

3.3 深海底地磁気電場観測システムの開発と沖縄観測ステーションの構築

中塚 正・宮崎光旗・村上 裕・小川康雄・西村清和（地質調査所）

Development of Deep-sea Geomagnetic and Electric Field Observation System and Its Deployment at the Okinawa Site

T. Nakatsuka, T. Miyazaki, Y. Murakami, Y. Ogawa, and K. Nishimura
(Geological Survey of Japan)

Deep-sea geomagnetic and electric field observation system for VENUS project was developed at the Geological Survey of Japan. The system consists of a proton precession magnetometer, 3-axis ring-core fluxgate magnetometer with 2-component tilt-meter, and 2-component horizontal electric field meter using 3 electrodes. It was designed for least power consumption because the power supplied from cable system is quite limited. The equipment was manufactured step-by-step from 1995 to 1997.

We had twice chances to test and confirm valid operation of equipment at a dry dock test site, before the deployment at the deep-sea real site. Although our system operated normally from the beginning of dock test, the stainless steel frame of the equipment was proven to affect magnetic measurement. Then the arrangement of sensor to attach to the frame was improved to minimize such effect.

Our equipment was landed to the sea-bottom at Okinawa observation site in the “Kaiyo” KY99-07 cruise (Sept., 1999) in use of a deep-tow camera system equipped to the vessel. Then, the deployment of electrodes, stretching the interconnecting cable toward the branching unit and the connector interconnection were operated by the ROV “Kaiko” in the “Kairei” KR99-09 cruise (Sept.-Oct., 1999). Soon after the connector was plugged into the junction box of branching unit, test operations at the shore station to supply power to our equipment was attempted, which resulted in quite normal responses and valid upcoming data from the sea bottom.

1. 観測装置の概要

地磁気電場観測装置の開発は地質調査所が担当した。本装置は、地磁気測定部（プロトン磁力計と3成分フラックスゲート磁力計）、電位差計部（3個の海中電極を用いて水平2成分の電場を測定する）、それらの計測の制御とデータ伝送をつかさどる制御部（フラックスゲート磁力計の傾きを補正するための2成分傾斜計を含む）、およびそれらを海底に設置するための耐圧容器・フレーム等からなる地磁気測定部の開発を1995年度に、電位差計部の開発を1996年度に行い、制御部と周辺部分である耐圧容器・フレーム等の製作を1997年度に行った。

この装置のブロック図を第1図に、概略の仕様を第1表に示す。海底通信ケーブルから取り出せる電力には、そのケーブルの特性に応じて限りがあり、それを接続予定の全ての機器に割り振る必要がある。このため、地磁気電場観測装置に供給される電力も全体で約3W（DC24V, 125mA）と極めて低く制約されている。

装置の製作は、前述のように1995～1996年度に行われたが、当初の計画では有人の深海作業艇「しんかい6500」を利用して、観測ステーションの設営を行う予定であった。

しかし、1997年度以降の計画では、諸般の事情から「しんかい6500」が利用できず、有索無人作業艇（ROV）「かいこう」を使って作業にあたることとなった。ROVの場合には、作業上の制約も大きくならざるを得ないので、海底ケーブル接続作業の確実性を高めるため、観測装置フレーム等の装備を見直して観測装置フレームの若干の改装を1998年度に行った。さらに、観測装置は一旦設置されると長期間の安定動作が期待できるのに比し、電場センサーである電極は本質的には消耗が予想されるので、電極を交換可能にするためのROVコネクタ装備も行った。

