

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博 士 論 文 概 要

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

2016年11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、(独)産業技術総合研究所、(独)海洋研究開発機構等による調査によって、沖縄トラフ及び伊豆・小笠原海域において、多くの徴候が発見され、その分布水深が700~1,600m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、詳細な海底下の構造を把握するための技術として、電気・電磁探査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。

海底における電磁探査では、海底油田の調査に対して大電流を送信する探査法が実用化されているものの、海底鉱物資源を目的とした浅部を詳細に調査する技術については未踏の分野であり、海底熱水鉱床の鉱量評価に寄与できる探査技術の確立を目的として、筆者が参加している早稲田大学の研究チームによって、陸域の鉱床調査で広く利用されている時間領域電磁探査法(TDEM法)を海底鉱床の調査に応用することを主眼とした研究開発が進められている。TDEM法は人工送信源による電磁誘導現象を利用した探査法の一つで、鉱山・地熱・石油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ついても実用化されている。本探査法では送信電流の急激な遮断によって生じる、誘導電流がつくる磁場(二次場)を時間の関数として計測する。陸域においては、誘導電流は時間と共に地下深部に浸透し、経路の地層の比抵抗に応じて減衰するため、地下の比抵抗分布を知ることができる。海域に適用するにあたってはモデル実験の相似則を応用して、小さいループと高速のサンプリングによって低比抵抗環境の問題を軽減する探査法が開発された。また、TDEM法では短い送受信距離で高い分解能と地下深部の探査が可能なことから、測定システムを一体とし、遠隔型無人探査機(ROV)を利用した海底電磁探査方式が開発された。

本論文は、これらの研究をさらに進めて、ROVを利用した海底TDEM法をより実用的な探査システムとするために、ノイズ軽減による探査精度の向上と、データ処理法の確立についての検討結果をまとめたもので、次の8章から構成されている。各章の概要は以下のとおりである。

第1章は序論であり、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調査の最近の動向と、海底熱水鉱床を対象とした電磁探査法についての課題をまとめたうえで、本研究の目的と概要について述べた。

第2章では電磁探査の探査指標となる海底熱水鉱床鉱石の電気・磁気特性に

ついて検討した。様々な機関から借用した、また実海域調査で我々が取得した海底熱水鉱床鉱石と陸域の硫化物鉱石（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、蛍光 X 線分析、X 線回折分析、誘導結合プラズマ質量分析による金属含有率および鉱物組成と合わせることによって、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た。

- ・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）
- ・伊豆・小笠原海域の鉱石は閃亜鉛鉱が優勢で比抵抗が比較的高い（数 $\Omega \cdot m$ ）
- ・両海域の鉱石はいずれも高い充電率を示す
- ・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

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 TDEM 法の応答と海底熱水鉱床への感度について調べ、垂直ループよりも水平ループの方が海底熱水鉱床に対して感度が高いこと、海底 TDEM 法は、海底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を探索できることが判った。次に実際的な送受信のモーメントを想定し、測定に必要とされる精度（ダイナミックレンジや分解能、ノイズレベル）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た。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、プロフィール測定結果の作図や、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を示した。

ROV を利用した TDEM 法の実際の測定においては、測定中の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波形に影響を及ぼしていることが確認されている。深海底での測定では、陸上での測定にみられる 50Hz/60Hz の商用電源ノイズや高圧線によるノイズなどはないものの、海洋での調査に使用している、ROV の電源などが原因の周期的なノイズ、ROV や耐圧容器などの測定システムに含まれる金属が原因のノイズ、測定システムの揺動によるノイズなどがある。第 5 章では、海底で取得されるデータの精度向上のために、浅海域や実海域での実測データより各種ノイズを抽出して、ノイズの周波数範囲や、影響を受ける空間的範囲、強度を評価し、軽減方法を検討した。その結果、ROV のノイズを軽減するために ROV と測定システムの距離を 6m 以上とること、海底の影響のない位置でリファレンスデータを取得して補正に使用することとした。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が少ないことが判り、データの一次評価としては、コインシデントループによ

