

海洋における地殻構造探査のための電磁場観測技術とその動向

笠谷 貴史*・後藤 忠徳*・高木 亮**⁽¹⁾

要 旨

自然の磁場信号は非常に電気伝導度の高い海水の影響で減衰が大きいため、海底での MT 探査では一般的に長周期のデータのみを扱い、深部のマントル構造を主なターゲットとしていた。プレート間巨大地震発生域の調査といった地殻構造を得るためには、より短周期の 1 秒から 1000 秒の周期帯が重要となる。しかしながら、それらに適した海底電位差磁力計が国内に存在せず、地殻構造調査を行うことが困難であった。そのため、我々は機動性に優れた小型の海底電位差磁力計の開発を行い、実海域での動作試験とデータ取得に成功した。一方で、人工電流源を用いた探査は、MT 法よりもさらに浅い構造をより詳細に得るのに非常に有効な手法である。我々は、150m の電極ケーブルを曳航体に取り付けて調査を行う曳航式海底電気探査装置を開発し、その実海域試験を通してその有効性を確かめた。本稿では、我々が開発した OBEM と曳航式海底電気探査装置について述べ、その実海域試験の結果について述べる。

キーワード：海底電位差磁力計・曳航式海底電気探査・人工電流電磁探査・比抵抗

1. はじめに

自然信号もしくは制御信号をソースとする電磁場探査は、反射法や屈折法などの地震波探査とは別のパラメータである比抵抗を通して地下を可視化する技術である。電磁法から得られる構造は一般的に反射法などの地震波探査のような解像度は得られないものの、1 点でも測点直下の鉛直構造を得られるなどメリットも多い。また、電気の流れやすさをパラメータとしているため、流体の存在に対して敏感な探査法と言える。この特徴を生かし、地下水・土質調査や石油などの資源探査に重要な位置を占めるだけでなく、科学的な面でも内陸地震発生域や火山体の構造調査において大きな成果を上げている。一方、海域でも石油探査への適用例が多くあり、沿岸域での地盤調査などへ海底電気探査法を適用した例もある(井上, 2005)。また、プレート沈みこみ帯での流体分布の推定

(Kasaya et al., 2005; 木村他., 2005)や、熱水地域での構造調査(Tada et al., 2005 など)が科学的な成果としてあげられる。さらには高比抵抗であるメタンハイドレートの検出にも期待が寄せられている。

これまでに国内に存在する自己浮上型海底電位差磁力計(以下, OBEM)は、海水によって短周期の電磁場が多く減衰することと、開発当時の技術的な制約により、100 秒以上の長周期データを長期にわたって観測するのに適した大型の観測装置となっており、主なターゲットはマントルなどの深部構造であった。これらの議論については藤(2005)に詳しい。しかしながら、陸に近い浅海では短周期の電磁場の減衰も小さいと考えられ、1 秒から 100 秒の周期帯のデータが、より浅部の地殻の比抵抗構造を明らかにするのに重要である。Constable et al.(1998)では、インダクションコイルを用いた水平磁場 2 成分と電場 2 成分が測定可能な OBEM を用い、10 日

2006 年 12 月 11 日原稿受付; 2007 年 1 月 25 日受理

* 海洋研究開発機構

〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町 2-15

** 高知大学大学院理学研究科

〒780-8520 高知市曙町 2-5-1

(1) 現所属:日本海洋掘削株式会社

〒103-0012 東京都中央区日本橋堀留町 2-4-3 新掘留ビル 6F

第 113 回(平成 17 年度秋季)学術講演会にて一部を発表

間の観測データから 10 秒から 1000 秒の周期帯で良好なデータを取得している。日本近海でも、巨大地震発生域の構造解明を主な目的とした地殻構造調査が実施されている。たとえば、南海トラフでは 11 台の測器を用いた観測が行われ、海洋地殻の沈み込みに伴う構造変化を明らかにしているが(Kasaya et al., 2005; 木村他, 2005), 地殻構造を得るのに十分なサンプリングレートでデータ取得可能な OBEM が調査の時点では国内にはなかったために、機材を海外よりレンタルして観測を実施する必要があった。南海トラフの様な巨大地震発生域では IODP による掘削計画が進行しており、その実体解明には深さ 10km 程度の地殻構造が重要である。また、火山活動の活発な海山における調査では浅部をより高解像度で見ることが必要であり、人工電流源を用いた探査が有効となる。今後の海底電磁場観測を考えると、機動性の高い電磁場観測装置や人工電流源を備えた装置が必要であると言える。加えて、この様な観測装置が多く存在すれば、大きな被害を及ぼす地震や火山の噴火が起こった際にも、陸上の様な緊急調査(たとえば Uyeshima et al., 2005)を速やかに実施することが可能になるであろう。

本稿では、筆者らが開発した小型の自己浮上型電磁場観測装置および電気探査装置を中心に、近年の海域における電磁探査および電気探査の近況を述べる。自己浮上型の電磁場観測装置では測定対象によって電磁場両方を測定するもの、またはその一方のみを測定するものなどがあるが、本稿では特にことわらない限り電磁場両方を測定する海底電位差磁力計(OBEM)を指すものとする。

2. 小型の自己浮上型海底電位差磁力計(OBEM)の開発

国内で主に使用されてきた OBEM は、数ヶ月から 1 年にわたる観測の実施を念頭に開発されており、磁場センサーや収録装置および電池は、複数のガラス球に封入されて大型の金属フレームに取り付けられる。そのため、メンテナンス性や船上作業の容易さの面では優れているとは言い難い。また、1 台当たりの運用コストも高い。つまり、短期間に多くの機材を設置・回収を繰り返し行う観測には適しているとは言えず、緊急の調査に対応するのも難しい。また、電位差を測定するためには長さ数 m 程度の電極アームが必要であるが、従来型の電極アームの取り付け方法は、組み上げ時や船上での投入・揚収時の作業性も決して良いものではなく、難しい船上オペレーションを必要とされることも多い。このようなことから、我々は作業性やメンテナンス性なども考慮した設計が、運用を容易にするのに重要であると考えた。新規開発する OBEM では地殻構造から上部マントルまでをターゲットとした、数週間から数ヶ月程度の観測の実施に適した構造とした。この OBEM の開発にあたり、我々がクリアすべきと考えた課題は以下の通りである。