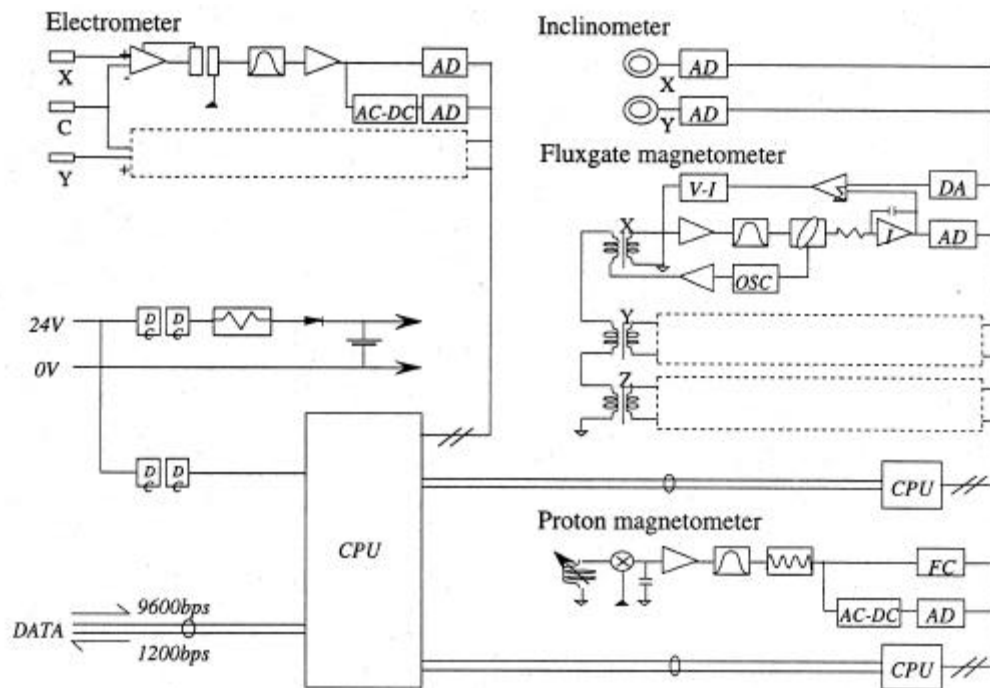
2. 乾ドック試験

観測装置の実海域への設置作業に先立って、分岐装置に接続されるすべての観測機器を一堂に集め、かつ海水に浸した状態での総合動作試験を、都合2回実施した。

1回目の総合動作試験は、1998年9月7～11日に三浦市の乾ドック（第2図）で行われた。試験サイトは市街地に隣接しており、人工的な電磁場ノイズが卓越するため、深海底とは比べるべくもない悪条件にあるため、我々の装置にとっては、取得データそのものの良否判定は、必ずし

第1表 海底地磁気電場観測装置の基本仕様

プロトン磁力計	測定レンジ : 20,000 ~ 70,000 nT 測定分解能 : 0.1 nT 分解能 測定間隔 : 1 ~ 60分, 標準5分
フラックス ゲート磁力計	(リングコア型直交3成分) 打消磁場範囲 : $\pm 65,000$ nT, 100 nTステップ 測定レンジ : ± 327.68 nT, 0.01 nT 分解能 測定間隔 : 1 ~ 60分, 標準1分
電位差計	(3電極, 2成分測定, 想定電極間隔: 20m) 使用電極 : 銀 - 塩化銀 (塩水封入) [Kernovel製] 測定レンジ(DC) : ± 2000 μ V, 60 nV 分解能 AC振幅測定 : 約94 μ V レンジ, 3 nV 分解能 (10Hz ~ 5kHzバンド) 測定間隔 : 1秒



