

要旨

この小文はオフライン方式による深海曳航式プロトン磁力計システムの概要と第1回の海域実験の結果について述べたものである。本装置の特徴は従来のオンライン方式のもの(スクリップス海洋研究所、通称FISHなど)に比べて取り扱いが簡単であり、低コストで6000mまでの任意の深さでセンサを曳航し海底の磁気探査ができることである。実験の結果、磁力計の測定値のばらつきは約15nTであった。

序論

プロトン磁力計は海上からの地磁気観測に最もよく使われる測機である。測定は通常、センサを船の後方200から300m、海面下10から20mのところを曳航して行なわれる。海底は一番深いところでも10kmなので、この方法は数十から数百kmの波長の異常を調べるには十分である。しかしもっと短波長の異常に対してはより磁化物体に近いところ、つまり海底近傍で測定する必要がある。海底地殻の磁化の微細構造を研究する目的で、我々は音響機器を使ったリモート式の深海曳航式プロトン磁力計の開発を行なっている。

海底近傍での磁場測定は欧米諸国では1960年代からすでに始められている。この測定で最もよく使われシステムはスクリップス海洋研究所の Fully Instrumented Submersible Housing (FISH) である (Harrison 1987)。このシステムの思想は本質的には海上で行なわれる観測をそのまま深海にもつてくるというものである。そのため、音響測深機、サイドソナー、深海カメラ、プロトン磁力計などを1セットにした形になっている。船とセンサは同軸アーマードケーブルで結ばれ、オンラインで電力供給とデータ通信を行なう (Spiess et al. 1970)。今までにこの装置を使って主に海嶺近くにおいて多くの研究がなされてきた (例えば、Larson et al. 1974, Macdonald et al. 1980)。その結果海底地殻の磁化の強さの分布や地磁気反転付近の磁化物体の構造について新しい知識が得られた。

このように海底地殻の微細構造を研究する上で、FISHは非常に優れた装置である。しかしその思想上どうしても避けられない問題がある。それは装置が大掛かりで高価になることである。そのため誰でもまたどんな船でもそれを使うというわけにはいかない。

我々は、簡単かつ安価なシステムで多くの測線がとれるという考えのもとに深海曳航式プロトン磁力計を作ることにした。そのためケーブルに多大な費用のかかるオンライン方式をとらずに、曳航策にワイヤを使うオフライン方式にした。プロトン磁力計の本体およびセンサは陸上で使用されているものを利用し一部改良を行なった。最終目標は、ケーブルではなく音響機器を使って、リアルタイムにセンサ深度をモニタしながら観測できるシステムを作ることである。

ここでは現在のシステムの概要と昨年の淡青丸の航海（11月27日から12月4日）で行なわれた第1回目の海域実験の結果を紹介する。

システムの概要

本システムは深海を曳航する計測機の部分と船上のデータ処理の部分に大きく分れる（図1）。前者において磁場と水圧（水深のモニタとして）の測定と記録を行ない、後者においてデータの読み出しと編集を行なう。計測機はプロトン磁力計、プロトンセンサ、水圧計、圧力センサからなる。プロトン磁力計と水圧計は耐圧容器の中に収められている。また圧力センサは耐圧容器の後ろブタに取付けられている。プロトン磁力計とそのセンサはケーブルで接続されている。船上部は基本的にはRS232Cボード付きのマイクロコンピュータとプリンタから構成される。今回の実験ではデータ通信、データ処理の便利さ（アプリケーションソフトがそろっている）を考慮してマッキントッシュ・プラスとハードディスクを使用した。

測定の開始終了、データの記録、データの読み出しについて順を追って説明すると以下のようになる。

(1) まずプロトン磁力計と水圧計に対して測定日時、測定回数、測定間隔を設定する。耐圧容器にセットする直前に測定開始のコマンドを送る。磁力計の方はフロントパネル上でこれらの操作を行なう。水圧計の方はマイコンのCPUからRS232Cを経由してこれらのコマンドを入力する。

(2) 磁力計と水圧計の準備ができれば、それらを耐圧容器にセットし、曳航計測を行なう。水圧のデータは耐圧容器内の各装置のメモリ（RAM）に蓄積される。

DEEP TOW PROTON MAGNETOMETER SYSTEM(KT88-21)

ORI-DTP I

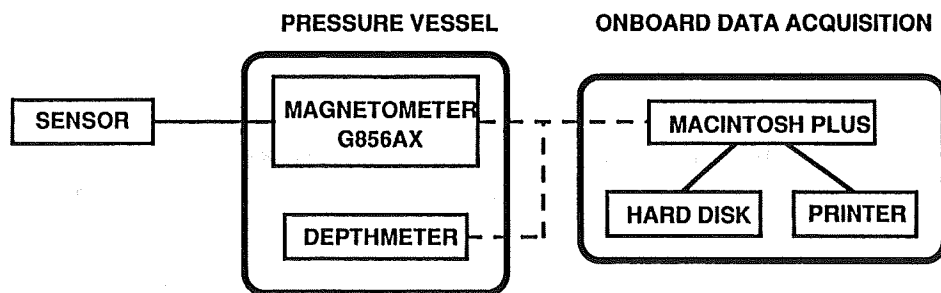


図1 深海曳航式プロトン磁力計システムのブロック図。曳航される計測機は耐圧容器、プロトン磁力計（センサも含む）、圧力計（センサも含む）から構成される。船上のデータ収集、処理部はマイクロコンピュータとプリンタからなる。KT88-21時航海の海域実験にはマッキントッシュ・システムが使われた。

