

産総研新居浜黒島観測点の孔井内透水性亀裂の方向と応力場の関係について

Orientations of permeable fractures in borehole and their relation to in-situ stress at AIST observation borehole in Niihama, southwestern Japan

木口 努¹・桑原保人¹

Tsutomu Kiguchi¹ and Yasuto Kuwahara¹

¹ 活断層・火山研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, kiguchi.t@aist.go.jp)

Abstract: We have examined a relation between the orientations of permeable fractures and the state of in-situ stress by combining various kinds of borehole measurements conducted during drilling three boreholes at AIST observation station in Niihama, Ehime Prefecture, southwestern Japan in order to better understand the condition that control the existence of permeable fractures at hard rock site. We detected the depths of permeable fractures intersecting the borehole by using data of hydrophone VSP, sonic logging and fluid electric conductivity logging. The orientations of permeable fractures at 18 depths were determined from the borehole wall images obtained by borehole televiewer (BHTV). The orientations of permeable fractures are not localized in any direction but rather dispersed, having no correlation with the current stress field estimated from hydraulic fracturing technique. It is noted that for all 3,893 fractures, including non-permeable ones, detected from BHTV images, the strikes of the fractures show a tendency to concentrate around ENE-WSW, almost perpendicular to the orientation of maximum horizontal compressive stress, although the reason is unclear.

キーワード:透水性亀裂, 応力場, ハイドロフォン VSP, 速度検層, 電気伝導度検層, ボアホールテレビュア, 水圧破砕法

Keyword: permeable fracture, in-situ state of stress, hydrophone VSP, sonic logging, fluid electric conductivity logging, borehole televiewer, hydraulic fracturing technique

1. はじめに

地下亀裂に関してその向きや透水性などの存在形態は、石油・天然ガスや地熱資源の開発、放射性廃棄物の地層処分の可能性評価など、様々な地下利用に関わる研究分野で研究されている（例えば、Zoback, 1999; Vidal *et al.*, 2017）。この中で結晶質岩などの硬岩に分類される岩盤では、一般に、多数の亀裂が存在するが、その中で高い透水性を示す亀裂はごくわずかであり、第2章で示すように、どのような条件で高い透水性をもつ亀裂が存在するのかについて多くの研究がある。

産業技術総合研究所は、2006年から2013年にかけて愛知県から紀伊半島及び四国周辺の16地点において、地下水位・地殻歪・地震の観測を行うための地下水等総合観測点を整備した。整備においては、これら観測を行うための基礎データを得るため、各地点の孔井で物理検層や応力測定なども実施している。特に整備後に地下水位を適切に観測できるように、帯水層の深度区間に約10m長のストレーナ（スリットの入ったケーシング）を設置する必要がある、孔井内の透水性を評価するための孔井内測定が各種実施されている。これらの測定結果を利用し、孔井

内の透水性亀裂の分布や特性などを明らかにすることができれば、今後、地下水や地殻変動の観測結果への影響や地下に関わる研究分野に必要な高い透水性の亀裂の存在条件についても重要な知見が得られるものと期待できる。

産総研の各観測点での物理検層や応力測定などの孔井内測定項目・仕様などは地質条件や掘削状況などにより異なっているが、愛媛県新居浜市の観測点では、透水性亀裂を検出して亀裂の向きを求めるためのハイドロフォンVSPと多項目の物理検層が実施され、さらに応力場を求めるための水圧破砕法が複数の深度で行われ、各種データが最も充実した観測点の1つである。また、本観測点は2013年に設置された最も新しい観測点の1つでもあることから、水圧破砕法の機器の改良 (Ito *et al.*, 2010)、物理検層のボアホールテレビュア (BHTV) の低周波数対応型の導入や掘削泥水中の電気伝導度検層時の手順などの技術的な改良が進み、得られたデータの信頼性が高いと考えている。これらのことから、16地点のうち新居浜黒島観測点を選び、亀裂の向きや応力場との関係などについて整理することとした。

2. 高い透水性を説明する3つの亀裂モデル

高い透水性を持つ亀裂の存在について、地下で亀裂が開口幅を保って存在することを説明するいくつかのモデルが提案されており、本章では、応力場と関係付けた2つのモデルと、関係しないとするモデルの合計3つのモデルに分類し説明する。

まず、原位置の応力場と亀裂の向きを直接関係付ける亀裂モデルとして、引張り型亀裂とせん断型亀裂のモデルがある。岩盤中に多数存在する亀裂は様々な方向を持つが、引張り型亀裂はその面の法線方向が最小主応力の方向に近い方向に存在し、せん断型亀裂はその向きが亀裂面に作用するせん断応力が極大となる方向に存在するとするものである。引張り型亀裂モデルでは、数値計算や岩石実験により、亀裂の透水性は亀裂面への法線応力の大きさと逆相関を示す（例えば、Pyrak-Nolte and Morris, 2000; Öhman *et al.*, 2005）。一方、せん断型亀裂モデルでは、せん断すべりによって2つの亀裂面の凸点が互いに重なり合い、亀裂開口幅が増加し、そのまま開口性が維持されることが示されている（Yeo *et al.*, 1998; Olsson and Barton, 2001）。あるいは、せん断破壊により亀裂内の充填物が破壊され亀裂の透水性が高くなることが予想される（Olsen *et al.*, 1998）。

引張り型亀裂モデルが適用可能な事例として、石油開発地域の孔井データを用いた Heffer and Lean (1993) や地層処分候補地を対象とした Mattila and Tammisto (2012) などがある。Heffer and Lean (1993) は、世界各国の80の石油開発地域において、地殻応力場が正断層型または横ずれ断層型の応力場の石油貯留層中で、流体の流れの方向が最大水平圧縮応力の方向と調和的であることを示した。逆断層型応力場においても、Mattila and Tammisto (2012) はフィンランドの地層処分候補地で掘削した深度800 m 孔井のデータを用いて、様々な向きを持つ亀裂面に作用する法線応力の相対的な大きさを評価する Dilation Tendency (Ferrill *et al.*, 1999) を計算することにより、透水性の高い亀裂の向きは引張り型亀裂モデルに対応することを示した。

せん断型亀裂モデルの適用例としては、3次元モーダルダイアグラムを用いて評価した Barton *et al.* (1995)、地層処分研究用孔井を対象とした Rogers (2003) や地熱開発地域を対象とした Davatzes and Hickman (2009) などがある。Barton *et al.* (1995) は、亀裂面に作用する法線応力 S_n とせん断応力 τ を3次元モーダルダイアグラムに表示し、クーロンの破壊基準を用いて、せん断破壊を起こしやすい亀裂の分類を試みた。室内での摩擦強度の試験 (Byerlee, 1978) の結果から、 $0.6 \leq \tau/S_n \leq 1.0$ となる亀裂面は、与えられた応力場においてせん断破壊（摩擦破壊）を起こしやすいと考えられる。従って、Barton *et al.* (1995) は、ある応力場で τ/S_n が0.6以上となる

向きの亀裂を、臨界応力状態 (critically stressed fracture) にあると分類し、高い透水性を持つことが期待できるとした。実際に、科学掘削などの3つの地点の深さ2~3 kmの孔井データを用いて、3次元モーダルダイアグラムから臨界応力状態にあるとして分類した亀裂は、高い透水性を持つ亀裂とよく対応した。Rogers (2003) は、イギリスの地層処分研究用の孔井で求めた透水性亀裂の走向の卓越方向が全ての亀裂についての走向の傾向とは異なり、また、透水性亀裂の走向が横ずれ断層型の応力場においてせん断破壊を起こしやすい向きと一致することから、この孔井の透水性亀裂はせん断型に対応するとした。Davatzes and Hickman (2009) は米国ネバダ州の高温岩体地熱開発地域において、この周辺の活断層が正断層型であるという情報から正断層型の応力場を仮定して、臨界応力状態に相当する亀裂の向きの領域と複数の深度区間から求めた透水性亀裂の向きの分布が重なることから、透水性亀裂はせん断型であると判断した。Rogers (2003) や Davatzes and Hickman (2009) は、様々な向きを持つ亀裂面においてせん断破壊を起こしやすい傾向を数値化する Slip Tendency (Morris *et al.*, 1996) を用いており、せん断型亀裂モデルを評価する上で Slip Tendency は有効と思われる。

一方、現在の応力場とは関係しない向きの透水性亀裂の存在を示す例もある。Laubach *et al.* (2004) は、現在の応力場とは関係しない向きの透水性亀裂の事例を示し、一度生成された開口性亀裂の開口部に鉱物が沈殿することにより、現在の応力場とは関係しない向きの亀裂の開口性が維持されることで高い透水性を示す亀裂モデルを考えた。亀裂内で沈殿した鉱物などが亀裂の開口を支えることにより保持され、現在の応力場との相関性は不必要であるとしている。

以上、透水性亀裂の向きと応力場の関係については様々な可能性が想定され、何が亀裂の向きを決めるのかを見出すことは難しく、さらなる研究が必要な状況と考えられる。

3. 新居浜黒島観測点

第1章で説明したように産業技術総合研究所では、南海トラフで発生する巨大地震に関連する地下水位変化・地殻変動・地震活動などの研究を進めることで地震発生の予測精度の向上を図ることを目的とし、愛知県から紀伊半島及び四国周辺において多項目の観測が可能な地下水等総合観測点の整備を順次行ない、2006年から2013年までに16地点を構築した（小泉ほか, 2009; Itaba *et al.*, 2010; 小泉, 2013）。愛媛県新居浜市北東部の黒島海浜公園内に位置する新居浜黒島観測点（以後、本稿では新居浜観測点と呼ぶ）は16の観測点の1つであり、2013年1月に完成した。第1図に新居浜観測点の位置を地質図上に赤丸で示す。観測点の座標（世界測地系）と標高は、それぞれ、

33.9904N, 133.3423E, 9 m である。観測点は中央構造線の石鎚山脈北縁区間（岡村断層）の北約 7 km の領家帯に位置し、海岸線からおおよそ 100 m 離れている。地質図に示されるように地表に花崗閃緑岩が露出し、孔井から回収したコアは領家深成岩類及び領家変成岩類が卓越している（佐藤ほか, 2014）。

新居浜観測点は他の観測点と同様に 3 つの鉛直孔井が掘削された。孔 1, 孔 2, 孔 3 の掘削深度は、それぞれ、570 m, 212 m, 51 m である。3 つの孔井で実施した物理検層の種目、測定深度や機器の型式と仕様などの詳細は、木口ほか（2014）が取りまとめている。また、佐藤ほか（2018）も、掘削と物理検層の仕様などについて説明している。

4. 水圧破碎法による応力場の推定

新居浜観測点の原位置で地殻応力を測定するために、佐藤ほか（2013）は孔 1 と 2 の 2 つの孔井の HQ サイズ（ビット外径：約 98 mm）のコアリングの掘削後に水圧破碎法（例えば、Bredehoeft *et al.*, 1976; Haimson and Cornet, 2003）を実施した。測定方法、応力値を求めるためのデータ処理と計算方法、得られた結果などの詳細は、佐藤ほか（2018）にまとめられている。

新居浜観測点で適用した水圧破碎法は、基本的には Ito *et al.* (2006) と伊藤 (2004) の方法によった。まず測定装置において、孔内装置の上部に試験区間に送水するためのタンクを搭載し、孔内装置の内部に測定区間を加圧するためのポンプと流量計を設置することにより加圧系システム内の水の体積を小さくしてシステムの剛性を高める改良がされている。Ito *et al.* (2006) が指摘するように、最大水平圧縮応力を正しく評価するためには測定区間内の圧力変化の測定から得られる亀裂再開口圧を精度よく推定することが必要であり、この改良はその実現を図ったものである。また、最大主応力 SH を求めるために、岩石の引張り強度と水圧破碎で得られる破碎圧を用いる計算式が従来から用いられているが、原位置の引張り強度を正しく評価することは一般に容易でない。従って、亀裂再開口圧を用いる下記の式（伊藤, 2004）から SH を求めた。

$$SH = 3 \cdot Sh - 2 \cdot Pr \quad (1)$$

なお、Sh は最小主応力、Pr は亀裂再開口圧である。また、水圧破碎法により応力値を求める際に、3 つの主応力のうち 1 つの主応力の方向が孔井軸と一致すると仮定する。

水圧破碎は孔 1 と 2 で合計 11 深度で実施された。このうち 1 深度（孔 1 の深度 400.6 m）では亀裂は生成したが、測定時に使用するパッカーが破損したため応力方位だけが求められた（佐藤ほか, 2018）。亀裂認定のための型撮りパッカーにより確認された、水圧破碎で生成された縦型の亀裂の例を第 2 図 (a)

～(c) に示す。水圧破碎法では理論的に 2 つの縦型の亀裂が孔壁の 180 度離れた方向に生成されることになるが、第 2 図のように理論と整合する縦型の亀裂を確認することができる。

佐藤ほか（2018）が求めた最大及び最小水平圧縮応力の値と最大水平圧縮応力の方位の結果を用いて、応力値と応力方位の深度方向の分布をそれぞれ、第 3 図 (a) と (b) に示す。水圧破碎法で生成された縦亀裂がやや不明瞭であった深度が含まれるため、縦亀裂が明瞭であった深度の値は図中に * 印付きで示す。(b) 図に示す 11 深度の最大水平圧縮応力の方位は、北から北西方向の範囲に分布している。11 深度の方位を平均すると N19.7W（図中の黒色破線）である。

佐藤ほか（2018）によると、深度 19～480 m の範囲から採取した 9 個のコアの岩石試験から求めた密度は 2.59～2.74g/cm³ であり、その平均値 2.67g/cm³ を用いて鉛直応力を推定した。この鉛直応力を第 3 図 (a) の黒色実線で示す。また、図中に、10 深度で求めた最大及び最小水平圧縮応力の値を直線で近似して求めた深度－応力の関係を示す。それぞれの傾きは、0.073 MPa/m, 0.038 MPa/m である。(a) 図に示すように得られた新居浜観測点の応力場は、最小水平圧縮応力の大きさが鉛直応力よりも大きくなる逆断層型である。ただし、深度 312 m 以浅では、最小水平圧縮応力のデータは鉛直応力に近い値となっており、横ずれ断層型の応力場に近くなっている。なお、今回用いた 10 深度の測定結果の代わりに、水圧破碎法で生成された縦亀裂がやや不明瞭であった 4 深度を除いた 6 深度について応力値と応力方位の平均値を同様に求めたが、応力場は全データを用いた場合と同様、逆断層型で北北西－南南東の最大水平圧縮応力方位であった。

5. 透水性亀裂の検出

新居浜観測点では孔井を横切る透水性の亀裂や破碎帯を検出するための物理探査手法として、ハイドロフォン VSP、物理検層の速度検層（ソニック検層）と電気伝導度検層の 3 つの手法を、HQ サイズのコアリングの掘削後に適用した。孔 1, 2, 3 の HQ コアリングの深度は、それぞれ、200～570 m, 40～212 m, 0～51 m であるので、3 つの孔井を合わせることで、地表から深度 570 m までのデータを連続的に取得したことになる。なお、ハイドロフォン VSP は孔 1 と 2 のみで実施した。

ハイドロフォン VSP は、地表付近に震源を配置し、震源から発震した弾性波を孔井内に配置した受振器のハイドロフォンにより記録する探査形態である。孔井内を横切る透水性亀裂が存在すると、入射する初動 P 波によりその深度からチューブ波と呼ばれる境界波が発生し、その深度から孔井に沿って上方及

び下方へ伝播する。初動P波からチューブ波が発生する深度を求めることによって、透水性亀裂が存在する深度を求めることができる (Beydoun *et al.*, 1985; Kiguchi *et al.*, 2001)。本観測点のハイドロフォンVSPで観測されたチューブ波の周波数は10~100 Hzのオーダーであり、速度検層で得られる波と比べると1~2桁小さいため空間分解能が低くなる。またVSPの測定深度間隔は1 m間隔で、物理検層は10 cm間隔で測定するため、VSPでは物理検層よりも深度方向の分解能が低下する。

速度検層は、孔内機器の震源から発生した波動が、孔壁や地層を伝播した後に複数の受振器で記録される物理検層である。地層を伝播するP波やS波の速度が得られるが、境界波であるストーンレー波も収録可能である。ストーンレー波は孔井を横切る透水性亀裂が存在すると、その深度で反射・減衰・速度低下などを示す。これらの特徴を示す波形を検出することから、透水性亀裂の深度が得られる (Winkler *et al.*, 1989; Tang *et al.*, 1991; Kumar *et al.*, 2008)。

透水性亀裂を検出するための電気伝導度検層は、原則として、孔内水を地下水の電気伝導度と異なる水 (例えば、脱イオン水) に置換した後、揚水して孔内水位を下げ、孔内水の電気伝導度を孔井に沿って測定する。地層水が亀裂を通じて孔井内へ流入する深度を電気伝導度の変化から求めることができる。一般に、同一孔井で繰り返し測定し、経時的な電気伝導度の変化の再現性あるいは地層水の拡散の過程などを確認する。測定手法の原理や適用事例は、Tsang *et al.* (1990), Doughty *et al.* (2008) などに説明されている。新居浜観測点の孔1と2ではケーシングが無い裸孔区間での孔壁崩壊を防止するための安全を優先させたため、孔内水を脱イオン水などに置換せず比重が1.05~1.11g/cm³の掘削用泥水のままの測定となった。泥水中での測定は、比重が重い泥水の影響で孔井内の圧力が高くなるため地層水が透水性亀裂から孔井内へ流入しにくくなることと、泥水の電気伝導度は地層水との差が小さいことなどから、高い信頼性で透水性亀裂の深度を求めることが困難な条件であった。なお、掘削深度が浅い孔3では孔壁崩壊の危険性が低いため、脱イオン水に置換した後に測定した。

上記3手法の中で、電気伝導度検層は地層水の流入深度を直接検出することから、当初、新居浜観測点において透水性亀裂を高い信頼性で検出できることを期待した。第4図(a)~(d)に、孔1, 2, 3で測定した電気伝導度の結果を示す。各グラフで繰り返し測定したデータを色分けして示している。繰り返し測定する時にポンプで揚水し孔内水位を順次低下させ、地層水が孔内に流入しやすくなる孔内圧力状態へと変化させたので、繰り返し測定の後半では前半で見られなかった地層水の流入による変化が見られる傾向がある。揚水によって孔内の水位を、孔

1では管頭まで満水の状態から測定ごとに約10~20 mずつ低下させ5回目では58 mまで低下させた。孔2はポンプで揚水しながら連続的に水位を低下させる中で測定を行い、管頭から最大約20 m低下させた。孔3では測定ごとに水位を管頭から最大12 mまで順次低下させた。孔1では5回目に測定した時の電気伝導度が非常に高くなったため、電気伝導度の低い値の範囲を拡大した図を(b)図に示す。新居浜観測点は海岸に約100 mの距離で隣接しているため、この高い電気伝導度は海水の成分を含む地層水の流入によるものと考えられる。

第4図(d)に示す孔3の電気伝導度のグラフにおいて、脱イオン水に置換した直後で水位が管頭付近にある1回目の測定では全体に低い電気伝導度を示すが、水位を7 m低下させた2回目の測定で33.4 mと35.2 mの2つの深度でピークを示し電気伝導度が高くなる変化が見られる。このことからこの2つの深度から地層水が流入していることがわかる。また3回目と4回目の測定においても同じ深度で電気伝導度に変化し、地層水の流入が継続していることが確認できる。なお、3,4回目の測定で孔底から高い電気伝導度の地層水が流入し上部へ拡散するように見えるが、孔底に透水性亀裂が存在するとしてもその形状などを孔壁画像で確認できないため、透水性亀裂の深度として求めなかった。

一方、泥水中で測定した孔1と2の電気伝導度は、孔3のデータに比べると、原因は明らかでないが以下の特徴が認められる。1) 例えば第4図(a), (b)に示す孔1の5回目の測定での深度210~230 m区間に見られるような深度方向に短波長で大きな振幅でパルス状に変化する深度区間があり、地層水の流入による変化と区別することが困難な場合が多い。2) 繰り返し測定のデータを用いても、ある深度における変化の再現性を確認できない場合が多い。3) 高周波の変動がほぼ全深度にありノイズレベルが高い。これらの特徴のために、全深度を通じて高い信頼性で透水性亀裂の深度を高分解能で求めることはできなかったが、孔井全体を対象とする巨視的な電気伝導度の変化として、孔1では3回目と4回目の測定から約200~210 m、4回目の測定から約275~290 mと約325~335 mの付近で有意な変化を示し、5回目の測定でもこれらの深度付近や360 m付近などで電気伝導度の変化が見られる。深度400 m以深では全ての繰り返し測定において変化が見られないが、後述するようにハイドロフォンVSPと速度検層により400 m以深にも透水性亀裂が存在することがわかっている。電気伝導度の変化がなかった原因として、深部では泥水の比重による孔内圧力が高くなる効果が大きいために地層水が流入できなかった可能性が高い。孔2では4回目と5回目の測定で、約80~85 m, 130~150 m, 165~175 m付近で電気伝導度が大きな変化を示す。これらの深度区間に透水性亀

