

浅海での OBM 実験

姫野康一郎・安松潤二・新貝雅文・佐藤数美・下泉政志(九州能開大)・
大志万直人(京大防災研)・上嶋誠(東大震研)

Preliminary report regarding OBM experiment in shallow seas

K. Himeno, J. Yasumatsu, M. Shingai, K. Sato, M. Shimoizumi (Kyushu Polytechnic College), N. Oshiman(DPRI, Kyoto U.) and M. Ueshima(ERI, U. Tokyo)

Abstract

In June 2007, we conducted the KT07-13 Tansei cruise in the Sea of Japan to achieve three different purposes. First, we verified to deploy and recover a newly developed OBE (Ocean Bottom Electrometer) system and validity of the system was confirmed. Second, we conducted a pressure-resistant test of newly manufactured OBM (Ocean Bottom Magnetometer) vessels. Finally, seafloor natural geomagnetic data were obtained to study the effect of shallow sea stream in our OBEM system. In this paper, the result of the experiment for measuring the natural geomagnetic variation in shallow seas is described in detail.

1. はじめに

周囲を海に囲まれた日本においては、陸上だけでなく海域における構造調査も不可欠であることから海陸同時電磁気観測も実施され始めており、構造解析では海陸接合問題などが提起されている(藤、2005)。ところで、21世紀に入り、鳥取県西部地震(2000/10/06、M7.3)を始めとし、福岡県西方沖地震(2005/3/20、M7.0)、能登半島地震(2007/3/25、M6.9)など日本海側の浅海域を震源とする地震が立て続けて発生し大被害をもたらしている。この海陸境界部にあたる浅海における海底観測では、複雑で活発な低層流によるセンサの揺れが極めて深刻な影響を及ぼすため、電磁場観測が実施されたことは殆どなかった。この自然電磁場変動観測のフロンティア領域といえる浅海においても、海洋研究開発機構(JAMSTEC)や原環センター(RWMFRC)などにより実用機の研究開発が進行中である(笠谷ら、2006;吉村ら、2004)。

このような状況の下、我々は、水深数100m程度までの浅海域を対象としたOBEM(Ocean Bottom Electro-Magnetometer:海底電位磁力計)の開発に平成16年度より取り組んでいる(西留ら、2005;吉村ら、2007)。その低層流対策の第一段階は装置の低床化であり、磁場計測よりも揺れの影響の少ない電場計測装置OBEは、1個の深海用ガラス球を用いた筐体構成によりほぼ実用化できている(丸山ら、本論文集)。しかし、磁場計測に関しては、その揺れ対策の困難さからいまだ実現できていないと言えず、開発途上段階にある。

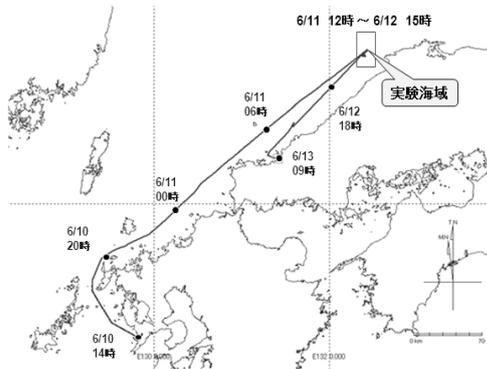
今回は、平成18年の鳥取沖での海底電磁気共同観測(6月25日~8月25日)に先だって実施した淡清丸KT07-13次研究航海(6月10日~13日)時に、低床化OBEMを用いて島根沖浅海底で計測された磁場変動データから得られた知見に関して報告する。

2. 淡清丸KT07-13次研究航海

本航海の目的は、次年度共同観測海域の予備調査と九州能開大製海底電位差計(KPC-OBE)の投入・回収試験、OBM用金属製耐圧容器の試験に加えて、浅海域での自然磁場変動観測の実現可能性を探るための磁場計測実験であった。

