

平成17年度金属資源探査推進グループ業務報告 (2) 高温超電導磁力計を用いた電磁探査装置 (SQUITEM) の開発・成果概要

金属資源探査推進グループ

1. はじめに

金属鉱床探査では、アクセスしやすく地表に露出した鉱床の探査が進み、鉱床が潜頭化（深部化）・奥地化しているために、地質調査とボーリングに比重を置いていた従来の探査技術では対応が困難となってきた。そこで、地質状況をより詳細に把握する手段として物理探査技術の高度化が必要である。

比抵抗の低い金属鉱床、または、それに付随する鉱徴（粘土化変質帯など）の位置を探る方法として時間領域電磁探査法（TEM法）が多用されている。しかし、地表が低比抵抗の被覆層で覆われている場合、誘導コイル型磁力計を用いる TEM 法の従来装置では、被覆層下の鉱床を捕捉できない場合がある。そこで、鉱床が潜頭化している近年、TEM法の探査深度の改善が求められている。

TEM法の探査深度を向上させるには、送信ループへの電流値を上げる、という手段があるが、機器性能の制約から通電できる最大値に限界がある。また、送信ループのサイズを大きくすると探査深度は大きくなるが、調査分解能が損なわれてしまう。

そこで、JOGMECは使用頻度の多い TEM 法の探査深度を向上させるために、平成13年度から17年度までの5年間で、高温超電導量子干渉素子（High Temperature Superconductor Superconducting Quantum Interference Device；高温 SQUID）を用いた TEM 装置（SQUITEM）を開発した。以下に、SQUITEM 開発の成果について報告する。

2. TEM法とは

TEM法では、地下の比抵抗分布を調べるための媒体である電磁場を発生させる送信ループを地上に設置し、一般的にオン・オフ時間のある交替直流をそれに通電する（図1）。地表に設置した送信ループに流す電流を急激に遮断すると、電磁誘導の法則により、それまで形成されていた磁場が変化するのが妨げるように、それまでループに流れていたと同じ大きさの電流がループ直下の地表面に発生する。この誘導電流は大地の比抵抗により減衰するが、この誘導電流の変化を妨

げるような新しい誘導電流が地中に発生する。このプロセスが繰り返され、あたかも誘導電流が地下深部に伝播していくような現象をスモークリング（Nabighian, 1979；村上・斎藤, 1997）と呼ぶ。これらの誘導電流は、伝播経路の比抵抗に応じて減衰するため、それらの作る磁場、あるいは磁場時間微分値を時間の関数として測定することにより地下の比抵抗分布を調べることができる。誘導電流は時間とともに地下深部に浸透するので、より長い時間測定することにより、より深部までの比抵抗分布を得ることができる。

