

バーティカルケーブル方式反射法地震探査(VCS)の開発

浅川栄一*・村上文俊*・岡本 拓*・関野善広*・三ヶ田均**・武川順一**・志村拓也*³

要 旨

バーティカルサイスミックケーブル方式反射法地震探査は、海底面から鉛直上方に受振器(ハイドロフォン)を配置し、水中震源により音波(地震波)を発生させ、この音波が地下に伝播し、地層境界からの反射波を記録して、海底下構造を調査する手法である。一般的に VCS(Vertical Cable Seismic)と略称されている。VCS は、海底熱水鉱床探査の対象領域と想定される比較的狭いエリアでの三次元反射法地震探査としては、非常に優位性があり、現在、文部科学省「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」の中で海底熱水鉱床探査システムとして、データ処理・解析技術も含めた総合的な探査技術として研究をすすめている。

平成 21 年度には琵琶湖において VCS のジオメトリを実現しフィージビリティスタディとしての三次元調査を実施し、地下構造の高分解能な三次元ボリュームを得ることができた。この結果を受けて、平成 22 年度には自律型探査システム二式を試作し、実海域におけるシステム性能・運用試験を経た上で、海底熱水鉱床の存在が示唆される沖縄伊平屋海丘海域において深海曳航型震源を用いた海域実験を実施した。本実験では、水深 1,000m での投入・回収方法、バーティカルケーブルの位置の計測方法を検証した。また、深海曳航型震源との組み合わせで取得されたデータは、海底からの反射波をとらえており、海底熱水鉱床が存在する深海環境下で、システムが十分な性能を持って正常動作することが確認できた。しかしながら、データ処理段階では、受・発震の位置精度向上などの課題が抽出されており、今後、水中測位技術や精度良い投入・回収方法の確立なども含めたトータルな探査システム構築の必要がある。平成 23 年度は、高分解能な海上震源と組み合わせた調査と海底震源と組み合わせた調査の二度の実海域調査を計画しており、VCS 探査技術の実用化を図る計画である。

キーワード：海底熱水鉱床・音波探査・バーティカルケーブル・高分解能反射法地震探査

1. はじめに

日本は四方を海で囲まれ、領海と排他的経済水域(EEZ)を合わせた面積は約 447 万平方 km で世界 6 位であり、更に平成 20 年 11 月に国連大陸棚限界委員会に申請した延伸面積は 74 万平方 km となっている。この広大な海域の有効利用のために、平成 19 年に「海洋基本法」が施行され、その後平成 20 年に「海洋基本計画」が策定された。特に、海洋資源に関しては、平成 21 年度に「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」が経済産業

省より公表されて、海洋資源の今後 10 年間の開発計画が示された。この計画の中では、メタンハイドレート、石油・天然ガスと並んで、海底熱水鉱床の探査・開発が大きな柱となっており、経済産業省と文部科学省が連携して研究・開発を推進している。

海底熱水鉱床は、海底から重金属に富む熱水が噴出し、それが冷却される過程で熱水中の銅、鉛、亜鉛、金、銀等の重金属が沈殿して生成された多金属硫化物鉱床である。日本周辺海域では、沖縄トラフ及び伊豆・小笠原海域において、科学、資源調査等によって、多くの鉱床が

2011 年 8 月 29 日原稿受付; 2011 年 11 月 1 日受理

* (株)地球科学総合研究所

〒101-0031 東京都文京区大塚 1-5-21

** 京都大学

〒615-8246 京都府西京区京都大学桂 4 C1-1-112

*³ 海洋研究開発機構

〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町 2-15

発見されている。これらは、世界的にみても分布水深が700m~1600mと比較的浅く、開発に有利と期待されている。

しかしながら、水深1000mを越える深海域において海底下100m以浅に賦存すると考えられる海底鉱物資源の探査に対しては、従来の探査手法では、鉱物の賦存状況や資源量に関する情報を効率よく把握することが困難である。このため、海底下の地質構造や物性等を高分解能で把握することを目的とした探査技術の高度化に関する研究・開発として、文部科学省では、「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」を平成21年度より開始した。

「パーティカルケーブル方式反射法地震探査」は、平成21年度「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」の中で研究テーマ「パーティカルサイスミックケーブル方式反射法地震探査(VCS)システムの開発」として採択され、京都大学及び海洋研究開発機構と共同で開発を開始した。平成22年度より、研究テーマ「パーティカルサイスミックケーブル方式反射法地震探査(VCS)と高周波音源を組合わせた接地型高解像探査システムの開発」として東京大学大気海洋研究所および海洋研究開発機構とともに開発をすすめている。

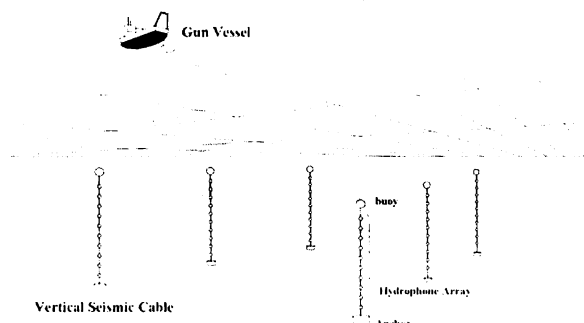


Fig.1. Schematic data-acquisition configuration of VCS. Vertical arrays of hydrophones are placed on the seafloor and compressional waves propagate through the water so that the configuration becomes similar to that of VSP.

2. パーティカルケーブル方式反射法地震探査(VCS)

パーティカルサイスミックケーブル方式反射法地震探査は、海底面から鉛直上方に受振器(ハイドロフォン)を配置し、水中震源から音波(地震波)を発生させ、この音波(地震波)が地下に伝播し、地層境界で反射して戻ってくる波(反射波)を記録して、海底下構造・物性を探査する手法である。一般的にVCS(Vertical Cable Seismic)と略称されている。VCSは、石油探鉱において1990年代後半に米国で複雑な構造での三次元反射法地震探査手法として限定的に使われた(Krail, 1994; Leach,

1997; Ikelle and Wilson 1999)。しかし、その後の大規模な三次元地震探査船の登場で海上三次元反射法地震探査に置き換わった。そのため、VCSのデータ取得技術、データ処理・解析技術が未確立のままである。しかしながら、後述するように海底熱水鉱床探査の対象領域と想定される1km×1km程度の比較的狭いエリアでの三次元探査としては、海上三次元探査に比較してVCSは非常に優位性があり、海底熱水鉱床探査の実用システムとして新規に設計・開発しているものである。

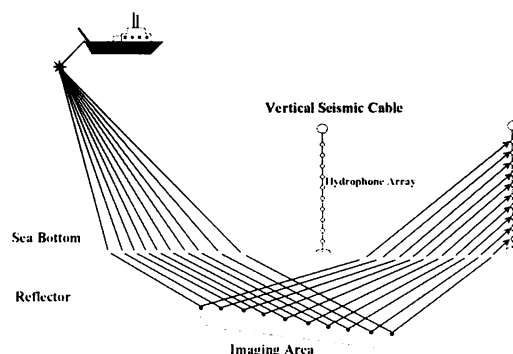


Fig.2. Survey schema of VCS with surface-towed source.

