

# 拓洋搭載3センサプロトン磁力計 (PMM-100) の現状と 経緯について —観測ノート—

穀田昇一 ・ 林田政和 : 測量船 拓洋

On the Present State and Troubles of the Three Sensors Type  
Proton Magnetometer (PMM-100) on S/V TAKUYO - A Survey Notes -

Shoichi Kokuta and Masakazu Hayasida  
Survey Vessel TAKUYO

## 1. まえがき

海上地磁気測定を高精度、かつ効率的に実施するため、昭和58年9月就役の大型測量船拓洋に、<航走中の船上において、地磁気の日変化補正の可能性を秘めた>3センサリアンプ曳航型の高精度プロトン磁力計が搭載された。この磁力計は、論文等で可能性を論じられた方式による世界最初の実用計器であり、近くに地磁気観測所が無いような調査海域でも地磁気の日変化、及び船体磁気の影響を測定値から取り除き、船上で資料整理も可能とされるものである。

数10 nT ( $nT = r = 10^{-5} Oe$ ) ある地磁気の日変化の算出は、同一地点で、ある時間において測った2個以上のデータ (精度 $\pm 0.5 nT$ ) から時間変化量に対する地磁気変化分を積算して求める。このため、本機は250 m, 500 m, 750 mと3本の長さの違ったケーブルの先端にセンサ部を、そこから40 m離してアンプとコントローラ部、及びバッテリー部をそれぞれ接続して曳航する。(写真1) 船上からのマイクロプロセッサ制御により、速力に合わせて励磁の時間間隔を設定し、同一地点の測定データを3個ずつ得ることができる。(故に3センサ型と呼称する。) 磁場の強さによって変化するアンプのチューニング容量の調整もリモートコントロールする。アンプ部、バッテリー部がセンサに近く、しかもノイズ発生源の船体から離れた海中にあるため、効率の良い励磁でS/N比の非常に高いプロトン信号を増幅して船上に伝送する。この信号はフィルタ回路を通した後、ラック内ノイズを避けるため光信号に変換し、光ファイバケーブルでカウンタに転送する。カウンタは、プロトン信号の周波数を正確に測定するため1000波の周期を1  $\mu s$  の分解能で測定し、0.1 nTの単位まで計測する。

以上のような特長を持つ本磁力計であるが、拓洋搭載以来2年間に曳航部等の故障が続発したため、当初期待されたデータを連続して収録することができなかった。

筆者らは拓洋就役以来の観測士として、観測機器を

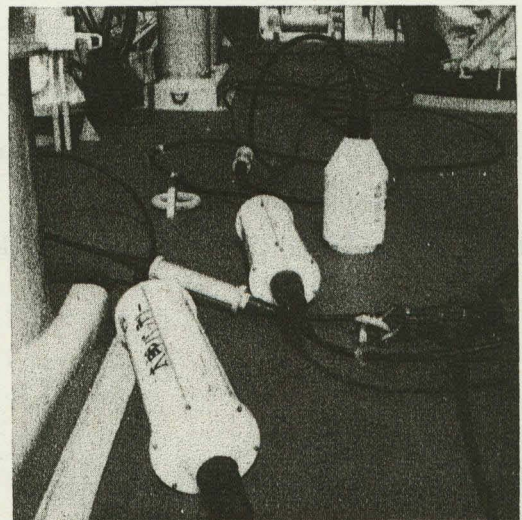


写真1. 曳航部

(手前からバッテリー、アンプ、センサ)



担当し、本機の数々のトラブルにも関わってきた。浅学ではあるが、これまでのトラブルの経緯と対策について記述してみた。今後の参考になれば幸いである。

## 2. 本機の仕様及び機能

### (1) 検出機器

トロイダルコイル, 23mH, 6Ω, プロトン試料ケロシン, 容器はソルジュール製

### (2) アンプ&コントロール部

プロトン信号を入力インピーダンス50kΩ 出力2kΩ 120dBで増幅し, 船上に送信するシグナルモード, バッテリーに船上から充電するチャージモード, 同調コンデンサの切り替え(0.001~0.399μFまで0.001μF刻み), 励磁電流(2.5A)のON-OFFするコントロールモード等を船上のマイコンの指令により制御する機能を持つ。