淡清丸はADCP(超音波ドップラー流速計プロファイラー;千葉ら、2007;SEA社、2005)を搭

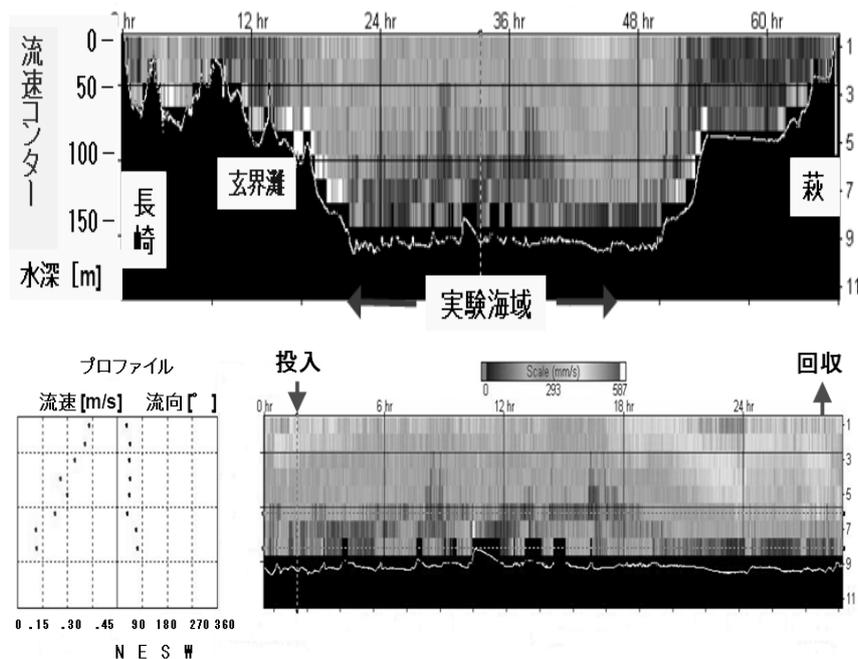
載しており、出港から入港までの全期間において1分毎に、水深300m程度までの海流の流向・流速分布を約25m間隔の深度毎に計測しており、第2図に示すように全航跡における流速・流向の深度分布データが取得されている。浅海域における磁場計測では海流の影響を非常に大きく受ける事は予想できるが、実際の海中環境に関する情報は皆無の状態であった。搭載型 ADCP の場合、原理上、海面から海底上25m程度までのデータが有効であり、海底近傍の情報は得ることができない(千葉ら、2007)が、今回の淡清丸で得られた ADCP データから、浅海域の海中環境に関する有益な情報を得ることができ、浅海用計測機器を開発している我々にとっては、非常に有用なデータであった。



第1図 淡清丸航海での航跡図

6月10日14時に長崎港を出港し、対馬海流の流れに沿い、約1日かけて実験海域である島根沖に到着し、6月11日12時から12日15時頃までの約1日間、黒枠で示す海域において実験を行った。

Fig.1 Cruise tracks of TANSEI



第2図 航海中の流速プロフィール図

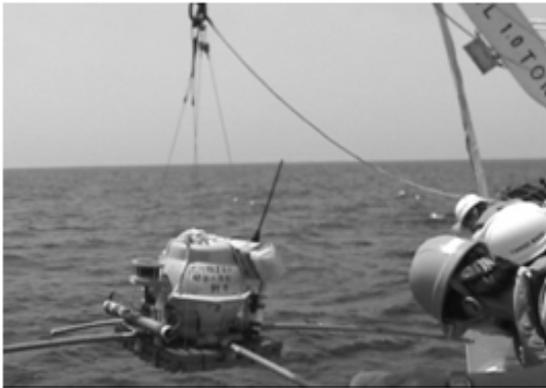
淡清丸に搭載された ADCP による航跡(左端が長崎港、右端が萩港で、中央の水深150m程度の部分が図1における実験海域である)に沿った場所における流速の深度分布を示す。なお、図下部の黒色部分の中の白線は海底を示す。

下段の図は、実験期間中のもので、左図は投入時点における流速、流向の深さ分布を示している。海面下では1ノット(0.45m/s)であるが、深さとともに減衰し、水深130mでは0.15m/s程度となる。また、流向は水深100m程度まではほぼ一定で、東北東方向(対馬海流の方向)であるが、それ以深では方向が時々刻々と変化し、複雑な海流の状態が伺える。

