■ 特集号 研究速報

曳航式サブトムプロファイラーを用いた海底熱水鉱床 における音響探査技術の開発

三尾有年 (NTT データ CCS)*^{1,†},

浅田 昭, 水野勝紀, 片瀬冬樹, 小島光博 (東京大学生産技術研究所)*²

(2016 年 3 月 31 日原稿受付)

Abstract:

In order to assess hydrothermal deposits within the Japanese Exclusive Economic Zone to secure domestic marine mineral resources, we are developing and using five observation devices: Multi-Beam Echo Sounder (MBES), Sub-Bottom Profiler (SBP), Remotely Operated Vehicle (ROV), Interferometric Synthetic Aperture Sonar (InSAS), and samplers. Although topography can be determined with an ROV and/or InSAS, the accurate identification of submarine hydrothermal deposits requires a detailed observation of the geological structures underneath the vents. To this aim, we developed an SBP to perform detailed and geocoded surveys of zones previously mapped at a rough scale with MBES. Our SBP can observe vents as large as several tenths of meters. Its airfoils help suppress roll, and its arrays of 8-channel acoustic receptors reduce noise. Chirped signals allow a resolution in depth of 3.75 cm, which we believe should be sufficient to analyze hydrothermal vents.

Surveys over submarine calderas of the Izu-Bonin island arc were carried out in July 2014 with our SBP. On the Bayonnaise reef, we determined the structure down to 30 m below the seafloor.

In the future, our devices could be used to determine the geological structures of hydrothermal vents in other hydrothermal zones.

Classification: 物理音響・海底音響, 信号処理

Keywords: 曳航式サブトムプロファイラー, 海底熱水鉱床, 音響探査

1. はじめに

日本周辺海域では有望な海底熱水鉱床等の海洋

鉱物資源が確認されている。しかし、海洋基本計画¹⁾で目標に掲げられている平成 30 年後半の商

Development of the Acoustic Research Technology with the Towed Sub-Bottom Profiler for the Discovery of Submarine Hydrothermal Deposits

*1 Aritoshi MIO (NTT DATA CCS CORPORATION)

*2 Akira ASADA, Katsunori MIZUNO, Fuyuki KATASE, Mitsuhiro KOJIMA (Institute of Industrial Science, The University of Tokyo)

† amio@nttdata-ccs.co.jp

業化を実現するためには、より大規模で採掘コストに見合う鉱床の発見が必要不可欠となる。最近では、活動中の熱水鉱床のほかに活動を終えた熱水鉱床(非活動的熱水鉱床)や熱水活動の終了後に堆積物に覆われ現在は海底面上に露出していない鉱床(潜頭性鉱床)の存在が期待されている。しかし、非活動的熱水鉱床や潜頭性鉱床の探査技術はまだ確立されていない。

本研究グループでは、海洋鉱産資源の確保のために我が国の排他的経済水域内にある熱水鉱床を探索することを目的として、海洋鉱物資源広域探査システムの開発を行い、下記に示すように広域的な音響探査から局所的な岩石のサンプリングまでの幅広いレンジの観測ツールを用いて海底熱水鉱床の絞り込みを行っている。

- ・ MBES による広域での地形・反射強度マップの作成
- ・ SBP (サブボトムプロファイラー) 曳航体による海底下探査
- ・ ROV による海底探査
- ・ InSAS 搭載の Autonomous Underwater Vehicle (AUV) による精密三次元音響画像計測
- ・ 柱状採泥・岩石コアサンプラーによる海底採取

調査対象は、大きく3つのカテゴリー(広域調査、中域調査、詳細調査)に分けられ、広域調査をMBES、中域調査をSBP、ROVおよび合成開口ソナー、詳細調査を柱状採泥と位置づけている。中域調査の中でROVや合成開口ソナーは、海底の表面の観測を行ううえでは、重要な役割を果たすが、海底下の地下構造を知るためには、SBPによる音響探査が必須となる。

一般にSBPは、海底下数十mの地層の構造を調査することを目的とするもので海底工事の事前調査、パイプライン埋設のためのルーティング調査などに用いられる。研究対象としては、湖沼や海底の堆積層の層厚を求める研究²⁻⁴⁾が多数存在する。また、海洋鉱物資源調査に適用する場合は、船に設置したSBPを用いて広域的に調査を行う場合が多い。しかし、SBPによる広域的な調