G856AX

resolution	0.1 nT
accuracy	0.5 nT
clock	5 sec/month
measurement range	20000 nT to 90000 nT
cycle time	3 sec
measurement Intervals	4 to 999 sec
memory	5700 readings (3000)
output	RS232C 9600 baud rate
temperature	-20 to 50 °C
physical	18x27x9 cm 2.7 kg
power	8 D-cell batteries (Alkaline 1.5 V)

DEPTH METER

accuracy	10 ⁰ m
measurement range	20 to 6000 m (2 to 600 kg/cm ²)
measurement Intervals	2 to 255 sec
memory	16000 readings (32 KB RAM)
output	RS232C
temperature	-10 to 40 °C
power	DC13.5 V

SENSOR

liquid	kerosene
depth	6000 m
physical	62 cm, ø15 cm 25 kg

PRESSURE VESSEL

depth	6000 m
physical	stainless-steel 58(42.5) cm, ø26 cm 80 kg

表1 G856プロトン磁力計およびそのセンサ、圧力計、耐圧容器の仕様

Batter Type	Readings at 25°C	Readings at 0°C
Alkaline	6,000	4,000
Standard CarbonZinc (flashlight)	1,500	700
Premium CarbonZinc	3,000	1,700

表2 電池の種類および温度とプロトン磁力計の測定回数の限度の関係を表にしたもの。

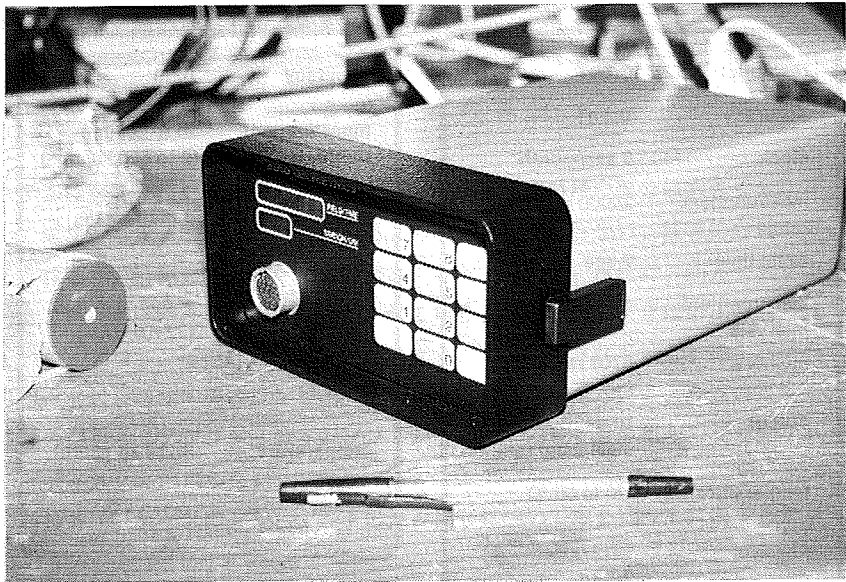


図2 ジオメトリクス社製G856プロトン磁力計本体。フロントパネル右のキーを使って、測定間隔などの計測条件の設定やデータの読み出しのためのコマンドを入力する。フロントパネル左のコネクタはデータ入出力用のものである。すなわち曳航計測時はプロトンセンサケーブルに、船上でのデータ読み出し時にはRS232Cケーブルに接続される。



図3 ジオメトリクス社製プロトンセンサ。ダイヤフラム方式を使った圧力バランス方式で深度6000mまで使うことができる。センサ尾部にはセンサを安定させるために4つのフィンがつけられている。