Fig.2 Velocity Profile Contour during TANSEI KT07-15 cruises

3. OBM 実験

今回は、第 3 図に示した OBEM を水深約 150m の海底に設置した。耐水压 6700m のガラス製耐圧容器内には電位差計測器と姿勢検出のための傾斜計・方位計だけでなく、磁力計も搭載していた。機器投入から回収まで実質 1 日間であり、観測データとしては十分とは言えないが、我々にとって、水深 150m の海底で初めて観測した磁場データからは多くの知見を得ることができる。なお、実験海域での水深 130m における海流の流速は、第 2 図から分かるように期間中 0.3m/s を超えることはなかったが、海面付近とは大きく異なり、その流向は時間と共に複雑に変化していた。

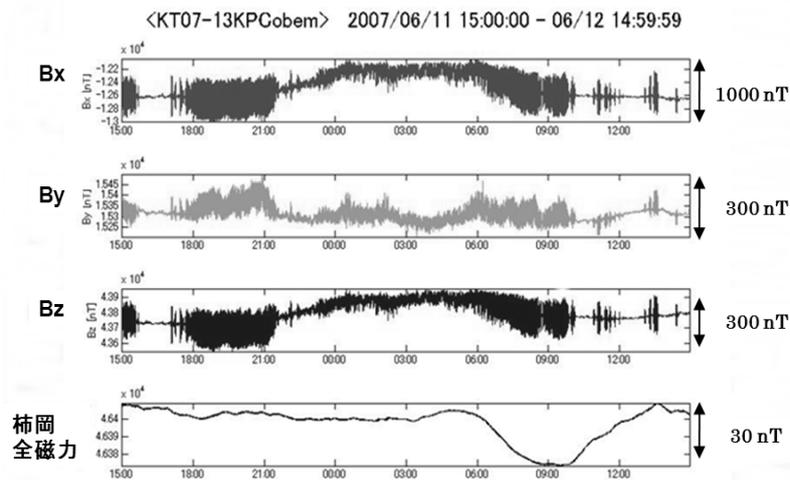


第 3 図 投入時の OBEM 外観

ハードハットで耐圧ガラス球を保護した本体の他に、磁力計、電場計測のため銀 - 塩化銀電極を格納した 4 本の 2m 長の塩ビパイプ、音響切離しのためのトランスジューサ、海面に浮上後の位置通知のためのビーコン、フラッシュと浮力調節用のシタティックフォームから構成されており、本体のサイズは 60×60×H80 [cm] である。30kg の錘を含めた空中総重量は約 60kg であり、落下速度は約 0.5m/s、回収時の浮上速度は約 0.7 m/s であった。

Fig3. Appearance of KPC-OBEM

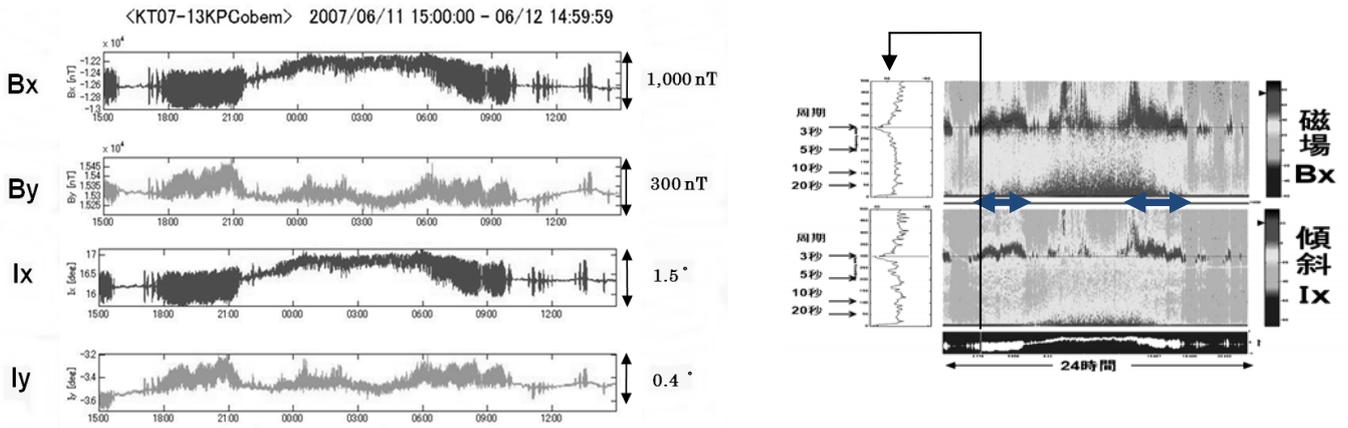
水深 150m の浅海底で観測された 1 日間（6 月 11 日 15 時～12 日 15 時）の磁場 3 成分データと陸上（柿岡地磁気観測所）での全磁力データを第 4 図に示す。陸上での全磁力データの変動幅はせいぜい 30nT であるのに対して、海底の磁場データはその 10 倍以上の変動を示し、特に、 B_x 成分は他の成分の 3 倍以上の 1000nT も変動している。さらに、OBM 内の磁場変動には、これまで経験したことのない短周期変動が記録されていた。このような陸上で観測されていない磁場変動は、既に指摘されているように磁場センサが振動した結果、発生したものである（半田ら、1992、下泉ら、2000）。



