

地球規模的及び広域的鉱物資源評価法の概説

金沢康夫* 神谷雅晴**

KANAZAWA Yasuo and KAMITANI Masaharu (1993) A review of geological models for global and regional mineral resource assessment. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 44 (2/3/4), p.77-89, 5 fig., 5 tab.

Abstract: Several geological models for global and regional mineral resource assessment are reviewed. There are two models for the global assessment; 1) the crustal-abundance model and 2) geostatistical model. The equation applied to the models can be expressed as

$$1) M_i = w \cdot k_i \cdot A_i,$$

$$2) M_i = w \cdot p_i \cdot q_i,$$

where, M_i : the quantity of element i to be estimated, w : the weight of the crust, A_i : the crustal-abundance of element i , k_i : the constant for element i which corresponds to the mineralization factor estimated by Tatsumi (1979), q_i : the grade of element i and p_i : the probability density distribution of the grade.

For the regional assessment, the URPV (the Unit Regional Production Value) method and the mineral deposit model are applicable to poorly explored regions. In the URPV method, the region to be estimated is compared geologically with well-explored one. The mineral deposit model is based on the following equation,

$$M = N \cdot T \cdot Q,$$

where N : the number of deposits to be estimated, T and Q : average tonnage and grade corresponding to each deposit type, respectively.

The crustal-abundance model and the URPV method are comparatively easy to carry out the assessment. However, the estimation of k_i in equation 1) and the geological comparison between two regions in the URPV contain some uncertainties for the assessment. Both the geostatistical and the mineral deposit models can give more accurate assessment though it is difficult to determine the parameters.

要 旨

多くの鉱物資源評価法のうち、地球規模的及び広域的評価を対象とする地質学的モデルの代表例について、その評価式を中心に基礎的概念をまとめた。地球規模的評価については、1) 地殻存在度モデルと 2) 地球統計学的モデルがある。それぞれの評価式は

$$1) M_i = w \cdot k_i \cdot A_i$$

$$2) M_i = w \cdot p_i \cdot q_i$$

と表現でき、ここで、 M_i : 地殻中の評価する元素(例えば金属量)、 w : 地殻の質量、 A_i : i 元素の地殻存在度、 k_i : 元素 i についての比例定数、また q_i : 元素 i の品位、 p_i : その品位の確率密度関数である。

一方広域的評価手法では、1) URPV法(単位地域生産値法)と 2) 鉱床モデルがあまり探査されていない地域の評価に有効である。前者は類似法の一つで、評価する地域をよく調査された地域と地質学的に比較する方法である。後者は評価地域を鉱床タイプごとに区分けし、次式

$$M = N \cdot T \cdot Q$$

中の、 N : 鉱床数、 T : 平均鉱量、 Q : 平均品位を評価する。 T 、 Q の見積りにあたっては鉱床タイプごとの品位・鉱量モデルを使用する。

地殻存在度モデルと URPV法は比較的実行が簡単であるが、前者モデル 1) 式の比例定数 k_i や後者手法の地質学的対比が難しいため、幾分不正確な要素を持つ。

* 国際協力室

** 地質標本館

Keywords: mineral resource assessment, crustal-abundance model, geostatistical model, URPV, mineral deposit model

地球統計学的モデルと鉱床モデルには、品位の確率密度関数や品位・鉱量モデル等を構築しなければならない困難さがあるが、より正確な評価が可能である。

1. はじめに

鉱物資源評価 (Mineral Resource Assessment あるいは Appraisal) に関する論文が近年増加している。これは各国の鉱物資源およびその評価手法への関心が高まっていることを示している。一口に鉱物資源評価と言っても、1つの鉱山から地球規模にいたるまでのスケールの違いや鉱物資源の何を評価するのかによって、さまざまな手法が考えられている。この解説では、表題にあるようなスケールにおける資源量評価について、有効であると考えられるモデル、手法について概説する。そのために必要な資源用語、資源モデルの分類と概念、評価手法の分類、資源評価の確率・統計学的取扱いについても概説する。

2. 資源用語について

“鉱物資源”という用語の中の“鉱物”という言葉は普通、金属、非金属、炭化水素を含む広い意味で用いられるが、ここで説明する用語や概念は基本的にこれらのどれについても同じである。

最初に資源評価で用いられる資源の分類とそれに伴う用語の定義をしておく。歴史的にもっともよく引用されている資源分類の図式は合衆国地質調査所 (USGS) の以前の所長であった McKelvey (1973) によるものである。この図式は“マッケルビーボックス” (第1表) として日本でも用いられた。

その後、使用されている多種の用語と資源の分類を整理するために、合衆国鉱山局 (USBM) と USGS が協力して「アメリカ合衆国鉱山局および同地質調査所の鉱物資源分類体系基本方針」(1976) およびその改訂版「鉱物資源量・埋蔵鉱量分類の基本方針」(1980) を提案した。なお、上記分類については立見訳 (1978, 1983) があり、資源用語の定義も述べられているので、詳しくはそれを参照されたい。第2表にその分類図式を示しておく。上述した第1と2表は、いずれも縦軸に経済的可能性、横軸に確からしさの程度をとって表現しているところ共通性がある。

Harris (1984) は資源評価における確率・統計学的推論を発展する中で、曖昧さをなくすため新たに分類の中に経済性によらない資産 (Endowment) という用語を導入した。以下の用語は Harris (1984) によるものであるが後の議論にも引用するのでここで紹介する。また、Harris の分類の概念図を第1図に示す。

資産 (Endowment): ある地域の資産というものは、品位、大きさ、深さ等の物理的性質を指定した時、その中に含まれる鉱物量をいう。したがって、資産は純粹に物理的 (地質的) なものであり経済や技術には直接関係しない量として規定されている。ある地域で指定された条件のもとでの本来の資産は時代や人間の経済活動とは関係しない不変的なものである。

資源 (Resources): 現在または将来可能性のある経済条件と技術のもとで生産できる鉱物量をいう。それで資源は資産・経済・技術の関数になる。

経済的資源 (Economic resources): 現在の経済と

第1表 マッケルビーボックス (Mckelvey, 1973)
Table 1 “Mckelvey box” (after Mckelvey, 1973).