### (3) バッテリー

ソルジュール製の容器にNiCd 19.2V 10AH電池を収納

### (4) ケーブル

ケブラー強化ケーブル(250m, 500m, 750m), 現在はステンレス線鋼強化ケーブル(250m, 550m, 550m)

### (5) タイマー

マイコン指令等のシステム制御のための時刻信号

### (6) カウンタ部

ユニバーサルカウンタ(VP-4546A ナショナル製)と光信号/電気信号変換器より構成され, 光信号に変換されたプロトン信号を, 再度電気信号に変換し, 1000波分の周期時間を1μsecの分解能で計測し, インターフェースを中継してマイコンに出力する。

### (7) インターフェース(A), (B)

(A)マイコン指令の入出力信号を伝送するとともに, D/Aコンバーターを3cH持ちアナログレコーダに出力, (B)バッテリー充電電源の中継及びアンプとコントロール部からのプロトン信号をフィルタ・アンプ回路を通した後, 光信号に変換しカウンタ部に送信する。

### (8) マイクロコンピュータ部

TEAC PS-80 (RAM48K, 8BIT×8cH)

RS-232C (2ポート), CMT (2台), CRT, キーボード

### (9) ソフトウェア (BASIC)

システム制御プログラム, CMTデータ再生プログラム

### (10) その他

デジタルプリンタ, アナログレコーダ, 充電内電源, モニター用オシロスコープ

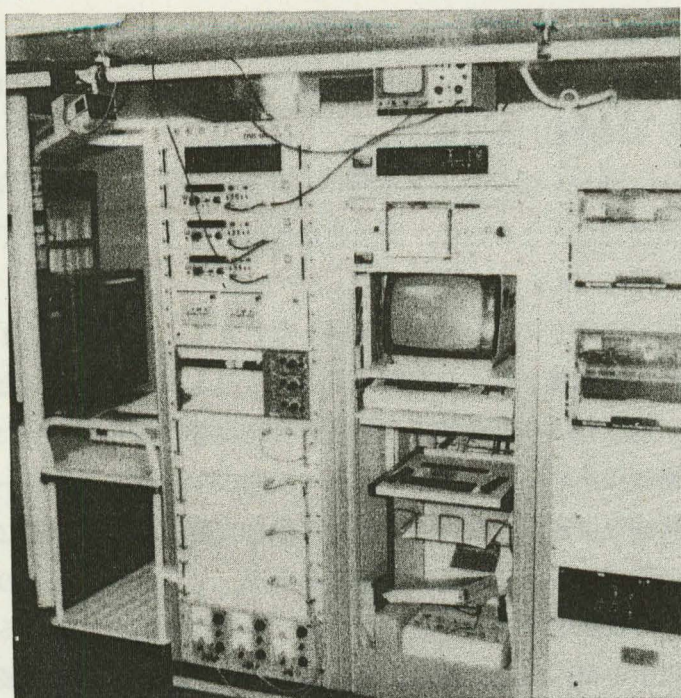


写真2. 3センサー型プロトン磁力計制御部



### 3. これまでのトラブル

本機は昭和58年8月の公式試運転時に初めて作動させた。9月の機器テストの一環として、船体磁気を測定するため、3センサ(250m, 500m, 750m)を曳航して、8方位測定(基点を360度を8分割した方位により8回通過)を実施した。

各センサからのプロトン信号は、非常にS/N比の良好な信号が得られた。資料整理後の結果、測定区域の磁気傾差が大きいため、交点の比較値のばらつきが大きく、期待された船体磁気等の影響を把握出来ないとの事であった。

これらのデータの詳細を見る間もないまま、10月から第1回の大陸棚調査が始まり、本機による初の海上磁気測定が実施された。曳航系3本のうち1本は、アンプとコントロール部の作動不良のため使用不能であった。残りの2本は最初のうちS/N比良好の信号であったが、次第に不良となり5日目には信号0となった。揚収点検の結果、アンプとセンサ間の中継器からのシーアース板が、ほとんどなくなっていたが信号回路の断線等は無かった。シーアース板を交換後も信号がこない状態なので、曳航時のテンションによるケーブルの断線が考えられた。正常であれば、シグナルモードの時のみ、センサまでの回路は導通状態となる。しかし、曳航中はアンプとコントロール部が接続されているため船上コネクタでの導通チェックも出来ず、それ以上の原因追究は帰投後に業者に委託する事とした。最後の1本も10日程して揚収してみると、ケーブルの内部銅線が伸びて細くなり柔軟性が無くなっていた。

