

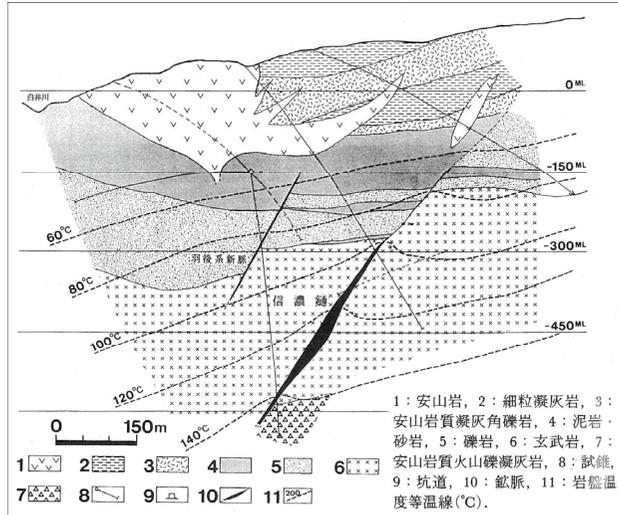
地殻データ解析プログラム

独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構
金属海洋資源部 海洋資源調査課
担当調査役 両角 春寿

2022年7月21日

鉱床とは

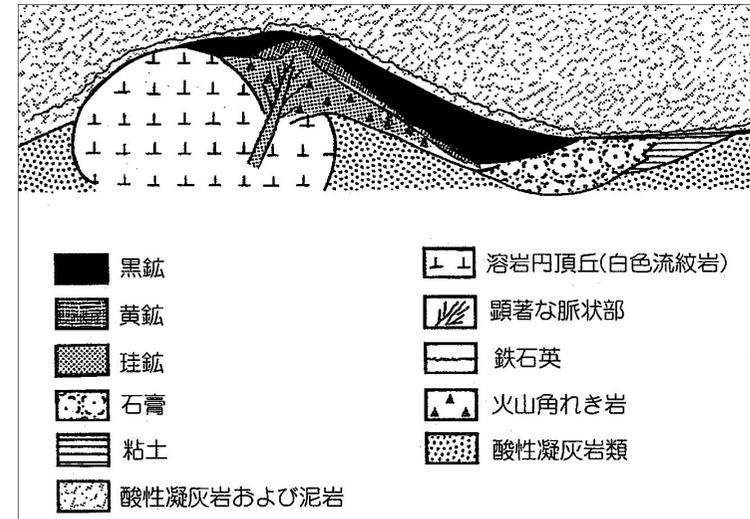
標題技術は鉱床探査の効率化を目的としている。鉱床とは、銅、鉛、亜鉛、金、銀などの有用鉱物からなる鉱石が地下に経済性を持って濃集しているものであり、鉱床を採掘する設備が鉱山である。



北海道, 豊羽鉱脈鉱床の断面図(神原ほか, 1989).



豊羽鉱脈鉱床の鉱石(鉛、亜鉛)

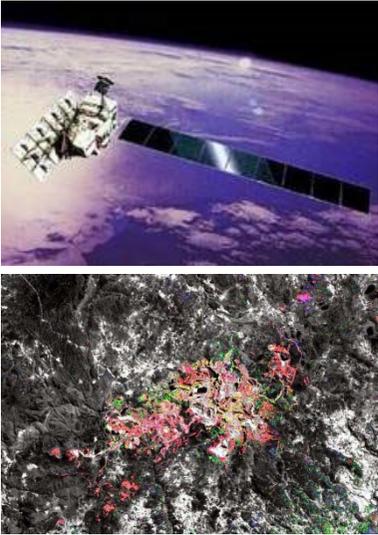
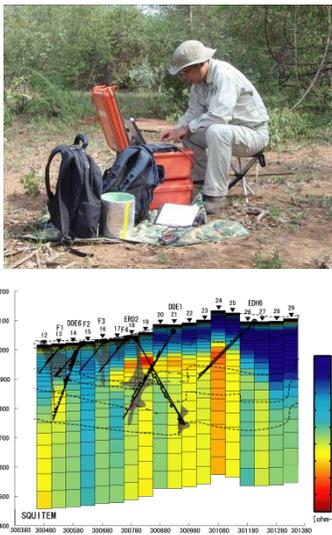


秋田県, 模式的な黒銅鉱床の断面図(Sato, 1974).



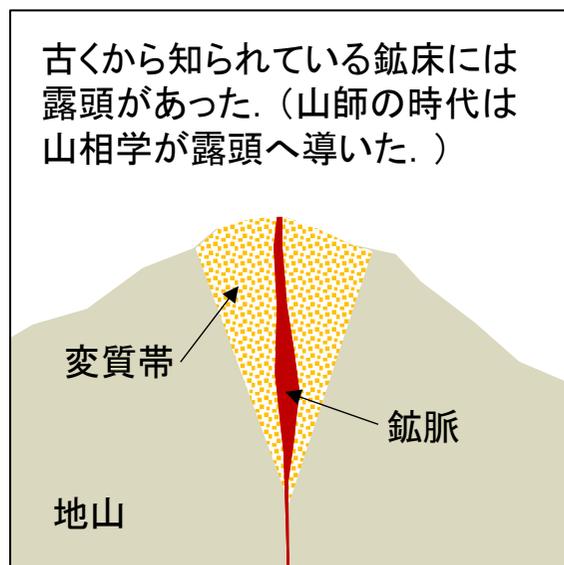
温川黒銅鉱床の鉱石(銅、鉛、亜鉛)

