

孔井内測定で検出した透水性亀裂の方向と応力場の関係： 産総研西尾善明観測点の結果

Orientations of permeable fractures detected by borehole measurements and their relation to in-situ stress at AIST observation borehole in Nishio, Aichi Prefecture, central Japan

木口 努¹・桑原保人²

Tsutomu Kiguchi¹ and Yasuto Kuwahara²

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)

² 韓国地質資源研究院 (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

Abstract: We examined a relationship between the orientations of permeable fractures and the state of in-situ stress to our understanding of the conditions that control the presence of subsurface permeable fractures at hard rock site in three boreholes at AIST observation station in Nishio, Aichi Prefecture. Hydraulic fracturing stress measurements showed the present-day stress field at Nishio station to be a reverse fault type with NNE-trending maximum horizontal stress. Combinational use of fluid electric conductivity loggings, sonic loggings and hydrophone VSPs in three boreholes were able to detect the depths of permeable fractures. Forty-two orientations of permeable fractures at the detected depths were determined from the borehole wall images obtained by borehole televiewer logging. We showed that the orientations of the permeable fractures tend to be distributed rather dispersively, while a relatively large number of the orientations are oblique to the stress orientation at 40 degrees or more. As a result of detailed comparison with the fracture orientation and both of a shear and tensile fracture model, it is likely difficult to explain this characteristic orientation of the permeable fractures in a relation to the current stress state.

キーワード: 透水性亀裂, 応力場, 電気伝導度検層, 速度検層, ハイドロフォン VSP, ボアホールテレヴィュア, 水圧破碎法, slip tendency, dilation tendency

Keywords: permeable fracture, in-situ state of stress, fluid electric conductivity logging, sonic logging, hydrophone VSP, borehole televiewer, hydraulic fracturing stress measurement, slip tendency, dilation tendency

1. はじめに

硬岩中に高い透水性を示す亀裂が存在する条件を明らかにするため, 木口・桑原 (2018) は産業技術総合研究所(産総研)が整備した新居浜黒島観測点(以降, 本稿では新居浜観測点と呼ぶ)において, 透水性亀裂の向きと応力場との関係などについての解析をまとめている。新居浜観測点の孔井で, 電気伝導度検層, 速度検層, ハイドロフォン VSP とボアホールテレヴィュア (BHTV) のデータを用いて求められた透水性亀裂の走向は全方位的に大きくばらついて分布し, 水圧破碎法により求めた応力場との相関は見られないという結果であった。これまで明らかにされてきた応力場と透水性亀裂の方位の関係については, 木口・桑原 (2018) で紹介したように, 最小主応力方位と相関のあるもの, 最大せん断応力と相関のあるもの, 無相関のものなど様々な事例があり,

必ずしも一つのモデルで統一的に説明できるものではないと考えられる。そこで, 本報告は, 透水性亀裂の解析と応力場の評価が可能となる信頼性の高いデータを取得した産総研西尾善明観測点についても新居浜観測点と同様の解析を行い, 考察を加えるものである。

愛知県西尾市に位置する西尾善明観測点は, 新居浜観測点と同じく, 産総研が整備した 16 の地下水等総合観測点の 1 つである。各観測点で実施した孔井内測定項目・仕様は地質条件や掘削状況などのために異なっているが, 西尾善明観測点は透水性亀裂に関する解析が可能となる物理検層やハイドロフォン VSP が実施され, さらに応力場を求めるための水圧破碎法が複数の深度で行われ, 新居浜やその他 3 つの観測点 (津安濃, 豊田神殿, 土佐清水松尾) とともに各種の測定データが充実した観測点の 1 つである。また, 2013 年に整備された最も新しい観測点

である西尾善明と新居浜では、掘削泥水中で電気伝導度検層を実施する手順や応力場評価のための水圧破碎法の機器の改良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られる。以上から、透水性亀裂の向きを決める条件を見出すための研究などを進めるために、新居浜観測点の解析に続いて、西尾善明観測点を選び、物理検層などの孔井内測定データを用いて、亀裂の向きや応力場との関係などについて整理した。

2. 西尾善明観測点の概要

産総研では、南海トラフ沿いの高度な地殻活動のモニタリングを実現するため、愛知県から紀伊半島及び四国周辺において、地下水位・地殻変動・地震などの観測が可能な多機能の地下水等総合観測点の整備を順次行い、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)。愛知県西尾市内に整備された西尾善明観測点(以後、本稿では西尾観測点と呼ぶ)は16の観測点の1つであり、2013年6月に完成した。第1図に西尾観測点の位置を地質図上の赤丸で示す。観測点の座標(世界測地系)と標高は、それぞれ、 34.8442°N , 137.1057°E , 39 mである。西尾観測点は三河地域内の幡豆山地の北西縁に位置し、この山地には1945年三河地震で確認された深溝—横須賀断層の横須賀セグメントが存在する。観測点はほぼ南北方向の断層から東に約1.5 km, ほぼ東西方向の断層から北に約2 km離れている。地質図に示されるように観測点周辺では領家変成岩類に属する片麻岩が分布し、観測点近傍の露頭では珪質片麻岩が確認されている。孔井から回収されたコアは領家変成帯の泥質片麻岩を主体として互層状に珪質片麻岩が出現し、花崗岩が貫入岩として認められ、一部の深度区間では破碎帯が存在する(北川ほか, 2014)。

西尾観測点は3つの鉛直孔井が掘削され、孔1, 孔2, 孔3の掘削深度は、それぞれ、601 m, 210 m, 42 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などの詳細と検層結果例は、木口ほか(2014)が取りまとめている。また、北川ほか(2019)も、孔井掘削と物理検層の仕様などについて説明している。

3. 水圧破碎法による応力場の評価

西尾観測点の原位置の地殻応力の値と方向は、佐藤ほか(2013)が孔1と2の2つの孔井のHQコアリングの掘削後に水圧破碎法を適用することにより得られている。なお、佐藤ほか(2013)では測定当時の全体概要が記述されているのみであり、その詳細な内容は北川ほか(2019)の報告書で参照することができる。

水圧破碎法は孔井を利用した応力測定法として従

来から広く用いられており、海外では Haimson and Cornet (2003) や ASTM International (2008) などが基準化を行い、推奨する測定装置・測定手順・データ処理・計算式などを示している。しかし、これらの基準は従来の水圧破碎法の理論に基づいており、国内で適用されつつある新しい測定理論とシステムによる方法と大きな差異がある。このため、公益社団法人地盤工学会は最大主応力値の測定結果の信頼性を向上させることなどを目的とし、新しい理論と測定システムに基づく基準「水圧破碎法による初期地圧の測定方法」(地盤工学会, 2018)を策定した。西尾観測点に適用した水圧破碎法は、基準策定期よりも前に実施されたが、この基準に適合した測定装置や計算式などを採用している。また産総研地下水等総合観測点では西尾観測点以外に6観測点で水圧破碎法を実施しているが、これら地点の水圧破碎法も、基本的に上記基準に適合している。西尾観測点で使用した測定装置は、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決定できるように、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ている。また、最大主応力値を求めるために、従来、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用いられていたが、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ため、亀裂再開口圧を用いる式を採用した。この式では一度開いた亀裂の内部には試験区間と同一の間隙水圧が作用することを考慮した修正がなされている(伊藤, 2004)。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の9深度と孔2の4深度の合計13深度で実施された。このうち9深度の岩種は片麻岩であり、残りの4深度は花崗岩であった。水圧破碎で生成された縦型の亀裂を亀裂認定のための型撮りパッカーにより確認した例を第2図(a), (b)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できた。

北川ほか(2019)で示す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), (b)に示す。(b)図に示す13深度の最大水平圧縮応力の方位にはばらつきがあるが、主に北北東から北東方向の範囲に分布する。13深度の方位を平均すると $\text{N}32.9^{\circ}\text{E}$ (図中の黒色破線)である。なお、全体の傾向と異なる北西の方位を示す2深度について、浅部の深度71 mでは縦型の亀裂の長さが他の深度に比べて短いことなどから方位の信頼性が他の深度よりも低い可能性があるが、この2深度を取り除いた11深度から平均方位を求めると $\text{N}34.7^{\circ}\text{E}$ であり、全ての深度を用いた平均値と大きな差はない。

北川ほか(2019)によると深度19~590 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 $2.47\sim 2.71\text{ g/cm}^3$ の範囲にあり、その平均値 2.64 g/cm^3 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、13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、 0.0766 MPa/m 、 0.0451 MPa/m である。(a)図に示すように得られた西尾観測点の応力場は、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。また、ここで得られた応力値は、後述の第6章の第10図のモールダイアグラムを用いて応力場の影響を検討する際、せん断応力/法線応力が0.6よりも大きくなる領域が含まれることから、応力と亀裂の向きを十分議論できる程度に大きな差応力の応力場であると考えられる(例えば、Barton *et al.*, 1995)。なお、木口・桑原(2018)では明示的に述べなかったが、この観点から新居浜観測点も十分大きな差応力場であった。

4. 透水性亀裂の検出

西尾観測点では孔井を横切る透水性の亀裂を検出するため、新居浜観測点と同様、物理検層の電気伝導度検層、速度検層(ソニック検層)とハイドロフォンVSPの3つの手法をHQコアリングの掘削後に適用した。孔1, 2, 3で物理検層を適用した深度は、それぞれ、 $200\sim 570\text{ m}$ 、 $30\sim 210\text{ m}$ 、 $16\sim 42\text{ m}$ であるので、3つの孔井を合わせることで、地表付近から深度 570 m までのデータを連続的に取得したことになる。ハイドロフォンVSPは孔1と2のみで実施した。また、掘削時に孔井内で逸水や逸泥した情報があれば、その深度付近に透水性亀裂の存在が示唆されるが、西尾観測点の孔井では地表付近の浅部で逸泥防止を行っただけであり、それ以深で顕著な逸水・逸泥は発生しなかった。また、物理検層やハイドロフォンVSPの実施時に孔井の湧水は見られなかったことから西尾観測点の間隙水圧は高くないと考えられる。

電気伝導度検層、速度検層とハイドロフォンVSPそれぞれにより透水性亀裂を検出する方法や特徴については、木口・桑原(2018)に説明されているものと同様である。この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、深度方向に高分解能で検出することが可能であり、高品質のデータであるならば高い信頼性で透水性亀裂の深度を求めることに最も適していると考えられるので、まず、電気伝導度検層のデータを用いて透水性亀裂の深度を決定することを試みた。

透水性亀裂を検出するための電気伝導度検層では孔内水を地層水の電気伝導度と異なる水(例えば、脱イオン水)に置換した後に測定することが標準的な仕様である。しかし、西尾観測点の孔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に置換せずに、比重が $1.04\sim 1.07\text{ g/cm}^3$ の掘削用泥水のままでの測定となった。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や、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、透水性亀裂の深度の検出に不利な条件であった。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。

第4図(a)~(c)に、3つの孔井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電気伝導度の深度方向の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 $10\sim 30\text{ m}$ ずつ低下させ5回目では約 80 m まで低下させた。孔2も測定ごとにポンプで揚水し水位を順次低下させながら合計5回の測定を行い、管頭から最大約 14 m 低下させた。孔3では測定ごとに水位を $1\sim 2\text{ m}$ 低下させ5回目では 5 m まで低下させた。

なお、新居浜観測点でも、掘削泥水中で実施した電気伝導度検層のデータから透水性亀裂の深度を検出することを試みた(木口・桑原, 2018)。しかし、新居浜での測定データには、1)深度方向に短波長でパルス状に大きく変動する区間があり、地層水の流入による変化と区別できない。2)ある深度における変化の再現性を繰り返し測定で確認できない。3)ほぼ全深度で高周波の変動がありノイズレベルが高いなどの問題があり、透水性亀裂の深度を高い信頼性で高分解能に求めることはできないとした。一方、西尾観測点の掘削泥水中での孔1と2の測定データ(第4図(b), (c))では、上記の1)や2)のような特徴は見られず、また、孔1でのノイズレベルはやや高いが変化の検出が可能な範囲内であった。従って、西尾観測点では掘削泥水中での測定であっても電気伝導度の深度方向の変化を高い信頼性で検出することが可能であると判断し、以下に説明するように3孔井の電気伝導度検層の結果から透水性亀裂の深度を求めた。

まず、第4図(a)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 2 m 低下させた2回目の測定で 31.2 m と 35.7 m の2つの深度で明瞭な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透水性亀裂が存在することがわかる。また3~5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。

孔2のデータを第4図(b)に示す。ほぼ全深度において孔3のデータと同じ程度にノイズレベルが低く、電気伝導度の変化を精度よく求めることが可能である。水位を10 m～14 m低下させた3～5回目の測定において、電気伝導度が低くなるピークが複数の深度で存在し、そのピークの深度よりも深くなると急激に値が高くなる変化となり、また繰り返し測定により同一深度での変化の再現性が確認できる。従って、これら6つの深度に透水性亀裂が存在し、泥水よりも低い電気伝導度の地層水が流入していると考えられる。

第4図(c)に示す孔1のデータでは、孔2と3に比べるとノイズレベルが高いが、水位を45～80 m低下させた3～5回目の測定において、そのノイズレベルよりも有意に大きく電気伝導度に変化することをいくつかの深度で確認できる。その変化は孔2のデータと同じく、前後の深度よりも電気伝導度が低くなるピークを示す。深度313.8 m, 393.6 m, 401.8 mでは、電気伝導度の有意な変化を確認できるのは5回目の測定だけであるが、その変化は明瞭であり、ピークを示すデータの変化はそれ以浅の深度における繰り返し測定で再現性が確認できる変化の形状と似ていることから、これら300 m以深の変化も透水性亀裂の存在と地層水の流入によるものと考えられる。孔1では8深度に透水性亀裂が存在することがわかった。以上のように、3つの孔井で電気伝導度の変化から透水性亀裂が存在する深度を合計16深度求めることができた。

次に、速度検層とハイドロフォンVSPによる結果を説明する。孔2と1の速度検層とハイドロフォンVSPの記録を、それぞれ、第5図(a), (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(b), (c))を挿入している。赤い矢印はそれぞれの手法により検出した透水性亀裂の深度である。木口・桑原(2018)と同じように、速度検層ではストーンレー波の反射・減衰・速度低下などの変化を示す深度から、ハイドロフォンVSPでは初動P波からチューブ波が発生する深度から、それぞれ検出した。電気伝導度検層で明瞭な変化を示した深度、例えば、孔2の100.3 m, 154.9 mや孔1の252.7 m, 393.6 m, 401.8 mなどでは、速度検層とハイドロフォンVSPでもそれらの深度近傍で透水性亀裂を検出している。北川ほか(2014)によるコア観察では、深度250 mと400 m付近に顕著な破砕帯が存在し、また破砕帯の一部の亀裂面で鏡肌が確認された。これらの破砕帯は断層活動により形成されたことが推察され、その中の亀裂が高い透水性を示すと考えられる。また、孔2と1の深い深度区間160～210 mと410～570 mにおいて、電気伝導度検層では明瞭な変化を確認できなかったが、