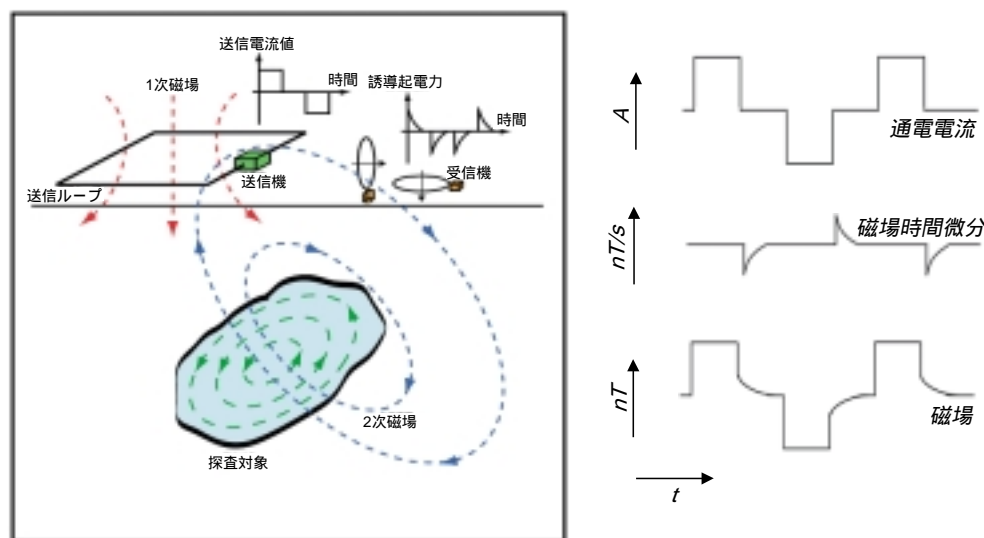


図1 TEM法の説明図

3. TEM 法に SQUID を利用する利点

TEM 法では、送信ループ中の直流を突然遮断することにより、送信ループ直下の地中で誘導電流が発生し、誘導電流は時間の経過とともにゆっくりと地下の深部に向けて、その半径を広げながら拡散していく。深度方向に拡散する電磁場の時刻 t での最大振幅の深度を表す拡散深度 $d = \sqrt{2tp/\mu}$ (ρ : 地下の比抵抗、 μ : 地下の透磁率) を、時刻 t まで測定したときの探査深度の目安と考えることができる。拡散深度の式から分かるように、探査深度を深くするためには、できるだけ長い時間、過渡現象を観測する必要がある。しかし、例えば低比抵抗の被覆層で覆われた潜頭鉱床の探査では、地下で発生する誘導電流が被覆層をゆっくりと拡散していく。したがって、誘導電流が塊状硫化物鉱床に到達する時間が遅くなり、鉱床からの応答が TEM 装置のノイズレベル幅に近くなるため、誘導コイル型磁力計を利用する TEM 法の従来装置では、鉱床の応答を得ることが困難となる。その一方で、磁場は磁場時間微分よりもゆっくりと減衰するので、磁場を測定した方が TEM 装置のノイズレベル幅に達し難いため探査深度が大きくなる。したがって、誘導コイル型磁力計による従来装置では捕えることができなかった低比抵抗の被覆層下の鉱床を、磁場を直接測定する SQUID などの磁力計を用いることにより捕らえられる可能性がある。

鉱床が低比抵抗の被覆層で覆われている場合、磁場時間微分を測定するよりも磁場測定の方が鉱床を捕らえ易いことを示すために、図2で示した次元比抵抗モデルを用いて数値試験を行った。比抵抗モデルの第一層は被覆層であり、被覆層の比抵抗は $10^{-4} \Omega \cdot m$ 、層厚は $50m$ である。第二層、第三層(低比抵抗層)の比抵抗はそれぞれ $100 \Omega \cdot m$ 、 $10 \Omega \cdot m$ であり、第三層までの深度が $200m$ 、 $400m$ 、 $600m$ の場合と、第三層がない場合の4通りのモデルに対して送信ループの中心での磁場と磁場時間微分を数値計算した。