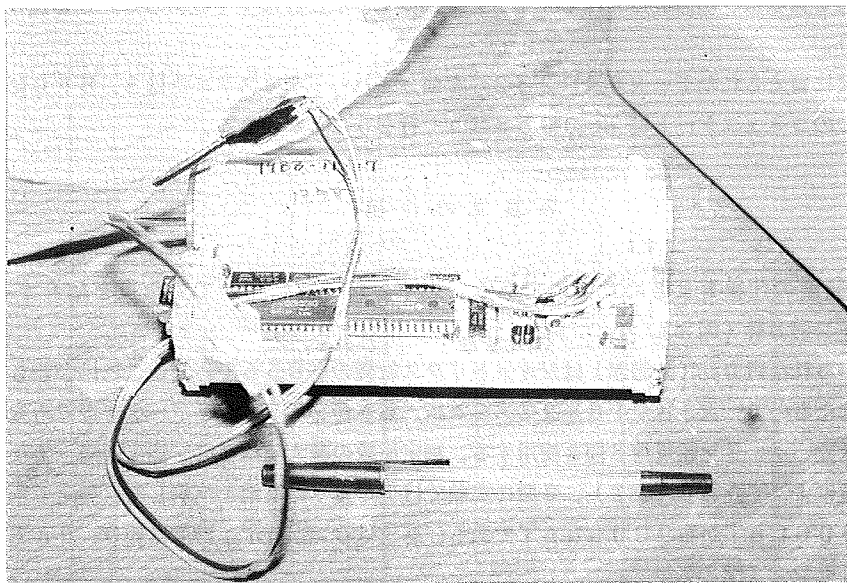


図4 計測機の深度をモニタするための圧力計。測定間隔などの計測条件の設定やデータの読み出しはRS232C経由でマイコンのCPUを使って行なわれる。

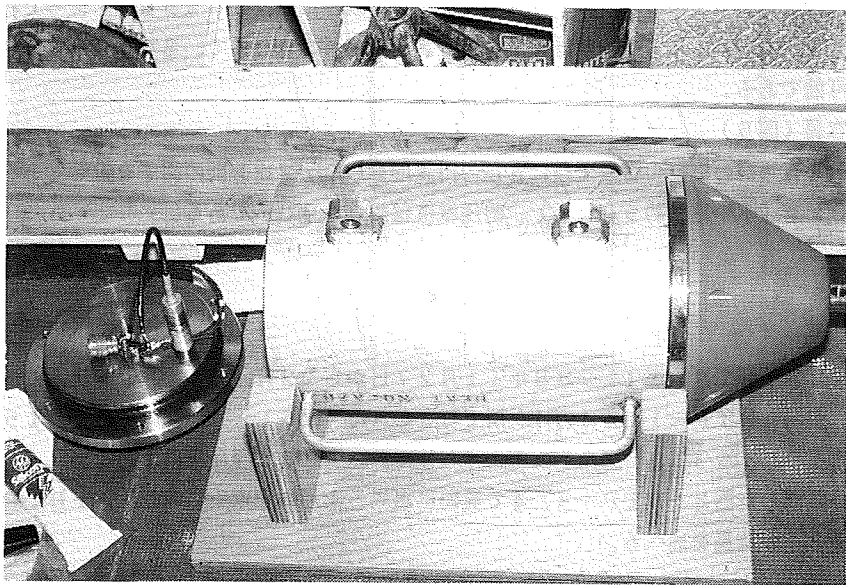


図5 6000mの深さまで曳航可能なステンレス製の耐圧容器。写真左の耐圧容器のフタには圧力センサが取り付けられている。

(3) 計測機を揚収後、磁力計はやはりマニュアル操作で、水圧計はマイコンのCPUを使って測定終了を行なう。

(4) 各装置に蓄えられたデータをRS232Cを使ってハードディスクまたは3.5FDに落とす。RS232Cのコミュニケーションは9600baudで行なうことができる。

各装置の仕様

表1は各装置の仕様をまとめたものである。以下それぞれについて主な点を紹介する。

(1) プロトン磁力計 (図2)

ここで用いられた磁力計(計測部)はジオメトリクス社製のG856である。これはもともと陸上用に開発されたもので、大きさが $18 \times 27 \times 9$ cm、重さが2.7 kgとポータブルである。電源は直流12Vで、1.5V乾電池8個を使用する。測定回数の最大値は温度、測定間隔、また使用する電池の種類によって変わる(表2)。今回の実験ではアルカリ乾電池を使用した。測定できる磁場の範囲は20000 nTから90000 nTである。感度は0.1 nT、精度は約0.5 nTである。

(2) 磁力計センサ (図3)

ダイヤフラムを使った圧力バランス方式によって深度約6000mまで使用することができる。溶液にはケロシンが使われている。ケーブルは長さ15mのアーマードケーブルである。

(3) 水圧計 (図4)

電源は直流13.5Vが必要である。32KBのRAMに16000個のデータを記録することができる。相対精度は数mである。コマンド入力やデータの読み出しはRS232Cを使って行なわれるように設計されている。圧力センサはKYOWA製PAV-500Kで、20から6000mの範囲の測定が可能である。

(4) 耐圧容器 (図5)

本体はステンレス製の筒型の容器で頭に青色の円錐形をしたテフロン製の帽子を被せてある。空中重量は約80kg(水中重量約50kg)、耐圧深度は約6000mである。

実験

淡青丸KT88-21次航海(1988年11月27日から12月4日)で本システムの海域実験を行なった。実験はDTP-1から4の4ヶ所で行なわれた(図6)。水深はそれぞれ1594、4690、4500、4350mである。そのうちDTP-1、2で耐圧実験を行ない、4500mまでの耐圧を確認したあと、DTP-3、4で実際に磁場と水圧の測定を試みた。以下DTP3、4での測定方法とその結果を述べる。

