

海底資源探査に向けた磁気探査システムの開発

ー海域および空中試験についてー

原田 誠・佐柳敬造・伊勢崎修弘・竹内昭洋（東海大学）

松尾 淳（OYO インターナショナル）

笠谷貴史・澤 隆雄・浅田美穂・多田訓子・市原 寛（JAMSTEC）

Development of Magnetic Exploration System for Seabed Resources

-Performance test in the AUV/DT and air-borne measurements-

Makoto Harada, Keizo Sayanagi, Nobuhiro Isezaki, Akihiro Takeuchi (Tokai University),

Jun Matsuo (OYO International Co.),

Takafumi Kasaya, Takao Sawa, Miho Asada, Noriko Tada, and Hiroshi Ichihara (JAMSTEC)

Abstract

The authors have developed new precise exploration tools for seabed resources by magnetic method 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). We practiced two experiments both in the deep-sea and sky in order to investigate the performance of developed equipments. In July 2009, we carried out the R/V Yokosuka YK09-09 cruise in Kumano-nada, off Kii Peninsula, Japan. The developed equipments, including two flux-gate (FG) and one Overhauser (OVH) magnetometers and gyrocompass, were set up on the deep-tow (DT) system and AUV Urashima. In the test, we used a magnetic target which is consisted of 25 iron bars and 50 neodymium magnets. The magnetic target was put into water and set at the depth of 2,058 meters. The navigations of AUV and DT were performed at heights about 20-30 meters for AUV and 15 meters for DT. After the effects of the magnetization of platform were properly eliminated, 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. In October 2009, we carried out helicopter-borne magnetic explorations in Aogashima. Two types of FG sensors, GPS equipments and gyrocompass were set up on the towing system. The magnetic data were acquired at altitudes of 150, 450, and 1000 meters. We could obtain the three-components of magnetic anomaly around active volcanic island and inside in the geothermally active caldera. Note that this project has been supported by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) – Japan.

1. はじめに

資源に限られた日本にとって、日本近海の EEZ (排他的経済水域) に潜在する海底資源の有効活用が重要な課題に位置づけられている。これまでに海底資源の賦存量が大まかに推定されているが、商用化のためには鉱量や品位等の賦存状況を詳細に知る必要がある。そのためには、海底下の構造を精密かつ効率よく調べる手法が不可欠であるが、十分に確立されているとは言い難い。著者らは、文部科学省の「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」のもと、「電磁気学的手法を用いた高精度海底地質構造探査ツールの開発」(研究代表者: 佐柳敬造) という課題を設定して、深海底の資源探査を目的とした探査ツールの開発を目指している (Sayanagi et al., 2009)。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 (ディープ・トゥ, 以下 DT) などを用いた電気・磁気探査装置の開発を目的としている。とりわけ AUV や ROV 等の海中ロボットには目覚ましい発展があり、これら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て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」を使って試験潜航を行った。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」、「ディープ・トゥ」を使って試験を行った。また、2009 年 10 月には、青ヶ島においてヘリコプターを使った空中磁気探査実験を実施した。

本論文では、実海域および陸域 (空中) で実施した磁気探査装置の動作・性能試験の概要と取得データおよび初期段階の解析結果の一例を紹介する。

2. システムおよび実験の概要

2.1 システムの概要

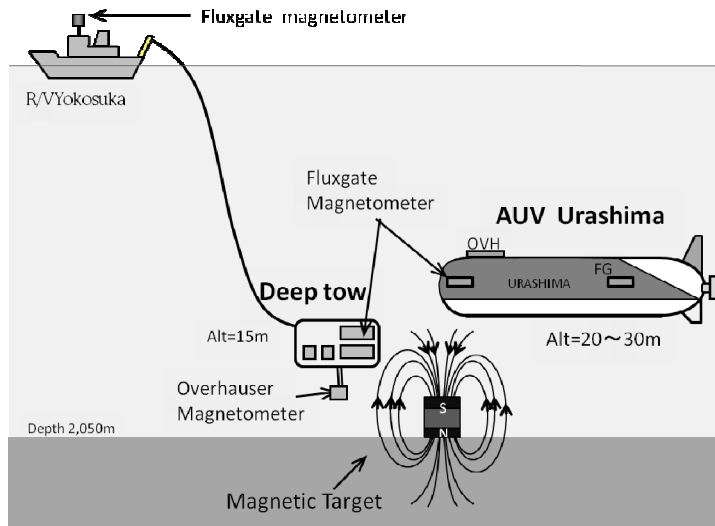
本システムは、2 台のフラックスゲート (以下, FG) 磁力計, 1 台のオーバーハウザー (以下, OVH) 磁力計, 光ファイバジャイロ, 制御・記録部, 通信部, 電源, および船上モニタシステムからなる (Sayanagi et al., 2009)。制御・記録部として ARM 搭載型コンピュータを利用しており, OS として LINUX を採用した。FG, OVH 磁力計およびジャイロデータは Serializer で一本化されて 10Hz 値で制御・記録部に収録される。FG 磁力計およびジャイロデータのサンプリングレートは 10Hz, OVH 磁力計は 4Hz から 10 秒の 6 段階から選択できる。システムの詳細については, 原田ほか (投稿中) を参照されたい。