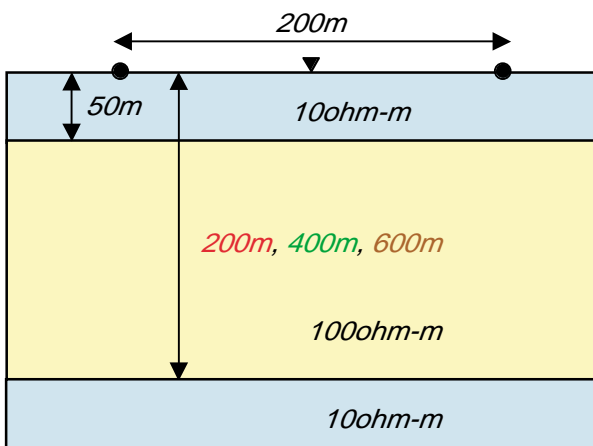
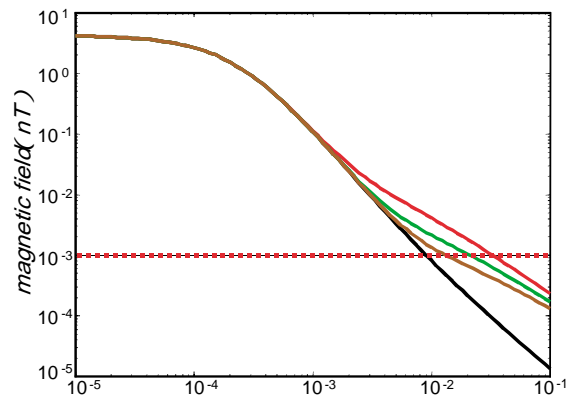
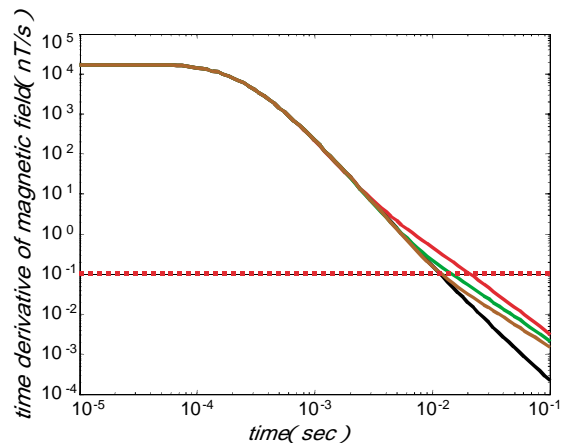


図2 数値試験に用いた次元比抵抗モデル

図3 (a) は数値計算した磁場、(b) は磁場時間微分を示しており、横軸は送信ループへの電流遮断後の経過時間、縦軸はそれぞれの数値計算値である。第三層が深度 $200m$ に位置している場合は、黒で示した水平二層構造の場合の曲線と電流遮断後 $2 \sim 3msec$ 付近で違いが現れ始めていることから、 $2 \sim 3msec$ で深度 $200m$ の地下情報が取得され始めることが分かる。このように考えると、約 $6msec$ での探査深度は約 $400m$ 、約 $10msec$ での探査深度は約 $600m$ であることが分かる。磁場を測定する装置のシステムノイズ幅を $1pT$ と設定すると (SQUITEM の SQUID 素子ノイズレベルは約 $100fT/\sqrt{Hz}$ 、周波数帯域は $DC \sim 100kHz$ であり、 $1,000$ 回スタッキングした場合のシステムノイズ幅は約 $1pT$ となる) 図2のように被覆層で覆われている場合でも、磁場測定により深度 $600m$ の情報を取得できることが分かる。その一方で、TEM 法の従来装置のノイズレベル幅を $0.1nT/s$ とすると、図3 (b) より磁場時間微分測定による探査深度はせいぜい $400m$ であることが分かる。また、第三層を設定した場合と設定しない場合の応答の違いが、磁場の方が磁場時間微分よりも早い時間に現れている。この数値試験から、磁場測定の方が磁場時間微分測定よりも、探査深度が大きいことが分かる。



(a) 磁場



(b) 磁場時間微分

図3 数値試験結果 (a) 磁場、(b) 磁場時間微分

磁場あるいは磁場と等価な測定値を得る手段として、以下の3つの方法が考えられる。

- (1) UTEMのようなステップ応答を測定する装置を利用する。(UTEM: トロント大学が開発したTEM装置。一般的には、図1で示したオン・オフ時間のある交替直流を送信ループに通電するが、UTEMでは三角形に変化する電流を通電する。)
- (2) 誘導コイル型磁力計に基づく装置で測定して、ステップ応答にデコンボリューションする(磁場時間微分を測定して、時間積分により磁場を計算する)。
- (3) 周波数帯域の十分に広い磁力計を利用して直接、磁場を測定する。