- (1) 金属フレームを使わず小型化をはかる
- (2) 組み上げの容易さ、メンテナンスのしやすさ
- (3) 船上での作業性の向上
- (4) 製作・運用コストの削減
- (5) 1Hz 以上の高速サンプリング
- (6) 高分解能
- (7) 高精度な時刻同期

(1)から(3)は、多くの測器を短期間に運用するために重要であり、その成果は(4)の製作・運用コストの削減にも繋がる。磁力計や電気回路などは、既存のものを上記の課題を解決できるように改良している。

2.1. 開発した小型 OBEM の概要

OBEM の持つ長い電極アームが作業効率の悪化をもたらすことは先に述べた通りである。我々は、電極アーム部を組み立て作業が容易な構造とし、かつ浮上時に電極アームを折りたたむ機構を備えることでその欠点を解決することとした。また、自己浮上型の測器の肝となる音響切り離し装置は、東京大学地震研究所や海洋研究開発機構で実績のある海底地震計の音響切り離し機構を採用しており、海洋研究開発機構の船舶では船底デューサーを用いた SSBL(Super Short Base Line)による測距が可能である。このため、沈降や浮上時のスラントレンジだけでなく、測器の深度もリアルタイムで知ることが出来る。検討の結果、電極アームとその取り付け台座がガラス球と錘部との間に挟み込まれた構造を考案し、Fig.1 に示す小型の OBEM を開発した。音響信号による錘の切り離しが成功すると、浮上するに伴い自動的に電極アームが折りたたまれるようになっている。Figure 2 は、その機構の概念図である。取り付け台座はポリプロピレン製で浮力的にほぼ中性、電極アーム部の素材は MC ナイロンと塩ビであるため浮力が無い。そのため、切り離

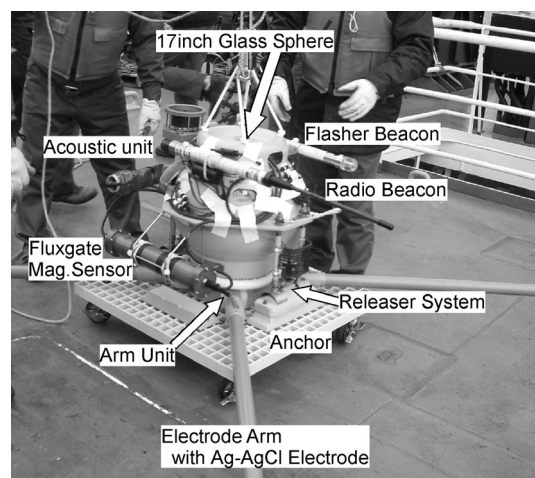


Fig.1 Developed ocean bottom electro-magneto meter. Electronic devices and a battery are put in a 17 inch pressure glass sphere. The electrode arms are 2-m lengths with silver-silver chloride electrodes.

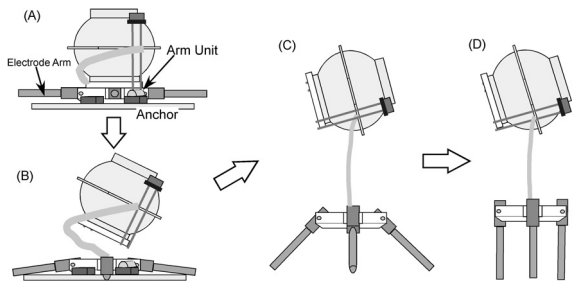


Fig.2 Diagram of floating and arm folding system. (a) Setting on the seafloor. (b) The anchor is released by acoustic unit on receipt of an acoustic release command code from a acoustic unit on board. A glass sphere then start to pop up. (c) Arm unit is picked up with surface, and electrode arms are automatically folded. (d) Floating posture.

し後に最初に浮上するのは OBEM 本体のガラス球部のみで、台座と電極アームは本体ガラス球と台座を結ぶチューブが伸びきるまでは浮上しない。電極につながるケーブルは、このチューブの中を通過しており、どのような状態でもケーブルに不用意に力がかかって断線することのないように工夫されている。この機構については、特許を申請している(特許申請番号 2005-350021)。また、浮力の関係で、OBEM 本体ガラス球が海面に達した後も、海面に出るのは OBEM 本体のみである。すなわち、既存の OBEM 回収作業を困難にしていた電極アームが海面下に垂れ下がった状態にあるため、海上に浮かんだ OBEM 本体を船のすぐ側まで寄せることが可能になり、作業性と安全性を高める効果がある。アンプや記録装置などの主なエレクトロニクスはガラス球内部に電池と共に封入されており、ガラス球の周囲に金属耐圧容器に入ったフラックスゲート磁力計、音響装置、ラジオビーコ

ン、フラッシャービーコンが取り付けられている。

測器の性能は、測定系の回路のみならず、確実に投入から浮上・回収までの作業が行えることも重要なファクターの一つである。先の述べた特異な構造を持つため、沈降姿勢や Fig.2 で示した着底姿勢、切り離し・浮上時の挙動を確かめる必要がある。我々は、海洋研究開発機構にある潜水訓練プール(最大水深 5m)や機構岸壁において実験を行った。実験の結果、極めて安定した姿勢で沈降すること、切り離し時の姿勢や浮上時の挙動も仕様通りであることを確認することが出来た。

