

研究種目：基盤研究 (C)  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19560812  
 研究課題名(和文) 小型ループ・ループ電磁法3次元調査による導電性地盤環境の特性評価  
 研究課題名(英文) Characterization of conductive ground using handheld loop-loop 3D electromagnetic method  
 研究代表者  
 佐々木 裕 (SASAKI YUTAKA)  
 九州大学・大学院工学研究院・助教  
 研究者番号：10128027

研究成果の概要(和文)：携帯型小型ループ・ループ電磁探査装置はその操作の簡便さゆえに地盤特性評価によく用いられている。しかし、多くの場合データの信頼性が低く、定量的な解析はほとんど不可能とってよい。これは、装置のドリフト等によりオフセット誤差が生じ、これを測定時に校正できないためである。本研究では、求めるべき地盤の電気比抵抗構造とともにオフセット誤差も未知パラメータとする逆解析法を開発し、大きなオフセット誤差を含むデータであっても、オフセット誤差の影響を受けずに地盤の電気比抵抗構造を精度よく推定することができるようになった。さらに、電気比抵抗とともに地盤の帯磁率も同時に求めることができる逆解析法を開発した。

研究成果の概要(英文)：Handheld loop-loop electromagnetic (EM) instruments are being used increasingly for shallow environmental surveys because of their portability. However, in many cases, the quality of data is so poor that quantitative interpretation is not justified. This is because EM data are inherently susceptible to calibration errors. We have developed an algorithm that simultaneously inverts loop-loop EM data for a multidimensional resistivity distribution and offset errors. By using this simultaneous inversion algorithm, one can determine the resistivity distributions without being affected by offset errors. We have also developed an inversion algorithm to simultaneously recover multidimensional distributions of resistivity and magnetic susceptibility from various types of loop-loop EM data. This development of a new algorithm was motivated by the fact that EM data are often affected by both resistivity and magnetic susceptibility particularly where metal objects are buried. For these inversion methods to work successfully, the data must be collected at multiple heights and/or different loop configurations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：地球・資源システム工学

キーワード：物理探査

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 土壌・地下水汚染や廃棄物処分場の安全性等、地盤環境に関わる社会問題が顕在化している。汚染の防止・修復のためには、まず地盤環境の正確な特性評価がなされなければならない。物理探査は非破壊で地盤内部を調査できることから、この役割を果たすことが期待されている。汚染があれば地盤内部の物理的特性に変化が生じる。物理探査で用いられる物理的特性のなかで、特に電気比抵抗が低くなることが多い。このような導電性地盤に対しては、電気探査や電磁探査を用いて比抵抗およびその時間的変化を求めることにより、汚染源の分布や挙動を把握できると考えられる。これまでいくつかの廃棄物処分場で電気探査が試みられ、その基本的な有効性は確認されているものの精度の点ではまだ不十分とされる。今後、三次元探査の適用により高精度化が求められている。

(2) 三次元探査を効率的に行ううえでは、装置がコンパクトで、測定者一人がゆっくり歩きながら測定できる小型ループ・ループ電磁法が最も適している。しかし、小型ループ・ループ電磁法データの信頼性が疑われるケースが多く、電磁法の有効性を疑問視する声は強い。この原因は、装置のキャリブレーションを調査ごとに行うことが事実上困難であるためである。受信ループにおいては送信ループから直接入る1次磁場の方が地盤比抵抗に依存する2次磁場よりはるかに大きいいため、両ループの中央部にバックング・ループ（受信ループと逆向き接続）を設けて、1次磁場を相殺し、残った2次磁場を増幅して、1次磁場に対する2次磁場の比（ppm）を測定している。1次磁場の強さは距離の3乗に逆比例するので、各ループの位置関係が温度変化や衝撃によりわずかに変化しただけで、零レベルが大きくシフトする。測定を始める前に装置を空中高く（10 m 以上）持ち上げることができれば、導体である大地の影響を受けずに正確なキャリブレーションが可能であるが、そのような作業をおこなうことは事実上困難である。

## 2. 研究の目的

小型ループ・ループ電磁法により三次元探査を行ううえで、キャリブレーション誤差は避けて通ることはできないといえる。筆者らは、たとえ大きなキャリブレーション誤差が

含まれていても、小型ループ・ループ電磁法データから比抵抗分布を精度よく推定するための新しい測定・解析方法を提案した。その方法の要点をまとめると

1. 少なくとも2点の異なる高さで各周波数のプロファイルデータを取得する。

2. 2次元・3次元解析において、地盤の比抵抗だけでなくキャリブレーション誤差（オフセット誤差）も未知パラメータとする。

本研究ではこの方法を実際のループ・ループ電磁法データに適用してその有効性を実証し、導電性地盤の特性評価・モニタリングに有効な三次元調査法を確立することを目的とした。

