

# 地下透水性亀裂の方向の支配要因：産総研地下水等総合観測井（愛知県・紀伊半島～四国）の16地点の孔井内測定データからの考察

## Controlling factors of orientations of subsurface permeable fractures: Borehole data analyses of 16 AIST observation stations in Aichi, Kii Peninsula and Shikoku regions, southwestern Japan

木口 努<sup>1</sup>・桑原 保人<sup>2</sup>

KIGUCHI Tsutomu<sup>1</sup> and KUWAHARA Yasuto<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 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)  
<sup>2</sup> 韓国地質資源研究院 (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

**Abstract:** We analyzed various borehole data obtained at 16 AIST observation sites down to a depth of 600 m in Aichi Prefecture, the Kii Peninsula and the Shikoku regions, southwestern Japan to clarify controlling factors of orientations of subsurface permeable fractures. We detected permeable fractures intersecting the borehole by using fluid electrical conductivity loggings, sonic loggings, and hydrophone vertical seismic profiling (VSP) data at each site. The orientations of permeable fractures were determined from borehole wall images obtained by borehole televiewer or television. We also determine orientations of all fractures which are not only limited to the permeable ones but also non-permeable ones traced on the borehole wall images. The number of permeable fractures is less than 4 % of that of all fractures at each site. Directions of the maximum compressional stresses at 16 sites were estimated from hydraulic fracturing stress measurements, borehole breakouts, and so on. It is found that the orientations of permeable, all fractures, and the directions of the stress and characteristic geological structure are almost consistent at all sites in the Shikoku region except one site, namely Niihama-Kuroshima (NHK), while these orientations are not consistent at the sites in Aichi Prefecture and the Kii Peninsula region. Combining all the data, we found that the strikes of the permeable fractures tend to correspond with orientations of the geological structure rather than the stress directions at each site. Thus, the geological structure is likely an important factor to control the orientation of the permeable fractures.

**キーワード：**透水性亀裂, 応力場, 地質構造, 電気伝導度検層, 速度検層, ハイドロフォン VSP, 水圧破砕法

**Keywords:** permeable fracture, in-situ stress, geological structure, fluid electrical conductivity logging, sonic logging, hydrophone VSP, hydraulic fracturing stress measurement

### 1. はじめに

岩盤中の高い透水性を示す亀裂の存在条件を明らかにするため、木口・桑原 (2018, 2019) は産業技術総合研究所 (産総研) が地下水等総合観測点として整備した2つの観測点、新居浜黒島 (以下、NHKと呼ぶ) と西尾善明 (以下、NSZと呼ぶ) で掘削された孔井において、透水性亀裂の向き (走向と傾斜角) と応力場との関係などについての解析を行った。彼らは電気伝導度検層、速度検層、ハイドロフォン VSP のデータから透水性亀裂の深度を検出し、ボアホールテレビュア (BHTV) による孔壁画像から透水性亀裂の向きを求めた。水圧破砕法から得られた応力場と透水性亀裂の向きとの関係について検討した結果、NHK では透水性亀裂の走向が全方位にばらついて分布し応力場との相関が見られなかった。

NSZ では透水性亀裂はある卓越方向を持つことが示されたが、透水性亀裂と応力場を関係付けたせん断型亀裂モデル (例えば、Morris *et al.*, 1996) と引張り型亀裂モデル (例えば、Ferrill *et al.*, 1999) のいずれの亀裂モデルを用いても、多くの透水性亀裂の向きを応力場と直接関係付けて説明することは困難であった。そこで我々はさらに事例を増やすことが重要であると考え、他の全ての地下水等総合観測点についても同様な解析を行い、また観測点近傍の地質構造の特徴的な方向や応力方位 (最大水平圧縮応力の方位) と亀裂走向の関係について考察を加えることとした。

産総研が2006年から2013年にかけて愛知県から紀伊半島及び四国地方に整備した16の地下水等総合観測点の掘削孔井では、地下水位・地殻歪・地震を

観測する機器の設置深度の判断を主な目的として各種の孔井内測定が実施された。必ずしも個々の透水性亀裂の把握が主目的ではなかったため、機器の設置上は十分であると判断されれば、観測点ごとの孔井地質や掘削状況などによって孔井内測定の項目や仕様については変更している場合もある。また、本論文で解析した速度検層等の物理検層やハイドロフォン VSP などのデジタル波形データについても多くの場合は保存されておらず、各種データ処理後の波形記録画像のみが保管されている。また、産総研観測点の孔井は鉛直井であり、高角で傾斜する亀裂は孔井に遭遇する確率が低くなることから、孔井を横切る亀裂を解析する際には原理的に亀裂分布などの評価に影響を与える（例えば、Davy *et al.*, 2006）。解析にあたってはその点にも注意する必要があるが、現段階では、孔井で観察される範囲の亀裂についての議論に留める。ここでは、以上のような制約のもとではあるが、透水性亀裂がどのような条件で存在するのかを検討するうえで非常に貴重なデータがあると考え、可能な限り統一的な解析を行うよう努めた。

本論文では、16 の観測点において上記のような多様な特徴と品質を示す測定データを用いて求めた透水性亀裂の向きが、応力方位や地質構造の特徴的な方向などとどのような関係を持つかについて整理し、透水性亀裂の方向の支配要因について検討した。なお、NHK と NSZ の 2 観測点については、他の観測点での結果と比較するなどの目的のために、木口・桑原（2018, 2019）で示した観測データや亀裂の分布などの解析結果の一部を改めて本論文で掲載する。

## 2. 産総研地下水等総合観測点及び孔井内計測の概要

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、産総研では 2006 年から 2013 年にかけて、愛知県から紀伊半島及び四国において多機能の地下水等総合観測点を 16 か所整備した（小泉ほか, 2009; Itaba *et al.*, 2010; 小泉, 2013）。各観測点では深さの異なる 3 つの鉛直孔井が掘削され、それらの深度は 600 m, 200 m, 30 m が基本であるが、観測点の状況に応じて深度を変更したことがある。ここではそれぞれの孔井を深い順に、孔 1, 孔 2, 孔 3 と称す。第 1 図は 20 万分の 1 日本シームレス地質図（産業技術総合研究所, 2020）上に 16 観測点の位置と名称を示したものである。また、第 1 表に各観測点の位置、座標、整備完了年などをまとめた。愛知県・紀伊半島に位置する観測点は表の上から 8 か所であり、四国の観測点は表の下 8 か所である。

各観測点での孔井内計測の概要については、16 の観測点で実施した全ての物理検層の測定項目、測定深度などの測定仕様の詳細及び結果の例は、木口ほ

か（2014）が取りまとめている。また、応力測定については水圧破碎法による応力測定及びボアホールブレイクアウトの孔壁観察を実施して得られた応力場の結果などが、Satoh *et al.* (2013), 佐藤ほか（2013）と木口・桑原（2018, 2019）にまとめられている。直接的な応力測定ではないが、観測点の孔井で観測されている歪計の長期トレンドを解析することにより求めた最大主歪方向と水圧破碎法などによる応力方位を比較し、それらが調和的であった観測点もある（木口ほか, 2017）。本論文では、水圧破碎法とボアホールブレイクアウトを利用する方法から応力場の情報を得ることを基本とするが、この 2 つの手法で応力情報が得られない観測点では歪計の長期トレンド解析から求めた最大主歪方向と比較することとした。

## 3. 各観測点の地質概要

本論文では主に亀裂の向きと応力方位や地質構造の方向との関係を議論するので、ここでは観測点の岩石の種類（結晶質岩 / 堆積岩）と地質構造・地形の特徴的な方向性の 2 つに注目して、16 の観測点の地質概要をまとめておく。各観測点の地質に関する情報については、掘削により回収されたコア試料や観測点周辺の地質調査などから、それぞれ観測点ごとに地質調査総合センター研究資料集にまとめられており、各観測点の説明の最後に参考資料として示す。

### TYS（豊田神殿観測点）

愛知県豊田市内の観測点は領家帯の南縁付近に位置し、周辺には領家帯の花崗岩類が広く分布している。このうち観測点には古期領家花崗岩類のトータル岩が分布し、その南側に分布する花崗岩との境界線は NE-SW 方向である。孔井地質はほぼ全深度でトータル岩が分布し、均質で硬質な性状を示す深度区間や亀裂の多い区間などが含まれる。また、アプライト脈・ペグマタイト脈が 1 cm ~ 数 m の幅で貫入しているのが認められる。（北川ほか, 2009b）

### NSZ（西尾善明観測点）

愛知県西尾市内の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確認された珪質片麻岩の片麻状構造の走向はおおよそ N80°E である。孔井地質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する。また、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）

### ANO（津安濃観測点）

三重県津市内の観測点は布引山地の東縁付近に位置し、観測点の東方約 2 km には逆断層の一志断層が

存在する。観測点周辺には領家変成帯中の花崗岩類である花崗閃緑岩、石英閃緑岩、片麻岩類が広く分布し、花崗閃緑岩の片麻状構造と片麻岩類の片理面の走向はおおよそE-Wである。孔井地質は花崗閃緑岩を主体とし、石英閃緑岩や花崗岩の岩脈、片麻岩（砂質・泥質が主体）が捕獲岩として認められる。（高橋ほか、2018）

#### ITA（松阪飯高観測点）

三重県松阪市内の観測点は領家帯の南縁に位置し、周辺には領家帯の花崗岩類が分布する。観測点の南約300mには中央構造線がほぼE-W方向に横断しており、中央構造線の南側には三波川帯の結晶片岩が分布する。観測点近傍に認められるトータル岩の面構造の方向はおおよそN80°Wである。孔井地質は深度474mまで領家帯の深成岩類（トータル岩、斑れい岩）であり、それ以深は三波川帯の結晶片岩であり、境界部が中央構造線と考えられる。（重松ほか、2009a）

#### MYM（紀北海山観測点）

三重県北牟婁郡内の観測点の周辺には熊野酸性岩類に属する花崗斑岩が分布する。観測点は環状岩脈上に位置すると考えられ、観測点近傍の環状岩脈の円弧の方向はおおよそE-Wである。孔井地質は、浅部の段丘堆積物を除き花崗斑岩が深部まで分布する。花崗斑岩中には、変質部や断層ガウジが存在する場合があります。また、コアが円盤状に割れるディスクングが顕著に発達する区間がある。（重松ほか、2009b）

#### ICU（熊野磯崎観測点）

三重県熊野市内の観測点は海岸から150m程度離れており、海岸には花崗斑岩の柱状節理が見られる。周辺の地形リニアメントはNE-SWからE-Wが優勢である。孔井地質は、深度464mまで熊野酸性岩類の花崗斑岩であり、それ以深は結晶片に富む酸性凝灰岩である。花崗斑岩は浅部では風化されているがそれ以外ではほぼ新鮮である。凝灰岩には亀裂や変質がほとんど認められない深度区間が多く、良好な岩盤と推定できる。（北川ほか、2009a）

#### KST（串本津荷観測点）

和歌山県東牟婁郡内の観測点は紀伊半島南端部に位置し、周辺には熊野層群の泥岩や泥岩優勢泥岩砂岩互層などが分布する。この地域には熊野酸性岩類の貫入があり、観測点の約2km北方に古座川弧状岩脈がある。古座川弧状岩脈に沿った古座川断層の南側には、高傾斜でNNW-SSE走向の多くの断層群が見られる。孔井地質は黒色泥岩を主体とするが、一部、含礫泥岩や砂岩も分布し、断層破碎帯も確認された。（佐藤隆司ほか、2009）

#### HGM（田辺本宮観測点）

和歌山県田辺市内の観測点は、E-W系の山稜が連なる紀伊半島中央部の果無山地の南部に位置する。観測点周辺には四万十層群に属する付加体堆積物の砂岩と頁岩の互層が分布する。孔井地質は浅部の段

丘堆積物以外は頁岩砂岩互層である。深度によって、頁岩優勢互層、砂岩優勢互層、等量互層の3つに区分することができる。（板場ほか、2009b）

#### ANK（阿南桑野観測点）

徳島県阿南市内の観測点の北側にはE-Wに伸長する山地が広がり、その山腹には仏像構造線がE-W方向に延びている。地質は付加帯堆積物の四万十帯北帯に属す。観測点近傍では砂岩と頁岩が交互に出現し、地層境界はほぼE-Wに配列する。孔井地質は、砂岩、砂岩優勢砂岩頁岩互層、頁岩、頁岩優勢互層から成り、一部破碎帯を含む。（木口ほか、2009）

#### MUR（室戸岬観測点）

高知県室戸市内の室戸岬北西域に位置する観測点周辺の地質は、四万十帯南帯の泥岩マトリックス中に砂岩ブロックや頁岩ブロックを含む岩塊の集合体であり、葉片構造の走向として、ENE-WSW（おおよそN50°E～N70°E）が認められる。孔井地質は含礫泥岩が主体であり、一部の深度では砂岩の巨礫が含まれる。また、高角度のせん断面が発達する部分と良好部分の繰り返しで構成されている。（梅田ほか、2009）

#### KOC（高知五台山観測点）

高知市内の観測点は高知平野西部の河川流域に広がった三角州低地に位置する。秩父類帯に位置する観測点の約1km南方にはE-W走向の仏像構造線がある。周辺の地質は付加コンプレックスであり、塊状砂岩、砂岩泥岩互層からなる碎屑岩類と厚いチャートが特徴的に繰り返し分布している。孔井地質は深度120mまで砂、シルト、砂礫からなり、それ以深は砂岩、泥岩、砂岩泥岩互層、チャートを主体とする。（関ほか、2009）

#### NHK（新居浜黒島観測点）

愛媛県新居浜市北東部の観測点は、ENE-WSW走向である中央構造線の石鎚山脈北縁区間（岡村断層）の北約7kmの領家帯に位置する。観測点は海岸線からおおよそ100m離れている。観測点近傍の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）

#### SSK（須崎大谷観測井）

高知県須崎市内の観測点周辺の地形は、ENE-WSW方向に延びる尾根構造と谷地形が顕著である。観測点は四万十帯北帯に属し、周辺では暗灰色の泥岩が分布し、泥岩のマトリックスのなかに、チャート・玄武岩・石灰岩・珪質泥岩・砂岩などが岩塊状・レンズ状に混在する。孔井地質は頁岩を主体とするが、砂岩が部分的に出現する。（板場ほか、2014）

#### TSS（土佐清水松尾観測点）

観測点は高知県土佐清水市内の足摺半島の南西端に位置する。深成岩類が観測点の周辺に分布し、この深成岩類はその北側に分布する四万十層群を貫く

貫入火成岩体である。観測点近傍では、花崗岩類や閃緑岩類がNE-SW方向に連続する。孔井地質は花崗岩類と閃緑岩類が主体であり、花崗岩、花崗斑岩、花崗閃緑岩、石英閃緑岩、閃緑岩等の岩種が確認された。(塚本ほか, 2009)

#### MAT (松山南江戸観測点)

愛媛県松山市内の観測点の北側には領家花崗岩類に属する花崗閃緑岩が分布し、一方、観測点周辺は和泉層群の砂岩および泥岩が分布する。この地質境界はおよそNE-SWの走向である。孔井地質は、深度177mまでの浅部が和泉層群の砂岩泥岩互層および凝灰岩であり、177m以深は花崗閃緑岩が主体となり流紋岩が数カ所で貫入している。(佐藤努ほか, 2009)

#### UWA (西予宇和観測点)

愛媛県西予市内の観測点周辺は南部秩父帯に属する付加体であり、チャートおよび砂岩を主とする。観測点の北側にENE-WSW走向の褶曲軸を持つ褶曲がある。孔井地質は、浅部では未固結の砂礫混じり粘土及び有機質土から成り、深度97m以深は南部秩父帯に属する砂岩粘板岩互層及びチャートを主体とするが、破碎帯も見られる。(板場ほか, 2009a)

### 4. 観測点の応力場評価

ここでは、これまで実施された水圧破碎法、ポアホールブレイクアウトの孔壁観察、歪計の長期トレンドデータの解析による3種類の結果を用いて、16の観測点における応力場を取りまとめる。

まず、6つの観測点(TYS, NSZ, ANO, ICU, NHK, TSS)の原位置で水圧破碎法を用いて地殻応力を測定した結果を説明する。この6観測点は、孔井掘削前の予想地質として硬質で亀裂の少ない結晶質岩(水圧破碎法を実施するのに適する岩質)が存在すると推定されたことなどを条件として選定された。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、パッカーにより密閉された孔井区間に水圧をかけて孔壁に亀裂を生成する手法である(例えば, Haimson and Cornet, 2003)。亀裂は最大水平主応力の方向に孔軸と平行に形成されるので、その亀裂を型撮りパッカーや孔壁イメージング検層で認定することから応力方位が得られる。区間内への送水を操作することにより一度生成した亀裂を閉口または再開口させ、そのときの水圧を用いて最大及び最小水平主応力の値を得ることができる。地盤工学会(2020)は、最大水平主応力の測定結果の信頼性を向上させることなどを目的として、新しい測定理論と測定システムに基づく水圧破碎法の基準を策定した。この基準では、最大水平主応力の値を適切に求めるために必要となる、測定装置の加圧システムの剛性を高くすることや最大水平主応力を算出する計算式における亀裂内の水

圧を修正することなど、従来の基準では説明されていなかった重要な事項が指摘されている。6観測点で実施した水圧破碎法はこの基準の策定期間よりも前に実施されたが、基本的に、基準に適合した測定装置や計算式などを採用している。

水圧破碎法により応力場を求めた6観測点では、せん断応力の大きさの指標としてYamamoto and Yabe(2001)による相対せん断応力 $r$ (relative shear stress)を用いることとした。 $r$ は、最大せん断面における最大せん断応力と法線応力の比であり、

$$r = (S1 - S3) / (S1 + S3)$$

で計算され、 $S1$ と $S3$ は、それぞれ最大圧縮応力と最小圧縮応力である。逆断層型の応力場の場合には、 $S3$ は鉛直応力を用いる。また、以下で求める $r$ では法線応力から静水圧を仮定した間隙水圧を差し引いている。

6観測点のうちNHKとNSZにおいては、最大及び最小水平圧縮応力の値と応力方位の結果を、それぞれ、木口・桑原(2018)、木口・桑原(2019)で詳細に説明している。NHKとNSZでは、ともに逆断層型の応力場であり、 $r$ は0.59、0.62と比較的大きい値を示すことから大きな差応力の応力場と言える。残りの4観測点、TYS, ANO, ICU, TSSにおける水圧破碎法による結果は、Satoh *et al.*(2013)が概要をまとめており、その結果を用いて、第2図(a)~(h)に4観測点の最大及び最小主応力の値と応力方位の深度方向の分布を示す。なお、(h)図のTSSの深度197.88mの測定においては、応力値を評価することが困難であったため応力方位だけを示した。測定した深度範囲と深度数については、NHKとNSZはともに浅部から深部まで幅広い深度区間で測定され、深度数はそれぞれ、11と13と多い。一方、TYS, ICU, TSSの測定深度数は2~5と比較的少なく、またANOは10深度で測定しているが300m以浅での測定に限られる。応力値を示す第2図(a), (c), (e), (g)の各図には、4観測点の最大及び最小主応力の値を直線で近似して求めた深度-応力の関係も示している。TYS, ANO, ICU, TSSの各観測点から採取したコアの岩石試験から求めた密度の平均値は、それぞれ、2.74, 2.72, 2.54, 2.68 g/cm<sup>3</sup>であり、この平均値を用いて鉛直応力を推定した。これらの鉛直応力は黒色実線で示す。NHK, NSZと同様に、最大、最小水平圧縮応力と鉛直応力の3つの直線近似から $r$ の値を求めると、ANOでは0.55で比較的差応力の大きい応力場である。TYS, ICU, TSSの3観測点では3主応力の値の大きさは同程度であり、 $r$ は、それぞれ、0.35, 0.23, 0.22となり差応力は小さい。なお、TYSとANOは逆断層型、ICUとTSSは横ずれ断層型の応力場と推定され、横ずれ断層型の場合に $r$ を求めるときは、 $S3$ に最小水平圧縮応力を用いた。応力方位について、各深度で得られた方位を平均した方位を(b), (d), (f), (h)の各図に黒色破線で

示す。TYS, ICU, TSS の 3 観測点では深度による方位のばらつきが小さいが、ANO では全体に N~W の範囲に分布してばらつきは大きく、方位の標準偏差は 32 度である。

次に、ボアホールブレイクアウトを利用して応力方位を求めた結果について説明する。ボアホールブレイクアウトは、掘削した孔井に周囲の岩盤からの圧縮応力が集中することにより、孔壁が孔軸方向に連続的に崩壊する現象であり、その崩壊は最小水平主応力の方位に生じる（例えば、Zoback *et al.*, 1985）。水圧破碎法の能動的な測定とは異なり、自然に発生する破壊現象を観察する手法である。ボアホールブレイクアウトが発生するかどうかは、孔井周辺の応力や岩盤の物性などの条件に依存する。Satoh *et al.* (2013) は、各観測点の孔壁イメージング検層の結果から、ボアホールブレイクアウトの有無やその方位などを求め、各観測点での平均方位と標準偏差を示している。ここでは、これらの平均方位と標準偏差を用いた。ボアホールブレイクアウトが確認された観測点は、ANO, ITA, MYM, ICU, ANK, MUR, KOC, SSK, TSS, MAT, UWA の 11 観測点である。

最後に、KST と HGM の 2 観測点では、水圧破碎法が実施されず、ボアホールブレイクアウトの発生も確認されなかったため、参考情報として、木口ほか (2017) による孔井内歪計で観測される長期トレンドデータからの最大主歪方向と標準偏差の結果を用いる。

以上のようにして求めた 16 観測点の応力方位あるいは最大主歪方位、標準偏差及び用いた手法を第 1 表にまとめる。表中の手法の HF, BB, LT の表記は、それぞれ、水圧破碎法、ボアホールブレイクアウトの孔壁観察、歪計の長期トレンド解析を意味する。なお、ANO, ICU, TSS の 3 観測点では、水圧破碎法とボアホールブレイクアウトの 2 つの手法が適用されたので、各手法により得た応力方位と標準偏差をそれぞれ平均した値を示している。16 観測点で求められた応力方位の分布や亀裂の走向との対応などの特徴は、第 7 章で説明する。

## 5. 透水性亀裂の検出

孔井を横切る透水性亀裂の検出には、NHK, NSZ で実施した木口・桑原 (2018, 2019) と同様に、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 つの孔井内測定の方法を用いる。この 3 つの手法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) と同様である。ただし、それぞれの孔井で歪計、地震計、水位計などを設置できるように孔井内作業の安全性を十分考慮する必要があるため、物理検層などの項目や仕様は各観測点・各孔井の孔井地質や掘削状況など

に基づき決定したので、3 つの測定がすべての孔井で実施されたわけではない。検層項目の中では、電気伝導度検層は HGM を除く 15 観測点で実施された。速度検層とハイドロフォン VSP による解析を実施した観測点は限られており、それぞれ、4 観測点、6 観測点であった。また、物理検層や VSP は観測井に機器を設置する際の透水ゾーンの深度や速度構造などの参考データを取得することが主な目的であり、電気伝導度検層についてはデジタルデータが保存されていたが、速度検層とハイドロフォン VSP については多くの場合、デジタルの波形データが保存されず、本章の図に示すようなデータ処理後の波形画像記録のみが保管されていた。そのため、速度検層とハイドロフォン VSP については波形画像記録を用いて解析した。以下に、3 つの手法で各観測点の透水性亀裂を検出した結果を説明する。なお、HGM ではないずれの手法も適用されず、透水性亀裂を検出することはできなかった。

### 5.1 電気伝導度検層による検出

透水性亀裂を検出するための電気伝導度検層では、以下のような標準的な測定手順をとる。1) 測定前に、孔内水を掘削泥水から地層水の電気伝導度と異なる水（例えば、脱イオン水）に置換する。2) 地層水が透水性亀裂から孔井内へ流入しやすい圧力状態とするために、測定前や測定中に孔内水を揚水し孔内の水頭を低下させる。3) 地層水の流入による電気伝導度の変化の再現性や拡散状態を確認するために、数回の繰り返し測定をする。

しかし、観測井の整備にあたっては孔井内状況に応じた孔井の保護と孔井内作業の安全を十分に考慮して測定仕様などを決める必要があったため、上記とは異なる手順で測定した場合もある。例えば、ケーシングがない裸孔区間では孔壁崩壊を防止するために、脱イオン水に置換せず掘削泥水のままで測定することがあった。泥水中での測定は、泥水の比重が  $1 \text{ g/cm}^3$  よりも大きく孔井内の圧力が高くなるために、地層水が孔井内へ流入しにくくなり検出に不利な条件となる。また、孔内水を脱イオン水に置換した孔井で測定された電気伝導度の値は  $1 \sim 100 \mu\text{S/cm}$  のオーダーであり、掘削泥水のままの孔井では  $1,000 \sim 10,000 \mu\text{S/cm}$  のオーダーとなり、測定データのノイズレベルが大きくなった。さらに、電気伝導度の変化を高感度で測定できるように、孔径が小さい HQ コアリング（直径約 98 mm）の孔井で実施することを基本としたが、掘削仕様の都合によりそれよりも大孔径（例えば直径約 270 mm）の孔井で実施した場合もある。本論文では各孔井の測定条件やデータの品質を十分考慮しながら地層水の流入による電気伝導度の変化を目視で検出し、透水性亀裂の深度を求めることとした。以下では、各孔井のデータの特徴などの違いにかかわらず、電気伝導度の変化を

検出するために用いた共通する3つの考え方を説明する。

まず、地層水が流入する深度の電気伝導度の変化の特徴は、脱イオン水の孔井においては、一般に流入する地層水の電気伝導度の方が高い値となるため、電気伝導度が高くなるピーク（正のピーク）の形状を示す。また、掘削泥水中で測定した場合には、地層水が流入する深度で電気伝導度が小さくなるピーク（負のピーク）を示す。このようなピーク以外のデータ変化の特徴として、Doughty and Tsang (2005) がモデル計算で示したように、孔内水に上昇あるいは下降の流れがある場合には、流速、測定までの経過時間などの条件によって、流入する深度でステップ状の変化を示すこともある。ステップ状の変化を示す例として、後述するNHKの孔3（第3図(k)）において2回目の測定による明瞭なピークを示した深度で、3時間後の4回目の測定ではステップ状に近い変化に変わっており、揚水などの影響による上昇流によって生じた変化と推定される。

次に、1つの孔井では原則1時間から数時間程度以上の間隔で繰り返し測定を実施し、電気伝導度が増える深度を検出する際には、変化の再現性の有無を確認した。しかし、測定を1回のみ実施した場合や、繰り返し測定のうち1回だけしか変化を確認できなかった場合でも、各孔井の状態や測定条件などを考慮して検出した場合もある。

最後に、脱イオン水と掘削泥水における電気伝導度のノイズレベルを評価するために、電気伝導度が50 m以上の区間で巨視的な変化も局所的な変動も見られずほぼ一定の値を示す下記の9孔井において、該当区間のデータの標準偏差を求めた。9孔井は、TYS孔2（1回目測定）、NSZ孔1（1回目）、NSZ孔2（3回目）、KST孔1（2回目）、ANK孔1（1回目）、ANK孔2（1回目）、MUR孔1（1回目）、SSK孔1（2回目）、UWA孔1（1回目）である。これらの測定データは後述する第3図に示している。掘削泥水での測定となった8孔井での標準偏差は2.3~63.0  $\mu\text{S}/\text{cm}$  の範囲であった。この結果から、掘削泥水の場合のノイズレベルを低（標準偏差:5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ）、中（標準偏差:10  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ）、高（標準偏差:60  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ）の3つに分類することが適切であると考え、掘削泥水を使用したすべての孔井のデータのノイズレベルを3つに分類することとした。分類する際には、各孔井で巨視的な変化のない区間のデータの標準偏差から判断した。また、脱イオン水で測定した1孔井で求めた標準偏差は、掘削泥水の場合よりも1~2桁小さい0.36  $\mu\text{S}/\text{cm}$ であったことから、脱イオン水を使用した場合の各孔井のデータの標準偏差を0.5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 程度とした。地層水の流入による電気伝導度の変化を検出する際には、それぞれの孔井において、上記のノイズレベルの分類に対応する標準偏差の2倍以上の大きさで電気伝導度が増えることを条件とした。ただし、

測定データで基準以上の変化がある深度を全て検出したのではなく、変化する勾配や形状、再現性なども考慮して検出を行なった。

HGMを除く15観測点における電気伝導度検層のデータと検出した透水性亀裂の深度を第3図(a)~(o)に示す。各図において、縦軸の深度と横軸の電気伝導度のスケールが異なることに注意されたい。また、繰り返し測定したデータを色分けして示した。検出した結果は図中の横線とグラフ右側の深度の数字で示す。1つの孔井で浅部と深部の2回に分けて測定した場合は、グラフを2つに分けて表示している。以下、観測点ごとに、測定時の孔井内条件やデータの特徴・品質などを説明する。

#### TYS（第3図(a)）

全ての孔井で脱イオン水に置換し、孔3と1は揚水により水頭を低下させた。孔2は測定時に湧水（約10リットル/分）していた。孔3と1では、測定ツールの測定限界よりも孔内水の電気伝導度が小さくなりデータが取得できない深度区間があったが、それ以外の深度区間において各繰り返し測定で電気伝導度の正のピークが確認できる深度を検出できた。ノイズが小さく急激な変化を示すことから検出した深度の分解能は高いと考えられる。また、孔2では、測定中の湧水により孔内水は上昇流となっておりと推定され、この場合、ある深度で脱イオン水よりも高い電気伝導度の地層水の流入があると、その深度より上部で急激に高い電気伝導度となるステップ状の変化を示すと考えられるので、その深度を認定した。

#### NSZ（第3図(b)）

孔3は脱イオン水に置換し、孔2と1は掘削泥水で測定し、全ての孔井で揚水により水頭を低下させた。孔3では正のピークを示す2つの深度について再現性を確認し高分解能で検出できた。孔2と1では電気伝導度が負のピークを示す深度を、再現性を確認しながら認定した。しかし、400 m以深部では変化を検出した深度がなかったことから、掘削泥水の測定のために深部での孔井内圧力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が考えられる。

#### ANO（第3図(c)）

孔3は脱イオン水に置換し、揚水により水頭を低下させた。孔2と1は掘削泥水で測定した。孔2は測定時に湧水（約1リットル/分）していた。孔1では最初の測定において297 mで降下不能となったため、ツールを引き上げたのち再測定として300~560 mまで測定したが、検出した深度はなかった。孔3の1回目の測定では、測定ツールの測定下限よりも孔内水の電気伝導度が小さくなる深度区間があった。

#### ITA（第3図(d)）

孔3と2は脱イオン水に置換し、孔1は掘削泥水

で測定し、孔3は揚水により水頭を低下させた。孔1は1回のみでの測定であったがノイズが小さく高品質のデータであったので、200 m以浅では上昇流を想定したステップ状の変化、200 m以深では負のピークを示す深度を認定した。孔3の14 m以深で測定ツールの測定下限よりも孔内水の電気伝導度が小さくなったため、14 m以深のデータの変化が確認できなかった。また、ケーシング直下の深度10 m付近で電気伝導度が高くなる変化が見られるが、これはケーシング下端付近に滞留する孔内水により電気伝導度が不均一となる影響の可能性が考えられたため認定しなかった。

#### MYM (第3図(e))

孔2の測定はなく、孔3は脱イオン水に置換し、揚水により水頭を低下させた。孔1は掘削泥水で測定した。孔1では測定時に5~9リットル/分程度の湧水があったため、繰り返し測定中に掘削泥水が徐々に薄まり電気伝導度が全体的に低下した可能性がある。電気伝導度が負のピークを示す深度を検出し、再現性も確認できた。測定2回目の250 mと測定3回目の265 m付近で電気伝導度が低下する変化が見られるが、それ以外の測定回では顕著な変化が認められず再現性がないため認定しなかった。孔3では測定ツールの測定下限よりも孔内水の電気伝導度が小さくなる深度区間があった。

#### ICU (第3図(f))

孔3の測定はなく、孔2と孔1はそれぞれ、脱イオン水、水道水に置換し、揚水により水頭を低下させた。孔1は浅部から525 mの深部まで、明瞭な電気伝導度の変化があり、かつ良い再現性を示すデータである。ただし355~420 m区間の電気伝導度の変動については、繰り返し測定の中で区間内の正のピークの個数が3から1に変化し、ピークの深度も測定回ごとに異なり、これらのピークの変化を孔内水の流れで説明することは困難であり、他の深度で検出したピークの再現性の特徴とは異なることからこの区間では認定しなかった。孔2では、掘削時に逸水した深度と対応する100.0 mにおいて、ステップ状に電気伝導度が急激に変化しており、この深度を認定した。

#### KST (第3図(g))

孔2の測定はなく、孔3は脱イオン水に置換し、孔1は掘削泥水で測定した。2孔井とも揚水により水頭を低下させた。孔1では水頭を最大45 m低下させた3回目以降の測定において電気伝導度が有意に負のピークを示す深度を認定した。孔3では、水頭を4 m以上低下させた4~8回目の測定で電気伝導度が正のピークを示す深度を認定した。

#### ANK (第3図(h))

孔3は脱イオン水に置換し、孔2と1は掘削泥水で測定し、孔2は揚水により水頭を低下させた。孔1では水位を管頭まで上げ孔井内圧を高くし孔井か

ら地層へ孔内水を浸透させるように亀裂を刺激することも試みたが、電気伝導度のデータに大きな変化は見られず、また全深度で高周波数のノイズがあるため全体に深度の検出が困難であった。孔1の深度490 m付近の電気伝導度が高くなる変化は泥水濃度が不均一となった影響が大きいと推測し認定しなかった。

#### MUR (第3図(i))

孔3と孔1の浅部は脱イオン水に置換し、孔1の深部は掘削泥水で測定した。全ての孔井で揚水により水頭を低下させた。孔3では全深度でほぼ一定の電気伝導度を示し、再現性のある有意な変化は認められないため、認定しなかった。大孔径(直径約270 mm)の孔井で実施したため電気伝導度の変化が小さくなった可能性も考えられる。孔1の浅部の測定中に孔井が孔壁崩壊と推定される孔井詰まりが深度130 m付近で生じたため、130 m以深は1回だけの測定であった。97.8 m~136.8 mの深度区間でステップ状の変化を示す深度について、ここでは孔井内に下降流を想定することから、これらの深度を亀裂深度と認定した。

#### KOC (第3図(j))

全ての孔井は掘削泥水で測定し、孔1の深部での測定時のみ揚水により水頭を低下させた。孔3と2は大孔径(直径約270 mm)での測定であり、また測定回数は1~2回と少なかった。孔2の浅部の測定は1回のみであり変化の再現性を確認できないが、ノイズが小さく、電気伝導度が負のピークを示す有意な変化がみられたので、これらの深度を認定した。

#### NHK (第3図(k))

孔3は脱イオン水に置換し、孔2と1は掘削泥水で測定した。全ての孔井で揚水により水頭を低下させた。孔2と1では、多くの区間で大振幅のパルス状の変化が高頻度に出現し、地層水の流入による変化と区別できないこと、変化の再現性を確認できないことなどから透水性亀裂の深度の認定はできなかった。また、海岸に約100 mの距離で隣接しているため、孔1の深度325~335 m付近の非常に高い電気伝導度の変化は海水起源の成分を含む地層水の流入によるものと推測される。異常を示す深度幅が広すぎるため、流入深度を認定しなかった。

#### SSK (第3図(l))

孔3は脱イオン水に置換し、孔2と1は掘削泥水で測定した。全ての孔井で揚水により水頭を低下させた。孔2と1では、測定の回数が進むにつれて孔井内の平均的な電気伝導度が低下しており、これは電気伝導度の低い地層水の流入が継続していると考えられる。孔1ではノイズレベルがやや大きい、3~5回目の測定で電気伝導度度が有意な振幅で負のピークを示す深度を認定した。

#### TSS (第3図(m))

全ての孔井で脱イオン水に置換した。水頭変化に

については、工事報告書に記載がなく不明である。孔1では、電気伝導度が正のピークを示す深度があるが、繰り返し測定によりピークの深度が深くなる変化を示す。ここでは、電気伝導度の変化する深度は孔内水の下降流によって経時的に移動したものと考え、孔内水を置換した直後に測定した1回目の測定結果から深度を検出した。孔2では、浅部から深部へ電気伝導度が緩やかな変化を示すが、その変化は緩やかすぎるため深度を認定できなかった。孔2では電気伝導度検層の代わりに、温度検層で地層水の流入による顕著な低温変化とその再現性を確認できたため、温度検層で検出した深度をここでは用いることとした。なお、他の観測点でも温度検層を実施しているが、他では温度検層は電気伝導度検層よりも高い品質・深度分解能で地層水が流入する深度を検出できなかった。

#### MAT (第3図(n))

全ての孔井で脱イオン水に置換し、揚水により水頭を低下させた。孔1の30~130 m区間で電気伝導度が振動するような変化が見られるが、変化が緩やかであるため認定しなかった。この変化は測定直前の揚管作業による鉄管の移動で孔井内の電気伝導度が乱された影響が残っていた可能性が考えられる。孔1の深部では、繰り返し測定は2回と少ないが、ノイズが小さいためステップ状に急な変化を示す深度などを認定した。

#### UWA (第3図(o))

孔3は脱イオン水に置換し、孔2と1は掘削泥水で測定し、全ての孔井で揚水により水頭を低下させた。孔1では、ノイズレベルが高いが、水頭を徐々に低下させた効果により、繰り返し測定でノイズよりも大きな振幅の負のピークを示す変化の深度を認定できた。例えば、約300 m以浅では主に2, 3回目のデータ、約300~400 m区間は主に3, 4回目のデータ、400 m以深は5回目のデータの電気伝導度の変化に注目した。孔2では認定できる深度はなかった。大孔径(直径約270 mm)の孔井で実施したため変化が明瞭でなかった可能性が考えられる。

### 5.2 速度検層による検出

速度検層では孔井壁面に沿う境界波であるストーンレー波が発生し、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。これらの現象を検出することで透水性亀裂の深度を求めることができる。速度検層はP波速度あるいはS波速度を求めるため全ての観測点で実施されているが、速度検層から透水性亀裂を検出するためのデータ処理と解析は16観測点整備期間中の後期になって実施するようになったため、早い時期に整備した観測点では速度検層による解析は行われず、NSZ, ANO, NHK, SSKのみで実施された。従って、この4観測点のみが解析対象となった。なお、前述のようにこの4観

測点についても、波形のデジタルデータそのものは残っておらず、第4図に示すような波形処理後の画像データだけが保存されているため、画像データから読み取りを行った。

第4図(a)~(h)に、NSZ, ANO, NHK, SSKのそれぞれ孔2と1で得られた速度検層の受振波形のVDL (Variable Density Log) 表示と検出した結果を示す。波形記録の中で、初動付近の約600 $\mu$ sに見られる太く濃い黒色で示される波形(大きい振幅で比較的低周波数の波形を意味する)がストーンレー波である。第4図(a)に600 $\mu$ sの位置を矢印で示す。図中左に数字の付いた黒い太線で示すおよそ1 mから数 mの区間は、ストーンレー波が反射・減衰・速度低下の異常を示す深度区間であり、区間の中心深度が横に示されている。亀裂が存在すると認定する深度の具体的な特徴として、反射波は上方及び下方に進行するV字型の波形パターンを示し、減衰は振幅と周波数の低下であり、速度低下は走時が遅れるためデータで波形が右側に凸となるパターンを示す。目視によりこれらの深度を検出する際には、上方及び下方進行の反射波が確認でき、かつ、減衰または速度低下の少なくともどちらか一方が確認できることを基準とした。減衰と速度低下はどちらか一方の確認でも良いとした理由は、減衰による振幅低下のために速度低下の特徴が確認できない場合があるからである。認定しなかった深度にも透水性亀裂が存在する可能性は残るが、ここではより顕著な変化を示す深度、すなわちより高い透水性の深度を認定したものと考えている。また、孔井内のケーシングの下端部と孔底の付近では、孔径変化の影響などによりストーンレー波の反射波などが記録されることがあるが、透水性亀裂の存在と関係しないため、これらの深度は対象としない。