我々の開発した自己浮上型の観測装置は、測器の回路部を目的に応じて選択することができる。これはトランスポンダをガラス球外部に独立して装備しているため可能となっている。通常は、自然シグナルを利用した Magneto-telluric 法の実施を念頭に置いているため電磁場の双方を測定する OBEM での運用が主である。この OBEM はテラテクニカ社製の電子回路とフラックスゲート磁力計を搭載しており 8Hz サンプリングが可能となっている。この測器の仕様を Table.1 に示す。フラックスゲート磁力計はガラス球外部の金属耐圧容器内に収納されている(Fig.1)。このほかに電場のみを測定する電位差計(以下 OBE)の製作を行っている。外観上は Fig.1 の OBEM とほとんど変わりなく、磁力計耐圧容器が無い点が異なる。この OBE は神戸大型 OBEM の電位差測定回路部を基本として、A/D コンバーターを 24bit 化、主電源をリチウム 2 次電池とし、GPS 同期の外部時計との同期および時刻比較を可能にしている。リチウム充電電池を用いているので運用のたびに電池を購入する必要が無く、多くの繰り返し観測の実施に適している。また、時刻同期・比較が正確な時計と行えることは、人工電流源探査を実施する上で必要な条件である。前述の OBEM では現場でのパソコンを介した高精度時刻同期機能(0.01 秒)を搭載しているが、精度は ntp サーバと同期したパソコンの時計に依存してしまう。今後、OBEM でも同様の外部時計ないしは GPS 時計との同期機能を付加できるように改良を行う予定である。

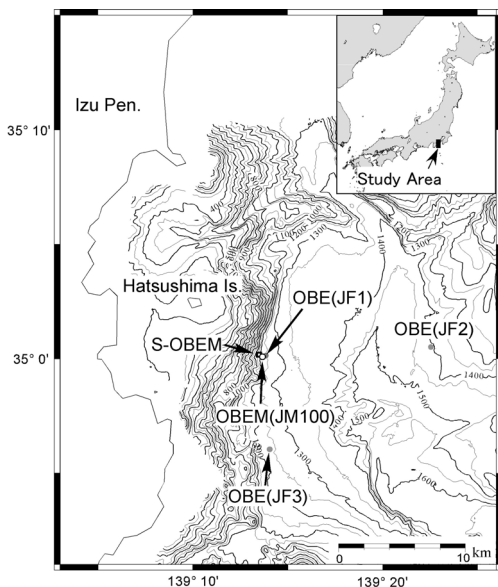


Fig.3 Survey area map off Izu peninsula, Sagami bay.

	OBEM	OBE
Sampling rate	8Hz	1Hz
AD converter	16bit	24bit
Resolution	0.000305176mV/LSB 0.01nT/LSB	0.0000019mV/LSB
Power supply	Lithium battery	Li-ion rechargeable battery
Memory	Compact flash memory (Max 2GB)	Compact flash memory (Max 256MB)
Communication port	USB1.1/RS-232C	RS-232C

Table1 Specifications of developed OBEM and OBE system.

2.2 海域試験

	Longitude	Latitude	Depth(m)	Deployment(JST)	Recovery(JST)
JM100	139-13.667E	35-00.094N	1221	2005/1/9	2005/1/20
JF1	139-13.848E	35-00.143N	1251	2005/1/7	2005/1/19
JF2	139-22.547E	35-00.515N	1406	2005/1/8	2005/1/20
JF3	139-14.048E	34-56.048N	1227	2005/1/8	2005/1/15

Table2 Locations and summary of OBEM and OBEs in NT05-01 cruise.

最初の海域試験は 2005 年 1 月に相模湾での海洋研究開発機構の海洋調査船「なつしま」による NT05-01 航海で実施された。設置したのは OBEM1 台, OBE3 台である。設置点は Fig.3 に示したとおりである。着底位置と設置期間は Table 2 にまとめた。本航海では、実船舶を用いた設置・回収作業を実施し、沈降および自己浮上時の諸処の動作検証そして実海域でのデータ取得試験を行うことで、開発した測器の実用性を検証することを大きな目的としている。この航海では無人潜水艇ハイパードルフィンを搭載していたため甲板での作業に制約があり、狭い端艇甲板での作業を余儀なくされた。すべての電極アームを一度に取り付ける作業面積がないため、OBE(M)をクレーンでつり上げた状態で電極アームの取り付けおよび電場ケーブルの結線を行うことになった。しかしながら、電極アーム取り付けやケーブル結線のしやすいように設計されているため、スムーズに投入作業にはいることが出来た(Fig.5)。Figure 4 は OBE(JF2)の沈降時の方位計の記録で、投入時から着底までの方位変化は数十度しかない事が分かる。また、傾斜角の変化も非常に小さく、ほぼ水平姿勢を保って沈降していることが分かった。これらのことから、沈降時の姿勢は非常に安定していることが示された。この傾向は他の測器でも同様であった。また、着底の姿勢を観察するために無人潜水艇ハイパードルフィンを使った潜航調査を実施した。相模湾の底質は軟らかい堆積物が厚く堆積しており、着底時に堆積物中に埋まってしまう懸念があったが、ハイパードルフィンによる観察の結果、ほとんど堆積物に没することなく極めて安定した姿勢でほぼ水平に着底していることが確認された。7日から12日間の観測後、船上からの音響信号送信による錘の切り離しを実施し、すべての測器の回収に成功した。浮上速度は 45m/分から 50m/分で、従来型に比べると 10m/分以上速い。この速度向上は、腕を折りたたむことによって浮上時の水の抵抗が軽減されたためと推測され、離底から回収までの時間短縮に貢献する。海面への浮上が確認されたときの姿

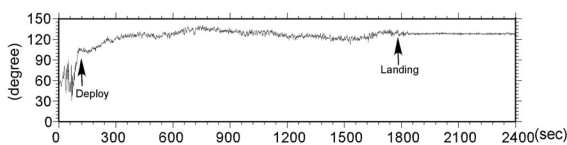


Fig.4 Time series of a magnetic compass collected by JF2 between deployment and landing.