## 3. 研究の方法

塩水の影響を受けた地盤および廃棄物処分場等の導電性地盤において小型ループ・ループ電磁法とともに電気探査を実施し、電気探査の結果を基準として電磁探査データの精度評価および解析結果の評価を行う。また、数値シミュレーションにより、どのような条件でデータ取得を行えば最も精度良く地盤比抵抗を把握できるかを明らかにする。特に装置の設定高度を複数回変えることにより、どの程度の精度向上が見られるかを具体的に明らかにする必要がある。

また電磁応答は地盤の磁化率によっても変化するので、地盤に磁化率異常が存在する場合に、比抵抗の解析結果にどのような影響が現れるかを数値シミュレーションにより明らかにする。数値シミュレーションでは小型ループ・ループ電磁法だけでなく、ループ・ループ電磁法の一つである空中電磁法およびスリングラム地上電磁法による三次元探査の可能性についても研究する。

## 4. 研究成果

(1) 海水の影響で比抵抗が約 30 ohm-m である調査地において 0 m と 1 m の高さで電磁探査データを取得し、キャリブレーション誤差（オフセット誤差）を未知パラメータとする解析を行った結果は、別途に行った電気探査の結果に良く一致し、新しい解析法が有効であることが確認された。このような成果は国内外でまだ報告されていない。

1 測線における解析結果の比較を図 1 に示す。高さ 0 m における測定データとモデル計算値を図 2 に示す。測定データはオフセッ

ト誤差のため、同相成分の大部分は負の値を示したが、それが補正されている。

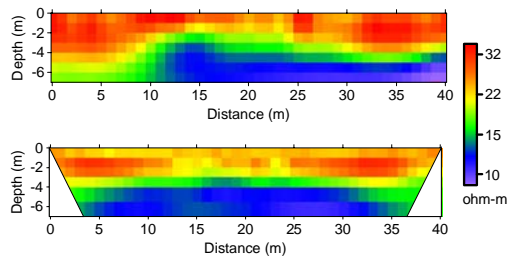


図1 小型ループ・ループ電磁法（上）とダイポール・ダイポール配置電気探査（下）の2次元解析結果

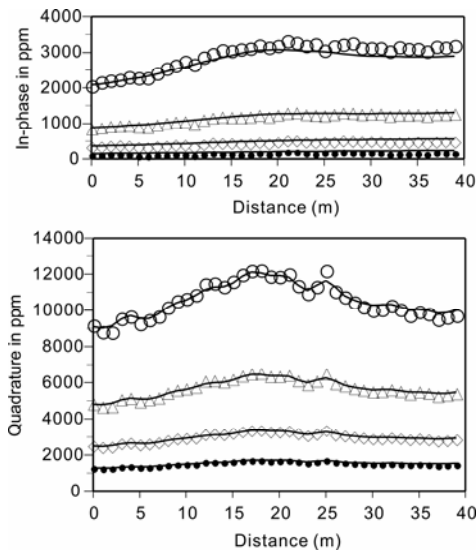


図2 オフセット誤差が補正された電磁法データ（記号）とモデル計算値（実線）

(2) 比抵抗が 150-250 ohm-m の調査地で同様の測定・解析を行い、電気探査データの解析結果と比較したところ、おおむね一致はしたものの、電磁探査データの S/N 比が低いため、比抵抗分布の信頼性は劣ることが示された。これは、特に同相成分の信号レベルが外部電磁ノイズよりも低いためである。これは、数値シミュレーションの結果から予想されたことと矛盾しない。すなわち、比抵抗が 100 ohm-m 程度より高い地盤に対しては、ループ間隔が非常に小さい小型ループ・ループ電磁法では比抵抗分布を精度よく求めることはできないと結論できる。

(3) 廃棄物処分場では比抵抗が約 10 ohm-m と極めて低いため、強い 2 次磁場信号が観測され、とくに離相成分は約 20000 ppm に達した。しかし、同相成分では大きなオフセット誤差の存在が明白であった。オフセット誤差を考慮した解析結果は電気探査の結果とほぼ一致したが、測定値と計算値の合致度は十分に小さいものではなかった。この原因は、廃棄物の中には多くの金属が含まれており、そのため比抵抗だけでなく地盤の磁化率が電磁応答に影響しているためである。