各観測点で得られた波形の特徴などの概要を以下に説明する。

#### NSZ (第4図(a), (b))

孔2と1ではともに、全体的にノイズが低く、また初動付近以降の波形の振幅も相対的に小さいため、反射波の波形を明瞭に確認できる。減衰や速度低下を示す初動付近の波形の相対的な変化も顕著である。

#### ANO (第4図(c), (d))

孔2の100~150 m区間の波形データは保存されていなかった。孔2のそれ以外の区間では初動付近以降の波形の振幅が相対的に小さいため反射波の波形を明瞭に確認できる。また、減衰や速度低下を示す初動付近のストーンレー波の波形の変化も明瞭である。孔1では初動付近以降の波形の振幅が相対的に強調される処理が行われたため、反射波が他の波形と重なる傾向であるが、周波数の高い反射波は検出可能である。また、減衰や速度低下を示す初動付近の波形は、低周波数の波形として観察される場合がある。



#### NHK (第4図 (e), (f))

孔2では初動付近以降の波形の振幅が相対的に小さいため反射波が明瞭に確認できる。減衰や速度低下を示す初動付近の波形は、低周波数の波形として観察される場合があり、これらの深度では後続波全体が振幅の低下を示す傾向がある。この振幅低下から減衰する深度区間を推定することも可能である。孔1では、孔2に比べると初動付近以降のノイズが高い傾向があるが、反射波の検出は可能である。

#### SSK (第4図 (g), (h))

孔2では初動付近以降の波形の振幅が相対的に小さく、反射波の波形は他の波形よりも高周波となる傾向であるため、反射波を明瞭に確認できる。孔1では初動付近以降の波形の振幅が相対的に強調されているため、反射波が他の波形と重なり、検出が難しい場合がある。減衰については、初動付近だけでなく後続波全体が振幅の低下を示す場合があるので、この振幅低下から減衰を推定して検出することが可能であった。

### 5.3 ハイドロフォンVSPによる検出

ハイドロフォンVSPでは、孔井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、上方及び下方に伝播する。そのチューブ波を検出することで透水性亀裂の深度を求めることができる。ハイドロフォンVSPを実施する観測点は、孔井地質としてほぼ全深度で結晶質岩などの硬岩が予想されることや、反射法地震探査よりも有効に観測点周辺の地下構造に関する情報の取得が見込まれることなどを条件として、TYS, NSZ, ANO, NHK, SSK, TSSの6観測点(9孔井)が選ばれた。

第5図(a)~(i)に、TYS(孔2と1)、NSZ(孔2と1)、ANO(孔1)、NHK(孔2と1)、SSK(孔1)、TSS(孔1)のハイドロフォンVSPの記録と矢印で示す検出した深度をそれぞれ示す。初動P波から発生し上方及び下方に伝播するチューブ波の発生があり、発生深度から十分離れた深度までチューブ波の波形が連続することを確認して発生深度を認定することとした。ここでは10m程度以上離れた深度までチューブ波の並びが確認できることを目安とした。また、孔井内のケーシングの下端と孔底では、孔径変化などの影響によりチューブ波が発生することがあるが、透水性亀裂と関係しないため、これらの深度は対象としない。ケーシングの下端の例は第5図(h)の図中に示されている。これ以外の孔井ではケーシングの下端は図に示す最浅部よりも浅部側にある。また、第5図(e)と(f)の図中で最深部付近から上方に伝播する波形が見られるが、これらは孔底から発生したチューブ波の例である。なお、本章で示すハイドロフォンVSPは、深度10m分ずつ取得したデータを深度順に並べた記録であるので、VSP記録上に

10m間隔で不連続が見られ、チューブ波の検出が曖昧になる場合がある。速度検層と同じように、特徴的な波形の変化を目視で検出した結果には曖昧さが含まれるが、ここではチューブ波の発生が明瞭な深度を認定したものと考えている。

ハイドロフォンVSPで観測されるチューブ波の発生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ことについて、木口ほか(1996)や木口・桑原(2018, 2019)と同じような考え方で、キャリパー検層で取得した孔径値(木口ほか, 2014)を用いて深度1m区間内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、NSZ, ANO, TSSの観測点では、それぞれの孔井において、チューブ波を発生しないが大きな平均勾配を示す深度での値と比べて、チューブ波の発生する全ての深度ではそれよりも小さい平均勾配の値となるため、これらの観測点では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。NHKとSSKでは、チューブ波を発生しない深度の中で最大の平均勾配を示す値は、それぞれ、1.6%と0.35%であり、これらよりも大きな平均勾配を示す深度の近傍で発生したチューブ波がそれぞれの観測点で3深度ずつあり(NHK: 孔2の85.5mと孔1の330.0m, 433.5m, SSK: 孔1の314.0m, 509.0m, 537.5m)、これらの深度で発生するチューブ波には孔径変化による影響が含まれる可能性がある。しかし、2観測点のこれら以外のチューブ波発生深度では平均勾配が1.6%または0.35%より小さいため、チューブ波発生に孔径変化が与える影響は小さいと考えられる。なお、TYSの孔2と1では、VSPを実施したHQコアリング後の孔井においてキャリパー検層を実施しなかったため、孔径変化による影響を評価することができなかった。しかし、孔壁画像によって、開口性の亀裂が存在することが確認されており、ここでは孔径変化による可能性は低いと考えた。

以下に、各観測点で得られたハイドロフォンVSPの記録の特徴を述べる。

#### TYS (第5図 (a), (b))

孔2と孔1のチューブ波の周波数は、ともに約100Hzである。孔2の初動付近からチューブ波が上方及び下方に伝播する波形を確認できる2深度を認定した。孔1では震源を設置した付近の軟らかい地盤などの影響により、震源エネルギーが小さく、深部の波形を確認することが困難な場合がある。チューブ波が上方及び下方に伝播する波形を明瞭に確認できる3深度を認定した。孔2と1ともに、初動P波が到達する前の波形をミュートする(振幅低減)処理をしている。

#### NSZ (第5図 (c), (d))

孔2と1ともに、150~200Hz程度の高周波数の記録が取得され、深部までS/N(signal/noise)の良

い初動 P 波を確認できる。チューブ波の発生深度の検出も高分解能で可能である。なお、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、これらは孔井内で移動し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。

#### ANO (第 5 図(e))

孔 1 で取得された記録の周波数は 150 Hz 程度であり、深部まで S/N の良い初動 P 波を確認できる。チューブ波の発生深度の検出も高分解能で可能である。

#### NHK (第 5 図(f), (g))

孔 2 と 1 とともに、200 Hz 程度の高周波数の記録が取得され、S/N も良好であり、深部まで初動 P 波を確認できる。チューブ波の発生深度の検出も高分解能で可能である。

#### SSK (第 5 図(h))

孔 1 で取得された記録は、200 Hz 程度の高周波数であり、深部まで S/N の良い初動 P 波を確認できる。チューブ波の発生深度の検出も高分解能で可能である。

#### TSS (第 5 図(i))

孔 1 で取得された記録の周波数は 100 Hz 程度である。初動 P 波が到達する前の波形をミュートする処理をしていないため、初動付近の S/N は他の観測点と比べて相対的に低い。しかし、深部まで初動 P 波は確認でき、チューブ波の発生深度の検出も可能である。

### 5.4 透水性亀裂の深度の決定

前節までに説明したように、本論文では 3 つの手法を用いて透水性亀裂の深度を検出した。複数の手法によって検出した深度について、本論文では、木口・桑原 (2018, 2019) と同様に、以下の考え方とする。

1) 各手法で検出した深度の誤差を木口・桑原 (2019) と同じように最大 2.5 m と考え、各手法による深度が 2.5 m の範囲で対応する場合には、同一の深度から検出したとする。速度検層では深度区間の中心深度を用いて他の手法の深度と比較する。最終的に表記する検出深度は電気伝導度検層による深度とし、電気伝導度検層で検出していない場合には速度検層の深度とする。

2) 同一孔井で速度検層とハイドロフォン VSP の両方を実施した場合、両者でともに検出した深度 (2.5 m の範囲で両者による検出深度が対応する) を最終的な検出深度とする。どちらか一方だけで検出した深度は採用しない。これは、ハイドロフォン VSP に比べて速度検層で検出した深度は多くなっており、その原因として、木口・桑原 (2018, 2019) 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に、孔径変化などの透水性亀裂以外の変化

も敏感に捉えている可能性も考えられるからである。

3) 1 つの孔井で速度検層またはハイドロフォン VSP のどちらか一方だけを適用した場合、その手法で検出した深度をそのまま採用する。

以上の考え方により各観測点の各孔井で検出した透水性亀裂の深度を第 2 表の (a)~(o) にまとめた。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。検出した深度数は 15 観測点全体で、238 個である。

### 6. 孔壁画像による透水性亀裂の向きの決定

第 5 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、各観測点で実施された BHTV またはボアホールカメラ (ボアホールテレビジョン, BTV) の孔壁画像から決定した。観測点の中には BHTV または BTV の測定時のデジタルデータが保存されていない場合があり、ここではデータ処理を経た画像データを用いた。

BHTV は孔内装置から超音波を発射して孔壁からの反射波を記録し反射波の走時と振幅の 2 種類のデータから孔壁画像を得る。BHTV の測定原理、孔壁画像を用いた亀裂形状の確認や亀裂の向きの決定方法などは、木口・桑原 (2018, 2019) を参照されたい。BTV は孔内装置のテレビカメラで孔壁を光学的に撮影する原理であり、掘削泥水を使用した孔井内では撮影が可能となるように実施前に孔内水を清水に置換する必要がある。孔壁画像を用いた亀裂形状の確認や向きの決定などは、基本的に BHTV と同様である。BTV の画像から亀裂の向きを求めた観測点は TYS と TSS の 2 観測点であり、それ以外の観測点は BHTV の画像を用いた。

全ての観測点において、木口・桑原 (2018, 2019) が説明した NHK と NSZ と同じように、ほぼ全深度で様々な向きの亀裂が存在し、また亀裂の幅や亀裂形状を示すサインカーブの連続性などで様々な特徴が見られ、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。各観測点で検出した深度の孔壁画像を確認すると、それらの深度付近には複数の異なる向きの亀裂が密に存在する場所があるので、特定の亀裂を透水性亀裂として選定することが難しい。このため、木口・桑原 (2018, 2019) の考え方と同じように、速度検層により観測されるストンレー波は 1 m から数 m 程度の深度区間で異常を示す傾向であることから、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、速度検層による解析を実施していない孔井やストンレー波で異常が確認できなかった場合には、電気伝導度検層またはハイドロフォン VSP で検出した深度を中心とした  $\pm 0.5$  m の区間を透水ゾーンとした。各観測点で求めた透水ゾーンの深度区間を第 2 表 (a)~(o) に示す。表中の深度区間に

速度検層のストンレー波の異常から求めた区間か、電気伝導度検層またはハイドロフォン VSP による検出深度から求めた区間かの区別を示している。

各透水ゾーンから透水性亀裂の向きを求める方針は、木口・桑原 (2018, 2019) と同じく以下の通りとした。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る。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する。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する。また、透水ゾーン内に開口性を示す亀裂が存在しない場合には、その深度では亀裂の向きを求めないこととした。上記の3つの分類に対応する透水ゾーンの孔壁画像の代表的な例を第6図 (a), (b), (c) に示す。3つの画像はいずれも BHTV で取得されたものであり、また、各図の深度の横の黒線は透水ゾーンの区間を示す。なお、孔壁画像の全データについては、膨大になるためここでは掲載しないが、木口ほか (2020) で見るので参照されたい。また、NHK と NSZ の2観測点については全ての透水ゾーンの孔壁画像を木口・桑原 (2018, 2019) で示している。第6図の孔壁画像における亀裂は、目視により亀裂形状の明瞭性と開口性を基準として、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ている。木口・桑原 (2018, 2019) と同じく、開口性の亀裂が存在する場合は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した。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 (a) に示す SSK の孔2の深度 57.1 m 付近では、速度検層で異常を示す 1.2 m の深度区間内に開口性の亀裂 (図中赤色) が1つ存在するので、この亀裂によりこの深度の透水性亀裂の向きを代表した。ANO の孔2の深度 96.0 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、およそ北に傾斜する開口性の亀裂 (図中赤色と緑色) が3つ存在する。どれかの1つの亀裂に決めることが困難であるため、ここでは3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 NHK の孔1の深度 329.7 m 付近では、速度検層が異常を示す深度区間に亀裂が密集し孔径の拡大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。各観測点で求めた合計 238 個の透水ゾーンの孔壁画像か

ら、第6図の例と同様にして透水性亀裂の向きを決定した結果を第2表 (a)~(o) にまとめる。孔壁画像から求めた亀裂の深度、傾斜方位、傾斜角を示している。傾斜方位は北から時計回りの角度である。1つの透水ゾーンから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。第2表 (j) に示す KOC では、透水性亀裂を検出した孔井が孔2だけであり、その孔2の孔径が約 270 mm と大きいことの影響などにより BHTV による孔壁画像の品質が低い結果となり、亀裂の形状や開口性を確認できなかった。このため、KOC では透水性亀裂の向きを求めなかった。第3表に観測点ごとの透水ゾーンの個数、向きを求めた透水性亀裂の個数、全亀裂の個数を示す。全亀裂とは、第6図の孔壁画像の例に見られる青色も含めた全てのサインカーブで示された亀裂である。透水性亀裂の向きの数は各観測点により 9~137 個の範囲でばらつきがあり、14 観測点の合計は 598 個であった。

木口・桑原 (2018, 2019) 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もあることなどから、透水性亀裂を一意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、木口・桑原 (2018, 2019) と同様に、その有意性も検討しつつ、以下のように透水性亀裂の向きを支配する要因を調べることにする。

## 7. 亀裂の向きと応力方位、地質構造の関係

各観測点の全亀裂及び透水性亀裂の向きの分布を第7図 (a)~(p) に示す。上段が全亀裂、下段が透水性亀裂の分布である。また左から亀裂面の法線方向の下半球投影図、そのコンター図、亀裂走向のローズダイアグラム (10 度間隔) である。各観測点で求めた応力方位の平均方位を図中に赤色矢印で示す。なお、(h) HGM と (k) KOC では透水性亀裂の向きを求められなかったため、全亀裂についての向きだけを示している。第7図の図中及び第3表に全亀裂と透水性亀裂の数を示しており、6章でも説明したように、各観測点の透水性亀裂の数は全亀裂の多くても 4% 以下である。第7図から、観測点ごとに、亀裂の走向が卓越した向きを持つか、透水性亀裂と全亀裂の向きが同じような傾向を示すか、亀裂の走向と応力方位が一致するかなどの様々な特徴が見て取れる。例えば、(a) TYS, (l) NHK の観測点では透水性亀裂は特に卓越した走向を示さず全方位にばらつく傾向である。本章では、透水性亀裂の向きの支配要因を検討するため、各観測点の応力方位を基準とした透水性亀裂と全亀裂の向きの対応と相関の解析を行った。

まず、透水性亀裂と全亀裂のそれぞれの向きと応力方位の関係を定量的に評価できるように、個々の

亀裂の走向が応力方位となす角度の頻度分布を調べた。方位の頻度分布を求める際には、角度幅によって分布の見え方が変わる場合があるので（例えば、新井, 2011）、角度幅として5度、10度、15度の3種類を取って、それぞれについて各観測点の頻度分布の結果を第8～10図に示した。各観測点の図の横軸は亀裂の走向が応力方位となす角度であり、時計回りを正とする。縦軸は応力方位からそれぞれ5度、10度、15度間隔の方位に存在する走向の亀裂の頻度であり亀裂の総数における割合（%）で示している。図中の赤線と黒線が、それぞれ透水性亀裂と全亀裂の頻度を示す。ただし、HGMとKOCでは全亀裂についての頻度分布だけを示している。各図の右半分の枠内に愛知県と紀伊半島に位置する8観測点、左半分の枠内に四国に位置する8観測点の結果をまとめた。間隔を5度とした場合（第8図）に、透水性亀裂の総数が少ないMYMやANKなどの観測点では、頻度がゼロとなる角度が多く頻度分布の傾向を捉えにくくなる場合もあるが、3種類の角度幅によって透水性亀裂と全亀裂の頻度の分布の傾向に特に大きな差異はないであろう。従って頻度分布に関する考察では以下のように間隔が10度の場合の結果（第9図）を用いることとする。

第9図を見ると、応力方位と透水性/全亀裂の卓越走向の対応に関して、愛知県・紀伊半島と四国の2つの地域に大別して、異なる傾向が見られるようである。四国ではNHKを除いた全ての観測点で、透水性亀裂及び全亀裂の卓越方向が応力方位と30度以内で一致しているように見える。NHKでは全亀裂の卓越方向は応力方位とほぼ直交し、透水性亀裂の走向は全方位にばらついている。一方、愛知県・紀伊半島では、ITAの全亀裂とMYMの透水性/全亀裂を除き、透水性/全亀裂ともに卓越方向が明瞭でないか、明瞭である場合でも応力方位とは一致しないように見える。ITAでは全亀裂は応力方位に近い走向が多く分布し、MYMでは透水性亀裂及び全亀裂の走向とともに、応力方位と一致する卓越方向と、それとは大きく異なる方向の2つで卓越するバイモーダルな分布となっている。透水性亀裂の走向と応力方位の対応の程度を3つに分類した結果を第3表に示す。ここでは、応力方位に含まれる誤差も考慮して、透水性亀裂の卓越方向が応力方位と約20度以内で対応する場合に○印、約30度以内で対応する場合に△印、30度以上異なるか亀裂走向が全方位にばらつく場合は×印とした。また、表中のFPとFAは、それぞれ、透水性亀裂と全亀裂を表している。

第11図は、透水性亀裂の向きを求めなかったHGMとKOCを含めた16観測点の全亀裂の走向について、愛知県・紀伊半島と四国の2つの地域に分け、それぞれの地域の8観測点における応力方位となす角度の頻度分布（10度間隔）を重ねて表示している。この図からも、四国の観測点は愛知県・紀伊半島の

観測点に比べて、全亀裂の走向は応力方位と一致する横軸0度付近で頻度が大きくなる傾向であることがわかる。また、第12図は、透水性亀裂について、第11図と同じように2つの地域に分けて頻度分布を重ねて表示した結果であり、透水性亀裂の向きの数が少ない観測点があるために分布の傾向が不明瞭となる場合もあるが、前段落で説明した通り、愛知県・紀伊半島ではMYMを除き応力方位と30度程度以上異なる走向が相対的に多くなる傾向を示す。以上のように、2つの地域により亀裂の走向と応力方位の対応の傾向が異なることが明らかとなり興味深い。

さらに、第8図に示す頻度分布から透水性亀裂と全亀裂の走向の分布に相関がみられる観測点が多数認められ、両者の相関図を作成し相関係数を求めた。第13図に示す相関図の横軸と縦軸はそれぞれ、10度間隔とした場合に全亀裂、透水性亀裂の走向が応力方位となす角度の頻度（%）である。図中の各観測点の名称の横に示した数字が相関係数であり、第3表にも示している。第3表では統計学で一般に用いられている相関の強さの基準（例えば、川瀬, 2009）に従い、相関係数が0.7以上、0.7未満～0.4、0.4未満～0.2、0.2未満の4段階に分けて、それぞれ、強い相関、中程度の相関、弱い相関、ほとんど相関がないに分類し、◎、○、△、×の記号で示した。相関係数を求めるデータ数が18個と多くないため、相関を評価するには注意が必要であるが、各観測点により両者の相関は様々であることが示された。相関係数が0.2よりも小さく、透水性亀裂の走向の分布が全亀裂の分布とほとんど相関がないと考えられる3つの観測点TYS、ITA、KSTは全て愛知県・紀伊半島にある。相関係数の平均値は、愛知県・紀伊半島の観測点では0.37、四国では0.54であった。上記の相関に関する検討は角度の間隔が10度の場合の結果を用いたが、角度の間隔を5度として相関に用いるデータ数を増やした場合にも、各観測点の透水性亀裂と全亀裂の走向の分布の相関の傾向は上記の内容とほぼ同じであった。

以上の結果から、各観測点の透水性亀裂の走向と応力方位または全亀裂の走向との関係に関する特徴として、愛知県・紀伊半島の観測点では透水性亀裂の卓越走向は応力方位と30度程度以上異なるか全方位にばらつく傾向であり、一方、四国の観測点では応力方位とほぼ整合する傾向を示した。ただし、MYMとNHKは各地域内の他の観測点と異なる傾向を示す。また、透水性亀裂の走向の分布について、全亀裂の走向と高い相関を示す観測点が多いがほとんど相関を示さない観測点もいくつか含まれ、四国の観測点の方が両者の走向が対応する傾向にある。

これまで議論した全ての観測点の透水性亀裂と全亀裂の走向と応力方位、地質構造の特徴的な方向が統一的に一目でわかるように、観測点の位置とともに表示したのが第14図である。応力方位（赤矢印）

と地質構造の特徴的な方向（青実線）は走向のローズダイアグラムと合わせて示している。地質構造の方向は、3章で説明した地質概要を基に、観測点近くの断層・構造線・褶曲軸、地形リニアメント、岩相境界、露頭岩石の片麻状構造・面構造などの地質情報から読み取った。各観測点の地質構造の方向は1つで代表したが、ICUは周辺地形リニアメントから得た情報によりNE-SWとE-Wの2方向を示している。なお、観測点ごとに透水性亀裂及び全亀裂の総数が異なり、そのことが図上で視覚的にわかるようにするため、(a)と(b)図のローズダイアグラムの半径は、それぞれの図のローズダイアグラムの最大数の平方根に比例している。第14図を見ると全亀裂の走向は地質構造の特徴的な方向と対応する傾向があることもわかる。

以下では、全亀裂と透水性亀裂のそれぞれの平均走向と標準偏差及び地質構造の特徴的な方向が、愛知県・紀伊半島と四国の地域を合わせ、全体的にはどのような関係になっているのかについて検討する。走向の平均値と標準偏差を求める際には、走向データは180度ごとに循環する特性を持つため、方向統計学（例えば、新井，2011）に従い各方位をベクトルとして扱い合成ベクトルの方向と長さを用いて求めた。ただし、例えばMYMの全亀裂と透水性亀裂の走向では、第7図(e)のローズダイアグラムや第9図に示すように走向が大きく異なる2つの方向(N-S, ENE-WSW)に卓越する頻度を示すバイモーダルな分布を示すため、このような分布を示す観測点では単純に平均した走向を用いるのではなく、2つの卓越する方向におけるそれぞれの最頻値の走向を観測点の代表する走向として使用するのが適切であると考へた。第7図と9図から、目視により特に顕著な2方向の卓越頻度を示す観測点として、MYMの他に、NSZの透水性亀裂、ANOの全亀裂と透水性亀裂、ITAの透水性亀裂、KSTの全亀裂を選び、これらの観測点では平均値ではなくバイモーダルな分布の2つの卓越する頻度の走向を使用することとした。卓越する走向はローズダイアグラムから求め、また、卓越する頻度の走向を用いて相関を求めるときは、2つの卓越走向のうち、比較する方向との対応が良い走向を用いた。観測点の全亀裂と透水性亀裂の平均走向及び標準偏差の相関図をそれぞれ、第15図、第16図に示す。平均走向と標準偏差の値は第3表に示している。バイモーダルな分布を示す観測点では卓越する2つの走向を表中の平均走向の欄のかっこ内に示す。走向の方位は北から時計回りの角度である。四国地域を黒丸、愛知県・紀伊半島地域を白丸で示す。各図に縦軸と横軸の値が等しい場合の補助線を加えた。第15図を見ると、TYSでは全亀裂と透水性亀裂の平均走向の差が40度以上異なるが、これはTYSでは全亀裂も透水性亀裂も全方位にばらつくことによる影響と考へられる。14観測点

全体で見ると全亀裂と透水性亀裂の平均走向には比較的強い相関があることがわかる。相関係数は0.85である。なお、バイモーダルな分布を考へせず全ての観測点で平均走向を用いた場合の相関係数は0.70である。相関係数を評価するときには、元のデータの成分それぞれに同じバイアス（定数）を加えて原点から離れたデータとすると、バイアスの影響により元のデータに比べて見かけ上大きい相関係数が得られることになる。そこで、相関を求める前に適切なデータ処理によりデータを原点の周辺に分布させることが必要である。ここでは、第15図を作成するときに、方位データが180度ごとに循環する特異性を生かして、KSTの方位を負の値とし各観測点の方位を全体の方位の平均値のおよそ±90度の範囲に入るように取り、全体として方位データを原点周辺に分布させることから相関係数を適切に評価できるようにした。この作業を行わない場合は、相関係数はより大きくなる。さらに、本解析においては、ある分布がバイモーダルかどうかの判断には任意性があり、TYS, KST, MUR, NHKの4観測点の透水性亀裂についてもバイモーダルのように見える可能性があるため、この場合の2つの卓越する走向を参考値として第3表に記入した。これら4観測点もバイモーダルな分布とした場合には、相関係数は0.92とさらに大きくなる。バイモーダルな分布とするかどうかは、データ数が少ないことなどの問題もあり、ここではこれ以上の議論はできないと考へるが、この4観測点をバイモーダルな分布とするかしないかのいずれにおいても強い相関を示す結果となる。

走向の標準偏差については、第16図に示すように、全亀裂のばらつきよりも透水性亀裂のばらつきがやや大きいグループ（補助線よりも上側）と、透水性亀裂の方が全亀裂よりも標準偏差が小さくある向きに集中する傾向を示すグループ（補助線よりも下側）の2つのグループに分かれるように見える。このように2つに分かれる原因は不明であるが、全体としては全亀裂の走向のばらつきが大きいほど透水性亀裂のばらつきが大きくなる傾向であり、相関係数は0.56である。また、愛知県・紀伊半島と四国地域で分布の違いは特に見られないようである。

次に、全亀裂の平均走向と地質構造の特徴的な方向との相関を第17図に示す。ここでも、四国地域を黒丸、愛知県・紀伊半島地域を白丸で示し、縦軸と横軸の値が等しい場合の補助線を加えた。各観測点の地質構造の特徴的な方向を第3表にまとめた。ICUには2つの方向があるが、第17図では全亀裂の平均走向に近い方向(90度)だけを用いている。また、第15図と同じく、走向がバイモーダルな分布をする観測点では平均走向ではなく卓越走向を使用した。第17図から、大局的には全亀裂の平均走向は地質構造の特徴的な方向に近いと言えるであろう。相関係数は0.94であり、非常に強い相関があると言える。

なお、バイモーダルな分布を考慮せずに全ての観測点で平均走向を用いた場合の相関係数は0.85である。第14～17図から以下のことが言える。

- ・16観測点全体として、全亀裂の平均走向は、地質構造の特徴的な方向と強い相関がある。
- ・透水性亀裂の平均走向は、大局的に全亀裂の平均走向と強い相関がある。
- ・亀裂走向の標準偏差について、全体的に全亀裂のばらつきが大きいほど透水性亀裂のばらつきも大きくなる傾向が見られる。
- ・四国ではNHKを除いて、全亀裂/透水性亀裂の走向、応力方位、地質構造の方向がほぼ一致し、NE-SWからE-Wの範囲に分布する。愛知県・紀伊半島では四国に比べると、これらの向きが一致しない観測点が多く含まれる。

なお本論文では、応力場と透水性亀裂の関係について、木口・桑原(2018, 2019)で行ったような詳細な検討は行わなかった。木口・桑原(2018, 2019)で述べたように応力場と透水性亀裂を関係付けたせん断型と引張り型の2つの亀裂モデルを用いると、応力場との組み合わせによって応力方位と透水性亀裂の走向の関係は様々な場合が想定される。例えば、引張り型亀裂モデルでは、逆断層型・横ずれ断層型・正断層型のいずれの応力場でも、高い透水性が期待される亀裂の走向は応力方位と平行に近い向きに分布する。せん断型亀裂モデルの正断層型応力場では透水性亀裂の走向は応力方位と平行に近い向き、横ずれ断層型応力場では応力方位から20～30度程度異なる向き、逆断層型応力場では応力方位と直交に近い向きとなる。木口・桑原(2018, 2019)ではNHKとNSZのそれぞれの観測点の応力場と亀裂の向きとの関係について、これら2つの亀裂モデルを用いて詳細に検討したが、応力場で透水性亀裂の向きの分布を説明することは困難であった。本章で説明したように、16観測点全体としての透水性亀裂の走向の分布は、応力場との関係で見ると、地質構造の向きや全亀裂の走向との相関が最も強く現れると言えるであろう。

## 8. まとめ

産総研が愛知県から紀伊半島及び四国にかけて整備した16の地下水等総合観測点のそれぞれ3つの掘削孔井(最大深度約600m)で、透水性亀裂が存在する条件を解明するため、物理検層、ハイドロフォンVSP、応力測定の種類データの整理を行った。その結果、HGMとKOCを除く14観測点において、透水性亀裂の存在する深さとその向きを決定した。また、水圧破砕法、ボアホールブレイクアウトの孔壁観察及び歪計の長期トレンドデータの解析の各手法から得られた16観測点における応力方位または最大主歪方向は、全体として、NE-SWからE-Wの範

囲にほぼ分布する傾向であるが、それとは大きく異なるNW-SEなどを示す観測点もあった。

16観測点における全亀裂と透水性亀裂の走向、応力方位、地質構造の特徴的な向きの相関などを調べた結果、四国の観測点ではNHKを除いて、全亀裂と透水性亀裂の走向、応力方位、地質構造の方向がほぼ一致しており、愛知県・紀伊半島では四国に比べるとこれらの向きが一致しない観測点が多いことがわかった。ただし、全てのデータを大局的に見ると、透水性亀裂の向きは応力方位よりも全亀裂の走向に支配されている傾向があることがわかった。また、全亀裂の卓越方向は、全体として地質構造の特徴的な方向に近い傾向があることもわかった。どのような方向の透水性亀裂が存在するかは、既存の地質構造に支配される媒質の割れやすさと応力状態の2つの要因があると考えられ、今回の結果は、既存の地質構造が支配的であることが示されたと考えられる。

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)及び松本則夫氏、各観測点の整備を担当された北川有一氏、高橋 誠氏、重松紀生氏、佐藤隆司氏、板場智史氏、梅田康弘氏、関 陽児氏、塚本 齊氏、佐藤 努氏や多くの関係者の方々に、地下水等総合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。各観測点の観測井は、株式会社日さく、住鉱コンサルタント株式会社(現：住鉱資源開発株式会社)、サンコーコンサルタント株式会社、地熱エンジニアリング株式会社、株式会社エオネックス、応用地質株式会社、日鉱探開株式会社(現：JX金属探開株式会社)により掘削されました。物理検層、ハイドロフォンVSP、水圧破砕法は、それぞれ、物理計測コンサルタント株式会社と応用地質株式会社、サンコーコンサルタント株式会社、ジオテクノス株式会社と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。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

- 新井宏嘉(2011)地質学における方向データ解析法：円周データの統計学、地質学雑誌、117、547-564。
- Davy, C., Darcel, C., Bour, O., Munier, R. and de Dreuzy, J.R. (2006) A note on the angular correction applied to fracture intensity profiles along drill core. *J. Geophys. Res.*, 111, B11408.
- Doughty, C and Tsang, C.-F. (2005) Signatures in flowing fluid electric conductivity logs. *J. Hydrol.*, 310, 157-180.

- 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.
- 板場智史・佐藤 努・小泉尚嗣・梶原竜哉・佐久間澄夫・堀 邦夫・高橋 仁・菱 靖之・杉本健 (2009a) GSJ コア宇和観測点資料. 地質調査総合センター研究資料集, 503, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 板場智史・高橋 誠・小泉尚嗣・千葉昭彦・村瀬昭彦・明石孝行 (2009b) GSJ コア本宮三越観測点資料. 地質調査総合センター研究資料集, 509, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 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.
- 板場智史・梅田康弘・小泉尚嗣・渡辺 寛・中山伸朗・酒井誠志 (2014) GSJ コア須崎大谷観測点資料. 地質調査総合センター研究資料集, 595, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 地盤工学会 (2020) 新規制定地盤工学会基準・同解説 水圧破砕法による初期地圧の測定方法. *JGS* 3761-2017.
- 川瀬雅也 (2009) 生物学のための統計学入門. 化学同人, 208pp.
- 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, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, No. 18, 73-114.
- 木口 努・桑原保人 (2019) 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. 活断層・古地震研究報告, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, No. 19, 33-59.
- 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・高橋 誠・小泉尚嗣・南澤正幸・村中英寿・香月 誠・赤澤司史・遠田 渉 (2009) GSJ コア阿南桑野観測点資料. 地質調査総合センター研究資料集, 507, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 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.
- 木口 努・桑原保人・松本則夫 (2017) 孔井内歪計で観測される長期トレンドの解析と地殻応力測定結果の比較. 活断層・古地震研究報告, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, No.17, 91-116.
- 木口 努・松本則夫・北川有一・重松紀生・板場智史・塚本 斉・佐藤 努 (2020) 産総研地下水等総合観測点の孔井における孔壁画像資料. 地質調査総合センター研究資料集, 704, 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・水落幸広・村瀬昭彦・川西 繁 (2009a) GSJ コア井内浦観測点資料. 地質調査総合センター研究資料集, 510, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 北川有一・佐藤 努・小泉尚嗣・中山伸朗・伊藤健二・鈴木悠爾 (2009b) GSJ コア豊田下山観測点資料. 地質調査総合センター研究資料集, 513, 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.
- 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.
- 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) (2020) 20 万分の 1 日本シームレス地質図 V2 2020 年 4 月 6 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・高橋 誠・柳谷茂夫・佐久間澄夫・阿部孝男・菱 靖之・浅沼幹弘・荒井文明 (2009) GSJ コア串本津荷観測点資料. 地質調査総合センター研究資料集, 508, 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.

Satoh, T., Kitagawa, Y., Shigematsu, N., Takahashi, M., Tsukamoto, H., Kiguchi, T., Itaba, S., Umeda, Y., Sato, T., Seki, Y. and Koizumi, N. (2013) Shallow crustal stress around Shikoku and Kii region, SW Japan, inferred from hydraulic fracturing tests and borehole wall observations. *Proc. of 6th. Int. Symp. on In-Situ Rock Stress*, 661-666.

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 努・北川有一・小泉尚嗣・名取二郎・西村義章・芳賀政蔵・廣岡 知・谷川晋一 (2009) GSJ コア松山観測点資料. 地質調査総合センター研究資料集, 504, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.

関 陽児・松本則夫・小泉尚嗣・大島雅浩・元松直幸 (2009) GSJ コア高知市観測点資料. 地質調査総合センター研究資料集, 505, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.

重松紀生・小泉尚嗣・渡辺 寛・伊藤 勉・曾出康浩・西脇 仁 (2009a) GSJ コア飯高赤桶観測点資料, 地質調査総合センター研究資料集, 511, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.

重松紀生・小泉尚嗣・水落幸広・村瀬昭彦・明石孝行 (2009b) GSJ コア海山観測点資料. 地質調査総合センター研究資料集, 512, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.

高橋 誠・佐藤 努・木口 努・小泉尚嗣・松本則夫・伊藤 勉・西脇 仁 (2018) GSJ コア津安濃観測点資料. 地質調査総合センター研究資料集, 656, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.

塚本 齊・佐藤 努・小泉尚嗣・佐々木勝司・萩原育夫・戸村重樹 (2009) GSJ コア土佐清水観測点資料. 地質調査総合センター研究資料集, 502, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.

梅田康弘・板場智史・小泉尚嗣・佐々木勝司・堀川滋雄・吉岡正光 (2009) GSJ コア室戸観測点資料. 地質調査総合センター研究資料集, 506, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.

Yamamoto, K. and Yabe, Y. (2001) Stresses at sites close to the Nojima Fault measured from core samples. *The Island Arc*, 10, 266-281.

Zoback, M. D., Moos, D., Mastin, L. and Anderson, R. N. (1985) Well bore breakouts and in situ stress. *J. Geophys. Res.*, 90, 5523-5530.

(受付: 2020 年 8 月 31 日, 受理: 2020 年 10 月 26 日)

第 1 表. 産総研地下水等総合観測点の名称, 所在地, 座標 (世界測地系), 標高, 整備完了年, 最大水平主応力の方位と標準偏差, 応力測定手法. \*1: 北から時計回りの方位. \*2: 応力方位の標準偏差. 応力測定手法の HF は水圧破砕法, BB はボアホールブレイクアウトの孔壁観察, LT は歪計の長期トレンドデータの解析を示す.

Table 1. Site parameters and the estimated stress orientations. \*1: Clockwise from north. \*2: Standard deviation of stress orientation. HF: Hydraulic fracturing stress measurement. BB: Borehole breakout. LT: Long-term trend of borehole strainmeter data.

Site	Prefecture	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Elevation (m)	Construction year	Stress orientation *1 (deg.)	S.D. *2 (deg.)	Method of stress measurement
TYS	Aichi	35.0405	137.3578	480	2008	74	14	HF
NSZ	Aichi	34.8442	137.1057	39	2013	33	34	HF
ANO	Mie	34.7870	136.4019	163	2010	141	26	HF & BB
ITA	Mie	34.4534	136.3129	301	2008	90	15	BB
MYM	Mie	34.1123	136.1815	29	2008	73	20	BB
ICU	Mie	33.9001	136.1379	28	2007	37	10	HF & BB
KST	Wakayama	33.5201	135.8363	25	2008	133	6	LT
HGM	Wakayama	33.8675	135.7318	120	2007	170	5	LT
ANK	Tokushima	33.8661	134.6045	36	2008	90	20	BB
MUR	Kochi	33.2856	134.1563	62	2008	43	17	BB
KOC	Kochi	33.5505	133.5990	5	2008	55	18	BB
NHK	Ehime	33.9904	133.3423	9	2013	160	20	HF
SSK	Kochi	33.3896	133.3229	17	2010	72	20	BB
TSS	Kochi	32.7357	132.9757	125	2008	73	22	HF & BB
MAT	Ehime	33.8422	132.7393	44	2008	54	13	BB
UWA	Ehime	33.3859	132.4823	214	2009	96	11	BB



第2表. HGMを除く15の観測点において、電気伝導度検層、速度検層、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孔壁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((a)~(o)). 観測点名を各表の上部に示す. 複数の向きを求めた深度や向きを求めなかった深度を含む. \*1: 電気伝導度検層から検出した深度. \*2: 速度検層から検出した深度. \*3: ハイドロフォンVSPから検出した深度. \*4: 電気伝導度検層またはハイドロフォンVSPから求めた深度区間. \*5: 速度検層から求めた深度区間. \*6: 北から時計回りの方位. \*7: 温度検層から検出した深度(TSSの孔2のみ).

Table 2. Summary of the depths of the permeable fractures detected by fluid electrical conductivity logging, sonic logging and hydrophone VSP at 15 AIST observation sites except HGM, depth interval of the permeable zone, and the depth, dip direction and dip angle of the permeable fractures determined by using borehole wall images at each site ((a)~(o)). The site name is shown at the top of each table. 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 electrical conductivity logging. \*2: Depth detected by sonic logging. \*3: Depth detected by hydrophone VSP. \*4: Depth interval determined by using fluid electrical conductivity log or hydrophone VSP. \*5: Depth interval determined from anomalies of Stoneley waves in sonic logging data. \*6: Clockwise from north. \*7: Depth detected by temperature logging (only at Hole-2 of TSS).

