

新型海底電位磁力計の製作

神戸大学自然科学研究科 一北 岳夫
テラテクニカ 大西 信人
東京大学地震研究所 歌田 久司

Development of a new type of Ocean Bottom Electromagnetometer

Takeo ICHIKITA¹⁾, Nobuhito OHNISHI²⁾ and Hisashi UTADA³⁾

1)The Graduate School of Science and Technology, Kobe University

2)Tierra Tecnica Ltd., 3)Earthquake Research Institute, University of Tokyo

1. はじめに

海底における電磁場変動を測定することは多くの困難を伴う。¹⁾しかし、日本のように周りを海に囲まれている地域の地殻および上部マントルの3次元的な電磁気学的性質を知るためには海底下のデータは必要不可欠である。また、分解能はともかくとして、100~150kmの探査深度を持つ電磁気学的手法は、海洋域において非常に有効な手段である。

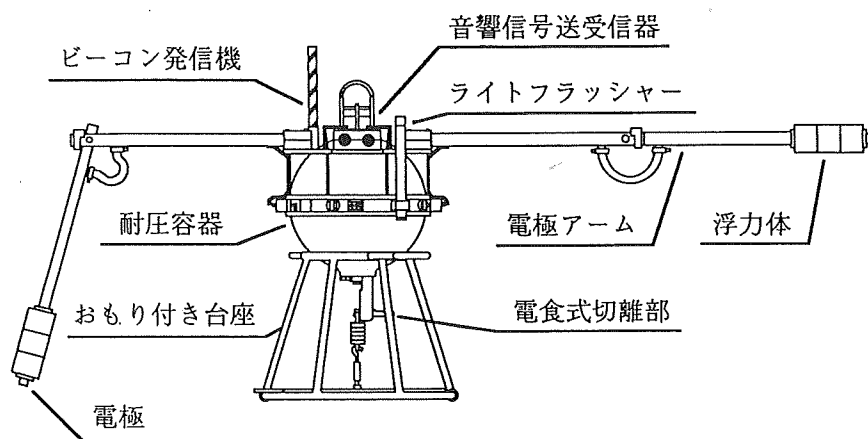
日本における海底電磁気観測は、1980年頃から盛んに行われてきた。まず、海底磁力計(Ocean Bottom Magnetometer: OBM)の開発および自然磁場変動の観測がSegawa et al. (1981²⁾, 1982³⁾, 1983⁴⁾)によって行われた。ついで海底における電場変動を測定する海底電位差計(Ocean Bottom Electrometer: OBE)が浜野ら(1984a⁵⁾, 1984b⁶⁾)によって行われ、OBMとOBEを1セットとして海底におけるMT法の適用も行われるようになった。

浜野ら(1989)⁷⁾は海底において磁場3成分および水平電場2成分を同時に測定することのできる海底電位磁力計(Ocean Bottom Electromagnetometer: OBEM)を開発した。詳細は後述するが、音響式切り離し装置、電位磁力計などがコンパクトにまとまっており、RS232C回線を利用して耐圧容器を開けずに設定や転送ができるなど非常に進歩的な測定器であった。しかし、コストが非常に高く、コネクタが多いために整備も大変であり、より低価格で実用的な測定器が要求された。そこで我々は低コストOBEMの開発に取り組み、実際に4回の海底観測に使用し、多くの失敗と改良を重ねてようやく完成した。本論ではこの新型OBEMの能力、実状、問題点などについて述べる。

