

白嶺丸における地磁気三成分測定の実状と問題点

森尻理恵* 山崎俊嗣**

MORIJI Rie and YAMAZAKI Toshitsugu (1997) The Present state of Vector Geomagnetic Anomaly Measurement on the R/V Hakurei-Marui. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 48 (2), p. 65-77, 18 figs., 2tables

Abstract: The invention and development of the Shipboard Three Component Magnetometer (STCM) has successfully provided geomagnetic field vector data from many areas of the oceans. However, the STCM suffers from several types of noise problems. Here we present 2 cases of marine geomagnetic vector anomaly measurement from cruises of the R/V Hakurei-marui. The viscous remanent magnetization of the ship has a more serious influence on the 12 constants of the ship's induced and permanent magnetic moment than that of the ship's attitude data. The intensity of spatial differential vectors (ISDV) exhibits a peak at the boundary of magnetic structures. Compared with the gradient of total intensity anomalies, the difference from the ISDV peak pattern gives an estimate of the direction of the magnetization.

要 旨

船上地磁気三成分磁力計の開発により、多くの海域で地磁気三成分異常が測定された。しかし、現在のシステムでは船体磁気補正が不十分なため、地磁気三成分の絶対値は使用せず、相対変化値のみを解析に用いている。船上地磁気三成分のデータ誤差は様々な要因が複合して生じているので、本報告では白嶺丸で実際に取得したGH91航海とNH92-1航海のデータについて検討し、船上地磁気三成分測定の実状と問題点を整理した。その結果、船体磁気補正を行うための12個の係数が正しく決まらない原因は、船首方位や船体の姿勢の測定誤差の影響だけでなく、航海中に船体が獲得する粘性残留磁化の影響がかなり大きいことが分かった。

また、絶対値が使用できなくても、地磁気三成分異常の相対変化値の空間微分と全磁力異常の空間微分のプロファイルと比較することによってある程度の磁化方向の情報が得られることも示した。

1. はじめに

海上における地磁気三成分測定は、神戸大学グループによって1970年代の終わり頃より精力的にシステムが開発されてきた (Isezaki, 1986)。現在は東京大学海洋研究所、極地研究所、海洋科学技術センターなどが船上地磁気三成分磁力計 (STCM; Shipboard Three Component Magnetometer) を調査船に導入し、さまざまな研究プログラムにおいて地磁気三成分の観測を行い、海底の構造発達史の研究等に成果をあげている。地質調

査所でも1990年以降は、白嶺丸の地学的な研究航海では通常ルーチン的に船上地磁気三成分測定を行っている。地磁気三成分異常が分かれば、少ない測線から磁化の方向や磁気的境界の位置の情報を得ることができ、地殻構造やそのテクトニクスを考える上で有用なデータとなる (例えば Yamazaki *et al.*, 1994)。

しかし、観測事例が増えるにしたがい現在の測定システムにおける問題点も明らかになってきた。そこには白嶺丸固有のものもあるが、大部分は他グループと共通の問題になっている。例えば、STCMの開発当初から、得られた地磁気三成分値から計算された全磁力値とプロトン磁力計で同時に測定された全磁力値の間では、プロファイルの形は一致するが、数値そのものは最大数百nTの差がある場合のあることが指摘されていた (Isezaki, 1986)。その原因として常々船体の向きや姿勢の計測精度が問題になってきた。船によっては高精度のジャイロコンパスを搭載し、データの質を向上させているものの、根本的な解決には至っていない。そのため、今のところは地磁気三成分の絶対値は利用せずに、信頼度の高い相対変化値のみを用いる研究が多く行なわれている (例えば Seama *et al.*, 1993)。

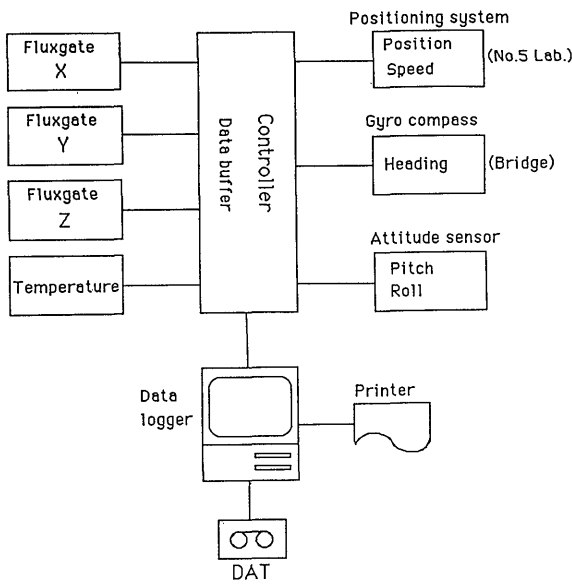
しかしながら、地磁気三成分の絶対値は磁気的構造、並びにその海域のテクトニクスを理解するためには必要な情報である。そのためにも、船体磁気補正の問題を整理しておくことはシステムを改良するうえで重要である。

本報告では、白嶺丸の1991年の秋田沖航海 (GH91) ならびに1992年と1993年の太平洋東経175度線上赤道付

*地殻物理部 (Geophysics Department, GSJ)

**海洋地質部 (Marine Geology Department, GSJ)

Keywords: Vector geomagnetic anomaly, Shipboard Three Component Magnetometer, Hakurei-marui



第1図 船上地磁気三成分磁力計のシステム構成図。
Yamazaki, et al., (1994)より引用。

Fig. 1 Block diagram of a three component magnetometer system equipped on-board the R/V Hakurei-maru.
After Yamazaki et al, (1994)

近 (NH92-1, NH93-1) における航海で取得されたデータ (森尻・山崎, 1992; 森尻, 1993; 森尻・山崎, 1994) を用いて, 現システムの問題点を検討していく。

2. 白嶺丸における船上地磁気三成分磁力計システム

白嶺丸に搭載されている船上地磁気三成分磁力計システム (テラテクニカ社SFG1211) はFig. 1に示す構成である。磁気センサーは, 互いに直交した3軸のリングコア型フラックスゲートセンサーを用い, 上部甲板に設

けた高さ 2 mの支柱上のアルミ製ドーム内に, それぞれ船首方位 (h), 右舷 (s), センサードームの水平面に対する鉛直下方 (v) の地磁気三成分を測定するように設置されている。またドーム内には温度センサーも設置されている。

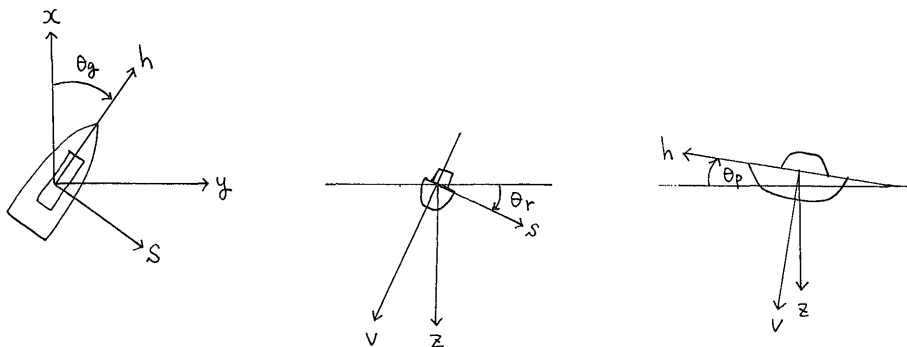
コントロール部は16ビットのA/D変換器を持ち (分解能3nT/LSB), 8 Hzでサンプリングする。船首方位は, 白嶺丸のブリッジ搭載のジャイロコンパス (横河ナビテックCMZ300X; 追従精度0.1°) よりコントロール部に取り込み (ジャイロコンパスの緯度補正, 速度補正済み), ピッチとロールのデータは船内の研究室の床に設置した水平姿勢計 (多摩川精器TA7175N2; 公称分解能0.01°, 検出角度範囲20°) より取り込んでいる。これらも 8 Hzでサンプリングされる。位置及び船速は, GPS・LORAN-C・NNSS 複合測位システム (Magnavox Series 5000) の毎秒値を取り込んでいる。そして, 時刻データはデータ収録に用いているパソコンの内蔵時計を利用している。8 Hzサンプリングしたデータをワークステーションへ転送し, そこで1秒平均値を計算し解析に用いている。

3. 船体磁気補正

船上地磁気三成分磁力計 (STCM) によって船上で観測される磁場 (H_{ob}) には船体磁気の影響が含まれている。今, 船体磁気は船体の誘導磁化係数を表す 3×3 の行列Aと永久磁化を表すベクトル H_p で表現されれば, 船上で観測される磁場 (H_{ob}) とその地点の地球磁場 (F) との関係は次のように表現される (Isezaki, 1986)。

$$H_{ob} = ARPYF + H_p \tag{1}$$

観測測磁場 (H_{ob}) は, 船上座標の船首方位 (h), 右舷 (s), 磁気センサーの水平面に対する鉛直下方 (v) の右手系直交三成分で得られているので, 船体のピッチ (θ_p), ロール (θ_r), 船首方位 (θ_g) を用いて,



第2図 地球座標 (x, y, z) と船上座標 (h, s, v) の関係。
 $\theta_g, \theta_p, \theta_r$ は, 船首方位角, ピッチ, ロール角を示す。

Fig. 2 The fixed earth coordinate system (x, y, z) and the fixed ship coordinate system (h, s, v).
 θ_g, θ_p and θ_r are yaw, pitch and roll angles, respectively.