裂が存在すると考えられる。

次に、孔1と2では、ハイドロフォンVSPと速度検層のデータを用いて透水性亀裂の深度の検出を行った。ハイドロフォンVSPの記録では、いくつかの深度において初動P波からチューブ波が発生し、水中の音波速度に近い速度で上方及び下方に伝播することが明瞭に確認することができた。また速度検層の記録でも、ストーンレー波が反射と減衰を顕著に示す深度を検出することができ、透水性亀裂の深度が得られた。孔1と2のハイドロフォンVSPと速度検層の記録、及びそれらから求めた透水性亀裂の深度を、それぞれ第5図(a)と(b)に示す。速度検層については受振波形のVDL(Variable Density Log)表示と周波数スペクトラムを併記し、また、図中に電気伝導度検層のグラフ(第4図(a),(c))を挿入している。ハイドロフォンVSP記録の横軸は時間である。赤い矢印はそれぞれの手法により求めた透水性亀裂の深度である。2つの手法から求めた深度を比較すると、速度検層の方がハイドロフォンVSPよりも多くの深度を検出しているが、概ね、ハイドロフォンVSPで求めた深度は速度検層でも検出している。ハイドロフォンVSPは深度1m間隔で測定しているため、その程度の深度誤差を含むとすると、VSPで求めた透水性亀裂の深度は速度検層で求めた深度と概ね対応していると言える。速度検層の方が多くの深度を検出した原因としては、より高周波での測定のため、VSPよりも敏感な変化を捉え、深度の検出に影響を与えた可能性が考えられる。本論文では、2つの手法により同時に確認された場合にその深度に透水性亀裂が存在するとして、次章で説明するようにBHTVの画像から透水性亀裂の向きを決定することを試みた。孔1と2では速度検層とVSPの両方で検出された透水性亀裂が存在する深度を第1表に示す。表の深度は速度検層で求めた深度で代表している。なお、ハイドロフォンVSPで求めた孔1の深度296.0mの近傍で速度検層により295.7mと297.0mの2つの深度を求めており、VSPの深度分解能では2つの深度を有意に区別することは困難であるため、2つの深度を表に記載した。また、孔3で電気伝導度検層により求めた2つの深度も第1表に示す。検層ではある程度の幅を持つ深度区間で異常を示すため、第1表の深度はその深度区間の中心深度を意味する。なお、速度検層とハイドロフォンVSPから求めた孔1と2の深度について、第4図に示す電気伝導度検層のデータで電気伝導度の変化が示されるかについて確認すると、孔2の深度85.0m, 138.2m, 172.0mと孔1の深度277.3m, 329.7m, 360.4mにおいて、電気伝導度の比較的顕著な変化が見られた。

速度検層と電気伝導度検層にキャリパー検層とBHTVのデータを含めた、孔1, 2, 3の総合検層図をそれぞれ第6図(a), (b), (c)に示す。BHTVの装

置や得られる孔壁画像の特徴などについては次章で説明する。第6図の各図において、キャリパー検層による孔径の拡大及び速度検層による速度低下と減衰を示し、BHTV画像では周囲よりも暗色で表示されるいくつかの深度区間があるが、これらの区間は亀裂が密集し孔壁の一部が崩れるなど孔径が拡大する破碎帯が数m連続していることが推測できる。これらの深度では電気伝導度が顕著な変化を示すことを確認できる場合があるため、破碎帯やそれを構成する亀裂が高い透水性と関係する可能性があると考えられる。

ハイドロフォンVSPと速度検層においてチューブ波の発生やストーンレー波の反射の原因は、透水性亀裂の存在だけでなく、孔径の変化による影響が含まれる可能性がある。ハイドロフォンVSPでのチューブ波の発生への孔径変化の影響をVSPとキャリパー検層のデータから考察した木口ほか(1996)では、深度1m区間中の孔径変化の平均勾配が約0.8%を示す深度ではチューブ波は発生していないことが示され、これより小さい平均勾配で孔径が変化する深度で発生するチューブ波は透水性亀裂によるものとしている。これと同様に考えると、第6図のキャリパー検層の結果から本観測点でチューブ波が発生しない深度で最も大きな平均勾配を示すのは孔1の深度263mの1.6%(孔径変化で16mmに相当)である。孔径の平均勾配がこれよりも大きく変化する孔1の深度329.7m, 434mと孔2の85mでは発生するチューブ波に孔径変化による影響が含まれる可能性があるが、それ以外の深度で発生するチューブ波は透水性亀裂によるものと推定できる。

なお、3孔井のストレーナの設置深度について、本章で説明した3手法の測定の結果などを用いて、孔1では280.1~291.1m, 孔2では79.4~90.4m, 孔3では25.6~36.5mと決められた。孔1のストレーナ深度を決定するときには、電気伝導度検層により判明した、海水成分が混入したと考えられる非常に高い電気伝導度の地層水が流入した深度を避けることも考慮された。また、ハイドロフォンVSPや物理検層の実施時に湧水は見られなかったことから本観測点の間隙水圧は高くはないと考えられる。

6. 透水性亀裂の向きの決定

第5章で説明した方法で求めた深度において、BHTVの孔壁画像を用いてその深度に存在する透水性亀裂の傾斜方位と傾斜角を求める。BHTVは、孔内装置内からMHzオーダーの超音波を放射して、孔壁からの反射波を記録する(Zemanek *et al.*, 1970)。孔壁を超音波でスキャンするように、孔内装置を360度回転しながら深度を移動してデータを取得するため、反射波の走時と振幅の2種類のデータを用いて、孔壁全周の画像を得ることができる。孔壁を

横切る亀裂が存在すると周囲の孔壁面と物性が異なるため反射波の振幅は変化し、また、開口性の亀裂の場合には開口部における反射点は孔壁面よりも奥にあるため走時遅れの異常が生じる。傾斜した亀裂があると、画像中にはサインカーブとして現れるので、そのカーブの形状から亀裂の傾斜方位と傾斜角を求めることができる。新居浜観測点のBHTVの画像を見ると、ほぼ全深度で、様々な向きの亀裂が存在する。また、画像上の亀裂には、亀裂の幅、亀裂形状の連続性などにおいて様々な特徴が見られ、走時の画像から開口性が認められる亀裂は全体のごく一部だけであった。3孔井のBHTV画像から検出した全ての亀裂は3,893個であった。

第1表に示す19の全ての深度において、ハイドロフォンVSPや検層により約1mから数m程度の幅を持った区間で異常を示すため、本章では異常を示す区間として透水ゾーンと呼ぶこととする。各透水ゾーンの深度付近ではBHTV画像において密に亀裂が認定される傾向があるので、特定の亀裂を透水性亀裂として選定することが全体的に難しい。このため、各深度の透水ゾーンにおいて透水性亀裂の向きを決めるために以下の方針とした。1) 透水ゾーンの深度付近の亀裂の中に開口性を示す明瞭な亀裂が1つ存在する場合は、その亀裂を透水性亀裂として、その向きを求めた。2) 透水ゾーンの付近で開口性を示す明瞭な亀裂が複数認定できる場合には複数の亀裂を選び、それらの向きで代表した。3) 個々の亀裂の形状が不明瞭な破砕帯があり、破砕帯の境界の形状が明瞭に読み取れる場合には、その境界の形状を用いて代表する向きとした。19の深度付近のBHTV画像から向きを求めた結果について、それぞれ第7図(a)~(r)を用いて説明する。BHTV画像から求めた亀裂については、亀裂形状の明瞭性と開口性を基準として目視により、形状及び開口性が明瞭な場合は赤、全体的に明瞭な形状を示すが開口性が部分的な場合は緑、形状は判別できるが開口性を示さない場合は青に区分し、第7図の各図の右から2番目と右端の列の図に示されている。青に区分した亀裂はやや不明瞭な形状であるが最も数が多く、3孔井で3,671個あり、赤と緑に区分した亀裂は、それぞれ56個と166個であった。右端の列のアロープロットでは、丸印の位置で亀裂の傾斜角の値を示し、線分の方角で傾斜方位を示す。また、速度検層(孔1と2)または電気伝導度検層(孔3)から読み取った異常区間である透水ゾーンの区間を黒色バーで示している。なお、孔1ではBHTV画像の破砕帯と速度検層による異常の深度を対比したところ、両者の深度が全深度を通じて約80cmずれている可能性が高いことが判明したため、ここでは孔1のBHTV画像の深度を80cm浅くして表示している。以下に各深度で求めた透水性亀裂の向きを個別に説明する。

(1) 孔3 33.4 m 付近 (第7図(a))

電気伝導度検層で明瞭な変化のピークを示す32~34mの透水ゾーン内には、32.3~33.9mの区間に破砕帯と考えられる異常が認められる。開口性を示す亀裂の形状は必ずしも明瞭ではない。ただし、破砕帯の下側境界の33.7mに比較的明瞭な形状がある。このため、この境界を透水ゾーンを代表する向きとした。

(2) 孔3 35.2 m 付近 (第7図(b))

電気伝導度検層で明瞭な変化のピークを示す34.2~36.2mの範囲には様々な向きを持つ亀裂が複数存在しているが、明瞭に開口性を示す亀裂の存在の判断は難しい。この深度を代表する透水性亀裂を定義しないこととした。

(3) 孔2 68.0 m 付近 (第7図(c))

速度検層で顕著な異常が見られる深度区間には一部開口性を示す明瞭な形状の高角の亀裂(図中緑色)が存在する。従って、この亀裂の向きでこの深度を代表した。

(4) 孔2 85.0 m 付近 (第7図(d))

深度84.6~85.3mには全体的に孔径が拡大する異常を示す破砕帯が存在し、速度検層で顕著な異常を示す深度区間とほぼ対応する。破砕帯内の亀裂の形状は不明瞭であるが、破砕帯下端(深度85.2m)の境界の連続性が良く(図中緑色)、この境界形状をこの透水ゾーンを代表する向きとした。

(5) 孔2 130.0 m 付近 (第7図(e))

速度検層で顕著な異常を示す深度付近には、傾斜角約60度で北西の走向の向きで開口性の亀裂(図中赤色)が2つ存在する。どちらかの1つの亀裂を決めることが困難で、ここでは深度128.5mと129.4mの2つの亀裂の向きでこの透水ゾーンを代表した。

(6) 孔2 138.2 m 付近 (第7図(f))

速度検層では137~139mの区間で顕著な異常となる。この深度範囲には、亀裂が密に存在する区間とその下側の亀裂が比較的少ない健岩部がある。この健岩部との境界である深度138.3mの形状(図中緑色)から代表する向きとした。

(7) 孔2 172.0 m 付近 (第7図(g))

速度検層で異常を示す深度区間の上部の171.0~171.8mの区間で開口性が一部認められるが、この区間では亀裂が密に重なり合うので、開口性の亀裂の形状や向きを選ぶことが困難である。この区間の下側の深度172.2mに緑色で示す明瞭な亀裂が存在するため、この亀裂の向きでこの深度を代表した。

(8) 孔1 204.4 m 付近 (第7図(h))

速度検層では203.8~204.8mの区間で異常を示す。この深度範囲内の204.5mに明瞭な開口性を示す亀裂(図中赤色)が存在する。この亀裂の向きでこの深度を代表した。

(9) 孔1 217.7 m 付近 (第7図(i))

速度検層で顕著な異常を示す深度区間(217.0~

218.2 m) の区間内に赤色で示す明瞭な開口性を示す亀裂が存在する。この亀裂でこの深度を代表する向きとした。

(10) 孔 1 277.3 m 付近 (第 7 図 (j))

速度検層で異常を示す深度区間のうち、特に顕著な異常を示す中央付近に、亀裂が密集し一部開口性を示す破砕帯がある。この破砕帯で特に明瞭な形状で開口性を示す深度 277.3 m の亀裂 (図中緑色) でこの破砕帯を代表する向きとした。

(11) 孔 1 295.7 m 付近及び 297.0 m 付近 (第 7 図 (k))

この深度付近では、295.1~296.2 m の区間とその下側の 296.4~297.4 m の区間の 2 つの深度区間で速度検層が隣接して顕著な異常を示す。2 つの区間からそれぞれ透水性亀裂の向きを求める。295.1~296.2 m の区間には赤色で示す明瞭な開口性を示す亀裂が 1 つ存在する。296.4~297.4 m の区間には緑色で示す一部開口性を示す 3 つの亀裂が存在する。これらの亀裂でそれぞれの深度を代表する向きとした。

(12) 孔 1 329.7.0 m 付近 (第 7 図 (l))

速度検層が異常を示す深度区間には、亀裂が密集し一部開口性を示す破砕帯が存在する。破砕帯中の亀裂の向きは同一ではないが、破砕帯の上端の明瞭な形状を示す境界 (図中赤色) と破砕帯の下部に位置する比較的明瞭で一部開口性を示す亀裂 (図中緑色) の 2 つが破砕帯中の亀裂の向きとして読み取れ、この 2 つの向きでこの深度を代表した。

(13) 孔 1 342.4 m 付近 (第 7 図 (m))

速度検層が異常を示す深度区間内 (341.6~343.0 m) に明瞭な開口性を示す亀裂 (図中赤色) が 1 つある。この亀裂の向きでこの深度を代表した。

(14) 孔 1 360.4 m 付近 (第 7 図 (n))

速度検層が異常を示す深度の付近に亀裂が密に存在する区間 (359.6~361.9 m) があり、亀裂の一部が開口性を示す。このうち特に明瞭な開口性を示す 3 つの亀裂 (図中緑色) をこの深度を代表する向きとした。

(15) 孔 1 433.7 m 付近 (第 7 図 (o))

深度 432.6 m から下に破砕帯が約 3 m 連続しており、速度検層で顕著な異常を示す透水ゾーンに概ね対応する。破砕帯内の亀裂を個々に判別することは困難であるが、破砕帯の上端の境界 (深度 433.0 m) が明瞭な連続性を示し、この境界形状から代表する向きとした。

(16) 孔 1 491.8 m 付近 (第 7 図 (p))

速度検層で異常を示す約 1 m の区間内に、亀裂が密に存在する約 70 cm の区間がある。それらの中に明瞭な開口性を示す亀裂が 3 個 (図中赤色) 存在する。3 つの亀裂の向きは異なり、この 3 つ亀裂の向きをそれぞれこの深度を代表する向きとした。

(17) 孔 1 511.7 m 付近 (第 7 図 (q))

速度検層では 511.0~513.2 m の区間で異常が見ら

れ、511 m 付近から下方に一部孔径が拡大する深度区間が存在する。その区間中に図中赤色で示す明瞭な開口性を示す高角の亀裂が存在する。この亀裂の向きでこの深度を代表した。

(18) 孔 1 523.0 m 付近 (第 7 図 (r))

速度検層で 523 m を中心とする約 3 m の区間で異常が見られる。その区間内に縦亀裂が続く深度があり、また様々な向きを持つ亀裂が密に存在する。その区間内で図中の赤と緑で示す 2 つの高角の亀裂は開口性を示す。この 2 つの亀裂の向きをこの深度の代表とした。

以上のように透水性亀裂の向きを求め、第 1 表に BHTV 画像から求めた透水性亀裂の深度、傾斜方位と傾斜角の値をまとめる。傾斜方位は、北から時計回りの角度で示す。第 5 章で求めた 1 つの深度において、複数の向きを求めた場合や向きを求めなかった場合が含まれる。各透水ゾーンでは亀裂が密に存在する傾向が見られ亀裂の形状が不明瞭な場合があることなどから、透水性亀裂を一意的に選ぶことが難しく、その向きの決定に曖昧さが残る深度もあると思われる。しかし、次章で説明するように透水ゾーンの向きと応力場の関係の大まかな関係を見る上では、十分に検討の価値はあると考えた。

7. 透水性亀裂の向きと応力場の関係

新居浜観測点の透水性亀裂の向きの傾向と比べるために、最初に、3 つの孔井の全ての亀裂の向きの分布において見られた特徴的な傾向を以下に説明する。BHTV で検出した全ての亀裂の向きの分布を第 8 図 (a), (b), (c) に示す。(a) 図は全ての亀裂 3,893 個の亀裂面の法線方向を下半球面に投影したものである。(b) 図はそのコンター図であり、(c) 図は亀裂の走向のローズダイアグラムである。水圧破砕法で求めた最大水平圧縮応力の平均方位 N19.7W を図中に赤色矢印で示す。第 8 図を見ると、全ての亀裂についての向きの特徴として、傾斜角は中~高角 (40~70 度) に多く分布し、走向は東北東-西南西に卓越している。このように傾斜角が 40 度以下の低角の亀裂が少なく、卓越する走向が最大水平圧縮応力の方位とほぼ直交することは、原因は必ずしも明らかではないが、興味深い結果と考える。なお、同じ亀裂幅を持つ高角と低角の亀裂では高角の亀裂の方が孔壁面で見かけ上の亀裂幅が大きくなるため、BHTV 画像から高角亀裂を検出しやすくなることと関係する可能性はあるかもしれない。

第 6 章で求めた 27 個の透水性亀裂の向きの分布を第 9 図 (a), (b), (c) に示す。これらの亀裂の傾斜角は全て 40 度以上であり、80 度以上の高角の傾斜角の亀裂もある。走向については、東北東-西南西の走向の亀裂の数がやや多いように見えるが全方位的に分布している。第 6 章で説明したように、ハイド

ロフォン VSP や検層により検出したそれぞれの深度において、複数の亀裂の向きを求めた場合があるため、各深度での透水性亀裂の向きの数は1~3個とばらつきがある。このため、各深度で求めた亀裂の向きの数の違いも考慮して孔井全体における亀裂の向きの傾向を評価できるように、各深度で求めた向きの数に応じて重み付けを行うこととした。例えば、深度 297.0 m では3つの向きを求めたので、それぞれの向きの重みを1/3とし、向きのヒストグラムを作成した。重み付けを行なった亀裂の走向のヒストグラムを第10図のローズダイアグラムに示す。この図を見ると、東北東-西南西や北北西-南南東の走向がやや多いが、全体としてばらつきが大きく特定の卓越方向があるとは言えないと考える。次に、透水性亀裂の走向の深度方向の分布を、水圧破碎法で求めた最大水平圧縮応力の方位と共に、第11図に示す。第11図を見ると、透水性亀裂の向きと深度の相関は明らかでなく、最大水平圧縮応力の方位の個々の測定データとの関係も認められない。第6章で説明したように透水性亀裂の向きを求める際に曖昧さが残る場合も含まれると思われるが、その曖昧さを考慮しても、多くの透水性亀裂の向きはばらつき、卓越する傾向が認められないことは変わらないと言えるようである。また、27個の透水性亀裂のうち、孔1, 2において電気伝導度検層でも比較的顕著な変化を示した6深度の合計9個の透水性亀裂の向きを図中に*印付きで示す。その9個だけを見ても走向は全方位的に分布している。さらに、第2章で説明した引張り型とせん断型の亀裂モデルと本観測点の透水性亀裂との対応については、水圧破碎法から得られた逆断層型で最大水平圧縮応力方位が北北西となる応力場を仮定すると、引張り型亀裂モデルとせん断型亀裂モデルで高い透水性が期待される亀裂の向きは、それぞれ、低角または北北西の走向、傾斜角が中程度で東北東の走向となる。従って、高角で走向が全方位的にばらつく透水性亀裂の向きは2つの亀裂モデルで説明することは困難であると考えられる。

以上の結果から、27個の透水性亀裂の傾斜角は高角となる傾向であり、走向については特定の方向に卓越する傾向は見られず、最大水平圧縮応力の方位との相関は認められない。また、深度方向における向きの分布についても明らかな傾向は認められなかった。透水性亀裂の向きを BHTV 画像から求めるときに曖昧な場合が含まれる可能性があるが、それを考慮しても多くの透水性亀裂は応力方位と関係のない向きにばらつくようである。

8. まとめ

産総研地下水等総合観測点の新居浜観測点において、ハイドロフォン VSP、速度検層、電気伝導度検

層を適用し、透水性亀裂の深度を求めた。BHTV の孔壁画像を用いることにより、求めた各深度において代表する透水性亀裂の向きを27個決定した。BHTV から求めた、透水性亀裂以外の亀裂も含む3,893個の全ての亀裂については、原因は明らかではないが、傾斜角が中~高角であり、走向は東北東-西南西に集中する傾向を示した。透水性亀裂の向きに関しては、全方位的に大きくばらついて分布し、水圧破碎法から求めた応力場との相関も見られない。今後、他の産総研観測点で取得した物理検層や応力測定などの孔井内測定データを用いて、それぞれの地点における透水性亀裂の向きの特徴や応力場との関係を明らかにする解析を行う予定である。

謝辞 産業技術総合研究所の地下水等総合観測点を整備するプロジェクトの責任者である小泉尚嗣氏(現所属:滋賀県立大学)及び多くの関係者の方々に、新居浜黒島観測点で測定された各種のデータを使用する機会を与えて頂きました。ハイドロフォン VSP を実施する際には、産業技術総合研究所の住田達哉氏、渡辺史郎氏、塚本齊氏に協力して頂き、測定作業はサンコーコンサルタンツ株式会社に依頼しました。査読者である北川有一氏と編集担当者である今西和俊氏から有益なコメントを頂き、本稿の改善に大きく役立ちました。ここに記して感謝いたします。

文 献

- Barton, C.A., Zoback, M.D. and Moos, D. (1995) Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock. *Geology*, 23, 683-686.
- Beydoun, W.B., Cheng, C.H. and Toksöz, M.N. (1985) Detection of open fractures with Vertical Seismic Profiling. *J. Geophys. Res.*, 90, 4557-4566.
- Brederhoeft, J.D., Wolff, R.G., Keys, W.S. and Shuter, E. (1976) Hydraulic fracturing to determine the regional in situ stress field, Piceance Basin, Colorado. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 87, 250-258.
- Byerlee, J. (1978) Friction of rocks. *Pure Appl. Geophys.*, 116, 615-626.
- Davatzes, N.C. and Hickman, S.H. (2009) Fractures, stress and fluid flow prior to stimulation of Well 27-15, Desert Peak, Nevada, EGS project. Proc. 34th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, SGP-TR-187.
- Doughty, C., Tsang, C.-F., Hatanaka, K., Yabuchi, S. and Kurikami, H. (2008) Application of direct-fitting, mass integral, and multirate methods to analysis of flowing fluid electric conductivity logs from Horonobe, Japan. *Water Resour. Res.*, 44, W08403.
- Ferrill, D.A., Winterle, J., Wittmeyer, G., Sims, D., Colton, S., Armstrong, A. and Morris, A.P. (1999) Stressed

