

海底資源探査に向けた磁気探査装置の開発

— R/V「よこすか」YK09-09航海における実海域試験 —

原田 誠*1・佐柳敬造*1・伊勢崎修弘*1・笠谷貴史*2・澤 隆雄*2・浅田美穂*2・
多田訓子*2・市原 寛*2・後藤忠徳*3・野木義史*4・大西信人*5・松尾 淳*6Development of magnetic exploration tools for seabed mineral resources
— Performance test in R/V Yokosuka YK09-09 cruise —Makoto HARADA, Keizo SAYANAGI, Nobuhiro ISEZAKI, Takafumi KASAYA,
Takao SAWA, Miho ASADA, Noriko TADA, Hiroshi ICHIHARA,
Tada-nori GOTO, Yoshifumi NOGI, Nobuhito ONISHI and Jun MATSUO

Abstract

The authors have developed new precise exploration tools for seabed resources by electrical and magnetic method in order to estimate accurate abundance of those resources. The exploration tools will be mounted underwater platforms such as deep-tow system, ROV (Remotely Operated Vehicle), and AUV (Autonomous Underwater Vehicle). In July, 2009, we carried out the R/V Yokosuka cruise in Kumano-nada, off Kii Peninsula, Japan, in order to investigate the performance of developed equipments for magnetic exploration. We mounted two flux-gate magnetometers and an Overhauser magnetometer on the deep-tow (DT) system and AUV Urashima. This paper will present the summary of the test by the AUV. In the test, we used a magnetic target which is consisted of iron bars and 50 neodymium magnets. The magnetic target was put into water and set at the depth of 2,058 meters. The navigation of AUV was performed at height of 20-30 meters in the area with a radius of about 300 meters. After the effects of the magnetization of platform were properly eliminated, the two flux-gate magnetometers successfully detected prominent magnetic anomaly produced by the magnetic target. We could understand the efficiency of our system, restrictions of navigation and their suitable operation, and technical problems which are related to some kinds of noise component. Note that this project has been supported by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science & Technology (MEXT).

Keywords: deep-sea magnetic exploration, three-component magnetometer, Autonomous Underwater Vehicle, hydrothermal deposit

1. はじめに

日本の排他的経済水域 (EEZ) は、国土の12倍で世界第6位の広さがある。そこには、海底熱水鉱床やコバルトリッチクラスト、メタンハイドレートなどの豊富な海洋資

源が存在すると考えられている。資源が限られた日本にとってこれらの海洋資源は大変魅力的である。さらに、最近には主にアジア圏での急激な経済発展などにより、鉱物資源やエネルギー資源の確保のための国際的な開発競争が激化しており、海洋資源の重要性も高まることが予想される。しかし、海底熱水鉱床やメタンハイドレートなどの海洋資

2010年3月31日受付 2010年7月14日受理

*1 東海大学海洋研究所 (Institute of Oceanic Research and Development, Tokai University)

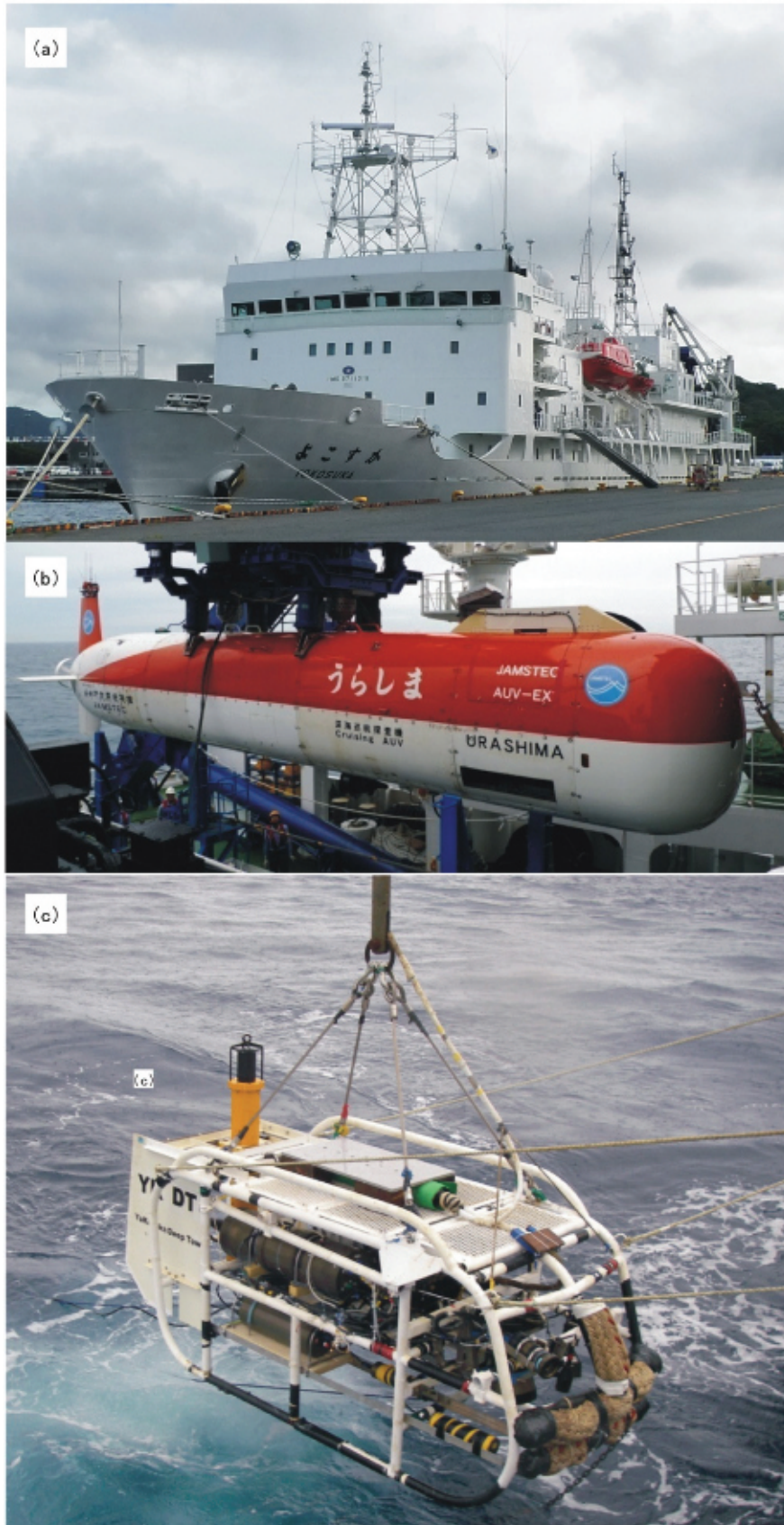
*2 海洋研究開発機構 (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

*3 京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 (Department of Civil and Earth Resources Engineering Geophysics, Kyoto University)

*4 国立極地研究所 (National Institute of Polar Research)

*5 有限会社テラテクニカ (Tierra Tecnica Co.)

*6 OYO インターナショナル株式会社 (OYO International Co.)



Pict.1 Photos of (a) R/V Yokosuka, (b) AUV Urashima, and (c) Deep-Tow system.

源の開発には大きなハードルもある。それは、正確な賦存量が明らかになっていないことである。それらの賦存量を正確に調べるためには、海底下の詳細な構造を知らなければならぬ。それには海底近傍における物理探査が有用であるが、その方法は確立されているとは言い難い。

このような背景の中で、2008年度より「海洋資源の利用促進に向けた基盤ツール開発プログラム」が、文部科学省の競争的資金制度のもとで開始された。その一環として、著者らは電磁気学的手法を用いて海底下の構造を高精度に推定するための探査ツールの開発に取り組んでいる(佐柳ほか, 2008; Sayanagi *et al.*, 2009a; Sayanagi *et al.*, 2009b; 原田ほか, 2009a)。具体的には、自律式無人探査機(AUV)、有索式無人探査機(ROV)、曳航式探査システム(DT)などを用いた電気・磁気探査装置を開発することを目的としている。特にAUVやROVなどの海中ロボットには目覚ましい発展があり、これを利用することでこれまでにない高精度な海底下構造の探査が期待できる。

現在の開発状況は、電気探査装置と磁気探査装置の試験機を製作し実海域試験を行う段階にある。電気探査装置については、2009年11月に海洋研究開発機構(JAMSTEC)の「かいらい」KR09-16航海において、ROV「かいこう7000II」を使って試験を行った。また、磁気探査装置については、2009年7月にJAMSTECの深海潜水船支援母船「よこすか」YK09-09航海において、AUV「うらしま」(以下、AUV)や「ディープ・トゥ」(以下、DT)を使って試験を行った(Pict. 1)。ここでは、磁気探査装置の概

要とAUVによる海域試験の結果を中心に報告する。

2. 磁気探査装置

磁気探査装置は、2台のフラックスゲート型(以下、FG)磁力計センサーと1台のオーバーハウザー(以下、OVH)磁力計センサー、姿勢計測部(ジャイロ)、制御・記録部、通信部、電源部、および船上装置からなる(Sayanagi *et al.*, 2009a; Sayanagi *et al.*, 2009b; Harada *et al.*, 2009b)。本システムの電源はDC24Vに対応しており、潜航中はAUVから給電を受けるが、船上では制御コンソール(AC100Vで作動)からDC24Vを供給する。Fig. 1にAUVへ搭載する場合の磁気探査装置のシステム概念図を示す。以下に各要素の仕様について記載する。

磁力計センサー部には、Bartington Instruments社製のMag-03H(FG磁力計)、Marine Magnetics社製のExplorer(OVH磁力計)を採用した。分解能はそれぞれ、FGは0.01nT、OVHは0.001nTである。

姿勢計測部として、本システムではIXSEA社製のPHINS III(光ファイバジャイロ)を採用した。headingの精度は、本体単独で $0.05^\circ/\cosine(\text{latitude})$ で、GPS(Global Positioning System)データの入力がある場合は $0.02^\circ/\cosine(\text{latitude})$ 、ドップラー速度計(DVL)データの入力がある場合は $0.01^\circ/\cosine(\text{latitude})$ である。また、rollおよびpitchの精度は 0.01° である。姿勢データの出力周波数は0.1~200Hzから選択できる。なお、本

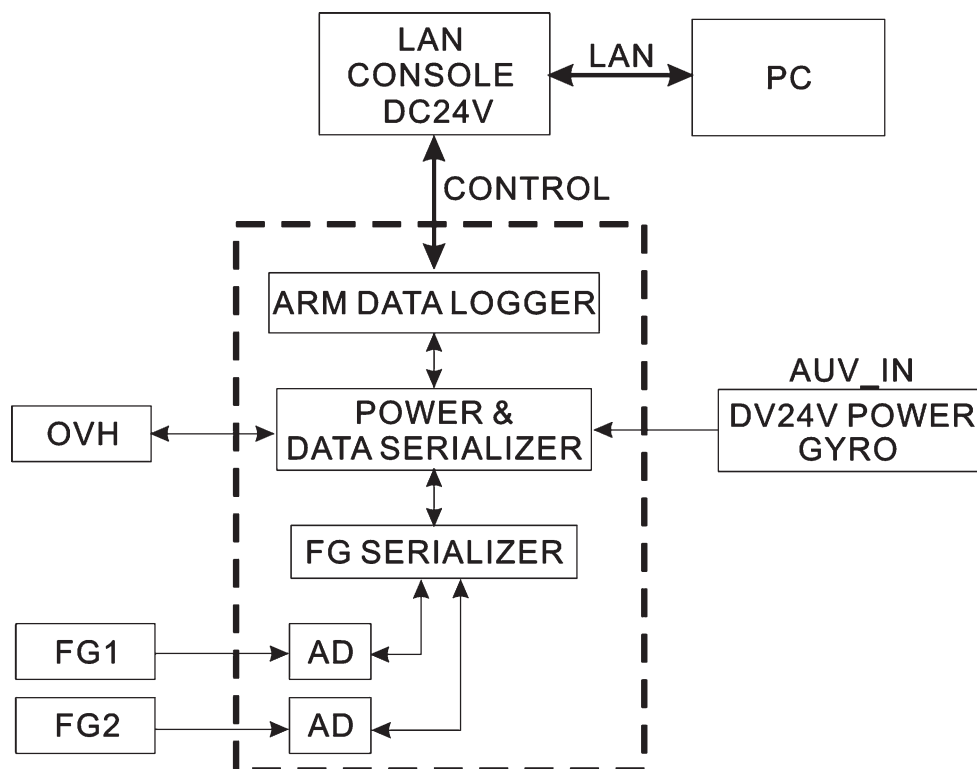


Fig. 1 System diagram of the magnetic exploration tools in YK09-09 cruise.