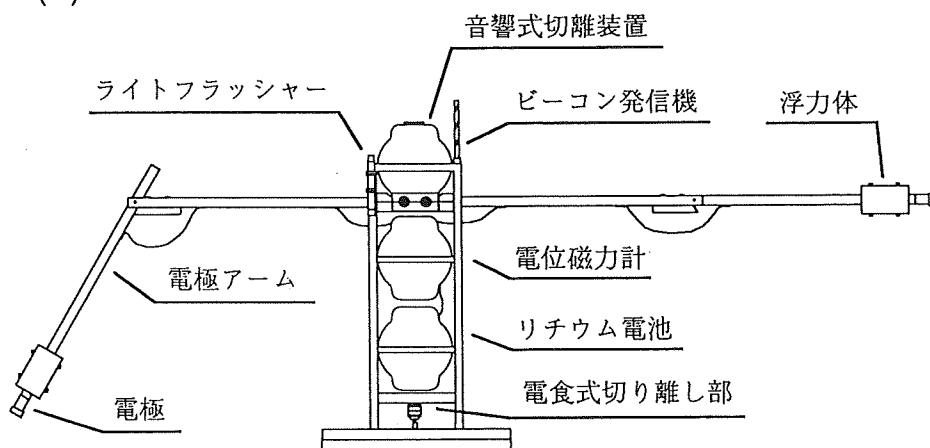
2. 海底電位磁力計の性能

海底電位磁力計の概観を第1図に示す。第1図(a)は浜野ら(1989)⁷⁾が製作したOBEMである。これをAタイプとする。高さは1.4m、幅は電極アームをまっすぐに伸ばした状態で4.6m、甲板上で曲がった状態で3.1mである。おもり付き台座をつけた状態での空中重量は175kg、水中重量は18kg、台座を切り離した時点での浮力は10kgである。耐圧容器はアルミ製で、使用最大水深は約6000mである。電位磁力計、音響式切離装置、電池が1つの耐圧容器に入っている。

(a) OBEM TYPE A



(b) OBEM TYPE B



第1図 OBEM概観図

第1図(b)は我々が製作したOBEMである。これをBタイプとする。高さは2.2m、幅は電極アームをまっすぐに伸ばした状態で6.3m、甲板上で曲がった状態で5mである。おもり付き台座をつけた状態での空中重量は150kg、水中重量は20kg、台座を切り離れた時点での浮力は20kgである。耐圧容器はガラス製で、使用最大水深は約4000mである。3つの耐圧容器には上から音響式切離装置、電位磁力計、リチウム電池がそれぞれ入っている。電位磁力計とリチウム電池は水中ケーブルを介して接続されている。

測定間隔	電池寿命 (電池フルセット時)	メモリーの記録可能期間
1秒	15日間	28.8時間
10秒	15日間	12日間
30秒	50日間	36日間
1分	80日間	72日間
2分	100日間	144日間
3分	115日間	216日間

第1表 設定測定間隔に対する測定期間

1990年10月～12月の観測でAタイプのOBEMは浸水し本体を破損してしまった。電位磁力計本体については現在、両タイプとも同じものを搭載している。磁力計はフラックスゲート型で、定磁界補償は100nTステップで行われる。分解能は0.1nT、ダイナミックレンジは±3000nTである。電位差計の分解能は0.3μVで、ダイナミックレンジは±10mVである。本体には傾斜計が取り付けられており、磁力計のXZ平面、YZ平面内の角度を計測している。定磁界補償値、電池電圧、回路温度、傾斜計の値は720計測毎に記録される。記録媒体は256キロバイトのRAMメモ리카ード4枚である。最大測定期間を第1表に示す。測定間隔が1秒、10秒の時は連続動作で磁場、電位差共に0.5秒値の平均値を記録する。それ以外の時は磁場については間欠動作で正時の瞬間値を、電位差については0.5秒値の平均値を記録する。

これらOBEMの最大の特徴は、測定開始時刻の設定や測定データの転送を耐圧容器の水中コネクタを介してRS232Cケーブルで接続して行えることである。実際には50m程度のケーブルを使用して甲板上のOBEMと研究室のパソコンを接続して設定、転送を行う。このため、搬出の前に耐圧容器の封入やある程度までの組立ができるので、船上での作業は前述の設定と電極アームの取付等のみとなり、設置するOBEMの数が増えても作業を迅速に行うことができる。

