

特集 断裂型貯留層評価をめざす物理探査

南茅部地域での TEM 法・アレイ式 CSAMT 法による比抵抗構造調査

光畑裕司・内田利弘

北海道南西部に位置する南茅部地域において浅部比抵抗構造の調査及び CSAMT 法データのスタティック効果の評価を目的に過度現象電磁探査法(Transient Electromagnetic method, TEM 法)を実施した。測点は NEDO (1992)によって実施されたアレイ式 CSAMT 法の測線上に 15 点配置した。取得されたデータは比較的ノイズが少なく、地表から深度 500—700m の範囲の比抵抗構造を把握することができた。

TEM 法は MT 法と異なり磁場だけを用いて比抵抗構造を決定することができるため、スタティック効果に悩まされることがない。しかし、データの解析に関してはまだ未発展の段階であり、また探査深度も浅い。本報告ではまず、TEM 法のデータ解析法として 1 次元解析法を適用し、浅部の比抵抗構造を決定した。結果として表層付近の帽岩の役割を果たす低比抵抗層、その下部の比較的高比抵抗を示す貫入岩が見いだされた。次に、アレイ式 CSAMT 法のデータを 1 次元解析したが、スタティック効果の影響のため表層の低比抵抗が横方向につながらないモデルとなった。そこで平滑化条件付き 2 次元解析を実施したところ、TEM 法の結果と整合性のある満足のゆく結果が得られた。更に比抵抗検層の結果とも比較したところ、どちらの探査法の結果もよく一致していた。

(地殻物理部)

Keywords : TEM, Arrayed CSAMT, Static effect, Minami-kayabe

低速度層の層厚変化が大きい場合の反射法解析の問題点

加野直巳・山口和雄

反射法の処理の中で静補正は S/N を向上させるだけでなく、正しい地下のイメージを得るという点でも重要な意味を持っている。丹那盆地は表層に湖底堆積物が厚く堆積しており、その厚さも次第に変化している。この湖底堆積物の上部はとくに速度が遅く、下位の火成岩類とは大きな速度コントラストを持ち、静補正の対象となっている。

正しい地下のイメージを得るという点での静補正の意義を示すために、丹那盆地の湖底堆積物の低速度層の形状を考慮して、低速度層の厚さが徐々に変わるモデルを作り、反射法のモデリングを行った。低速度層は速度 400m/s で、最深部が 20m、両端の距離が 500m の球の一部の形状とした。その下に速度 150 0 m/s で深度 50m の層、速度 2000m/s で深度 200m の層、速度 2400m/s の層を設定し反射面とした。いくつかの CDP ギャザの反射波の波線を観察すると、低速度層の傾斜のために反射点のずれが生じている。この効果は浅部の反射ほど大きい。また反射波の走時を観察すると、反射面の深度が同じであるのに、走時が大きく異なっている。更にオフセットと走時の関係も双曲線の形状が異なっており、重合速度が変化し、正しい区間速度が得られなくなる。したがって静補正を正しく行わないと、水平な層が背斜構造であるかのように見えてしまうことになる。

NEDO が 1988 年に丹那盆地で行ったパイプロサイスによる反射法データで実際に静補正の有無により速度解析や重合結果にどのような影響が現れるかの様子を 2カ所で見た。その結果静補正を行わない場合には屈折波を反射波としてイメージしてしまうこと、重合速度が遅くなり、また NMO 補正を行っても走時がきれいにはそろわないこと、反射面が遅い時間にイメージされることが分かった。

反射波のばらつきの補正としてだけ考えて静補正を実

* 平成 6 年 2 月 23 日本所において開催

施すると、屈折面である湖底堆積物の基底の形状がイメージされ、かつ湖底堆積物の速度がほぼ400m/sと遅いため20m程度の厚さの変化が100msの大きな走時差となってイメージされる。低速度層の厚さを考慮して静補正を実施すると、重合結果は見かけがかなり変化し、解釈の修正が必要になるかも知れない。(地殻物理部)

Keywords : Seismic reflection, Static correction, Low velocity zone, Thickness variation, Imaging

シミュレーションによるフラクチャー周辺の弾性波の伝播状況の解明

菊地恒夫

フラクチャーの開口幅を弾性波を用いて推定することを目的とする。そのために、まずシミュレーションを使用して、フラクチャー周辺の弾性波の伝播状況を明らかにする。シミュレーション手法として Staggered grid finite-difference と呼ばれる差分法を用いた。今までは、フラクチャーを表すのに、平行平板モデルを用いてきたが、今回は接触部があるモデルを用いた。まず、原点からの距離を x とし、そこに到着するまでに接触がない場合の振幅を 1 とし、 x 到達までに通過した接触の数に対して振幅がどう変化するか調べた。P 波の場合は、接触が増加するにつれ、僅かに振幅が小さくなるものの、その変化は非常に小さい。S 波の場合は、接触があると、最初に急速に振幅が小さくなり、その後はなだらかに小さくなる方向へ変化する。ところが、フラクチャーの表面を伝播する境界波(表面波)は実体波とは全く違った挙動を示す。例えば、 $x=15.5\text{m}$ に 1 個だけ接触があるモデルでは、接触部の前までは境界波が存在するが、接触部では境界波は消失してしまうことが分かった。更に、接触部から 3.5m 離れた点(境界波の波長の 70% 程度)では、再び現れている。(地殻熱部)

Keywords : surface wave, staggered grid finite-difference, fracture

坑井内イメージングツールとハイドロフォン VSP による透水性キ裂の評価

伊藤久男*・木口 努**・栗原保人**
中尾信典*・大湊隆雄*

地下キ裂のキャラクタリゼーションのうちで、キ裂の透水性は地下流体の挙動に直接影響を与える重要な要素である。透水性キ裂の把握とキ裂の透水性を評価するため、マルチオフセットハイドロフォン VSP 実験を行った。坑井を横切る透水性のキ裂において実体波からチューブ波が発生することから、透水性キ裂の検出と、実体波と発生したチューブ波の振幅比からキ裂の透水係数や傾斜角・傾斜方位を求めた。