鉱床探査の一般的な流れ

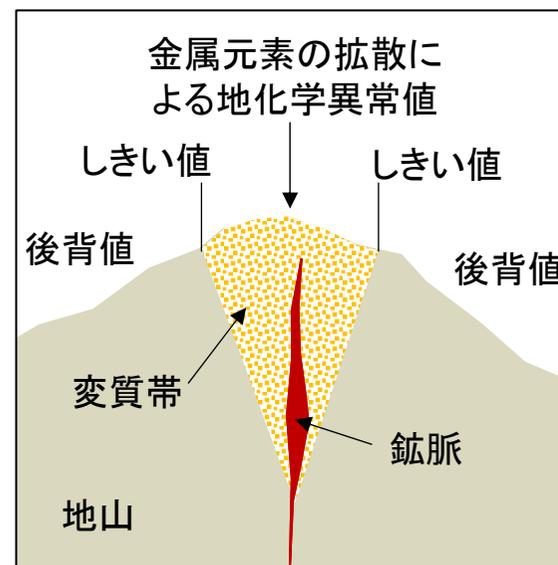
調査段階	予察～広域調査	準精査	精査	プレF/S
調査手法	<ul style="list-style-type: none"> ・既存資料解析 ・衛星画像解析 ・グラントルース(地質概査) 	<ul style="list-style-type: none"> ・地質準精査(地化探含む) ・空中物理探査 ・トレンチ調査 ・ボーリング調査 	<ul style="list-style-type: none"> ・地質精査(地化探含む) ・物理探査 ・ボーリング精査 ・坑道調査 	<ul style="list-style-type: none"> ・鉱量計算 ・選鉱試験 ・鉱山・インフラ開発計画 ・環境影響評価 ・経済性評価
調査目的	<ul style="list-style-type: none"> ・基礎データの収集整理 ・鉱徴・変質帯の確認 ・有望探査地域の抽出 	<ul style="list-style-type: none"> ・鉱徴・変質帯の詳細確認 ・鉱床の発見 	<ul style="list-style-type: none"> ・鉱床の詳細確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・鉱床の鉱山開発可能性の予備的評価 ・環境対策を講じた最適な鉱山開発計画
対象面積	1万km ² 以上	1万～100km ²	100～10km ²	10～1km ²
イメージ				

地化学探査とは

地化学探査(地化探)とは、岩石等を採取して化学分析を行い、地球化学的な異常(地化学異常)を手掛かりにして鉱床発見につなげる手法。



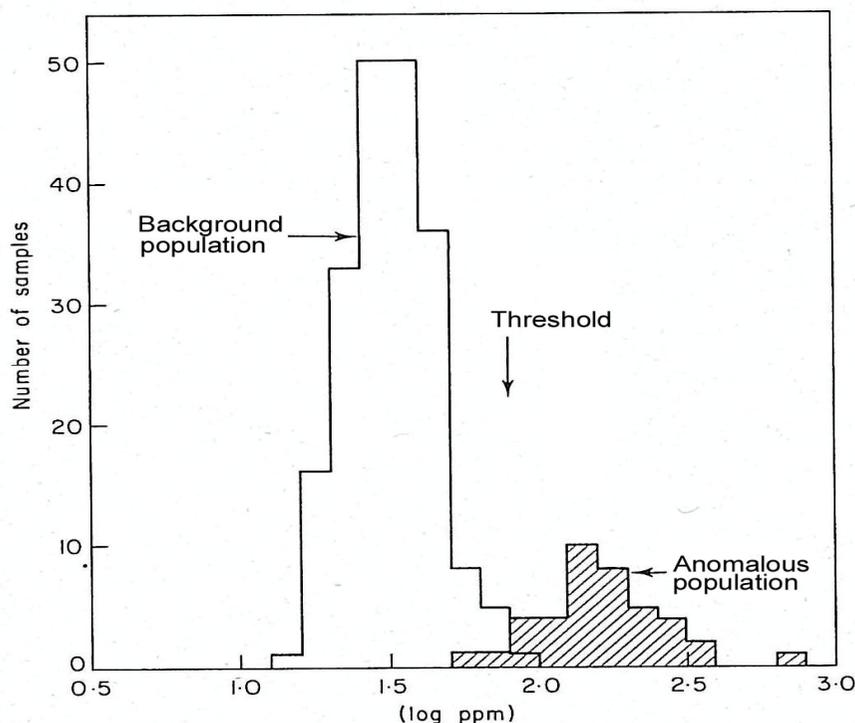
鉱床探査の深部化
(潜頭鉱床の探査)



鉱脈鉱床の変質帯
(秋田県, 大葛鉱脈鉱床)

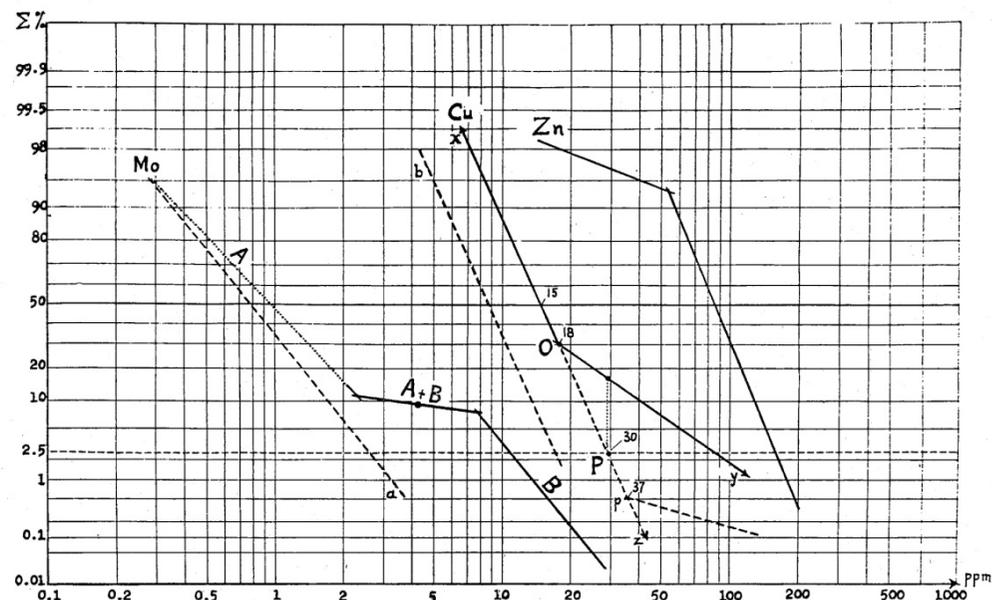
※地化学探査で地化学異常を把握することは、後背値とのしきい値を把握すること同義である。

従来技術と問題点



地化学探査データにおける後背値と異常値の頻度分布のイメージ(Rose et al., 1979).