航海では AUV のペイロードの関係で本ジャイロは搭載しなかった。代わりに、AUV に既設のリングレーザージャイロのデータを取り込むことになった。

制御・記録部として、ARM 搭載型コンピュータを利用し、OS には LINUX を採用した。記憶装置には 2 ギガバイトのコンパクトフラッシュカードを使った。装置の起動・終了時やデータ回収時などの制御・記録部の操作は、PC 端末から制御用コンソールを介して LAN で行うことが可能である。記録部のサンプリング間隔は 10Hz とした。FG 磁力計データは 24bit の A/D コンバータを用いてデジタルデータに変換される。OVH 磁力計の測定間隔は 4Hz~10 秒の 6 段階から選択でき、本航海では 5 秒間隔とした。AUV の航法システムからは姿勢 (heading, roll, pitch) および位置 (latitude, longitude) のデータを 10Hz で取り込むようにした。OVH および AUV データは FG データと SERIALIZER で一本化されて記録部に 10Hz 間隔で記録される。

Fig. 2 に AUV の寸法と取り付けられた磁力計センサー部の位置を示す。2 台の FG 磁力計は AUV 内部の先頭部と尾部に取り付けられた。OVH 磁力計は、当初は AUV 頭部に本体から約 70cm 離して取り付ける予定であったが、潜

行時の安定性を欠く恐れがあるとの判断から、頭部に直付けされた (Pict. 1(b))。

3. 開発装置および実験の概要

3.1 海域試験の目的と方法

2009年7月19日から7月29日の JAMSTEC の深海潜水船支援母船「よこすか」による YK09-09 航海 (首席: 笠谷貴史) において、磁気探査装置の海域試験を実施した。試験海域として、海底地形が平坦で磁気異常の小さい紀伊半島沖の熊野灘を選んだ (Fig. 3)。Fig. 4 に本航海で設置した磁気ターゲット (後述) 近傍の詳細な海底地形図を示す。試験海域の地形は水深が約 2,060m でほぼ平坦である。また、同海域の地磁気異常は 50~60nT 程度である (産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2002)。

本航海では、航海の前半に AUV の潜航調査を行い、A 型フレームの艀装替えの後 DT の潜航調査を行った。期間中に、AUV による磁気探査装置試験のために 2 潜航 (Dive#95, #96) と、DT による試験のために 2 潜航 (Dive#69, #70) 実施された。潜航試験を行わない夜間や艀装替えのための新宮港への入港 (7月22日) 前後は航走

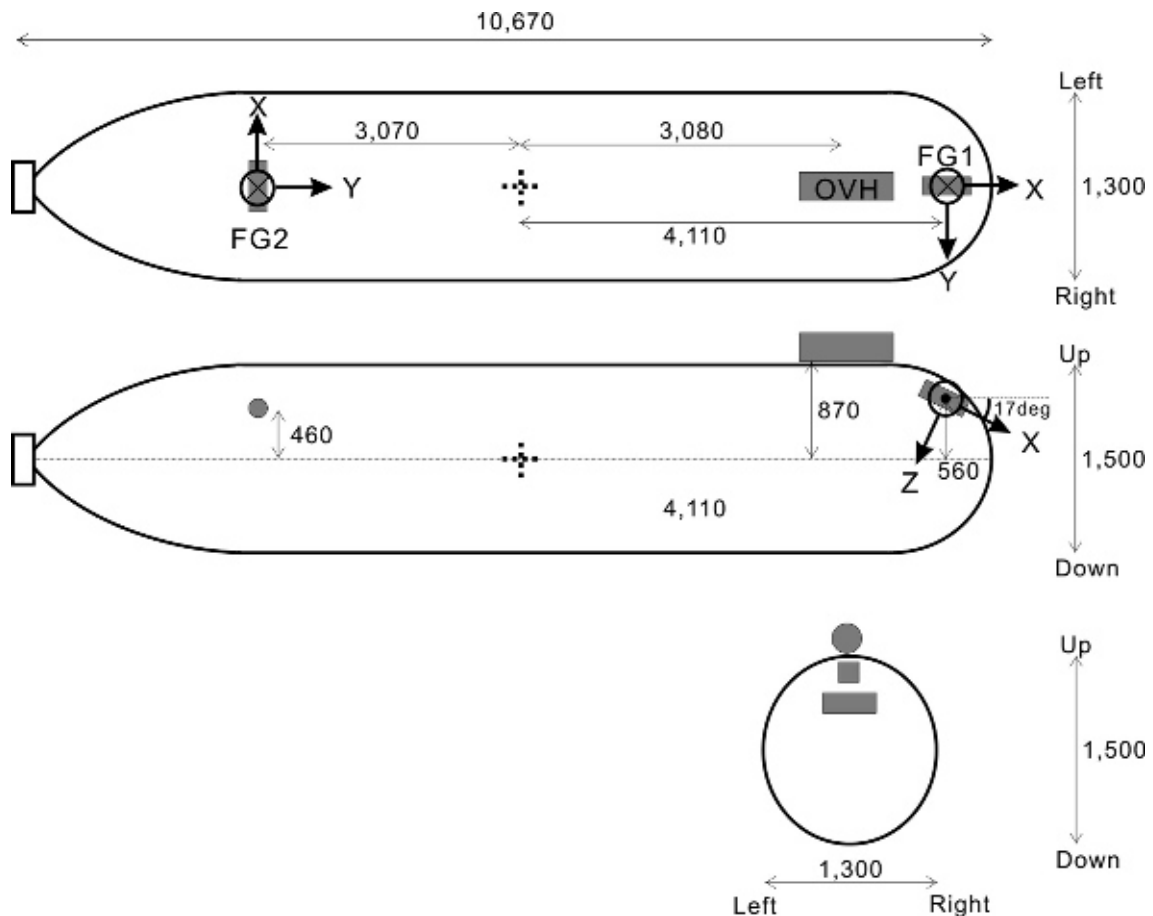


Fig. 2 Layout of two flux-gate magnetometers and Overhauser magnetometer which were installed in the AUV Urashima.

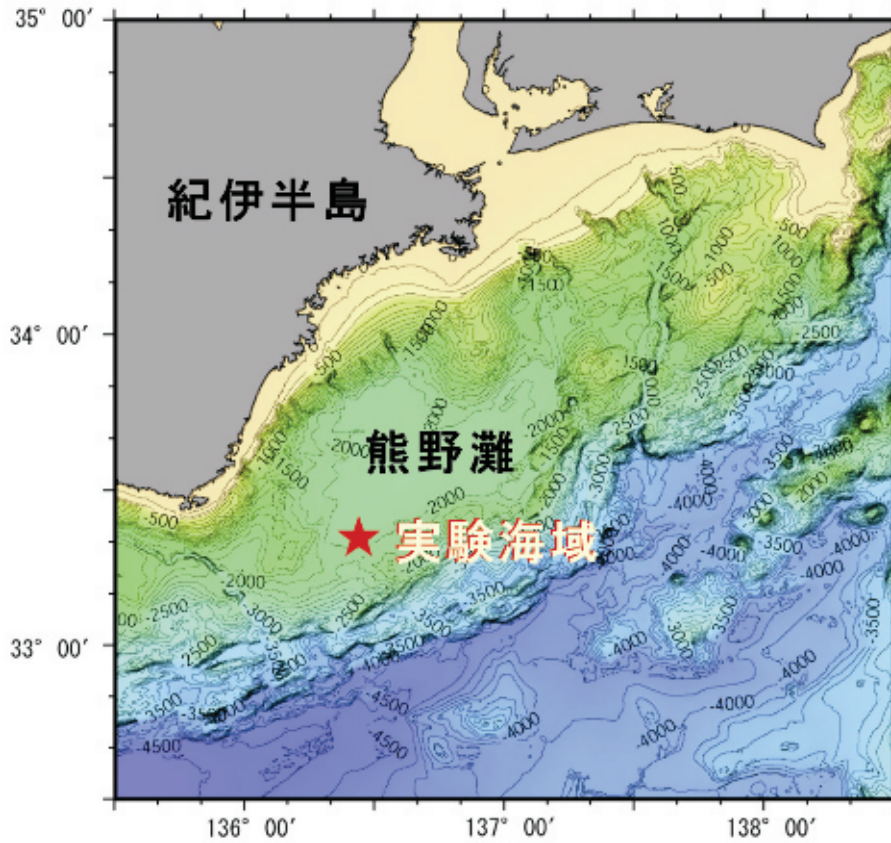


Fig. 3 Bathymetry of study area. Asterisk indicates the position of the magnetic target.