- rock strains groundwater at Yucca Mountain, Nevada. *GSA Today*, 9, 1-8.
- Haimson, B. C. and Cornet, F. H. (2003) ISRM Suggested Methods for rock stress estimation-Part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF). *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 40, 1011-1020.
- Heffer, K. J. and Lean, J. C. (1993) Earth Stress Orientation - A control on, and guide to, flooding directionality in a majority of reservoirs. In Linville, B. ed., *Reservoir Characterization III*, PennWell Books, Oklahoma, 799-822.
- Itaba, S., Koizumi, N., Matsumoto, N. and Ohtani, R. (2010) Continuous observation of groundwater and crustal deformation for forecasting Tonankai and Nankai earthquakes in Japan. *Pure Appl. Geophys.*, 167, 1105-1114.
- 伊藤高敏 (2004) 水圧破砕地殻応力評価法の問題点とき裂開口圧の物理的意味. *月刊地球*, 26, 84-89.
- Ito, T., Igarashi, A., Kato, H., Ito, H. and Sano, O. (2006) Crucial effect of system compliance on the maximum stress estimation in hydrofracturing method: Theoretical considerations and field-test verification. *Earth Planets Space*, 58, 963-971.
- Ito, T., Satoh, T. and Kato, H. (2010) Deep rock stress measurement by hydraulic fracturing method taking account of system compliance effect. *Proc. of 5th Int. Symp. on In-Situ Rock Stress*, 43-50.
- 木口 努・伊藤久男・桑原保人・中尾信典・大湊隆雄 (1996) ハイドロフォン VSP による透水性亀裂の検出と透水係数の推定. *物理探査*, 49, 285-296.
- Kiguchi, T., Ito, H., Kuwahara, Y. and Miyazaki, T. (2001) Estimating the permeability of the Nojima Fault zone by a hydrophone vertical seismic profiling experiment. *The Island Arc*, 10, 348-356.
- 木口 努・桑原保人・小泉尚嗣・塚本 齊・板場智史・佐藤 努・佐藤隆司・関 陽児・梅田康弘・北川有一・重松紀生・高橋 誠 (2014) 南海トラフ巨大地震予測のための地下水等総合観測点の孔井における物理検層資料. *地質調査総合センター研究資料集*, 598, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 小泉尚嗣, 高橋 誠, 松本則夫, 佐藤 努, 大谷 竜, 北川有一, 板場智史, 梅田康弘, 武田直人, 重松紀生, 桑原保人, 佐藤隆司, 今西和俊, 木口 努, 関 陽児, 塚本 齊, 干野 真 (2009) 紀伊半島～四国周辺における地下水等総合観測施設による短期的ゆっくり滑りと東南海・南海地震のモニタリング. *日本地球惑星科学連合 2009 年大会予稿集*, S-156-004.
- 小泉尚嗣 (2013) 地下水観測による地震予知研究. *シンセシオロジー*, 6, 24-33.
- Kumar, A., Klimentos, T., Sarkar, A., Sinha, A. and Nath, G. (2008) Permeability determination from Stoneley waves in gas saturated sands, India: A case study. *Proc. SPWLA 49th Symp.*, J.
- Laubach, S. E., Olson, J. E. and Gale, J. F. W. (2004) Are open fractures necessarily aligned with maximum horizontal stress? *Earth Planet. Sci. Lett.*, 222, 191-195.
- Mattila, J. and Tammisto, E. (2012) Stress-controlled fluid flow in fractures at the site of a potential nuclear waste repository, Finland. *Geology*, 40, 299-302.
- Morris, A. P., Ferrill, D. A. and Henderson, D. B. (1996) Slip tendency and fault reactivation. *Geology*, 24, 275-278.
- Öhman, J., Niemi, A. and Tsang, C.-F. (2005) Probabilistic estimation of fracture transmissivity from wellbore hydraulic data accounting for depth-dependent anisotropic rock stress. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 42, 793-804.
- Olsen, M. P., Scholz, C. H. and Legger, A. (1998) Healing and sealing of a simulated fault gouge under hydrothermal conditions: Implications for fault healing. *J. Geophys. Res.*, 103, 7421-7430.
- Olsson, R. and Barton, N. (2001) An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joints. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 38, 317-329.
- Pyrak-Nolte, L. J. and Morris, J. P. (2000) Single fractures under normal stress: The relation between fracture specific stiffness and fluid flow. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 37, 245-262.
- Rogers, S. F. (2003) Critical stress-related permeability in fractured rocks. *The Geological Society of London Special Publication*, 209, 7-16.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター (編) (2015) 20 万分の 1 日本シームレス地質図 2015 年 5 月 29 日版. 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 佐藤隆司・北川有一・高橋 誠・佐藤 努・小泉尚嗣 (2013) 愛媛県新居浜市および愛知県西尾市における水圧破砕法地殻応力測定一地下水等総合観測施設整備に伴う一. *日本地震学会 2013 年秋季大会講演予稿集*, 227.
- 佐藤隆司・佐藤 努・木口 努・小泉尚嗣・渡辺 寛・酒井誠志・鈴木悠爾 (2014) GSJ コア新居浜黒島観測点資料. *地質調査総合センター研究資料集*, 596, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 佐藤隆司・佐藤 努・木口 努・小泉尚嗣・渡辺 寛・酒井誠志 (2018) 東南海・南海地震予測のための地下水等総合観測施設整備工事 (愛媛県新居

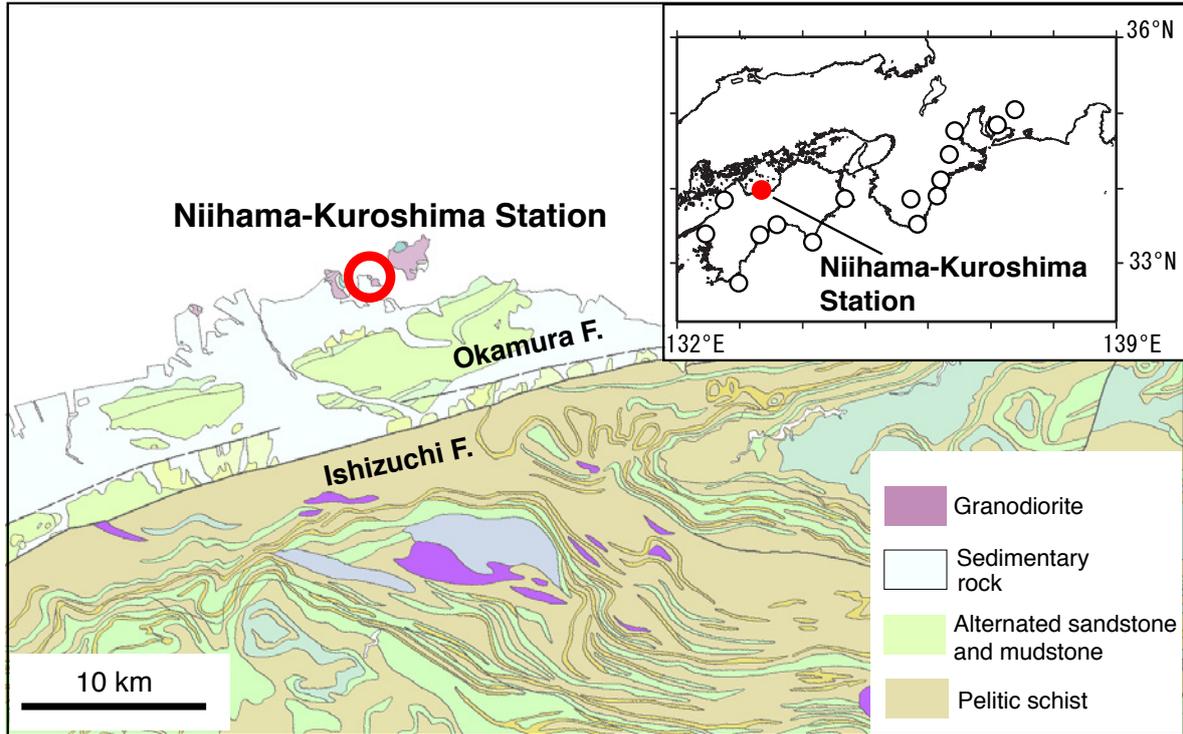
- 浜市地区) 報告書. 地質調査総合センター研究資料集, 666, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- Tang, X.M., Cheng, C. H. and Toksöz, M. N. (1991) Dynamic permeability and borehole Stoneley waves: A simplified Biot-Rosenbaum model, *J. Acoust. Soc. Am.*, 90, 1632-1646.
- Tsang, C.-F., Hufschmied, P. and Hale, F. V. (1990) Determination of fracture inflow parameters with a borehole fluid conductivity logging method. *Water Resour. Res.*, 26, 561-578.
- Vidal, J., Genter, A. and Chopin, F. (2017) Permeable fracture zones in the hard rocks of the geothermal reservoir at Rittershoffen, France. *J. Geophys. Res.*, 122, 4864-4887.
- Winkler, K. W., Liu, H. L. and Johnson, D. L. (1989) Permeability and borehole Stoneley waves: Comparison between experiments and theory. *Geophysics*, 54, 66-75.
- Yeo, I. W., De Freitas, M. H. and Zimmerman, R. W. (1998) Effect of shear displacement on the aperture and permeability of a rock fracture. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 35, 1051-1070.
- Zemanek, J., Glenn, E., Norton, L. J. and Coldwell, R. L. (1970) Formation evaluation by inspection with the borehole televiewer. *Geophysics*, 35, 254-269.
- Zoback, M. D. (1999) Fracture permeability and in situ stress in the Dixie Valley, Nevada, geothermal reservoir. United States: N. p., doi:10.2172/12560.

(受付 : 2018 年 8 月 31 日, 受理 : 2018 年 10 月 1 日)

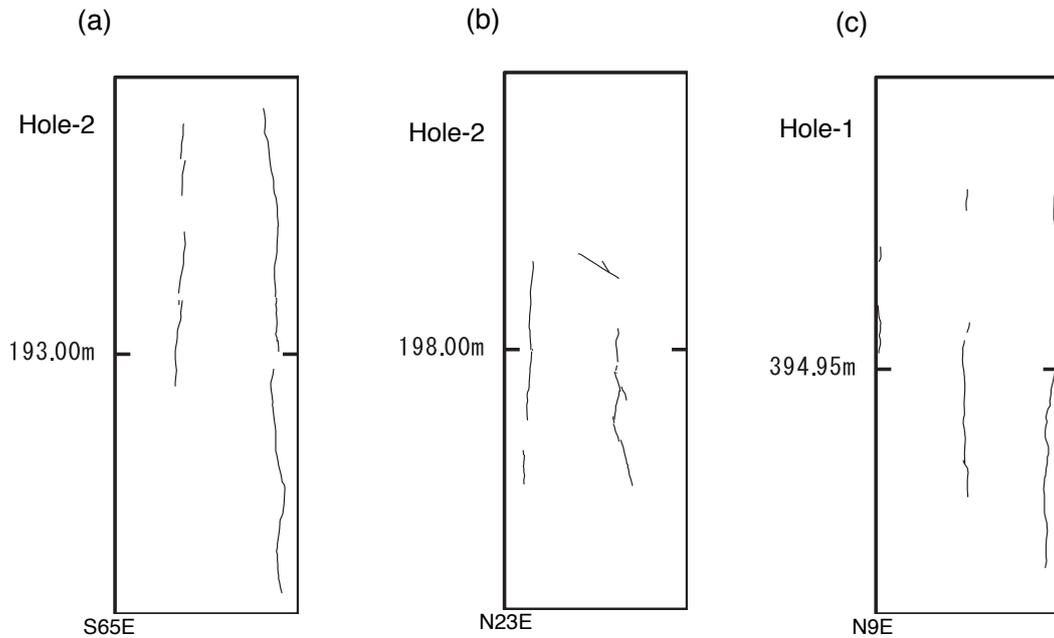
第1表. 新居浜黒島観測点の3つの孔井において、ハイドロフォンVSP、速度検層、電気伝導度検層から求めた透水性亀裂が存在する深度、及びBHTV画像から求めた透水性亀裂の深度、傾斜方位と傾斜角、複数の向きを求めた深度や向きを求めなかった深度も含む。*1: 北から時計回りの方位。

Table 1. Summary of the depths of the permeable fractures detected by hydrophone VSP, sonic logging and fluid electric conductivity logging in three boreholes at Niihama-Kuroshima station, and the depth, dip direction and dip angle of the permeable fractures determined by using BHTV images. Both of the depths where more than two orientations were determined and those where no orientation was determined are included in the table. *1: Clockwise from north.

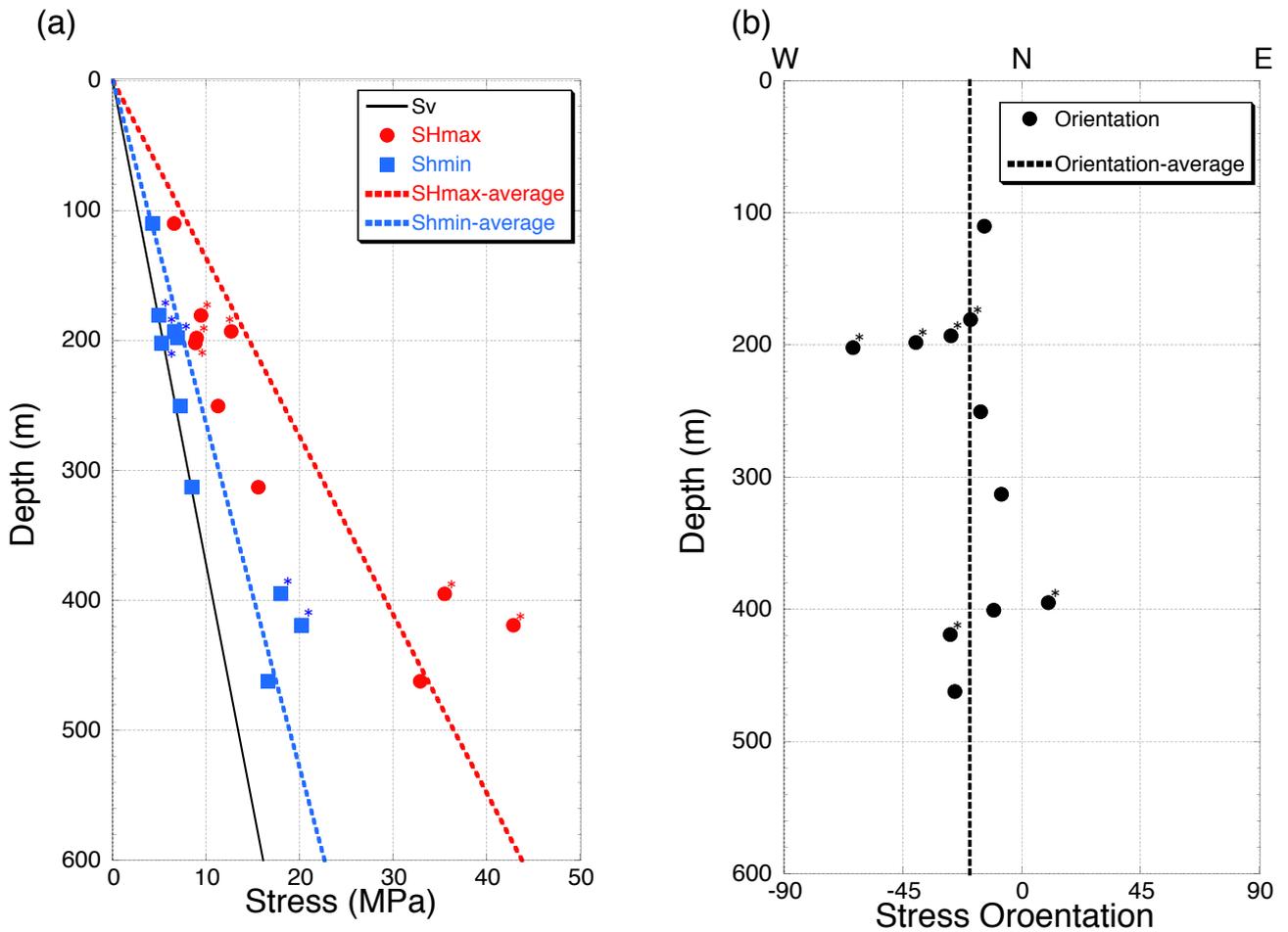
| Hole | Depth (m) by VSP and loggings | BoreholeTeleviewer (BHTV) | | |
|------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------|------------|
| | | Depth (m) | Dip direction (deg.) *1 | Dip (deg.) |
| 3 | 33.4 | 33.71 | 148 | 44 |
| 3 | 35.2 | - | - | - |
| 2 | 68.0 | 68.30 | 346 | 82 |
| 2 | 85.0 | 85.23 | 86 | 43 |
| 2 | 130.0 | 128.50 | 51 | 60 |
| | | 129.36 | 57 | 60 |
| 2 | 138.2 | 138.32 | 102 | 74 |
| 2 | 172.0 | 172.22 | 49 | 74 |
| 1 | 204.4 | 204.53 | 189 | 61 |
| 1 | 217.7 | 217.66 | 161 | 75 |
| 1 | 277.3 | 277.34 | 213 | 69 |
| 1 | 295.7 | 295.91 | 161 | 68 |
| 1 | 297.0 | 296.49 | 151 | 65 |
| | | 296.54 | 331 | 65 |
| | | 296.92 | 150 | 52 |
| 1 | 329.7 | 328.56 | 250 | 77 |
| | | 329.70 | 1 | 62 |
| 1 | 342.4 | 342.27 | 259 | 77 |
| 1 | 360.4 | 360.07 | 277 | 83 |
| | | 361.63 | 238 | 66 |
| | | 361.71 | 219 | 63 |
| 1 | 433.7 | 432.76 | 69 | 67 |
| 1 | 491.8 | 491.38 | 115 | 58 |
| | | 491.74 | 165 | 49 |
| | | 491.95 | 141 | 46 |
| 1 | 511.7 | 512.01 | 125 | 83 |
| 1 | 523.0 | 521.53 | 307 | 82 |
| | | 521.97 | 117 | 86 |



第1図. 産業技術総合研究所の新居浜黒島観測点の位置図. 20万分の1日本シームレス地質図(産業技術総合研究所, 2015)上に赤丸で示す. 右上図に新居浜黒島観測点以外の地下水等総合観測点を白丸で示す.
 Fig. 1. Location of AIST Niihama-Kuroshima observation station in Ehime Prefecture, southwestern Japan based on Seamless digital geological map of Japan 1: 200,000 (Geological Survey of Japan, AIST (ed.), 2015). The station is indicated by a red circle. AIST integrated groundwater observation stations except Niihama-Kuroshima station are also shown in the upper right of the figure by open dots.

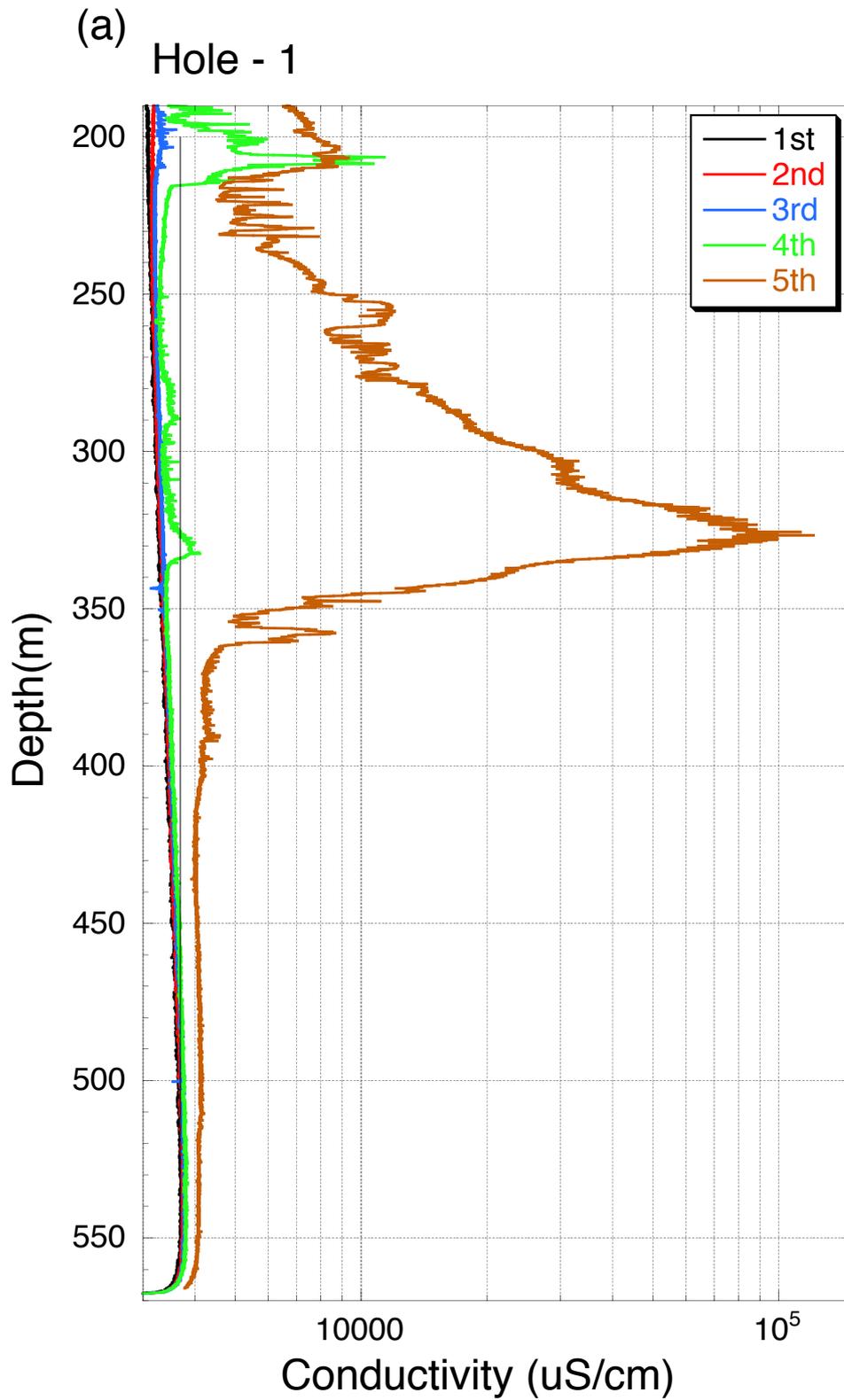


第2図. 水圧破砕法により孔壁に生成された縦亀裂を型撮りした記録の例(佐藤ほか, 2018に一部加筆). 各図の左端の方位を図中に示す. (a) 孔2 深度 193 m. (b) 孔2 深度 198 m. (c) 孔1 深度 395 m.
 Fig. 2. Typical examples of fracture imprints at the depths where hydraulic fracturing technique was conducted (modified from Sato *et al.*, 2018). The azimuth is shown at the left end of each figure. (a) Depth of 193 m at Hole-2. (b) Depth of 198 m at Hole-2. (c) Depth of 395 m at Hole-1.