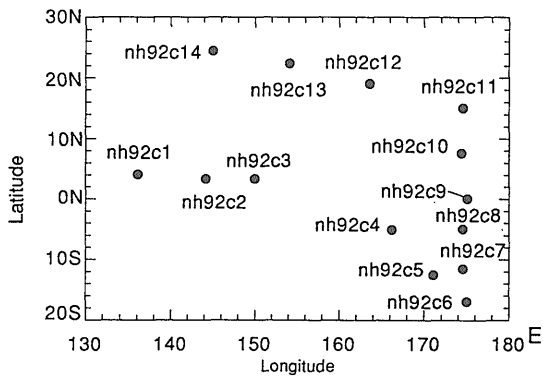
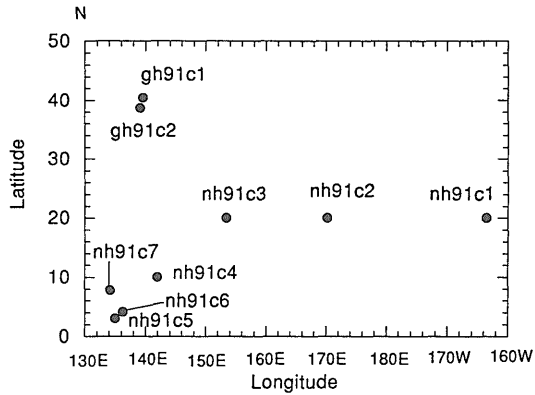
地球座標の地理的北 (x), 東 (y), 鉛直下方 (z) の右手系直交三成分の地磁気三成分に変換する (Fig. 2). ここで **R**, **P**, **Y** はそれぞれ船体のロール, ピッチ, 船首方位に対応する回転行列である. したがって, 船体磁気係数の **A** と **H_p** が得られれば, 船体のロール, ピッチ, 船首方位を測定することにより, 測定磁場 (**H_{ob}**) より地球磁場 (**F**) を分離できる.

船体磁化を表現する **A** と **H_p** の12個の係数は, 「8の字航走」と呼ばれている航走観測を行って決める. 具体的には, 360° の左回頭と右回頭の航走観測を1回ずつ行い, 式(1)の **F** を既知として測定された **R**, **P**, **Y**, **H_{ob}** から最小二乗法で求められる. 既知磁場 **F** は, 「8の字」の中心点の国際標準磁場 (IGRF: International Geomagnetic Reference Field; IAGA Division V, Working Group 8, 1991) の値で代用されることが多い.

4. 船体磁気係数の算出の問題

4.1 算出方法と現状

白嶺丸では船体磁気係数 (式(1)の **A** 及び **H_p**) を求め



第3図 船体磁気補正に用いた「8の字航走」を行った位置.

(a) GH91航海ではここでは先行したNH91-1航海のデータも使用した. (b) NH92-1航海, 「8の字航走」は番号順に行なわれた.

Fig. 3 Location of 'figure 8', showing ship's steerings during cruise.

(a) GH91 and NH91-1, (b) NH92-1.

るための「8の字航走」は, 角速度がなるべく一定になるように左回頭と右回頭を360°ずつ1回行い, 半径約750mの円2つを速度約18.5km/h (10kt) で航走している. ここでは, 船体磁気係数は航海中は一定であると仮定する. また, 「8の字航走」では, 船体はほぼ水平面上を回転するので, 地磁気鉛直成分 (**v**) にかかる係数を決定するためには, 地磁気_z成分の大きさの異なるところで複数回の「8の字航走」を行なう必要がある (Isezaki, 1986). 「8の字航走」を行なう回数の判断は, 白嶺丸の場合, 船上で1回分ずつデータを足して **A** と **H_p** を求め, だいたい似たような値になってきたら止める, という方法がとられているが, 経験的に最低4回は必要であることが多い.

実際の船体磁気係数の計算には, 8H₂サンプリングの生データではなく1秒平均値を使用し, 式(1)の既知磁場 **F** = (F_x, F_y, F_z) は, 「8の字」の中心点のIGRFの値を用いる. 既知磁場 **F** は磁場と同時に観測される船体のピッチ, ロール, 船首方位に対応する回転行列 **R**, **P**, **Y** を用いて, (x, y, z) の地球座標から (h, s, v) の船上座標へ座標変換を行なう (**F_{hsv}** = **RPYF_{xyz}**). 各成分は独立であるから, 観測磁場 **H_{ob}** = (H_h, H_s, H_v) は, 誘導磁化を表わす 3 × 3 の行列 **A** = (a_{ij}) と, 永久磁化ベクトル **H_p** = (H_{ph}, H_{ps}, H_{pv}) を用いて式(1)を成分毎に書き直すと

$$H_h = a_{11} * F_h + a_{12} * F_s + a_{13} * F_v + H_{ph}$$

$$H_s = a_{21} * F_h + a_{22} * F_s + a_{23} * F_v + H_{ps}$$

第1表 GH91航海, NH91-1航海, NH92-1航海で求められた船体磁気係数.

Table. 1 12 constants of GH91, NH91-1, and NH92-1 cruises.

	GH91	NH91-1	NH92-1
a ₁₁	0.9957	0.9960	0.9925
a ₁₂	-0.0224	-0.0227	-0.0122
a ₁₃	0.0848	0.0738	0.0723
a ₂₁	0.0130	0.0117	0.0020
a ₂₂	0.7297	0.7292	0.7276
a ₂₃	0.0048	0.0117	-0.0080
a ₃₁	0.0686	0.0669	0.0750
a ₃₂	-0.0146	-0.0129	-0.0234
a ₃₃	1.0373	1.0300	1.0478
H _{ph}	3912	3945	4086
H _{ps}	-5380	-5414	-3395
H _{pv}	1793	1754	2249

$$Hv_i = a_{31} * Fh_i + a_{32} * Fv_i + a_{23} * Fv_i + Hp_v$$

となる。ここで、複数回行なった「8の字航走」の全データをまとめて、成分毎に4つの係数を最小二乗法で解く。この解のうちv成分に係わる項 (a_{13} , a_{23} , a_{31} , a_{32} , a_{33}) と永久磁化ベクトル成分 (H_{ph} , H_{ps} , H_{pv}) は逆行列を解いたときの分散が他の項に比べて大きく、解が不安定になる。これは水平成分は十分変化しているのに対し、v成分の変化が大変小さいことによる。

白嶺丸のGH91航海では、Fig. 3aに示すように、「8の字航走」を行なったのはgh91c1とgh91c2の2点であるが、直前に行なわれたNH91-1の航海で行なわれた7回分の「8の字航走」データ (山崎, 1992) を加えて、船体磁気係数を計算した。また、NH92-1航海では「8の字航走」はnh92c1からnh92c14までFig. 3bに示した場所で行なわれた。これらのデータから求めた船体磁化係数をTable. 1に示す。

ところが、例えば「8の字航走」gh91c1のデータについて、Table. 1に示した12個の船体磁気係数を用いて、観測磁場の船体磁気補正值 ($F'_{hsv} = A^{-1}(H_{ob} - H_p)$) を計算したところ、初めに仮定した基準磁場 (F_{hsv}) との差はかなり大きく、数百nTになった。また、 $F' - F$ の値を成分毎に船首方位に対してプロットしたものをFig. 4に示したが、誤差は一定にはならず、船首方位と相関が見える。いずれにせよ、求めた12個の係数は正しく船体磁気を表現していないことが分かった。

