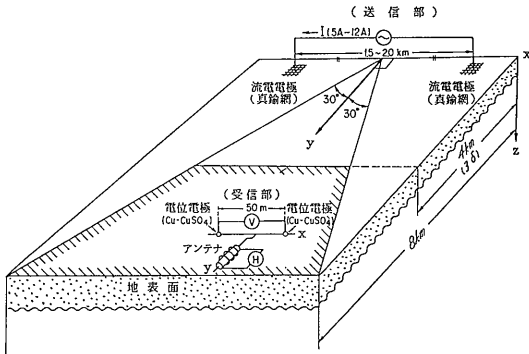


# 浅熱水性鉍脈型金鉍床の鉍化作用による比抵抗異常について

辻本 崇史 (金属鉍業事業団)

TAKAFUMI TSUJIMOTO



第1図

## 1. はじめに

金属鉍業事業団では CSAMT 法 (Controlled Source Audio Frequency Magnetotelluric Method) を昭和56年度に我が国で初めて導入以来 各地での試験調査を経て昭和58年度より国内外の鉍物資源探査に積極的に利用しています。今回は この中から 昨今とくに注目されている 菱刈鉍床に代表される浅熱水性鉍脈型金鉍床についての調査例のいくつかを紹介し 鉍化作用に伴う比抵抗異常 (電気伝導性異常) について考えてみたいと思います。

## 2. CSAMT 法の概要

CSAMT 法は 大地の比抵抗構造の解明 換言すれば大地の電気伝導性を明らかにすることを目的とした物理探査法であり その手法的特徴を一言で言えば 数 Hz から数 KHz のいわゆる可聴周波数帯域の電磁波に注目する 人工信号源を利用した地磁気地電流法 (MT法) と位置づけることができます。従って その基礎理論は 最近我が国でも地熱資源の探査法として積極的に用いられる中で 広く知られるようになってきたMT法と同様です。しかし 本手法は 人工信号源を利用するという点でSN比の高いデータが得られる反面MT法の理論が成立する場とするため 各測定点で対象とする電磁波を近似的に平面波として扱えることが必要となりこのため測定系に種々の制約があります。

測定系の概略図を第1図に示します。人工信号源として 電極間隔約 2 km の両端設置の電線より10A程度の電流を流します。私達が主として用いてきたシステム (ZONGE 社製) での使用周波数は 4Hz 8Hz 16Hz ……、2048Hz の 10 周波数を基本としていますが 1Hz や 2Hz を用いることもあります。測定領域は 平面電磁波の仮定の成立やSN等を考慮して 図の斜線の領域が一般的ですが 各調査地域の平均的な比抵抗レベルやノイズレベルにより多少の変動はあります。また比抵抗の高い地域では 送受信間隔が 10km 程度離れても 低周波領域で平面電磁波の仮定が成立しないこともあり このような平面電磁波の仮定が成立しない場 (=アーフィールドと呼ばれている) での解析法が CSAMT 法の大きな課題となっています。

各測定点では 図にも示すように 送信部の両電極を結んだ方向と平行な電場と これと直交する方向の磁場の強度などを測定します。これらの値より 次式により周波数ごとに大地の見掛比抵抗を求めることができます。

$$\rho^a = \frac{1}{5f} \left| \frac{Ex}{Hy} \right|^2 \quad (1)$$

ここに

$\rho^a$  : 大地の見掛比抵抗 ( $\Omega m$ )

$f$  : 流電電流の周波数 (Hz)

$Ex$  : 地表面における電位傾度 ( $mV/Km$ )

$Hy$  : 地表面における磁場水平成分 ( $\gamma$ )

このようにして求めた見掛比抵抗の深度の目安として 表皮深度 (Skin Depth) というものが利用されます。この表皮深度とは 均質な大地 (比抵抗  $\rho$ ) に入射した電磁波のエネルギーが  $1/e$  (約37%) にまで減衰する深度であり 次式により表されます。

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2)$$

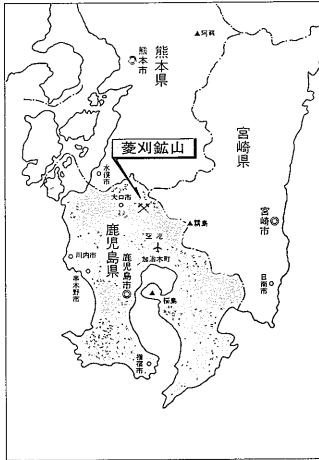
ここに

$\delta$  : 表皮深度 ( $m$ )

$\rho$  : 大地の比抵抗 ( $\Omega m$ )

$f$  : 電磁波の周波数 (Hz)

実際には この表皮深度を  $\sqrt{2}$  で割った値が現実的な



第2図

有効深度(可探深度)とされています。例えば 大地の比抵抗を  $50\Omega\text{m}$  とすると  $2048\text{Hz}$  で約  $50\text{m}$   $8\text{Hz}$  で約  $900\text{m}$  となります。従って CSAMT 法の可探深度は各調査地域の比抵抗レベルに大きく左右はされるもの一般には  $500\sim 1000\text{m}$  程度であり 金属鉱床探査には充分と言えましよう。

