

産総研綾川千疋観測点における物理検層の概要と解析結果

Overview and results of geophysical loggings at two boreholes of AIST integrated groundwater observation station in Ayagawa Town, Kagawa Prefecture, southwestern Japan

木口 努¹・板場 智史¹・松本 則夫¹

KIGUCHI Tsutomu¹, ITABA Satoshi¹ and MATSUMOTO Norio¹

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

Abstract: We show an overview and analysis results of the geophysical loggings conducted at boreholes in Ayagawa-Sembiki observation station, which was constructed in Ayagawa Town, Kagawa Prefecture in FY2022, as part of the AIST integrated groundwater observation network for monitoring the Nankai Trough megathrust earthquake. Nine types of the loggings were carried out in two boreholes with depth up to 334 m. The main results from our analysis of the entire logging data at this station are as follows: 1) The P-wave velocities through sonic logging were higher than 5.0 km/s at most depths of around 60 m or deeper. When we compared them with the P-wave velocities obtained at the boreholes of the AIST seventeen observation stations, the largest P-wave velocity was observed at this station. 2) The depth intervals of relatively high permeability were identified by the comprehensive interpretation of sonic logging (Stoneley wave analysis, P-wave velocity), electrical logging, borehole image logging and other loggings. We determined the depth range of strainers for water level observation from the permeable intervals. 3) The frequency of the strikes of all fractures detected by the imaging tools were predominant in two different orientations, ENE-WSW and NNE-SSE, after applying the dip angle correction. These dominant orientations roughly correspond to the strikes of the active faults and the valley topography in the vicinity of the station.

キーワード: 物理検層, 孔壁画像検層, P波速度, 透水性, 亀裂, 地下水等総合観測点, 綾川町, 南海トラフ

Keyword: geophysical logging, borehole imaging tool, P-wave velocity, hydraulic conductivity, fracture, AIST integrated groundwater observation station, Ayagawa Town, Nankai Trough

1. はじめに

南海トラフ沿いではM8~9クラスの地震の今後30年以内の発生確率は70~80%とされている(地震調査研究推進本部・地震調査委員会, 2023)。産業技術総合研究所(産総研)は, 南海トラフ沿いで発生する地震の予測精度向上を目的として, 20観測点で構成される南海トラフ地震モニタリングのための地下水等総合観測ネットワークの構築を計画した(小泉, 2013; 松本, 2016)。2006年から2013年までに16観測点を整備し, 2021年度には日高川和佐観測点を整備した(北川ほか, 2023)。さらに, 2022年度には, 香川県綾川町地区に18番目の観測点として, 綾川千疋観測点を整備した。綾川千疋観測点では, これまでの観測点と同様に3つの鉛直孔井が掘削され, 孔1, 孔2, 孔3の掘削深度は, それぞれ, 334 m, 200 m, 30 mである。孔1の孔底付近には, 地殻のひずみと地震を観測するデジタル式地殻活動総合観測装置が埋設され, 孔2の孔底付近には地震・

傾斜観測装置が設置された。また, 3つの孔井内に水位計・水温計が設置された。

孔1と孔2の2つの孔井の各掘削段階において各種の物理検層を実施した。本観測点で物理検層を実施する主な目的は, これまでの観測点と同様に, 地下水位・地殻のひずみおよび地震・傾斜を観測する機器を適切に設置する深度を決定することである。

本原稿では, 観測点と地質の概要を説明した後, 孔1と孔2の2つの孔井で実施した物理検層について, 検層の種目や測定深度などの概要を整理した。その次に, 各種の物理検層による測定と解析の結果を示した。本原稿では, 実施した検層種目全体を網羅する基本的な解析を実施し, 本観測点の構造や物性に関する今後の詳細な解析や解釈の基礎となるデータを示すことを目的とした。解析として, 自然ガンマ線検層による岩相区分と孔井地質の対比, 温度検層・キャリパー検層・セメントボンド検層の結果を用いた孔内環境の情報取得, 電気検層と速度検層による花崗岩類中の比抵抗とP波速度の特徴の把

握などを行なった。また、水位観測用のストレーナ(スリットの入ったケーシング(孔井保護の鋼管))を設置する深度区間を決定するために、速度検層(ストーンレー波解析, P波速度)、電気検層、孔壁画像検層などの複数の検層結果を総合的に解釈し、相対的に高い透水性を有すると考えられる深度区間を求めた。さらに、孔壁画像検層により孔井を横切る亀裂を読み取り、亀裂の頻度について亀裂の傾斜角を用いた補正を適用し、全ての亀裂の卓越する走向と地質構造の特徴的な走向の対応、深度区間ごとの亀裂の卓越走向の変化、明瞭度などからランク分けした亀裂の向きの特徴などについて解析した結果を取りまとめた。

2. 綾川千疋観測点の概要

綾川千疋観測点の位置を第1図の地質図上に赤丸で示し、本観測点の3つの孔井の深度、緯度・経度(世界測地系)と標高を第1表に示す。また、第1図内で示した本観測点およびそれ以前に整備した17観測点について、名称、緯度・経度、標高と主な孔井地質を第2表にまとめる。孔井掘削を含む本観測点の整備工事は、2022年8月18日に現地作業を開始し、2023年3月25日に完了した。3つの掘削孔井、孔井内の観測機器、および地上に建設した観測建屋などからなる本観測点の概要を第2図に示す。ひずみ・地震・傾斜・地下水位などの観測データは、観測建屋内の通信サーバを経由してLTE回線をつくば市の産総研に送られる。

3. 地質概要

本観測点は、高松市と綾川町にまたがるさぬき空港公園の敷地内に位置する。さぬき空港公園に隣接して高松空港があり、観測点を含む空港周辺は、標高200m前後のなだらかな丘陵地の地形であり、およそ南北走向系の谷地形が卓越している。観測点の北側約1.5kmには東西走向で南側隆起の逆断層の長尾断層の西端がある(杉山ほか, 2001)。また、観測点の南側約1kmにおよそ東北東-西南西の走向の鮎滝断層があり、断層露頭の観察などから北上がりの逆断層で右横ずれ成分を持つと考えられる(小林ほか, 1986)。

本観測点の周辺は、礫質な扇状地堆積物である三豊層群焼尾層が覆っており、その数十m下に後期白亜紀花崗岩類の1つである白鳥花崗岩が基盤となっている(植木, 2001)。この花崗岩類は讃岐山脈北側に分布する丘陵地帯を構成する岩体であり、分布域内で多少の岩相変化をとまなうものの花崗岩~花崗閃緑岩の範囲で均質な岩相をなすと考えられる(平山, 1953)。

孔1は、地表から313.6mまではノンコアで掘削し、313.6~333.6mの区間ではPQサイズ(掘削ビット径

123mm)のコア掘削により、外径約85mmのコアを回収している。孔1の孔井地質の概要について、313.6mまではカッティングス、313.6~333.6mはコアの観察によって第3表のように整理できる。深度約60m以深の多くは風化や変質のない花崗岩・花崗閃緑岩・閃緑岩と考えられ、ひん岩の貫入が推定される深度もある。313.6m以深についてはコア観察から、約2m区間の花崗岩の岩脈以外は、未風化非変質の新鮮硬質な花崗閃緑岩または閃緑岩であった。孔1のコア写真を第3図に示す。孔2と孔3ではコア掘削がなく、カッティングスの回収を行った。

