

最新海洋調査技術の活用 — その現状と課題 —

橋本健太郎*・梅溪健一郎*・大鐘 勲*・大平 亮*

Application of the Latest Marine Survey Technologies - Current Status and Future Tasks -

Kentaro HASHIMOTO*, Kenichiro UMETANI*, Isao OOGANE* and Ryo OHIRA*

Abstract

Marine surveys are applied to wide variety of water depths, and the applicable instruments, towing method, accuracy, and resolution of these surveys depend on water depth. First, this report reviews current technologies used for marine surveys and summarizes their applicability with respect to water depth. Then, the importance of accurate positioning data, various ocean acoustic positioning equipment, and methods to collect accurate positioning data are discussed. Next, the report describes two case studies to introduce several elemental technologies for improved survey accuracy, and outlines potential future developments. The first case study entails an integrated interpretation of sub-bottom profiler, side scan sonar, and seabed image data to characterize a buried fault system along a submarine cable route. It is verified that the appropriate use of underwater positioning systems secures accurate positioning data, even at a water depth of 1,500 m and a towing length of 2,500 m. On the other hand, a non-negligible difference between feasibility of cabling works estimated from submarine soil samples, and the actual feasibility, suggests the acquisition of similar data is important. The second case study consists of an investigation of seafloor hydrothermal deposit. A multi-beam acoustic sounding instrument captured unique plumes generated by the hydrothermal system, and a correlation between the plume acoustic and magnetic characteristics is obtained by analyzing magnetometer and multi-beam data. Data obtained by a geochemical sensor also suggested a correlation with the plumes, but the verification requires further data. Ocean Engineering Corporation will continue to adopt the latest survey technologies and to improve positioning data quality, as integrated multi-disciplinary approaches become increasingly essential for comprehensive investigation.

Keywords: Marine survey, cable route surveys, seafloor hydrothermal deposit

要 旨

海洋調査は、浅海域から大水深域まで、さまざまな海域で実施される。調査機器は、水深によって、利用できる機種や曳航方法が異なり、精度や分解能も異なる。そこでまず、最新の海洋調査機器を概観し、浅海域と深海域への適用性を整理した。各種海洋音響調査機器の性能が向上する中、最も重要なのは、センサーの水中での位置データであることを示し、測位技術や調査船の動揺を補正し正確な航跡を得る技術について述べた。次に二つの調査事例をあげ、要素技術の組合せによって探査精度を向上させた例や、適用上の課題について述べた。海底ケーブルルート調査では、ディープトウ（サブボトムプロファイラーとサイドスキャンソナーを一つの曳航体に搭載）による海底地質構造と海底面画像を合わせて解釈することにより、伏在断層の存在を明らかにした。また、水深 1500m、曳航長 2500m という条件下でも、水中測位機を正しく利用することにより、高い位置精度が確保できることを示した。一方、サンプリング試料から判断した埋設工事の施工性が実際の工事実績と乖離した例は、今後のデータの蓄積が重要であることを示唆した。海底熱水鉱床調査では、マルチビーム音響測深機により熱水鉱床特有のブルームが捉えられ、マグネットメーターによる磁気異常との関連が認められた。また、地化学センサーで得られた指標もブルームとの関連性を示したが、結果の解釈にあたっては、今後のデータの蓄積が重要であると考えられる。複数の要素技術を的確に活用して総合的に評価する手法は、今後ますます重要になると考えられるため、常に最新技術を取り入れ、調査精度をさらに向上させていきたい。

キーワード：海洋調査、海底ケーブルルート調査、海底熱水鉱床

*オーシャンエンジニアリング（株）

*Ocean Engineering Corporation

1. まえがき

海洋調査は、浅海域から大水深海域にいたる様々な海域で行われる。たとえば、最近の海底ケーブルは浅海域だけでなく水深 1000m 以上でも埋設するケースが多くなってきているが、埋設の可否を調べるという目的は同じでも、浅海域と深海域とでは求められる精度や利用できる調査機器が異なる。本稿ではまず、最近の海洋調査技術について概観し、目的に応じて適切な調査手法を用いる必要があることを述べる。目的にかなった適切な評価を行うためには、それらの要素技術を組み合わせて総合的に判断することが求められる。そのような事例として津波計埋設のためのケーブルルート調査結果と「戦略的イノベーション創造プログラム」¹⁾における民間レベルでの海底熱水鉱床調査結果を取り上げ、これら2つの事例における評価結果について論じる。

2. 海洋調査技術の概観

ここではケーブルルート調査などに用いる海洋調査技術について概観する。表1に海洋調査に必要とされる要素技術を示す。表中には、測位技術や船舶の動揺計測技術も含む。以下、要素技術について概説する。

2.1 マルチビーム音響測深機

マルチビーム音響測深機（以下 MBES）は、扇状に発振する音波によって幅広く測深データが得られる機器である。表2に主な MBES 機種のうち浅海域と深海域の仕様を示す。最新の浅海域 MBES は、200~400kHz の高周波を用い、音響ビームの指向角が 0.5° と小さく、

地形分解能が向上している。これにより、サイドスキャンソナー（以下 SSS）に匹敵する海底画像の取得が可能となった。また、周波数を可変としたことで、適用可能な水深帯が広がったほか、ロールスタビライズ機能により船の動揺に関わらず一定幅でデータが取得できるようになった。さらに、ウォーターカラムデータ（音波が海底に到達するまでの反射波のない時間帯のデータ）の取得機能も有している。これらの機能により、MBES 単体でも海底底質や海底から噴出する気泡などを捉えることが可能となった。図1に小型調査船への機装例を、図2に MBES により得られた海底地形例を示す。

深海域の MBES は、原則として専用船に機装する設

表2 主なマルチビーム音響測深機の仕様一覧

区分	名称	メーカー	周波数 (k Hz)	スワ幅(°)	最大水深 (m)
浅海域	SONIC2024	R2 SONIC	200~400 可変	160	400
	Seabat7125	RESON	200/400	165	450
	EM3002	Kongsberg	300	130	200
	Seabeam1180	ELAC	180	153	600
深海域	EM302	Kongsberg	30	150	7000
	EM122	Kongsberg	12	150	11000
	Seabeam3030	ELAC	30	140	7000
	Seabeam3012	ELAC	12	140	11000
	Seabat7150	RESON	12	150	6000

表1 海洋調査に必要とされる要素技術

要素技術	使用目的	特徴・性能・条件 等	
		浅海域	深海域
マルチビーム音響測深機(MBES)	海底地形構造の把握	舷側固定 小型船利用可	船底機装 大型の鋼船
GNSS 動揺センサー	船位計測 調査船の動揺計測	位置精度 <1.0m	位置精度 <5.0m
サイドスキャンソナー(SSS)	海底面の状況把握	表層曳航 小型船利用可	曳航用ウインチと ディブレッサーが必要 ディーブトウなど
サブボトムプロファイラー(SBP)	海底面下の地層構造の把握(音響層序)	表層曳航または 舷側固定 小型船利用可	
水中測位機	曳航体の位置測定	舷側固定 小型船利用可	舷側固定または 船底機装
マグネットメーター	既設ケーブル位置の把握	表層曳航 小型船利用可	ディブレッサー または ディーブトウに接続
サンプラー	底質試料の採取	グラブ式 小型船利用可	柱状採泥器 (ピストンコアラー)