VCSの概念図をFig.1に示す。ハイドロフォンを内蔵したケーブルの一端にアンカーをつけて海底面に接地させ、他端にブイを付けて浮かせ、ケーブルを海底から鉛直に設置する。このように海底に設置されたハイドロフォンケーブルをパーティカルケーブルと呼ぶ。ここで、海上発震をして発生した音波が、海底下に伝搬し、地層境界から反射してくる波(反射波)を鉛直に展開したハイドロフォンで受振する。Fig.2に反射波の波線を模式的に示す。ここで、地層境界の反射点の分布を図示しているが、この反射点の分布する領域が地下のイメージング可能範囲となる。海上の発震点を面的に設けることによって、パーティカルケーブルを中心とする地下の三次元構造イメージを得ることができる。通常海上三次元調査に比較して受振点数が制限されるが、複数のパーティカルケーブルの配置、発震点の分布を適切に変えることによって、対象となる範囲の三次元構造を効率的に把握することが可能となる。

受振器は、パーティカルケーブルによって海底面近傍に配置されるため、探査対象に接近した観測が可能になり、波動現象による分解能の劣化(フレネルボリュームの拡大)を抑制でき、また波浪ノイズを避けることができるため、鉛直・水平方向ともに従来の海上反射法地震探査(MCS)に比べて分解能の向上を図ることができる。また、震源に関しては、海上震源、海中震源(深海曳航震源)、海底震源などに対応でき、用途によって構成を変更することが可能である。

VCSは上記以外にも、以下の様な特長を持つため、海底熱水鉱床の探査に最適な反射法地震探査手法と考える。

(1) 海底熱水鉱床の賦存する海域では、海底面の起伏が激しいケースが多い。パーティカルケーブルの端は、海底に接地するものの、センサーは海中にあり、起伏の激しい海底面とのカップリングなどの問題が生じない。これに対して、従来から、海底に受振器を設置し、海底下からの反射波を記録し、地下の構造を推定する海底受振ケーブルシステム(OBC, Ocean Bottom Cable)があるが、これは受振器自体を海底設置するため、熱水鉱床域のように起伏の激しい海底に適切に設置することが困難である。VCS ではセンサーが海底面に接地しない点が大きな利点となる。

(2) 受振器が海底に着底している OBC では、海底直下の反射面からの反射波と水中を直接に伝わる音波(水中直達波)がほぼ同時刻に到達するため、それらを分離してイメージングを行うことが困難である。しかしながら、VCS の場合には海底から離れてセンサーが展開されているので、直下からの反射波を分離しやすいため、極浅部を対象としたイメージングが可能となり、海底下浅層に賦存する海底熱水鉱床探査に有利である。

(3) 海底熱水鉱床域では、海上から発震された波が、複雑な地形により途中で散乱するケースが考えられる。VCS の鉛直に展開された複数センサーの記録を処理することによって、こうした散乱波の性状を把握しノイズとして波動場を分離し、地下からの反射波だけを取り出し、高品質な地下イメージを得ることが可能になる。また、発震点の制約が少なく、いろいろな方向(アジマス)からの反射データを取得することができるため、複雑な

構造でのイメージの向上が期待できる。

3. 琵琶湖 VCS 現場実験

「パーティカルケーブル方式反射法地震探査 (VCS) システムの開発」は平成 21 年度から平成 23 年度までの 3 年間で実施されている。研究初年度である平成 21 年度には、本探査手法の有効性を確認するフィージビリティスタディとして「琵琶湖」において、既存の VSP ハイドロフォンケーブルを用いてパーティカルケーブル方式反射法地震探査と同じジオメトリを実現し、データを取得し、データ解析を行い、探査手法の有効性を確認した。

3.1 データ取得

平成 21 年 11 月に琵琶湖において VCS の現場実験を実施し、二次元および三次元の VCS データを取得した。調査場所は琵琶湖の北西部(高島市新旭町饗庭地先 4km 沖)、既往のストリーマによる反射法地震探査測線(Line54-02/Line54-8)の交点を中心とする 1~2km 四方の水深が 90m を超えている領域に設定した。調査海域は、琵琶湖の最深部にあたり、水深は約 100m である。調査エリアの広域図と拡大図を Fig. 3 に示す。

琵琶湖 VCS 実験用に構築したパーティカルケーブルの受振装置は、VSP(Vertical Seismic Profile)で用いられる 24 チャンネルのハイドロフォンケーブルを用いた。ハイドロフォンセンサーを 3m 間隔に 24 個装着し、それを船上から降下させてつり下げることによって VCS

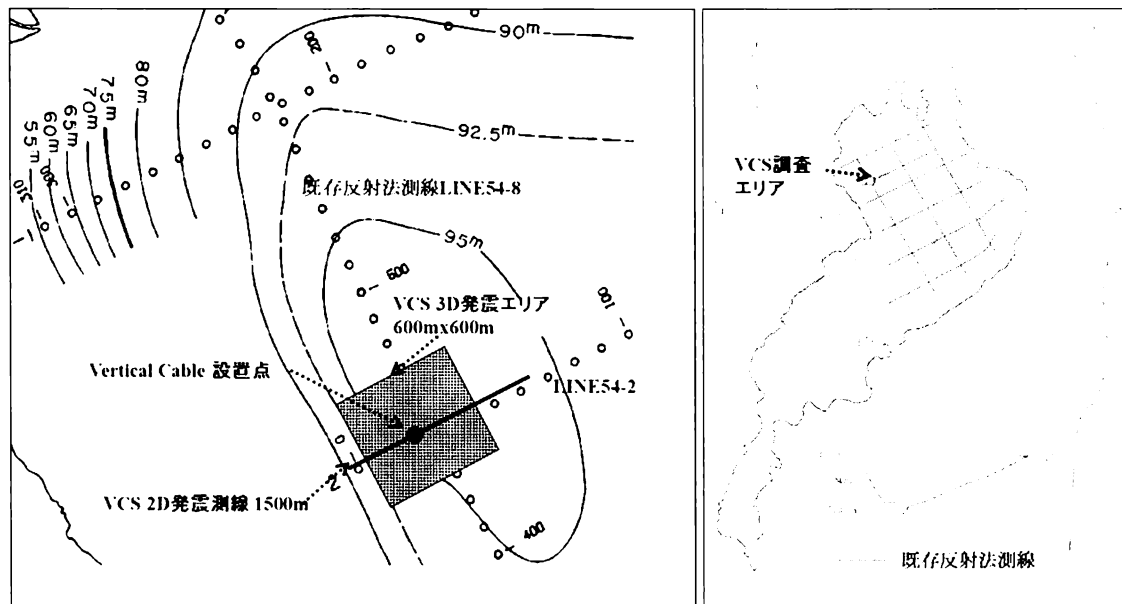


Fig.3. Survey map of VCS experiment in Lake Biwa. The solid circle shows the location of the vertical cable. The solid line shows the 2D VCS shot line of 1.5km length. The hatched rectangle shows the 3D VCS shot area of about 500m x 500m. The conventional surface seismic lines (54-2, 54-8) are shown with open circles. The vertical cable is located at the crossing point of line 54-2 and 54-8.