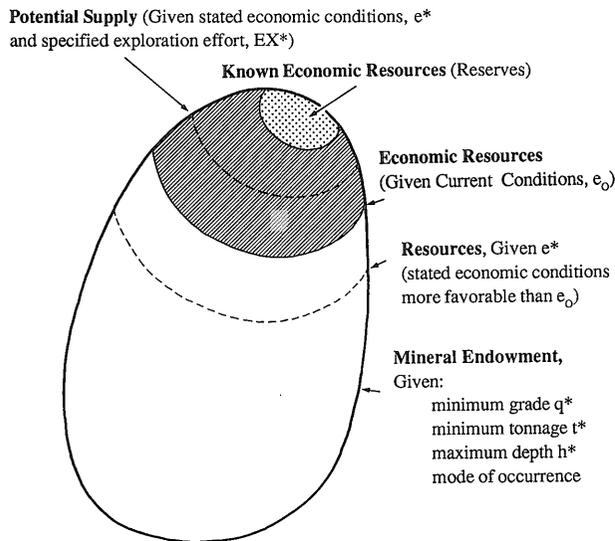
	既知 Identified			潜在 Undiscovered
	確定 Proved	推定 Probable	予想 Possible	
回収可能 Recoverable	埋蔵鉱量 Reserves			↑ 経済的可能性
准限界的 Paramarginal	資源 Resources			
亜限界的 Submarginal				

← 確からしさの程度

第2表 鉱物資源分類の大綱（USGS, 1980）（訳 立見, 1983）

Table 2 Principles of the mineral resources classification by USBM and USGS (after USGS, 1980).

累積生産量 Cumulative production	既知鉱物資源量 Identified resources		潜在鉱物資源量 Undiscovered resources		
	確認 Demonstrated		予測 Inferred	確からしさの程度 Probability range	
	精測 Measured	観測 Indicated		仮定 Hypothetical	純理的 Speculative
経済的 Economic	埋蔵鉱量 Reserves		予測埋蔵鉱量 Inferred reserves		
准経済的 Marginally economic	准埋蔵鉱量 Marginal Reserves		予測准埋蔵鉱量 Inferred marginal reserve		
経済限界下 Subeconomic	確認経済限界下鉱物資源量 Demonstrated subeconomic resources		予測経済限界下 鉱物資源量 Inferred subeconomic resources		
その他の産出 Other occurrences	非在来型および極低品位の鉱床 Includes nonconventional and low-grade materials				



第1図 Harris (1984) による資源の分類

Fig. 1 Classification of mineral resources (after Harris, 1984).

技術条件のもとで経済的に生産できる鉱物量をいう。したがって、経済的資源は資源の一部である。なお、既知の経済的資源を埋蔵鉱量（Reserve）という。

ポテンシャル供給（Potential supply）：資源の一部であり、一定の経済と市場があるという前提のもとで最

適の探査経費を使って発見される鉱物量をいう。

供給（Supply）：ポテンシャル供給の一部であり、指定した時間 t までに発見される鉱物の全体量（累積生産量+埋蔵鉱量）をいう。

3. 評価の対象, 資源モデル及び手法

資源評価にあたっては, 何を, どれくらいの面積内を, どんなモデルや手法で評価するのか?, がはっきりしていなければならない。まず“何を”については, 目的に応じて, いろいろあるが, Singer and Mosier (1981) は, これまでの100以上の資源評価に関する論文をレビューして, 以下の9個の評価する量を挙げている。

評価量:

1. 金属量(鉱物量), 2. 岩石量と品位, 3. 総価値(生産可能な鉱物資源の価値), 4. ポテンシャル, 5. 鉱床数, 6. 鉱床存在確率, 7. 岩石量・品位・タイプ別鉱床数, 8. ポテンシャル供給量, 9. 純価値(3. から生産コストを引く)

“どれくらいの面積内を”については, 地域的, 広域的, 地球規模的の3つに分けて考えることができる。当然面積が違えば情報量も異なり, 評価手法も異なってくる。面積が小さいほど, 鉱山会社や地質コンサルタントの対象となり, 広域的になれば, 国, 公団, 事業団といったレベルの対象となり, その目的も異なる。

3つめの“どんなモデルや手法”についてであるが, まずモデルについては大きく分けて, 地質学的モデルと経済学的モデルが認識されている。というのは前述したように, 資源は資産および経済・技術に依存する鉱物量である。資産の見積りは地質学的確からしさに基づくため, 資源評価は地質学的側面と経済・技術的側面の両面よりなされる。この意味において, 資源モデルは概念的に地質学的モデルと経済学的モデル(技術を含む)に大別されると言える。もちろんこの分類は概念的なものであり, 実際の資源評価においては両方のモデルを複合した形で行われる。経済学的と地質学的モデルの両極端の場合で説明するとすれば, 経済学的モデルは鉱物原料の価格, 供給, 需要などの経済的要素や資源の発見, 生産量・コストといった活動の結果など間の関係をもとに資源評価を行い, 地質学的要素を用いない。具体的には, 鉱物の生産量や発見量などの時系列データに基づいて, 将来の経済・技術的変数を仮定して将来の鉱物生産量を推定する。一方, 地質学的モデルにおいては, 地質と鉱床の関係, 鉱床の品位と鉱量, 地殻存在度と鉱量の関係などを用いて評価を行う。Harris (1984) は, 資源モデルを概念的に, 経済学的, 量-質, 地質学的, 地球統計学的, 複合, の5つに分類した。しかし, 量-質, 地質学的, 地球統計学的の3つのモデルは資産の評価が中心課題であり, 広義の地質学的モデルに属すると言える。いずれにしても重要なことは, いろいろな地質