図1 船外機船への MBES 機装例

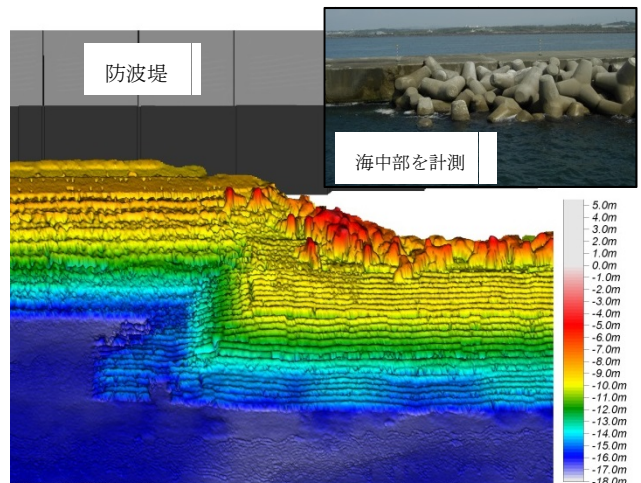


図2 MBES により得られた海底地形図(標高表示)

計となっている。トランスデューサーが大型となるため、ゴンドラと呼ばれる架台に収納して固定するのが一般的で、300トン以上の船でなければ取付けは難しい。小型船での調査と違い、固定には大規模な溶接工事が必要で、艀装の際には調査船をドライドックに入渠させる必要がある。図3に深海用MBESの艀装例を示す。

深海用MBESは、12~30kHzの低周波を用いている。ビームの指向角は、0.5°から4°で、これはトランスデューサーの大きさによって決まる。例えばEM302で0.5°の指向角を得るには、送波器の長さは6m程度となる。ビームスタビライズ機能は、すべての機種に備えられている。

また、深海用MBESでもウォーターカラムデータやサイドスキャンイメージが取得可能となっている。ウォーターカラムデータについては後述する。

2.2 GNSS・動揺センサー

MBESは、単独では測深機として機能しない。位置データを得るためのGNSS、調査船の動揺を計測する動揺センサー、調査船の方向を測定するヘディングセンサーと組み合わせることが必要となる。動揺センサーは、浅海と深海で同程度の高い精度が要求されるが、GNSSについては浅海の方が深海よりも高い精度が求められる。これは、音響ビームのフットプリント（海底に照射されるビームの面積）の大きさに由来する。0.5°の指向角を持ったビームのフットプリントは、水深50mでは直下で約40cm四方であるが、水深5000mでは約40m四方となる。浅海部ではRTK-GNSSの精度が求められるが、深海ではD-GNSSの精度で十分とされる。最新の機器は、3軸の加速度データのほかに、2つのGNSSアンテナもしくは光ファイバージャイロを利用して、ヘディングを測定することができるようになっている。

また、動揺センサーの計測精度向上に伴い、慣性航法の精度も向上した。さらに動揺センサーや慣性航法のデータだけでなく、他の位置情報も併せて解析することで計測精度を向上させることも可能になっている。ここでは、GNSS・動揺センサーPOS/MVシリーズに搭載された2つの機能について紹介する。

(1) TRUE HEAVE ヒープ補正機能

従来の3軸加速度計を搭載した動揺センサーは、船のロール方向やピッチ方向の比較的周期の短い動揺は正確にとらえられるが、周期の長いうねりによる調査船の上下方向の動きや、回頭の際に船が傾いて沈み込むような動きについては、正確に検知することができなかった。TRUE HEAVEは、観測中の上下動に関するデータに、別途収録した船位データを組み合わせることでフィルタ処理やデータ補間などの後処理を行い、正確なヒープ値（上下方向の変位値）を得る処理機能である。

(2) POSPac MMS 測位補正機能

この補正機能は、慣性航法の延長上にある技術である。

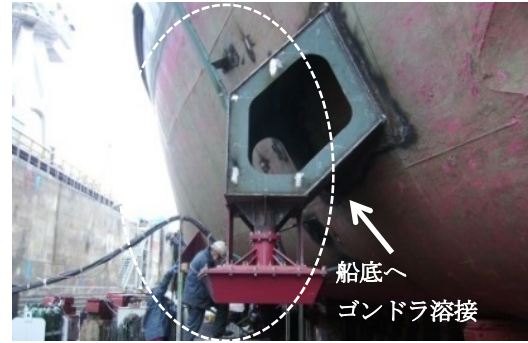


図3 MBESの船底艀装例

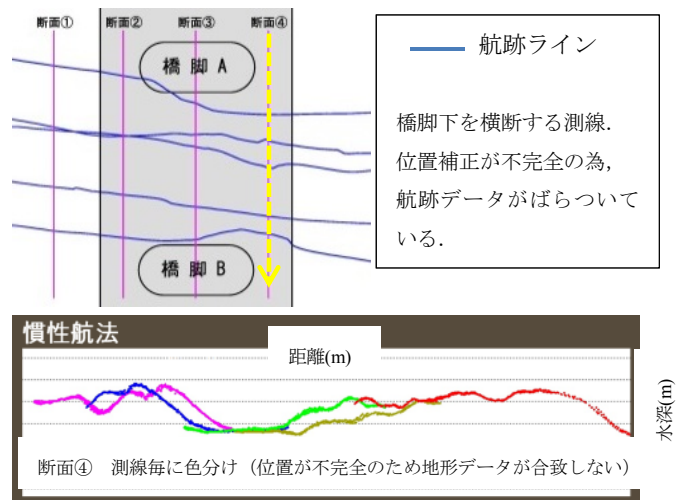


図4 慣性航法のみ航跡と断面図

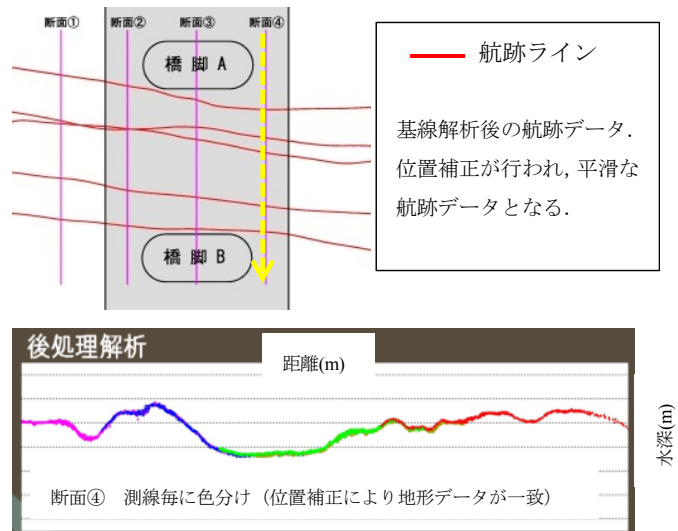


図5 POSPac処理後の航跡と断面図

通常の慣性航法と異なる点として、国土地理院の電子基準点データを使用し、基線解析を行うことで位置精度を向上させること、時間軸の正方向の解析だけでなく逆方向の解析を行い両データの平滑化を行うことでもっとも確からしい航跡を求めるものである。図4に慣性航法の場合と図5にPOSPac処理をした場合の調査船の航跡と地形データの比較を示す。

この補正機能を適用することで、橋梁などによってGNSSの電波が遮蔽されてしまう区域や通信機器の受信不良などにより位置補正情報が得られなかった場合でも、RTK-GNSSと同等の位置精度が得られるようになった。

2.3 ディープトウ (SSS・SBP)