のジオメトリを作り出した。また、アンカー部分には3成分加速度計、加速度計の方位を検出するためのコンパス、温度計を装着した。

発震は、まず小型エアガン、ウォーターガン、ピエゾ発震素子を用いて、データ品質の評価を行った。その結果、深部からの反射が明瞭に認められる小型エアガンを用いて二次元・三次元データを取得した。Fig. 4 及び Fig. 5 に琵琶湖 VCS 実験で得られたデータの一部を示す。Fig. 4 は連続する3つの発震を24個のハイドロフォン

で記録したものである。また、Fig. 5 は一つのハイドロフォンに対して、小型エアガンの全発震のデータを並べたもの（共通受振点記録）である。深部からの反射を明瞭にとらえており、高品質なデータが得られている。

3.2 二次元データ処理

石油探鉱では VCS と同様に鉛直に受振器を配置した高分解能反射法地震探査の方法として、VSP(Vertical Seismic Profile)がある。これは、坑井に受振器を配置し

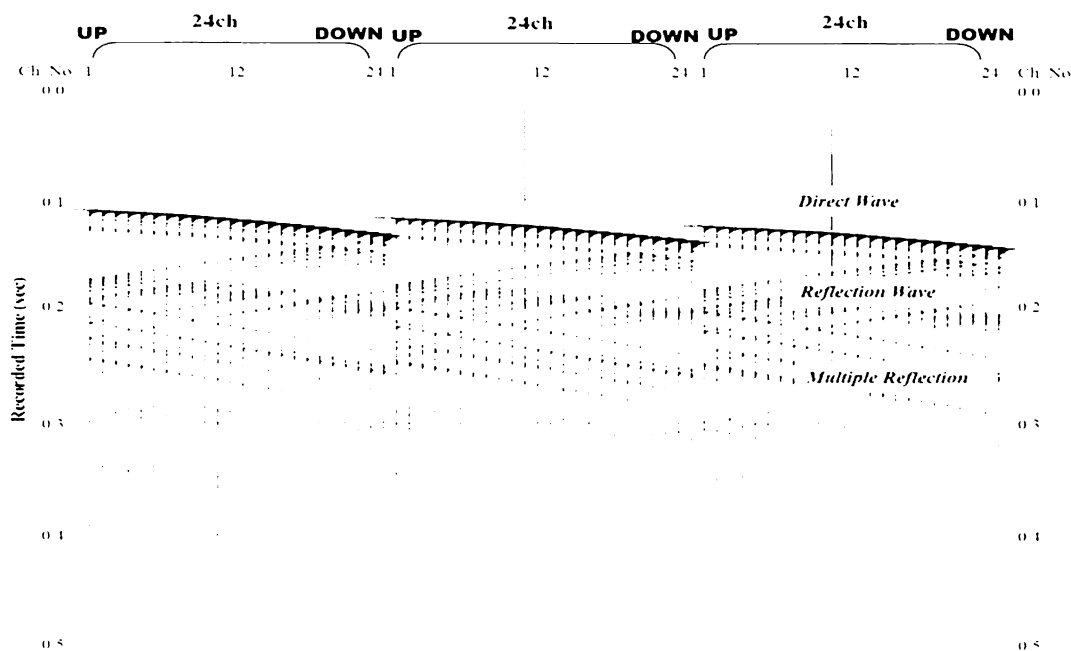


Fig.4. An example of VCS shot records with GI gun.

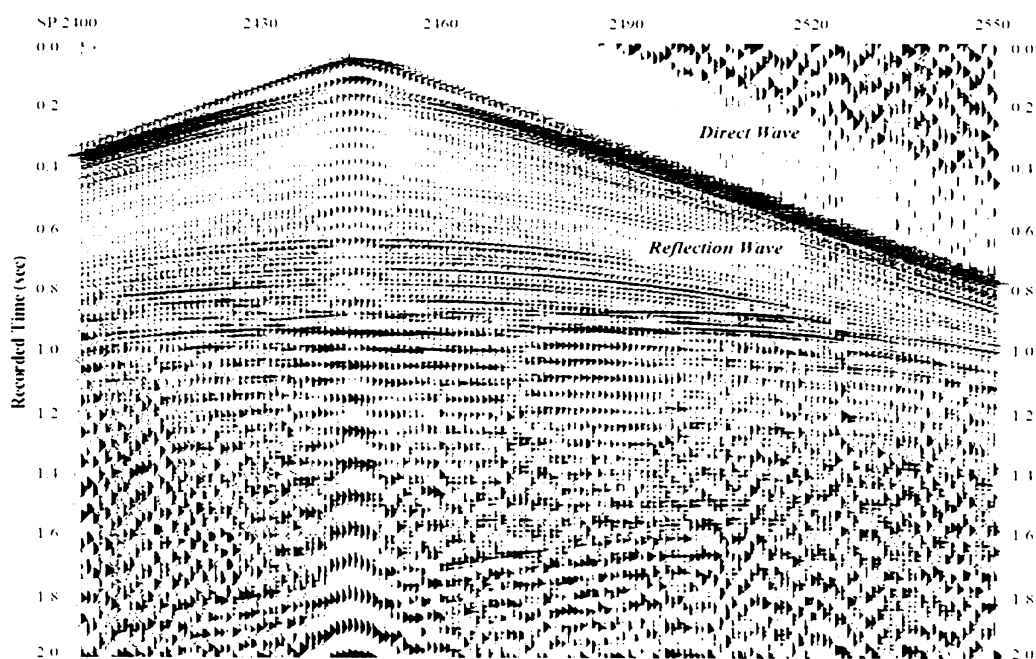


Fig.5. An example of Common receiver gather of top hydrophone.