査では海底までの距離による減衰や音波の指向性の問題から熱水鉱床下の精密な地下構造を得ることは困難である。これに対して曳航体やAUVを使って海底に接近して音響探査^{5,6)}を行えば、海底熱水鉱床の精密情報をピンポイントで確定することが可能となる。そこで、本研究グループでは、海底熱水鉱床の発見のための確度を上げるためのツールの1つとして曳航式のSBPの開発を行った(以降SBP曳航体)。SBP曳航体による探査の目的は、熱水鉱床の地下構造の観測であるため、深海でも安定した観測を行うために曳航体の強度、SBP曳航体の位置精度の確保、受信データの精度、観測中のSBP曳航体の姿勢を考慮に入れて曳航体を開発した。

本研究では、2014年7月に伊豆小笠原諸島のベヨネーズカルデラにおいて音響探査を実施した観測手法および観測結果(音響画像断面マップ)を示す。また、音響画像を作成するうえで影響を受けるノイズ(通信機器、送信器、多重散乱)について低減手法を開発し、適用した。

2. 観測

2.1 観測地域

本研究航海では、2014年7月に実施した「KKKyot14-03-Sumisu」航海においてベヨネーズカルデラの観測を行った。Fig. 1に調査海域エリアを示す。Fig. 2にベヨネーズ海丘内で実施したSBP曳航体の観測側線を示す。本観測では、カルデラの東側スロープから進入し、カルデラの底を経てカルデラの西側スロープを登る経路をとり、SBP曳航体によってカルデラの断面を観測した。なお、本研究では、既存の熱水鉱床の地下構造の把握のためにベヨネーズ海丘カルデラの東側斜面に位置する白嶺鉱床の上を通るルートを選定した。

2.2 観測機器

SBP曳航体は、SBP本体と海底下の層厚構造を探査するセンサー群を搭載している。以下に曳航体および搭載されている観測機器について説明

する。

(1) 曳航体の形状

Fig. 3 の曳航体の配置図が示すように SBP 曳航体の先頭部は、水の抵抗を少なくするために流線型の形状をしている。曳航するワイヤーは、曳航体の真上に設置され、船からワイヤー操作が行われる。ワイヤーの長さは、数百 m に達するため、曳航体自体の安定性が求められ、特に横揺れの影響を受けないために水平尾翼および垂直尾翼を付

加した。これまでの観測において姿勢情報のログを確認する限り曳航体自体の横揺れやそれに伴うデータ処理の欠損は、発生しておらず、安定した観測を行っている。

(2) 音響観測装置

Table 1 に示す通り水深 3000 m まで潜行可能である。音波探査データの計測システムは前方に音波探査用の送波音源(無指向性)、中腹部上方に音波送信用のパワーアンプ等を格納した音波探査用アンプシリンダ耐圧容器、中腹部下方に CPU ボードや音波データ収録装置、システム駆動用電池を格納した音波探査用回路シリンダー耐圧容器を搭載している。

(3) 音響モデム

SBP 曳航体の位置情報を船上にリアルタイムで知らせるため、本システムでは、SBP 曳航体と通信用の曳航体(通称 FISH)の通信および、船に設置された GAPS (Global Acoustic Positioning System) と SBP 曳航体の通信を SBP 曳航体に設置された音響モデムを通じてそれぞれ 2 系統の通信を行っている。今回の航海の場合、SBP 曳航体と通信用の曳航体との距離が離れると通信不能になることがあったため、曳航体のワイヤー操作は、主に GAPS から得られる位置情報を用いて

Fig. 1 Research sea area.

Fig. 2 SBP tracking line in Baiyonnaise Caldera.

Fig. 3 Towed SBP system.

Table 1 Performance of SBP.

SBP features	Value
Dimensions	2.9×2.6×1.5 m
Weight	500 kg
Maximum Voltage	1.75 kV
Maximum Operational Depth	3,000 m
Duration of battery	8.0 h
Sensors	DVL, GAPS, Acoustic Modem CTD

行った。

(4) 海中運用環境の計測システム

・ Doppler Velocity Logger (DVL) (Nav Quest 600)

曳航体の後部に設置されており、曳航体の速度、加速度、曳航体の高度を計測し、曳航体の位置、姿勢情報を取得しており、この情報は、音響モデムを通じて船にリアルタイムで送信されている。

・ Conductivity Temperature Depth profiler (CTD) (Citadel CTD-NV)

曳航体の後部側面に搭載されており、電気伝導度、水温、水深を観測している。この水深情報は、3.1.4 の CTD 高さ補正の処理で使用され、SBP 曳航体から反射面までの距離情報しか持たない音響データを海面からの距離に変換するために使用される。