基本的な原則は、地化学的な後背値と異常値のそれぞれが正規分布を示し、両者の境界にしきい値が設定されることにある。



Cu, Zn, Moの累積頻度分布図(Lepeltier, 1969).
縦軸は正規分布確率目盛.

常用対数で正規分布に従う一つの母集団に属するデータが、累積頻度分布において直線を示し、それら直線の屈曲点からしきい値を読み取れる。類似手法としてSinclair (1976).

従来技術と問題点

実際のデータでは, Lepeltier (1969)のような屈曲点を明確に見いだせないことが多い.

大津ほか(1984)は, 非線形最小二乗法を適用して複合母集団を単元母集団に分割する手法を提示したが, 計算結果はあくまでも近似解であるとしている.

通商産業省資源エネルギー庁(1986)は, 便宜的な手法として常用対数での平均値+ $2 \times$ 標準偏差でしきい値を決定する手法を提示した. しかし, 以下の問題点がある.

- 1) 化学分析の検出限界未満のデータに対して検出限界値の半分の値を与えることで, 本来の平均値や標準偏差が得られない.
- 2) 平均値+ $a \times$ 標準偏差として, a に与えるべき数値の妥当性が不明確であり, 明確に後背値と異常値の母集団を分離識別するものではない.
- 3) 鉱床地域の岩石がある元素に富んでいて, その平均値自体が後背値に比べて異常である場合に, 平均値+標準偏差の倍数を計算することでしきい値が高くなりすぎて, 地化学異常が適切に抽出されないことがあり得る.

新技術の考案

平成8～10年度にエキスパートシステムの開発に従事，コンピュータシステムの開発ではなく，鉱床探査のための知識データを集約してルールベースの策定を行った。その一環として，データの分散の大きさに着目して有望データの占有率を計算する方法を考案した。

この計算方法は，通商産業省資源エネルギー庁（1999）平成10年度鉱物資源探査技術開発調査報告書エキスパートシステムの開発報告書として公知の技術であり，これを地化学探査のデータ解析に応用を図った。

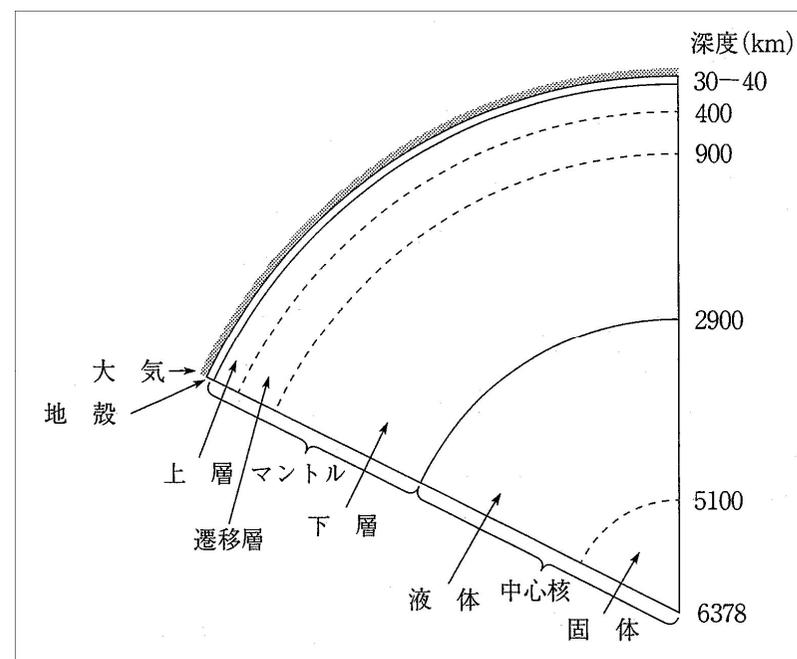
結果として，地化学異常のしきい値を計算することは可能であったが，その際には，目標とする金属品位を主観的（人為的）に設定しなければならなかった。

新技術の考案

客観的なデータ解析を実現するためには、客観的な尺度を用いることが必要であると考え、元素の地殻存在度を用いる手法を考案した。

地殻存在度とは、地球内部構造のうち地殻での元素の平均含有量として、理科年表や地学辞典に掲載されているものであり、上部大陸地殻に関するRudnick and Gao (2003)のデータを用いることにした。

地化学探査では地殻のデータを対象としている。



地球の内部構造(西村, 1991).

新技術の考案

地化学探査データの平均値が地殻存在度であっても構わないと仮定する.

※対象とする地化学探査データが実際の平均値ではなく、地殻存在度を平均値とする正規分布に従う場合の上限値を計算で求め、それより上位は正規分布に従わないことから異常値と捉え、直近上位の値をしきい値とすることを考案した.

※類似手法はあったものの、データ解析をデータの上位のみならず、上位と下位の双方から解析することで特許性が認められた.

新技術の計算方法

※計算方法1

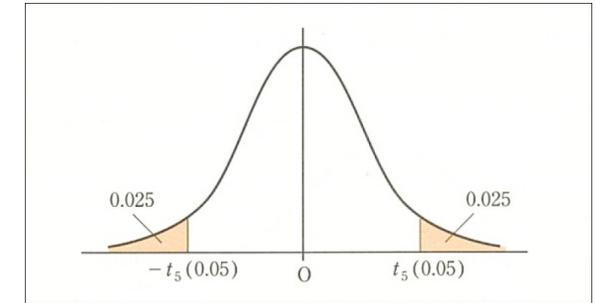
1) 地殻存在度の値が平均値(μ)であるとの帰無仮説をたてる.