帰投後の検査の結果、アンプとコントロール部の作動不良は、コントロール部内部のリレー回路の不良によるものであり、また、単に断線と考えていたケーブルは、センサ、アンプとコントロール部、及びバッテリー部の曳航張力の加わる側のケーブル接続部で、それぞれ断線し、また付近から1m程の間の銅線に屈曲・ねじれによる金属疲労が認められた。

この結果により、ケーブルは、10ノットの速力での使用に耐えられないことが判明したので、使用をしばらく見合わせ、ケーブルの強化等を検討する事とした。ちなみに、本船の大陸棚調査では、速力10ノット、風速15~18m、波浪5mでも調査を続行しており、かつ40日間の行動であれば、最低30日間程度は昼夜連続測定を実施するため、曳航する測定器にとり苛烈な条件といえよう。

昭和58年度末に、ステンレス鋼強化ケーブル(直径16mm日本大洋海底電線社製)を1500m購入し、同年8月に550m2本、250m1本に分断し、残りはセンサ・アンプ間用とし、計3組のプリアンプ曳航型センサとケーブルを製作した。750m長とせず550mを2本としたのは、ケーブル径が以前の10mmより太くなり、拓洋の多目的巻揚機のドラムに巻き取れないためである。

第4回大陸棚調査から、このタイプのケーブルで、3組のセンサ(アンプとバッテリーを含む)及びケーブルを交互に2組ずつ使用して、2センサで測定することとした。

測定データから、シーアースさえ完全であれば、S/N比の良いプロトン信号(6~7倍)が得られることが確認できた。このステンレス鋼強化ケーブルは、柔軟性に乏しく、中継器の接続時の作業や、センサ部の収納の際に取り扱いにくい事は否めないが、ねじれや伸びも無く、長期間の使用に耐え得る事が確認された。

第4回大陸棚調査の後半に入ったころ、揚収時にセンサを調べてみると、ケロシン漏れが生じていた。当時センサの構造図面が無く、船上で分解して原因究明することが出来ず、外側に防水テープを巻いた応急処理で調査を続行した。帰投後、調べてみると、センサ蓋部にそりが見られ、蓋部と本体間を止める非磁性であるテフロンネジ(センサ本体の重量は構造上全てこのネジにかかっている。)が折損していた。



1組はこのネジを交換し再度使用したが、10日程の連続使用で再び同じ状態となり内部に海水が混入するに至った。

1組のセンサには、ねじれ・動揺の防止、及びシーアンカー的な効果をねらい長さ10m、径30mmのロープをつけた。結果的には、この過程でセンサ部を細いロープで、格子状に固縛したためか、ネジは折損に至っていない。他の1組は海水が入って、分解までに日数もかかり、コイルの絶縁まで不良となった。業者と今までのトラブルの原因をもとに検討した結果、新しいセンサの容器として内部くりぬき型で、長期間の曳航に耐え得る物を試作することにした。

第2回WESTPAC調査(昭和60年2月)に、G E K Droop補正值校正のため、 $8^{\circ}\text{N}$ 、 $134^{\circ}\text{E}$ の磁気赤道付近で12方位測定を実施する計画があり、航走方法を少し変えれば(必ず1点を通過する形)船体磁気測定の航走法と同様となるので、プロトン磁力計も一緒に曳航する事を提案し、3センサ1組(500m)及びバリンジャー型磁力計により測定を実施した。

測定区域は磁気静穏域でもあり、精度評価及び船体磁気影響の検出を期待したが、3センサ型は、同調コンデンサの設定値の最大が $0.399\mu\text{F}$ であったため、この付近の低磁場で検出される周波数には完全な同調が取れず、S/N比の良くない信号しか得られなかった。しかも前述のとおり、センサ接続部に不安定な要素があるのでノイズも多かった。このため、ばらつきが大きく精度評価等を得るデータとはならなかった。Droop補正の計画の詳細を前もって知っていれば、それ相応の準備が出来たのに残念であった。