速度検層とハイドロフォンVSPがともに透水性亀裂を検出している深度がある。これらの深度では、電気伝導度検層が掘削泥水中の測定であったことから深い深度では孔内圧力の低下が不十分であり十分な量の地層水が流入できなかった可能性も考えられる。また、孔1の深度313.8 mを除く電気伝導度検層で検出した各深度では、下記に述べるように、各検層とハイドロフォンVSPによる深度の誤差を2 m程度と考えると、その範囲内では速度検層またはハイドロフォンVSPで検出している。深度313.8 mの近傍で2つの手法から検出されなかった原因は明らかでない。なお、ハイドロフォンVSPの孔1の深度310～380 m区間において10 m間隔で初動P波から発生し上方に伝播する波形が見られるが、これらは孔井内で10 mずつ深度を移動ながら測定したハイドロフォンケーブルの下端から発生していることを測定時に確認しており、透水性亀裂が発生の原因ではない。

ハイドロフォンVSPで検出した透水性亀裂の深度のほとんどは、その深度近傍の速度検層で検出した深度との差が1 m以内であり、両者による深度は概ね対応していると言える。速度検層ではハイドロフォンVSPに比べて検出される深度が多く、その原因としては、木口・桑原(2018)でも考察したように、速度検層がより高周波での測定のため孔井の孔径変化など、透水性亀裂以外の敏感な変化も捉えている可能性が考えられる。速度検層とハイドロフォンVSPでそれぞれ観測されたストーンレー波の反射・減衰やチューブ波の発生などの波動現象に孔井の孔径変化が影響を与える可能性については、木口ほか(1996)や木口・桑原(2018)と同じような考え方で、西尾観測点のキャリパー検層(木口ほか, 2014)を用いて孔径値から深度1 m区間中の孔径変化の平均勾配を連続的に算出し、チューブ波の発生の有無との対応を確認した。その結果、ハイドロフォンVSP記録においてチューブ波を発生しない深度の中で孔径が大きく変化し大きな平均勾配を示す深度(例えば、孔2の50.0 m)の値と比べて、チューブ波を発生する全ての深度でそれよりも小さい平均勾配となるので、西尾観測点のハイドロフォンVSP記録のチューブ波の発生に孔径変化が与える影響は小さいと考えた。本論文では、速度検層とハイドロフォンVSPの2つの手法によりともに検出された場合にその深度に透水性亀裂が存在するとした。ハイドロフォンVSPで検出した孔1の深度392.0 mと478.5 mではその近傍の速度検層による深度と約2～2.5 m異なるが、ハイドロフォンVSP記録の連続する深度の波形にチューブ波の発生が重なり発生深度が幅を持つ可能性があることやVSP記録の初動P波の周波数が約100 Hzであり速度検層よりも空間分解能が低いことなどの影響が重なり、この程度の誤差が生じると考え、透水性亀裂の深度として求めた。なお、VSP

の測定は深度 0.5 m 間隔である。西尾観測点ではハイドロフォン VSP で検出した深度は全て速度検層でも検出された。以上から、前述した電気伝導度検層で検出した深度に加えて、速度検層とハイドロフォン VSP の 2 手法により合計 12 個の透水性亀裂の深度を求めた。このうち 7 深度は電気伝導度検層で検出していない深度である。

以上、西尾観測点では、一部を除き高品質の電気伝導度検層のデータにより地層水の流入深度を検出し、深度方向に高分解能で透水性亀裂の深度 16 個を求めることができたと考えられる。さらに、速度検層とハイドロフォン VSP で観測した波動現象を用いて、2 つの手法による深度の対応や孔径変化による影響などを検討した結果、泥水中で実施したために電気伝導度検層で検出できなかった可能性がある深い深度などを含めて、7 深度を追加した。3 つの手法から求めた合計 23 深度を第 1 表に示す。表中の深度に、どの手法によって検出したかの区別を示している。速度検層とハイドロフォン VSP からのみ検出した場合の深度は速度検層による結果、電気伝導度検層、速度検層とハイドロフォン VSP とともに検出した場合の深度は、電気伝導度検層による結果として示している。

5. ボアホールテレビュアによる透水性亀裂の向き決定

第 4 章で求めた深度に存在する透水性亀裂の傾斜方位と傾斜角を、ボアホールテレビュア (BHTV) の孔壁画像により決定した。BHTV の原理などは、木口・桑原 (2018) を参照されたい。木口・桑原 (2018) と同じように、BHTV の画像から開口性の有無も含めた亀裂の読み取りは以下の考え方に従った。孔井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するが、これだけでは開口性の有無の区別は明瞭でない。開口性の場合には開口部における反射点が孔壁面よりも奥になるため走時遅れの異常が生じるであろうから、走時画像で認定できる亀裂を開口性亀裂とする。亀裂の傾斜方位と傾斜角は孔壁画像中に現れるサインカーブの形状から決定する。西尾観測点では、BHTV の画像から、ほぼ全深度で様々な向きの亀裂が存在することがわかり、また、亀裂の幅や亀裂形状の連続性などにおいて様々な特徴が見られる。3 孔井の BHTV 画像から求めた全ての亀裂は 3,964 個であり、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。

第 1 表に示す 23 の全ての深度において、BHTV 画像において複数の異なる方向の亀裂が認めら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難しい。一方、速度検層により観測されるストーンレー波は、検出した深度付近で 1~2 m 程度

の幅を持った深度区間で異常を示す傾向であることから、本章ではこの深度区間を透水ゾーンと呼び、この透水ゾーンから透水性亀裂の向きを求めるとした。なお、電気伝導度検層で検出したがストーンレー波で異常を示さなかった深度では、電気伝導度検層で検出した深度を中心として ± 0.5 m の区間を透水ゾーンとした。各透水ゾーンの深度区間を第 1 表に示す。表中の深度区間に、ストーンレー波の異常から求めた区間か電気伝導度検層による検出深度から求めた区間かの区別を示している。

木口・桑原 (2018) と同じく以下の方針により、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こととした。1) 透水ゾーンの深度区間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) 透水ゾーンの深度区間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碎帯があり、破碎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。各深度の透水ゾーン付近の BHTV 画像を第 6 図 (a)~(w) に示す。図中の黒色バーは透水ゾーンの区間を意味する。なお、第 6 図 (d) 以後は、表示の大きさを小さくしても読者は十分判断できると考え、縮小して示した。

BHTV 画像から求めた亀裂については、目視により、亀裂形状の明瞭性と開口性を基準とし、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た。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 3,639 個あり、赤と緑に区分した亀裂は、それぞれ 97 個と 228 個であった。この分類による色分けは、第 6 図の各図の右から 2 番目と右端の列の図に例示されている。第 6 図の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。透水性亀裂の向きを求めた例として、第 6 図 (a) に示す孔 1 の深度 290.0 m 付近では、速度検層で顕著な異常を示す深度区間内に、傾斜角約 60 度で北西の走向 (傾斜方位：南西) の向きで開口性の亀裂 (図中緑色) が 1 つ存在するので、この亀裂の向きでこの深度を代表した。孔 2 の深度 133.3 m 付近 (第 6 図 (b)) では速度検層で異常を示す深度区間内に、傾斜角約 60 度でほぼ東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 133.6 m と 133.7 m の 2 つの亀裂の向きでこの透水ゾーンを代表した。第 6 図 (c) に示す孔 1 の深度 393.6 m 付近では、速度検層で異常を示す深度に密に亀裂が重なり合う約 1 m の区間があるが、区間内で開口性の亀裂の形状や向きを選ぶことが困難である。この区間の上端と下端に緑色で示

す明瞭な亀裂が存在するため、この2つの境界形状からこの深度を代表する向きとした。なお、23深度のうち4深度(第6図(h), (k), (o), (t))では複数の亀裂が存在するが、明瞭に開口性を示す亀裂は見られないため、これらの深度を代表する透水性亀裂の向きを求めなかった。

以上のように求めた透水性亀裂の向きを第1表にまとめる。第1表では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示している。傾斜方位は北から時計回りの角度で示す。第4章で検出した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。木口・桑原(2018)による新居浜観測点の結果と同じく、各透水ゾーンでは複数の異なる方向の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、透水ゾーンの向きと応力場の関係の傾向を調べる上では、十分に検討の価値があると考えた。

6. 透水性亀裂の向きと応力場の関係

透水性亀裂の向きの傾向を検討するために、最初に、西尾観測点の3つの孔井の全ての亀裂の向きの分布について見られる特徴を説明する。BHTVで求めた全ての亀裂の向きの分布を第7図(a)~(c)に示す。(a)図は全ての亀裂3,964個の亀裂面の法線方向を下半球面に投影したものであり、(b)図はそのコンター図、(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N32.9°Eを図中に赤色矢印で示す。第7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20~70度の範囲に多く分布し、走向は東北東-西南西に卓越する。この卓越する走向は最大水平圧縮応力の方位と約40度で斜交することになる。観測点周辺で確認された珪質片麻岩の露頭では、片麻状構造の走向はおおよそN80°Eであり(北川ほか, 2014)、孔井内の亀裂の卓越走向とほぼ対応することから、この構造が亀裂の特徴的な走向に関係している可能性がある。なお、新居浜観測点における全ての亀裂の向きの特徴は、傾斜角が中~高角が多く、走向は応力方位とほぼ直交する東北東-西南西に卓越する傾向であり(木口・桑原, 2018)、これは観測点の南約7kmにある中央構造線の石鎚山脈北縁区間の走向とほぼ同じである。このようにこれまで解析した2観測点では、BHTVで認められる全ての亀裂の向きは応力場と関係していると言うよりも、周辺の構造と関係づけられる。また、西尾観測点でも新居浜観測点と同じく低角の亀裂が少ない傾向があり、木口・桑原(2018)が説明したように、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に、BHTV画像から高角の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。

次に第5章で求めた42個の透水性亀裂の向きの分布を第8図に示す。(a), (b)図では透水性亀裂の向きを求めた手法により色分けをした。黒丸は電気伝導度検層、速度検層とハイドロフォンVSPでともに検出した亀裂、赤三角は電気伝導度検層だけで検出した亀裂、青菱形は速度検層とハイドロフォンVSPだけで検出した亀裂を意味する。透水性亀裂全体で傾斜角は50度以上の高角を示す傾向があり、走向については東北東-西南西から東-西の走向の亀裂の数が多くように見える。亀裂を3つのグループに色分けしたが、それぞれのグループの向きは全体の傾向と大きく異なる傾向を示さないと思われる。第5章で説明したように、第4章で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、木口・桑原(2018)と同じく、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した図も作成する。例えば、深度31.2m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。重み付けを行った亀裂の走向の分布である第8図(d)のローズダイアグラムを見ると、走向は様々な方位にばらついて分布するが、全方位的に均等に分布するのではなく、最大水平圧縮応力の方位と平行に近い走向は少なく、応力方位と40度程度以上の角度をなす走向の亀裂が多いことがわかる。

西尾観測点は第3章で説明したように差応力が十分大きい応力場である。また、第1章で説明した通り透水性亀裂の向きの特徴を現在の応力場と直接関係付けて説明するせん断型と引張り型の2つの亀裂モデルが提案されており、例えば、Kulikowski *et al.*(2018)やBarcelona *et al.*(2019)は様々な向きの亀裂面に作用する応力を計算し、せん断型亀裂モデルではslip tendency(Morris *et al.*, 1996)を、引張り型亀裂モデルではdilation tendency(Ferrill *et al.*, 1999)を求めることによって、高い透水性が期待される亀裂の向きの傾向を議論している。ここでは、これらと同様にこの2つの亀裂モデルと西尾観測点の亀裂の向きとの対応を調べるために、水圧破砕法から得た平均的な応力場を仮定して得られたslip tendency及びdilation tendencyと亀裂の向きを下半球面に重ね合わせて投影した図を作成した(第9図(a)~(d))。(a), (b)図に透水性亀裂の向きを第8図と同じ色分けで示し、(c), (d)図に全ての亀裂の向きを黒丸で示す。(a), (c)図のslip tendencyにおいて高い透水性が期待される亀裂の向きは、暖色系の高い値で示される。(c)図の全ての亀裂の中には高い値の領域に含まれる亀裂

が存在するが、(a)図と比較するとそれらの多くは透水性亀裂ではないことがわかる。これは、せん断型亀裂モデルにより西尾観測点の透水性亀裂の向きの特徴を説明することは難しいことを示していると考えられる。このことは、各亀裂面に作用する法線応力とせん断応力を3次元モーダイアグラムに表示した第10図においても同様に示される。Barton *et al.*(1995)は、ある応力場で亀裂面における摩擦係数が0.6以上となる向きの亀裂を、せん断破壊しやすい臨界応力状態にあると分類し、高い透水性を持つことが期待できるとして、3地点の孔井データにこの分類を適用した。(a)図に示す透水性亀裂の応力状態(図中の赤丸)の多くが、摩擦係数が0.6より小さくなる領域に分布する。一方、(b)図で高い透水性を示さない亀裂の中に摩擦係数が0.6よりも大きくなる領域に含まれるものがあることが示され、透水性亀裂の向きの傾向はせん断型亀裂モデルでは説明できないことがわかる。また、新居浜観測点の透水性亀裂の向きも木口・桑原(2018)で示したようにせん断型亀裂モデルで説明できなかった。このように、Barton *et al.*(1995)ではせん断型亀裂モデルで説明でき、西尾観測点と新居浜観測点では説明できなかったことの原因は明らかではないが、前者の地点は横ずれ断層型と正断層型の応力場であり、後者はいずれも逆断層型応力場という違いがあったことも含めて検討する必要があるかもしれない。

引張り型亀裂モデルについて見ると、高い透水性が期待される亀裂の向きは、第9図(b),(d)で高い値を示す低角または走向が応力方位と平行に近い北北東-南南西付近となる領域である。せん断型亀裂モデルの場合と同様、全ての亀裂の中には高い値を示す亀裂もあるが、(b)図と比較するとそれらの亀裂は必ずしも透水性亀裂ではない。むしろそれらよりも低い値となる向きの亀裂が高い透水性を示す傾向であり、透水性亀裂は引張り型亀裂モデルでも説明できないと言えるであろう。