2) n 件のデータを x_{1-n} とし, これらの平均値を \bar{x} , 分散 $S^2 = 1/n \sum \{(x_1 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2\}$ を計算.

$t = (\bar{x} - \mu) / \sqrt{\frac{S^2}{(n-1)}}$ で求められる検定統計量が自由度 $n-1$ の t 分布に従うことを利用して検定する.

3) 有意水準5%の t 分布の境界値 $t_{(n-1)}(0.05)$ を t 分布表から読み取り, 検定統計量の絶対値 $>$ 境界値ならば対立仮説が採択され, データは μ を平均値とする正規分布の標本とみなされない, 一方, 検定統計量が \pm 境界値の範囲なら, 対立仮説が棄却され, データは μ を平均値とする正規分布の標本とみなされる.

4) 対象データが正規分布の標本とみなされるまで, 上位と下位のデータを削除する. その際には二分探索法を用いても構わない.



正規分布の有意水準5%での採択域と棄却域(吉野・岡安, 1995).

新技術の計算方法

※計算方法2

1) n件のデータは自由度nの χ^2 分布に従うとして、信頼係数95%の信頼区間にて標準偏差(σ)は、 $\sum_{i=1}^n (xi - \mu)^2 / \chi_n^2(0.025) \leq \sigma^2 \leq \sum_{i=1}^n (xi - \mu)^2 / \chi_n^2(0.975)$ である。

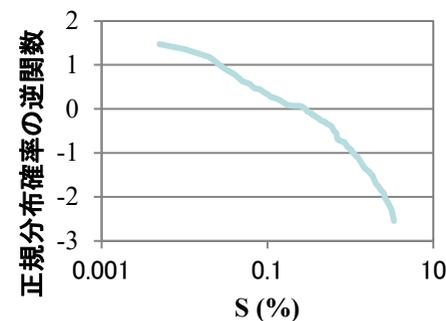
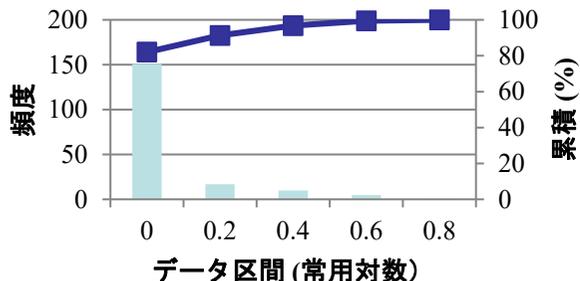
2) χ^2 分布表から値を読み取って σ^2 を計算する。ただし、 $n > 100$ の場合においては
 $\sqrt{2\chi^2} - \sqrt{2n - 1}$ が近似的に規準正規分布N(0,1)に従うとして計算により求める。

3) 最大値として、 $\mu + \sigma$ を計算する(常用対数で計算して実数に戻す)。

4) 対象データが当初から正規分布の標本と見なされる場合には計算方法1が使えないが、計算方法2ではしきい値を計算できる。

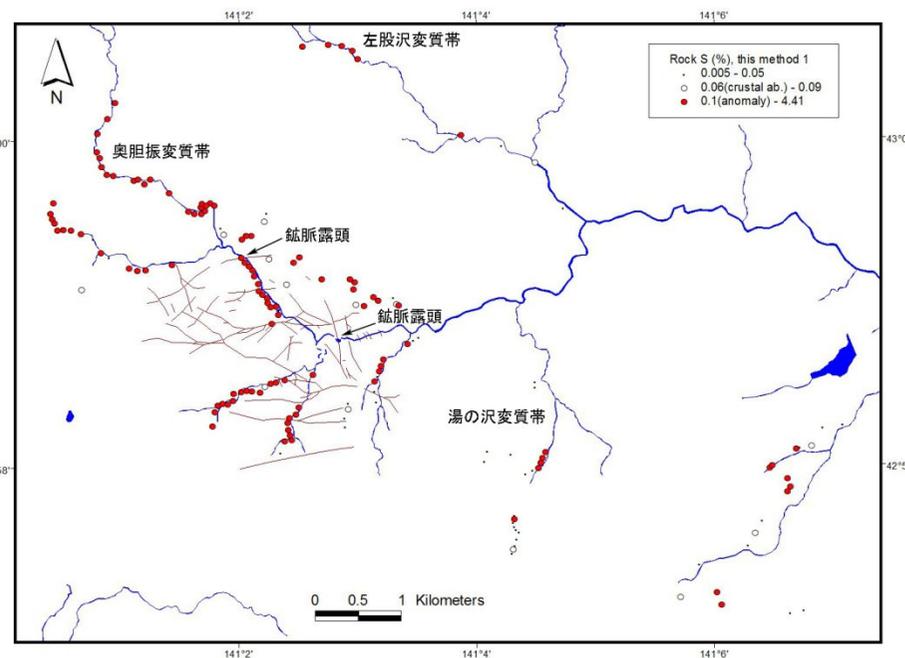
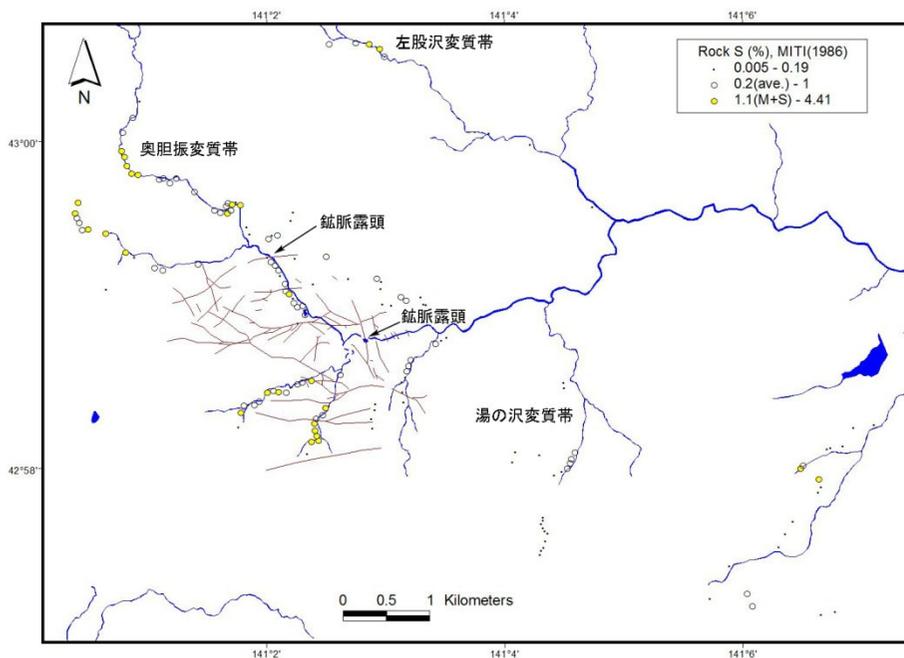
従来技術との比較(北海道, 豊羽鉱脈鉱床)