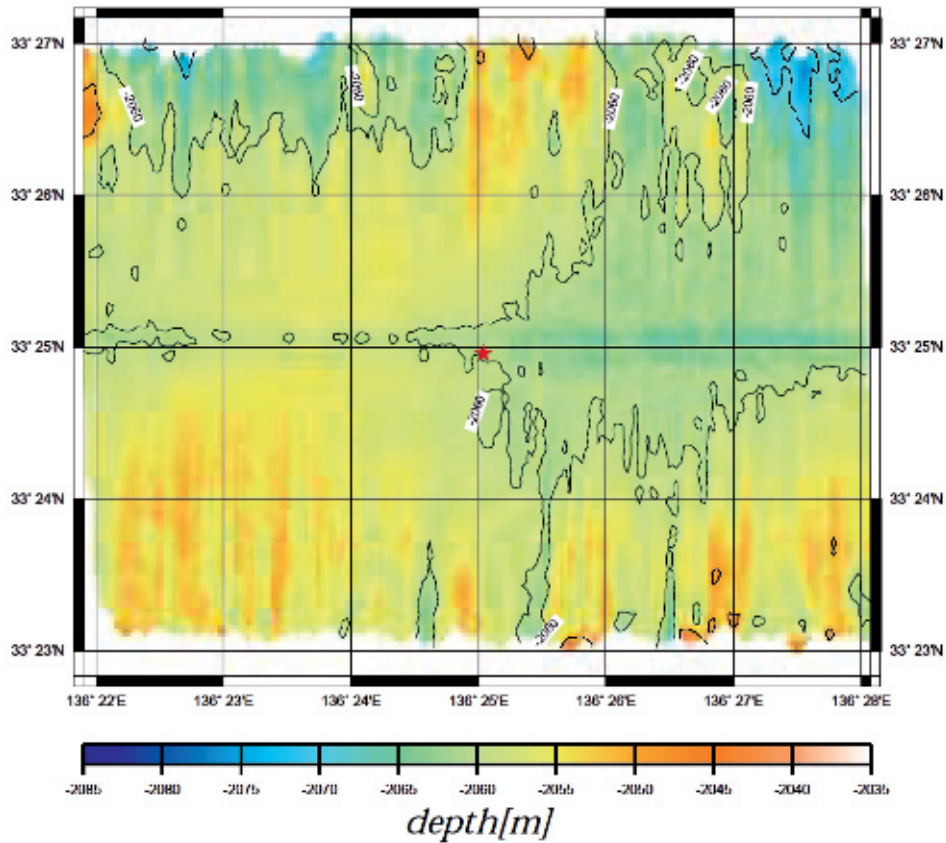


Fig. 4 Detailed bathymetric map around the magnetic target.

調査により海底地形、地磁気、重力等の測定が行われた。

Fig. 5 に、本航海における AUV を用いた磁気探査装置海域試験の概念を示す。本試験の目的は、我々の磁気探査装置について、AUV「うらしま」を使った磁気測定の可能性と、測定ノイズや操作などに関する実用性を調べることである。試験データは、基本的に中層域と海底近傍において取得した。中層域では、1) 一定深度での航走、2) 船首を上下に振りながら走る「波乗り航走」、3) 水平面上で 360° ずつ右回りと左回りする「8 の字航走」の3種類の航走試験を行った。1) では磁氣的ノイズの小さい環境でのデータ、2) と 3) では AUV の誘導磁化や永久磁化の影響を補正するためのデータ (Isezaki, 1986) を得た。海底近傍では、磁気ターゲットの地点を中心に、海底から 20~30m の高度で 1) 格子状測線と 2) 花びら状測線を作り、磁気ターゲットの作る磁気異常を検出することを試みた。

3.2 磁気ターゲットの製作

本試験では、磁気探査装置の磁気異常の検出能力を定量的に実証するために、人工的な磁気ターゲットを製作した。磁気ターゲットの仕様として、AUV の航行可能な高度の下限である 20m において 50nT 以上の磁気異常が測定されることを条件とした。鉄棒や鉄板などの鉄製品を利用した場合、上記の条件を満たすためには数トン~10トンの重量を要するので現実的ではない。そこで本研究では、鉄棒とネオジム磁石を合わせて利用した。ネオジム磁石はネオジム 33%、鉄 66%、ボロン 1% からなり、最も広く利用されるフェライト磁石に比べて磁力が極めて強力であり機械強度が強い (Sagawa *et al*, 1984)。反面、使用温度が低く、80°C 以下での使用が必要であることや、主成分として鉄が含まれるので耐食性や耐酸化性が低い等の問題がある。通常、表面がニッケルでメッキされている。

使用したネオジム磁石のサイズは 50.7×50.7×12.7 mm、表面磁束密度は 380mT である (Pict. 2(a))。50個の角型の磁石を25本の鉄棒 (材質: SS400, サイズ: 50×

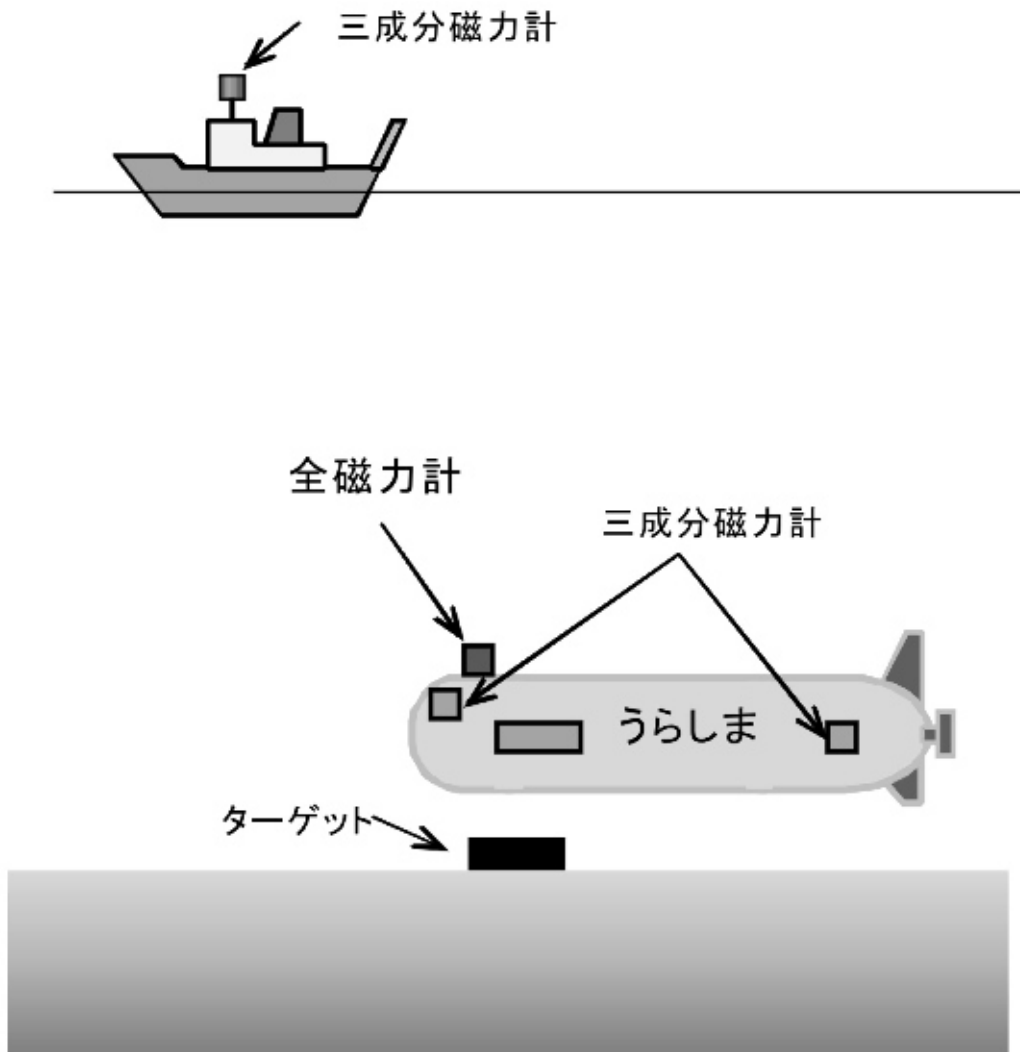
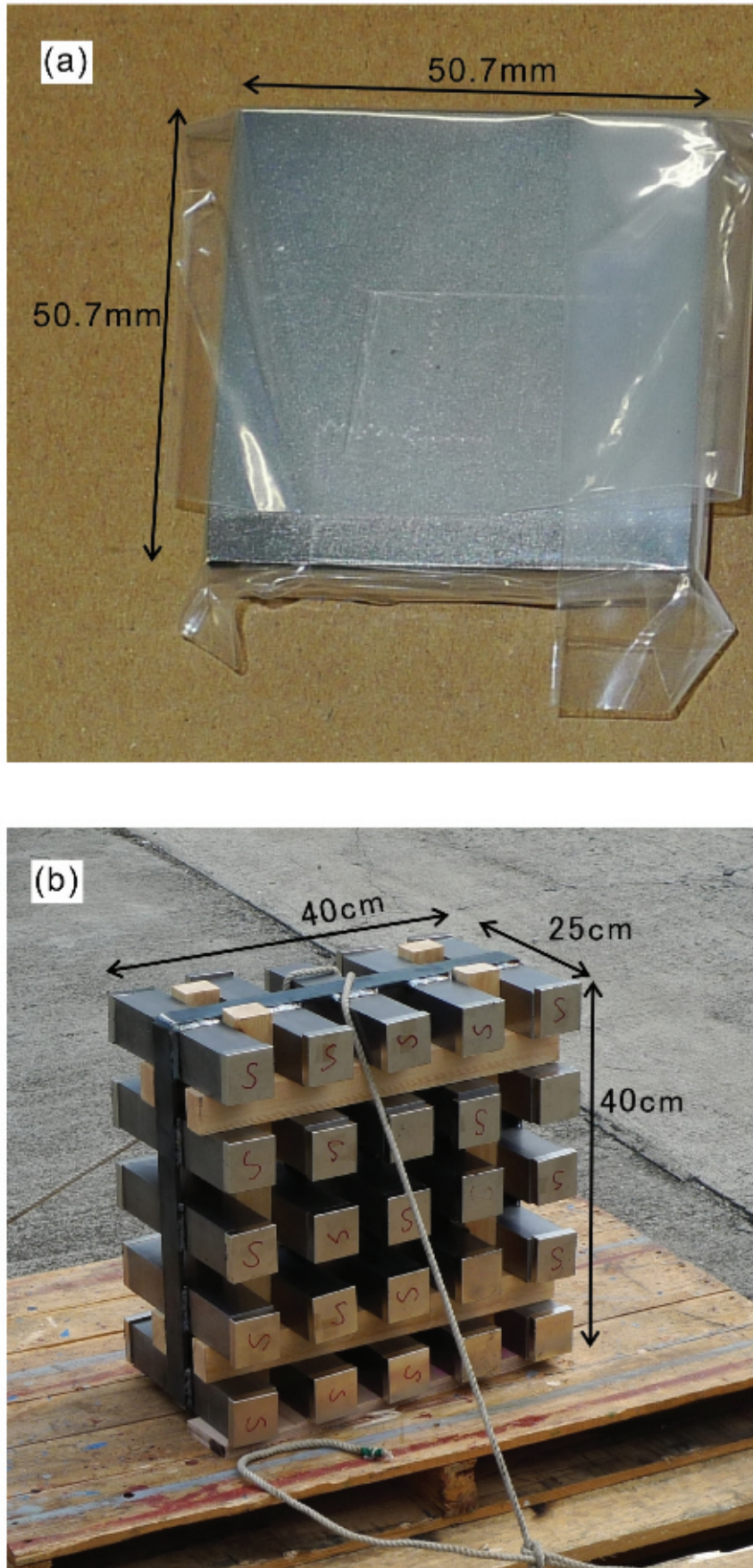


Fig. 5 Concept of this study.