(1)については、Stolz and Macnae (1998年)は、TEM法の応答を時定数(測定値の時間減衰の程度を表すパラメータ)を用いた指数関数の和として表して各時定数に対する検出能力を解析することにより、オン・オフ時間のある交替直流を通電する通常のTEM法よりもUTEMの方が、ベースメタル鉱床の時定数に対して感度が高いことを示した。しかし、UTEMには、三角波に対する応答を測定するためにデータ処理や解析に手間がかかることや、正確な三角波を送信できない等のデメリットがある。(2)については、測定値に含まれる周波数成分の帯域が限られるために、時間積分しても正確に積分定数を求めることができない。(3)については、フラックスゲート磁力計など、磁場を直接測定する磁力計はあるが、それらの周波数帯域は狭いために深度数百mを探査する金属鉱床探査に用いることは難しい。

SQUIDは、マイスナー効果などの超電導現象を利用した超高感度磁気センサーである。SQUIDを用いた磁力計(SQUID磁力計)の電磁探査法への利用については、1970年代に、低温(金属系(ニオブ化合物))SQUIDを用いた磁力計が開発され、特に米国を中心に利用されたが、冷却剤である液体ヘリウムの取り扱いの難しさや、原油価格の低下に伴う石油探査件数の減少などから、ほとんど使われなくなり、広く普及することはなかった。しかし、1986年に液体窒素による冷却が可能な77.3K(-196)で超電導状態になる酸化物材料(セラミックスの一種)がベドノルツ・ミュラーにより発見されたことで、それを用いた高温SQUIDでは冷却装置等が小型化され、取り扱いがかなり容易になったために、野外測定用への利用が検討されるようになった。

SQUID磁力計は周波数帯域が十分に広く、誘導コイル型磁力計よりも高周波数域でも低周波数域でも安定した特性を示す。さらに、磁場を直接測定するので、先に示したとおり、磁場時間微分を測定する誘導コイル型磁力計よりも探査深度が大きい。したがって、誘導コイル型磁力計による従来装置では捕らえることができなかった深部鉱床、あるいは潜頭鉱床をSQUID磁力計により捕らえられる可能性がある。

SQUIDを利用する利点としては、探査深度の向上の他に、低比抵抗に対する感度の高さも挙げられる。従来装置では、誘導コイル型磁力計を用いて磁場時間微分値に比例した起電力(電圧)を計測する。誘導コイルの原理から、磁場が急激に減衰する場合は誘導コイル内の起電力が大きくなるために測定値は大きくなり、磁場がゆっくりと減衰する場合は誘導コイル内に発生する起電力が小さいために、誘導コイル型磁力計による測定値は小さくなる。したがって、TEM法が良く用いられるベースメタル探査では、鉱床の比抵抗が非常に低い場合、磁場が非常にゆっくりと減衰するために磁場時間微分値が小さくなり、誘導コイル型磁力計では精度良く測定することができない。その一方で、SQUIDは磁場を直接測定するので、鉱床の比抵抗が非常に低い場合でも精度良く測定することができる。

4. SQUIDの動作原理

SQUIDの構造は、超電導のリング上に存在する2つのジョセフソン接合が基本となる。ジョセフソン接合とは絶縁体を超電導体で挟んだものである(トンネル型接合)。接合部では、超電導状態を作り出すクーパ対のトンネル現象により超電導電流が流れるが、その大きさはジョセフソン接合の両端におけるクーパ対の位相差に依存して変化する。

図4に示すように、SQUIDにバイアス電流を流すと、接合で制限される超電導電流の限界値(超電導臨界電流値)を超えたところで常電導電流が発生して電圧が生じる。一方、SQUIDに磁場が加わるとマイスナー効果により、超電導リングに遮蔽電流が発生する。外部から印加される磁場の強さによりジョセフソン接合におけるクーパ対の位相差は変化するが、超電導臨界電流値を I_c とすると、遮蔽電流は $I_c \sin$ で与えられる。したがって、SQUIDに一定のバイアス電流をかけておくと、図5のようにSQUIDに印加される磁場に応じてSQUIDの両端に発生する電圧も周期的に変化する。