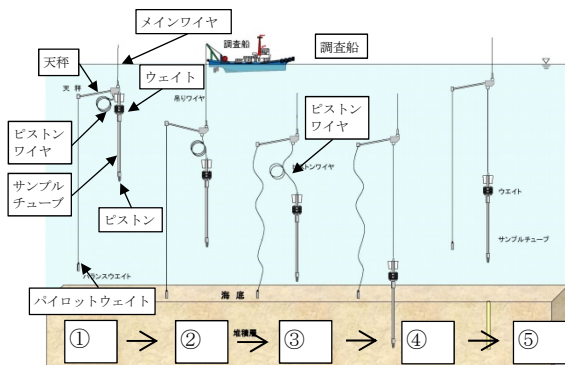
SSSは、25mから500m程度までの測定レンジを選択可能であるが、良好なデータを得るために、曳航体は海底からレンジの20~40%の距離を保つ必要がある。浅海部では、小型船での表層曳航でデータを得られるが、中深海で運用するためには、アーマードケーブルを備えたウインチと曳航体を沈めるためのディプレッサーが必要となる。また、Klein社のK-ChirpやEdgetech社の2000-DSS・DT-1のように、SSSとサブボトムプロファイラー(以下SBP)の機器を1つの曳航体に備えたディープトウと呼ばれる機種は、同位置で両データを取得することができること、SBPのトランスデューサーが海底に近いこと、データの質と密度が向上することなどから、データ解析には非常に有効である。当社では、ディープトウを用いてSSS・SBP調査を行っている。

2.4 水中測位機

曳航体は潮流などの影響により流され、調査船とは別の航跡をたどる。水深が大きくなれば曳航長も長くなり、曳航長と深度のみで計算を行うレイバック方式では曳航体の位置を正確に算出することができない。このため、水中測位機により測位を行う必要がある。一般に、USBL(Ultra Short Base Line)方式により水中の測位が行われる。USBL方式は、海底に基準点を設置する必要がなく、船に送受波器、曳航体にトランスポンダーを設置するのみで、1000m以上の長距離での測位が可能な方式である。

2.5 マグネットメーター

海底ケーブルの敷設の際の既設ケーブル切断といっ



- ①組み上げた採泥器を投入
- ②パイロットウエイトが着底
- ③天秤のテンションが緩み採泥器が落下
- ④海底の試料を採取
- ⑤揚収

図6 ピストンコアラーによるサンプリング概念図

た事故を避けるため、既設ケーブルの位置を詳細に把握しておくことは非常に重要である。そのために、マグネットメーターを用いた調査を行う。

磁界は距離減衰が大きいので、センサーはなるべく海底に近付ける必要があるが、センサー単体では沈まないため、ディプレッサーを使用するかディープトウに接続する。電流が流れている運用中の海底ケーブルは比較的容易に発見できるが、廃棄ケーブルは残留磁気の程度によっては、検出できないケースもある。

2.6 サンプリング

ルート調査では、ケーブル埋設深度までの底質試料を得ることが望ましく、ピストンコアラーと呼ばれる柱状採泥器で試料を乱さないように採取することが多い。図6にサンプリングの概念図を示す。浅海域やサンプラーが貫入しない底質の場合は、グラブ式採泥器あるいはドレッジャーを用いる。

3. 津波計設置のための海底ケーブルルート調査

3.1 津波計設置のための海洋調査の概要

津波計は地震に関する総合的な観測を行う上で欠かせないものである。津波計の観測ユニットは、対象領域に密度が偏らないように可能な限りメッシュ状に配置され、ケーブルで接続される。そのケーブルは安全確保のため、水深1500mまでの海底には埋設が必要とされた。そのため、埋設のための調査範囲は陸上部、沿岸部、中深海部および深海部にまでいたる。

ここでは、東北地方太平洋沖地震の津波被害を受けて設置することになった太平洋側海域での調査結果から、

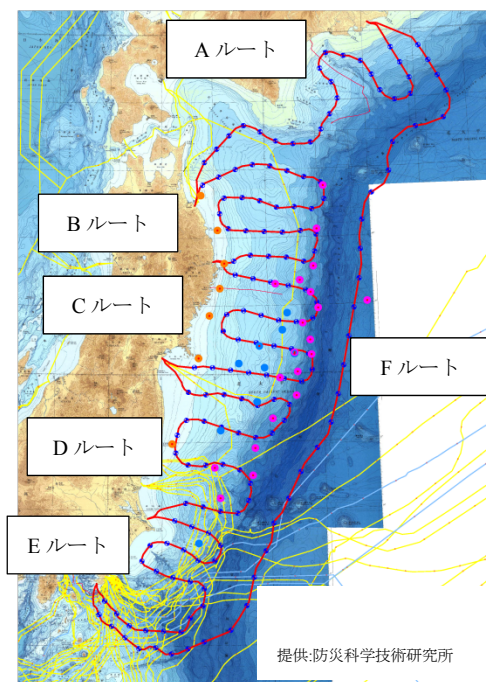


図7 ケーブル及び津波観測ユニットの配置予定図

表3 主な使用機器一覧

調査種別	名称	型式	性能	製造元
陸上部 測量	VRS-GNSS	Trimble5700	水平精度: ±5mm +0.5ppm RMS	Trimble 社
	トータル ステーション	OS-105	精度: (2+2ppm x D) mm	Topcon 社
	レベル	DL-502	1km 往復標準偏差: 0.4mm	Topcon 社
沿岸部 調査	MBES	SONI2024	最大水深: 400m 周波数: 200~400kHz ビーム角: 0.5°×1.0° スワ幅: 160°	R2SONIC 社
	SSS	System3000	耐圧: 1000m 周波数: 100/500kHz 最大レンジ 450m	Klein 社
	SBP	3100-G	周波数: 2~16kHz 分解能: 6 cm ビーム幅: 20°	EdgeTech 社
	GNSS・ 動揺センサー	POS/MV WM	測位精度: 0.02~0.1m (RTK) Roll 精度: 0.02° Pitch 精度: 0.02° ヒープ精度: 5 cm or 5%	Applanix 社
中深海 調査	MBES	Seabat8101	最大水深: 400m 周波数: 240kHz ビーム角: 1.5°×1.5° ビーム数: 101 本 スワ幅: 150°	RESON 社
	SSS	2000-DSS	耐圧: 2000m 周波数: 100/400kHz 最大レンジ: 500m	EdgeTech 社
	SBP		周波数: 2~16kHz 最大探査深度: 80m	
	マグネット メーター	G-880	測定範囲: 17,000 ~ 100,000nT 測定精度: 0.02nT	Geometrics 社
	水中測位機	HiPAP350P	周波数: 21~30.5 kHz 測定レンジ: 3000m	Kongsberg 社
深海部 調査	MBES	EM302	最大水深: 7000m 周波数: 30kHz ビーム角: 2°×4° ビーム数: 144 本 スワ幅: 150°	Kongsberg 社
	SBP	Bathy-2010P	周波数: 2~16kHz 最大探査深度: 200m	SyQwest 社
	GNSS・ 動揺センサー	Seapath200	測位精度: 0.7~1.5m (SBAS) Roll 精度: 0.02° Pitch 精度: 0.02° ヒープ精度: 5 cm or 5%	Kongsberg 社

今後、海洋調査技術を活用する上で役立つと思われるいくつかの事例について紹介する。調査対象領域は、図7に示すように6つのケーブルルートが計画されている地域で、総延長5500kmにおよぶ。調査は2012年5月から同年12月にかけて行われた。