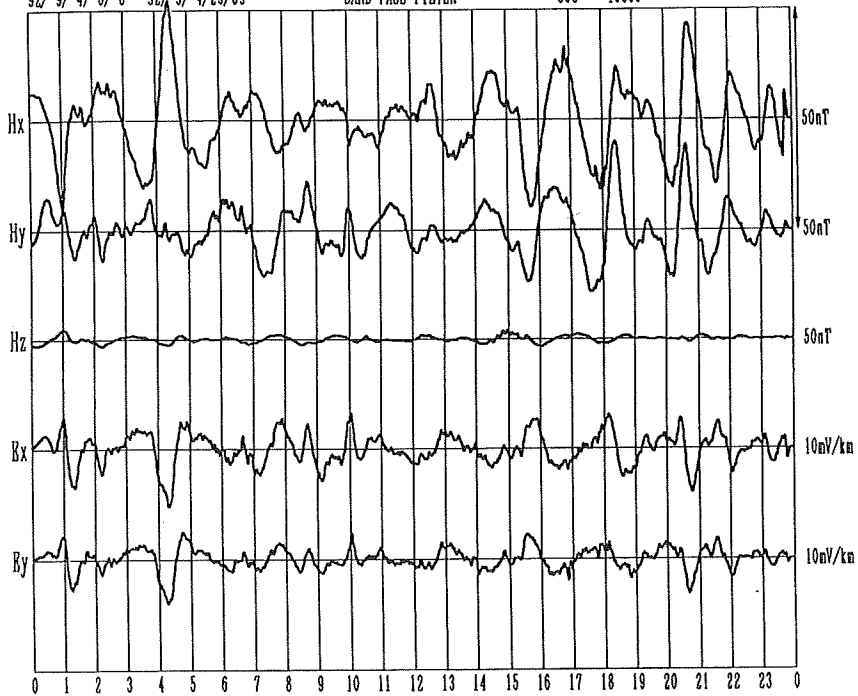
3. 銀-塩化銀平衡電極

第2図に1992年9月に日本海対馬海盆において得られた電磁場変動の例を示す。海底での電場の変動は数mV/km程度であり、電極間隔が6mの場合測定電圧変動は数十μV程度である。そこで分解能を上げるために電位差計のダイナミックレンジは±10mVしかない。そのためOBEMの電極には海水との接触電位差が小さく、ドリフトの小さい銀-塩化銀平衡電極を使用する。我々が製作、使用している銀-塩化銀電極は浜野ら(1984a)⁵⁾によるものである。製作方法を簡単に述べると、酸化銀と塩化銀を2:1の割合で混合し、純水でペースト状にし、銀メッシュに塗り付け乾燥させる。これを電気炉で450°Cで加熱し、酸化銀を還元させたものである。

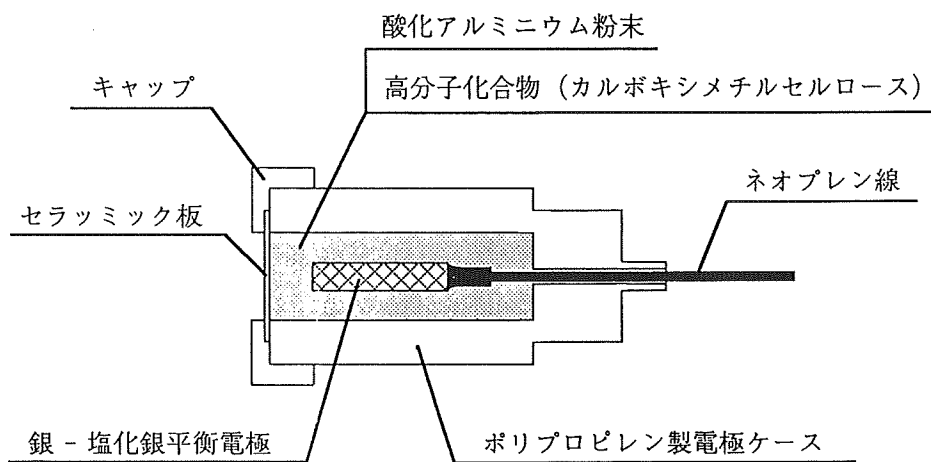
1つのバケツに海水を入れ、そこに全ての電極を浸し、電極間電位差を測定するとほとんど500μV以下の値を示す。普通は100μV程度である。

第3図に示すように、実際の電極はポリプロピレン製の電極ケースに入っている。当初は電極が振動しないように周りに酸化アルミニウムの粉末を充填していた。また、外部の海水の流動の影響を受けぬよう、そして船体との衝突時の防御用に多孔質のセラミック板で蓋を

