

確率分布モデルに基づく, 黒鉱床賦存ポテンシャルティー評価

古宇田亮一* D.A. Singer**

KOUDA Ryoichi and SINGER Donald A. (1993) Evaluation of potentiality of kuroko deposits based on the probability distribution model. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 44 (2/3/4) p. 91-103, 8 fig., 1 tab.

Abstract: Ore deposits potentiality is calculated by the probability distributions of occurrence related to mineralization for a possible deposit model. Since the size of ore deposit is small for the targeting of exploration, we use the mineralized area which includes a spatial group of ore deposits and mineralization occurrences related to ore deposits like alteration halo.

The distribution of seven classes of mineralized and unmineralized features was extracted from the 262 column of drill holes in the Hokuroku district of 40 times 40-km square. The 6 classes as the mineralization features are the kuroko-bearing column, the lead-zinc mineralized column without kuroko, the gypsum-anhydrite-bearing column without kuroko nor lead-zinc mineralization, the barite-bearing column without kuroko, lead-zinc mineralizations, nor gypsum-anhydrite, the pyrite vein-containing column without kuroko, lead-zinc, gypsum-anhydrite, nor barite, and the pyrite-bearing column without any other mineralization features in the descending order of the classes. The seventh class is no mineralization feature with or without the strong alteration. The distribution of the six mineralization classes is closely related to the distribution of kuroko deposits. Most of all the column of drill holes in the Hokuroku district belong to both the upper part of the footwall and hanging wall of bedded kuroko deposits. The age of these rocks are mostly of upper Miocene age which includes kuroko and post-kuroko hydrothermal activities. The spatially close relationship between the kuroko and post-kuroko mineralization suggests the hydrothermal activities occur through the geologically same path during upper Miocene age. Consequently, the mineralization features of each column can be averaged to show plan distribution of ore deposits in the Hokuroku district.

There exists the well-known sodium depleted zone around a spatial group of kuroko deposits. A previously defined bimodal distribution of Na_2O for mineralized and barren zones was tested in the case of the Fukazawa kuroko deposits. The low sodium group from 36 drill holes around the Fukazawa deposits forms 1.5 times 3.0-km elliptical halo zone. The low sodium occurrence was used as the control mineralization zone of the Fukazawa deposits for the probability computation in the Hokuroku district with 174 drill holes for the chemical analysis. The high probability areas of mineralization calculated by Bayesian statistics well correspond to the distribution of the known kuroko deposits with some areas of unknown deposits. Other distributions of mineralization features were also tested and found the well-split bimodal distribution of occurrence for sericite and gypsum-anhydrite by the data of X-ray powder diffraction from 165 drill holes of the same area. Sericite is enriched up to 2.15 km and gypsum-anhydrite up to 3.5 km from the centroid of the Fukazawa area as the control mineralized zone of the Hokuroku district. Making the sodium, sericite, and gypsum-anhydrite occurrences overlap using Bayesian statistics, the high

* 地質資源部

** U.S.G.S.

Keywords: kuroko, potentiality, probability distribution, mineralization class, post-kuroko hydrothermal activity

probability area of mineralization was also estimated and well corresponded to the known kuroko deposits. Only one known deposit that is much smaller than the control deposits is missed. Several large areas that are favorable centers of undiscovered deposits and other areas that are unlikely centers of deposits are also identified. From this result using the size of mineralization area of Fukazawa deposits, it is suggested that there are four to five areas of the potentiality of the number of undiscovered kuroko deposits in the Hokuroku district. In case that they have the same size of tonnage of the control area, the tonnage potentiality of undiscovered deposits estimated about 20 to 25 million tons of crude ore in the Hokuroku district.

要 旨

鉱床周辺の異常値の示す鉱床賦存確率を算出する手法を開発し、地化学的異常値の他に鉱物学的異常値を重ね合わせることによって、黒鉱鉱床賦存ポテンシャルティ―評価を行った。秋田県北鹿地域における黒鉱鉱床周辺の地化学異常値と鉱物学的異常値をベイズの定理によって重ね合わせることで、確率分布図を算出した。又、262本の既公表孔井柱状図の記載から、黒鉱鉱石、鉛・亜鉛鉱微、石膏・硬石膏鉱微、重晶石鉱微、黄鉄鉱鉱微に分類して、鉱化帯が広がる範囲と空間分布を明らかにした。特に、 Na_2O 溶脱特徴 (Date, *et al.*, 1983) に対して、深沢鉱床周囲36孔井を元に、長軸2.8 km、短軸1.5 kmの分布モデルを適用した。同様に、石膏分布に対して、内径1.95 km、外径3.5 kmの円環分布モデルを重ね合わせた。この結果、北鹿地域の40 km×40 kmで、500万t規模の未発見鉱床の賦存ポテンシャルティ―は4~5個と見積られた。

1. はじめに

鉱床探査や資源予測において、異常値を示すサンプルを識別し、その異常値から鉱床の型や存在可能性を探ることは、一般には障害が多い。あるサンプルの示すデータが鉱化帯を意味するのか、不毛帯であるのかを明確に区別できれば、探査・予測上極めて意義深いことである。地球化学データでは、不毛帯における注目する元素の頻度分布からその 2σ (σ は標準偏差)以上を異常値と定義することがある。数値データを扱う限り地球物理データでも、地質データでも同様の手法が適用できる。この異常値が示す空間的分布の意義を明らかにする必要がある。

一般に、このような異常値が空間的に全く均質、又はランダムに分布し、特定の空間的濃集傾向を示さないような鉱床帯は皆無であろう。鉱床そのものが特異な空間的物質濃集帯に他ならないからである。特異な濃集場の探査・予測には均質な確率分布を前提としたアプロー

チの仕方は有り得ない。ここでは空間的な分布モデルを考察する必要がある。この分布モデルに基づいて、不毛帯と鉱化帯の各々の確率分布を解明することにより、鉱床の賦存するポテンシャルティ―を得ることができる。

本研究は、秋田県北鹿地域における日本最大の黒鉱濃集帯を対象地域として、詳細に調べられている黒鉱周囲の変質帯 (Date *et al.*, 1983) 等の分布モデルから黒鉱鉱床賦存ポテンシャルティ―評価を論ずるものである。

2. 確率分布の重ね合わせ方法

本研究で用いる計算機プログラムの理論と応用に関する報告は、Singer (1985), Singer and Kouda (1988) に詳しく述べられている。ここでは、その後の追加事項も含めて必要な範囲で略述する。

異常値の識別には通常値 (又はバックグラウンド値) が如何なるものかを明らかにする必要がある。地球化学では、一般に地殻平均化学組成から何倍濃集するかを異常の基準としている。しかし、地殻平均化学組成を用いる方法は、地域ごとの、又、各元素ごとの頻度分布の実態から離れて用いるなら極めて誤った結果を導きかねない。例えば、同一平均値で異なる分散を持つ、異なる頻度分布があるとすれば、この平均の2倍の値 (を異常値と考えてもよい) は、2つの分布で全く異なる生起の仕方になるからである。つまり、通常値 (バックグラウンド値) を用いるには、単に平均がわかるだけではなく、その分散を知ることが決定的に重要であって、これなしにポテンシャルティ―を議論することはできない。