陸上部と沿岸部は、各ルートの陸揚げ地点の6か所である。中深海部と深海部を含む沖合の調査は、ルート長が非常に長く、試算すると調査船1隻では1年以上を要することが分かった。そこで、中深海を主な対象とする装置と深海を対象とする装置を2隻に分けて搭載し、効率的に調査が行えるようにした。調査に使用した機器を表3に示す。後述する事例は、これら中深海部と深海部で得られた調査結果なので、陸上部と沿岸部の調査については簡単に述べるにとどめる。

(1) 陸上部調査

陸上部は、陸揚げ地点の地形が重要である。ここでは、VRS-GNSS方式により基準点を設置し、この基準点からトータルステーション・レベルを用いて地形測量を行った。

(2) 沿岸部調査

沿岸海域では、海底地形、海底面の状態、海底面下の地層構造が重要である。また、既設ケーブルの状況を調

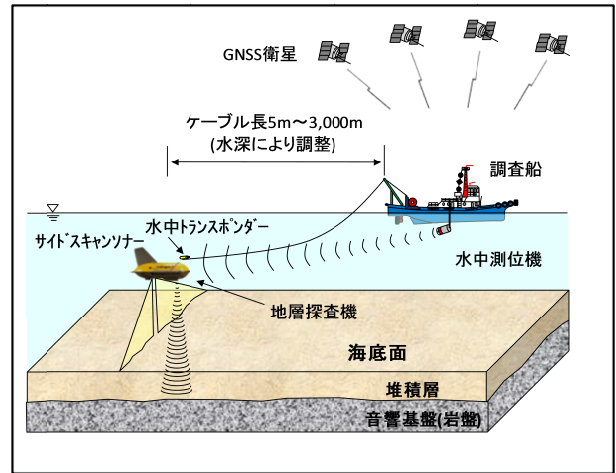


図8 中深海部調査のイメージ図

べるのにマグネットメーターが利用されることが多く、ここでも調査を実施した。さらに、表層の採泥調査とダイバーによる汀線部の測量、底質の目視および突き棒調査などでより確実に状況を把握できるようにした。沿岸部までは、表層の採泥も比較的確実にでき、ダイバーによる確認も可能であるが、中深海部以深ではそれが難しい。

(3) 中深海部調査

中深海部では、図8に示すようなシステムを用いた。埋設区間について海底地形、海底面画像、海底面下の地層構造などを調べた。曳航体の位置は水中測位機で把握する。

(4) 深海部調査

本調査では、海底地形の調査幅は水深の2倍と定められた。そのため、MBESは3測線を基本とし、データの取得幅が不足する場合は随時補測した。また、観測ユニットの埋設予定地点については、SBPにより地層構造を調べた。SBPの測線は、埋設予定地点を中心に1km間隔で格子状に配置し、合計9測線とした。さらにルート沿いに10km間隔でピストンコアラーによる採泥調査を行った。

3.2 最新の海洋調査技術による評価事例

ケーブルルート調査では、SSSで海底の底質を判別し、SBPのデータから表層の堆積層厚を読み取っている。さらに判別の基準となりそうな箇所ですらサンプリングを行い、これらのデータを総合的に判断して埋設評価を行う。それらの中で、より精度を向上するための試みや精度の検証事例、音速度プロファイルの取得や工事の施工性に問題があった事例などを紹介し、今後の調査技術改善の一助としたい。現在、調査した海域でケーブル敷設工事が行われており、いわば、埋設評価の答え合わせが進んでいるところである。

(1) 海底地層構造と海底画像の比較による確度向上例

海底の表層構造と海底面画像を比較することにより

個々には断定しにくい構造が、より確信をもって判定できる事例を示す。図9はディープトウ 2000-DSS によって得られた SSS 記録および SBP 記録である。水深 330m 付近で得られた記録で、海底の表層構造 (SBP 記録) と海底面画像 (SSS 記録) を並べて示したものである。

ディープトウでは海底の地層構造と海底面画像が同時に得られるため図9に示すように両者の位置を正しく合わせて比較できる特長がある。

まず、地層構造に着目すると SBP 記録は、海底下 25m 程度まで音波が達しており、堆積物が細粒であることが示唆される。海底面までに達する層理面がみられ、複数の断層によりシャープに切られていることがわかる。層理面の地表での位置は SSS 記録とよく一致している。また、海底面画像には断層位置に不連続面は見られず、伏在していることが裏付けられる。すなわち、断層が層理面を明瞭に切っていることから堆積層はほぼ固結していると考えられるが、その変位は海底には現れていない。また、褶曲構造が認められ、層理面が浸食を受けている痕跡があることから、堆積物が更新世もしくはより古い時代のものであることが考えられる。

(2) 水中測位の位置精度検証例

深海部の調査では、曳航体の位置の精度が非常に重要になる。位置精度が悪いと、最新の装置の高分解能、高精度の特長を生かすことができない。そこで、水中測位機 HiPAP350P の精度検証として、往復航走時のデータ比較を行った。図10に音響画像図を示す。

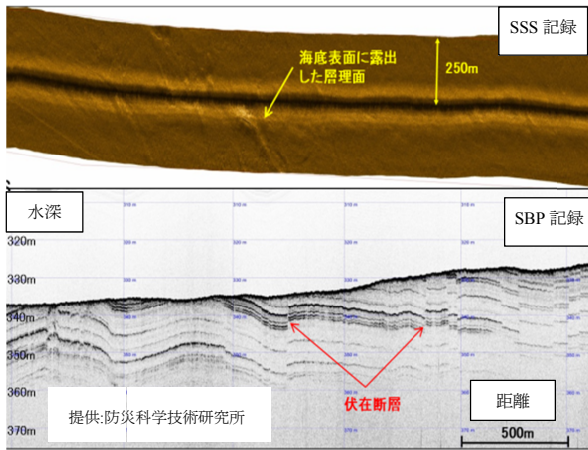


図9 海底の地層構造と海底面画像に現れた層理面

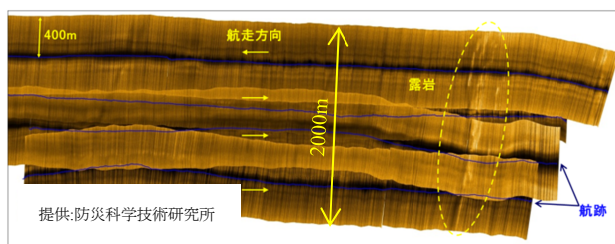


図10 往復航走時の音響画像図

検証は水深が 1500m、曳航長は 2500m という曳航体の位置が把握しにくい条件で実施した。その結果、図中黄色の破線で示す区域の露岩位置が往路と復路でよく一致していることが確認された。水中測位機を正しく利用することにより、深部で曳航長が長い場合でも高い精度が保てることが検証できた。

3.3 最新の海洋調査技術における課題

(1) 音速度プロファイル取得の課題

ルート調査に限らず、MBESによる測深において、正確な水中音速度プロファイルを得ることは、良好な調査結果を得るために非常に重要となる。送波アレイから射出された音響ビームは海中を伝播して海底に達するが、海中での音速は一定ではない。そのため、音波が海底面に達するまでの時間を正しく求めるためには、正しい音速プロファイルが必要になる。不正確な音速度プロファイルを適用すると、本来は連続的な1本の曲線であるはずの水深データが、図11に示すようなスマイルカーブと呼ばれる放物線状の曲線を示すエラーデータとなってしまう。

