

海底資源探査に向けた磁気探査システムの開発 —AUV を用いた海域試験について—

佐柳敬造・原田誠・伊勢崎修弘（東海大学）・笠谷貴史・澤隆雄・浅田美穂・多田訓子・
市原寛（海洋研究開発機構）・松尾淳（OYO インターナショナル）

Development of precise magnetic exploration system for seabed resources: Preliminary result of test in sea area using AUV

Keizo Sayanagi, Makoto Harada, Nobuhiro Isezaki (Tokai University),
Takafumi Kasaya, Takao Sawa, Miho Asada, Noriko Tada, Hiroshi Ichihara (JAMSTEC),
and Jun Matsuo (OYO International Co.)

Abstract

Sea-floor hydrothermal deposits have recently focused renewed attention behind rapid changes in the international situation for natural resources (e.g., increased competition of resources development) in order to maintain a stable supply of the resources. It is, however, difficult to estimate accurate abundance of those resources. One of the reasons is considered that effective methods for such exploration have not been well established. The most promising solution to those problems is considered to be geophysical surveys near the sea floor. With these points as a background, a development program of fundamental tools for exploration of deep seabed resources was started with the financial support of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science & Technology (MEXT) in 2008. Our project has carried out as a part of the program. In this project, we are developing new electrical and magnetic exploration tools for sea floor resources using AUV (Autonomous Underwater Vehicle), ROV (Remotely Operated Vehicle), and deep-tow system in order to estimate sea-floor structure precisely. The present stage of the development has been tests of basic performance for each exploration system after manufacturing a prototype one. The magnetic exploration system was tested in the Kumano Basin during the R/V Yokosuka cruise in July, 2009. AUV "Urashima" and towing vehicle "Yokosuka Deep-Tow" (both are JAMSTEC vehicles) were used in the tests. The tests gave us basic data of the system for the platforms and the confirmation of their performance. Particularly, we successfully obtained vector magnetic field data in measurements using the AUV and total magnetic field data in ones using the towing vehicle. We will here report the outline of the project and preliminary result of the test using AUV.

1. はじめに

近年の主にアジア圏での急速な経済発展は、エネルギー・鉱物資源の需要を高め、それらの価格の高騰や開発競争の激化、資源ナショナリズムの台頭をもたらしている。陸上の天然資源に乏しい日本にとって、資源の確保・安定供給は、国民生活や産業の持続的な発展に極めて重要な課題である。ここで注目されるのが、世界第6位の面積をもつ我が国の排他的経済水域の海底資源である。これまでの調査か

ら、海底には海底熱水鉱床やメタンハイドレートなどの様々な資源があることがわかってきた（大岡，2008）。また、海底資源を巡る国際法および国内法も整えられてきた（Ushio，2008）。例えば、国連海洋法条約が1982年に採択、1994年に発効され、日本では1996年に批准された。またそれに伴って国内法も整備され、2007年に海洋基本法が施行された。これらの状況は、海底資源を魅力的なものにしているが、産業に結び付けるにはまだ多くの課題がある。その最初のハードルが、海底資源の賦存量を正確に推定することである。