(a) TYS

Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole TV		
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)
3	23.0 *1	22.5-23.5 *4	23.10	142	73
			23.31	156	74
3	24.6 *1	24.1-25.1 *4	24.63	302	4
3	28.7 *1	28.2-29.2 *4	-	-	-
3	41.0 *1	40.5-41.5 *4	40.69	179	20
2	151.6 *1,3	151.1-152.1 *4	151.21	85	10
			151.57	203	6
			151.67	209	22
			151.86	213	10
2	167.8 *1	167.3-168.3 *4	168.19	115	8
2	169.6 *1	169.1-170.1 *4	169.41	241	78
2	193.6 *1,3	193.1-194.1 *4	193.38	261	69
			193.81	252	11
1	117.5 *1	117.0-118.0 *4	117.00	77	41
			117.76	16	15
1	160.0 *1	159.5-160.5 *4	159.75	146	32
			160.31	45	10
1	167.9 *1	167.4-168.4 *4	168.06	59	22
1	168.8 *1	168.3-169.3 *4	168.88	54	17
			216.31	334	39
			216.58	315	48
			216.85	107	11
			216.88	233	23
1	216.8 *1,3	216.3-217.3 *4	217.16	41	64
			235.04	55	20
1	234.9 *1	234.4-235.4 *4	235.04	55	20

Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole TV		
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)
1	243.6 *1	243.1-244.1 *4	243.22	20	70
			243.64	176	31
1	252.2 *1,3	251.7-252.7 *4	251.97	93	10
			252.16	201	14
1	254.7 *1	254.2-255.2 *4	254.23	299	32
			254.34	289	19
			254.56	146	53
			254.62	174	35
			254.87	120	65
1	322.4 *1	321.9-322.9 *4	322.75	212	42
			322.88	66	34
1	393.6 *1	393.1-394.1 *4	393.86	348	61
			394.10	93	72
1	411.7 *1	411.2-412.2 *4	412.10	19	36
			412.19	307	39
1	417.0 *3	416.5-417.5 *4	416.52	300	33
			416.81	302	46
			416.93	295	32
			417.38	300	46
			417.39	4	37
			417.48	329	23
1	429.8 *1	429.3-430.3 *4	429.83	283	67
1	448.4 *1	447.9-448.9 *4	447.97	247	31
			448.06	291	49
			448.21	240	41
			448.25	247	45
			448.28	0	29

第2表. (続き)  
Table. 2. (continued)

(b) NSZ

Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televiewer (BHTV)		
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	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 *2,3	62.1-63.5 *5	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 *2,3	89.6-90.4 *5	89.95	158	30
			90.03	5	47
			90.17	87	72
2	100.3 *1,2,3	98.8-101.2 *5	99.92	245	54
2	120.7 *1	120.6-121.5 *5	-	-	-
2	133.3 *1	133.2-133.9 *5	133.63	4	60
			133.71	6	63
2	154.9 *1,2,3	154.6-155.3 *5	154.80	259	61
			155.22	186	51
2	169.3 *2,3	168.2-170.4 *5	168.60	221	47
			169.32	174	31
			169.45	210	58
2	202.9 *2,3	202.1-203.4 *5	202.33	20	73
			202.70	352	69

Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televiewer (BHTV)		
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)
1	252.7 *1,2,3	252.2-253.2 *5	-	-	-
1	256.6 *1	256.3-257.2 *5	256.68	163	67
			256.97	215	66
			257.09	199	62
1	262.2 *1	262.0-263.4 *5	262.29	225	28
			262.50	178	56
			262.86	170	65
1	270.1 *2,3	269.8-270.7 *5	270.27	190	60
			270.33	194	64
1	290.0 *1	290.0-290.8 *5	290.40	213	59
1	295.9 *1	295.8-296.7 *5	295.85	23	73
			296.41	344	65
			296.48	348	64
1	313.8 *1	313.3-314.3 *4	-	-	-
1	393.6 *1,2,3	393.6-394.9 *5	393.96	88	43
			394.45	7	71
1	401.8 *1,2,3	401.0-401.8 *5	401.17	82	60
1	480.7 *2,3	480.1-481.1 *5	480.15	259	53
			480.36	259	43
			480.62	251	49
1	537.7 *2,3	537.2-538.2 *5	537.58	43	70
			537.99	50	66

第2表. (続き)  
Table. 2. (continued)

(c) ANO

Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televiewer (BHTV)			Hole	Depth detected by loggings and VSP (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televiewer (BHTV)					
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)				Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)			
3	21.4 *1	20.9-21.9 *4	20.93	203	58	1	241.1 *2,3	240.5-241.6 *5	240.51	6	64			
			21.06	194	47				240.61	10	65			
			21.17	312	37				240.73	80	59			
			21.21	269	36				241.05	254	72			
			21.27	254	38				241.12	250	60			
			21.52	328	46									
3	30.5 *1	30.0-31.0 *4	-	-	-	1	287.7 *2,3	287.2-288.2 *5	287.67	111	73			
2	41.5 *2	41.0-42.0 *5	41.06	316	49	1	290.4 *2,3	289.6-291.2 *5	289.94	160	54			
			41.20	324	59				290.10	161	55			
			41.34	301	63				290.25	182	56			
2	43.7 *2	43.4-44.1 *5	43.52	358	83				290.29	324	45			
			43.81	344	49				290.34	186	54			
			43.90	346	43				290.39	334	45			
2	52.4 *2	51.8-52.9 *5	51.91	10	57				290.58	181	61			
			52.53	8	71				290.69	185	57			
2	55.5 *2	55.0-56.0 *5	55.07	278	57				290.77	350	34			
			55.25	262	71				290.85	196	42			
2	60.8 *2	60.3-61.3 *5	60.33	262	60				1	293.2 *2,3	292.4-294.0 *5	292.58	296	41
			66.74	272	48							292.65	164	46
			66.78	210	34							292.79	312	57
			67.03	222	32	292.86	304	44						
			67.16	12	58	293.01	226	55						
			67.47	146	49	293.14	16	48						
			67.55	352	68	293.34	20	37						
			67.60	168	54	293.39	8	39						
			67.88	2	60	293.44	350	36						
			69.10	324	43	293.57	181	61						
2	69.5 *2	69.1-70.0 *5	69.21	320	54	1	296.0 *2,3	295.0-297.0 *5	295.09	342	50			
			69.57	265	67				295.26	188	63			
			82.89	256	72				295.36	187	53			
2	83.4 *2	82.8-84.0 *5	83.76	1	61				295.37	11	70			
			95.43	354	58				295.99	154	52			
			95.49	353	48				296.28	166	50			
2	96.0 *2	95.4-96.5 *5	95.69	358	61				296.72	159	57			
			-	-	-				296.80	158	64			
			161.41	286	72				296.86	328	68			
2	104.2 *1	103.7-104.7 *4	161.64	234	59				1	320.4 *2,3	318.2-322.5 *5	318.75	294	33
			161.71	227	56	320.30	259	30						
			163.38	252	51	322.15	284	40						
2	164.3 *2	163.0-165.5 *5	163.47	261	83	322.20	298	32						
			163.82	268	47	322.24	306	29						
			164.25	230	47	416.88	180	48						
			164.33	188	58	417.06	212	40						
			164.39	358	48	417.17	208	33						
			166.52	282	74	417.40	220	59						
2	167.2 *2	166.5-167.8 *5	-	-	-	1	417.4 *2,3	416.8-418.1 *5				417.49	318	33
2	176.8 *1	176.3-177.3 *4	-	-	-				417.52	246	41			
2	201.5 *1	201.0-202.0 *4	201.99	246	61				417.64	332	45			
1	208.4 *1	207.9-208.9 *4	208.06	36	72				417.68	248	60			
			208.92	330	73				417.81	232	63			
			209.01	322	72				417.89	146	81			
			209.39	356	75				418.66	262	49			
			209.51	356	76				418.84	260	32			
			209.72	12	72				444.73	266	41			
			209.92	359	64				444.83	97	55			
1	209.7 *2,3	208.0-211.4 *5	210.17	4	66	445.15	108	58						
			238.68	37	50	446.21	337	56						
			238.85	36	50	446.38	270	51						
1	238.9 *2,3	238.5-239.2 *5	238.97	16	52	447.60	236	42						

第2表. (続き)  
Table. 2. (continued)

(c) ANO (continued)

Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televierer (BHTV)			Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televierer (BHTV)		
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)				Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)
1	488.1 *2,3	487.5-488.8 *5	487.85	21	43	1	520.6 *2,3	520.2-521.1 *5	520.48	187	49
			487.95	4	44				520.64	164	65
			488.14	31	42				522.15	86	69
			488.25	358	51				522.49	164	53
			488.44	171	61				522.51	344	69
1	492.3 *2,3	491.0-493.6 *5	491.02	80	59	1	522.6 *2,3	522.0-523.2 *5	522.64	202	67
			491.10	86	63				522.72	147	47
			491.27	105	63						
			491.40	100	57						
			491.52	92	62						
			491.71	86	64						
			492.53	180	59						
			492.56	350	48						
			492.72	124	67						
			492.80	309	85						
			493.23	54	70						

(d) ITA

Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televierer (BHTV)			Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televierer (BHTV)		
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)				Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)
2	188.5 *1	188.0-189.0 *4	188.26	214	55	1	176.4 *1	175.9-176.9 *4	176.46	226	67
			188.28	33	69				176.76	273	68
			188.46	229	40				176.83	288	71
			188.56	30	72				193.04	142	20
			188.64	249	49				193.39	180	33
			188.89	335	45				193.50	27	82
2	196.9 *1	196.4-197.4 *4	196.58	289	41	1	193.1 *1	192.6-193.6 *4	193.54	33	70
			196.66	304	40				325.08	187	47
			196.71	305	40				325.74	175	52
			196.80	285	42				373.11	304	53
			196.87	305	77				373.36	321	52
			196.95	292	56				404.76	182	67
			197.16	314	43				405.40	215	76
			1	325.5 *1	325.0-326.0 *4				325.08	187	47
1	373.6 *1	373.1-374.1 *4	373.11	304	53						
1	405.2 *1	404.7-405.7 *4	404.76	182	67						

(e) MYM

Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televierer (BHTV)			Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televierer (BHTV)		
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)				Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)
1	211.4 *1	210.9-211.9 *4	-	-	-	1	382.5 *1	382.0-383.0 *4	382.65	174	70
1	295.9 *1	295.4-296.4 *4	295.42	187	62				382.89	35	61
1	336.4 *1	335.9-336.9 *4	295.60	165	56	1	421.7 *1	421.2-422.2 *4	421.23	108	75
			295.83	164	61				421.37	121	76
			336.04	160	65				421.65	107	73
			336.17	334	82						
			336.31	332	73						

第2表. (続き)  
Table. 2. (continued)

(f) ICU

Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televierer (BHTV)		
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)
2	100.0 *1	99.5-100.5 *4	-	-	-
1	31.7 *1	31.2-32.2 *4	31.28	11	67
			31.59	350	49
			31.98	23	67
			32.04	19	66
1	42.0 *1	41.5-42.5 *4	41.70	164	68
			41.85	171	63
			42.15	163	50
1	125.3 *1	124.8-125.8 *4	125.66	137	24
1	145.6 *1	145.1-146.1 *4	-	-	-
1	220.2 *1	219.7-220.7 *4	220.26	357	73
			220.56	0	75

Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televierer (BHTV)		
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)
1	299.7 *1	299.2-300.2 *4	299.41	5	61
			299.59	319	71
			299.98	189	61
			300.20	194	67
1	354.8 *1	354.3-355.3 *4	354.58	180	61
1	421.7 *1	421.2-422.2 *4	421.89	163	72
			421.91	33	71
			422.13	185	68
1	476.1 *1	475.6-476.6 *4	475.72	299	52
			475.95	5	62
			476.05	3	63
			476.17	357	60
			476.40	353	59
1	525.3 *1	524.8-525.8 *4	-	-	-

(g) KST

Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televierer (BHTV)		
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)
3	29.6 *1	29.1-30.1 *4	29.76	114	60
			29.88	119	54
			29.93	281	54
3	31.2 *1	30.7-31.7 *4	30.98	318	48
			31.16	304	66
			31.32	285	66
			32.13	266	56
3	32.1 *1	31.6-32.6 *4	32.18	270	57
			32.21	94	62
			32.40	284	74
			32.57	255	64
			32.40	284	74
3	32.8 *1	32.3-33.3 *4	32.57	255	64
			32.81	245	66
			33.90	54	66
3	34.2 *1	33.7-34.7 *4	34.19	265	61
			34.24	1	76
			34.69	263	72

Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televierer (BHTV)		
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)
3	36.2 *1	35.7-36.7 *4	-	-	-
3	38.4 *1	37.9-38.9 *4	38.50	283	41
1	213.0 *1	212.5-213.5 *4	212.87	1	57
			213.06	12	53
			213.19	227	62
			213.23	12	60
			213.33	24	63
			213.40	187	68
			213.48	0	50
1	265.6 *1	265.1-266.1 *4	265.88	86	53
1	311.5 *1	311.0-312.0 *4	266.05	107	64
			311.62	296	32
1	333.5 *1	333.0-334.0 *4	333.36	208	75
			333.74	241	69
			333.88	228	70

(h) ANK

Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televierer (BHTV)		
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)
3	18.5 *1	18.0-19.0 *4	-	-	-
3	26.5 *1	26.0-27.0 *4	26.69	37	36
			26.76	81	33
1	49.4 *1	48.9-49.9 *4	49.25	19	66
			49.51	16	75

Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televierer (BHTV)		
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)
1	64.4 *1	63.9-64.9 *4	63.92	158	45
			64.08	0	26
			64.40	0	52
			64.52	10	61
			64.69	353	33

第2表. (続き)  
Table. 2. (continued)

(i) MUR

Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televiewer (BHTV)		
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)
1	97.8 *1	97.3-98.3 *4	97.37	333	79
			97.80	97	17
			98.28	337	85
1	127.9 *1	127.4-128.4 *4	-	-	-
1	131.7 *1	131.2-132.2 *4	131.54	27	22
1	133.7 *1	133.2-134.2 *4	133.78	156	58
1	134.6 *1	134.1-135.1 *4	-	-	-

Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televiewer (BHTV)		
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)
1	135.6 *1	135.1-136.1 *4	-	-	-
1	136.8 *1	136.3-137.3 *4	136.55	135	72
			137.20	335	83
1	225.7 *1	225.2-226.2 *4	225.49	118	80
			226.00	109	63
			226.13	108	65

(j) KOC

Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televiewer (BHTV)		
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)
2	147.1 *1	146.6-147.6 *4	-	-	-
2	148.3 *1	147.8-148.8 *4	-	-	-
2	158.0 *1	157.5-158.5 *4	-	-	-

Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televiewer (BHTV)		
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)
2	159.8 *1	159.3-160.3 *4	-	-	-
2	170.2 *1	169.7-170.7 *4	-	-	-
2	172.0 *1	171.5-172.5 *4	-	-	-

(k) NHK

Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televiewer (BHTV)		
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)
3	33.4 *1	32.9-33.9 *4	33.71	148	44
3	35.2 *1	34.7-35.7 *4	-	-	-
2	68.0 *2,3	67.3-68.3 *5	68.30	346	82
2	85.0 *2,3	84.4-86.1 *5	85.23	86	43
2	130.0 *2,3	128.9-131.0 *5	129.36	57	60
			129.67	47	59
2	138.2 *2,3	137.0-139.0 *5	138.32	102	74
2	172.0 *2,3	171.2-172.6 *5	172.22	49	74
1	204.4 *2,3	203.8-204.8 *5	204.53	189	61
1	217.7 *2,3	217.0-218.4 *5	217.66	161	75
1	277.3 *2,3	276.4-278.2 *5	277.34	213	69
1	297.0 *2,3	296.4-297.5 *5	295.91	161	68
			296.49	151	65
			296.54	331	65
			296.92	150	52

Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televiewer (BHTV)		
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)
1	329.7 *2,3	328.2-330.4 *5	328.56	250	77
			329.70	1	62
1	342.4 *2,3	341.8-342.9 *5	342.27	259	77
			360.07	277	83
1	360.4 *2,3	359.1-361.8 *5	361.63	238	66
			361.71	219	63
1	433.7 *2,3	432.2-435.2 *5	432.76	69	67
1	491.8 *2,3	491.2-492.2 *5	491.38	115	58
			491.74	165	49
			491.95	141	46
1	511.7 *2,3	510.8-512.7 *5	512.01	125	83
1	523.0 *2,3	521.4-524.5 *5	521.53	307	82
			521.97	117	86

第2表. (続き)  
Table. 2. (continued)

(I) SSK

Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televiewer (BHTV)			Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televiewer (BHTV)		
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)				Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)
3	33.7 *1	33.2-34.2 *4	33.26	339	33	2	160.2 *2	159.6-160.8 *5	159.61	174	43
			33.43	165	53				159.67	167	46
			33.89	316	70				159.79	165	43
			34.12	321	64				160.54	128	71
			34.18	328	62				160.70	123	63
2	33.4 *2	32.8-34.0 *5	-	-	-	2	185.7 *2	185.1-186.2 *5	185.10	333	15
2	48.5 *1,2	46.5-47.7 *5	46.64	73	25	2	196.1 *2	195.0-197.2 *5	185.21	315	23
			46.69	71	55				195.00	18	70
			47.20	190	70				195.16	159	55
2	57.1 *2	56.5-57.7 *5	56.58	149	62	2	196.1 *2	195.0-197.2 *5	195.42	1	44
2	78.0 *2	77.5-78.5 *5	77.56	330	48				195.80	328	64
2	82.1 *2	81.5-82.7 *5	81.58	40	43				195.94	337	56
			81.66	13	48				196.27	332	61
2	84.2 *2	83.8-84.6 *5	84.23	170	61				196.51	159	54
2	88.5 *2	88.0-89.0 *5	-	-	-	2	208.0 *1	207.5-208.5 *4	208.03	308	62
2	91.3 *2	90.7-91.8 *5	90.82	18	41	2	207.9 *2,3	207.3-208.5 *5	208.12	303	62
2	94.0 *2	92.3-95.7 *5	92.36	259	38				207.42	25	48
			92.53	85	53	207.48	38	40			
			92.90	58	52	207.55	40	38			
			93.02	11	59	1	209.4 *2,3	208.8-209.9 *5	208.82	112	35
			93.10	340	47				209.34	5	61
			93.25	73	46	209.36	170	29			
			93.44	349	50	209.38	5	61			
			93.52	348	55	1	260.5 *2,3	260.0-261.0 *5	260.02	157	49
			93.66	74	50				260.28	194	69
			93.75	44	48	260.44	208	53			
			93.93	6	48	1	277.1 *2,3	276.6-277.5 *5	-	-	-
			94.07	349	43	1	304.0 *2,3	303.5-304.5 *5	303.59	345	41
			94.29	351	39				303.88	0	32
			94.37	344	50	1	314.0 *1,2,3	312.0-314.0 *5	312.48	179	71
			94.74	299	52				312.54	359	75
99.70	264	54	313.13	180	69						
100.27	151	67	313.13	0	76						
2	98.4 *1,2	99.7-100.6 *5	105.88	322	38	1	334.5 *2,3	334.0-335.2 *5	334.25	141	53
2	105.5 *2	105.0-106.0 *5	106.75	300	53				334.52	45	72
2	107.3 *2	106.5-108.0 *5	106.79	136	54	1	337.5 *2,3	336.9-338.1 *5	334.58	38	48
			106.86	320	49				334.68	336	61
			106.94	312	46				337.00	320	51
			112.16	280	36				337.10	312	58
2	112.7 *2	112.0-113.3 *5	112.60	277	54	1	349.6 *1	349.1-350.1 *4	337.33	311	57
			112.90	261	48				337.38	312	49
			115.01	346	32				337.52	311	54
2	115.6 *2	115.0-116.2 *5	115.09	32	31	1	364.7 *1	364.0-365.5 *5	337.61	316	47
			115.21	261	21				-	-	-
			115.27	310	32				364.07	207	45
			115.36	322	35				364.11	57	68
			115.56	218	44				364.16	219	48
			115.81	144	76				364.23	193	54
			116.08	295	72				364.30	188	51
2	118.9 *2	118.3-119.5 *5	118.32	334	48	364.47	130	62			
2	126.8 *2	126.0-127.5 *5	118.42	338	36	364.54	125	71			
			126.06	19	55	364.80	316	63			
			126.28	353	58	365.39	127	57			
			126.35	356	52	425.80	299	52			
			126.40	351	53	427.28	136	27			
2	156.3 *2	155.5-157.0 *5	126.44	138	86	1	426.4 *2,3	425.5-427.3 *5	-	-	-
			126.67	324	73	1	440.0 *1	439.5-440.5 *4	-	-	-
			155.68	146	64	1	449.0 *2,3	448.0-450.0 *5	449.24	345	60
155.75	144	63	1	561.8 *2,3	561.0-562.5 *5	561.37	350	43			

第2表. (続き)  
Table. 2. (continued)

(m) TSS

Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole TV			Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole TV								
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)				Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)						
3	61.7 *1	61.2-62.2 *4	61.41	244	54	2	211.4 *7	210.9-211.9 *4	211.05	143	60						
			61.71	238	14				211.07	317	31						
			61.92	337	64				211.23	285	35						
			61.97	188	32				211.40	290	27						
3	82.9 *1	82.4-83.4 *4	82.53	166	30				211.43	300	24						
			82.84	317	62				211.47	290	16						
			82.88	149	13				211.62	337	42						
			82.94	159	7				211.71	324	35						
			83.01	133	16				211.74	169	34						
			83.29	274	4				211.79	322	35						
3	101.5 *1	101.0-102.0 *4	101.19	320	41				2	245.0 *7	244.5-245.5 *4	211.87	312	29			
			101.22	316	46							244.86	267	69			
			101.39	154	45							244.99	266	57			
			101.42	132	37							245.01	214	87			
2	132.0 *7	131.5-132.5 *4	101.46	296	16	245.19	320	46				1	87.5 *3	87.0-88.0 *4	-	-	-
			131.51	153	77	1	96.5 *3	96.0-97.0 *4				-	-	-			
			132.06	165	82	1	164.0 *1.3	163.5-164.5 *4				163.71	180	18			
			132.18	157	78							163.80	265	40			
132.22	155	79	229.89	325	25												
170.27	242	23	229.97	347	27												
2	170.6 *7	170.1-171.1 *4	170.33	207	51	1	230.0 *3	229.5-230.5 *4	230.05	107	39						
			170.58	338	40				319.06	2	30						
			170.63	248	9	1	319.5 *3	319.0-320.0 *4	319.89	139	70						
			170.79	185	78				320.00	3	37						
			170.82	310	22				1	418.0 *3	417.5-418.5 *4	-	-	-			
			171.01	284	19				1	475.5 *3	475.0-476.0 *4	475.85	228	34			
			171.06	319	18	475.93	213	55									
			2	190.0 *7	189.5-190.5 *4	-	-	-				475.94	342	75			
2	202.2 *7	201.7-202.7 *4	202.18	143	28												



第2表. (続き)  
Table. 2. (continued)

(n) MAT

Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televiewer (BHTV)					
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)			
3	17.0 *1	16.5-17.5 *4	16.68	133	38			
			17.36	166	35			
			19.34	306	73			
3	19.8 *1	19.3-20.3 *4	19.54	126	30			
			19.57	120	27			
			19.60	114	28			
			19.61	118	26			
			19.80	128	26			
			19.85	118	30			
			19.95	128	26			
			20.01	132	30			
			20.03	142	26			
			20.22	174	66			
			2	191.2 *1	190.7-191.7 *4	190.81	10	43
						190.99	212	52
191.05	341	40						
191.15	251	55						
191.31	88	40						
191.61	267	55						
1	394.4 *1	393.9-394.9 *4	394.26	146	32			
			394.51	125	41			
			394.72	324	64			
			398.50	325	38			
1	398.8 *1	398.3-399.3 *4	398.93	232	48			
			399.08	252	44			
			416.71	186	50			
1	416.6 *1	416.1-417.1 *4	416.71	186	50			
1	426.3 *1	425.8-426.8 *4	426.45	59	41			

Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televiewer (BHTV)		
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)
1	433.0 *1	432.5-433.5 *4	433.21	273	43
			435.81	246	32
1	435.4 *1	434.9-435.9 *4	435.88	224	40
			441.3 *1	440.8-441.8 *4	-
1	460.7 *1	460.2-461.2 *4	460.79	94	49
1	471.0 *1	470.5-471.5 *4	471.29	121	41
			471.49	81	40
1	485.3 *1	484.8-485.8 *4	485.34	136	40
			485.47	300	20
1	487.8 *1	487.3-488.3 *4	-	-	-
1	492.7 *1	492.2-493.2 *4	-	-	-
1	494.3 *1	493.8-494.8 *4	-	-	-
1	496.8 *1	496.3-497.3 *4	496.95	158	41
1	501.2 *1	500.7-501.7 *4	501.32	169	27
			501.41	213	35
1	513.5 *1	513.0-514.0 *4	513.51	145	52
1	517.0 *1	516.5-517.5 *4	-	-	-
1	521.2 *1	520.7-521.7 *4	521.36	120	38
1	525.0 *1	524.5-525.5 *4	524.65	5	50
			524.73	95	27
			525.47	261	46
1	527.7 *1	527.2-528.2 *4	527.58	196	40
			527.77	2	65
1	561.0 *1	560.5-561.5 *4	560.97	170	14
			561.09	188	17
			561.21	220	20

(o) UWA

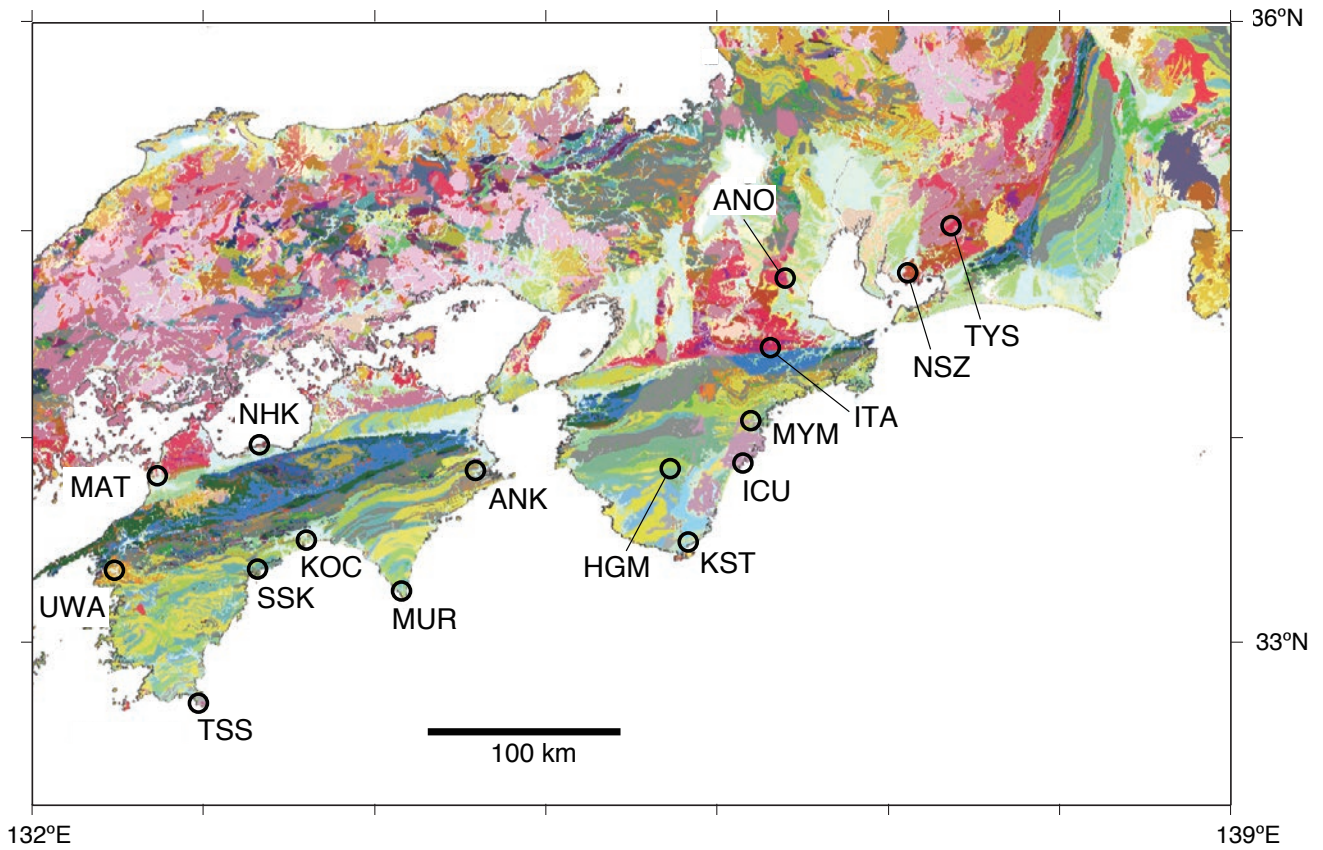
Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televiewer (BHTV)		
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)
3	14.4 *1	13.9-14.9 *4	-	-	-
3	22.2 *1	21.7-22.7 *4	-	-	-
1	205.5 *1	205.0-206.0 *4	205.62	302	34
			205.64	320	40
			205.66	195	69
1	243.3 *1	242.8-243.8 *4	-	-	-
1	285.4 *1	284.9-285.9 *4	285.09	341	57
			285.70	334	56
1	305.2 *1	304.7-305.7 *4	305.06	190	48
1	362.4 *1	361.9-362.9 *4	362.76	169	70
			362.84	163	70

Hole	Detected depth (m)	Depth interval of permeable zone (m)	Borehole Televiewer (BHTV)		
			Depth (m)	Dip direction (deg.) *6	Dip (deg.)
1	452.3 *1	451.8-452.8 *4	452.38	348	51
			452.72	358	56
1	472.4 *1	471.9-472.9 *4	472.07	334	44
			472.11	342	50
1	492.9 *1	492.4-493.4 *4	493.38	8	53
1	515.0 *1	514.5-515.5 *4	514.54	26	44
			514.80	190	75
			514.80	335	25
1	522.3 *1	521.8-522.8 *4	-	-	-

第3表. 各観測点における透水ゾーン, 透水性亀裂と全亀裂の数, 透水性亀裂の卓越走向と応力方位の対応, 透水性亀裂と全亀裂の走向の相関, 全亀裂及び透水性亀裂の平均走向と標準偏差, 観測点近傍の地質構造の特徴的な方向. FPは透水性亀裂, FAは全亀裂を示す. 透水性亀裂の走向と応力方位の対応において, ○: 透水性亀裂の走向が応力方位と約20度以内で対応する場合, △: 約30度以内で対応する場合, ×: 30度以上異なるか亀裂走向が全方位的にばらつく場合. 透水性亀裂と全亀裂の走向の相関係数は0.7以上, 0.7未満~0.4, 0.4未満~0.2, 0.2未満の4段階に分けて, それぞれ, ◎, ○, △, ×で示す. 亀裂走向がバイモーダルな分布を示す観測点では, 平均走向の欄のかわりに2つの卓越頻度の走向を示す. \*1: 北から時計回りの方位. \*2: 参考値として求めた2つの卓越頻度の走向.

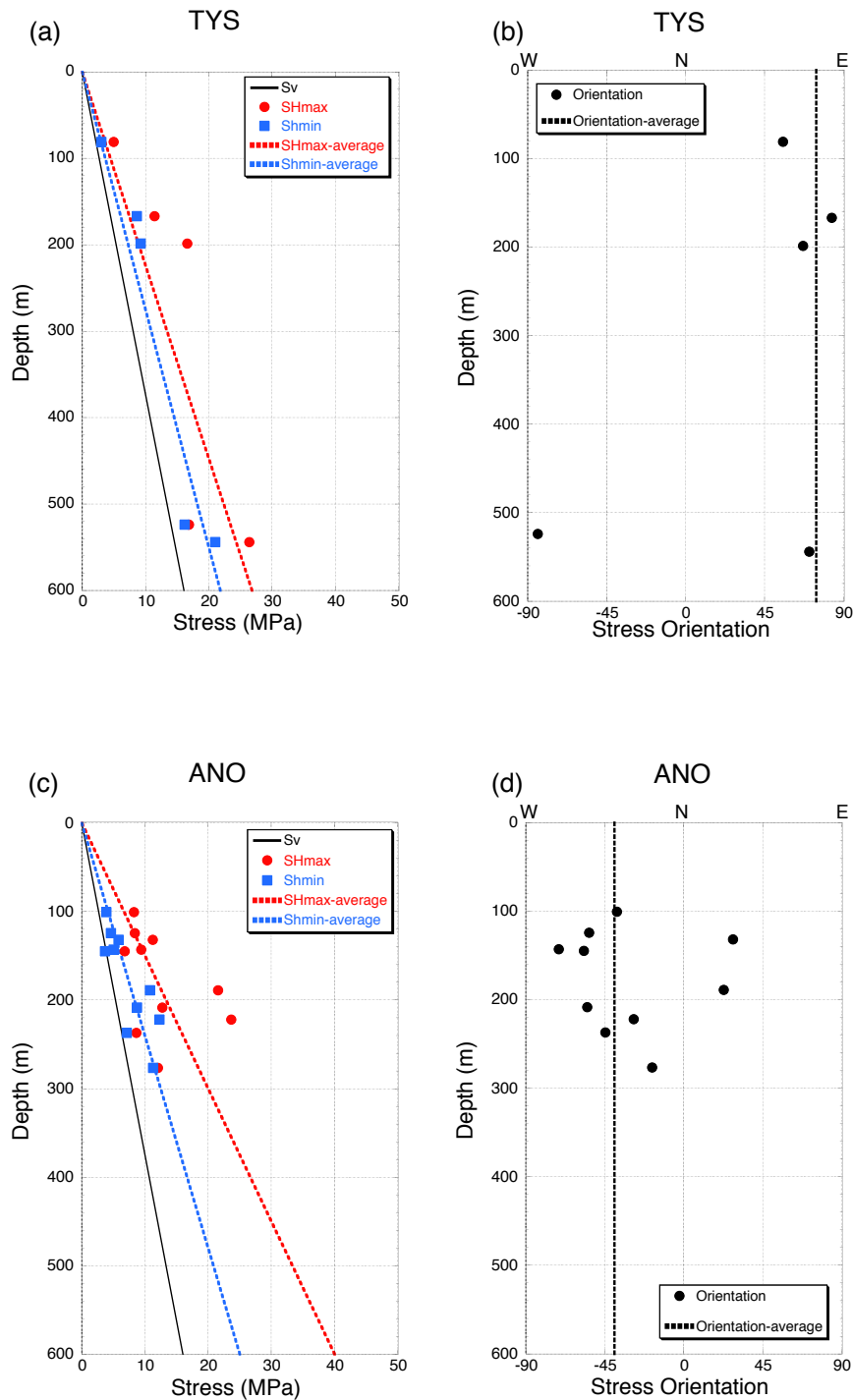
Table 3. Summary of the number of permeable zones, permeable fractures (FP) and all fractures (FA), correlation between strikes of FP and stress orientations, correlation between strikes of FP and FA, average strikes and standard deviations of FA and FP and characteristic orientations of geological structure at each site. ○: dominant strikes of FP correspond to stress orientations within about 20 degrees. △: dominant strikes correspond within about 30 degrees. ×: dominant strikes differ by more than 30 degrees or the strikes are rather dispersed. The correlation coefficients are divided into four levels of more than 0.7, less than 0.7 to 0.4, less than 0.4 to 0.2, and less than 0.2, which are denoted by ◎, ○, △, ×, respectively. At the sites where the strikes have a bimodal distribution, the two strikes that have the predominant frequencies are shown in parentheses in the column of average strike. \*1: Clockwise from north. \*2: Two predominant strikes for reference purposes only.

Site	region	Number of permeable zones	Number of permeable fractures (FP)	Number of all fractures (FA)	Correlation between orientations of FP and stress	Correlation between strikes of FP and FA	Average strike of FA (deg.) *1	S.D. of FA strike (deg.)	Average strike of FP (deg.) *1	S.D. of FP strike (deg.)	Orientation of geological structure (deg.) *1
TYS	Aichi ・ Kii	23	51	1773	×	× (0.08)	49	52	1 (35, 155) *2	51	45
NSZ		23	42	3964	×	△ (0.35)	75	45	105 (75, 165)	36	80
ANO		33	137	4140	×	○ (0.68)	106 (85, 155)	48	84 (95, 175)	49	90
ITA		7	26	2962	×	× (0.08)	107	45	61 (125, 35)	49	100
MYM		5	11	2466	○	○ (0.44)	37 (5, 75)	45	66 (75, 15)	32	90
ICU		11	23	2263	×	◎ (0.86)	92	38	88	21	45, 90
KST		11	32	4331	×	× (0.06)	157 (165, 75)	53	175 (15, 95) *2	42	160
HGM		-	-	2722	-	-	99	36	-	-	90
ANK		Shikoku	4	9	1515	○	○ (0.63)	87	40	99	28
MUR	8		10	2461	△	△ (0.28)	38	26	45 (15, 65) *2	31	60
KOC	6		-	2347	-	-	85	45	-	-	90
NHK	19		27	3893	×	△ (0.35)	77	48	43 (75, 145) *2	50	70
SSK	36		112	3406	△	◎ (0.83)	69	30	68	38	70
TSS	16		54	5262	△	◎ (0.72)	44	46	54	38	45
MAT	24		48	4370	○	△ (0.25)	65	40	41	45	45
UWA	12		16	5931	○	◎ (0.73)	77	38	79	21	70



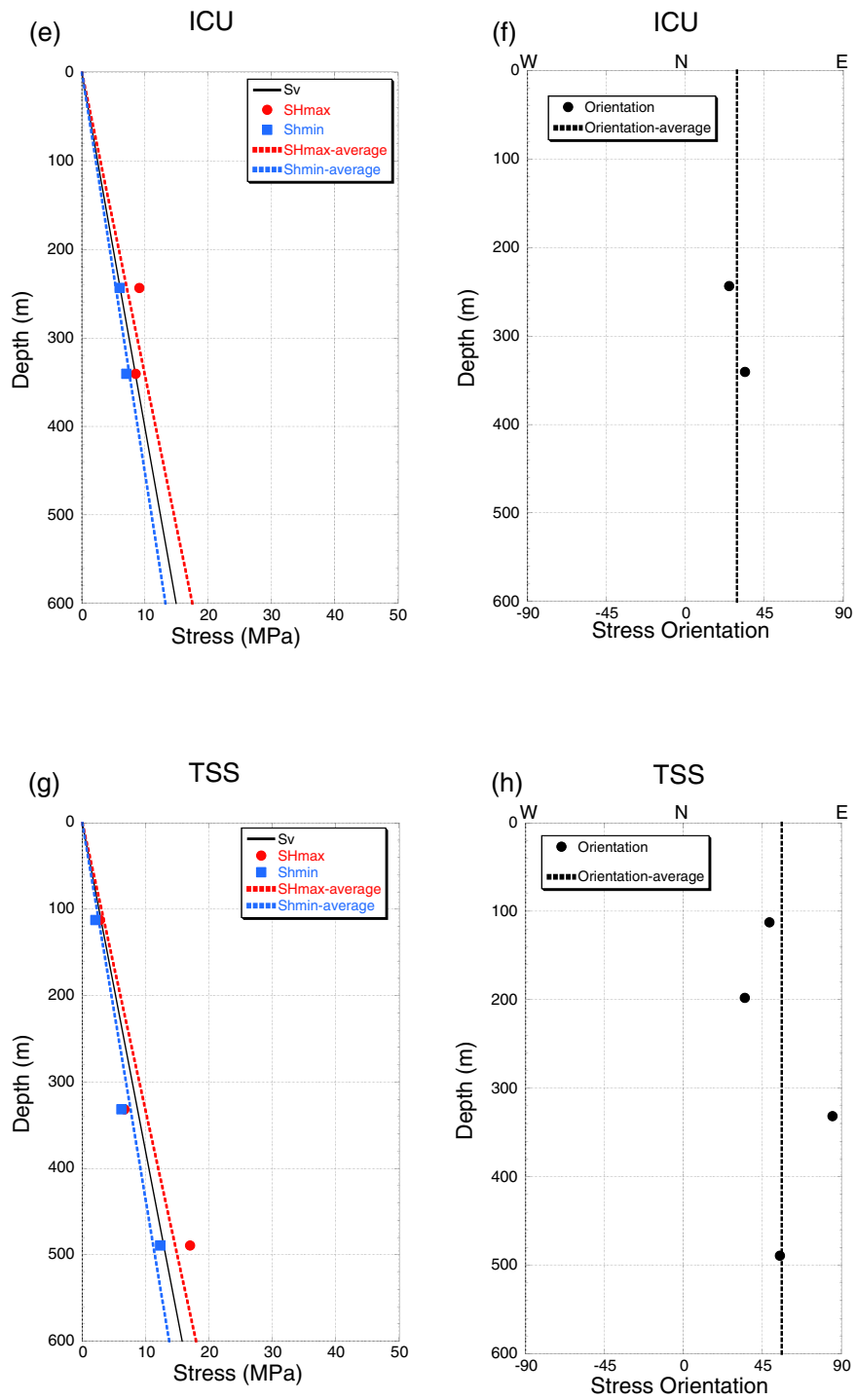
第1図. 産総研地下水等総合観測点16か所の位置図. 20万分の1日本シームレス地質図V2(産業技術総合研究所, 2020)上に示す.