Pict. 2 Photos of (a) Neodymium magnet and (b) magnetic target.

50×220mm)の両端に取付けた。磁石を付けた鉄棒は強力な磁力を有するので、磁極を揃えて並べると互いに反発し合う。磁気ターゲットの大きさを小型にするために、(株)マリンワーク・ジャパンの協力を得て、鉄棒を縦5本×横5本に並べて4cm間隔で溶接した(Pict. 2(b))。また、不意に鉄製品や磁気カード類を磁気ターゲットに近づけぬように、上下に約5cm、横に約5cmの空間をあけて木製の箱(約40×40×40cm)に収納した。磁気ターゲットの空中および水中重量はそれぞれ120.7kg, 105kgとなった。

3.3 磁気ターゲットの投入

磁気ターゲットの設置は和歌山港を出発した7月19日の夕方に行われた。磁気ターゲットはN極を下に向けて木箱に収められ、海底への着底時に堆積物中に埋もれぬようにFRPスノコ(一辺が約1m)に載せられた。また、水中カメラに映るように表面に反射テープを貼った(Pict. 3(a))。投入にあたっては、沈降速度を抑制するために3つのガラス球を浮力材として利用し、着底地点を測定するために音響トランスポンダを取り付けた。Pict. 3(b)~(d)に、磁気ターゲットの海中への投下の様子を示す。音響的

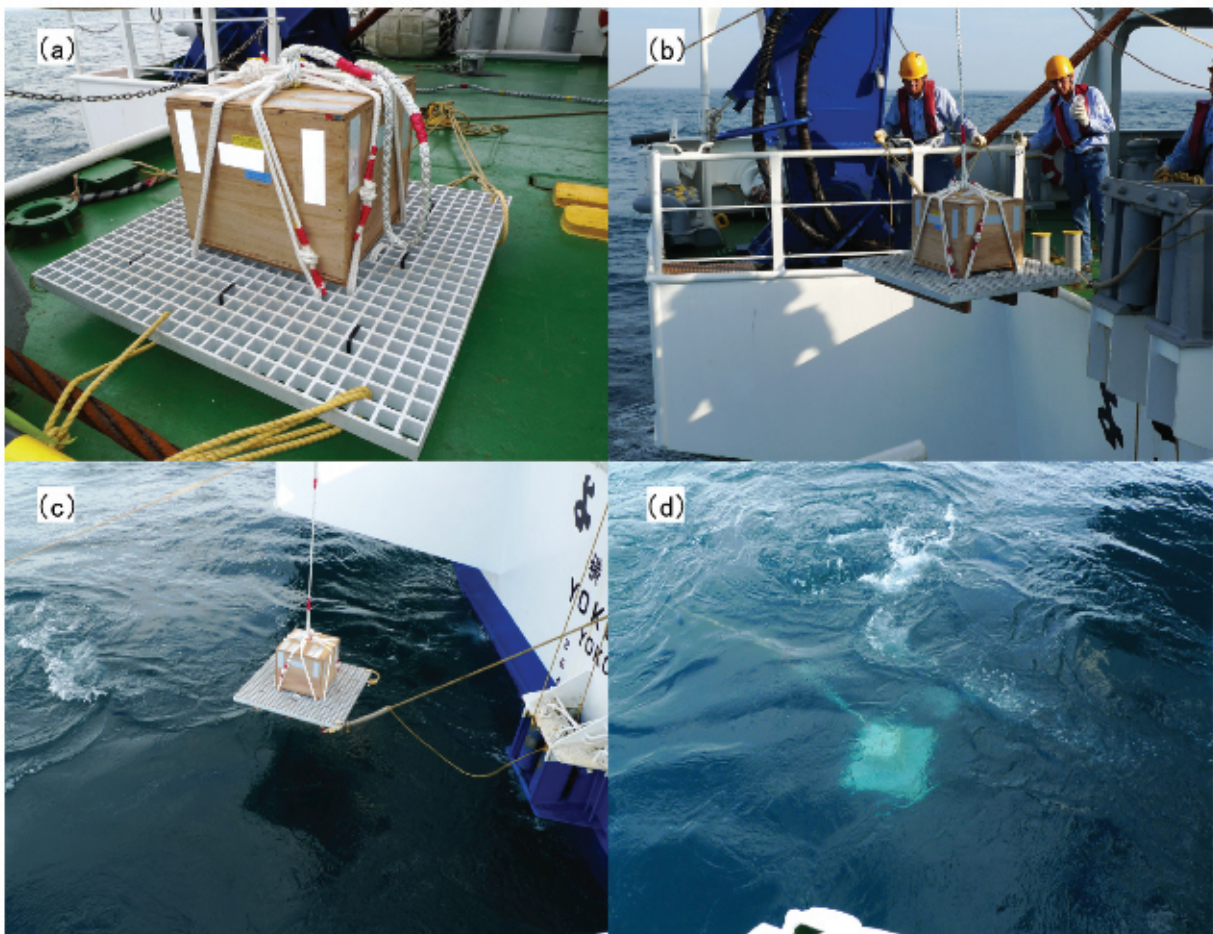
手法により推定された着底位置は、北緯33度24.9946分、東経136度25.0254分、水深2,058mである。音響トランスポンダおよびガラス球を取り付けた係留系は、音響測位の直後に磁気ターゲットから切り離され、母船上に回収された。

3.4 潜航の概要

毎潜航開始前に、AUVに搭載した磁気探査装置と外部制御用のパソコンをケーブルでつなぎ、磁気探査装置を起動させる。磁気探査装置の内蔵時計の時刻を調整し、データの収録を開始した後パソコンを切り離す。AUVの潜航中は、ブリッジ後方のAUV制御室において潜航状況を常時モニタし、司令と航走方法や針路等を決定する。潜航終了後には、パソコンを回路部につなげて時刻や取得データファイルを確認して測定を終了し、測定データをパソコンに転送した後、磁気探査装置の電源を落とす。

AUVの潜航は、実験海域到着の翌日から2日間にわたり実施された。Table 1に潜航の概要、およびFig. 6に潜航の概念図を示す。

Dive#95(7月20日)では、磁気ターゲットの直上において潜航を開始し、時計回りの旋回下降(半径約80m)



Pict. 3 Photos of the magnetic target on the vessel.

Table 1 Data of AUV dives in YK09-09 cruise. Schedules are represented in the local time.

潜航番号	年月日	潜航開始時刻	潜航終了時刻	総潜航時間	最大潜航深度	測線
#95	2009.07.20	8:35	16:54	8:21	2,040m	① 水平航行 (深さ500m) ② 水平航行 (深さ1,000m) ③ 8の字航行 (深さ1,000m) ④ 波乗り航行 (深さ1,000m) ⑤ メッシュ状測線 (高度20~30m)
#96	2009.07.21	8:33	14:38	6:05	2,040m	① 水平航行 (深さ1,000m) ② 8の字航行 (深さ1,000m) ③ 波乗り航行 (深さ1,000m) ④ 花びら状測線 (高度20~30m)

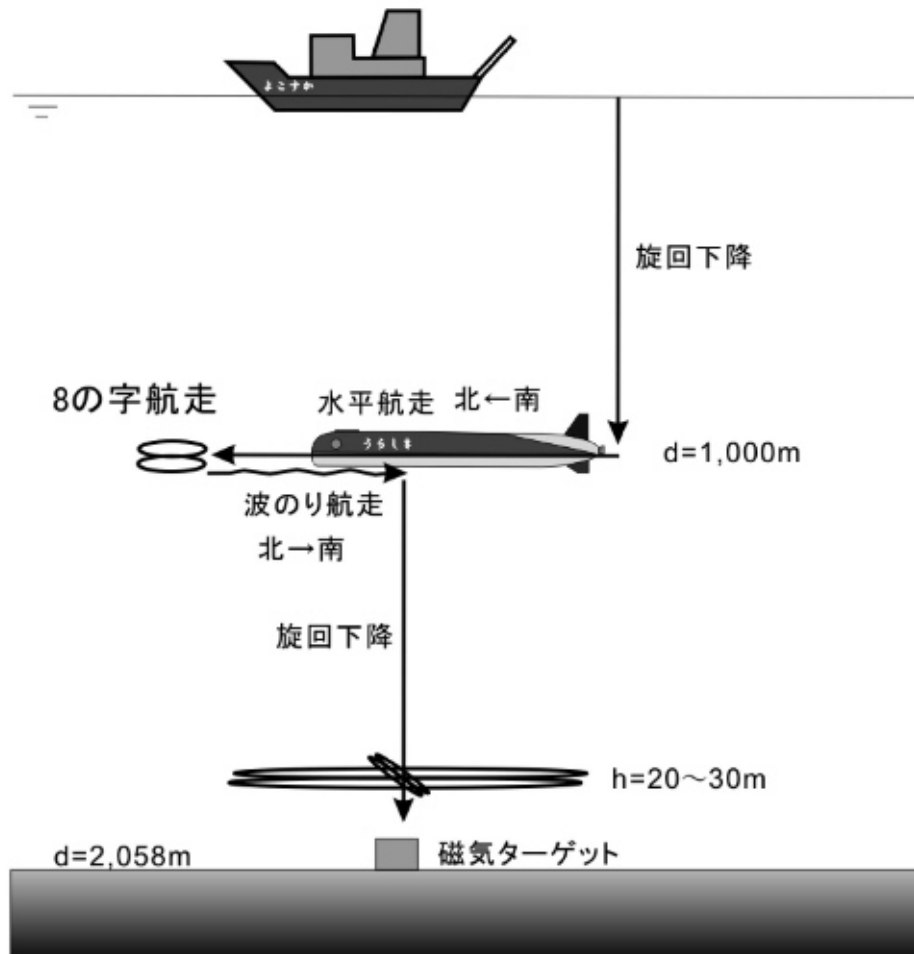


Fig. 6 Concept of the navigation of AUV in Dive#96.