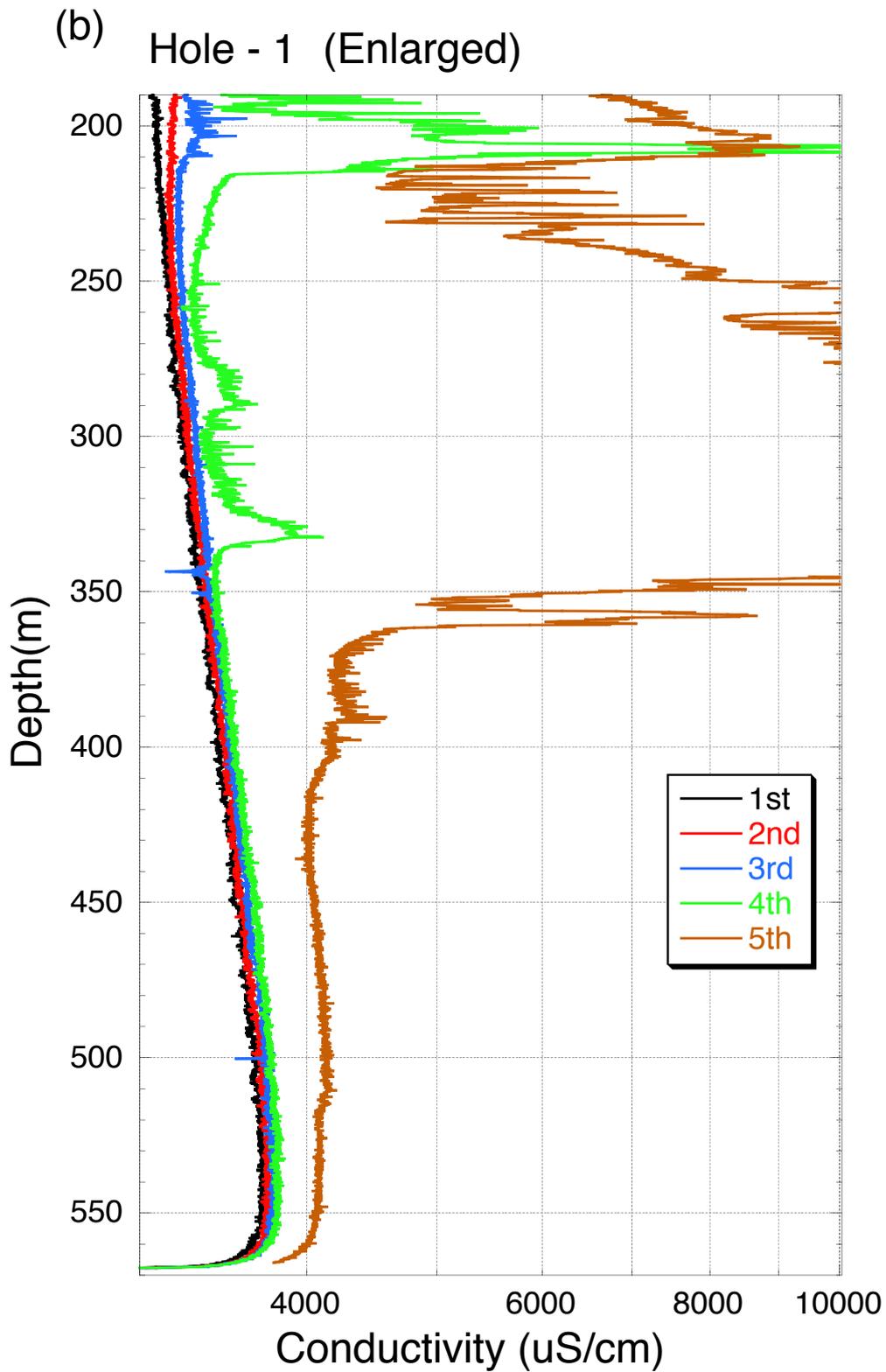
第3図. 水圧破碎法から求めた応力場. (a) 最大水平圧縮応力 (赤丸) 及び最小水平圧縮応力 (青四角) と深度との関係. 黒色実線で示す鉛直応力は密度 2.67g/cm^3 を仮定して求めた. 赤色破線と青色破線は, それぞれ最大及び最小水平圧縮応力の値を直線で近似して求めた. (b) 最大水平圧縮応力の方位の分布 (黒丸). 方位の平均値を黒色破線で示す. 水圧破碎法で生成された縦亀裂が相対的に明瞭であった測定値を*印付きで示す.

Fig. 3. Stress state at Niihama station obtained by using hydraulic fracturing technique. (a) Maximum (red circle) and minimum (blue square) horizontal compressive stresses as a function of depth. The black line indicates the overburden stress estimated assuming the density is 2.67 g/cm^3 . The red broken line and the blue one are obtained by linearly approximating the values of the maximum and minimum horizontal compressive stress, respectively. (b) Depth distribution of orientations of maximum horizontal compressive stress indicated by black circles. The averaged orientation is denoted by black broken line. The asterisks indicate the measurements where the vertical fracture imprints induced by hydraulic fracturing technique are relatively clear.



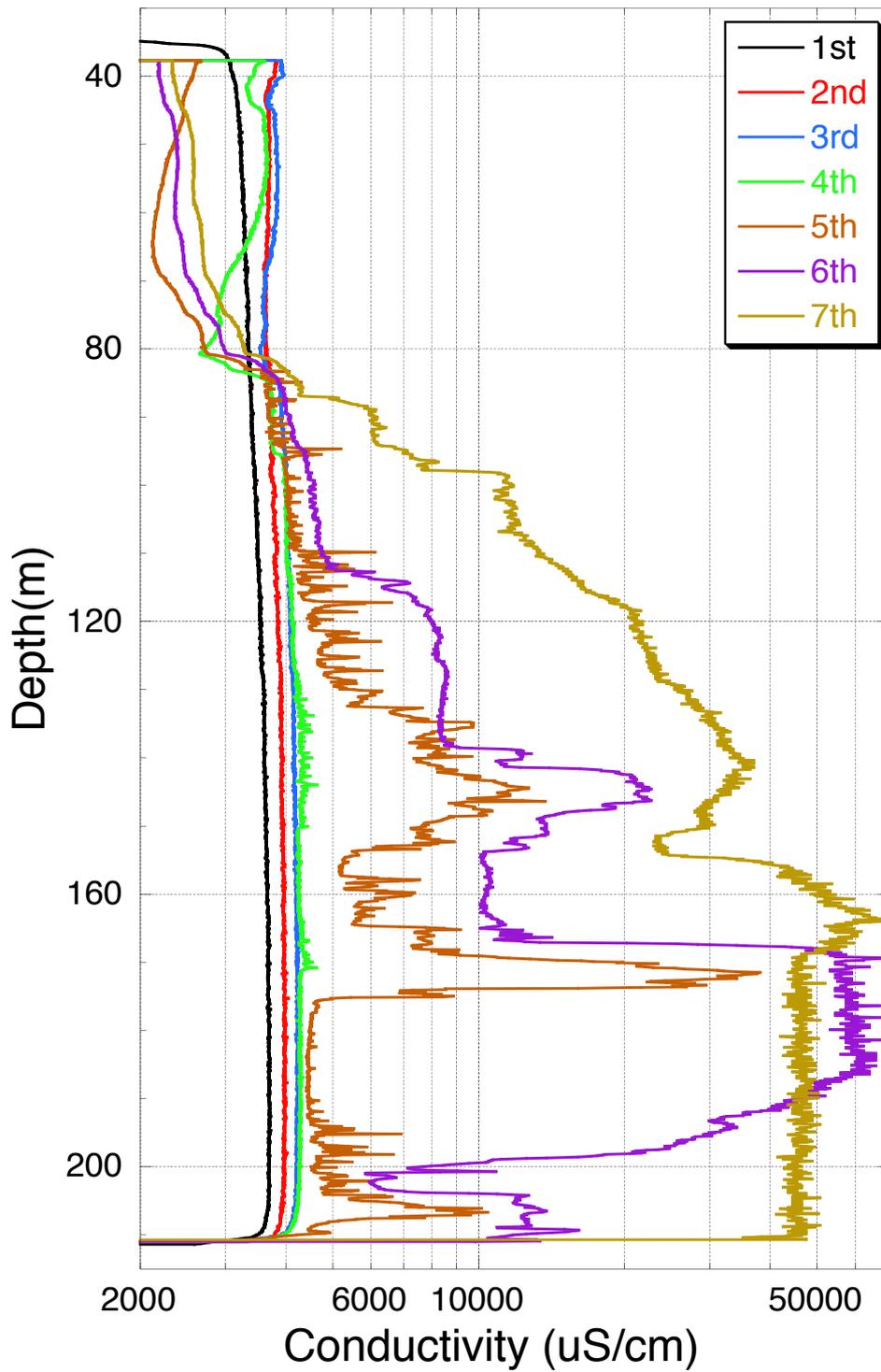
第4図. 電気伝導度検層の測定データ. 繰り返し測定したデータを色分けして示す. (a) 孔1. (b) 孔1の低電気伝導度の範囲の拡大図. (c) 孔2. (d) 孔3.

Fig. 4. Repeatedly measured data of fluid electric conductivity logging. (a) Hole-1. (b) Enlarged range of low electrical conductivity values at Hole-1. (c) Hole-2. (d) Hole-3.



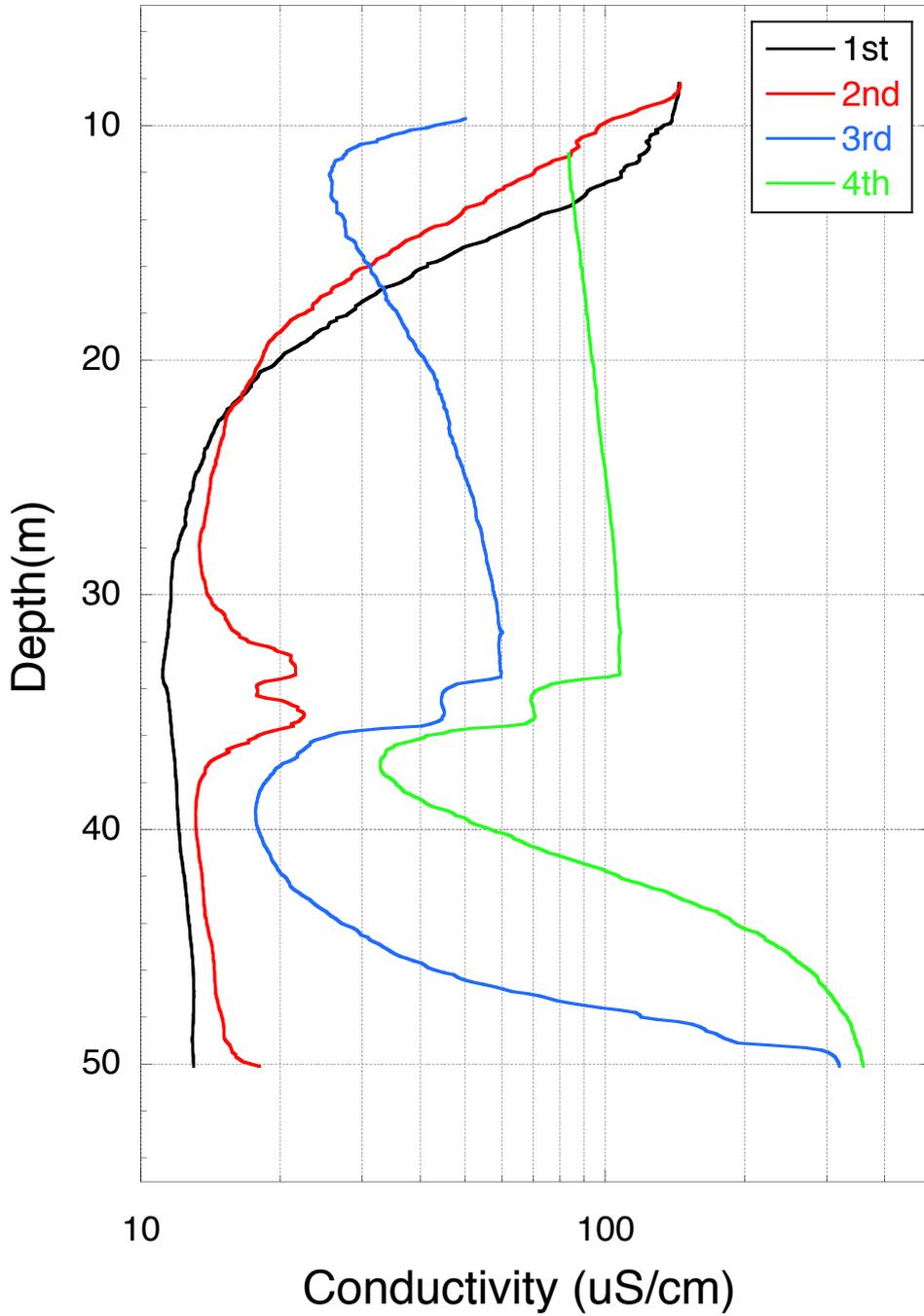
第4図. (続き)
Fig. 4. (continued)

(c) Hole - 2

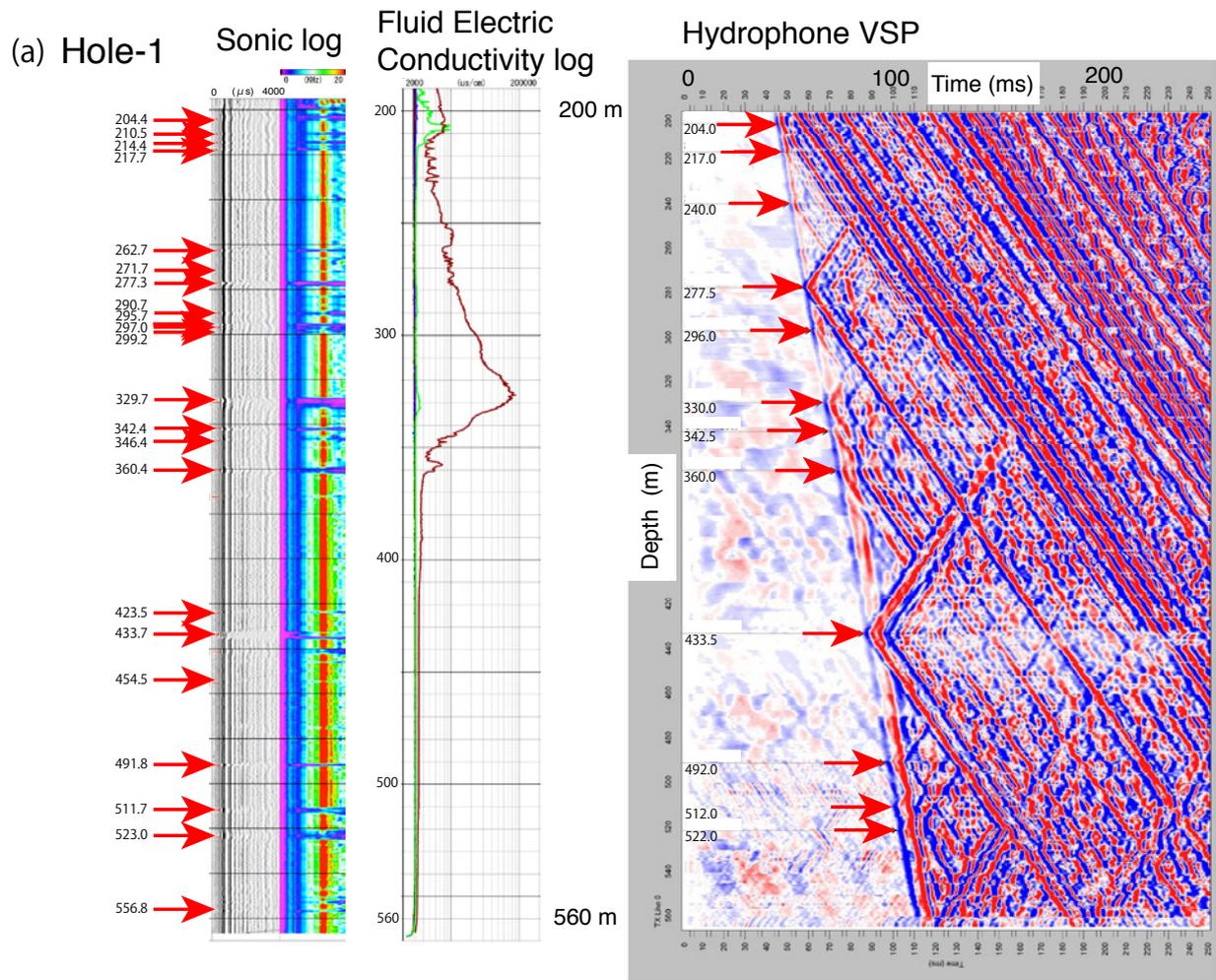


第4図. (続き)
Fig. 4. (continued)

(d)
Hole - 3



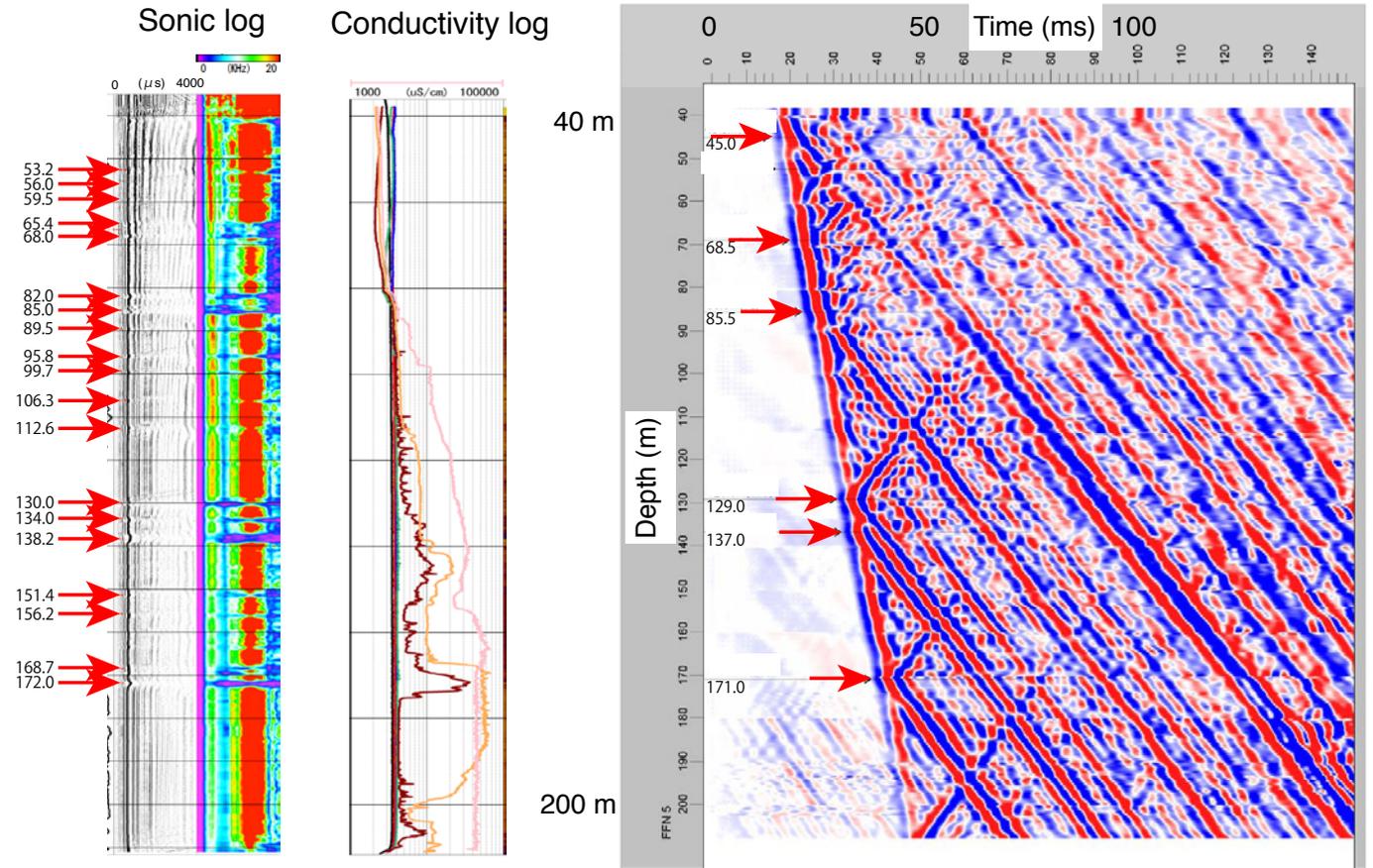
第4図. (続き)
Fig. 4. (continued)



第5図. 孔1と2で実施した速度検層, 電気伝導度検層, ハイドロフォンVSPの結果. 速度検層とハイドロフォンVSPからそれぞれ求めた透水性亀裂の深度を赤矢印で示す. (a) 孔1. (b) 孔2.

Fig. 5. Results of sonic logging, fluid electric conductivity logging and hydrophone VSP. Red arrows indicate the depths of the permeable fractures detected by sonic logging and hydrophone VSP, respectively. (a) Hole-1. (b) Hole-2.