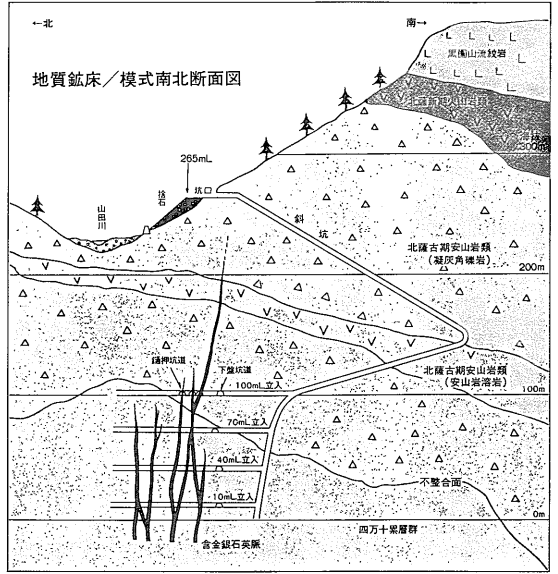
調査データから(1)式により計算される見掛比抵抗は大地の平均的な値としてとらえることができますが この場合の深度の目安は この値を(2)式の  $\rho$  に代入して計算される表皮深度を  $\sqrt{2}$  で割った値にほぼ相当すると考えてよいでしょう。(例:  $2048\text{Hz}$  で見掛比抵抗  $50\Omega\text{m}$  → 深度  $50\text{m}$  程度までの平均的な比抵抗が  $50\Omega\text{m}$ )

定量的な解析としては 各周波数でのデータを用いた一次元解析(水平多層構造モデルを仮定した解析)が一般的ですが 二次元解析や複数の信号源を用いたテンソル解析も一部では実施されています。

CSAMT 法は 一端 人工信号源を設置すれば 各測定点で 従来の比抵抗垂直探査法のように長い電線を敷設する必要がなく 簡便に測定できることから とくに我が国のような植生地域に適した手法と言えるでしょう。ニアフィールドの問題など課題も多いですが 今後より一層の解析技術の向上が期待されます。

### 3. 菱刈鉱山での調査例

最初に菱刈鉱山での調査例を紹介します。菱刈鉱山は 昭和56年度に当事業団が CSAMT 法を導入して我が国で初めて試験調査を実施した記念すべき地ですが 菱刈鉱山は当時まだ存在せず 前年度に当地で実施した広域調査ボーリングにより高品位の金鉱脈に着脈したということで大きな期待が寄せられていた時期でした。



第3図

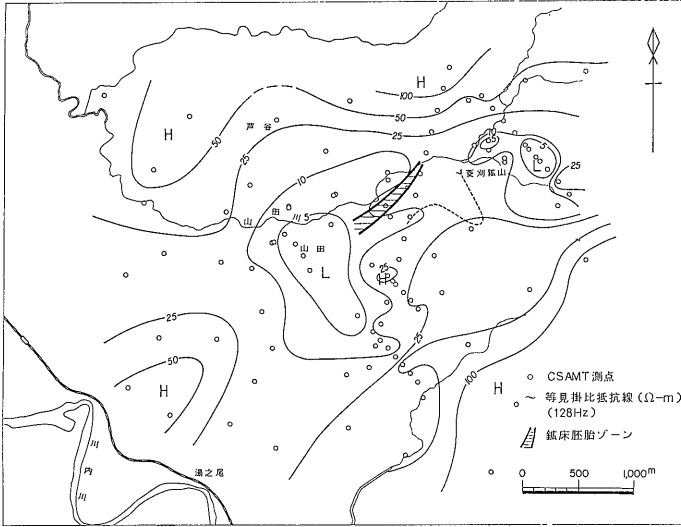
今回のデータには その後 企業探鉱として住友金属鉱山(株)が取得されたデータが多数含まれています。

菱刈鉱山は 第2図に示すように 鹿児島県の北部大口市の近く(車で約15分)に位置します。

鉱脈は東西系を主体としており 潜頭性の鉱床と呼べるものです。鉱脈の走向方向にほぼ直交する南北方向での地質鉱床の模式断面図を第3図に示します。鉱脈は 当地域の基岩岩である四万十層群(白亜紀の堆積岩類)と これを不整合に覆うプロピライト化した安山岩との境界部に発達しています。この安山岩は 最近では菱刈下部安山岩類と呼ばれており 年代測定により第四紀に噴出したことが明らかになっています。また 鉱化作用の時期も 100 万年前後より若いごく最近の活動であることが示されています。

第4図に  $128\text{Hz}$  での見掛比抵抗平面図を示します。菱刈鉱床付近に明瞭な低比抵抗帯の存在することがわかります。また 低比抵抗帯の伸びの方向は 大局的には東北東-西南西方向と鉱脈の走向方向に一致しています。因みに 周波数  $128\text{Hz}$  比抵抗  $10\Omega\text{m}$  の場合の有効深度は約  $100\text{m}$  となります。この低比抵抗帯は 後の企業探鉱により 鉱床の上部周辺部に発達する粘土化帯に起因することが明らかにされています。

なお この低比抵抗異常は 昭和53年度に実施された電気探査(シュランベルジャー法)と空中電磁探査により把握されていたものであり この付近が高重力異常を示すことに加えてボーリング実施の動機づけとして大きな役割を果たしたことは周知の通りです。