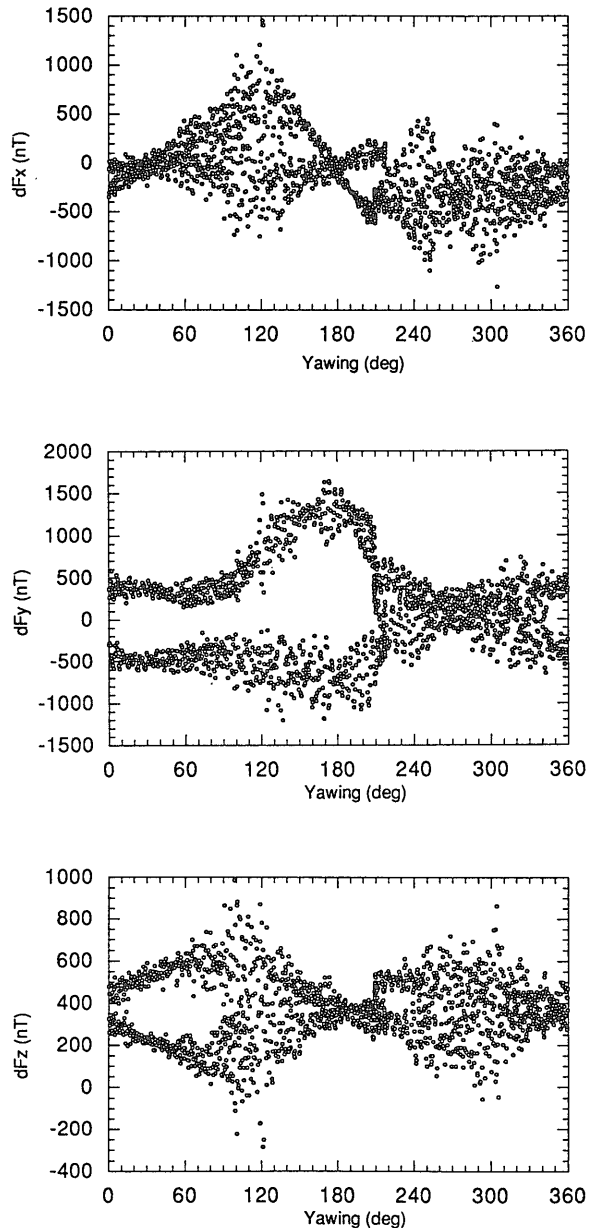
4.2 「8の字航走」の基準磁場との差に関する考察

前節で述べたように、「8の字航走」データから最小二乗法によって求めた船体磁気係数 (A , H_p) は、船体磁気を正しく表現していない。この誤差の原因については、(1)姿勢計測、(2)基準磁場の仮定、(3)粘性残留磁化、の3つがあげられる。実際にはそれぞれが複雑に関わり合っているものと考えているが順番に整理してみる。

4.2.1 姿勢計測

初めに、姿勢計測の問題については、Fig. 4にも示されるように、磁気値の誤差と船首方位に相関があることから、現実の姿勢と方位の測定データでは要求される精度を満たしていないと考えられてきた。Kitahara *et al.* (1993) では東京大学海洋研究所の白鳳丸の航海で「8の字航走」を行なったとき、船首方位、ピッチ、ロールを、白嶺丸と同等の通常仕様のジャイロコンパス (公称追従精度0.1°) で測定したデータと白鳳丸に搭載されている高精度のジャイロコンパス (公称追従精度0.01°) で測定したデータを両方使用して、測定した地磁気三成分値と解析に用いた基準磁場値との差を比較した。その結果、高精度のジャイロコンパスのデータを用いた場合は基準磁場Fと観測磁場の船体磁気補正值F'の差の値のばらつきがかなり小さいことを報告している。また、白嶺丸でも上嶋・駒澤 (1996) は北海道西方海域で行われたGH95航海において、船首方位を測定する

ジャイロコンパスは共通で、水平姿勢計を従来のもの (公称分解能0.01°) と高精度のもの (公称分解能0.0055°, データ更新20msec) をそれぞれ使用して北向き測線のデータについて比較したところ、船体の動揺と測定値の波形の相関が良くなったことを報告している。しかしながら、改善は見られても依然として船体磁気補正後の地磁気三成分値には大きな誤差が含まれている。

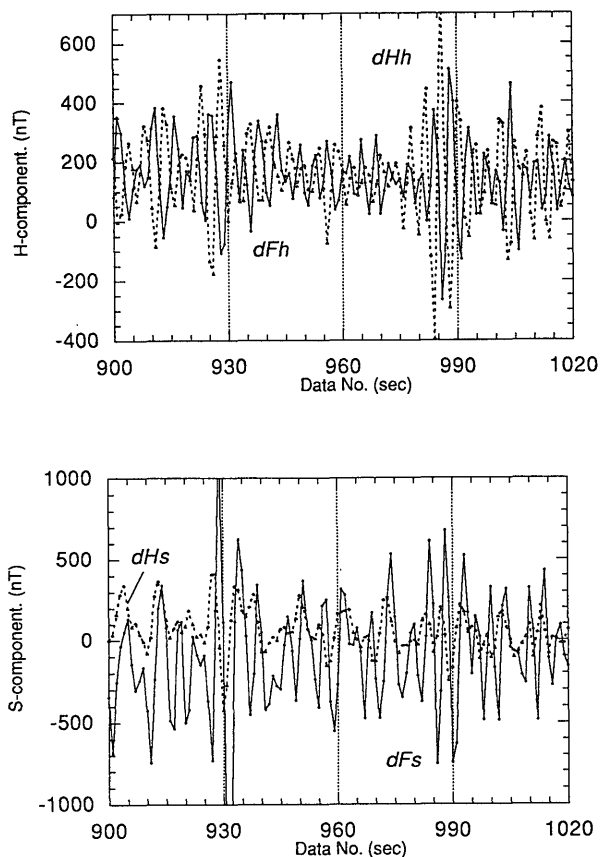


第4図 船体磁気補正後のGH91航海の1回目の8の字航走データと基準磁場との差。

横軸は船首方位、縦軸は磁場の差 (nT)。dFx, dFy, dFzは北、東、鉛直下方の成分を示す。

Fig. 4 Differences between IGRF and geomagnetic vector after 'figure 8' compensation.

Horizontal axis indicates yawing angle. dFx, dFy and dFz indicate north, east and down components, respectively.



第5図 GH91航海の1回目の「8の字航走」データについて、h成分(船首方向)とs成分(右舷方向)の実際データの1秒変化値(dHh, dHs)と姿勢の1秒変化によるh成分, s成分の磁場の変化(dFh, dFs)の比較。

Fig. 5 Comparison of the magnetic variation of measured field (dHh, dHs) with calculated field (dFh, dFs) by attitude of the ship.

「8の字航走」中の観測磁場(Hh, Hs, Hv)の変化は、外部磁場が一定という仮定のもとでは船体の姿勢の変化のみによる。そこでFig. 4と同様にgh91c1のデータを例に検討する。

まず、「8の字」の中心点のIGRFの値(Fx, Fy, Fz)を実際の姿勢のデータを使って船上座標(Fh, Fs, Fv)に変換する。ここでFhとFsの1秒変化値(dFh, dFs)と実際の磁場の測定値であるHhとHsの1秒変化値(dHh, dHs)を比較してみた(Fig. 5)。図では無作為に初めの左回頭から2分間のデータを示したが、所々位相が合わないことから、測定された船体の姿勢データは実際の船体の姿勢変化を正しく表現できていないと考えられる。白嶺丸ではサンプリング間隔は125msであるが、ジャイロ、水平姿勢計、磁気センサーの間で厳密な時刻の同期がとれていない。そのため例えば、船体のローリングが1秒間に2°動くとする、50

msecの時刻ずれは0.1°の姿勢誤差になってしまう。これは、Korenaga (1995)の見積りによれば、25,000 nTの磁場中ならば40nTの磁気値の誤差として現われる。しかも、船体の振動は数秒から数分の周期が混じっているため、結果的にノイズとの分離は難しく、理想的な係数を計算するのは困難である。

次に、姿勢の誤差の影響だけでどの程度の磁気値の誤差になるのか見積るために簡単な計算を行なった。具体的には、まず基準磁場Fo, 仮想船体磁気係数(Ao, Hpo), 「正しい」姿勢データの回転行列(RPY)を設定する。そして「正しい」姿勢データの回転行列(RPY), 基準磁場Fo, 並びに仮想船体磁気係数(Ao, Hpo)から仮想観測値Hob' = Ao(RPY)Fo + Hpoを計算する。ここでは、仮想的な「8の字航走」データを作ることになる。次に「誤差入り」姿勢データの回転行列(RPY)'を作るために、船首方位には-1°から1°の範囲の乱数、ピッチとロールには違う系列の-0.1°から0.1°までの乱数を加えた。白嶺丸の場合、経験的に船首方位の誤差は±1°には収まっていることが知られているので、これは実際の観測上の誤差と比べてやや大きい値である。さらに次に、仮想観測値Hob'と「誤差入り」姿勢データの回転行列(RPY)'を使っ

第2表 NH92-1航海で得られた14回の「8の字航走」のうち4回分ずつ解いた船体磁気係数。

A: 1+2+3+4, B: 7+8+9+10, c: 11+12+13+14, D: 1+6+11+14.

Table. 2 12 constants obtained from 4 'figure 8' ship's steerings of NH92-1 cruises.