の後、深度 500m および 1,000m において水平航行 (約 2,000m) を行い、深度 1,000m において 8 の字航行 (半径 80m) を約 14 分間にわたって行った。その後、pitch 角 $\pm 20^\circ$ で頭部を上下に振る「波乗り航走」を行い、磁気ターゲット直上から旋回下降で深さ 2,058m の海底に達した。AUV は音響遠隔制御モードで制御され、SSBL (Super Short Base Line Positioning System) による位置の測定は中層では 16 秒間隔、海底付近では 8 秒間隔で行わ

れた。磁気ターゲット近傍では、海底高度 20~30m の格子状測線 (間隔 10m) を目標として針路を制御し、速度 2.5ノットの定高度航走が行われた。しかし、格子状測線では AUV の回頭に必要な半径が予定していた測線間隔よりも大きかったため、予定された測線上を航走するのは困難であった。同潜航において磁気ターゲット直上を通過したのは 1 回であった。

Dive#96 (7月21日) では、磁気ターゲットの南に約

1,000mの位置から時計回りの旋回下降(半径約80m)を行い、深度1,000mにおいて南から北に向けて約2,000mにわたり深度一定の水平航行を行った。また、同深度において約13分間の8の字航走を行った後、磁気ターゲット直上に向けて波乗り航走を行った。その後磁気ターゲット直上から旋回下降を行い、海底付近に達した。測線は、Dive#95における針路制御の困難さを受けて、花びら形に設定された(Fig. 7)。各測線は磁気ターゲット直上を通過するように針路が制御され、計20本の測線を得ることが

できた。同潜航では、高度20~30mにおいて速度1.5~2.0ノットで水平航行を行った。この潜航ではSSBLによるAUVの位置の測定は8秒間隔で行われた。

4. 試験データと解析結果

測定された磁場データはAUVに固定された磁力計の座標系で測定されるので、地磁気が一定であってもAUVの姿勢変化に対応して変動する。Fig. 8およびFig. 9に、

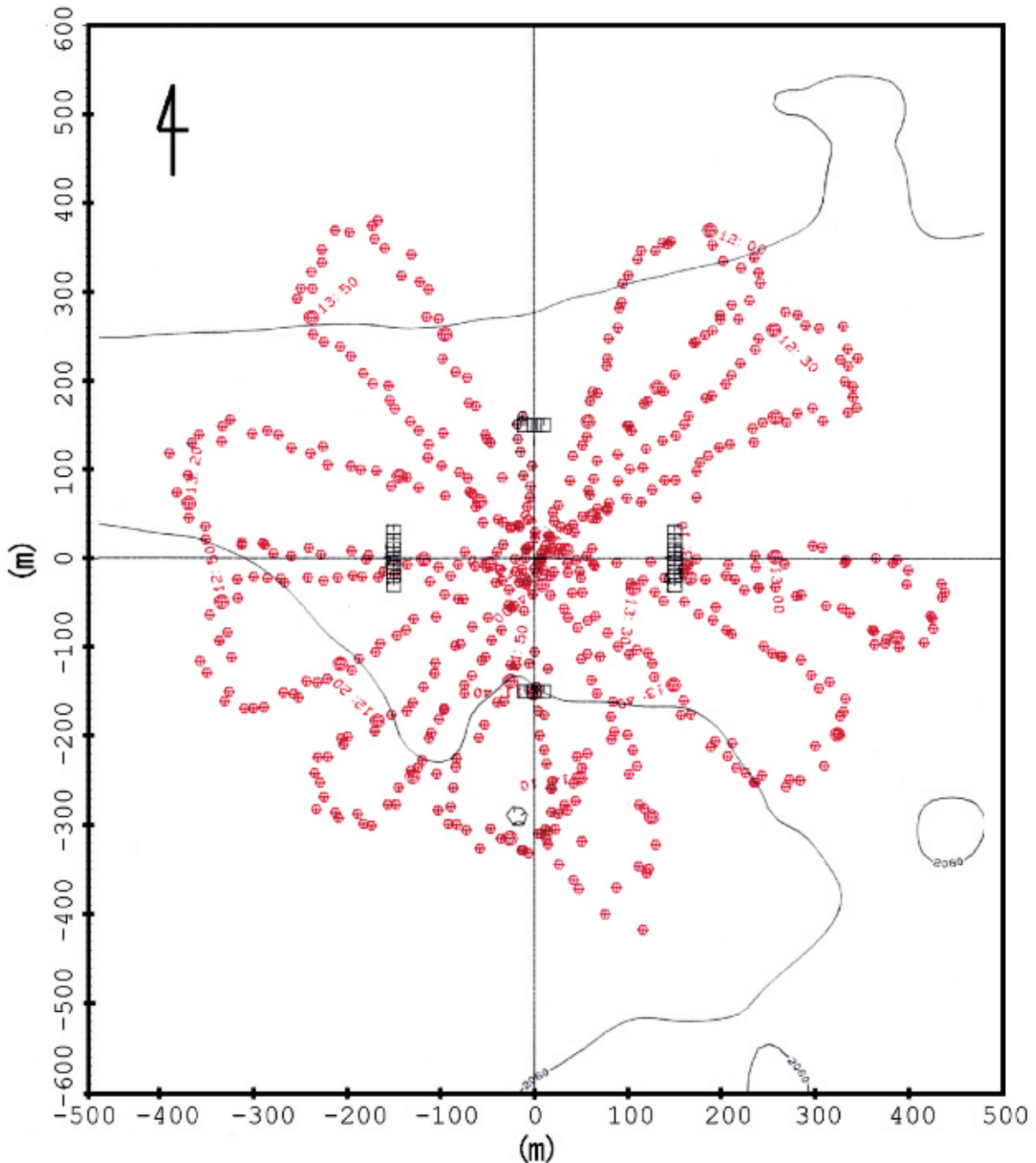


Fig. 7 Track of AUV in Dive#96. Four latticed rectangles which locate at $\pm 150\text{m}$ from the origin indicate the planned waypoints in Dive#95.

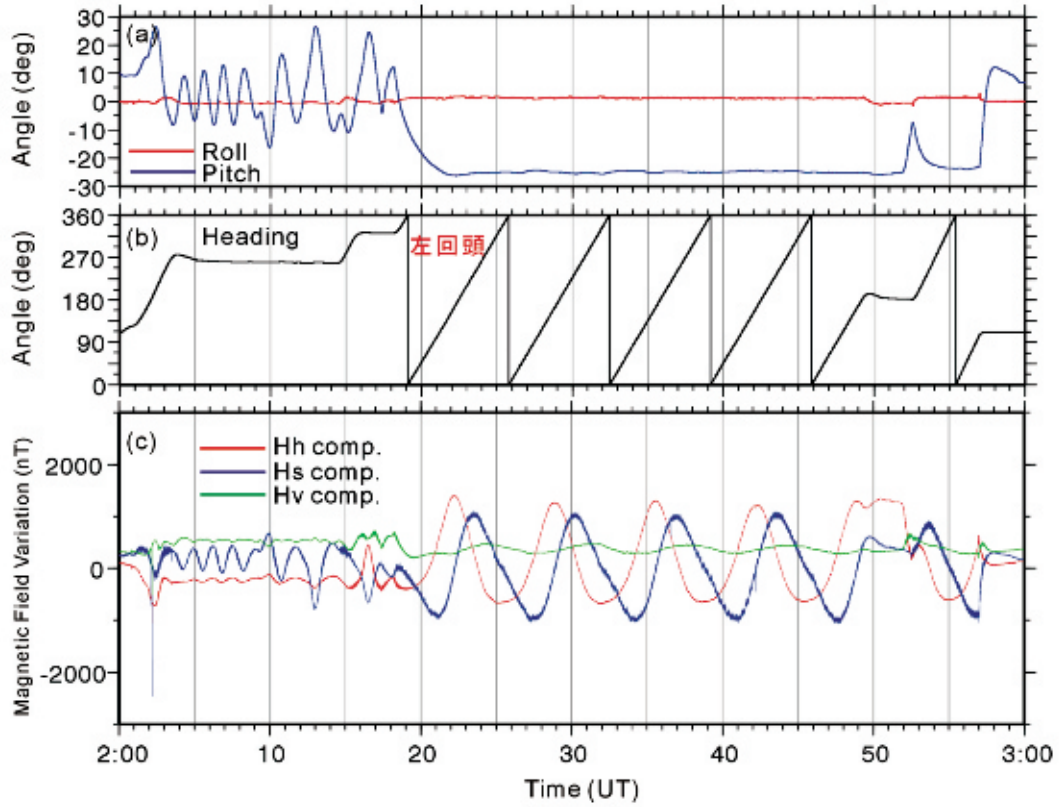


Fig. 8 Time series data of (a) roll and pitch, (b) heading, and (c) magnetic field components, that were acquired in Dive#95. AUV was descending with the clockwise rotation. Magnetic field variations are given as heading, starboard, and vertical down components, respectively.

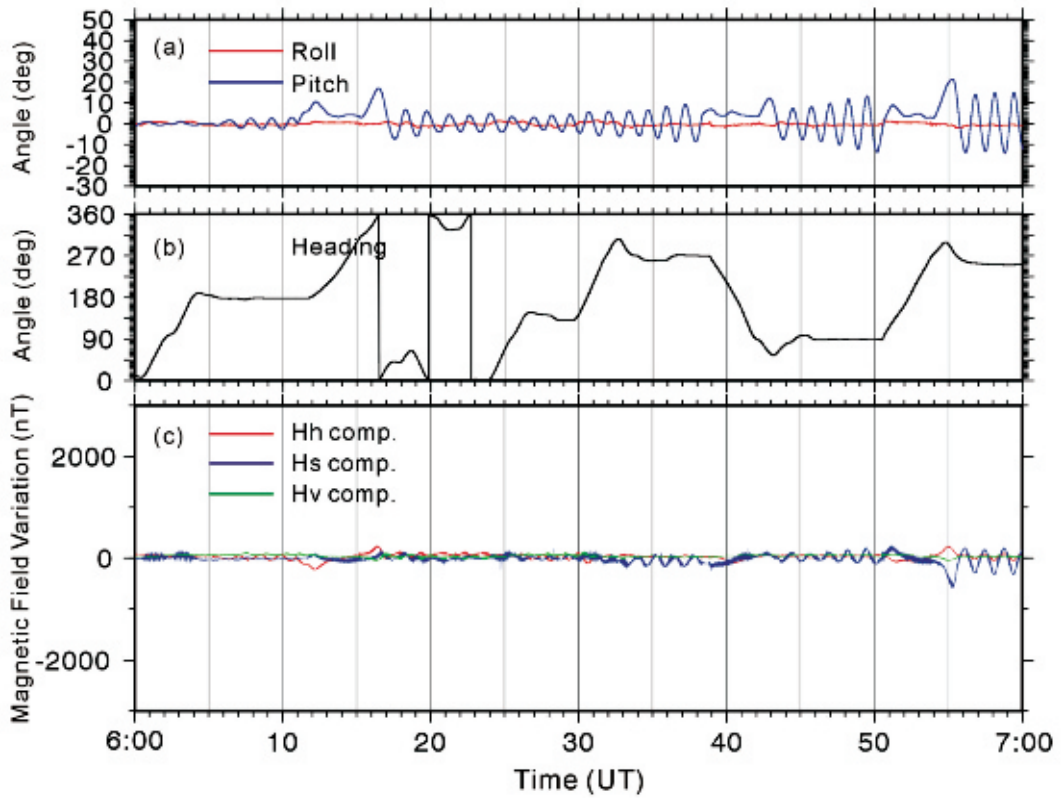


Fig. 9 Time series data of (a) roll and pitch, (b) heading, and (c) magnetic field components, that were acquired in Dive#95. AUV was navigated with keeping a settled depth of 1,000 meters.