第1図 海底地磁気電場観測装置の回路構成

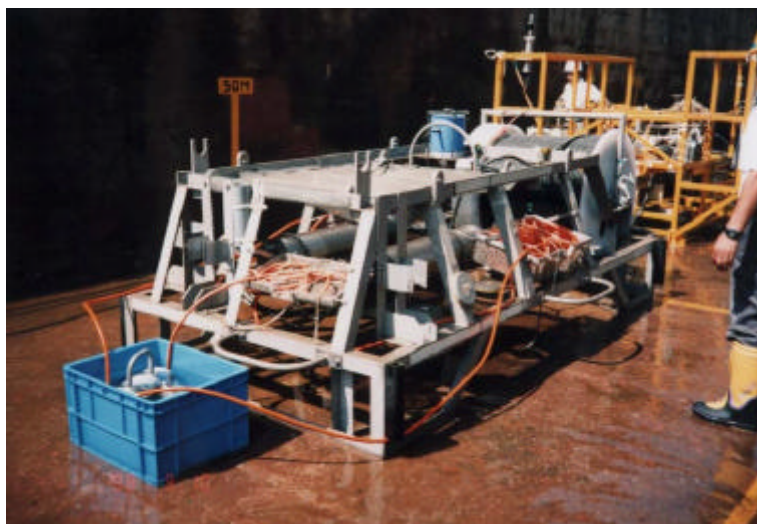
も容易ではないが、次の手順で動作の妥当性を確認した。

- (1) 磁場測定に関しては、ごく低感度のモニタ記録をとるように設定し、構内にあるクレーンの操作・移動に対応した変動が、現れることを確認した。また、その状況に装置が海水に浸かる前後での異なった振る舞いは見られなかった。
- (2) 電場測定では、電極が海水に浸からないうちは、ソースインピーダンスが無限大に近く、ノイズのみを受信する状況であり、そのうち、データ伝送時間帯についてのみノイズレベルが少し上がる傾向が見られた。

- (3) 電極が海水に浸った時点で、電場測定値の跳躍が見られ本来の測定状況への移行が確認できた。
- (4) その後は、人工ノイズ環境のため、安定な電場測定値は得られず、スケールアウトする状況が多かったが、たまたまスケールアウトしていない時間帯で見ると、電極が海水に浸らない時点に比して、ノイズレベルが大幅に減少していることを確認した。
- (5) 電場のスケールアウトが、人工場に原因があることを確認するため、電極を同一水桶に浸した状態（第3図）でも測定を行い、スケールアウトが解消されるの認めた。