次に、透水性亀裂の走向が深度と何らかの相関があるのかを見るため、水圧破碎法で求めた最大水平圧縮応力の方位とともに、透水性亀裂の走向の深度方向の分布を第11図に示す。透水性亀裂の走向は第8図と同じ色分けをしており、応力方位は緑四角で示している。これを見ると、透水性亀裂の向きや、それと最大水平圧縮応力の方位との差が、特に深度方向の影響を受けているようには見えない。第12図(a)~(e)に、亀裂頻度、走向、傾斜角、slip tendency及びdilation tendencyの亀裂特性についての深度方向の分布の結果をまとめる。(a)図の色は第5章で説明した第6図の亀裂の色分けと同じである。また、(b)~(e)図で灰色丸印は全ての亀裂を示し、透水性亀裂を示す黒丸、赤三角、青菱形の色分けは第8図と同じである。亀裂頻度を示す(a)図から、亀裂頻度の小さい230 m, 340 m, 450 mなどの付近では透水性亀

裂は存在せず、透水性亀裂の存在する深度は亀裂頻度の大きな深度区間と対応する傾向が見られる。しかし、高い亀裂頻度を示す深度区間内に存在し、かつ高いtendencyを示す亀裂が必ずしも透水性亀裂ではないことから、亀裂頻度と応力場以外に透水性亀裂の存在に影響を与える要因があると思われる。

木口・桑原(2018)で報告した新居浜観測点でも、西尾観測点と同じく差応力が大きい応力場であったが、その透水性亀裂の向きは、全方位的に大きくばらつく傾向であり、応力場を用いてその向きの特徴を説明することはできなかった。今回、西尾観測点でも同様に透水性亀裂の向きの傾向を現在の応力場と関係付けて定量的に説明することが困難であった。このように応力場と関係しない向きを持つ透水性亀裂の存在の例を示したLaubach *et al.*(2004)は、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している。また、透水性亀裂の向きが応力場と関係せずばらつく場合には、直径約10 cmの孔井の壁面よりも大きなスケールでは応力場と関係するある方向の大きなトレンドで透水性亀裂は分布しているが、その亀裂が分岐や屈曲をしたことによる不規則な亀裂の向きのばらつきを孔壁面で微視的に見ているという可能性もあるかもしれない。

7. まとめ

産総研地下水等総合観測点の西尾観測点において、3つの孔井で電気伝導度検層、速度検層とハイドロフォンVSPを実施することにより、3つの手法を用いて透水性亀裂が存在する深度を求めた。BHTVの孔壁画像を用いることにより、検出した各深度において代表する透水性亀裂の向きを42個決定した。BHTVから求めた、透水性亀裂以外の亀裂も含む3,964個の全ての亀裂については、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ついては、水圧破碎法から求めた応力方位と40度程度以上の角度をなす走向のものが多くなる特徴がある。しかし、せん断型と引張り型の亀裂モデルによる詳細な検討を行った結果、これらは必ずしも高いせん断応力、あるいは高い引張り応力に対応する亀裂の走向・傾斜角に対応しておらず、現在の応力場と直接関係付けて説明することは難しいと考えられる。

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の小泉尚嗣氏(現所属：滋賀県立大学)及び多くの関係者の方々に、西尾善明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。西尾善明観測点の観測井は株式会社日さくにより掘削され、物理検層、水圧

破碎法, ハイドロフォン VSP は, それぞれ, 株式会社物理計測コンサルタント, ジオテクノス株式会社, サンコーコンサルタント株式会社により実施されました. 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, 塚本斉氏に協力して頂きました. 査読者である北川有一氏と編集担当者である松本則夫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

- ASTM International (2008) Standard test method for determination of in-situ stress in rock using hydraulic fracturing method, D4645-08, 1-7.
- Barcelona, H., Yagupsky, D., Vigide, N. and Senger, M. (2019) Structural model and slip-dilation tendency analysis at the Copahue geothermal system: Inferences on the reservoir geometry. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 375, 18-31.
- Barton, C.A., Zoback, M.D. and Moos, D. (1995) Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock. *Geology*, 23, 683-686.
- 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.
- 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) 水圧破碎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.
- 地盤工学会 (2018) 水圧破碎法による初期地圧の測定方法. JGS-3761-2018, 公開手続中.
- 木口 努・桑原保人 (2018) 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. 活断層・古地震研究報告, 18, 73-114.
- 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.
- 木口 努・桑原保人・小泉尚嗣・塚本 斉・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.
- 北川有一・高橋 誠・小泉尚嗣・伊藤 勉・堀 信雄・長藤亮輔 (2014) GSJ コア西尾善明観測点資料. 地質調査総合センター研究資料集, 597, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 北川有一・高橋 誠・小泉尚嗣・堀 信雄・伊藤 勉 (2019) 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 (愛知県西尾市地区) 報告書. 地質調査総合センター研究資料集, 686, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 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.
- 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 斉, 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.
- Kulikowski, D., Amrouch, K. and Burgin, H.B. (2018) Mapping permeable subsurface fracture networks: A case study on the Cooper Basin, Australia. *J. Struct. Geol.*, 114, 336-345.
- 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.
- Morris, A.P., Ferrill, D.A. and Henderson, D.B. (1996) Slip tendency and fault reactivation. *Geology*, 24, 275-278.
- 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碎法地殻応力測定—地下水等総合観測施設整備に伴う—. 日本地震学会 2013 年秋季大会講演予稿集, 227.

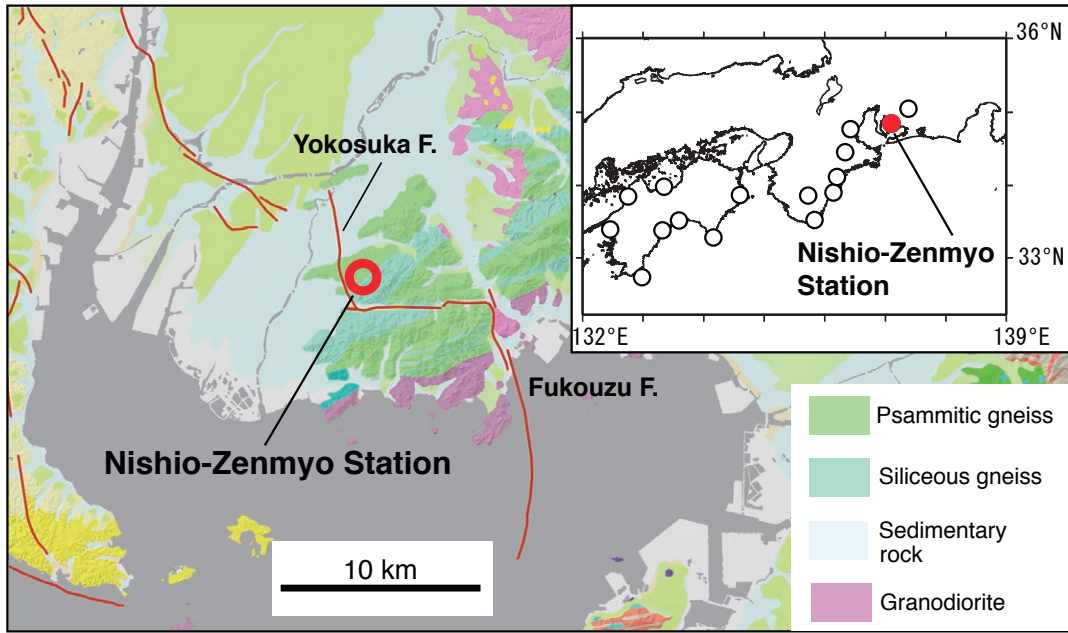
(受付: 2019 年 7 月 29 日, 受理: 2019 年 9 月 24 日)

第1表. 西尾善明観測点の3つの孔井において、電気伝導度検層、速度検層とハイドロフォンVSPから検出した透水性亀裂が存在する深度、透水ゾーンの深度区間及びBHTV画像から向きを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：電気伝導度検層から検出した深度。*2：速度検層とハイドロフォンVSPから検出した深度。*3：ストーンレー波の異常から求めた深度区間。*4：電気伝導度検層から求めた深度区間。*5：北から時計回りの方位。

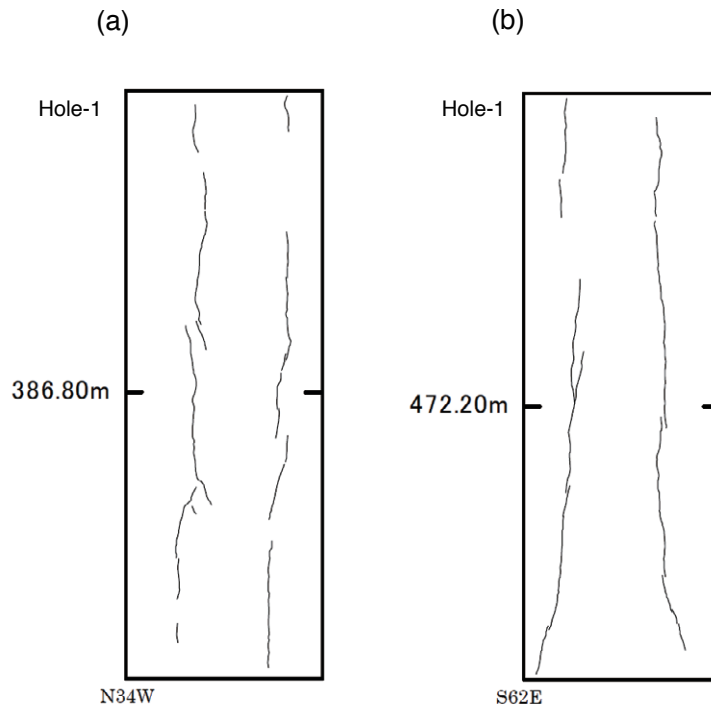
Table 1. Summary of the depths of the permeable fractures detected by fluid electric conductivity logging, sonic logging and hydrophone VSP in three boreholes at Nishio-Zenmyo station, depth interval of the permeable zone, and the depth, dip direction and dip angle of the permeable fractures determined by using BHTV images. Both of the depths where multiple orientations were determined and those where no orientation was determined are included in the table. *1: Depth detected by fluid electric conductivity logging. *2: Depth detected by both of sonic logging and hydrophone VSP. *3: Depth interval determined from anomalies of Stoneley wave. *4: Depth interval determined by using fluid electric conductivity log. *5: Clockwise from north.

Hole	Depth detected by loggings and VSP (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televierer (BHTV)		
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *5	Dip (deg.)
3	31.2 *1	30.7 - 31.7 *4	30.87	313	54
			30.98	345	62
			31.34	341	58
3	35.7 *1	35.2 - 36.2 *4	35.66	163	47
			36.07	178	64
2	62.8 *2	62.1 - 63.5 *3	62.35	143	42
			62.50	209	59
			62.56	194	56
2	80.4 *1	79.9 - 80.9 *4	79.96	224	73
2	81.8 *1	81.3 - 82.3 *4	-	-	-
2	89.9 *2	89.6 - 90.4 *3	89.95	158	30
			90.03	5	47
			90.17	87	72
2	100.3 *1,2	99.6 - 100.5 *3	99.92	245	54
2	120.7 *1	120.6 - 121.5 *3	-	-	-
2	133.3 *1	133.2 - 133.9 *3	133.63	4	60
			133.71	6	63
2	154.9 *1,2	154.6 - 155.3 *3	154.80	259	61
			155.22	186	51
2	169.3 *2	168.2 - 169.6 *3	168.60	221	47
			169.32	174	31
			169.45	210	58
2	202.9 *2	202.1 - 203.4 *3	202.33	20	73
			202.70	352	69

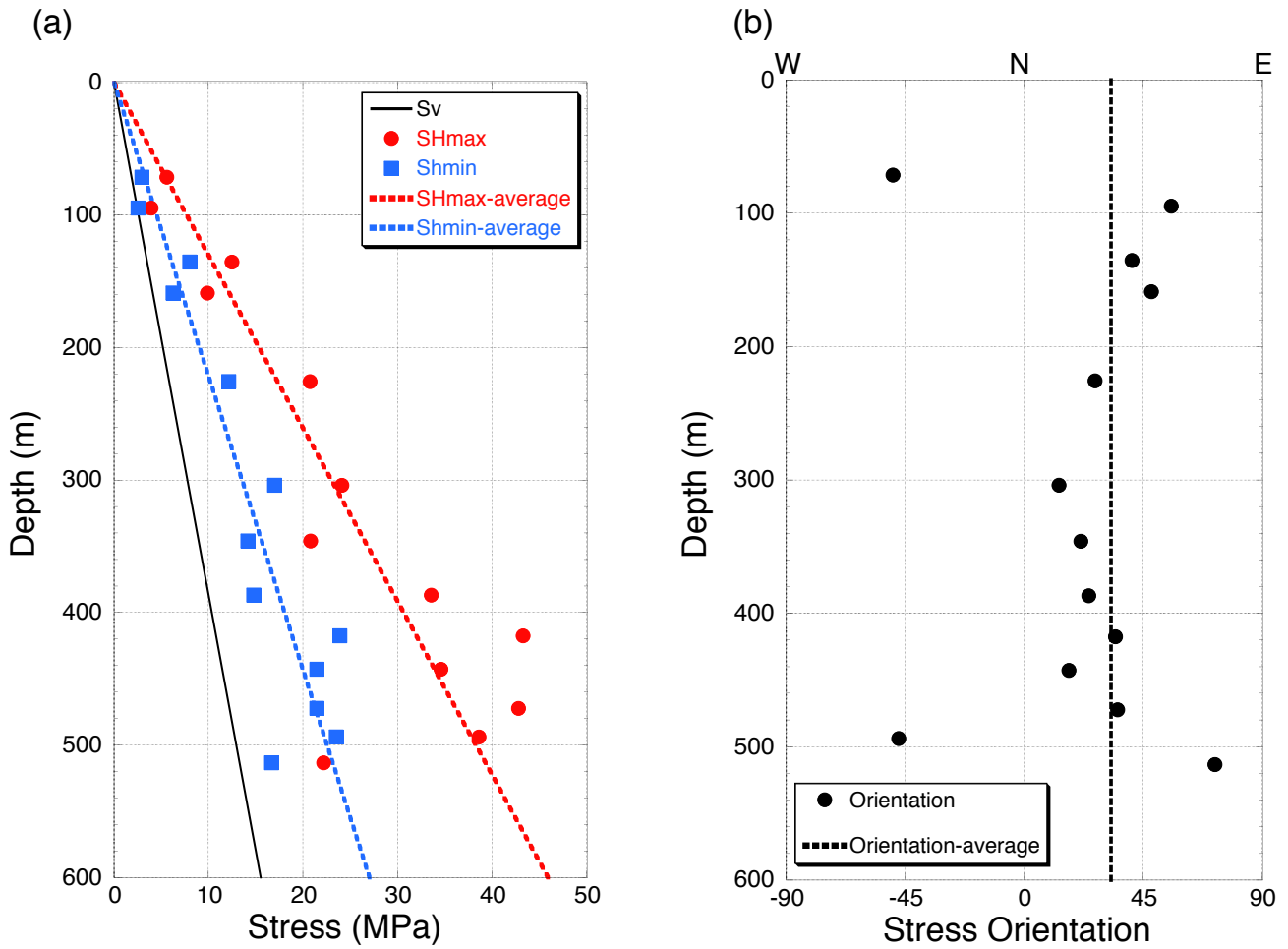
Hole	Depth detected by loggings and VSP (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televierer (BHTV)		
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *5	Dip (deg.)
1	252.7 *1,2	252.2 - 253.2 *3	-	-	-
1	256.6 *1	256.3 - 257.2 *3	256.68	163	67
			256.97	215	66
			257.09	199	62
1	262.2 *1	262.0 - 263.4 *3	262.29	225	28
			262.50	178	56
			262.86	170	65
1	270.1 *2	269.8 - 270.7 *3	270.27	190	60
			270.33	194	64
1	290.0 *1	290.0 - 290.8 *3	290.40	213	59
1	295.9 *1	295.8 - 296.7 *3	295.85	23	73
			296.41	344	65
			296.48	348	64
1	313.8 *1	313.3 - 314.3 *4	-	-	-
1	393.6 *1,2	393.6 - 394.9 *3	393.96	88	43
			394.45	7	71
1	401.8 *1,2	401.0 - 401.8 *3	401.17	82	60
1	480.7 *2	480.1 - 481.0 *3	480.15	259	53
			480.36	259	43
			480.62	251	49
1	537.7 *2	537.2 - 538.2 *3	537.58	43	70
			537.99	50	66