的ファクターや経済的ファクターを区別して取扱い, 総合判断での仮定や根拠を明確にしておくことである。

また, Singer and Mosier (1981) は手法についても分類を行い以下のような15個の方法を挙げている。ただし, これらは手法技術の問題であり, 評価モデルとは直接的に結びついていない。

評価手法:

1. 時系列法 (Time-rate), 2. 地殻存在度関係法 (Crustal abundance), 3. 累積鉱量と品位関係法 (Cumulative tonnage versus grade), 4. 主観法 (Simple subjective), 5. 複合主観法 (Complex subjective), 6. ベイズ法 (Bayesian), 7. 頻度分布法 (Frequency), 8. トレンド法 (Trend), 9. 幾何学的確率法 (Geometric probability), 10. 重回帰法 (Multiple regression), 11. 判別解析法 (Discriminant analysis), 12. 成分変形法 (Modified component), 13. 多変量ロジスティック法 (Multivariate logistic), 14. クラスタ分析 (Cluster analysis), 15. シミュレーション (Simulation)

4. 資源の確率モデルの基礎

4.1 基礎モデル

地球上の現象は非常に複雑であり, 鉱床生成についてもさまざまな要素がからみあっている。資源評価は鉱床の多様性を反映して前述のとおり多くの手法が考えられている。これを定式化するためには確率論的取扱いが必要である。この基礎が Harris (1984) により与えられているので, 結論を中心に概説する。

地質学者にとって最も興味あることは鉱物資産の鉱量と品位を評価するところにある。もし鉱物資産の概要が把握できれば, 適当なカットオフ品位を与えて埋蔵鉱量を計算することができる。鉱物資産 m を次の地質学的特徴 g の関数として扱うことができる

$$m = \lambda(g_1, g_2, \dots, g_p) \quad (4.1)$$

要するにすべての地質学的特徴を知っていれば, 鉱物資産を言い当てることのできるという式である。実際には地質学的特徴は不完全にしか分かっていない。したがって, g という条件付きで1つの地域の鉱物資産はランダム変数 M とみなすべきで, M が m_1 と m_2 ($m_1 < m_2$) の間に入るという確率 P は

$$P(m_1 \leq M \leq m_2 | g_1, g_2, \dots, g_d) = \int_{m_1}^{m_2} f(m | g_1, g_2, \dots, g_d) dm \quad (4.2)$$

ここで, G_d を地質学的特徴変数のベクトル集合とすると, 次式が書ける。

$$P(m_1 \leq M \leq m_2 | G_d) = \int_{m_1}^{m_2} f(m | G_d) dm \quad (4.3)$$

$f(m | G_d)$ は確率密度関数で、この式が確率モデルの基本式となる。

Harris によれば、確率モデルを具体化していく際、大きく2つのモデルに分けられる。それは大まかに言って、鉱床を単位に取るか、地殻の元素存在度から出発するか、の違いである。前者を鉱床モデルと言い、既知の経済的鉱床における経験に基づいて未知の鉱床を推定する。後者を地殻存在度モデルと言い、地殻から出発して、鉱床という濃集の異常値を推定する。しかし、地殻存在度モデルは狭義には後述するように、元素 i についての鉱量が地殻の元素存在度に比例する場合のみを扱い、それ以外品位分布に何らかの確率密度関数を考慮する場合には地球統計学的モデルとした方がよい。

4.2 鉱床モデル

鉱床モデルで扱う基本式は

$$M = N \cdot T \cdot Q \quad (4.4)$$

である。ここで、 M は鉱物資産、 N は鉱床の数、 T は鉱量、 Q は品位である。単純な話として、 N 、 T 、 Q の見積りは、 N に関しては地質と鉱床タイプからの関係から鉱山地質学者が推定、 T と Q に関しては同じ鉱床タイプの使用できる品位-鉱量モデル(後述)があればそれを利用することである。しかしながら将来鉱床に関する情報の質と量が増加し、コンピュータシミュレーションにより確率論的取扱いが可能になるかも知れないことを予測して、以下 Harris の基本式を参考に述べておく。

N 、 T 、 Q の確率密度関数を h 、 j 、 k とすると、条件確率は、

$$h(n | q, G_d), j(t | q, G_d), k(q | G_d)$$

と表現でき、最終的に $f(m | G_d)$ は

$$f(m | G_d) = \int_T \int_Q \left\{ h\left(\frac{m}{t \cdot q}, t, q | G_d\right) \cdot j(t | q, G_d) \cdot k(q | G_d) \right\} \frac{dq dt}{t \cdot q} \quad (4.5)$$

が導かれている。

4.3 地球統計学的モデル

このモデルでは、地殻のある地域における鉱物資産 M を評価する。 M はその地域内の質量 w に指定した品位以上の平均品位 q とその確率をかけることによりもとまる。

$$M = w \cdot p \cdot q \quad (4.6)$$

この式の確率論での定式化は Brinck (1967) により行われた。

ある地域の地殻物質が N 個のブロックに分けられ、その各サイズが t であるとすると、 $t = w/N$ である。ここで t というサイズ条件で、カットオフ品位 $q' | t$ 以上のブロック数の確率を $P(Q \geq q' | t)$ 、平均品位を $q_{q' | t}$ とすると、

$$M_{q' | t} = N \cdot t \cdot P(Q \geq q' | t) \cdot q_{q' | t} \quad (4.7)$$

となる。確率 P に対する確率密度関数を $\lambda(q | t)$ で表わすと、

$$P(Q \leq q' | t) = \int_{q'}^{q_{max}} \lambda(q | t) dq \quad (4.8)$$

$$q_{q' | t} = \frac{\int_{q'}^{q_{max}} q \cdot \lambda(q | t) dq}{\int_{q'}^{q_{max}} \lambda(q | t) dq} \quad (4.9)$$