A. 方法

図7はシステムの曳航中の様子を模式的に書いたものである。先に述べたように本システムはオフライン方式なので、曳航策として1番ウインチのワイヤを使用した。このワイヤは径9mmの鋼鉄製

THE LOCATION of deep tow magnetometer lines

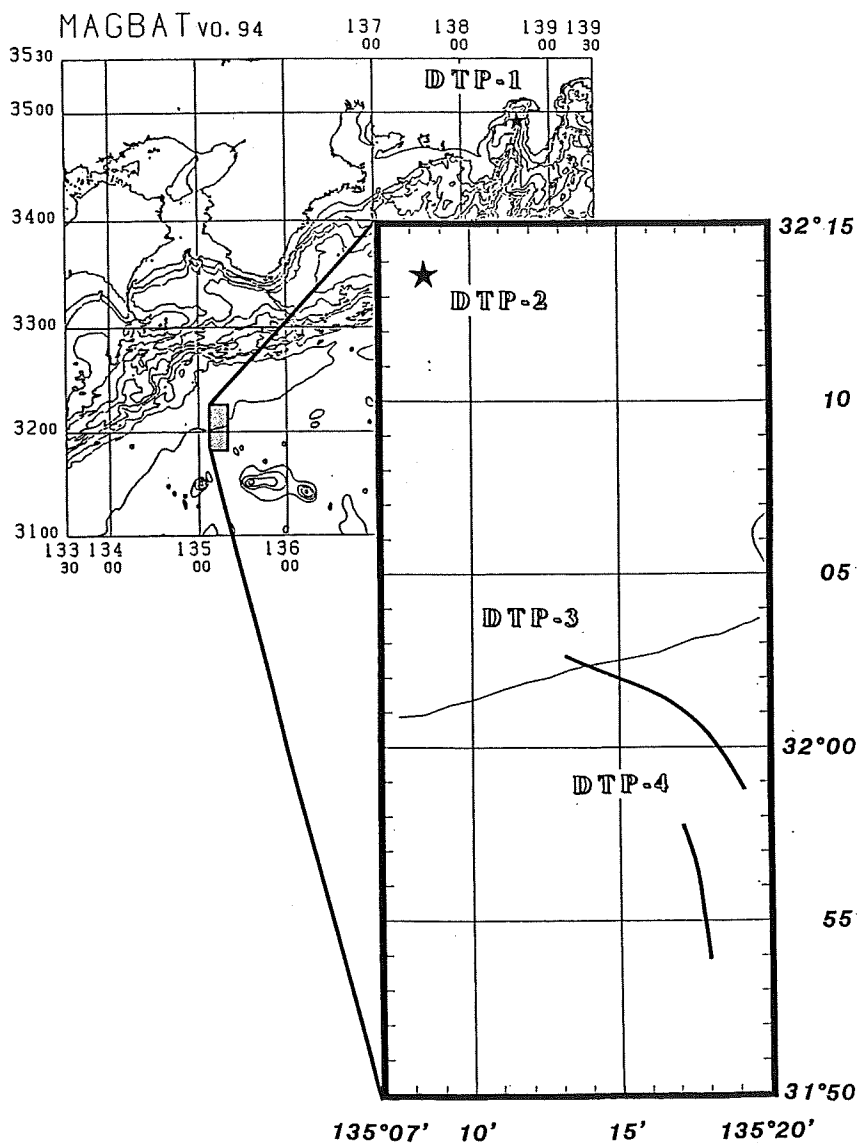


図6 KT88-21次航海で行なわれた海域実験の場所を示す。右手前の太枠で囲んだ図は左奥の図中の影を付けたエリアの拡大図。DTP-1、2で耐圧実験を、DTP-3、4で計測実験を行なった。

ワイヤである。ワイヤの先端に耐圧容器、センサ、パラシュートを順番に接続した。センサケーブルと耐圧容器とのコネクタ部分に力がかからないように2本のワイヤで、ケーブルに弛みをつけるようにした。センサにつけたフィン(図3)、その後方にひかれたパラシュートはセンサの姿勢を安定させるためのものである。ワイヤと耐圧容器は2個のシャックルと1個のシーブルを図7のように組み合わせたものである。ワイヤの先端から50 m手前の船よりのところにつけたピンガーは計測機の位

置をリアルタイムにモニタする目的のものである。しかしDTP-3の実験で直達波は受信できたが海底に反射して船に帰ってくる波が受信できなかったため、DTP-4ではつげなかった。

磁力計および水圧計の測定間隔は15秒に設定し、水圧計の測定回数は最大16000回とした。投入および曳航方法については各実験で若干異なる。DTP-3の場合、投入中の船速は対水0.5から1.5ノットであった。またワイヤ長が500、1500、3000mのところで繰り出しを5分間停止するという方法をとった。ワイヤは4300mまで出し、船速2ノットで曳航した。DTP-4ではワイヤの繰り出しは連続的に行ない、2000mで曳航した。実験中の船速は2.5ノットの一定に保った。