Fig. 1. Locations of the 16 AIST integrated groundwater observation stations, southwestern Japan. Sites are shown on the Seamless digital geological map of Japan 1: 200,000 (Geological Survey of Japan, AIST (ed.), 2020).

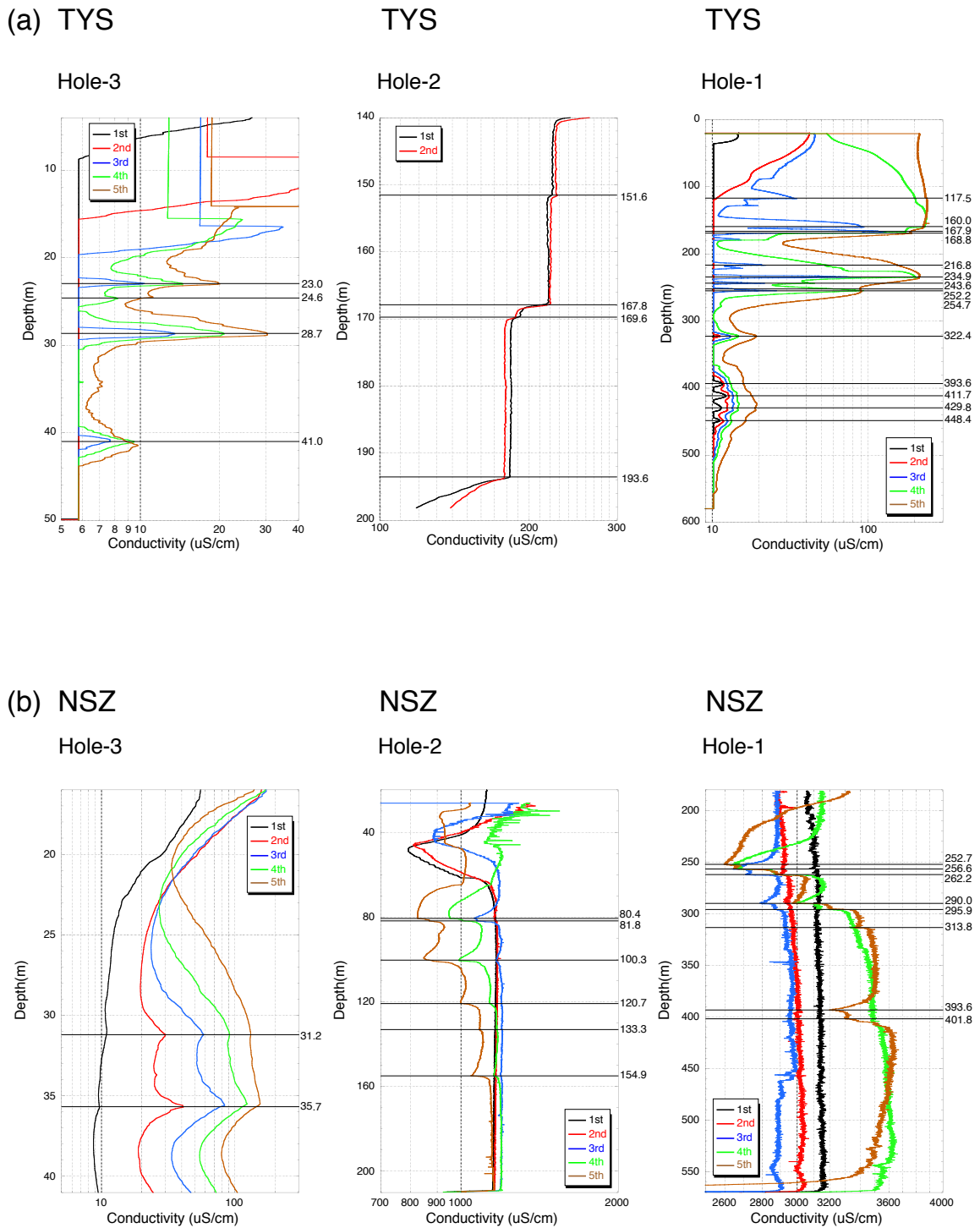


第2図. TYS, ANO, ICU, TSSにおいて水圧破砕法から求めた応力場. (a) TYSの最大水平圧縮応力(赤丸)及び最小水平圧縮応力(青四角)と深度との関係. 黒色実線で示す鉛直応力はコアから求めた密度の平均値を仮定して求めた. 赤色破線と青色破線は、それぞれ最大及び最小水平圧縮応力の値を直線で近似して求めた. (b) TYSの最大水平圧縮応力の方位の分布(黒丸). 方位の平均値を黒色破線で示す. (c), (d) ANOにおける応力場の結果. (e), (f) ICUにおける応力場の結果. (g), (h) TSSにおける応力場の結果. (c) 図以下の図の見方は(a)または(b)と同様.

Fig. 2. Stress states obtained by using hydraulic fracturing stress measurements at TYS, ANO, ICU and TSS. (a) Maximum (red circle) and minimum (blue square) horizontal compressive stresses at TYS as a function of depth. The black line indicates the overburden stress estimated assuming the average weight density of core samples. The red and blue broken lines are linear approximations of the values of the maximum and minimum horizontal compressive stress, respectively. (b) Depth distribution of orientations of the maximum horizontal compressive stress at TYS. The average orientation is denoted by the broken line. (c), (d) Stress state at ANO. (e), (f) Stress state at ICU. (g), (h) Stress state at TSS. Explanations of the figures are the same as those in (a) or (b).



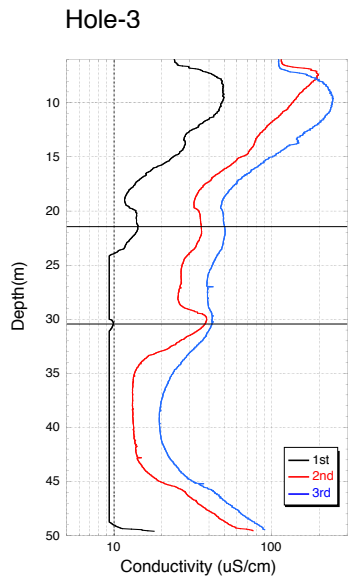
第2図. (続き)  
Fig. 2. (continued)



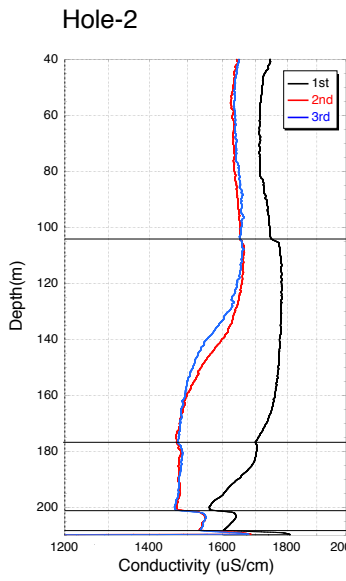
第3図. HGMを除く15観測点の電気伝導度検層の測定データ. 繰り返し測定したデータを色分けして示す. 各図の左から, 孔3, 孔2, 孔1の結果を示す. 観測点名を(a)~(o)の各図の上部に示す. 検出した透水性亀裂の深度をグラフ右側の数字で示す.

Fig. 3. Repeatedly measured data of fluid electrical conductivity loggings at 15 sites except HGM. The results of Hole-3, Hole-2 and Hole-1 are shown from left to right. Site names are shown at the top of figures, (a)~(o), respectively. The detected depths of the permeable fractures are denoted on the right side of the figure.

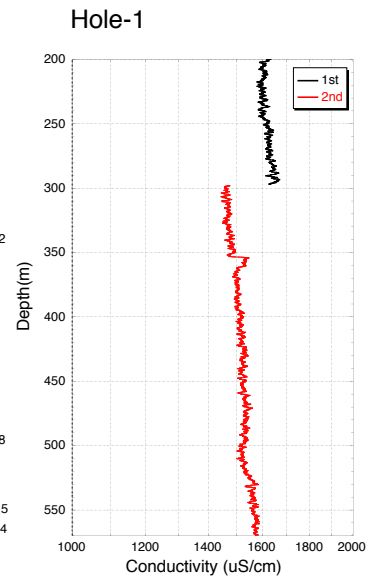
(c) ANO



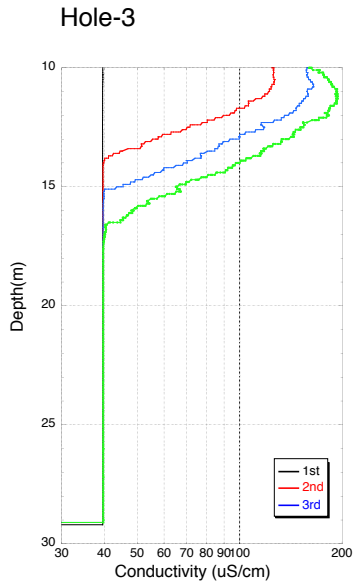
ANO



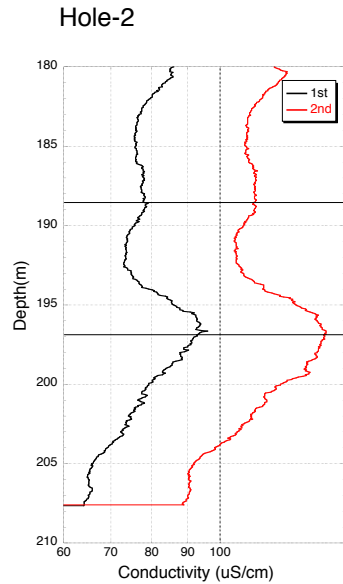
ANO



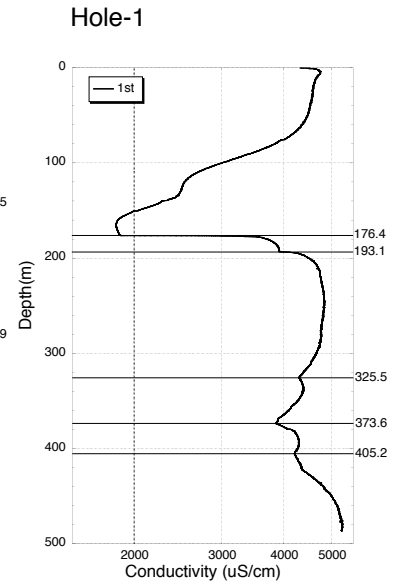
(d) ITA



ITA

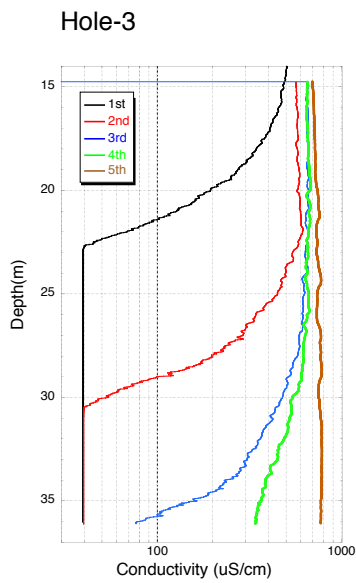


ITA

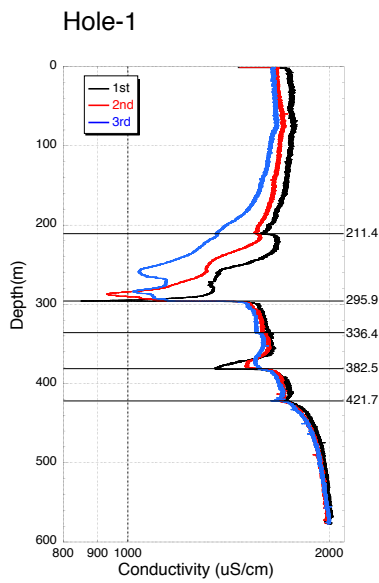


第3図. (続き)  
Fig. 3. (continued)

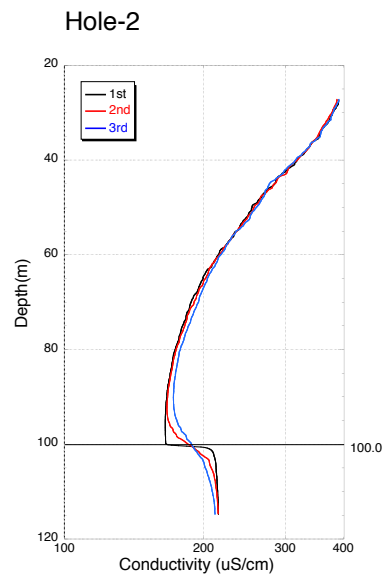
(e) MYM



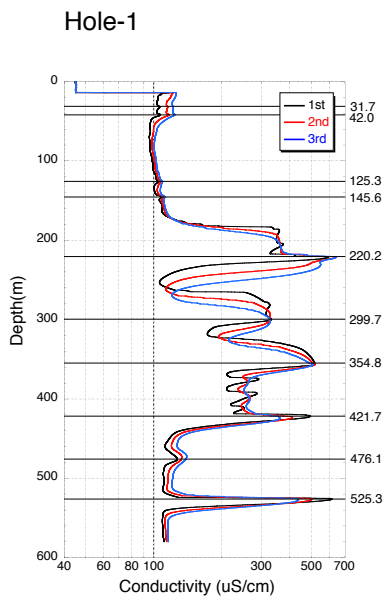
MYM



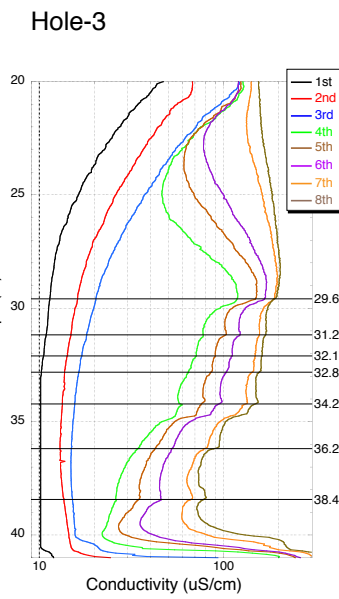
(f) ICU



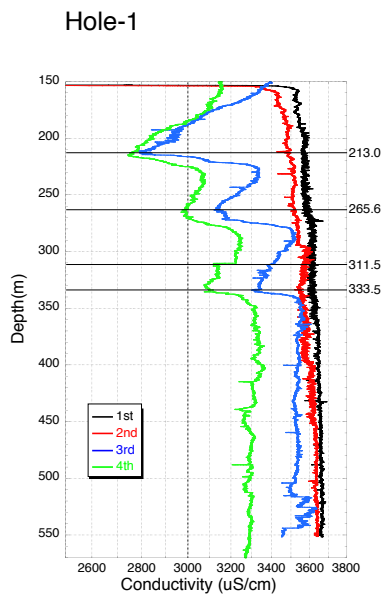
ICU



(g) KST



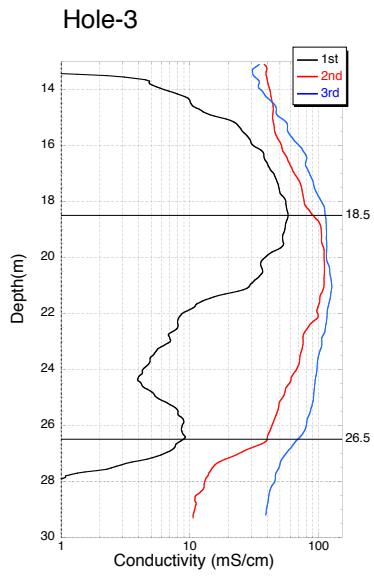
KST



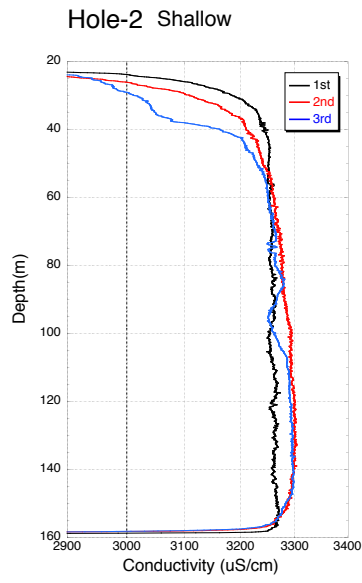
第3図. (続き)  
Fig. 3. (continued)



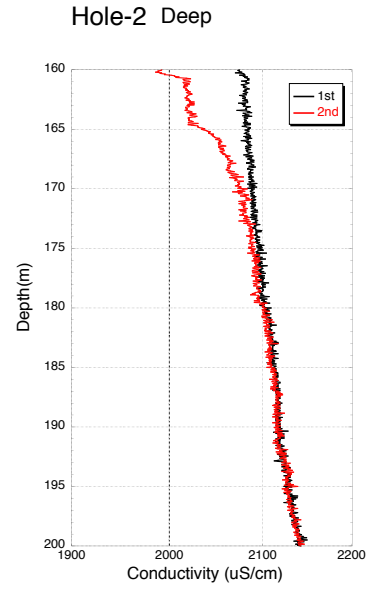
(h) ANK



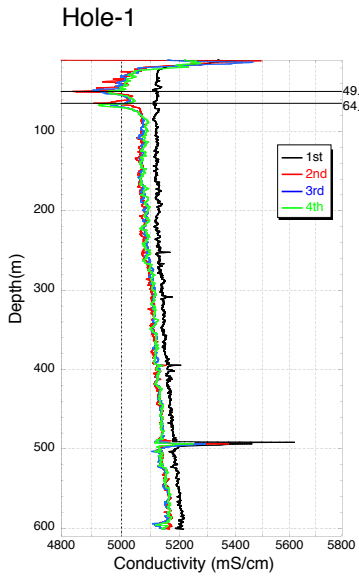
ANK



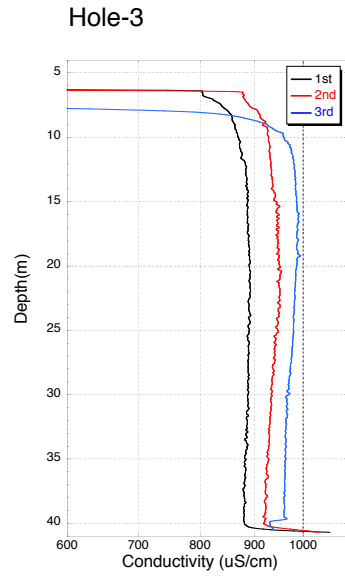
ANK



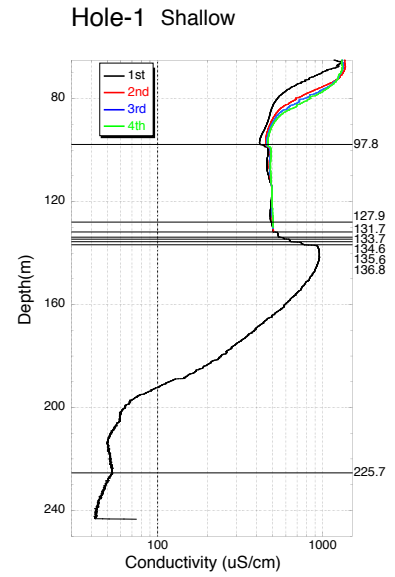
ANK



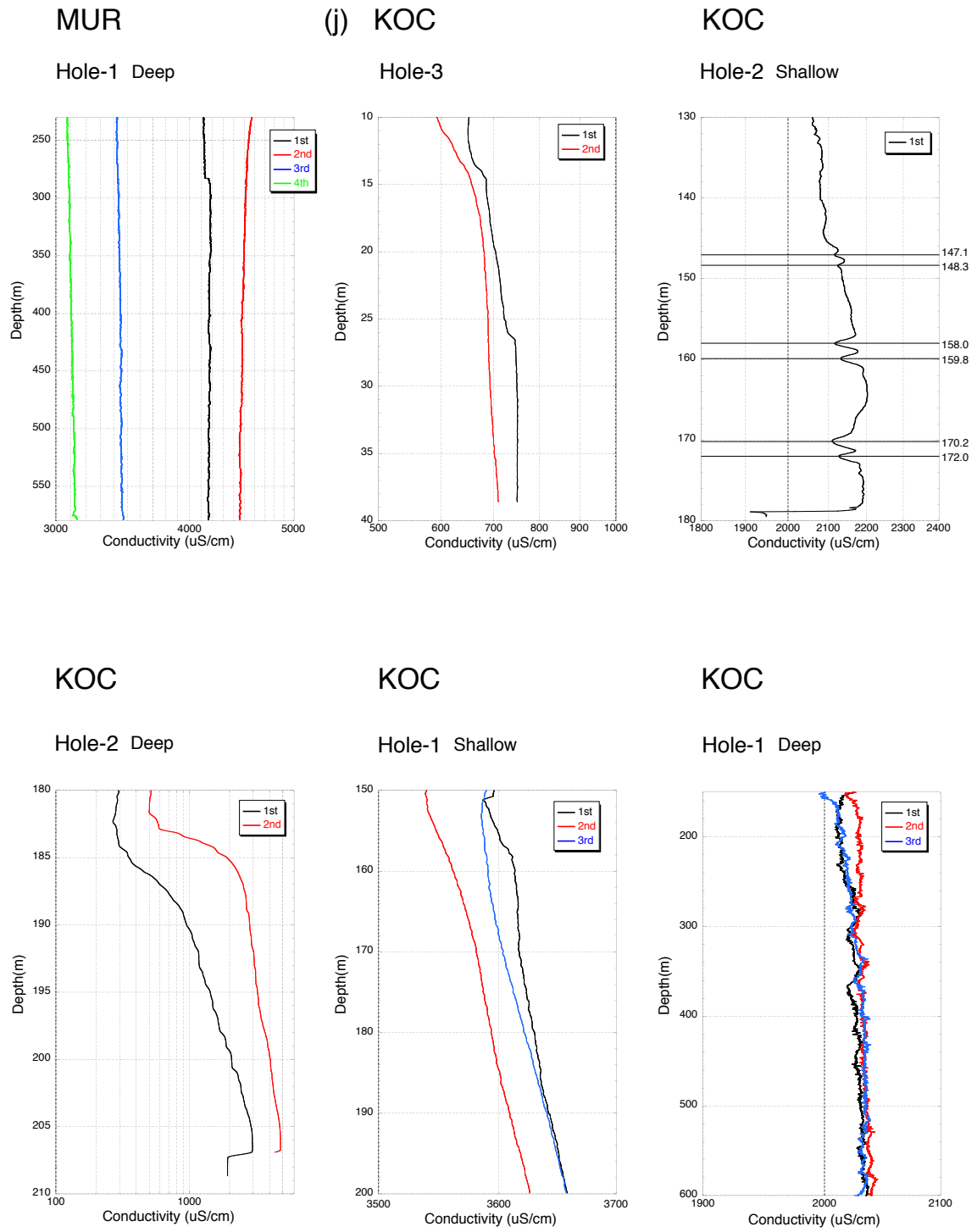
(i) MUR



MUR

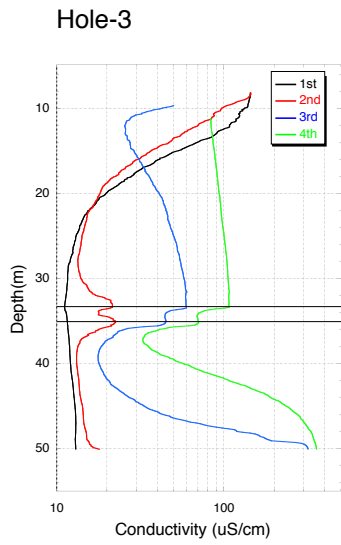


第3図. (続き)  
Fig. 3. (continued)

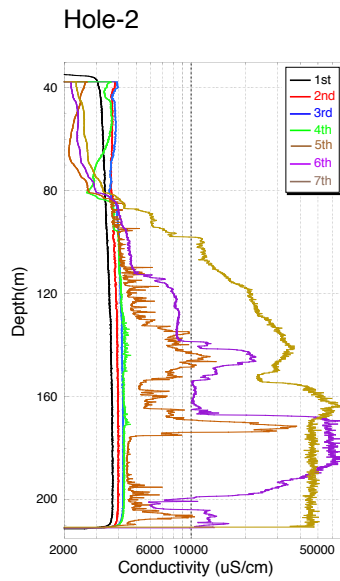


第3図. (続き)  
Fig. 3. (continued)

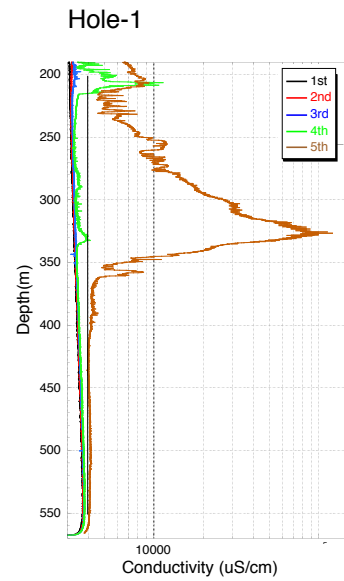
(k) NHK



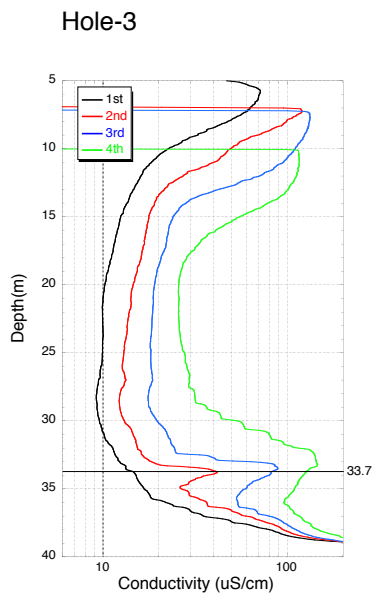
NHK



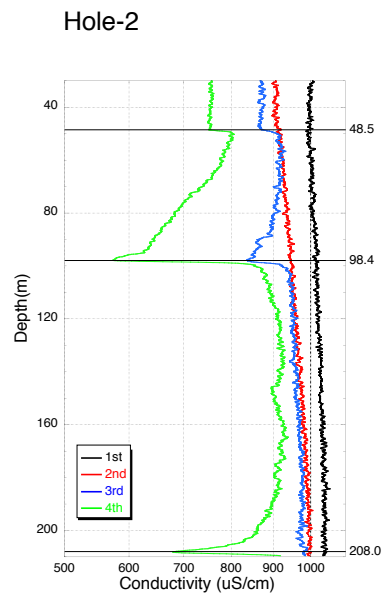
NHK



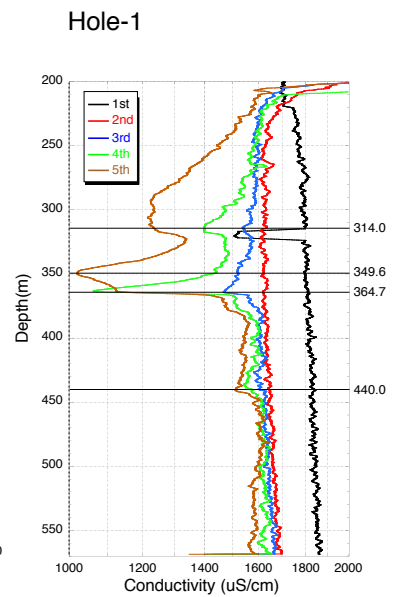
(l) SSK



SSK

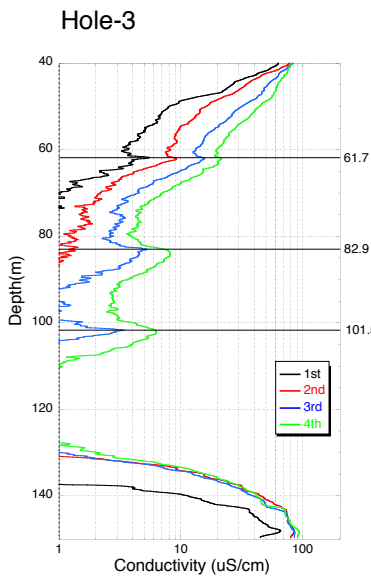


SSK

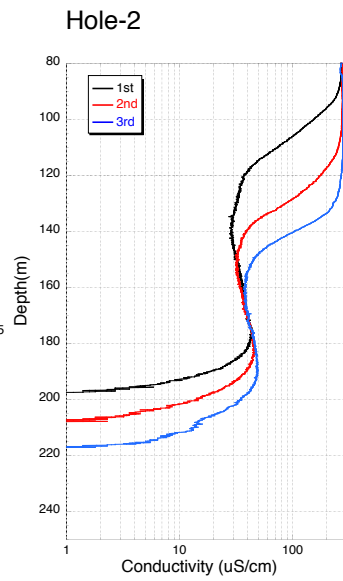


第3図. (続き)  
Fig. 3. (continued)

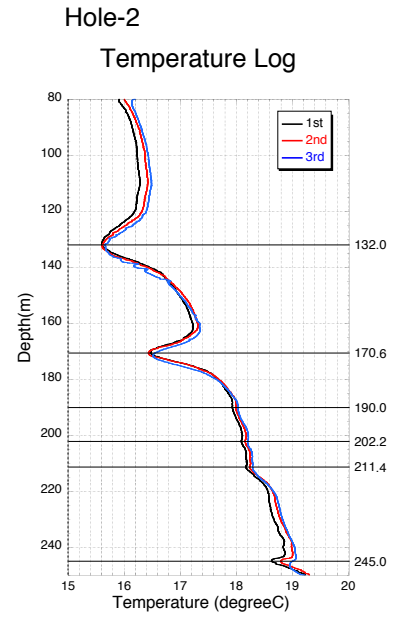
(m) TSS



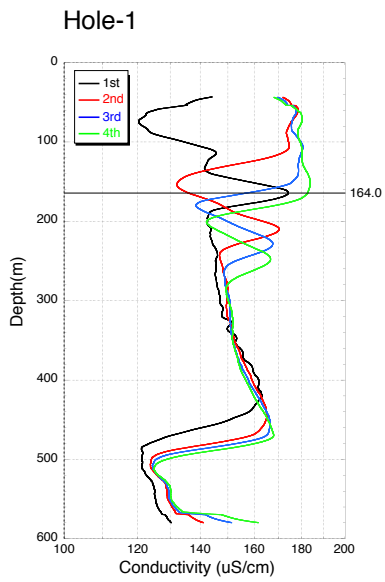
TSS



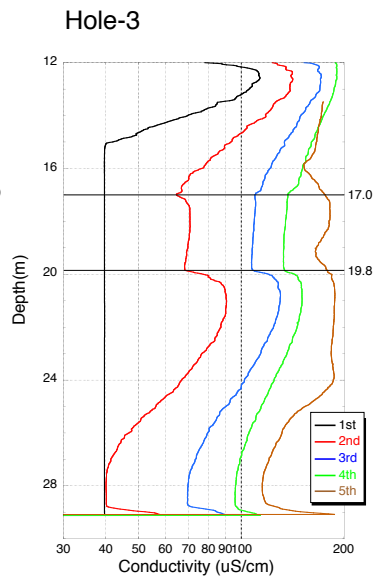
TSS



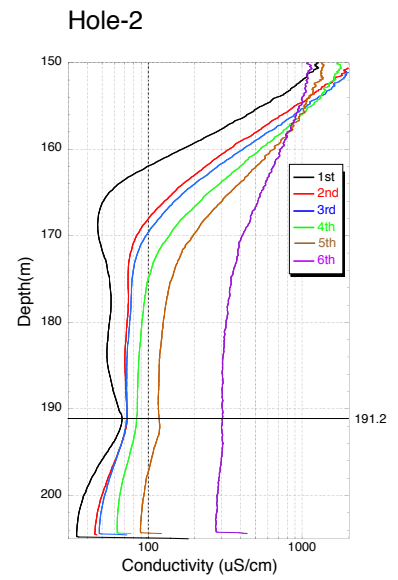
TSS



(n) MAT



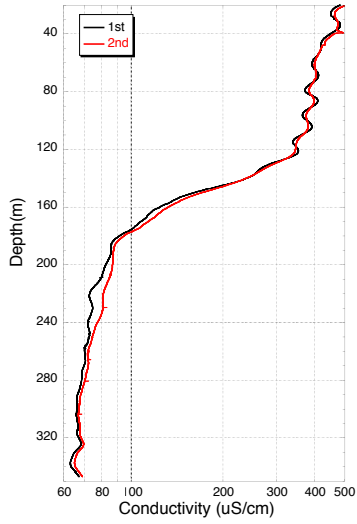
MAT



第3図. (続き)  
Fig. 3. (continued)

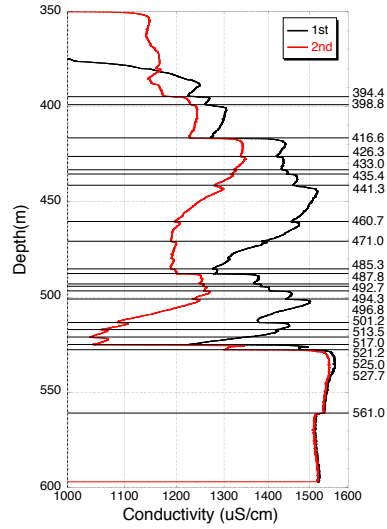
MAT

Hole-1 Shallow



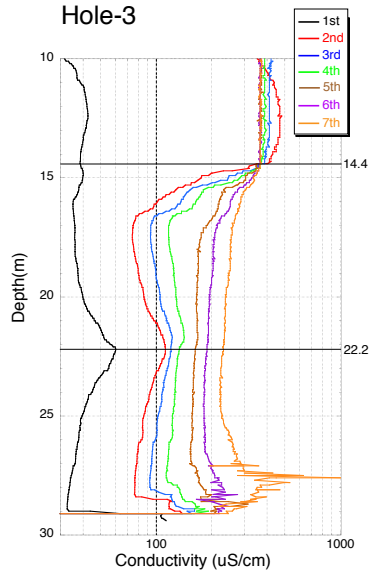
MAT

Hole-1 Deep



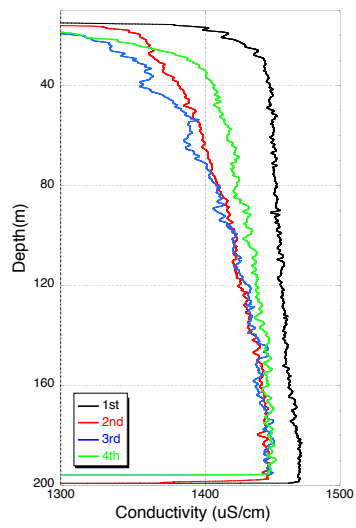
(o) UWA

Hole-3



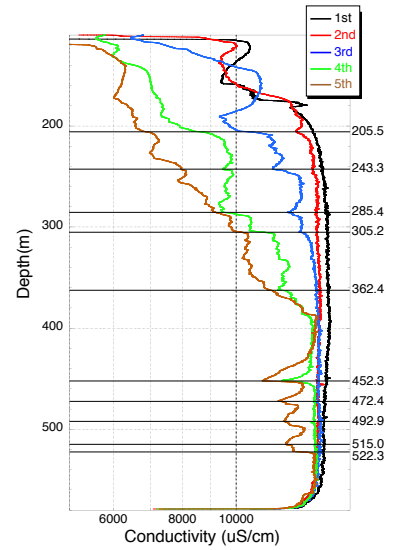
UWA

Hole-2

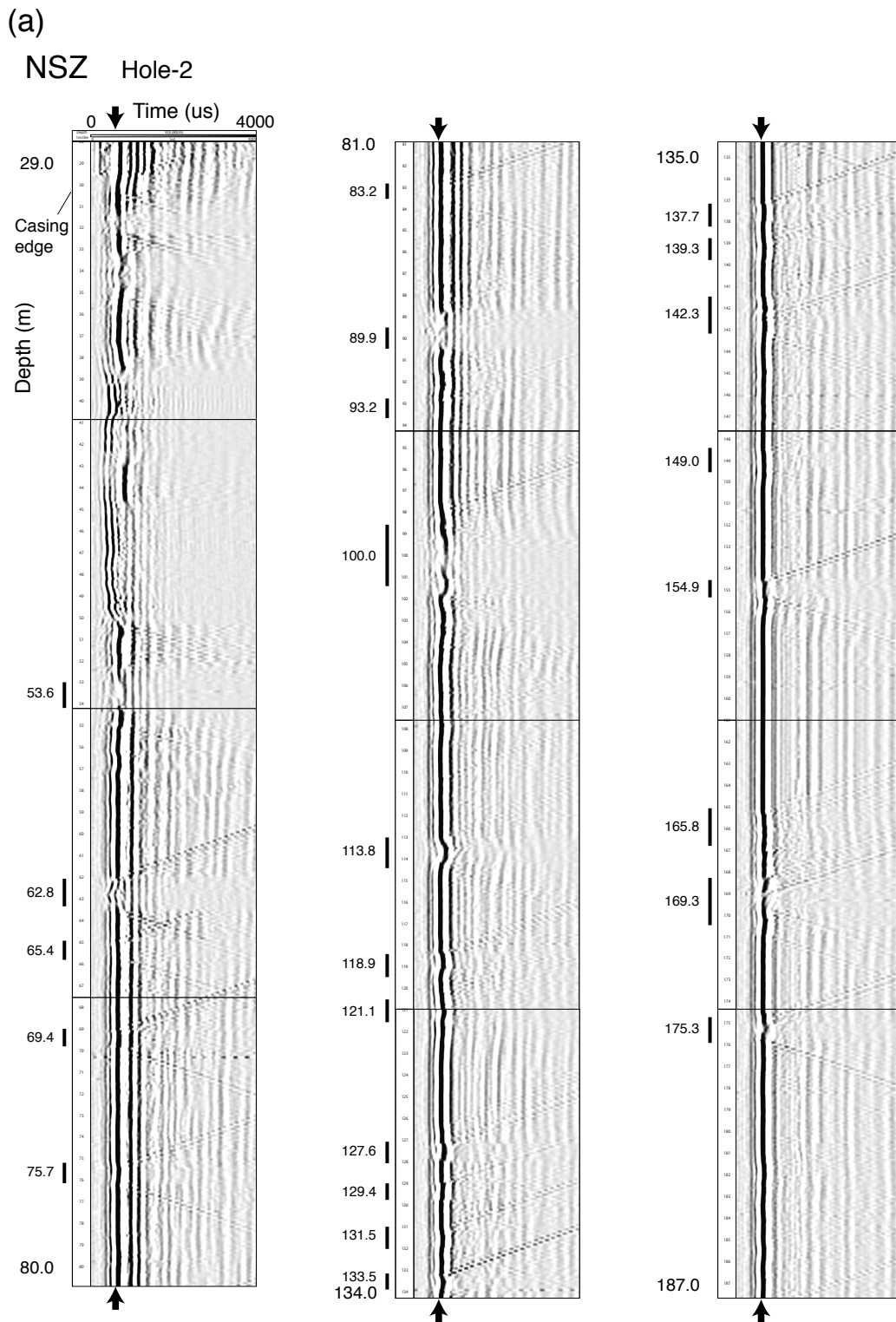


UWA

Hole-1

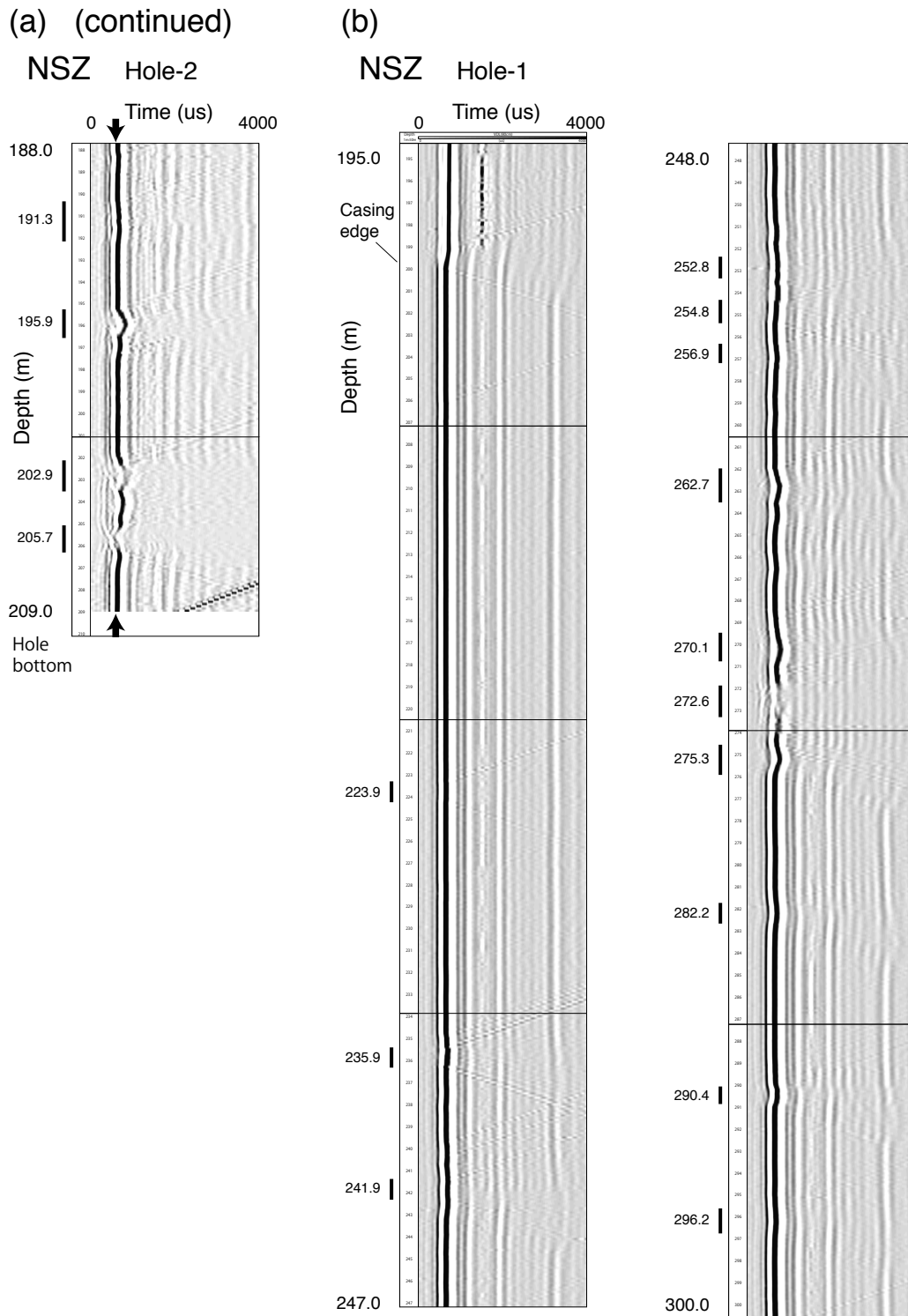


第3図. (続き)  
Fig. 3. (continued)



第4図. NSZ, ANO, NHK, SSKの4観測点のそれぞれ孔2と1で得られた速度検層の受振波形. 図中の黒線は透水ゾーンとして検出した深度区間であり, その区間の中心深度を示す. (a) NSZの孔2. 600  $\mu$ sの位置を矢印で示す. (b) NSZの孔1. (c) ANOの孔2. ただし, 100~150 m区間のデータはない. (d) ANOの孔1. (e) NHKの孔2. (f) NHKの孔1. (g) SSKの孔2. (h) SSKの孔1.