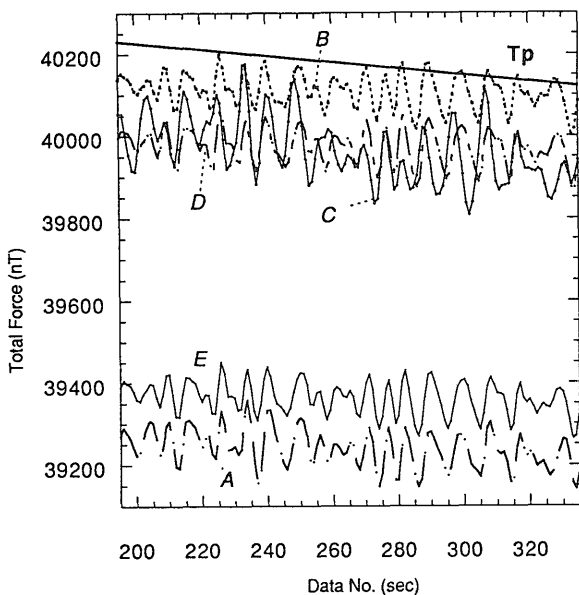
A: 1+2+3+4, B: 7+8+9+10, c: 11+12+13+14, D: 1+6+11+14.

	A	B	C	D
a11	0.9942	0.9931	0.9935	0.9906
a12	-0.0125	-0.0119	-0.0113	-0.0120
a13	0.0596	0.0776	0.0764	0.0750
a21	0.0036	0.0029	0.0017	0.0035
a22	0.7279	0.7296	0.7295	0.7266
a23	-0.0331	0.0084	-0.0666	-0.0000
a31	0.0728	0.0744	0.0737	0.0736
a32	-0.0228	-0.0239	-0.0245	-0.0243
a33	1.0557	1.0222	1.0253	1.0468
Hph	4189	3987	3990	4040
Hps	-3440	-3277	-2494	-3497
Hpv	2490	2112	2613	2397

て、最小二乗法によって船体磁気係数 (A, H_p) を計算した。さらに、ここで計算した船体磁気係数 (A, H_p) と「誤差入り」姿勢データの回転行列 (RPY) ' を使って仮想観測値 H_{ob}' の船体磁気補正值 ($F=A^{-1}(H_{ob}'-H_p)$) を計算した。この磁場 F と基準磁場 F_0 を比較すると、各成分毎の比較では数百nTの差があるが、全磁力にすれば、高々±20nTしか差が現われなかった (森尻・山崎, 1994)。ここから全磁力に変換した場合は、姿勢の誤差の影響はあまり大きく現われず、現実のデータに見られるような観測値の船体磁気補正值の「8の字航走」で設定する基準値に対する数百nTのばらつきは説明できないことが分かった。

4.2.2 基準磁場

原因(2)としてあげた基準磁場を「8の字」の中心点のIGRFの値を仮定している問題については、確かに実際の磁場はIGRFとは違うはずであるが、「8の字航走」を行った場所の磁気傾度が極端に高くないかぎり、式(1)の上で永久磁化ベクトル (H_p) に押しつけられるため、



第6図 NH92-1航海での「8の字航走」を4回分ずつ最小二乗法で解いた船体磁気係数を用いて、全磁力値を計算し比較した。

A : 1 + 2 + 3 + 4, B : 7 + 8 + 9 + 10, C : 11 + 12 + 13 + 14, D : 1 + 6 + 11 + 14, E : 全データ。Tpはプロトン磁力計で測定された全磁力値を示す。

Fig. 6 Differences between total force calculated from geomagnetic vector using 12 constants obtained from 4 'figure 8' ship's steerings. Sample data come from No. 7 'figure 8' ship's steerings.

Constants set, A is obtained from No. 1, No. 2, No. 3, and No. 4; B is from No. 7, No. 8, No. 9, and No. 10; C is from No. 11, No. 12, No. 13, and No. 14; D is from No. 1, No. 6, No. 11, and No. 14, and E is from all data. The straight line indicates the value observed by Proton Precession Magnetometer.

さほど深刻な影響は出ないことが分かった (森尻・山崎, 1994)。

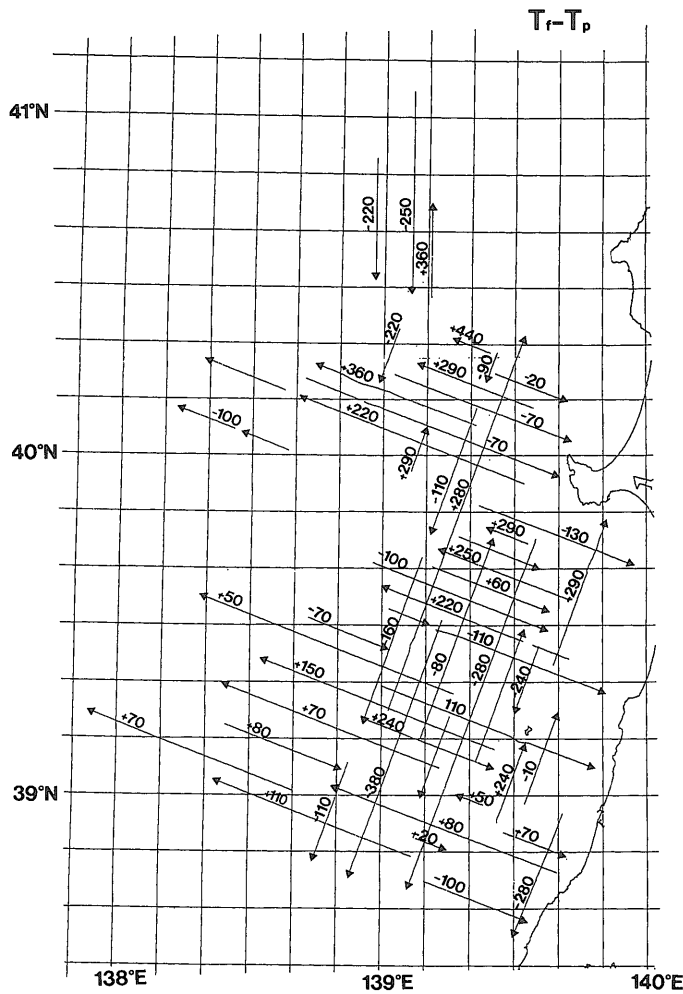
4.2.3 粘性残留磁化

原因(3)の粘性残留磁化の問題は、Yamazaki *et al.* (1994)で指摘されているように、現在、Isezaki (1986)にしたがって船体磁気の永久磁化成分は一定であるとして、式(1)を使って解析を行っているが、実際の船体は粘性残留磁化のような、式(1)では考慮されていない、船体磁化の時間変化の影響が大きいと予想される。磁化の時間変化の影響を見るために、NH92-1航海で合計14回行われた「8の字航走」のデータセットを、経験的に最低限必要とされている4回分ずつ組み合わせて4種類の船体磁気係数を計算した。各「8の字航走」の位置はFig. 2bに示してあるが、ほぼ番号順に観測は行われており、nh92c1とnh92c14の時間差は約42日ある。「8の字航走」の組み合わせは、A (nh92c1+nh92c2+nh92c3+nh92c4), B (nh92c7+nh92c8+nh92c9+nh92c10), C (nh92c11+nh92c12+nh92c13+nh92c14), D (nh92c1+nh92c6+nh92c11+nh92c14) とし、全データから求めた係数の組をEとする。具体的な係数はTable. 2に示したが、比較が簡単なように、この合計5組の係数を用いて、nh92c7が行われる直前に得られた北向き測線の観測値 (H_{ob}) から磁場 (F_x, F_y, F_z) を求め、全磁力値に変換して比較した (Fig. 6)。プロトン磁力計の測定値 (PPM) に最も近いのはBの係数を用いた場合で、これは計算に用いた「8の字航走」を行った場所と時間がサンプルデータと最も近い。逆に最も違いが大きいのはAで、ここではサンプルデータが取得される前に行われた「8の字航走」のみを使って係数が計算されている。これは、粘性残留磁化の獲得を考えれば、サンプルデータが測定された時の船体磁化がその前と大きく違っているためと解釈できる。Eはすべての「8の字航走」データを用いているので、Aに近く、Dはサンプルデータ取得後データの割合が高いためBに近いのであろう。そのため、前半の測定値にはAの係数を用いるのが良く、後半はBまたはCの係数を用いるとプロトン磁力計による全磁力値との差が小さくなるのかもしれない。この例から、船体の磁化は一定ではないために、航海中のいつ、どこで、「8の字航走」を行なうか、ということは船体磁気係数の計算に大きく影響することが分かる。しかしながら、粘性残留磁化の獲得についてはまだ何もわかっていないので、とりあえず対処療法として時間的にも位置的にも片寄りのないように、なるべく多く「8の字航走」を行なう努力が必要である。

5. 測線におけるプロトン磁力計との全磁力値差

このように船体磁気係数の誤差を生じる原因はいろいろと考えられるが、誤差を含んだままの船体磁気係数を使ってとにかく三成分値を計算し、プロトン磁力計で得られた全磁力値と比較検討する。