勢も極めて安定しており、Fig.2の(D)と同じように本体ガラス球は浮いているが、浮力のない電極アーム部は海水中にあった。回収作業も非常にスムーズ(Fig.5)で、測器の視認からオンデッキまで5分程度で作業を完了できた。以上のように、海域試験でも設計通りの作業性の良さや安定した姿勢での沈降、着底が可能であることが確認できた。

次に取得データについて述べる。ここでは、設置した4台のうち、電磁場双方を取得しているOBEMのデータを用いる。NT05-01航海では海洋研究開発機構が初島沖合に設置している深海底総合観測ステーション(Momma et al., 1998; 岩瀬ほか, 2001)に、ケーブル接続型OBEM(ここではS-OBEMと呼ぶ)や海底重力計などの接続も行っている(佐柳ほか, 2005)。このS-OBEMは、

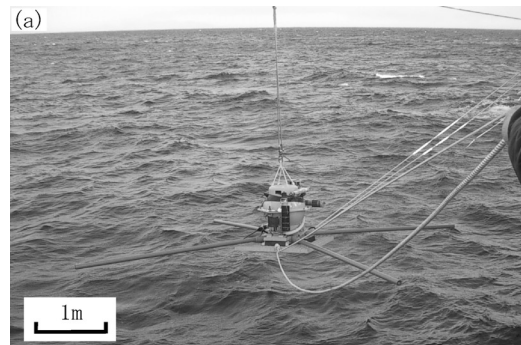


Fig.5 Photos of onboard operation (a) Deployment of OBEM system (b) Recovery Operation of OBEM system.

Sayanagi et al.(2004)で試験観測が実施されたケーブル接続型 OBEM を、深海底総合観測ステーションに接続できる通信仕様としたもので、観測ステーションと地上局とを結ぶ通信回線を通してデータを連続収録可能になっている。現在、取得されたデータは初島地上局より海洋研究開発機構横浜研究所へ定期的に送られ、データベース化されている(<http://www.jamstec.go.jp/scdc/>)。この磁場データを磁場参照点として OBEM の時系列解析を行った。OBEM の磁場データに CF カードドライブのノイズが乗っていたため、20 次のメディアンフィルタ処理を施し、1 秒値にリサンプリングして解析に使用した。このノイズはカードドライブアクセス時の電流が流れる際の磁界によって生じていることが分かったので、現在改良を行っている。解析に用いたのは、S-OBEM と OBEM 双方で全日のデータ取得が出来た 1/15,16,18 の 3 日分のデータである。時系列解析には rrrmt ver.8(Chave et al., 1987)を使用した。Figure 7 は解析によって得られた見掛け比抵抗と磁場-電場間のコヒーレンスである。観測点と磁場参照点が近接しているため、同期したノイズが取り切れていない可能性があるが、3 日分のデータのみの結果としては非常に良く決定されている。特に両成分とも 50 秒から 500 秒でエラーの小さい見掛け比抵抗値と良好なコヒーレンスが得られた。RhoYX 成分では、10 秒から 50 秒の短周期でも誤差の少ない見掛け比抵抗値が得られている。このことは、開発した OBEM が地殻構造調査に必要な短周期のデータを提供できる性能を有することを示唆している。

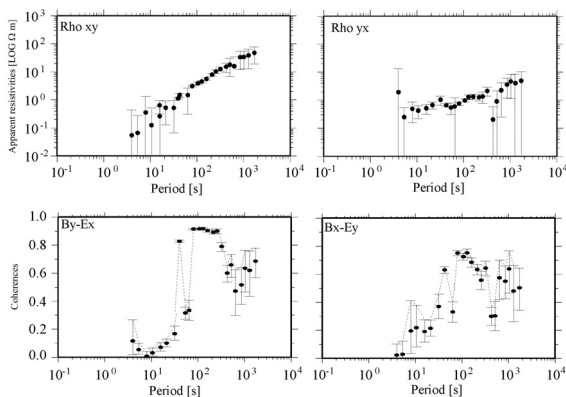


Fig.6 Apparent resistivity and coherency calculated by 3 days OBEM data. Upper panels show Apparent resistivity, and lower panels show coherency magnetic field and electric field.

3. 深海曳航式電気探査の開発

前章で述べた OBEM や OBE システムにより、自然信号での MT 探査を十分な観測密度で実施可能な目処が立ったと言える。しかしながら、海洋底掘削のロギングデ

ータやコアサンプルと関連づけて地震発生域やメタンハイドレートや石油などの資源との関連を調べるには、海底下 1km 程度より浅部の情報が不足している。特に観測する海域の深度が深くなればなるほど、浅部の情報を持つ高周波数成分の減衰が激しく、十分な質を保った観測が難しい。その場合、自然信号のみで対処することは難しいため、人工信号源を用いた探査法に頼らざるを得ない。また、火山活動の活発な海山での調査でも浅部の情報が重要である。そこで我々は、陸域と同じく浅部情報を得ることができる海底電気探査システムの開発を実施した。