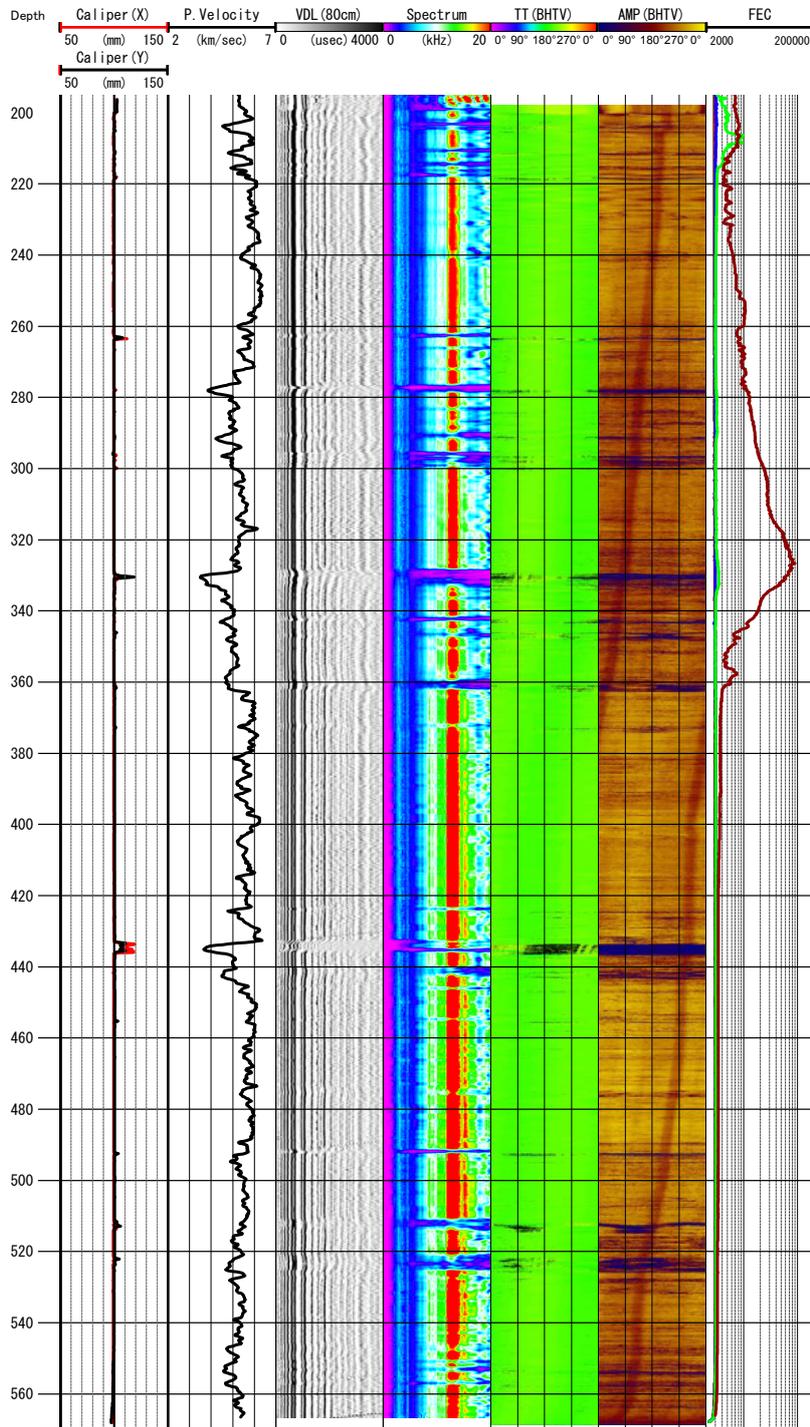
(b) Hole-2



第5図. (続き)
Fig. 5. (continued)

(a)

Hole-1

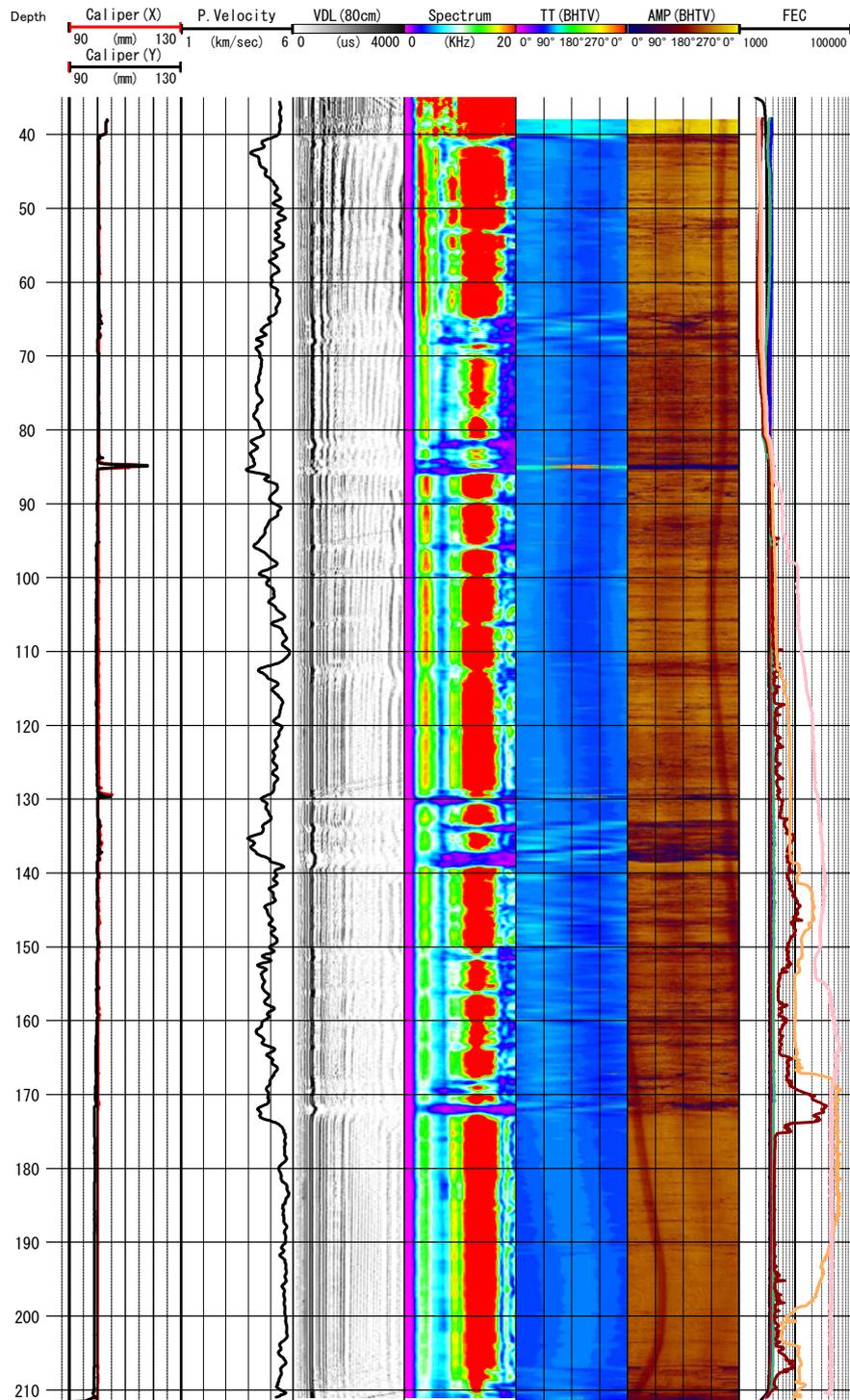


第 6 図. 総合検層図. 左から順に, キャリパー検層による孔径, 速度検層による P 波速度, 速度検層の VDL 表示と周波数スペクトラム, BHTV の走時と振幅の画像, 電気伝導度を示す. (a) 孔 1. (b) 孔 2. (c) 孔 3.

Fig. 6. Depth profiles of logging data. Plotted from left to right are borehole diameter measured by caliper logging, velocity of P wave by sonic logging, VDL and frequency spectrum from sonic logging, travel time and amplitude images of BHTV and electric conductivity. (a) Hole-1. (b) Hole-2. (c) Hole-3.

(b)

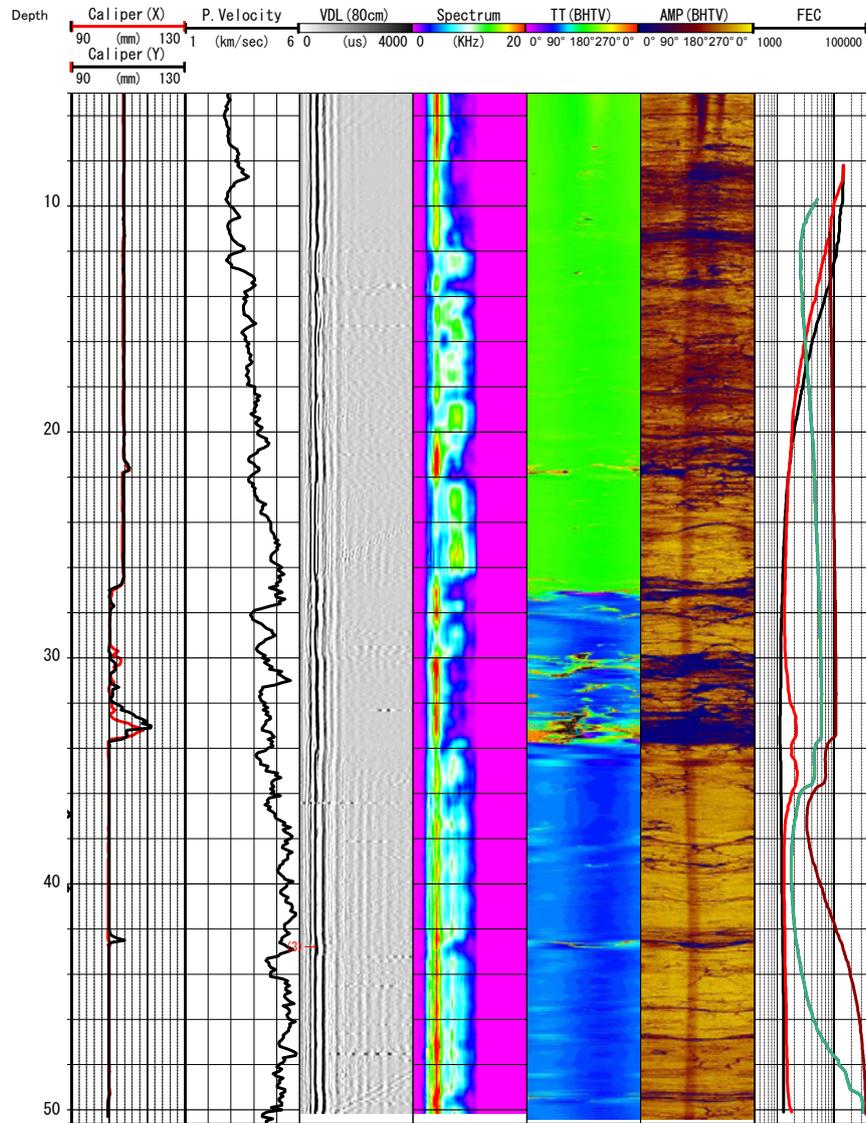
Hole-2



第6図. (続き)
Fig. 6. (continued)

(c)

Hole-3

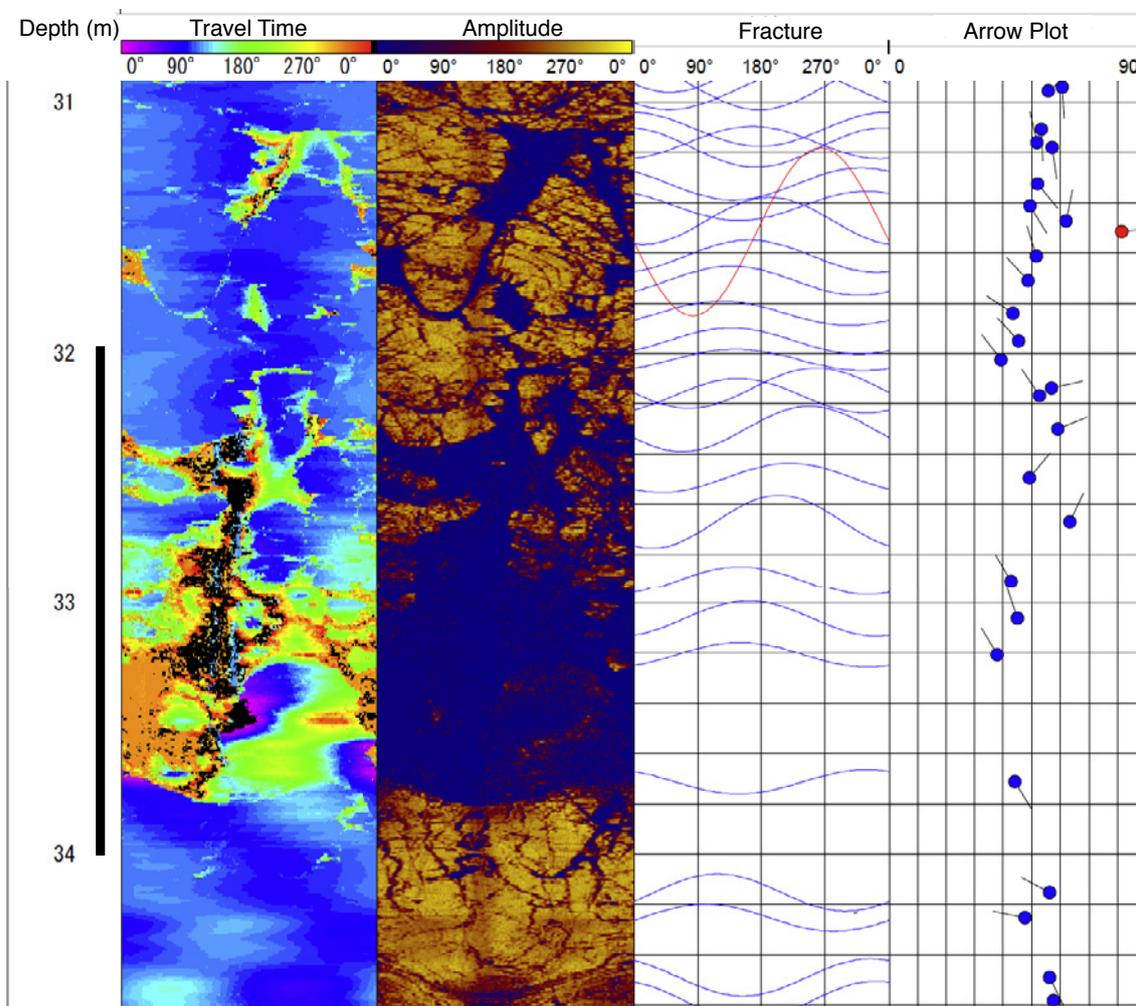


第6図. (続き)

Fig. 6. (continued)

(a)

Hole-3

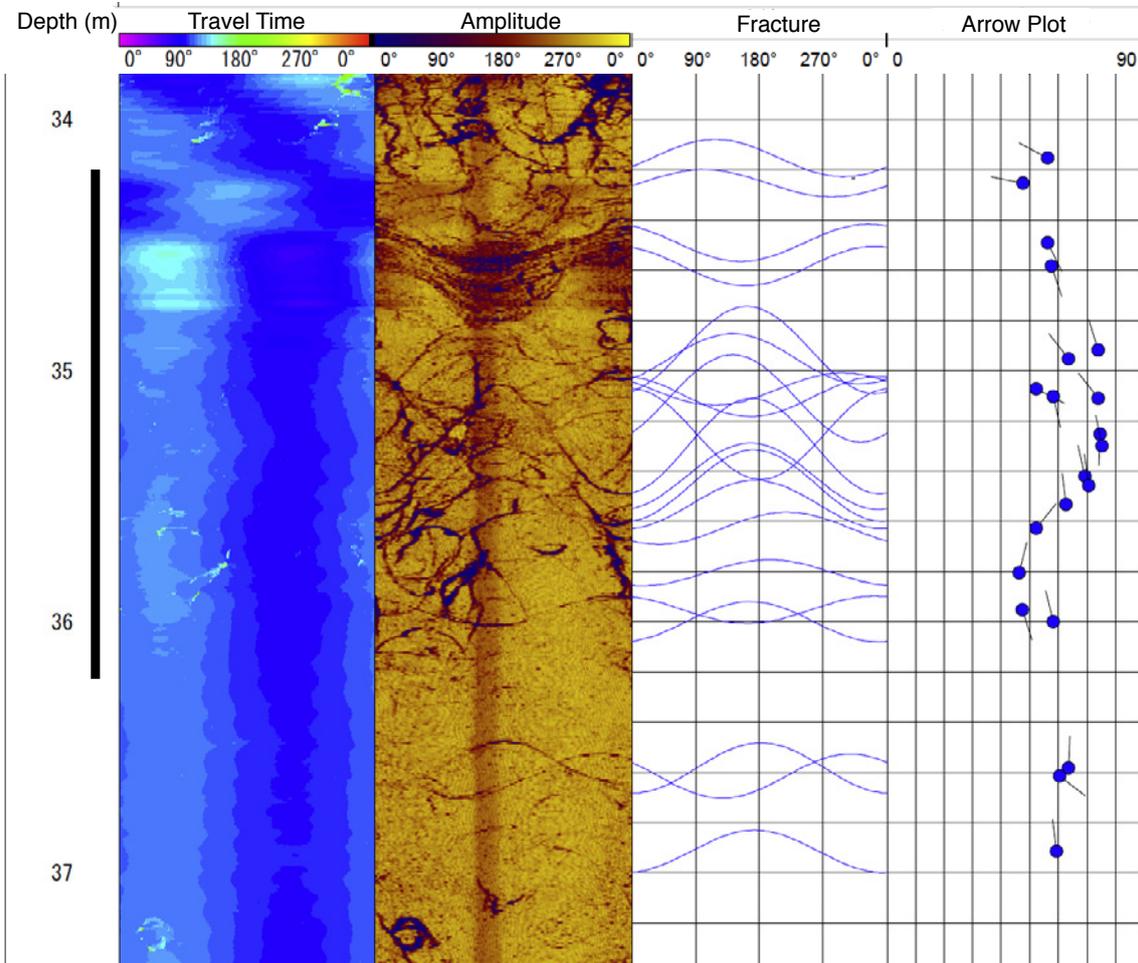


第7図. ハイドロフォン VSP, 速度検層, 電気伝導度検層により求めた深度付近の BHTV 画像及び検出した亀裂の形状と向き. 左の列から, 深度, BHTV 画像の走時と振幅のデータ, サインカーブの形状として検出した亀裂, 亀裂の傾斜方位と傾斜角を示すアロープロットを示す. アロープロットでは丸印の位置が傾斜角, 線分の方向が傾斜方位を意味する. 速度検層または電気伝導度検層で異常を示した深度区間を黒色バーで示す. (a) 孔3 深度 33.4 m. (b) 孔3 深度 35.2 m. (c) 孔2 深度 68.0 m. (d) 孔2 深度 85.0 m. (e) 孔2 深度 130.0 m. (f) 孔2 深度 138.2 m. (g) 孔2 深度 172.0 m. (h) 孔1 深度 204.4 m. (i) 孔1 深度 217.7 m. (j) 孔1 深度 277.3 m. (k) 孔1 深度 295.7 m と 297.0 m. (l) 孔1 深度 329.7 m. (m) 孔1 深度 342.4 m. (n) 孔1 深度 360.4 m. (o) 孔1 深度 433.7 m. (p) 孔1 深度 491.8 m. (q) 孔1 深度 511.7 m. (r) 孔1 深度 523.0 m.

Fig. 7. BHTV images around the depth detected by using data of hydrophone VSP, sonic and fluid electric conductivity loggings and shapes and orientations of fractures in BHTV images. From the column on the left, depth, travel time and amplitude images of BHTV, fracture shape indicated as sinusoidal curve and arrow plot for dip direction and dip angle of the fracture are shown. The position of the arrow's head and the direction of arrow indicate dip angle and dip direction, respectively. The black bar shows the depth interval where sonic logging or fluid electric conductivity logging detects anomaly. (a) Depth of 33.4 m at Hole-3. (b) Depth of 35.2 m at Hole-3. (c) Depth of 68.0 m at Hole-2. (d) Depth of 85.0 m at Hole-2. (e) Depth of 130.0 m at Hole-2. (f) Depth of 138.2 m at Hole-2. (g) Depth of 172.0 m at Hole-2. (h) Depth of 204.4 m at Hole-1. (i) Depth of 217.7 m at Hole-1. (j) Depth of 277.3 m at Hole-1. (k) Depth of 295.7 m and 297.0 m at Hole-1. (l) Depth of 329.7 m at Hole-1. (m) Depth of 342.4 m at Hole-1. (n) Depth of 360.4 m at Hole-1. (o) Depth of 433.7 m at Hole-1. (p) Depth of 491.8 m at Hole-1. (q) Depth of 511.7 m at Hole-1. (r) Depth of 523.0 m at Hole-1.