2.2 実験の概要

2.2.1 海域試験

2009 年 7 月 19 日から 7 月 29 日の JAMSTEC の「よこすか」による YK09-09 航海 (首席: 笠谷貴史) において, 磁気探査装置の動作・性能試験を実施した。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。試験海域の地形は, 水深が約 2,060m でほぼ平坦であり, 同海域の地磁気異常は 50~60nT 程度である。

本実験の概念図を第 1 図に示す。磁気探査装置を自律航行型探査機 (AUV)「うらしま」と曳航式探査システム (Deep-tow, 以下 DT) に搭載して, 約 2,000m の海底近傍で磁場 3 成分および地磁気全磁力を測定する。AUV の潜航ではさらに深さ 1,000m において水平航行, 8 の字航行, “波乗り航行” (ピッチを ±25 度の範囲で大きく振る) を行い, プラットフォームの永久磁化・誘導磁化の他, 人工ノイズの



第1図 AUVおよびDTの潜航実験の概念. AUVとDTは別々に潜航を行う.

Fig.1 Concept of experiment in the AUV & DT navigations. The navigations of AUV and DT are individually practiced.

影響を測定する. 本実験では, FG, OVH センサの性能の評価およびプラットフォームの運航上の制約等を把握するため, 人工的な磁気異常体 (50 個のネオジウム磁石と 25 本の鉄棒からなる. 以下, 磁気ターゲット) を海底に設置してその周辺を潜航することで磁気異常の検出を試みた.

AUV および DT の実験は, それぞれ 2 回ずつ行われた. AUV には 2 台の FG センサと OVH センサが搭載され, ジャイロデータは AUV に搭載された慣性航法装置のデータを同期して記録した. AUV の潜航実験 (Dive#95, Dive#96) 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) の後, 中層 (深さ 1,000m) において水平航行, 8 の字航行, 波乗り航行を行い, 旋回下降の後海底に達した. SSBL (Super Short Base Line Positioning System) による AUV の位置測定は 8 秒間隔で行われた. Dive#95 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 ノットの定高度航行が行われた. Dive#96 では磁気ターゲットを中心とする花びら状に設定され, 高度は 20~30m, 速度 1.5~2.0 ノットで水平航行を行った.

DT の曳航実験では, 磁気ターゲットを中心とする東西 800m (Dive#69), 南北 800m (Dive#70) 測線においてフレーム部を曳航した. DT フレーム部には 2 台の FG センサおよびジャイロが取り付けられ, Dive#69 では海底高度 3~5m を速度 1~2 ノットで曳航した. Dive#70 では OVH センサを DT フレーム部の下方 10m に吊り下げ, OVH センサを高度約 5m で曳航した.

2.2.2 空中試験

人工ノイズが少ない環境での磁気探査装置の性能・動作試験と海底熱水鉱床と類似した特徴をもつカルデラ地形内外での磁気探査実験を目的として, ヘリコプターを利用した空中磁気探査実験を行った. 空中試験は, 青ヶ島 (東京都青ヶ島村) における空中磁気探査を本試験として, 事前に安全確認を目的とした試験飛行を富士山麓 (富士宮市) で行うことで, 2 回実施された.