海域での電気探査を考える場合、問題となるのは非常に比抵抗の低い海水の存在である。電流・電位電極のついたケーブルを、音波探査と同じように海面を曳航するのが最も簡単であるが、低比抵抗の海水による電力損失が非常に大きくなり、深海での適応は困難であると考えられる。そのため、出来るだけ海底に近い位置で測定することが望ましい。Francis (1985)や Von Herzen et al.(1996)では、潜水艇を用いた海底電気探査が行われているが、比較的狭い範囲での観測にとどまっている。広域をマッピングするには電極ケーブルを曳航する方が効率的であるが、潜水艇では行動範囲や着揚収作業の制約も大きく、広域マッピングには適しているとは言えない。また、十分な探査深度を稼ぐためには、100m を超える長さの電極ケーブルを曳航する必要がある。そこで我々は、海洋研究開発機構所有の曳航式深海底調査システム「ディープ・トウ」(詳細は <http://www.jamstec.go.jp/rov/deepto.html> を参照)に送信電流源とレコーダーを搭載し、曳航体後部に電極ケーブルを取り付けた状態で曳航する方法を採用し、ハードおよびソフトウェアの開発を行った。

3.1 開発した深海曳航式電気探査装置の概要

開発した深海曳航式電気探査装置「MANTA」(Marine Navigated Towed Antenna)は、送信電流源とレコーダーからなる人工電流源装置を曳航体に搭載し、送信電極への給電と電位測定を行っている(Fig.7)。曳航体後部に取り付けられた電極ケーブルは全長約 160m であり、8 カ所の送信電流電極と 2 本の受信電極を備えている。受信電極には 1 組 2 個の Ag-AgCl 電極が用いられており、曳航体のテールから 5m と 25m 位置で電位差測定を行うことが可能である。一方、送信電極と人工電流源を結ぶ電線はプラスチックチューブでカバーされ、一条に一体化されている。各送信電極は長さ 2m の銅網線からなるが、銅網線をプラスチックチューブに巻き付けたコンパクトな状態として用いられる。曳航体から最も離れた電極(曳航体尾部より 153m)を基準送信電極(COM)として、残り 7 つの電極(CH1~CH7)のうち 1 つをもう一方の送信電極として順次切り替えながらサイン波的交流電流

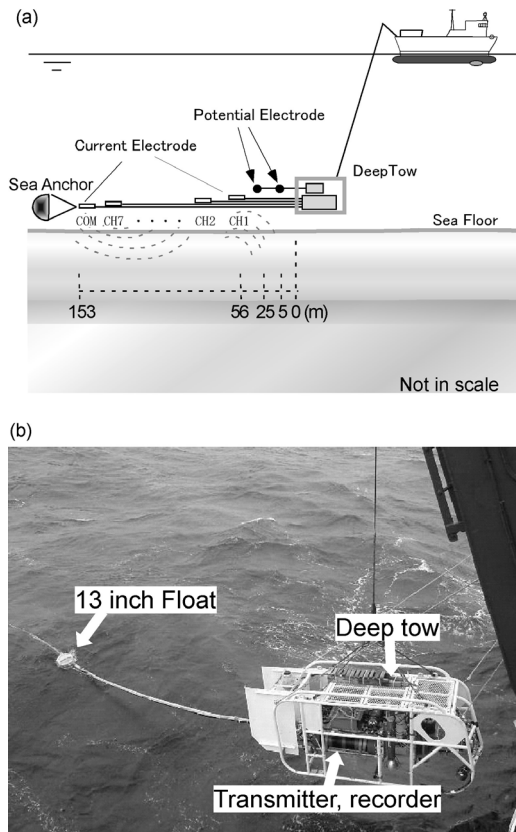


Fig.7 (a) Line drawing of the towed DC resistivity system. Each potential electrodes set up at 5m and 25m, and eight current electrodes set up between 56m and 153m. (b) Photo of the towed DC resistivity system.

を通電した。7つの電極は、曳航体からそれぞれ 56m, 66m, 75m, 90m, 105m, 124m, 138m の位置にある。電極配置としては、一つの電位電極が固定された Dipole-dipole 法の一種と言える。通常の電気探査と同様に考えれば、送信電極が受信電極から遠い場合には受信電位差は海底付近～地下深い場所の平均的な比抵抗構造を反映しており、近い場合は浅い場所の比抵抗構造を反映しているといえる。従って MANTA では、送信電極の位置を切り替えることにより、異なる深さの比抵抗構造の情報を得ることができる。

安定してケーブルの曳航を行うためには、ケーブル自体が中性浮力を持つことが必要である。電線や電極の水中重量を計算し、それを打ち消すためのフロートを4カ所に取り付けている。また、ケーブルの安定性を増すためにケーブルの末端にはシーアンカーを取り付け、一定の抵抗を持たせることでケーブルに張りを生み、安定した曳航を行えるようにした。曳航体とケーブル末端には音響トランスポンダが取り付けられており、船舶との音響測距によってそれぞれの位置をリアルタイムで把握することが可能である。このときの位置決定精度は水深の2-5%程度である。また、海底面近傍を曳航するため、地形変化による衝突が懸念されることから、高度計のデー

タに加え、曳航体の前方、後方、直下に向けた3つのカメラを搭載して監視を常に行いケーブル長の調整を行っている。人工電流源装置自体は曳航体に搭載されているが、装置への電力の供給は曳航体を曳くウィンチケーブルを通して船舶より行っている。また、ウィンチケーブルに入っている光ファイバーを通して、送信電流や受信電位差の値の一部をリアルタイムにモニター出来る。最終的に得られた全データは調査終了後(曳航体揚収後)に耐圧容器からパソコンへ転送される。その後、送信電流のサイン波1周期ごとに、送信電流値と受信電流値の比を最小自乗法によって求め、無限一様媒質中での電極配置による Geometric Factor を適用することによって、海中や海底での見掛比抵抗値を求めた。