(b)

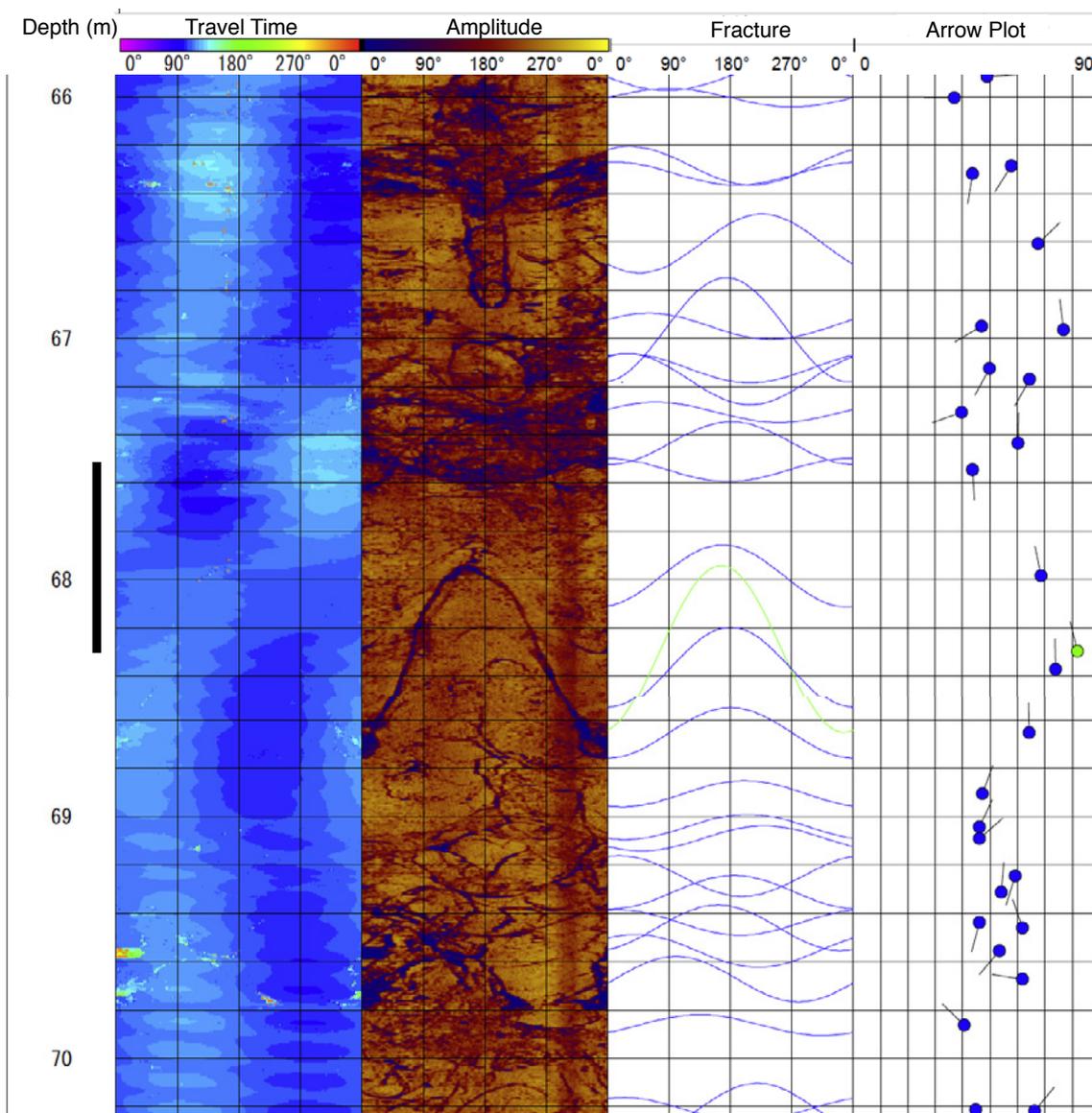
Hole-3



第7図. (続き)
Fig. 7. (continued)

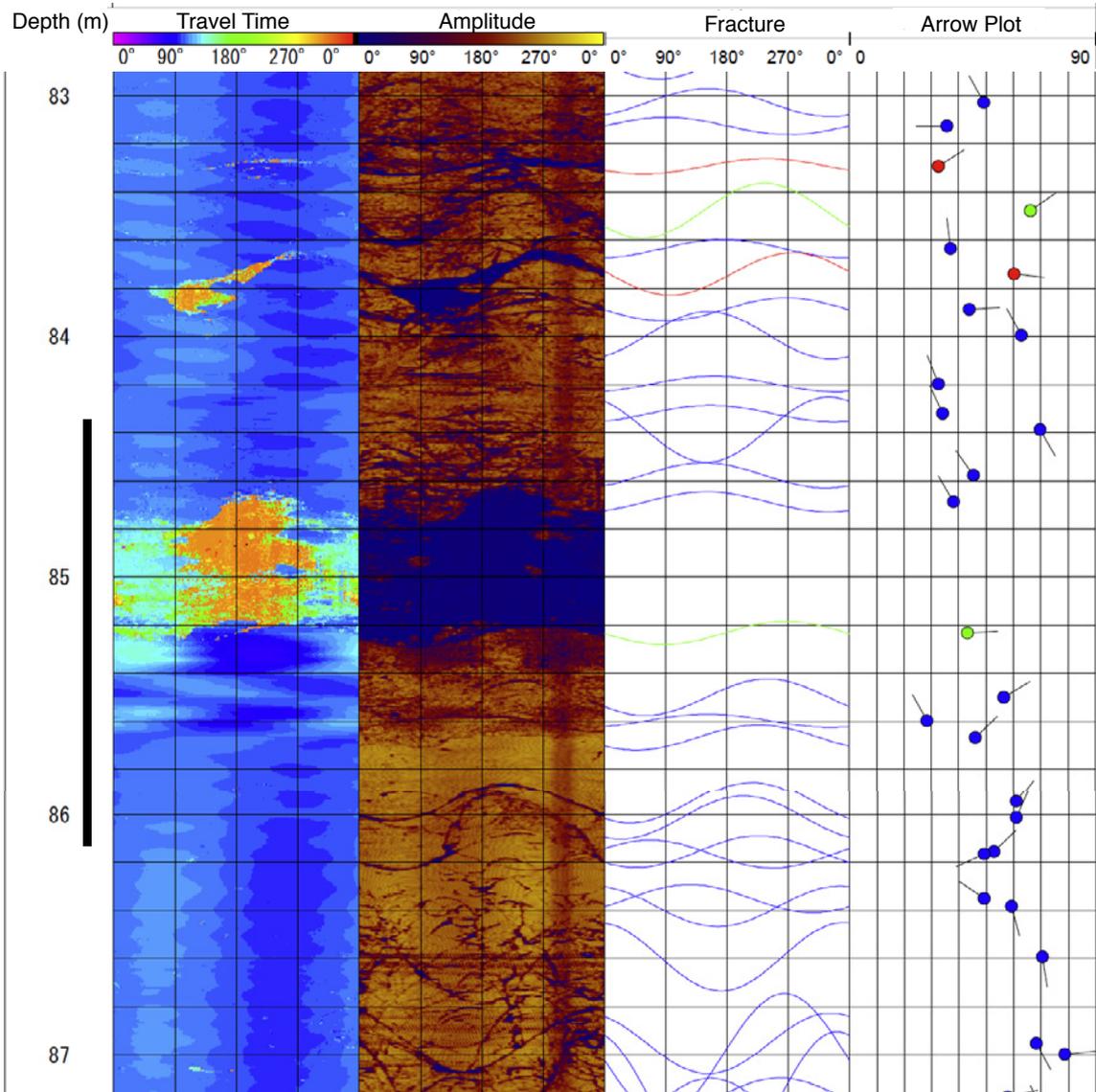
(c)

Hole-2



第7図. (続き)
Fig. 7. (continued)

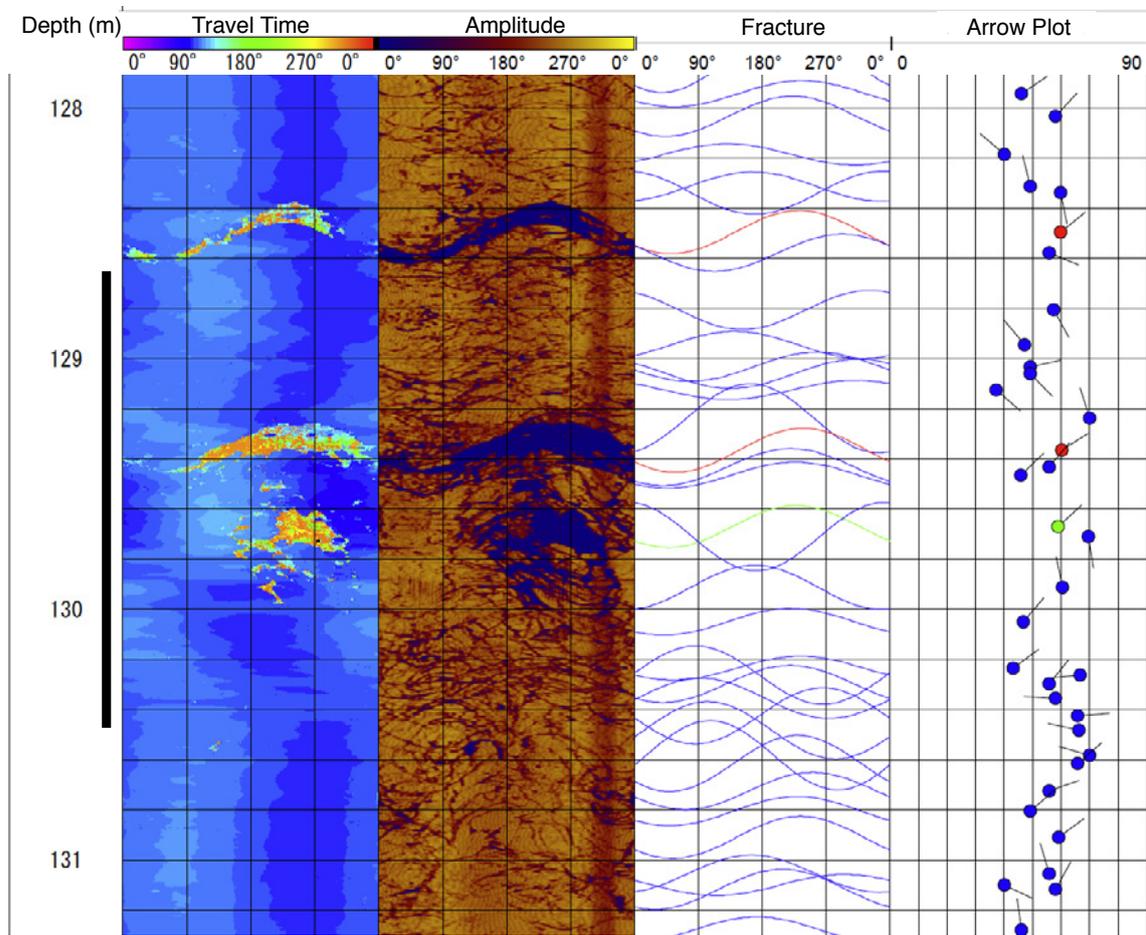
(d)
Hole-2



第7図. (続き)
Fig. 7. (continued)

(e)

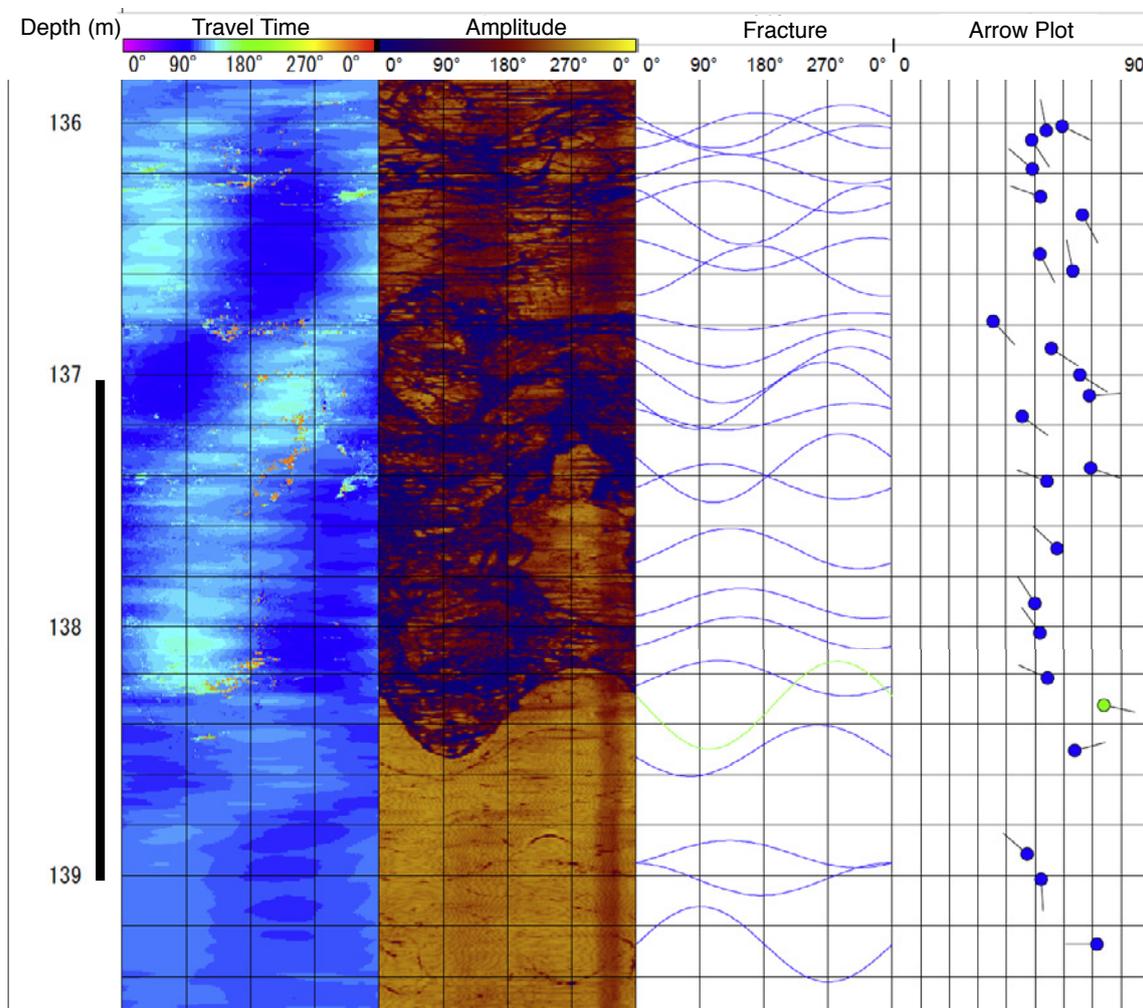
Hole-2



第7図. (続き)
Fig. 7. (continued)

(f)

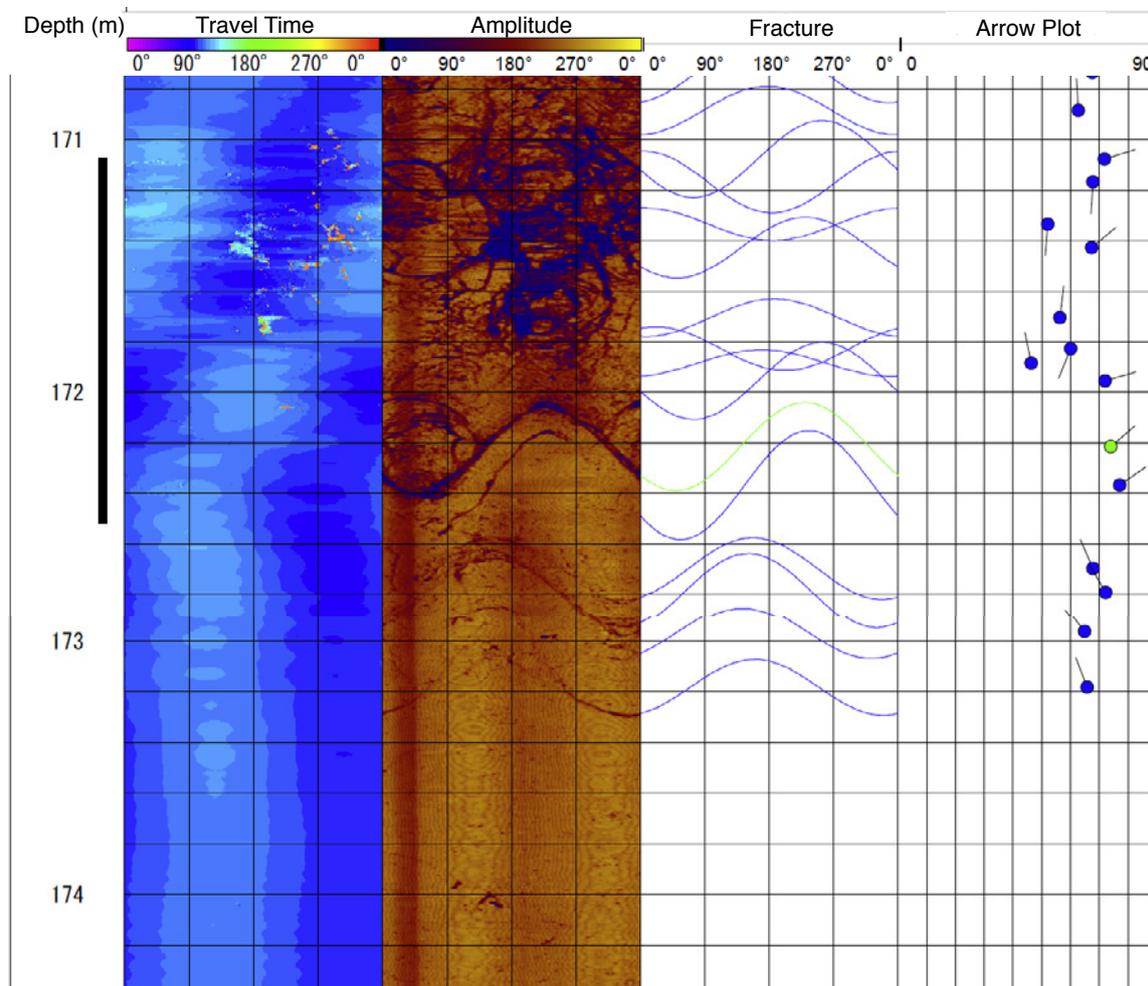
Hole-2



第7図. (続き)
Fig. 7. (continued)

(g)

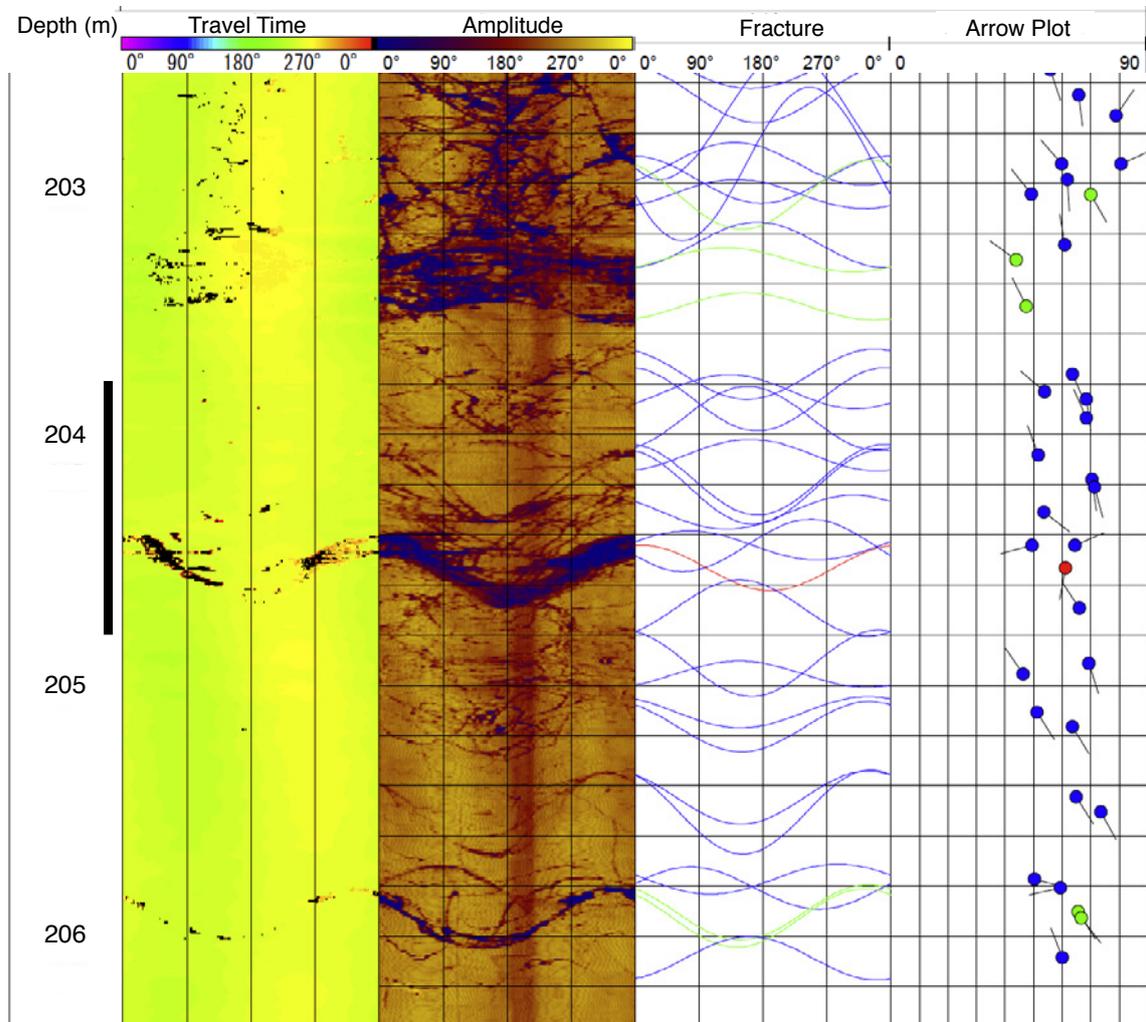
Hole-2



第7図. (続き)
Fig. 7. (continued)

(h)

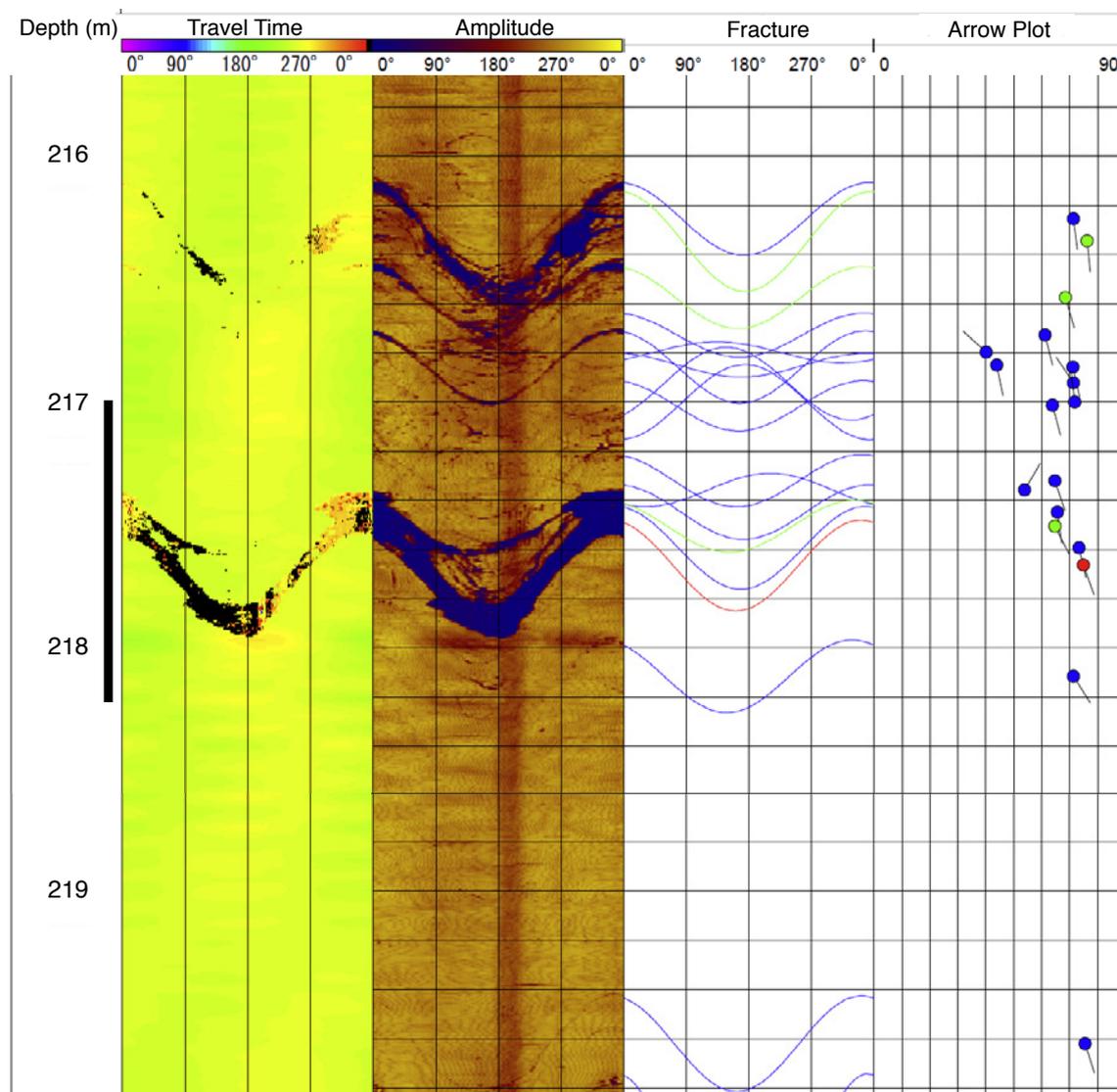
Hole-1



第7図. (続き)
Fig. 7. (continued)