OBEEM 10sec DATA PLOT SITE=JEM13 OBEEM ROTATED DATA
 92/9/4/0/0 - 92/9/4/23/59 BAND PASS FILTER 300 - 10000

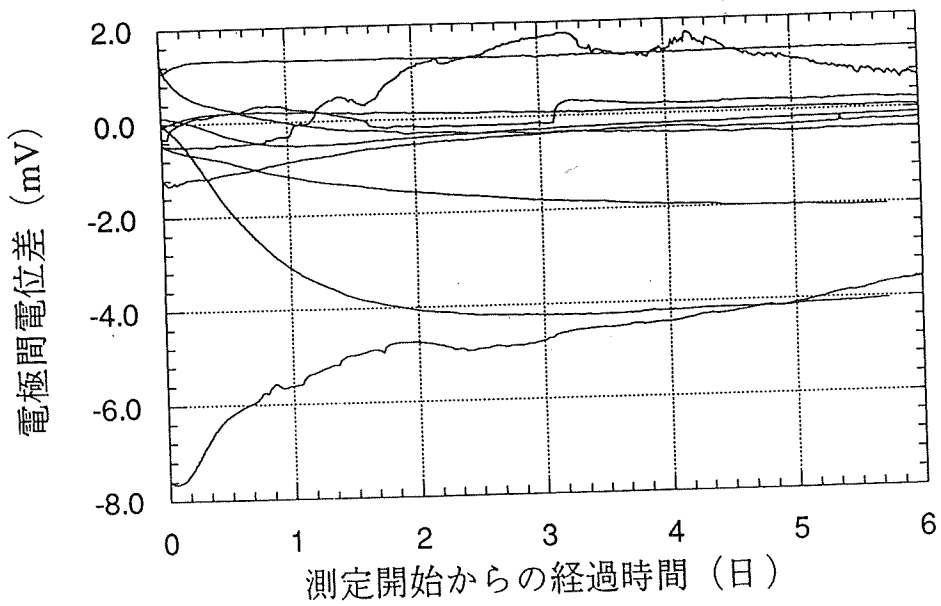


第2図 対馬海盆における1992年9月4日の磁場3成分および水平電場2成分変動記録

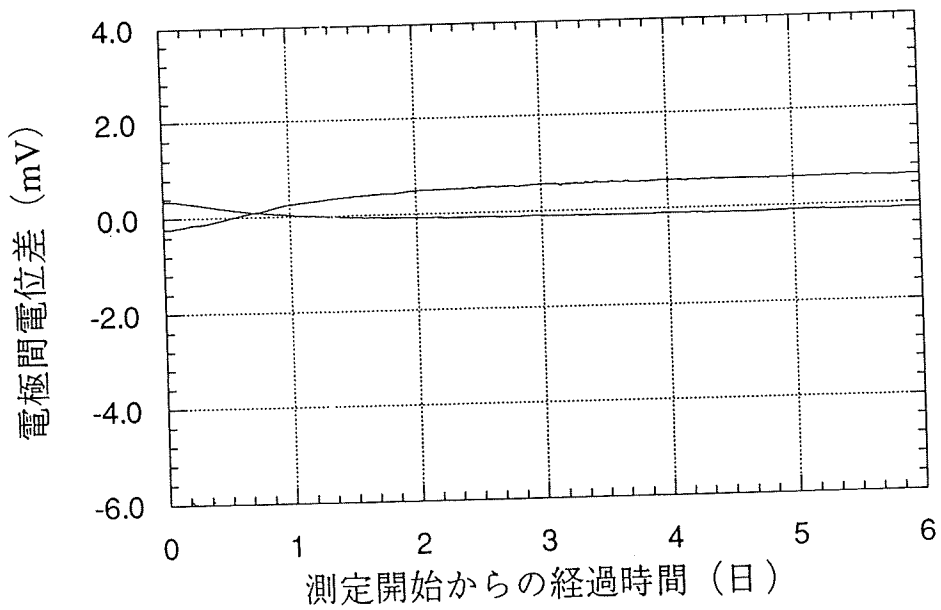


第3図 銀-塩化銀平衡電極概観図

旧型電極 [酸化アルミニウム粉末]