第4図

#### 4. 千歳鉍山舞鶴本鍾での調査例

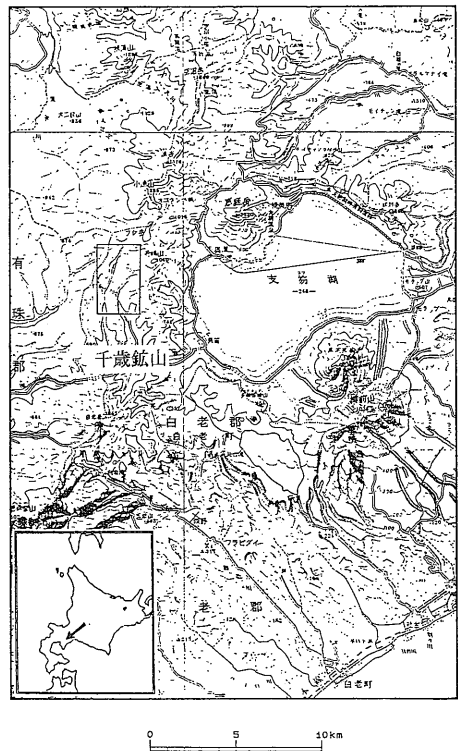
次に千歳鉍山舞鶴本鍾での調査例を紹介します。千歳鉍山は 第5図に示すように 北海道の西南部 支笏湖の西方約4 km に位置します。千歳鉍山は 本鉍山の主鉍床である福神沢鉍床群を対象として 最近まで稼働されていました。累計産出量は約23トン 平均金品位は約14g/トンです。今回 調査対象とした舞鶴本鍾は 福神沢鉍床群の北方約2 km に位置する舞鶴鉍床群の主脈ですが 30年以上も前に採掘を休止しています。累計産出量は約4トン 平均金品位は約9g/トンと記録されています。図上 長方形で囲まれた範囲は 昭和60年度広域調査千歳地域物理探査 (CSAMT法) の調査範囲ですが 今回のデータはこの調査の際に取得されたもので 舞鶴本鍾は この範囲内の中央南端部付近に位置します。

本地域は 西南北海道グリーンタフ地域の東縁部にあたり 新第三系の火山岩類と これを不整合に覆う第四系の火山噴出物よりなります。鉍床は 第三紀中新世のプロピライト化した安山岩を主体とする美笛川層とこれを貫く石英安山岩及び安山岩の貫入岩を母岩とする含金石英脈であり 舞鶴本鍾は この貫入岩を母岩としています。

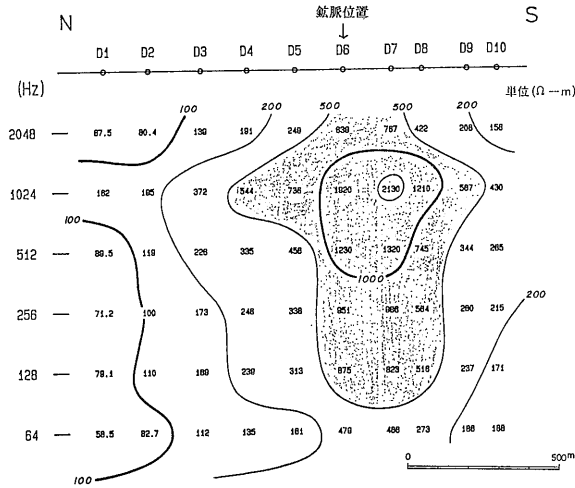
第6図は 舞鶴本鍾の走向方向にほぼ直交する 南北方向に設定した測線上での見掛比抵抗断面図で D1~D10が測定点です (測定点間隔約150m)。舞鶴本鍾の位置は 断面図上で測定点D6付近に対応しますが 鉍脈は地表面付近よりほぼ鉛直下方に延びています。CSAMT

法では 見掛比抵抗断面図の縦軸は周波数であり 各周波数での見掛比抵抗の値を図のように対応する測定点 (横軸) の下にプロットします。CSAMT法の概要の所でも述べましたように より低周波での見掛比抵抗ほど より深部の情報を反映することから このような表現法により比抵抗構造の特徴を定性的に把握することが可能です。32Hzより低周波では ニアフィールド現象により見掛比抵抗の急激な上昇が見られるので この図では 64Hzより高周波での見掛比抵抗のみを示しました。舞鶴本鍾近くに対応するD6 D7を中心として 明瞭な高比抵抗帯が存在しますが この高比抵抗帯は 鉍化作用に伴って生じたと考えられる珪化変質帯に起因するものと解釈されています。

第7図は 各測定点での一次元解析に基づく 比抵抗構造推定断面図です。厳密には二次元的な考察が必要ですが 舞鶴本鍾付近に1000Ωmを越える高比抵抗帯の発達することは明らかと言えましょう。