(i)

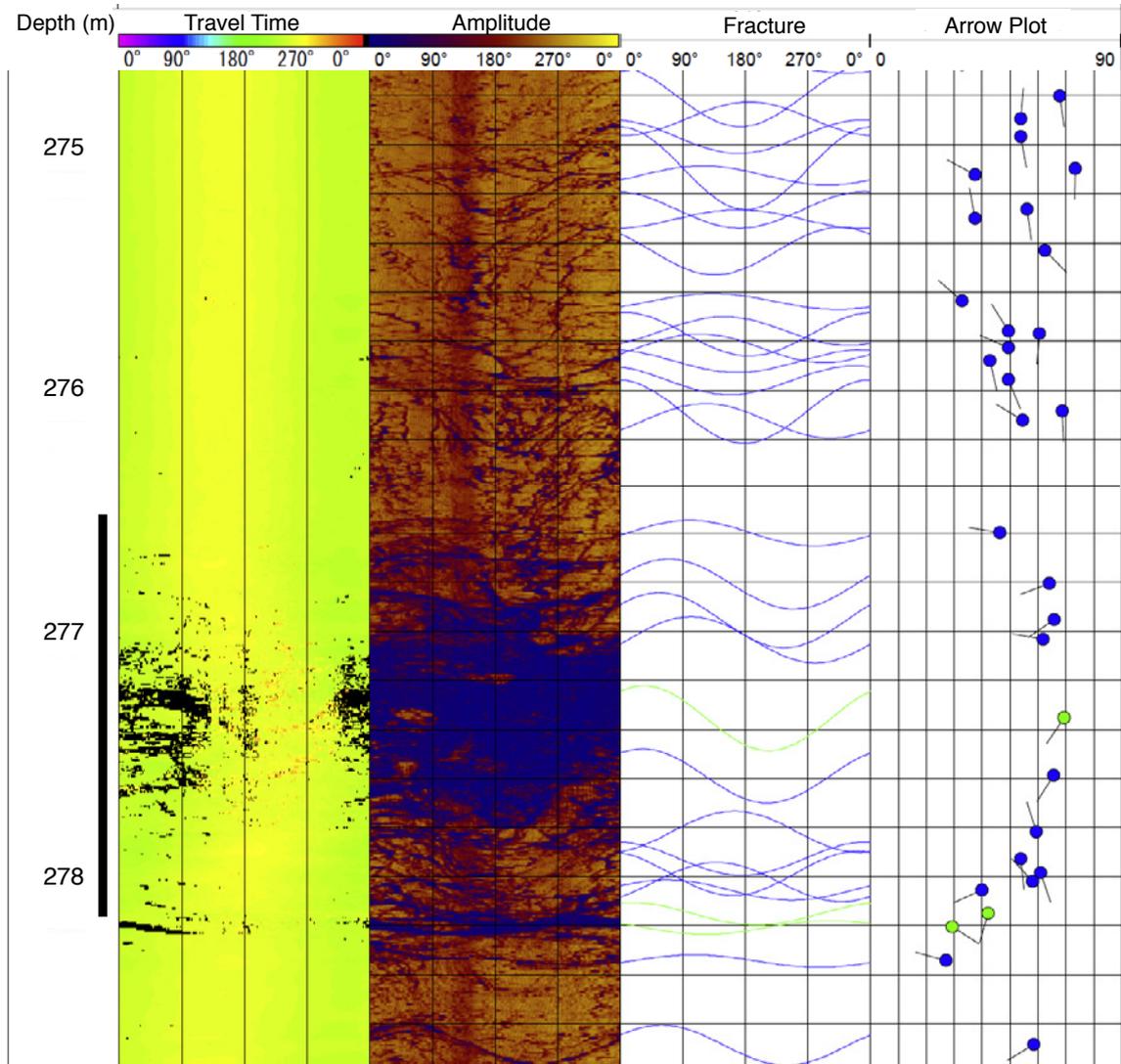
Hole-1



第7図. (続き)
Fig. 7. (continued)

(j)

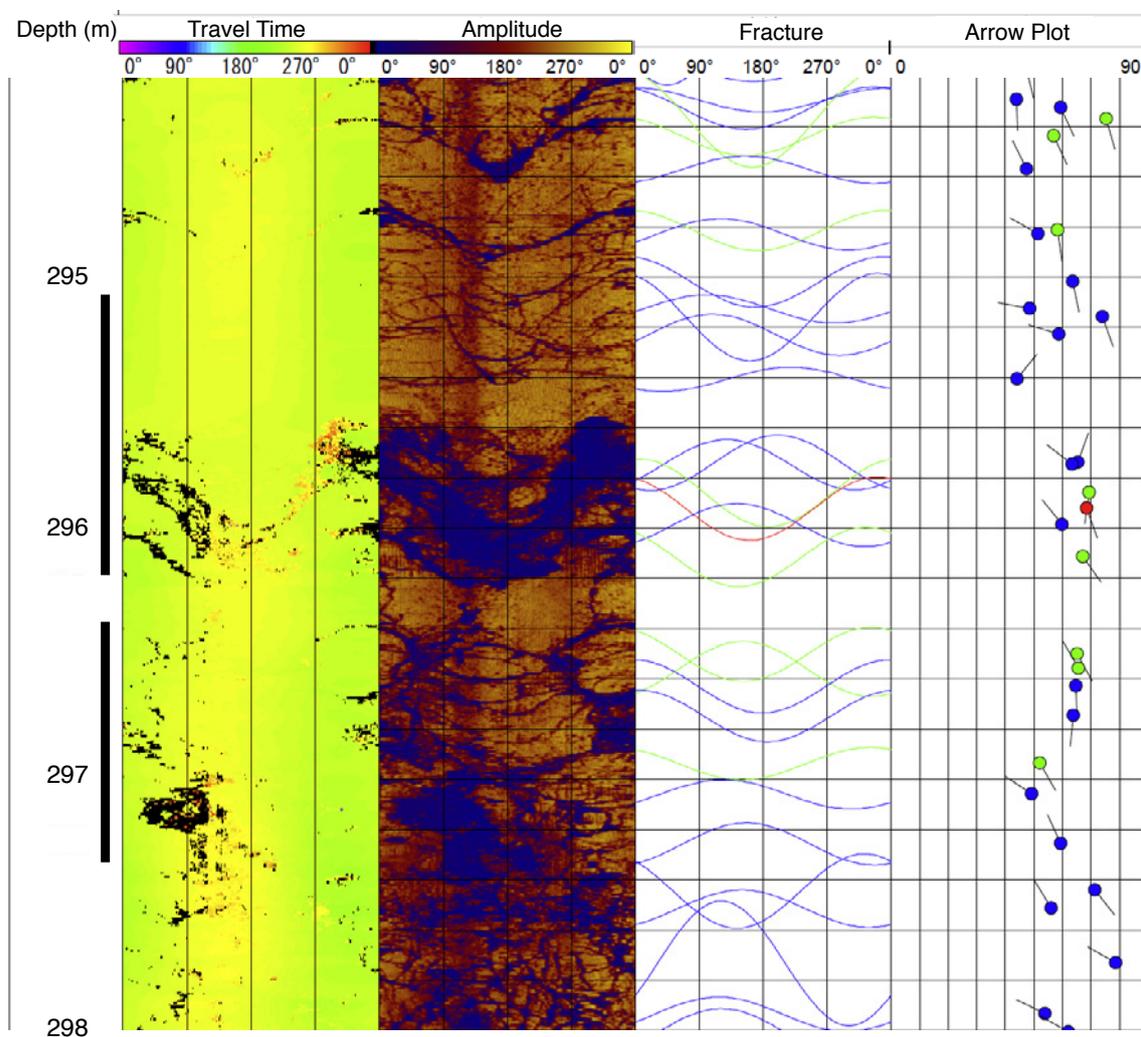
Hole-1



第7図. (続き)
Fig. 7. (continued)

(k)

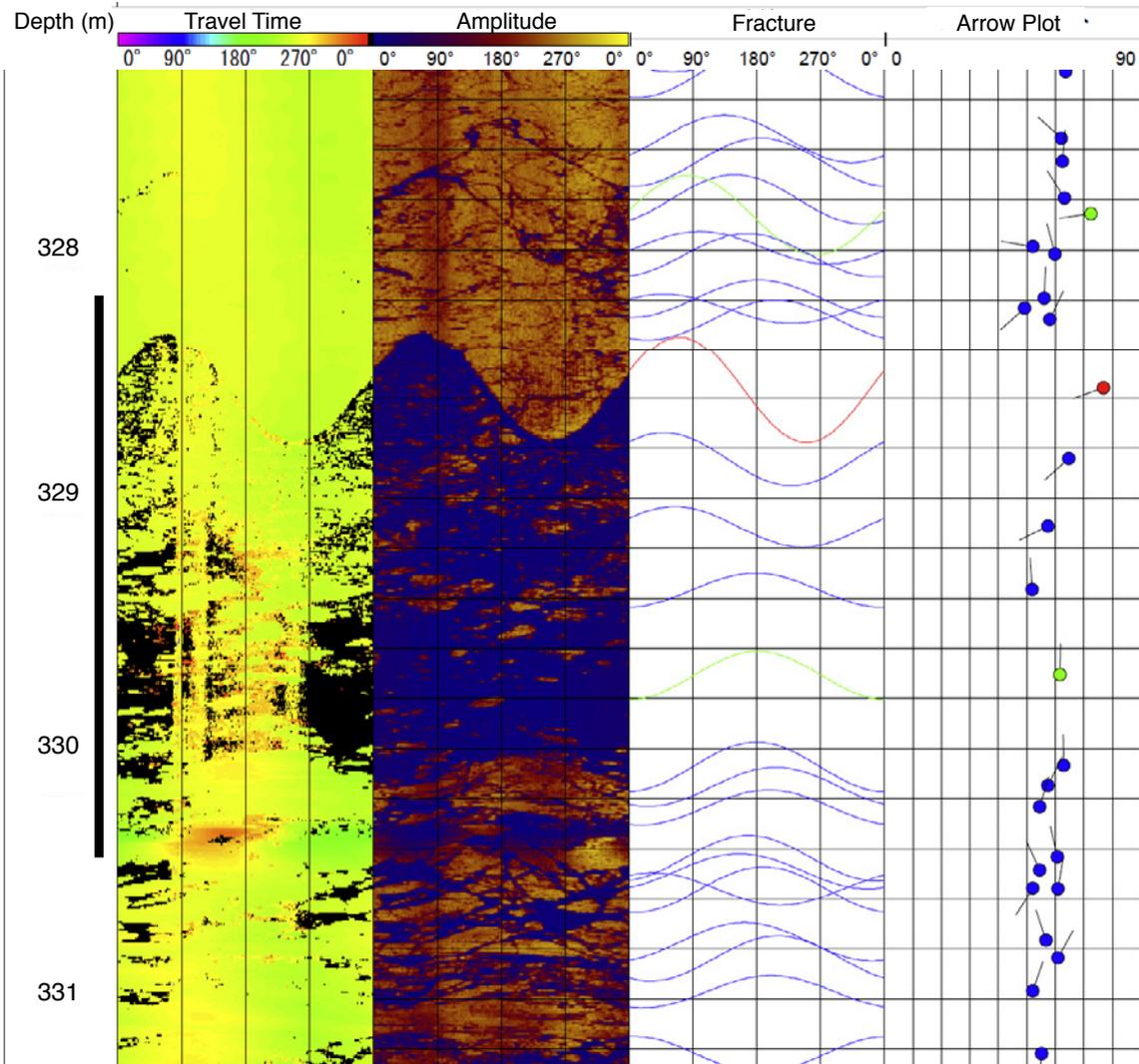
Hole-1



第7図. (続き)
Fig. 7. (continued)

(I)

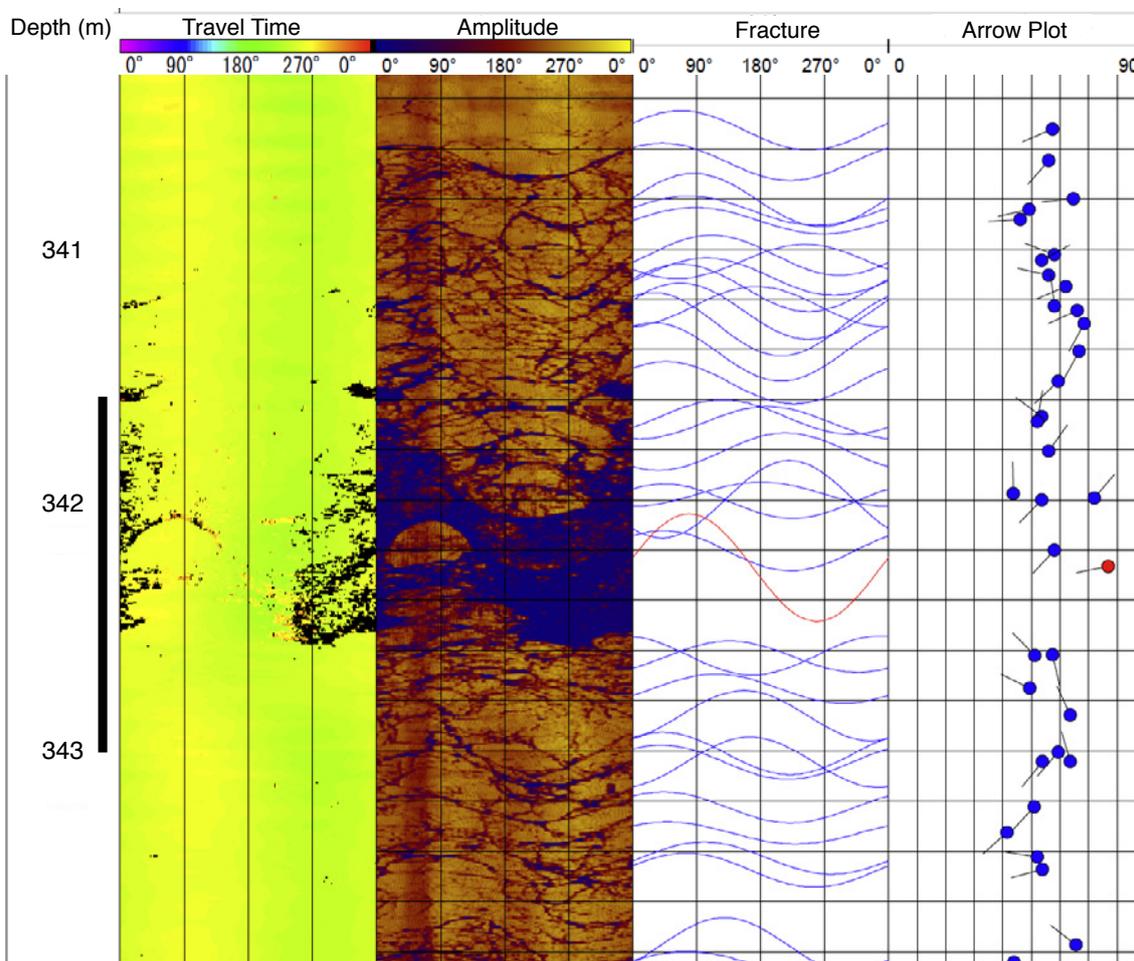
Hole-1



第7図. (続き)
Fig. 7. (continued)

(m)

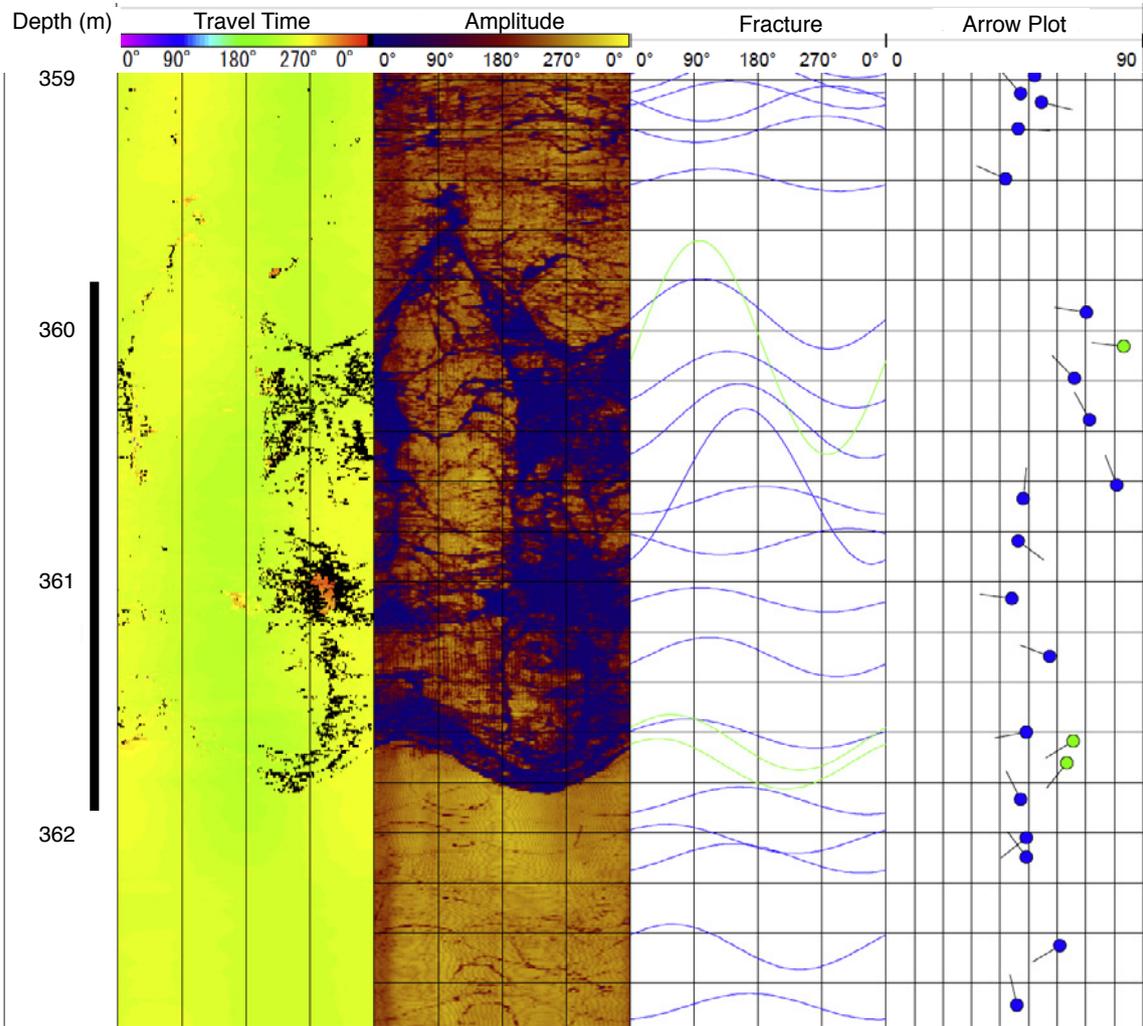
Hole-1



第7図. (続き)
Fig. 7. (continued)

(n)

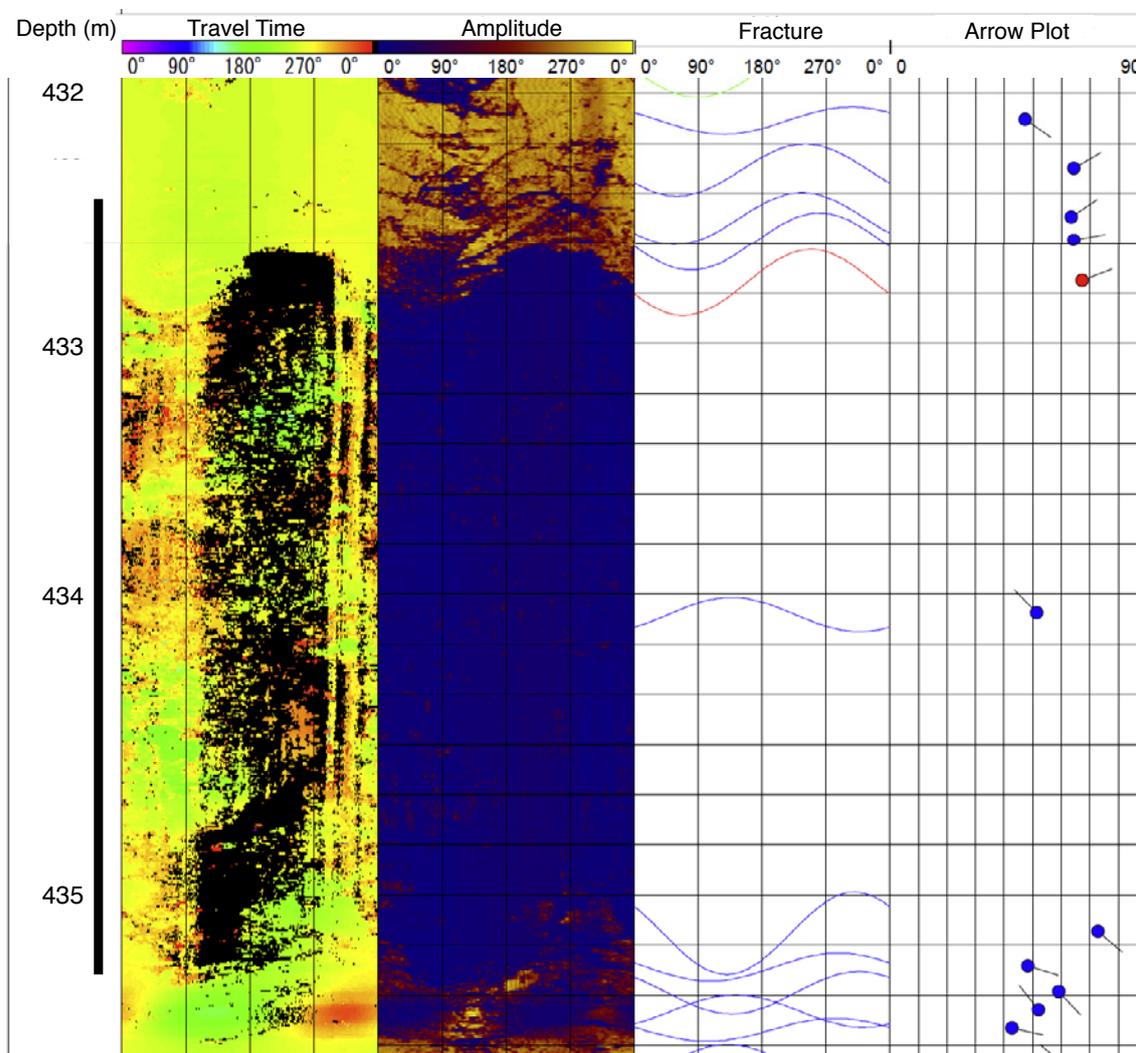
Hole-1



第7図. (続き)
Fig. 7. (continued)