4. 物理検層の種目

本観測点では、孔1と孔2の2つの孔井において、それぞれの掘削段階に応じて必要となる物理検層の種目を選択し、合計9種類の検層を実施した。実施した検層種目、測定深度、掘削径、測定日をまとめて第4表に示す。地下水等総合観測点で物理検層を実施する主な目的は、第1章で説明したように観測機器を適切に設置する深度を決定することなので、岩盤の強度や均質性、透水性などを評価するための速度検層(音波検層)、電気検層や孔壁画像検層などの種目が含まれる。また、観測機器を設置する深度付近の温度環境を把握するための温度検層、孔井を適切に仕上げるために孔井環境の情報を得るためのキャリパー検層やセメントボンド検層なども実施した。日高川和佐観測点での検層種目と比べると、核磁気共鳴検層、密度検層、電気伝導度検層が含まれておらず、S波速度の測定も行われなかった。日高川和佐観測点の物理検層の種目や解析結果などについては、木口ほか(2023)が取りまとめている。また、日高川和佐観測点よりも以前に整備した16観測点で実施した物理検層の結果は、木口ほか(2014)に示されている。

本観測点で使用した物理検層の孔内ツールや地上装置などの機器一式は日高川和佐観測点で使用したツールと同様である。日高川和佐観測点の使用機器は木口ほか(2023)がまとめているので参照されたい。実施した物理検層の各種目の原理や測定方法などについても、木口ほか(2023)が説明しているので本原稿では省略する。

5. 解析結果

孔1と孔2の裸孔で実施した全ての検層結果を統合して表示した物理検層総合柱状図を第4図に示す。第5図は孔1の総合柱状図のうち200~334mの深度区間を拡大表示した図であり、また、孔2の総合柱状図を第6図に示す。

孔1と孔2で得られた各種の物理検層のデータを用いた解析結果を次節以降に説明する。5.1から5.4節は、個々の検層データを用いて、岩相区分や孔内

環境（温度・孔径・セメント膠着）、比抵抗や速度の特徴などについての結果であり、5.5節では複数の検層結果を総合的に解釈し相対的に高い透水性を有する深度区間を求めた。5.6節は、孔壁画像検層から求めた地下亀裂の向きや頻度の特徴についてまとめた。

5.1 自然ガンマ線検層による岩相区分

一般に岩石には天然放射性元素が含まれ、それらの崩壊に伴い自然ガンマ線が放射される。岩石の種類により天然放射性元素の種類や存在量が異なるので、自然ガンマ線検層で測定するガンマ線の強度やその変化を用いて岩相の対比や同定などが可能となる。孔1のCuttingsやコアから推定した孔井地質と比較し、自然ガンマ線検層を用いた孔1の岩層区分について検討した。ただし、Cuttingsによる314 m以浅の孔井地質の深度分解能は10 m程度と考えられるため、それよりも詳細に検層結果と比べることは困難である。孔1で測定した自然ガンマ線検層のデータとCuttings・コアから推定した孔井地質の対比を第7図に示す。測定時に孔1は200 mまでケーシングを挿入し、200 m以深が裸孔であった。

約40 m以深の観測点の孔井地質はCuttingsなどから花崗岩類と推測された。花崗岩類では一般的に塩基性になるほどガンマ線強度が低くなるため、花崗岩は相対的に高い自然ガンマ線の値を示し、花崗閃緑岩・閃緑岩・ひん岩は相対的に低い値となる傾向がある。深度約60～180 mの区間でガンマ線は40～45 API程度のほぼ一定の値を示していることから、この区間は岩相の変化が少ないと考えられる。これは、風化や変質がほとんどない花崗岩がこの区間に連続して分布するとしたCuttingsの観察による結果と整合する。

180 m以深は、顕著なガンマ線強度の変化が見られるいくつかの深度区間に分けることができる。このうち200 m付近にステップ状の変化が見られるが、200 mはケーシングの下端でありまた孔径も変わるため、ステップ状の変化はこのような孔内状況の違いによる影響が大きいと考えられる。自然ガンマ線はケーシングがあっても測定できるが、同一地層内でもケーシングの有無によって測定の絶対値が変化する可能性があるため、本原稿では200 m付近の変化を岩相区分の検討の対象としなかった。相対的に低い値（20～35 API程度）を示すのは、189～192 m、220～224 m、228～249 m、275～276 m、282～308 m、314～317 m、322～330 mなどの区間である。これらの深度にはひん岩や花崗閃緑岩の分布が推測でき、Cuttingsやコア観察による地質区分の結果と調和的である。一方、卓越して高い値を示す249～261 mと317～319 mの区間は、孔井地質と比較すると、高い自然ガンマ線を示す傾向と考えられる、わずかに風化した花崗岩と変質した花崗岩の岩脈の深

度にほぼ対応する。以上から、ガンマ線強度の深度方向の変化から推測できる岩相区分とCuttings・コアの観察による孔井地質とはおおよそ整合的であった。ただし、深度210～250 mの区間は、Cuttingsからひん岩の分布を推定したが、自然ガンマ線が相対的に高い値（50 API以上程度）を示す210～220 m、225～228 mの区間が含まれていることから、40 mの区間に均一にひん岩が分布するのではなく、ひん岩以外の花崗岩などが含まれている可能性がある。

5.2 物理検層による孔内環境の把握

5.2.1 温度検層の結果

第8図に孔1と孔2の温度検層の結果を重ねて表示する。孔1と孔2とともに、それぞれの一連の検層実施の初日の最初と検層実施の最終日の最初に2回繰り返して測定した。温度検層を測定日の最初に実施する理由は、他の検層ツールの孔内操作により孔内水の温度の擾乱が生じる前に測定するためである。また、1回目の測定の2日以上前に孔内作業を停止し孔井を静置した。孔1は地表から200 mまでケーシングを挿入していたので、測定時の裸孔区間は200～314 mである。孔2の測定時には34 mまでケーシングを挿入していた。

孔1の200 m以深において、温度勾配が少し変化する変曲点が見られる。213 mと252 mの付近に見られる。このような変曲点を示す深度では、湧水や逸水の可能性が考えられる。しかし、これらの深度では他の検層（速度、電気、キャリパーなど）では顕著な変化が示されず、また孔壁画像において明瞭な亀裂が存在しないなど、他のデータからこの深度で地層水が出入りしていることを示唆する明確な根拠がなく、温度勾配が変化する原因は不明である。測定時の孔底（314 m）の温度は約18.8℃であり、200 mと孔底の間の平均温度勾配は、約1.6℃/100 mである。

孔2では、2回目に測定した温度（第8図の緑線）が全深度で1回目（同図の青線）よりもやや低くなる変化を示すので、検層実施前に孔内に注水した泥水の温度が地層の温度よりも高かったのかもしれない。2回目の測定で、112 mと127 m付近に温度勾配の変曲点が見られる。このうち127 m付近は、5.5節で後述するように、他の検層により、ストンレー波の減衰と反射の特徴や低比抵抗・低速度の変化などが見られるため、この深度付近に透水性亀裂や透水ゾーンが存在すると思われる。透水性亀裂などが存在する場合には、この変曲点の浅部側の深度区間（約113～127 m）で温度がほぼ一定となる特徴は、127 mから地層よりも温度の高い地層水が湧水して孔内を上昇するときの温度変化として説明できるかもしれない。孔2の2回目測定の孔底の温度は、約17.6℃である。深度200 mまで孔1はケーシングが挿入され、孔2は裸孔という違いがあるが、200 mまでの孔1

と孔2の温度を比べると、深度約80m以深で孔2の方が0.6~1.0℃程度高く、80m以浅では温度差はそれよりも大きい。検層前に孔内に注水した泥水の温度の違いによる影響の可能性が考えられるが、孔2の方が高い温度を示す原因は明らかでない。

5.2.2 キャリパー検層の結果

孔内ツールのアームを孔壁に接触させて孔径を連続して測定するキャリパー検層から求めた孔1と孔2の孔径値(直径)を第9図(a)~(d)にまとめて示す。孔1では3回の掘削段階の32~201m, 201~314m, 314~334mに分けて実施した。各測定で使用したツールの違いのために、孔1の201~314mの区間と孔2では3方向の孔径を測定し、それ以外では2方向で測定した。図では各方向の孔径値を色分けして示す。また、掘削に使用したビットサイズを図中に黒線で記入した。(a)~(d)の各図の縦軸と横軸のスケールが異なることに注意されたい。