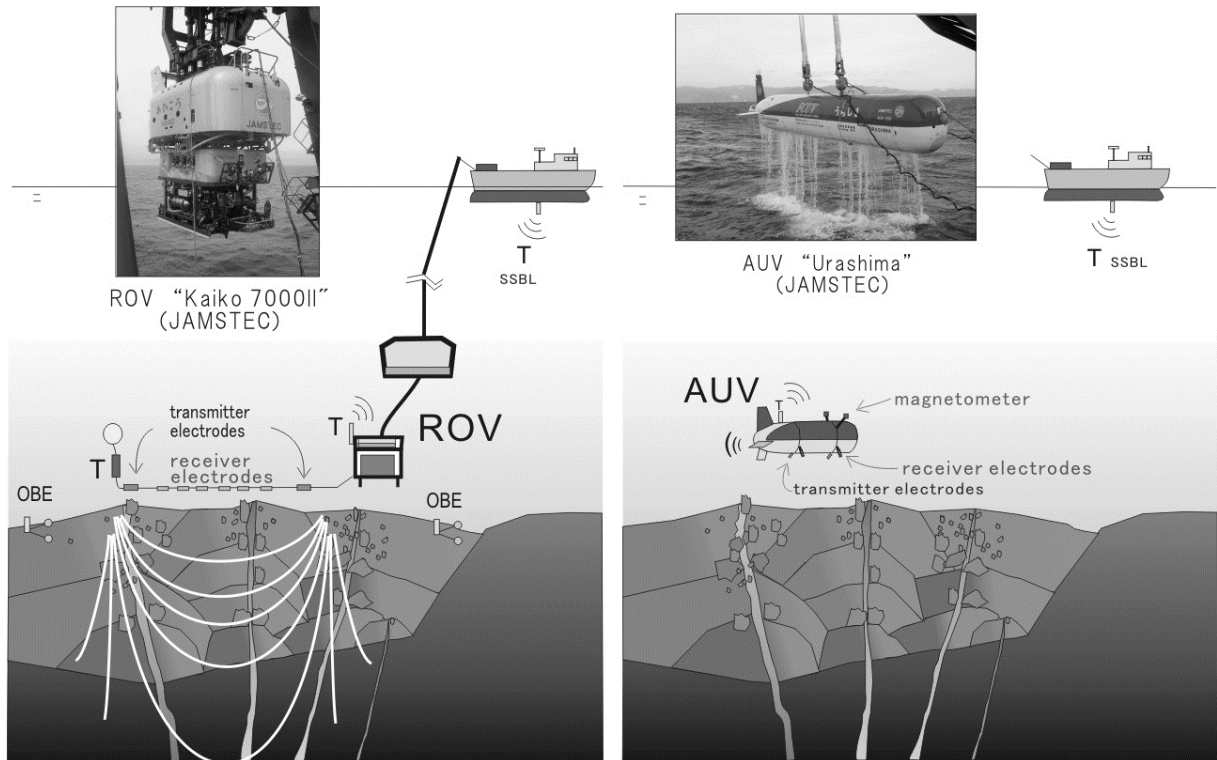
このような背景のなか、文部科学省の競争的資金制度のもとで、2008年度より「海洋資源の利用促進に向けた基盤ツール開発プログラム」が開始された。我々は、このプログラムの一環として、「電磁気学的手法を用いた高精度海底地質構造探査ツールの開発」に取り組んでいる。具体的には、自律式無人探査機（AUV）や有索式無人探査機（ROV）、深海曳航体を使った磁気探査装置および電気探査装置を開発している。ここでは、開発計画の概要とAUVを用いた磁気探査装置の海域試験について報告する。

2. 開発計画の概要

本開発計画の目的は、賦存量推定の基礎情報となる海底下の地質構造を高精度で探査するための基盤技術を開発することである。調査の対象となる主な地質（海底資源）は、海底熱水鉱床である。これまでの海底熱水鉱床の調査では、海底掘削や海底地形調査、海上からの重力、磁気、地震探査などが行われてきた。海底掘削は鉱床の有無や品位を直接調べることができるが、多大な時間と労力が必要であり、また鉱床の底まで到達できるとも限らない。他の海上物理探査は海底掘削と比べて容易であるが、水深500メートルから3,000メートルに存在する海底熱水鉱床の分布を、数メートルから数十メートルの精度で明らかにするのは困難である。

このような問題を解決するためには、海底近傍で物理探査を行うのが有効であろう。海中技術や陸上での物理探査技術はコンピュータの発展と共に着実に進歩している。海中技術では、ROVやAUV等の技術がここ数年で著しく発展してきた。陸上での金属探査では、探鉱・開発の進展の中で、磁気探査や電気探査などの物理探査の重要性が増すと共に、その技術も高度化してきた（荒井，2008；物理探査学会，1998）。我々は、こうした点に着目し、海底熱水鉱床の探査には、上記の無人探査機と電気・磁気探査法を組み合わせる方法が有望であると考えた。第1図に、開発中の探査ツールを用いた海底熱水鉱床探査のイメージを示す。

開発内容は、1）磁気探査システム、2）電気探査システム、3）データ解析システムの3つのテーマから構成される。これらのテーマを通して、次の技術開発を目指している：1）高分解能かつ高速サンプリングで磁場および磁場勾配を計測する技術、2）S/Nを向上するために強度の高い信号や精密に制御した信号を送信する電気探査技術、3）浅部（～20m）から深部（～100m）までの構造探査に対応できる電気探査技術、4）ROV・AUV・ROV・深海曳航体のマルチプラットフォームに搭載可能な汎用型の磁気・電気探査システム、および5）海底熱水鉱床探査のためのデータ処理・解析システムの要素技術。