となる。最終的に基本的な地球統計学的モデルは次のように書ける。

$$M_{q' | t} = N \cdot t \cdot \int_{q'}^{q_{max}} q \cdot \lambda(q | t) dq \quad (4.10)$$

5. 地球規模的鉱物資源評価の例

この資源評価では基本的に前述した地殻存在度モデルと地球統計学的モデルを用いる。典型的な例として、立見 (1979, 1986) と Brinck (1976) の方法を紹介する。

5.1 立見による総鉱物資源量の見積り

この見積りの発端の1つは McKelvey (1960) によるもので、彼は合衆国の各鉱種の埋蔵鉱量と各元素の地殻存在度との間には経験的に比例関係が認められることを述べた。この比例関係は Erickson (1973) などによっても論じられた。

立見はこれに加えて、鉱化度 (mineralization factor) という概念から始めて、総鉱物資源量の見積りを試みた。鉱化度とはある元素についての地殻部分における鉱床となって濃集している割合のことで、一般的には次のようになる。ある与えられた質量 m (トン) の地殻部分についてある元素 i の鉱化度 f_i は

$$f_i = r_i / t_i \quad (5.1)$$

で表される。ここで、 t_i (トン) はこの地殻部分に存在する元素 i の全量、 r_i (トン) はそのうち鉱床となって濃集している分である。地殻の元素存在度を A_i (ppm) とおくと、 $t_i = m$ (トン) $\times A_i$ (ppm) $\times 10^{-6}$ であるから鉱化度は

$$f_i = r_i / (m \cdot A_i \cdot 10^{-6}) \quad (5.2)$$

である。式を変形すれば、元素 i の鉱量は

$$r_i = m \cdot A_i \cdot 10^{-6} \cdot f_i \quad (5.3)$$

もし初めに述べたように鉱量 r_i が A_i と比例するとしたら f_i は元素によらず似たような値となるはずである。そして、立見はいろいろなデータに基づいて、各元素に共通した平均鉱化度を 10^{-5} - 10^{-4} と見積った。ある元素 i が大陸地殻上部で鉱床を作って濃集している分の総量を R_i トンとすれば、(5.3) 式より

$$R \text{ (トン)} = M \text{ (トン)} \cdot n \cdot A_i \text{ (ppm)} \cdot 10^{-6} \cdot F \quad (5.4)$$

ここで

M : 大陸地殻全体の質量 = 22.5×10^{18} トン

n : 大陸地殻上部を占める範囲の割合 = 0.2 または 0.3 (地表からの深さで 7 km と 10 km に対応)

F : 大陸地殻上部を通じての各元素に共通した平均の鉱化度 = 10^{-5} または 10^{-4}

$n = 0.2$ または 0.3 , $F = 10^{-5}$ または 10^{-4} をとることにすると次の4式が得られる。

A. $R_i = 6.8 A_i \times 10^8$ (トン) ($F = 10^{-4}$, $n = 0.3$)

B. $R_i = 4.5 A_i \times 10^8$ (トン) ($F = 10^{-4}$, $n = 0.2$)

C. $R_i = 6.8 A_i \times 10^7$ (トン) ($F = 10^{-5}$, $n = 0.3$)

D. $R_i = 4.5 A_i \times 10^7$ (トン) ($F = 10^{-5}$, $n = 0.2$)

このような考え方を基に試算された24種の元素についての総鉱物資源量が他のデータとともに第2図に示されている。この図から、かなりの元素について見積もられた総鉱物資源量と他のデータがよく対応していることが読み取れる。

ここで少し最初にもどり、前提になっている資源量が地殻存在度に比例することが地球統計学的モデルの基本式(4.6)とどのように関係しているか見てみる。(5.3)式と(4.6)式との対応において、(4.6)と品位 q と確率 p の積 ($p \cdot q$) は地殻存在度 A に比例する。

$$p \cdot q = A_i \cdot 10^{-6} \cdot f_i \quad (5.5)$$

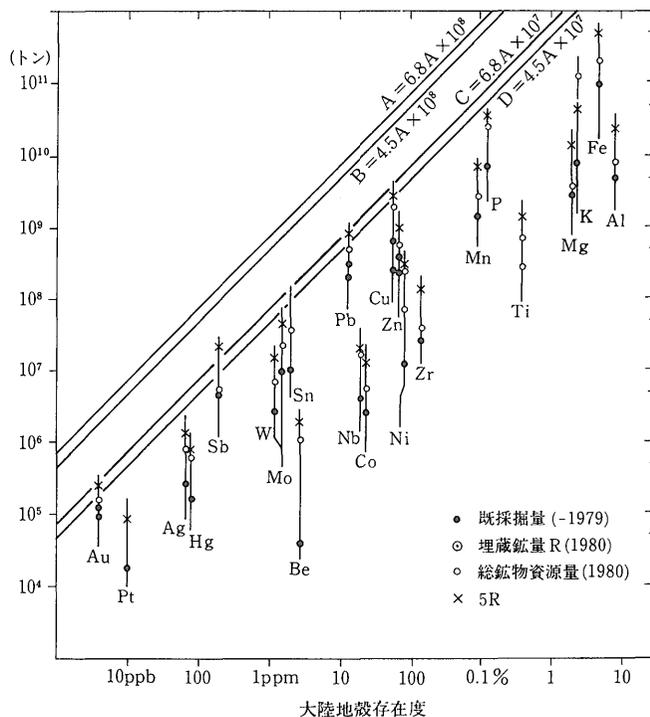
もし採掘可能品位 q が元素の地殻存在度 $A_i \cdot 10^{-6}$ に比例し、元素ごとの比例定数 k_i を用いて、

$$q = k_i \cdot (A_i \cdot 10^{-6}) \quad (5.6)$$

と書けるとすれば、確率 p は(5.5)より、

$$p = (1/k_i) \cdot f_i \quad (5.7)$$

である。したがって、定性的には k_i に依存して品位 q



第2図 大陸地殻上部での総鉱床量および鉱物資源量(立見, 1986)

Fig. 2 Total tons of ore deposits and mineral resources (after Tatsumi, 1986).