第5図



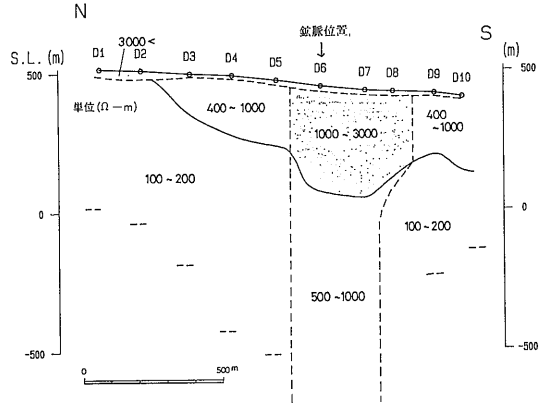
第6図

### 5. 佐渡鉱山地域での広域調査例

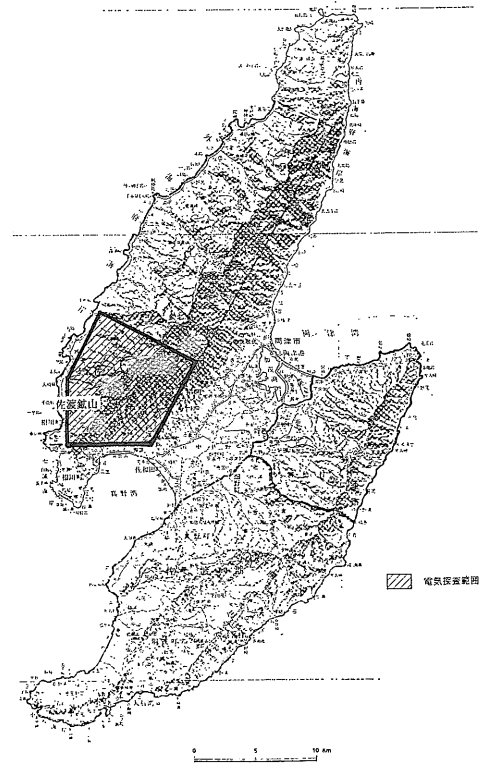
次に佐渡鉱山地域での広域調査例を紹介します。佐渡鉱山はその歴史も古く、おそらく我が国で最も有名な金山と言えるでしょう。現在までの累計産出量も約78トンと、我が国の数ある金山の中でも最多であり（平均金品位は約5g/トン）現在でもなお小規模に採掘が続けられています。佐渡鉱山は第8図に示すように佐渡島の中央部に広がる国中平野の西方で、大佐渡山脈の南西端、佐渡郡相川町に位置します。図上、実線で囲まれた範囲は、昭和61年度広域調査佐渡地域物理探査の内、CSAMT法が行われた範囲ですが、今回のデータはこの調査により取得されたものです。

佐渡は東北日本グリーンタフ地域の西縁部に位置しており、今回の調査対象地域には第三系及び第四系が分布しています。佐渡鉱床は第三系の最下位層である古第三紀漸新世の石英安山岩質～流紋岩質の火砕岩よりなる入川層と、その上位に位置する新第三紀中新世最下部の安山岩及び同質の火砕岩を主体とした相川層を母岩とする鉱脈型金鉱床です。

第9図は1024Hzでの見掛比抵抗平面図（単位は $\Omega m$ ）です。測点密度は2点/km<sup>2</sup>弱ですが、佐渡鉱山付近では相対的に高い測点密度となっています。佐渡鉱山付近に対応して明瞭な高比抵抗帯が存在しますが、この高比抵抗帯は、鉱化作用に伴って生じたと考えられる珪化変質帯に起因するものと解釈されています。この高比抵抗帯の南東部にも小規模な高比抵抗帯が見られますが、この付近で同年度に実施されたボーリングにより有望な鉱化帯を把握しており、以後、精力的な探査が行われています。また、佐渡鉱山北方に見られる高比抵抗帯はこの付近に分布するとされる入川層が比較的高い比抵抗



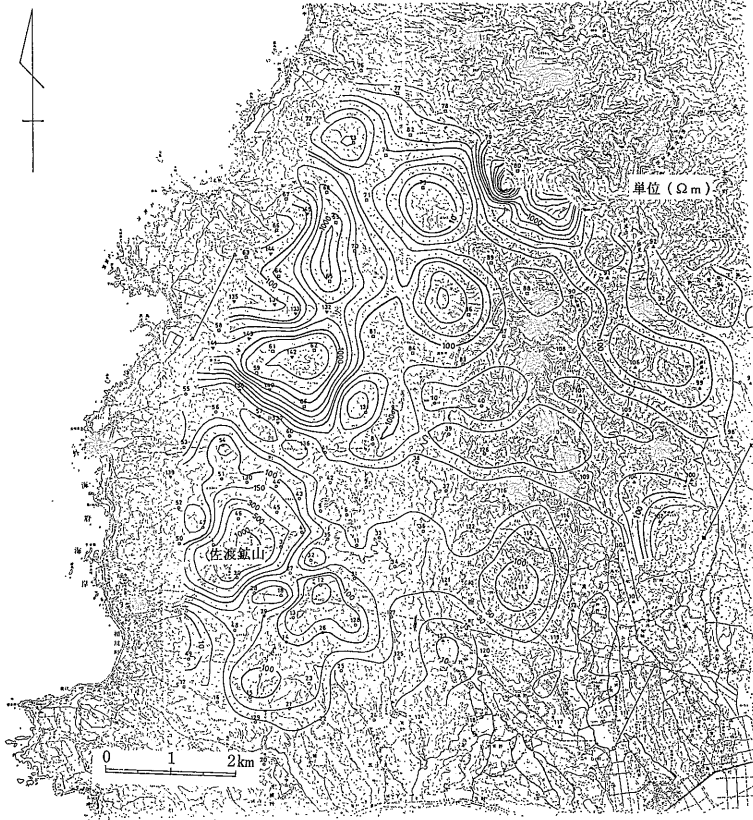
第7図



第8図

抗を示すことから、これに起因するものと考えられることもできます。しかし、1000 $\Omega m$ 程度のかかなり高い値であること、そしてこの付近にも金の鉱徴が知られていることから、鉱化作用による影響が付加されている可能性もあり、より正確な地層区分やより精密な電気探査などにより、今後さらに検討する必要があるでしょう。

第9図



## 6. 電気検層調査例

これまでの三例からもわかるように 同タイプと考えられる鉍脈型の金鉱床であっても その比抵抗異常のパターンは異なります。今回紹介できなかった調査結果も含め 鉍脈型の金鉱床に伴う比抵抗異常は 大局的には高比抵抗異常と低比抵抗異常の両タイプに分れるようです。