(5) トランスデューサ (Echoes-1500, IXSEA)

音響計測は、送波音源から曳航体下方の海底に対して低周波音波を発信した後、海底下へ浸透した音波が熱水鉱床などの薄層境界面からの反射波を収録する。ハイドロホンアレイは、8 チャンネル装着されており、電気ノイズをキャンセルするために奇数チャンネルと偶数チャンネルで極性を逆転させて音響データを収容している。

音波探査のシステムは、送信波として電圧を 1.75 kV まで引加することができ、1.2 kHz を中心とし、幅 0.5 kHz の広帯域チャープ信号を使用して海底下反射波の観測分解能を向上させている。

2.3 観測方法

Fig. 4 に観測概念図を示す。まず、調査船からワイヤーで繋いだ SBP 曳航体を海底からの高度 50–100 m まで下ろし、高度を維持しつつ、等速 (約 1 m/s) で牽引した。また、船から音響モデムを搭載した別の曳航体を海面から 10–15 m 程度の深さに沈め牽引した。この FISH 曳航体の役割は、SBP 曳航体から送信される DVL 高度情報や CTD 深度情報を受信し、通信ケーブルを通じて船に送信することである。船上では曳航体と海底との高度をモニタリングしながら船の操船(ワ

Fig. 4 Conceptual diagram of SBP research.

イヤーの出し入れ)を行った。

ただし、SBP 曳航体と FISH 曳航体との間の通信が途絶えた場合は、調査船に設置された GAPS によって SBP 曳航体の位置情報を取得し、高度の維持を行った。

3. データ解析

3.1 解析手法

水中での残響ノイズの除去は、ハード面では、音波の指向性を高めて残響の受信を抑えるものや、TVG の使用によって残響の低減をはかる⁷⁾などの手法があげられ、本システムでも受信回路に TVG を用いて残響の低減を行っている。しかし、海面反射や壁面反射などで音響画像に写りこんだノイズの除去は、容易ではない。これは、ソナーの指向性や姿勢、海底地形の反射が厳密にシミュレーションできないためである。実際、音響画像の多くは、残響に関しては、そのまま残し、残響であることを提示して除去しない例⁸⁾が多い。しかし、今後新たな熱水鉱床を発見するためにグランドトゥルースデータの無いエリアに対

して音波探査を行った際に残響の除去または低減を行うことは、地下構造の把握を行う上で必要不可欠となる。そこで、本研究では、音響画像に対するフィルターの適用を行った。SBP 曳航体の受信データから音響断面マップを作成するまでの解析処理の手順を Fig. 5 に示す。以下、各解析を概説する。

3.1.1 チャネル合成

本研究では、より高精度の音響画像を取得するために複数の受信チャネルから得たデータのスタッキングを行っている。

まず、SBP 曳航体から海底に向けて音波を発射し、さまざまな場所から反射してきた音響信号を 8 チャンネルのハイドロホンで受信する。このとき、電気信号のノイズをキャンセルするため、ハイドロホンの奇数と偶数の極性を反転させている。データ処理では、8 チャンネルのデータを読み込み、極性を合わせたうえで Eq. (1) のように合成した。

$$\begin{aligned}
 \text{合成チャンネル} = & \text{ch1} + (-1) * \text{ch2} + \text{ch3} \\
 & + (-1) * \text{ch4} + \text{ch5} + (-1) * \text{ch6} \\
 & + \text{ch7} + (-1) * \text{ch8} \quad (1)
 \end{aligned}$$

Fig. 5 Flow chart of SBP data analysis.

ここで、1チャンネルのみで結像した結果(ch8を使用)と8チャンネルすべてをスタッキングした結果を Fig. 6 に示す。ここでは明らかに右図の方がノイズの低減化していることがわかる。左図で発生している上下方向のストライプノイズは、単チャンネルで画像を結像した時、Fig. 3 の曳航体の両羽根の部分に位置する 1, 2, 7, 8 チャンネルでレンジ方向(鉛直方向)に 20 秒間隔で発生している。この原因は、曳航体の上部に搭載されている音響モデムが 20 秒間隔で通信を行っているためと考えられる。一方、曳行体の腹部に位置する 3, 4, 5, 6 チャンネルにストライプノイズが混入しなかった原因は、ハイドロホンの位置が曳航体の陰となったためと考えられる。

