

微小地震解析による深部地熱資源調査

杉原 光彦¹⁾・西 祐司¹⁾・当舎 利行¹⁾

1. はじめに

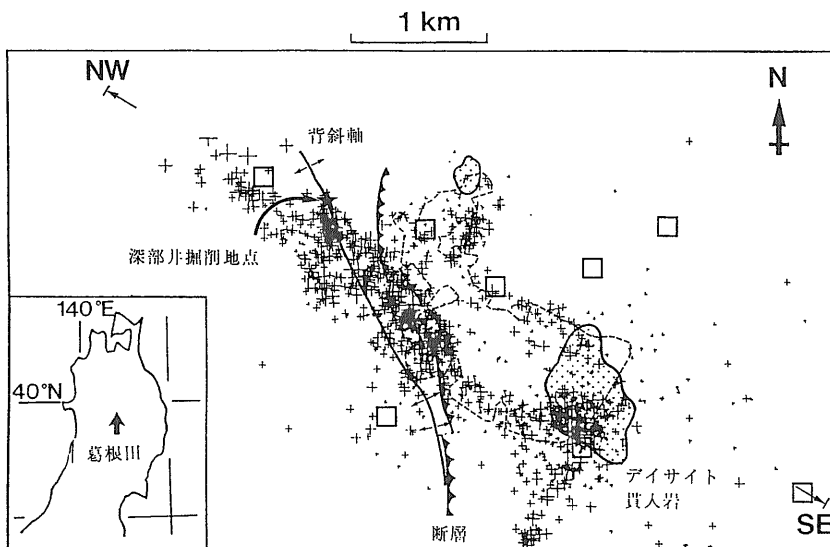
現在進行中の深部地熱資源調査プロジェクトにおいては、モデルフィールドとして岩手県葛根田地域が選ばれ、4000 m級のテスト井が掘削される。この掘削地点を決定する上で根拠の一つになったのが、地質調査所で1982年以来行ってきた微小地震観測の解析結果である。その内容については別に紹介している(伊藤・杉原, 1987; 杉原, 1993)ので、ここではその概要を簡単に紹介し、今後の研究の展望を述べる。

2. 深部掘削井の掘削地点選定の根拠となった微小地震解析結果

地熱地域で発生する個々の微小地震の震源が小断層などの断層に対応するならば、微小地震の震源分布から地熱貯留層の断層系分布を推定できる。地熱地域では、しばしばこの観点から微小地震調査が行

われる。葛根田地域で発生した微小地震について、個々の震源メカニズムを解析してみると、ほとんど全てが小断層のせん断運動によるものであることが確かめられた。また、1年間に発生した微小地震の震源を重ね合わせて得られる震源分布図は、地質調査から推定される断層系分布の特徴を良く表していることも確認された。

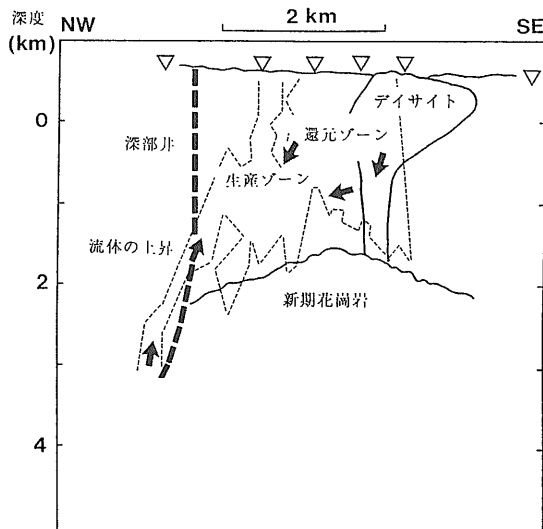
本地域では海水準下1000 mを境に震央分布のパターンが異なる(第1図)。1000 mより浅部では葛根田地域の中心部2 km×1 kmの範囲内で震央が密に分布するのに対し、深部では、浅部の震央密集域の周縁部にいくつかに分かれて震央が局在し、中心部は空白域になっている。一方、葛根田地域では坑井データから推定された透水性分布の特徴の違いによって海水準下1000 m付近を境に、上部貯留層と下部貯留層が区別される。透水性に極めて富む上部貯留層と、透水性の良い領域が限定されている下部貯留層の断層系分布の特徴の違いを震央分布は明瞭に示しているように見える。