3.2 海域試験

MANTA の海域試験は海洋研究開発機構の海洋調査船「かいよう」による KY05-08 航海により佐渡西方沖の海域で行われた(Fig.8)。曳航体としては、「かいよう」に搭載された 6000m 級深海曳航カメラシステムを用いた。データ取得時の送信電流は最大約 $\pm 18A$ 、周期は 4 秒であり、受信側のサンプリングレートは 0.2 秒とした。送信電流の組み合わせは COM に対して CH1 から CH7 までの 7 通りを順次切り替える方式で、28 秒で 1 回の測定を終える(これを 1 シーケンスと呼ぶ)。

MANTA により得られたデータが正しく海水や海底の比抵抗値を反映しているかどうかをチェックするために、海中でキャリブレーションを行っている。曳航体投入後、海底と海面から十分に離れた深度 600m(調査地域の水深は約 1200-1500m)において 15 分のデータ取得を行った。取得されるデータは海水の比抵抗値のみを反映していると考えられるので、求められる見掛比抵抗値が海水の比抵抗値と等しくなればよい。海水の比抵抗は曳航体に搭載された CTD(Conductivity, Temperature, Depth profiler)の値を用いることが出来るので、電流の送受信データから計算される見掛比抵抗値と CTD で得られる海水の比抵抗値を比較することにより MANTA が正常に動作しているのかどうかを確認できる。両者の比較の結果、MANTA によって得られる見掛比抵抗値は概ね CTD の比抵抗値に近いことは確認された。ただし両者には多少のずれがあり、その原因としては、受信電極での受信電圧の減衰や、曳航される電極ケーブルの若干のたわみによる Geometric Factor の相違、曳航体や曳航ケーブルの金属部分による電位分布の歪みが挙げられる。そこで本研究では、キャリブレーション時の CTD による比抵抗値と見掛比抵抗値の比を補正係数として、海底付近などで得られた見掛比抵抗値を補正することとした。深度 600m でのキャリブレーションの後、徐々に曳航体の高度を下げ、海底からの高度が 5m から 10m の間を保つように曳航を行い、通算 120 分間の通電を行った。得

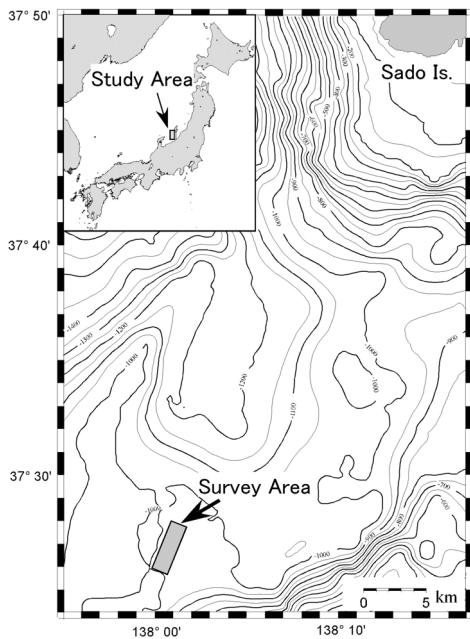


Fig.8 Survey area map off Sado island

られたデータから見掛比抵抗を計算し、キャリブレーション時の補正係数を用いて補正を行った。補正後の見掛比抵抗値を測定時間や水平測定位置に沿った疑似断面として図示することができる(Fig.9)。Figure 9を見ると、海底下の構造は様ではなく、かなり空間的な変化が大きいことが分かる。ほとんどの地域で海水の比抵抗値 $0.3 \sim m$ よりも大きい値を取っていることから、海底下の構造の影響を受けていることが分かる。特徴的なのは高い見掛比抵抗を示す領域が2つあることである。これらの領域では、同じ KY05-08 航海で実施されたピストンコアリングによってメタンハイドレートのコアが取得または曳航体のカメラ観察によりメタンハイドレートの海底面への露出が観察された地域と一致する。よって、電気探査によって得られた高い見掛比抵抗値は、固体で比抵抗値の高いメタンハイドレートの影響を受けたものと推定することができる。なおここで用いた補正方法が適正かどうかは今後検討を重ねる必要があるが、調査中は曳航体および電極ケーブルの姿勢はほぼ安定であったことが曳航体のカメラ映像で確認されているため、Figure 9 が相対値としては正確なものであると思われる。

より詳細な構造解析法に際しては、海底地形や曳航体高度などの補正やインバージョンコードの開発が今後必要となる。現段階では、Spitzer(1995)による3次元フォワードコードを用いて地形の補正を試験的に行い(高木他, 2005)、 $0.3 \sim m$ 以上の高い見掛比抵抗値は海底地形の凹凸のみでは説明できず、地下構造の違いを表していることが分かっている。より高度なデータ補正・モデリング方法は今後の検討課題としたいが、近い将来広域の2次元ないしは3次元比抵抗マッピングが可能になるで

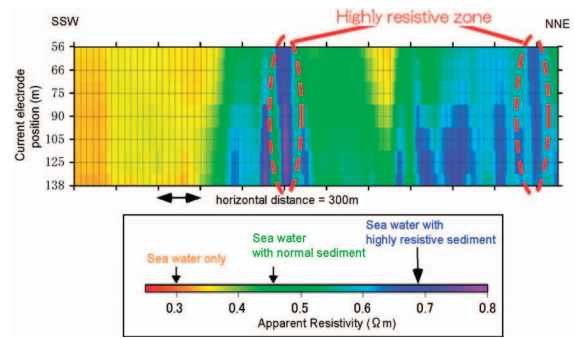


Fig.9 Apparent resistivity distribution after correcting sea surface geometry. Horizontal axis shows the position of MANTA. Vertical axis shows current electrode position.