て、地表で発震を行い、地下からの反射波を坑井内の受振器で記録し、坑井近傍の地下構造を高精度に推定する手法である。VSP では受振点が坑井内に配置されているのに対し、VCS では受振点が水中に配置されているところが異なるが、海面を地表とみなし、水中を地層の一部と見なすことで、VSP と同様のデータ処理を実施することができる。二次元 VCS データ処理は、この VSP データ処理を参考にした。Fig. 6 にデータ処理フローチャートを示す。

帯域通過フィルターやデコンボリューションといった各発震記録に対して信号処理を行った後、水中を伝わって発震点から受振点に直接伝搬する波（水中直達波）の到達時間を読み取り、そのデータを基にして、下方進行波と上方進行波に波動場を分離する。下方進行波には、水中直達波や湖面で反射した多重反射波であるため、湖底からの反射波を使うイメージング処理の際にはノイズとなってしまう。このため、上方進行波のみを使って、重畳前深度マイグレーション処理を行った。Fig. 7a に、二次元 VCS データに対して重畳前深度マイグレーション処理を施して得られた深度マイグレーション断面を示す。

また、地震波干渉法(Seismic Interferometry)処理を行い、擬似的に海上発震、海上受振の従来型の反射法地震探査データを合成し、通常の処理で用いられている CDP

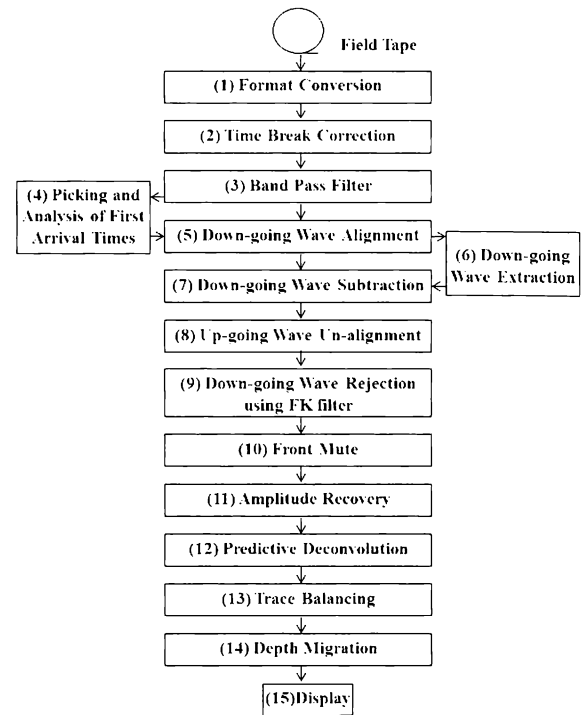


Fig.6. Flowchart of VCS data processing.

重畳法によるイメージング処理を実施した。ここでは、VCS の共通受振点記録に対してトレース間の干渉処理（相互相関処理）により、海上の全ての発震点位置を仮想

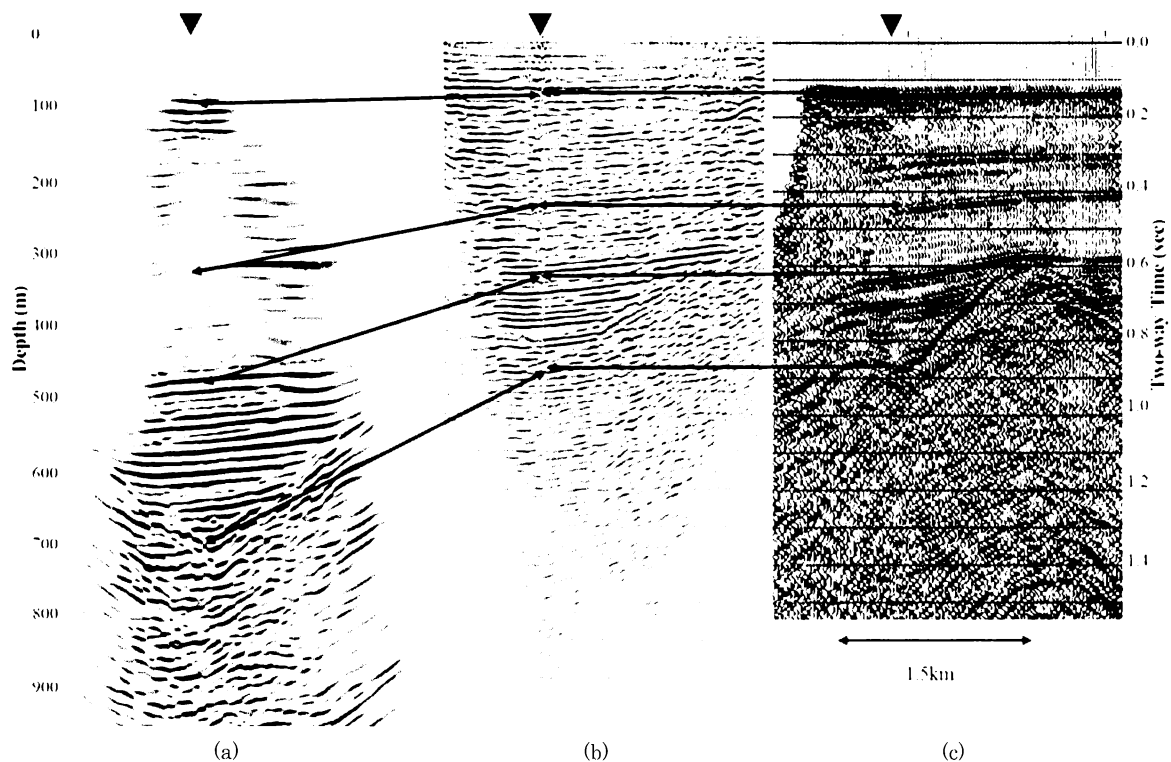


Fig.7. VCS 2D seismic images. Left figure (a) shows the VCS prestack depth migrated section, middle (b) shows the VCS stack time section with SI and right (c) shows the stacked time section of conventional MCS the. The triangles show the location of the vertical cable. The VCS 2D survey covers the range of 1.5km on (c). The arrows indicated the major corresponding reflections.