ある異常値が鉱化帯に関係するかどうかは、通常値の頻度分布が決定でき、かつその値が統計的に有意なほど平均値から離れているかどうかを明確に判定しなければならない。そして異常値を持っていても鉱化帯を示すものと、示さないものがある。この識別の為に、鉱化帯の中における異常値の意味を明らかにしなければならない。少なくとも、鉱化帯と不毛帯の2つに区別できる確率分布の型が存在すると仮定する。

今、注目するデータの値を X 、ある地域で得られた X

の値の一つを X_j とすると ($j=1, \dots, n$). この地域の一部を鉱化帯 m と不毛帯 b に分けることができたとすれば、一般に X_j が鉱化帯に属する確率は $P(X_j | m)$ であり、不毛帯に属する確率は $P(X_j | b)$ で表すことができる。ところが求めたいものは、あるサンプル j がどの程度鉱化帯に属するかという確率 $P(m | X_j)$ である。明らかにこれは、上述の値と異なっている。鉱化帯にある場合には、鉱化帯の平均値から離れた値 X_j は極めて低い確率でしか生じない。同様に、不毛帯にあるサンプルで、鉱化帯の平均値をはるかに上回って鉱化帯的の異常値をもつ場合も非常に低い確率であろう。この確率は、一般的に計算することができる。

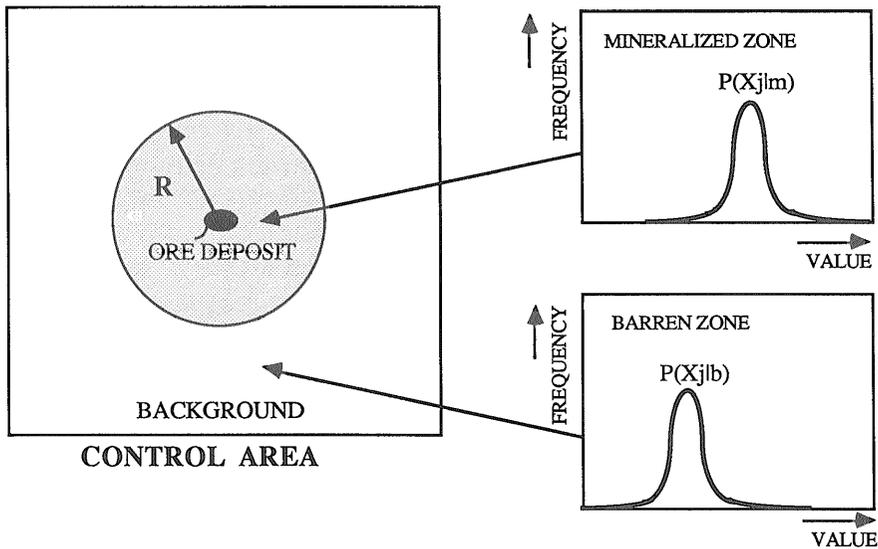
基準となるモデル頻度分布は既知の鉱化帯から容易に求めることができる。この分布が、ある鉱床分布地域で真であると仮定すれば、データが1つかそれ以上あれば、ベイズの法則 (Raiffa, 1968) によって、

$$P(m | X_1, \dots, X_n) = \frac{P_m \prod_{j=1}^n P(X_j | m)}{P_m \prod_{j=1}^n P(X_j | m) + (1 - P_m) \prod_{j=1}^n P(X_j | b)} \quad (1)$$

と表すことができる。ただし、 n は1以上のサンプル・データ数、 P_m は鉱化帯に属する初期確率で、一般に

0.005 等、低い値を与える。 P_m がゼロということは、この地域に鉱床が存在することが可能性として全く無い事を示し、議論の対象にはなり得ない。 $P(m | X_1, \dots, X_n)$ はサンプル $1, \dots, n$ が鉱化帯に属する確率である。異常値の $P(m | X_1, \dots, X_n)$ は P_m より十分大きい値になるので、初期確率 P_m の値はある程度低ければよい。 $P(m | X_1, \dots, X_n)$ の低いものは細かく議論しない。言い換えれば、 P_m より十分大きいある閾値以下の $P(m | X_1, \dots, X_n)$ は一括して不毛帯に入れることができる。(この閾値は、Date *et al.* (1983) のように、統計的に厳密に定められる)。

鉱化帯と不毛帯の確率は、鉱化帯の分布の統計的モデルにより異なる。平面的に円に近似できる鉱化帯 m があるとすれば (第1図)、データ X_j ($j=1, \dots, n$) は、鉱化帯の中にある集団 X_k と、外、つまり不毛帯 b にある集団 X_l に分けることができる。ただし、 $k+l=n$ である。ここで極端な例を使えば、あるサンプルのデータが鉱化帯に属する確率が非常に低いものと高いものがあって、両者 ($j=1, 2$) の空間的位置が鉱化帯の大きさ (半径 R_i) に比べて十分離れていれば、両者の位置を中心とした各々の半径 R_i の範囲内がそれぞれの確率で満たされる (第2図)。 i は異なる異常値の種類に相当する。今の場合 $i=1$ だけで考えてよい。この場合

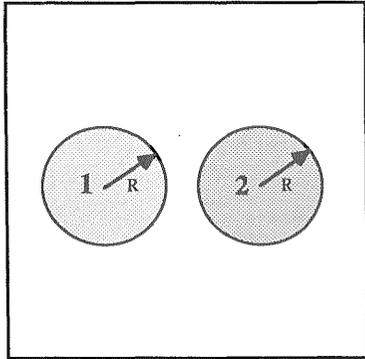


第1図 鉱床を中心として半径 R の鉱化帯による制御地域。右上は鉱化帯内試料頻度分布、右下は不毛帯内試料頻度分布。

Fig. 1 Control area showing mineralized zone within radius R centered by the centroid of ore deposits.

Upper right : Frequency distributions for samples taken within the mineralized zone.

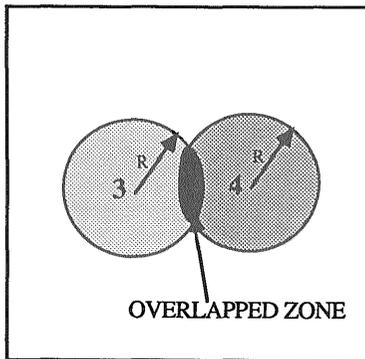
Lower right : Frequency distributions for samples taken within the unmineralized zone (or barren zone) that show the background values.



OBJECT AREA

第2図 試料1と2による半径R領域の、重複しない場合の鉱化確率。

Fig. 2 Probabilities of mineralization centered within radius R given sample locations 1 and 2; no overlap case.



OBJECT AREA

第3図 試料3と4による半径R領域のベイズ定理により重複する鉱化確率。

Fig. 3 Probabilities of mineralization centered within radius R given sample locations 3 and 4; overlap case where the probability is modified by Bays rule.

には、サンプル相互の確率の影響が無いので、各々で確率が決定できる。(j=1, 2; 又は k=1, 1=2).

$$P(m | X_j) = \frac{Pm \cdot P(X_j | m)}{Pm \cdot P(X_j | m) + (1 - Pm) P(X_j | b)} \quad (2)$$

ところが、例えば、共に高い確率を有するサンプルデータ (j=3, 4) が接近した場合、半径 R_i (ただし i=1) で示される円が重複する (第3図)。この重複する範囲では、式(1)から、

$$P(m | X_3 X_4) = \frac{Pm \cdot P(X_3 | m) \cdot P(X_4 | m)}{Pm \cdot P(X_3 | m) \cdot P(X_4 | m) + (1 - Pm) P(X_3 | b) P(X_4 | b)} \quad (3)$$

で確率を求めることができる (j=3, 4; 又は k=3, 4).

