

京都大学	博士（工学）	氏名	石 須 慶 一
論文題目	Clarifying detailed resistivity structures in seafloor hydrothermal fields by inversion of electric and electromagnetic data (電気及び電磁データ逆解析法による海底熱水域での比抵抗構造の詳細解明)		
近年，世界的な金属需要の急増から，海底熱水鉱床の探査と開発が求められている。金属鉱床の探査には，金属の導電性を利用する電気・電磁探査が有効である。しかしながら，熱水域における従来の探査では以下の3つの問題点が指摘される。①得られる比抵抗構造の解像度が低いこと，②海底下浅部から深部までをカバーする詳細な比抵抗構造は得られていないこと，③三次元的な比抵抗構造は得られていないことである。すなわち，海底熱水鉱床の分布は詳細には解明されていない。本論文では，以上の3つの問題点を解決するべく，二次元曳航式電気探査データと三次元電磁探査データを逆解析し，熱水域の海底下浅部から深部までの比抵抗構造をイメージングする手法を開発した。本手法を沖縄トラフ熱水域で得られた実データに適用することで有用性を実証するとともに，得られた詳細比抵抗構造に基づいて熱水鉱床の形成メカニズムを解釈することを試みた。 第一章は本論文の緒論である。研究背景，問題提起，目的，問題解決のためのアプローチについて述べた。海底熱水鉱床は，日本の排他的経済水域内でも発見されており，特に金属を輸入に頼る日本では，その開発に向けて様々な調査を行っている。本論文では，海底熱水鉱床の分布調査に有用な比抵抗構造を明らかにできる電気・電磁探査に着目する。既存の電気・電磁探査結果は，低比抵抗域と熱水マウンドの一致などの有効性を示したが，再現された比抵抗構造の解像度は限られており，海底下浅部から深部まで網羅した比抵抗構造はこれまで得られていない。そこで，本論文では，二次元曳航式 electrical resistivity tomography (ERT)データ逆解析法と三次元 controlled source electromagnetic (CSEM)データ逆解析法を用いた海底下浅部から深部まで網羅できる比抵抗構造イメージング技術を開発し，海底熱水鉱床の分布を明らかにする。 第二章では，二次元曳航式 ERT 法と三次元 CSEM 法の順解析について述べた。順解析は，逆解析の核となるため，正確かつ効率的な順解析が必須である。二次元曳航式 ERT 法では，海底下浅部の詳細な比抵抗構造を推定するため，海底地形をできる限り現実近く再現する必要がある。そこで，非構造格子を用いた有限要素法による順解析を行うことで，海底熱水域での複雑な海底地形を正確に表すことを可能とした。本順解析によって計算される海底下の電氣的応答を，一次元層構造モデルでの解析解と比較した結果，十分な精度が得られていることを示した。一方，三次元 CSEM 法順解析では，有限差分法により離散化を行った。さらに，送信点近傍での特異点問題を回避するため，電場を一次場と二次場に分解して計算を行った。三次元順解析では，解くべき線形システムのサイズが莫大になるため，効率的な数値計算法が必要である。本論文では，並列計算疎行列直接法ソルバー PARDISO を用いて線形システムを解くことで，現実的な計算時間で順解析を実行可能とした。CSEM 法順解析においても，計算される海底下の電磁応答を一次元層構造モデルからの解析解，および三次元石油貯留層モデルからの参照応答と比較した結果，送受信距離 10 km 程度まで十分な精度が得られていることが示された。 第三章では，二次元曳航式 ERT データ逆解析法と三次元 CSEM データ逆解析法について述べた。両逆解析法ともに，安定して海底下比抵抗構造を推定できる Occam アルゴリズムを採用した。二次元 ERT データ逆解析では，モデルを更新する際に解くべき線形システムのサイズが，$M \times M$ (M はモ			