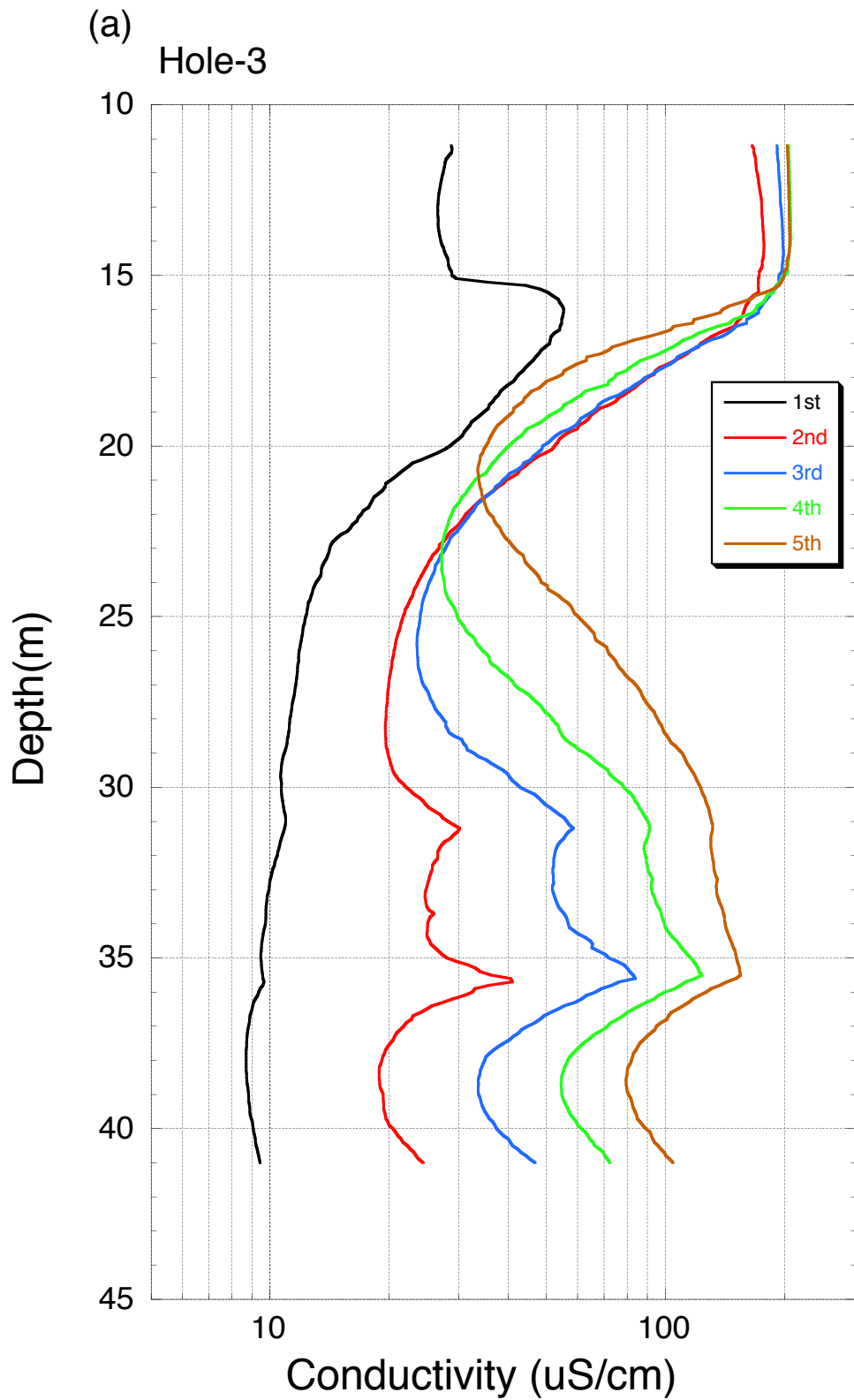
第1図. 産業技術総合研究所の西尾善明観測点の位置図. 20万分の1日本シームレス地質図(産業技術総合研究所, 2015)上に赤丸で示す. 右上図に西尾善明観測点以外の地下水等総合観測点を白丸で示す.
 Fig. 1. Location of AIST Nishio-Zenmyo observation station in Aichi Prefecture plotted on the Seamless digital geological map of Japan 1: 200,000 (Geological Survey of Japan, AIST (ed.), 2015). Nishio-Zenmyo observation station and other AIST integrated groundwater observation stations are also shown in inset figure with red and open circles, respectively.



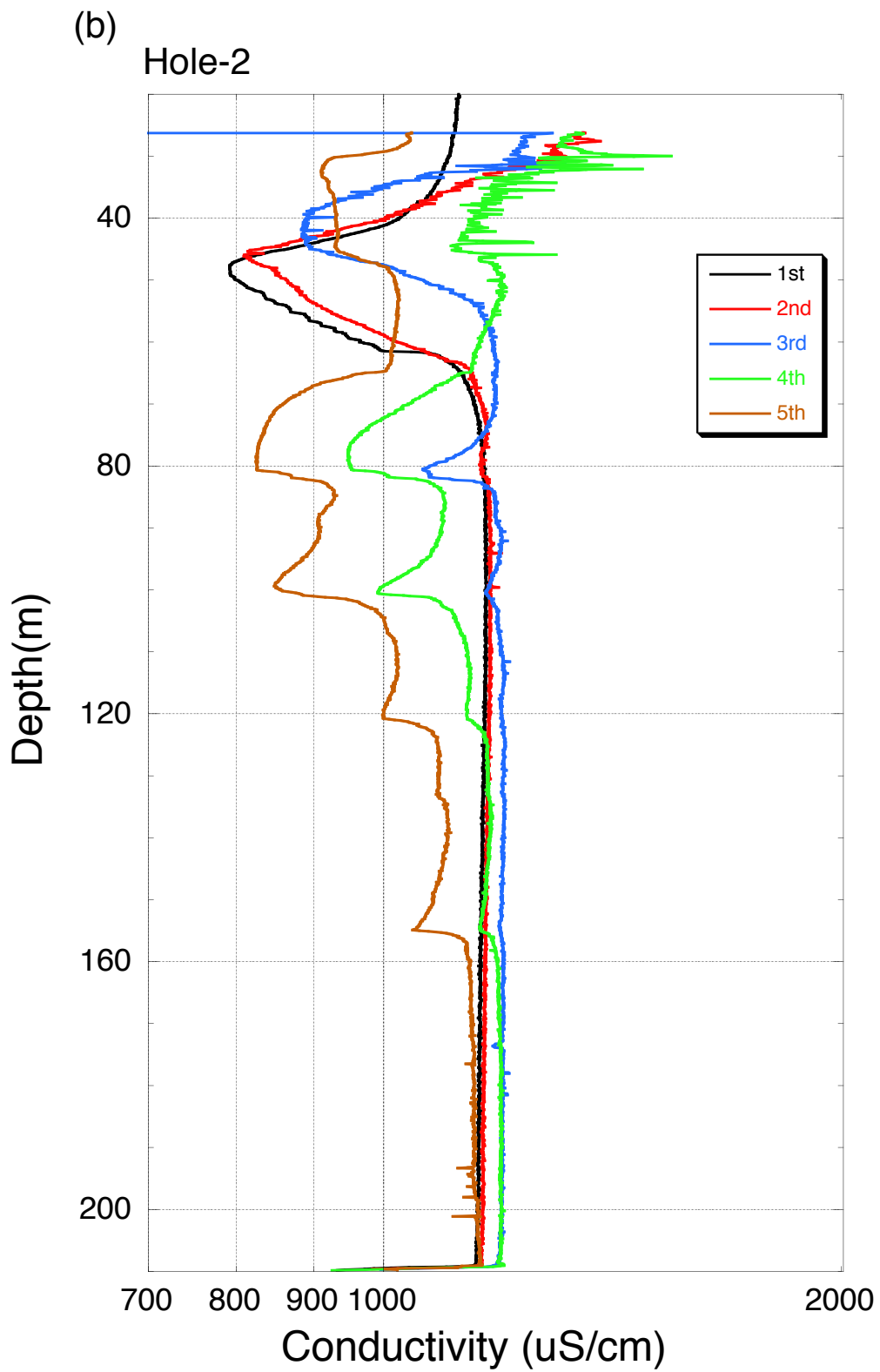
第2図. 水圧破碎法により孔壁に生成された縦亀裂を型撮りした記録の例(北川ほか, 2019に一部加筆). 各図の左端の方位を図中に示す. (a) 孔1 深度 386.80 m. (b) 孔1 深度 472.20 m.
 Fig. 2. Typical examples of fracture imprints at the depths where hydraulic fracturing stress measurement was conducted (modified from Kitagawa *et al.*, 2019). The azimuth is shown at the left end of each figure. (a) Depth of 386.80 m at Hole-1. (b) Depth of 472.20 m at Hole-1.



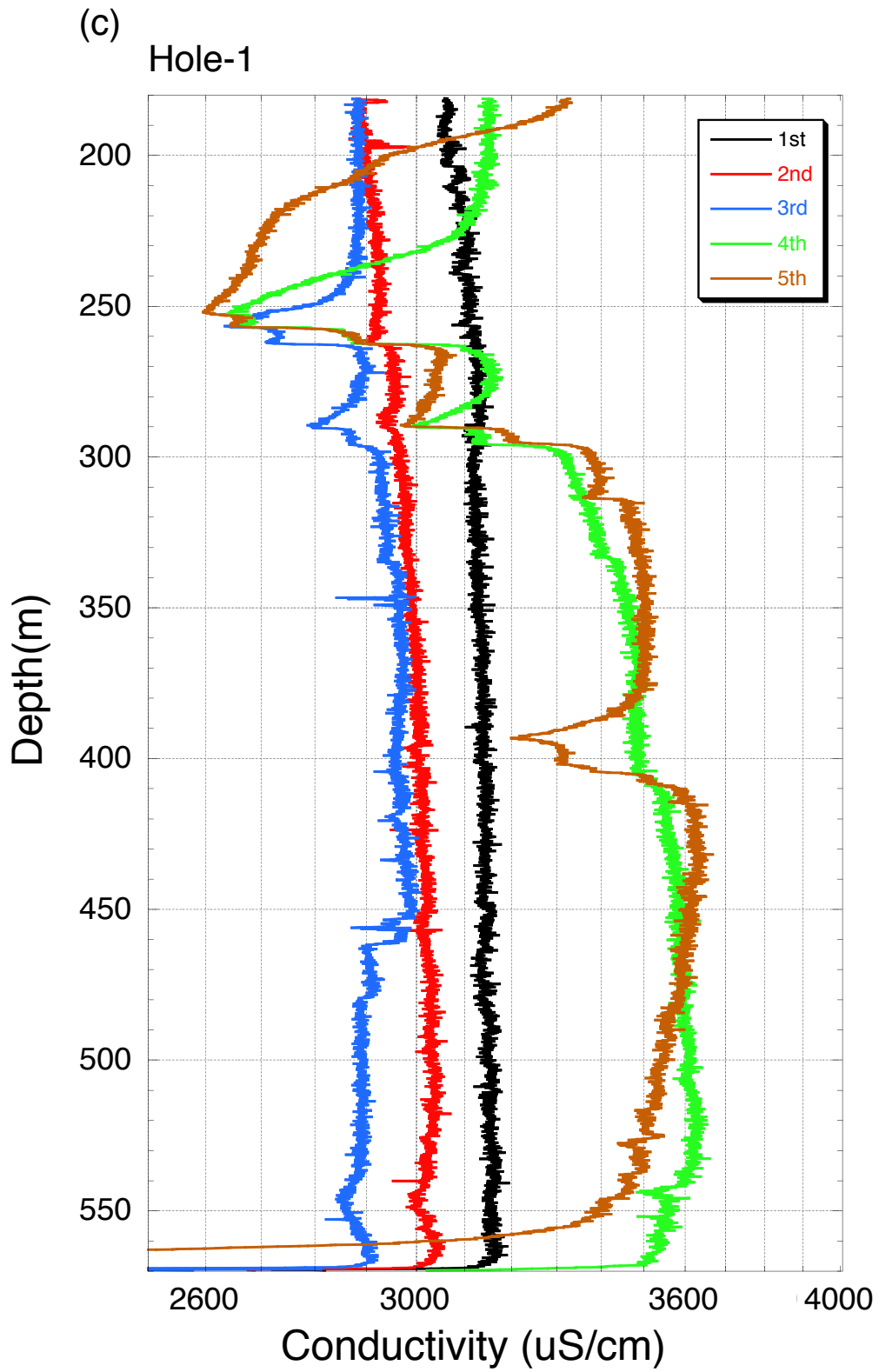
第3図. 水圧破砕法から求めた応力場. (a) 最大水平圧縮応力 (赤丸) 及び最小水平圧縮応力 (青四角) と深度との関係. 黒色実線で示す鉛直応力は密度 2.64 g/cm^3 を仮定して求めた. 赤色破線と青色破線は、それぞれ最大及び最小水平圧縮応力の値を直線で近似して求めた. (b) 最大水平圧縮応力の方位の分布 (黒丸). 方位の平均値を黒色破線で示す.
 Fig. 3. Stress state at Nishio station obtained by using hydraulic fracturing stress measurement. (a) Maximum (red circle) and minimum (blue square) horizontal compressive stresses as a function of depth. The black line indicates the overburden stress estimated assuming the density is 2.64 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.