第1図
葛根田地域で1988年1年間に発生した微小地震の震央分布。破線で囲んだ領域は、海水準下1 km以浅の震央分布域である。個々の十字印は海水準下1 km以深の震央である。海水準下1 km以深では、貫入岩体近傍、葛根田断層沿、背斜軸翼部で多くの微小地震が発生している。深部調査井掘削予定地点を星印で示す。四角形は地震計設置点を示す。

1) 地質調査所 地殻熱部

キーワード：微小地震, 葛根田地域, 深部地熱資源



第2図 葛根田地域の地熱貯留構造モデルの断面図(測線位置は第1図のNW-SE)。破線で囲まれた領域が1988年1年間に発生した微小地震の震源分布域である。三角形は観測点位置を示す。太い破線は計画中の深部坑井の位置(NEDO, 1992)を示す。

最近掘削されたいくつかの3000 m級坑井により、さらに深部の震源分布の特徴について新たな知見が得られた。微小地震の震源分布には明瞭な下限が認められていたが、葛根田地域中心部の震源分布の下限付近(海水準下1500-2000 m)で新期花崗岩体が発見され、その上面付近に極めて優勢な断裂帯が確認された(加藤ほか, 1993)(第2図)。また北西端の微小地震観測点の直下付近では北西方向に深部に向かって線状に並ぶ一群の微小地震活動がある。この微小地震活動が全体の震源分布の下限の延長で発生しているように見えること、複数の坑井データにより新期花崗岩の上面が北西側で深くなる傾向が認められることから、北西部の深部に連なる微小地震群は新期花崗岩上面付近の優勢な断裂帯の延長に対応し、地熱流体の上昇経路となっているものと予想される。この予想を支持する別の観測事実を以下に示す。

葛根田地域では地熱発電所の定期点検のために1年に1回、全生産井の坑口が閉止される。この時、坑井近傍の空隙圧は上昇する(これはビルドアップテストを実施したことに相当する)。この空隙圧の上昇は地殻の破壊強度を低下させる。したがって生産井から周囲に空隙圧上昇域が広がるのに伴う

微小地震活動が予想され、実際にその現象が観測された。震源分布域は生産ゾーン中心部から1日毎に拡大し、1年間の微小地震震源域を7日間で覆いつくすほどである。特に北西地域では深部への微小地震活動の伝播が認められた。震源伝播の方向は地熱流体の出口(生産井)から入口(還元井または別の源)への経路を表していると推定される。したがって北西深部に伸びる震源分布は地熱流体の深部からの上昇経路を表している可能性が強い。この上昇経路は葛根田地域の深部の地熱貯留構造を特徴づけていると考えられ、新たに掘削される深部調査井のターゲットとなった。

この深部調査井の掘削予定位置を、微小地震活動の特徴から推定した地熱貯留構造モデルとともに第2図に示す。なお、震源分布の下限が新期花崗岩の上面付近にあることの物理的な意味については、新期花崗岩が破砕度が小さく破壊強度が比較的に強いために微小地震が発生しにくいのか、新期花崗岩の上面付近を境にして主として温度条件により延性的になっていて微小地震が発生しないのかは未だ判断できないが重要な検討課題である。

3. 今後の課題1: 震源位置決定精度の向上

深部地熱資源調査でターゲットとなる北西部で深部に連なる震源域は、これまで解析に使用していた観測網の周縁部にあたる。そのためもあって、第1図と第2図に示した北西部深部の震源位置決定誤差は1000 mに及ぶ可能性もある。また観測網から遠ざかる方向に深部に伸びる震源分布は震源決定計算での見かけのパターンとして現れやすいこともあるので、解析結果の解釈には注意を要する。したがって、より確実な解釈を行うためには葛根田地域の北西部深部をターゲットとする新たな微小地震観測網を構成する必要がある。新たな観測網はターゲットを取り囲むものであることが望ましい。また地下4000 mの深部を狙うために、観測網のサイズを10 km程度まで広げることも望まれる。その一方で、震源から観測点までの距離が大きくなることにより信号レベルの低下が懸念されるので対策を考える必要がある。さらに実際の問題としては、自然保護のための立ち入り禁止区域に接していることもあり、震源決定のための観測点最適配置の条件は必ずしも