日本近海には、黒潮や親潮などの海流が流れているが、それらの海流内とその影響を受けない沿岸とでは、音速プロファイルは大きく異なる。また、大きな河川の流入がある湾などでは淡水の影響を受けるほか、潮流などにより潮目が複雑に入り組み、100m 移動しただけで全く異なるプロファイルが得られる場合もある。

そのため、スマイルカーブなどのエラーを避けるために、音速度プロファイルはなるべく頻繁に測定することが望ましい。しかし、センサーを海底まで降ろして測定するような方式では調査船を停止させる必要があり、調査の効率が低下してしまうので、より効率的な方法が望まれる。現在、水中グライダーあるいは音速度のみを測定する別の船を用意し、メッシュ状に繰り返し測定を行うなどの方法を検討している。

(2) サンプリングによる評価に関する課題

サンプリングは、実際の試料を見ることができると信頼度が高い評価ができると考えられるが、予測した結果と異なった事例について述べる。

a) 半固結の堆積物の評価

これは、更新統上部と考えられる半固結の堆積物が露

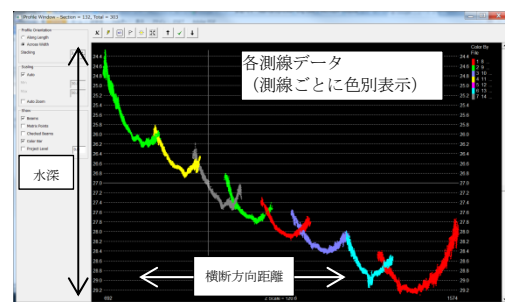


図11 スマイルカーブ例 (測線毎色分け断面)

出している水深 100~200m の海域での事例である。図 12 に SBP 記録を、図 13 に試料の写真を示す。SBP 記録は、海底下に明瞭な反射記録が認められ、海底下 15m 付近には基盤と考えられる反射記録が読み取れる。層理面は、海底に対し傾斜不整合を示し、更新世後期の堆積物であることが予想された。重量が約 200kg のピストンコアラーで得られた試料は、試料長が 0.3m の青緑色の粘土で、鉄のへらでようやく破壊できる程度に固結が進んでいた。これらの情報から、堆積物は細粒であるが固結が進んでおり、埋設には適さないと判断した。

しかし、埋設工事の結果、この海域では 1m 以上の埋設が可能であった。SBP 記録だけを見れば、そのような結果も考えられるが、サンプリング試料から判断する限り、1m の埋設ができるとは考え難かった。埋設工事は、5000 t から 10000 t の大型船により行われ、その工程はルート調査による埋設評価結果に基づいて作成される。そのため、正確な埋設評価を行うことは、埋設施工コストの面で非常に重要となる。埋設が可能かどうかは、埋設機の性能にも依存するので、今後、埋設担当の企業と連絡を密にし、海洋調査データとの関連性について理解を深めていく必要がある。

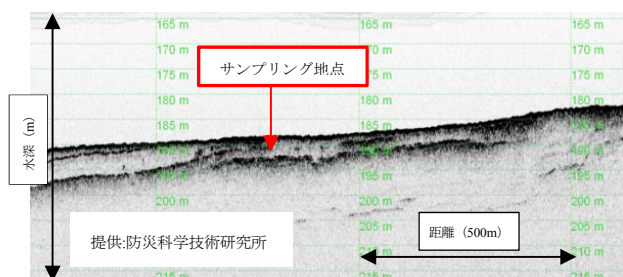


図 12 SBP 記録



図 13 サンプリング試料写真 (半固結堆積物)



図 14 サンプリング試料写真 (軟弱地盤)

b) 軟弱地盤の評価

これは軟弱地盤により、埋設機が埋没してしまい、埋設工事が困難であったケースである。現地は水深が 40~80m と浅く、平坦な区域である。図 14 にサンプリング試料の写真を示す。

サンプリング試料は、粘土と砂質シルトの互層となっており、軟弱な性状であることは確認していたが、埋設機が埋没することまでは予測できなかった。埋設機の埋没をたとえば地盤のせん断強度で予測できるのか、参考となる資料がないのが現状である。CPT などの貫入試験が必要となるのか、簡易ベーン試験で対応可能なのか、このような点についても、今後検討し、埋設工事の遅延のないような埋設評価が作成できるようにする必要がある。

c) 既存資料と異なる海底地形が得られた例

図 15 は、2 つの海山の間にある尾根地形で、今回の調査による地形と既存資料に示されている地形とが異なっていることを示している。

図中赤枠で囲った箇所で、取得データには比高 400m 程度の高まりが認められるが、既存資料には表れていない。このような差異は、メッシュサイズの違いによる影響も考えられるが、既存資料 (JODC500mメッシュデータ) の測定時と本調査の測定との間に、海底火山の噴火や泥火山の噴出といった何らかの地形変化を伴うイベントがあった可能性もある。いずれにしても、既存調査だけに頼ることなく事前に調査することの意義が確認された例である。

また、A 海溝で行った調査でも得られた地形と既存資料による地形とで大きな差異があった。図 16 に地形の比較図を示す。

図中の青色系統の等深線が、本調査で得られたデータによるもので、赤色系が既存資料による等深線である。海溝より北側の斜面では、両データはよく一致しているが、図中に示したように海溝軸の方向が大きくずれている。また、海溝より南側では地形がまったく一致していないことが認められる。この原因については不明であり、既存資料がどのような機器を使用したのかも確認でき

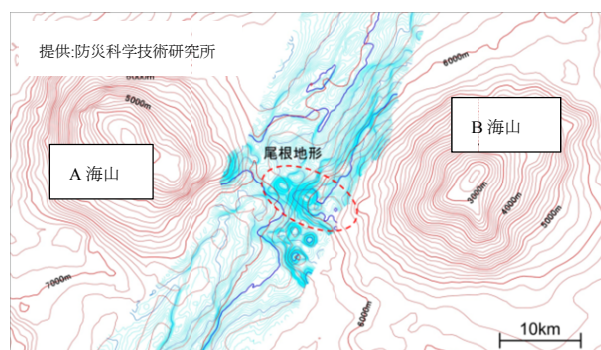


図 15 等深線比較図 (赤: 既存資料 青: 実測)

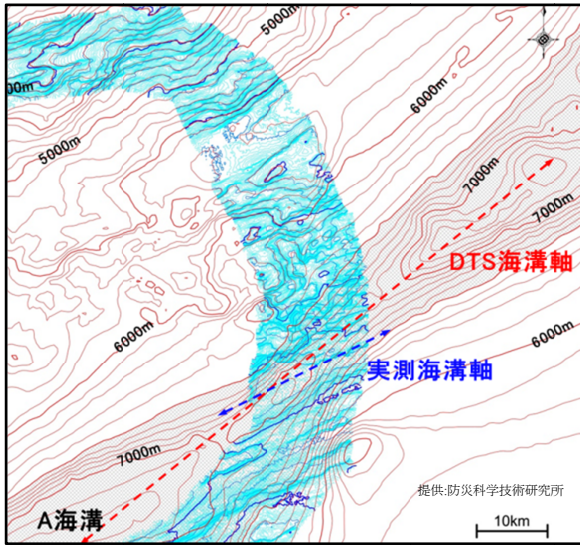


図 16 A海溝における地形比較図
(DTS海溝軸：既存資料，実測海溝軸：実測データ)