3.1.2 レンジ圧縮

SBP 曳航体から発射する送信パルスは、700–1700Hz の FM 変調がかけられている。一般に帯域幅を N 倍すると元の送信波の長さの $1/N$ の短いパルスを発射したことと等価となり、距離分解能を N 倍に上げることが可能となる。この手法は、衛星 SAR の合成開口処理でも使用されており、レンジ圧縮処理⁹⁾と呼ばれる。

FM 変調をかけたチャープパルスは、Eq. (2) で定義される。本研究では、チャープ幅を 700Hz から 1700Hz に変化させている。

(a) Acoustic image using ch8 only

(b) Acoustic image using 8 channels

Fig. 6 Channel stacking.

$$r(t) = \sin(2\pi * (f_0 + (f_1 - f_0)/(2T) * t)) \quad (2)$$

f_0 : 開始チャープ値

f_1 : 終了チャープ値

T : シグナルの長さ

Eq. (2) は、送信信号のチャープパルスである。この信号の FFT と海底からの反射信号 R_{sig} の FFT の共役を取り、逆 FFT を施して実空間上に戻すことで、音響画像を結像させることができる。Eq. (3) に周波数空間上の相関処理を示す。

$$sig(t) = \text{invFFT}(\text{FFT}(r(t)) * \text{FFT}(R_{sig}(t))) \quad (3)$$

FFT : 高速フーリエ変換

invFFT: 逆高速フーリエ変換

$r(t)$: リファレンスチャープ信号

$R_{sig}(t)$: 受信信号

本研究では、1 ピングごとに Eq. (3) の処理を施し、解像度の向上をはかった。

Fig. 7 にレンジ圧縮前後の結果を示す。Fig. 7 左側のレンジ圧縮前においては、レンジ方向(鉛直方向)のフォーカスが甘くなっているのに対し

て、右側のレンジ圧縮後の結果は、レンジ方向にフォーカスが合い、特に斜面でピークが揃っていることがわかる。

3.1.3 ストライプ残響補正

Fig. 7 のレンジ圧縮前後の画像に Azimuth 方向(水平方向)のストライプノイズが残存している。これは、SBP 曳航体のトランスデューサ自身の残響ノイズであり、音波を発射した後にも残るため 8ch のハイドロホン、近くの発信源の残響を反射波とともに受信する。しかし、このノイズは、トランスデューサの特性に起因するためピングごとに異なった残響は発生せず、SBP 曳航体からの距離に伴って同じパターンが残響が出力される。そこで、このレンジ方向に同様の残響が発生する特徴に着目し、レンジ方向に信号をスタッキングし、それをリファレンスとして、元の信号にフィッティングして差分を取ることで、ストライプ残響ノイズの低減を行った。

ストライプ残響ノイズ除去の概念を Eq. (4) に示す。ここで、 x を曳航体の進行方向、 y を音波の発射方向とする。

Fig. 7 SBP acoustic image with range compression.

Fig. 8 SBP acoustic image with reverberation correction.

$$S'(x, y) = S(x, y) - \text{mean}(y) \quad (4)$$

$S'(x, y)$: ストライプノイズ除去後の出力シグナル

$S(x, y)$: レンジ圧縮後の入力シグナル

$\text{mean}(y)$: 進行方向のシグナルの平均値

Fig. 8 にストライプ残響ノイズ補正の結果を示す。ストライプノイズを除去する前後の画像を見ると、Fig. 8 の右側のストライプノイズ除去後の画像では、水平方向のノイズが十分に除去できていることがわかる。また、ストライプノイズと交差する斜面の反射輝度は、そのまま残っており、ストライプノイズの除去によって過剰除去が起こっていないことがわかる。

3.1.4 CTD 深度・ヒーブ補正

残響補正までの処理においてレンジ方向(鉛直方向)の距離は、曳航体からの距離を示している。そこで正しい海底面の地形を抽出するために母船から曳航体までの距離を CTD によって計測された値を加えて相対的な海底地形の変化量に変換する高さ補正を施した。しかし、CTD 深度補正を行っただけでは、海底面の凹凸(数 cm-数十 cm)

残るため、海底面に強い反射面が存在し、それが曳航体の進行方向に連続しているという仮定のもとにヒーブ補正を行った。本研究では、海底面付近で最も反射強度が強い範囲を進行方向に該当ピング数分抽出し、その移動平均を取り、移動平均線に元の反射面が並ぶように上下方向にピクセルの移動を行った。