(a)図に示す孔1の浅部の50~60m付近までは、砂岩礫や風化花崗岩の地質に対応して孔径が大きく拡大している。(b)図の孔1の200m以深において、新たなビットサイズ(279mm)で掘削を始めた200~210mで孔径が大きくなっており、またそれ以深では279~280m, 283m付近で急激な孔径拡大が見られる。(c)図の314m以深の測定では顕著な孔径拡大は見られず、孔径は概ねビットサイズ程度で安定している。デジタル式地殻活動総合観測装置を設置した深度区間(321~328m)でも孔径の変化がほとんど見られないことから、この区間では開口性の亀裂や破碎帯が存在しない岩盤であると推測できる。

(d)図の孔2において、浅部の約60m以浅は(a)図の孔1と同じように大きく孔径が拡大している。それ以深で、孔径はビットサイズ程度で概ね安定しているが、103m, 127m, 140m付近では急激な孔径拡大が見られる。これらの深度に開口幅の大きい亀裂や破碎帯の存在が示唆される。

5.2.3 セメントボンド検層の結果

セメントボンド検層は、ケーシングと地層の間に注入したセメントの硬化・膠着の状況を深度方向に連続的に評価するために実施する。速度検層と同様な音波の測定を行い、音波の減衰や走時などの結果からセメンチングの状況を判断する。

セメントボンド検層の例として、孔1の結果を第10図に示す。第10図では、左の列から順に、ケーシングの設置深度、深度、受振波形の走時、振幅、VDL表示(Variable Density Log)およびセメント膠着度をそれぞれ示す。VDLは波形の振幅強度をグレーの濃淡で表示しており、濃いほど振幅値が大きいことを意味し、また横軸は時間である。孔1のストレーナは深度274.2~284.4mに設置しており、ストレーナ区間を含む268.0~291.8mに砂利を、263.0

~268.0mの区間に遮水用の粘土をそれぞれ入れている。砂利と粘土の区間(263.0~291.8m)はセメンチングをしていないため、この深度区間は地層と膠着していないケーシングを伝播する音波の減衰が小さくなり、図に示す振幅は約20~30mV程度と相対的に大きな値となっている。この区間の前後のセメンチングをした深度では振幅が数mV程度と小さい。VDLの波形でも砂利と粘土の区間で大きな振幅が認められ、これは膠着していないケーシングからの反射波を示すと考えられる。なお、砂利区間のうちストレーナを設置した深度では、振幅が10mV以下程度と小さい。

セメンチングをした深度は全体として、振幅が非常に小さく、VDLの色調も薄く反射波の振幅が小さいことが図から確認でき、伝播する音波が大きく減衰していることから、ケーシング・セメント・地層がほぼ一体となって固着していると推定できる。この結果から膠着度は非常に良好と評価した。ただし、107~126mの約20m区間は振幅値が20mV程度と少し大きい値となり、またVDLでケーシングからの反射波も確認できるために、セメントの膠着度はやや良好と判定した。

5.3 電気検層による比抵抗の特徴

地層に電流を流してその比抵抗を測定した電気検層の結果を第11図に示す。図では、深度200m以浅は孔2で、200m以深は孔1でそれぞれ測定した結果を合わせて示している。また、孔井内の電極間隔をそれぞれ、25cmと100cmとするショートノルマル比抵抗(SN)とロングノルマル比抵抗(LN)の2種類の結果を色分けして示す。LNはSNに比べると、探査深度が深くなり孔壁からより離れた地層の比抵抗値を得られるが、一般に深度方向の分解能は低下する。図を見ると、全深度でLNの方がSNに比べて大きい比抵抗値を示すが、深度方向の比抵抗値の変化のパターン(比抵抗が増減する深度や増減の振幅)はほぼ同じであることがわかる。このLNとSNが同じパターンで変化する特徴は、日高川和佐観測点の電気検層でも同様に見られた(木口ほか, 2023)。

浅部のおよそ30~60mの範囲は、比抵抗が低い値から高い値へ単調に遷移する特徴があり、カッティングスから推測される砂岩礫や風化花崗岩の地層の深度と対応している。60mに近くなるに従い比抵抗が高くなる変化は、風化花崗岩が徐々に新鮮な花崗岩に変化することを示すと考えられる。

約60m以深は、LNでは1,000Ω・m以上を示す全体的に高い比抵抗値を保ちながら、深くなるに従い比抵抗がやや大きくなる傾向が見られ、新鮮な花崗岩類が連続して存在すると推定できる。局所的に低比抵抗の変化を示す深度が314mまでいくつかある。例えば、79m, 103m, 127m, 134m, 142m,

167 m, 174 m, 222 m, 234 m, 245 m, 257 m, 278 m, 308 m の付近である。これらの低比抵抗の深度では、破碎帯や透水性亀裂、透水ゾーンなどが存在する可能性がある。200 m 以浅（孔 2）と以深（孔 1）の 2 つの範囲で、最も顕著な低比抵抗の変化を示すのは、それぞれ、127 m と 278 m 付近である。

5.4 速度検層による P 波速度の特徴

5.4.1 本観測点の P 波速度

速度検層によって得られた本観測点の P 波速度の特徴についてまとめる。孔 1 と孔 2 で得られたデータを合わせた深度 34~334 m の P 波速度を第 12 図に示す。図中に、深度 50 m 区間ごとに求めた平均値を黒破線で記入した。

50 m 以浅の浅部では 2~3 km/s 程度の低速度であり、カッティングスなどから推測した砂岩礫や風化花崗岩に対応した速度と考える。50 m より深くなると急激に速度が大きくなり、約 60 m で 5.0 km/s 以上となる。50~60 m までの 10 m 区間で風化花崗岩から新鮮な花崗岩に変化したことが推測できる。60 m 以深のほとんどの深度で、速度は 5.0 km/s 以上を示す高速度であり、未風化非変質の花崗岩類がおおよそ連続していると考えられる。約 283~303 m の 20 m 区間などいくつかの深度では 6.0 km/s 以上の大きい速度を示す。ただし、短い区間でパルス状に 5.0 km/s よりも小さい値を示す深度があり、これらには開口幅の大きい亀裂や破碎帯などが存在する可能性がある。50 m 以深において 50 m 区間の P 波平均速度は 5.3~5.8 km/s であり、最も大きい平均速度を示す深度は 250~300 m の区間である。コアと対比すると、314 m 以深で新鮮硬質の花崗閃緑岩または閃緑岩が存在する深度は、5.5 km/s 以上の高速度を示し、5.0 km/s 以下の相対的に低い速度を示す約 318~319 m の区間は亀裂の多い変質した花崗岩の岩脈に対応する。

5.4.2 これまで整備した観測点の P 波速度との比較

本観測点で大きい P 波速度が得られたので、本観測点より以前に整備した第 2 表に示す 17 の観測点において得られた P 波速度（木口ほか, 2014; 木口ほか, 2023）と比較した。第 13 図と第 14 図に、それぞれ、愛知県・紀伊半島の 9 観測点、四国の 9 観測点（本観測点を含む）の P 波速度の 50 m 区間の平均値を重ねて表示した。観測点の速度検層の結果を重ねて表示するとき各観測点の原データを使用すると、他の観測点のデータとの重なりが多くなり各観測点の速度を比較することが困難になるため、50 m 区間の平均値を使用した。また、本観測点と同様な孔井地質における速度の特徴を確認するために、花崗岩あるいはそれに類する深成岩を孔井地質に含む観測点として、本観測点を含めた 9 観測点（AYS, TYS, ANO, ITA, MYM, ICU, NHK, TSS, MAT）の P