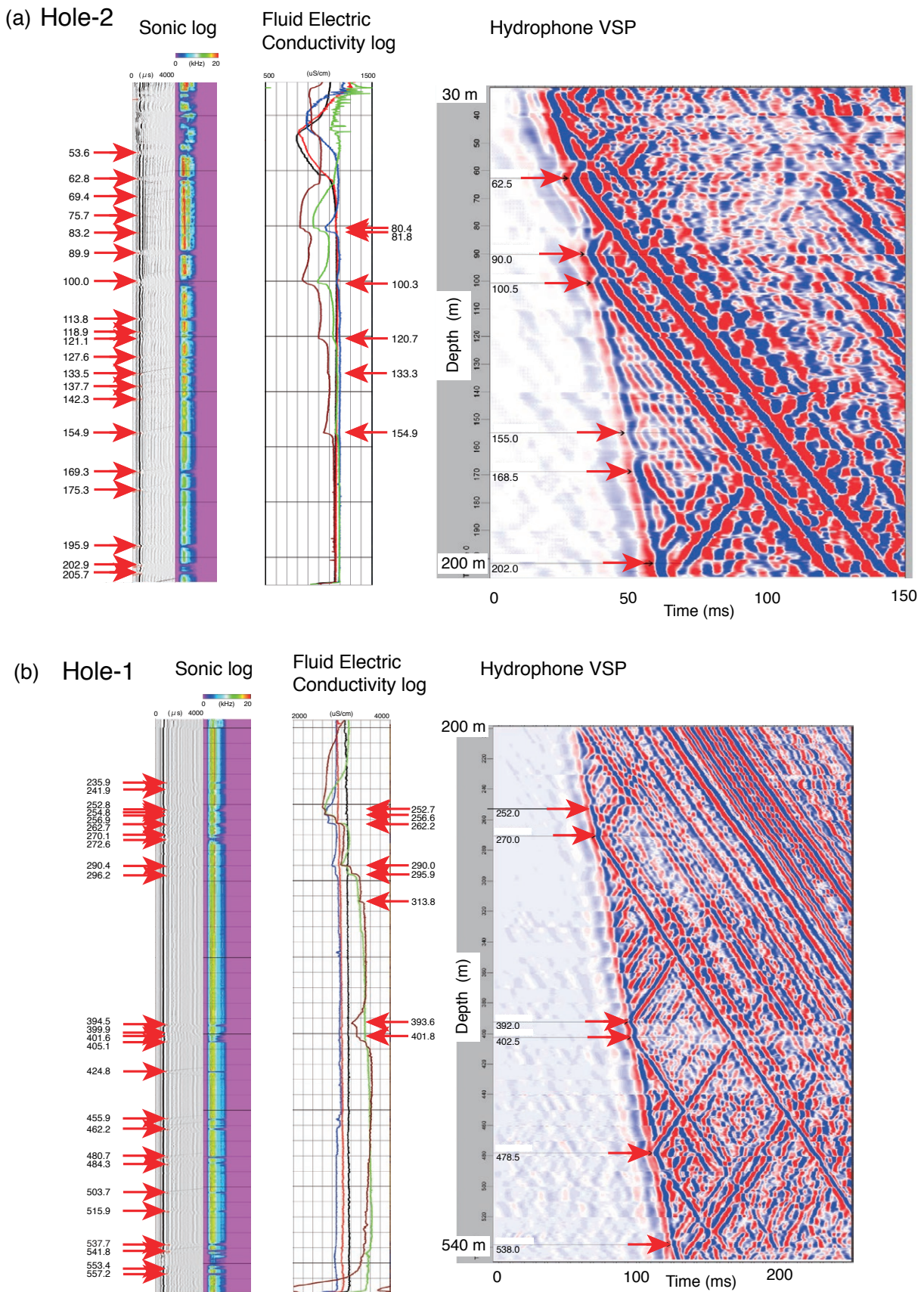
第4図. 電気伝導度検層の測定データ. 繰り返し測定したデータを色分けして示す. (a) 孔3. (b) 孔2. (c) 孔1.
Fig. 4. Repeatedly measured data of fluid electric conductivity logging. (a) Hole-3. (b) Hole-2. (c) Hole-1.



第4図. (続き)
Fig. 4. (continued)



第4図. (続き)
Fig. 4. (continued)

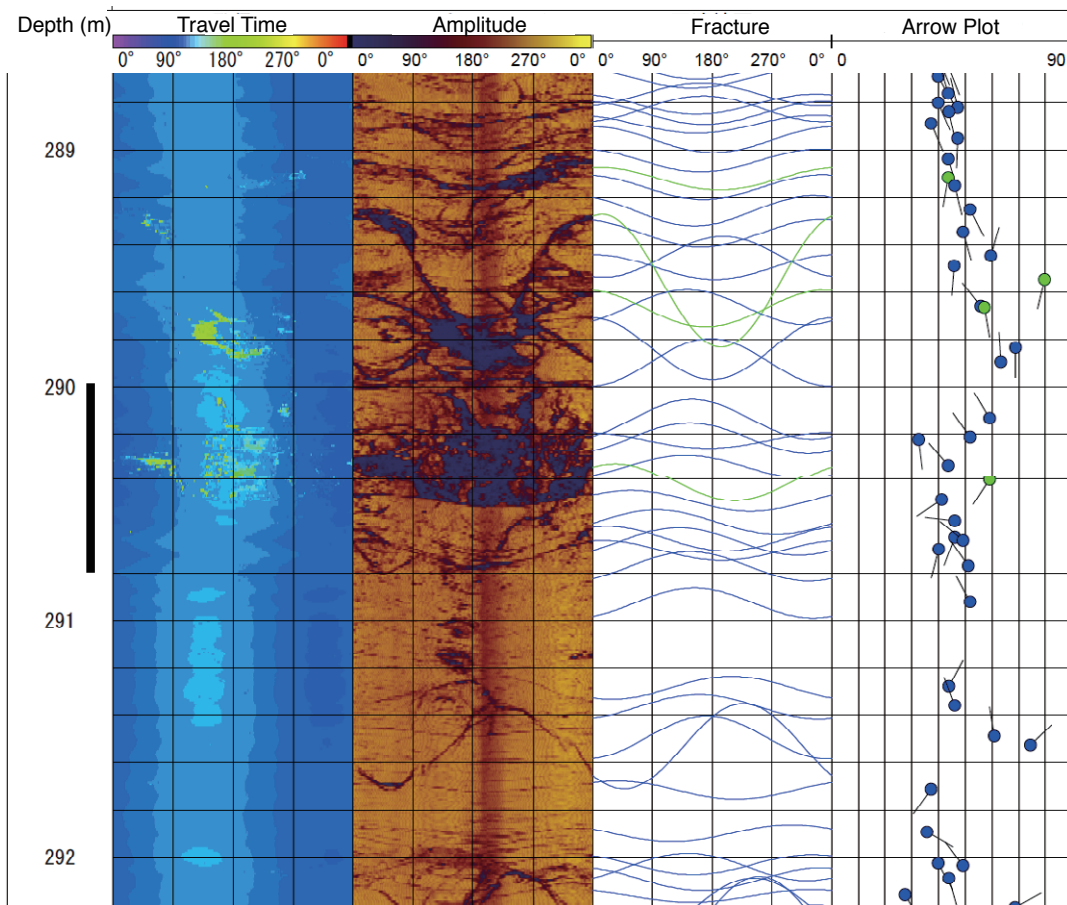


第 5 図. 孔 1 と 2 で実施した速度検層, 電気伝導度検層, ハイドロフォン VSP の結果. 3 つのデータからそれぞれ求めた透水性亀裂の深度を赤矢印で示す. (a) 孔 2. (b) 孔 1.

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

(a)

Hole-1 290.0m

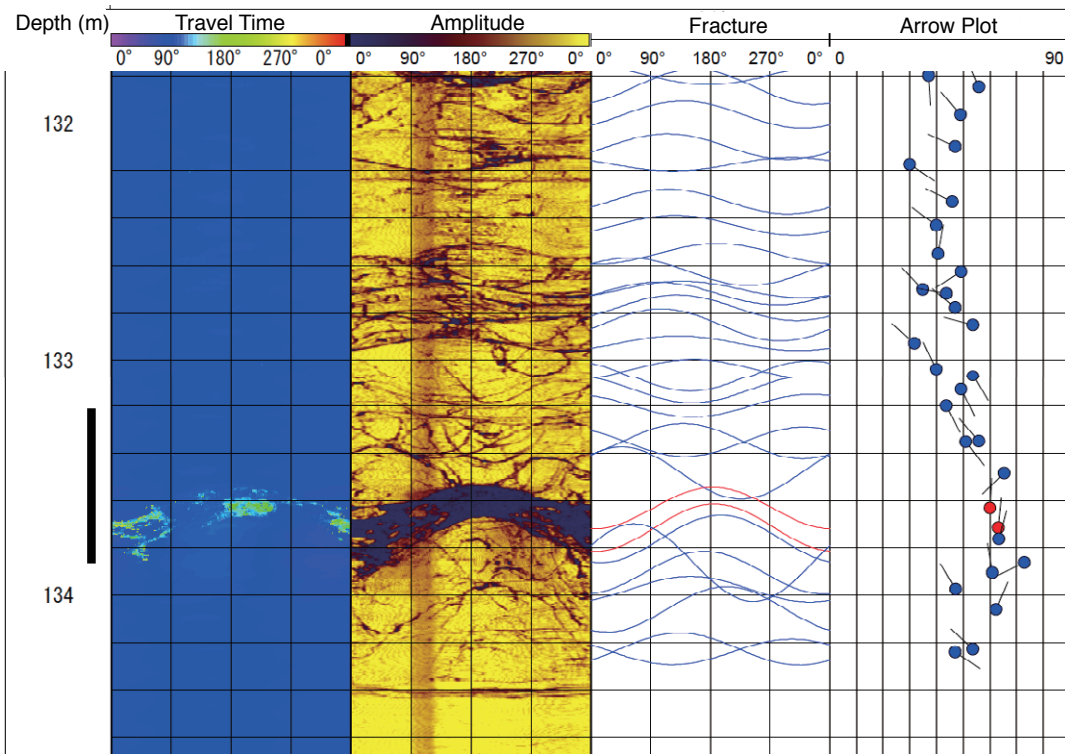


第6図. 電気伝導度検層、速度検層とハイドロフォンVSPにより検出した深度付近のBHTV画像及び亀裂の形状と向き. 左の列から、深度、BHTVによる走時と振幅の画像、サインカーブの形状として検出した亀裂、亀裂の傾斜方位と傾斜角を示すアロープロットを示す. アロープロットでは丸印の位置が傾斜角、線分の方向が傾斜方位を意味する. 透水ゾーンを黒色バーで示す. (a) 孔1 深度 290.0 m. (b) 孔2 深度 133.3 m. (c) 孔1 深度 393.6 m. (d) 孔3 深度 31.2 m. (e) 孔3 深度 35.7 m. (f) 孔2 深度 62.8 m. (g) 孔2 深度 80.4 m. (h) 孔2 深度 81.8 m. (i) 孔2 深度 89.9 m. (j) 孔2 深度 100.3 m. (k) 孔2 深度 120.7 m. (l) 孔2 深度 154.9 m. (m) 孔2 深度 169.3 m. (n) 孔2 深度 202.9 m. (o) 孔1 深度 252.7 m. (p) 孔1 深度 256.6 m. (q) 孔1 深度 262.2 m. (r) 孔1 深度 270.1 m. (s) 孔1 深度 295.9 m. (t) 孔1 深度 313.8 m. (u) 孔1 深度 401.8 m. (v) 孔1 深度 480.7 m. (w) 孔1 深度 537.7 m.

Fig. 6. BHTV images around the depth detected by using data of fluid electric conductivity logging, sonic logging and hydrophone VSP, and shapes and orientations of fractures in the images. From the column on the left, depth, travel time and amplitude images of BHTV, fracture shape indicated as sinusoidal curve and arrow plots for dip direction and dip angle of the fractures 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 interval of permeable zone. (a) Depth of 290.0 m at Hole-1. (b) Depth of 133.3 m at Hole-2. (c) Depth of 393.6 m at Hole-1. (d) Depth of 31.2 m at Hole-3. (e) Depth of 35.7 m at Hole-3. (f) Depth of 62.8 m at Hole-2. (g) Depth of 80.4 m at Hole-2. (h) Depth of 81.8 m at Hole-2. (i) Depth of 89.9 m at Hole-2. (j) Depth of 100.3 m at Hole-2. (k) Depth of 120.7 m at Hole-2. (l) Depth of 154.9 m at Hole-2. (m) Depth of 169.3 m at Hole-2. (n) Depth of 202.9 m at Hole-2. (o) Depth of 252.7 m at Hole-1. (p) Depth of 256.6 m at Hole-1. (q) Depth of 262.2 m at Hole-1. (r) Depth of 270.1 m at Hole-1. (s) Depth of 295.9 m at Hole-1. (t) Depth of 313.8 m at Hole-1. (u) Depth of 401.8 m at Hole-1. (v) Depth of 480.7 m at Hole-1. (w) Depth of 537.7 m at Hole-1.