観測ワッチログの作成にはアプリケーションソフトのFileMaker IIを使い、そのままデータベースとして使えるようにした。観測ワッチログの項目は15分毎の位置、船速、方位、水深、ワイヤ長である。またこれとは別に淡青丸のNavigation Systemによって30秒毎の位置、船速、方位をMTに記録した。

磁力計、水圧計に蓄積されたデータの収集にはSmartCom II (通信ソフト)、Word Perfect (エディタ) を使用した。またExcel 1.5 (スプレッドシート)、StatView 512 (データプロット)、FileMaker II (データベース) を使ってデータ編集や図表の作成を行なった。

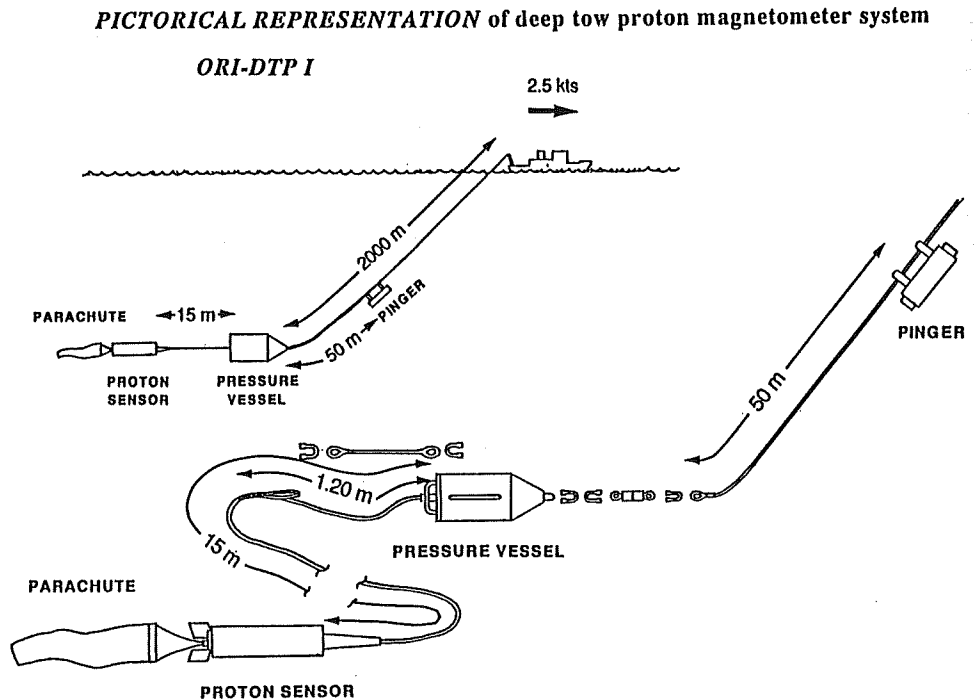


図7 曳航中の計測部の模式図。

B. 結果

DTP-3、4においてそれぞれ4.27時間、1.75時間、距離にして約12km、7kmの測線で測定を行なった。DTP-3、4において前者の実験では1025、後者では420ポイントのデータを得ることができた。ただし、DTP-3の磁場測定の結果は図8-2に示されているようにほとんどがノイズであった。この時の測定値の最大は46102.1nT、最小は20419.6nTで最大振幅は24950nTにも達した。これはセンサケーブルが耐圧容器に絡まってしまったためである。

DTP-4では現在のシステムの大体の性能と今後の開発方針を考えるのに十分なデータを得ることができた。図9-1に横軸に時間を縦軸に水圧データを水深値に読み直してプロットしたもの、図9-2に横軸に時間を縦軸に磁場の値をプロットしたものを示す。図9-2から船体磁気の影響がほとんどなくなったと見られる3.5から4.8時の間の磁場の最大値は45222.9nTで最小は45176.2nTであった。その平均は45206.4nTである。この間のデータのばらつきは約15nTである。水深は276から919mまで変化し、水深が深くなるほど磁場の値が増える傾向にある。ただしその増分はただか30nT程度である。次に計測機の姿勢が最も安定したであろうと思われる4.36から4.47時の記録を見てみる。水深は816から800mへわずかに減少しただけでほとんど変化していない。磁場は最大値が45221.9nT、最小が45209.2nTであった。平均値は45218.5nTで標準偏差を計算すると2.5nTになった。

考察

DTP-4の結果では測定値のばらつきが約15nTである。この程度でも、あとで述べる振幅が数百から数千nT、波長が数km以上になる地磁気精状異常の同定には使えらる。しかし地磁気反転境界における磁化構造といったより微細なものの解析には不十分である。今後精度を向上させていくためには測定値がばらつく原因を解明する必要がある。今までの実験において考えられる原因には、(a)地形の影響、(b)地磁気脈動、(c)船体磁気の影響、(d)計測機内のノイズの4つがある。実験海域の平均水深が4312mで最も深く曳航したときでも海底まで3400mはあること、ばらつきの振幅が約15nT波長がおよそ80mであることから、(a)は考えなくてよいだろう。(b)にしては振幅が大きいのでこれも省く。(c)についても、ばらつきの大きさと深さに相関がないことや白鳳丸の船体磁気に関する見積(友田ら、1980)を考慮すると省いてよい。最後に残ったのが(d)でこれが原因であろうということになる。