通商産業省(1986)
の岩石試料184件,
赤は地化学異常値.
黄は準異常値.



硫黄分析値の頻度分布図.

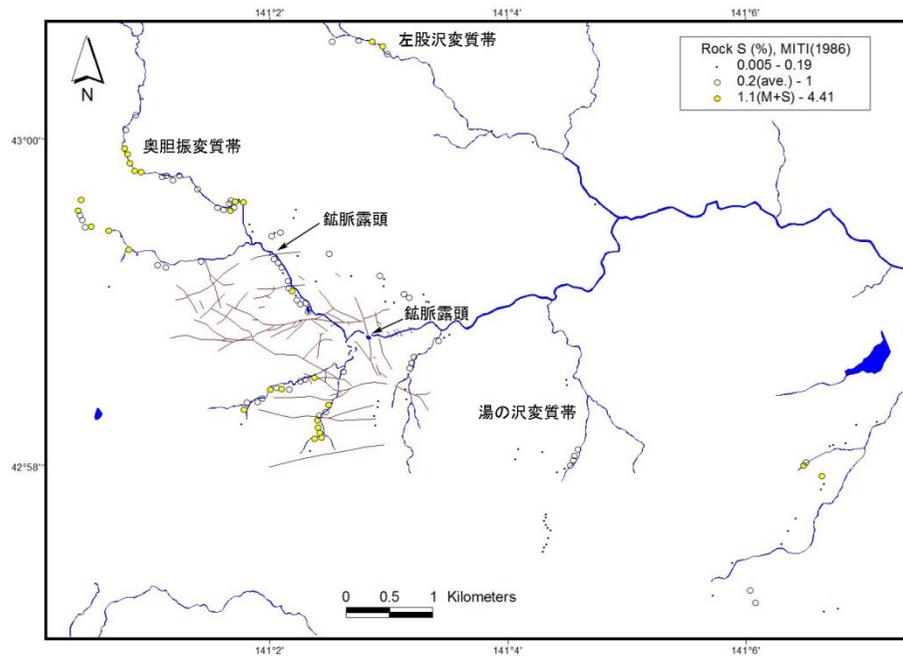
Lepeltier (1969)の手法では屈曲点が見いだされない.



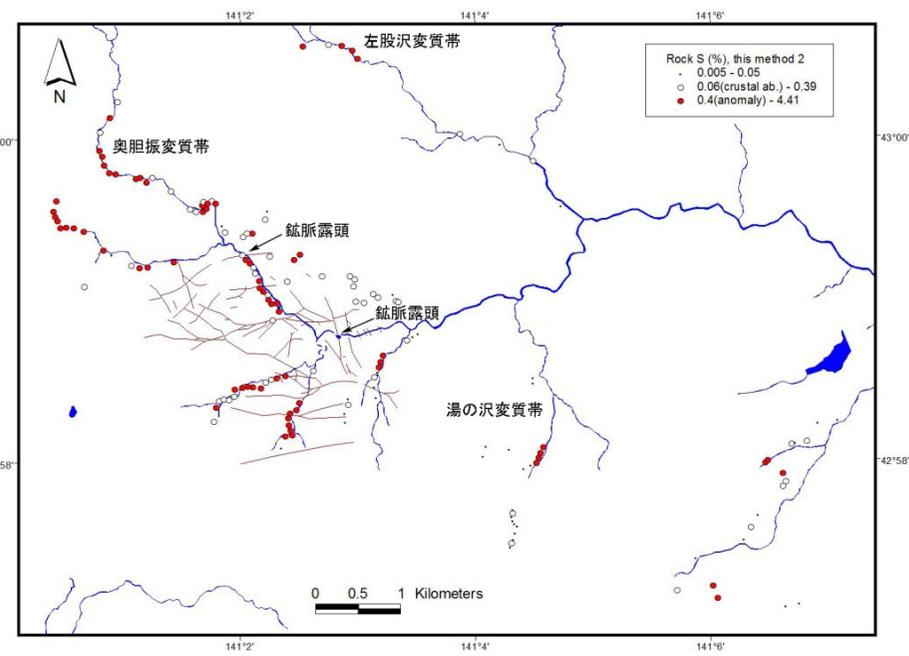
通産省(1986)の手法による硫黄の地化学異常.
平均値 = 0.2 %, 平均値 + 2 × 標準偏差 = 6.1 %.
(地殻存在度 0.06 % に対して平均値 0.2% 自体が異常である.)

計算方法1による硫黄の地化学異常.
地殻存在度 = 0.06 %, しきい値 = 0.1 %.