もその出現確率 p も変わってくる。実は k_i についても立見 (1986) によって見積もられているが、だいたい A の 10 倍から 10^5 倍の範囲に入っている。しかし、立見によれば既知経済限界下鉱床の品位と他鉱床中の副成分をも考慮に入れば k_i は 10-100 に収まり、採掘可能ぎりぎりのところでは品位もまた地殻存在度にはほぼ比例するのではないかということが言える。今後この方向からの議論では、元素ごとに地球化学的経験からのずれを定量的に考察していく必要がある。

5.2 Brinck による地球統計学的アプローチ

次に紹介する Brinck の扱いも、地球化学的試料のデータを基礎としている。基本的説明はすでに 4.3 節で述べた。確率 P 、平均品位 q 、資産 M はそれぞれ (4.8), (4.9), (4.10) 式に与えられている。したがって、問題はこれらの式に現れてくる確率密度関数 λ にどんな関数モデルを採用するかにある。Brinck (1967) は、大陸地殻の金属資源品位分布に対数正規モデルを採用した。この場合、品位 Q が ($q'_j \leq Q \leq q'_j$) の範囲にある時の確率 P 、岩石量 t 、平均品位 q のそれぞれの式は結果のみ書くと次のようになる。

確率:

$$P_j = P(q'_j \leq Q \leq q'_j) \\ = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}\sigma} \int_{\ln q'_j}^{\ln q''_j} \exp\left(-\frac{(\ln q - \gamma)^2}{2\sigma^2}\right) d\ln q \quad (5.8)$$

ここで γ は $\ln(q)$ の平均で

$$\gamma = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \ln q_i} \quad (5.9)$$

標準偏差 σ は

$$\sigma = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (\ln q_i - \gamma)^2}{n}\right)^{1/2} \quad (5.10)$$

岩石量:

$$t_{q''-q'} = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}\sigma} \int_{\ln q''}^{\ln q'} \exp\left(-\frac{(\ln q - \gamma)^2}{2\sigma^2}\right) d\ln q \quad (5.11)$$

平均品位:

$$q_{q''-q'} = \frac{k_2}{k_1} \quad (5.12)$$

ここで、

$$k_2 = \frac{\exp(\gamma + \sigma^2/2)}{(2\pi)^{1/2}\sigma} \int_{\ln q''}^{\ln q'} \exp\left(-\frac{(\ln q - (\gamma + \sigma^2))}{2\sigma}\right) d\ln q$$

$$k_1 = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}\sigma} \int_{\ln q''}^{\ln q'} \exp\left(-\frac{(\ln q - \gamma)^2}{2\sigma^2}\right) d\ln q$$

これらの式の利用にあたっては、大陸地殻を等しいブロック (例えば 1 辺 2.5 km など) に分け、評価したい深さを与え、地殻の体積、地殻中のブロック数、地殻の質量を求めておく。さらに目的金属に対してその品位幅 ($q'' \leq Q \leq q'$) を与えれば、対応する平均品位、岩石量、金属量を計算することができる。

地球統計学的モデルで重要な問題は品位を代表するブロックの大きさをどのように取るか、そして地殻の元素品位の確率密度関数をどのように設定するかにある。品位分布に対数正規型を仮定することは自然な発想かも知れない。しかし Skinner (1976) が地球化学的に乏しい金属について、品位に対する頻度が正規型に加えて高品位側にもう 1 つの小さなピークの存在を考えたように、実際には正規型からずれるであろう。地殻中の各元素の品位分布が実際にどのようなになっているかは興味のあるところである。これの実態をつかむには、岩石区分に応じた系統的なサンプリングと微量元素を含めた精密な化学分析値が必要である。現実的には現在利用できる化学分析値と岩石 (地質) 区分を結びつけたデータベースを構築し、地球化学図など多目的利用に向けたシステム作りの中でこの種の問題を扱うのが妥当かと考える。

6. 広域的鉱物資源評価の例

広域鉱物資源評価の例として中華人民共和国及び合衆国アラスカ州に適用された手法を紹介する。これらの地域においては鉱物資源に関する情報がほとんどない、あるいは情報が収集し難い場合の例である。

6.1 中国の鉱物資源評価

中国は、主要金属、レアメタルおよび炭化水素資源に富む国である。例えば、次の鉱種では埋蔵鉱量が世界 1 または 2 位とされている: 石炭・タングステン・錫・アンチモン・亜鉛・チタン・リチウム・希土類・ボーキサイト・ニッケル・水銀・モリブデン・ニオブ。中国の将来の経済活動を考える上でおおまかな資源評価を行っておく必要にせまられている。以下では Clark ら (1985) による方法を説明する。

資源評価の方法は単純で、中国を評価 (すべき) 地域とすると、これをよく評価された基準地域と地質学的対比をしてその資源量を決定する、というものである。基準地域としては国の広さと、よく評価が進んでいるという観点からアメリカ合衆国が選ばれた。その方法は

URPV法(the Unit Regional Production Value)と呼ばれているが、ここでは“単位地域生産値法”と訳しておく。URPV法は、「地質学的に似た地域は鉱物資源量も同じである」という仮定をおいている。もともと、URPV法はGriffiths(1978)のURV法(the Unit Regional Value)を改良した方法である。具体的手順としては

1. 評価地域(中国)と基準地域(合衆国)を地質学的に比較し、中国の省と合衆国の州を地質的に類似している地区ごとに対応させる。
2. 基準地区(州)内の鉱物生産統計を調べ、合計する。さらに埋蔵鉱量を加える。
3. 上記2.の資源量についてUS\$で値をつけ、単位面積当たりの値を出す。
4. 州に対応する評価地区(省)の面積に、上記3.の値を比例配分する。