的な発震点および受振点とする海上探査記録を合成した。水面上のひとつの発震点 A から VCS に到達する波線は一度海底面で反射し、直接 VCS で受振される波線の他に、水面上で二度目の反射をし、VCS で受振される波線も存在する。水面上の反射点として、発震点 B を考えた場合、発震点 A と発震点 B とのデータの相互相関を取ることで、発震点 B から直接 VCS に到達して受振される波線はキャンセルされるため、発震点 A から海底面で反射して発震点 B に到達する信号だけが残ることとなる。VCS のセンサーの数(24)だけデータセットができるため、同じジオメトリで 24 データセットが得られる。本手法の特徴は、海面に起因する多重反射波を干渉処理により時間シフトし、複数の干渉波形のフェーズを重ね合わせることで一次反射波を強調し、反射波記録を得る点にある。このため、特に海底直下の反射波のイメージの品質向上を図ることができる(白石ほか,2008)。合成された反射波記録に対しては、CDP 重合法により速度解析、イメージングを行った。

Fig. 7c に既往海上反射法地震探査の断面 (Ikawa, 1991) を示し、Fig. 7a および Fig. 7b と比較する。Fig. 7a~7c の断面で湖底面を含む主要な 4 つの反射面に関して矢印で対応を示しているが、どの断面でも明瞭にとらえられている。ここで、Fig. 7a は深度断面で、Fig. 7b 及び 7c は時間断面であるため、同じ反射面でも両者の間で軸方向にずれている。VCS により得られたイメージ (Fig. 7a 及び 7b) は、既存の反射断面 (Fig. 7c) と整合性があり、かつ主要な対応する反射面の間により多くの反射面が認められることから、より高分解能な結果となっていることがわかる。

二次元重合前深度マイグレーション処理結果 (Fig. 7a) のイメージング範囲は浅部でもある程度の広がりを持つが、深くなるにしたがって次第に広がっていることが分かる。1 本のパーティカルケーブルを用いた場合でも海底受振の OBC や OBS が海底面をイメージングできないことと比べて有利である。また、地震波干渉法を用いた重合断面 (Fig. 7b) では、二次元重合前深度マイグレーション処理結果 (Fig. 7a) と比較して、浅部のイメージング品質が向上していることがみてとれる。これは、多重反射波により浅部の反射点が広がっているためである。一方、深部に関しては、重合前深度マイグレーション処理結果の品質が高いため、両者を組み合わせた最適な処理を考える必要がある。

3.3 三次元データ処理

三次元データはパーティカルケーブルを中心に約 600m の発震測線 28 本から成っている。発震間隔は 10m で、各測線間の距離は 20m である。まず、発震データに関して、信号処理や波動場分離処理は二次元データと同様の前処理を行った。前処理後のデータに対して、三次

元重合前深度マイグレーションを適用した。マイグレーション速度は、二次元データ処理で用いた速度モデルを単純に平面に延伸した水平多層モデルを使用した。三次元重合前深度マイグレーションボリュームを Fig. 8 に示す。パーティカルケーブルを中心にして、水平方向 500m × 500m の範囲で、深度 1000m までの高分解能な地下構造が得られている。

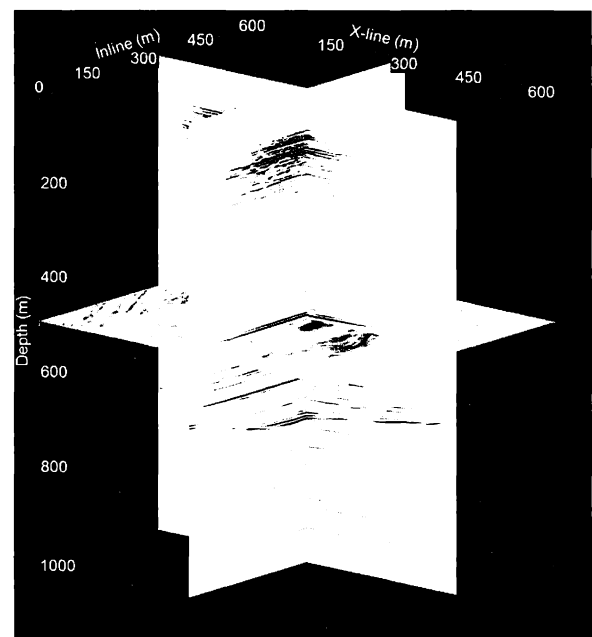


Fig.8. VCS 3D Prestack depth migrated volume.

4. 実用機器の開発

平成 21 年度の琵琶湖 VCS 現場実験を含むフィージビリティスタディを通し、パーティカルケーブル方式反射法地震探査(VCS)の理論、実用の両面から技術の有効性が確認できた。また、当初より、実海域における実用機は、琵琶湖 VCS 現場実験で用いた船上からケーブルをつり下げる方式ではなく、探査システムを船上から投下し、海底面に着底させ、海上または海中で発震しながら連続的にデータ取得を行い、調査後には自己浮上する自律型探査システムの開発を計画であった。

平成 22 年度には、高感度で広帯域観測が可能なハイドロフォンアレイセンサーをもつ VCS 実験機を試作した。試作機の概観を Fig. 9 に示す。図中、黒いリボンで覆われている部分がハイドロフォンケーブルである。VCS 実験機 1 式につきハイドロフォン 8 個が 10m 間隔で取り付けられている。本機は水深 1,500m までの海域において、自重を利用した自然落下により海底面所定の位置に着底し、数日間のデータ取得作業の後、係留用のアンカーをシステム本体から音響切離装置を利用して分離し、ブイの浮力により自己浮上、回収する設計となっ

ている。

音響分離装置は、アンカー直上に装着されているが、調査時にはブイ直下に装着された音響測位装置とともに測位用トランスホンダとして使用する。これにより、パーティカルケーブルの上部、下部二箇所の位置を求めることができる。また、ケーブルの途中には傾斜計を装着し、姿勢観測を行ない、パーティカルケーブル設置時の姿勢をモニターする。

また、データ収録装置は、耐圧容器に収納してパーティカルケーブルに装着する。これにより、8個のハイドロフォンの観測データを取り込み、記録する。ハイドロフォンの観測データは、24ビットデルタシグマ型高精度AD変換器で8チャンネル信号同時サンプリングをおこなっている。また、AD変換器からの連続デジタルデータは、SDメディアに記録され、システム回収後に回収される。また、高速サンプリングのために、超高精度ルビジウム発信器をタイムベースにしたクロックモジュールを組み込んだ時刻同期装置を装備し、システム投入前後にGPSクロックでキャリブレーションを行う。



Fig.9. Photo of the autonomous VCS system.