Dive#95 で測定された FG1 の磁場 3 成分 (進行方向成分 H_h , 横向き成分 H_s , 下向き成分 H_v) およびジャイロ 3 成分 (heading, roll, pitch) を示す. それぞれ旋回下降時と深度 1,000m において高度一定モードで航行した際の 1 時間分のデータである. 旋回下降時 (2:18~2:57) では, pitch 角が -26 度でほぼ一定しており, 5 周回で深さ 1,000m まで達している. このときの磁場変動は, H_h 成分と H_s 成分が $\pm 1,000$ nT あまりに達する. 一方, 深度 1,000m における高度一定モードでの航行では, roll 角はほぼ 0 度であったが, pitch 角が ± 5 度~10 度の範囲で変動した. なお, 測定される磁場変動には太陽活動に起因する擾乱が含まれることがあるが, この潜航中の地磁気活動度 (Kp インデックス) は 0~2 程度と低いことがわかっている.

測定磁場データは, 下式の通り表される (Isezaki, 1986).

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_0 &= \mathbf{R} \cdot \mathbf{F} + \mathbf{A} \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{F} + \mathbf{H}_P \\ &= \mathbf{A}' \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{F} + \mathbf{H}_P \end{aligned} \quad (\mathbf{A}' = \mathbf{I} + \mathbf{A}) \quad (1)$$

ここで, \mathbf{H}_0 は測定磁場ベクトル, \mathbf{R} は AUV の heading 角, roll 角, pitch 角による座標変換行列, \mathbf{F} は地理座標系の地球磁場ベクトル, \mathbf{A} は AUV の誘導磁化に関する行列 (センサーの 3 軸方向と AUV 座標系とのずれの補正を含む), \mathbf{H}_P は AUV の永久磁化に関するベクトルである. ここで, \mathbf{A}' と \mathbf{H}_P が定数とすると, これらが推定できれば測定値 \mathbf{H}_0 , \mathbf{R} から地球磁場を求めることができる. (1) 式を各成分に書き下すと,

$$\begin{pmatrix} H_h \\ H_s \\ H_v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\gamma & 0 & \sin\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\gamma & 0 & \cos\gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & \sin\beta \\ 0 & -\sin\beta & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{14} \\ a_{24} \\ a_{34} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

と表される. ここで, (H_h, H_s, H_v) は測定値 3 成分, (F_x, F_y, F_z) は地磁気 3 成分 (水平北向き, 水平東向き, 鉛直下向き), α, β, γ はそれぞれジャイロの heading 角, roll 角, pitch 角である.

本航海では, AUV の永久磁化および誘導磁化の影響を補正するために, 母船や海底から十分に離れた深度 1,000 m において 8 の字航走を行い全方位の磁場・ジャイロデータを取得した. Fig. 10 に Dive#95 における 8 の字航走時の測定データを示す.

実際に (2) 式を解く際には, 地球磁場として国際標準磁場 (International Geomagnetic Reference Field: IGRF, IAGA Division V, Working Group VMOD, 2005) による予測値を代用した. Dive#95 および Dive#96 から得られた FG1 の補正係数を次に示す.

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.93486 & 0.00684 & -0.360558575 & 7.5 \\ 0.00403 & 1.00218 & 0.01371 & -30.2 \\ 0.34846 & -0.011550 & 94.629 & 245.9 \end{pmatrix}$$

Fig. 11 (c) に Dive#96 において深度 1,000m で測定された FG1 の磁場データから AUV の磁化や誘導磁化の影響を補正した結果を示す. 磁場 3 成分 (X, Y, Z) はそ

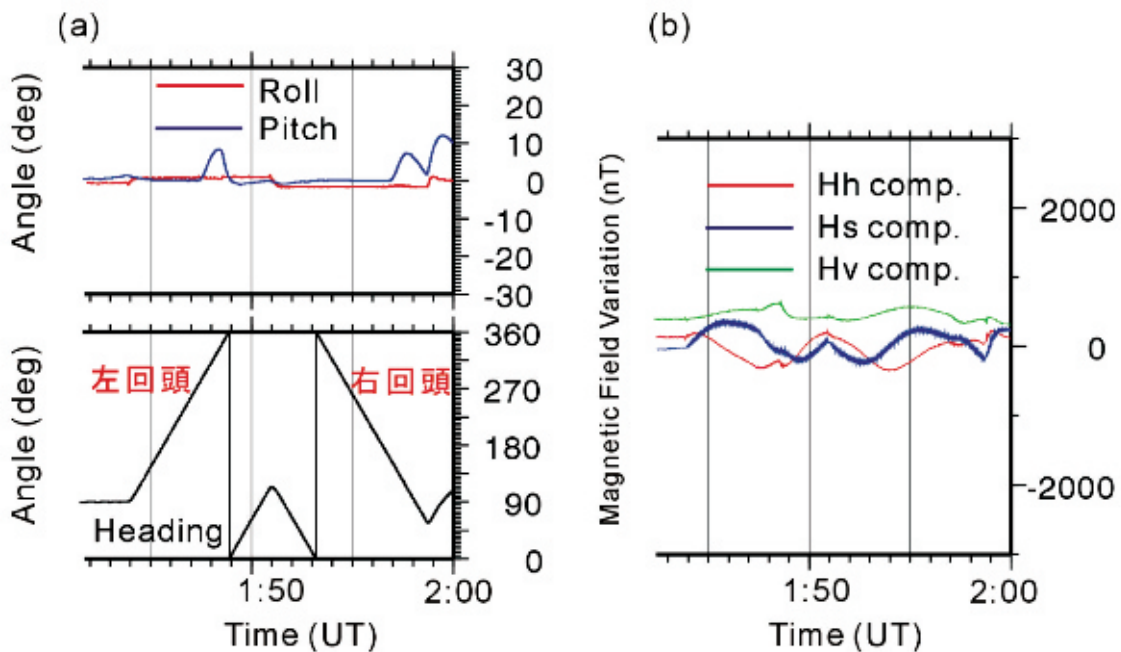


Fig. 10 Time series data of (a) roll, pitch, and heading, and (b) magnetic field components, that were acquired in Dive#95. AUV was navigated along clockwise and counterclockwise circles of which radius was about 80 meters.

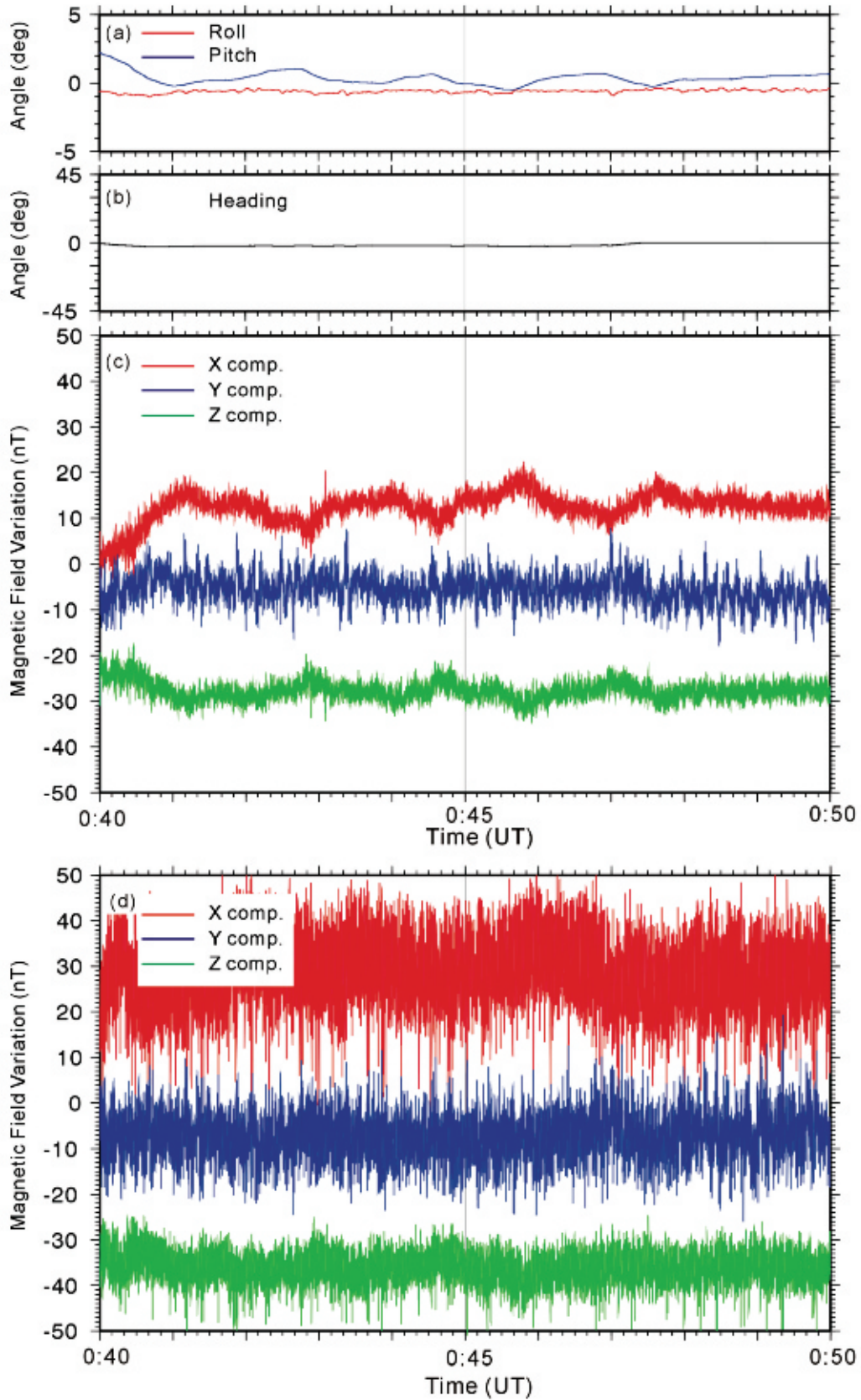


Fig. 11 Time series data of (a) roll and pitch, (b) heading, (c) magnetic field variation of FG1, and (d) magnetic field variation of FG2, that were acquired in Dive#96. Magnetic field components are given as X (northward), Y (eastward), and Z (vertical down) components, respectively. Magnetization of AUV and IGRF are eliminated. AUV was navigated with keeping a depth of 1,000 meters.