実験では、NEDO が高温岩体発電システム技術開発の一環として福島県飯館地区に掘削した坑井を使用した。受震坑井と 3 本の発震坑井の深度はそれぞれ 100m 程度であり、坑井間距離は 20m—30m 程度である。明瞭な初動 P 波が見られ、いくつかの深度において、上方及び下方に伝播するチューブ波がある。

3 つのオフセットのそれぞれの受震記録から、初動 P 波とチューブ波の振幅比を求め、Beydoun *et al.* (1985) に従い、キ裂の傾斜角・傾斜方位と透水係数を算出した。深度 83.25m のチューブ波では浸透率として 100 md—170md、キ裂の傾斜角として約 20° が得られた。この深度では NEDO により水圧破壊が行われ、その前後に坑壁のキ裂計測が行われた。今回の結果は、観察された複数のキ裂のうち水圧破壊後に発生した低角のキ裂が透水性キ裂であることを示す。

今後この手法が広く利用されるためには(1)チューブ波の解析のより現実的なモデルの作成、(2)得られた結果、特にキ裂透水率の妥当性の検証、(3)透水性キ裂と不透水性キ裂の分布、成因についての研究、(4)多くの坑井での測定を可能にするための耐温性、耐圧性の向上などの技術開発が必要である。

(*地殻熱部・**地殻物理部)

Keywords : downhole measurements, fracture, permeability

S 波利用による地下き裂の異方性解析

中尾信典*・栗原保人**・木口 努**
大湊隆雄*・伊藤久男*

地下資源の探査において、地下のフラクチャーの情報

を的確に把握することが重要な課題となっており、S波の偏向異方性(S波のスプリットング)を利用した探査法が有効な手法の一つとして注目されている。すなわちS波偏向異方性から、S波が伝播してきた経路に存在する様々なスケールのフラクチャー群の平均的な走向及び密度に関する情報が抽出可能である。特にデータ取得のジオメトリがVSP方式であれば坑内受振であるため、受振深度ごとの減衰が小さい直達波を取り扱える利点がある。S波VSP法によるデータからS波偏向異方性に関する情報を得るためには、速いS波相(S1波)の振動方向、及び速いS波相と遅いS波相(S2波)との時間差(又は速度差)をパラメータとして検出することが必要である。

地質調査所では、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)により静岡県丹那盆地に掘削された坑井を使用し、S波を用いたVSP実験を行った。異方性解析の方法としては、アルフォード回転を用いたLayer stripping法(Winterstein and Meadows, 1991)、偏向ダイアグラム法、及び受振器回転による区間速度算出法の3つの解析方法を適用した。これは、それぞれの解析方法が固有の仮定や問題点を有しているためである。解析の結果、玄武岩質溶岩に対応する深度300m—410m区間において強い異方性が検出され、S1方向については3つの方法ともほぼN方向、異方性の量はLayer Stripping法及びS波区間速度から20%程度に見積られた。20%の異方性とは、鉛直のキ裂を仮定した場合、10cmサイズのキ裂では体積1m³当たり160個、1cmサイズのキ裂では1.6×10⁶個程度存在することに相当する。一方、火山礫凝灰岩層に玄武岩質溶岩が挟まれた深度160m—200m区間では、Layer Stripping法により異方性の量が20%程度と求められたが、3つの解析方法によるS1方向は一致しなかった。このことは、単純な異方性モデルでこの区間が説明できないことを示唆しているものと考えられる。

(*地殻熱部・**地殻物理部)

Keywords : S-wave polarization anisotropy, Layer stripping

風化層の影響を考慮した3方向 弾性波トモグラフィ

横田俊之*・六川修一**
大久保泰邦**・芦田 譲***

モデルシミュレーションによって作成されたデータを用いて、坑井間データに地表坑井間データを加えて解析

した場合の効果の検討を行った。その際に、浅部の風化層の存在を考慮しない場合(通常の解析)と、考慮した場合の解析結果の比較検討を行い、風化層の影響を取り除くインバージョンを考案した。更にこの手法を丹那盆地のデータに適用し、縦型断層の検出を試みた。本研究によってわかった点は以下のとおりである。

(1) 従来の坑井間データに加え、地表坑井間の透過型VSPデータを併用する解析手法を用いると、縦型波線が増加する影響により、水平方向に速度コントラストを持つ構造の再構成結果が改善される。

(2) 浅部の風化層のように確度の高い既知情報を有効に利用することにより、解析結果の精度向上を計ることができる。

今後、この種の解析を行う場合は、マクロな地下構造と計測条件の関係を考慮すること、並びに既存データ・情報の有効利用を計ることが重要であると考えられる。

(*地殻物理部・**東京大学工学部
***京都大学工学部)

Keywords : seismic tomography, vertical ray-path, weathering layer

岩石内部のフラクチャー観察と岩石物性

西澤 修*・栗原保人**・中野 司***・安川香澄*

クラックやジョイント(あるいは小断層)は地下の熱水貯留層形成において重要な役割をはたす。これまで、クラックが岩石の物性に及ぼす影響についての研究は数多くなされているが、ジョイントや小断層が岩石の物性に及ぼす影響については詳しく調べられていない。この研究プロジェクトではクラックが岩石物性に及ぼす影響だけでなく、ジョイントや小断層が支配的な岩石物性についても研究を進めてきた。特に弾性波の散乱については新しくモデル実験を行うとともに、散乱の原因となっているジョイントの形状そのものについても詳しく研究を行った。弾性波の散乱は開口型割れ目の方向に支配され、縦波と横波のエネルギー減衰の比は割れ目の方向に依存しており、弾性波の波形を用いた物理探査に重要な役割を与える。また、岩石コアの静水圧変形試験により簡便に地殻応力を推定する手法の開発がなされた。

(*地殻熱部・**地殻物理部・***地質情報センター)