(b)

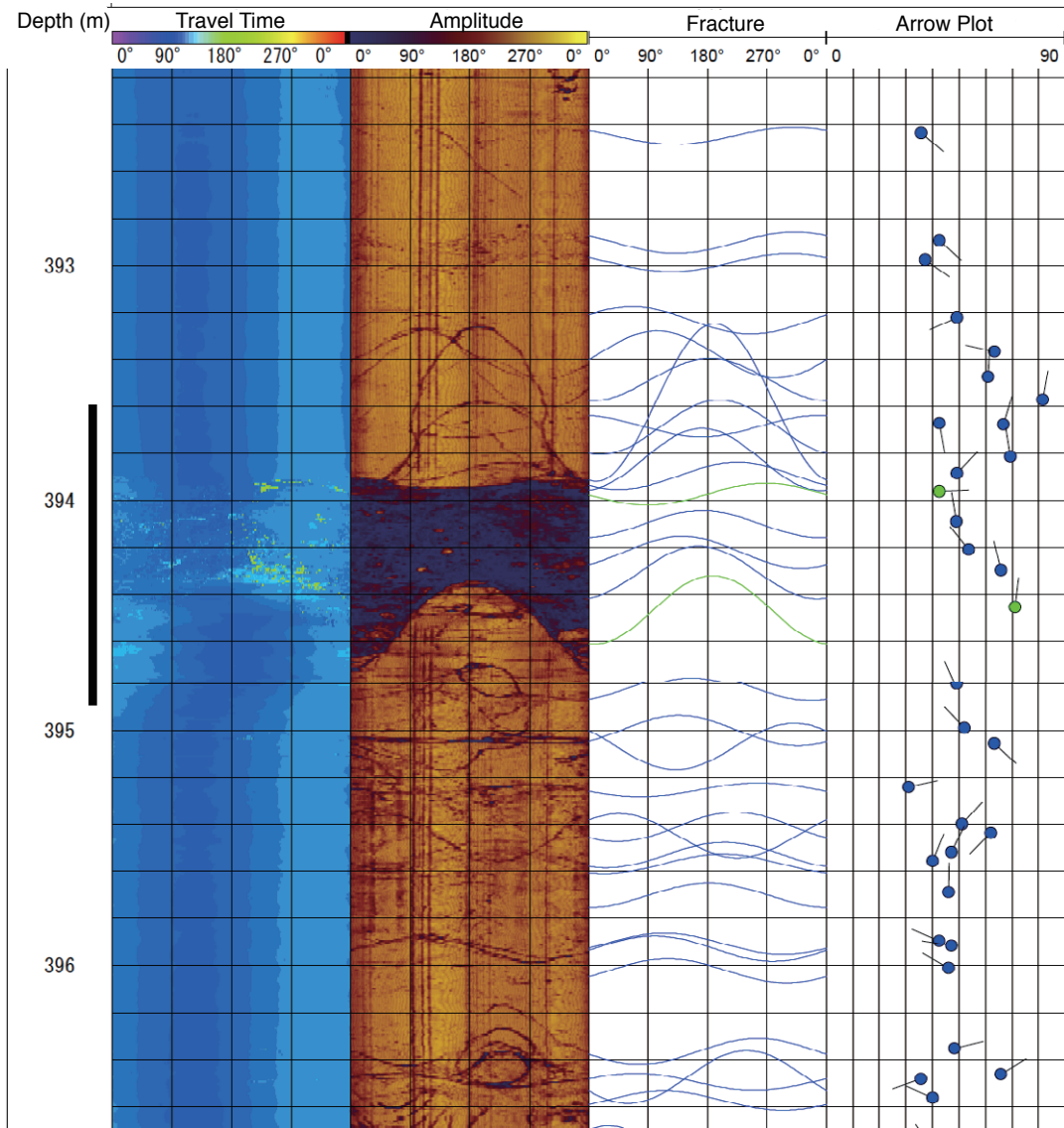
Hole-2 133.3m



第6図. (続き)
Fig. 6. (continued)

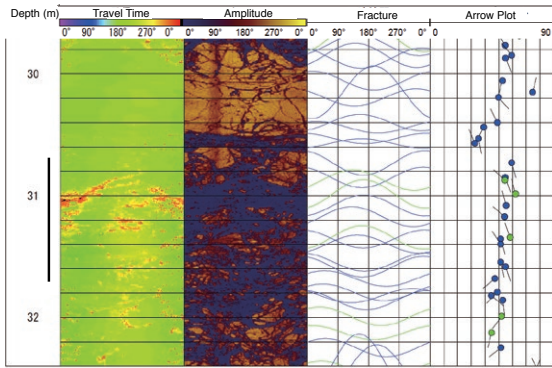
(c)

Hole-1 393.6m

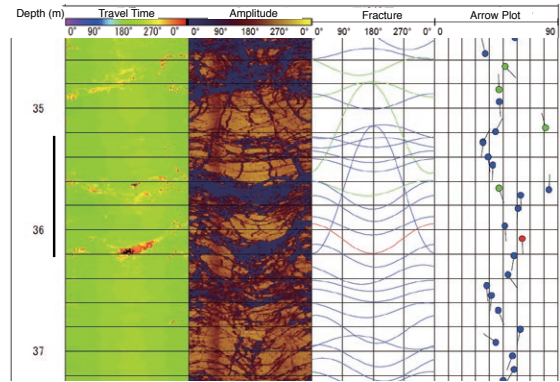


第 6 図. (続き)
Fig. 6. (continued)

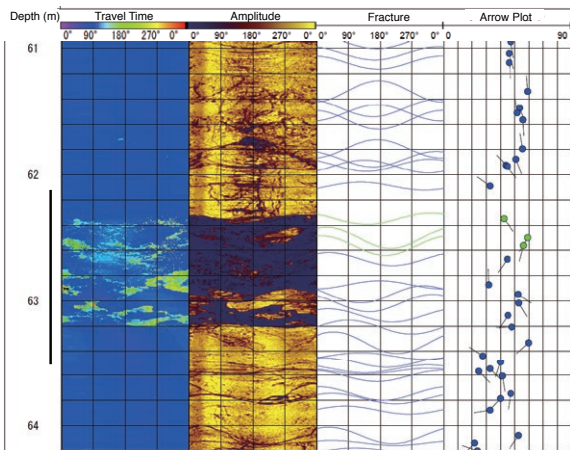
(d) Hole-3 31.2m



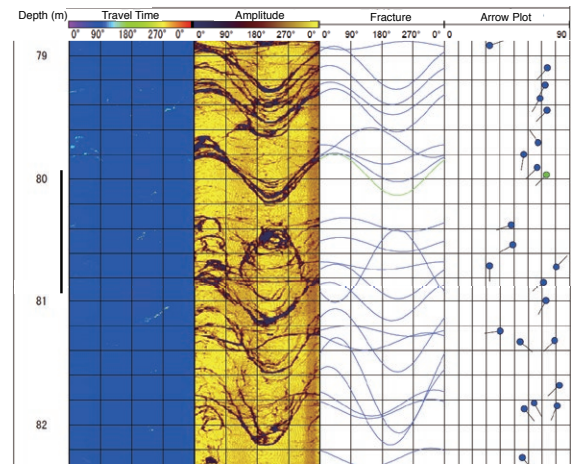
(e) Hole-3 35.7m



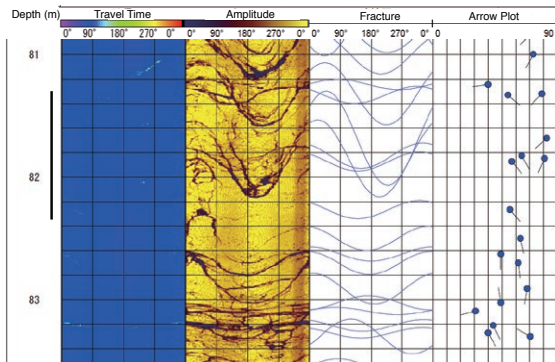
(f) Hole-2 62.8m



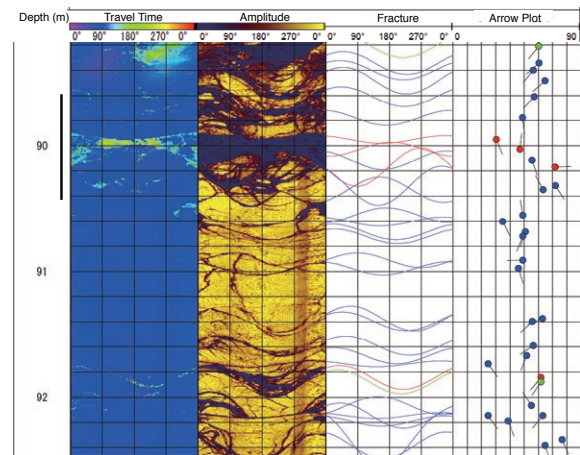
(g) Hole-2 80.4m



(h) Hole-2 81.8m

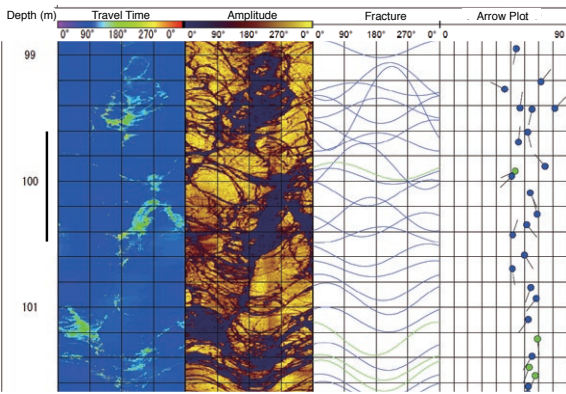


(i) Hole-2 89.9m

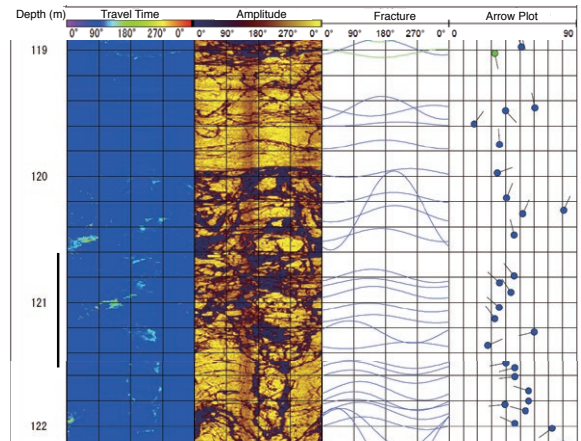


第 6 図. (続き)
Fig. 6. (continued)

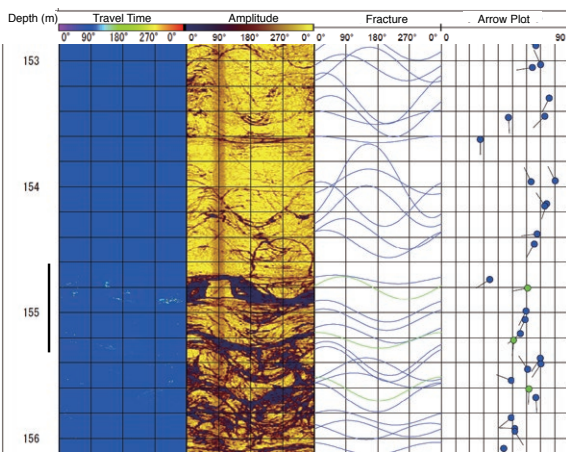
(j) Hole-2 100.3m



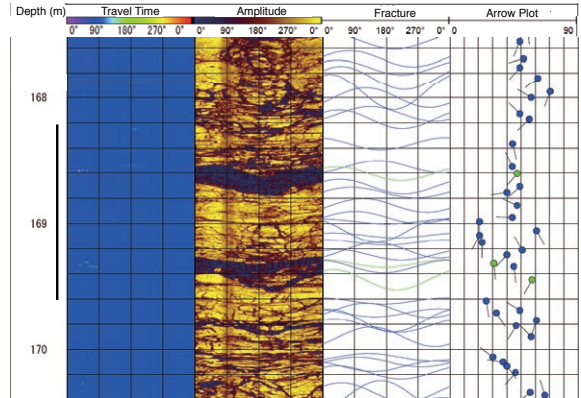
(k) Hole-2 120.7m



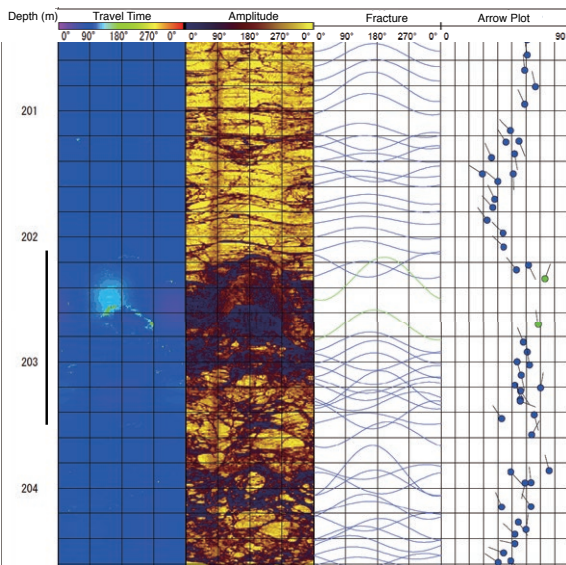
(l) Hole-2 154.9m



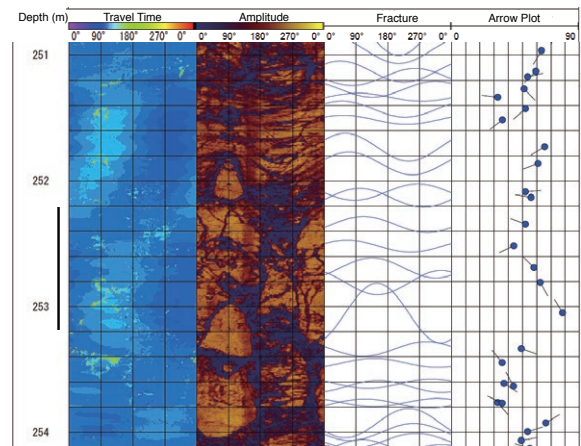
(m) Hole-2 169.3m



(n) Hole-2 202.9m

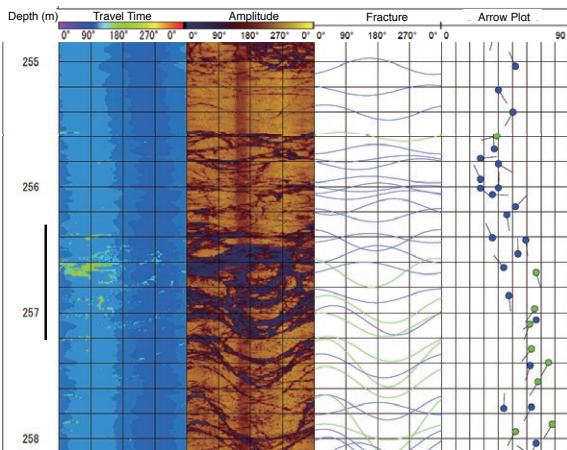


(o) Hole-1 252.7m

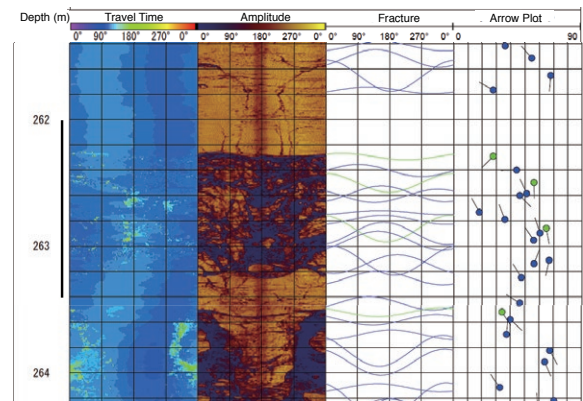


第6図. (続き)
Fig. 6. (continued)