GH91航海で得られた測線について、測線毎にSTCM

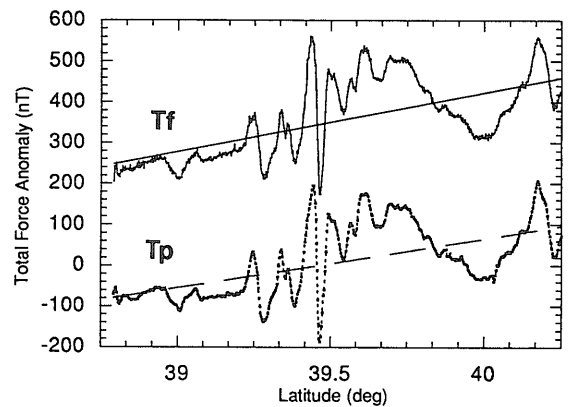
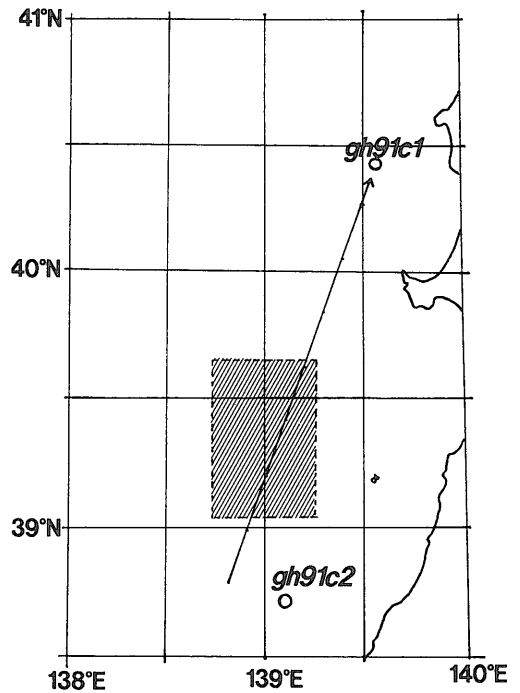


第7図 GH91航海で得られた測線ごとに、船上三成分磁力計による全磁力値 (Tf) とプロトン磁力計による全磁力値 (Tp) の差 (Tf-Tp) をとったもの。

Fig. 7 The differences between the total intensity calculated from the three component magnetic fields (Tf) and that measured by the proton precession magnetometer (Tp).

による全磁力値 (Tf) とプロトン磁力計による全磁力値 (Tp) の差 (Tf-Tp) の平均的な値をとるとFig. 7 のようになる。図には現われていないが実際の航海は航跡が複雑で、粘性残留磁化の獲得も複雑になると推察される。ここで用いた船体磁気係数は、ほとんど測線データが得られる前に行われた「8の字航走」データから計算されているため、新たに獲得した粘性残留磁化の影響は含まれていない。例外もあるが、Fig. 7を見る限り大きさはまちまちであるけれども、南、又は南南西の向きの測線と東南東の向きの測線は負、その逆は正の値をとるような傾向が見られ、磁力値の誤差は測線の方向と関係があることを示唆している。

Fig. 7ではTf-Tpは測線毎に平均的な値を示したが、



第8図 (a)北北東向きの測線t112の位置、「8の字航走」を行った地点、並びにハッチの部分はFig. 14で示した全磁力異常図の範囲を示す。(b)測線t112の三成分磁力計で測定された三成分異常から計算した全磁力異常 (Tf) とプロトン磁力計による全磁力異常 (Tp) を測線の緯度に対してプロットしたもの。

Fig. 8 (a) Location of line t112, whose direction is NNE, and 'figure 8' ship's steerings points. The hatched area indicates the location of the magnetic anomaly map for Fig. 14. (b) Comparison of Tf with Tp. Tf are the total force magnetic anomalies calculated by three component anomalies, and Tp are the anomalies obtained by the proton precession magnetometer. Horizontal axis indicates latitude data of the observed points.

実際は一定値になっていない。ここで、北北東向きの測線t112 (Fig. 8a) のプロトン磁力計による全磁力異常 (Tp) とSTCMで得られた地磁気三成分から計算した全磁力異常 (Tf) を横軸は測定点の緯度をとったプロファイルと比較した。TpとTfのプロファイルはリニアトレンド (緯度をx, 全磁力異常をyとした一次傾向) が違うほかは変化パターンが良く似ており (Fig. 8b), リニアトレンドを除去すればプロファイルはほぼ一致する。磁気値の差は船体磁気係数の誤差によってもたらされるから、船体磁気係数の誤差はTfとTpのリニアトレンドの差として現われている。

磁力値の誤差Fer = (Xer, Yer, Zer) は、具体的に書き表すと、式(1)より誘導磁化行列の誤差行列をdA = {daij}, 永久磁化ベクトルの誤差ベクトルをdHp = {dHph, dHps, dHpv} として、

$$Fer = - (RPY)^{-1} (A + dA)^{-1} (dARPYF + dHp)$$

と書くことができる (Seama *et al.*, 1990)。十分長い測線では、ピッチとロールの平均は十分小さいと考えられるので (RP) = I と近似する。そこで上式をθを船首方位として成分ごとにより書き直すと、

$$Xer = - (Ax * \sin\theta + Bx * \cos\theta + Cx + Dx * \sin 2\theta + Ex * \cos 2\theta) * Fx$$

$$Yer = - (Ay * \sin\theta + By * \cos\theta + Cy + Dy * \sin 2\theta + Ey * \cos 2\theta) * Fy$$

$$Zer = - (Az * \sin\theta + Bz * \cos\theta + Cz) * Fz$$

ここで hh = dHph/Fx, hs = dHps/Fy, hv = dHpv/Fz, Bij = (A + dA)⁻¹ij = (bij), dA1 = da11 + da12 + da13, dA2 = da21 + da22 + da23, dA3 = da31 + da32 + da33 とおくと、