ていない。しかし、たとえ既存資料が旧式の機器により得られたものとしても、海溝軸のずれといった傾向が得られることは、双方のデータに大きな差異があり、それが10年から20年間での変容を示唆している可能性も考えられる。

これらの事例を考えると、重要な海域については10年程度のスパンで日本周辺の太平洋全域の地形調査を行ってはどうかと考える。定期的な観測によりデータを蓄積していけば、地震による変動はもちろん、海底地すべりや、長い目で見れば海山の移動などのテクトクスも確認できるのではないかと思う。現在、国内の民間会社で4台の深海用MBESを保有している。官・学の船舶を含めると、恐らく20台程度のMBESがあるはずで、これらを動員すれば全域の調査も可能と思われ、得られた海底地形データは様々な分野の基礎データとして大変利用価値が高いのではないかと考えている。

4. 海底熱水鉱床調査

4.1 海底熱水鉱床調査の概要

海底熱水鉱床は、日本の排他的経済水域内で数多く存在が報告されており、海底鉱物資源を得るために将来有望な鉱床となり得る。しかし、その調査はまだ試行の段階にあるとはいえ、今後の発展が期待されている。

海洋調査協会では、2014年度より「航走観測を主体とした熱水鉱床探査」という主題で研究を行っている。これは、SIP「次世代海洋資源調査技術（海のジパング計画）－海洋資源調査システム・運用手法の開発－」の一環として行われているものである。当社は、協会の一員として当初から本研究に参加してきた。本項では、そ

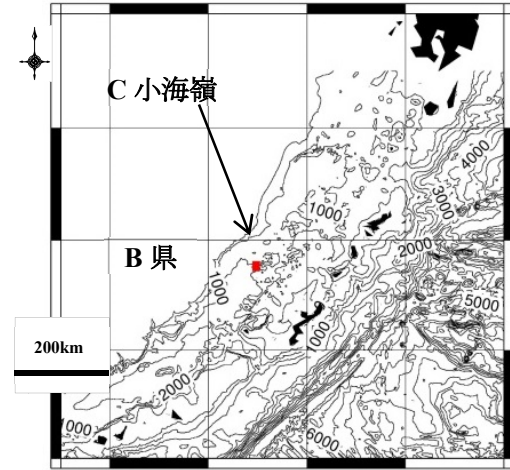


図 17 調査位置図

表 4 主な使用機器

機器名	機種名
MBES(マルチビーム音響測深機)	EM302(Kongsberg)
マグネットメーター	G880(Geometrics)
SSS(サイドスキャンソナー)	2000-DSS(ディーブトウ)
SBP(サブボトムプロファイラー)	(Edge Tech)
水中測位装置	HIPAP350P(Kongsberg)
海洋地化学センサー	pH/CTD/ORPセンサー(高知大)

のなかで行われた2015年度研究航海による海底熱水鉱床調査結果の一部について述べる。データについては、公式に発表されている松田ほか(2015)²⁾より引用した。

海洋調査協会では、熱水鉱床調査を概査、準精査、精査の3つの段階に分けて考えている。概査は、広域を効率よく調査し、海底熱水鉱床が存在する可能性のある箇所を絞り込むための調査、準精査は、曳航体を利用してなるべく海底に近い位置からデータを得る調査、精査は、海底に接近してデータを得る調査である。

ここでは、B県にあるC小海嶺周辺において、概査と準精査を行った例を示す。図17に調査地周辺の地形図を、表4に使用した主な機器を示す。多くはケーブルルート調査で使われているものと同じであるが、海洋地化学センサーが併用されていることが特徴的である。

この調査では、10mメッシュ程度の海底地形を得ること、表層・中層・下層の3層でマグネットメーターおよび地化学センサーのデータを得ること、できるだけ曳航体を海底に近づけてサイドスキャンソナーの画像を得ることを目標として今後の調査手法としての可能性を検討した。図18に測線配置図を示す。図中の緑枠内が概査の範囲で、東西約10km、南北約13kmの区域である。また、図中の青色の枠内が準精査の調査範囲で、およそ6km×1.6kmの区域である。

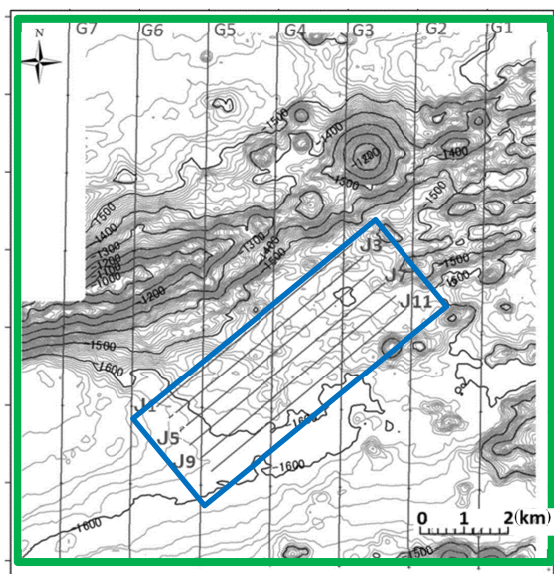


図 18 測線配置図

(1) 概査

概査では、MBES の EM302 で幅広く地形データを取得するとともに、ウォーターカラムデータにより海底からのブルームを捜索した。また、同時に表層曳航方式でマグネットメーターのデータを収録した。

測線配置は 1500m 間隔とし、EM302 のスワ幅を片舷 1500m と設定することで、測深データが 100% オーバーラップし、密度の高いデータが得られるように航走した。また、1 日に 2 回、投げ捨て式の CTD (深度・水温・塩分計測装置) である XCTD により水中音速度プロファイルを取得し、音速度補正を行った。

マグネットメーターは、調査船の船体磁場の影響を避けるため、船尾より 300m の離隔をとって曳航した。

(2) 準精査

絞り込まれた区域を詳細に調査する精査には、AUV や ROV などが適している。しかし、これらの機器は海況によって投入・揚収が大きく制約される。そこで、限られた航海日数の中で、可能な限り詳細なデータを得るという観点で、曳航体による調査を準精査と位置付け、精査の前段階として実施することにした。

この区域は、概査で得られたブルームの位置により設定した。測線間隔は、当初 200m とする予定であったが、台風の接近があり、調査期間が短縮することも予想されたため 400m とした。

使用した機器は、ディープトウ 2000-DSS、マグネットメーター G-880、地化学センサー (pH/CTD/ORP)、水中測位機 HiPAP350P である。なお、地化学センサーは、高知大学の岡村先生より借用した。図 19 に準精査の調査イメージを示す。

このシステムでは、2000-DSS 曳航体に G-880 曳航体を 10m の曳航ケーブルで接続し、曳航索に地化学センサーと水中測位装置のビーコンが取り付けられている。