波速度の区間平均値を第 15 図に表示する。第 14 図と第 15 図で、本観測点のデータは AYS の名称で示す黒線である。

第 13 図~第 15 図を見ると、18 の観測点全体の傾向として、深部に比べて浅部の方が低速度であり、浅部では観測点による速度のばらつきが大きいことがわかる。このばらつきが大きい理由として、地層の低い固結度や風化などが原因となる低速度の変化は観測点ごとの浅部の地質に大きく依存することが考えられる。また、必ずしも深くなるに従い速度が単調に大きくなるのではなく、およそ 200 m 以深で速度が大きく増加しない観測点も見られる。ある観測点の深部の区間速度が浅部の区間と比べて低下する場合があるが、これは深部側の区間に破碎帯などの低速度ゾーンが含まれることが原因の 1 つと思われる。観測点全体で最深部の 550~600 m 区間の平均速度は、4.5~5.4 km/s の範囲である。この深度区間では観測点や孔井地質によらず大きい P 波速度が得られていることがわかり、ひずみ計の設置・観測に適した堅固な岩盤であると推測できる。愛知県・紀伊半島と四国の 2 地域に観測点を分けた場合、50 m 以浅の平均速度が 3.0 km/s 以下の低速度を示す観測点が四国に 3 点あり、愛知県・紀伊半島にはないという違いがあるが、それ以外には、2 つの地域で P 波速度に顕著に異なる傾向は見られない。

本観測点の P 波速度を他の観測点と比較すると、50 m 以深の区間速度について、200~250 m 区間の速度は NHK 観測点に次いで 2 番目であるが、それ以外の深度では全観測点で最も大きい値である。従って、本観測点は掘削深度が 334 m と他の観測点よりも浅いが、18 観測点の中で最も大きい P 波速度を示す観測点と言える。第 15 図から、花崗岩類を孔井地質に含む観測点では区間速度が 5.0 km/s 以上の高速度となる深度が多く見られるが、他の観測点と比べると、全体的に本観測点の花崗岩や花崗閃緑岩が最も大きい速度を示すと思われる。本観測点では低い速度を示す 50 m 以浅の区間も含めた全深度の P 波の平均速度が大きい上位 5 観測点は、第 15 図に示す花崗岩類を含む孔井地質の NHK, MYM, TSS, AYS, TYS である。本観測点の次に大きい速度を示すのは NHK 観測点と考えられ、50 m 区間の平均速度は 100 m 以深で全て 5.0 km/s 以上であり、5.7 km/s を示す深度区間もある。

5.5 物理検層データを用いたストレーナ設置深度の決定

5.5.1 これまで整備した観測点における透水性評価手法

孔井を掘削し物理検層を実施した後に孔井を保護するケーシングを挿入するが、地下水位の観測のため、地層水が孔井内に入り出できるようにケーシングの一部をストレーナに置き換える必要がある。ス

トレーナを設置する深度の地層には孔井全体の中で相対的に高い透水性があることが求められる。孔井内の透水性を評価する手法として、これまでに整備した観測点では以下の孔井内測定を実施している。2006～2013年に整備した16の観測点では、電気伝導度検層、ハイドロフォンVSP、速度検層(ストンレー波解析)の3つの手法を適用した(木口・桑原, 2021b)。これら手法の位置付けとして、電気伝導度検層は原則として全ての観測点での実施を予定した基本的な手法であり、ハイドロフォンVSPと速度検層のストンレー波解析は限られた観測点のみで補完的に実施した。また、日高川和佐観測点では、核磁気共鳴検層と電気伝導度検層を実施し、ストンレー波の解析結果も参照した(木口ほか, 2023)。

5.5.2 本観測点で使用した検層データ

本観測点では、これまでの観測点と異なり、地層水の流れそのものの計測が可能な電気伝導度検層や地層中の可動流体の分布を測定する核磁気共鳴検層などの透水性評価のための基本的な手法を実施しないので、透水性を直接評価することが困難である。このため、これまでの観測点で透水性評価に使用したことのある速度検層のストンレー波解析に加えて、開口性の亀裂や透水ゾーン、水みちなどが存在する場合に変化の検出が可能となる検層として、電気検層、速度検層(P波速度)、孔壁画像検層、キャリパー検層、温度検層に注目し、これらの検層結果を総合的に解釈し、相対的に高い透水性を有する深度区間を求める方針とした。

5.5.3 孔1のストレーナ区間の決定

孔1のストレーナ区間の決定に用いた検層データとして、まず、速度検層から得られたストンレー波を対象とする波形と周波数スペクトルを第16図に示す。孔井内を伝播する境界波のストンレー波は、木口・桑原(2021b)が説明するように、孔井を横切る透水性亀裂や透水ゾーンが存在する深度で、反射・減衰・速度低下などの特徴的な変化を示すので、これらの変化を示す波形を用いて、透水性亀裂や透水ゾーンの深度を求めることができる。ただし、透水性とは関係のない、岩盤の弾性定数が変化する境界や孔径が変化する深度などでもストンレー波は同様な波形変化を示す可能性があることに注意する必要がある。第16図のストンレー波の波形では283m付近から明瞭なV字型のパターンを示す反射波が発生しており、また同じ深度付近で周波数スペクトルは減衰を意味する赤紫色を示す。図中の周波数スペクトルのカラー表示は、各深度における波形の周波数ごとの振幅を横軸方向に示す。この深度以外では200～210m付近に強い反射波が見られるが、これらはケーシングの下端やその直下の孔径拡大の変化の影響で発生している可能性が考えられる。次に、第11図の電気検層

の比抵抗の結果では、275～285m付近で低比抵抗の最も大きな変化を示しており、この区間に破碎帯や透水性亀裂が存在したり孔井近傍に地層水が相対的に多く存在する可能性がある。また、278～280mと283m付近で、速度検層による低速度(第12図)とキャリパー検層による孔径の拡大(第9図(b))が認められ、開口性の亀裂や破碎帯が存在する可能性が示唆された。以上から、275～285m付近を対象として比抵抗式孔壁画像検層(XRMI検層)による孔壁画像を確認すると、276.3m、276.8m、280.0m、282.9mの深度に明瞭な亀裂(亀裂明瞭度のランク2、緑色)が存在し、その他にも多くの亀裂(ランク3、青色)が分布することがわかった(第17図)。亀裂のランクの分類については、5.6.1節で説明する。第17図の孔壁画像中の白抜き部分は、検層ツールの電極が孔壁をカバーできずイメージングされなかった範囲を意味する。これらの亀裂がストンレー波の変化や低比抵抗などの特徴を示す原因となり、相対的に高い透水性を有する可能性があると考えた。なお、温度検層では、275～285m付近で温度勾配の変化は見られなかった。また、孔1では200～314mの区間でエアハンマー式での掘削を行ったので、回転式掘削における泥水タンクの水位管理から得られるような詳細な湧水・逸水の情報を把握できなかったが、280～285m付近の掘削時に湧水が顕著に増加した(約140L/分)ことから、この深度付近で透水性が高い亀裂が存在することが掘削時のデータからも期待できる。湧水量は、掘削中に圧縮空気により孔内水を地上に排水した水量から推定した。以上の結果により、275～283m付近を水位観測に適した深度と考え、この深度を含むように、ストレーナの深度区間を274.2～284.4mと決定した。なお、ストレーナの設置深度には、孔井内に孔底付近から約5.4m長のケーシングを順に挿入するときの継ぎ目の深度とする制約がある。ストレーナの前後の深度も含めてセメントの代わりに砂利を充填したので、地層水を集水できる範囲は砂利充填区間の268.0～291.8mとなる。

5.5.4 孔2のストレーナ区間の決定

孔2について、ストンレー波の波形と周波数スペクトル(第18図)から、103m付近の明瞭な反射波・減衰、127～128m付近の明瞭な減衰・走時遅れと弱い反射波、139～140m付近の弱い反射波・減衰、173m付近の弱い反射波・減衰などの特徴を示す深度が高い透水性を有する深度の候補として考えられた。これら深度を中心として電気検層による比抵抗の結果を確認すると、127～128m付近が最も顕著な低比抵抗の変化を示すことがわかり、この低比抵抗の傾向は134m付近まで続いているように見える(第11図)。この深度付近は、速度検層による低速度(第12図)とキャリパー検層による孔径の拡大(第9図