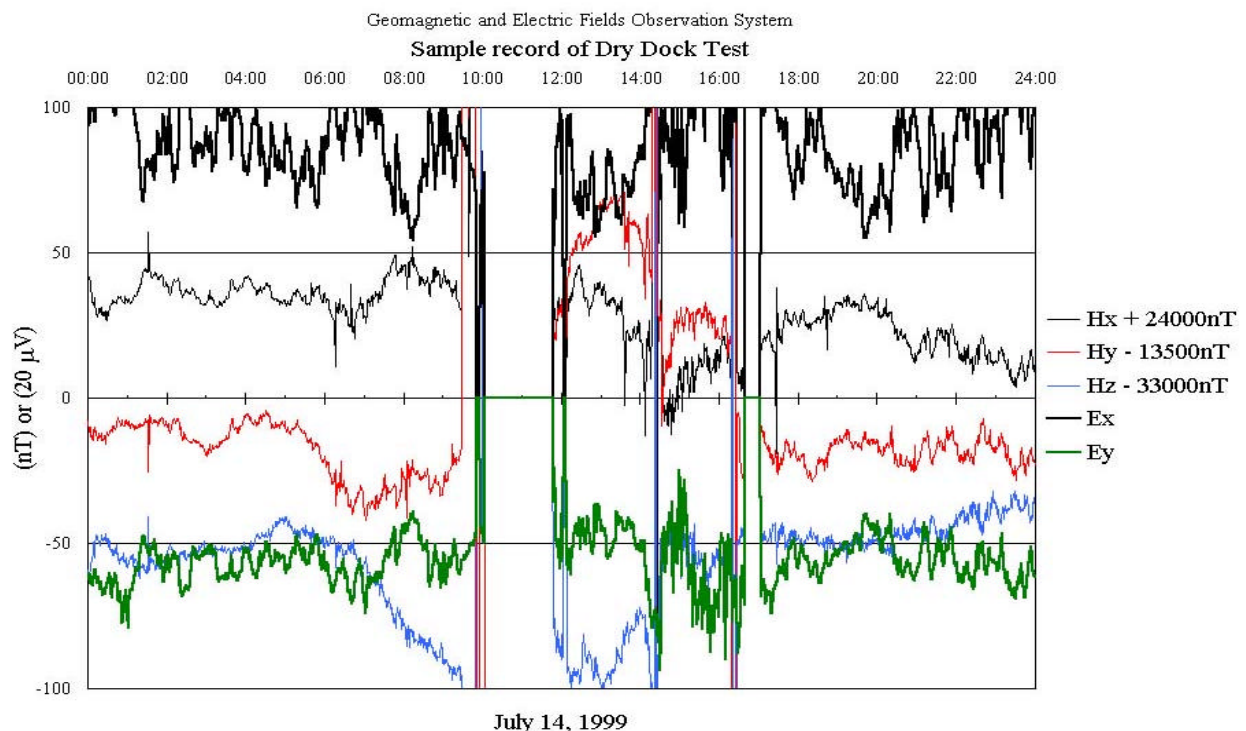
第2図 乾ドック試験の試験サイト（全景）



第3図 乾ドック試験サイトに置かれた海底地磁気電場観測装置
（電場観測動作確認のため3電極をまとめて1つの海水桶に浸している）



第4図 1999年乾ドック試験（3電極は束ねて海水中に浸けている）



第 5 図 乾ドック試験取得データ例

2 回目の総合動作試験は、1999 年 7 月 12～15 日に、1 回目と同じサイトで行われた。動作確認内容は 1 回目と大きく変わるところはないが、前回には電極スパンを少しとただけで電場測定値にスケールアウトを生じたことを念頭に置き、第 4 図に示すように 3 電極を 1 箇所にまとめて束ねた状態で試験を行った。この状態では、共通電極を中央にしているので、(完全に一直線に配置することはできていないので目安程度であるが、) 電場 2 成分は上下対称に近い変化パターンを示すはずである。第 5 図には、7 月 14 日 24 時間分の取得データ例を示すが、相対的に短周期の変化で上下対照的な変化がきれいに示されている。なお、10～12 時頃に記録がとぎれているのは、他の観測装置の調整等のために動作停止したためであり、14 時過ぎと 17 時前後に激しい変動の見られるのは、クレーン動作等の人為的な原因によるものである。また、電場・磁場双方の変化パターンに注目すると、相互に相関する成分の変動が含まれていることもわかり、地磁気電位差計としての動作の妥当性が見て取れる。

第 5 図では、プロトン磁力計の記録は、測定値の安定が良くなかったので示していない。よく知られているように、プロトン磁力計はセンサ位置の磁気傾度に弱く、設置した乾ドックサイトでは、自然の深海底と異なり磁気傾度が高いためであろうと考えていた。しかし、念のため本乾ドック試験の終了後に別の場所で動作試験を行ったところ、装置フレームに磁気傾度を生じる原因のあることが判明した。このため、プロトン磁力計センサの取付け部を改良した上

で、装置の実海域設置に臨むこととした。

3. ディープトウによる海底への設置

地磁気電場観測装置の沖縄海域への設置作業を、海洋科学技術センターの海洋調査船「かいよう」で、「かいよう」装備のディープトウを用いて、1999 年 9 月 12 日に行った。この設置作業に先立ち、9 月 11 日には、ディープトウへの観測装置の組付け作業および観測装置の海底近傍での切り離し設置に必要な準備作業を行っている。

