

氏名	そう ま のぶ かず 相馬 宣和		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成10年3月25日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士過程)資源工学専攻		
学位論文題目	AEを用いた反射法による深部地熱貯留層構造の評価に関する研究		
指導教官	東北大学教授 新妻 弘明		
論文審査委員	主査 東北大学教授 新妻 弘明	東北大学教授 中塚 勝人	
	東北大学教授 林 一夫	東北大学助教授 浅沼 宏	

第1章 結論

クリーンな地熱資源の利用量を増大させる手段として、大深部地熱資源開発が注目されている。このため、既存の貯留層の下部あるいは周囲の情報を得ることが重要になっている。しかし、一般的な反射法地震探査では、地熱地域特有の音源に対する制約や減衰の大きい媒質の影響、地形上の送受信点配置の制約などにより、地熱地域の大深部地下計測を実現することが困難である場合が多かった。

そこで本研究では、地下き裂進展時に放出されるAEの反射波に注目して地熱地域での地下深部構造推定を実現することを考えた。AEを反射法における音源のように利用することには以下のような利点が考えられる。(1)エネルギーが著しく大きい、(2)弾性波の減衰が小さい、(3)比較的広範囲に多数発生する、(4)観測は受動的な装置のみで行え長期の観測も簡便かつ安価に行える。しかしその一方で、AEを音源として反射法計測を実現するには多くの問題がある。AEは天然の地震波であり、P波とS波が同時に発生し、様々なモードの波が重畳した複雑な波形として観測され反射波の検出は容易ではない。また、直達波のエネルギーと反射波の分離が不十分であることが予想される。

以上のようなことをふまえ、本研究では深部地熱貯留層構造の評価を実現することを目的として、AE波形中からの反射波検出ならびに地下構造推定のための3成分信号処理法の開発を行った。

第2章 3次元ホドグラム解析による反射波の検出と地下構造推定法

AEの反射波の検出は、波形の振幅・エネルギーに着目する方法では困難である。本章では、3次元ホドグラムの形状の直線性評価による反射波検出法と地下構造推定のための3次元逆解析法を検討している。

3次元ホドグラムの形状は、ランダムノイズなどのインコヒーレントな信号受信時には球状になるのに対し、平面波の観測時には一時的に直線的に変化する。コーダ波は不特定多数の散乱波のランダムな集合であると考えられることから、そのホドグラム形状はボール状になると予想される。一方反射波は平面波であると考えられる。これをふまえ、主成分分析により分散-共分散行列の固有値解析

を短時間移動窓を用いて行い、3次元ホドグラム形状の直線性の時間変化の定量評価を実現し反射波の検出を行う方法を考えた。

地下構造推定のための3次元逆解析法概念図を図2-1に示す。直達波に対してディレイ ΔT を持つ反射波があるとすると、この反射点はディレイと観測点と震源位置により定まる楕円体の面上に存在しうることになり、この面上に対応する波形エネルギーを分布させる。この操作を全イベントの全ディレイについて繰り返すことにより地下反射面が強調される。本研究では、さらに「S波偏波情報を利用した反射面検出時の自由度の低減」および「音源分布の偏りの補正」を行い、より高精度な反射面検出を実現している。

図2-2、2-3は葛根田地熱地域およびソルツHDRサイトでの観測データに対して本章の方法を適用した結果であり、両フィールドでいくつかの反射面が検出できた。このように、葛根田地域とソルツHDRサイトの解析例から、実データを利用して実際に地下反射面の検出が可能であることが分かった。一方、フェントンヒルHDRサイトの古い観測データに本方法を適用したところ反射面の検出が行えず、本方法においては、弾性波検出器が十分高精度なホドグラム検出能を持つことが必要であることが分かった。