バリンジャー型磁力計は、ケーブルの絶縁不良(2度程サメにやられ傷ついている)のためか同様の結果であった。この調査のあとで点検してみると、やはり1組のセンサのネジが折れ、ケロシン漏れが生じていた。WESTPAC帰投後、早速修理に出したが海水が混入しており、コイルに腐食がみられ使用不能との事であった。

昭和60年4月の機器テスト前日に、センサの容器試作品が出来上がったので、機器テストの船体磁気測定に早速使用してみた。

機器テストは、地磁気異常の少ない御前埼沖 $34^{\circ}25'\text{N}$ 、 $137^{\circ}50'\text{E}$ を選んで実施した。測定方法としては、船尾よりケーブル長550m及び242mの長さの3センサを、10ノットの速力で曳航し、測定間隔1分として、550mのセンサが、1分後には242mのセンサと同一地点での測定となるように制御した(プログラムは250m間隔測定になっているため、ダミー速力8.1ノットを入力し1分間隔測定とした)。同時にバリンジャー型プロトン磁力計も比較データを得るために曳航(250m)した。

3センサ型は、モニタではS/N比が良好であり、単発的なノイズもほとんどないプロトン信号が得られていた。試作のセンサ容器はソルジュールくりぬき型であるため、揚収後点検してもケーブル接続部等に何等変化がみられず、長期間の使用に耐え得るものと思われた。

帰投後の整備期間を利用し、早速資料を整理してみた結果、8方位の測線は1方位につき2マイルなので1分間隔の測定値を12個採用出来るが、変針後の船首の安定性及び暫時磁気の影響を考慮して、8方位交差点を中心に、前後に各3個の測定値を採用し、同一針路に対するばらつきをみると、3センサ型では、2組とも $\pm 6\text{nT}$ (最大値)もあった。ちなみに同一条件で測定したバリンジャー型の値は、ノイズ(2,000Hz位のプロトン信号に近いものがランダムに乗り原因調査中)が大きく、S/N比も良くない状態にもかかわらず、 $\pm 2\text{nT}$ 程度の値であった。3センサ型はマイコンシステムのため、交差点で瞬間値を測定する事が難しいので前後の補間値により各8方位の値を比較してみたが、上記のようなばらつきがあり船体磁気の方角特性も得るには至らなかった。



バリンジャー型で比較した結果では、船体中心から300 mで第1図のような結果が得られ、 $\pm 5$  nT (最大値) 程度の影響を受けるようである。後日、3 センサ型が安定した値を得られるようになれば、ケーブル長の異なるセンサにより比較して、各方向特性の影響が測定出来るはずである。3 センサ型のばらつきの原因究明のため、大陸棚調査室に第1回及び4、5回の調査における2センサの記録がとれている、夜間の地磁気変化(静穏時)のデータ検討を依頼した。比較検討の結果、全てのデータに5~6 nTのばらつきがみられ、時には10 nT以上の時もあった。このことから測定値の大きなばらつきは、ケーブル交換によって生じた現象ではなく測定方式の問題である事が推定された。

これまではアナログ記録のスケールが1,000 nT/20 cmであったことや、各機器のトラブルの続出により、船上でのモニタ信号と比較して、ノイズ関係等の説明が十分出来なかった。

昭和60年5月からの第6回大陸棚調査ではこれらの事をふまえ、重点的にばらつきの原因究明に努めた。これによりわかった事は次のとおりである。

- カウンタ内部発振の基準信号を使用すると、測定値に $\pm 6$  nTのばらつきがみられる(以前の使用状態)。外部基準信号として1 MHzをセシウム周波数標準器(確度 $7 \times 10^{-12}$ )からラインを引いて入力すると測定値のばらつきは $\pm 1$  nT程度になる事から内部基準信号は信号自体が不安定であることが分った。水晶の温度特性等に問題があるうか。

- カウンタ内部発振の1 MHz基準信号は、周期測定の場合タイムベースが $0.1 \mu\text{s}$ なので、分解能は上がるが、システムプログラム上、MULTIスイッチ $\times 100$ の位置で測定しており、プロトン信号を100波分しか計測していないことになる。