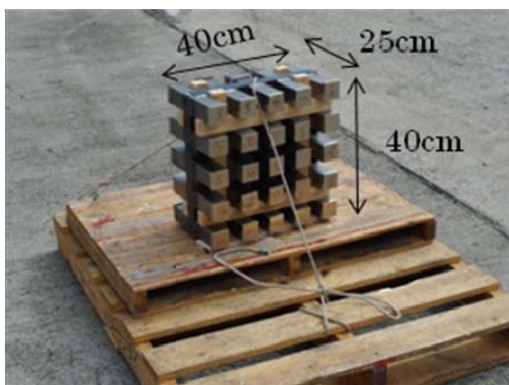


第 1 図 開発中の探査装置を用いた海底熱水鉱床探査の概念図. AUV「うらしま」の写真：海洋研究開発機構提供

Fig.1 Illustration of exploration of a sea-floor hydrothermal deposit using new instruments. Photo of AUV "Urashima" was provided by JAMSTEC

3. AUV を用いた磁気探査装置の海域試験

2009 年 7 月、深海潜水調査船支援母船「よこすか」による YK09-09 航海において、AUV「うらしま」および深海曳航体「よこすかディーブ・トウ」を使って磁気探査装置の海域試験を行った。試験海域は、紀伊半島沖の熊野海盆の南西部であった。地形は平坦で、水深は 2060m であった。また、磁気異常およびその勾配が小さい海域を選んだ。



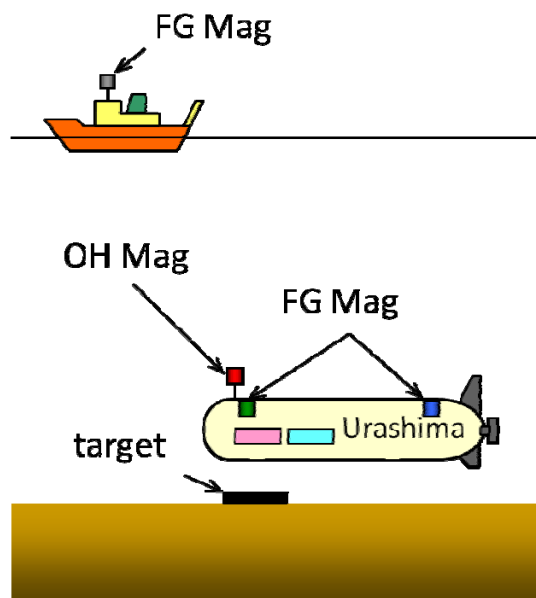
第 2 図 よこすか YK09-09 航海の海域試験で使用した磁気ターゲット

Fig. 2 Magnetic target used in the tests during YK09-09.

磁気探査装置は、2 台のフラックスゲート型磁力計と 1 台のオーバーハウザー型磁力計、光ファイバジャイロ、本体（制御部、記録部、通信部等）、および船上装置からなる。測定間隔は、オーバーハウ

ザー型磁力計データが 4Hz から 10 秒で、それ以外はすべて 10Hz である (原田ほか, 査読中)。なお, AUV での試験では, 搭載スペースの制限から光ファイバジャイロは搭載せず, AUV に常設されているリングレーザージャイロのデータを本体に入力するようにした。

試験は以下のようにして行った。まず鉄棒とネオジム磁石で作った磁気ターゲット (第 2 図) を磁化方向が下向きになるように海底に設置した。次に第 3 図のように磁気ターゲットの近傍を高度 20~30m で航走し, 磁気ターゲットが作る磁気異常を測定した。同航海では, このような試験を 2 回行った。なお, 試験方法の詳細については, 原田ほか (査読中) と本論文集の原田ほかに記載されている。