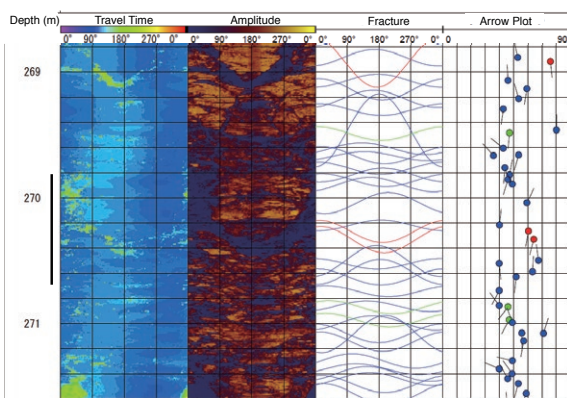
(p) Hole-1 256.6m



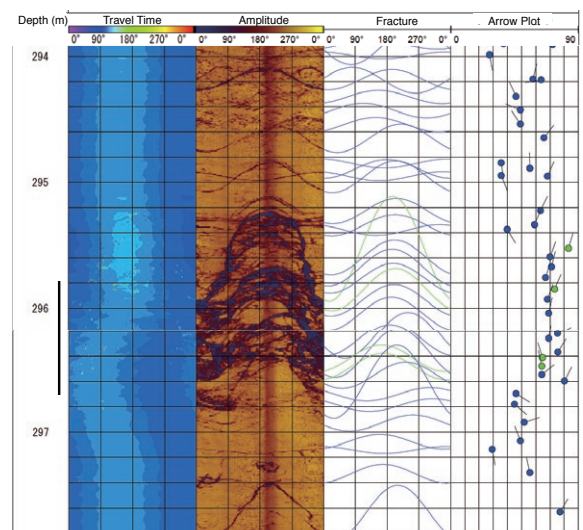
(q) Hole-1 262.2m



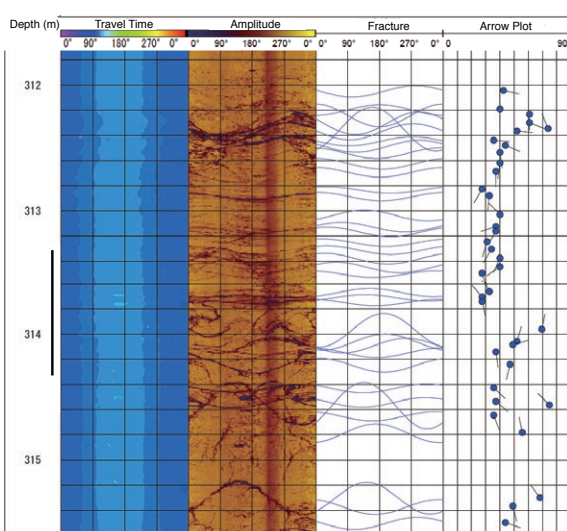
(r) Hole-1 270.1m



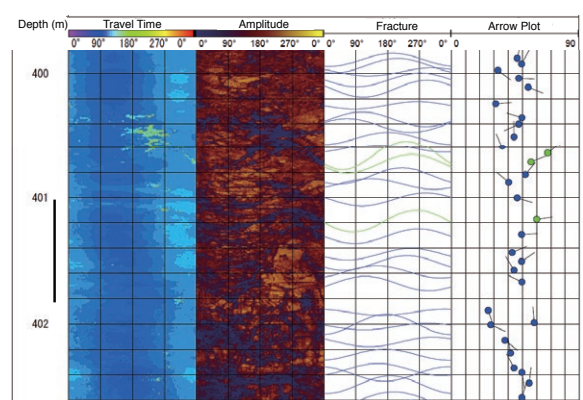
(s) Hole-1 295.9m



(t) Hole-1 313.8m

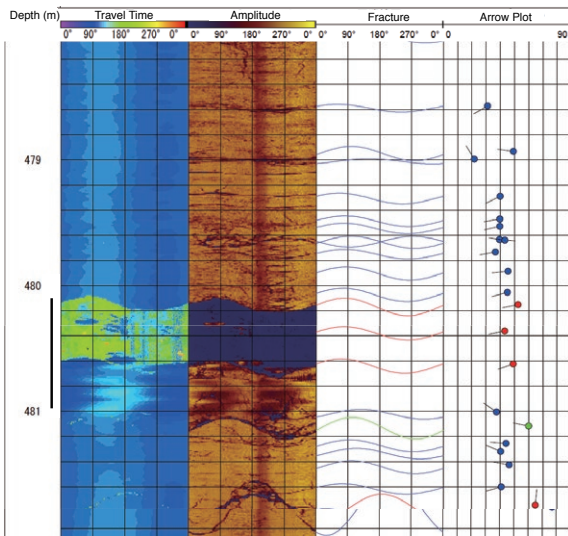


(u) Hole-1 401.8m

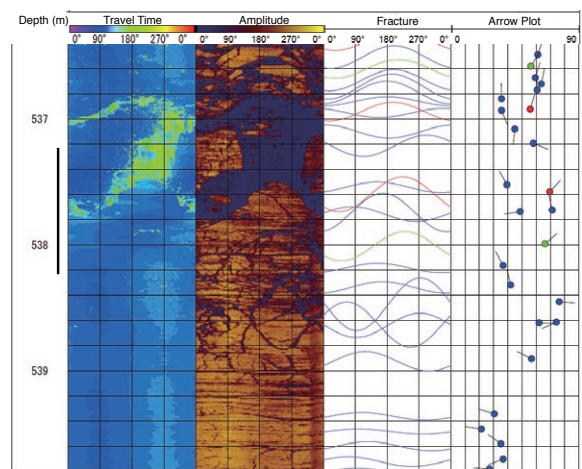


第 6 図. (続き)
Fig. 6. (continued)

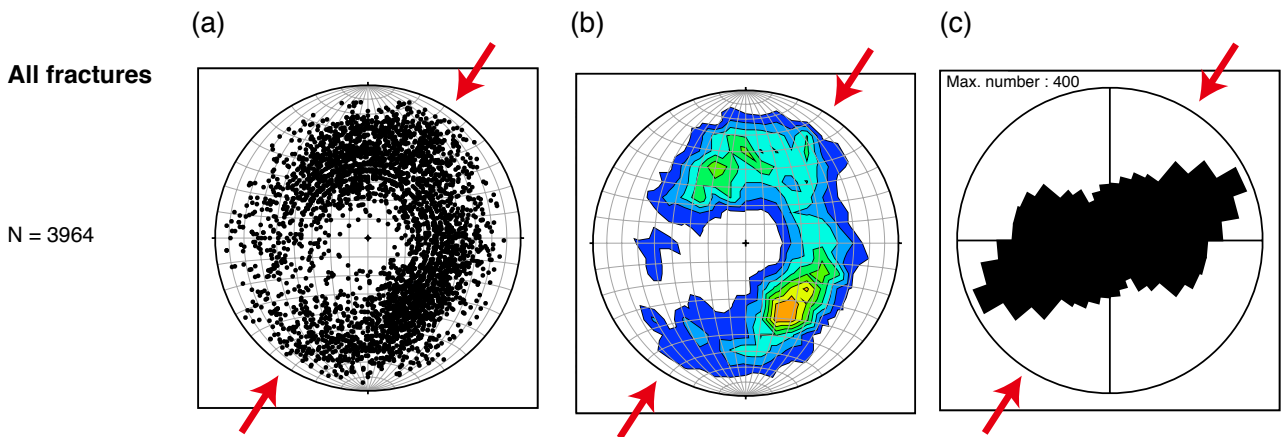
(v) Hole-1 480.7m



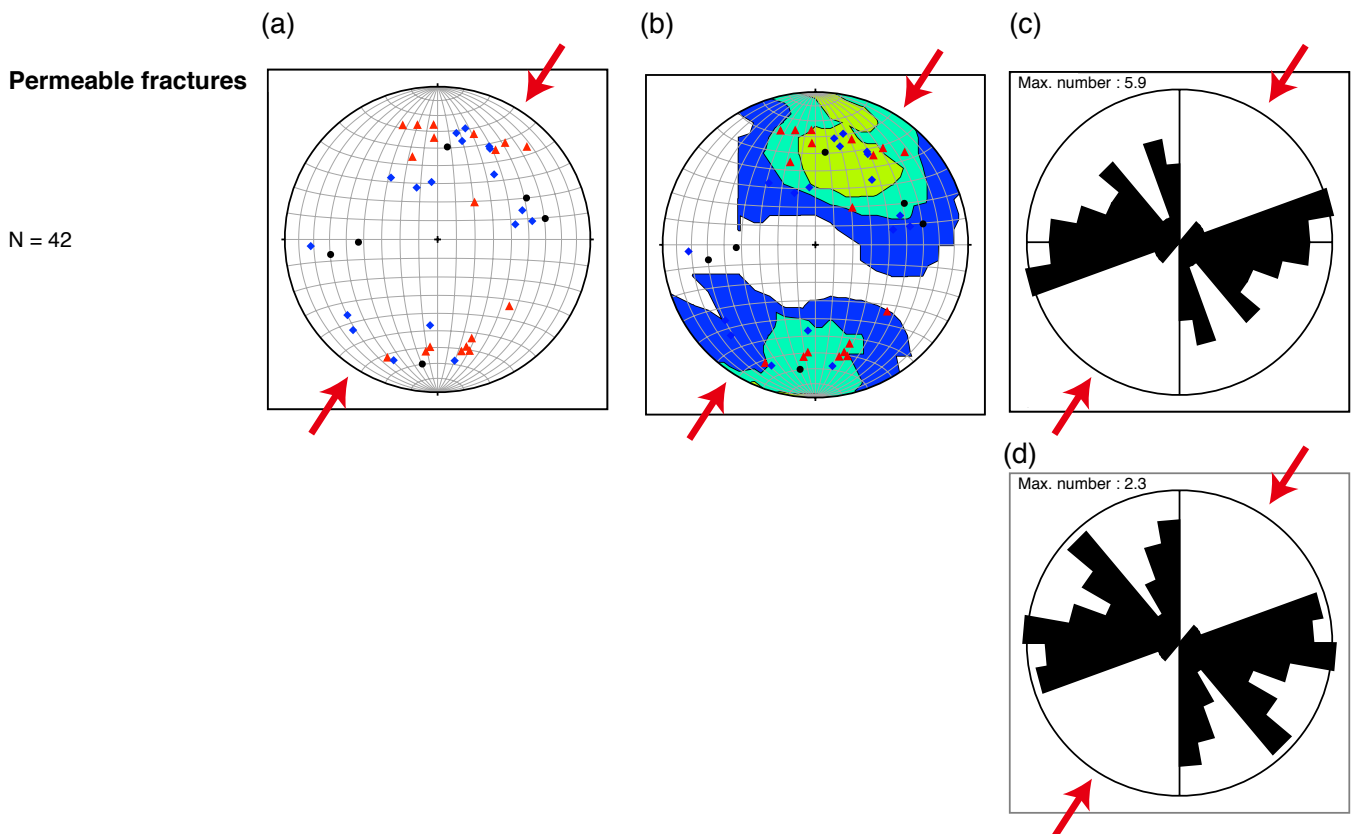
(w) Hole-1 537.7m



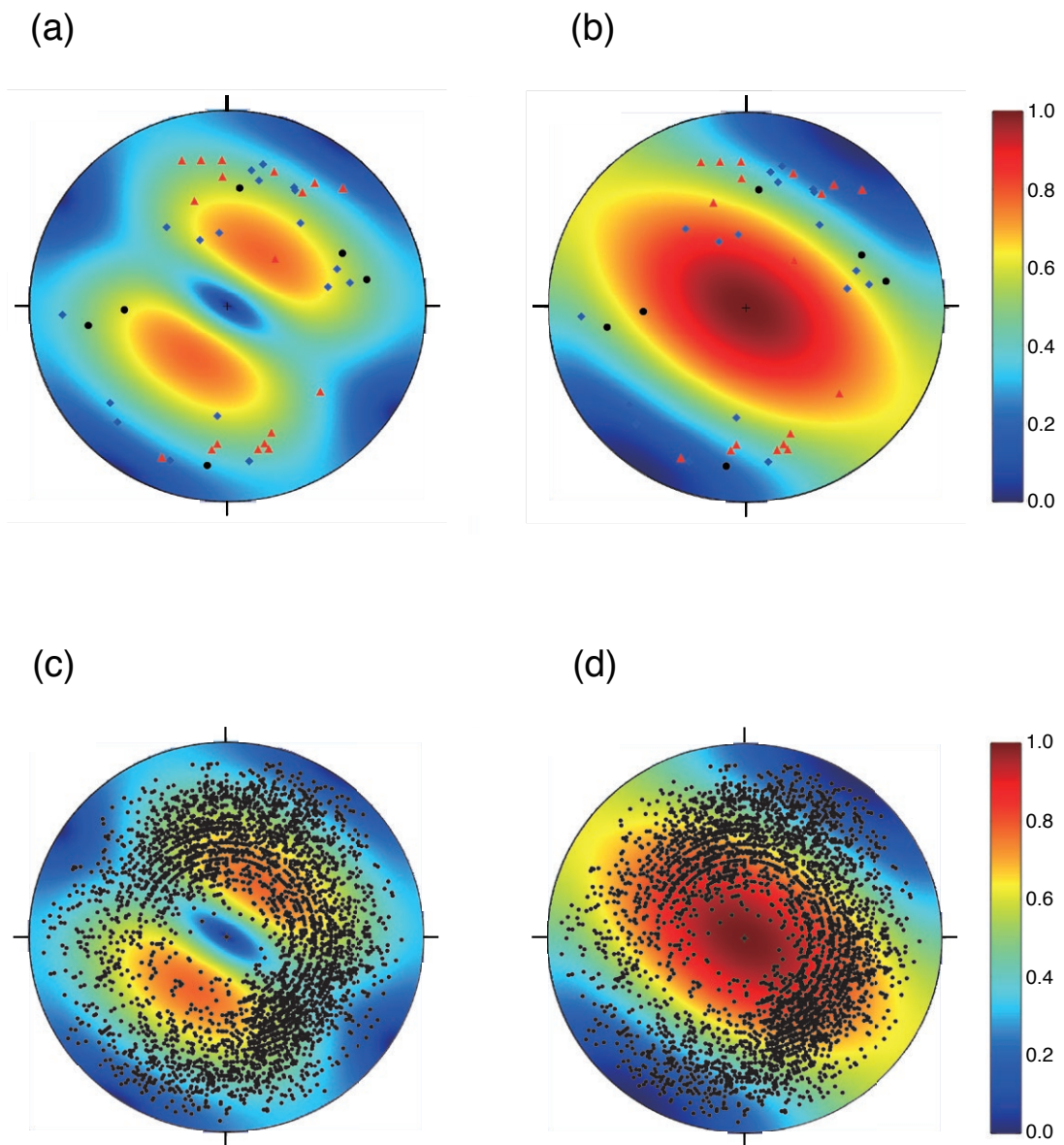
第 6 図. (続き)
Fig. 6. (continued)



第7図. BHTVで求め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 (N32.9°E)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. 7. Distributions of the orientations for all fractures obtained 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.