従来技術との比較(北海道, 豊羽鉱脈鉱床)



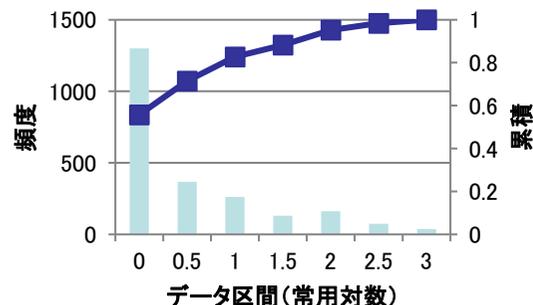
通産省(1986)の手法による硫黄の地化学異常(再掲).
 平均値 = 0.2 %, 平均値 + 2 × 標準偏差 = 6.1 %.
 (地殻存在度 0.06 % に対して平均値 0.2% 自体が異常である.)



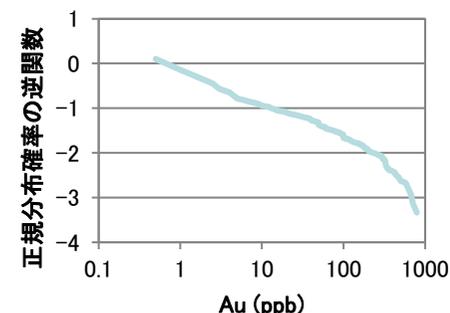
計算方法2による硫黄の地化学異常.
 地殻存在度 = 0.06 %, しきい値 = 0.4 %.

従来技術との比較(鹿児島県, 串木野鉍脈鉍床)

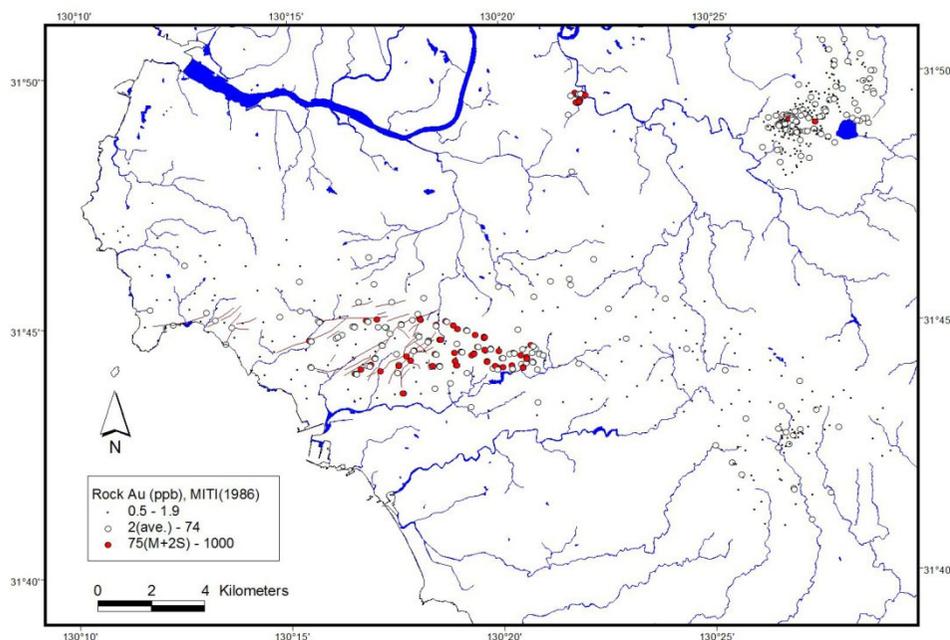
経済産業省(2004)
の岩石試料1,260件,
赤は地化学異常値.
一部を下図に示す.



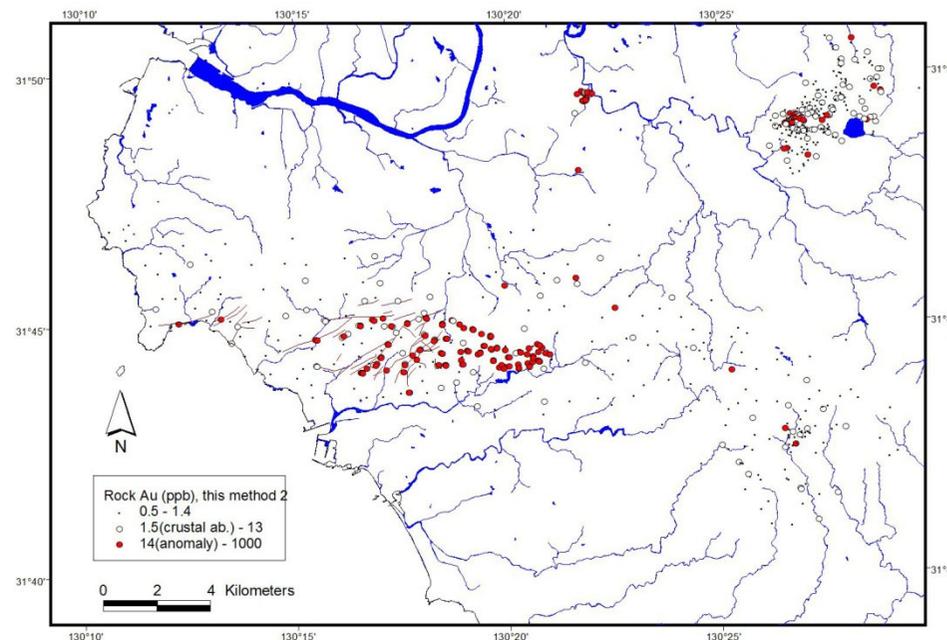
金分析値の頻度分布図.



Lepeltier (1969)の手法では屈曲点が見いだされない.



通商産業省(1986)の手法による金の地化学異常.
 平均値 = 2ppb, 平均値+2 × 標準偏差 = 75ppb.
 (平均値が地殻存在度を上回っている.)