9 月 12 日当日は、午前 8 時より作業を開始し、ディープトウの切り離し装置の動作点検・電場観測用電極の保護カバーの交換等の準備作業を行った後、8 時 25 分より曳航体の釣り下ろしを開始した。8 時 26 分に海面へ着水した後、8 時 32 分よりケーブルの巻き出しを行い、午前 9 時 28 分に北緯 25 度 44.80 分、東経 128 度 03.72 分(設置予定地点まで約 500m)の海底近傍まで達した。その後、引き続き設置目標点に向かって曳航を続け、午前 10 時 04 分に分岐装置 (ROV Homer #23) まで約 240m の地点で観測装置の切り離し操作を行い、観測装置の着底を確認した。なお、着底位置の長基線 (LBL) 音響測位による緯経度は、北緯 25 度 44.517 分、東経 128 度 03.754 分であり、本装置には ROV Homer #28 が装備されている。

なお、本観測装置を組み付けたディープトウの着水寸前の映像を第 10 図に、観測装置の着底直後をディープトウのカメラが捉えた映像を第 11 図に示す。

4. 地磁気電場観測装置のケーブル接続

ディーブトウによる観測装置の海底設置に続いて、1999年9～10月の海洋科学技術センター深海調査船「かいれい」/ROV「かいこう」の航海（KR99-09）において、装置の海底ケーブルシステム分岐装置への接続作業を実施した。

海底ケーブル分岐装置への接続作業に先立ち、9月27日の「かいこう」Dive #127において、各観測機器の設置状況調査が行われた際、地磁気電位差測定装置についてもビデオ映像による所在・設置状況の確認を行った。そのときの音響測位システムによるピークルの位置は、北緯24度44.5195分、東経128度03.7552分、水深2148mであった。さらに、後に述べるように本装置の接続関連作業には多くの手順があり、そのうちに電極ケーブル収容かごのケーブル押さえをはずす作業が含まれるが、ピークルの着底位置がたまたま当該作業を試験的に行うに最適の位置であったので、電極#1についての当該作業を設置状況確認の一環として実施した。その結果は、ROVによる作業としての困難はないが、はずされたケーブル押さえが電極ケーブル展開の障害にならぬよう、かごの背後まで引込まれる設計であったにもかかわらず、かごの中に握り棒部分が滞留する状況となり、使用しているゴム張力等の面で改善の余地があることを示した。しかし、ケーブル押さえ全体はほとんど完全に取り除かれた状態にあり、電極ケーブルの展開作業には何ら支障はないと判断された。

地磁気電場観測装置の分岐装置への接続関連作業の手順は、次のように計画した。

- (1) 地磁気電位差計設置位置に向かって潜航する。
- (2) ピークル切り離し後は、地磁気電位差計に取り付けられた ROV Homer #28 を目標に東側からアプローチする。
また、分岐装置への給電停止を確認する。
- (3) [地磁気電位差計接続ケーブルの展張・接続]
 - a) ケーブルドラム回転止めロープを解放する。
 - b) ホパリングしつつケーブルドラム持手を専用フックでつり上げ、分岐装置フレーム近傍(15m 以内)に近づき、ドラムを海底に下ろす。
 - c) ドラムの持手取り外しロープを引いて、持手を外す。
 - d) ドラム側面から ROV コネクタをつかみだし、そのまま分岐装置に北北西方から近づいて所定位置(左端)に接続する。
 - e) 沖縄中継局に連絡して給電・動作確認を依頼し、その完了まで待機する。
- (4) [電極の展開]
 - a) 地磁気電位差計フレームに戻り、南西(SW)側からアプローチする。
 - b) #3 電極ケーブル収容かごのケーブル押さえをはずす。