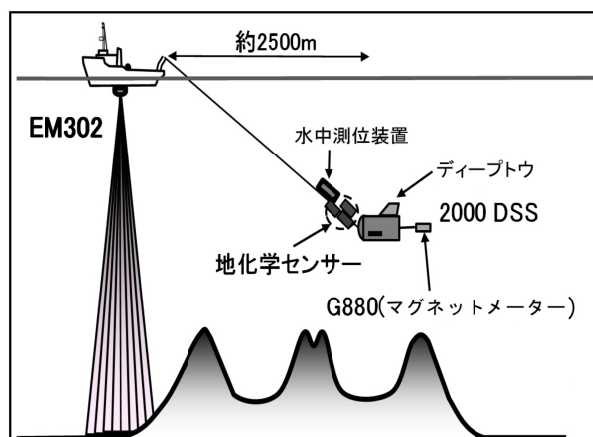


図 19 準精査調査イメージ図

この準精査では、水深 1400m および水深 600m の 2 層においてマグネットメーターのデータを得ることを最優先項目とした。そのためには、一定深度でマグネットメーターを曳航する必要がある。曳航体の深度は、曳航索の長さおよび曳航体の対地速度で規定される。海流と同一方向に航走する際は、どうしても対地速度が大きくなってしまいうため、曳航体を沈めることが難しい。そこで、調査前に調査船のドップラー流速計を用いて現場海域の海流の強さと方向を計測して測線方向の流れの方向に設定した。流れに対向する方向では 1400m の深度で測定し、流れに乗る方向では深度 600m で測定を行った。全部で 5 本を設定した測線について、それぞれ 1 往復する形で測定を行った。なお、地化学センサーについても、同様に 2 層の深度でデータを取得した。

この調査では、2000-DSS はマグネットメーターと地化学センサーを一定の深度で曳航するためのおもりの役割としてのみ使用している。

4.2 海底熱水鉱床調査結果の一例と課題

以下に、それぞれの調査手法で得られた結果について、海底熱水鉱床の探査手法としての可能性という視点で述べる。

(1) MBES

EM302 の測深データから、図 20 に示すように 10m メッシュサイズの詳細な海底地形を得ることができた。これにより、マルチビーム測深は 1 つの有力な手法となりうることが示されたといえよう。図中、中央部の N80°E の走行を持つ高まりが C 小海嶺である。その南側は比較的平坦な区域となっており、凸地形が点在している。さらに、図 21 に示すように、EM302 のウォーターカラムデータにより、海底からのブルームを明瞭に確認することができた。確認されたブルームは、水深約 1600m の海底から立ち上がり、水深約 700m 付近で消滅している。熱水鉱床調査では、ブルームの存在を検知することは重要であり、今回、ウォーターカラムデータにより明瞭に記録できたことは、今後に希望の持てる結果である。

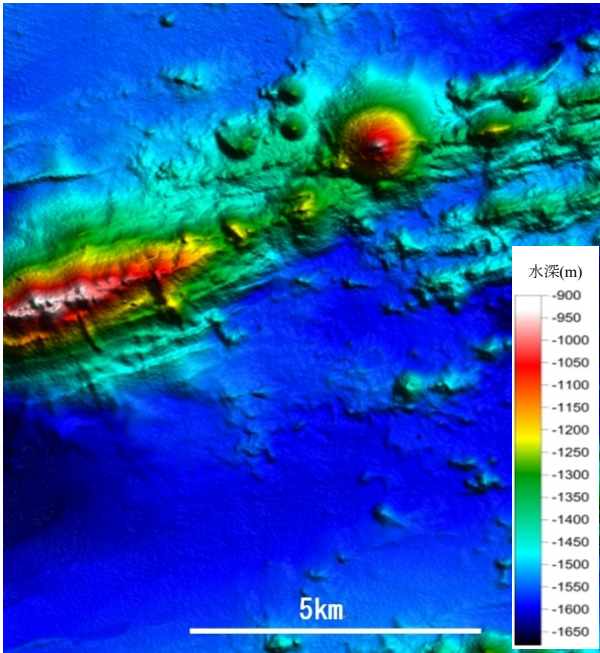


図 20 海底地形図

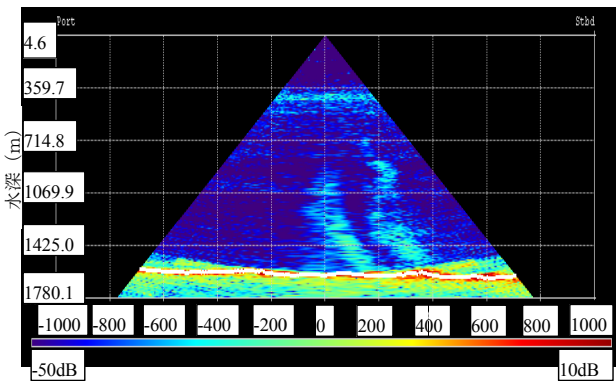


図 21 ウォーターカラムデータ記録例
(カラースケールはdB表示)

といえよう。

(2) マグネットメーター

マグネットメーターでは、図 22 と図 23 に示すように地磁気異常が明瞭に捕えられた。図 22 は表面曳航による概査域の地磁気異常、図 23 は水深 1400m を曳航した準精査域の地磁気異常を示している。ここに示した地磁気異常は、個々の観測値から観測値の全平均値を差し引いた値である。

概査域では、C 小海嶺の尾根付近を境界として、北側がマイナスの異常、南側がプラスの異常となる長波長の変化を示している。準精査域では、ブルームが認められた区域北側の一帯でプラスの異常が認められ、ここでは短波長が卓越していることがわかる。これらのデータを用いて、今後 3 次元インバージョンを行い、深部の磁化強度について解釈を進める予定である。

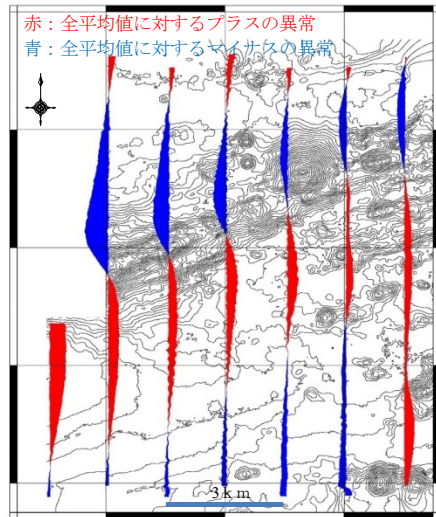


図 22 概査域の地磁気異常

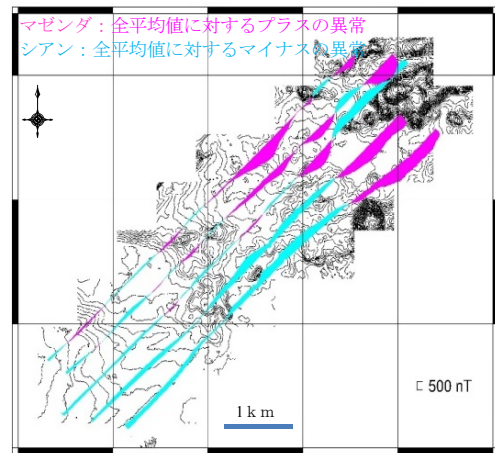


図 23 準精査域の地磁気異常

(3) 地化学センサー

図 24～26 に地化学センサーの測定結果を示す。

地化学センサーは、pH、酸化還元電位 (ORP) および濁度計を増設した CTD (電気伝導度、温度、水圧) の 3 種を使用した。図 24 は pH、図 25 は ORP、図 26 は濁度について測線上の値を示したものである。これらの図中には、先に述べたウォーターカラムにより得られたブルームの範囲も示した。

地化学センサーが熱水ブルームを捉えた場合、pH と ORP の値は低下し、濁度は上昇すると考えられる。今回のデータでは、そのような値も得られているが、ブルーム上すべての箇所センサーに反応があったわけではなかった。また、ブルームが確認できなかったところでセンサーに反応があった箇所もあった。