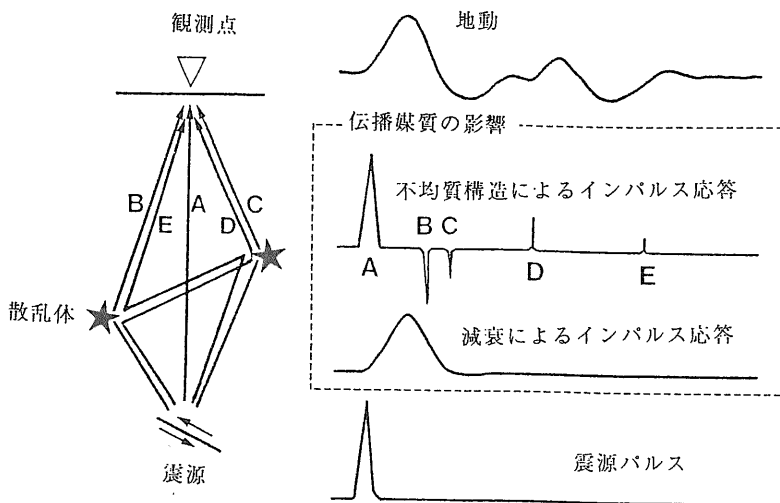
満たされない。仮に条件が満たされたとしても、通常の震源決定方法(P波とS波の初動時刻から震源時刻と震源位置を決定する方法)では震源位置決定精度を200-300 m 以内にするには難しい。

微小地震群の個々の微小地震の位置関係を高精度で決定するには、近接して発生した微小地震の同一観測点での記録についてクロススペクトルを計算してサンプリング周波数より細かい時間精度で到達時刻差を評価する方法がある。以前、葛根田地域の群発微小地震のデータにこの手法を適用し、約10 mの分解能で震源決定を行った事例がある(杉原・伊藤, 1984)。しかしこの方法では震源の相対位置は高精度で決定できるが、絶対位置を高精度で決定することはできない。そこでさらに別の解析を行う必要がある。

深部で発生する微小地震の震源位置決定精度が低いことの原因の一つは、観測網から震源を見込む角度が小さいために各観測点へ地震波が伝播する時間の差が小さいことである。全世界で記録されるような大地震については、1観測点の記録から震源位置及び発震機構を決めることも行われる。地球を1周した地震波も記録されるような大地震では、震源から様々な方向に射出された波が地球内部のいろいろな経路を通して初動以後の様々な後続波として1観測点でも記録されるためである。これに対し、微小地震の場合は元々のエネルギーが弱いために、直接観測点方向に射出された波動以外は検出できない場合が多い。しかし強い散乱体があって顕著な後続波が観測される場合には後続波形解析は有効にな

る。簡単な例として第3図を示す。★印で示した2箇所(散乱体)を考えると、この散乱体は本来の震源に加えて2次的な震源として働く。観測波形は、震源からの直達波(A)の他に、各散乱体での1次散乱波(B, C)、及び2次散乱波(D, E)が加わったものになる。従って震源を見込む角度も広がるが、さらに震源位置決定精度に有利なことがある。震源位置が異なれば、直達波と後続波の時間関係が変わり、波形が大きく変化する。この波形変化は観測点間の初動到達時刻差の変化よりも震源の位置について敏感である。つまり波形変化を解析する方が初動到達時刻差を解析するよりも高分解能の震源位置決定解析ができる可能性がある。