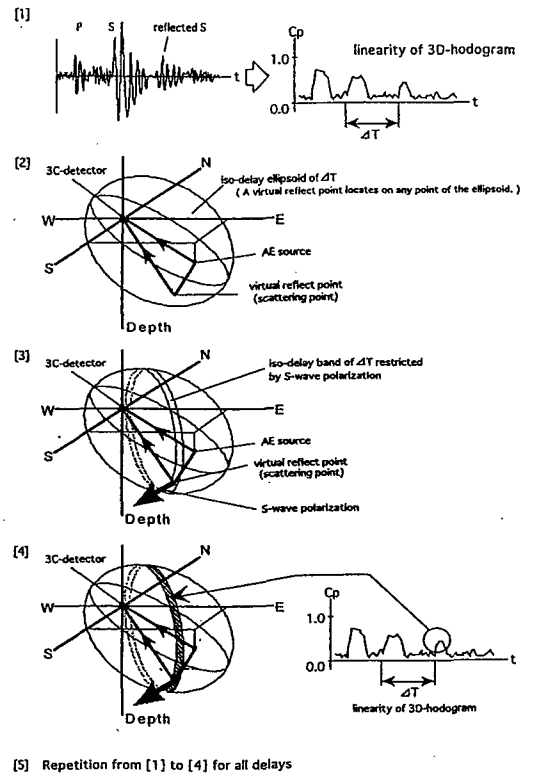


図2-1:3次元逆解析の概念図

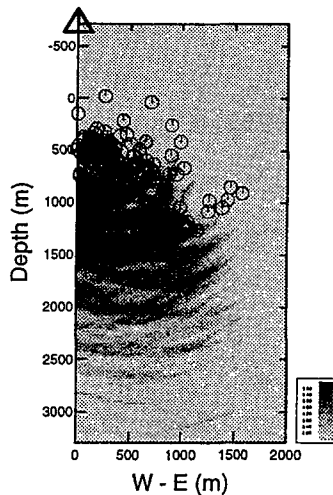


図2-2:葛根田地熱地域の深部地下構造推定結果

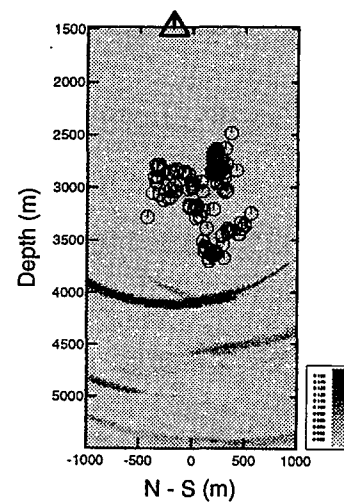


図2-3:ソルツHDRサイトの深部地下構造推定結果

第3章 ウェーブレット変換を利用した高精度反射波検出と地下構造推定法

本章ではウェーブレット変換を3次元ホドグラム解析に導入し、高精度・高分解能の反射波検出法、地下構造推定法を検討した。また、反射面性状評価の例としてS波偏波方向の変化の評価についても検討した。

ウェーブレット変換は、時間、周波数軸上の両領域で局在した関数列であるanalysis waveletを積分核とした積分変換である。本研究ではエネルギーの議論を行う必要があるため、ここではMayerの正規直交ウェーブレットを使用した。ホドグラム形状評価のために、新たにウェーブレット変換を用いたスペクトル行列解析を考案した。スペクトル行列はパワースペクトル、クロススペクトルを要素とする行列で周波数領域でのホドグラム解析を実現する。本方法についてはシミュレーションにより、ホドグラム評価が正常に行えること、低SNで時間一周波数領域で反射波検出が行えることを確認した。地下構造推定のための3次元逆解析では、各スケールの分解能に応じた台形の窓関数の使用と、偏波方向の評価を各スケール毎に独立して行うことにより、高分解能、高精度の反射面推定を実現している。

本章での検討により、観測波形中での反射波成分の同定が可能になった。このことは、震源放射パターンを決定することにより反射係数などの反射面性状評価を実現する可能性を示している。本章では一例として、反射前後でのS波偏波方向の変化の評価を検討した。

第4章 複数観測点を利用した地下構造推定法

本章では、複数観測点での地下深部構造推定法を検討した。

本研究では坑井内AE計測が望ましく、従って観測点数は少数でそれらの間の距離も離れている場合が多い。また音源分布にもばらつきがあり、一般の反射法での共通反射点の仮定は成立しない。このことから、それぞれの観測点で独立した解析を行い最終結果を複合するという方法が適切であるといえる。解析結果の複合は、推定する空間内の各点毎に複数点での地下構造推定結果を比較し、それらのうち最大となるものをその点の値として選択する、という方法で行った。