- c) #3 電極の取っ手をつかんでホルダーから引き抜く。
 - d) #3 電極をつかんだまま約 20m 後退(SW 方向)し、電極を海底に下ろす。
 - e) 地磁気電位差計フレームに北東(NE)側からアプローチする。
 - f) b),c)と同様に、#2 電極ケーブルのケーブル押さえをはずし、#2 電極をホルダーから引き抜く。
 - g) #2 電極をつかんだまま 3m 後退(NW 方向)し、電極を海底に下ろす。
 - h) 地磁気電位差計フレームに北東(NE)側からアプローチする。
 - i) c)と同様に #1 電極をホルダーから引き抜く。(ケーブル押さえは前記のように9月27日に外してある。)
 - j) #1 電極をつかんだまま約 20m 右(NW)方向へ移動し、電極を海底に下ろす。
- (5) 設置した電極の展開状況把握のため、電極ケーブルルートに沿い海底から 5m 程度の高度で、連続ビデオ撮影を行う。(想定コースとしては、#1 電極位置を SE 方向に出発し、#2 電極を視野にとらえフレーム位置に達したところで右回頭し、SW 方向に向かい#3 電極位置に至る。)
- (6) 作業を終了し、離底帰還する。

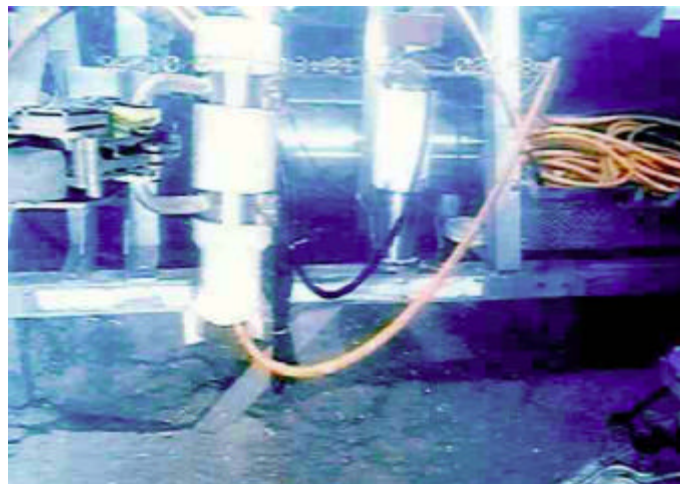
地磁気場観測装置のケーブル接続等の作業を、1999 年 10 月 1 日の「かいれい」潜航（Dive #130）で実施した。当日は、午前 8 時より作業を開始、09 時 04 分に着水、09 時 18 分に下降を開始した。海底からの高度 130m（深度は約 2020m）で 10 時 12 分にピークルを切り離し、ピークルは 10 時 27 分に地磁気電位差測定装置の位置に到達した。

ケーブルドラム回転止めロープの解放を行った後、ケーブルドラムを専用フックでつり上げて分岐装置フレーム近傍まで移動し、ドラムを海底に下ろした(11 時 05 分、北緯 24 度 44.4023 分、東経 128 度 03.7487 分、水深 2154m)。続いてドラムの持手の取り外し操作を行い、ドラム側面から ROV コネクタをつかみだして分岐装置へ向かって移動しようとしたところ、ドラムの姿勢が不安定となり、再度ドラム持手がドラム軸にかかった状態となった(第 6 図)。ケーブルの大半が巻き出されのに加えてドラム回転軸が横ズレをおこしており、ドラム片側が浮き気味であるため、重りを加えて安定させる必要があると判断された。このため、ROV コネクタを海底に置き、ドラム持手を近くにあった重りを使ってとりあえず安定させ、ケーブル接続自体は延期することとした。

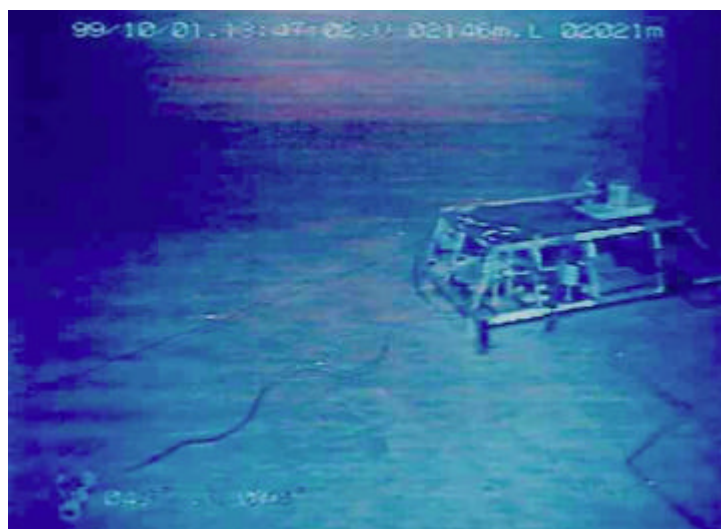
次に、地磁気電位差測定装置フレームの位置に戻り、前記の手順に従って 3 個の電極の展開作業を行った(第 7 図)。