鉱化帯の形やデータの分布モデルに応じて、確率分布 P () や “半径” R_i がとる関数の形はいろいろ考えることができる。例えば不規則な形をした鉱化帯があれば R_i は一定ではありえず、適当な点から境界に至る角度を Θ とすれば R_i = R_i(Θ) つまり Θ の関数で与えられる。P () も連続、不連続を含む様々な分布を考えてよい。つまり式(1)は一般的に成立する式である。

数学的取扱いの容易さから言えば、R_i として、円

$$R_i = \text{constant} \quad (4)$$

や、線

$$R_i(\Theta) = \begin{cases} \text{constnt} & (\Theta = \Theta_0) \\ 0 & (\Theta \neq \Theta_0) \end{cases} \quad (5)$$

を考え、又、P () として平均 μ_i、標準偏差 σ_i の正規分布

$$P(x | \mu_i, \sigma_i) = \frac{\int_z^\infty \exp(-\frac{Z^2}{2}) dz}{\sqrt{2\pi}} \quad (6)$$

ただし、Z = (X - μ_i)/σ_i、を考えることが便利である。R_i の形として、この他、楕円も扱い易い。直線も円も楕円の特別な場合とみなすことができる。

鉱化帯は鉱床そのものを含み、鉱床ほど高品位でなくてもある程度の異常値を示す所である。このことから、直接鉱床の存在が確認できなくても、ある程度の異常値(鉱徴)があれば鉱化帯と呼ぶことがある。又、鉱床は、熱水性鉱床などで特に顕著な変質帯を伴うことがある。これには、鉱床と関係ない熱水変質帯と、鉱床と密接な関係を有する変質帯がある。後者を鉱化変質帯と呼び、鉱化帯の一種としてよい場合もある。

以上のような、鉱床を含むか、鉱徴をもつか、鉱化変質帯のあるような鉱化帯は、一般に帯状構造を持つことが多い。この帯状構造は、鉱床を挟んで対称の場合もあるが、非対称の場合も多く、又、必ずしも鉱床が中心に来るものでもない。帯状構造を扱うには、鉱化帯の中心からみてどの程度の範囲の位置に特定の異常値が濃集するのか、又、その形状 R_i(Θ) を明らかにする必要がある。円や直線を含む楕円形で考えると、それは環形状になるであろう。例えば、環状の部分で P (X | m)、内環の内側と外環の外側で P (X | b) を考える。

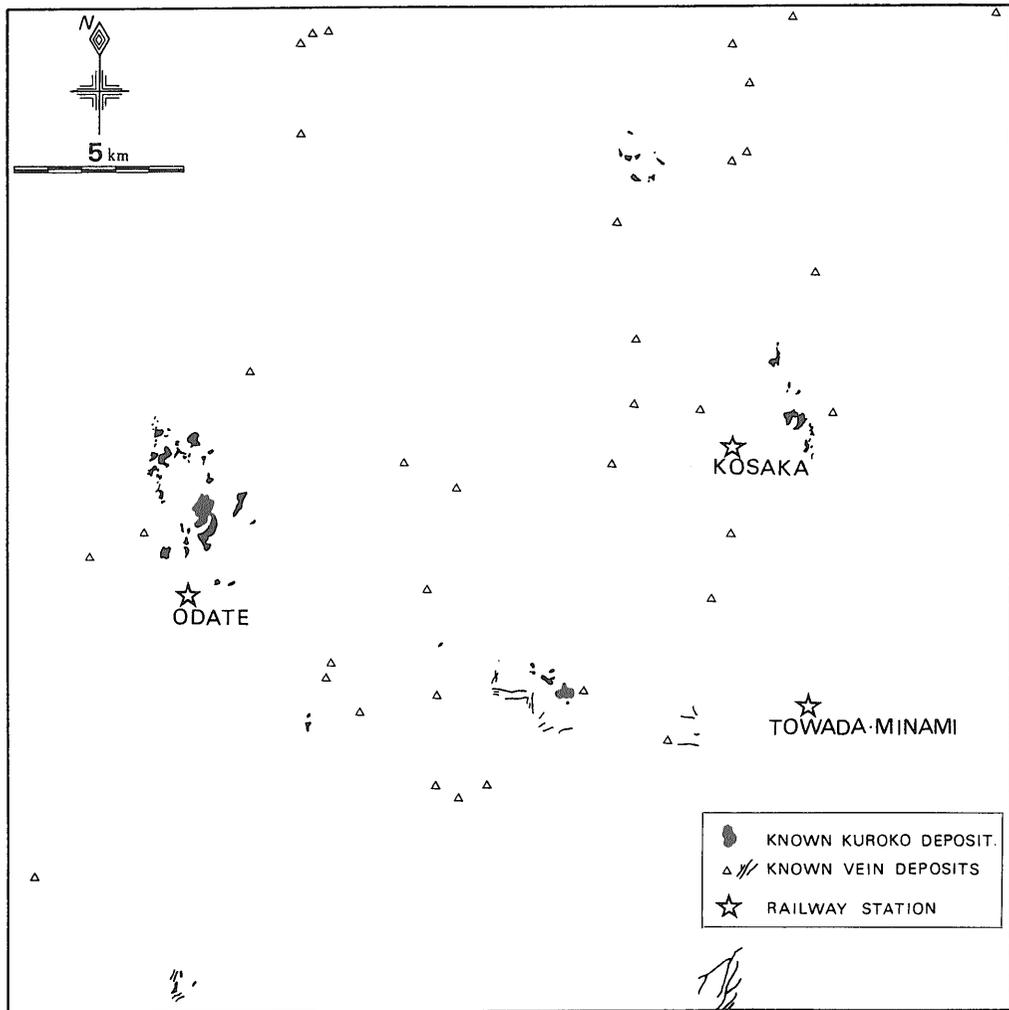
サンプルのデータ値 X_j から鉱化帯としての確率 P (X_j | m) を空間的に求める為には、鉱化帯がある程度

の広がりを持つ必要がある。鉱化帯が非常に狭く、点で近似できる場合には、確率分布の重ね合わせは困難で、式(2)の形のみが意味を持つ。鉱床そのものの広がり是一般に狭く、鉱床探査が鉱床を発見することで終了することから考えて、鉱化帯としては鉱床の大きさよりかなり大きく空間的に広がった異常帯が必要である。

3. 北鹿地域の鉱微分布

秋田県北鹿地域は、大館市と小坂町を含む東西、南北ほぼ 40 km×40 km の広がりを持つ、盆地状構造を有する第三紀海底火山岩堆積の場である。地層は緩やかな

褶曲を伴う、水平的な構造を持つ。局所的に断層に伴って急傾斜するところがある。特に盆地の端は何本かの大きな断層帯で区切られ、先新第三紀の基盤岩に囲まれている。盆地状の東西の端に、小坂鉱山、花岡鉱山、南北の端に古遠部鉱山、尾去沢鉱山、中央付近に深沢鉱山、餌釣鉱山等が知られており、鉱脈状銅鉱床である尾去沢鉱山を除いて、数百万トンクラス以上の黒鉱鉱床が集中する。北鹿地域には、黒鉱鉱床に隣接する 33 の銅・鉛・亜鉛鉱脈鉱床が知られており(第4図)、その鉱量の百万トンに達しない中・小規模のものが大部分である。