1996年にソルツで3点観測されたデータを用いて地下構造推定を行った結果、1993年のソルツの解析結果と調和的な反射面が検出された。このことから本アルゴリズムによって複数観測点で地下構造推定が可能であることが分かった。

第5章 AEを用いた反射法による深部地熱貯留層構造の推定

本章では「AEを用いた反射法」を用いて実フィールドの深部貯留層構造を推定し、深部地下計測法としての性能や有効性について具体的な検討を行った結果を述べている。ここでは、葛根田地熱地

域の1993年のビルドアップテストの際のA E、およびソルツ HDRサイトの1993年の水圧破碎実験の際の波形を利用し、それぞれのデータで適用可能な全ての方法を利用し、地質等の情報との比較を行いながら、検出された反射面の意味や方法の有効性を議論している。

葛根田地熱地域は我が国有数の地熱地域である。火山性の地質で複雑で変化に富んだ地下構造を有している。本地域では、深部に大規模な熱源の一つであると考えられる第四紀花崗岩類の存在が知られており注目を集めている。図5-1は、2観測点でのウェーブレット変換を用いた解析結果を複合した図と池内らによる地質断面概略図との比較である。ウェーブレット変換の利用により微小な反射体が多数検出され、2観測点の複合により大局的な構造が明瞭になった。深度2000m 付近の反射面は葛根田花崗岩の上面に、深度2500m 前後は花崗岩内部の透水性変化の境界に対応していると考えられる。複数断面の推定結果から、花崗岩の上面は走向約N60° W、傾斜約30°（南西下がり）であると概算することができた。

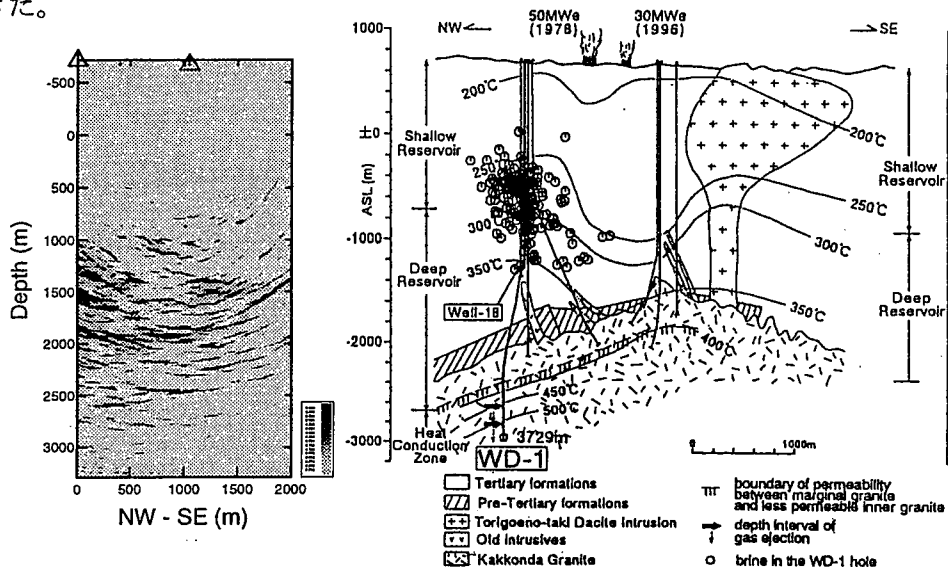


図5-1: 葛根田地域の地質断面概略図[池内らに加筆]と同一の断面についての2観測点を複合したウェーブレット変換を用いた地下構造指定結果

ソルツ HDRサイトはフランス北東部に位置する。本フィールドでは深度約1400m 以深の花崗岩質の基盤岩内部に人工貯留層が作成されている。図5-2はソルツでのウェーブレット変換を用いた地下構造推定結果である。本結果では深度3500m、3900m、4200m、4800m、5250m 付近などに反射面が検出されている。深度3500m 付近は貯留層内部のフラクチャー・ゾーンに対応している。深度4000m 前後は人工貯留層の下限にあたるが、ウェーブレット変換を用いた解析では分解能の高さから反射面が上下に2枚に分離して検出されている。このことは構造体の厚みの推定の可能性を示唆している。