(d)も認められる。孔壁画像では、127~134 m の区間に複数の亀裂が存在する(第19図)。また、5.2.1節で説明したように、127 m 付近には2回目の温度検層による温度勾配の変曲点があり、この温度変化は127 m 付近から地層水が湧水することで説明できるかもしれない。ストレーナ波の反射波を示す103 m 付近でも明瞭な亀裂が存在することが孔壁画像から確認できたが、孔2のエアハンマー式掘削時に、118~127 m 区間で著しく湧水量が増加した(約230 L/分) ことなども併せて検討した結果、127~128 m 付近が相対的に高い透水性を有し水位観測に最も適した深度と考えた。この深度を含むように、ストレーナの深度区間を125.0~135.2 m と決定した。砂利充填区間は119.6~141.5 m である。なお、孔壁画像の例として示した第17図と第19図では、最も明瞭な亀裂として分類したランク1の亀裂(赤色)が含まれていないため、3つの全てのランクの亀裂を含む孔2の深度115~120 m の区間の孔壁画像を第20図に示す。

孔1と孔2は、ストレーナ設置後に孔内洗浄を行うためにストレーナ区間に水中ポンプを降下して連続揚水を行った。孔1と孔2において、それぞれ、揚水量12.6 L/分で3日間、揚水量16.0 L/分で6日間、平衡水位を保ちながら揚水を継続できた。連続揚水量からストレーナ区間の透水性を評価することは難しいが、上記の揚水量で連続揚水が可能となるだけの地層水がストレーナ区間の地層に存在すると言える。なお、日高川和佐観測点での揚水試験の揚水量は0.1~1.0 L/分程度と本観測点よりも1~2桁少なく、揚水試験から予備的に得られた透水量係数は約 $1\sim 3\times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ と低透水性を示唆する低い値であった(木口ほか, 2023)。

5.6 孔壁画像から読み取った亀裂の向き・頻度の特徴

5.6.1 孔壁画像検層による亀裂の読み取り

本観測点では、孔壁画像検層として、孔1の201~314 m 区間と孔2(34~200 m)では比抵抗式孔壁画像検層(XRMI 検層)を、孔1の314~334 m 区間ではBHTV(ボアホールテレビュア, 超音波式)をそれぞれ使用した。2種類の検層を使用した理由は掘削径の違いである。孔1の314~334 m 区間の掘削径は123 mm であるために、ツール外径が127 mm のXRMI 検層は適用できず、小孔径の孔井で使用可能なBHTVを使用した。一方、孔1の201~314 m 区間と孔2の掘削径は、それぞれ279 mm と270 mm であり、これらの大きい孔径では、BHTVの超音波がツールと孔壁間の孔内水中で減衰し高い品質のデータが取得できない可能性があるため、153~533 mm の掘削径で適用できるXRMI 検層を使用した。

XRMI 検層とBHTVのそれぞれから取得した孔壁

画像から不連続面を読み取った。孔井を横切る傾斜した平面の不連続面は、孔壁画像ではサインカーブの形状で表示されるので、サインカーブの形状を孔壁画像から読み取り、その形状から不連続面の向きを示す傾斜方位と傾斜角を求めた。一般的に、孔壁画像上の不連続面は、亀裂または地層境界に分類できるが、本観測点では、約40 m 以深は花崗岩類が連続することと約40 m 付近の砂岩礫層と花崗岩の地層境界を示す不連続面が見られないことから、本観測点で読み取った不連続面は全て、孔井を横切る亀裂とした。なお、孔1と孔2で孔壁画像検層の測定深度区間は重複しておらず、200 m 以浅は孔2、201 m 以深は孔1の画像をそれぞれ用いて亀裂を読み取った。

本観測点では、ほぼ全深度で様々な走向と傾斜角を示す亀裂が存在し、また亀裂の幅や形状の連続性などにおいても色々な特徴が見られる。孔壁画像から読み取った亀裂について、目視により、亀裂形状の明瞭性や開口幅を基準として、次の3つのランクに分類した。形状が明瞭で開口幅が大きい場合にはランク1(赤色)、ランク1と比べると形状の質がやや劣るか開口幅がやや小さいがランク1に準じる明瞭さがある場合にはランク2(緑色)、小さい開口幅・不明瞭な形状・形状の欠損などが認められる亀裂はランク3(青色)とした。XRMI 検層による孔壁画像と亀裂の例は5.5節の第17図、第19図と第20図に示した。BHTVの孔壁画像の例を第21図に示す。また、参考のため、孔1と2で取得した全ての孔壁画像と亀裂の読み取りの結果の縮小図を付図1に示す。ランクによる色分けは、後述の第22図などでも使用する。孔1と孔2を合わせた亀裂の総数は、577個である。このうち、ランク1は12個、ランク2は55個であった。

5.6.2 亀裂の傾斜角を用いた亀裂頻度の補正

本観測点で求めた亀裂の分布や亀裂の走向・傾斜角の頻度などの特徴を統計的に解析するため、本原稿では、個々の亀裂面の法線が孔軸(鉛直方向)となす角度、つまり傾斜角を用いて、亀裂の頻度に幾何学的な重み付けをする補正を行った。この補正は、亀裂の傾斜角が大きくなるに従い、亀裂が孔井と遭遇する確率が低くなり、傾斜角が90度の亀裂は孔井と平行となり孔井で亀裂を確認できないこと(遭遇確率がゼロ)を考慮したものである。亀裂の頻度を統計的に解析するには、亀裂の傾斜角を用いた補正が重要であることは以前より指摘されている(例えば、Hudson and Priest, 1983; Barton and Zoback, 1992)。Terzaghi(1965)は、傾斜角 α を持つ亀裂面に対して、もし亀裂面に垂直に孔井が掘削された場合に遭遇する亀裂の数を予想するために、 $1/\cos\alpha$ の補正を適用することを提案しており、この補正は広く用いられている。この補正を適用すると、傾斜角 α の亀裂1

個は、 $1/\cos\alpha$ の頻度（個数）と見なされる。しかし、亀裂が孔井と平行に近くなる（傾斜角 α が90度に近くなる）と、 $1/\cos\alpha$ による補正值が大きくなり過大に補正される問題点が指摘されている（例えば、Yow, 1987; Davy *et al.*, 2006）。傾斜角が大きくなる場合の補正に関して、Meller *et al.* (2012)は、亀裂情報を得る区間長と地質ユニットの最大層厚との比を用いることから、 $1/\cos\alpha$ の補正を適用できる傾斜角 α の上限を約84度とした。

本観測点では、傾斜角が大きい亀裂として、80度以上が4個、Meller *et al.* (2012)が補正の適用上限とした84度以上が1個であり、全体の亀裂数に比べると高角の亀裂はごく少数であると言える。従って、 $1/\cos\alpha$ を用いた補正において、過大な補正となる可能性のある高角の亀裂が亀裂全体の頻度の結果に与える影響は小さいと考えたので、本原稿では $1/\cos\alpha$ の補正を全ての亀裂に適用することとした。ただし、86度の傾斜角の亀裂1個（深度319.8 m）については、Meller *et al.* (2012)の結果を参考として、傾斜角を84度とした場合の補正值（9.57）を用いた。

また、亀裂が高角になると、亀裂が孔井を横切って存在する深度の範囲、つまり第17図などに示す亀裂形状のサインカーブが存在する深度範囲が長くなる。例えば、孔径279 mmの孔井で傾斜角80度の亀裂が存在する深度範囲は約1.6 mである。そのため、高角の亀裂の深度方向の頻度を表す場合には、各亀裂が孔井で存在する深度範囲にその頻度を分配するなどの処理を行うことにより、深度方向の頻度分布の誤差を少なくする対応が可能となると考えられる。しかし、本原稿ではそのような処理を行わず、各亀裂の中心の深度でその頻度を代表した場合の議論に留める。