Keywords : fracture, crack, joint, scattering

断り型地熱貯留層における微小地震探査

当舎利行・杉原光彦・西 祐司

これまで主として葛根田地熱地域で行ってきた微小地震観測とそのデータ解析によって、微小地震の個々の震源のほとんどが小断層のせん断運動であること、その小断層が組合わさって断り系が構成されていることが明らかになっている。したがって長時間に発生した微小地震の震源分布は、そのような断り系をマッピングしたものととして解釈できる。実際は1年間の微小地震震源分布と坑井データに基づく地質構造モデルを比較すると震源分布域は地熱貯留層の領域と対応しているようである。この解釈は別の二つの微小地震活動によっても支持される。

一つはビルドアップに伴う微小地震活動である。全ての生産井を順次閉止すると微小地震活動は生産ゾーンから周囲に広がり、最終的には1年間の微小地震震源域をほぼ覆い尽くす。生産井を閉止すると空隙圧が上昇するので、封圧が低下し、微小地震がトリガーされるであろう。この空隙圧上昇は生産井から周囲に伝播するはずなので、それが微小地震の伝播として観測されたものと思われる。もう一つの微小地震活動とは、通常の微小地震発生領域のすぐ外側で発生した「前震—本震—余震」様式のものである。通常の微小地震活動のいわゆる群発型と異なる発生様式を示すのは、震源域の破碎度が小さいためであると考えられる。

以上のように微小地震活動解析からでも断り型貯留層の評価をある程度行うことはできる。しかし分析能や精度を上げるためには地震波形解析が必要である。地熱地域で発生する微小地震の波形はしばしば複雑な様相を呈する。この複雑さの原因の一つは断り系などの不均質構造による散乱・反射・減衰である。この不均質構造の影響を分離できれば、震源位置決定や震源過程解析精度が向上する。一方、不均質構造自体の解析によって断り系の分布を推定できる。地震観測波形から震源の影響と構造の影響を分離するにはアレイ式観測が有効である。

我々はこれまでの観測経験に基づいて微小地震観測システムを改良してきた。その結果1台6チャンネルの記録計を複数台接続し、時計と記録動作を同期させることによって、目的に応じた機動的なアレイ観測を行えるようになってきている。例えば1台の3成分地震計を3台の1成分地震計によって囲んで配置するマイクロアレイは地震活動を把握するのに効率の良い観測形態であるが、これは1台の記録計で実現できる。一方、不均質構造を詳細に調べるためには数多くの地震計を密に配置する必要

がある。このためには記録計を連結して多チャンネルのシステムで観測することが有効である。(地熱熱部)

Keywords: Kakkonda, microearthquake, geothermal reservoir, fracture

断り系のレザバーシミュレーション

矢野雄策*・中尾信典*・宮崎芳徳**・石戸経士*

断り系における地熱流体の流動に関する諸現象を理解するため、数値シミュレーションを主たる手法として基礎的研究を行った。ここでは、実際の現場で得られる流動に伴う温度圧力等の状態量変化を観測し、数値モデルと対比させることによって、断り系の構造を推定することを念頭においている。

流動の数値シミュレーションにおける断り系の扱いは大きく3通りに分類できる。ひとつは個々の断層やフラクチャーを独立した数値ブロックで扱う場合、2番目は断り系をフラクチャーのネットワークとして考え、フラクチャーの統計的性質を数値ブロックに与える場合であり、3番目はフラクチャーネットワークをポラス近似する場合である。2番目の考え方に基づく一つの手法としてMINC法があげられる。このような分類・場合分けは、フラクチャーに囲まれた岩石マトリクスに温度圧力変化がしみ込むタイムスケールと、対象とする現象のタイムスケールの関係によって決められる。0次元の岩石マトリクスモデルに基づく理論では、あるスペーシングのフラクチャーネットワークに対して岩石マトリクスの浸透率と熱伝導率によって使用モデルの場合分けがなされている。我々の行ったIn Situ Boilingの数値実験では、グローバルな流動がある場合には、更にフラクチャー部と岩石マトリクス部の蒸気飽和度の違いによってフラクチャーネットワーク特有の圧力遷移挙動を示すことが明らかになった。また、Cold Sweep過程の数値実験ではフラクチャースペーシングの違いによるコールドフロント到達時間の相違を示した。これは生産計画の指針作成の基礎データとなり得る。

実際のデータとして、丹那で行われたフォールオフ試験の結果はダブルポロシティの挙動を示している。また、湯坪で行われた坑井テストデータのインバージョン解析結果からは単独井の解析から得られるkhよりも干渉試験の解析から得られるkh値の方が大きい傾向を見せており、これも断り系貯留層に特徴的な結果であると解釈できる。(地熱熱部・**国際協力室)

Keywords : fractured reservoir, numerical simulation, fluid flow

東濃地域の花崗岩を対象とした レーダー法クロスホール調査

仙波 毅・長谷川 健

NEDO における断裂型貯留層探査法開発の概要

米田吉宏・永野征児・村岡洋文

地熱貯留層中の断裂を精度よく探査する技術開発として実施している断裂型貯留層探査法開発の概要を紹介する。電磁探査技術ではアレイ式 CSMT 法、弾性波探査技術では高精度反射法・VSP 弾性波トモグラフィ、更に微小地震探査のための実用的なデータ処理・解析ソフトウェアの開発を行っている。電磁探査技術では最大 32ch のアレイ式 CSMT 観測装置を開発、秋田県澁川での実験で効率性を実証した。弾性波関連では大分県湯坪での実験を通して、火山岩地帯での VSP・弾性波トモグラフィなどの探査を可能とした。ここで開発された坑井内地震計は 2 成分・4 連で耐熱温度 260°C というものである。(新エネルギー・産業技術総合開発機構)

Keywords : Yutsubo, Sumikawa, VSP, tomography, CSMT, microearthquake, fracture, geothermal reservoir

コア、FMS/FMI 検層に見られるフラクチャー

稲葉 充・兼清豊比古

最近の物理検層技術の飛躍的な発展に伴って、坑壁周囲の比抵抗分布を緻密に、かつ連続的に得ることのできる FMS/FMI 検層が、フラクチャーを認定する手段として有力なものとなってきている。コアに認められるフラクチャーと FMS/FMI 画像との対比、FMS/FMI 画像上でのフラクチャータイプの認定などから、北海道勇払ではフラクチャーは 3 系列が認められた。フラクチャーが自然のものであるか、掘削などによる人工的なものであるかは形状と表面の様子により判別される。コア表面の浸透率分布とフラクチャー系列には関連が見えた。(石油資源開発(株)技術研究所)