それでは何に起因したノイズなのかというと、今のところ1つの推測をしているだけである。それは測定機の姿勢の影響である。例えば、水圧の変化の大きいところで磁場のばらつきが大きいこと(図9-1、2)やばらつき具合がパルス的であること(図10)がそのことを予想させる。もしこの推測が正しいとすれば、測定値が安定するのはどこであろうか。それはワイヤの繰り出しが終了し、計測機が徐々に水深を上げて一定の深さに落ち着いたところであろう。残念ながらDTP-4ではこのことを確かめる時間がなかった。ただそれに最も近い状態が4.36から4.47時のデータであると考えている。この間の標準偏差が2.5nTであるのはこの考えと調和的である。

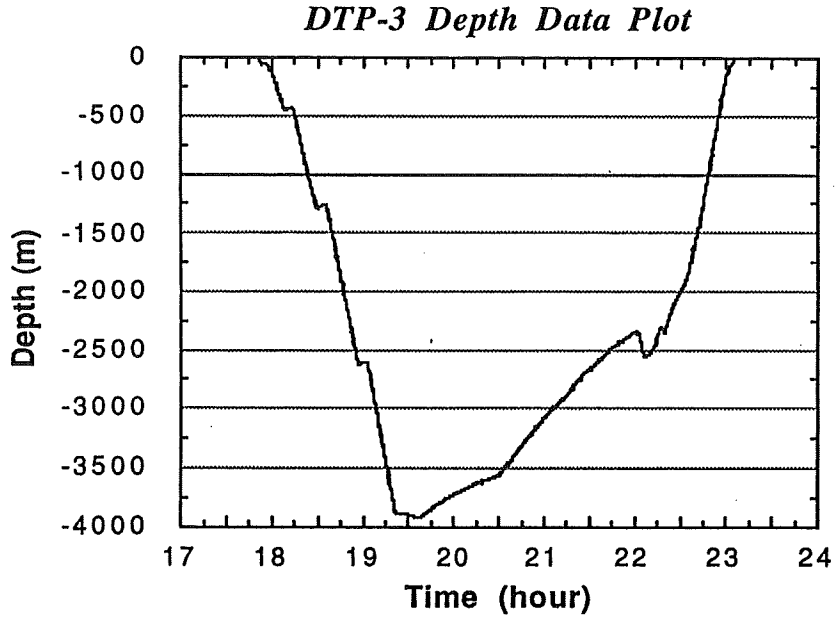


図8-1 DTP-3の圧力計の結果を水深値に直してプロットしたもの。ワイヤ長が500、1500、3000mのところワイヤの繰り出しを止めたことが、18時から19時30分までの階段上に深くなる水深値に現われている。ワイヤは4300mまで出した。