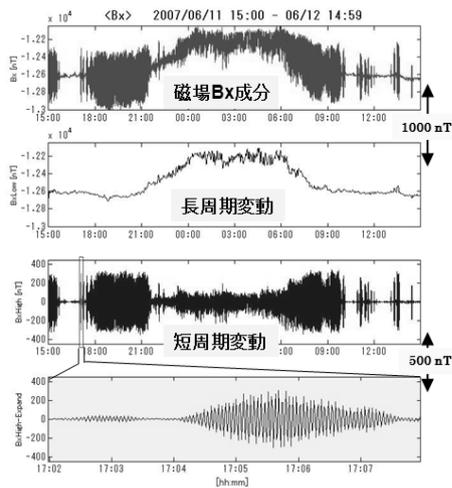
第 4 図 観測された磁場 3 成分データと、陸上で同時観測された全磁力データ
Fig.4 Observed magnetic in the ocean bottom and total force data in land

第 5 図左側に傾斜計の水平 2 成分データと対応する磁場データを示す。これから、磁場と傾斜の対応する成分の変動波形が瓜二つであり、3 倍程度の磁場変動を示す X 方向の傾斜変動 I_x も I_y 成分の約 3 倍の 1.5 度の変動幅であることが分かる。日本周辺での地球主磁場は約 40,000nT であり、磁場センサが 1.5 度傾くと約 1000nT の変動を生じるが、これは観測された変動値とほぼ一致している。

約 12 時間周期の潮汐に関係した揺れによる変動は経験していたが、今回の短周期変動は初めてであった。そこで、全期間中の磁場と傾斜データのダイナミックスペクトルにより、卓越周期とその時間変化を調べた。その結果、第 5 図右側のパワースペクトルから磁場・傾斜共に卓越周期が 3 秒程度であり、さらに、そのスペクトル構造が磁場と傾斜で完全には一致せず、時間と共に変化していることが分かった。つまり、磁場変動は、装置の短周期（約 3 秒）の揺れによる影響と長周期（数分以上）のそれが支配的な時間帯に分かれているようである。そこで、第 6 図に示すように、周期 300 秒を境として、長周期成分と短周期成分に分け変動の原因を考察した。



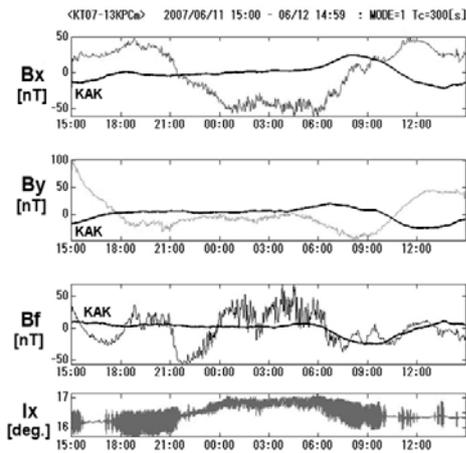
第 5 図 水平磁場成分と対応する傾斜変動の時系列データ（左図）とダイナミックスペクトル
 Fig.5 Horizontal magnetic field and corresponded increment data and their dynamic spectrum