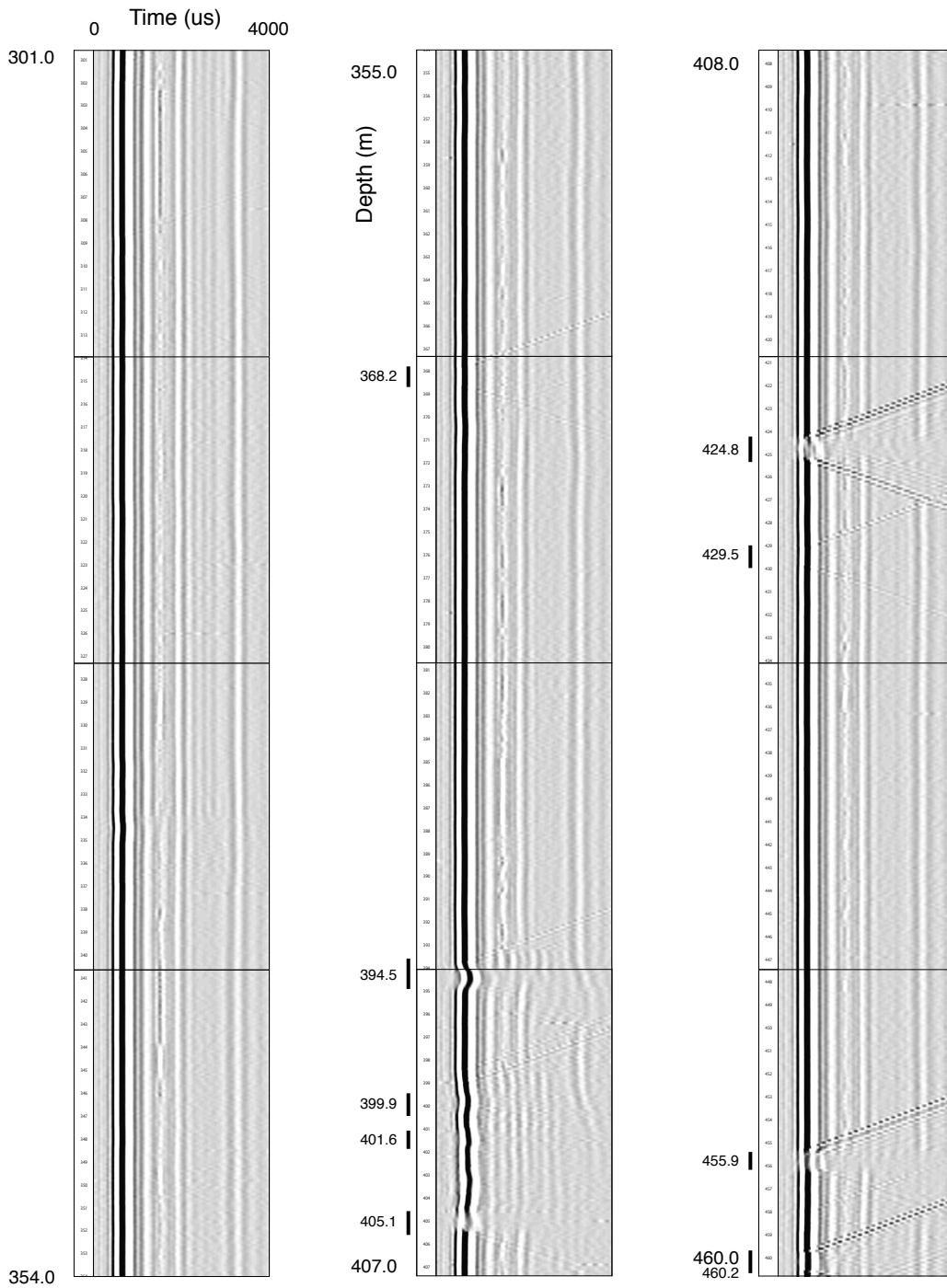
Fig. 4. Waveforms obtained by sonic loggings at NSZ, ANO, NHK and SSK. The black bars in the figure denote the depth intervals of the permeable zones determined from anomalies of Stoneley waves. Numerals indicate the central depth of the interval. (a) Hole-2 of NSZ. The positions of 600  $\mu$ s in time axis are indicated by black arrows. (b) Hole-1 of NSZ. (c) Hole-2 of ANO. There are no data from 100 m to 150 m. (d) Hole-1 of ANO. (e) Hole-2 of NHK. (f) Hole-1 of NHK. (g) Hole-2 of SSK. (h) Hole-1 of SSK.



第4図. (続き)  
Fig. 4. (continued)

(b) (continued)

NSZ Hole-1

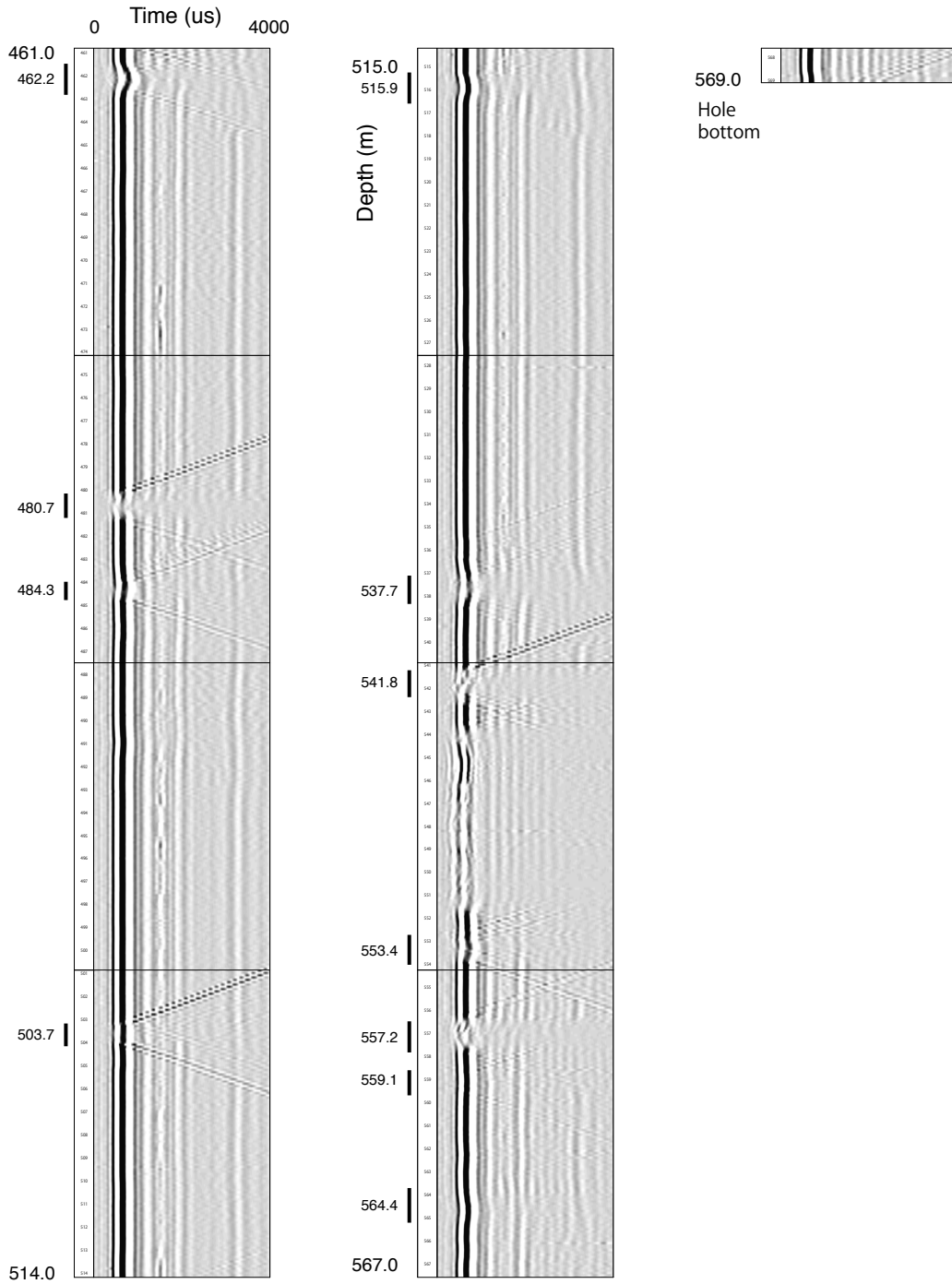


第4図. (続き)  
Fig. 4. (continued)



(b) (continued)

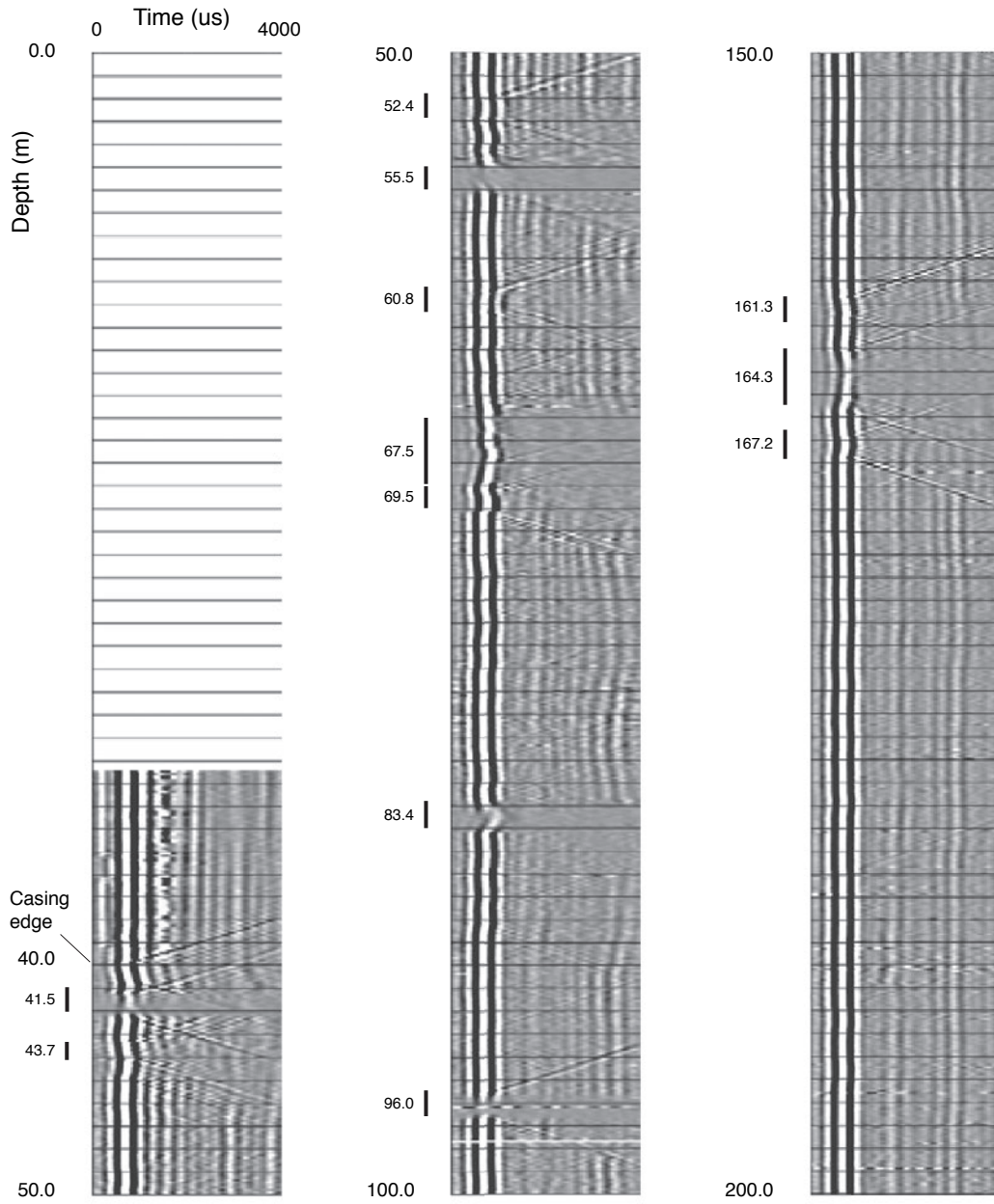
NSZ Hole-1



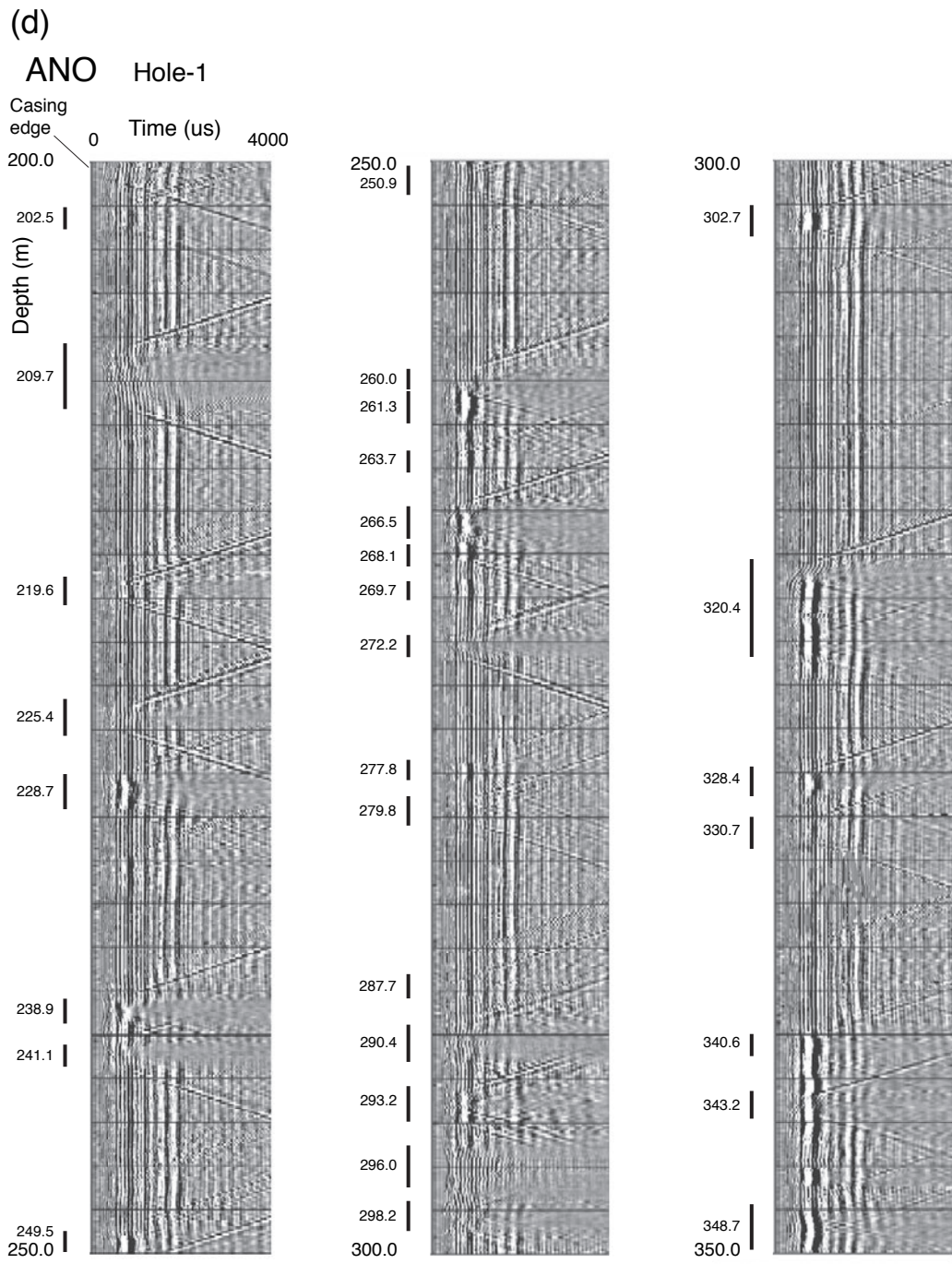
第4図. (続き)  
Fig. 4. (continued)

(c)

ANO Hole-2 (no data from 100 m to 150 m)



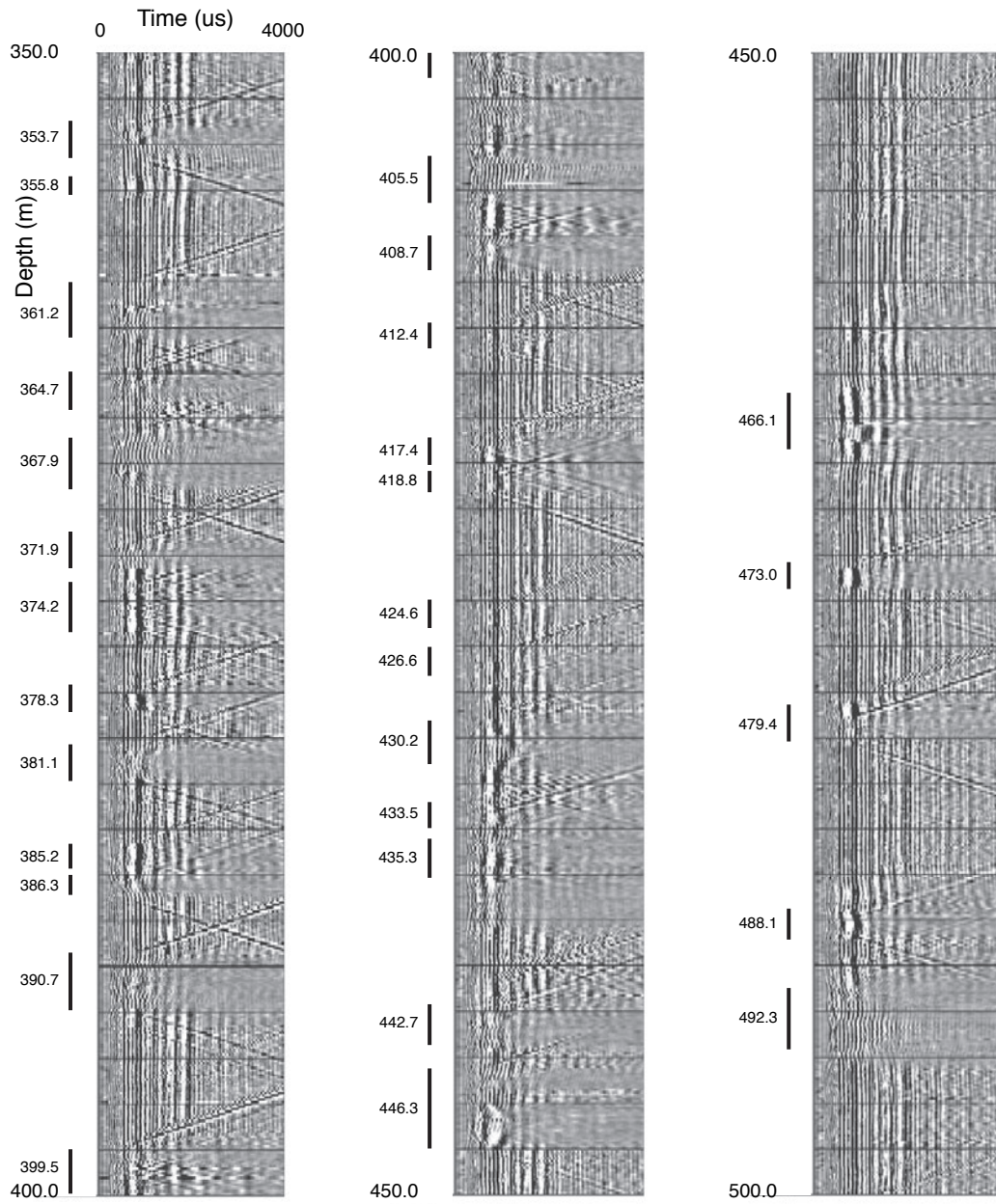
第4図. (続き)  
Fig. 4. (continued)



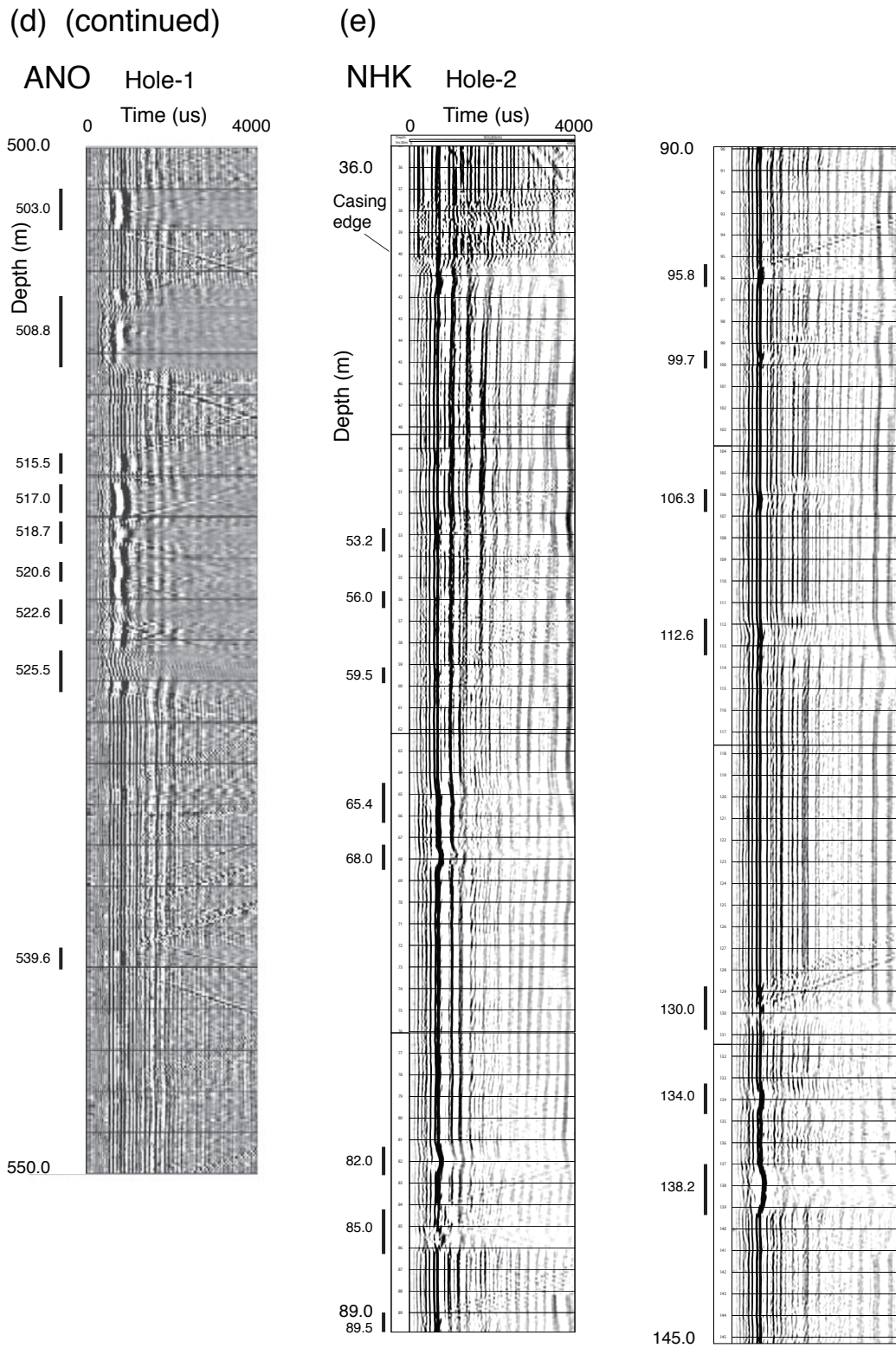
第4図. (続き)  
Fig. 4. (continued)

(d) (continued)

ANO Hole-1



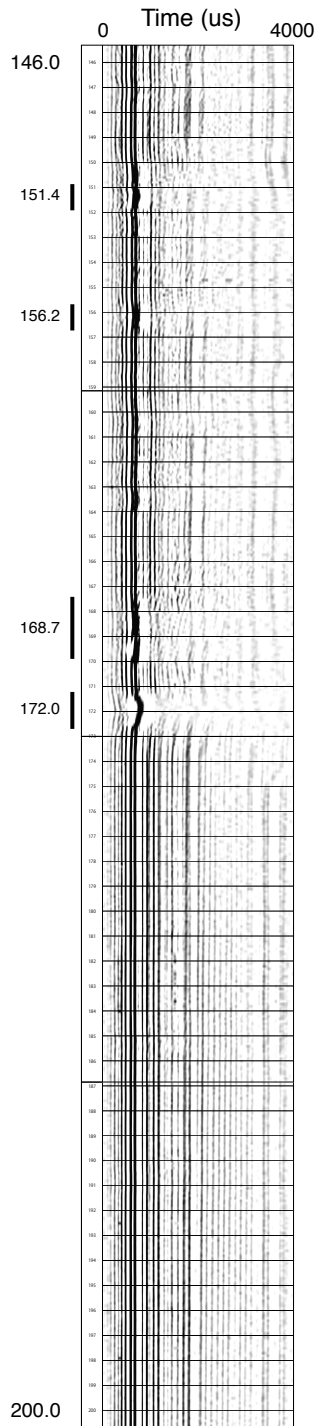
第 4 図. (続き)  
Fig. 4. (continued)



第4図. (続き)  
Fig. 4. (continued)

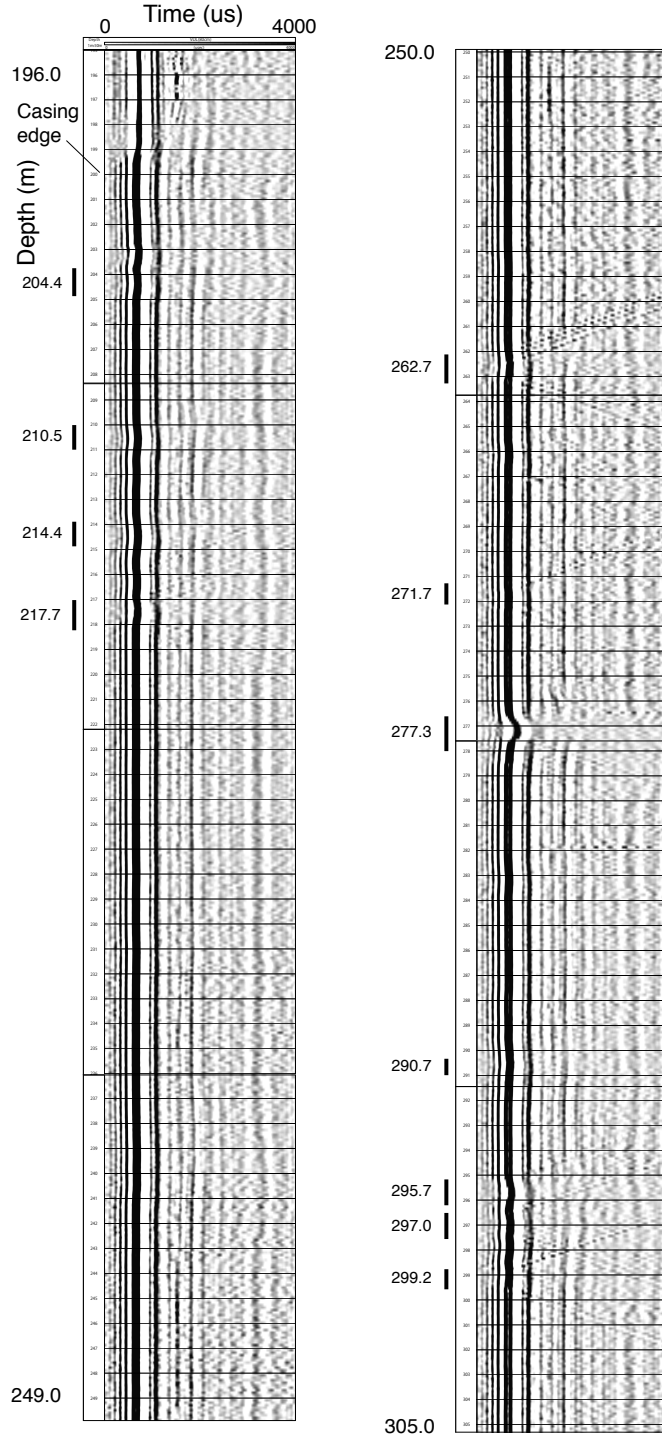
(e) (continued)

NHK Hole-2



(f)

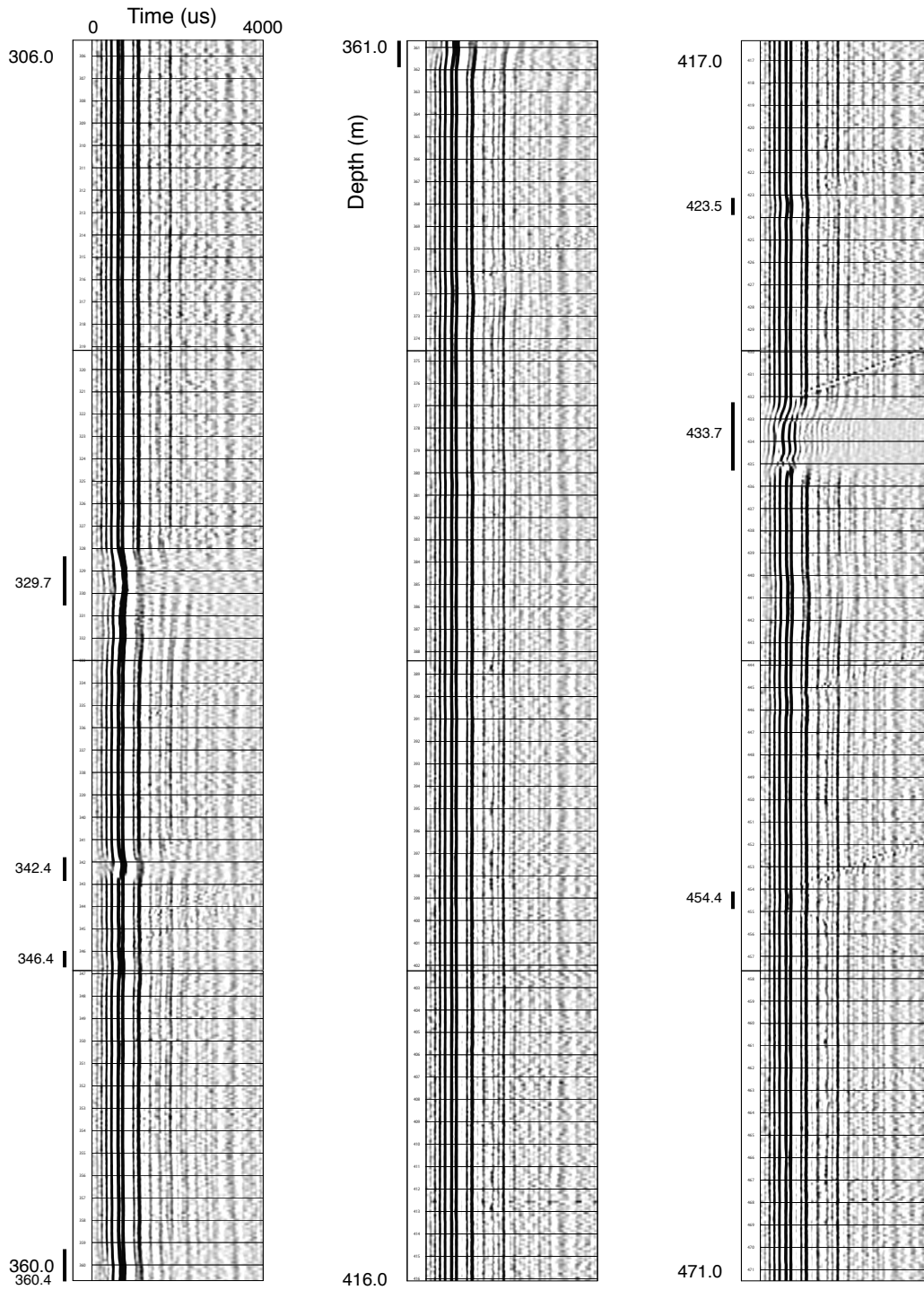
NHK Hole-1



第4図. (続き)  
Fig. 4. (continued)

(f) (continued)

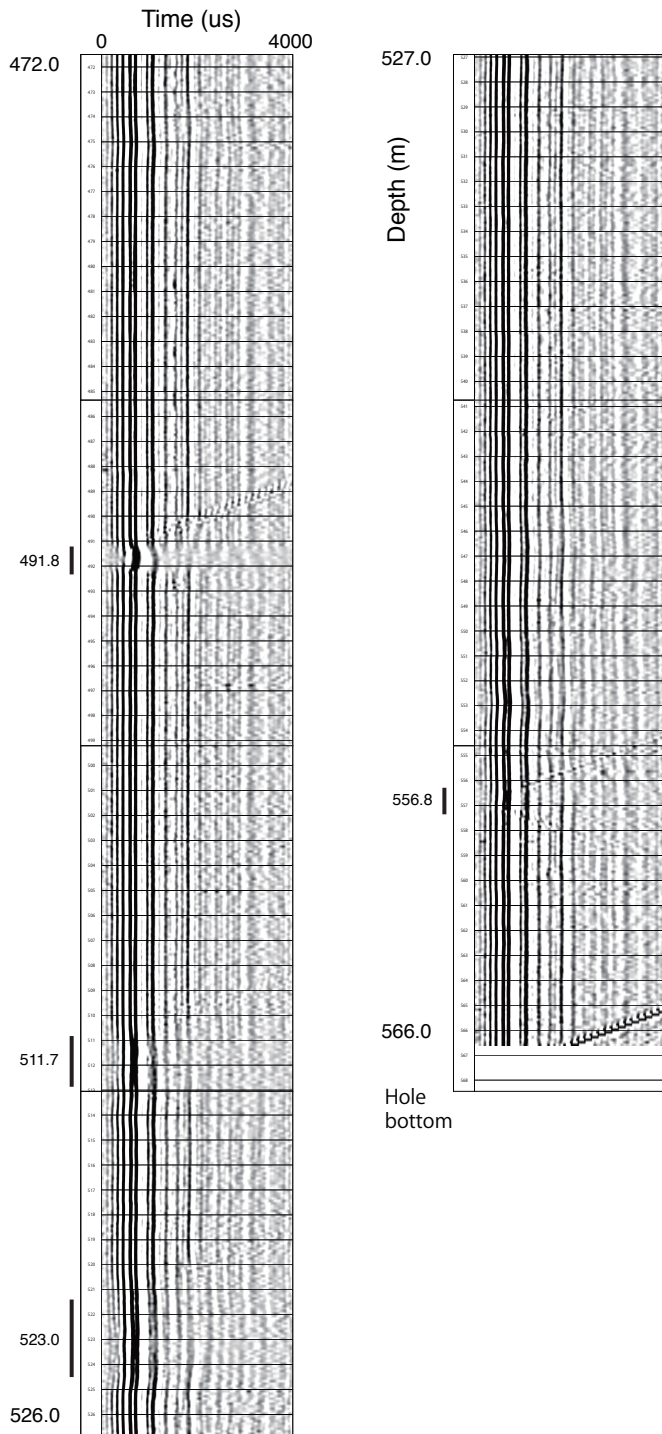
NHK Hole-1



第4図. (続き)  
Fig. 4. (continued)