第6章 結論

本研究は、深部地熱貯留層構造評価を実現するためのA Eを音源とする反射法計測技術の開発を目

的として行ったものである。ここでは、コーダの性質をふまえ「3次元ホドグラムの形状変化に着目し反射波の検出を行う」という概念を創出し、さらに正規直交ウェーブレット変換の導入など、より高度な地下深部情報抽出のための多成分信号処理法の開発を進めた。この結果、従来の方法では困難であった地熱地域の大深部あるいはHDRフィールドの人工貯留層下部などの領域についての地下情報の抽出が可能になった。さらにウェーブレット変換の導入などにより、実際の開発に有効な地下深部の性状に関する情報を抽出できる、実用的な地下計測法へと発展させる端緒を築くことができたと考えられる。

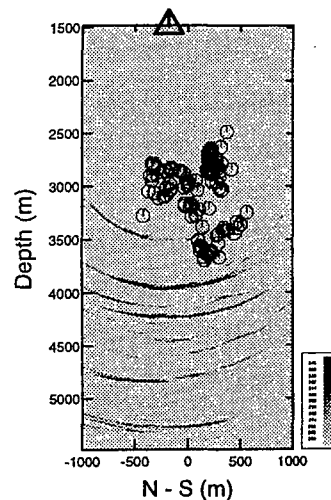


図5-2:ソルツ地域のウェーブレット変換による地下構造推定結果

審査結果の要旨

地下深部に賦存する膨大な地熱貯留層に関する情報取得技術の開発は、人類が来世紀に向けて新たなクリーンエネルギーを確保する上で重要である。本論文は、地熱貯留層内で発生するAE（アコースティック・エミッション）を音源として利用し、その反射波成分の抽出と逆解析によりAE源以深の深部地熱貯留層構造を取得できる新たな地下深部計測法を提案するとともに、実フィールドデータの解析によりその有効性を確認したもので、全文6章からなる。

第1章は緒論である。第2章では、坑井内で3成分計測されたAEのコーダ部分に埋もれたコヒーレントな反射波成分を、3次元ホドグラム形状を分析することにより抽出する新しい方法を提案し、シミュレーションならびに実波形の解析によりその有効性を確認している。さらに、得られた反射波情報の逆解析により3次元地下構造情報を得る具体的な手法を提示し、シミュレーションならびに実波形解析によりその特性を明らかにしている。これらは、AEを音源とした反射法を可能にするための具体的な手法を与えたもので重要な成果である。

第3章では、反射波検出の時間分解能を改善するために、ウェーブレット変換を用いたスペクトル行列解析の概念とその反射波検出への具体的適用法を提案し、シミュレーションならびに実波形解析によりその特長を明らかにしている。その結果、得られる3次元地下構造情報の分解能が大幅に改善されることを明らかにしている。これは画期的な成果である。さらに、本手法により、地下反射面における偏波方向の変化が検出できることを実波形の解析例により示している。これは、地下反射面のキャラクタリゼーションが原理的に可能であることを示したもので重要な知見である。

第4章では、複数点で観測されたAEデータへの本方法の適用について論じている。まず、AEを用いた反射法と既存の反射法との違いを明らかにし、複数点情報の最適な統合化とそのための効率的なアルゴリズムについて論じ、さらに、実波形の解析によりその妥当性を明らかにしている。

第5章では、前章までに論じた手法を葛根田地熱開発地域ならびにソルツ高温岩体フィールドに適用し、深部地熱貯留層構造の推定を行っている。葛根田地熱開発地域の解析では、本フィールドにおける信号の特徴を明らかにするとともに、現在開発対象となっている貯留層以深の3次元地下構造の映像化に成功している。そこでは、近年深部貯留層として注目されている葛根田花崗岩上面および内部に反射面が存在することを明らかにし、それらが他の独立な地下情報と調和的であることを示している。また、ソルツフィールドの解析では、水圧破碎にともなうAE源の下限ならびに深部に優勢な反射面が存在することを明らかにしている。これらは極めて重要な知見である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、弾性波を用いた深部地熱貯留層の計測に関し、新しい計測概念と具体的な手法を提案し、さらに実データの解析によってその有効性を実証するとともに、深部地熱貯留層に関する新しい知見を与えたもので、資源工学ならびに地殻工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。