5. 沖縄伊平屋海域実験

研究2年目となる平成22年度には、平成23年1月30日から同年2月10日にかけて沖縄トラフ伊平屋海丘(水深1,000m強)の熱水鉱床実海域において、前節において説明した実験機2式を用いて、投入・回収、姿勢観測に関する運用実験とデータ取得試験を実施した。本実験は、平成22年度(独)海洋研究開発機構の深海調査研究の一般公募として採択された、東京大学生産技術研究所の「マルチビームサブボトムプロファイラーによる熱水鉱床の位置ならびに大きさの三次元的把握に関する研究」の「なつしま」NT11-02航海で実施された。

5.1 探査概要

本調査は熱水鉱床実海域において、VCSシステムの投入・回収手法や海底面設置後の測距精度、姿勢変化について検証し、また、データ収録装置を用いてデータ取得

実験を行い、想定する海底下の環境において機器が正しく作動し、所定のデータ取得ができることを確認する目的で、深海曳航型音波震源とVCSを組み合わせた探査を(独)海洋研究開発機構所有の海洋調査船「なつしま」で実施した。

5.1.1 深海曳航型音波震源

使用した深海曳航型音波震源は東京大学生産技術研究所の所有するIXSEA社ECHOES 1500である。これを(独)海洋研究開発機構所有の深海曳航調査システム「4KCディープトウ」に搭載して使用した。搭載時の外観をFig. 10に示す。深海曳航型音波震源の取り付け位置を矢印で示している。



Fig.10. High frequency acoustic source mounted on JAMSTEC Deep-tow 4KC. White arrow shows the source position corresponding reflections.

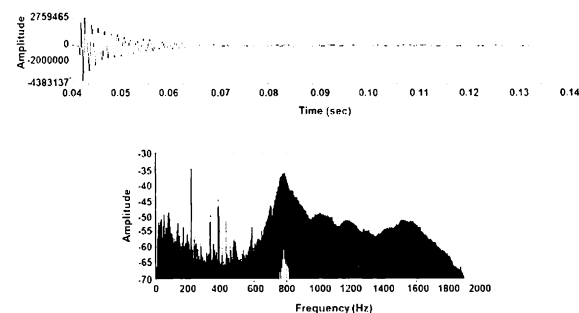


Fig.11. Observed waveform and amplitude spectrum of the high frequency deep-towed source.

また、本震源の震源波形と周波数スペクトラムの一例をFig. 11に示す。Fig. 11上図は、曳航型音波震源がVCSシステムの係留ブイの真上約50mを通過時に発振した波形をVCSシステムの最上部のハイドロフォンセンサーが捉えたデータのものである。また、その周波数スペクトラムをFig. 11下図に示す。本震源は、ヘルムホルツ型音波震源(周波数帯域650Hz-2.5kHz)で、本調査ではドライブ信号はサイン波1波のハルス波形とした。

出力される音波は 800Hz 弱の共振周波数で徐々に減衰するリングングの激しい波形である。また、発震は内蔵ルビジウム時計の絶対正秒に同期して 1 秒間隔で実施した。曳航速度は約 1 ノットであり約 50cm 間隔の発震となっている。

5.1.2 発震測線

パーティカルケーブルを中心にして、潮流の方向に 50m 間隔で設定された直線ライン上を曳航型音波震源が通過するように操船した。測線長は約 2km である。曳航深度については、測線直下の地形の最も標高の高い点と VCS システムの係留ブイのいずれか高い方から 50m 上方を目安にし、一定深度を維持するようにディープトウを操作し曳航した。Fig. 12a は、発震測線とパーティカルケーブルの位置を示した平面図である。発震時の震源位置は SSBL(Super Short Base Line)で計測している。Fig. 12 b は、水中の断面図であり、SSBL で求められた震源の高度を示している。パーティカルケーブルのブイの約 50m 上方を曳航されていることがわかる。

5.1.3 受振系

二式のパーティカルケーブルを船上からの投下、自由落下により海底に設置した。その後、海上の 4 点で船上からトランスポンダを用いた水中音響測位(Slant Ranging)によって設置位置を計測した。Fig. 12a の黒丸で示されている。海流の影響を考慮し約 200m 潮上より投下したものの投下位置より約 250m 流されて着底したことがわかる。また、パーティカルケーブルの上部と下

部の水平座標が異なっており、着底後に潮に流されて傾斜していることがわかる。これは、ケーブルに装着した傾斜計の結果からも推察されている。

データ収録は震源音圧や周波数帯域、受振感度を勘案し、ゲインを調整し、10kHz でサンプリングを行った。記録は連続記録方式で独自のバイナリーデータ形式で行われるが、データ処理装置に転送後に SEG-Y 形式にフォーマット変換している。

5.2 データ処理

Fig. 13 は、震源が VCS システムのほぼ真上の測線を 1 秒間隔で発震したときの、最上部 (Fig. 13a) と最下部 (Fig. 13b) のハイドロフォンセンサーによって取得された共通受振点ギャザー記録である。Fig. 13a を見ると、直達波、海底面反射波、前発震の海面反射波が明瞭に読み取れる。海底面反射波の後続波としていくつかのイベントが見られるが、発震記録からは海底地形の影響が極浅層の反射イベントを示すものかは判別できない。Fig. 13b については受振点が海底面に近いことから直達初動と海底面反射波が重なり判別が困難になっている。それぞれのデータセットに対して波形処理 (フィルターおよびデコンボリューション処理) を行なった結果を Fig. 14a 及び 14b に示す。波形処理後には、震源波形のリングングが抑制されていることがわかる。また、初動走時が滑らかになっていないのは、曳航型音波震源あるいは VCS の微少な振動によるものと考えられる。初動走時を平均