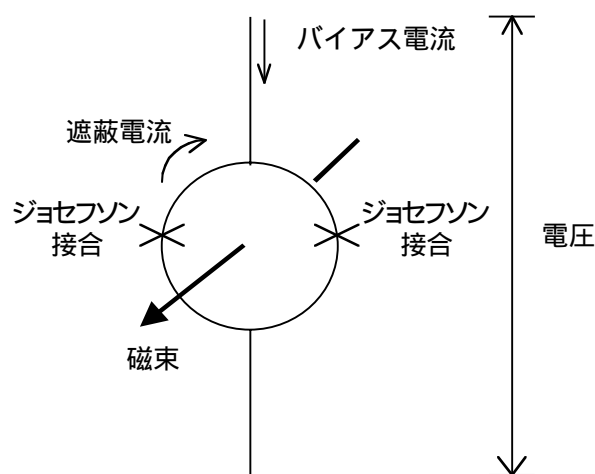


図4 SQUIDの概念図

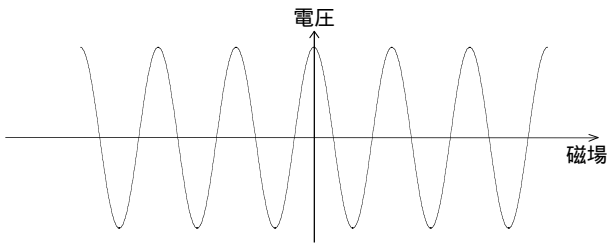


図5 SQUIDに加わる磁場とSQUIDの出力電圧の関係

しかし、磁場により周期的に出力電圧が変化すると磁場の変化の絶対量を知ることができない。そこで、図5で示した磁場 - 電圧変化において、ある“山”と“谷”の間にSQUIDの出力電圧が収まるように磁場補償コイルにより逆方向の磁場を発生させてSQUIDに印加する。その際に印加した補償磁場を計測することにより、外部から印加される磁場を測定することができる。

5. SQUITEM の概要

SQUITEM は3チャンネルのシステムであり、2つの測定モードを有している。2つの測定モードとは、3成分の磁場を同時に測定する測定モードと、2個のSQUID 磁力計を用いて2点での磁場とそれらの磁場偏差を同時に測定する測定モードである。

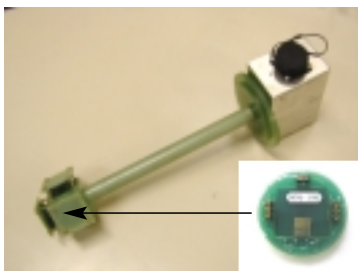
SQUITEM は、PC、A/D コンバーター、コントローラー、バッテリーユニット、SQUID 磁力計、増幅器などから構成される (図6)。SQUID 磁力計については、3成分同時測定のための大きなSQUID 磁力計 (図6 (c)) と、磁場偏差測定のための2つの小型SQUID 磁力計 (図6 (a)) の計3台を開発した。SQUID 磁力計の筐体 (液体窒素デュワ) に挿入するプローブ (図6 (d)) の先端にSQUID (図6 (e)) を装着して、液体窒素を注ぎ込んだ液体窒素デュワの中にプローブを挿入してSQUID を超電導状態にすることで磁場を測定する。



(a) SQUITEM の全容

(b) SQUITEM の受信部

(c) 3成分同時測定のためのSQUID 磁力計



(d) プローブ

(e) SQUID

図6 SQUITEM の概要

A/D コンバータのサンプリングレートは 125kHz、分解能は 16 ビットである。コントローラに入力できる電源電圧の範囲は $\pm 5V$ であるため、SQUITEM のビット分解能は $1.5 \times 10^{-4} (V)$ (約 7.7pT) である。なお、増幅器により late time での小さなデータを 10 倍に増幅することができるので、SQUITEM で検出できる最小磁場 (分解能) は約 0.7pT である。液体窒素デュワの容積は、磁場 3 成分同時測定用で約 3.3 リットル、磁場偏差測定用で約 2 リットルであり、それらの保持時間は 9 時間以上である。