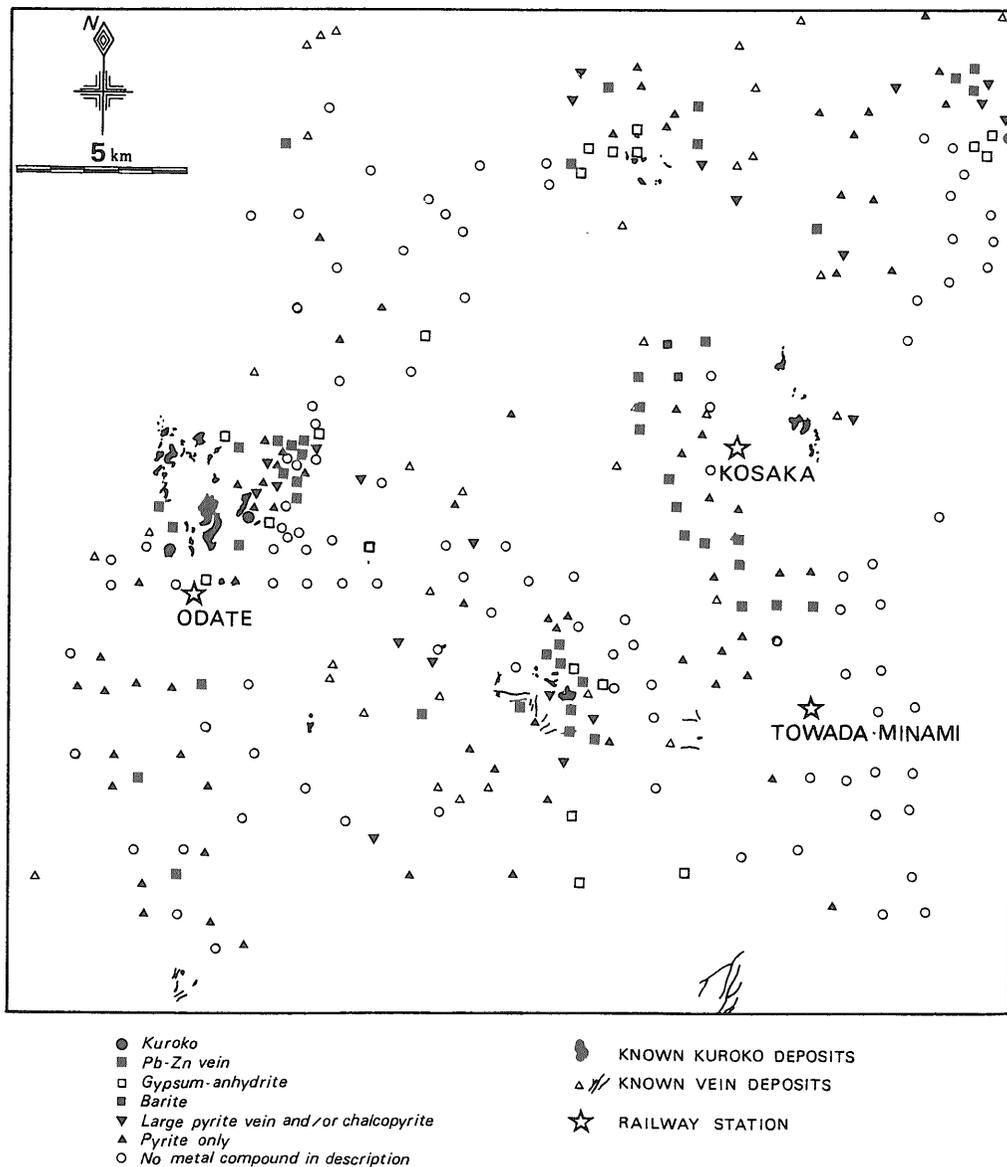
第4図 北鹿地域の既知層状黒鉱・熱水鉱脈型鉱床分布図。

Fig. 4 Distribution map of known bedded kuroko and hydrothermal vein type deposits in the Hokuroku district.

公表された 262 本の孔井柱状図の記載(金属鉱物探鉱促進事業団, 1965, 1966, 1967, 1968, 金属鉱業事業団, 1975, 1976, 1977, 1978, 1980, 1981, 1982) から, 定

性的に次のような手順で 1 本ごとに鉱徴を級別分類した.

[1] 1 本のボーリング柱状図の上から下まで全ての記載のうち, 黒鉱石の記載のあるものを第 1 順位のク



第 5 図 北鹿地域の孔井 262 本から抽出した鉱化及び非鉱化を示す 7 つのクラス分け分布図 (Singer and Kouda, 1988 の修正).

Fig. 5 Distribution map of seven classes of mineralization and unmineralization occurrences extracted from column descriptions of 262 drill holes in the Hokuroku district (modified from Singer and Kouda, 1988).

ラスとする。

[2] 黒鉱鉱石の記載が無く、鉛・亜鉛鉱徴の記載のあるものを第2とする。

[3] 黒鉱鉱石、鉛・亜鉛鉱徴共に記載が無く、石膏・硬石膏の存在の記載があるものを第3とする。

[4] 黒鉱鉱石、鉛・亜鉛鉱徴、石膏、硬石膏共に記載が無く、重晶石鉱の記載があるものを第4とする。

[5] 黒鉱鉱石、鉛・亜鉛鉱徴、石膏・硬石膏、重晶石鉱の記載がいずれも無く、黄鉄鉱（と黄銅鉱）の明らかな鉱脈が記載されているものを第5とする。

[6] [1]～[5] のいずれでもなく、黄鉄鉱の鉱徴のみが記載されているものを第6とする。

[7] [1]～[6] のいずれでもないものを第7とする。

第4図に示した鉱脈鉱床は、[2]～[5] のいずれかに属すると考えられる。そこで、33の鉱脈鉱床の位置も含めた[1]～[7]の分布図を第5図に示す。大きな黒鉱鉱床群の周囲には探査用の孔井が多数打たれているため、孔井密度が高い。注目すべきことは[1]～[3]のクラスは特に黒鉱鉱床に隣接して密集する傾向にあることと、鉱床の知られていない所には概して[7]のクラスが多いこと、そして、[7]のクラスは黒鉱鉱床群のごく付近にも存在することである。

[1]～[7]の元になった記載は20年以上にわたって複数の人々の不均質な観察に基づいており、中には重要な事実の記載もれや、誤りもあると見られる。しかし、地層名や岩石名における疑問は多いものの、最重要な鉱徴の記載は複数の鑑定者の検討を通してと思われるので、誤りや見落としは少ないと思われる。X線回折による孔井165本分の鉱物同定結果と第5図の対応性がよいので、大局的には第5図の精度は高いと考えざるを得ない。

[7]のクラスは、硫黄化合物の鉱徴の無いことを意味しており、変質は強いものと殆ど見られないものがある。対象となった262本の孔井記載では、著しい変質をあげているものが[7]のクラスでは少ない。174本の孔井コアの一部は化学分析がなされており、次節で述べる。