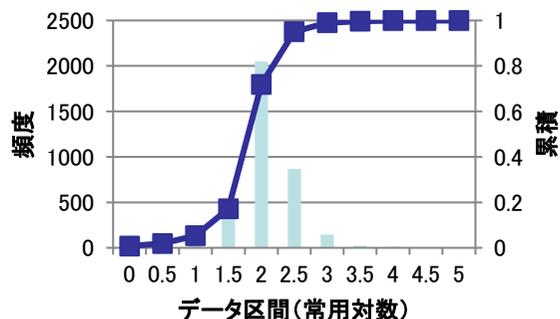


計算方法2による金の地化学異常.
 地殻存在度 = 1.5ppb, しきい値 = 14ppb.
 (計算方法1では3ppbがしきい値.)

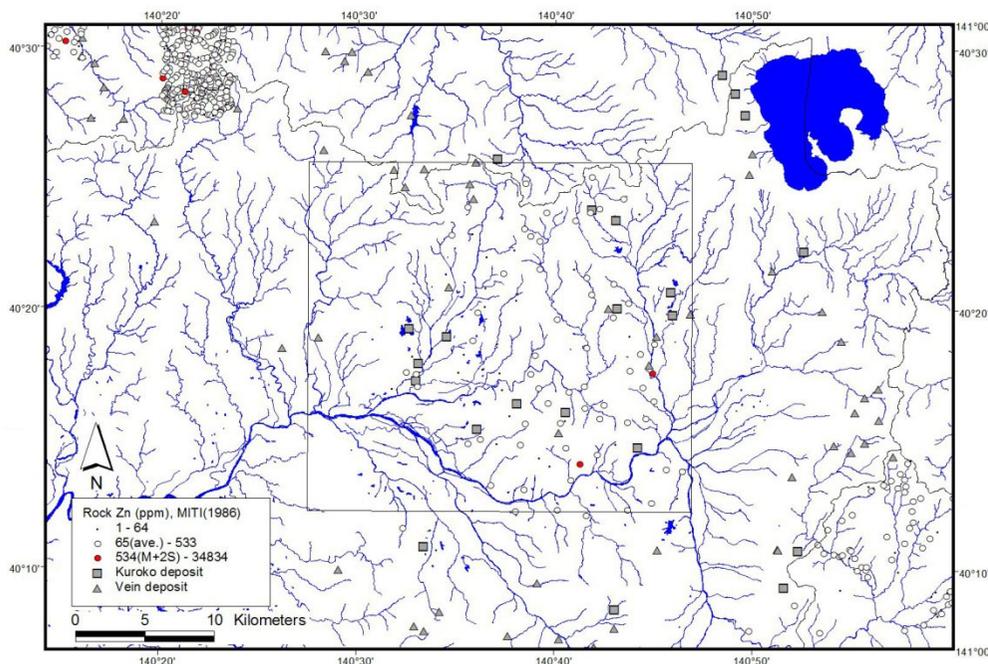
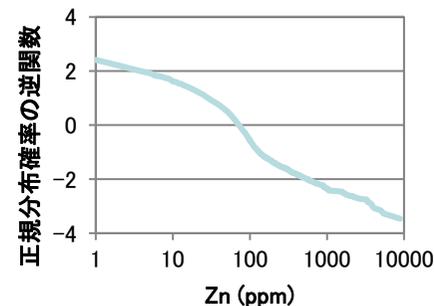
従来技術との比較(秋田県, 黒鉱鉱床と鉱脈鉱床)

経済産業省(2004)
の岩石試料3,713件,
赤は地化学異常値.
一部を下図に示す.

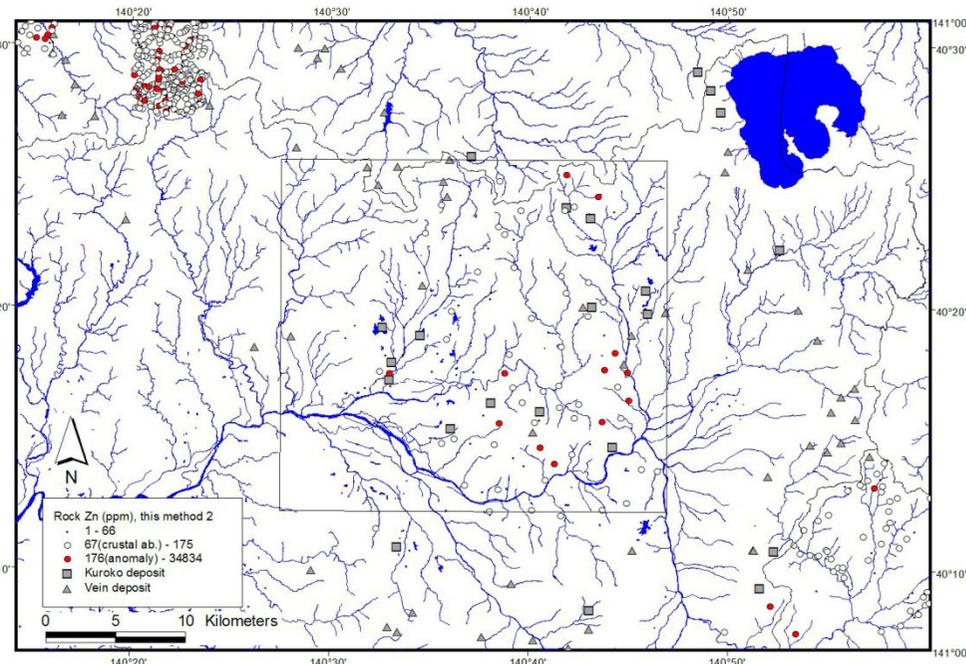
データは正規分布に
従っているので計算
方法1は使えない.



亜鉛分析値の頻度分布図. Lepeltier (1969)の手法では屈曲点が見いだされない.



通商産業省(1986)の手法による亜鉛の地化学異常.
平均値 = 65ppm, 平均値+2 × 標準偏差 = 534 ppm.



計算方法2による亜鉛の地化学異常.
地殻存在度 = 67 ppm, しきい値 = 176ppm.