Keywords : well log, FMS, FMI, fracture

結晶質岩の水理地質特性を明らかにするためには、岩質中に発達する割れ目帯の空間的広がりや規模を明らかにする必要がある。これらを把握する手法の一つにボアホール・レーダー法がある。動燃事業団では、岐阜県東濃地域の花崗岩に掘削された 2 本の試錐孔を対象としてクロスホール調査を実施し、反射波に着目した解析を行った。その結果岩盤の含水量境界面の位置や広がりを 3 次元的に推定することができた。

(動燃事業団中部事業所)

Keywords : Tono, borehole radar, tomography

リニアメント分布特性による 広域地下水流動調査領域の検討

小出 馨・柳沢孝一

岐阜県東濃地方のランドサット TM 画像から作成されたリニアメント判読図をもとにリニアメント分布特性を調べた。その結果、阿寺断層や屏風山断層などの高角度の断層は、異なるリニアメント分布特性を有する地区の境界を成していることが確認された。このことから、高角度の断層は地下水流動系の境界の一つとして考えられ、これらを境にして水理地質構造は不連続になっていることが予想される。(動燃事業団中部事業所)

Keywords : Tono, Adera Fault, Byobuyama Fault, Landsat TM, hydrogeology, linearment

地熱貯留層挙動シミュレーションのための 貯留層モデルの作成

門脇正和

貯留層シミュレーションを行うための貯留層モデル作成について奥会津北域を例に考察した。奥会津北域はいくつかの顕著な断層帯、破碎帯によって規制されている。ここでは特に自然状態地下温度分布、透水性の分布を各種データから作成し、貯留層モデルを順次改良することにより同地域の熱水流動などのシミュレーションを可能

とした。

(三井金属鉱業株)

南茅部地域の空中電磁探査

Keywords : well test, reservoir simulation, permeability,
geothermal reservoir

村上 裕*・大久保泰邦*・川村政和**

仙岩澄川地区 MT 法データの 2 次元解析

内田利弘・光畑裕司

浅部比抵抗異常に起因するスタティック効果を避ける 1つの手段として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)は、測点を連続的に配置して測定する EMAP 法を仙岩澄川地区において実施した。NEDO は空間フィルタリング及び 1 次元ポスティック解析によって比抵抗モデルを作成した。それに対し地質調査所では、EMAP 法のオリジナルデータをそのまま用い、比抵抗構造に平滑化の制約を与える 2 次元インバージョンを行った。そうすることによって、データに含まれる情報をフィルタによって消してしまうことなく、個々の測点が受けているスタティックシフトは浅い細かな比抵抗構造で補償し、深部の構造はデータが許す範囲で滑らかにすることができる。この方法によって非常に安定に測定値を説明する比抵抗モデルが得られることが確認された。

2 次元解析によって得られた比抵抗モデルを澄川地区の地質モデルと比較すると、以下のような解釈ができる。

- 1) 浅部の新しい火山岩は高比抵抗である。
- 2) その下の湖沼堆積物やグリーンタフの低温粘土変質帯は低比抵抗でキャップロックの役割をしている。
- 3) 更にその下のグリーンタフは高温粘土化帯かつ比較的比抵抗(100Ωm)で熱水貯留層になっている。

NEDO の坑井 SN-7D では深度 2100m 以深で高比抵抗の新期花崗岩にあたっているが、EMAP 法による比抵抗モデルではその深度に対応するデータがあまりよくないため、高比抵抗のグリーンタフと区別することはできなかつた。深部の花崗岩を想定した数値実験の結果でも、非常に高品位の測定データでないとい、花崗岩は検出できないことがわかった。

(地殻物理部)

Keywords : magnetotellurics, EMAP, two-dimensional inversion, geothermal reservoir, Sengan-Sumikawa

北海道函館の北東にあり噴火湾に面する地熱微候地帯である南茅部地域において、ヘリコプタによる電磁法/全磁力測定を実施した。測線方向は北西-南東、測線間隔は約 200m、測線数は 49、総測線長は 387.4km である。測定期間は 1993 年 3 月 22-25 日である。調査範囲は NEDO による南茅部地域地熱開発促進調査(昭和 59-61 年度)の範囲とほぼ同じである。

使用した空中電磁法測定装置は DIGHEM V 型である。送受信コイルの配置と周波数は、水平共平面配置が 385, 5k, 56kHz の 3 周波、鉛直同軸配置が 900, 7.2kHz の 2 周波である。送受信コイルはバード内に設置し、ヘリコプタより曳航する。バードの対地高度はレーザ高度計(精度 0.1m)により、ヘリコプタの高度と位置は電波高度計と GPS 航法システムにより計測した。全磁力測定は光ポンピング型セシウム磁力計を使用した。

測定データを NEDO 地熱開発促進調査データと対比する。促進調査範囲は茅部郡南茅部町と函館市にまたがる面積約 70km² の地域で、温泉は磯谷川の中流に磯谷温泉(65°C)があり、大船川沿いに大船温泉上の湯(75.0°C)と下の湯(69.0°C)があり、地熱微候が大船川沿いと泣面山からその北西の硫黄山にかけて分布する。変質帯は 13 地域に区分される。

5kHz と 385Hz の見掛比抵抗分布図と変質帯分布を比較した。5kHz 見掛比抵抗分布における低比抵抗帯は浅部に広がる変質帯分布をよく表している。385Hz の見掛比抵抗分布図は、より深部につながる低比抵抗帯の分布を表すが、主として第四紀の火山噴出物の分布域で、カオリナイトを主体とする酸性変質帯である 6 地域とよく対応していることがわかった。