あろう。特に3次元探査を念頭に置く場合、ケーブルを張り巡らす必要のある陸での観測に比べ、曳航するだけで広域を連続的にマッピングできる海底電気探査は非常に有利と言えるだろう。

4. その他の海洋電磁探査法

前章で述べた電気探査法は、深さ数百 m までの構造を微妙かつ広域にわたってマッピングするのに向いているが、数 km までの構造を得ることは難しい。この自然信号の MT 法と電気探査の間をつなぐのが、船舶や曳航体などから人工信号を送信し、その信号を海底にある OBEM など受信する手法である。陸上観測では CSAMT 法や TDM 法に相当する。送信と受信に電場もしくは磁場のどの成分を用いるかによって多くの組み合わせが考えられる。海域において、近年成果を上げつつある人工電流源を用いた電磁探査の代表的なものとしては、海底に対して鉛直の双極子電流を流すものと、水平双極子電流を流すものに大きく分けられる。前者は MMR(Magnetometric resistivity)法と呼ばれており、送信された双極子電流を海底に設置された複数の OBEM で受信する。適応事例として、熱水地域での地殻比抵抗構造調査があげられる(Evans et al., 2002; Tada et al., 2005)。MMR 法については多田・島(2005)に詳しいレビューがあるので参照されたい。後者の水平双極子電流を流す探査法としては CSEM(Controlled-source electromagnetic)法があげられる(Shinha et al., 1990 など)。学術的な成果としては、MacGregor et al.(2001)がラウ海盆に置いて、海底下 6-7km までの2次元構造を得ることに成功している。一方で、メタンハイドレードに対する CSEM 法の適用も行われている。Weitemeyer et al.(2006)は、曳航体から送信された信号を 25 点の OBEM で受信し、見掛比抵抗断面と1次元構造を推定している。得られた1次元構造と ODP で行われた検層データとの比較も行っている。

同様の探査は、前述した小型の OBEM および OBE を受信機に、電気探査装置を信号源として利用することで実現可能である。信号の受信試験については、KR05-08 航海においてすでに成功しており(笠谷・後藤, 2005), Weitemeyer et al.(2006)と同様の解析を行うことも可能となっている。しかしながら、電流源の位置が 3 次元配置となるため 2.5 次元ないしは 3 次元解析が今後は必須となる。これらの計算コードは通常の MT 法に比べて整備されているとは言い難い状況であるので、観測技術の開発と共に解析法の確立が重要な課題であるといえる。

5. まとめ

本稿では、筆者らが開発した小型の OBEM と曳航式の電気探査装置を中心に述べた。小型 OBEM の海域観測では、投入から浮上・回収までの一連の過程が設計通りに動作することを確認し、MT レスポンスの算出を行った。投入・回収作業の容易さは、既存の測器では実現し得なかったことである。副次的な要素として、腕を折りたたむことによる水の抵抗の軽減により、既存の測器に比べて浮力が少ないにもかかわらず海底地震計と同等の速度で浮上することがわかった。このことは、浮上から回収までの作業時間短縮に貢献する。3 日分のデータを使用した解析により、10 秒前後の短周期帯から 500 秒付近までの良好な MT レスポンスを得ることができた。また、150m 超の電極ケーブルを海底から高度 5m 程度で曳航する電気探査装置の実海域での試験にも成功し、海底下の構造の影響と思われる比抵抗異常域の検出に成功している。今後の解析法や観測手法の改善と共に、これらの装置を活かした観測が行われることにより、学術的な面のみならず、資源探査などへの適応も期待される。

謝辞

本装置の開発にあたり、三ツ矢農水の岡部圭二氏には電極アームの折り畳み機構や切り離し装置の実装法などについて非常に有益な助言やアイデアをいただき、製作についても当方の難しいリクエストに応じていただいた。測定装置については(有)テラテクニカ,(株)クロバテック、長井義春氏には多大なるご協力をいただいた。東京大学地震研究所の金沢教授には考案された音響切り離し装置の利用を了承いただいた。測定装置については東京大学地震研究所の歌田教授ならびに神戸大学の島助教授には電子回路の一部の利用許可をいただいた。また、なつしま、かいようの船長ならびに乗組員諸氏、(株)日本海洋事業と(株)マリンワークの観測技術員、さらに陸上支援を頂いた海洋研究開発機構海洋工学センター研究船運航部・応用技術部には多くのご助力をいただき、海域試験を成功に導いていただいた。ここに記してお礼申し

