

# Venus 計画における深海底地磁気電場観測システム

中塚 正・宮崎光旗・西村清和・村上 裕・小川康雄（地質調査所）

## Deepsea Geomagnetic and Electric Field Observation System in the VENUS project

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

### 1. はじめに

運用が停止された商用海底通信ケーブルを再利用して、実時間の深海底地球科学観測に役立てようという計画は、1980年代初頭に始まるが、科学技術庁が主導する Venus 計画もそれらの一つであり、旧第二太平洋海底ケーブル（沖縄ーグアム間、TPC-2）を利用して、琉球海溝からマリアナトラフに至るフィリピン海に海底地球科学観測基地を構築しようとするものである。

この Venus プロジェクトは、科学技術振興調整費総合研究課題「海底ケーブルを用いた地震等多目的地球環境モニターネットワークの開発に関する研究」の英語名 Versatile Ecomonitoring Network by Undersea-cable System の頭文字をとって名付けられている。その意義は、「地球環境の悪化が人類の生存を脅かしつつある中で、その防止のためには諸現象の総合的・統一的に理解する必要がある、極めて重要であるにも関わらずデータの空白域となっている海洋域において種々のリアルタイム観測を実現する」ことである。

このプロジェクトでは、(1)既設の海底ケーブルへ新たな海底中継装置を接続し、それに各種観測装置を接続する技術の開発と、(2)各種のリアルタイム海底観測機器の開発、および(3)それら全体の海底ケーブルシステムの運用管理とデータ管理技術の確立をめざしており、(2)の一項目としての地磁気電場観測装置の開発を地質調査所で担当している（宮崎ほか、1996, 1997）。

### 2. Venus計画の概要

本プロジェクトは、1994年度のフィージビリティスタディに続いて、1995年度から開始されており、当初計画では、1997年度までの第I期において、各種観測機器・ケーブルシステムの開発を行うとともに海底設置・ケーブル接続技術を確立して、沖縄沖に予定される第1観測点を構築し、1998-1999年度の第II期においては、改良型機器の開発と第2・第3の観測点（マリアナトラフ・沖の鳥島付近）の構築を進める予定であった。しかし、後述のように気象条件その他の制約から、予定が大幅に遅れており、現状では、1999年度に第1観測点の構築が図られる見通しとなっている。

計画された観測項目としては、ハイドロフォンアレイによる海底火山活動監視、広帯域地震計による地震観測、磁場3成分+全磁力・電位差2成分の地磁気電場観測、精密水圧計による津波監視、カメラ・濁度計・流速計ほかマルチセンサを用いた海底環境観測、音響測距計による地殻変動観測、音

響通信を用いた臨時的な移動体観測システム構築の7項目の海底観測と、磁場変動による海底ケーブルへの誘導を測る地磁気擾乱観測（陸上）が取り上げられている（図1）。

各海底観測の装置は、図1に示されているようにジャンクションボックスを経てデータ伝送中継器に接続され、分岐結合装置を通じて海底ケーブルの陸揚地である沖縄局との通信を行いつつ海底ケーブルを通じた電源供給が行われる。なお、海底ケーブルの他端のグアム側は、施設の都合で海中アースとなっている。この観測システムの最大の特徴は、電源が陸上から常時供給される点にあり、装置類の寿命が続く限り連続的な観測が行える点にある。

これら海底設置機器の、実海域への据付け・接続等には、海底作業用の各種船舶・潜水艇を用いる。1998年初時点でのシナリオは、

- (1) 深海調査船「しんかい 6500」で、海底ケーブルを切断し、ケーブル揚収用のリフトライン先端のグリッパーをケーブルに取りつける
- (2) 海底ケーブル作業船でリフトラインを巻き上げて海底ケーブルを揚収し、分岐装置フレーム（分岐結合装置・データ伝送中継器・ジャンクションボックスと津波計を収容してある：図2）を接続した後、それをケーブル切断点へおろす
- (3) もう一方の海底ケーブルも揚収後、水中着脱用コネクタ（ROV コネクタと呼ばれる）を取りつけておろす
- (4) おろした ROV コネクタを「しんかい 6500」で分岐結合装置に接続する
- (5) 津波計以外の海底観測装置を、ディープトウ（深海曳航体）に取りつけて設置予定地点へ向かい、所定位置で装置を切り離して着底させる