各孔井深度は地表から数百mのものが大部分であり、ほぼ中新世中期～後期の地層に対応している。北鹿地域の岩石は多かれ少かれ変質しているため、火山砕屑岩の原堆積年代を直接示す放射年代値は系統的に調べられるほど多くは無く、ただ中新世のある時代を岩相からいくつかに分割していることが多い。半分以上の孔井は黒鉱鉱床の存在する特定の層準（15～16 Ma 頃と見られる）に達したところで掘止となっている。第5図の分布は、黒鉱鉱床の層準を含み、かつそれより上位の中新世後半

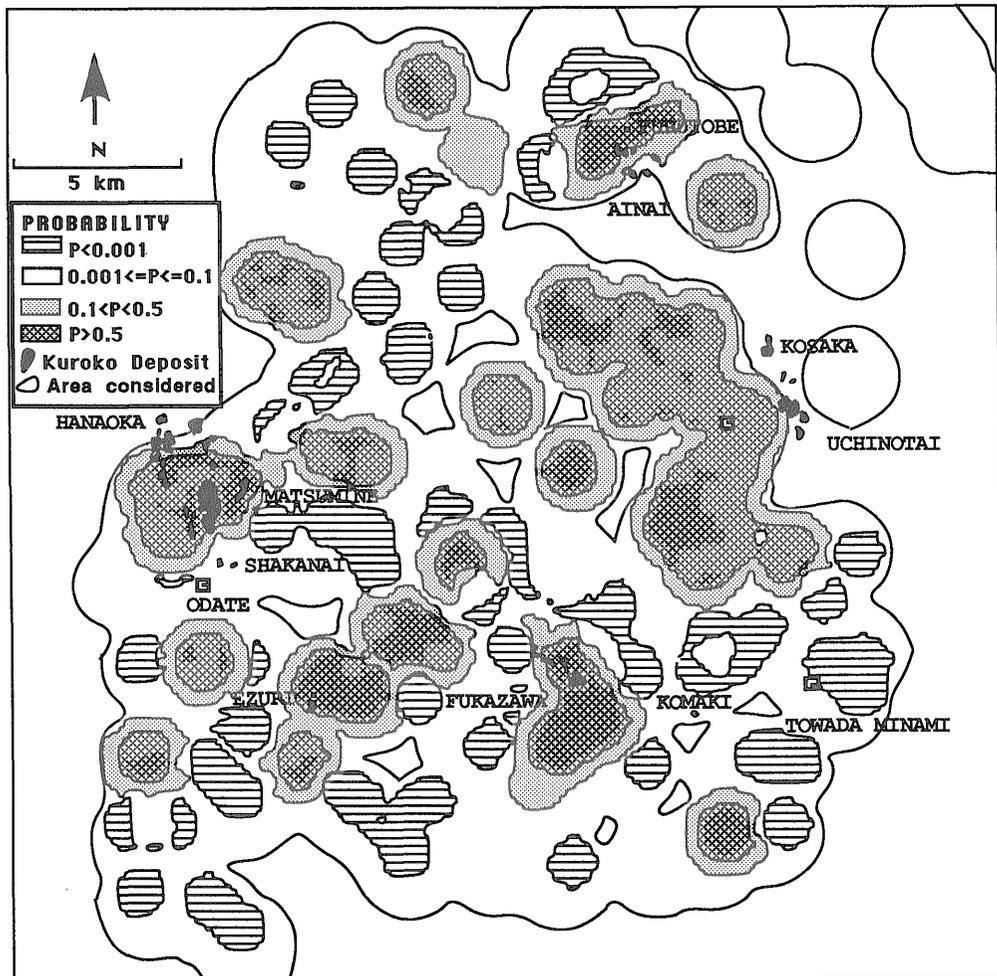
の地層までの鉱徴の分布を示している。

伊達・渡辺（1979）は黒鉱鉱床の上位の変質が、黒鉱鉱床生成に関与した黒鉱鉱床下位の変質と共通性を有することを見出し、熱水活動の共通性ないし継続性を示している。これは歌田・青木（1981）の結果とも一致している。第4図における黒鉱鉱床と鉱脈鉱床の分布の隣接性から見ても両者に共通性ないし継続性を仮定することには意味がある。第5図の分布は黒鉱鉱床を含む、北鹿地域の中新世熱水活動の結果の平面的分布を示すことができる。これは定性的な鉱化帯の分布である。北鹿地域における不毛帯の重金属分布が知られるなら、鉱徴部分の重金属分布と合わせて鉱化帯確率が計算できる。しかし、鉱徴がスポット的にしか存在しないため、各孔井を平均化すると不毛帯との区別が難しく、又、3次元解析のプログラムが未開発のため、鉱床と鉱徴分布の利用にはまだ至っていない。平面分布の定量的解析には明瞭な統計的分布を示す要因が必要であり、次節以下の方法を用いる。

4. 北鹿地域の化学組成異常値の分布

174本の孔井から、平均12～3個づつ、できるだけ新鮮に見える試料を採取した分析値が公開されている（通商産業省、1983）。これは主成分15元素（Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K, Ti, Mn, P, Ba, Cr, Zr, Cu, LOI）と微量成分10元素（Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sb, V, Zr）を、ICP発光分光分析で定量している（以後MITI（1983）と称する。）。多くの成分は前節に示した定性的な鉱化帯（クラス[1]～[6]）と不毛帯（クラス[7]）への頻度分布の分離が良くない。

ところが、Naについては非常に良く分離でき、Date, *et al.*（1983）の示した深沢鉱床の詳細なNa分布図と対比可能である。石英安山岩のNa₂Oは黒鉱鉱床を含む鉱床群を生成した熱水活動によって、岩石中から熱水中に溶解され散逸してしまったと考えられる。Date, *et al.*（1983）は約0.8×1.5 km〔の楕円形〕で近似できる深沢鉱床の鉱体群の周囲に約1.5×3.0 km〔の楕円形〕で近似できる石英安山岩の低Na₂O帯を見出した。ここで楕円形で近似しているのは、著者等による。この低Na₂O帯は黒鉱鉱床の（又は鉱体の）上位にも伸びており、前節の結果と調和している。低Na₂O帯は熱水変質によるもので鉱床そのものではないが、鉱体群の分布範囲より広いので捕捉し易く、又、鉱体群より一回り大きくとりまいているので、鉱化作用を熱水活動の一部と捉えれば、低Na₂O帯が鉱床存在を示す鉱化帯の一種と見ることができる。