想定される用途

想定される用途は、金属鉱床を発見するための地化学探査である。

鉱床の存在を示唆する地化学異常を、従来技術よりの確に把握することが出来る。

対象とするデータの実際の平均値ではなく、地殻存在度を理想的な平均値と仮定し、その場合に正規分布に従わないデータを異常値として識別している。また、データ解析をデータの上位のみならず、上位と下位の双方から解析することを特徴としている。

このようなデータ解析手法は、鉱床探査以外の分野にも応用が利く可能性があると思われる。

実用化に向けた課題

技術コメント

「近年では地化学データに特化して解析するソフトもあるが、本手法は特に分析値が検出限界以下のものが多い場合など、後背値と異常値のしきい値」を求めることが困難な場合にも適用でき、企業との共同探鉱案件等を評価する際に有効な手法である。」

「本手法は日本の鉱床地帯で実際に検証されていることから、日本と類似する植生地域や鉱床タイプが存在する地域において、鉱床探査を行う企業が実施許諾に関心を示す可能性がある。」

実用化に向けた課題

$$\sum_{i=1}^n (xi - \mu)^2 / \chi_n^2(0.025) \leq \sigma^2 \leq \sum_{i=1}^n (xi - \mu)^2 / \chi_n^2(0.975)$$

S地殻存在度		S(%)	log ₁₀ S	(X-M) ²	Sigma(X-M) ²	n	正規分布確率	逆関数	χ ²	σ ²	σ	M+σ	実数
0.0621		4.41	0.644439	3.427484	132.7	171	0.975	1.959964	208.6	0.64	0.80	-0.409	0.39
-1.206908		3.35	0.525045	2.999661		171	0.025	-1.95996	136.2	0.97	0.99	M-σ	実数
		3.15	0.498311	2.90777								-2.194	0.01
		2.86	0.456366	2.766481									
Number	171	2.6	0.414973	2.630499									
Max (ppm)	4.41	2.56	0.40824	2.608703									
Min (ppm)	0.01	2.33	0.367356	2.478307									
Average	0.3	2.21	0.344392	2.406533									
SD (c.log)	0.636	2.05	0.311754	2.306334									
		1.98	0.296665	2.260732									
		1.92	0.283301	2.220724									
		1.88	0.274158	2.193556									
		1.85	0.267172	2.172911									

(中略)

		0.02	-1.69897	0.242125									
		0.02	-1.69897	0.242125									
		0.02	-1.69897	0.242125									
		0.01	-2	0.628995									
		0.01	-2	0.628995									
		0.01	-2	0.628995									
	Total		-102	132.6992									
	AVE		-0.5973										
	SD		0.635921										
	No		171										

豊羽鉱床の硫黄に関する計算方法2のExcelシート.

計算結果のマップへの表示は市販のGISソフトウェアを用いており、特許技術の対象外である。

企業への期待

企業への期待として、鉋床探査を行う企業には本手法の活用が期待される。

鉋床探査を行わない企業であっても、他分野への応用が利く可能性があるため、何らかのソフトウェアを構築する際には、本手法の応用を一部に組み込むことが期待される。

本手法を実施する際には、是非ご一報をお願いしたい。

本技術に関する知的財産権

発明の名称 : 地殻データ解析方法, 地殻データ解析プログラム及び地殻データ解析装置

出願番号 : 特願2015-531736

特許番号 : 特許第6429398号

出願人 : 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物
資源機構

発明者 : 両角春寿

産学連携の経歴

2014年 資源地質学会にてポスター発表

両角春寿 (2014) 地殻存在度を平均値に用いた地化学探査データの解析手法について. 資源地質学会講演要旨集, P-26.

2015年 資源地質学会誌に論文掲載

両角春寿 (2015) 地殻存在度をしきい値決定に用いた地化学探査データの解析について, 資源地質, 65, 85-90.

お問い合わせ先

(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構
総務部 知的財産推進課

TEL 03-6758-8020

e-mail patent@jogmec.go.jp

引用文献

- ・ 神原洋・三箇智二・大浦利行・汲田啓一 (1989) 豊羽鉬山信濃ひの鉬化作用, 鉬山地質, 39, 107-122.
- ・ 経済産業省資源エネルギー庁 (2004) 平成15年度広域地質構造調査, 国内調査総合評価, 246p.
- ・ Lepeltier, C. (1969) A simplified statistical treatment of geochemical data by graphical representation. *Econ. Geol.*, 64, 538-550.
- ・ 両角春寿 (2015) 地殻存在度をしきい値決定に用いた地化学探査データの解析について, 資源地質, 65, 85-90.
- ・ 西村雅吉 (1991) 環境化学, 裳華房, 156p.
- ・ 大津秀夫・窪田亮・松田陽一 (1984) 地化学データの頻度分布分割法. 鉬山地質, 34, 51-56.
- ・ Rose, A., Hawkes, H.E. and Webb, J.S. (1979) *Geochemistry in Mineral Exploration*. Second Edition, Academic Press, London, 657p.
- ・ Rudnick, R.L. and Gao, S. (2003) The Composition of the Continental Crust, p1-64. In *The Crust* (ed. R.L. Rudnick) Vol. 3, *Treatise on Geochemistry* (eds. H.D. Holland and K.K. Turekian), Elsevier-Pergamon, Oxford.
- ・ Sato, T. (1974) Distribution and geological setting of the kuroko deposits. *Geology of Kuroko deposits, Mining Geology Special Issue*, 6, 1-9.
- ・ Sinclair, A. J. (1976) Applications of probability graphs in mineral exploration. *Assoc. Expl. Geochem., Special 4*, 95p.
- ・ 通商産業省資源エネルギー庁 (1986) 昭和60年度広域地質構造調査, 構造解析総合解析報告書, 641p.
- ・ 通商産業省資源エネルギー庁 (1999) 平成10年度鉬物資源探査技術開発調査報告書エキスパートシステムの開発. II-1~II-113.
- ・ 吉野崇・岡安隆照 (1995) 数理統計学, 培風館, 116p.