Fig. 9 に高さ補正の結果を示す。Fig. 9 の左側のヒーブ補正前の画像では、海水と海底面の境界がぼけている。これに対して右側のヒーブ補正後は、画像上面に強い反射面が二層確認することができ、その下の層状構造もはっきりと確認できる。

3.1.5 海底下深部の多重散乱の低減

本研究で SBP 曳航体に搭載した送波音源は、無指向であるためあらゆる方向からの反射を取得する可能性がある。斜度が急激に変化する場所では、多重散乱によるノイズが地下の深い場所に重畳し、あたかも地層構造が存在するように結像する。この多重散乱を低減するために、音波が距離の二乗に反比例して減衰することを利用し、多重散乱低減フィルターを SBP 曳航体音響画像に対して適用した。

Fig. 9 CTD height and heave correction.

Fig. 10 Conceptual diagram of multichannel reverberation depression.

通常音波は、距離が遠ざかるにしたがって減衰するが、多重散乱が発生した場合、Fig. 10に示すような強度異常が発生する。そこで、反射強度の極大値(もしくは極小値)の漸近線を以下の式

で定義した。

$$y = a/x^2$$

(5)

(a) no correction image

(b) correction image

Fig. 11 Application results in using multichannel reverberation depression.

x は海底から下方のピクセルまでの距離、 α は解析エリアの強度の最大値を設定した。また、漸近線を超える値を異常値として異常値の最大値が漸近線を超えないようにゲインを調整する処理を施した。ただし、漸近線を超えるエリアのみゲインを掛けると画像に不連続が生じるため、 y の値が 0 から極大値となり、極大値から 0 に戻る範囲に対してゲインを設定した。この処理の結果を **Fig. 11** に示す。多重散乱の低減補正前の画像は、多重散乱により深度 50m までの信号が確認できるが、補正を行うことにより大幅に改善されることがわかる。ただし、**Fig. 11** の下の画像では、海底下に層状の構造(図中の矢印部分)が確認で

きる。しかし、これは地下構造の反射面ではなく、1 ピング前の音波が海面反射して次のピングの受信信号として現れた結果である。このように真の信号と多重散乱が混入する場合は、本フィルターでは分離不可能となる。

3.2 結果と考察

3.2.1 音響画像の正規化

前節の音響データ処理により、ベヨネーズカルデラの白嶺鉾床上の音響画像を作成し、**Fig. 12** に示すとおり海底面下 30m までの層状構造を捉えることが出来た。しかし、**Fig. 12** の画像中には、1 ピング前の送信波が海面で反射した海面反射の影響や、ベヨネーズカルデラの斜面からの反

Fig. 12 SBP acoustic profile in the Bayonnaise caldera.

射波の影響などが含まれていることが考えられる。最終的にはこれらの信号とノイズの分離を行う必要があり、フィルタリング手法の評価に対してSN比を用いて定量的に議論すべきである。しかし、海中の反射面を特定することは非常に困難である。そこで、まずは多重散乱によるノイズの影響範囲の把握が必要と考え、ピングごとに多重散乱の影響が大きいエリア、小さいエリアを定量的に示す試みを行った。まず、1パルスごとのレンジ方向(鉛直方向)の反射強度を積算し、1パルスの擬似的なエネルギーの総計とみなしてその分布を見れば、多重散乱などによって混入した別の信号がある場所は、平均値よりも高くなることが予想される。そこで、Fig. 12と同じ範囲に対して反射強度の総計(積算強度と呼ぶ)を以下の手順で行った。

- ・レンジ方向の音響断面から正の領域のピーク値

をつなげた包絡線を求める

- ・各ピングの包絡線の断面積を求める
- ・断面積を画像全体の最大値で割る
- ・SBP 曳航体からの距離の減衰を考慮するために上で求めた値にSBP 曳航体の高度を乗じ、SBP 曳航体の高度の最大値(100m)で正規化する

この結果を **Fig. 13** に示す。SBP 曳航体の高度補正を行うことによってピークが出現しているが、これらは、Fig. 12 に示すベヨネーズカルデラの東側斜面の多重散乱の場所と一致しており、斜面からの多重散乱によって発生するノイズの位置を特定できる可能性が示唆される。

3.2.2 ノイズ除去の考察

今後新たな熱水鉱床を発見するために音響画像のノイズの除去による海底地層の明瞭化を行うために3つのノイズ除去を行った。まず、他の機

Fig. 13 Diagram of the sum of the acoustic intensity normalized by SBP height in the range direction.