京都大学	博士（工学）	氏名	石 須 慶 一
デルパラメータ数）である従来のモデルスペース法を用いた。一方、三次元 CSEM データ逆解析法では、モデルパラメータ数が、データ数に比べて格段に多い。そこで、データスペース法を逆解析に適用することで、解くべき線形システムのサイズを $N \times N$ (N はデータ数) に変換した。その結果、従来の Occam アルゴリズムに比べて計算量を大幅に削減できた。仮想データを用いた数値実験により、二次元曳航式 ERT データ逆解析法の海底下比抵抗構造の可視化能力を評価した。その結果、曳航ケーブル長が 180 m の場合、海底面下 45 m より浅く存在する低比抵抗異常体を可視化できることが明らかとなった。さらに、探査深度はケーブル長によって決定されることも数値計算から明らかとなった。しかしながら、深海で長いケーブルを曳航することは容易ではない。そこで、長いケーブルを用いる必要がなく、海底下深部まで探査深度を稼ぐことができる CSEM 法に注目した。仮想データを用いた数値実験を行った結果、三次元 CSEM データ逆解析法は、海底下浅部に存在する熱水鉱床を模した低比抵抗異常体を高解像度で再現できることが示された。さらに、本逆解析を海底下深部に存在する石油貯留層を模した高比抵抗異常体を含むモデルに適用した結果、石油貯留層も十分に再現できることが数値実験により示された。 第四章では、伊平屋北海丘熱水域での観測された曳航式 ERT 実データへの適用について述べた。観測された見かけ比抵抗データを逆解析法に適用することで、海底下 50 m までの二次元比抵抗構造を 10 m 程度の空間解像度で可視化できた。この比抵抗構造により、0.2 Ohm-m 程度の低比抵抗異常体が、海底面直下と海底面下 40 m に存在する二層構造をしていることが明らかとなった。岩石モデルや他情報を組み合わせて低比抵抗異常を解釈した結果、その異常体は、熱水や粘土の存在だけでなく、硫化鉱物の存在に由来すると考えられる。さらに、その異常体が確認された近傍で、熱水噴出孔や高熱流量が観測されている。この比抵抗構造に基づいて、新たな海底熱水鉱床の形成メカニズムを提案した。そのメカニズムでは、海底下深部から熱水が上昇し、その熱水が帽岩により流れが規制された結果、帽岩下で硫化鉱物が蓄積し、その帽岩を通り抜けた熱水が海底面で冷やされ海底面で硫化鉱物が蓄積するというものである。このような海底熱水鉱床の二層構造は、掘削により提案されていたが、比抵抗構造により可視化されたのは世界初の成果である。 第五章では、伊江山熱水域での観測された CSEM 実データへの適用について述べた。0.125 Hz の矩形波をダイポールアンテナから送信し、海底面に設置された六台の受信機で CSEM データを観測した。開発した三次元 CSEM データ逆解析法をその実データに適用した結果、海底熱水域での三次元比抵抗構造の推定に成功した。海底熱水域での比抵抗構造は三次元的であるため、一次元や二次元逆解析法に比べて、高精度に比抵抗構造を推定できた。その結果、0.1~0.2 Ohm-m 程度の低比抵抗異常域が海底面直下に再現され、この異常域の近傍で海底熱水噴出孔、自然電位異常も確認された。そのため、この異常域は、熱水が冷やされる過程で蓄積した硫化鉱物を含むと考えられる。 第六章では、第四章と第五章で推定された比抵抗構造に基づいて、海底熱水鉱床の発達メカニズムを議論した。その結果、熱水が上昇する際に、その流れが規制されて水平方向に熱水が流れることによって、水平に伸びた硫化鉱物層が発達することが異なる 2 地域に共通して考えられる。 第七章は本論文の結論であり、本研究で得られた主な成果をまとめた。			

(論文審査の結果の要旨)

近年、世界的な金属需要の急増から、海底熱水鉱床の探査と早期開発がますます求められている。その探査には、鉱床の存在に関連した比抵抗構造を明らかにできる電気・電磁探査が一般に有効である。例えば、大西洋中央海嶺で行われた電磁探査によって、海底熱水鉱床が低比抵抗異常域に分布するという結果が得られた。しかしながら、従来の探査による比抵抗構造の解像度は低く、海底下浅部から深部までをカバーした詳細な比抵抗構造は得られていない。また、電磁探査データに対して一次元あるいは二次元の逆解析法が適用されており、海底熱水鉱床域の三次元的な比抵抗構造はこれまで得られていない。その結果、海底熱水鉱床の詳細分布は明らかになっていない。そこで、本論文では二次元曳航式電気探査データと三次元電磁探査データの逆解析により、熱水域の海底下浅部から深部までの詳細比抵抗構造をイメージングできる手法を開発した。これを沖縄トラフ熱水域で得られた実データに適用することで有用性を実証したとともに、比抵抗構造に基づいて熱水鉱床の形成メカニズムを解釈できた。主な成果は次の4点に纏められる。

- 1) 非構造格子を組み込んだ二次元曳航式電気データ逆解析法を開発した。この格子により複雑な海底地形を逆解析で考慮でき、既存の手法に比べて比抵抗構造の推定精度が向上したとともに、鉱床が海底下直下のストック状構造と40 m 深度付近の層状構造の2つからなることを見出し、前者は熱水の海底への噴出、後者はキャップロック下の熱水の沸騰や海水混合に起因すると解釈できた。
- 2) データスペース Occam アルゴリズムに基づいて三次元電磁データ逆解析法を開発し、従来よりも格段に短い計算時間で三次元比抵抗構造を自動的に推定することが可能になった。本手法を沖縄トラフ熱水域で得られた実データに適用した結果、海底熱水域での詳細な三次元比抵抗構造を初めて明らかにできた。
- 3) 開発された二次元曳航式電気データと三次元電磁データの逆解析法を組み合わせることで、海底下浅部から深部までの比抵抗構造を従来よりも高い空間分解能と計算精度で推定できるようになった。この詳細な比抵抗構造は、海底熱水鉱床の資源量算定と鉱床生成プロセスのモデル作成のための基礎資料として活用できる。
- 4) 本論文で開発された比抵抗構造イメージング技術は、海底下浅部に存在する海底熱水鉱床のみならず、より深部に存在する石油貯留層に対しても有効であることを示した。

以上、本論文で開発された逆解析法とそれを用いた比抵抗構造イメージング技術の有用性、汎用性は高く、海底熱水鉱床のみならず、石油・天然ガス資源探査や断層の分布調査など、種々の地球科学・工学的課題の解決に資する研究として、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成2年2月19日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行い、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

氏 名	石 須 慶 一
-----	---------

なお，本論文は，京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し，公表に際しては，全文公表日までの間，当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。
--