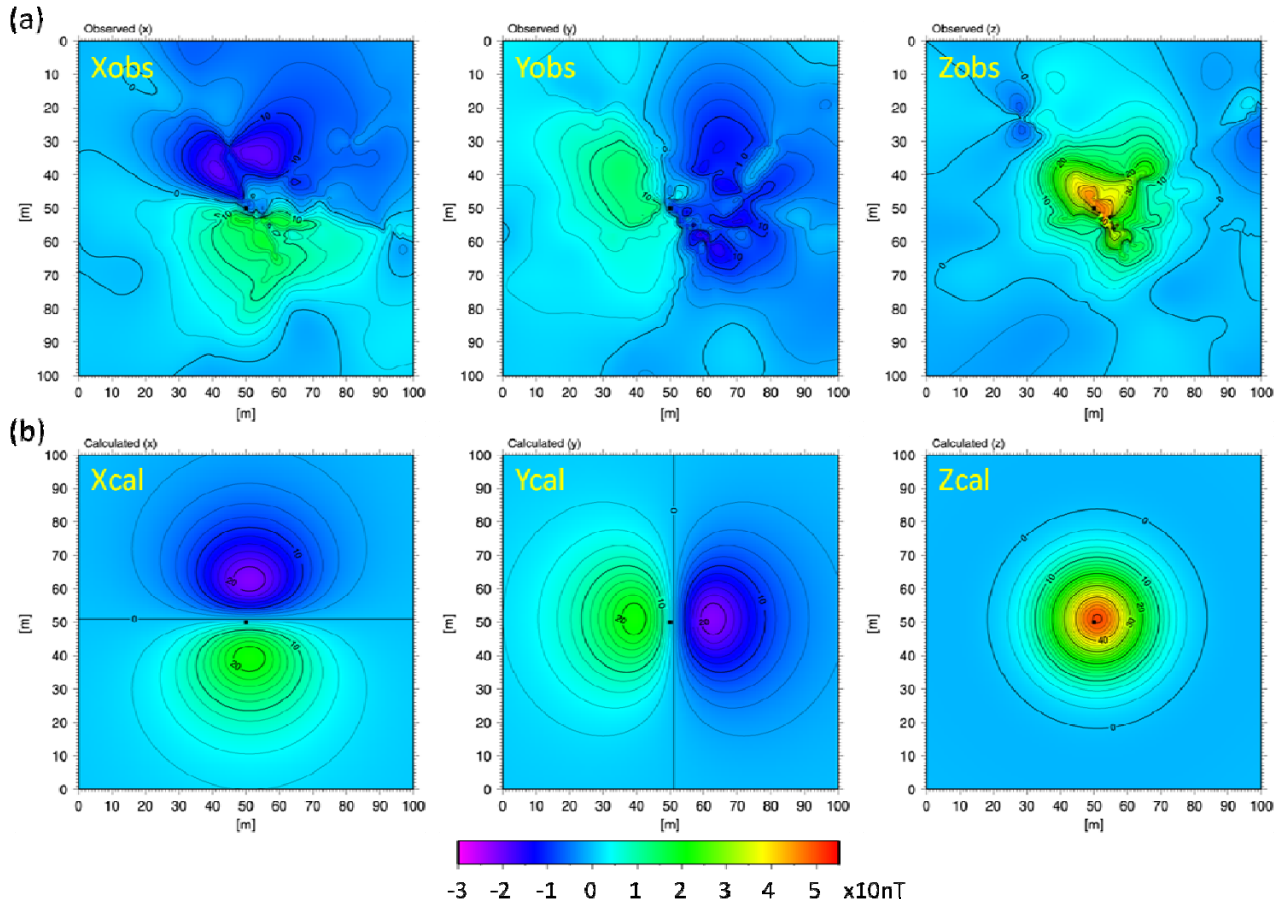


第 3 図 AUV「うらしま」を用いた磁気探査装置の性能試験概念図。FG Mag : 三成分フラックスゲート型磁力計, OH Mag : オーバーハウザー型磁力計, target : 磁気ターゲット

Fig. 3 Configuration of the performance test of magnetic exploration system using AUV URASHIMA during the R/V YOKOSUKA YK09-09 cruise. FG Mag: 3-component fluxgate magnetometer, OH Mag: Overhauser (total intensity) magnetometer, target: magnetic target.