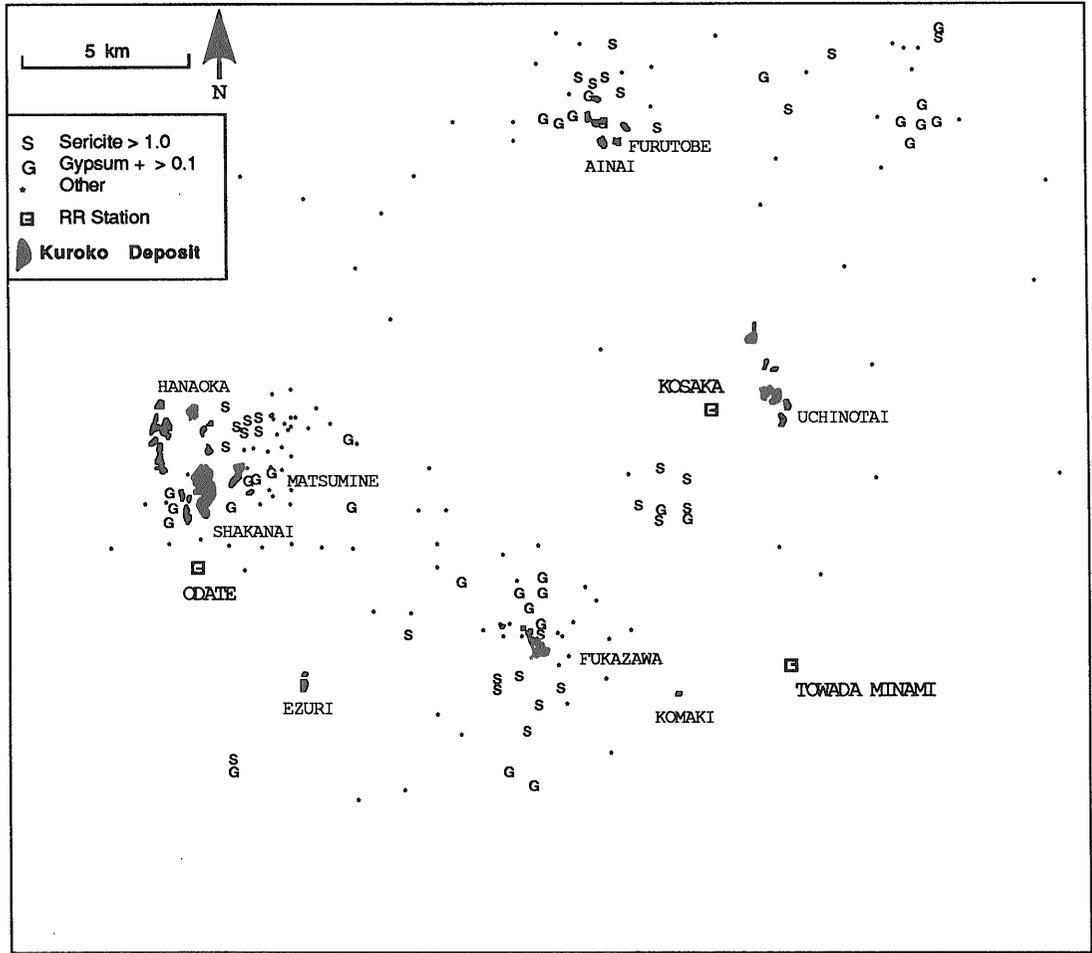
第6図 深沢鉱床周辺鉱化帯で制御される北鹿地域の174孔井のICP化学分析値による低Na₂O帯から求めた黒鉱鉱床中心確率分布図 (Singer and Kouda, 1988の修正).

Fig. 6 Distribution map of probabilities of centers of kuroko deposits based on sodium depletion from 174 drill holes measured ICP chemical analysis in the Hokuroku district controlled by the mineralized zone around the Fukazawa deposits (modified from Singer and Kouda, 1988).

著者等は MITI (1983) の値から深沢鉱山の周囲36孔井で閾値を再計算し、鉱化帯の重量%を平均0.083、標準偏差2.24、又、不毛帯の平均0.513%、標準偏差2.09とした。この鉱化帯を楕円形近似し、長軸2.8km、短軸1.5kmとした。これは Date, et al. (1983) の値や、それと少し異なる橋口他 (1981) 等の値とも少し異なるが、Date, et al. (1983) 等、先行する研究報告の使用したデータが鉱床周囲に集中して多量に打たれた企業探鉱井を主とし、又原子吸光分析による数成分のみ

の分析結果によるものの為当然である。0.1%を閾値とする低Na₂O帯を鉱化帯の異常値として式(1)を適用した結果を第6図に示す。ここではR_i(Θ)は楕円近似であり、一組の値を適用した。つまり、少なくとも深沢鉱床より大きい鉱床が存在する確率の平面分布を示している。初期確率は0.001であり、これより低い確率をもつところは積極的に不毛帯と考えることができる。

データの欠落した所は確率を示すことができない。小坂鉱山の東方や花岡鉱山北方は、R_i(Θ)を超える位置



第7図 北鹿地域の165孔井のX線粉末回折データによる絹雲母と石膏・硬石膏の高強度値分布図 (Singer and Kouda, 1988の修正).

Fig. 7 Distribution map of the high values of sericite and gypsum-anhydrite from 165 drill holes measured Xray powder diffraction data in the Hokuroku district (modified from Singer and Kouda, 1988).

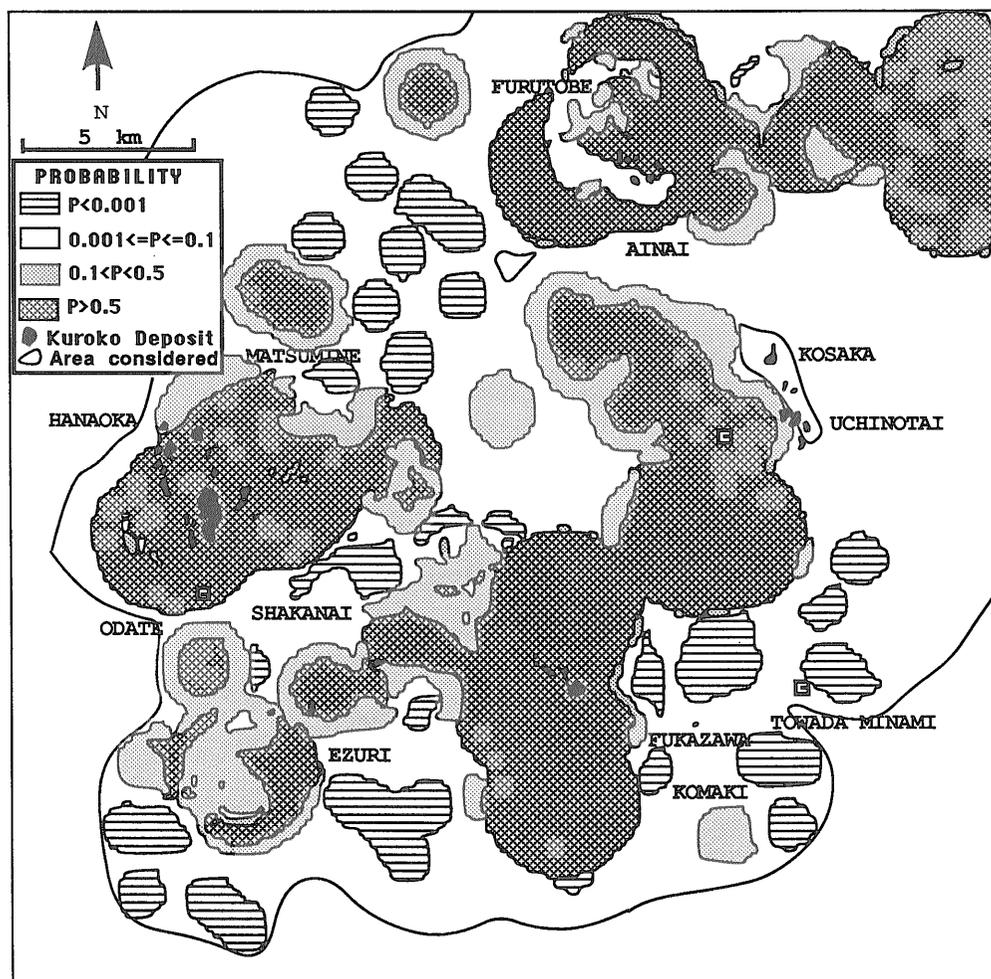
にデータが無いので結果が出ていない。これを除いて、高確率域は既知鉱床と良く一致している。又、既知鉱床の知られていない所にも高確率分布が存在し、探鉱上興味深い。