る測定データを使用することとした。測定システムによる揺動ノイズについては、ジャイロデータの使用や実測波形のスプライン補間によって解析に問題ない程度まで軽減できることがわかった。

海での調査実施の可否は海象に大きく左右されることもあって、1航海中に測定を実施できるチャンスは少ない。限られた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システムの実用性の観点から重要である。ROVを利用したTDEM法の1日の調査で取得されるデータ(6チャンネル分)はバイナリフォーマットで約8 Gbyte、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、データ取得中にリアルタイムに、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ためのデータ処理技術の確立が求められている。第6章では、海底TDEM法の迅速な解釈を目的に、簡便な処理によって、海底下の鉱石に由来する電磁異常を抽出するデータ処理方法を検討した。近年のコンピュータ技術の発展により、現代では逆解析に掛かるコストは高くはないが、逆解析では入力したパラメータによっては安定した解が得られないこともある。本研究で開発した方法は、パラメータの入力を必要とせず、簡便な処理によってデータに含まれる電磁異常の全体像を把握できる技術で、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いる。逆解析のパラメータの決定のための前処理としても、非常に有用である。

第7章では5章で行ったノイズ軽減方法の検討結果、6章で行ったデータ処理方法の検討結果を実海域調査に適用した。調査試験は沖縄海域の既知の鉱床域で行われ、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とらえた。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、潜頭性鉱床もとらえられており、実際的な海底での調査に対して有効であることを証明された。さらに海域でも陸域と同様に硫化物鉱石のIP効果の影響をとらえることができた。

第8章は結論であり、本研究で得られた成果をまとめて示す。本研究の検討によって、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、海底下の熱水鉱床の立体的分布や連続性を把握できるための実用性の高い技術を確立することができた。さらに実海域データの処理結果には鉱石の充電効果(IP効果)を示す顕著な特徴が認められ、深海底においても時間領域電磁探査を使用してIP効果の計測が可能であることが明らかになった。このことは、今後の電気・電磁的手法を用いた海洋鉱物資源探査にきわめて有益な指針を与えるものである。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 中山 圭子 印

(2017 年 2 月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
筆頭論文	○ ROV などを用いた時間領域 EM 法、物理探査 64(4)、255-266、2011-08-01、2011 年、 <u>中山圭子</u> 、 <u>斎藤章</u>
共著論文	全国地形分類図による表層地盤特性のデータベース化、および、面的な早期地震動推定への適用、地震 2, Vol. 56, No. 1, pp. 21-37、2003 年 2 月、久保智弘、久田嘉章、柴山明寛、大井昌弘、石田瑞穂、藤原広行、 <u>中山圭子</u>
講演論文 (筆頭、査読あり)	○ Practical Marine TDEM Systems using ROV for the Ocean Bottom Hydrothermal Deposits, Manuscript of TechnoOcean2016、2016 年 10 月、 <u>Keiko Nakayama</u> and Akira Saito ○ The seabed TDEM towed by ROV for the ocean bottom hydrothermal deposits、Extended abstract of Near Surface Geoscience 2016 - First Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining, DOI: 10.3997/2214-4609.201602109、2016 年 9 月、 <u>Keiko Nakayama</u> and Akira Saito ○ Development of new marine TDEM systems for the ocean bottom hydro thermal deposits、SEG Technical Program Expanded Abstracts 2014, 850-854、2014 年 11 月、 <u>K. Nakayama</u> , A. Saito ○ Marine Time-domain electromagnetic technologies for the ocean bottom mineral resources、Proceedings of the 10th SEGJ International Symposium、2011 年 11 月、 <u>K. Nakayama</u> , T. Shingyouji, M. Motoori, M. Yasui, Y. Kobayashi, A. Yamazaki and A. Saito.
講演論文 (共著、査読あり)	○ Time-domain electromagnetic (TDEM) baseline survey for CCS in Gundih area, Central Java, Indonesia, Proceedings of the 12th SEGJ International Symposium、2015 年 11 月、Wahyu Srigutom, Warsa, M. Rachmat Sule, Akira Saito, <u>Keiko Nakayama</u> , Masami Hato, Trimadona, Donny Prasetyo, Djedi S. Widarto 全国地形分類図による表層地盤特性のデータベースを用いた早期地震動推定、第 11 回日本地震工学シンポジウム予稿集, p. 2293-2298、2002 年、久保智弘、久田嘉章、柴山明寛、大井昌弘、石田瑞穂、藤原広行、 <u>中山圭子</u> Numerical experiments and application of resistivity tomography by the finite element method、Proceedings of SEGJ International Symposium, Vol. 1、1990 年、Koji NOGUCHI, <u>Keiko HATANO</u> , Kaoru NISHIDA, Yoshihiro SUGIMOTO