第 4 図 (a) は測定された 3 成分磁気異常のコンター図である。磁気ターゲットは図の中心に■で示している。X 成分 (北向き成分) では北側に負の異常, 南側に正の異常があり, Y 成分 (東向き成分) では東側に負の異常, 西側に正の異常がある。Z 成分 (下向き成分) では中心に正の異常が分布し, 外側に負の異常が取り囲んでいる。このような分布は, 今回の磁気ターゲットのように下向きの磁化が作る磁気異常の特徴である。それを確かめるために, 鉛直下向きに 20 万 A/m に磁化した 25 立方 cm の磁化物体が作る磁気異常のフォワード計算を行った。その結果を第 4 図 (b) に示した。これは第 4 図の (a) と非常に調和的である。このことから, 定性的ではあるが, 開発した磁気探査装置を使って AUV による磁気三成分測定が十分に可能であることを確かめた。今後はインバージョンも行い, 定量的な評価ができるようにするつもりである。

一方, AUV の頭部に搭載したオーバーハウザー型磁力計は, 地磁気を測定することができなかった。その原因は, 恐らく磁場勾配が大きすぎたためと考えている。しかし, 原田ほか (本論文集) に記載されているように, 深海曳航体に吊して (距離 10m) 測定した場合は磁気ターゲットの異常を捉えることができた。2010 年 12 月のよこすか航海では, AUV から数十 m 離して曳航する方法を検討している。



第 4 図 AUV を用いた磁気探査装置の試験結果. (a) 測定値, (b) 計算値. なお, X 成分は北向きを正, Y 成分は東向きを正, Z 成分は下向きを正とした.

Fig. 4 Result of the test of the magnetic exploration system using the AUV “Urashima”: observation (a), forward modeling (b). X: north component, Y: east component, Z: downward component.

4. まとめ

近年, 鉱物・エネルギー資源を確保するために国際的な資源開発競争が強まる中, 海底熱水鉱床に再び関心が集まっている. しかし, 開発に不可欠な賦存量を正確に見積もる手法は確立されているとは言い難い. 高精度にかつ実用レベルで鉱床を検出・評価するには, 海底近傍における新しい物理探査技術が必要である. こうした中, 2008 年 8 月より文部科学省の競争的資金制度による「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」が開始された. その一環として我々は, 高精度に海底熱水鉱床域の構造を推定するために, 自律式無人探査機 (AUV), 有索式無人潜水機 (ROV), 曳航体を用いた磁気・電気探査装置の開発に取り組んでいる. 現在の開発状況は, 試作機を製作し本格的な性能試験に入った段階である. 磁気探査装置については, 2009 年 7 月, よこすか航海 (YK09-09) において, JAMSTEC の AUV 「うらしま」と深海曳航体 「よこすかディープ・トウ」を用いた海域試験を行った. この試験では, ユニークな試みとして, 測定対象物を鉄棒と磁石で作成し, 海底に設置した. 今回の試験の結果, 各プラットフォームで同装置を使用するための基礎データを取得し, 同装置の基本性能を確認すること

ができた。特に、AUV を用いた試験では三成分異常を、深海曳航体を用いた試験では全磁力異常を明瞭に捉えることができた。

謝辞

よこすか航海では、櫻井利明司令をはじめとする「うらしま」およびディープ・トウの運航チーム、また請蔵栄孝船長をはじめとする母船「よこすか」乗組員の方々の高度な技術と的確な判断によって困難な試験を遂行することができた。海洋研究開発機構、日本海洋事業（株）の関係者の方々には、航海準備などにおいて多大なるご支援を頂いた。東海大学の川畑広紀上級技術員には、装置の開発から試験に至るまで常に技術的および事務的なサポートをして頂いた。極地研究所の野木義史准教授および東京大学の沖野郷子准教授の多大なるご理解とご協力により、よこすか航海での試験を円滑に実施することができた。（有）テラテクニカの方々には、高度な技術と豊富な経験によって装置の開発から航海準備まで支えて頂いた。

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

- 荒井英一，金属資源探査における物理探査の役割と将来展望，最新の物理探査適用事例集，物理探査学会編，pp. 77-82，2008
- 物理探査学会，物理探査ハンドブック，ケーススタディ編，pp. 945-1336，1998
- 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，査読中。
- 原田誠，佐柳敬造，伊勢崎修弘，竹内昭洋，松尾淳，笠谷貴史，澤隆雄，浅田美穂，多田訓子，市原寛，海底資源探査に向けた磁気探査装置の開発－海域および空中試験について－，CA研究会2010年論文集，投稿中。
- 大岡隆，深海底鉍物資源探査の現状と物理探査の適用について，最新の物理探査適用事例集，物理探査学会編，pp. 399-404，2008
- Ushio, T., The enactment of basic act on ocean policy and its problems: Focusing on the deliberations at the 166th session of the Diet, Journal of The School of Marine Science and Technology, Tokai University, Vol.6, pp. 153-181, 2008