(o)

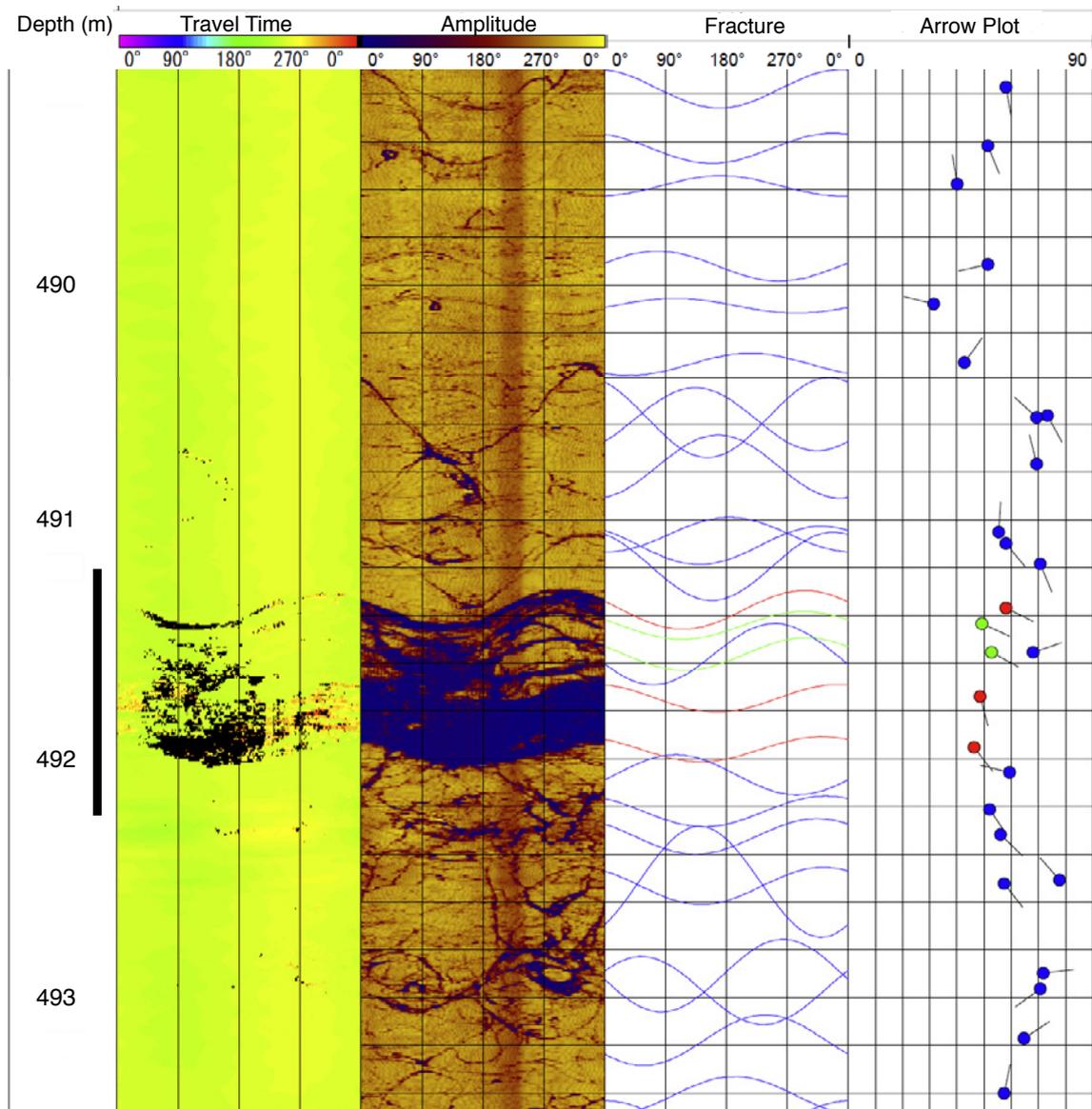
Hole-1



第7図. (続き)
Fig. 7. (continued)

(p)

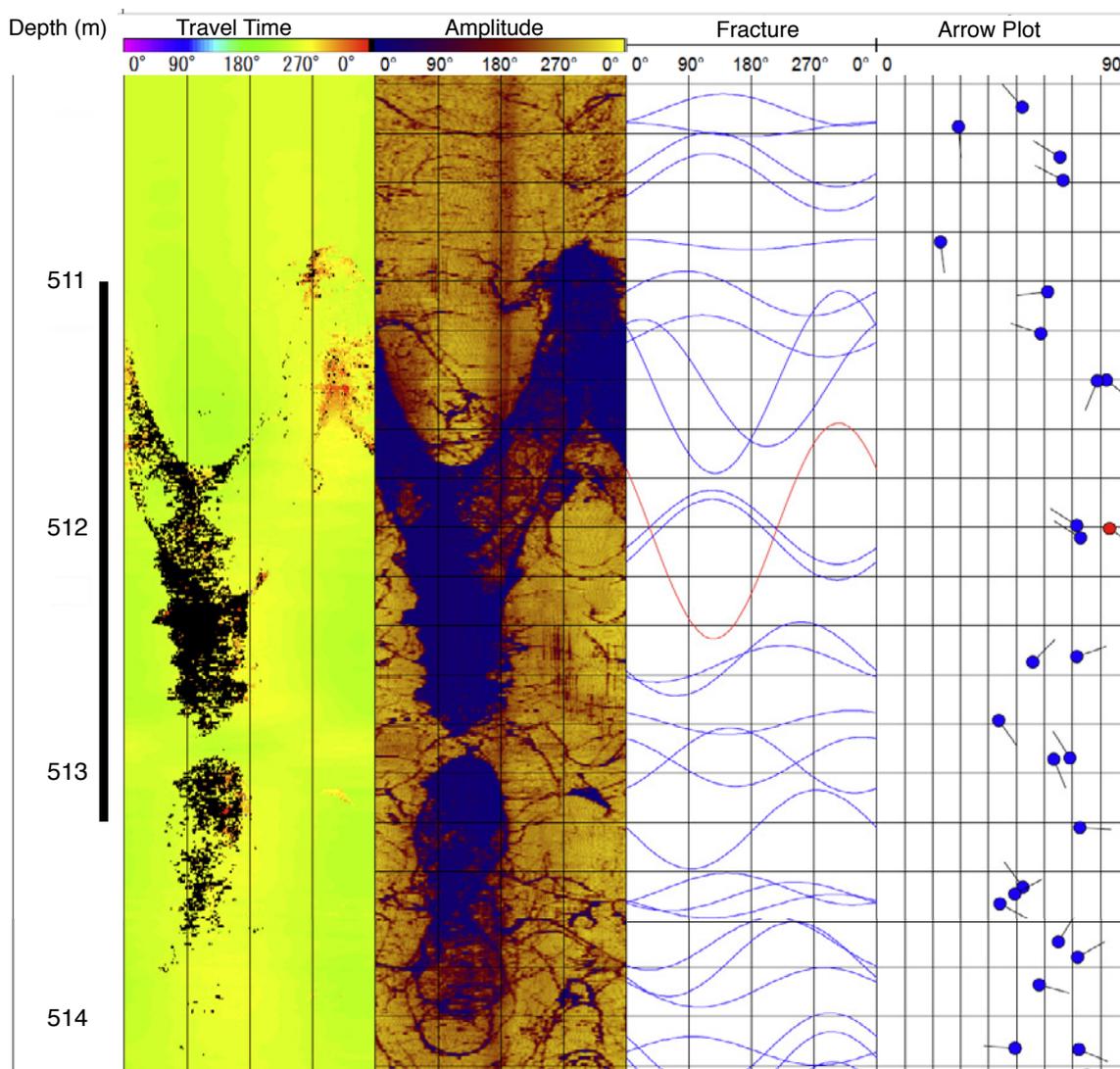
Hole-1



第7図. (続き)
Fig. 7. (continued)

(q)

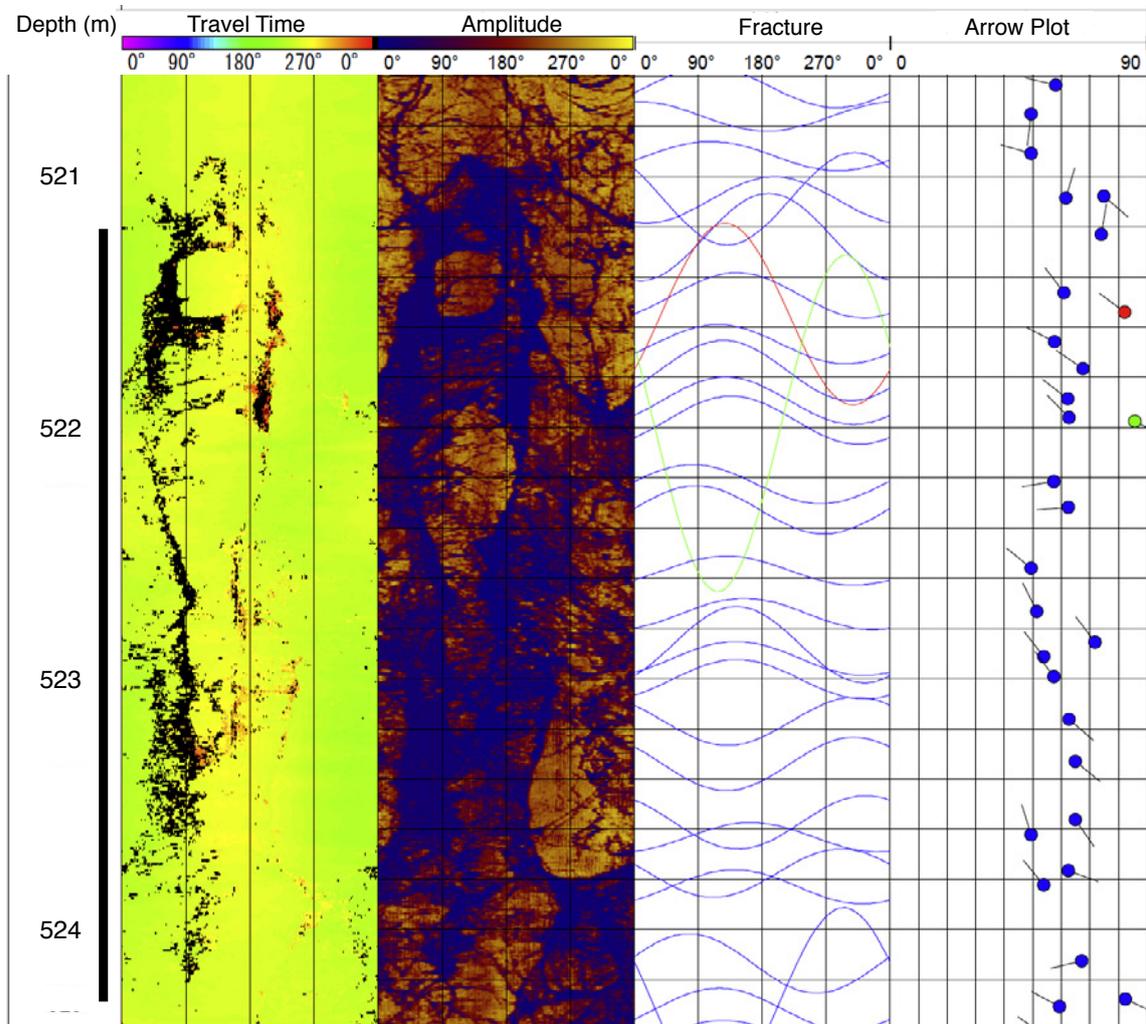
Hole-1



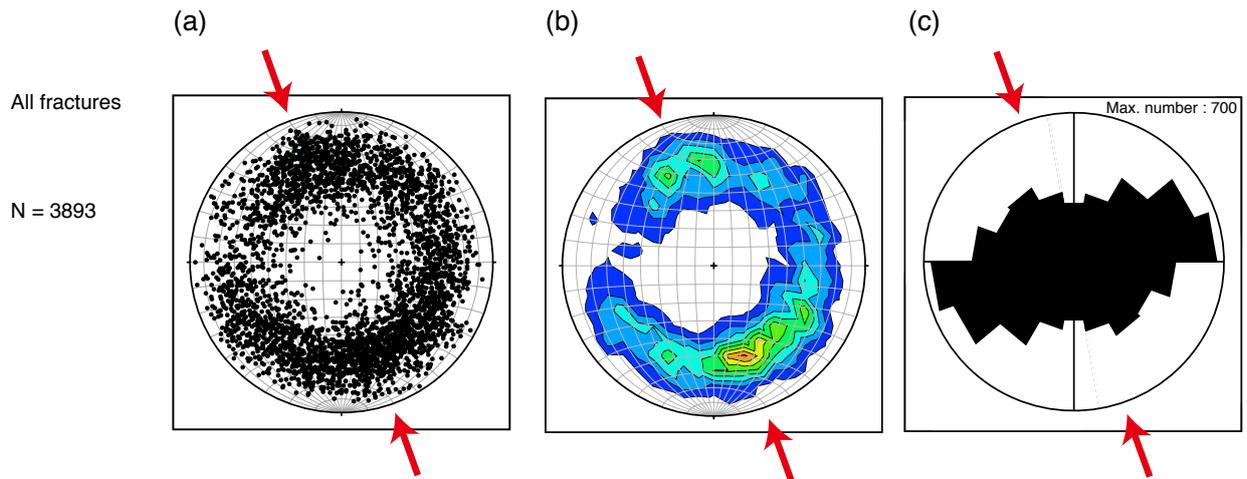
第7図. (続き)
Fig. 7. (continued)

(r)

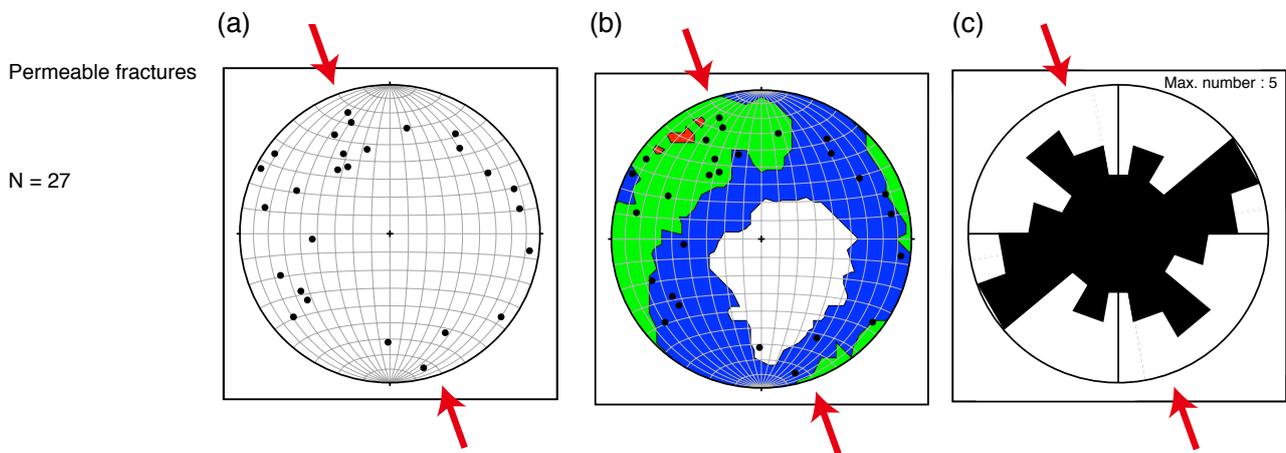
Hole-1



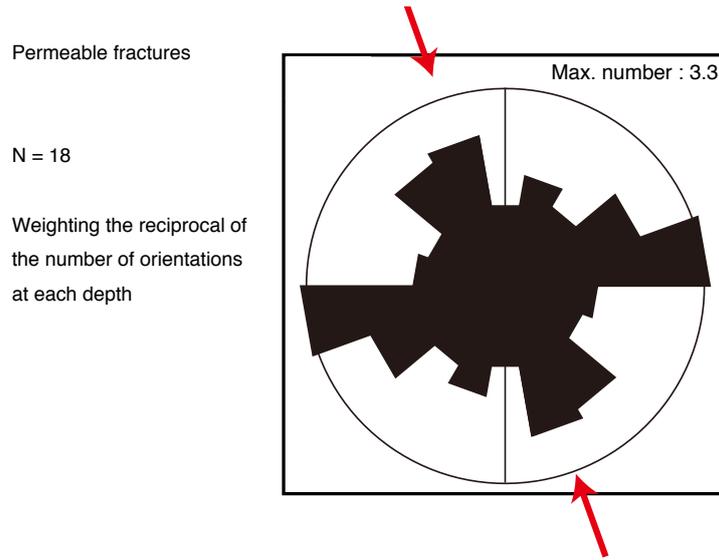
第7図. (続き)
Fig. 7. (continued)



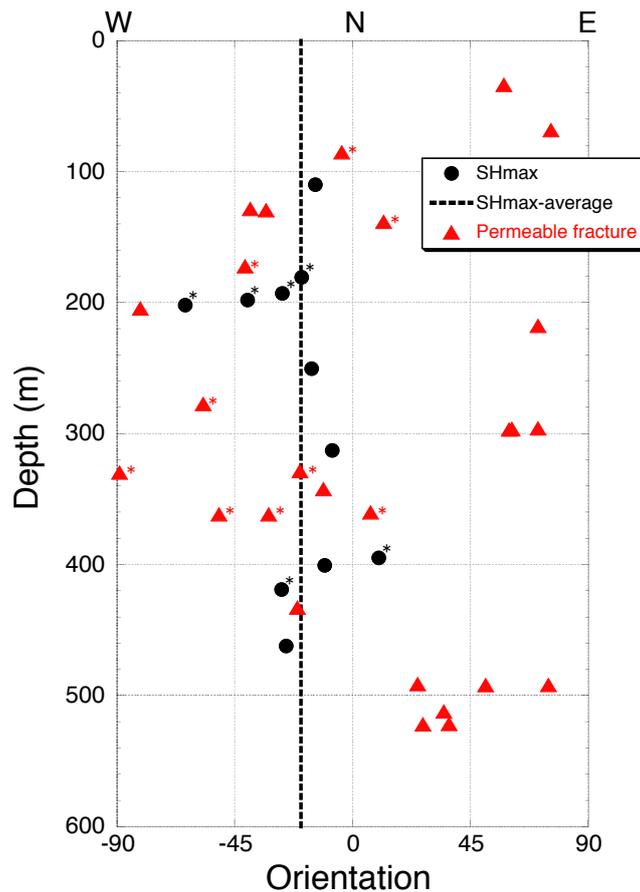
第 8 図. BHTV で検出した全ての亀裂の向き分布. 赤矢印は最大水平圧縮応力の方位 (N19.7W) を示す. (a) 亀裂面の法線方向の下半球面への等積投影図. (b) (a) の分布のコンター図. (c) 亀裂の走向のローズダイアグラム.
 Fig. 8. Distributions of the orientations for all fractures detected by using BHTV images. Orientation of maximum horizontal compressive stress is shown as red arrow. (a) Lower-hemisphere equal-area projection of the poles to fracture planes. (b) Contour for the distribution of the poles. (c) Rose diagram representing a histogram of the strike of the fractures.



第 9 図. 透水性亀裂の向き分布. 第 8 図と同じ.
 Fig. 9. The same as Fig.8 for the permeable fractures.



第 10 図. 各深度で求めた透水性亀裂の向きの数に応じて重み付けをした場合の透水性亀裂の走向のローズダイアグラム.
 Fig. 10. Rose diagram representing a histogram of the strike of the permeable fractures in case that the reciprocal of the number of the orientations of permeable fractures at each depth are weighted.



第 11 図. 透水性亀裂の走向の深度方向の分布. 赤色三角印は透水性亀裂の走向を示す. *印付きは, その亀裂の深度で電気伝導度検層でも比較的顕著な変化を示したことを意味する. 水圧破砕法で求めた最大水平圧縮応力の方位と平均方位を黒丸と黒色破線でそれぞれ示す. 水圧破砕法で生成された縦亀裂が相対的に明瞭であった測定値を*印付きで示す.

Fig. 11. Depth distribution of strikes of the permeable fractures. The red triangles indicate the strikes of the permeable fractures. The triangles with an asterisk denote that electric conductivity logging also showed relatively large anomaly at the depths of the fractures. The orientations of maximum horizontal compressive stress and the averaged orientation are also shown by black circles and black broken line, respectively. The asterisks indicate the measurements where the vertical fracture imprints induced by hydraulic fracturing technique are relatively clear.