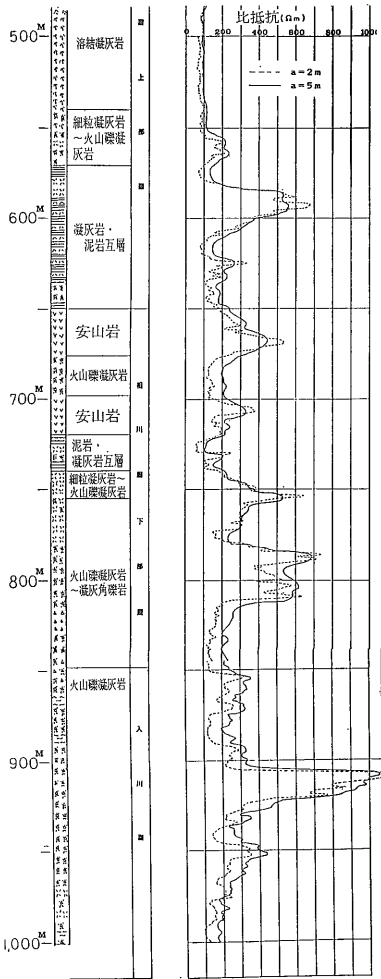
ところで 私達いわゆる物探屋と呼ばれている人達は 低比抵抗異常→鉍化変質に起因という短絡的発想をする場合がよくありますが 鉍化変質といっても具体的にどのような変質鉱物が出現しているのかを考える必要があります。また逆に 私達がそれを知らうとして変質記載を見ると 珪化変質という言葉はかなり具体的ですが 粘土化変質という言葉にはあいまいさがあり 人によっても使い方に若干の相違があるようです。地学辞典には 粘土化作用とは 熱水液の作用により岩石が粘土鉱物に交代される作用とあり 緑泥石化作用 絹雲母化作用 カオリン化作用 パイロフィライト化作用 モンモロロナイト化作用などと書かれています。しかし 粘土化作用という言葉 を 緑泥石化作用や絹雲母化

作用と同列の言葉として記載している場合もよく見かけ 私達にはわかりにくいものとなっています。モンモロロナイト化作用が卓越する場合や いわゆる一般の人達が粘土という言葉から連想する 水を含み柔らかくなっている状態に対し 粘土化という言葉が使われていることも多いように感じます。どちらにしても 私達にとっては統一的・具体的な記載が望まれます。

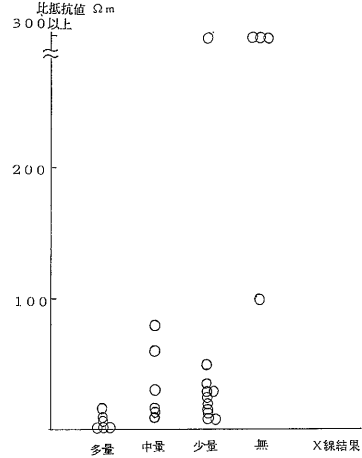
ここで 比抵抗電気検層のデータを二・三紹介し 比抵抗異常と鉍化変質作用との関連性を検討する場合 どのような変質鉱物が出現しているのかを知ることがいかに重要であるかについて述べたいと思います。

### ○ 検層例 1

昭和61年度に 佐渡地域広域調査の一環として 佐渡鉱山南東方で実施された ボーリング孔 (61MASD-2: 1000m垂直) 利用による比抵抗検層結果を第10図に示します。ボーリング地点は 先に述べた CSAMT法による佐渡鉱山地域での広域調査により 佐渡鉱山南東方で把握された小規模な高比抵抗帯付近に対応します。第10図は 深度 500m 以深の結果を示したもので 点線は電極間隔 2m 実線は電極間隔 5m の場合で 横軸の一目盛は100Ωmに相当します。



第10図



第12図

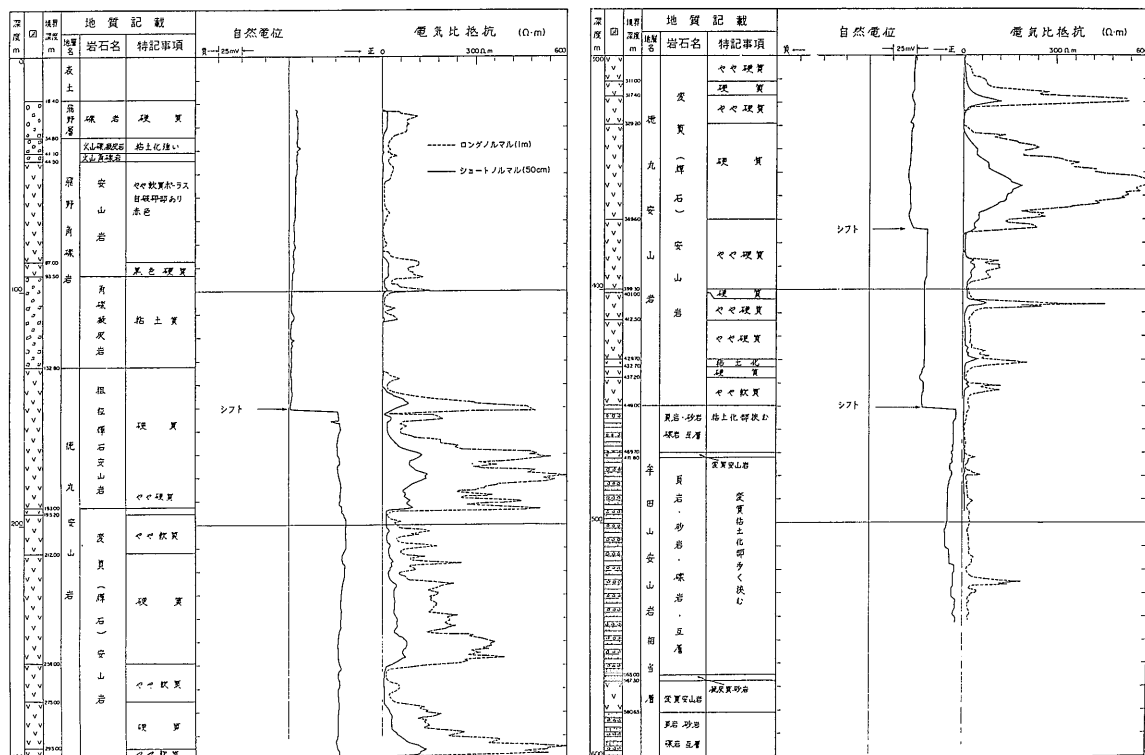
ボーリング柱状図での記載と対応させると 深度 560 m 580m 750m 800m及び920m付近に珪化変質の記載があり珪化変質により母岩の比抵抗が高比抵抗化したことが明瞭に読み取れます。因みに 深度 750m 付近の珪化帯中において有望な鉱化帯 (幅1.85m : 金0.42 g/トン 銀428 g/トン 銅1.79% 鉛2.53% 亜鉛1.52%) を把握しています。