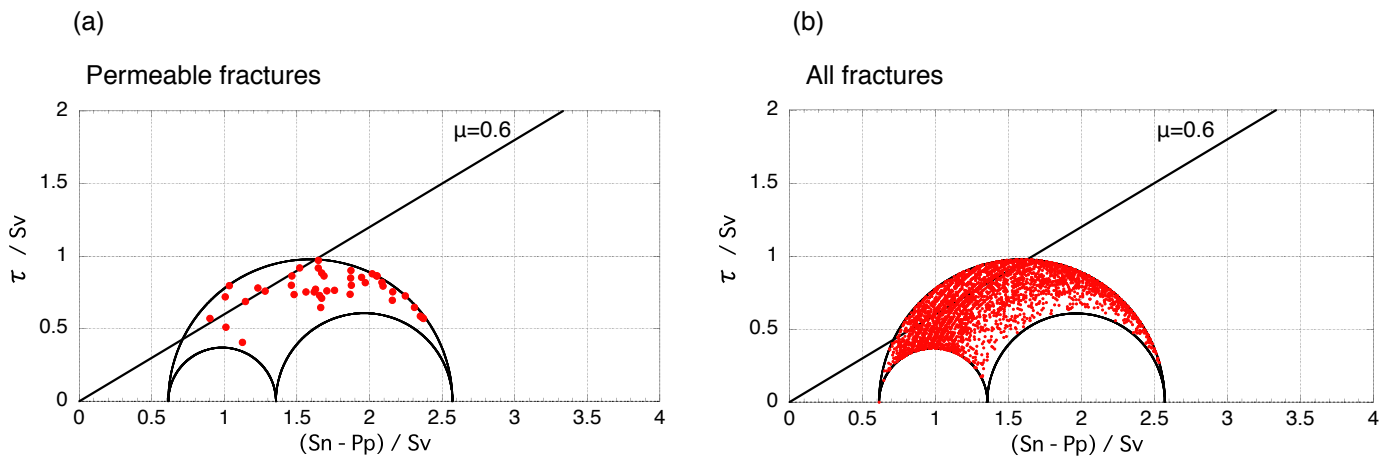


第8図. 透水性亀裂の向き分布. (a)~(c) 第7図と同じ. (a), (b) 黒丸は電気伝導度検層, 速度検層とハイドロフォンVSPでもって検出した亀裂, 赤三角は電気伝導度検層だけで検出した亀裂, 青菱形は速度検層とハイドロフォンVSPだけで検出した亀裂を示す. (d) 各深度で求めた透水性亀裂の向きの数に応じて重み付けをした場合の透水性亀裂の走向のローズダイアグラム.
 Fig. 8. Distributions of the orientations for permeable fractures. (a)~(c) The same as Fig. 7. (a), (b) Black dot: Fracture detected by fluid electric conductivity logging, sonic logging and hydrophone VSP. Red triangle: Fracture detected by fluid electric conductivity logging. Blue diamond: Fracture detected by sonic logging and hydrophone VSP. (d) 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.



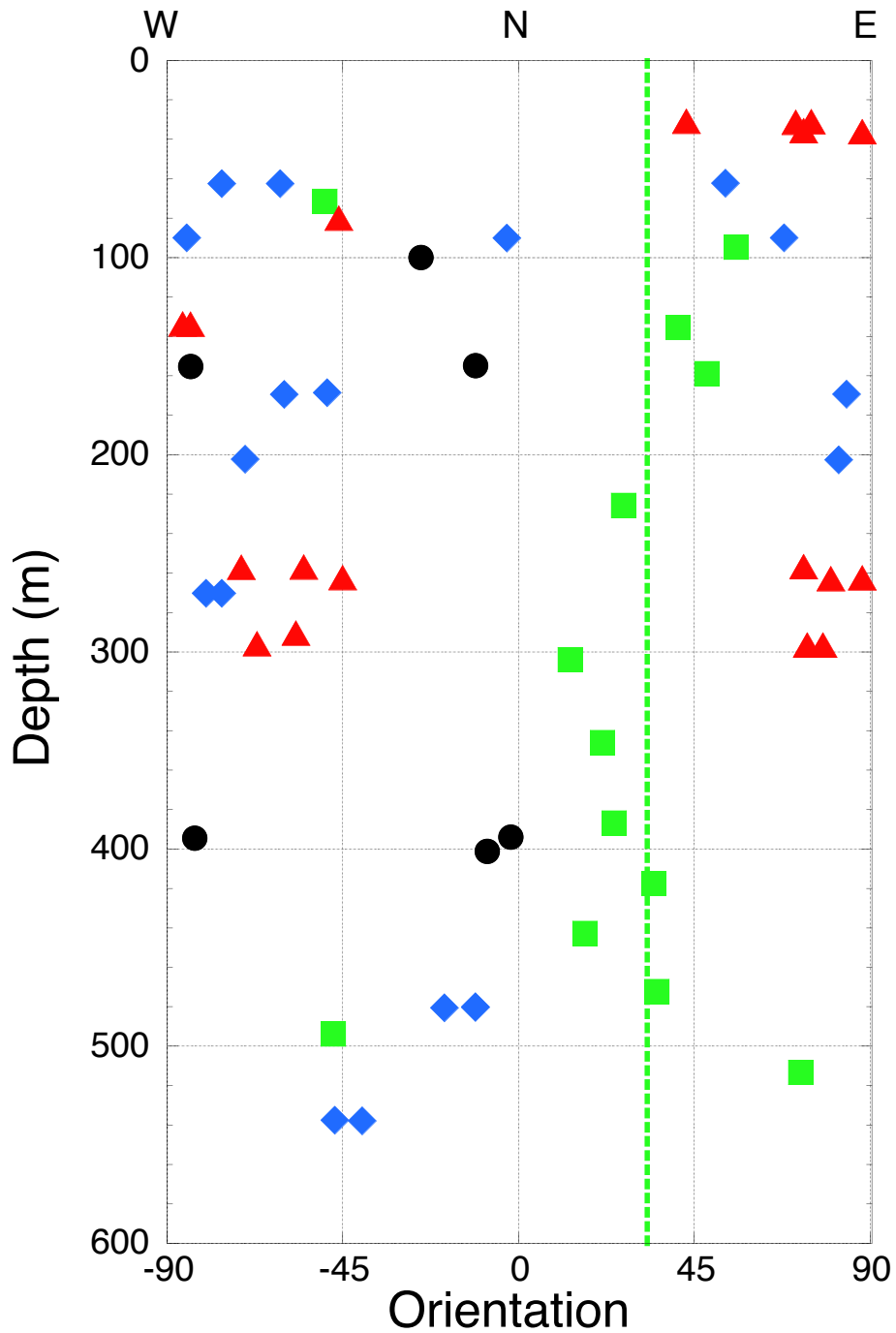
第9図. 水圧破砕法で求めた応力場から計算した slip tendency と dilation tendency. それぞれの図に透水性亀裂または全ての亀裂の向きを重ねて示す. 透水性亀裂の色分けは第8図と同じである. (a) slip tendency と透水性亀裂の重ね図. (b) dilation tendency と透水性亀裂の重ね図. (c) slip tendency と全ての亀裂の重ね図. (d) dilation tendency と全ての亀裂の重ね図.

Fig. 9. Stereo plots of slip tendency and dilation tendency calculated using stress state estimated by hydraulic fracturing stress measurement. The orientations of the permeable fractures or all fractures are shown in each plot. The color classification of the permeable fractures is the same as Fig.8. (a) Overlay of slip tendency and permeable fractures. (b) Overlay of dilation tendency and permeable fractures. (c) Overlay of slip tendency and all fractures. (d) Overlay of dilation tendency and all fractures.



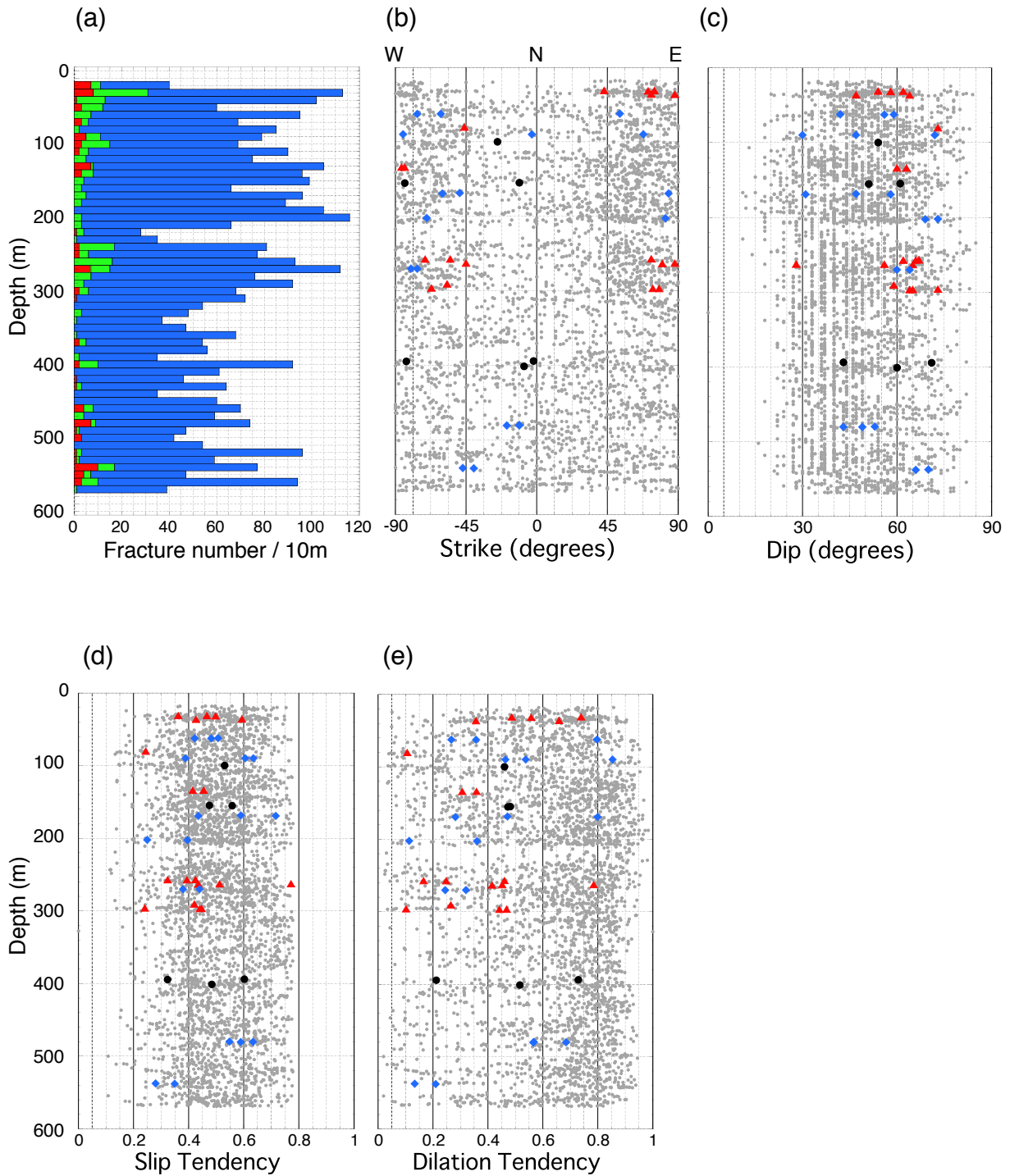
第 10 図. 亀裂面に作用する法線応力とせん断応力を示す 3 次元モールドダイアグラム. 横軸の間隙水圧を差し引いた法線応力と縦軸のせん断応力は、鉛直応力で規格化している. 直線は摩擦係数 $\mu=0.6$ の場合のモール・クーロン破壊線を示す. 図中の赤丸は、(a)透水性亀裂と (b)全ての亀裂の応力状態を示す.

Fig.10. Three-dimensional Mohr diagram with the normal and shear stresses acting on a fracture plane. The horizontal and vertical axes correspond to the normal stress after removal of the pore pressure and the shear stress normalized by overburden stress, respectively. The black straight line indicate the Mohr Coulomb failure line under the condition of $\mu = 0.6$. Red dots in the figures are shown as the stress state of (a) permeable fractures and (b) all fractures, respectively.



第 11 図. 透水性亀裂の走向の深度方向の分布. 黒丸, 赤三角, 青菱形は透水性亀裂の走向を示す. 色分けは第 8 図と同じである. 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緑四角と緑色破線でそれぞれ示す.

Fig. 11. Depth distribution of strikes of the permeable fractures. The black dots, red triangles and blue diamonds indicate the strikes of the permeable fractures. The color classification is the same as Fig. 8. The orientations of maximum horizontal compressive stress and the averaged orientation are also shown by green squares and green broken line, respectively.



第12図. 亀裂の各種特性に関する深度方向の分布図. (a) 全ての亀裂の10 m 間隔の亀裂頻度. (b) 亀裂の走向. (c) 亀裂の傾斜角. (d) slip tendency. (e) dilation tendency. (a) 図の色は第6図の亀裂の色分けと同じである. (b)~(e) 図で灰色丸印は全ての亀裂を, 黒丸, 赤三角, 青菱形は透水性亀裂をそれぞれ示す. 透水性亀裂の色分けは第8図と同じである.

Fig. 12. Depth distributions of the fracture characteristics. (a) Frequency of all fractures at 10 m interval. (b) Strike of fractures. (c) Dip angle of fractures. (d) Slip tendency. (e) Dilation tendency. (a) The color classification is the same as the fractures in Fig.6. (b)~(e) The gray dots indicate all fractures. The black dots, red triangles and blue diamonds indicate the permeable fractures. The color classification is the same as Fig. 8.