合衆国の各州は地質的によく定量化されているものとして、中国の各省を地質的に分類する基準を述べる。使

用した地質図は1/400万スケールである。これを細かいグリッドに切って岩石タイプを数え、地区全体の面積及び個々の岩石タイプの割合を算出する。地質図の正確さを補足する上で、各地区の地史やプレートテクトニック図などを解析に加えてある。

合衆国の州の地質アナログの選択にあたっては、各岩石タイプの割合と類似岩石タイプがいくつ対応しているかを計算してランキング表を作る。この表をもとに、地質アナログの対応が第3図にまとめてある。

以上のように地区ごとの対応が得られたあと、合衆国のURPV(単位面積当たりの資源生産値)を中国の省地区の面積に掛け、各省の全体値をもとめる。すべての鉱物資源のURPV解析を第3表に示す。これで見ると資源開発に最も有望視される地区はOklahomaに対応するGansuとQinghai(North)及びCaliforniaに対応するAnhui, Beijing, Guangdong, Hainan Dao, Hebei, Shaanxiを挙げることができる。ただし、これらの地区では炭化水素資源が重要である。非燃料資



第3図 地質アナログによる中国地区と合衆国州の対比 (Clark et al., 1985)

Fig. 3 PRC provinces with U.S. state geologic analogs (after Clark et al., 1985).

第3表 鉱物資源の各地区 URPV (Clark *et al.*, 1985)
 Table 3 Estimated URPVs of all mineral for the PRC provinces to 1980 (after Clark *et al.*, 1985).

Province ^{a,b}	U.S. state Geologic Analog	URPV 1980US\$/km ²	Estimated
			Total Value Million 1980US\$
Gansu	Oklahoma	4,600,000.	2,100,000.
Qinghai(North)	Oklahoma	4,600,000.	2,600,000.
Anhui	California	2,000,000.	280,000.
Beijing	California	2,000,000.	34,000.
Guandong	California	2,000,000.	420,000.
Hainan Dao	California	2,000,000.	50,000.
Hebei	California	2,000,000.	380,000.
Shaanxi	California	2,000,000.	410,000.
Guizhou	Kansas	1,800,000.	320,000.
Nei Manggol (Central)	Wyoming	1,600,000.	1,400,000.
Xinjiang (Central)	Wyoming	1,600,000.	920,000.
Sichuan (East)	New Mexico	1,500,000.	490,000.
Xinjiang (South)	Virginia	970,000.	700,000.
Shanxi	Alabama	850,000.	130,000.
Qinghai (South)	Colorado	780,000.	180,000.
Shandong	Colorado	780,000.	120,000.
Heilongjiang (East)	Arizona	510,000.	190,000.
Xizang	Arizona	510,000.	600,000.
Hubei	Montana	390,000.	73,000.
Jilin	Montana	390,000.	73,000.
Fujian	Alaska	390,000.	47,000.
Guangxi	Alaska	390,000.	90,000.
Heilongjiang (West)	Alaska	390,000.	34,000.
Nei Monggol (East)	Alaska	390,000.	120,000.
Henan	Alaska	390,000.	65,000.
Hunan	Alaska	390,000.	82,000.
Sichuan (West)	Alaska	390,000.	90,000.
Yunnan	Alaska	390,000.	150,000.
Zhejiang	Alaska	390,000.	40,000.
Jiangxi	Nevada	130,000.	22,000.
Ningxia	Nevada	130,000.	8,700.
Xinjiang (North)	Nevada	130,000.	46,000.
Liaoning	North Carolina	54,000.	7,900.
Nei Monggol (West)	North Carolina	54,000.	1,800.

^a URPV for Jiangsu equals 0.

^b URPVs of Fujian, Guangxi, Heilongjiang (West), Henan, Hunan, Nei Monggol (East), Sichuan (West), Yunnan and Zhejiang are to 1982.

Note: Some of the data used in determining U.S. state URPVs were compiled by J.C. Griffiths.

源 (アスベスト・銅・金・鉛・モリブデン・カリウム・銀・亜鉛など) の有望地区としては Heilongjiang (East), Xizang, Qinghai (South), Shandong, Sichuan (East) などが抽出されており, 合衆国の Arizona, Colorado, New Mexico に対応している。

6.2 アラスカの金属資源評価

もう一つの例として, 合衆国のアラスカ州を取り上げ

る。この例は, Singer and Ovenshine (1979), Harris (1984), Singer (1986) の論文をもとにアラスカで実施された金属資源評価についてである。アラスカの評価は合衆国議会の命を受けて合衆国地質調査所が実施したものである。

ここでの評価は, 鉱床モデルとして 4.2 節で紹介した (4.6 式) ($M = N \cdot T \cdot Q$) において, 鉱床タイプ (後述) ごとの鉱床数 N , 各鉱床における鉱量 T と平均品

位 Q を見積り、地域全体で合計する方法である。

詳細な情報がほとんどないアラスカのような地域を評価する1つの有力な方法は鉱床タイプに注目することである。鉱床タイプとは鉱床を母岩・関係岩石・含有金属・鉱石鉱物及び地質的セッティングにより分類したものである。同じ鉱床タイプは類似の鉱物・岩石・地質の特徴をもっているため、鉱床中の各金属の品位・鉱量も似ていると考えられる。よく探査された鉱床タイプの品位・鉱量データは同じ地質環境をもつ未発見鉱床に利用できる。鉱床タイプを利用して、資源評価は次の“3段階評価法”(Singer, 1986)により実行された。