○ 検層例 2

昭和60年度に 北薩・串木野地域広域調査の一環として 鹿児島県始良群始良町飛野で実施された ボーリング孔 (60MAHT-1 : 600m 垂直) 利用による比抵抗検層結果を第11図に示します。点線は 電極間隔 1 m 実線は電極間隔 0.5 m の場合で 横軸の一目盛は60Ωmに相当します。なお 図には比抵抗値とともに 同時に測定された自然電位 (検層図の左部) の値も併記されています。

ボーリング柱状図での地質記載と比抵抗検層図を対応させると 粘土化あるいは粘土質と記載されている部分は 確かにかなり低い比抵抗を示す傾向にはあるものの 硬質 やや硬質と記載されている部分にも顕著な低比抵抗を示す部分があり この地質記載からだけでは 比抵抗の大きな変化を支配している主要因を見い出せません。そこで 変質鉱物の種類や量と比抵抗変化の間に何らかの関連性があるのではないかとこの視点に立ち検討しました。幸いにも 本ボーリングでは ほぼ25mごとに連続的に採取した試料を用いて 粉末X線回折により変質鉱物が同定されていましたので その結果を検層図と対応させました。変質鉱物の量的な表現法は一般によく行われているように 多量・中量・少量の定性的な三段階表示でしたが 両者を対応させると モンモリロナイトの存在が比抵抗を低下させる大きな要因になっていることがわかりました。第12図は モンモリロナイトについての粉末X線回折結果と 各試料の採取深度に対応する位置で目視により読み取った おおよその検層比抵抗値を対比させたものです。変質鉱物の存在量については このような定性的な表記法は 必ずしも充分なものではないとも聞いていますし 採取位置が少し異なるだけで 大きな量的変化も有り得るとは考えられます。しかし この図より モンモリロナイトの存在が比抵抗値すなわち電気伝導性を大きく支配していることは明らかでしょう。

柱状図の地質記載からだけではこのような検討は不可能です。それだけに 比抵抗と変質作用との関連性を検討するには 具体的にどのような変質鉱物が出現しているのかを明らかにしておく必要があると考えます。変質作用の有無・程度 変質鉱物の同定は たとえ専門家であっても 肉眼鑑定のみで適確な判定はなかなか難しいと聞いています。今後ボーリングが行われた際に



第11図

は ボーリングコアを用いた室内試験による 系統的な 変質鉱物の同定が望めます。

### ○ 検層例 3

昭和61年度に 南薩地域広域調査の一環として 薩摩半島の南端部に位置する赤石鉱山の近くで実施された ボーリング孔 (61MANU-1: 300m 垂直) 利用による比抵抗検層結果を第13図に示します。点線は 電極間隔 5 m 実線は電極間隔 2 m の場合で 横軸の一目盛は 150 Ω m に相当します。なお 図には比抵抗値とともに 同時に測定された自然電位 (検層図の左部) の値も併記されています。

検層図より明らかなように 深度 150m 以深の 地質記載により粘土化が卓越する部分で顕著な低比抵抗を示しており 深度 150m を境に比抵抗構造が大きく変化しています。深度 150m 以深の粘土化部については 粉末X線回折により変質鉱物の同定が行われており モンモリロナイト主体の粘土化帯であることが判明しています。

検層例 2 及び検層例 3 より モンモリロナイトは低比抵抗異常を生じさせる注目すべき粘土鉱物であると考えられます。先に紹介した菱刈鉱山での調査例で 鉱山付近で把握された低比抵抗異常は 鉱床上部周辺部に発