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演論文 (筆頭、査読なし)	<p>○ 海底熱水鉱床を対象とした ROV 海底曳航方式 TDEM 法探査法の開発、物理探査学会学術講演会講演論文集 134, 161-164, 2016-05-18、2016 年、<u>中山圭子</u>, 齋藤章</p> <p>○ 海底熱水鉱床の電気・磁気的特性、日本地球惑星科学連合大会予稿集 (CD-ROM), 2012, SCG62-P14, 2012 年、<u>中山圭子</u>, 安井万奈, リュウブンテイ, 西山巡, 齋藤章, 山崎淳司</p> <p>○ 海底熱水鉱床を目的とした電気・電磁探査の探査指標としての鉱石の電気的および磁気的物性、物理探査学会学術講演会講演論文集 126, 162-165, 2012-05-29、2012 年、<u>中山圭子</u>, 山下善弘, 安井万奈, 山崎淳司, 齋藤章</p> <p>○ 海域における鉱物資源を目的とする時間領域の電磁探査法技術、物理探査学会学術講演会講演論文集 123, 66-69, 2010-09-29、2010 年、<u>中山圭子</u>, 齋藤章, 山下善弘</p>
講演論文 (共著、査読なし)	<p>○ 海底熱水鉱床を対象とした TDEM 法探査における ROV による影響の除去、物理探査学会学術講演会講演論文集 133, 166-169, 2015、2015 年、黒川誠弘, <u>中山圭子</u>, 齋藤章</p> <p>○ 樹脂封入型 MI 素子磁力計の開発、物理探査学会学術講演会講演論文集 133, 241-244, 2015、2015 年、笹谷勇登, <u>中山圭子</u>, 齋藤章</p> <p>線電流送信源を用いた TDEM 法による CO2 モニタリング、物理探査学会学術講演会講演論文集 130, 231-234, 2014 年、永黒友貴, <u>中山圭子</u>, 羽藤正実, 齋藤章</p> <p>○ フィードバック回路を用いた広ダイナミックレンジ MI 磁力計の開発、物理探査学会学術講演会講演論文集 131, 135-138, 2014、2014 年、高橋直人, <u>中山圭子</u>, 齋藤章</p> <p>海底油田を対象とした実用化されている海洋 CSEM 法技術の比較検討、物理探査学会学術講演会講演論文集 129, 215-218, 2013、2013 年、持地真平, <u>中山圭子</u>, 齋藤章</p> <p>CCS における CO₂ 挙動の TDEM 法を用いたモニタリング、物理探査学会学術講演会講演論文集 129, 242-245, 2013、2013 年、小川大輝, <u>中山圭子</u>, 齋藤章</p> <p>簡便な電気探査装置の開発、物理探査学会学術講演会講演論文集 128, 197-198, 2013-06-13、2013 年、西山巡, <u>中山圭子</u>, 齋藤章</p> <p>○ 海底熱水鉱床を対象とした電磁探査法における地形の影響の考察、物理探査学会学術講演会講演論文集 129, 172-175, 2013、2013 年、中村駿佑, 齋藤章, <u>中山圭子</u></p> <p>○ 海底熱水鉱床を対象とした時間領域海底電磁探査技術、海洋調査技術学会研究成果発表会講演要旨集, 25, 30-31、2013 年、中村駿佑, 西山巡, <u>中山圭子</u>, 齋藤章</p> <p>○ 電気・電磁探査技術による深部海底熱水鉱床探査法の研究開発、海洋調査技術学会研究成果発表会講演要旨集, 24, 29-30、2012 年、佐野成哉, 木佐貫寛, 武田哲明, 本居正幸, 持地真平, 