新型電極 [高分子化合物]

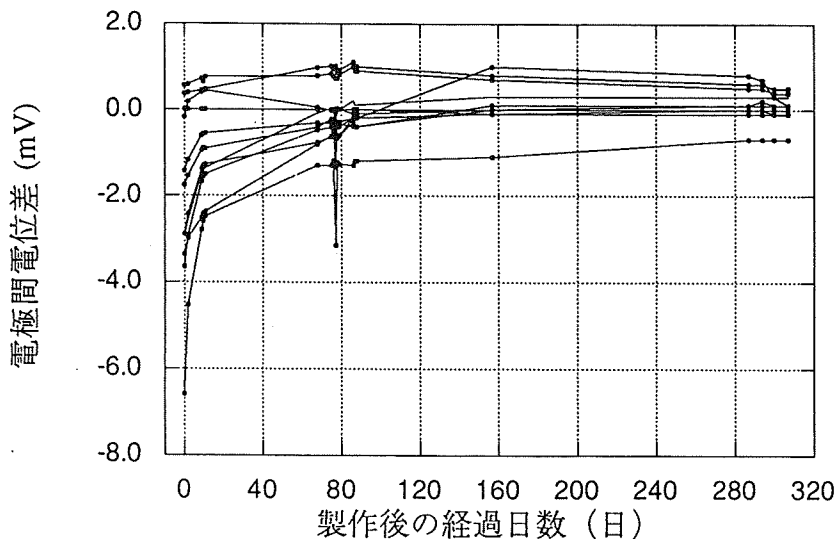


第4図 海底観測における電極間電位差の長期変動

している。現在では酸化アルミニウムの粉末の代わりに海水で溶いた高分子化合物（カルボキシメチルセルロース： $\text{R}_{0.11}\text{-OCH}_2\text{COONa}$ ）を充填している。これによって電極は海水と接触せず、また、イオンの流出も防ぐことができ安定すると考えた。この高分子化合物を用いた電極を1992年の対馬海盆において使用したところ測定開始後2日でドリフトも止まり、測定期間中従来のものと比較して非常に安定していた。測定開始からの測定電位差の長期変動を第4図に示す。

製作した新型電極の基準電極（安定している電極というわけではない。）との電位差を長期にわたって測定すると安定するまでに2カ月程度かかるようである。長期間の電極間電位差の変化を第5図に示す。これによると製作直後の電極を使用すべきかどうか判断が難しい。この安定に要する期間を短縮できないかと次のような実験を行った。製作した電極を水深1000m程度まで一時的に降ろし水圧をかけることによって、電極間電位差が減少するかどうかを調べた。第6図に示すような塩化ビニールのパイプに電極を入れて実験を行った。結果として特に電位差が小さくなるという傾向は見られなかった。

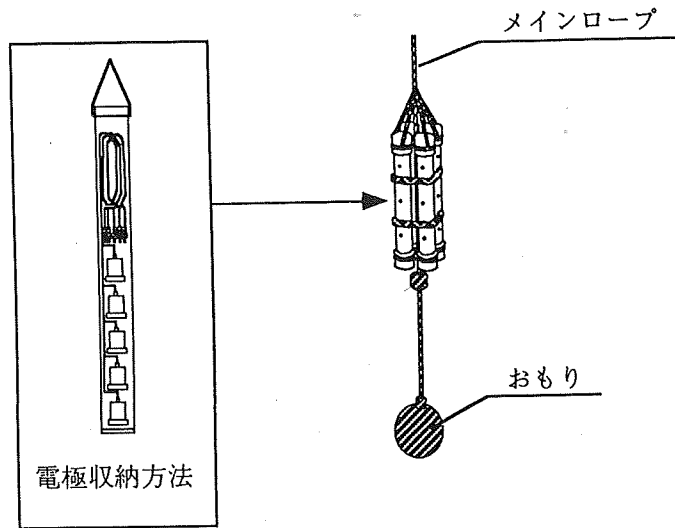
現在の結論としてはできるだけ多くの電極を製作し、2カ月程度変動を測定した上で使用する電極を選ぶのが安全なようである。