$$Ax = - (b21 * hh + b22 * hs + b23 * hv + b23 * dA3)$$

$$Bx = (b11 * hh + b12 * hs + b13 * hv + b13 * dA3)$$

$$Cx = 0.5 * (dA1 * b11 + dA2 * b12 - dA2 * b21 + dA1 * b22)$$

$$Dx = 0.5 * (dA2 * b11 - dA1 * b12 - dA1 * b21 - dA2 * b22)$$

$$Ex = 0.5 * (dA1 * b11 + dA2 * b12 + dA2 * b21 - dA1 * b22)$$

$$Ay = (b11 * hh + b12 * hs + b13 * hv + b13 * dA3)$$

$$By = (b21 * hh + b22 * hs + b23 * hv + b23 * dA3)$$

$$Cy = 0.5 * (dA1 * b21 + dA2 * b22 + dA2 * b11 - dA1 * b12)$$

$$Dy = 0.5 * (dA2 * b11 - dA1 * b12 - dA1 * b21 - dA2 * b22)$$

$$Ey = 0.5 * (dA1 * b11 + dA2 * b21 + dA2 * b12 - dA1 * b22)$$

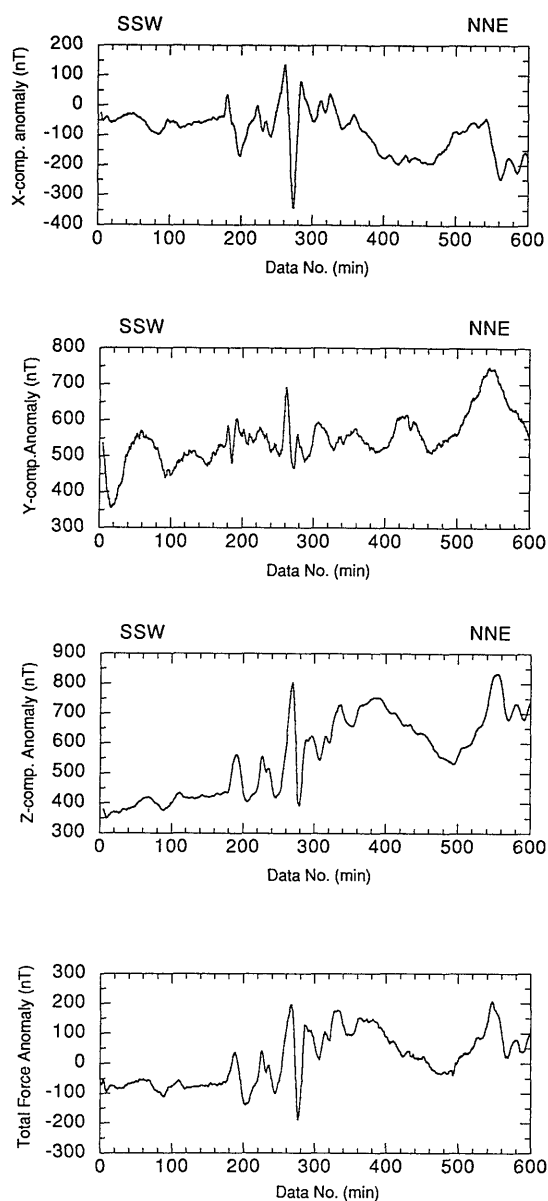
$$Az = (b31 * dA2 - b32 * dA1)$$

$$Bz = (b31 * dA1 + b32 * dA2)$$

$$Cz = b31 * hh + b32 * hs + b33 * hv + dA3 * b33$$

となる。

測線上では船首方位θはほぼ一定になると近似できるので、簡単のために北向き (0°) と南向き (180°) を

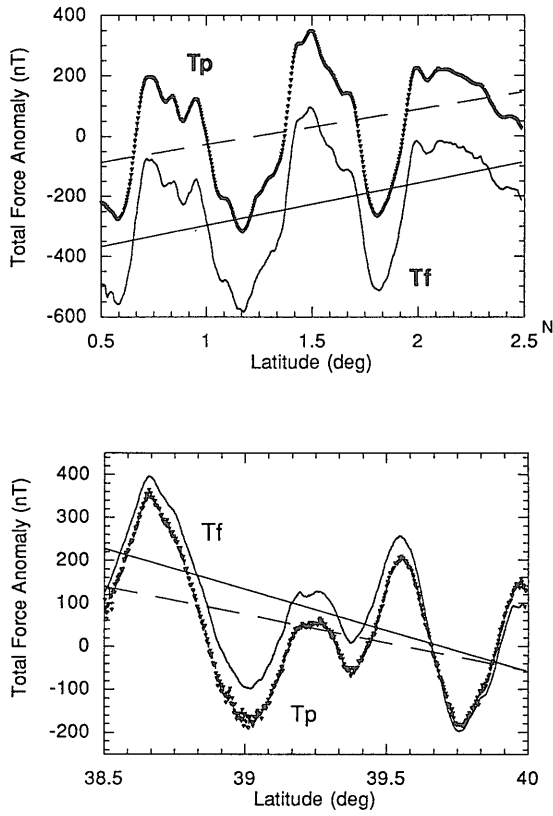


第9図 GH91航海で得られた測線t112 (Fig. 8a参照) の x, y, z 成分異常並びにプロトン磁力計による全磁力異常の1分平均値。横軸は時間。

Fig. 9 x-, y-, z-components and total force anomaly profiles, at 1 minute intervals along line t112.

考えると、係数はB, C, Eだけになり、かつ、極性が変わるのはBだけになる。そこで、Fig. 7に見られるように船首方位θによって誤差の極性が変わるためには、Bは他の項に比べて大きくならないといけない。

GH91航海で得られた具体的な誘導磁化行列Aと永久磁気ベクトルHpの計算結果はTable. 1に示した。逆行列を解いたときの分散を比べる限りでは、da11, da12, da21, da22は他の項に比べて小さい。上式よりdA1,

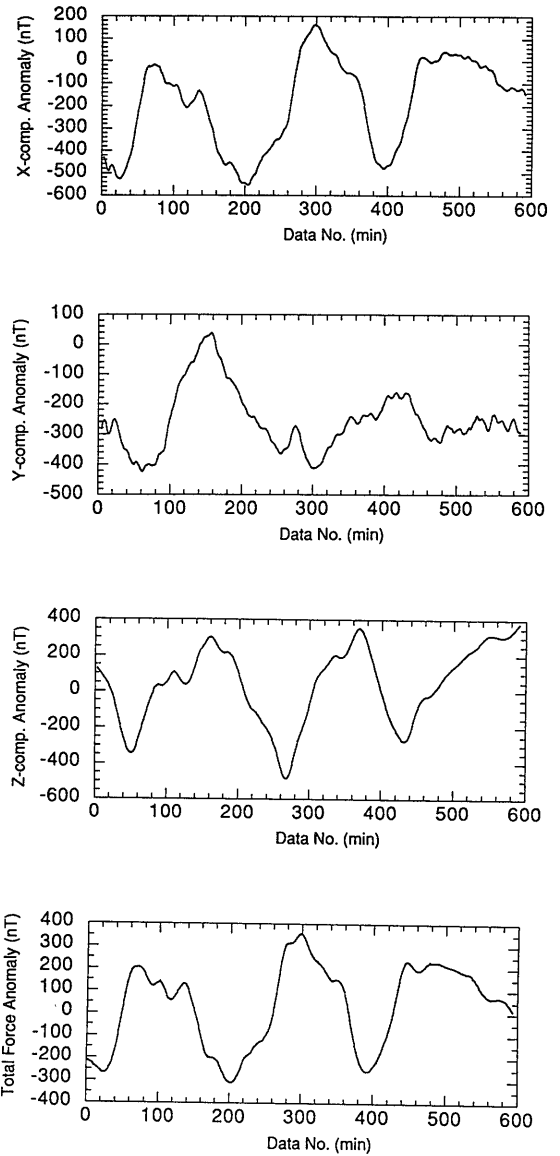


第10図 NH92-1 並びにNH93-1 航海で得られた175°Eに沿った北向き測線で、三成分磁力計で測定された三成分異常から計算した全磁力異常 (Tf) とプロトン磁力計による全磁力異常 (Tp) を測線の緯度に対してプロットしたもの。
(a)は0.5°Nから2.5°N, (b)は38.5°Nから40°N.

Fig. 10 Total force magnetic anomaly profiles along 175°E. Tf is the anomaly calculated by three component anomalies, and Tp is the anomaly obtained by proton precession magnetometer. Horizontal axis indicate latitude.
(a) 0.5° N-2.5°N, (b) 38.5° N-40°N.

dA_2 , b_{11} , b_{12} , b_{21} , b_{22} を 0 とすれば、最終的には、 X_{er} は dH_{pv} , Y_{er} は dH_{ps} , Z_{er} は $dH_{pv} + da_{33} * F_z$ が残り、これらの項が誤差に占める割合が高くなることになる。

上で述べた測線t112については、Fig. 8bに見られるように、船体磁気係数の誤差が Z_{er} のような一次式の形で近似できる。各測線の継続時間程度なら H_p は一定とみなせば、トレンドの傾きの差は da_{33} に相当する。また、測線t112のプロトン磁力計による全磁力異常値とSTCMによる地磁気三成分異常を比べるとz成分異常 (Fig. 9c) と全磁力異常 (Fig. 9d) のプロファイルの形がよく似ている。このことから、もともとz成分は「8の字航走」の性質から誤差が大きいうえに、中緯度



第11図 175°Eに沿って0°30'Nから2°30'Nまでの北向き測線プロファイル。
横軸は時間。(a)x成分異常, (b)y成分異常, (c)z成分異常, (d)プロトン磁力計による全磁力異常。

Fig. 11 Magnetic anomaly profiles along 175°E, from 0°30'N to 2°30'N.
(a) x-component, (b) y-component, (c) z-component, and (d) total force magnetic anomaly measured by proton precession magnetometer. Horizontal axis indicates time.

地域では、地磁気のz成分は他の成分よりも大きくなるので、z成分の誤差の影響が全磁力異常の誤差に占める割合が大きくなったと考えられる。

一方、他の海域で同様の比較を行うために、今度はNH92-1航海で得られた175°Eに沿った北向き測線について、プロトン磁力計による全磁力異常 (Tp) とSTCMで得られた地磁気三成分から計算した全磁力異