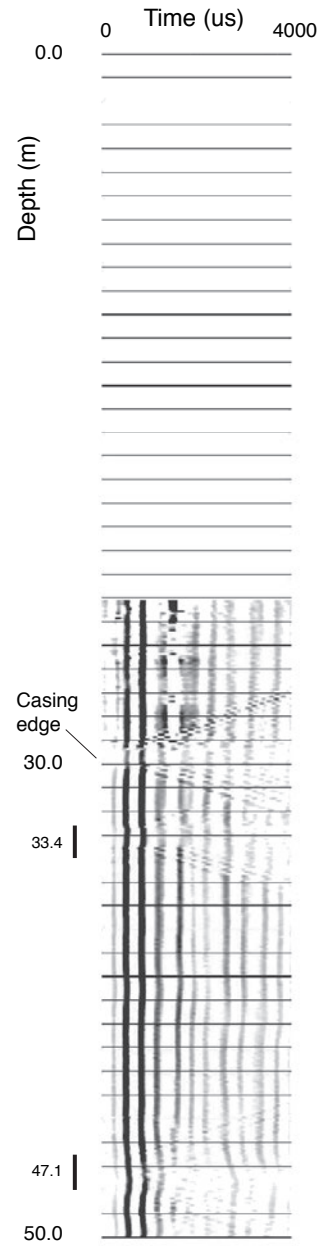
(f) (continued)

NHK Hole-1



(g)

SSK Hole-2

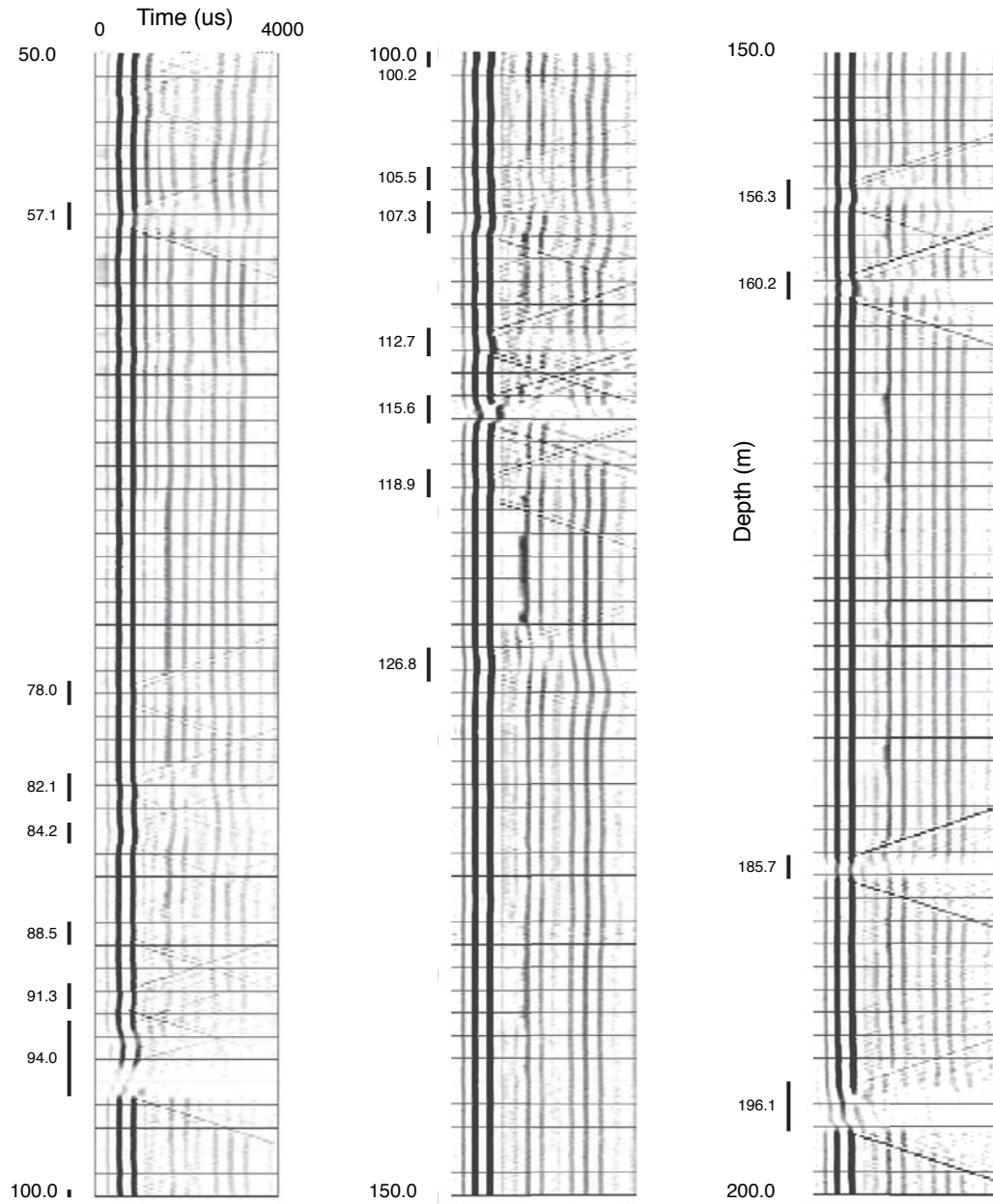


第4図. (続き)  
Fig. 4. (continued)

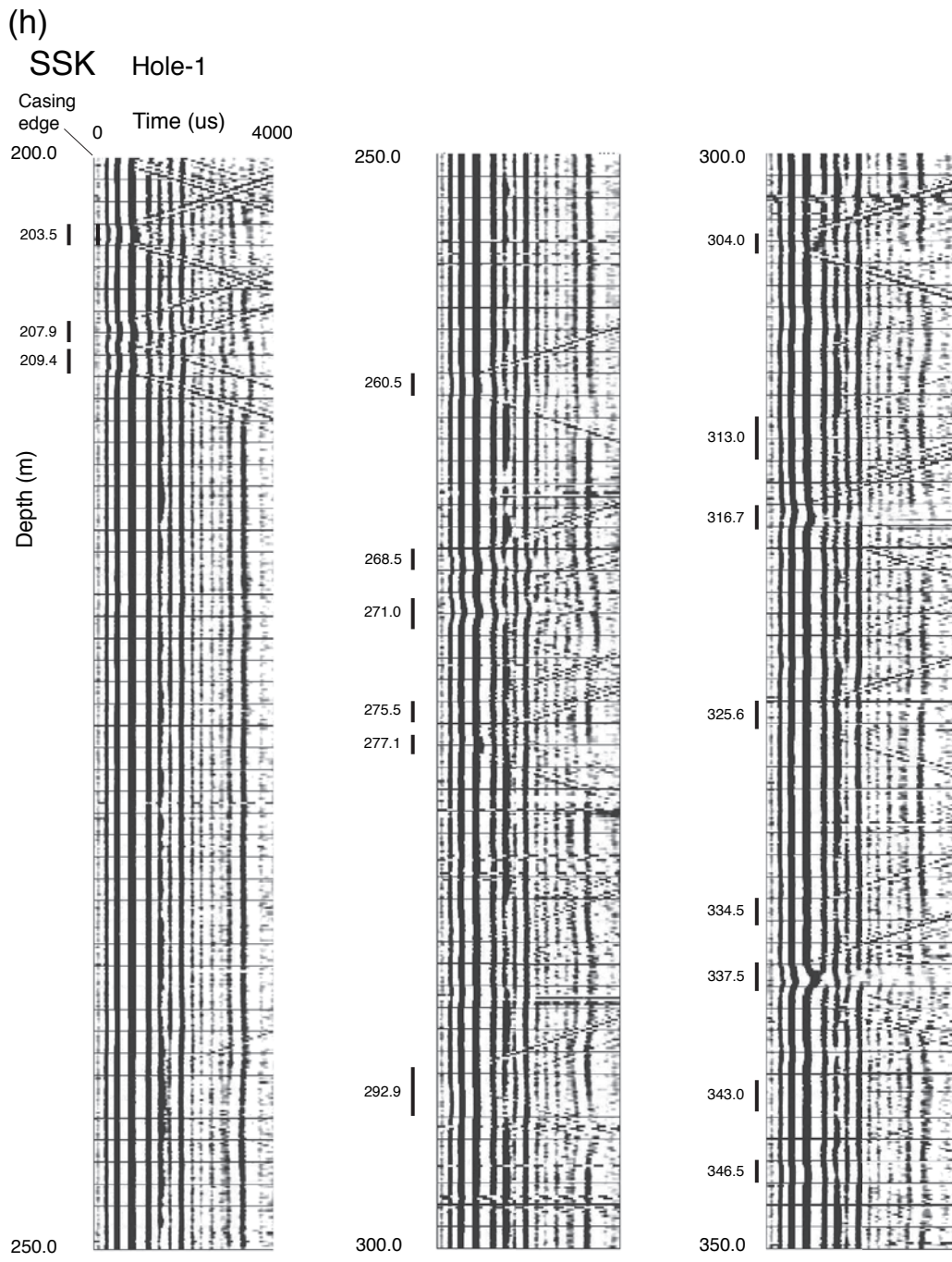


(g) (continued)

SSK Hole-2



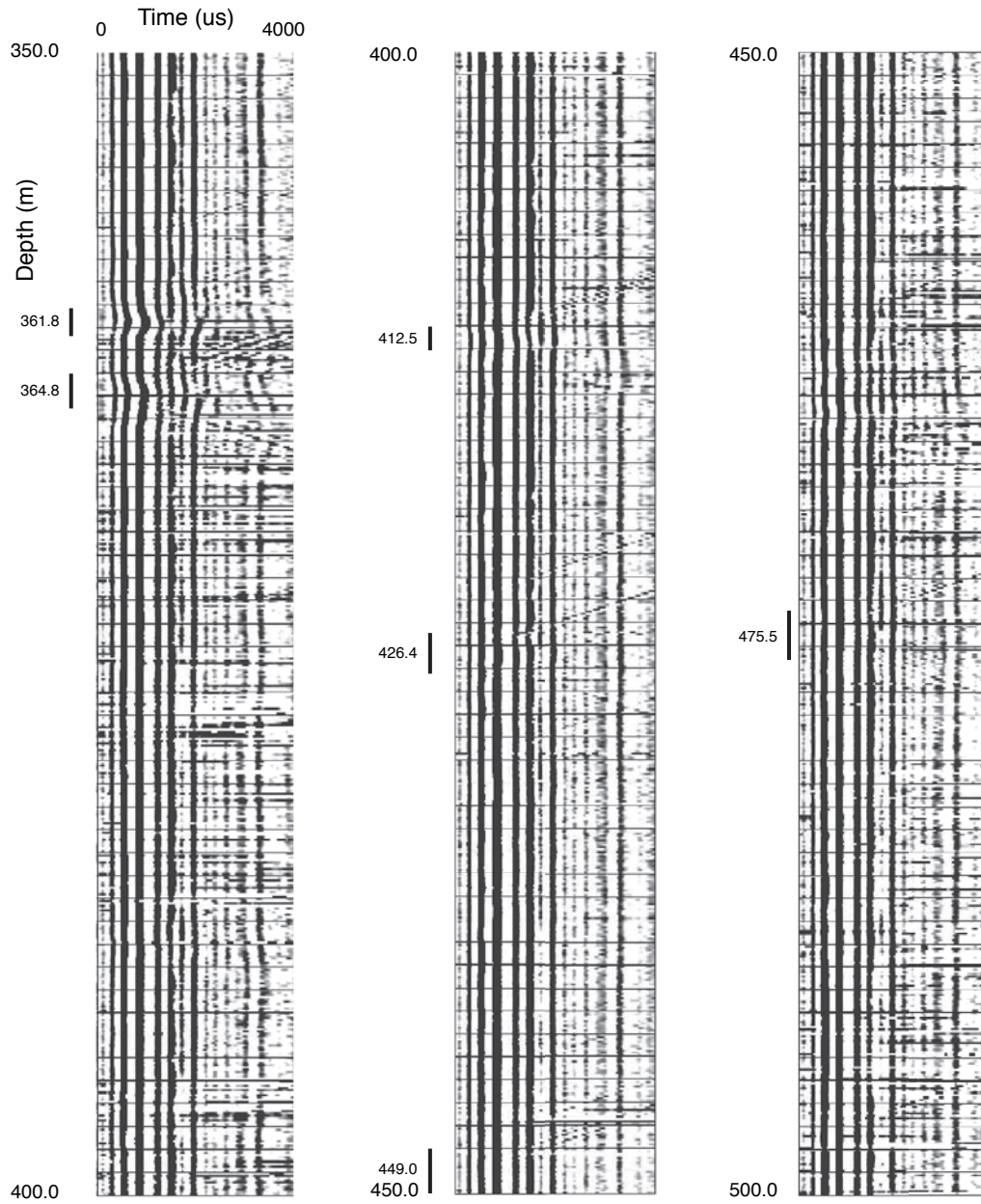
第4図. (続き)  
Fig. 4. (continued)



第4図. (続き)  
Fig. 4. (continued)

(h) (continued)

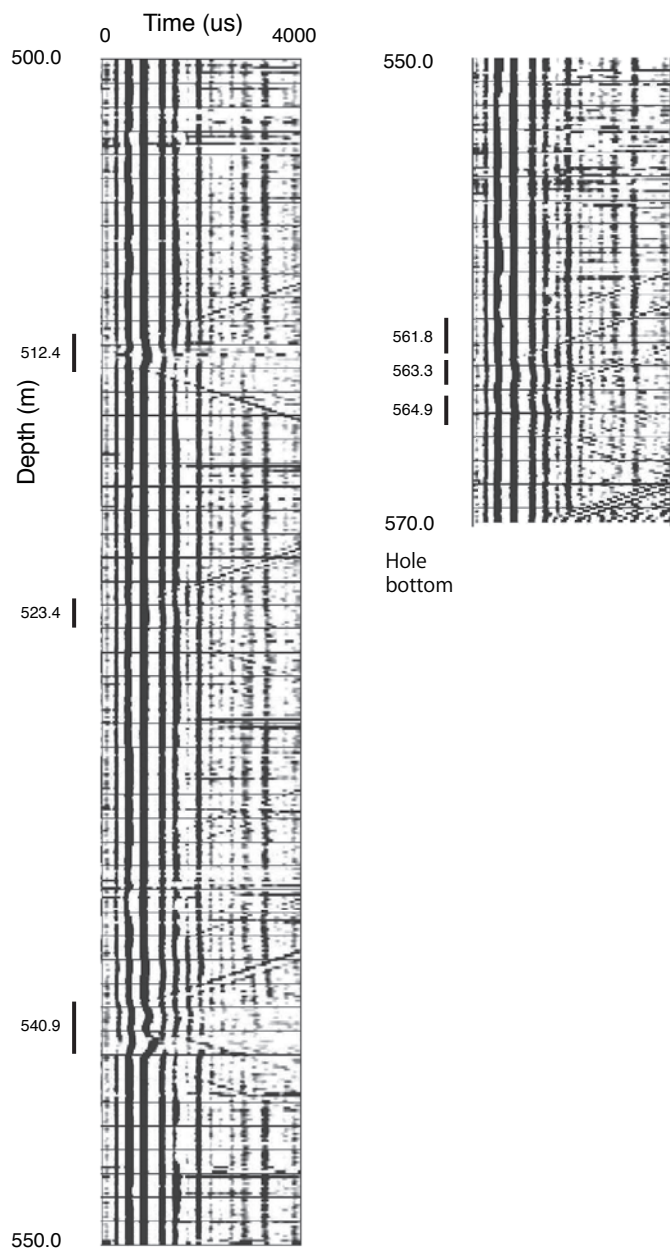
SSK Hole-1



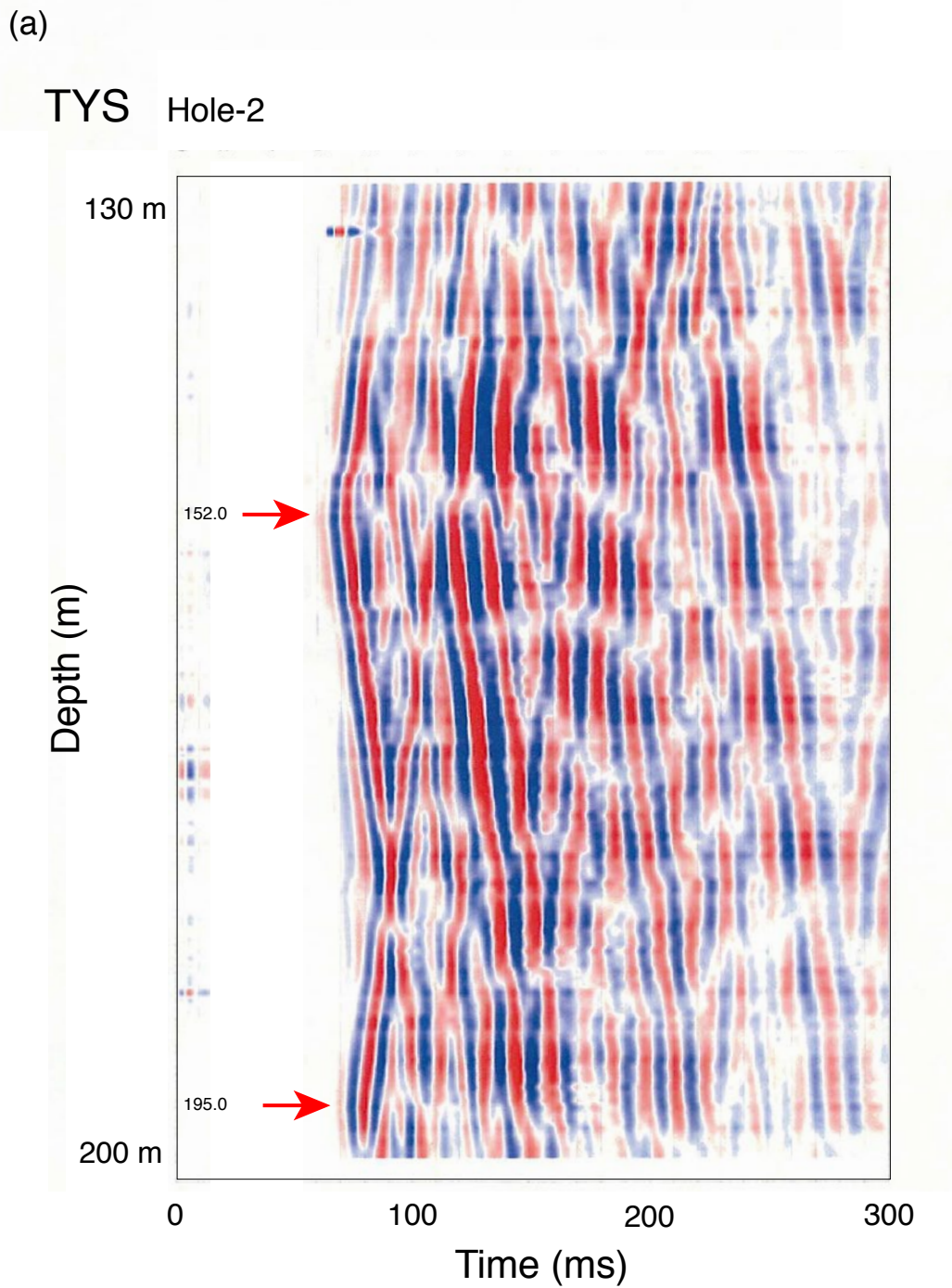
第4図. (続き)  
Fig. 4. (continued)

(h) (continued)

SSK Hole-1



第4図. (続き)  
Fig. 4. (continued)

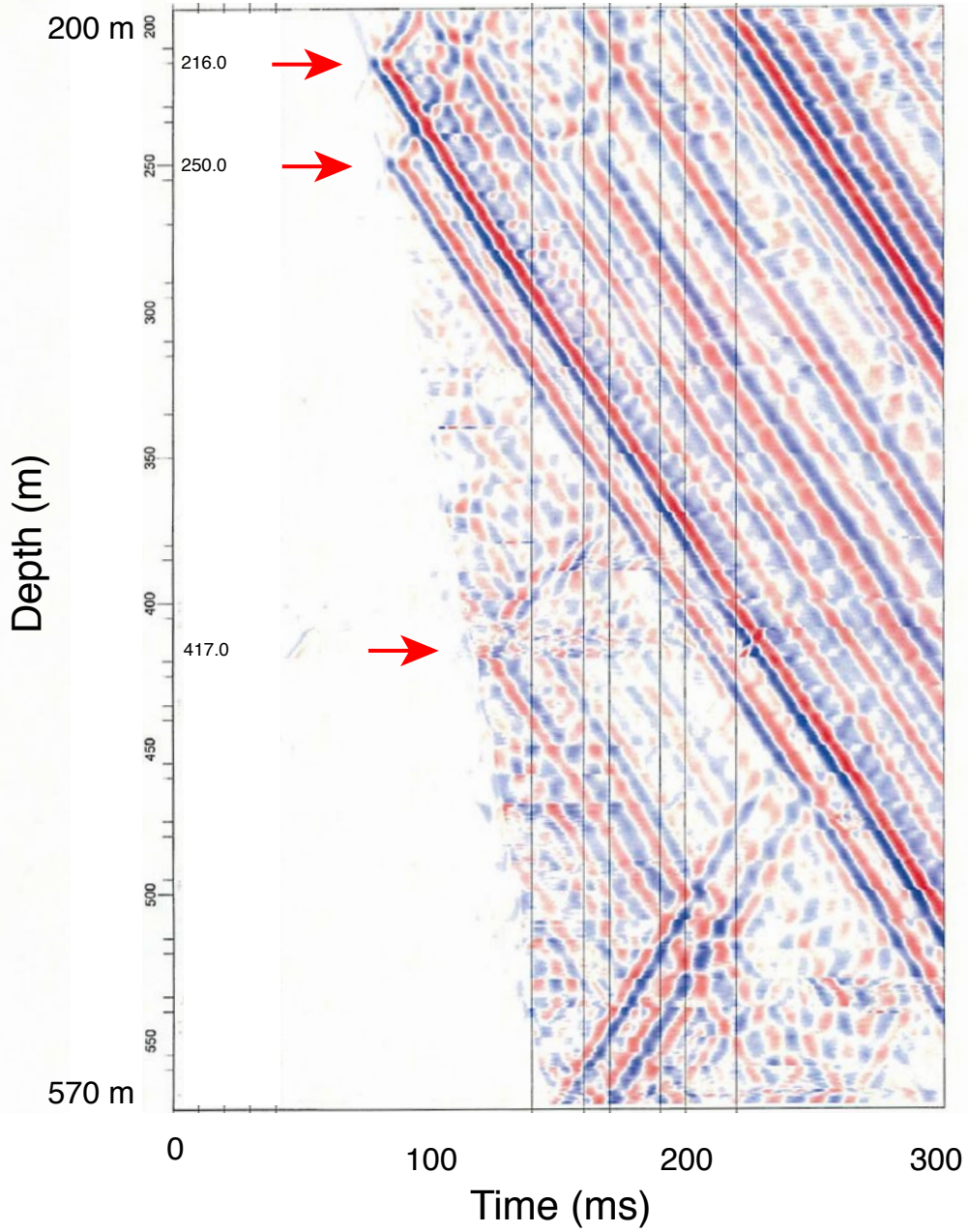


第5図. TYS, NSZ, ANO, NHK, SSK, TSSの6観測点のハイドロフォンVSPの結果. 検出した透水性亀裂の深度を赤矢印で示す. (a) TYSの孔2. (b) TYSの孔1. (c) NSZの孔2. (d) NSZの孔1. (e) ANOの孔1. (f) NHKの孔2. (g) NHKの孔1. (h) SSKの孔1. (i) TSSの孔1.

Fig. 5. Results of hydrophone VSPs at TYS, NSZ, ANO, NHK, SSK and TSS. Red arrows indicate the depths of the permeable fractures. (a) Hole-2 of TYS. (b) Hole-1 of TYS. (c) Hole-2 of NSZ. (d) Hole-1 of NSZ. (e) Hole-1 of ANO. (f) Hole-2 of NHK. (g) Hole-1 of NHK. (h) Hole-1 of SSK. (i) Hole-1 of TSS.

(b)

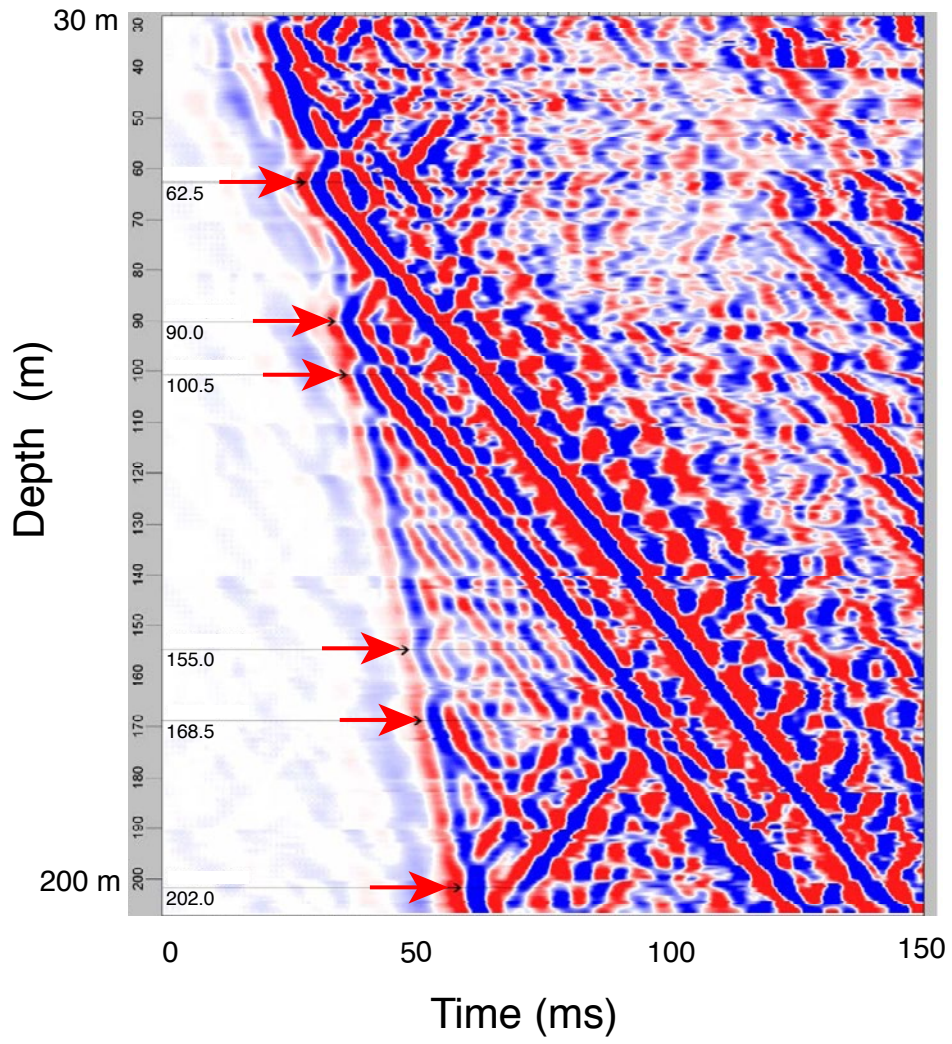
TYS Hole-1



第5図. (続き)  
Fig. 5. (continued)

(c)

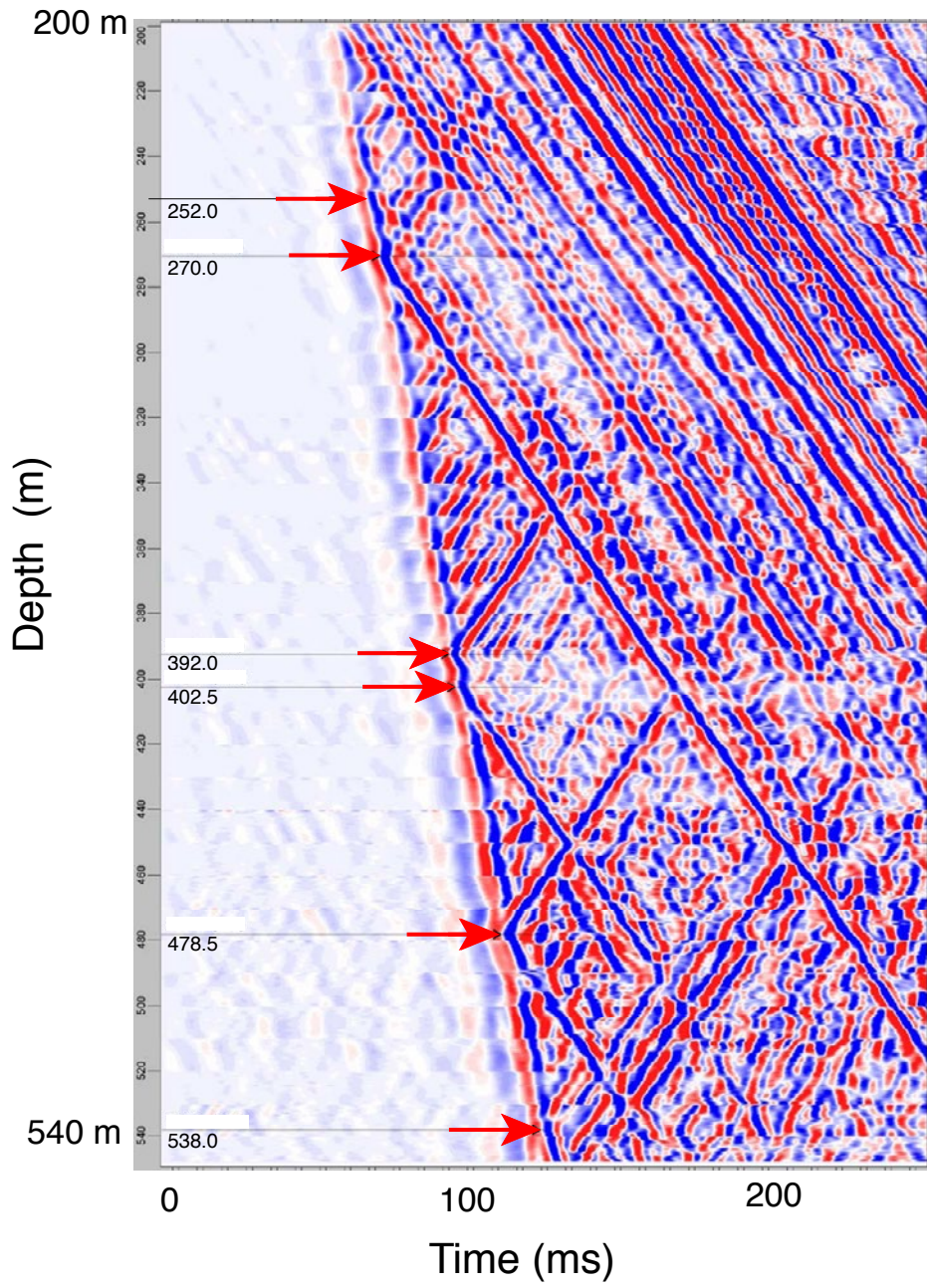
NSZ Hole-2



第5図. (続き)  
Fig. 5. (continued)

(d)

NSZ Hole-1

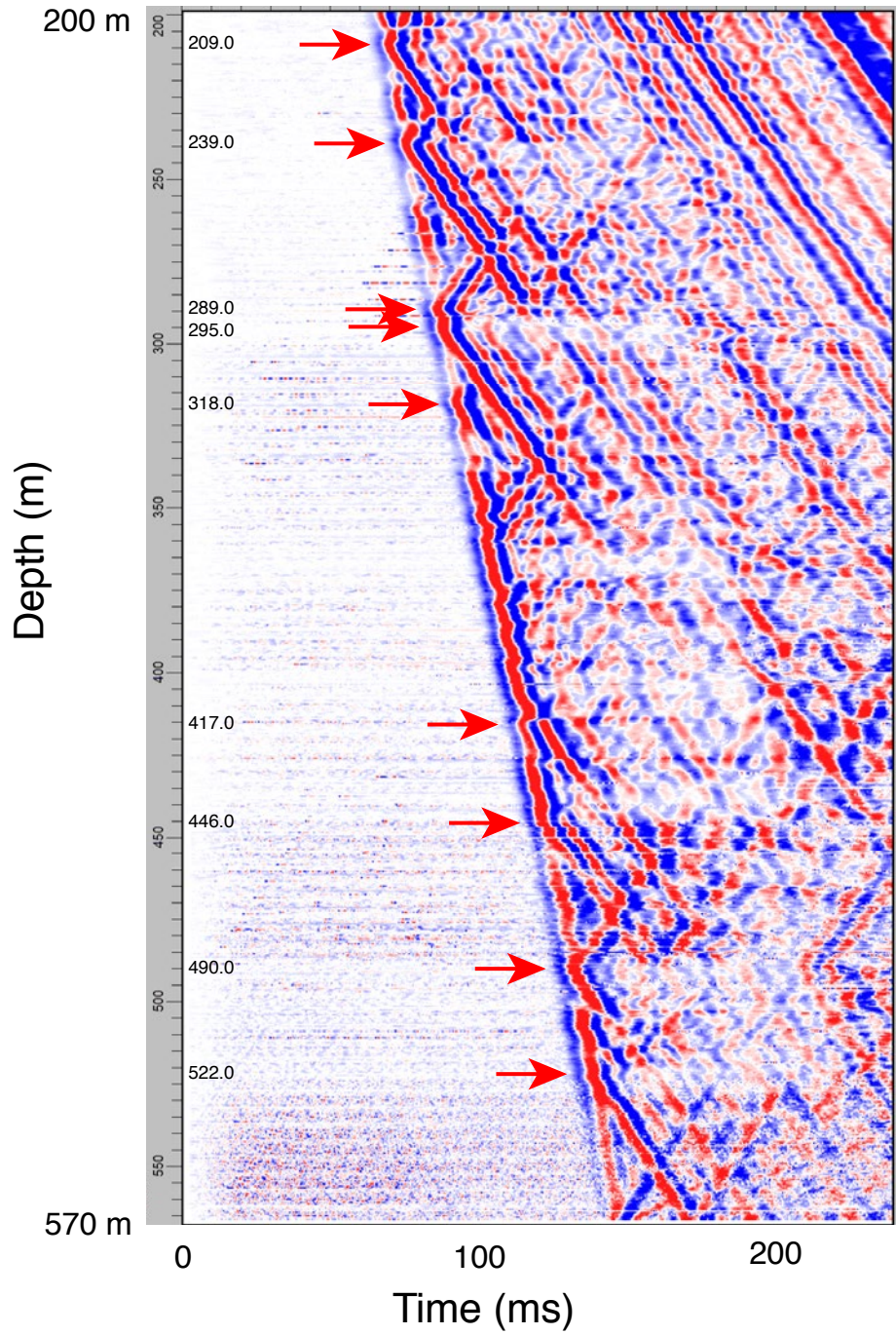


第5図. (続き)  
Fig. 5. (continued)



(e)

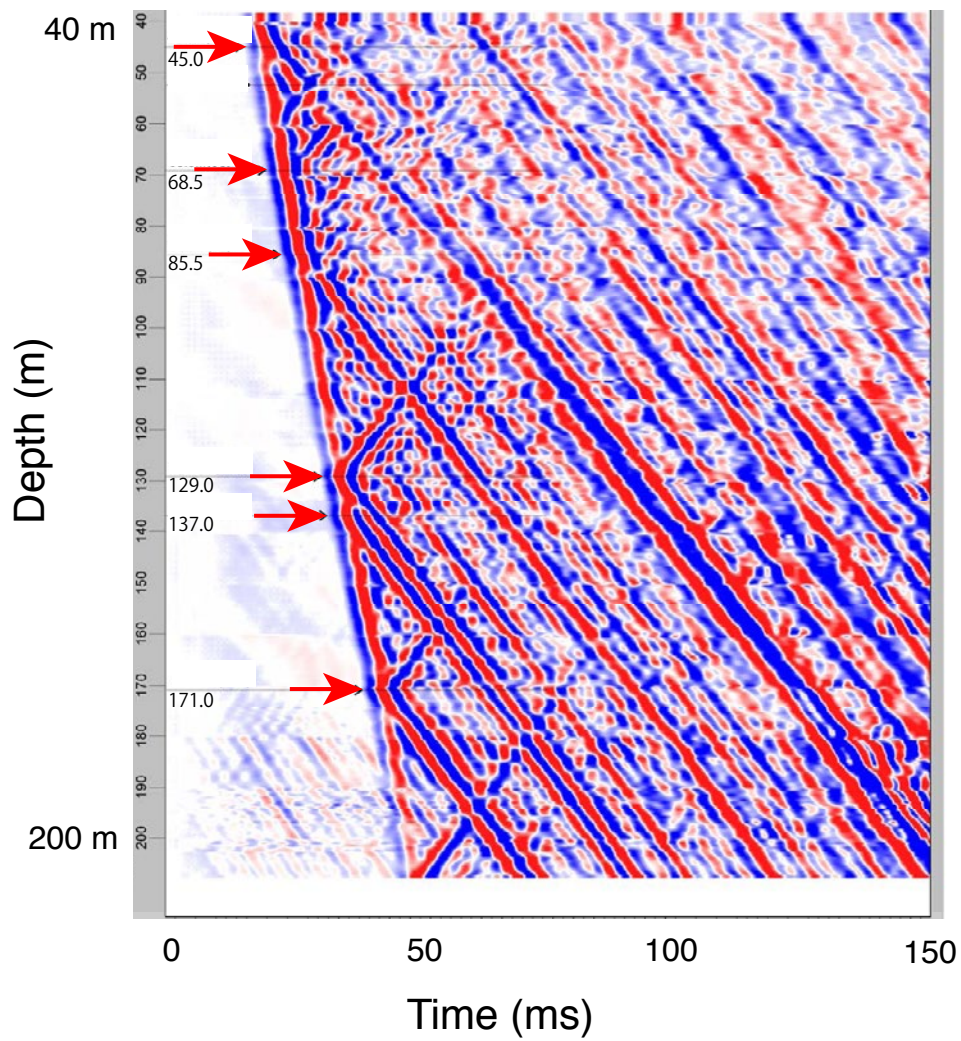
ANO Hole-1



第5図. (続き)  
Fig. 5. (continued)

(f)

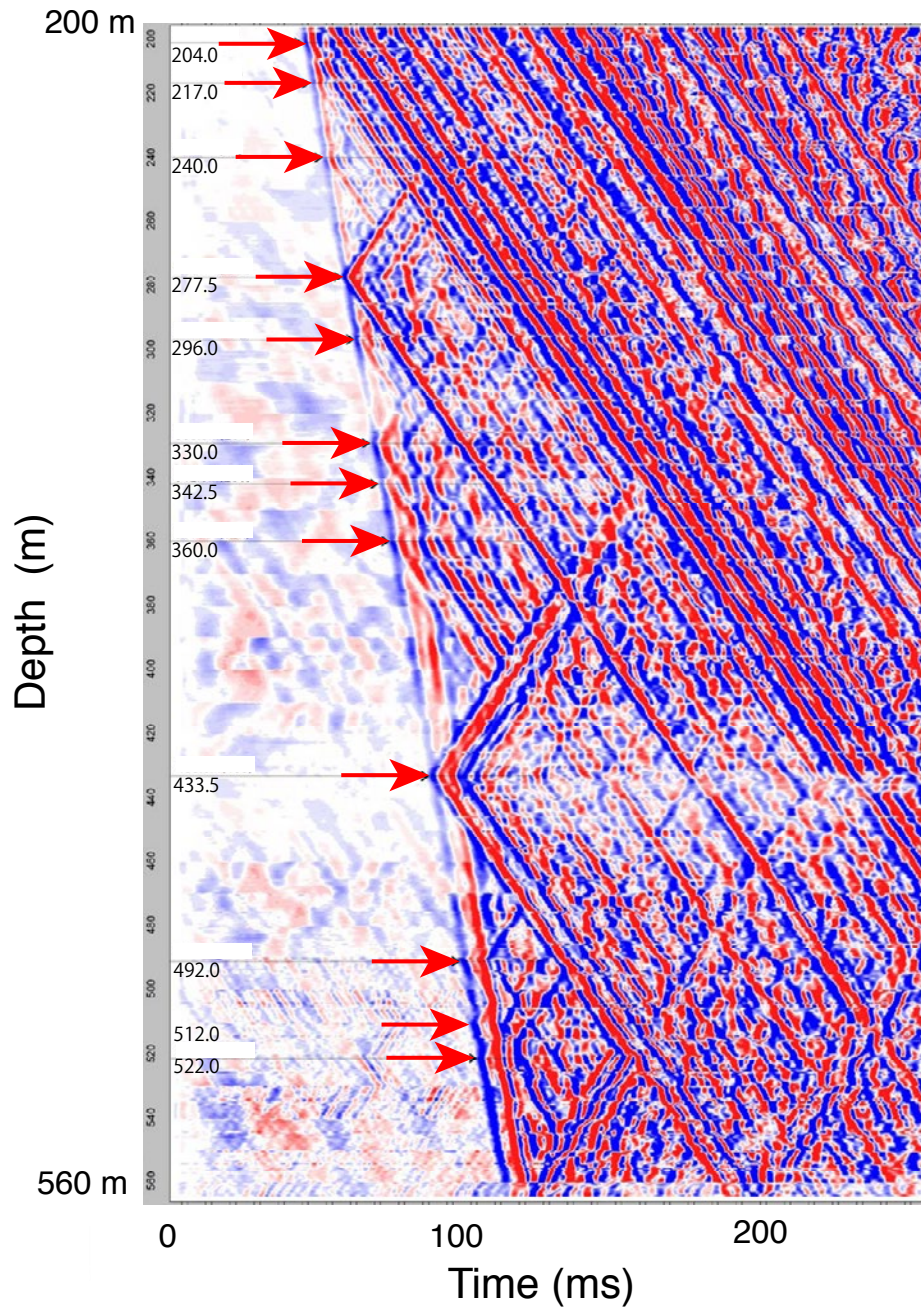
NHK Hole-2



第 5 図. (続き)  
Fig. 5. (continued)