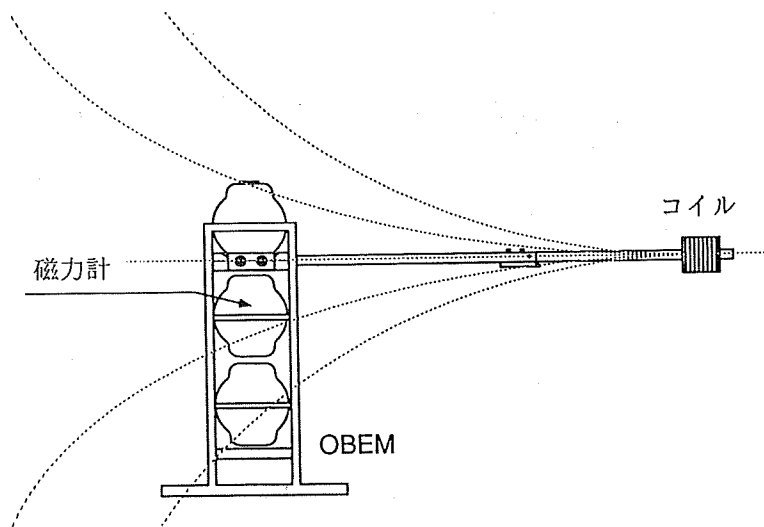
第5図 ある電極を基準にした電極間電位差の変化

4. 電場・磁場直交度検定

BタイプのOBEMは磁力計計測部が第1図(b)に示すように2段目のガラス製の耐圧容器の中に入っている。このガラス球にプラスチック製のハードハットを上下からかぶせてアルミフレームに固定している。すなわちガラス球はハードハットとの摩擦によって固定されている。組み立てる時には磁力計の座標系と電位差計の座標系を合わせるように取り付ける。しかし、組み立てる時すでにずれていたり、運搬作業時、投入作業時、回収作業などにクレ



第6図 新型電極への加圧実験



第7図 電場-磁場測定座標系検定実験

ーンで振り回されることによってずれることなどが考えられる。そこで、投入前と回収後に電場と磁場の測定座標系のずれを測定する試みを行った。第7図に示すように電極アームの先端にコイルを取り付けて周期20秒の矩形波を送信し、毎秒サンプリングで記録した。これを4方向から行い、その対称性からずれの角度を計算した。実験は1992年3月の南部沖縄トラフ観測終了後と同年9月の対馬海盆観測前と終了後の3回行った。測定は地震研究所の駐車場で深夜2~4時のノイズレベルの低い時間帯に行った。計算した結果、角度のずれは±2度以内であった。コイルの位置の対称性が確保されているかどうかなど問題点は多いが、この方法

によってずれの角度を十分に検出できるものとする。

5. 海底電位磁力計の改良点

本論文で紹介したOBEMをさらに改良するとすれば、以下のようなことが考えられる。まず、早急に行う可能な改良点は3つある。まず、磁力計の分解能を1オーダー上げて0.01nTにする。これは、今後、磁場変動の活動が弱くなっていくことへの対応策である。また、海底におけるより短周期の磁場変動を分解できることになる。次に、RAMメモリーカードの容量を大きくする。現在、大容量のメモリーカードを容易に入手することができ、RAMなので書き込み時の消費電力は少ない。コントロールソースによる海底観測時などには短い測定間隔で測定を行うので記憶容量の増加が望まれる。また、長期観測にも有効である。最後に電源電池の増加である。現在の測定機の浮力にはかなりの余裕があり、高周波、長期間サンプリングに向けてリチウム電池の増量が望まれる。

次に解決すべき問題は安定した電位差測定をできる限り簡便に行う手段を考案することである。アームの先端付近の海水と本体基部の電極を結ぶ絶縁チューブの経路を切り替えることによって電極の測定センスを逆転させ、ドリフト分を打ち消すsalt-bridge chopping方式 [Filloux (1974)⁸⁾] は優れた方式である。特に、半日以上の周期の電場変動を測定するには最良の方法であるといえる。しかし、サーボモーターあるいは電磁石によるスイッチングは磁場のノイズを生じる可能性がある。周期6時間以下の変動に焦点をしばり、ドリフトの少ない電極をいかにして製作するかが当面の課題であろう。