5.6.3 亀裂の向き・頻度の特徴

全ての亀裂を対象とした向きなどの特性の深度方向の分布図を第22図にまとめた。第22図は、左から、5 m間隔の亀裂頻度、亀裂の傾斜角、走向、亀裂面の法線方向の下半球面への等積投影のコンター図、および亀裂走向のローズダイアグラム（10度間隔）を示す。亀裂の頻度、傾斜角と走向の分布は、3種類の亀裂ランク別に色分けして示す。コンター図とローズダイアグラムは、50 m区間を基本として、39～100 m, 100～150 m, 150～200 m, 200～250 m, 250～300 m, 300～334 mの6深度区間に分けて表示する。また、全ての亀裂およびランク1と2の亀裂をそれぞれ対象として、亀裂面の法線方向の下半球面への等積投影図、そのコンター図と走向のローズダイアグラムを第23図と第24図にまとめた。さらに、第25図に、全ての亀裂およびランク1と2の亀裂について、それぞれの走向と傾斜角の頻度分布を示す。この図の縦軸は、各亀裂の頻度の亀裂頻度総数に対する割合(%)である。第22～25図のうち、傾斜角と

走向の深度方向の分布図（第22図）、亀裂面の等積投影図およびコンター図（第22図、第23と24図の(a), (b))は傾斜角による補正を適用しない原データの結果であり、それ以外の図は補正を適用した結果である。付図2～5に、亀裂頻度、ローズダイアグラムおよび走向と傾斜角の頻度分布について、傾斜角による補正を適用する前後を比較した結果を参考のために示す。付図を見ると、傾斜角の頻度（付図5の(b))において補正の適用により高角の頻度が大きくなるのは当然の結果であるが、それ以外の頻度や走向に見られる特徴や傾向は補正の適用前後で大きく変わらないように思われる。

まず、第22図の全ての亀裂の頻度について確認すると、深度全体の平均は15.8個/5 mである。顕著に頻度が大きい315～320 m区間を除くと、亀裂頻度は深度によって5～25個/5 m程度の範囲で変化する。カッティングスによる孔井地質の深度分解能が高くないため、亀裂頻度の深度方向の変化を地質区分によって詳細に検討することは難しく、亀裂頻度が深度により変化する原因は明らかでない。ただし、315～320 m区間で最大の亀裂頻度を示す理由は、コアで確認された約318～320 mの変質花崗岩の岩脈中に多数の亀裂が存在するためである。

第23図(a)と(b)に示す全ての亀裂の向きの分布を見ると、走向がおよそ東西で傾斜角が30～40度の向きに最大の集中があり、走向が北北東－南南西で傾斜角が10～50度の向きも同程度に多くあることがわかる。この走向の分布の特徴は(c)図のローズダイアグラムでも確認でき、亀裂の走向は東北東－西南西と北北東－南南西の2つの大きく異なる方向に卓越するバイモーダルな分布となる。走向がバイモーダルな分布を示すことは、第25図(a)の赤丸で示す走向の頻度分布図からも明らかである。ただし、2つの卓越した走向とは異なる走向の亀裂も存在する。亀裂が南北系と東西系の2つの卓越する走向を示すことに関して、観測点周辺の地形と地質構造の特徴を確認すると、第3章で説明したように、周辺の丘陵地では南北走向系の谷地形が卓越し、また観測点の北側と南側に、東西から東北東－西南西の走向の長尾断層と鮎滝断層がある。従って、亀裂の卓越する2つの走向が観測点周辺の2つの構造の特徴的な走向とほぼ対応することがわかる。木口・桑原(2021a)は、16の観測点の地下亀裂の向きの支配要因を調べた結果、全ての亀裂の走向の卓越方向は、全体として観測点周辺の地質構造の特徴的な走向に近い傾向があるとしており、本観測点の亀裂でもこの傾向が見られたことは興味深い。

全ての亀裂の傾斜角については、第22図を見ると、全深度を通じて低角から高角まで全体的に分布している。220～260 m区間などで低角の亀裂が少ない深度もあり分布は深度全体で必ずしも一様ではないが、深度方向で傾斜角の傾向が明瞭に変化する境界はな

いと思われる。第 25 図 (b) の赤線で示す傾斜角の頻度分布から、40 度から 60 度付近の中程度の傾斜角が最も卓越し、卓越した傾斜角から離れるに従い頻度はほぼ単調に低下することがわかる。

次に、形状が明瞭で開口幅が大きいと分類したランク 1 と 2 の亀裂について、亀裂の頻度や走向・傾斜角の分布を確認する。まず、ランク 1 と 2 の亀裂の数は亀裂全体の中では少ないことが第 22 図の亀裂頻度の図からわかり、全ての亀裂の中で約 14% である。なお、傾斜角の補正を適用する前の亀裂数では約 12% となる。この亀裂頻度の図を見ると、ランク 1 と 2 の亀裂はある深度区間に集中して存在するのではなく、浅部から深部まで全体的にばらついて分布するように見える。100~125 m 区間で、ランク 1 と 2 が他の深度に比べて相対的にやや多く分布するようであるが、孔 2 のストレナーナ設置のために選んだ深度 (127~128 m) とは異なることから、本観測点では明瞭な亀裂が多く分布する深度と相対的に高い透水性が推定される深度とは対応しないと考えられる。ランク 1 と 2 の亀裂の向きの分布の特徴を第 24 図と第 25 図から確認すると、南北に近い走向が最も卓越しており、その次に東北東-西南西の走向が多い。全ての亀裂の走向と比較すると南北に近い走向の割合がやや多いが、2 つの走向の頻度が大きい特徴は、全ての亀裂が示す傾向と同様である。また傾斜角は、第 25 図 (b) の黒丸で示すように 60~70 度付近の頻度が大きく、全ての亀裂と比較するとやや高角が多いが、最大の頻度を示す傾斜角から離れるに従いほぼ単調に減少する分布の傾向は全ての亀裂と同じである。以上から、ランク 1 と 2 の亀裂に、全ての亀裂と明瞭に区別できるような向きの特徴は見られないと考える。

最後に、第 22 図に示す 6 つの深度区間に分けたコンター図およびローズダイアグラムを用いて、亀裂の向きの深度方向の変化について確認した。深度区間の分割として、孔井地質の境界に対応した深度で区分することも考えられるが、カッティングスの情報だけで微細な地質境界を有意に決定することが困難であったため、50 m 区間を基本とする区分を本原稿では採用した。6 つの各区間内の亀裂の数は 82~109 個の範囲である。それぞれの区間の亀裂の向きに以下に示すような異なる特徴が見られた。最も浅い 39~100 m 区間では、走向が西北西-東南東と北北西-南南東の 2 つの方向に卓越し、傾斜角は 30~60 度の範囲以外の角度が他の深度と比べるとやや少ない傾向である。風化と新鮮な花崗岩の境界は約 60 m と推定されるが、この深度付近では走向の分布に明瞭な変化がないことから、2 つの卓越する走向が風化と新鮮な花崗岩のそれぞれに分かれて対応するのではないと考える。100~150 m 区間は、北東-南西から東北東-西南西の走向が明瞭に卓越する。カッティングスによるとこの区間はすべて花崗岩で

