

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文審査報告書

論 文 題 目

海底熱水鉱床の時間領域電磁探査法の研究
Study on the Marine TDEM
for the ocean bottom hydrothermal deposits

申 請 者

中山	圭子
Keiko	NAKAYAMA

地球・環境資源理工学専攻 探査工学研究

2017年2月

近年、日本周辺海域に賦存する鉱物資源・エネルギー資源などに対して、資源の新たな供給源としての期待が高まっている。海底熱水鉱床については、(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構などの機関によって調査が始められ、沖縄トラフ及び伊豆・小笠原海域において、その分布水深が 700~1,600 m と世界的にみて浅く、大西洋中央海嶺に分布するものと比べて金、銀の品位が高いことなどから、技術的・経済的に開発に有利であるとされている。それらの海底熱水鉱床の開発に向けた経済性の評価の点から、また地質学、鉱物学、生物学といった科学的な見地から、海底熱水鉱床の連続性や広がりについての詳細な情報が求められており、電気・電磁探査技術に対する期待は大きい。中でも陸上の鉱床探査で広く利用されている時間領域電磁探査法(TDEM法)は極めて有望な技術として注目されている。TDEM法は、鉱山・地熱・石油・地下水などの資源探査や工学・防災分野での地下構造調査に広く用いられ、航空機・ヘリコプタなどを使う空中電磁法にも取り入れられている。

海底における電磁探査法では、海底油田の調査に対して大電流を送信して海底下数千 m までを探査する MCSEM と呼ばれる電磁探査法が実用化されているものの、鉱物資源を目的とした浅部構造の詳細調査技術については、膨大な低比抵抗の海水の影響、海底地形や位置の精度の問題などが原因で、未踏の分野である。

早稲田大学探査工学研究室では、2009 年度から海底熱水鉱床を対象とした、ROV(遠隔操作型海中ロボット)を使った TDEM 電磁探査法の研究開発を推進してきたが、本論文はその中でも筆者が特に探査精度の向上と実用化のために貢献した、各種のノイズの原因究明と除去技術、計測中にリアルタイムで解析ができる高速のデータ処理・解析技術を中心に纏めたものである。

本論文は 8 章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章は序論であり、まず本研究の背景として日本国内の海底熱水鉱床についての研究や調査の最近の動向を纏めている。さらに海底熱水鉱床を対象とした電磁探査技術についての課題・問題点を整理したうえで、本研究の目的である、「計測に ROV を利用した TDEM 法に関して、探査精度の向上と実用的なデータ処理法の確立」を明示し、論文の概要を述べている。

第 2 章では電磁探査技術を適用する前提となる、海底熱水鉱床鉱石の電気・磁気特性について検討している。筆者が様々な機関から借用し、あるいは実際の調査で取得した海底熱水鉱床鉱石と陸域の硫化鉱(黒鉱、黄鉱)のサンプルについて、比抵抗と充電率、間隙率、帯磁率を計測し、各種 X 線分析、質量分析による金属含有率および鉱物組成の測定結果と総合して、沖縄トラフ海域および伊豆・小笠原海域の鉱石の鉱物組成や金属組成の違いと電気・磁気特性の関係について、以下に示す特徴を明らかにしている。

- ① 沖縄トラフ海域の鉱石には黄鉄鉱や黄銅鉱が多く含まれ、比抵抗が低い(0.1 $\Omega \cdot m$ 程度)。
- ② 伊豆・小笠原海域の鉱石は閃亜鉛鉱が優勢で比抵抗が高い(数 $\Omega \cdot m$)。

- ③ 両海域の鉱石はいずれも高い充電率を示す。
- ④ 沖縄トラフ海域の一部の鉱石は強い磁性を持ち、それは鉱石に含まれる磁硫鉄鉱に起因するものである。

特に、①～③および東北日本の黒鉱は、電気的特性から伊豆・小笠原海域の鉱石と類似するという知見は、本研究によって筆者が日本で初めて明らかにした点である。

第3章では3次元数値シミュレーション実験によって、海底熱水鉱床に対するTDEM法の応答と感度について調べ、垂直ループよりも水平ループの方が鉱床に対して感度が高いこと、海底TDEM法は、熱水鉱床の広がりや厚さに対して感度があること、海底からの高度10mの測定でも海底下の熱水鉱床の探査が可能であることなどを明らかにした。さらに実際に使われる送受信のモーメントを考慮して、必要とされる測定精度(ダイナミックレンジ、分解能、ノイズレベルなど)について明らかにした。