5. 北鹿地域の熱水活動による鉱物の分布

MITI (1983) は、165の孔井から同様にX線粉末回折結果を報告している。既に低Na₂O帯及び鉱微帯による鉱化帯が知られているが、これに更に熱水活動による鉱物が示す別の鉱化帯を加えることができる。同定さ

れた20種の鉱物のうち、頻度分布が鉱化帯と不毛帯に分離し得たのは、石膏・硬石膏と、絹雲母であった。絹雲母は熱水活動の中心付近で強く変質が進むことによって多量に生成し、石膏・硬石膏は熱水の運ぶ硫黄種が酸化環境で多量にCaと結合して沈澱する為生成すると考えられる。

同一条件下のX線粉末回折結果の強度比から、石膏・硬石膏と絹雲母の特に強い孔井の平面的分布(第7図)から興味ある結果が得られた。即ち、黒鉱鉱床を境に、片側に絹雲母の強い分布域が存在し、反対側に石膏・硬



第8図 ベイズ定理により複合した、ナトリウム溶脱、絹雲母、石英・硬石膏に基づく黒鉱鉱床中心確率分布図 (Singer and Kouda, 1988 の修正).

Fig. 8 Distribution map of probabilities of centers of kuroko deposits based on sodium depletion, sericite, and gypsum-anhydrite overlapped through the Bayes rule computation (modified from Singer and Kouda, 1988).

石膏の強い分布域が存在している。これは深沢、花岡、古遠部の各鉱山で明らかである。又、黒鉱鉱床の存在が知られていない、小坂鉱山の西南、深沢鉱山から米代川を越えた南、十和田湖西方にも同様の分布が見られ、探鉱上示唆に富む。このような非対称分布は、黒鉱鉱床の鉱体群を中心に、環状分布の一部を切取った形状と考えることができる。低 Na_2O 帯と同様に、深沢鉱山の周囲 36 孔井で、意味のある分離帯として、内径 1.95 km 外径 3.5 km の円環形をとり、環形内の石膏と硬石膏

の強度の平均値を 0.083、標準偏差を 0.15、又、環形外を平均値 0.026 標準偏差 0.05 と算出した。鉱化帯は内径の内と考えられる。

これに対して絹雲母は石膏ほど分布が広がっていないので、半径 2.15 km の円で近似し、鉱化帯の強度平均値が 0.731、標準偏差 0.75、不毛帯(円の外)の平均値が 0.166、標準偏差 0.37 である。

以上の確率分布を低 Na_2O 帯の確率分布に追加して、式(1)を適用した結果が第8図であり、第7図による定

第1表 第8図の黒鉱鉱床確率頻度分布 (初期確率 0.0001).

Table 1 Frequency values of probabilities of kuroko deposits given in the Figure 8. Prior probability is 0.0001.

Probability of kuroko deposits	Frequency
0.0 to 0.0001	10714
0.0001 to 0.1	6817
0.1 to 0.2	35
0.2 to 0.3	37
0.3 to 0.4	26
0.4 to 0.5	61
0.5 to 0.6	54
0.6 to 0.7	60
0.7 to 0.8	68
0.8 to 0.9	80
0.9 to 0.9999	385
0.9999 to 1.0	4163

性的な鉱化域分布を定量的確率分布で示している。データの欠落部分を除いて、従来の鉱床分布域 (第4図) との整合性が良く、更に、従来指摘されていない小坂鉱山南西、深沢鉱山南、古遠部鉱山東に鉱床賦存の確率の高い所が確認された。いずれの鉱化帯のデータ値も不毛帯に対する統計的分離が良く、確率分布も又、高確率と低確率への分離の良いものとなっている (第1表)。第1表の頻度の数は、単位要素 (200 m×200 m) の数である。深沢鉱床の Na₂O 鉱化帯要素数は 330 であり、既知鉱床の鉱化域要素数はこの約 8 倍、2640 と見積もられる。表 1 の 1 に近い確率を持つ要素から、既知鉱床分を差し引くと、深沢鉱床と同程度の大きさ (つまり 500 万 t 規模) の黒鉱鉱床の未発見数は 40 km×40 km の北鹿地域の範囲で 4~5 個程度と見積ることができる。

6. 平面的分布によるポテンシャル評価

現在知られている北鹿地域の黒鉱鉱床は、近くに黒鉱鉱床の露頭が有るか、又は鉱脈鉱床が有るものである。深沢鉱床と餌釣鉱床は近くに黒鉱鉱床の露頭が知られておらず、只、両者の中間に小規模な新沢黒鉱鉱床の露頭が知られているのみである。ただし、両鉱床とも、その上位に鉱脈が地表まで達している。第4図の鉱床分布及び第5図の鉱微分布からみて、既知鉱床周辺以外にも同様な関係で黒鉱鉱床が見つかるポテンシャルが定性的に残されていることは明らかである。

黒鉱鉱床の下位にも (網状) 鉱脈が存在することは広く知られており、その一部は生産対象にもなっている。この下位鉱脈が黒鉱生成時に密接な関連を持つことは、

そのまわりを囲む熱水変質帯の生成との関連と合わせて疑うことができない。ところが、黒鉱の上位に展開する、鉱脈鉱床は黒鉱生成の時期より数 Ma あとであり、直接関係するものではない。しかし、両者の空間的分布が近いことは、例えば断裂に規制された熱水系が中新世の中~後期を通じてあまり変らなかったためと推定できる。黒鉱鉱床にもこの後の鉱脈による熱水活動は及んでおり、黒鉱鉱床内外に展開する鉱脈の化学組成変化・再結晶等が詳しく研究されている (古宇田, 1984)。

時期 (黒鉱 = 15~16 Ma, 鉱脈 = 8~12 Ma) も型 (黒鉱 = 層状, 鉱脈 = 脈状) も異なる両者が相似た分布、変質帯、鉱微を持つのは、熱水経路の深部に共通性が有る他、熱水そのものの性質にも似たものが有るためと考えられる。これは、結果として、岩石中の Na₂O を溶脱し、鉄・銅・鉛・亜鉛硫化物を沈澱、周囲に絹雲母や石膏・硬石膏、重晶石等を出現させるものなら、一般に何でもよい。

相似た性質の熱水溶液が、厚いところで 1~2 km の厚さを有する北鹿地域の中新世珪長質火山岩類分布域である北鹿地域に、限定された経路で流通すれば、重金属の濃集及び変質帯の生成は平面的に局在することになる。鉱脈型には鉄緑泥石や方解石が多く見られる等の違いもあるもの前節までにあげた種類の鉱化帯は共通する。

更に注目すべき点は、絹雲母分布域と石膏・硬石膏分布域に挟まれた鉱床分布の規則性である。鉱床を中心とした両者の非対称分布は、その多くが黒鉱鉱床より下位の岩石中に出現するので黒鉱鉱床生成に伴うものと考えられるが、後の鉱脈鉱床生成時期に同じような熱水活動で更に重複強化される可能性もあるだろう。この平面分布上の現象は、低 Na₂O 帯と共に黒鉱鉱床の存在を強く示唆するものである。