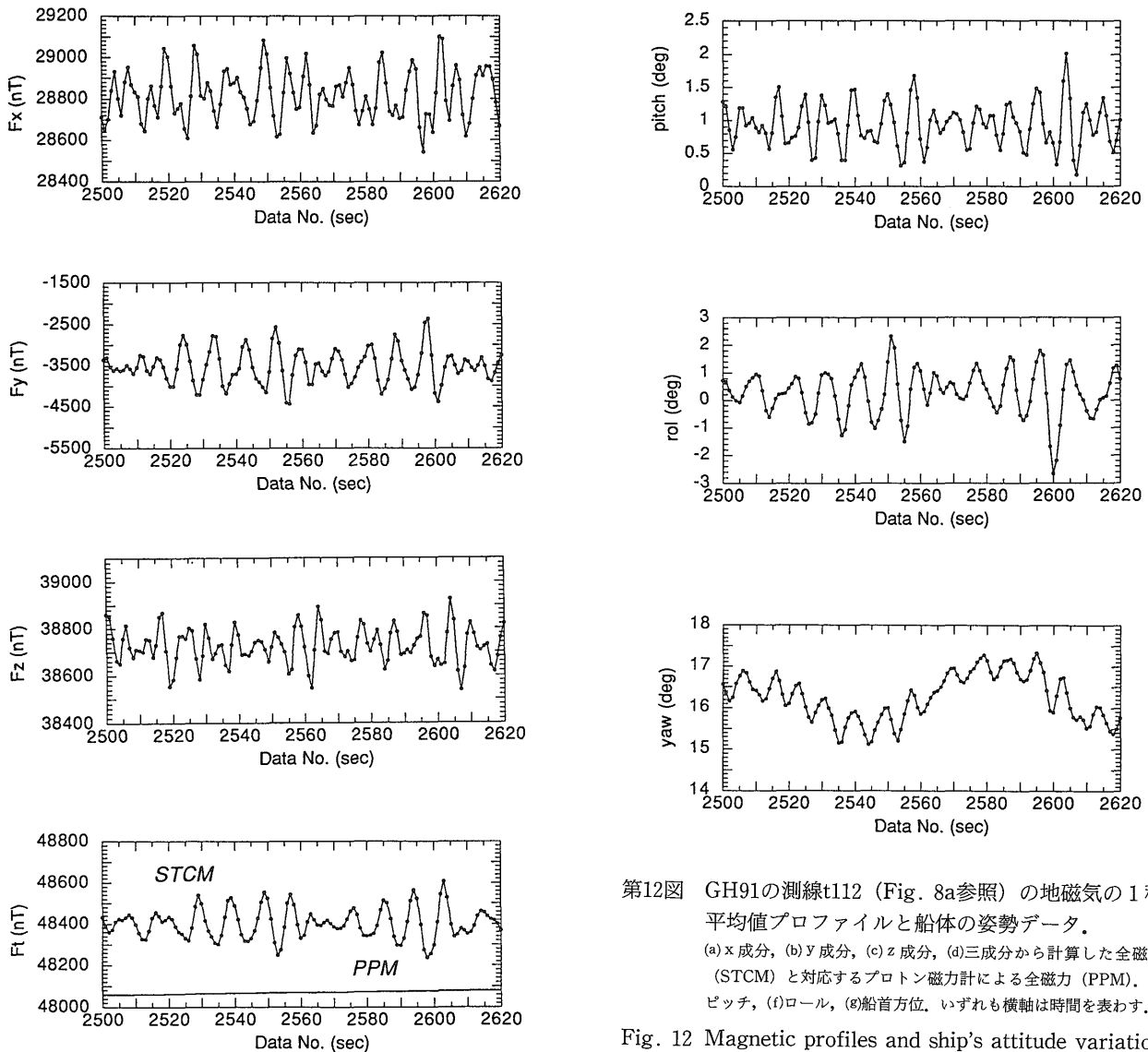
常 (Tf) を緯度を横軸にとったプロファイルで比べた。その結果、0°30'Nから2°30'Nまでの低緯度地域については、Tf-Tpの値がほぼ一定になり、38°30'Nから40°Nまでの範囲については、リニアトレンドの傾きが違ってくることが分かった (Fig. 10)。これは低緯度地域では、z成分が小さくなるので、Fig. 11に示すように、x成分異常のプロファイルがプロトン磁力計による全磁力異常によく似ている。そのため、x成分異常の誤差であるdHphの影響が大きくなる。これが、中緯度地域になるとz成分異常の誤差であるdHpv+da₃₃*Fzの影響が大きくなるので、誤差はリニアトレンドになると考えられる。

6. 磁氣的境界の推定

前節までに繰り返し述べてきたように船体磁気係数の精密な決定は大変難しい。ただし、全磁力異常では誤差がリニアトレンドとなって現われることから、相対変化値ならば、信頼できると考えてよい。そこでSeama, *et al.* (1993)では、地磁気三成分の相対変化を利用する磁気異常の空間微分 (ISDV: Intensity of Spatial Differential Vectors) を導入した。これは、船の進行方向の距離をpとして、

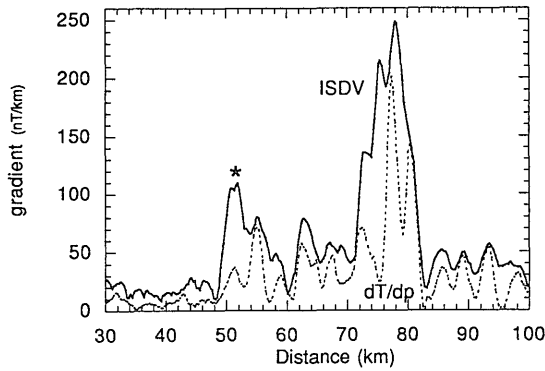
$$ISDV = \{(\partial F_x / \partial p)^2 + (\partial F_y / \partial p)^2 + (\partial F_z / \partial p)^2\}^{1/2} \quad (2)$$

となる。空間微分では短波長変動が強調される傾向があるので、通常スレッショルドレベルを適当に設定して磁



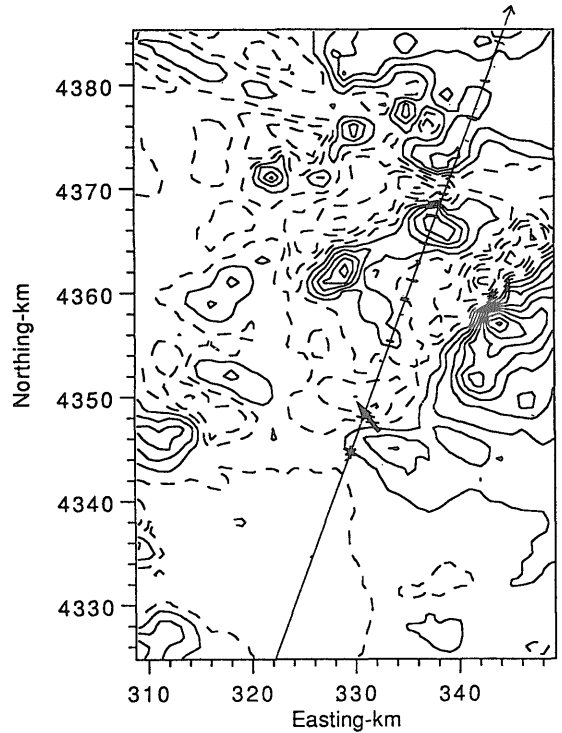
第12図 GH91の測線t112 (Fig. 8a参照) の地磁気の1秒平均値プロファイルと船体の姿勢データ。
(a) x成分, (b) y成分, (c) z成分, (d)三成分から計算した全磁力 (STCM) と対応するプロトン磁力計による全磁力 (PPM), (e) ピッチ, (f) ロール, (g) 船首方位。いずれも横軸は時間を表す。

Fig. 12 Magnetic profiles and ship's attitude variation at 1 sec intervals along line t112.
(a) x-component, (b) y-component, (c) z-component, (d) total force calculated by three components, (e) pitching, (f) rolling, (g) yawing.



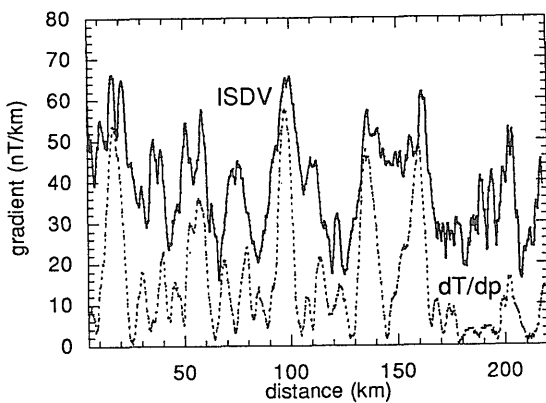
第13図 GH91の測線t112について三成分異常値の空間微分 (ISDV) とプロトン磁力計による全磁力異常の空間微分 (dT/dp) プロファイルの比較。
横軸は測線の始点から距離。
*をつけたところはピークパターンの違うところの例。

Fig. 13 The intensity of spatial differential vectors (ISDV) and the gradient of total force anomalies obtained by proton precession magnetometer (dT/dp) along line t112.
Horizontal axis indicates distance from the start point of line t112.
* indicates different point between ISDV and total force gradient.



第14図 Fig. 13に示した測線t112の一部分を含む範囲 (Fig. 7a参照) の全磁力異常図。
コンター間隔は50nT, 実線は正, 破線は負異常を示す。
*を付けたところはFig. 12に対応する。
また矢印は対応する3次元的な磁気異常についてコンターマップの正負の目玉を結んだ方向。

Fig. 14 Total force magnetic anomaly map including the line t112. Contour interval is 50 nT.
Solid lines indicate positive, and broken lines indicate negative anomalies.
* indicates the same as in Fig. 13.
The arrow indicates the estimated direction of magnetization of this magnetic source.



第15図 Fig. 10に示したNH92-1の測線 (175°Eに沿って0°30'Nから2°30'Nまでの北向き測線) について三成分異常値の空間微分 (ISDV) とプロトン磁力計による全磁力異常の空間微分プロファイルの比較。
横軸は0°30'Nを始点とした距離。

Fig. 15 The intensity of spatial differential vectors (ISDV) and the gradient of total force anomalies obtained by proton precession magnetometer along line 175°E, from 0°30'N to 2°30'N.
Horizontal axis indicates distance from (0°30'N, 175°E).