全磁力測定データから IGRF 残差及び極磁気異常を計算した。極磁気異常図は、8 方位から照射した陰影図として表示した。三森山北部に逆帯磁と思われる箇所や、泣面山のように地形と明瞭に相関した磁気異常を示す箇所や、万畳敷原野のように地形だけでは説明できない磁気異常を示す地域がある。これらの知見をより客観的・定量的に抽出するため、現在、測定磁気異常と理論磁気異常(地形に地球磁場方向の均質磁化を与えたときの磁気異常分布)との間の相関解析などにより地形補正を行い、地下の岩体分布の推定を進めている。

(*地殻物理部・**地殻熱部)

Keywords : airborne EM, Minamikayabe, apparent resistivity

火山岩地帯における高精度反射法

山口和雄・加野直巳

光ファイバーセンサによる坑井内温度分布測定

松島喜雄・川村政和

光ファイバーセンサは、ファイバー上の細かい温度分布を同時にかつ長期間にわたり測定することが可能である。そのため、1度坑井に設置すれば、流体の擾乱を引き起すことなく鉛直温度分布とその時間変化を測定することができる。このような特徴から、従来の検層方式に比べ容易で詳細な温度測定が期待される。本研究ではこのセンサに注目し、1) 検層装置としての有用性を確認する、2) 細かい温度プロファイルとその時間変化から坑井近傍の水理的性質を調べるの2点を目的にしている。

現在までに、1993年8月25日から27日にかけてNEDO坑井YT-1において予備的な測定を行った。この観測では、坑口から1550mの深さまで1m間隔の温度を約18分おきに23時間測定した。深度方向の温度分布は、約1.2°C/mの勾配で単調に増加し、坑井のストレーナ区間(1479m以深)でその勾配が緩やか(約0.03°C/m)になる。この傾向は、1992年12月20日にNEDOによって行われた従来の検層方式による測定結果と大差なく、両者の差は5°C以内である。一方、各深度における温度の経時変化は、最大で3°C程度の振幅をもって、ランダムな変動をしている。この変動は計器の回路に起因するノイズである。光の経路が長くなると信号がより微弱になるため、測定深度が深くなるに連れてその振幅は大きくなっている。そこで、5時間のウィンドウで移動平均を行いノイズを取り除いたところ、日周期的な変動が捉えられた。ストレーナ区間の直上1500m付近の約80mの区間では、測定を開始してから6時間後に温度が約1°C低下している。逆に、1000m以浅の区間では約1°C上昇している。そして、これらの変化は20時間後には元に戻っている。今回の測定結果を踏まえると、一見スタティックな状態にある坑井においてもわずかながら温度分布が変動していることを指摘できる。今後、測定条件を改善し精度を上げるとともに、より長期間の観測を行い、このような変動の原因を明らかにする予定である。

(地殻熱部)

Keywords : Optical fiber, Well logs, Temperature distribution

岩手県雫石町葛根田地熱地域で1984年に実施された反射法探査データの再解析を行った。ショット記録やCDP重合記録上で数-10数トレースにわたって連続する波群が認められ、本地域ではフラクチャーが存在するために連続性のよい反射面が期待できないことを考えると、これらの波群が反射波/反射面である可能性がある。反射法の形態で反射面を捉えるためには、反射波が連続的な1つの波群として記録上の多数のトレースにわたって現れることが必要である。本探査では受振点間隔が20m、発震点間隔が80mであり、対象とする反射面の連続する長さに対しては間隔が広すぎたと考えられる。上記の数-10数トレース程度の連続性を持つ波群について反射波であることを確認し、速度解析の精度を上げ、S/NのよいCDP重合断面を得るためには、5mないし10mといったより細かい受振点間隔、発震点間隔が必要である。

葛根田地熱地域の地質構造はNW-SEからNNW-SSE方向の褶曲軸を持つ1背斜1向斜で特徴づけられる。A測線とH測線はいずれも褶曲軸に低角度で斜交するために、各測線内では地質構造の変化を捉えにくいと思われる。500m離れた2測線間での地質構造の変化が期待されたが、CDP重合断面を見る限りでは、各断面での反射面の識別や両断面に共通する反射面の特定が難しく、地質構造の変化も不明である。地質構造の変化を確実に捉えるためには、測線は褶曲軸に直交する方向に配置するのがよい。震源・受振点配置をほぼ葛根田川に沿う道路に限定した場合、A、H測線に較べて標高変化がはるかに滑らかで表層補正が容易であること、作業効率が高く発震点、受振点を密に配置できることなどが有利で、短く続く波群が反射面であるかを確認できると思われる。一方、発電所施設、交通などによるノイズ、測線の曲がりによるCDPのばらつきなどが欠点となる。また、測線と褶曲軸は低角度で斜交するからA、H測線と同様に地質構造の変化は捉えにくいかもしれない。

(地殻物理部)

Keywords : Kakkonda geothermal area, seismic reflection survey, CDP stack, reflector

ボアホールテレビュアーとフラクチャー解析

伊藤久男

地下キ裂を検出・評価するために、坑井内イメージングツールによるフラクチャー解析を行っている。坑井内のイメージングツールとしてはボアホールテレビュアー(BHTV)、FMS/FMI、ボアホールテレビジョンなどがある。われわれはBHTVの耐温性の向上とデータのデジタル収録の開発を行ってきた。

これらのイメージングツールにより、坑井でのキ裂の直接観察を行い、キ裂の走向・傾斜・幅を決定することが可能になってきた。更にPTS検層あるいはハイドロフォンVSPなど他の坑井データと比較することにより、透水性キ裂の把握が可能になりつつある。山形県肘折地域でNEDOが高温岩体研究計画の一環として掘削した坑井でのBHTV測定では、PTS検層などで確認された透水性キ裂を検出することができた。ハイドロフォンVSPで観測されたチューブ波の解析から、透水性キ裂の検出とキ裂の透水係数の推定を行う際、坑井でのキ裂イメージングの結果を参照した解析が重要である。

また湯坪N2-YT-1、YT-2井でのBHTV測定の結果、ほぼ東西に熱応力によると思われる縦キ裂が観察された。熱応力が原因とすると、最大圧縮応力の方位は東西と推定される。