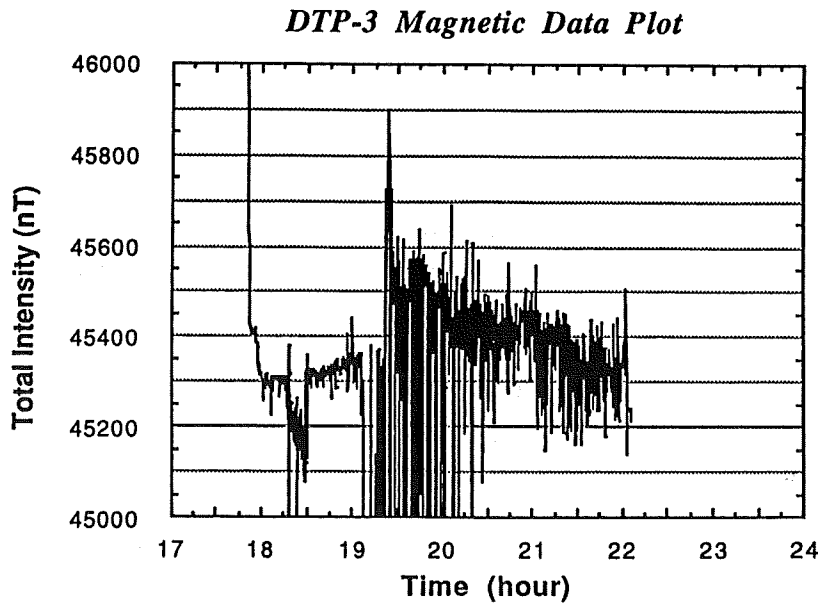


図8-2 DTP-3のプロトン磁力計の結果をプロットしたもの。センサーケーブルがワイヤに絡みついたため値が非常に乱れてしまった。

DTP-4 Depth Sensor plot

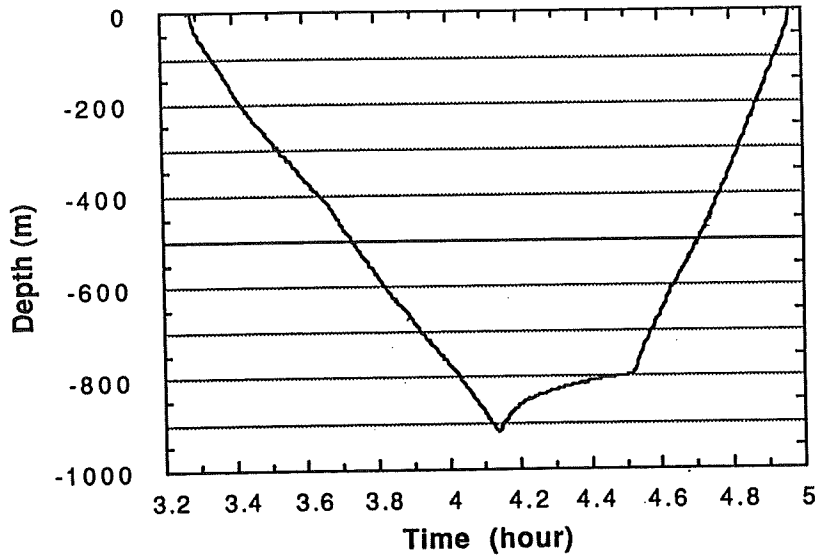


図9-1 DTP-4の圧力計の結果を水深値に直してプロットしたもの。ワイヤは2000mまで連続的に繰り出した。

DTP-4 Magnetic Data Plot

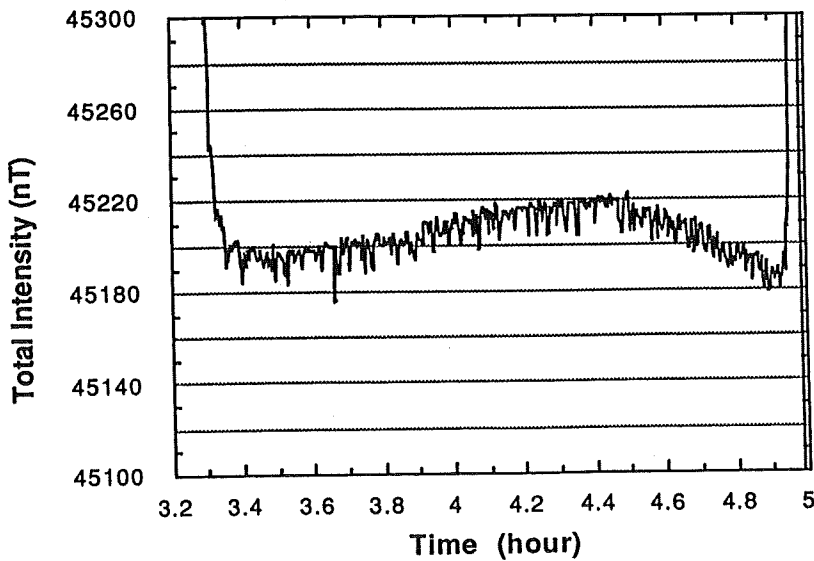


図9-2 DTP-4のプロトン磁力計の結果をプロットしたもの。深度が深くなるほど全磁力の値が高くなる傾向がある。測定値のばらつきは平均して約15 nTで、深度がほぼ一定になる4.36から4.47時付近で最も小さいように見える。

ここまでは地磁気観測の主役である磁力計の測定結果について考察してきた。次に深海観測では主役同様に重要な役割を果たす水圧計の結果(DTP-4)について考えてみる。

精度は相対的には数mであった。これは用いた圧力計の性能限界である。磁場のノイズと計測機の姿勢との関係を調べるにはさらに精度のよいものが必要になるであろう。

得られた水深値そのものはこれからの開発に大きな課題を与えたと言える。それは計測機をいかに深く沈めるかということである。ワイヤを巻き上げる直前の4.47時の計測機の水深は800mであった。このとき船速は2.5ノット、ワイヤ長は2000mであった。それでは水深6000mまで沈めるには何mのワイヤが必要か。実際には海水中のワイヤは海面に向かって凸の弧を描いているのだが、これを直線だとすると15000mのケーブルが必要である。これではどんな船でも使えるという本システムのメリットがなくなってしまう。これに対する一つの対策はデブレッサをつけることである。さらにシステム全体をできるだけコンパクトにすると言う当初の目的を満足させるためには耐圧容器の形、曳航速度なども含めた工夫が必要だと思われる。