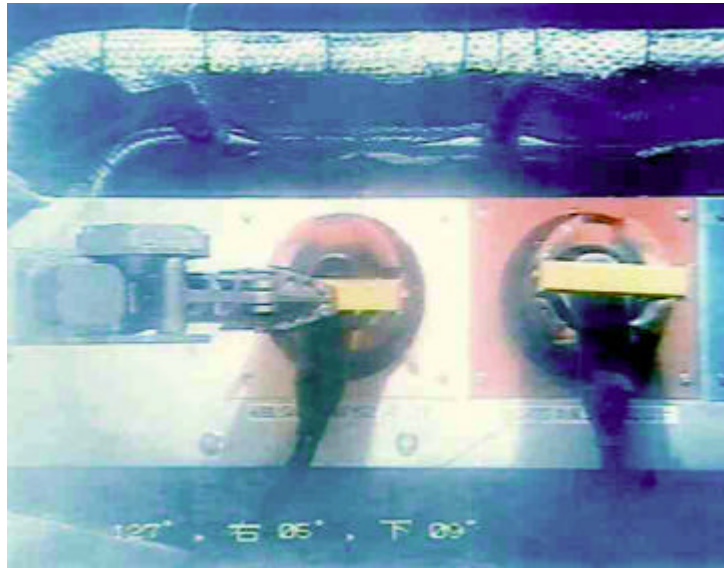
第 6 図 ドラム軸が抜けかかり不安定化したケーブルドラム



第 7 図 電極をつかんだマニピュレータ



第 8 図 電極展開後の電極ケーブルと観測装置フレーム



第 9 図 分岐装置ジャンクションボックスへの接続ケーブルコネクタ接続

最後に、設置した電極の展開状況を把握するため、電極ケーブルルートに沿い海底から約 5m の高度で、連続ビデオ撮影を行った（第 8 図）。コースは、#3 電極位置を始点として NE 方向に向かい、装置フレームと #2 電極を視野にとらえつつ NW 方向に向きをかえ、#1 電極位置に至ったところを終点とした。さらに、装置フレームへ戻り、分岐装置へ延びる接続ケーブルと装置フレームを観察し、それらの状況を確認した。この作業をもって当日の海底作業を終了し、14 時 03 分にピークルは離底し、揚収作業に移った。

以上のように、10 月 1 日の Dive #130 では、分岐装置へのケーブル接続を見送らざるを得なかったため、翌 10 月 2 日にはケーブルドラムを安定させるために重りをドラムにかけるための S 字フックを船上で製作し、1999 年 10 月 3 日の「かいいい」潜航（Dive #131）の前半で、このフックを使用して地磁気電場観測装置に関する追加作業を行った。10 時 32 分に海底のドラム位置に到達後、用意したフックを用いて重りをドラムに取り付けてドラムの安定化を図った後（第 12 図）、ROV コネクタを拾い上げて分岐装置までのばし、所定位置のコネクタ受けへ接続（第 9 図）した（11 時 43 分）。ここで、KDD 沖縄中継所へ連絡をとって給電の再開と各接続機器の動作確認を依頼し、その完了を待った。12 時 11 分に各機器の正常動作を確認した旨の連絡を受けた。