BHTVは超音波の坑壁からの反射強度と到達時間を計測する。到達時間から坑井の形状を知ることができる。肘折の坑井では著しい坑井の不安定が観測された。また坑壁での応力集中により、坑径の拡大がおこるブレイクアウトも観察された。この方位から最小水平応力の方向を推定した。

坑井内イメージングツールにより、フラクチャー解析のみならず、坑井の形状、坑井周辺の応力場の推定が可能になる。今後の課題としては(1)イメージングツールによる測定結果の坑井からの広がり、(2)フラクチャー分布モデルの作成、(3)ツールの耐温性、レゾリューションの向上などが考えられる。(地殻熱部)

Keywords : downhole measurements, fracture

デジタルジオフォンの開発について

伊藤久男*・榊原保人**・木口 努**
中尾信典*・大湊隆雄*

VSP、坑井間トモグラフィー及び自然地震観測用の坑井内3成分、マルチレベル地震計を開発した。

マルチレベルでの測定のため3個まで地震計(サテライトユニット)を接続し、坑井内でA/D変換し、デジタル方式により地上に信号を伝送する。サテライトユニットには3成分地震計、坑壁圧着用のアーム開閉機構が内蔵されている。サテライトユニット間の距離は最大100m程度離すことができる。各サテライトユニットからの信号はメインユニットで増幅、フィルター処理、A/D変換される。

地上装置はトリガーとアームの開閉制御を行うコントロールパネルとデータ集録を行う集録装置から構成される。

外部トリガー信号と内部トリガー信号の2種類がある。収録したデータについて、波形表示・プリントアウト・SEGY形式でのMT出力、ワークステーションへの転送を行うことができる。

現在までに、VSP測定あるいは長期間設置しての自然地震観測を行ってきた。(地殻熱部・**地殻物理部)

Keywords : downhole measurements, geophone

マルチオフセットハイドロフォンVSPによる透水性き裂の評価

木口 努*・伊藤久男**・榊原保人*
中尾信典**・大湊隆雄**

地熱資源の開発においては、貯留層を形成するき裂群の位置・卓越する方向・密度などを把握することが必要であり、特に、き裂の透水性は地下流体の挙動に直接影響を与える重要な要素である。坑井を用いて透水性き裂を検出・評価する方法として、ハイドロフォンVSPで観測されるチューブ波を利用することを試みた。

解析の原理を説明する。震源から発生した実体波が坑井を横切る透水性き裂に入射すると、き裂は振動しき裂内に含まれる水が坑井内に出される。坑井内に出された水によりチューブ波が励起され、チューブ波は透水性き裂の深度から上方及び下方に伝播する。透水性き裂の形状を平行平板とし、き裂の変位がP波の変位と同じと

するなどの仮定を行うことにより、チューブ波とそれを発生させた P 波の振幅比、P 波の周波数及びき裂の透水係数の関係を示す理論式が得られる(Beydoun *et al.*, 1985)。3 点以上のオフセット(震源位置)で発震した VSP 記録から、チューブ波と P 波の振幅比をある周波数について求め上の理論式を用いることにより、き裂の走向・傾斜角・透水係数が得られる。

NEDO が掘削した福島県飯館地区の坑井を用いてマルチオフセットハイドロフォン VSP を行った。震源位置は 3 箇所、震源には電気雷管を使用した。VSP 記録には初動 P 波から発生したチューブ波が観測された。その中で深度 83.25m から発生したチューブ波を選び解析した結果、83.25m のき裂は傾斜方位が南南東—南南西、傾斜角が約 20°、透水係数が 100—200md と求めた。この深度には BTV 検層により高角(傾斜方位北、傾斜角 78°)と低角(傾斜方位南東—南西、傾斜角 25—40°)の 2 種類のき裂が検出されているが、水圧破碎実験により低角のき裂ができたことなどから低角のき裂が透水性き裂である考えられており、これはハイドロフォン VSP の解析結果と調和する。

坑井を利用してき裂を検出するために、坑壁表面に現われるき裂を直接マッピングする BHTV や FMS などの検層が用いられているが、これら検層では透水性き裂とそうでないき裂を区別することが困難なことが多い。マルチオフセットハイドロフォン VSP を行うことにより、チューブ波の発生深度から透水性き裂を検出し、チューブ波と P 波の振幅を解析することからそのき裂の走向・傾斜角・透水係数が得られる。

(*地殻物理部・**地殻熱部)

Keywords : fracture, permeability, hydrophone VSP

VSP 法による P 波、S 波速度から 推定したき裂パラメータ

乘原保人*・伊藤久男**・大湊隆雄**
中尾信典**・木口 努*

断裂型貯留層の評価では貯留層内のき裂の空間分布、方向、密度、サイズ分布を求めることが重要となる。ここでは P 速度が 5km/s 以上の硬岩で構成される田沢湖地域の坑井(GF-2)と、速度 3km/s 以下の軟岩で構成される丹那地域の坑井(TN-2S)で行った各種検層や S 波の偏向異方性測定、ゼロオフセット VSP 法による P 波、S 波速度の精密測定から得られたき裂パラメータに関す

る知見を紹介する。

ボアホールテレビュアー(BHTV)による検層結果では、GF-2 では付近の応力場と調和的に選択配向した明瞭なき裂が約 270 個数えられたが、TN-2S ではき裂はほとんど観察できなかった。BHTV で観察できるき裂の厚さは約 1cm 以上であり、仮にき裂のアスペクト比を 10^{-4} とすると厚さ 1cm のき裂のサイズは 100m となる。すなわち GF-2 では、大きさ 100m オーダーのき裂が多数存在するが、TN-2S ではそのような大きなき裂は存在していないと考えられる。S 波 VSP による異方性測定結果は、GF-2 では異方性はみられず、逆に TN-2S では P 波速度の大きい溶岩層内で 20% 以上の S 波の偏向異方性がみられた。ここで用いた S 波の波長は 100m 以下である。TN-2S での異方性の形成にはこれよりも小さいき裂が関与しており、逆に GF-2 では、BHTV で観察された大きさ 100m 以上のき裂は異方性の形成には関与していないと考えられる。さらに GF-2 では P 波、S 波速度の精密測定から、用いた波長約 50m よりも小さいき裂密度の深度変化を推定した。その結果、BHTV で得られるき裂密度の深度変化と P 波、S 波速度から推定したき裂密度の深度変化の対応関係は得られなかった。