気異常によるピークなのか, その他の原因によるものなのか判断している。ここでGH91航海の測線t112データの1秒平均値プロファイルを示す。船体磁気補正を行った後のx, y, z成分の磁力値のいずれにも10-20秒程度の周期の変動が見られるが (Fig. 12), このような短波長の変動は磁場変化とは考えにくい。例示したプロファイルに対応する船体の姿勢データを見ると (Fig. 13), 姿勢の変動の周期が, 磁気値の短波長変動に近いことがわかる。Fig. 9に示した三成分異常プロファイルは, 観測データの1秒平均値を使って船体磁気補正を行い, その値の1分平均値 (約300m間隔に相当する) をとった。しかし, 水深から考えて, 地磁気異常とは思えない短波長変動が見られるので5項の重み付き移動平均 (2次・3次多項式適合法) によってさらに平滑化した。

平滑化した測線データから, ISDVを求めるとFig. 13

のようになった。全磁力異常の空間微分 (dT/dp) と ISDV を比較してピークのパターンの違うところ (例えば、図中*) に着目すると、この測線では、 z 成分異常のパターンと全磁力異常のパターンが良く似ていることから、この点では水平成分の変化が大きいと推察される。Fig. 7a で示した範囲について、プロトン磁力計による全磁力異常図を見ると (Fig. 14), Fig. 13 で* を付けた磁気境界に対応するところに* をつけたが、明らかに磁化の偏角がこのあたりの外部磁場 ($N8^{\circ}W$) よりも大きく西へずれていると考えられる3次元的な異常が見られ (図中矢印), ISDV プロファイルでの磁気境界とよい対応を示すことが分かる。

一方、NH92-1 航海のように $175^{\circ}E$ 線上をほぼ 1 直線に航走する場合には、プロトン磁力計では測線の走向と地球磁場方向との角度によって地磁気異常の振幅が変わるけれども、STCM データはこれらのパラメータの影響を受けないため、特に有力な地磁気異常の測定方法となりうる。今、ISDV と全磁力異常の空間微分を $175^{\circ}E$ 線上の $0^{\circ}30'N$ から $2^{\circ}30'N$ までの部分について比較する (Fig. 15)。今度は全磁力異常の空間微分は水平成分の変化に大きく依存していることから、ピークの違いは z 成分の変化と x 成分の変化のずれを示す。その結果ピークが合わないところは z 成分の変化が大きいと考えられる。また、磁気異常の小さいところやノイズが十分に除去できない場合などは、スレッショルドレベルの設定が難しく、ISDV からでは磁氣的境界の位置が決めにくい。そのような場合にプロトン磁力計による全磁力異常の空間微分と比較することは磁氣的境界の判定に役立つだろう。

7. 結 論

現状の船上地磁気三成分磁力計のシステムのままでは精度の良い船体磁気補正は困難であり、地磁気三成分の絶対値を得ることは難しい。そのため、絶対値ではなく相対変化値を利用するほうが無難である。しかし、相対変化値であっても、プロトン磁力計だけでは得られなかった情報を多く含んでおり、特に面的調査を行なわない航海では、その有用性は明らかである。しかしながら、地磁気三成分の絶対値は磁氣的構造、並びにその海域のテクトニクスを理解するためには必要な情報であるから、船体磁気補正の問題は避けて通れない課題である。

現システムの問題点を整理すると次の 2 点が大きく影響することが分かった。

- (1) 船体の運動は大変複雑であり、姿勢の計測精度、とりわけ追従精度はかなりの高さが要求される。
- (2) 船体が航海中に獲得する粘性残留磁化は無視できないほど大きい。そのため、船体磁気の時間変化を考慮したシステムが必要である。

どちらも解決は難しいが、(1) については、年々計測機が高性能になりつつあるので、いずれ解決されるだろう。少なくとも、現在パラレルにコントロール部に取り込んでいる、磁気センサー、水平姿勢計、ジャイロコン

パスの 3 種類のデータにそれぞれ精密な時刻データを持たせ、時刻更正が行えるようにすれば、かなり改善されるはずである。また、(2) については、対処療法的ではあるが、「8 の字航走」をなるべく多く、時間的空間的に片寄りがないように行うことが必要になる。その一方で、船体が獲得する粘性残留磁化をモニターできるような新しいシステムの開発が望まれる。

一方、船体が持つ磁気はかなり複雑なので、補正方法を改良するのではなく磁気センサーを船体から十分に遠ざける、すなわち船上設置から曳航タイプに変える方法のほうが現実的であるかもしれない。ところが、センサーの姿勢計測のさらなる高度化が要求され、曳航タイプでは船が航走すればデータが取れる、という簡便さが犠牲になる。今後は研究航海の目的に応じて観測形態を変えていくことになるだろう。

今までに白嶺丸では、相対変化値しか得られないが、 $175^{\circ}E$ に沿って $40^{\circ}S$ から、 $45^{\circ}N$ 位まで同じシステムで STCM のデータが得られている (森尻, 1993, 森尻・山崎, 1994, 佐柳・木川, 1995)。現在解析中であるが、このような長い測線で統一的にデータが取得された例は少なく、太平洋のテクトニクスの研究に貢献できると考えている。また、十分に全磁力データが面的に得られた海域でも、詳しく解析を行なおうとすれば、磁化が外部磁場と平行でない磁性体についての情報が必要になる。ただし、相対変化のみでは磁化の方向が特定できないので、現状の STCM データを解析に生かすためには、本報告で述べたような問題点を踏まえたうえで、違う方法で情報を引き出す工夫が必要であろう。

謝辞 データ取得作業に関して白嶺丸の乗組員及び乗船研究員の方々にはいろいろと御助力頂いた。また、査読者の地殻物理部の大久保泰邦氏には有意義な御指摘を頂いた。謝意を表します。なお、本研究は、工業技術院特別研究「物質循環に関わる海洋地質学的研究」及び、新エネルギー・産業技術総合開発機構が(株)関西総合環境センターに委託し実施した「海洋中の炭素循環メカニズムの調査研究」、並びに工業技術院特別研究「日本海中部東縁部大陸棚周辺海域の海洋地質学的研究」の一環として行なわれたものである。

文 献

- IAGA Division V Working Group 8 (1991) International Geomagnetic Reference Field, 1991 Revision. *J. Geomag. Geoelectr.*, **43**, 12, 1,007-1,012
- Isezaki, N. (1986) A new shipboard three component magnetometer. *Geophysics*, **51**, 1992-1998
- 上嶋正人・駒澤正夫 (1996) 積丹半島沖の地磁気、重力、3 成分地磁気異常測定。北海道西方海域の環境変動に関する総合的研究平成 7 年度研究概要報告書, 13-29, 地質調査所
- Kitahara, A., Sayanagi, K. and Isezaki, N. (1992)

- Measurement of geomagnetic three component anomalies in the southwestern part of the Kuril Trench. Preliminary report of the Hakuho Maru cruise KH92-3, O.R.I. Univ. of Tokyo.
- Korenaga, J. (1995) Comprehensive analysis of marine magnetic vector anomalies. *J.G.R.*, 100, B1, 365-378
- 森尻理恵 (1993) 東経175度線上の地磁気異常, 重力異常の特徴. 海洋における物質循環の研究平成5年度研究概要報告書, 47-67, 地質調査所
- 森尻理恵・山崎俊嗣 (1992) 山形・秋田沖における地磁気3成分測定. 日本海中部東縁部大陸棚周辺海域の海洋地質学的研究平成3年度研究概要報告書, 26-31, 地質調査所
- 森尻理恵・山崎俊嗣 (1994) 東経175度線上の地磁気異常, 重力異常の特徴. 海洋における物質循環の研究平成6年度研究概要報告書, 47-67, 地質調査所
- 佐柳敬造・木川栄一 (1996) 北西太平洋の重力異常, 地磁気全磁力・三成分異常—東経175度線上及び東マリアナ海盆—. 海洋における物質循環の研究平成7年度研究概要報告書, 43-59, 地質調査所
- Seama, N., Ichikita, T. and Isezaki, N. (1990) Measurement of Three Component Geomagnetic Field by STCM. Preliminary Report of The Hakuho Maru Cruise KH-89-1, 50-57, O.R.I. Univ. of Tokyo.
- Seama, N., Nogi, Y. and Isezaki, N. (1993) A new method for precise determination of the position and strike of magnetic boundaries using vector data of the geomagnetic anomaly field. *Geophys. J. Int.*, **113**, 155-164
- 山崎俊嗣 (1992) ハワイ西方-マリアナ東方の北緯20度線上の重力異常, 地磁気全磁力及び三成分異常. 海洋における物質循環の研究平成4年度研究概要報告書, 41-50, 地質調査所
- Yamazaki, T., Kikawa, E., Yamamoto, H. and Murakami, F. (1994) Spreading mode of the west Caroline basin deduced from magnetic vector anomalies. *J.G.G.*, 46, 443-453

(受付: 1996年10月30日; 受理: 1996年11月28日)