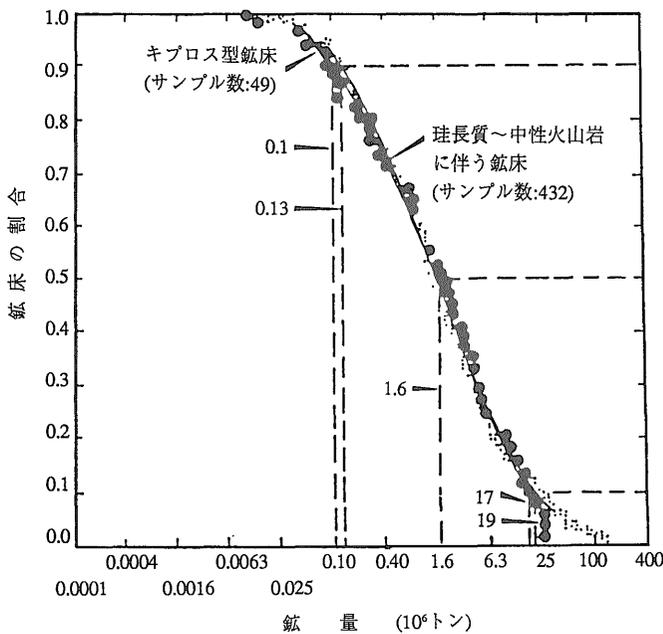
1. 既知の地質環境に合う鉱床タイプにしたがって地域区分する。
2. 区分した区域内の各タイプの鉱床数を評価する。
3. 品位-鉱量モデルによって金属量と鉱石の特徴を推定する。

そして区域の経済的重要性は上記2, 3の評価に基づいて推定する。このような評価にあたっては、評価区域の地質がどの程度明らかになっているか? 区画された区域が評価するに充分広いか? 同一鉱床タイプであっても品位・鉱量変化が著しく大きいのではないかと、いった問題があるだろう。

ここで、少し品位-鉱量モデルについてふれておく。

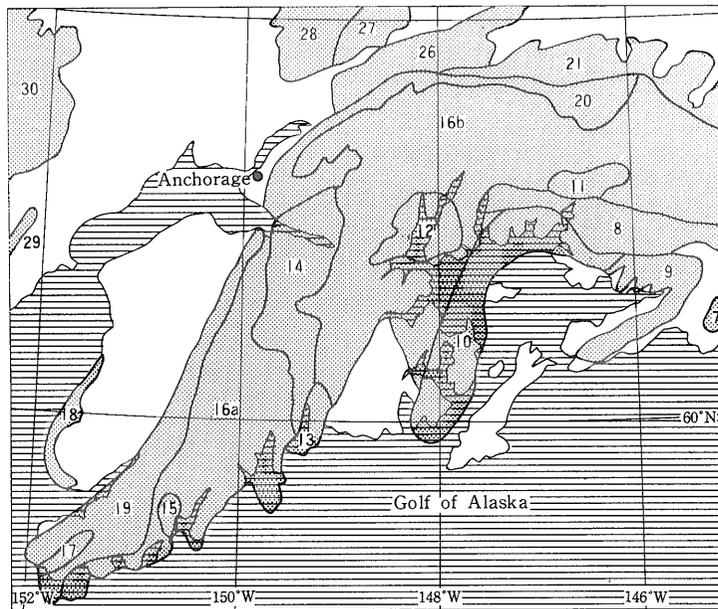
第4図は塊状硫化鉄鉱床の鉱量モデルを示している。珪長質及び中性火山岩に伴うキプロス型鉱床の例が挙げられている。各点は1つの鉱床を表し、よく探査された既知鉱床の値である。横軸が鉱量で縦軸が鉱床の数(割合へ変換)を累積してプロットしてある。この図から分かることは、珪長質及び中性火山岩に伴う例で、鉱量10万トン以下で90%以上、160万トン以下で50%以上、1,700万トン以下で10%以上の割合の鉱床がある、などである。これをいろんな既知鉱床タイプについてグラフを作っておけば、未知鉱床についてもその品位・鉱量を推定する手掛かりとなる。

アラスカの評価は1/100万の地質図や物探データ及び地化学データを編集し直すことから始まった。これに基づいて各鉱床タイプが地域区分された。南アラスカでの区分例を第5図に示す。全部で144の区域ができ、それぞれについて鉱床タイプの簡単な記載表が作成された。その表には、鉱床タイプ、含有金属、地質状況、地質・地球化学・物理的指標、探査と質の知識の程度、そしていくつかの鉱床タイプについては鉱床数見積りと既知鉱床のモデルから外挿した鉱量-品位の指標が記載してある。ほとんどの場合、基礎データによる定量的評価はで



第4図 塊状硫化鉄鉱床の鉱量モデル (Singer, 1986)

Fig. 4 Tonnage model of massive sulfides deposits (after Singer, 1986).



第5図 南アラスカにおける鉱床タイプ別地域区分 (Singer and Ovenshine, 1979)

Fig. 5 Outlined and numbered tracks delineated by the types of mineral deposits in southern Alaska (after Singer and Ovenshine, 1979).

第4表 珪長質及び中性火山岩に関する鉱床数の見積り (アラスカ) (Singer, 1986 による)

Table 4 Estimated number of the deposits related to felsic and intermediate volcanos in Alaska (after Singer, 1986).

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	—	—	—

きなかったが、特別なタイプについては可能であった。リストアップされた501の鉱床タイプのうち小さな鉱床を除くと、鉱床数の見積りは32%、品位-鉱量モデルの使用は43%に達した。そして資源の経済性に影響を及ぼす地質要素などの情報については別表が作られた。

鉱量-品位モデルの作られた鉱床タイプは次のとおりである。

porphyry copper, island-arc porphyry copper, porphyry molybdenum, skarn copper, mafic volcanogenic sulfide, felsic and intermediate volcanogenic sulfide, nickel and copper sulfides associated with small intrusions, skarn tungsten また、金属含有量のモデルは podiform chromite, mercury, vein gold について作成された。

区域ごとの鉱床数の評価には主観的確率法が採用された。それ故、評価ルールは正確に述べることができない。それはいろんな情報をもとによく考察してなされた。第4表に主観的確率法による珪長質及び中性火山岩に関する鉱床の数の推定をのせる。表の見方はNo.1の地域で、鉱床の数が1つ以上の確率は90%、5つ以上が50%、20以上が10%という具合である。推定された鉱床数に品位-鉱量モデルを適用すれば各鉱床タイプの品位、鉱量が推定できることになる。主観法はやや信頼性に欠けると思われがちだが、専門家による総合的な判断に基づくものであり、将来よりよい統計的手法が開発される際の手法をチェックする1つの基準になり得ると考えられる。

第5表 評価モデルのまとめ

Table 5 Summary of geological models for global and regional mineral resource assessment.