れぞれ北向き、東向き、鉛直下向き成分に変換されている。Fig. 9に見られたような $\pm 200\text{nT}$ ~ 300nT に及ぶ変動はほぼ除去された。短周期変動の振幅はXおよびZ成分で 5nT 、Y成分で 10nT 程度となる。X、Z成分については、なおも pitch 角と相関の高い変動が残ることから、AUV の磁化等の補正が不十分である可能性が高い。本装置では、データロガーへの記録の際に、FG 磁力計のデータとジャイロのデータに、ジャイロの出力のタイミングによって両者が数サンプル分ずれることがあり得る。この場合、補正係数の精度に影響を及ぼし、AUV の磁化や誘導磁化の補正に誤差を生じる原因となる。

Fig. 11 (d) は Fig. 11 (a)-(c) と同時に取得された FG2 の磁場データを示す。いずれも AUV の磁化と誘導磁化の

影響が補正されている。FG1 に比べて短周期変動の振幅が大きく、X 成分と Y 成分の振幅は $20\sim 30\text{nT}$ 、Z 成分の振幅は 10nT 程度である。このような短周期変動の大部分は AUV 内部の機器類が生じる人工ノイズであると考えられる。FG1 と FG2 ではノイズレベルが異なるが、FG2 は AUV の尾部に設置されており、付近の垂直スラスト、前後スラスト、水平・垂直蛇等の駆動に関連するノイズが混入した可能性がある。

Dive#96 では、磁気ターゲット付近を通過した際に有意な磁気異常を検出することができた。Fig. 12 にその一例を示す。ここでは、10分間にわたり北西方向に航行しており、4:43から4:44 (UT) にかけて Z 成分で $+55\text{nT}$ に及ぶ磁気異常が検出された。また、地磁気3成分から計算

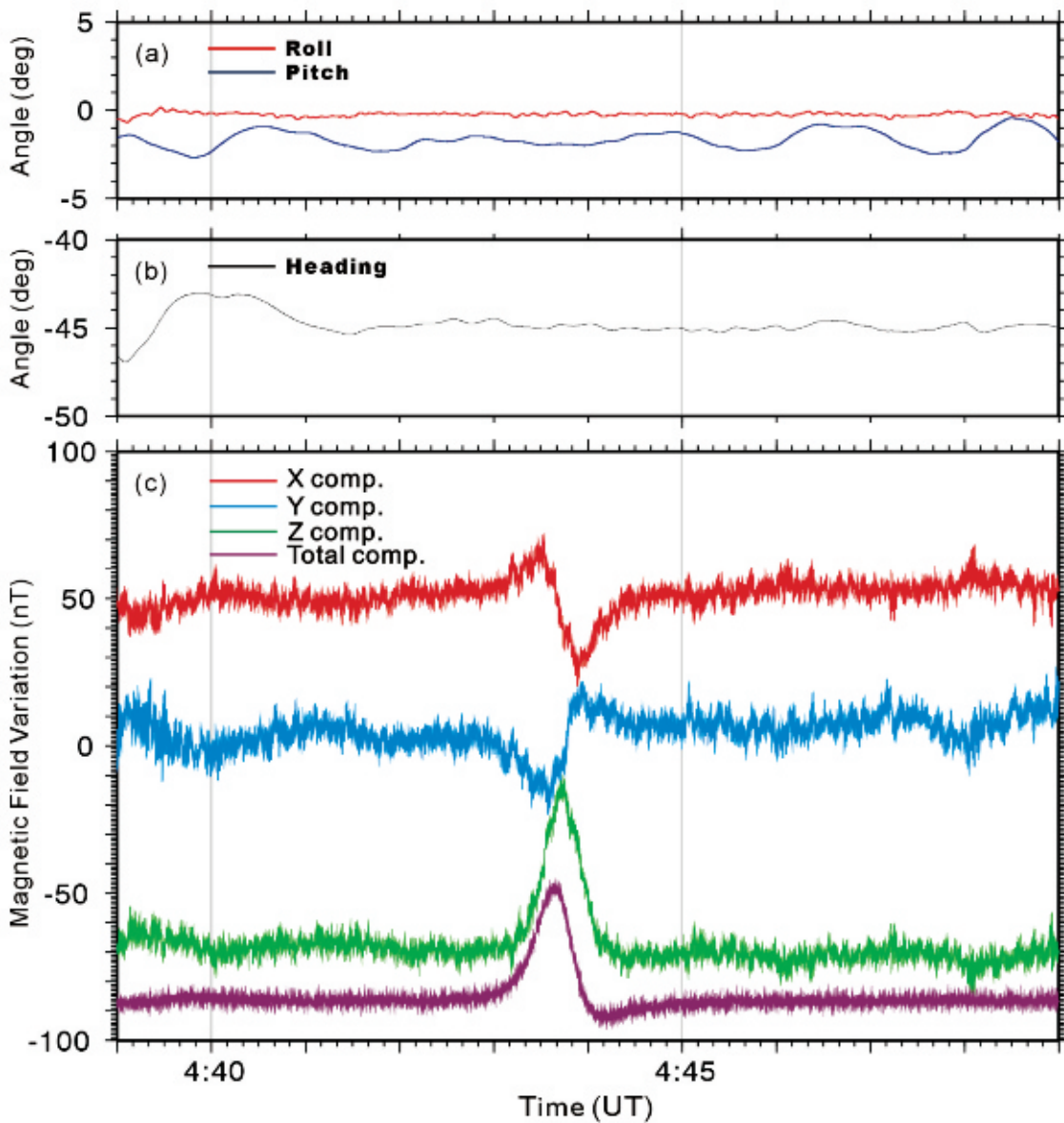


Fig. 12 Time series data of (a) roll and pitch, (b) heading, and (c) magnetic field components, that were acquired in Dive#96. AUV was navigated near the magnetic target at height of about 23 meters.

した全磁力異常は約 38nT となった。このときのサイドスキャンソナーの画像 (Edge Tech Marine Co., Jstar Ver. 8.5 を使用) を見ると、進行方向の右側に約 28m (傾斜距離) の地点に磁気ターゲットと思われる物体が写っている (Fig. 13)。同図から読み取ると、ターゲットに最接近した時の AUV の位置は、高度約 23m、水平距離は約 15m と推測される。

5. 考察とまとめ

本研究では、海洋資源の利用に向けた基盤ツール開発の一環として、海底下の構造を高精度に推定するために、深海で利用可能な精密磁気探査装置の開発を行っている。この磁気探査装置は、自律式無人探査機 (AUV) や曳航式探査システム (ディープ・トゥ, DT) 等に搭載することを想定して開発された。本論文では、2009年7月に実施した海洋研究開発機構の R/V「よこすか」YK09-09 航海で実施した実海域試験のうち、AUV の潜航の概要および取得データを中心に紹介した。同航海では、ネオジム磁石と鉄棒からなる「磁気ターゲット」を海底に設置し、それが作る磁気異常を測定対象とした。また、本装置や探査機の磁氣的ノイズの影響を調べるため、中層において水平航行、8の字航行、波乗り航行を行い、様々な状況における磁場変化のデータを取得した。

海底付近における潜航試験の結果、磁気ターゲットの作

る3成分磁気異常を検出することができた。この磁気異常は海上からでは検出できない非常に小さなものであり、本装置が AUV や DT を利用した高精度な深海磁気探査に有用であることを示している。

Dive#96 では、海底付近で面的に磁場を測定し (Fig. 7)、複数の測線で磁気異常が検出できたため、それらを満たす磁気ターゲットの磁気パラメータをフォワード解析およびインバージョン解析により推定することが可能である。しかし、そのためには、AUV の位置が正しく推定されることが前提である。本試験では、AUV の位置を SSBL で 8 秒ないし 16 秒間隔で測定したが、位置のばらつきは無視できるレベルではなかった。元々、SSBL で求めた位置は傾斜距離の数%の誤差を原理的に含むので、2,000m の深海では 10~20m の誤差となりえる (石川ほか, 2006)。本試験でも、例えば磁気ターゲット近傍を通過した 10 分間 (Fig. 12) の AUV の位置は、Fig. 14(a) のように推定された。これを直線近似して分散をみると、Fig. 14(b) のようになる。およそ $\pm 15\text{m}$ の範囲で分布しており、このときの標準偏差は 8.7m である。一方で、慣性航法装置で推定される AUV の位置は大きくばらつくことはないが、ジャイロコンパスの性質上、時間の経過とともに誤差が蓄積されてゆく。数十分から数時間に一度、音響的手法で位置を補正するが、その際の精度や補正前後の接続方法等の問題が依然として残る。海底熱水鉱床の水平方向の広がり数百メートル程度であり、その空間内で精

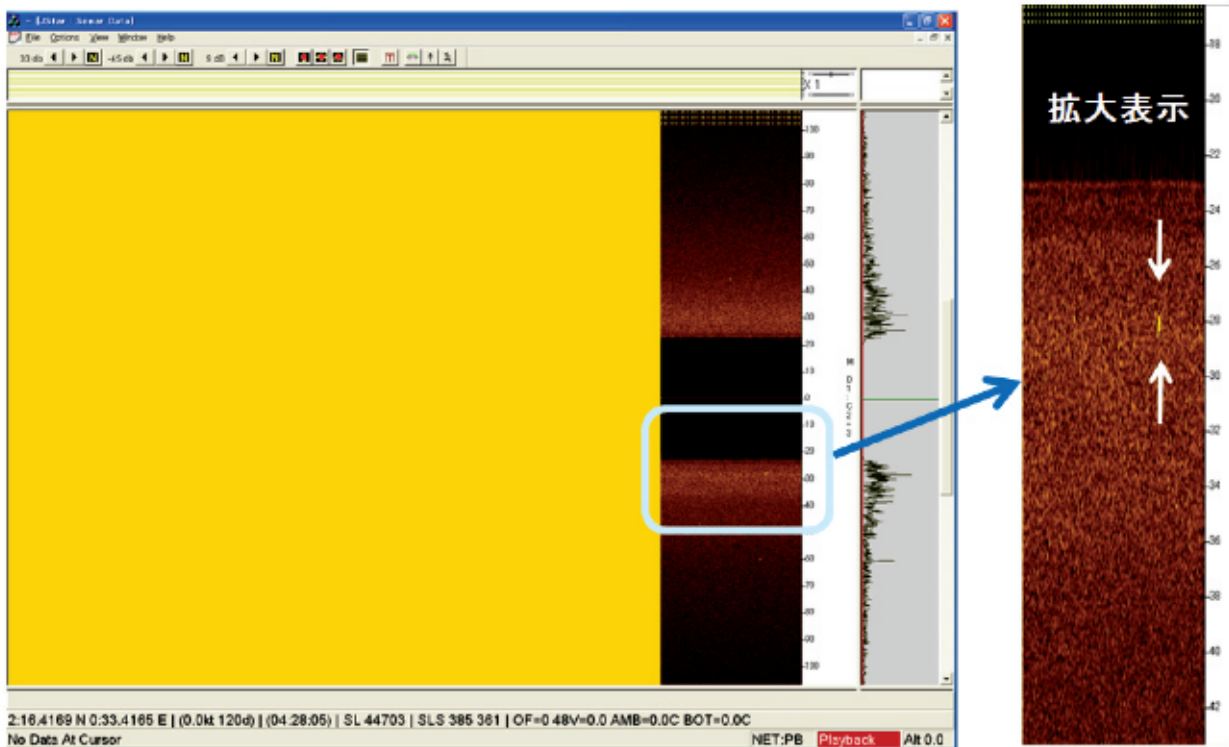


Fig. 13 Image of the ocean floor derived from the side scan sonar. The magnetic target is captured at the slant range of 28 meters.