ブルームと地化学センサーで得られる指標とは何らかの関連がありそうなことは確認できたが、より詳細に調べるには、さらにデータの蓄積が必要であろう。

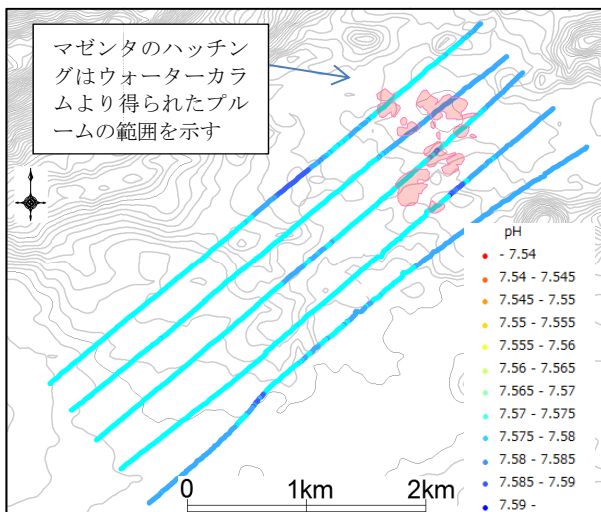


図 24 pH センサーの測定結果プロット図

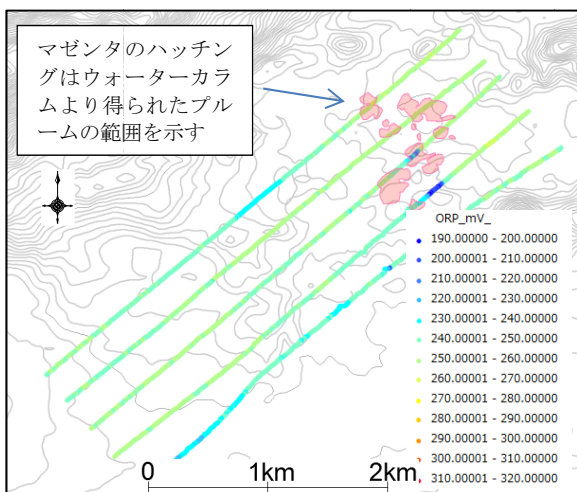


図 25 ORP センサーの測定結果プロット図

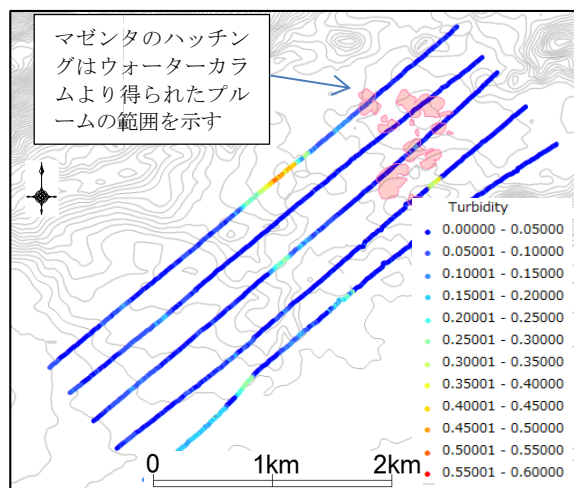


図 26 CTD センサーの測定結果プロット図 (濁度)

(4) サイドスキャンソナー・サブボトムプロファイラ

一定水深 1400m での SSS データには、ブルームやチムニーと思われる細かい地形の凹凸が確認できる測線が存在するが、MBES のウォーターカラムから抽出して

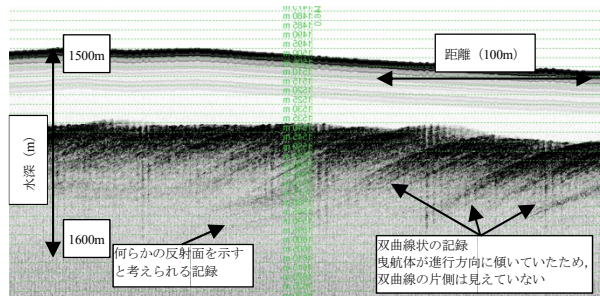


図 27 SBP 記録例 (双曲線状の記録)

いる全てのブルーム現象の位置に一致するものではなかった。これは、両者の周波数の違いにより、捉えられるブルームの性状に違いがあるためと考えられる(棚橋ほか, 2014)³⁾。EM302 のウォーターカラムが捉えたブルームは液体もしくは気体の状態であり、SSS 記録に認められたものは、熱水ブルームである可能性がある。

また、SBP ではブルームを示すようなデータは記録できなかった。ブルームの認められた地形の凹凸の激しいエリアで縞状の双曲線のような記録が収録された。図 27 に SBP の記録例を示す。この双曲線状の記録が単に海底が硬いことによるものか、その中に構造を示すものがないか、解析を進めている。ブルームの認められたエリア周辺の水深 1600m 付近の平坦面では、表層 5m 程度の堆積層を現す記録を得ることができており、ここでは今後、柱状採泥等のサンプリングを行いたいと考えている。

4.3 今後の課題

本航海では、水中測位データにエラーデータが多く含まれていた。MBES などとの干渉があった可能性がある。今後は、完全に発振を同期させるなどして対処していきたいと考えている。

また、地化学センサーを用いるのは初めてであり、現在解釈を進めているところである。ウォーターカラムでとらえたブルームの性状について議論を進め、ブルームのない箇所での地化学センサーの反応について解釈を行っていく必要がある。

今後は、全磁力データから火成活動の把握や、より短波長の磁化構造の把握、地形やウォーターカラム、SSS、SBP、地化学センサー情報を統合して解析し、熱水噴出の検証を行う予定である。

また、来年度には AUV を用いたより詳細なデータを取得する予定である。あわせてサンプリングを行い、試料の鉱石としての品質評価ができれば、と考えている。これによって、概査・準精査・精査と 3 段階に設定した調査のすべてを網羅できることになる。

5. まとめ

MBES・SSS・SBP といった機器の運用技術は、当社

の根幹をなす技術であり、これらを適正に組み合わせて調査に用いることで、様々な分野の海洋調査に貢献できると考えている。これに加えて、海外の動向も把握しつつ、基盤ツールに代表される、官・学で開発されている新技術を取り込むなどして、調査の精度を向上させていきたいと考える。

謝辞: 調査データの使用を認めて頂いた独立行政法人防災科学技術研究所ならびに一般社団法人海洋調査協会に謝意を表す。また、高知大学海洋コア総合研究センターの岡村慶准教授には地化学センサーを借用させていただき、その使用方法をご教示いただくなど多大なご協力を頂いた。ここに記して、謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 内閣府, SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) 次世代海洋資源調査技術 (海のジバング計画) 研究開発計画. 2015
http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/5_kaiyou.pdf, (参照 2015-12-05)
- 2) 松田健也, 橋本健太郎, 大原正寛, 坂本順哉, 松本アヌラ俊光, 永井洸太郎, 斎藤悠太, 後藤敏光, 松川育史朗, 川井田敏久, 木村信太, 横山心一郎, 内山昭憲, 久保田隆二. 航走観測を主体とした熱水鉱床探査—伊平屋小海嶺周辺海域における調査(速報)—. 海洋調査技術学会第27回成果発表会講演集. 2015.
- 3) 棚橋道郎, 上田哲士, 近藤六夫, 梶琢. 2周波のマルチビームソナーで何がわかるか—新たな広域熱水探査ツールの可能性について—. 物理探査. 2014, 67, 1, p. 17-24.