以上の測定結果をまとめると、GF-2 のような硬岩媒質においては大きさ数 10m 以上の大きなき裂が発達し、その走行はその地域の応力場と調和的である。この地域のマイクロクラックの走行は必ずしも応力場を反映せず、また深度分布に関して大きなき裂とマイクロクラックの密度に相関はない。TN-2S のような破碎の進んだ軟岩媒質においては大きさ数 10m 以上のき裂は発達していない。比較的 P 波速度の大きい地層内では大きさ数 10m 以下のき裂がある丹那断層にはほぼ平行な卓越方向をもって高密度で分布している。

(*地殻物理部・**地殻熱部)

Keywords : fracture, crack density, BHTV, VSP

震源近傍の不規則地形を利用した S 波の発生

大湊隆雄*・伊藤久男*・中尾信典*
乘原保人**・木口 努**

貯留層を形成する地下き裂の分布及びサイズなどのき裂パラメータを求めることが地熱貯留層探査において重要な役割を果たす。弾性波探査は地下のき裂を探る有効な手法の一つである。弾性波探査法においては P 波が用いられることが多いが、P 波と独立な物理量を得るた

めに、最近ではS波も盛んに用いられるようになってきている。また、広い周波数帯域の弾性波を用いることにより、地下キ裂のパラメータが推定できることが理論から期待されており、P波・S波はともに高周波を発生させる震源が求められている。ところが、P波ではダイナマイトやエアガンにより比較的容易に高周波を発生させることができるのに対して、高周波のS波を発生させることは難しい。板叩き法で発生するS波の周波数の上限は20Hz程度であるし、油圧インパクトを用いたS波震源でも卓越周波数はやはり20Hz程度である。

震源近傍に不均質構造がある場合、打撃型震源を用いてS波を発生させることができることが狐崎・奥住(1990)によって報告されている。我々はこれを、高周波S波震源として利用することを目的として基礎的な実験を行った。

実験は秋田県田沢湖町に掘削された坑井(GF-2)で行った。坑井周辺の敷地は北側と西側に急峻な崖があり、崖の近傍で発振することによりS波が発生することが期待された。2次元の数値計算の結果からも、P波と同程度の強度でS波が発生することが示された。震源として、発破孔での発振を用いた実験の結果、高周波のS波が十分な強度で発生することが確認された。得られたS波は、卓越周波数が50Hz程度であり、1989年に同坑井で板叩き震源を用いたときに得られたS波の卓越周波数(15-20Hz)を大きく上回った。これにより、S波の速度を従来より精密に測定することができた。一方、北と西の両崖の近傍で発振を行い、異なる振動方向のS波を発生させてS波の偏光異方性測定へ応用することを期待したが、いずれの場合もほぼ東西方向の振動が卓越していた。これは、S波発生が、北と西の崖それぞれに支配されているのではなく、更に大局的な周囲の地形に支配されていることを示唆している。

(*地殻熱部 **地殻物理部)

Keywords: S-wave source, High frequency, Nonuniform topography

地熱地域におけるS波偏向異方性

中尾信典*・大湊隆雄*・乗原保人**・伊藤久男*

S波の偏向異方性を利用した探査方法は、地下キ裂の情報、例えば走向や密度を推定するための有効な手法の一つとして考えられている。しかしながら、VSP法における測定仕様や、必要なパラメータを抽出するための

データ解析方法は、十分に確立しているとは言えない。また、S波偏向異方性が得られた場合、それがどのようなキ裂又は地層の影響で生じているのかを検層データなどと比較しモデルを構築する解釈についても研究すべき点が多いと考えられる。

大分県湯坪地区(地熱地域)で行われたS波VSPデータ取得では、震源としてS波パイブレータ(NEDO実施)を使用、震源のオフセット150m程度、S波を強調するための同一震源での左右発振をしていないことなど、これまで地質調査所が行ってきた田沢湖地区、丹那地区におけるデータ取得仕様とは、震源、オフセットなどの点で異なっている。本報告では本地区の解析例を取り上げ、これらのデータ取得仕様を考慮したデータ処理方法について検討した。まず、S波を強調するため、同一震源での左右発振をしていないことに替わる前処理としてFKフィルタを適用してS波を強調した。更に、アルフォード回転(Alford, 1986)による異方性解析を行った。その結果、異方性の方向はN45W-S45Eに推定されたが、回転後の非対角成分の振幅が小さくならないことなどの問題点があり、結果の信頼性には疑問が残る。今後の課題としては、アルフォード回転における解析ウィンドウの選択に関する検討や、ほかの解析方法による結果との比較検討などが必要と考えられる。

(*地殻熱部 **地殻物理部)

Keywords: S-wave polarization anisotropy, Alford rotation

断裂地域における調査方式の検討

横田俊之・大久保泰邦

丹那地域において実施された、重力・磁気・トモグラフィの三調査方法の結果により、断裂地域における調査方式の検討を行った。それぞれの調査方式における解析・解釈結果は、以下のとおりである。

重力基盤深度図によると、火山岩層は田代盆地では全域が沈降域となった。また、丹那盆地の中央部では断層の東側で隆起域、西側で沈降域、盆地北部では、断層東で沈降域、西側で隆起域となっている。

全磁力分布は、断層に沿った南北に延びた高異常が存在することを示す。磁気解析の結果、これは断層の西側に地表付近からかなり深部まで広がる、正帯磁の強い残留磁気を有する磁性岩体に起因したものであることがわかった。断層の東側の火山岩は、地層の傾動、風化、変質などによって残留磁化が相対的に小さくなったものと