6. 現場適用試験

実際の探査現場で SQUITEM を利用して、SQUITEM の従来装置に対する探査深度の優位性やその実用性を評価するために、平成 17 年 11 月に、豪州・西オーストラリア州のニッケル鉱床の直上で現場適用試験を行った。試験の対象としたニッケル鉱床は、グリーンストーン帯中に賦存する塊状硫化物鉱床であり、グリーンストーン帯の中央に位置する超苦鉄質岩と、その周縁に位置する玄武岩の境界部 (断層中) に賦存する (図7)。この鉱床は、比抵抗の低いレゴリス (厚さ約 80m、比抵抗 1 -m 程度) で覆われているために、TEM 法の従来装置ではその下のニッケル鉱床を捕らえることが簡単ではなく、TEM 法の新装置のテストフィールドとして利用されている場所である。

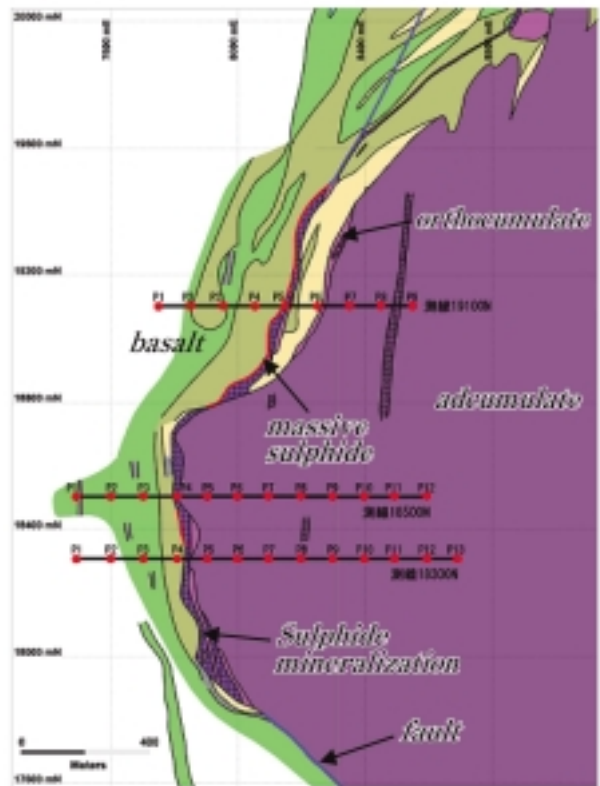


図7 現場適用試験 (豪州) での測線配置

試験では、3本の測線 (18300N、18500N、19100N) において、100m 間隔でデータを取得した。SQUITEM と従来装置により取得したデータの一例を図8に示す。SQUITEM では約 0.9sec まで地下構造を反映しているデータを取得できたが、従来装置では約 0.2sec までしか地下構造を表すデータが取得できていない。

18500N と 19100N の二測線上の各測点において、SQUITEM により探査できた深度を 1 とした場合の、従来装置による探査深度を拡散深度の式を用いて計算したところ、その平均値は約 0.79 であった。したがって、SQUITEM の探査深度が、誘導コイル型磁力計による従来装置よりも約 1.27 倍大きいことを実証できた。