上げる。相模湾の海底地形データは海洋研究開発機構海洋工学センターによるものである。

本研究の一部は、科学研究費補助金「人工電流源海底電磁探査法による海底下メタンハイドレートの探査と資源量推定」によるものである。

参考文献

- Constable, S. C., Orange, A. S., Hoversten, G. M. and Morrison, H. F. (1998) : Marine magnetotellurics for petroleum exploration Part 1: A sea-floor equipment system, *Geophysics*, **63**, 816-825.
- Chave, A.D., and Thomson, D.J., and Ander, M.E. (1987) : On the Robust Estimation of Power Spectra, Coherences, and Transfer Functions, *J. Geophys. Res.*, **92**, 633-648.
- Evans, R.L., Webb, S.C., and the RIFT-UMC Team (2002) : Crustal resistivity structure at 950' on the East Pacific Rise: Results of an electromagnetic survey, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, doi: 10.1029/2001GL014106.
- Francis, T. J. (1985) : Resistivity measurements of an ocean floor sulphide mineral deposit from the submersible Cyana, *Marine Geophys. Res.*, **7**, 419-438.
- 井上誠 (2005) : 海底電気探査システムの開発と適応事例, *物理探査*, **58**, 241-250.
- 岩瀬良一・満澤巨彦・平田賢治・海宝由佳・川口勝義・藤江剛・三ヶ田均 (2001) : 相模湾初島沖深海底総合観測ステーションの更新 - 次世代リアルタイム観測の確立に向けて -, *JAMSTEC 深海研究*, **18**, 185-192.
- Kasaya, T., Goto T., Mikada, H., Baba, K., Suyehiro, K., and Utada, H. (2005) : Resistivity image of the Philippine Sea Plate around the 1944 Tonankai earthquake deduced by Marine and Land MT surveys, *Earth Planets and Space*, **57**, 209-213.
- 笠谷貴史・後藤忠徳 (2005) : 小型海底電位差計の開発, *物理探査学会第 113 回学術講演会論文集*, 152-154.
- 木村俊則・芦田讓・後藤忠徳・笠谷貴史・三ヶ田均・真田佳典・渡辺俊樹・山根一修 (2005) : 南海トラフ沈みこみ帯の地殻比抵抗構造, *物理探査*, **58**, 251-262.
- MacGregor, L., Sinha, M., Constable, S (2001) : Electrical resistivity structure of the Valu Fa Ridge, Lau Basin, from marine controlled-source electromagnetic sounding, *Geophys. J. Int.*, **146**, 217-236.
- Momma, H., Iwase R., Mitsuzawa K., Kaiho Y. and Fujiwara Y. : Preliminary results of a three-year continuous observation by a deep seafloor observatory in Sagami Bay, central Japan, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **108**, 263-274 (1998)
- 佐柳敬造・後藤忠徳・一北岳夫・高村直也・長尾年恭・笠谷貴史・大西信人 (2005) : Installation of ocean bottom

- electromagnetometer on the Real-Time Deep Sea Floor Observatory off Hatsushima Island in Sagami Bay, 2005 年地球惑星関連学会連合大会予稿集.
- Sayanagi, K., T. Nagao, I. Watabe, T. I. Yamaguchi, N. Onishi, T. Ichikita, and N. Tamamura (2004) : Development of real-time observation system of electromagnetic fields at the seafloor, *Bull. Inst. Oceanic Res. & Develop., Tokai Univ.*, **25**, 55-66.
- Sinha, M. C., Patel, P. D., Unsworth, M. J., Owen, T. R. E. and Maccormack, M. R. G. (1990) : An active source electromagnetic sounding system for marine use, *Marine Geophys. Res.*, **12**, 59-68.
- Spitzer, K. (1995) : A 3-D finite difference algorithm for DC resistivity modeling using conjugate gradient methods, *Geophys. J. Int.*, **123**, 903-914.
- Tada, N., Seama, N., Goto, T., and Kido, M. (2005); 1-D resistivity structures of the oceanic crust around the hydrothermal circulation system in the central Mariana Trough using Magnetometric Resistivity method, *Earth Planets and Space*, **57**, 673-677.
- 多田訓子・島伸和 (2005) : Magnetometric Resistivity 法を利用した海洋地殻の比抵抗構造探査, **59**, 172-180.
- 高木亮・後藤忠徳・渡辺俊樹・真田佳典・三ヶ田均・島伸和 (2005) : メタンハイドレート海域における海底電気探査装置の実海域試験, 物理探査学会第 113 回学術講演会論文集, 141-144.
- 藤 浩明 (2005) : 海底電磁気観測の現状と将来, 物理探査, **58**, 227-239.
- Uyeshima, N., Ogawa, Y., Honkura, Y., Koyama, S., Ujihara, N., Mogi, T., Yamaya, Y., Harada, M., Yamaguchi, S., Shiozaki, I., Noguchi, T., Kuwaba, Y., Tanaka, Y., Mochido, Y., Manabe, N., Nishihara, M., Saka, M. and Serizawa, M. (2005) : Resistivity imaging across the source region of the 2004 Mid-Niigata Prefecture earthquake (M6.8), central Japan, *Earth Planets and Space*, **57**, 441-446.
- Von Herzen, R. P., Kirklin, J. and Becker, K. (1996) : Geoelectrical measurements at the TAG hydrothermal mound, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 3451-3454.
- Weitemeyer, K. A., Constable, S. C., Key, K. W. and Behrens, J. P. (2006) : First results from a marine controlled-source electromagnetic survey to detect gas hydrates offshore Oregon, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, doi:10.129/2005GL024896.

Marine electromagnetic observation technique and its development – For crustal structure survey –

Takafumi Kasaya*, Tada-nori Goto* and Ryo Takagi** (1)

ABSTRACT

Natural magnetic field is attenuated by electrically conductive water. Therefore, the marine magnetotelluric survey has been used at long period range(1000 to 100000 sec), and investigated deep mantle structure. To obtain the crustal structure, however, electromagnetic data at the periods between 1 and 1000s is very important, for example the investigation for mega-thrust earthquake zone. Because there is no suitable ocean bottom electro-magnetometer (OBEM), we developed small sized OBEM and OBE system. On the other hand, controlled-source survey techniques are needed to obtain a shallower detail structure than conventional MT method. The DC resistivity survey is powerful tool for a shallower survey. Our marine DC resistivity sounding system has a 150m long electrode cable, and this cable attached the Deep-tow system. In this article, we describe the mechanism of developed OBE(M) and DC resistivity survey system, and show some results of field tests

Keywords : Ocean bottom electro-magneto meter (OBEM), Towed marine DC resistivity sounding system, resistivity

Manuscript received December 11, 2006; Accepted January 25, 2007

* Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
2-15, Natsushima-cho, Yokosuka, Kanagawa 237-0061, Japan

** Graduate school of science, Kochi university
2-5-1, Akebono-cho, Kochi, Kochi 780-8520, Japan

(1) Now at : Japan Drilling Co.,Ltd.
Shin-Horidome Bldg. 6F 2-4-3 Nihonbashi Horidome-cho,
Chuo-ku, Tokyo 103-0012, Japan

A part of this paper was presented at the 113th SEGJ fall conference, 2005.