DT フレーム部 (千葉大学所有, Isezaki and Matsuo, 2009) に本磁気探査システムの FG センサとジャイロ, 千葉大学所有の FG センサを設置し, Trimble 社 (千葉大学所有) および NAVCOM 社の

GPS 測位装置 (StarFire, GNSS : 衛星測位技術 (株) 所有) を同時搭載した。DT フレーム部はヘリコプターから約 45m のロープで吊り下げられ、フレーム部に搭載された制御・記録部やパソコンに収録されたデータ (FG センサ, ジャイロ等) は無線 LAN を利用してコックピット上のノートパソコンからリアルタイムでモニタされた。

(1) 富士山麓における安全確認飛行

富士山麓 (大沢第二場外, 富士宮市) における安全確認飛行は, 2010 年 10 月 1 日に実施された。安全確認飛行では, 青ヶ島で実施する磁気探査実験を想定して, 速度 80~120km/h の巡航, 径 500m の旋回, 8 の字航行等の飛行試験が行われた。また, 海域試験で使用した磁気ターゲットと同等のものを設置し (標高 650m), その上空 5m~20m において曳航体を左右に揺らしながらホバリングを行った。

(2) 青ヶ島における空中磁気探査

本磁気探査装置を利用した青ヶ島における空中磁気探査は, 2009 年 10 月 21 日および 10 月 30 日の 2 回に渡って実施された。飛行測線として, ①青ヶ島を中心とした東西 7km, 南北 10km のエリアで東西方向に 500m 間隔で設定した南北方向の 14 測線 (高度 150m, 450m, 1,000m の 3 面), ②青ヶ島カルデラ縁の周回測線, ③カルデラ内部の周回測線, ④東西 2 測線, の 4 通りを予定測線として設定した。このうち, ①では 2006 年に実施された空中磁気探査 (松尾, 2009; 松尾ほか, 2009; Isezaki and Matsuo, 2009) での測線とは飛行高度を変えて, さらに東西方向に 250m ずらした。1 フライトにつき 1 高度の測線を飛行し, 離陸後測線に入る直前に高度 600~800m の海上で 8 の字飛行を行った。

3. 実験結果

3.1 海域試験

3.1.1 AUV を用いた試験の結果

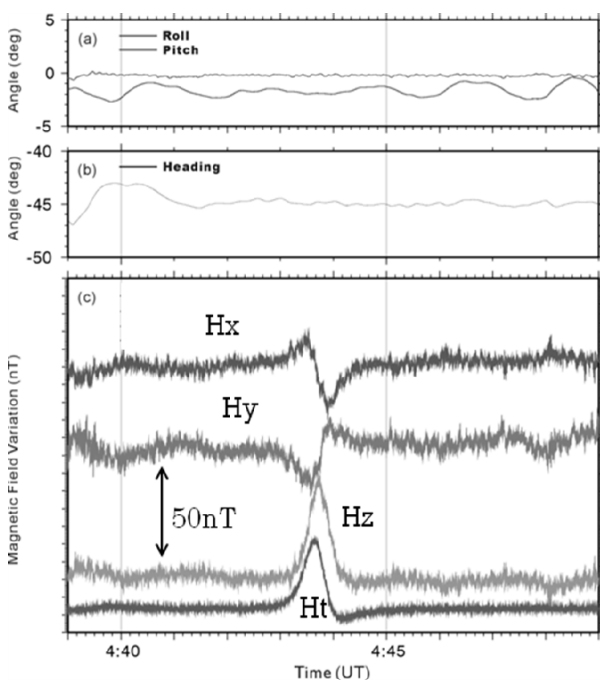
2 回の AUV 潜航実験により, 3 成分磁場データ (H_h : 進行方向成分, H_s : 右向き成分, H_v : 下向き成分) およびジャイロデータ (Heading, Roll, Pitch) を取得できた。磁場データに含まれる人工ノイズレベルは FG センサの取り付け位置に依存しており, 先端付近で 5~10nT, 尾部で 20~30nT 程度であった。尾部の FG センサは付近の垂直スラスト, 前後スラスト, 水平・垂直舵等の駆動に関連するノイズの影響を受けたと思われる。8 の字航走時の磁場・ジャイロデータから Isezaki(1986)の方法で AUV の永久磁化・誘導磁化の影響を除去したところ, AUV の方位・姿勢変化に関連する磁場変動を概ね除去できた。