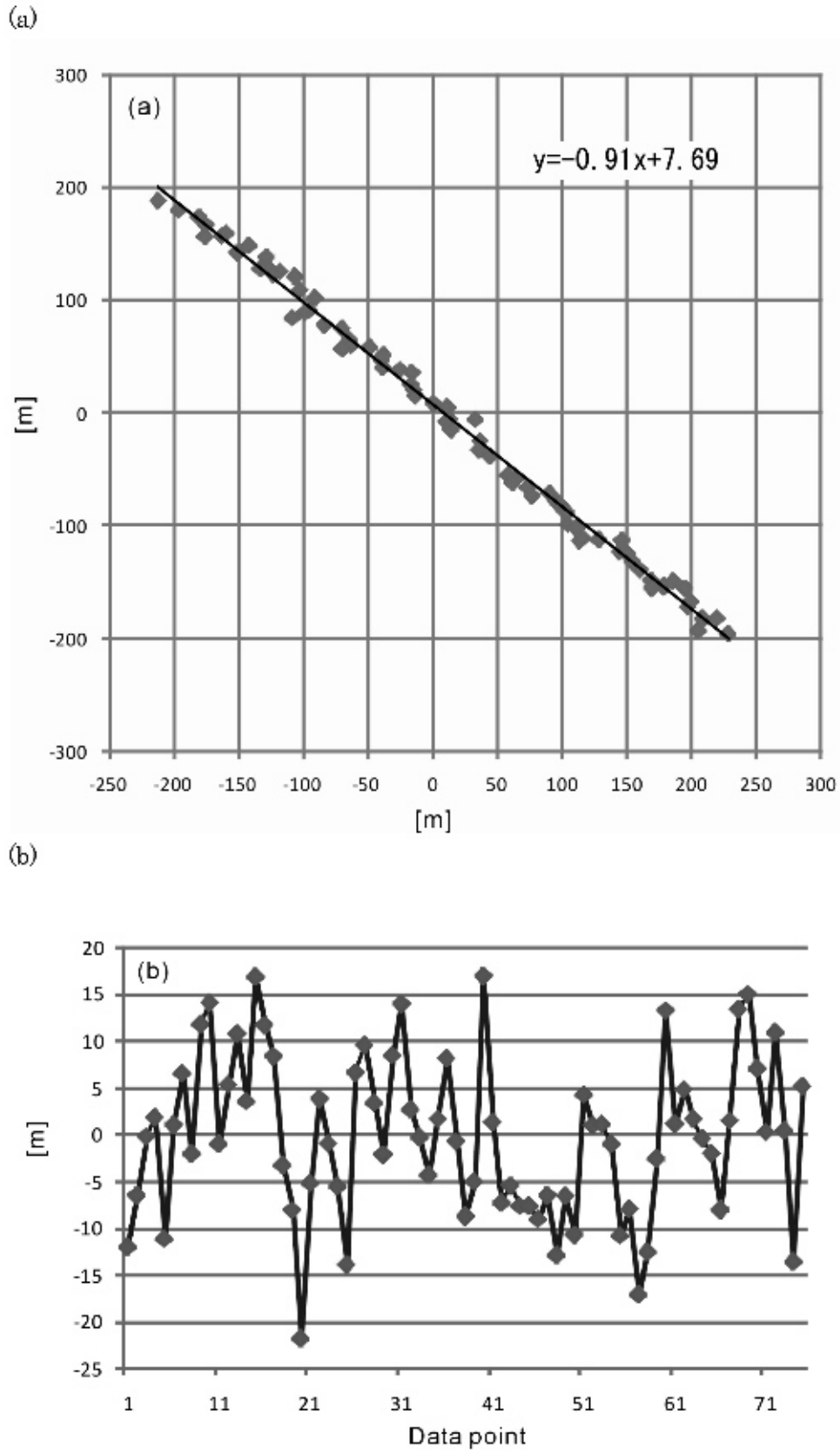


Fig. 14 (a) Track of AUV in the period of 04:39-04:49 (UT) in Dive#96. Positions were measured at every 8 seconds by SSBL. Solid line indicates the regression line. (b) Dispersion of the position of AUV.

密な位置を知る必要がある。したがって、500m～1,000m程度の範囲に複数の音響灯台を設置してLBL (Long Baseline Acoustic Positioning System) により測位する等の措置が必要であろう。

本試験で取得した磁場データから、磁気探査装置やAUVを含めたシステム全体の磁氣的性質を把握することができた。AUVの内部に磁力計センサーを設置することから、AUV自身が作る永久磁化や誘導磁化の影響は免れない。また、AUVの動力となるスラストの動作によって生じる人工ノイズも含まれている。海底下の鉱床の微小な磁化分布を明らかにするためには、これらの磁氣的ノイズを除去する必要がある。8の字航走から得られた補正係数を求めてAUVの永久磁化や誘導磁化の影響を補正したところ、それらのほとんどを除去することができたが、pitch角に相関のある変動がなお残ることから、まだ十分ではない。要因として、ジャイロの追従精度やFGデータとの同期、人工ノイズの混入による補正係数の誤差などの問題が考えられる。また、補正係数は8の字航走のデータから推定されており、波乗り航走時のデータは未使用である。AUVの航行時のAUVのピッチ変化は±25度に及ぶことから、pitch角が大きく変化した場合の補正係数を求める必要がある。一方で、永久磁化や誘導磁化を除去した結果、2台の磁気センサーから人工ノイズレベルの違いが明らかになった。これは、磁気センサーの取り付け位置の違いによるもので、FG1はAUVの頭部付近、FG2はAUVの尾部に取り付けられたことから、FG2はスラストが発生するノイズの影響を顕著に受けた可能性がある。今後、人工ノイズの効果的な除去手法の開発が必要であろう。

本試験では、OVH磁力計で地磁気全磁力の測定を行ったが、ほぼ全潜航時間にわたり正常な測定値とならなかった。OVH磁力計は磁気勾配が大きな場所では正常に磁場を測定できないので、一般に磁性体から距離を離して測定を行う必要がある。本航海ではAUVの頭部にセンサー部を取り付ける形となったため、AUVに搭載された装置類の永久磁化や誘導磁化の影響を受けた恐れがある。今後、AUVにOVH磁力計を搭載する場合は、AUV本体からさらに離して設置するか、もしくは曳航する等の措置が必要である。

今後の課題として、特に①測定機器やデータロガーの時刻精度の改善、②複数の装置のデータ記録の同期方法、③AUVの位置精度の向上、④人工ノイズの除去手法の開発などに取り組む予定である。さらに、伊豆・小笠原などにある海底熱水鉱床を目標とする探査実験を行い、装置の実用性を検証したい。

謝 辞

本試験は、櫻井利明司令をはじめとする「うらしま」お

よびディープ・トゥの運航チーム、さらに請蔵栄孝船長をはじめとする母船「よこすか」乗組員の高度な操船技術により成し遂げられました。また、本航海に献身的に協力して頂きました。海洋研究開発機構および日本海洋事業(株)の関係者各位に御礼申し上げます。さらに、東京大学海洋研究所(現・東京大学大気海洋研究所)の沖野郷子准教授には、AUV「うらしま」への磁力計の搭載に関して多大なるご協力をいただきました。なお、本研究は文部科学省の競争的資金制度による科学技術試験研究「海洋資源の利用促進に向けた基盤ツール開発プログラム」の一環として実施された。

参考文献

- Bhattacharyya, B. K. (1964): Magnetic anomalies due to prism-shaped bodies with arbitrary polarization. *Geophysics*, **29**, 517～531.
- Blakely, R. J. (1995): *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge University Press, New York, 441p.
- 原田 誠, 佐柳敬造, 竹内昭洋, 後藤忠徳, 笠谷貴史, 澤隆雄, 中島崇裕, 長尾年恭, 楠本成寿 (2009a): 磁気異常のフォワードモデリングによる海底熱水鉱床の検出可能性について, 東海大学海洋研究所研究報告, **30**, 59～67.
- Harada, M., K. Sayanagi, T. Kasaya, T. Sawa, T. Goto, N. Tada, H. Ichihara, M. Asada, T. Nakajima, and N. Isezaki (2009b): Development of new exploration tools for seabed mineral resources - Result of R/V YOKOSU-KA research cruise YK09-09 -, American Geophysical Union 2009 Fall Meeting, GP11A-0762.
- International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA), Division V, Working Group VMOD: Geomagnetic field modeling (2005): The 10th Generation International Geomagnetic Reference Field, *Geophysics J. Int.*, **161**, 561～565.
- Isezaki, N. (1986): A new shipboard three component magnetometer, *Geophysics*, **51**, 1992～1998.
- 石川暁久, 青木太郎, 月岡 哲, 吉田 弘, 石橋正二郎, 田原淳一郎, 澤 隆雄 (2006): 自律型無人探査機の位置修正手法の考案, テクノオーシャン2006, pp.1-4.
- Sagawa, M., S. Fujiwara, N. Togawa, H. Yamamoto, and Y. Matsuura (1984): New material for permanent magnets on a base of Nd and Fe, *J. Appl. Phys.*, **55**(6), 1083～2087.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター (2002): 数値地質図「400万分の一東アジア磁気異常図 CD-ROM版(第2版)」, 東・東南アジア沿岸沿海地球科学計画調整委員会(CCOP).
- 佐柳敬造・後藤忠徳・笠谷貴史・澤 隆雄・原田 誠・中島崇裕・長尾年恭・楠本成寿 (2008): 電磁気学的手法を用いた海底資源探査ツール開発の取り組み, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 第24回総会・講演会予稿集, A003-P003.

Sayanagi, K., T. Goto, T. Kasaya, M. Harada, T. Nakajima, T. Sawa, T. Nagao, A. Takeuchi, J. Matsuo, and N. Isezaki (2009a): Development of deep-sea exploration tools for sea floor resources by electrical and magnetic methods, Proc. The 9th SEGJ International Symposium Imaging and Interpretation -Science and Technology for Sustainable Development-, 91.

Sayanagi, K., T. Goto, M. Harada, T. Kasaya, T. Sawa, T. Nakajima, N. Isezaki, A. Takeuchi, T. Nagao, and J. Matsuo (2009b): Development of precise measurement systems for deep-sea electrical and magnetic explorations by ROV and AUV, American Geophysical Union 2009 Fall Meeting, GP21B-02.

要 旨

著者らは、海洋資源の利用に向けた基盤ツール開発の一環として、海底下の構造を高精度に推定するために、AUV や曳航体などを用いた精密磁気探査装置の開発を行っている。本論文では、2009年7月に実施したR/V「よこすか」YK09-09航海における実海域試験のうち、自律式無人探査機「うらしま」(以下、AUV)を利用して行った潜航実験の結果を中心に紹介している。本試験では、ネオジム磁石と鉄棒からなる「磁気ターゲット」を深さ2,058mの海底に設置して、2台のフラックスゲート(FG)磁力計とオーバーハウザー(OVH)磁力計を搭載したAUVを潜航させた。AUVの磁化の影響を除去したところ、磁気ターゲット近傍の高度20~30mにおいて、明瞭な磁気異常を検出することができた。空間分布の特徴は、予め陸上で測定した磁気異常から推定した結果とよく一致した。これは、本装置が深海底でのAUVを用いた磁気探査に有効であることを意味している。一方で、本試験によって、①測定機器やデータロガーの時刻精度の改善、②複数の装置のデータ収録時の同期性の問題、③AUVの位置精度の向上、④人工ノイズの除去手法の開発、⑤OVH磁力計の設置方法等の課題が明らかになった。

キーワード：深海磁気探査、三成分磁力計、自律式無人探査機、海底熱水鉱床