第 6 図 磁場変動の長周期成分と短周期成分への分離上から、磁場 x 成分の生データ、その長周期、短周期成分データと、短周期成分データの一部を時間軸拡大したものを示す。
 Fig.6 Separation to long and short period of the magnetic field variations

まず、長周期磁場変動に対して、分解能 0.01 度の傾斜データ（ロール、ピッチ角）を用いて補正を行った結果を第 7 図に示す。通常はこの補正操作によって、陸上の磁場データと数 nT 程度までは合致する程度に補正できるが、今回は数 10nT 程度までしか補正できなかった。これは、傾斜計測データのないヨー角変動（水平面での回転）補正を行っていないことに起因していると考えられる。つまり、深海では考慮する必要のないヨー角変動が、浅海域では発生する事を示唆している。さらに、今回は、ガラス球 1 個の中に、磁場センサとリチウム 1 次電池等を格納していたため、その帯磁の影響で補正が十分できなかった可能性もある。

以上より、揺れの激しい浅海域では、磁場センサ部と本体は分離する必要がある、さらに、センサ部には何らかの揺れ対策が必要不可欠であることを再確認した。

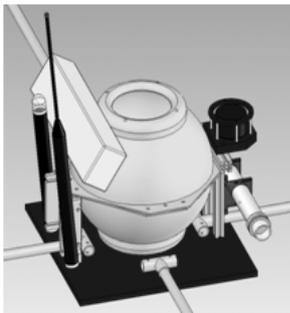


第7図 傾斜データによる磁場補正結果
 上から、磁場 x、y 成分、及び、全磁力に関する補正結果と対応する陸上での磁場(太線)と傾斜データを示す。

Fig.7 The result of increment Correction

次いで、短周期磁場変動について考える。第6図の最下段に示す波形と第5図右側のダイナミックスペクトルから、共振現象が発生していることが推定できる。そこで、海流により電極アームを含む筐体に加えられた力が、周期3秒程度(但し、1秒サンプリングデータであるので、共振周波数が数Hzである可能性もある)の共振を起こし得るかどうかをシミュレーションで確認した。

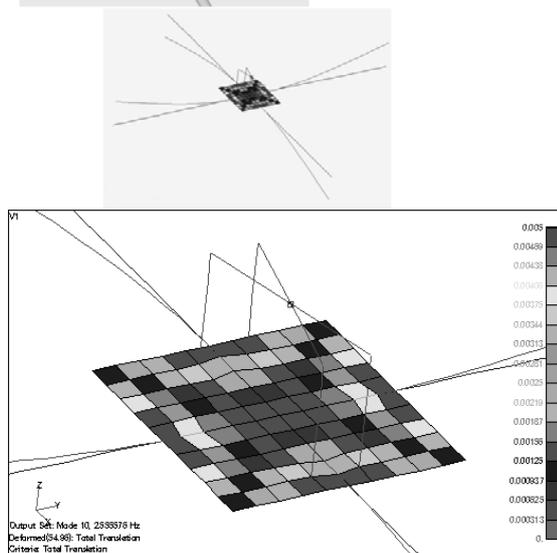
まず、第8図に示すように、OBEM 筐体を耐圧容器本体、プラスチック製台座、本体の固定用アルミフレーム、及び、4本の電極アームから構成されるとして、その3次元モデルを作成した。このモデルを基に、有限要素法ソフト Nastran を用いてモーダル(固有値)解析を行い、OBEMモデル筐体の固有振動が最も強い時の周波数を算出した。尚、モーダル解析では、曲げ解析とねじり解析モードの2種類を行ったが、両モードとも固定する点が存在しないと電極アームの揺れが本体に及ぼす影響を推定する事が出来ないため、隣接する電極アーム先端が海底に接着していると設定して解析を行った。



第8図 モーダル解析のためのOBEMモデル

実際のOBEM構成要素のうち、耐圧容器本体、台座、アルミフレーム、及び、電極アームのみをモデル化した。台座の大きさは0.6×0.6mで、装置の高さは約0.6m。

Fig.8 OBEM model for modal analysis



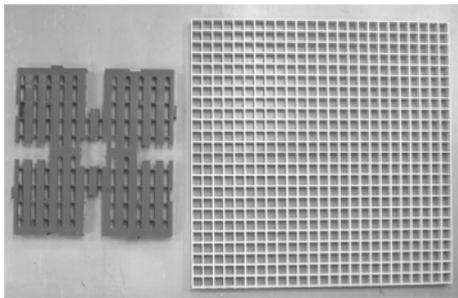
第9図 振動解析結果(変位図)
 上部に示す全体図のうち、台座部の変位を拡大した図を下に示している。