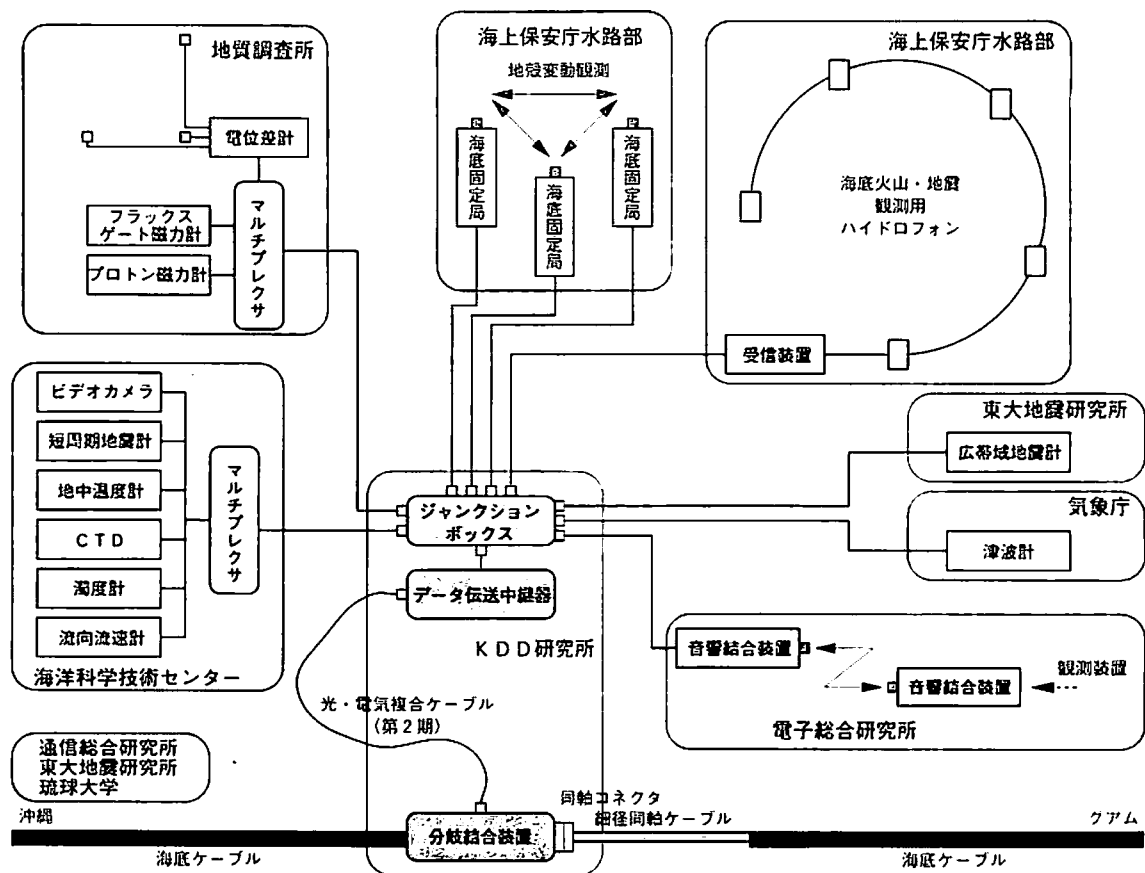


図1 Venus計画海底観測項目の全体像と各担当機関

(6) 各観測装置フレームには、ジャンクションボックスと接続するためのドラムに巻いたケーブルと ROV コネクタが装備されており、「しんかい 6500」でこれを展張してジャンクションボックスの所定位置のコネクタ受に接続するとなっていたが、その後の作業は必ずしも順調には経過せず、若干のシナリオの手直しが行われている。また、それに伴って観測装置側のフレームの改装等も施されている。