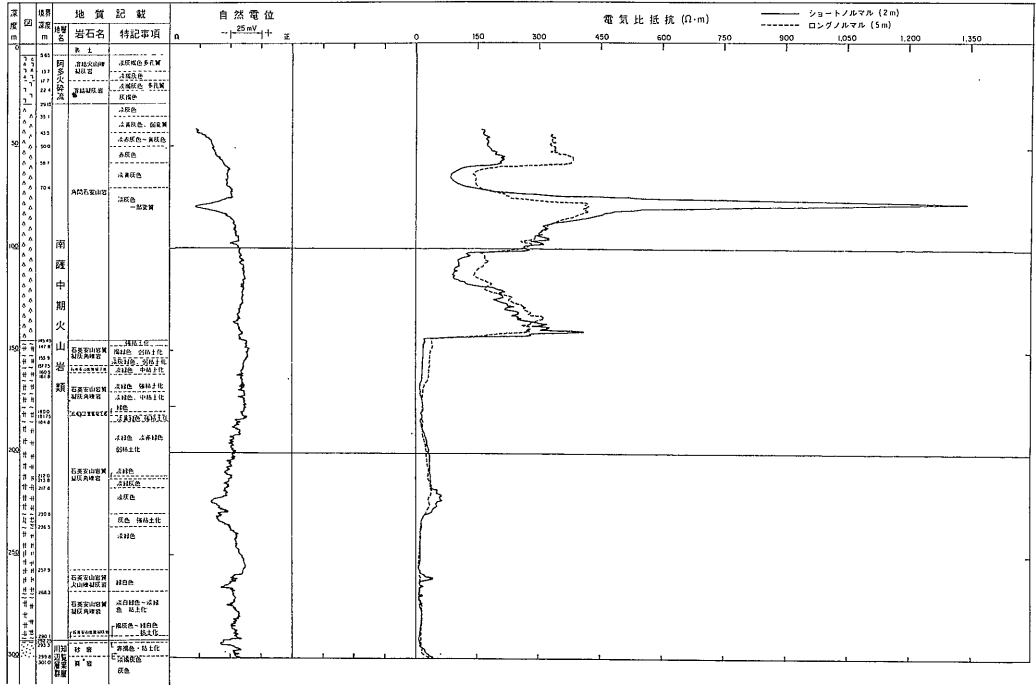
達する粘土化帯に起因することが明らかにされていると述べましたが 住友金属鉱山㈱の地質担当の方に具体的な変質鉱物名を尋ねたところ モンモリロナイト主体であるとのことでした。

他の粘土鉱物に関しては その存在が岩石の比抵抗値にどのような変化をもたらすかについて 検討できるようなデータは取得していません。緑泥石化作用や絹雲母化作用などは 岩石をむしろ高比抵抗化させるのではないかという所感を持っていますが それを裏づける具体的なデータはありません。金の鉱化作用との関連では カオリナイトやアルーナイトなどについて とくにこのような視点からの検討が必要と思われます。

## 7. 今後の課題

本格的な潜頭鉱床探査時代を迎え 物理探査とりわけ比抵抗に着目する電気探査に対する期待には大きなものがあります。この期待に応えるため 今後取り組む必要のある課題は 主に以下の三つの側面に分けて考えることができます。

- (1) 変質分帯を主とした鉱床モデルの作成
- (2) 電気探査データの数値解析技術の向上



第31図

(3) 変質作用に伴う比抵抗変化に関する検討

(1)については地質技術者の取り組むべき課題ですが 昨今この方面の研究は急速に進歩しつつあるようです。また (2)については物理探査技術者の取り組むべき課題ですが この方面の研究も 計算機性能の飛躍的向上と相まって 昨今の技術の進歩には目を見張るものがあります。もちろん エレクトロニクス技術の著しい発展により 探査機器の性能が飛躍的に向上し 信頼性のある高精度な電気探査データを取得できるようになってきたことも忘れてはなりません。

これら(1) (2)の課題と比較し (3)については十分な検討がなされているとは言えません。この課題は(1)と(2)の両課題の橋渡し役をするものであり 地質 物探両分野の技術者による協力が不可欠です。この課題に対する検討が 過去あまり積極的に成されてこなかったのはこのことが一因として考えられます。しかし この課題は 電気探査データの数値解析結果を最終的に解釈し 次段階の探査計画を策定する際のキーポイントとなるものです。それだけに 両分野の技術者の協力の下に 今後十分な検討が成されることを期待します。

最後に この問題と関連して 九州大学工学部の井沢英二先生による熱水変質モデル(第14図)を提示し 調査例で示した高比抵抗異常 低比抵抗異常に対する定性的な一解釈を述べます。これはあくまで一解釈であり

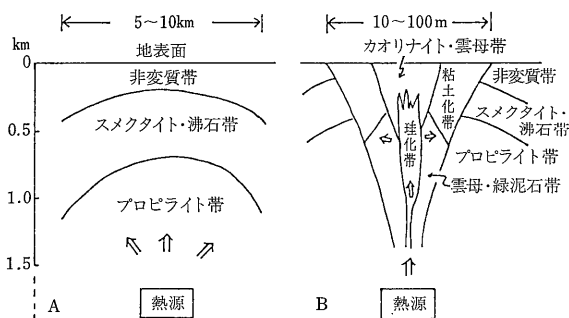
また非常に定性的なものですが 先に示した(1)~(3)の課題が成果を取めるに従い より確かな そしてより定量的な解釈が可能となるでしょう。

図のAは 広域変質に見いされる変質分帯を示し 図のBは 鉱脈型の鉱化作用が広域変質に重複して発達していることを示しています。図のBより 中心には石英脈を含めた珪化帯が生成し 浅部の周辺相としてモンモリロナイトを主要粘土鉱物とする粘土化帯が発達するとしています。このモデルに従いますと 菱刈鉱床の上部周辺部で把握した低比抵抗異常は粘土化帯をまた千歳鉱山舞鶴本鍾と佐渡鉱山周辺部で把握した高比抵抗異常は珪化帯を反映したものであり 比抵抗異常パターンの相違は 削剝のレベルの違いによるものと考えることができます。確かに 菱刈鉱床は 他の二鉱床より生成年代も新しく また 流体含有物の均質化温度より推定されている鉱脈の生成温度も 他の二鉱床に比べ低温であり より浅部での生成を窺わせ この考え方と調和的ですが 先に述べた課題を踏まえ 今後より一層 詳細な検討の必要なことは言を待ちません。