前節で使用した平面分布上の定量的データは、1本の孔井で平均化しているため、異常値がよほど強く現れない限り平面上の異常値にはならない。将来、3次元計算が可能になれば、鉱化帯と不毛帯の頻度分布の分離性はより明瞭となり、前節で使用した以外の元素、鉱物も異常値として利用できるようになるだろう。この平面分布上の異常値の存在は非常に確度の高いものである。従って、確度が高く、しかも不毛帯に対する分離性の良いデータから得られた鉱床賦存確率分布は、定量的精度も高い。

個々の鉱床の形態は極めて不規則な外形をしており、現在の正確な形から、未知鉱床の形を精度良く予測することは困難である。しかし、鉱化帯の形は、孔井の少なさもあって、概略楕円 (又は円、又は線) で近似できる。

この規則的な形からなら、未知鉱床域の規模と形を予測できる。前節で未知鉱床のポテンシャルティを4~5/深沢鉱床型としたのはこの為である。

鉱量と変質帯の大きさの定量的関係は知られていない。北鹿地域では単純に比例するとは限らないようである。鉱量の予測は更に困難となる。従って、鉱化帯の確率分布から直接算出することは疑問が多い。深沢鉱床型が4~5個有るとすれば、2,000万t~2,500万t規模が見込めるという推測ができるだけであり、これは不安定な値である。精度の高い鉱量予測のためには、個々の鉱化帯指示要素と金属濃集との定量的関係を知ることが今後必要になるだろう。

7. 今後の課題

本研究の範囲内で、著者等は地層の分布について中新世中~後期ということ以上に言及しなかった。黒鉱鉱床が層準規制型である為に、地層の分布は重要である。しかし、現在に至るも、予測のための精度の良い地層区分は知られていない。著者等の独自調査に基づく地層区分については別途稿を改めて詳しく言及したいと考える。

地層分布について言及していない第2の理由は、著者等の計算方法が平面分布に対するものであって、3次元の分布の処理技術をまだ開発していない為である。第6図、第8図で、小坂鉱山東方にデータ欠落した部分があって、予測していない。データがあったとしても、現在の地形に基づく限り高い確率が出てはならないのである。というのは、小坂鉱山元山鉱床は地表に露頭のある鉱床で、その東方は鉱床層準が地下に見込めないからである。鉱床層準の位置を立体的に精度良く推定できれば、鉱床層準の存在する付近で厚さ t_i 、 $R_i(\theta)$ の鉱化帯が存在可能であり、式(1)からその確率を決めることができる。鉱床層準が地下に無く、例えば中生代の基盤岩が露出している所では、黒鉱鉱床の存在確率はゼロである。この決定的なゼロは、他のどの要因の値にも優先するので、極めて重要であろう。この場合、地層分布決定に伴うあいまい性の数値処理を施す必要がある。

本研究の方法は、一般にどの鉱床にも適用することができる。又、データの数にはよらない。極端な場合、唯一つのサンプルのデータ値が1つしかなくても可能である。もちろんデータが多いほど精度は向上する。データの数が非常に少ない場合、詳細に調べられた地域(例えば北鹿地域)のモデルを初期条件として使うことができる。その場合は、地域性による違いを何らかの形で式(1)や、(6)に反映させることが必要だろう。

本研究は工業技術院特別研究「深部鉱物資源のポテンシャルティ評価に関する研究」で得られた成果の一部である。関係各位に厚く感謝申し上げる次第である。

文 献

- 伊達二郎・渡辺吉博(1979) 秋田県深沢鉱床の変質、とくに鉱床上盤における変質鉱物の分帯について。鉱山地質, vol. 29, p. 351-361.
- Date, J., Watanabe, Y., and Saeki, Y. (1983) Zonal alteration around the Fukazawa Kuroko deposits, Akita Prefecture, northern Japan. *Econ. Geol. Mon.* 5, p. 365-386.
- 橋口博宜・相沢 恒・山田亮一・井上常史(1981) 黒鉱鉱床の探査範囲限定の方法(1) 低 Na_2O ハローの適用。鉱山地質, vol. 31, p. 115-122.
- 金属鉱物探鉱促進事業団(1965) 昭和39年度地質構造調査報告書。金属鉱物探鉱促進事業団, 239 p.
- (1966) 昭和40年度地質構造調査報告書。金属鉱物探鉱促進事業団, 308 p.
- (1967) 昭和41年度精密調査報告書。金属鉱物探鉱促進事業団, 429 p.
- (1968) 昭和42年度精密調査報告書。金属鉱物探鉱促進事業団, 106 p.
- 金属鉱業事業団(1975) 昭和49年度精密調査報告書(北鹿地域)。金属鉱業事業団, 160 p.
- (1976) 昭和50年度精密調査報告書(北鹿地域)。金属鉱業事業団, 121 p.
- (1977) 昭和51年度精密調査報告書(北鹿地域)。金属鉱業事業団, 143 p.
- (1978) 昭和52年度精密調査報告書(北鹿地域)。金属鉱業事業団, 162 p.
- (1979) 昭和53年度精密調査報告書(北鹿地域)。金属鉱業事業団, 130 p.
- (1980) 昭和54年度精密調査報告書(北鹿地域)。金属鉱業事業団, 160 p.
- (1981) 昭和55年度精密調査報告書(北鹿地域, その一)。金属鉱業事業団, 155 p.
- (1982) 昭和56年度精密調査報告書(北鹿地域, その一)。金属鉱業事業団, 172 p.
- 古宇田亮一(1984) 黒鉱鉱床における脈状鉱の成因

- 的意義. 地学雑誌, vol. 93, p. 30-53.
- Mosier, D.L., Singer, D.A., and Salem, B. B. (1983) Geologic and grade-tonnage information on some volcanic-hosted copper-zinc-lead massive sulfide deposits, *U.S. Geol. Surv. Open-File Rept.* 83-89, 78 p.
- Raiffa, H. (1968) Decision analysis: Introductory lectures on choioes under uncertainty, *Reading, Massachusetts, Addison Wesley*, 309 p.
- Singer, D.A. (1985) Preliminary version of FINDER, a Pascal program for locating mineral deposits with spatial imformation. *U.S. Geol. Surv. Open-File Rept.* 85-590, 24 p.
- and Kouda, R. (1988) Integrating Spatial and Frequency Information jn the Search for Kuroko Deposits of the Hokuroku District, Japan. *Econ. Geol.* vol. 83, p. 18-19.
- 通商産業省〔MITI〕(1983) 昭和 57 年度広域調査報告書, 構造解析総合調査. 通商産業省・資源エネルギー省, 621 p.
- 歌田 実・常世俊晴・青木 尚(1981) 北鹿地域中心部における変質帯の分布. 鉱山地質, vol. 31, p. 13-25.
- Utada, M., Ishiikawa, Y., Takahashi. T. and Hashiguchi, H. (1983) The distribution of alteration zones in the western area (Hanaoka-Matsumine-Shakanai mineralization area) of the Hokuroku district, northeast Japan. *Soc. Mining Geologists Japan Spec. Paper* vol. 11, p. 125-138 (in Japanese with English abs.).

(受付: 1992 年 6 月 12 日; 受理: 1993 年 1 月 6 日)