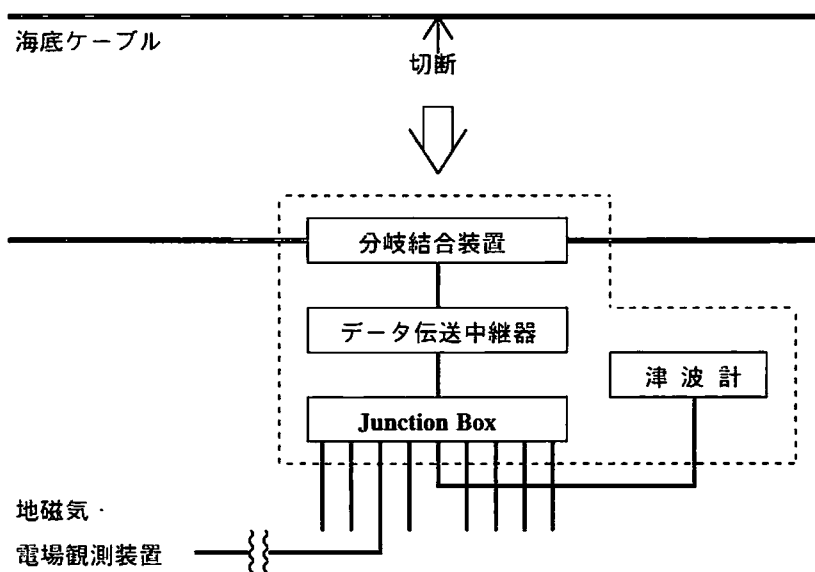


図2 分岐装置フレーム (点線枠内)

### 3. Venus計画の進捗状況

海底観測点設営のための機器開発は、1997年度第1観測点構築に向けて1995年度から順調に進められた。地磁気電場関係についても、1995年度に磁力計（プロトン・フラックスゲート3成分）と制御部の開発、1996年度に電位差計の開発を終え、1997年度前半に耐圧容器・フレーム・接続ケーブルの作成を行った。1997年11月には、分岐装置フレームと一部観測用機器の設置が予定されていたが、その設置航海では台風の接近等のために海象が悪くて「しんかい 6500」の潜航がほとんど確保できず、やむなく未設置のまま引き返さざるを得なかった。その状況の下で年度末の1998年3月に、分岐装置フレームの設置と各観測装置の設置・接続を続けて行うことになった。

しかるに、1998年3月の航海では、海底ケーブルの切断とグリッパーを用いたケーブルの揚収開始までは順調であったが、水深2200m（リフトラインケーブルは約4000m）のうちあと500m程度と見られる所で、海底ケーブルがグリッパーから脱落した。その原因としては、その後の調査で、グリッパー自体の把持力不足（仕様不満足）に加えて、海底ケーブルが事前調査時に発見されていない漁具に拘束されていた可能性が認められている。いずれにしても、海底ケーブルの揚収に失敗したことに変わりなく、追加の回復作業を行う選択子もあり得たが、その作業の確実性に対する懸念等もあって、この3月航海での作業は中断された。その結果、各観測機器の開発やケーブルシステム構築技術の開発は進んだが、計画第I期3年間のうちに第1観測点を構築するという目標自体は達成されなかった。

このような経過のため、第II期計画の見直しが必要となり、検討の結果、

- (a) Venus計画での第2観測点の構築（第3観測点の構築は予算確保上の問題から先に断念されていた）を取りやめ、第1観測点の確実な設置とそのための事前準備等を周到にする
- (b) 1998年度には深海調査船「しんかい 6500」がVenus計画に使用できない条件もあり、装置の設置を、有人潜水船なしで有索無人潜水艇(ROV)によって行えるように必要な対応を行う
- (c) 海底ケーブル脱落のため、潜水艇の接近が不可能となっているケーブルの揚収には、探線アンカー方式と呼ばれる作業方式をとる

こととなった。

かくして、1998年度の計画では、各観測機器のROVによる設置へ対応するためのフレーム等の改修と、全観測機器を海水中に設置した状態での総合動作試験を行うとともに、実海域においては分岐装置フレームの設置とハイドロフォンアレイ・地磁気電場観測装置の海底設置・接続までを1998年度中に行う予定となった。

1998年の10月末から11月にかけての航海では、若干の予期せぬ不具合に見舞われつつも、探線による海底ケーブルの揚収と分岐装置フレームの接続およびそれらの海底への設置（前節の(2)の作業まで）に成功し、分岐装置フレームに收容されている津波計のデータが沖縄局で正常に受信された。しかし、引き続いて(3)の作業にあたっている最中に、津波計のデータ送信が途絶える事態となった。その原因は、その後の追跡調査で、フレーム内の耐圧容器相互間をつなぐケーブルにあった弱点部がピンホールとなって海水が浸入し、浸水が約12時間かかってコネクタ部に到達した時点でコネクタピン間の絶縁を劣化させたためと判明している。

この結果、分岐装置フレームを回収して修理する必要を生じ、船上での修理では長期間にわたる性能維持の信頼性が極めて低いことも予想されたため、再び機器未設置のまま航海を終えることとなった。現時点では、必要な改修はもちろんとし、Venus計画全5年の最終年度である1999年度での機器設置・データ取得をめざして、作業手順についても再見直しが行われている。具体的には、