今回は2回の測定実験を行なったが、1回は失敗に終わった。このことで逆に投入方法について一つの教訓を得ることができた。少しあいまいな表現だが、ワイヤに常にテンションをかけながら下ろせということである。考えれば当たり前のことだが、計測機を自由落下させると、耐圧容器が先に落ちて行き、パラシュートのついたセンサがその上つまりワイヤ側に回り込んでしまうのである。DTP-3でケーブルがワイヤに絡まった原因は船速が0ノットに近かったことと断続的に下ろしていったことということになる。またこの教訓は曳航速度の下限の目安でもある。曳航深度を下げることにに関して、低速曳航という手段もあるがこの限界よりは低くできない。

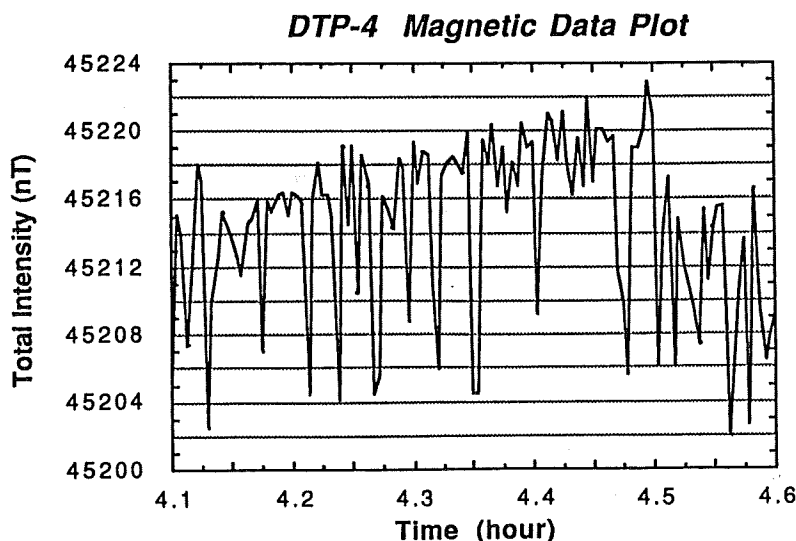


図10 DTP-4のプロトン磁力計の結果の一部をプロットしたもの。測定値のばらつきがワイルド的である。

以上実験結果について簡単な考察を行ない、主な問題点を指摘した。これらの問題を解決することによって、高精度の測定とより深い深度の観測が可能になるはずである。そして地球科学の多くの興味深い現象に対して新しい情報を与えてくれるであろう。そういった現象に対して我々の考えていることのいくつかを示すと以下のようなものがある。

(1) リフトアロバゲーションやフラクチャーゾーンといったテクトニックな場の磁気的な構造はどうなっているのだろうか。

(2) 地磁気反転境界の磁化は地球磁場逆転に関する新しい情報を持っていないだろうか。

(3) 振幅が弱いため海上では捉えられない地磁気精状異常の同定や新しい磁気反転のイベントの発見ができないだろうか。

(4) 海山の磁化の一様性と非一様性について詳しい情報を得、その海山のでき方まで含めた議論ができないだろうか。

また海域という点では古い海底について測定された例がほとんどないので北西太平洋はいいフィールドであろう。なかでもシャツキーライズは成因上問題のあるところであり魅力的な場所である。

まとめ

最後に現在のシステムの評価の一覧ということで海域実験(KT88-21)の結果と技術的な課題についてまとめておく。

実験の結果、水圧計は数mの相対精度の測定および評価ができ、磁力計の測定値には15 nT程度のばらつきがあることがわかった。今後の技術的な課題は次の3点である。

(1) プロトンセンサをいかに安定させるか。

(2) プロトンセンサをいかに深く沈めるか。

(3) センサ深度をいかにモニタするか。

謝辞

本システムの耐圧容器と圧力計の製作において海洋電子株式会社の村上英幸氏にたいへんお世話になった。システムの設計から海域実験までその全般において東京大学海洋研究所の古田俊夫氏の助言と協力を得た。また海域実験がスムーズに行なわれたのは東京大学淡青丸の乗組員の理解と協力があったからである。これらの方々に厚くお礼申し上げる。

参考文献

Harrison, C. G. A., The crustal field, in Geomagnetism, vol. 1, edited by J. A. Jacobs, pp.513-610, Academic Press, London, 1987.

Larson, R. L., P. A. Larson, J. D. Mudie, and F. N. Spiess, Models of near-bottom magnetic anomalies on the East Pacific Rise crest at 21° N, J. Geophys. Res., 79, 2686-2689, 1974.

Macdonald, K. C., S. P. Miller, S. P. Huestis, and F. N. Spiess, Three-dimensional modelling of a magnetic

- reversal boundary from inversion of deep-tow measurements, *J. Geophys. Res.*, 85, 3670-3680, 1980.
- Spiess, F. N., and J. D. Mudie, Small scale topographic and magnetic features, in *The Sea*, vol. 4, edited by A. E. Maxwell, pp. 205-250, Interscience, New York, 1970.
- Tomoda, Y., and H. Fujimoto, Possibility of measurement of geomagnetic daily variation with a cruising vessel, *J. Geod. Soc. Jpn.*, 26, 59-65, 1980 (in Japanese).