Fig.9 Result of modal analysis

解析結果を第 9 図に示すが、曲げ、ねじり解析とも約 0.6Hz の固有振動数（周期約 2 秒）が得られ、白黒の図では分かりにくい、4 箇所の電極取り付け部の変位が最も大きく変位をしていた。また、電極アームを取り外したモデル筐体に関する解析も行ったが、その結果は、固有振動の周波数は電極アームがある場合の約 30 倍高い 18Hz 程度であった。

これらシミュレーション結果より、卓越周期約 3 秒の短周期変動は、電場計測のために取り付けしていた 2m 長の電極アームによる共振が原因である可能性が高いと考えられる。また、この実験時には第 10 図の左側に示すような軽量で剛性の低いプラスチック製台座を 2 枚重ねていたが、そのうち上部は、回収の際の作業性を考え電極アームを折り畳んだ状態で自己浮上させるため、切り込みを入れていた。このような状況であったため、OBEM 本体により大きな振動を発生させたものと考えられる。

以上の結果から、浅海において磁場の計測を行う際には、振動を増幅させる可能性のある電極アームが取り付けられた状態では良好なデータを得ることは難しく、電場計測とは別個に行うべきである事が分かった。現在、OBM 専用の台座として第 10 図右側の FRP 製のものを採用し、重量を約 10 倍、設置面積を 3 倍程度大きくし、揺れにくい構造に改善している。



第 10 図 OBEM 台座

左側が本実験で使用したプラスチック製台座（0.6×0.6m、2kg）で、右側が OBM 専用使用する FRP 製台座（1m×1m、19kg）

Fig.10 OBEM

4. まとめ

対馬海流が流れ込む島根沖 20km 程度の水深が 150m の海底において、1 日間の自然磁場変動計測実験を行った。得られた磁場データには、潮汐が関与すると考えられる長周期変動だけでなく、電極アームに起因すると推定される短周期変動が大振幅で含まれ、自然磁場変動でなく、装置の傾斜変動を高精度に計測した結果となった。

本実験により、浅海域における磁場計測の困難さを再確認すると共に、実験データの考察からその実現に向けた対策などを得ることができた。また、ADCP データは浅海特有の海中環境に関する情報を示しており、今後の機器開発に是非生かしたい。

淡清丸研究航海では、船長、乗組員の方々をはじめ、技術支援の（株）マリンワークスの村田さんには多大な援助を受けました。ここに記して感謝いたします。また、柿岡における磁場データは、気象庁地磁気観測所のご厚意で提供頂きました。

なお、本研究は、平成 19 年度東京大学海洋研究所学術研究船淡清丸共同利用研究（研究代表者 大志万直人）、および、平成 19 年度東京大学地震研究所一般共同研究「西南日本背弧の三次元比抵抗構造の解明」（研究代表者 下泉政志）の支援を受けて実施した。

参考文献

- 藤 浩明、海底電磁気観測の現状と将来、物理探査、58、227-239、2005
笠谷 貴史・後藤 忠徳・高木 亮、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、物理探査、Vol.59、No.6 pp.585-594、2006
吉村 公孝、山根 一修、Steven Constable、Arnold Orange、浅海域での電磁法調査の問題点と対策試案、物理探査、57、383-394、2004
西留 紳也ら、極浅海における電磁場観測機器の開発（ ）CA 論文集、16-22、2005
吉村 修司ら、極浅海における電磁場観測機器の開発（ ）CA 論文集、111-117、2006

千葉 元・古山 彰一・横井 幸治、船舶搭載型 ADCP による対馬海流の流向流速計測、電学論 C、127、
No.5、669-704、2007
SEA 社、WinADCP 操作手順書、2005
半田 駿・田中 良和、海底電磁力計による有明海での MT 観測、佐賀大学教養部研究紀要、24、1-6、
1992
下泉 政志ら、男女海盆での OBEM 観測（序報）、CA 論文集、61-66、2000