

論文の内容の要旨

論文題目 高分解能音波探査による中部沖縄トラフ熱水活動域の構造解釈
(Structural Interpretation of Hydrothermal Fields, Mid-Okinawa Trough,
based on High-Resolution Acoustic Surveys)

氏名 多良 賢二

海底熱水活動とは、海底下のマグマを熱源、海水を媒質、海底下の断層や裂かといった割れ目を流路とする熱水循環のことを指し、我々はマグマによって温められた熱水が海底面から勢いよく噴出する様子を熱水活動として認識することができる。海底面から熱水が噴出する場所では、熱水と岩石の反応により熱水中に溶け込んだ金属元素が冷たい海水と反応し硫化鉱物が堆積する。この硫化鉱物は海域によって銅・鉛・亜鉛や金・銀といった有用金属を含む場合があり、特に海洋鉱物資源としての利用価値があると考えられる鉱体は海底熱水鉱床と呼ばれ、その開発が期待されている。一方で、熱水噴出域には熱水からエネルギーを得る生物群集の生息が確認されており、生態系の保護を考慮した海底熱水鉱床の開発が求められる。この課題の解決策として、熱水活動を停止した海底熱水鉱床の開発が挙げられる。熱水活動を停止した海底熱水鉱床はやがて遠洋性堆積物などに覆われ、その姿を海底面から識別することができなくなると考えられる。従って、堆積物に覆われた海底熱水鉱床を発見するには、鉱体自身が持つ物理特性（例えば、周辺堆積物との密度差や金属を多く含むことによる電気的な性質など）を利用した物理探査手法による検出が求められる。

一般に海底下の構造把握には、堆積物間の物性（密度や弾性波速度）の違いを利用し海底下の構造断面を得る音波探査が用いられる。海底熱水鉱床は周辺堆積物と比較して十分な密度差をもつことから、熱水活動を停止した海底熱水鉱床の検出に有効な手法であると考えられる。しかしながら、石油・天然ガスを対象とし発展してきた従来型の音波探査では、石油・天然ガスの貯留層と比べ 1/10 程度の規模である海底熱水鉱床の構造を把握することはできない。そのため、熱水活動域における海底熱水鉱床を対象とした音波探査手法、および音波探査記録の解釈方法は確立されていない。音波探査記録の高分解能化を考えた場合、垂直分解能を向上させるためには高周波音源の利用が必要である。音波の高周波成分は低周波成分と比較して海水中で減衰しやすいため、音源を海底に近づける、もしくは受振器を海底に近づけるあるいはその両方を海底に近づけるといった探査手法が必要となる。また、水平分解能の向上には一般的な空間サンプリング定理から、ある水平間隔を分解するには、その 1/2 以下の間隔でデータを取得する必要がある、垂直分解能と同様に、海底近傍での音波探査が求められる。2008 年度に文部科学省により実施

された「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」では、前述のような高分解能データ取得のための探査ツールの開発が行われ、海底接地型音源や深海において独立してデータ収録が可能なハイドロフォンケーブルが開発された。これらの探査ツールを用いた音波探査は、モデル鉱床とされる中部沖縄トラフ、伊是名海穴のハクレイサイトにおいて実施され、データ取得方法の検討が行われた。

本論文では熱水活動域で取得した高分解能音波探査記録を用い、熱水活動域の構造解釈、および熱水活動域の調査に適した音波探査手法の検討を行うことを目的とした。海底熱水活動域の海底下構造探査に適した音波探査手法の検討は、有索式無人潜水機に搭載したサブボトムプロファイラによる音波探査、海底係留方式ハイドロフォンケーブルを用いた音波探査、深海曳航方式ハイドロフォンケーブルを用いた音波探査の3つの手法について行い、2章から4章でそれぞれの成果を示す。5章では未調査海域での熱水活動域調査事例を示し、6章でそれぞれの探査手法の利点や課題について総合考察を行った。