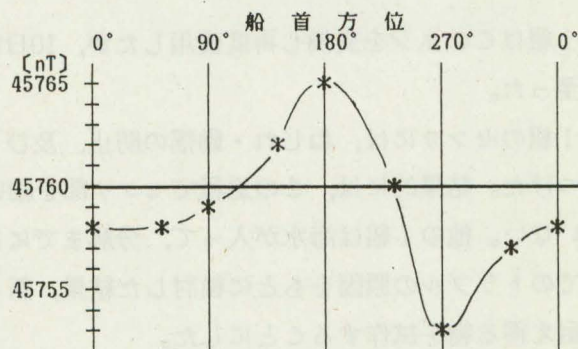
- 外部基準信号の場合はタイムベース $1 \mu\text{s}$ なのでMULTIスイッチ $\times 1$  Kでプロトン信号を1,000波分測ることになり、本来の仕様となる。

- 測定信号にノイズが乗ると全磁力値40,000 nTの場合40 nTの倍数で測定値にミスカウントが出る。このミスカウント値は補正可能である。これは周期測定の場合1,000波分の周期の中に入るノイズをN個カウントすると正規の信号を1,000 - N波分しかカウントしないためである。プロトン磁力計の原理から全磁力Fはプロトンの歳差運動の周波数fを測定することにより、回転磁気率rの関係式から求められた $F = 23.4874 f$ から算出している。本機のカウンタは、周期測定しているので $F = 23.4874 / \text{カウント値 (s)}$ となる。故に、ミス測定値を1,000 - Nの逆数で割れば良い。

- 同調コンデンサの値をこまめに変えてやる必要がある。0.01  $\mu\text{F}$ のずれがあると、ミスカウントの比率が多くなる。

#### 4. 今後の課題

(1) 早期に試作品と同等のセンサを購入して、3組又は2組の連続測定が可能な状態として、データの相互比較を行い、最終的に日変化検出まで出来るようなソフトウェアを開発する。



第1図 「拓洋」船体磁気測定結果  
(バリンジャー型プロトン磁力計による。)  
S 60. 4. 14 実施  
34° 25'.0N 137° 50'.0E  
船体中心からセンサーまでの距離約300 m



(2) 3組のカウンタに外部基準信号として、セシウム周波数標準器よりラインを導き分岐する。1 MHzの信号なので、単に分岐するだけで良いと思われる。分岐テストの結果もシンクロスコープでは電圧降下等は起きていない。

(3) 同調コンデンサの値は、測定値から自動的に判断し、0.001～0.005  $\mu\text{F}$ まで自動変換するよう改良する必要がある。

(4) サメによるケーブルの被害が多いので、対策を検討する必要がある。

(5) 現在のケーブルでは径が太いため、多目的巻揚機に最大600 m程度しか巻けないので、800 m程度巻けるドラム容量の大きい巻揚機に改造する必要がある。

(6) 新に、ケーブルの径が細くても、現在のステンレス鋼と同程度の強度を持ち、かつ柔軟性のあるケーブルの導入を図る。曳航時のねじれと相関があると思われるので十分検討する必要がある。

(7) アンプとコントロール部及びバッテリー部の小型軽量流線化を図り、投入・揚収時の作業を容易にし、また流体抵抗を軽減する。

(8) アンプとコントローラの電源スイッチは、バッテリーとの水中中継器を繋ぐことによってスイッチングするが、システムがチャージモードやシグナルモードの時、船上のコネクタ等のラインを外すとコントローラが誤動作してロックし、マイクロプロセッサ制御が利かなくなることがある。この時は、この中継器を外して2～3分してから再度繋げば、電源リセットされ正常となる。しかし、この水中中継器はケーブルの先端部に付いているのであるから当然ケーブルを揚収しなければならない。将来船上での電源リセットが可能のように改造の必要がある。

## 5. 追 記

本船就役以来、曳航物はサメによると思われる裂傷被害が、12cHストリーマケーブル1回、1cHストリーマケーブル1回、バリンジャー型プロトン磁力計ケーブル3回、3センサ型同ケーブル2回（写真3）と続出し、3センサ型のセンサ部（直径20cm、長さ40cm）が噛みつかれたときは、数ヶ所に長さ10cm、深さ7mm程度の咬傷ができ、その中にサメの歯のかけらが発見されたほどであった。