実際の解析手順としては、仮定した震源位置と発震機構及び速度構造に対して計算した理論波形を観測波形と比較し、両者が一致するように震源位置・発震機構・速度構造を決めていく。このような地震波形のモデル計算については、本研究プロジェクトでも始められている(菊地, 1994, 本特集号)。一方、実際にこのような試みを有効なものにするためには、後続波形の解析に耐える良質な観測データの取得が必須である。葛根田地域内の多くの観測点では、記録される地震波形データは非常に複雑である。断裂帯を通過してきたと思われる場合にこの傾向が著しいことから、複雑な波形の原因は、おそらくは断裂帯中に散乱源が多いためであるが、そのようなデータの解析は事実上困難であろう。しかし、断裂帯をはずれている観測点では単純な波形を記録することが多く、その中に明瞭な後続波が記



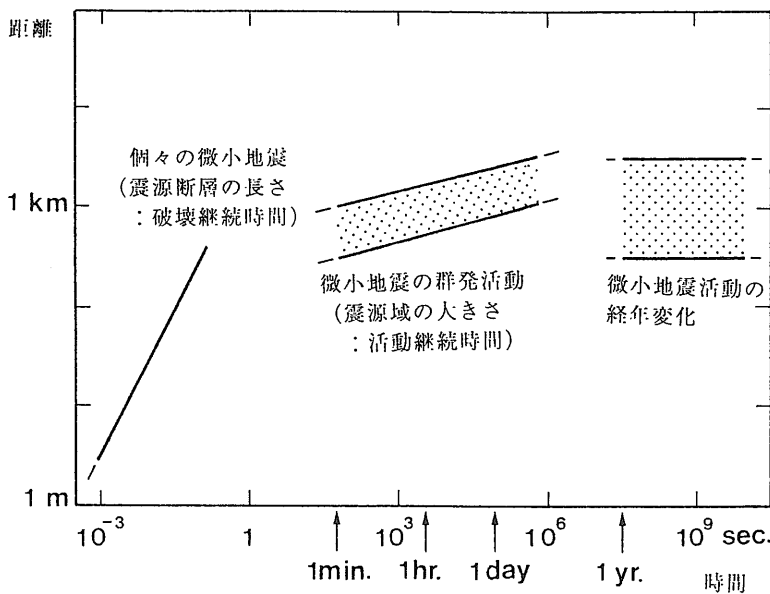
第3図 地震波形の概念図。震源から射出された地震波は、不均質構造で散乱されたり減衰されたりして地表に達する。

録されている場合がある。こうしたデータは理論波形と比較検討する上で十分な質を持つものである。さらに質を良くするためには、地震計を群列に配置することにより、信号/雑音比が向上し、注目する信号が検出されやすくなる。群列観測については、観測装置の開発をすでに進めており、火山地域での微小地震観測で試みている(西・杉原, 1992)。

4. 今後の課題2：微小地震の物理的な意味の解明

発震機構が解析された微小地震はすべてせん断破壊によるものであることはすでに述べた。個々の微小地震の発震機構に対応する応力場の空間分布は複雑であるが、平均すれば主圧縮応力軸は、ほぼ東西方向であり、これは測地データなどから推定された東北日本の平均的な応力場に一致する。したがって葛根田地域で発生する微小地震活動は、広域的な造構運動による歪エネルギーが解放される現象と見ることもできる。しかし、地熱貯留層は地殻の破砕度が大きく破壊強度が弱いため微小地震が発生しやすいのか、局所的に特別な応力場があるのかについて明らかにすることも重要な課題である。そのためには、微小地震の発震機構の他に、それとは独立した測地学的データを取得して考察することも必要だろう。