(g)

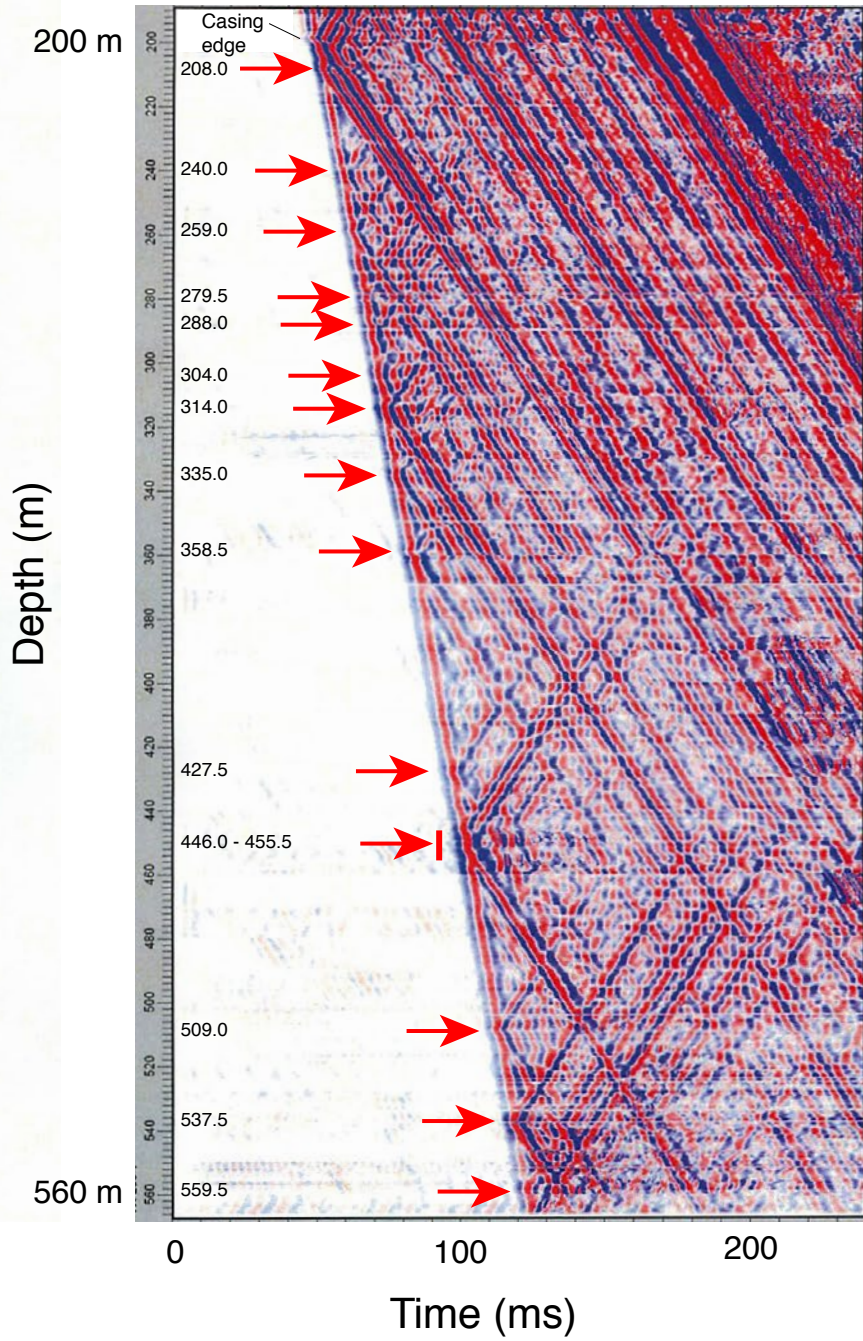
NHK Hole-1



第5図. (続き)  
Fig. 5. (continued)

(h)

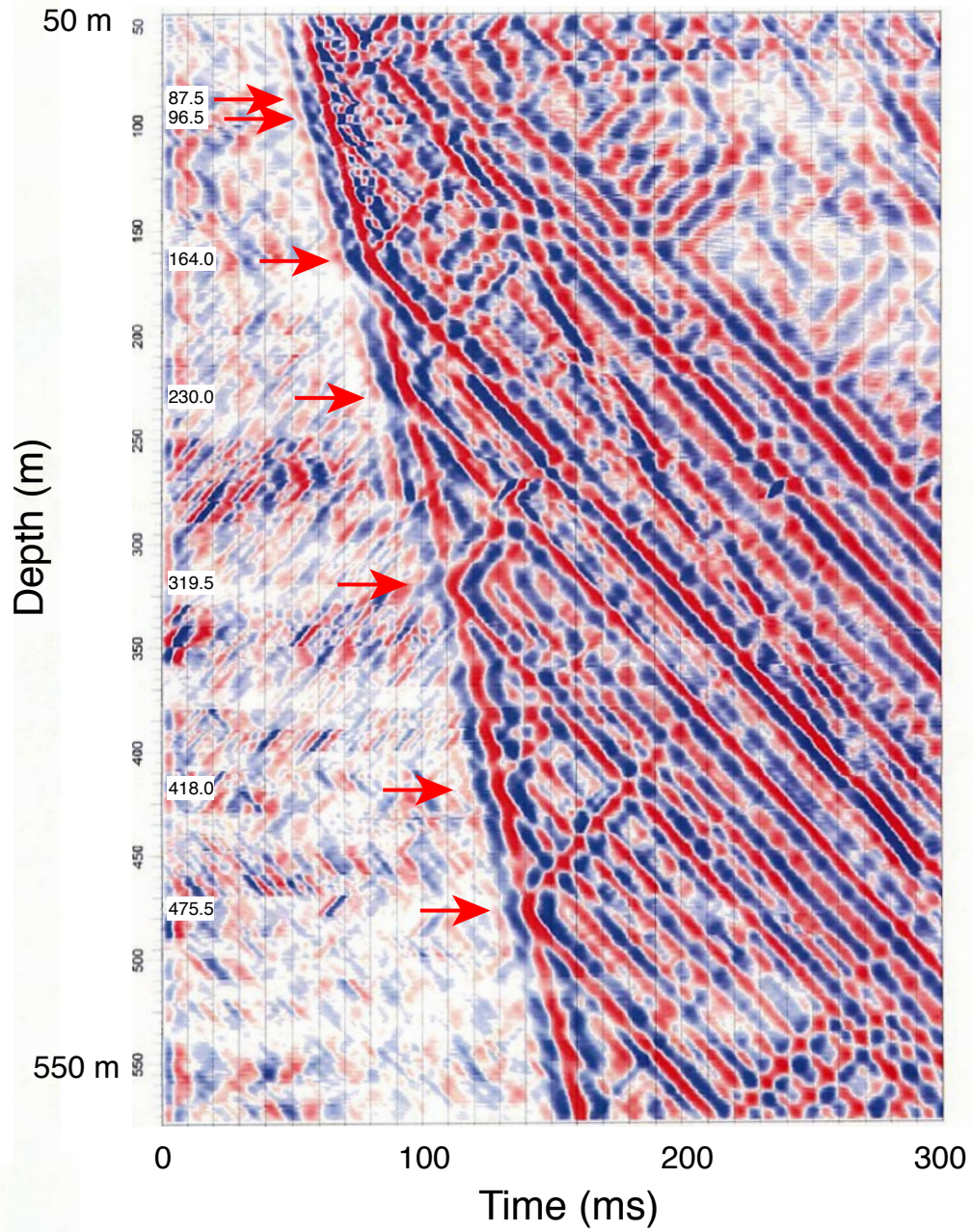
SSK Hole-1



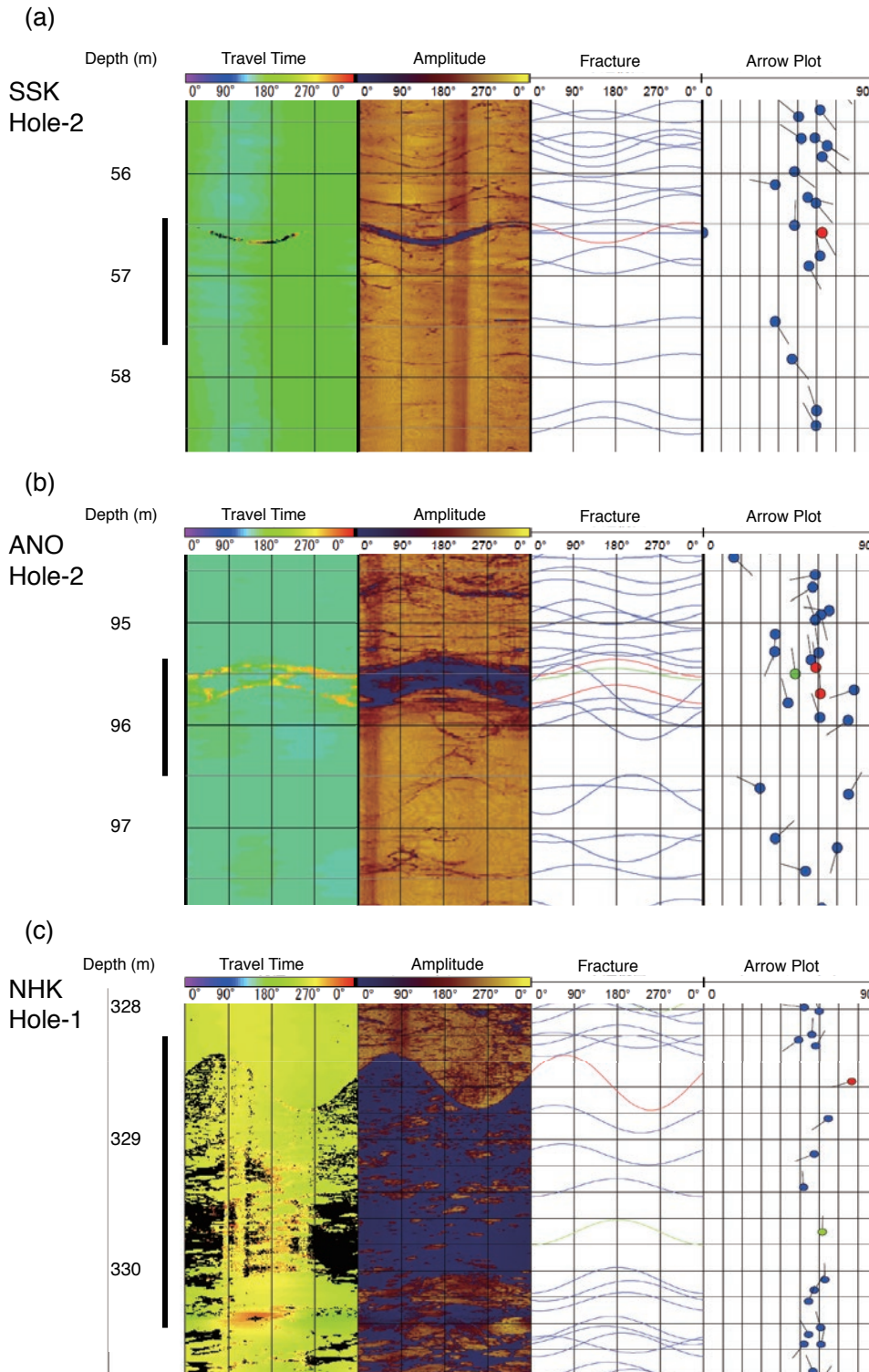
第5図. (続き)  
Fig. 5. (continued)

(i)

TSS Hole-1



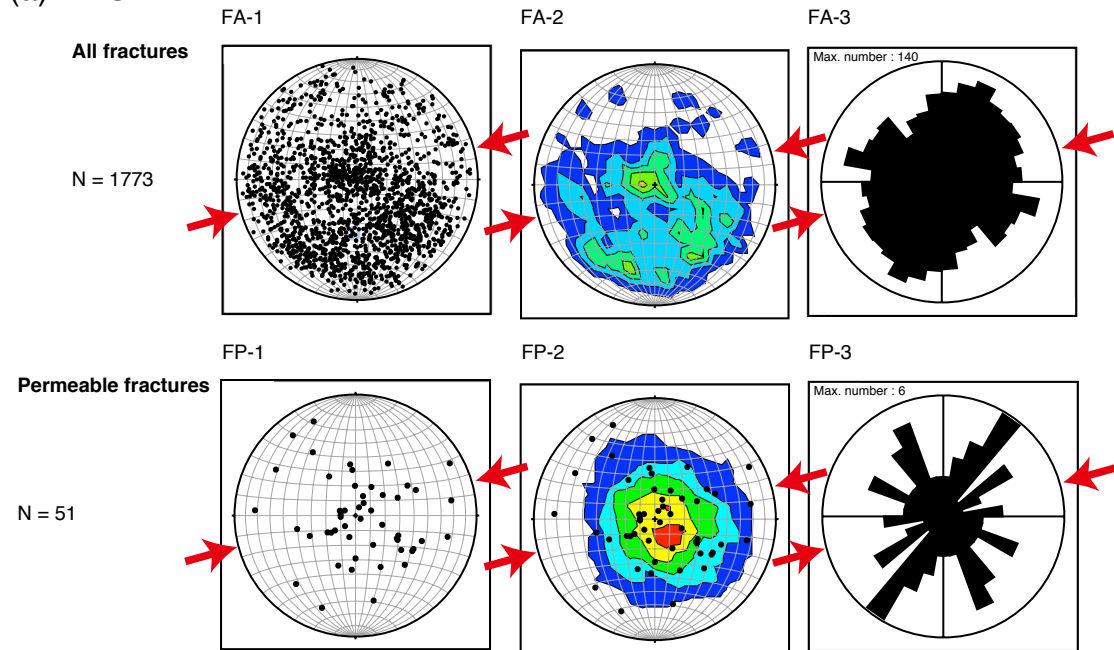
第5図. (続き)  
Fig. 5. (continued)



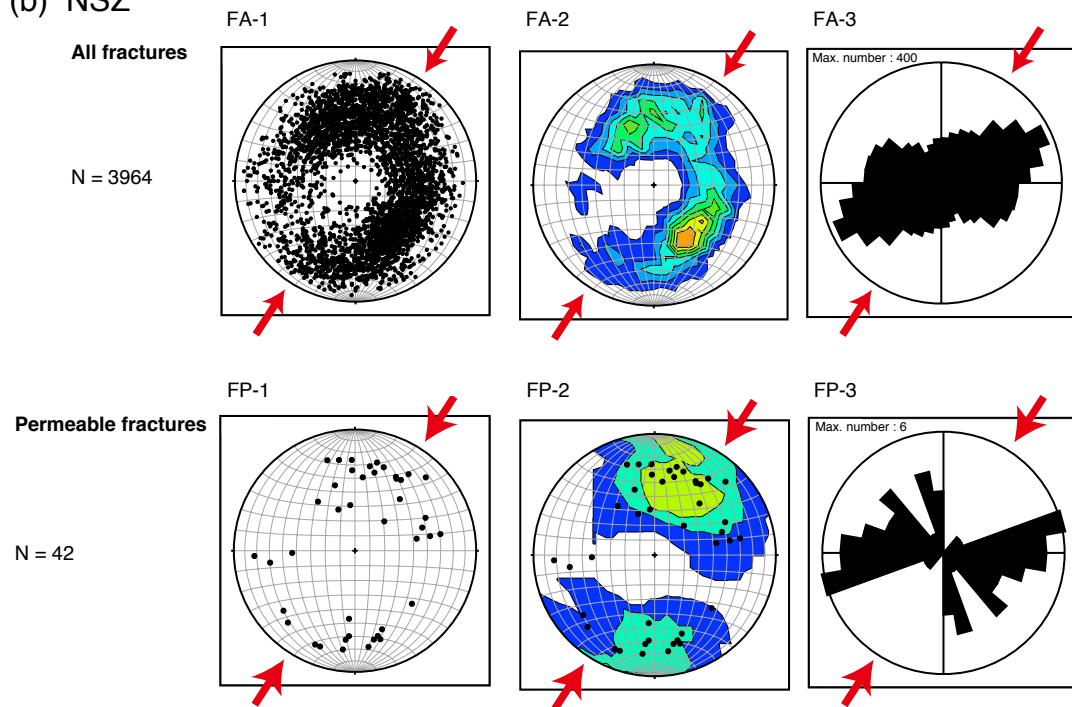
第 6 図. 透水ゾーン付近の BHTV 画像及び亀裂の形状と向き例. 左の列から, BHTV による走時と振幅の画像, サインカーブの形状として検出した亀裂, 亀裂の傾斜方位と傾斜角を示すアロープロットを示す. アロープロットでは丸印の位置が傾斜角, 線分の方が傾斜方位を意味する. 透水ゾーンの区間を黒線で示す. (a) SSK の孔 2 深度 57.1 m 付近. (b) ANO の孔 2 深度 96.0 m 付近. (c) NHK の孔 1 深度 329.7 m 付近.

Fig. 6. Typical examples of BHTV images around the detected permeable zones. Travel time and amplitude images of BHTV, fracture shapes indicated as sinusoidal curves and arrow plots for dip directions and dip angles of the fractures are shown from left to right figures. The position of the arrow's head and the direction of the arrow indicate a dip angle and a dip direction, respectively. The black bar shows the interval of permeable zone. (a) Depth of 57.1 m at Hole-2 of SSK. (b) Depth of 96.0 m at Hole-2 of ANO. (c) Depth of 329.7 m at Hole-1 of NHK.

(a) TYS



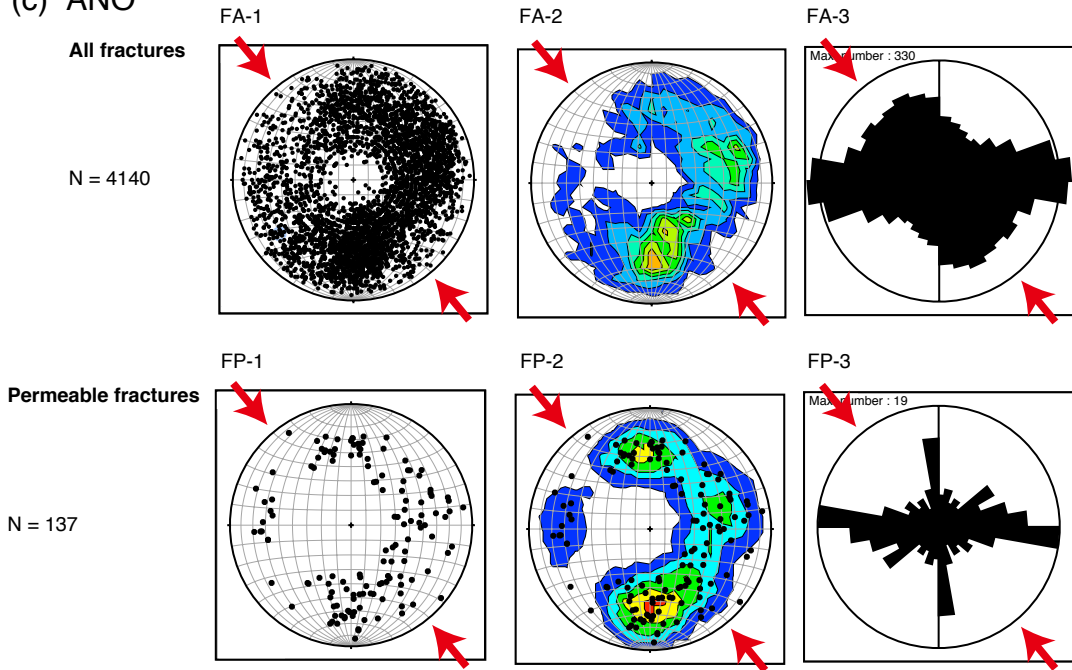
(b) NSZ



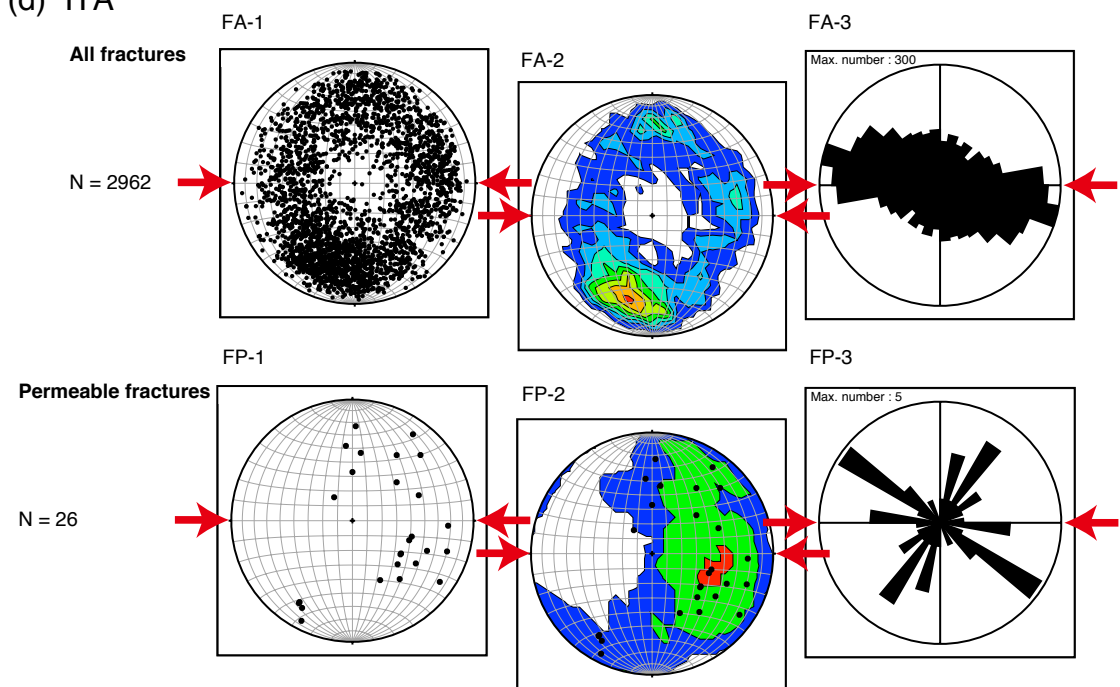
第7図. 16観測点の全亀裂及び透水性亀裂の向き分布. 観測点名を(a)~(p)の各図の上部に示す. 各図の上段に全亀裂, 下段に透水性亀裂の分布を示し, 左図は亀裂面の法線方向の下半球面への等積投影図, 中央図はそのコンター図, 右図は亀裂の走向のローズダイアグラム(10度間隔)である. 応力方位を赤色矢印で示す. なお, (h) HGMと(k) KOCでは全亀裂についての向きだけを示している.

Fig. 7. Distributions of the orientations for all and permeable fractures at 16 sites. Site names are shown at the top of the figures (a)~(p). Distributions of all and permeable fractures are shown in the upper and the lower panels, respectively. The left figures are lower-hemisphere equal-area projections of the poles to fracture planes, the center ones are contours for the distribution of the poles, and the right ones are rose diagrams showing frequencies of the strike of the fractures for the angle interval of 10 degrees. The stress orientation at each site is indicated by a pair of red arrows. Only the orientations for all fractures are shown in (h) HGM and (k) KOC,

(c) ANO



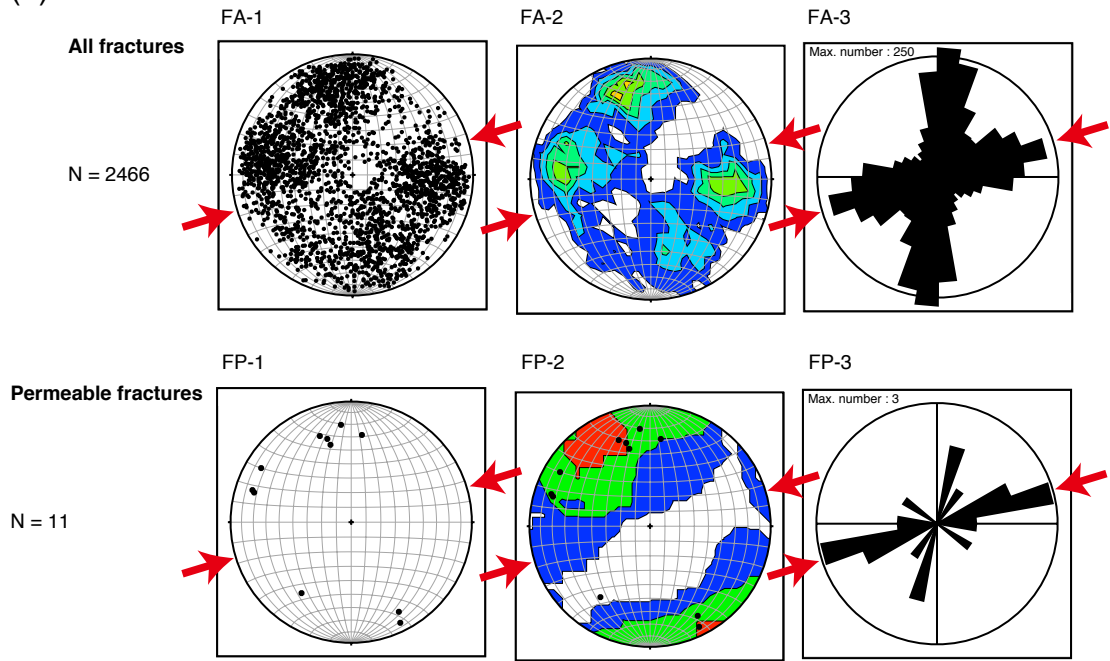
(d) ITA



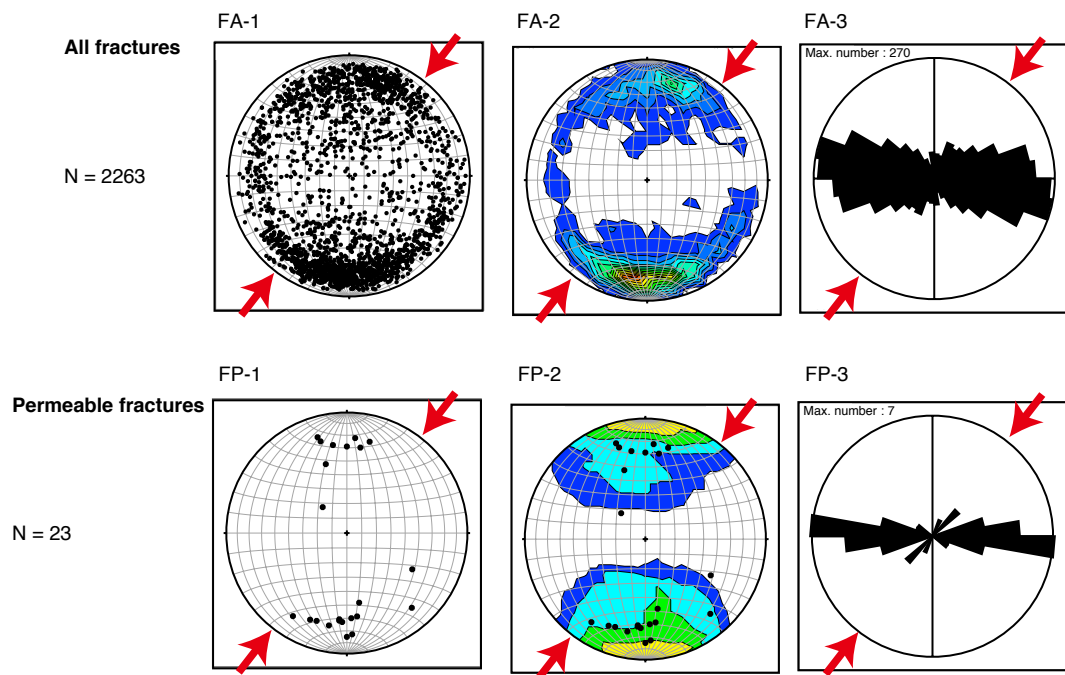
第7図. (続き)  
Fig. 7. (continued)



(e) MYM

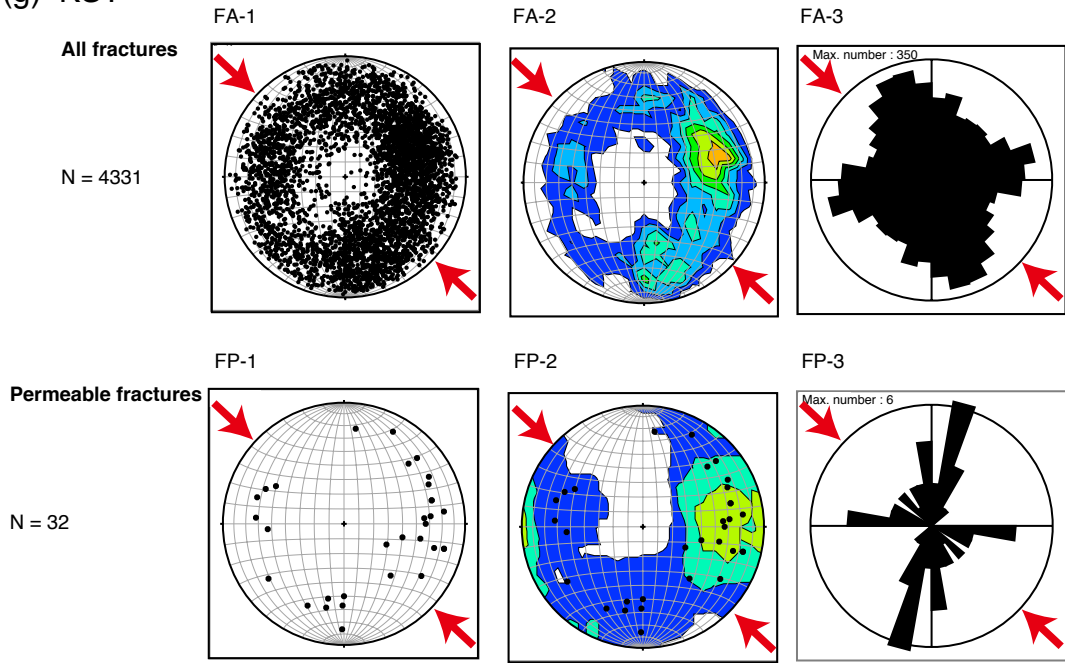


(f) ICU

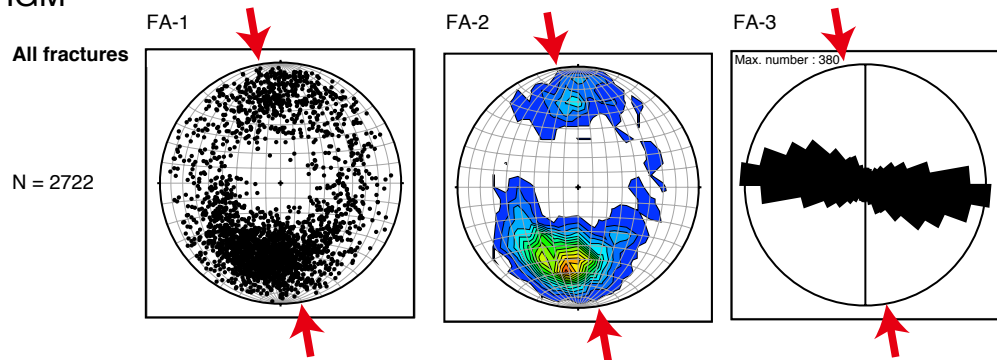


第7図. (続き)  
Fig. 7. (continued)

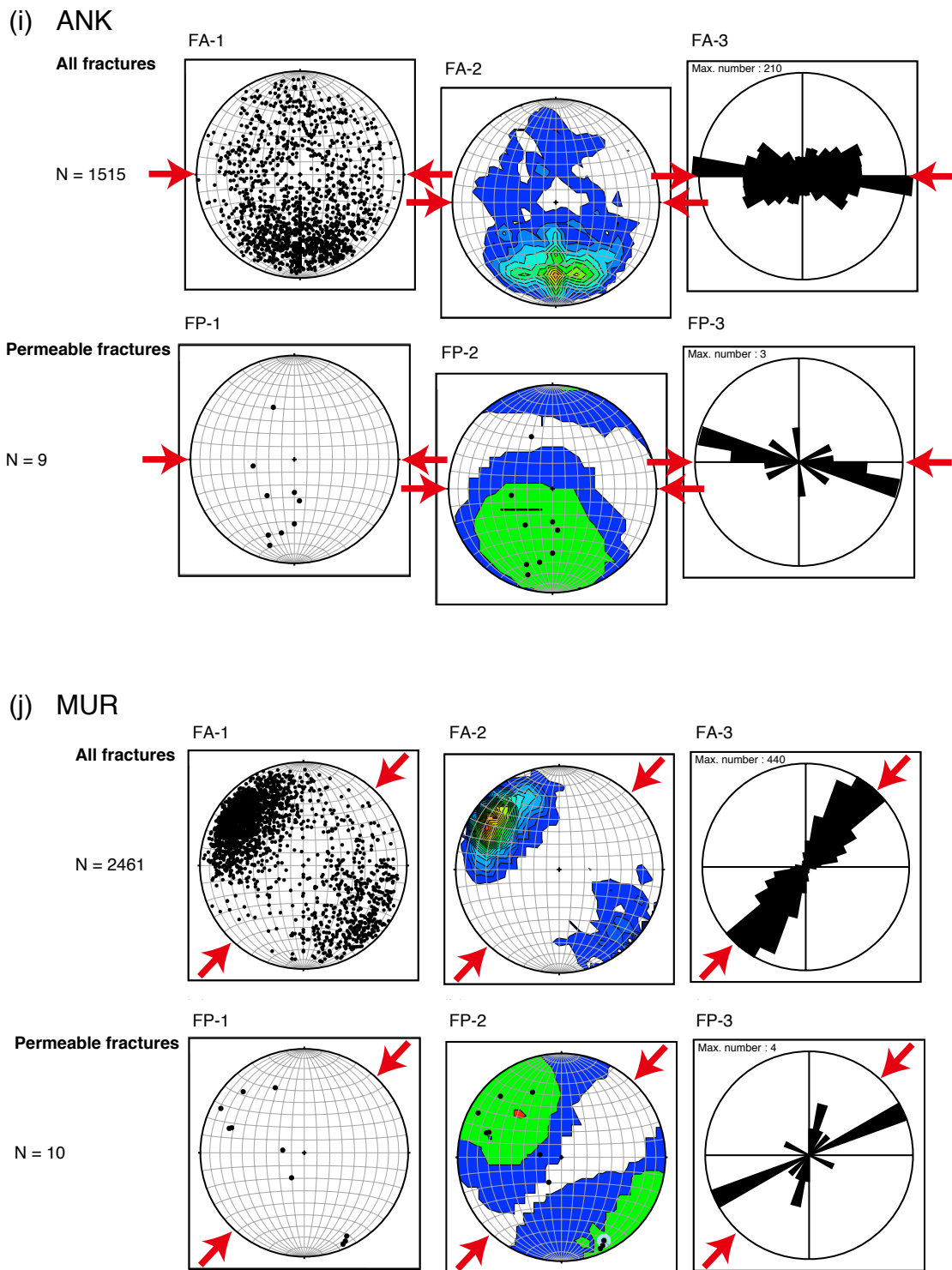
(g) KST



(h) HGM

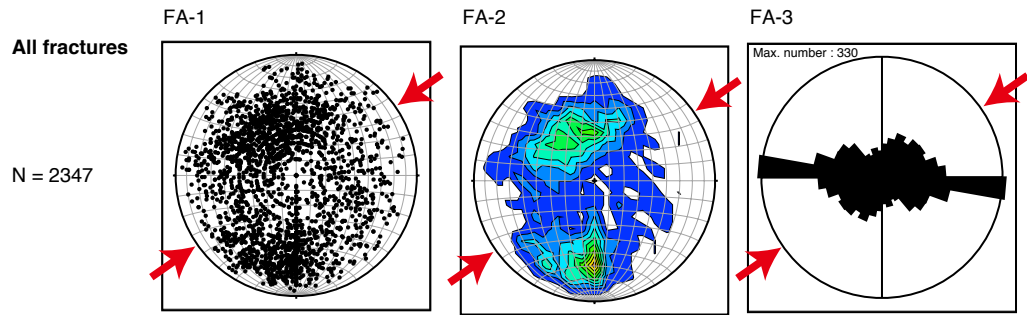


第7図. (続き)  
Fig. 7. (continued)

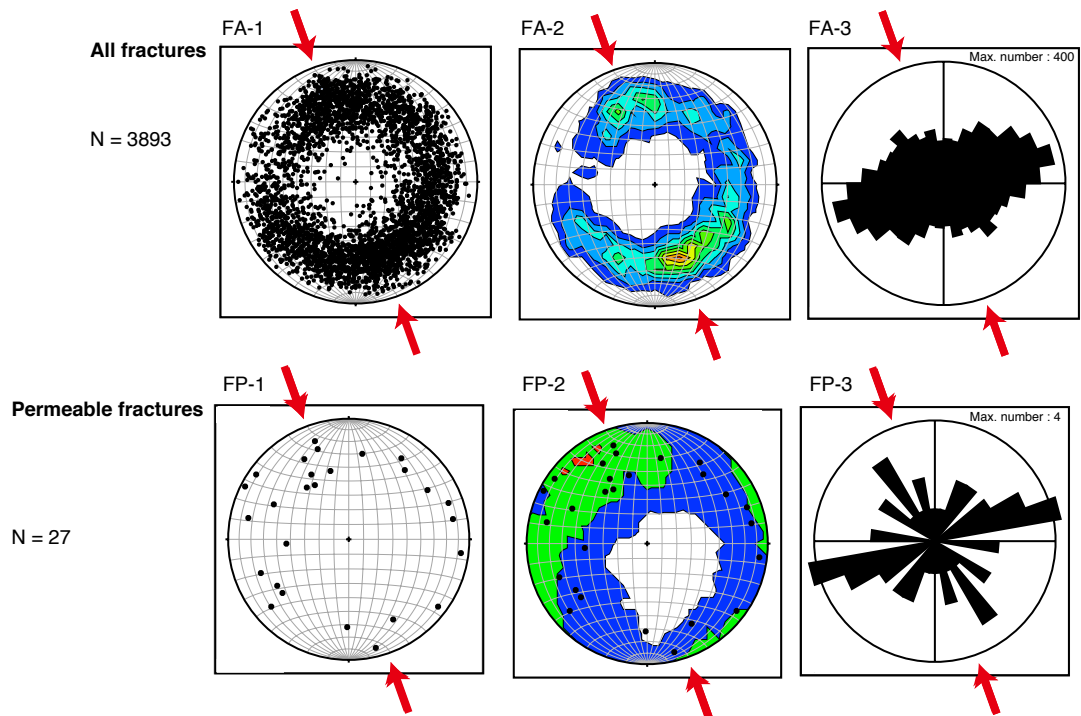


第7図. (続き)  
Fig. 7. (continued)