AUV 潜航実験では, ターゲット直上を通過する花びら状の測線を潜航することで, 複数の測線で磁気ターゲットの作る磁気異常を検出することができた。第 2 図に AUV の磁化の影響を除去した結果検出された 3 成分磁気異常 (H_x , H_y , H_z) と全磁力変換値 H_t の一例を示す。同時間帯では南東-北西の針路をとっており, 高度計やサイドスキャンソナーの画像から, 海底高度約 23m を航行しており, 磁気ターゲットから約 15m の距離を通過したと推定された。4:43 (UT) 頃に H_z 成分で約 38nT の磁気異常が検出されている。

一方で、OVH 磁力計の地磁気全磁力データは、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 の運航の安全上、AUV の頭部にセンサ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磁化の影響を受けた恐れがある。

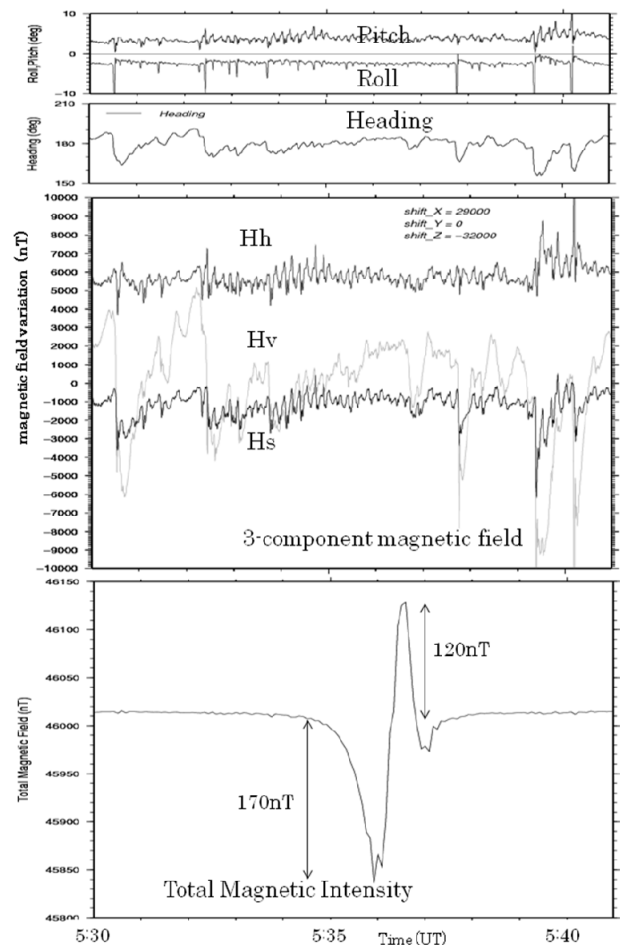
3.1.2 DT を用いた試験の結果

DT を用いた実験では、FG 磁力計のデータは AUV と比較してノイズの影響が大きく、ノイズの除去および DT の永久磁化・誘導磁場の除去等の処理を難しくしている。Dive#70 では、磁気ターゲットが作る磁気異常の検出を目指して、南北方向に 4 往復の曳航試験が行われた。このうち、3 回において磁気ターゲットが作る有意な磁気異常が検出された。第 3 図にジャイロデータ (heading, roll, pitch)、



第 2 図 AUV 実験において磁気ターゲットの近傍で測定された ジャイロ (Heading, Roll, Pitch) および磁場 3 成分 (Hx, Hy, Hz) と全磁力変換値 Ht.

Fig.2 Gyro data (Heading, Roll, and Pitch), three-components (Hx, Hy, and Hz) and total intensity Ht of magnetic anomaly caused by the magnetic target in the AUV Dive#96 navigation.



第 3 図 DT 実験において磁気ターゲット近傍で取得された、ジャイロおよび磁場 3 成分 (Hh, Hs, Hv) データ。

Fig.3 The data of gyro (Heading, Roll, and Pitch), three-components of magnetic field (heading, starboard, vertical down), and total magnetic intensity. Magnetic anomaly generated from the magnetic target is clearly detected during the period of 5:35 ~ 5:38 (UT).