2章では、有索式無人探査機 (Navigable Sampling System: NSS) に搭載したサブボトムプロファイラ (SBP) による音波探査記録の解釈を行い、手法の有効性について検討した。音波探査記録は2011年に中部沖縄トラフ伊是名海穴の熱水活動域であるハクレイサイトで取得したデータを使用した。SBP 反射断面は海底下の構造をほとんど得ることができず、調査海域に広く認められる軽石を含む粗い表層堆積物による音波の散乱・減衰によるものと結論した。また、音波探査と並行してNSSに搭載した深海カメラによる海底観察を行い、硫化物チムニーや、巨礫に覆われた熱水性の硫化物マウンドが音波を散乱させていることを示した。これらの結果から、チムニーやマウンドといった起伏に富む海底地形を呈する熱水活動域では、音波がどこから返ってきたのか識別できる探査システムが必要であると結論づけた。

3章では、海底係留方式ハイドロフォンケーブルを用いた Vertical Cable Seismic (VCS) によって得られた熱水活動域の音波探査記録を用い、海底下のイメージング、速度解析を行うことで手法の有効性について検討した。本手法はハイドロフォンケーブルを鉛直方向に係留することによって、海底下からの反射波と海底表層からの散乱波を識別可能としている。また、海底面に係留したハイドロフォンケーブルに対し、様々な距離から音波を発することで、海底下の速度構造解析を可能としている。音波探査記録は2011年に中部沖縄トラフ伊是名海穴の熱水活動域であるハクレイサイトで取得したデータを使用した。海底下のイメージング結果からは、本手法によって熱水活動域特有の起伏に富んだ地形や海底下構造をイメージングできることを示した。また、速度解析結果からは、本手法によって熱水性硫化物マウンドのようなスケールの速度異常を検出可能であることを示し、マウンドを構成する高密度の鉱体を高速度異常として検出できることを示した。これらの結果から、本手法は海洋鉱物資源として期待される緻密な塊状硫化鉱物の3次元的な広がり把握する手法として有効であると結論づけた。

4章では、深海曳航方式ハイドロフォンケーブルを用いた Zero-offset Vertical Cable Seismic (ZVCS) によって得られた音波探査記録の解釈について議論した。本手法では、鉛直方向に配列させたハイドロフォンケーブルに対し水平方向に同じ位置(ゼロオフセット)で発震を行うことで、

複雑な海底地形による側方反射を識別，除去することを可能としている。音波探査記録は 2016 年度に中部沖繩トラフ伊是名海穴の熱水活動域であるハクレイサイトで取得したデータを使用した。ここでは，熱水性硫化鉱物が堆積する熱水活動域だけでなく，その周辺の構造を連続して取得し，熱水活動域と非熱水活動域の震探相（反射波の連続性や波形を示す振幅や周波数）の違いに着目した。この結果，熱水性の硫化鉱物が堆積する場所は断続的な反射イベントで特徴付けられることが明らかとなった。また，高密度の鉱体が堆積する場所では反射波の位相に変化が現れることを示した。本手法は，低速度の曳航により高密度のゼロオフセットデータを取得することで，測線方向に対し高い水平分解能の反射断面を取得し，熱水の流路となりうる表層堆積物の断層や裂かといった断裂構造の分布を検出する手法として有効であると結論づけた。

5 章では，2 章から 4 章までに得られた海底熱水活動域における音波探査結果もとに，最も効率的な熱水活動域の絞り込み手法を構築し，未調査海域での音波探査による熱水活動域の絞り込みが可能であるか検討を行った。調査手法には，広域の音波探査が可能な深海曳航方式の ZVCS を採用した。調査航海は，内閣府による戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) のうち「次世代海洋資源調査技術（海のジパング計画）」によって行われた統合調査の一環として 2018 年度に実施された。本調査によって得られた火山体全域の広域 2 次元断面および熱水活動域の高分解能 3 次元イメージから熱水の流路となりうる断層や亀裂が特定できることを示した。また，同海域で得られた掘削コアサンプルと対比することで，調査海域の地質構造解釈を行い，熱水活動域における音波探査の有効性を示した。

最終章では，本論文で扱った各種高分解能音波探査手法について総合考察を行い，それぞれの音波探査手法について利点と課題を整理し本論文のまとめとした。