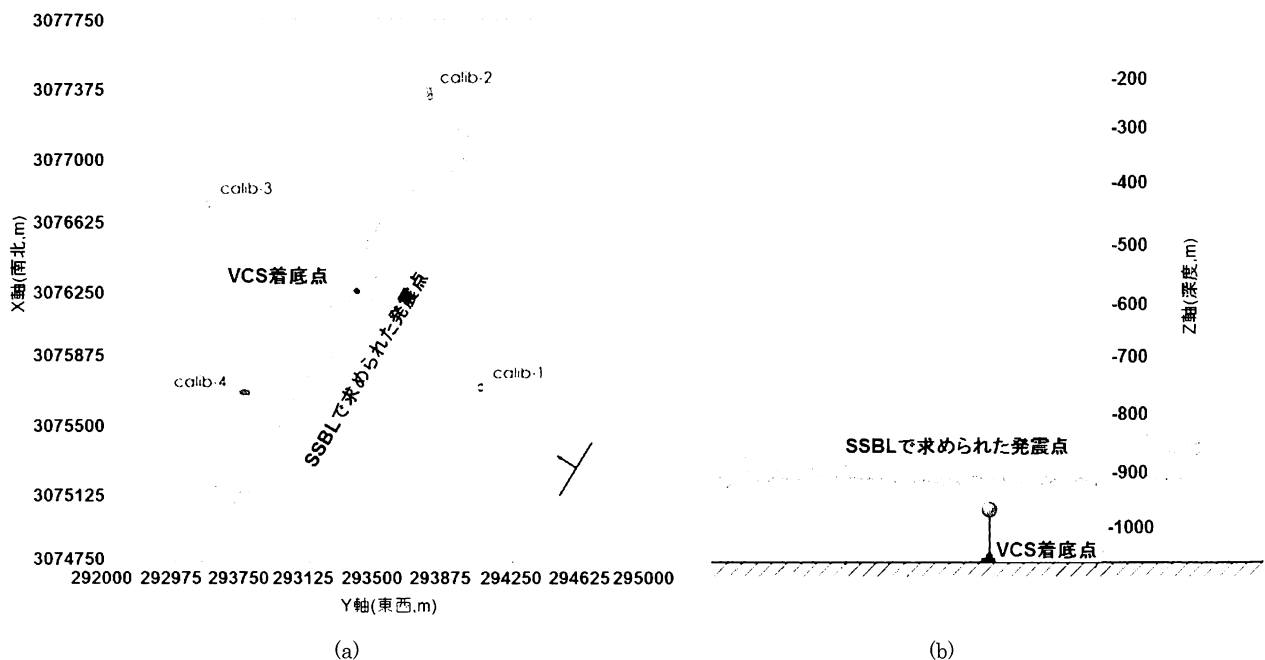


Fig.12. Left figure (a) shows the top view of the survey area. The lines show the shot lines of deep towed source, which are determined by SSBL. Solid square shows the VCS location determined by slant ranging from ship at the four calibration points (Open circles) Right figure (b) shows the depth section. The depth of the deep towed source is determined by SSBL.

化した滑らかな曲線に合わせる静的補正処理(Static Correction)をほどこすことにより、地下からの反射イベントもそろってくるのがわかる。波形処理後のデータからは、VCS システムと海底曳航震源の組み合わせたのデータ取得では、水中直達波や海底面反射波等のみならず、海底下からの反射波を明瞭にとらえられていることがわかる。特に、パーティカルケーブルの直上で発震した場合よりもオフセットの大きな発震点での地下からの反射が顕著である。海底熱水鉱床では、海底面近くに高速度層が存在するため、広角反射波の方がより地下への入射・反射がしやすくなっている可能性が高い。このことは、震源と受振器を同一あるいは近接した位置に取り付けたシステムでは、これらの反射波を取得することが困難であることを意味する。なお、Fig. 13 では海底面下からの反射を視認しやすくするために、水中直達波の初

動走時の 1/2 の時間シフトをしている。このように明瞭な反射波をとらえられているが、SSBL で計測した発震点座標では、それに含まれる誤差が反射法イメージング処理で許容できる範囲を超えており、今後、曳航型音波震源の発震位置を高精度に求める手法の開発が必要となる。

6. おわりに

VCS は、海底熱水鉱床探査の対象領域と想定される比較的狭いエリアでの三次元反射法地震探査としては、非常に優位性がある。文部科学省の実施する「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」の中で海底熱水鉱床探査の実用システムとして新規に設計・開発しており、データ処理・解析技術も含めた総合的な探査

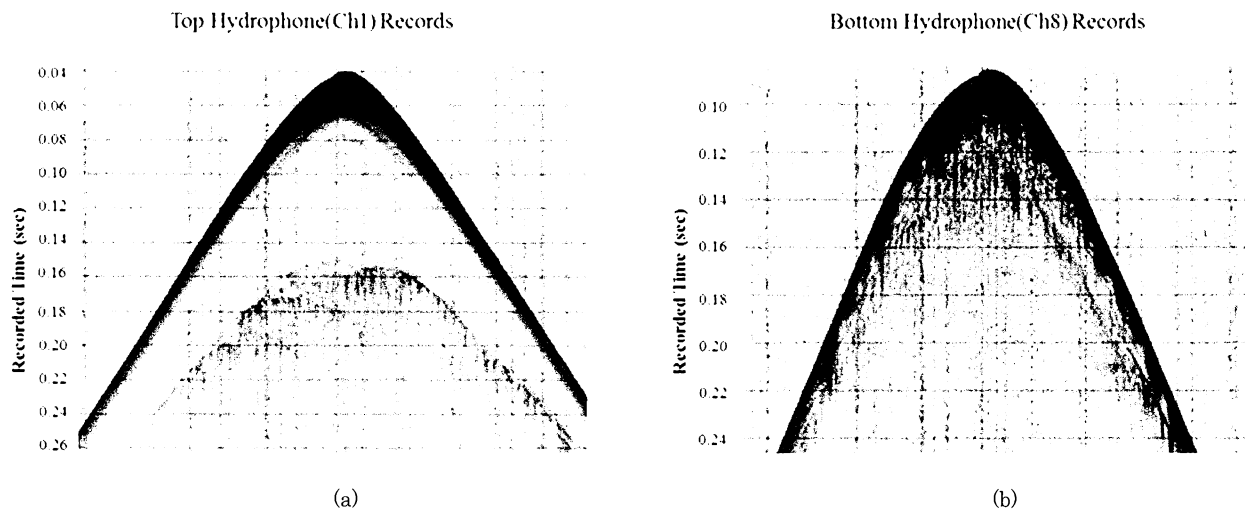


Fig.13. Common receiver gathers of the field data. Left figure (a) shows the top hydrophone records and right (b) shows the bottom hydrophone records.

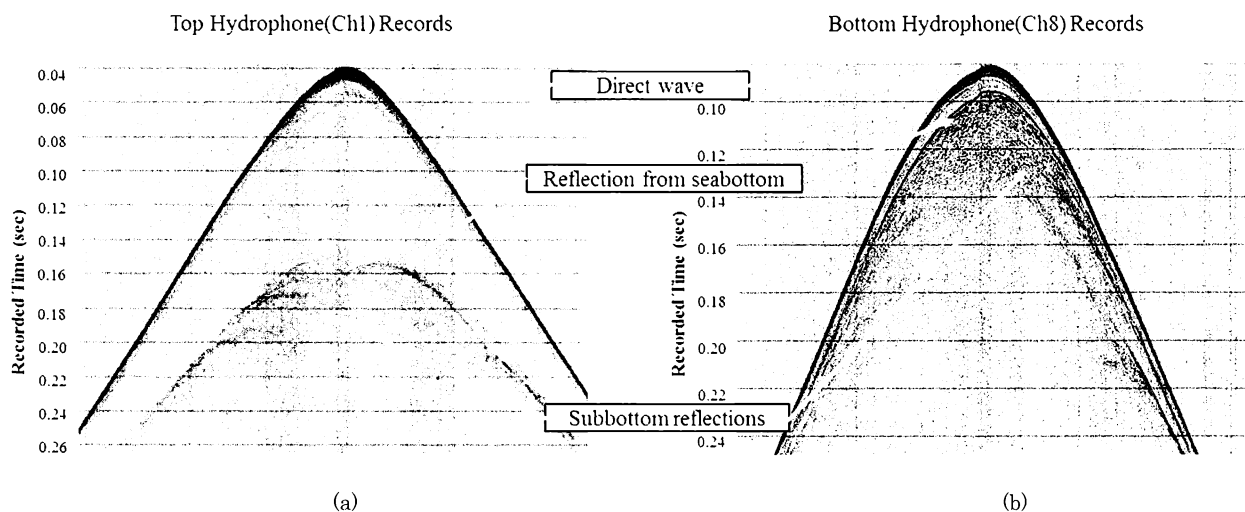


Fig.14. Common receiver gathers of the processed data with band-pass filter and deconvolution. Left figure (a) shows the top hydrophone records and right (b) shows the bottom hydrophone records.