(d) 海底作業に全面的にROVを採用し

(e) 作業手順の都合もあり、前節(3)の作業を船上で（通常の水中共コネクタに変更して）行い、その接続後に海底へおろすことを予定している。

#### 4. 地磁気電場観測システム

地質調査所が担当している地磁気電場観測装置の開発においては、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）を1995年度に、電位差計部を1996年度に製作し、それらを海底に設置するための周辺部分である耐圧容器・フレーム等の製作を1997年度に行っている。

この装置の概略の仕様は、右表に示すとおりである。ほかに、フラックスゲート磁力計の傾きを補正するための2成分傾斜計と、これら全体をコントロールする制御部を備えている（Miyazaki et al., 1997）。

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3W（DC24V, 125mA）と極めて低く制約されている。

##### 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
	消費電力	: 平均約 1W
	測定間隔	: 10秒~∞, 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	: ± 64,000 nT, 200 nT ステップ
	測定レンジ	: ± 300 nT, 0.01 nT 分解能
	測定間隔	: 1秒~∞, 標準 1分
	消費電力	: 平均約 0.5W
電位差計	: (3電極, 2成分測定, 想定電極間隔 : 20 m)	
	使用電極	: 銀-塩化銀 (塩水封入)
	周波数範囲	: DC ~ 5kHz
	測定	: DC電場と AC電場振幅
	測定レンジ(DC)	: ± 100 μV/m, 0.5 nV/m 分解能
	サンプリング間隔	: 1秒
	消費電力	: 約 0.6W

以上の機器開発は 1997 年度前半までに終え、1997 年度後半には沖縄沖の実海域に設置される予定であったが、前述のようなやむを得ぬ事情で、海底設置・海底ケーブルへの接続が実現していない。

1998 年度には、前節(b)の方針に対応した観測装置フレームの改造と、本質的には消耗が予想される電位センサ（電極）を交換可能にするための ROV コネクタ装備を行ったほか、海底設置を予定する全ての観測機器を海水中で接続する動作試験（ドック試験）を行った。図 3 に観測装置フレームの平面図を、図 4 にドック試験時の観測装置の写真を示す。

ドック試験は市街地とならざるを得ないため、地磁気電場観測装置の場合には深海底と同様の環境にはなりえず、極めて大きな人工ノイズ環境での試験となったので、磁場・電場変動のわかりやすい記録例は得られていないが、①機器が予定通り動作することおよびデータの正常伝送を確認し、②電極のレイアウト変更に対応して妥当な電位差測定値の振る舞いが得られ、③他の観測機器への干渉の問題もないことを確認した。

日本での海底電磁気観測については、1980 年頃より海底磁力計(OBM)の開発が進められ（瀬川，1982），続いて海底電位差計(OBE)の開発も行われて（浜野ほか，1984），海底電磁場観測(OBEM)の実用化が図られてきた（浜野ほか，1989；一北ほか，1993）。これらは単独で海底に設置し、観測終了後に回収して観測データを読み出すものであり、観測期間も通常数週間程度である。最近、Toh et al.（1998）は、音響モデムを用いてデータ回収ができ、消費電力を小さくして 1 年間の連続観測が行える OBEM のシステム（SFEMS：SeaFloor ElectroMagnetic Station と呼んでいる）を開発し、水深 1600 ～ 5400 m の海底での動作試験に成功している。