FG センサの磁場 3 成分 (Hh, Hs, Hv) および OVH センサの地磁気全磁力を示す。この測線では、DT は北から南へ曳航されており、5:33 頃から磁気ターゲットによる磁気異常が検出された。その後、5:35 にかけて磁気ターゲットに最接近したが、磁気異常の最大値は正異常で+120nT、負異常で-170nT に達した。その後、5:38 頃まで磁気異常が見られた。

磁気ターゲットに最接近したときの OVH センサとの位置関係を見積もるため Bhattacharyya (1964), Blakely (1995) に基づき、磁化物体の作る磁気異常の空間分布をフォワードモデリングによって計算した。モデリングの結果、センサ高度を 5m と仮定すると、ターゲットの東側もしくは西側 7~8m 程度の距離を通過したと推定された。また、磁気ターゲットの磁化強度は約 200,000A/m と見積もられた。

3.2 空中試験

3.2.1 富士山麓における試験飛行

約 36 分間の試験飛行が行われた。離陸後、はじめに 14 分間にわたり磁気ターゲットの上空で磁気ターゲットの作る磁気異常を測定した。その後、加速および上昇して最大 110km/h、高度 930m まで達した。この間、高度 930m で 1 分 40 秒にわたり 8 の字飛行を行った。地上待機組は、磁気ターゲット直上の測定の直後から磁気ターゲットを撤収し、磁気的影響の及ばぬ位置まで移動した。8 の字飛行の後、磁気ターゲットの測定を行った場所に移動し、磁気ターゲット撤去後の磁場を測定した。第 4 図に、離陸直前から着陸直後までのジャイロおよび磁場 3 成分 (Hh, Hs, Hv) および全磁力変換値 Ht の時系列データを示す。Ht を見ると、T=240 秒において+4,400nT に及ぶ磁気ターゲットが作る磁気異常が検出されている。