サメの咬害対策について、大陸棚調査室桂主任官の尽力により、板ザメ類の生態のシンポジウム資料や、内外のサメ研究者（東大・水産科・谷内氏、マイアミ大 グルーバー氏等）の意見をいただいたが、化学的、

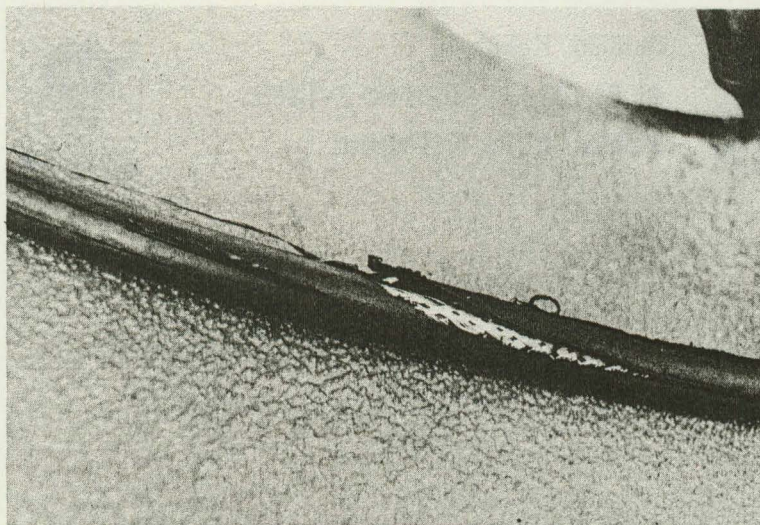


写真3. サメによる咬傷（曳航ケーブル）

機械的、電気的な面からの検討はかなりされているが、今のところ有効な手段が無いのが現状であるとの事であった。なお、プロトン磁力計センサに噛みついたサメは、歯の鑑定の結果、海洋の表面近くに多い青ザメと判明した。（今でもこの歯は、大陸棚調査室で保存されている）



## 6. おわりに

この原稿を提出直前の昭和60年9月30日に、試作と同品質のセンサ部が3組納入され、現在第7回大陸棚調査で、使用を始めたところである。モニター状況をみるとS/N比が大きく、今まで筆者が見た中で、最高のプロトン信号が得られており、カウント値も期待された精度1 nT内と見受けられ、今後の資料整理により、日変化補正や、正確な船体磁気の算出、補正が期待される。しかし、連続2週間使用したところ、センサ部とアンプを繋ぐ水中中継器や、同時に購入した600 mの曳航ケーブルとバッテリー間の水中中継器に、海水が入る事故が出始めた。これは新旧の接点部の形状が、若干違うためである。帰投後、補償修理でオリング部の改造を指示している。

なお、今までの経験から、曳航系（センサ、アンプ、バッテリー）の接続、投入、揚収にはかなりの時間と慎重さを要すことから、不慮のトラブルや無駄な労力を避けるためにも現場到着前に曳航系を全て接続し、船上で作動テストを続けながらシグナルモードにおけるノイズ状態をみて、接続ラインの接触抵抗や絶縁のチェック、チャージモードにおけるアンプとコントローラのリレー作動（メータによる充電電流の有無）等の確認に努める事が肝要である。

搭載以来2年間に多くのトラブルがあり改造を重ねた結果、本装置は漸く本来の機能を発揮できる見通しがついてきた。最後に、これまで本磁力計の導入や製作、テスト改良に当たって来た方々に敬意を表すると共に、拓洋搭載後、数々のトラブル、試行に御協力いただいた水路部関係各位並びに拓洋乗組員、調査員の方々、及び測定値のばらつき等の検討をしていただいた、大陸棚調査室小山官の熱意に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

友田好文・藤本博己：測地学会誌第26巻1号 59～65 ページ

## 報 告 者 紹 介



Shoichi Kokuta

穀田 昇一 昭和61年3月現在、  
測量船「拓洋」首席観測士



Masakazu Hayashida

林田 政和 昭和61年3月現在、  
測量船「拓洋」三席観測士