8. まとめ

金属鉱業事業団では 昭和56年度に CSAMT 法を新探査技術として導入以来 各地での試験調査を経て 同





第14図

手法を昭和58年度より国内外の鉍物資源探査に積極的に利用しています。本稿では 昨今とくに注目されている 菱刈鉍床に代表される浅熱水性鉍脈型金鉍床を対象とした CSAMT 法の調査例を紹介し 鉍化変質作用に伴う比抵抗異常（電気伝導性異常）について述べました。また合わせて これらに関連する比抵抗電気検層データも示し 鉍化変質作用による比抵抗異常を検討するには 具体的にどのような変質鉍物の出現が比抵抗異常を支配しているのかという視点に立つ必要のあることを述べました。以下に簡単にまとめます。

CSAMT 法調査により 菱刈鉍床では 鉍床周辺部を低比抵抗異常として把握しました。一方 千歳鉍山舞鶴鉍床および佐渡鉍床では 規模は違うものの鉍床付近で高比抵抗異常を把握しました。前者については 鉍化作用と関連した粘土化作用を 後者については珩化作用にそれぞれ起因するものと考えられています。このように 同タイプと考えられる鉍脈型金鉍床であっても その比抵抗異常のパターンは異なり 低比抵抗異常と高比抵抗異常に大別されそうです。これと関連し 比抵抗検層のデータにより 珩化作用による高比抵抗化およびモンモリロナイト化作用による低比抵抗化の実例を示しました。従来 とくに低比抵抗異常のよりどころを “鉍化変質” とか “粘土化変質” といったあいまいな言葉で片付けられてきたきらいがありますが 今回のデータは 今後は具体的に どのような変質鉍物の出現が比抵抗変化を支配するのかといった きめの細かい検討が必要なことを示唆しています。

潜頭鉍床探査時代を迎え 物理探査とりわけ電気探査の重要性はますます高まるものと考えられます。これらデータを有効に活用し 本タイプのような鉍床の発見に結びつけるためには 一方では地質専門家による変質分帯を主とした鉍床モデルの作成が また一方では物理探査専門家による電気探査データの数値解析技術の向上が重要であるとともに 両者の橋渡しとなる 変質作用

に伴う比抵抗変化に関する検討もまた両者に劣らず重要と考えられます。この課題は 地質 物探 両分野の境界に位置づけられることから 過去充分な検討がなされてきたとは言い難く 両分野の専門家による協力の下での今後の成果に期待します。

謝辞

本報文は 先に地質調査所で行われた所内研究発表会において講演させていただいた内容を取りまとめたものです。講演および本稿をまとめるに際して 種々お世話いただいた地質調査所地殻物理部の大久保泰邦氏に心よりお礼申し上げます。また 資料の提供など 御支援をいただいた住友金属鉍山(鉍)資源事業部技術部の方々に厚く感謝いたします。

本報文の発表を許可していただいた 金属鉍業事業団前調査部長の吉江忠夫氏ならびに 前技術開発部長の今北正夫氏には心より感謝いたします。また 調査部の菱田元氏には 本稿を御一読頂き適切な御指摘 貴重な御意見を頂きました。ここに記して 感謝の意を表します。

参考文献

金属鉍業事業団 (1982) : 昭和56年度鉍物資源探査技術開発調査報告書 (深部電気探査技術開発)  
 金属鉍業事業団 (1987) : 昭和61年度鉍物資源探査技術開発調査報告書 (深部電気探査技術開発)  
 通産省資源エネルギー庁 (1982) : 昭和56年度広域調査報告書北薩・串木野地域  
 川崎 潔・岡田和也・窪田 亮 (1986) : 菱刈鉍山における物理探査 鉍山地質 36(2) pp. 131~147 1986  
 阿部一郎・鈴木英雄・磯上篤生・後藤寿幸 (1986) : 菱刈鉍山の地質と探鉱開発 鉍山地質 36(2) pp. 117~130 1986  
 井沢英二 (1988) : 金を探す科学 科学 Vol. 58 No. 1 pp. 15~23 1988  
 金属鉍業事業団 (1979) : 昭和53年度鉍物資源探査技術開発調査報告書 (空中電磁法調査技術開発)  
 通産省資源エネルギー庁 (1979) : 昭和53年度広域調査報告書北薩・串木野地域  
 通産省資源エネルギー庁 (1986) : 昭和60年度広域調査報告書千歳地域  
 金属鉍業事業団内部資料 (1986) : 昭和60年度広域調査千歳地域物理探査報告書  
 通産省資源エネルギー庁 (1987) : 昭和61年度広域調査報告書佐渡地域  
 金属鉍業事業団内部資料 (1987) : 昭和61年度広域調査佐渡地域物理探査報告書  
 通産省資源エネルギー庁 (1986) : 昭和60年度広域調査報告書北薩・串木野地域  
 通産省資源エネルギー庁 (1987) : 昭和61年度広域調査報告書南薩地域  
 通産省資源エネルギー庁 (1986) : 昭和60年度広域調査報告書構造解析総合調査