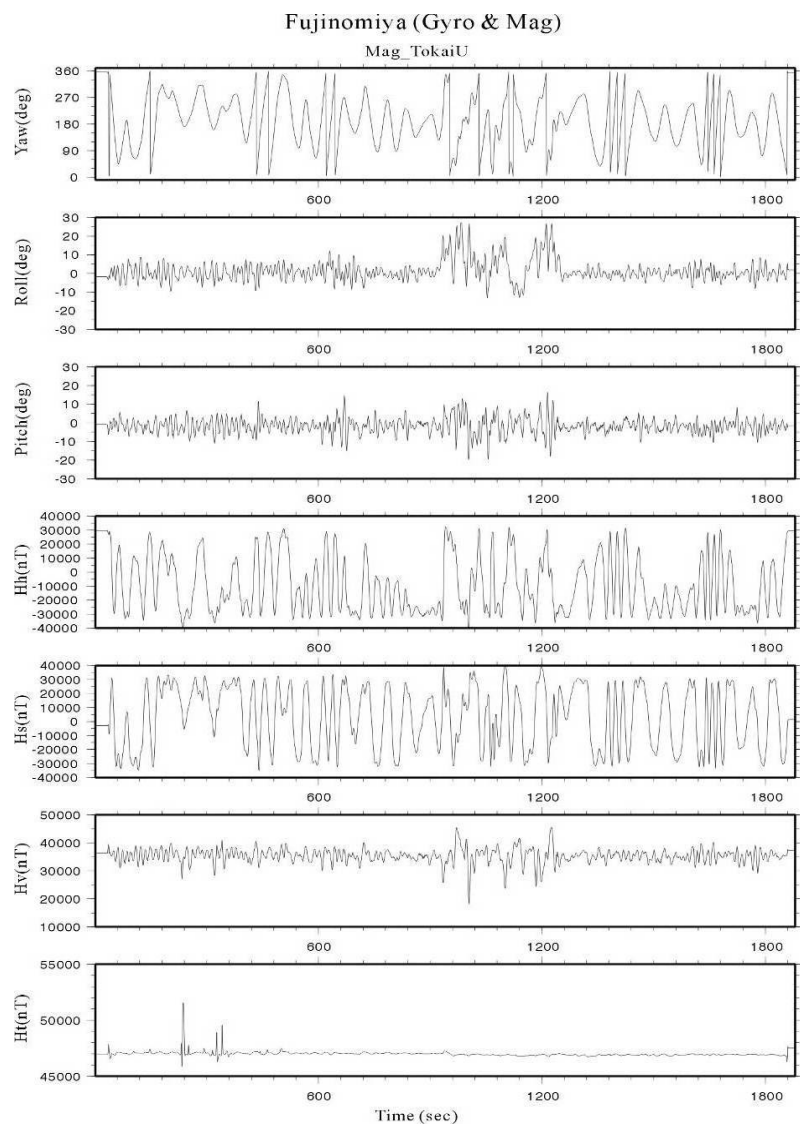
3.2.2 青ヶ島における空中磁気探査

10 月 21 日および 30 日の両日で、高度 150m、450m、1,000m の 3 層における南北測線、カルデラ縁上空およびカルデラ内部における磁場・ジャイロ・測位データを取得できた。一例として、第 5 図に高度 150m 測線を飛行した際のジャイロおよび磁場 3 成分 (Hh, Hs, Hv) の時系列データを示す。

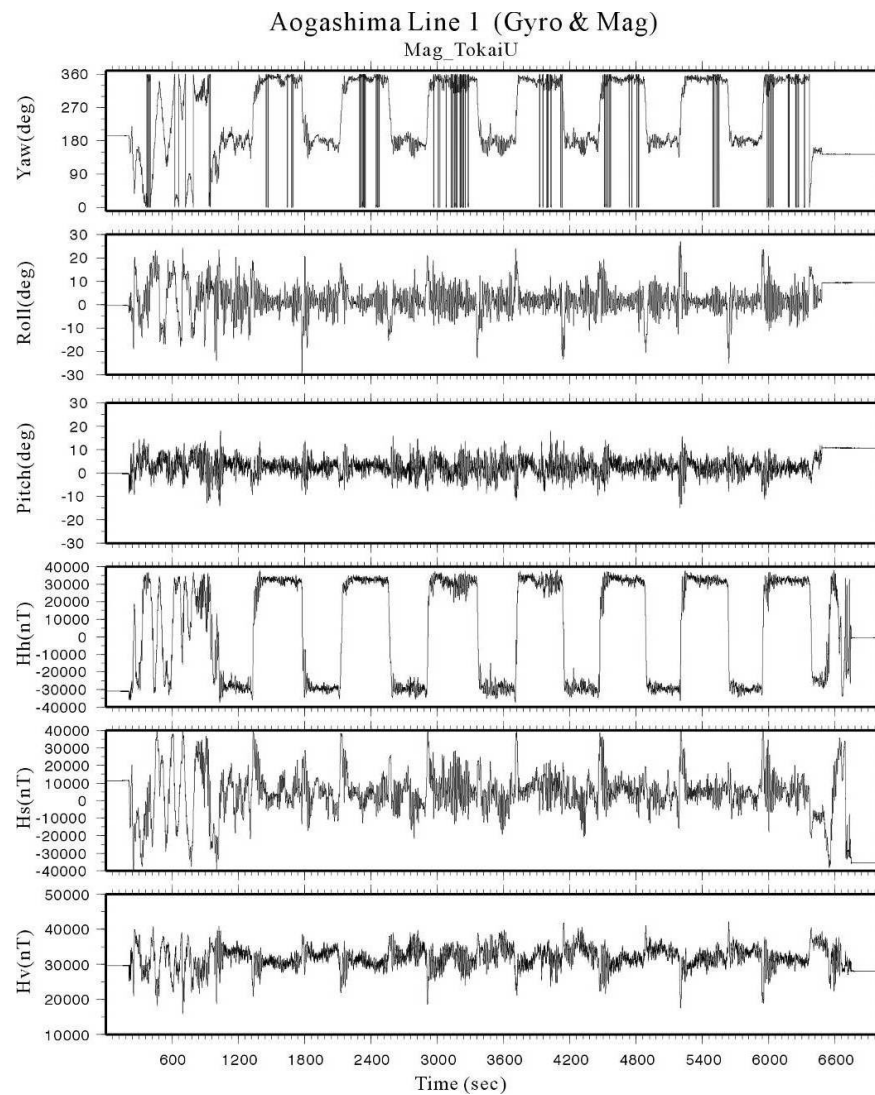
4. まとめ

本研究では、「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、海底下の構造を高精度で推定するために、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 (DT) 等に搭載することを想定して開発された。本論文では、陸域 (空中) および海中で実施した磁気探査装置の動作・性能試験の概要と取得データの一例を紹介した。