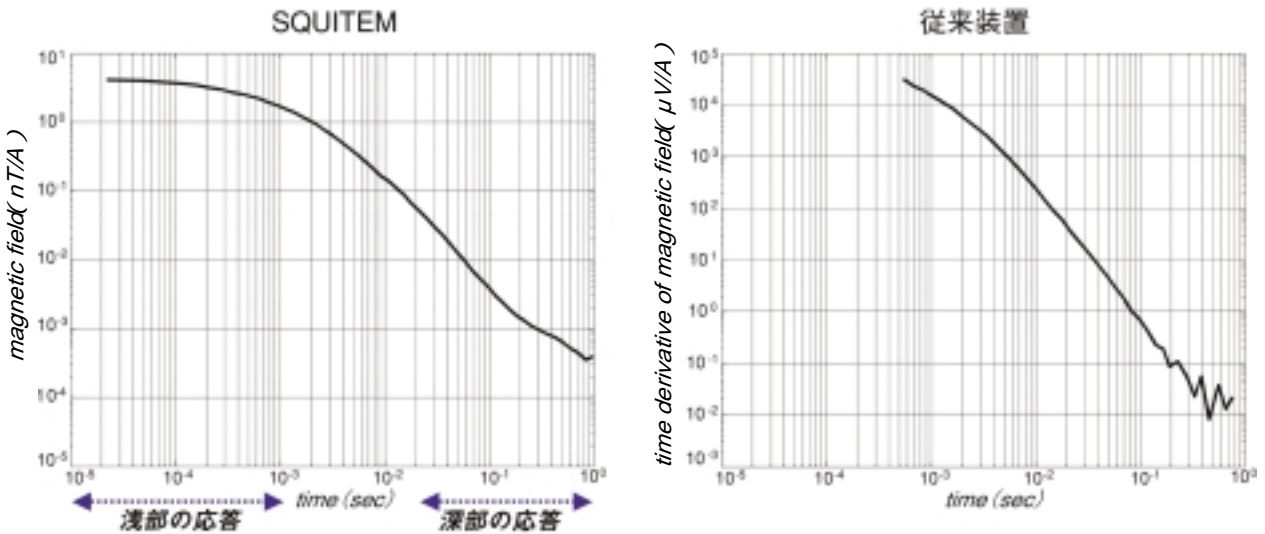


図8 SQUITEMと従来装置による取得データの一例

図9は、18500Nの各測点で取得した測定値を時間毎につないだ曲線(プロファイル)であり、横軸は測点、縦軸はデータ処理後の測定値(磁場、あるいは磁場時間微分)である。SQUITEMのプロファイルでは、主鉱体の直上(7900E)で大きなピークが現れている。その一方で、従来装置によるプロファイルでは、縦軸の桁数が多いためピークの高さが圧縮されているせいもあるが、SQUITEMの場合に比べて主鉱体のピーク

の高さがかなり小さくなっている。

18500NにおけるSQUITEMデータの一次元解析結果を図10に示す。300m以下の低比抵抗を示す範囲は主鉱体の位置よりも広く現れているが、100m以下の低比抵抗の範囲は主鉱体の位置とほぼ一致しており、鉱床の西側の形状などは良く再現されている。また、東側の小規模な鉱化帯も低比抵抗で再現されている。