地球規模の評価		
モデル 評価式(量) 評価のポイント	元素の地殻存在度モデル $M = w \cdot k \cdot A$ 比例係数 k (または鉱化度 f)	地球統計学的モデル $M = w \cdot p \cdot q$ 品位分布の確率密度関数
広域的评价		
モデル 評価式(量) 評価のポイント	単位面積生産値(URPV)法 単位面積当たりの M 類似地域の区分	鉱床モデル $M = N \cdot T \cdot Q$ 品位-鉱量モデルの使用, 専門家の判断
特徴	↓ 比較的容易に実施できるが 不正確である。	↓ より正確であるが, 実施が難しい。

7. ま と め

地球規模的及び広域的鉱物資源評価にそれぞれ有効な方法について概説した。これを第5表にまとめる。地球規模的では、1) 元素の地殻存在度モデルと、2) 地球統計学的モデルがある。前者は、地殻の鉱物資産は元素の地殻存在度と比例する、という経験則に基づく、これを式で表せば、鉱物資産 M_i は

$$M_i = w \cdot k_i \cdot A_i$$

ここで、 w : 評価する地殻の重量、 k_i : 元素 i についての比例係数、 A_i : 元素 i の地殻存在度、ただし、立見のモデルでは、比例係数 k_i のかわりに、鉱化度 f_i を用い、元素ごとの鉱化度について、吟味している。

2) の地球統計学的モデルでは、基本式

$$M_i = w \cdot p_i \cdot q_i$$

を用いる。ここで、 q_i は元素 i の品位、 p_i はその品位の確率密度関数を表す。このモデルの有効性は、確率密度関数 p_i をいかに地殻の実態に合うモデルに近づけていくかにある。

広域的评价では、1) URPV 法と 2) 鉱床モデルが有効である。前者は類似法の一つで、評価する地域をよく調査された地域と比較する時、「地質学的に似た地域は鉱物資源量も同じである」という仮定をおく。非常に荒っぽいやり方ではあるが、中国のような大きな国の資源評価には第1次近似として有効であろう。ただし、評価地域が基準地域と異なる鉱床タイプをもつ場合には危険性を伴う。

2) の鉱床モデルでは、基本式

$$M = N \cdot T \cdot Q$$

を使用する方法である。このモデルでは鉱床タイプごとに地域を区分けし、それぞれに品位-鉱量モデルを使用する。このモデルの長所は、鉱床タイプの分類が精密化し、それに付随する品位-鉱量モデルが増えるほど、評価の正確さが増してくる。鉱床数 N については専門家による判断を入れているが、最終的判断は専門家に委ねる部分が必要かと考えられる。

文 献

Brinck, J.W. (1967) Note on the distribution and predictability of mineral resources. *Euratom* 3461, Brussels.

Clark, A.L., Dorian, J.P. and Fan, P. (1985) An estimate of the mineral resources of China. East-west Center, Honolulu, Hawaii, USA, *Resource Systems Institute Working Paper*, WP-85-6, 60 p.

Erickson, R.L. (1973) Crustal abundance of elements, and mineral reserves and resources. In Probst & Pratt eds. *United States Mineral Resources USGS Prof. Pap.* vol. 820, p. 21-26.

Griffiths, J.C. (1978) Mineral resource assessment using the unit regional value concept. *J. Math. Geol.*, vol. 10, p. 441-472.

- Harris, D.P. (1984) Mineral resources appraisal. *Clarendon Press*, Oxford. 445 p.
- McKelvey, V.E. (1960) Relation of reserves of elements to their crustal abundance. *Amer. Jour. Sci.*, vol. 258, p. 234-241.
- (1973) Mineral resource estimates and public policy. In Probst & Pratt eds. *United States mineral resources, USGS Prof. Paper* vol. 820, p. 9-19.
- Singer, D.A. (1986) 広域的な鉱物資源評価について—その現在と将来—. *地質ニュース*, no. 377, p. 18-25.
- and Mosier, D.L. (1981) A review of regional mineral resource assessment methods. *Econ. Geol.*, vol. 76, p. 1006-1015.
- and Ovenshine, A.T. (1979) Assessing metallic resources in Alaska. *Am. Scientist*, vol. 67, p. 582-589.
- Skinner, B.J. (1976) A second iron age ahead? *Am. Scientist*, vol. 64, p. 258-269. (立見辰雄訳 1978, 第2の鉄時代も間近か? 日本の科学と技術, 19, no. 191, p. 62-71)
- 立見辰雄(1978) Researve ~ Resource — アメリカ合衆国鉱山局および地質調査所報告の紹介— 鉱山地質, vol. 28, p. 35-38.
- (1979) 総鉱物資源量見積りのための一つの試み. 鉱山地質, vol. 29, p. 227-238.
- (1983) Researve ~ Resource (続). 鉱山地質, vol. 33, p. 39-44.
- (1986) 鉱物資源を考える (2). *地質ニュース*, no. 382, p. 13-27.
- United States Bureau of Mines and United States Geological Survey (1980) Principles of a resources/reserve classification for minerals. *USGS, Circ.* 831, 5 p.
- United States Geological Survey (1976) Principles of the mineral resources classification system of the U.S. Bureau of Mines and U.S. Geological Survey. *USGS Bull.*, 1450-A, 5 p.

(受付: 1992年6月12日; 受理: 1992年12月14日)