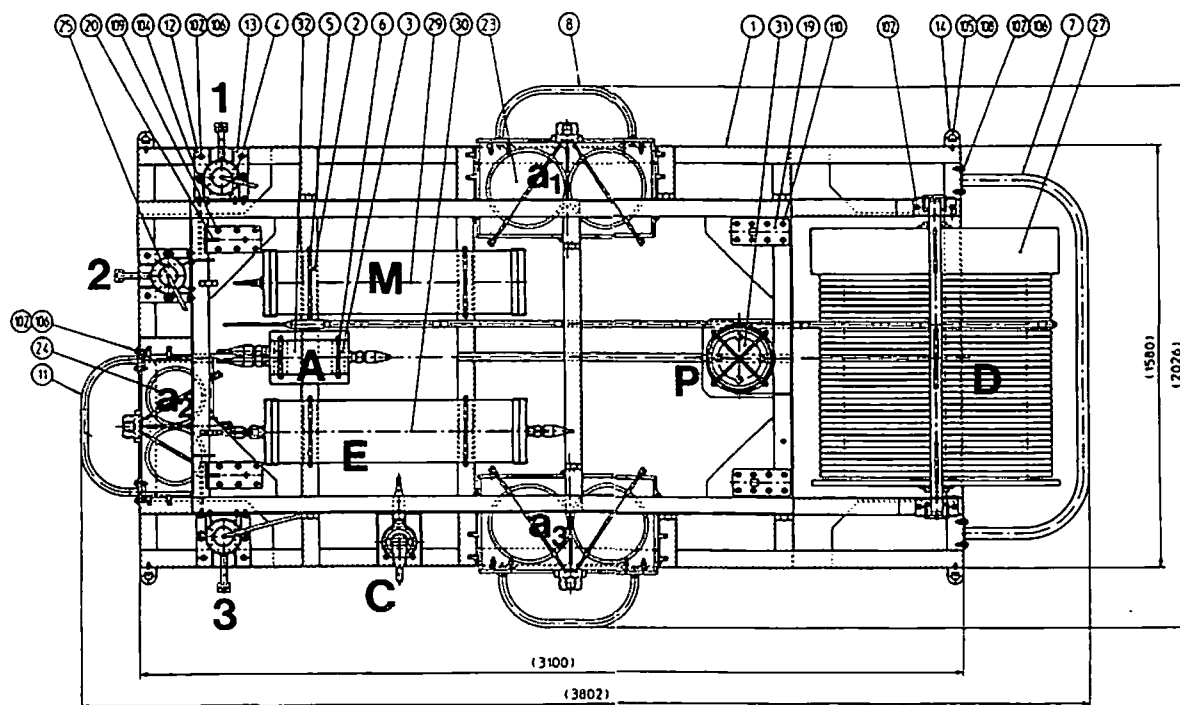


図 3 海底地磁気電場観測装置の平面図。

P はプロトンセンサ， M・E・A が磁力計・電位差計・電位差計プリアンプの各耐圧容器．1・2・3 が電位センサ（電極）で展張用のケーブルがトレイ  $a_1$ ・ $a_2$ ・ $a_3$  に 8 の字に収容され，C の ROV コネクタを経てプリアンプ A につながっている．D は 250 m 程度離れた Junction Box に接続するための 300 m 長ケーブルを巻いたドラムで，終端の 30 m は ROV での操作のためにドラム側面に 8 の字に収容してある。

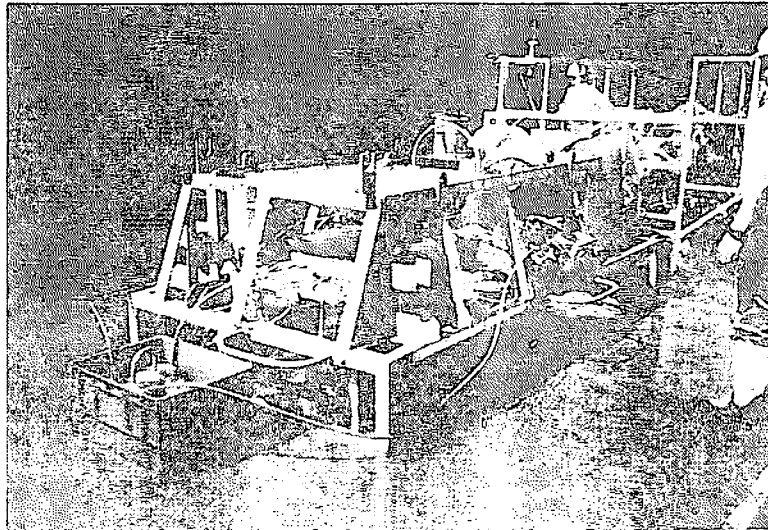


図4 ドック試験サイトに置かれた海底地磁気電場観測装置

このような開発により、任意の海域での電磁場観測が行えるようになった意義は大きいですが、ケーブルシステムによる地磁気電場観測では、設置海域は限定されるものの、リアルタイムでデータを取得することと半永久的に連続観測が行えることに特長がある。

## 5. おわりに

以上に述べてきたように、Venus 計画における深海底地磁気電場観測システムでは、科学的知見に対する成果どころか、観測データに取得すらもまだできておらず、1999 年度での観測開始の成功を期している。一方、海底ケーブルを活用した海底地磁気連続観測は、現在は陸域に限られている地磁気観測所のネットワークを大洋底に拡大できることとなり、MT 解析を通じた地下電気伝導度構造の解析研究にとどまらず、地磁気永年変化モデルの精密化やダイナモ理論と対比した磁場の時空間分布の把握等、コアおよびマントルのダイナミックスの解明に向けても、意義が認められる。そのためには、第1観測点の構築はほんの第1歩にすぎず、電磁場観測の絶対値の正確な較正も重要である。