葛根田地域での地質調査所の観測では、これまでは周波数帯域が2-100 Hzの信号を観測し、この帯域で最も顕著な現象として卓越周期が30-60 Hzの微小地震に注目してきたのであった。個々の微小地震は極めて局所的で短時間の現象である。しかし微小地震活動の時空間分布の特徴の中には、地熱貯留層のマクロな特徴とも関係づけられるものがある。一例が、前述したビルドアップに伴って発生する微小地震活動であるが、この他にも貯留層内部の圧力変化と微小地震発生の関係を示唆する観測事実がある。葛根田地域では継続時間が1-3時間の群発微小地震活動が時々発生するが、その継続時間とはほぼ等しい時定数の圧力変動が坑井内圧力計で記録されることがある。また、1-3日おいて離れた場所で群発微小地震活動が起こる場合がある。もしも貯留層内部の圧力変化と微小地震発生の間に関係があるならば、葛根田地域では貯留層内部圧力の経年変化が報告されている(小原, 1988)ので、微小地震活動の発生様式も経年変化をしているはずである。また地熱貯留層内部の地熱流体の生産・還元・供給あるいは蒸気ゾーンの形成などによる質量分布の変化が、重力分布の経年変化として、地熱地域ではしばしば報告される(石戸ほか, 1992)。質量分布の変化と微小地震活動様式との関係を探ることも意味のあることであろう。



第4図
葛根田地域での微小地震に係わる現象は、個々の微小地震、群発微小地震活動、震源分布の経年変化など、広い時間領域と空間領域で認められる。

5. ま と め

微小地震活動のデータから地熱貯留構造の物理的特徴を解明することは葛根田地域での従来の研究ですでに成果があがっている。今後は、特に地下3000 m以深で発生する個々の微小地震の震源位置決定の精度をあげることが第1の課題である。このためには、解析方法の開発とともに、明瞭な地震波形を記録できる観測点の探索とそこでの群列観測が重要である。今後の第2の課題は、微小地震発生の物理的な意味を明らかにすることである。従来の研究で注目してきた微小地震活動と地熱貯留構造の対応関係は経験的・定性的であるので、定量的な解釈を経て物理的なモデルを確立する必要がある。葛根田地域での微小地震に関する現象としては個々の微小地震の発生のほか、群発微小地震活動の発生、微小地震活動の経年変化がある。空間スケールで見れば、個々の微小地震の震源の大きさ(数 m 以下? - 数100 m)から震源分布域(数 km)に及び、時間スケールで見れば、個々の微小地震に伴う断層運動継続時間(1 ミリ秒以下? - 数10 ミリ秒)から微小地震活動の変動時間(1 分以下-10年以上)の広い範囲に及ぶ(第4図)。こうした広い帯域の物理現象を解明するには、当面は力学的考察に限定するとしても、従来の微小地震観測に加えて、より低周波領域での地動観測及び測地観測及び、坑井内圧力データの利用が重要になるであろう。葛根田地域の地熱

貯留構造の根とも考えられる深部の微小地震活動の物理的なモデルが解明されれば、何故そこに地熱貯留層が存在しているのかという問題の解決にも接近できるであろう。

引用文献

- 石戸経士・杉原光彦・菊地恒夫(1992): 地熱レーザーモニタリング. 物理探査, 45, 522-534.
- 伊藤久男・杉原光彦(1987): 岩手県滝の上地熱地域における微小地震観測システム. 地質調査所月報, 38, 247-264.
- 加藤 修・土井宣夫・村松容一(1993): 岩手県葛根田地熱地域における新时期花崗岩類と地熱貯留層. 日本地熱学会誌, 15, 41-57.
- 菊地恒夫(1994): 葛根田地域をモデルした弾性波シミュレーション. 地質ニュース.
- NEDO (1992): 深部地熱資源調査・採取技術に関する調査 463p.
- 西 祐司・杉原光彦(1992): ニュージーランドホワイト島火山微小地震観測記. 地質ニュース, 457, 34-49.
- 小原幸正(1988): 地熱貯留層工学技術—ケーススタディ(1)—. 地熱, 24, 519-523.
- 杉原光彦(1993): 微小地震を利用した地熱探査. 日本地熱学会誌, 15, 72-75.
- 杉原光彦・伊藤久男(1984): クロススペクトルを使った相似地震の震源決定—岩手県滝の上地域の例—. 地震学会59年度春季講演要旨, 100.

SUGIHARA Mituhiko, NISHI Yuji, and TOSHA Toshiyuki (1994): Microearthquake analysis of the deep-seated geothermal system at Kakkonda.

〈受付: 1994年1月6日〉