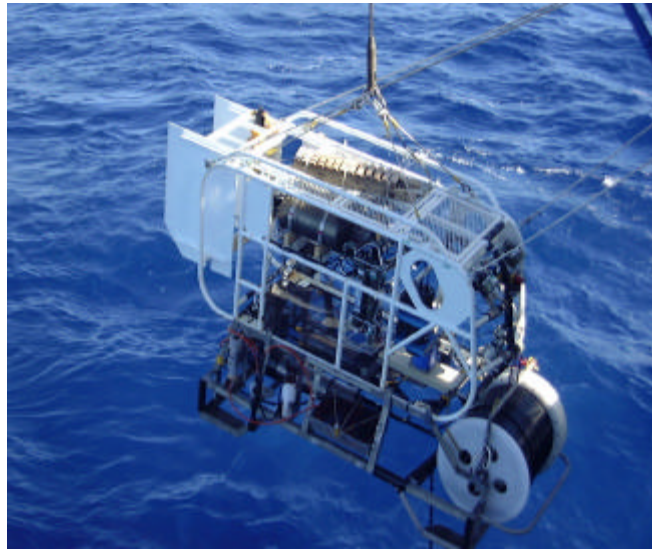
これをもって、地磁気電位差測定装置のケーブル接続作業を終了した。

5. ま と め

地磁気電場観測システムの開発においては、観測装置自体は、必要な性能・仕様を満たすための若干の改良や比較的新しい技術の導入などが必要であったとはいえ、基本的には既存技術の延長線での開発であったため、比較的順調にかつ予想通りの展開が行えた。しかし、その装置を深海底に設置し、海底作業ロボットを用いて機器展開・ケーブル接続等を行うことは、全く新しい第一歩からの取り組みとならざるを得なかったため、思わぬ事態に遭遇するなど、予定外の作業が必要になった。

しかしそれらは、これまでに同様の作業や取り組みが殆ど行われてこなかった先進的な分野で取り組みであったこと、今回の作業経験は今後の同様な海底作業への大きな指針となることを示しており、貴重な経験となったと言える。さらには、深海底という場での種々の観測装置の設計にあたって、観測項目に対応したセンサーやその組み込み技術も当然重要であるが、海底作業の実態に適合し、海底作業の上で確実性・信頼性の高いものを、ソフト・ハードの両面で築いていくことの重要性が痛感された。

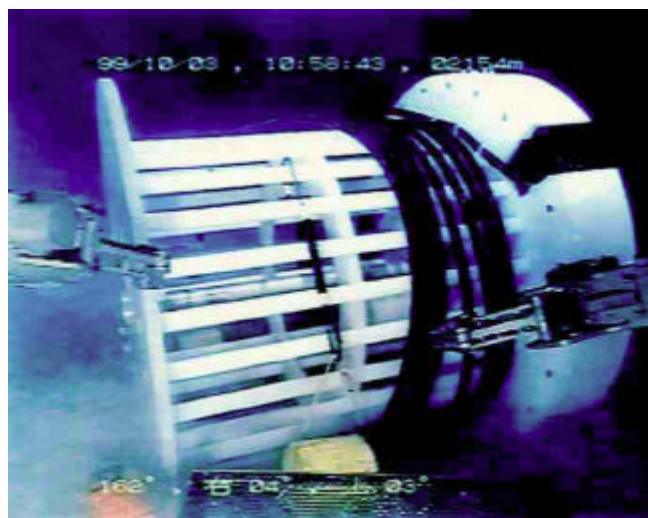
今回の海底観測点構築は、その貴重な第一歩であり、その経験とノウハウの上に、今後のさらなる発展を期したい。



第 10 図 海底地磁気電位差測定装置を組み付けたディープトウ（まもなく着水するところ）



第 11 図 「かいよう」ディープトウによる着底時の海底地磁気電位差測定装置



第 12 図 重りを用いて安定化したケーブルドラム