6. 海底電磁気観測を行う上での諸問題

海底観測を実際に行う上で問題となる点について述べる。

まず、観測計画立案時の問題として設置・回収のための船をいかにして確保するかがある。特に長期観測の場合、設置と回収を別々の航海で行うことになり、ますます航海の確保が困難になる。我々の場合、総合的な物理観測航海に便乗し、短いサンプリング間隔で1~2週間程度測定し、一つの航海で設置・回収を行うようにしている。もちろん、短期間の設置期間中に十分な電磁場変動が発生するとは限らない。しかし、日本近海における測定を増やしていくにはこのような観測が現実的である。いずれにしても、簡便でコンパクトな測定機を製作し、常に観測航海に参画できる状態を維持しておく必要がある。あるいは漁船等を使用して関東近海において重点的に観測を試みることも考えられる。

次に、電池、おもり等、消耗品が数多くあり経費がかかる点である。これは観測目的を明確にした簡易型測定機を量産し、コストを下げる以外に解決方法はないと思われる。いずれにしても海洋観測においてある程度費用がかかるのは避けられない。

解析上の問題として海底観測においては海水による磁場変動の減衰、測定間隔などによって表層付近の情報である短周期変動が欠落していることが挙げられる。今のところ、地震探査によって速度構造が推定されている場合にはそれを参考にして、典型的な電気伝導度を与えてモデリングを行う。あるいは掘削孔の電気検層やコアサンプルの測定値を参考にする。上部地殻の電気伝導度は予想にくらべて大きい (10^{-2} S/mのオーダー) ようである。地殻表層

部あるいは堆積物の電気伝導度を測定するには人工ソースを用いた測定が望まれる。これらはかなり大がかりなものであり、毎回行うのは難しい。しかし、地殻表層部の標準的な値を求めるために代表的な海域で行う必要がある。

現状では準備作業から設置・回収などの船上作業まで含めると、測定機に精通した者が最低3名は必要である。航海の度に学生に協力を依頼し、全般にわたって作業手順等を覚えてもらうのである。現時点では、説明書さえあれば誰にでも使用できる測定機ではなく、多くの学生から指摘を受ける点である。

先に述べたように観測航海を確保するのが難しいため、新機構のテストをどうしても実際の観測で行うことになる。この場合、我々は全滅を恐れて、1台をテストに当てている。しかしこれでは効率が悪すぎる。そこで、海底全磁力測定等の定常観測点を設置することができないだろうか。このような観測点があれば、海底における時間変化をとらえると共に開発のテストフィールドを確保することができる。観測と開発をある程度分離して進めることが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 瀬川爾朗, 海底地磁気観測の難しさ, Conductivity Anomaly 研究会論文集, 109-115, 1982
- 2) Segawa, J., T. Kasuga and T. Yukutake, Preliminary test on a three-component Ocean Bottom Magnetometer, Jour. Geodetic Soc. Japan, 27, 239-251, 1981.
- 3) Segawa, J., T. Yukutake, Y. Hamano, and H. Utada, Seafloor measurement of geomagnetic field using newly developed ocean bottom magnetometers, J. Geomag. Geoelectr., 34, 571-585, 1982.
- 4) Segawa, J., T. Yukutake, Y. Hamano, and H. Utada, A new model of ocean bottom magnetometer, J. Geomag. Geoelectr., 34, 407-421, 1983.
- 5) 浜野洋三, 行武毅, 瀬川爾朗, 海底電位差計の開発: 電極の製作, Conductivity Anomaly 研究会論文集, 251-257, 1984a
- 6) 浜野洋三, 行武毅, 瀬川爾朗, 浅岡達史, 歌田久司, 中川一朗, 笹井洋一, 電位差計による海底観測, Conductivity Anomaly 研究会論文集, 259-265, 1984b
- 7) 浜野洋三, 歌田久司, 瀬川爾朗, 行武毅, 海底電位磁力計, Conductivity Anomaly 研究会論文集, 235-240, 1989
- 8) Filloux, J.H., Electric field recording on the sea floor with short span instruments, J. Geomag. Geoelectr., 26, 269-279, 1974.