第4章では大型水槽実験によって、低比抵抗の媒質で囲まれた環境下での実際の計測器を用いた測定においても、TDEM法によって低比抵抗の鉱床の検知が可能であることを確認している。さらに実験結果からデータとノイズレベルの評価方法について検討し、リファレンス点を使用したデータ処理が可能かつ有用であることが示されている。

第5章ではノイズに対する考察が纏められている。ROVを利用したTDEM法の実際の測定においては、環境に存在するノイズや、測定システム自体から発生するノイズなど、様々なノイズが測定値に影響を及ぼしている。深海底での測定では、陸上での測定に見られる50 Hz/60 Hzの商用電源ノイズや高圧送電線によるノイズなどはないものの、ROVの電源(60 Hz, 3300 V)やスラスタなどが原因のノイズ、ROVや耐圧容器などの測定システムの導体部分に誘導される電流が原因のノイズ、測定システムの揺動によるノイズなどが確認された。ノイズの周波数範囲、影響を受ける空間的範囲と強度などを評価し、軽減方法が検討されている。その結果、ROVのノイズの軽減のためにはROVと測定システムの距離を6 m以上離せば十分であること、海底の影響のない高度でリファレンスデータを取得することで導体部分の影響の補正が可能であることなどが示された。またコインシデントループ測定は磁場測定よりもノイズの影響を受けにくいことが示され、データの最初の評価と解析には、コインシデントループによる測定データが有効であることが判明した。これらの結果から、筆者はシステムの揺動ノイズに対して、オプティカルジャイロの導入および実測波形のスプライン補間などで軽減する技術を開発した。

第6章では、取得されたデータの迅速な解析処理技術について述べられている。海での調査実施は海象に大きく左右され、1航海中に測定できる機会は限られる。調査時間をより有効に活用するために、取得したデータから海底下の鉱床の分布を迅速に評価し、翌日の調査計画に指針を与えることは

探査技術の実用性の観点から極めて重要である。1 日の調査で取得されるデータ(6チャンネル分)はテキストに変換後は約 180 GByte にのぼり、その膨大なデータから、リアルタイムにまたはデータ取得後に短時間のうちに電磁異常を抽出し、海底下の電氣的構造の概要を把握することが可能なデータ処理技術が開発された。近年のコンピュータ技術の発展により、逆解析による解析処理が普及しているが、入力データのおよび解の安定性、処理時間などの問題で調査中に船上で短時間に解析を行うことは困難である。筆者は海底での見掛け比抵抗の式を新しく導出し、パラメータの入力を必要とせずに簡便な処理によって海底下の電磁異常を抽出するデータ処理方法を開発した。計測中のリアルタイム処理や船上での即時処理に対応しており、さらに逆解析のパラメータの決定のための前処理としても有効と考えられる。

第 7 章では 5, 6 章の結果を実海域調査に適用した結果が示されている。沖縄海域の既知の鉱床域で実施され、ROV 曳航方式によって海底と海底下に広がる熱水鉱床に起因する高導電率異常を明瞭に捉えることに成功した。その 3 次元的な広がりにはボーリング結果とよく整合し、潜頭性鉱床も捕捉されており、本論文の技術が実際の調査に対して有効であることが示された。海底熱水鉱床の 3 次元的形状が電磁探査で具体的に示されたのは、世界でも例がない。さらに海域でも陸域と同様に硫化鉱物の IP 効果と考えられる影響も捉えており、今後の海底 IP 調査の技術開発への道を開く発見と考える。

第 8 章は結論であり、本研究で得られた成果が纏められている。本研究によって、ROV を利用した TDEM 法の測定精度ならびに、データ処理・解釈の技術が向上し、海底熱水鉱床の分布や連続性を把握する実用性の高い探査技術が確立された。

以上により、本論文は海底熱水鉱床の電磁探査技術の実用化に対して、多くの新しい知見をもたらすもので、“博士(工学)”に値するものであることを認める。

2017 年 2 月

審査員

主査 早稲田大学特任教授 Ph.D. Colorado School of Mines 齋藤 章

早稲田大学教授 博士(理学) 大阪市立大学 香村 一夫

早稲田大学教授 工学博士 早稲田大学 山崎 淳司

高知大学特任教授 理学博士 東京大学 徳山 英一