技術として研究をすすめている。

平成 21 年度には琵琶湖において VCS のジオメトリを実現しフィージビリティスタディとしての 3 次元調査を実施し、調査対象地域の地下構造の高分解能な 3 次元ボリュームを得ることができた。この結果を受けて、平成 22 年度には自律型探査システム 2 式を試作し、実海域におけるシステム性能・運用試験を経た上で、海底熱水鉱床の存在が示唆される沖縄伊平屋海域において深海曳航震源を用いた海域実験を実施した。本実験では、目標とする水深 1,000m での装置の投入・回収方法、パーティカルケーブルの位置の計測方法を確立することができた。また、VCS システムと海底曳航震源の組み合わせでのデータ取得では、水中直達波や海底面反射波等のみならず、海底下からの反射波をとらえており、海底熱水鉱床が存在する深海環境下においてもデータ収録装置が十分な性能を持って正常に動作することが確認できた。今後は、いろいろな目的に合わせて、自律型 VCS 探査システム、ハイドロフォン間隔や個数、電源及び記憶媒体による長時間観測、水中音響通信を使ったシステム状況のリアルタイムのモニタリングなどを検討し、システムの改良を行う予定である。また、適切な震源とパーティカルケーブルの関係を把握しより分解能の高い地下構造探査を実現する必要がある。

データ処理では、震源及びハイドロフォンの位置精度などの今後解決すべき課題の解決や、VCS に適した速度解析、マイグレーション技術の確立が必要であり、水中測位技術や精度良い投入・回収方法の確立なども含めたトータルなシステム構築を図る必要がある。平成 23 年度は、高分解能な海上震源と組み合わせた調査と海底震源と組み合わせた調査の二度の実海域調査を計画してお

り、データ取得・処理解析を含めた VCS 探査技術確立し、実用化を図る予定である。さらに、他分野への応用としては、深海域で海底下数百 m といった比較的浅い部分に賦存するメタンハイドレート探査や高分解能な海底活断層調査に対して効果的な手法と考えられる。

謝 辞

本研究は、平成 21 年度より開始された文部科学省「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」の中で、研究・開発を進めているものである。ここに記して、文部科学省に謝意を表します。また、本研究を推進している京都大学、海洋研究開発機構、東京大学大気海洋研究所、東京大学生産技術研究所の共同研究者の皆様に謝意を表します。

参 考 文 献

- Ikawa, T. (1991): Die knozoischen sedimente des Biwa Sees dargestellt mit hilfe der reflexionsseismik in Die geschichte des Biwa-Sees in Japan, S. Horie, ed., Universitatsverlag Wagner, Innsbruck, Austria, 40-57.
- Krail, P. M. (1994): Vertical cable as a subsalt imaging tool, *The Leading Edge*, **13**, 885-887.
- Leach, P. (1997): Strathspy vertical-cable seismic survey: a north sea first, *SPE Abstracts*, 333-347.
- Ikelle, L.T., and Wilson, R.J. (1999): Potential impacts of vertical cable (VC), *The Leading Edge*, **18**, 1154-1157.
- 白石和也・松岡俊文・川中卓 (2008): 地震波干渉法概説, 地学雑誌 **117**, 863-869.

Development of vertical cable seismic (VCS)

Eiichi Asakawa *, Fumitoshi Murakami *, Taku Okamoto *, Yoshihiro Sekino *, Hitoshi Mikada**, Junichi Takekawa** and Takuya Shimura*³

ABSTRACT

The vertical cable seismic is one of the reflection seismic methods. It uses hydrophone arrays vertically moored from the seafloor to record acoustic waves generated by surface, deep-towed or ocean bottom sources. Analyzing the reflections from the sub-seabed, we could look into the subsurface structure. This type of survey is generally called VCS (Vertical Cable Seismic). Because VCS is an efficient high-resolution 3D seismic survey method for a spatially-bounded area, we proposed the method for the hydrothermal deposit survey tool development program that the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) started in 2009. We are now developing a VCS system, including not only data acquisition hardware but data processing and analysis technique.

Our first experiment of VCS surveys has been carried out in Lake Biwa, JAPAN in November 2009 for a feasibility study. Prestack depth migration is applied to the 3D VCS data to obtain a high quality 3D depth volume. Based on the results from the feasibility study, we have developed two autonomous recording VCS systems. After we carried out a trial experiment in the actual ocean at a water depth of about 400m and we carried out the second VCS survey at Iheya Knoll with a deep-towed source. In this survey, we could establish the procedures for the deployment/recovery of the system and could examine the locations and the fluctuations of the vertical cables at a water depth of around 1000m. The acquired VCS data clearly shows the reflections from the sub-seafloor. Through the experiment, we could confirm that our VCS system works well even in the severe circumstances around the locations of seafloor hydrothermal deposits. We have, however, also confirmed that the uncertainty in the locations of the source and of the hydrophones could lower the quality of subsurface image. It is, therefore, strongly necessary to develop a total survey system that assures an accurate positioning and a deployment techniques.

We are planning two further field surveys in FY2011. One is a 3D survey with a boomer for a high-resolution surface source and the other one for an actual field survey in the Izena Cauldron an active hydrothermal area in the Okinawa Trough. Through these surveys, the VCS will become a practical exploration tool for the exploration of seafloor hydrothermal deposits.

Keywords: hydrothermal deposit, acoustic survey, vertical cable, high resolution reflection seismic

Manuscript received August 29, 2011; Accepted November 1, 2011.

* JGI, Inc

1-5-21 Otsuka, Bunkyo-ku, Tokyo 112-0012, Japan

** Kyoto University

C1-1-22 Katsura 4, Kyotodaigaku, Saikyo-ku, Kyoto-fu, 615-8246, Japan

*3 JAMSTEC

2-15, Natsushima-cho, Yokosuka-city, Kanagawa, 237-0061, Japan