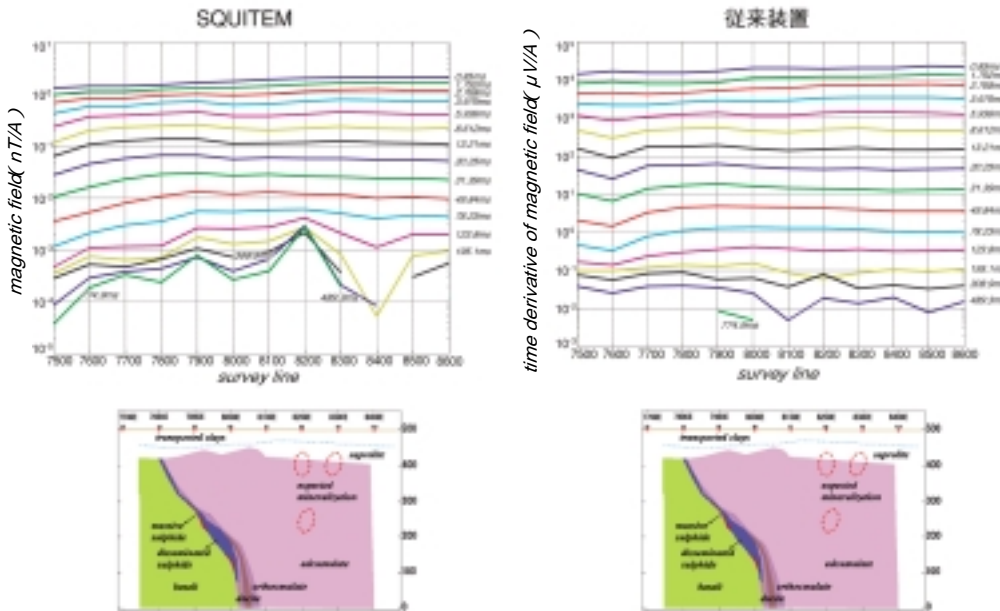
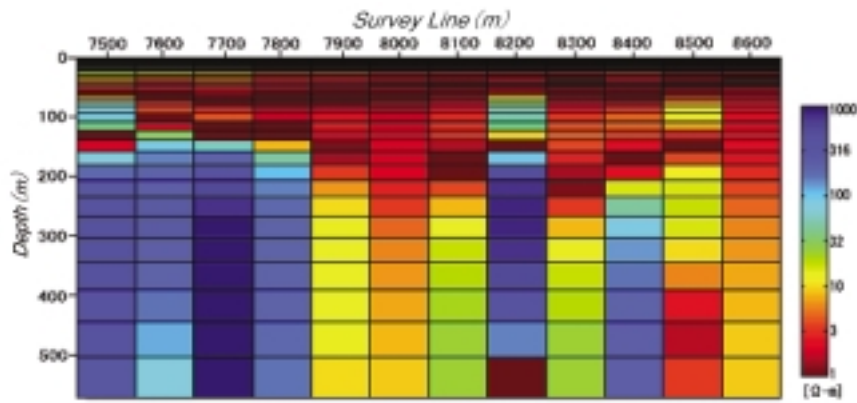
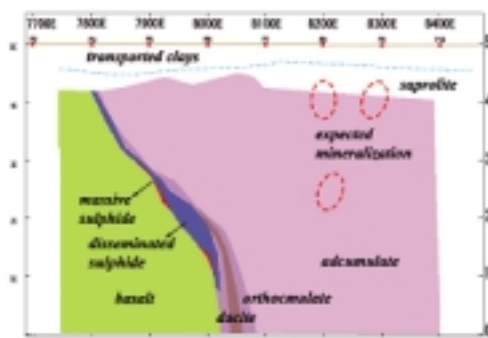


図9 SQUITEMと従来装置による取得データのプロファイル(18500N)



一次元解析結果



地質断面図

図10 SQUITEMデータの一次元解析断面(18500N)

7. おわりに

平成17年度までの5年間で、TEM法の従来装置よりも探査深度の大きいSQUITEMを開発した。平成17年度には豪州で現場適用試験を行い、従来装置では明瞭に捕らえることができなかった低比抵抗の被覆層の下の鉱床も、SQUITEMでは明瞭に捕らえられることを確認した。

冒頭で述べたとおり、近年、金属鉱床の潜頭化・深部化が進んでおり、特に、低比抵抗の被覆層で覆われた地域でも利用できる電気・電磁探査技術の開発が強く望まれている。SQUITEMはその要望を実現し得る電磁探査装置である。SQUITEMをJOGMECの金属資源探査に活用することにより、探査の効率化と成功率の向上に寄与できるものと期待する。

(2006.9.1)

参考文献

村上裕・斎藤章(1997): 時間領域電磁探査法における大地中のスモークリングの挙動解析について, 第4回地下計測ワークショップ論文集, 159-164.

Nabighian, M. N. (1979): Quasi-static transient response of a conducting half-space; An approximation representation, *Geophysics*, 44, 1700-1705.

Stolz, E. M. and Macnae, J. (1998): Evaluating EM waveforms by singular-value decomposition of exponential basis functions, *Geophysics*, 63, 64-74.