(4) 磁化率の分布が電磁応答に与える影響を明らかにするため、まず比抵抗と磁化率の任意の分布が与えられたとき、電磁応答を計算できる 3 次元モデル数値計算法（差分法）を開発した。小型ループ・ループ電磁法においては、磁化率分布の影響は周波数にほとんど依存せず、ループ間隔と高さに依存することが明らかとなった。小型ループ・ループ電磁法ではループ間隔が固定されているため、磁化率の分布を精度よく求めるためにはループの高さを変えるか、装置を回転させて地面に対するループの配置を変えてデータを得ることが必要であることが明らかとなった。したがって、オフセット誤差の影響をうけずに磁化率を求めるためには、少なくとも 3 通りの異なる高さでデータを得る必要がある。

次に 3 次元モデル数値計算法をもとに、比抵抗と磁化率の両方の分布を求めることができるジョイント解析法を開発した。これは小型ループ・ループ電磁法だけでなく、他のループ・ループ電磁法、すなわち空中電磁法およびループ間隔を変えることができる電磁法（スリングラム法）にも適用できる。このようなジョイント解析法に関する報告は 1 次元構造に対しては数件あるが、2 次元・3 次元構造を対象とした解析法は本研究が世界最初である。

数値シミュレーション結果の 1 例として、図 3 のモデルの電磁応答に対してジョイント解析法を適用した結果を図 4 に示す。

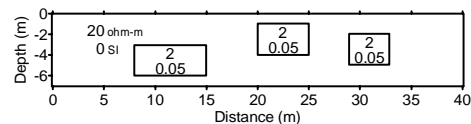


図3 比抵抗と磁化率が2次的に変化するモデル。上の数値は比抵抗 下の数値は磁化率。

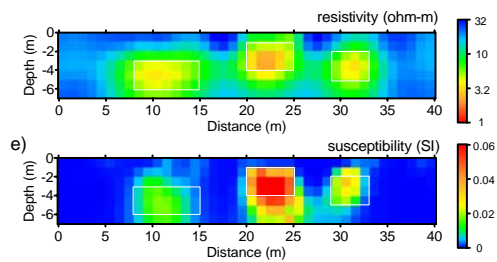


図4 ジョイント解析により求められた比抵抗分布（上）と磁化率分布（下）

数値シミュレーションの結果によれば、空中電磁法においても測定高度を変えてデータを取得することにより、比抵抗と磁化率の両方の分布を精度よく求めることができる。今後は、小型ループ・ループ電磁法だけでなく、空中電磁法やスリングラム電磁法を用いた3次元調査の高精度化について研究を継続する予定である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計0件）

〔学会発表〕（計6件）

① 中里裕臣、石田聡、土原健雄、吉本周平、皆川裕樹：TDEMによる多良間島における淡水レンズ調査、物理探査学会学術講演会、2009年5月、東京。

② Keisuke Inoue, Hiroomi Nakazato, Tomijiro Kubota, Mutsuo Takeuchi, Koji Furue and Hee Joon Kim: Resistivity monitoring of ground water recharge test by two different recharge ways, 2009 International Joint Symposium between IEGS (Korea), NIRE and CERI (Japan), 90-95.

③ Keisuke Inoue, Hiroomi Nakazato, Mutsuo Takeuchi, Yoshihiro Sugimoto and Hee Joon Kim: Numerical experiment on the effective arrangement of 2-D survey lines for 3-D inversion of resistivity data, 2008 International Joint Symposium between IEGS (Korea), NIRE and CERI (Japan), 30~35

④ 重松愛二郎、佐々木裕、水永秀樹：小型ル

ープ電磁法の探査特性、物理探査学会学術講演会、2008年、5月15日、東京

⑤ Yutaka Sasaki, Jeong-Sul Son, Changryol Kim, Jung-Ho Kim: Resistivity and calibration error estimations for small-loop electromagnetic method, Joint Conference of Korean Society of Exploration Geophysicists and Korean Geophysical Society, June 7, 2007, Daejeon, Korea.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐々木 裕 (SASAKI YUTAKA)

九州大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：10128027

### (2) 研究分担者

中里 裕臣 (NAKAZATO HIROOMI)

農業食品産業技術総合研究機構・農村工学

研究所・主任研究員

研究者番号：00373225

井上 敬資 (INOUE KEISUKE)

農業食品産業技術総合研究機構・農村工学

研究所・主任研究員

研究者番号：60414455