ある。150~200 m 区間では、走向が北東-南西から東西の範囲や北西-南東などほぼ全方位的に広く分布する特徴が見られる。また、傾斜角は全て 70 度以下である。200~250 m 区間は、南北から北北東-南南西の走向が明瞭に卓越しており、前後の深度区間と大きく異なる卓越走向を示す。カッティングスによるとひん岩と思われる貫入岩がおおよそこの深度に対応していることから、地質の違いにより前後の深度区間と異なる走向を示す可能性が考えられる。ただし、180~190 m 区間にもひん岩が推定されたが、この区間の亀裂の走向は南北に卓越しない。250~300 m 区間では、東北東-西南西と北西-南東の 2 つの走向が卓越する。最も深い 300~334 m 区間は、北西-南東の走向が卓越するが、東北東-西南西などその他の走向の亀裂も多く存在する。約 318~320 m にある変質花崗岩の岩脈中の亀裂は北西-南東の走向が多いが、岩脈以外の深度でも北西-南東走向の亀裂が存在するので、この区間で走向が北西-南東に卓越する原因を変質花崗岩の存在だけで説明することは難しいと思われる。6 つの深度区間に分割して亀裂の向きを調べた結果、卓越する走向が区間により大きく異なる場合があることがわかった。その違いを孔井地質と対応づけて説明することが可能な深度もあるが、地質との詳細な対比が難しい場合もあり、卓越する走向が深度によって変化する原因は明らかでない。

5.6.4 縦亀裂

上記 5.6.3 節までは孔井を横切る亀裂についての解析であるが、鉛直孔井の孔壁画像に縦亀裂が認められる場合には応力場の解析が可能となるので、本観測点の縦亀裂について簡単に説明する。日高川和佐観測点の孔壁画像では、掘削により誘発されて生成した Drilling Induced Tensile Fracture (以下、DITF とする) の縦亀裂が認められたので、DITF が分布する方位から応力方位を推定した (木口ほか, 2023)。本観測点においても、孔壁画像から縦亀裂を読み取ることを試みた。縦亀裂を読み取る際には、日高川和佐観測点で DITF を認定する際に用いたのと同じように、1) 長さ約 1 m 以上の比較的明瞭な亀裂形状の連続性を確認できること、2) 同一深度で約 180° 離れた方位に 2 つの縦亀裂が認められることを条件とした。しかし、2 つの条件を満たす縦亀裂は全深度で認められず、本観測点では DITF は生成しなかったと判断した。また、縦方向の孔壁崩壊であるボアホールブレイクアウトが発生した場合には、応力方位を推定できるが、本観測点では縦方向の孔壁崩壊も認められなかった。従って、本観測点では、縦亀裂の DITF やボアホールブレイクアウトを用いた応力方位の推定は実施できなかった。

6. まとめ

南海トラフ地震モニタリングのために産総研が構築を進める地下水等総合観測ネットワークのうち、2022年度に整備した綾川千疋観測点において、2つの掘削孔井で実施した物理検層の概要と解析結果を取りまとめた。孔1（深度334 m）と孔2（200 m）の孔井で、観測機器を適切に設置する深度を決定するなどの目的のために必要となる合計9種類の物理検層を実施した。検層の種目や測定深度などの概要を整理し、また、それぞれの検層により本観測点で得られたデータを示した。検層データを用いた解析結果は以下のようにまとめられる。

自然ガンマ線検層から得たガンマ線強度の深度方向の変化は、カッティングス・コアの観察から推定した花崗岩・花崗閃緑岩・ひん岩などの孔井地質とおおよそ整合的であった。温度検層・キャリパー検層・セメントボンド検層の結果から、孔井を仕上げる上で必要となる孔井内の環境に関する情報（孔内温度・孔径・セメント膠着度）をそれぞれ把握できた。約60 m以深で得られた、電気検層による高い比抵抗と速度検層による高いP波速度の結果から、約60 m以深は全体として新鮮な花崗岩類が分布することが推定できた。50 m区間ごとのP波速度の平均値は50 m以深で5.3~5.8 km/sと高速であり、これまで整備した17の観測点で実施した速度検層と比べた結果、本観測点は最も大きいP波速度を示した。

ストレーナを設置する深度区間を決定するために、速度検層（ストレーン波解析、P波速度）、電気検層、孔壁画像検層やその他の検層の結果を総合的に解釈し、孔1と孔2のそれぞれで、相対的に高い透水性を有すると推定できる深度区間を求めた。ストレーナ設置後の揚水の結果から、約13~16 L/分で3日間以上の連続揚水が可能となる程度の地層水がストレーナ深度区間の地層に存在すると考えられる。

孔壁画像検層の画像から読み取った亀裂について、分布の頻度などを統計的に解析するために、亀裂の傾斜角を考慮して幾何学的な重み付けをする補正を適用した。補正適用後の全ての亀裂の向きは、東北東-西南西と北北東-南南西の2つの大きく異なる走向に卓越することがわかった。これらの卓越走向は、本観測点周辺の活断層と谷地形の2つの地質構造の特徴的な走向とおおよそ対応しており、これまでの16観測点で、全ての地下亀裂の卓越走向が周辺の地質構造の走向に近い傾向となった結果と同じである。目視によりランク分けした明瞭な亀裂についてその向きの傾向を全ての亀裂と比較した結果、傾斜角がやや高角を示すなどの違いはあるが、全ての亀裂の向きと明らかに区別できる特徴は見られなかった。また、50 m区間を基本として深度を6つの区間に分割した場合に、亀裂の卓越する走向が深度

区間によって変化することがわかったが、変化を示す原因は明らかでない。

謝辞 綾川千疋観測点の孔井の掘削を含む観測施設の整備は、住鉱資源開発株式会社が施工し、物理検層は物理計測コンサルタント株式会社が実施しました。香川県、綾川町、さぬき空港公園と近隣住民の方々のご理解とご協力を得て、整備工事を進めることができました。匿名の査読者、編集委員長の今西和俊氏と編集委員の北川有一氏から有益なコメントをいただき、本稿の改善に大きく役立ちました。ここに記して感謝いたします。

文 献

- Barton, C. A. and Zoback, M. D. (1992) Self-similar distribution of macroscopic fractures at depth in crystalline rock in the Cajon Pass scientific drill hole. *J. Geophys. Res.*, **97**, 5181-5200.
- 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.
- 平山 健 (1953) 7万5千分の1地質図幅「脇町」および同説明書。産業技術総合研究所地質調査総合センター。
- Hudson, J. A. and Priest, S. D. (1983) Discontinuity frequency in rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, **20**, 73-89.
- 地震調査研究推進本部・地震調査委員会 (2023) 長期評価による地震発生確率値の更新について。地震調査研究推進本部・地震調査委員会報道発表資料, https://www.static.jishin.go.jp/resource/evaluation/long_term_evaluation/updates/prob2023.pdf, 2023年7月24日閲覧。
- 木口 努・桑原保人 (2021a) 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。活断層・古地震研究報告, **20**, 1-78.
- 木口 努・桑原保人 (2021b) 産総研地下水等総合観測井における透水性評価のための孔井内測定手法の適用事例：主に測定時の制約に対応するために。地質調査総合センター研究資料集, **726**, 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・北川有一・松本則夫 (2023) 産総研日高川和佐観測点における物理検層の概要と解析結果. 地質調査総合センター研究資料集, 742, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 北川有一・木口 努・板場智史・松本則夫 (2023) 和歌山県における新規の地下水等総合観測施設 (日高川和佐観測点) の紹介. 日本地球惑星科学連合 2023 年大会, S-CG59-P04.
- 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.
- 小林浩治・木村 学・寒川 旭 (1986) 讃岐平野南部の活断層. 活断層研究, 2, 55-63.
- 松本則夫 (2016) 南海トラフ地震の中短期予測をめざして. 地震ジャーナル, 62, 8-12.
- Meller, C., Kohl, T., Gaucher, E. and Genter, A. (2012) Approach for determination of the failure probability of fractures at the Soultz-sous-Forêts EGS project. *Proc. 37th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, SGP-TR-194.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター (編) (2022) 20 万分の 1 日本シームレス地質図 V2 2022 年 3 月 11 日版. 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 杉山雄一・寒川 旭・田村栄治・露口耕治・藤川 聡・長谷川修一・伊藤 孝・興津昌宏 (2001) 長尾断層 (香川県高松市南方) の活動履歴—三木町氷上宮下におけるトレンチ調査結果—. 活断層・古地震研究報告, 1, 175-198.
- Terzaghi, R. D. (1965) Sources of errors in joint surveys. *Geotechnique*, 15, 287-304.
- 植木岳雪 (2001) 香川県中部, 阿讃山地北麓の三豊層群—その記載と鮮新世以降の古地理の変遷—地学雑誌, 110, 708-724.
- Yow, J. L. (1987) Blind zones in the acquisition of discontinuity orientation data. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 23, 19-28.