波多野努, 安井万奈, <u>中山圭子</u>, 齋藤章, 山下善弘, 佐野康, 佐柳敬造, 笹谷貴史</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演論文 (共著、査読なし)	<p>○ ROV を用いた海底 TEM 法の開発、ブルーアース 2012 要旨集, 2012, 49-50、2012 年、相部翔, 劉雯婷, <u>中山圭子</u>, 齋藤章, 佐柳敬造, 笠谷貴史, 山下善弘</p> <p>○ 時間領域の海底電磁探査装置の開発、物理探査学会学術講演会講演論文集 127, 174-177, 2012-11-29、2012 年、武田哲明, 齋藤章, <u>中山圭子</u></p> <p>○ 電磁誘導現象を用いた Square-Array 法の基礎研究、物理探査学会学術講演会講演論文集 127, 178-181, 2012-11-29、2012 年、木佐貫寛, 齋藤章, <u>中山圭子</u></p> <p>海底資源探査のための AUV および曳航体を用いた磁気探査装置の開発 ベヨネース海丘域での試験、日本地球惑星科学連合大会予稿集 (DVD), 2011, STT056-03、2011 年、佐柳敬造, 伊勢崎修弘, 原田誠, 笠谷貴史, 松尾淳, 後藤忠徳, 西村清和, 澤隆雄, 馬場久紀, 川畑広紀, 齋藤章, <u>中山圭子</u>, 山下善弘, 浅田美穂, 野木義史, 大西信人, 大美賀忍</p> <p>海底熱水鉱床探査のための精密磁気探査システムの開発：ベヨネース海丘における実海域試験、物理探査学会学術講演会講演論文集 124, 171-174, 2011-05-10、2011 年、佐柳敬造, 伊勢崎修弘, 原田誠, 笠谷貴史, 松尾淳, 大西信人, 澤隆雄, 馬場久紀, 西村清和, 齋藤章, <u>中山圭子</u>, 山下善弘, 大美賀忍, 後藤忠徳, 川畑広紀</p> <p>ベヨネース海丘における AUV を用いた磁気探査装置の計測試験について、地震・火山噴火予知のための地球電磁気学の新展開--3 次元構造探査とモニタリング--！京都大学防災研究所研究集会 22K-05 (CD-ROM), 3-6. 1-3-6. 14、2011 年、佐柳敬造, 伊勢崎修弘, 原田誠, 笠谷貴史, 松尾淳, 野木義史, 大西信人, 西村清和, 澤隆雄, 馬場久紀, 齋藤章, <u>中山圭子</u>, 山下善弘, 大美賀忍, 後藤忠徳</p> <p>○ 海底資源探査を目的とした Square Array 電気探査の基礎検討：海底計測用電極の製作とフィールド試験、物理探査学会学術講演会講演論文集 124, 167-170, 2011-05-10、2011 年、山下善弘, 東宏幸, 田子公一, 並木久, 齋藤章, <u>中山圭子</u></p> <p>○ 海底熱水鉱床の電気的特性に関する考察、物理探査学会学術講演会講演論文集 124, 159-162, 2011-05-10、2011 年、真行寺泰輔, 齋藤章, <u>中山圭子</u></p> <p>(その他、9 件)</p>
特許	<p>○ 海底電磁探査装置、特願 2015-185641、2015 年、齋藤章, 中山圭子、早稲田大学</p> <p>○ 水底用電磁探査システム及びこれを用いた探査方法、特願 2016- 46797、2016 年、齋藤章, 中山圭子, 角友則、早稲田大学, 新日鉄住金エンジニアリング, 地球科学総合研究所</p> <p>○ 海底電磁探査装置及び海底電磁探査法、特願 2012-251578、2012 年、齋藤章, 山下義弘, 田子公一, 中山圭子、早稲田大学, 応用地質, ジオ・プレス</p>