とくに装置フレームの方位を正確に決定するためには、方位ジャイロが必要となる。3成分磁力計が既に正確な磁方位センサーであり、磁気コンパスの装備が無意味であることは自明である。しかし、方位ジャイロに関しては、精密なものは高価である上に連続測定の実用性がないにもかかわらず、消費電力が大きいという弱点がある。単独設置型では、観測期間が制約されることとなり、我々のケーブルシステムの場合には、許容される電力負荷の問題もあり、装置に組み込むに至っていないのが現状である。Toh et al. (1998) の SFEMS でも、機器の傾斜の測定結果は見事に表示されているが、磁場の X,Y 成分は設置機器の方向の成分であり、その値から機器の磁方位が計算される。機器の設置場所が磁気異常のない海域であれば、その磁方位と大局的な偏角分布から機器の設置方位を見積もることもある程度可能であるが、磁気異常の卓越する火成岩類が露出する海域の場合には、ごく局所的な磁気異常成分のため方位決定が困難となる。

上記のように方位ジャイロを海底観測装置に組み込むことが困難な状況の下で、装置フレームの方位を正確に決定する手段として、方位ジャイロを搭載した3成分磁力計を比較的短時間（例えば48時間程度）の間、海底設置装置の近傍（相互干渉がない程度になるべく近く）で並行観測を行い、変化ベクトル（日変化等）が両者で等しいという条件で海底設置装置の方位を決定する方法が考えられる。短時間で回収する方位計付き OBM である。この方法には、ケーブルシステムの場合のように、

半永久的な観測点が構築されたときに、方位決定だけでなくフラックスゲートのゲインドリフト等があったときの、ゲインリカバリ（校正データ取得）に役立つという利点もある。短時間の動作であれば、電源容量の問題も少なく、将来的には多くの海底設置装置を順次巡回して、校正データを取得することができる。それは、陸上の地磁気観測点において、常時は変化観測を行いつつ定期的に絶対観測を行って変化観測の絶対精度を維持する方法を採るのと同様である。

このような校正データ取得用の3成分磁力計の開発を1999年度予定として計画中であるが、限られたVenus計画予算の中では、海底観測点の構築を確実に達成することが当面する最大の課題となっており、校正データ取得はより後年度になる可能性もある。いずれにしても、海底ケーブルを用いた海底地磁気電場観測システムによる第1観測点での連続観測の実現は、Venus計画の大目標の中では小さな一歩であり、取得されるデータの解析と校正データ取得を初めとする今後の技術開発と科学的知見拡大への貢献を期していきたい。

#### 《 参考文献 》

- 浜野洋三・歌田久司・瀬川爾朗・行武 毅(1989)海底電位磁力計. *Conductivity Anomaly* 研究会 1989年論文集, 235-240.
- 浜野洋三・行武 毅・瀬川爾朗・浅岡達史・歌田久司・中川一郎・笹井洋一(1984)電位差計による海底観測. *Conductivity Anomaly* 研究会 1984年論文集, 259-265.
- 一北岳夫・大西信人・歌田久司(1993)新型海底電位磁力計の製作. *Conductivity Anomaly* 研究会 1993年論文集, 22-30.
- Miyazaki, T., Y. Murakami, T. Nakatsuka, and N. Ohnishi (1997) Development of geomagnetic and electric fields observation system. *Proc. Intern. Workshop on Scientific Use of Submarine Cables*, 157-159.
- 宮崎光旗・中塚 正・村上 裕(1996)VENUS計画における海底地磁気・電位差観測システム. *月刊海洋*, **28**, 252-255.
- 宮崎光旗・中塚 正・村上 裕・大西信人(1997)VENUS計画における海底地磁気・電位差観測システムの開発状況. *月刊地球*, **19**, 795-799.
- 瀬川爾朗(1982)海底地磁気観測の難しさ. *Conductivity Anomaly* 研究会 1982年論文集, 109-115.
- Toh, H., T. Goto, and Y. Hamano (1998) A new seafloor electromagnetic station with an Overhauser magnetometer, a magnetotelluric variograph and an acoustic telemetry modem. *Earth Planets Space*, **50**, 895-903.