実海域試験では、AUV や DT の運用に伴う磁気的ノイズの影響を調べるため、水平航行、8 の字航行、波乗り航行を行い、様々な運用条件下における磁場データを取得した。人工的な磁気異常源 (磁気ターゲット) を海底に設置して、その周囲で AUV や DT を潜航させることで、磁力計・ジャイロ・測位装置を組み合わせたシステム全体の性能、プラットフォームの運用上の制限や効率的な探査工程等を把握することができた。一方で、プラットフォームの測位精度の向上や人工ノイズの除去法の開発等の課題も明らかになった。



第 4 図 富士山麓の飛行実験で得られたジャイロおよび磁場 3 成分 (Hh, Hs, Hv) および全磁力変換値 (Ht).
 Fig.4 Observed gyro (Heading, Roll, Pitch), three-components of magnetic data (Hh, Hs, Hv) and total magnetic intensity (Ht).



第 5 図 青ヶ島における磁気探査 (高度 150m 測線) で得られたジャイロおよび磁場 3 成分 (Hh, Hs, Hv).
 Fig.5 Gyro (Heading, Roll, Pitch) and magnetic data (Hh, Hs, Hv) obtained at the altitude of 150m.

青ヶ島と富士山麓での空中磁気探査実験では、人工ノイズレベルの低い環境、高精度な測位装置の搭載という好条件下において磁場データを取得した。磁気ターゲットの上空で3次元的に取得されたデータから、システム全体のより精細な性能評価が期待される。加えて、本実験ではカルデラ内部で海底熱水鉱床の探査を想定した模擬的な測定を行うことができた。将来的に行う海底熱水鉱床をターゲットとする磁気探査に向けて、データ解析・解釈法の確立を目指したい。また、青ヶ島では2006年12月に空中磁気探査が行われ、3次元磁化構造モデルが推定されているが(松尾, 2009; 松尾ほか, 2009, Isezaki and Matsuo, 2009), 本実験データと併せることで磁化構造モデルの高分解能化を図りたい。

5. 謝 辞

海域試験においてお世話になりました、「よこすか」乗船員の皆様、空中試験においてお世話になりました、中日本航空(株)の皆様にご感謝申し上げます。また本実験にご支援・ご協力いただきました、川畑広紀氏、野木義史博士、沖野郷子博士、ならびに(独)海洋研究開発機構、日本海洋事業(株)、OYO インターナショナル(株)、(有)テラテクニカ、海洋電子(株)、GNSS: 衛星測位技術(株)、(有)青ヶ島整備工場の関係者各位に御礼申し上げます。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., Magnetic anomalies due to prism-shaped bodies with arbitrary polarization. *Geophysics*, Vol. 29, pp. 517-531, 1964.
- Blakely, R. J., *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge University Press, New York, 441p, 1995.
- 原田 誠, 佐柳敬造, 伊勢崎修弘, 笠谷貴史, 澤 隆雄, 浅田美穂, 多田訓子, 市原 寛, 後藤忠徳, 野木義史, 大西信人, 松尾 淳, 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-, 東海大学紀要海洋学部-自然と文化, Vol.8, No.2, 投稿中.
- Isezaki, N., A new shipboard three component magnetometer, *Geophysics*, Vol. 51, pp. 1992 - 1998, 1986.
- Isezaki, N., and J. Matsuo, Magnetization structure of Aogashima Island using vector magnetic anomalies obtained by a helicopter-borne magnetometer, *Exploration Geophysics*, Vol. 40, No. 1, pp. 17-26, 2009.
- 気象庁編, *日本活火山総覧(第3版)*, 635p, 2005.
- 小林亥一, *青ヶ島島史*, 緑地社, 601p, 1980.
- 松尾 淳, 青ヶ島火山体磁化構造の研究-地磁気3次元3成分異常の応用-, 千葉大学大学院自然科学研究科, 学位(博士)論文, 57p, 2009.
- 松尾 淳, 伊勢崎修弘, 津久井雅志, 藤本博巳, 三成分地磁気異常による青ヶ島火山帯内部の磁化構造の研究, *Conductivity Anomaly 研究会 2009年論文集*, pp.96-103, 2009.
- Sayanagi K., T. Goto, M. Harada, T. Kasaya, T. Sawa, T. Nakajima, N. Isezaki, A. Takeuchi, T. Nagao, and J. Matsuo, Abstract of AGU 2009 Fall Meeting, GP21B-02, 2009.