(k) KOC

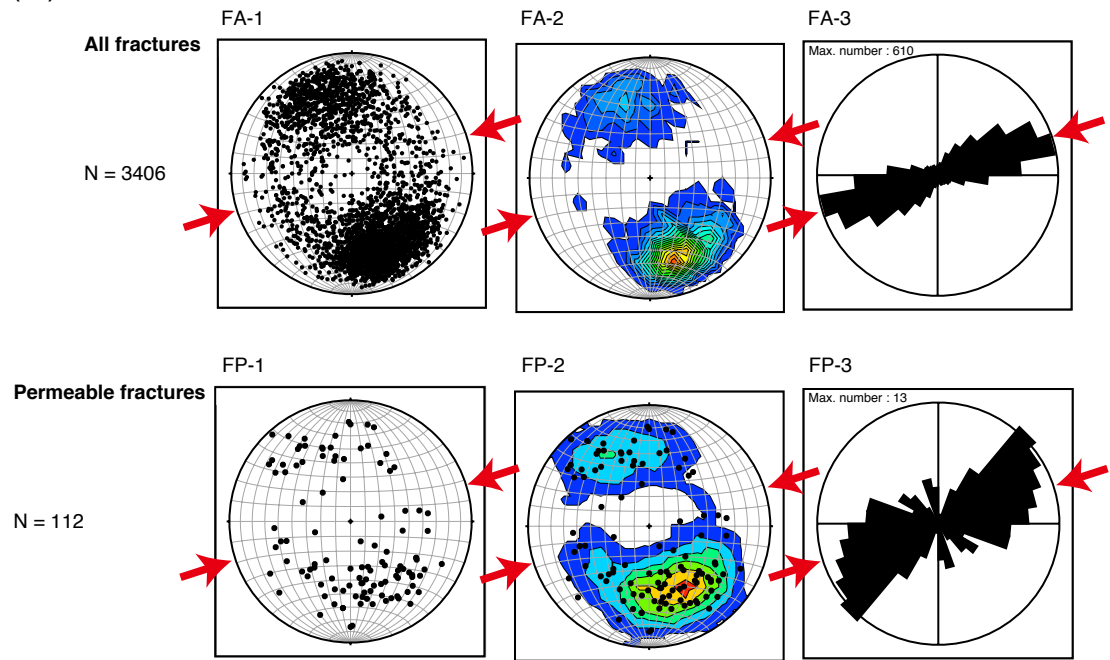


(l) NHK

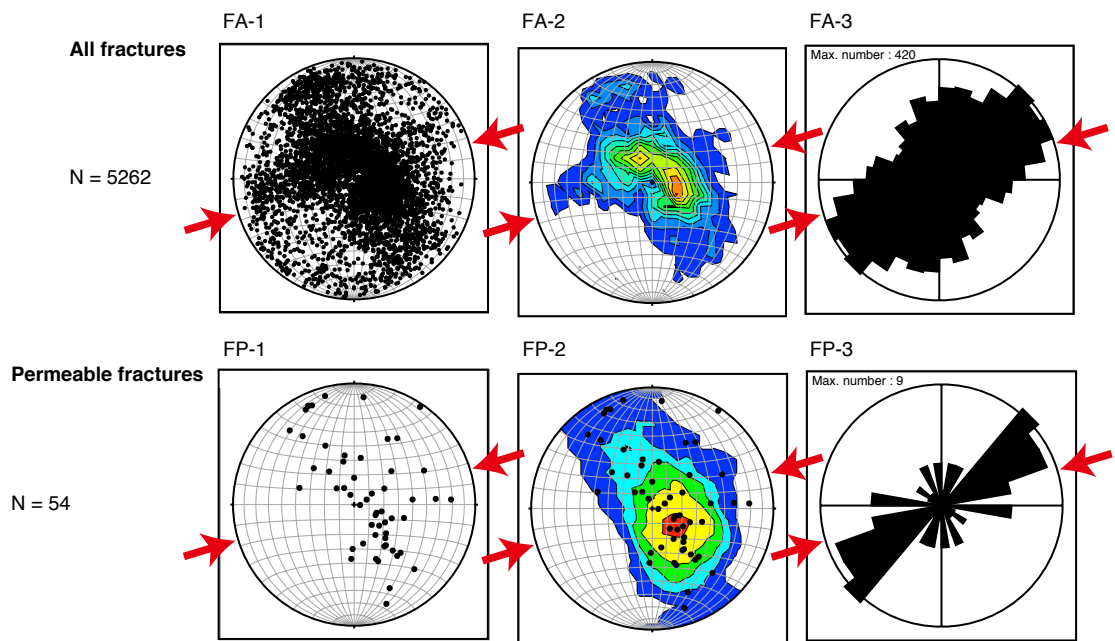


第7図. (続き)  
Fig. 7. (continued)

(m) SSK

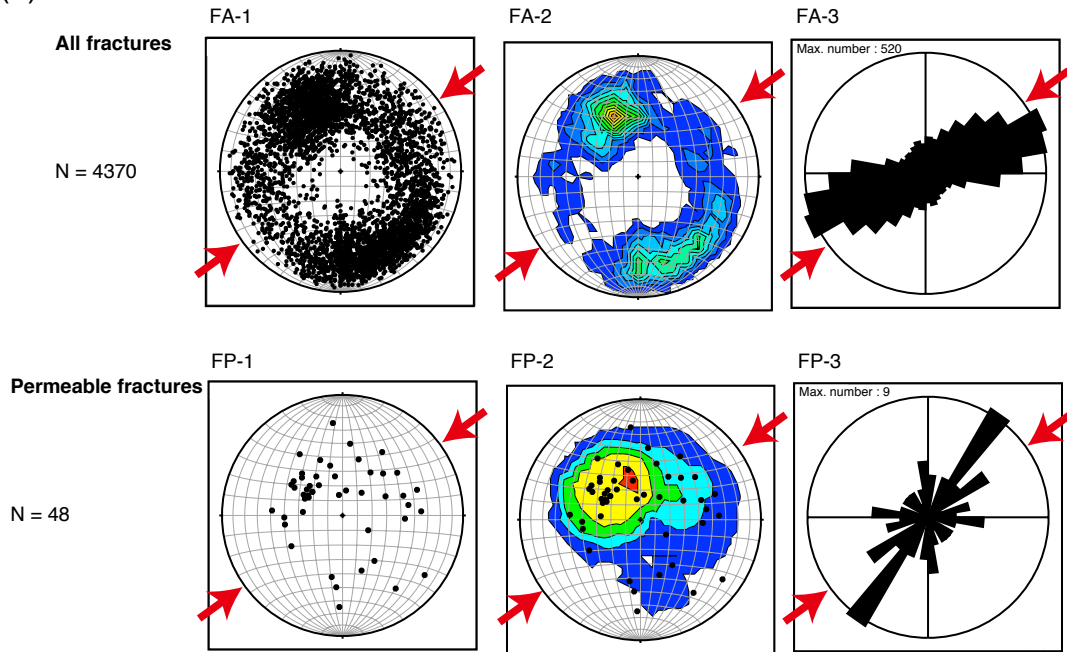


(n) TSS

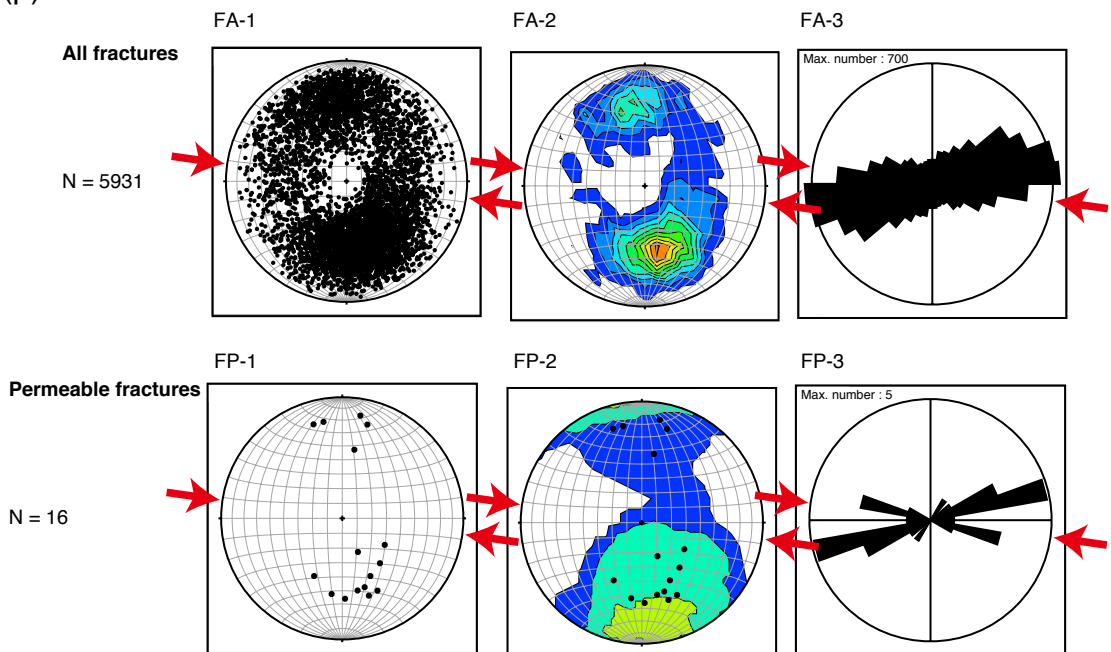


第7図. (続き)  
Fig. 7. (continued)

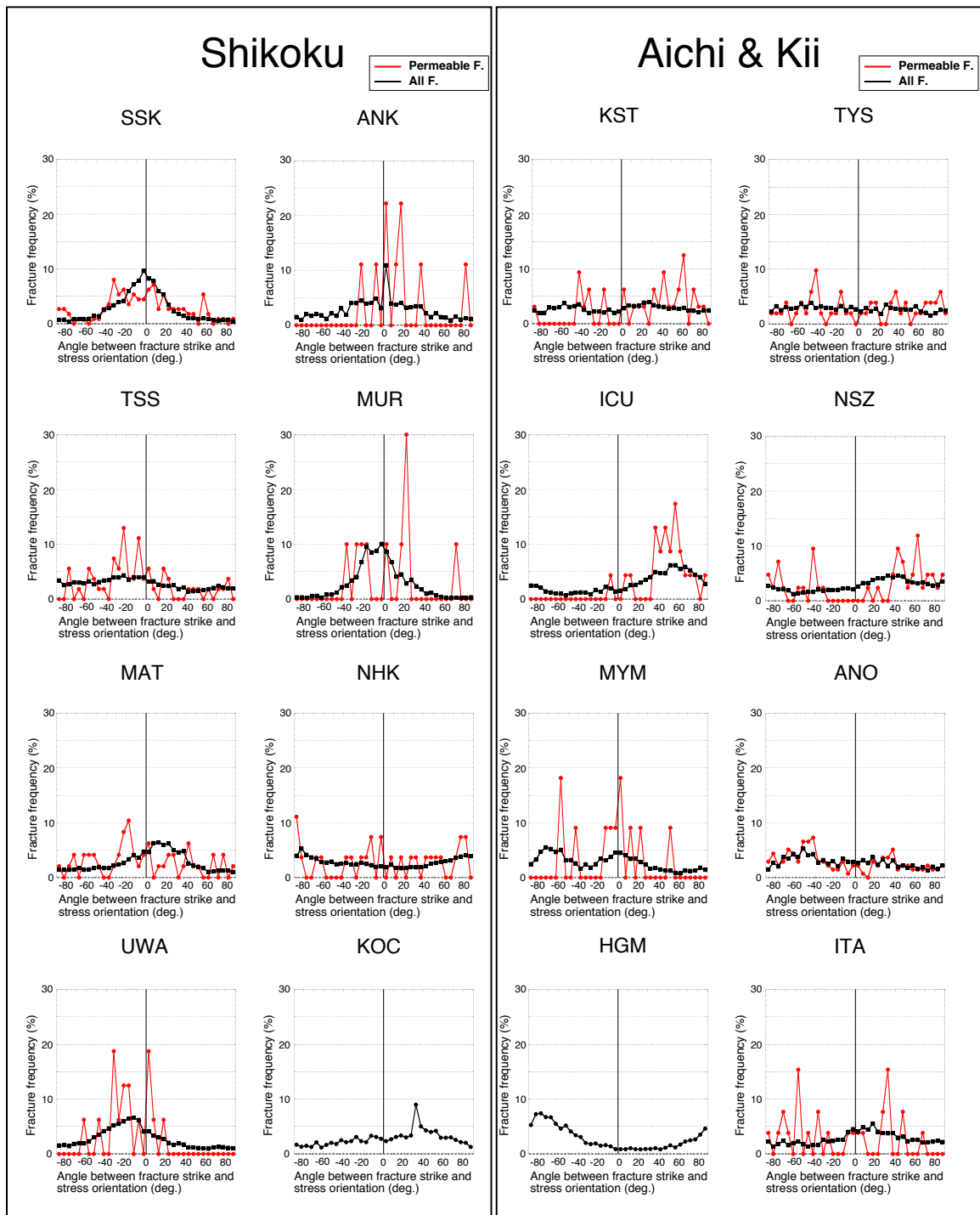
(o) MAT



(p) UWA

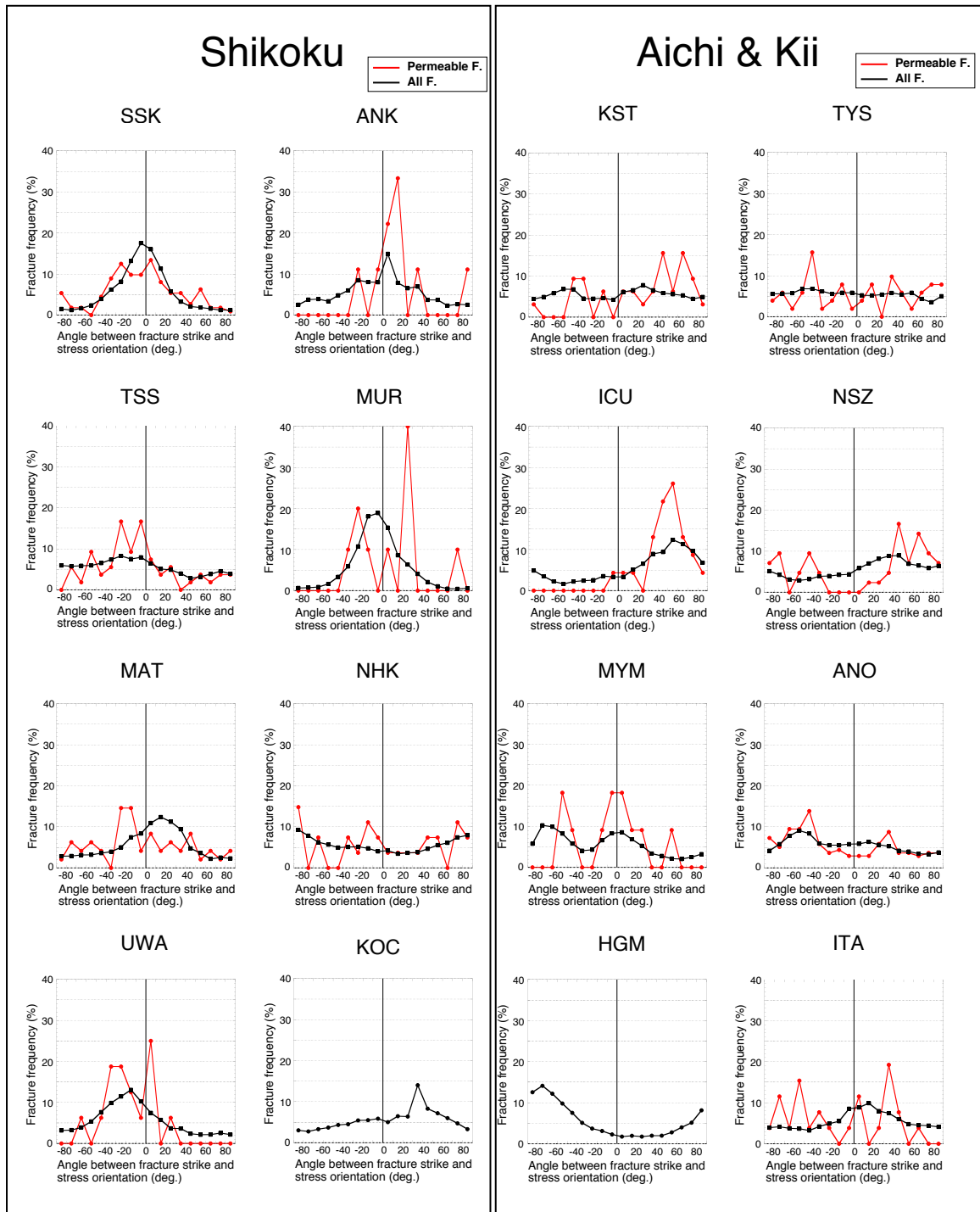


第7図. (続き)  
Fig. 7. (continued)



第 8 図. 各観測点の亀裂の走向が応力方位となす角度の頻度分布図。観測点名をグラフの上部に示す。頻度を求める角度間隔は 5 度である。横軸の正の値は亀裂の走向が応力方位から時計回りの向きにあることを意味する。縦軸は各亀裂の頻度の亀裂総数に対する割合 (%)。透水性亀裂と全亀裂の頻度を、それぞれ、赤線と黒線で示す。なお、HGM と KOC では全亀裂の頻度だけを示している。右側の枠内に愛知県・紀伊半島に位置する 8 観測点、左側の枠内に四国に位置する 8 観測点の結果をまとめる。

Fig. 8. Frequency distributions of strikes of permeable and all fractures at each site. Angles are between the strikes of fractures and the stress orientation at each site. Site names are shown at the top of each figure. The interval of the angle is 5 degrees for obtaining the frequency distribution. Positive values in the horizontal axis indicate the clockwise direction from the stress orientation. The vertical axis denotes the ratio of the frequency of fractures to the total number of fractures. The frequency of permeable and all fractures are shown by red and black lines, respectively. Only the frequencies for all fractures are shown in HGM and KOC. The results of the sites located in the Aichi · Kii and the Shikoku regions are divided into right and left frames, respectively.



第9図. 頻度を求める間隔を10度とした場合の頻度分布図. 図の見方は第8図と同様.

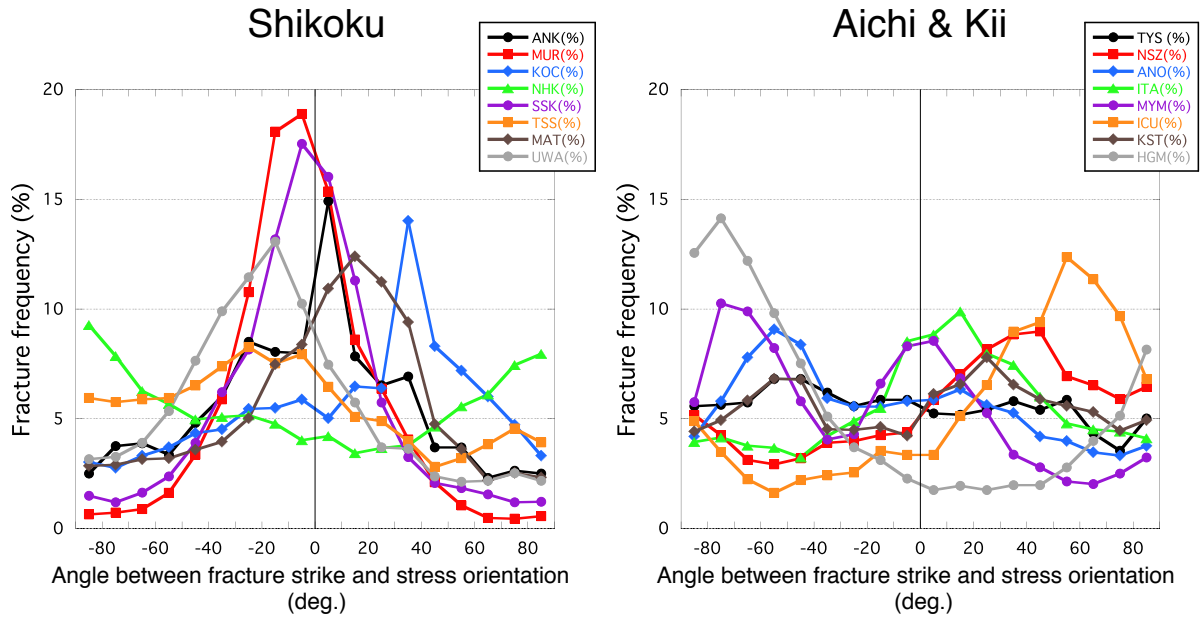
Fig. 9. Frequency distributions in the case of the angle interval 10 degrees. Explanations are the same as those in Fig. 8, but for the angle interval.





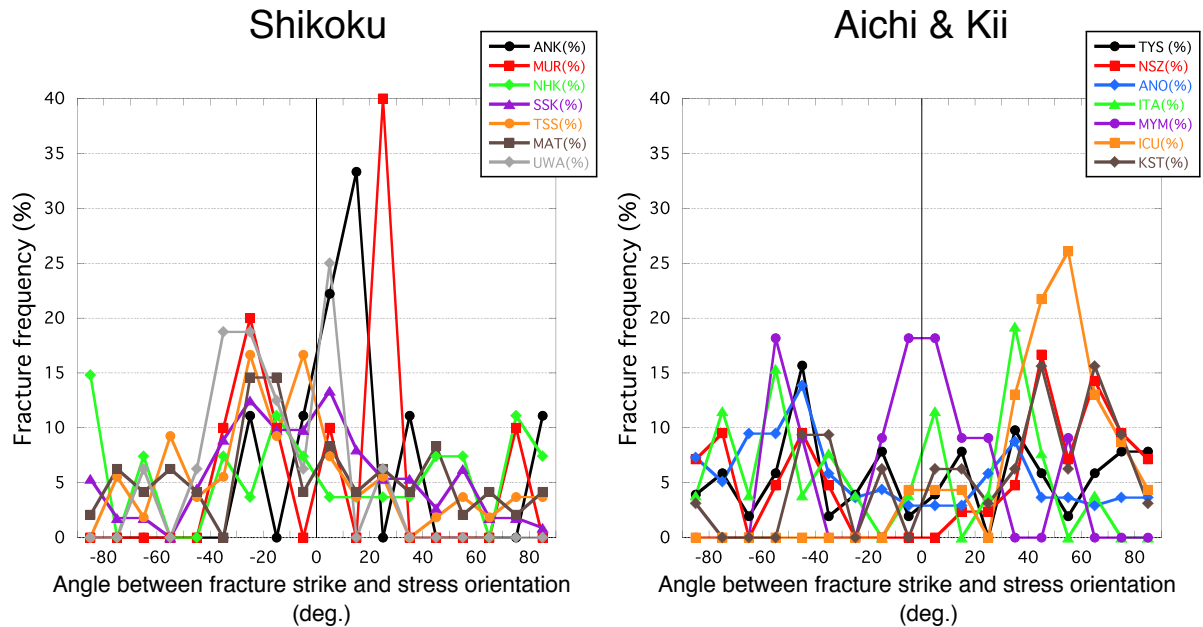
第 10 図. 頻度を求める間隔を 15 度とした場合の頻度分布図. 図の見方は第 8 図と同様.

Fig. 10. Frequency distributions in the case of the angle interval 15 degrees. Same as in Fig. 8, but for the angle interval.



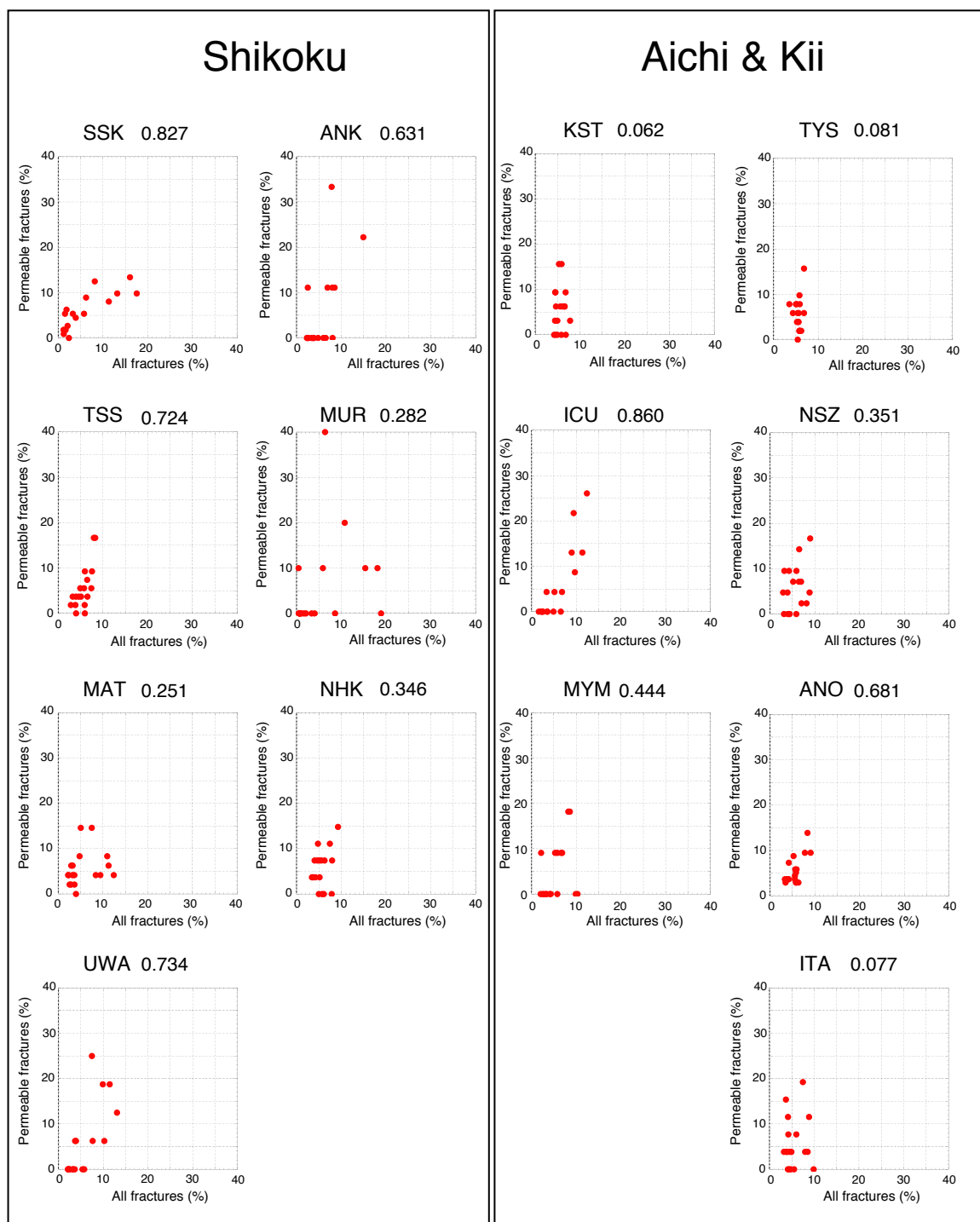
第 11 図. 愛知県・紀伊半島と四国の 2 つの地域に分けた, 全亀裂の走向が応力方位となす角度の頻度分布 (10 度間隔) の重ね図.

Fig. 11. Overlap views of the frequency distributions of the angle between the strike of all fractures and the stress orientation for the two regions of Aichi · Kii and Shikoku. The angle interval is 10 degrees.



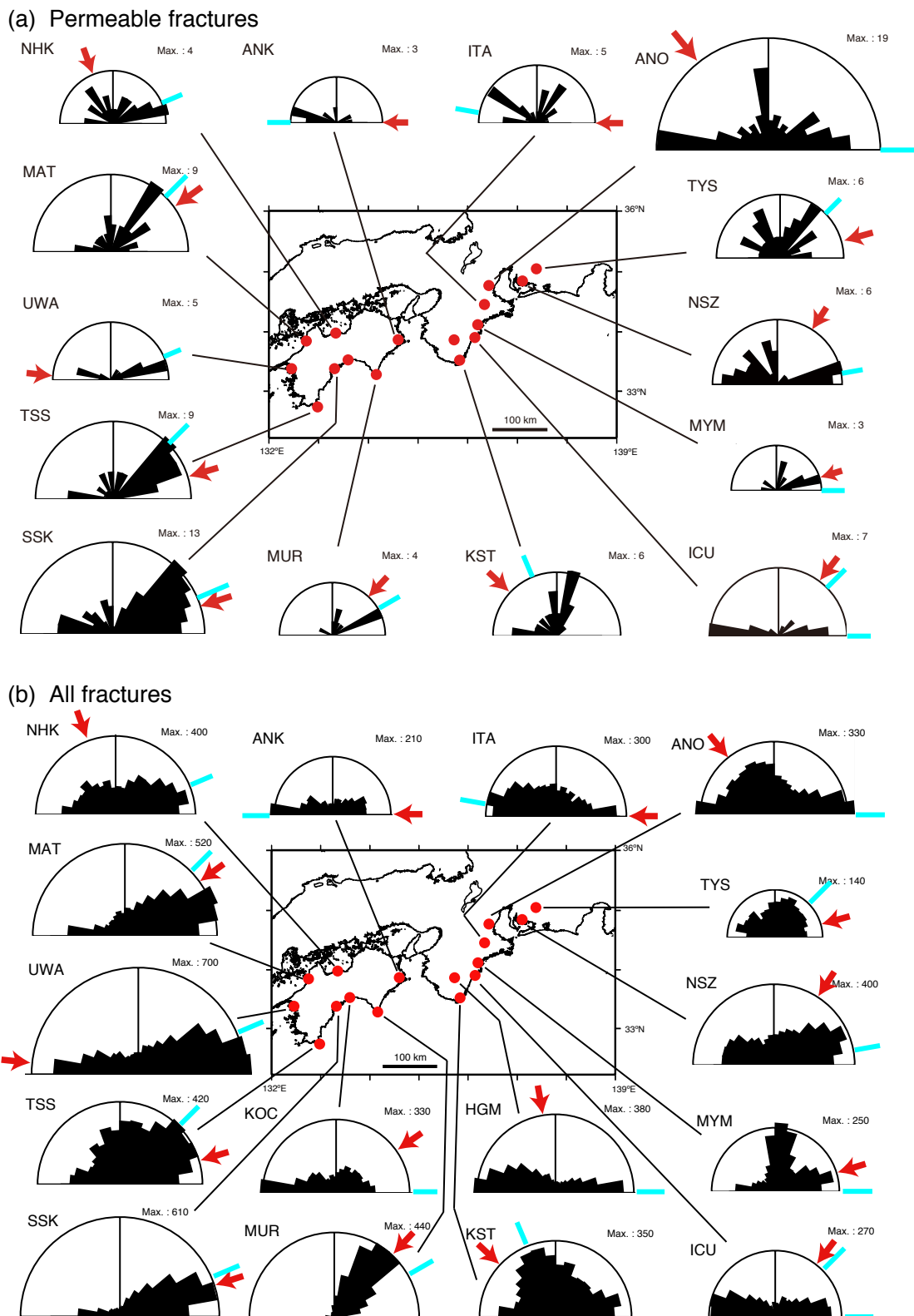
第 12 図. 14 観測点の透水性亀裂の走向が応力方位となす角度の頻度分布の重ね図. 図の見方は第 11 図と同様.

Fig. 12. Overlap views in the case of permeable fractures. Same as in Fig. 11, but for all fractures.



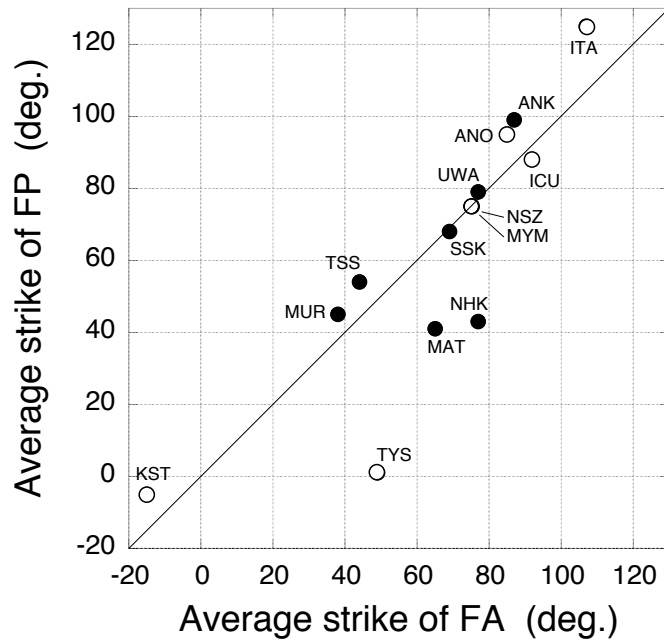
第 13 図. 14 観測点の透水性亀裂と全亀裂のそれぞれの走向が応力方位となす角度の頻度 (10 度間隔) の相関図. 横軸と縦軸はそれぞれ, 全亀裂, 透水性亀裂の走向が応力方位となす角度の頻度 (%) である. 各図の観測点名の横に相関係数を示す. 2 地域への観測点の分類は第 8 図と同じである.

Fig. 13. Correlation diagrams between the strikes of permeable and all fractures at 14 sites. The horizontal and the vertical axes are the frequencies (%) of angles of all and permeable fractures, respectively. The angles are between the stress orientation and the both of the fractures. The angle interval is 10 degrees. The correlation coefficient is shown on the right side of the site name in each figure. The classification of sites into two regions is the same as in Fig. 8.



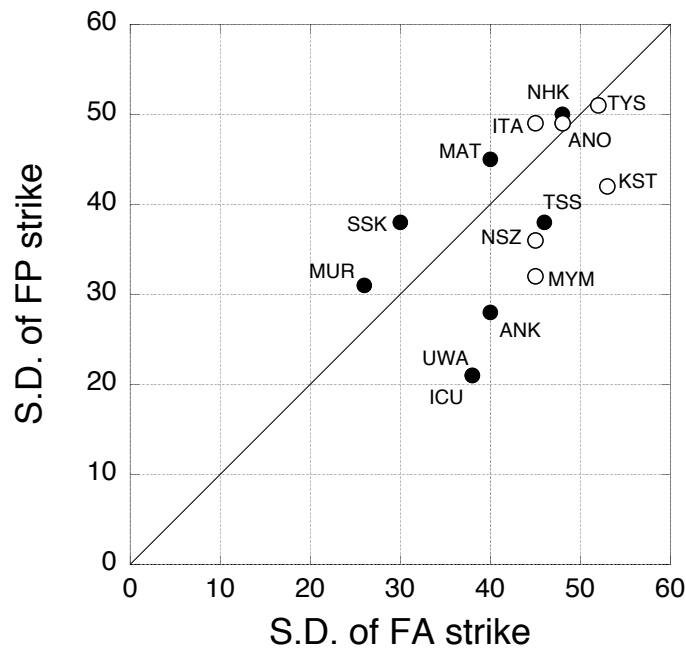
第 14 図. 亀裂の走向のローズダイアグラムの分布図. (a) 透水性亀裂. (b) 全亀裂. 各観測点の応力方位 (赤矢印) と地質構造の特徴的な方向 (青実線) も示す. (a) と (b) のローズダイアグラムの大きさは, それぞれの図のローズダイアグラムの最大数の平方根に比例している.

Fig. 14. Distribution map of the rose diagrams showing frequencies of the strike of the fractures at all sites. (a) Permeable fractures. (b) All fractures. Stress orientations (red arrow) and the characteristic orientations of the geological structure (blue solid line) are also shown at each site. The size of the rose diagram in (a) and (b) is proportional to the square root of the maximum number of rose diagrams in each figure, respectively.



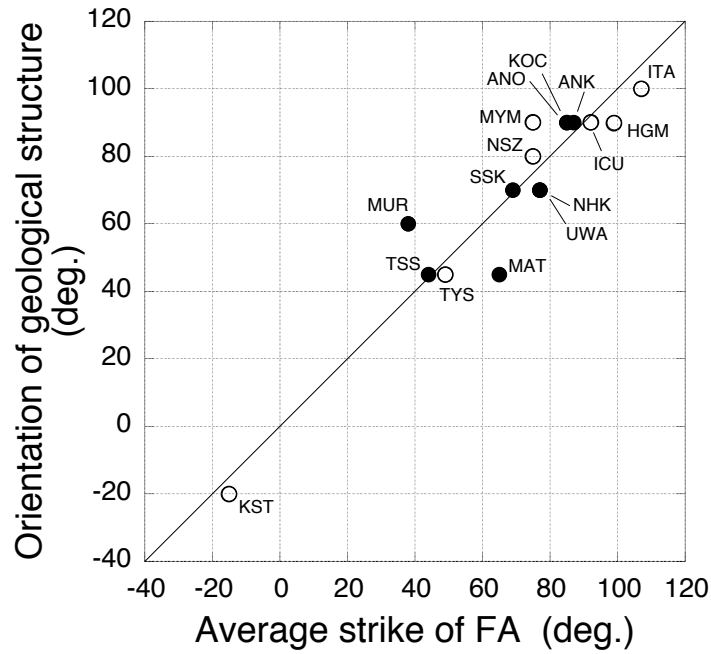
第 15 図. 各観測点の全亀裂 (FA) と透水性亀裂 (FP) の平均走向の相関図. 横軸と縦軸はそれぞれ, 全亀裂, 透水性亀裂の平均走向である. 方位は北から時計回りである. 黒丸は四国の観測点, 白丸は愛知県・紀伊半島の観測点を示す. 亀裂走向がバイモーダルな分布を示す観測点では, 平均走向の代わりに, 卓越頻度を示す 2 つの走向のうち相関を取る方向との対応が良い走向を用いた.

Fig. 15. Correlation diagram between the average strikes of all fractures (FA) and permeable ones (FP) of all sites. The horizontal and vertical axes are the average strikes of FA and FP, respectively. Orientation angle is clockwise from north. The black and white circles indicate the Shikoku and the Aichi · Kii sites, respectively. At the sites where the strikes have a bimodal distribution, one of the two strikes is chosen to plot to have a better correspondence between the vertical and horizontal axes, instead of using the average strikes.



第 16 図. 各観測点の全亀裂 (FA) と透水性亀裂 (FP) の走向の標準偏差の相関図. 横軸と縦軸はそれぞれ, 全亀裂, 透水性亀裂の走向の標準偏差である. 黒丸は四国の観測点, 白丸は愛知県・紀伊半島の観測点を示す.

Fig. 16. Correlation diagram between the standard deviations of the strikes of all fractures (FA) and permeable ones (FP) of all sites. The horizontal and vertical axes are the standard deviations of FA and FP, respectively. The black and white circles indicate the Shikoku and Aichi · Kii sites, respectively.



第 17 図. 各観測点の全亀裂 (FA) の平均走向と地質構造の特徴的な方向との相関図. 横軸と縦軸はそれぞれ, 全亀裂の平均走向, 地質構造の方向である. 黒丸は四国の観測点, 白丸は愛知県・紀伊半島の観測点を示す. 方位は北から時計回りである. 亀裂走向がバイモーダルな分布を示す観測点では, 平均走向の代わりに, 卓越頻度を示す 2 つの方向のうち地質構造の方向との対応が良い向きを用いた.

Fig. 17. Correlation diagram between the average strikes of all fractures (FA) and the characteristic orientation of the geological structure of all sites. The horizontal and vertical axes are the average strike of FA and the orientation of the geological structure, respectively. The black and white circles indicate the Shikoku and Aichi・Kii sites, respectively. Orientation angle is clockwise from north. At the sites where the strikes have a bimodal distribution, one of the two strikes is chosen to plot to have a better correspondence between the vertical and horizontal axes, instead of using the average strikes.