解釈できる。

速度トモグラムによると、(1) TN1-S 近傍の、深度 170m から 270m 付近に存在する 2,800m/s 層が、水平方向に不連続であること。(2) 浅部の 1,800m/s 層の厚さが、TN1-S から離れるにつれ、30m から 100m へと急激に変化していること。(3) 330m 以深の高速度層の速度が、中央付近から減少していること。などにより断層の位置が推定できると考えられる。(地殻物理部)

Keywords : fault dominant area, gravity, magnetic, seismic tomography

ブートストラップ法によるトモグラフィー 最適モデルの決定と信頼性評価法

西澤 修*・野呂春文**・増田幸治***

トモグラフィーなど物理探査におけるインバージョン問題を解く場合には、モデルの逐次修正を行うことが多い。しかし、過度のモデル修正は細部構造を本来の分解能以上に描き出すため、偽像を生じたり物理的に不合理なイメージを与えたりする。そのため、モデル修正の繰り返し回数を客観的に決める必要がある。この目的のために情報量規準を使うことができる。モデルの逐次修正アルゴリズムでは最尤推定値が得られないので、情報量規準はブートストラップ法を用いて求める。簡単な室内実験のデータに対してこの手法の有効性を試した。岩石試料に水を注入し、試料内部の弾性波速度を分布を求めたところ、モデルの逐次修正の繰り返し回数を客観的に決めることができた。更に、ブートストラップサンプルから求めた各ブロックにおけるスローネス分布の期待値と分散から、偽像かどうかの判定やスローネスの決定精度などトモグラフィーイメージの信頼度を評価することができる。

(*地殻熱部・**地質情報センター・***環境地質部)

Keywords : tomography, bootstrap, statistics, information criterion, velocity structure

ボーリング・コアの断裂解析

水垣桂子

地下の断裂系に対するアプローチのひとつとして、地下(坑井内)断裂系と地表の断裂系の分布・特性を明らか

にし、両者を総合的に解析する手法を開発中である。坑井内断裂系の調査法には、コアの断裂を調べる方法と、検層機器を用いて坑壁の断裂を調べる方法がある。ここではコアの断裂解析を行うため、コア断裂データベースによる検索・作図ソフトウェアシステムを開発し、実際のコア試料に適用して断裂系解析を実施した。解析に使用したコアは地質調査所にオールコアが保管されていたもので、大分県玖珠郡九重町で 1976 年に掘削された WT-1 (700m)・WT-2 (701m)・WT-3 (804m) の 3 坑井のコアである。これらのコアについて個々の断裂を計測・記載し、コア断裂データベースを作成し、解析を行った。その結果、断裂密度と逸水・岩相との間にはある程度の相関が認められ、断裂密度が 3 本/m を超える断裂帯は逸水と対応する場合が多いこと、また断裂は一般に溶岩の部分に多くその一部はジョイントの可能性があることが明らかとなった。しかし断裂密度の深度・層位分布や断裂傾斜角度分布については 3 坑井の特徴がまったく異なるため、坑井間対比は困難であった。また条線のある断裂が少なかったため、断層に関しては詳細な解析ができなかった。熱水作用については、WT-1 では方解石脈、WT-2 では石英脈、WT-3 では断裂面の変質が特徴的であり、3 坑井とも断裂傾斜による偏りはなく、深部では沸石脈の出現することが共通であるが、それ以外には共通点がなかった。WT-3 では他の 2 坑井よりも熱水活動が不活発であったと推定されるが、それ以上の解析はできなかった。今回の解析対象とした 3 坑井の距離は 1.3—1.4km であるが、断裂解析結果の共通点が少なく十分な解析ができなかった。今後は、坑井間距離が近い地域のコアや、条線のある断裂の多いコアを用いて、更に解析を進める必要がある。(地殻熱部)

Keywords : drillcore-fracture, database, fracture system analysis

湯坪における水理テスト

中尾信典・矢野雄策・菊地恒夫
松島喜雄・石戸経士

大分県湯坪地区は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)が実施している「地熱探査技術等検証調査断裂型貯留層探査法開発」の適用実験フィールドであり、現在までに 2 本の 1700m 級実験用坑井掘削、種々の弾性波探査実験(トモグラフィ、VSP、反射法)が実施されている。その一環として、当地区の断裂系に関する水理

特性を把握することを目的とし、掘削及びストレーナ設置直後に各坑井で注水テストが実施された。更に1993年9月には、坑井内圧力・温度観測装置、坑内水位測定装置、及び気温/気圧計を地質調査所が提供し、2坑井を用いた長期注水(7日間)による圧力干渉テストが実施された。地質調査所では、NEDOによるこれらの圧力遷移テスト・データの再解析・評価としてインバージョン解析による水理パラメータの推定を行い以下の結果を得た。

(1) N2-YT-1

フォールオフのインバージョン解析の結果、 kh (浸透率と層厚の積; Darcy-m) = 0.04程度となる。これは片対数プロットの勾配から求めた値(従来の解析方法)と整合する。ただし、 kh 以外のパラメータについては不定性が大きい。

(2) N3-YT-2

本坑井では1992年2月と1993年9月の2回フォールオフが測定されている。1回目のデータでは途中で圧力勾配の変化が生じており、フォールオフデータ全体の信

頼性には疑問が残る。勾配が変化する前の圧力遷移についてインバージョン解析を行うと、収束は2つのパラメータセットで起き、1つでは $kh=0.12$ で、この値は93年9月のデータの解析結果と同程度となる。もう1つは $kh=0.04$ とかなり小さい値を取る。この2つのパラメータセットではスキンの正負逆転しているのが特徴である。

(3) N3-YT-2 への注水による N2-YT-1 の圧力干渉

圧力干渉データの形状に注水以外のノイズが含まれている可能性があり、精密な解析は困難であるが、 kh は1-3程度と求められ、単独井の解析結果より1桁大きい値となる。一般に地熱井の圧力遷移データ解析においては、単独井の結果よりも圧力干渉データの解析による kh が大きく求められることが多い。これは単独井を切るフラクチャーと比較し、流体流動に関与したフラクチャーが2つの坑井の間に多数存在するためと考えられ、今回の解析結果はこのような現象と調和的である。

(地殻熱部)

Keywords : Pressure transient, Pressure interference