器の信号が混入した場合の除去(チャンネル合成)、次に送信器自身が発生する SBP 曳航体の進行方向に平行な残響ノイズの除去(ストライプ残響補正)、最後に多重散乱の低減処理(音波の減衰を用いたフィルタリング)によってノイズの低減化を行った。

本研究で観測を行ったベヨネーズカルデラの東側斜面の地形の傾斜の変化に伴う多重散乱が海底下 100m まで発生している。発生するポイントは、3.2.1 の SBP 曳航体の高度補正を施した積算強度分布により特定することはできる。しかし、例えば、3.1.5 で行った多重散乱低減処理を適用すると深いエリアのノイズは低減可能であるが、浅いエリアのノイズは真の信号も距離で様にフィルタリングするため、信号とノイズの分離が非常に困難である。今後は、作成画像単体からではなく複数の情報(海底地形、形状・強度・距離の違い、SBP 曳航体の姿勢情報、他のセンサー情報など)を用いて多角的に多重散乱の特徴の抽出を行い、信号との分離を行う必要があると考える。

4. まとめ

本研究では、SBP 曳航体の開発および SBP 曳航体による伊豆小笠原諸島のベヨネーズカルデラの音波観測を行った。

海底熱水鉱床の観測に特化した SBP 曳航体の開発を行い、実際の熱水鉱床に対して観測を実施した結果、海底下 30m までの層状構造を捉えることができた。ただし、既存の海底熱水鉱床であるベヨネーズ海丘カルデラの白嶺鉱床でも音響断面マップを作成したが、海底熱水鉱床特有の地質構造は、確認できなかった。しかし、深海における音響断面マップによって海底下の地質構造が得られたことは、同様のカルデラにおける適用が可能となったことを示している。今後、ハード面やソフト面、運用面でのさまざまな微調整を行う必要があるが、本システムは、本研究グループで開発している海洋鉱物資源広域探査システムの中の手法の 1 つとして十分に機能することが確認できたと考える。

謝辞

本研究(海洋鉱物資源広域探査システム開発プロジェクト)は、文部科学省「海洋資源利用促進技術開発プログラム」による支援を受けている。また、「海洋エンジニアリング株式会社第七開洋丸 KKKyot14-03 次航海スタッフ」、「株式会社リンク」、「株式会社エス・イー・エイ」の方々から多大なる支援をいただいた。ここに深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 首相官邸資料, 海洋基本計画, <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/kaiyou/kihonkeikaku/130426gaiyou.pdf> (最終検索日: 2016/03/30)
- 2) Z. Ben-Avraham, T. M. Neimi, D. Neev, J. K. Hall and Y. Levy, "Distribution of Holocene sediments and neotectonics in the deep north basin of the Dead Sea," *Mar. Geol.*, **113**, 219-231 (1993).
- 3) 片山 肇, 坂本拓也, "日本海東部, 秋田沖における堆積速度の広域分布," *地学雑誌*, **113**(10), 505-518 (2007).
- 4) 内田康人, "北海道沿岸域にて実施された海底音波探査とその記録解析," *地質研究所ニュース*, **590**, 505-518 (1999).
- 5) 明治大学ガスハイドレート研究所, 2014 年度調査概要, <http://www.kisc.meiji.ac.jp/~hydrate/images/summary201501.pdf> (最終検索日: 2016/03/30)
- 6) 多良賢二, 徳山英一, 芦寿一郎, 亀尾 桂, "深海曳航式サブボトムプロファイラーによる熱水活動域の地下浅部構造の解明—中部沖縄トラフ伊是名海穴の例," *日本地質学会第120 年学術大会講演要旨*, 76-76 (2013).
- 7) 土屋利雄, 中西俊之, 網谷泰孝, "しんかい 2000 用サブボトムプロファイラーの開発," *海洋科学技術センター試験研究報告*, **15**, 11-22 (1985).
- 8) 産業技術総合研究所, 海陸接合物理探査研究海域地質環境調査確証技術開発成果報告書, 245-299 (2014).
- 9) 海洋音響学会, 海洋音響の基礎と応用(成山堂書店, 東京, 2004), pp. 176-182.
- 10) 棚橋道郎, 塩川 智, 村山信行, 高取亮一, "伊豆・小笠原弧背弧リフト帯ベヨネーズ海丘で発見された大規模海底熱水鉱床," *資源地質*, **56**(2), 185-196 (2006).