(受付: 2023 年 9 月 14 日, 受理: 2024 年 11 月 19 日)

第 1 表. 綾川千疋観測点の 3 孔井の深度, 緯度・経度 (世界測地系) と標高.
Table 1. Depths, latitudes, longitudes (World Geodetic System) and elevations of three boreholes at Ayagawa-Sembiki station.

Borehole	Depth (m)	Latitude (°N) upper : deg.min.sec. lower : decimal	Longitude (°E) upper : deg.min.sec. lower : decimal	Elevation (m)
Hole-1	334	34° 13' 00.75 34.216875	134° 00' 17.06 134.004739	150.20
Hole-2	200	34° 13' 00.22 34.216728	134° 00' 16.30 134.004528	148.08
Hole-3	30	34° 13' 00.12 34.216700	134° 00' 16.26 134.004517	148.02

第2表. 綾川千疋観測点およびそれ以前に整備した17観測点の名称, 緯度・経度, 標高と主な孔井地質.
綾川千疋観測点を太字で示す.

Table 2. Site names, latitudes, longitudes, elevations and borehole geology of Ayagawa-Sembiki station and seventeen stations previously constructed by AIST. The Ayagawa-Sembiki station is shown in bold.

観測点		所在地	緯度 (°N)	経度 (°E)	標高 (m)	主な孔井地質
TYS	豊田神殿	愛知県豊田市	35.0405	137.3578	480	トータル岩
NSZ	西尾善明	愛知県西尾市	34.8442	137.1057	39	片麻岩
ANO	津安濃	三重県津市	34.7870	136.4019	163	花崗閃緑岩
ITA	松阪飯高	三重県松阪市	34.4534	136.3129	301	トータル岩 ・結晶片岩
MYM	紀北海山	三重県北牟婁郡	34.1123	136.1815	29	花崗斑岩
ICU	熊野磯崎	三重県熊野市	33.9001	136.1379	28	花崗斑岩 ・凝灰岩
KST	串本津荷	和歌山県東牟婁郡	33.5201	135.8363	25	泥岩
HGM	田辺本宮	和歌山県田辺市	33.8675	135.7318	120	頁岩・砂岩
HDW	日高川和佐	和歌山県日高郡	33.8862	135.1988	54	砂岩・頁岩
ANK	阿南桑野	徳島県阿南市	33.8661	134.6045	36	砂岩・頁岩
MUR	室戸岬	高知県室戸市	33.2856	134.1563	62	含礫泥岩
AYS	綾川千疋	香川県綾歌郡	34.2169	134.0047	150	花崗岩 ・花崗閃緑岩
KOC	高知五台山	高知県高知市	33.5505	133.5990	5	砂岩・泥岩
NHK	新居浜黒島	愛媛県新居浜市	33.9904	133.3423	9	花崗閃緑岩
SSK	須崎大谷	高知県須崎市	33.3896	133.3229	17	頁岩
TSS	土佐清水松尾	高知県土佐清水市	32.7357	132.9757	125	花崗岩
MAT	松山南江戸	愛媛県松山市	33.8422	132.7393	44	砂岩・泥岩 ・花崗閃緑岩
UWA	西予宇和	愛媛県西予市	33.3859	132.4823	214	砂岩・粘板岩 ・チャート

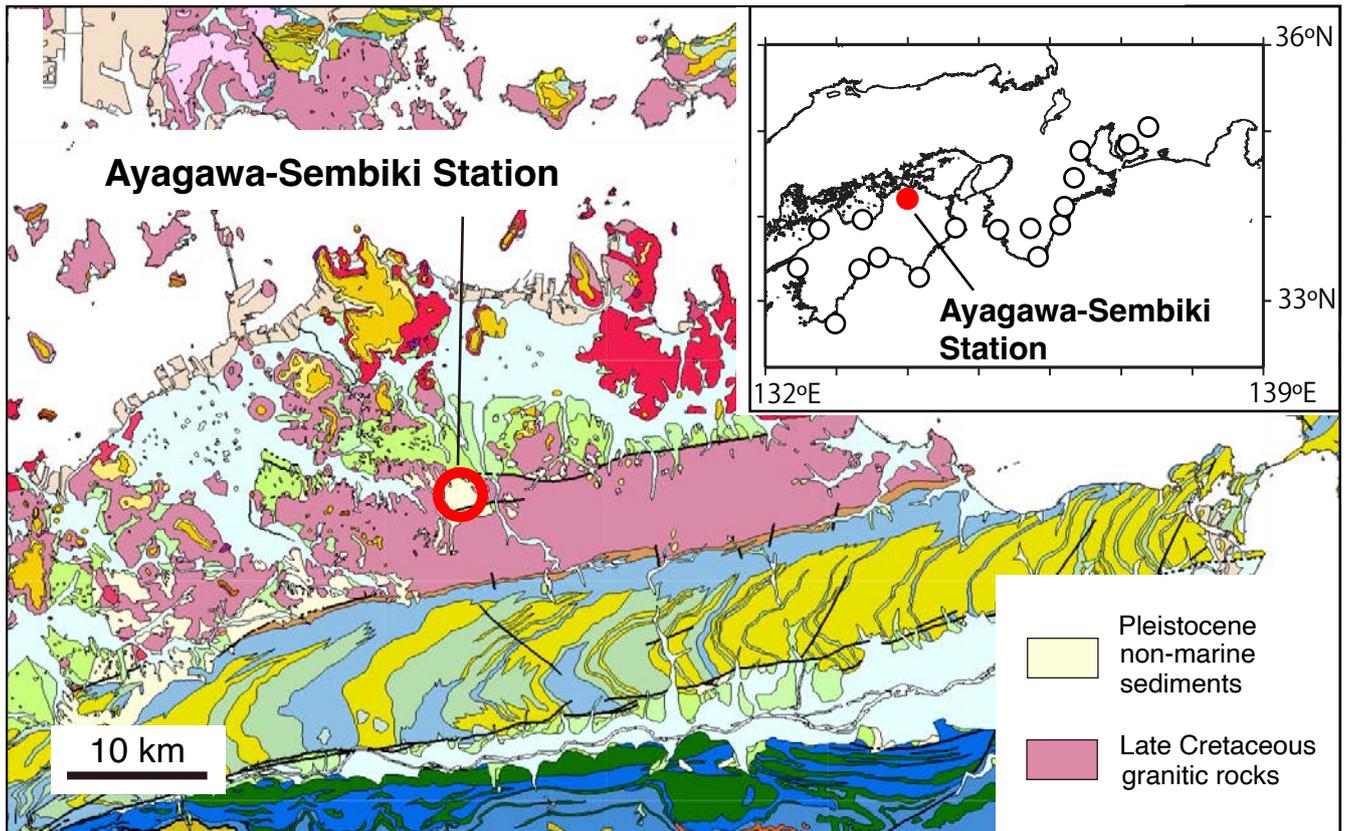
第3表. カッティングスやコア観察による孔1の孔井地質の概要.

Table 3. Overview of the borehole geology for Hole-1, based on cuttings and core observation.

深度区間	地質概要
地表～約40m	砂岩礫 風化が進んでいる
約40～60m	花崗岩 風化しているが深くなるに従い新鮮
約60～180m	花崗岩 風化や変質はほとんど認められない
約180～190m	ひん岩と思われる貫入岩
約190～210m	花崗岩 風化や変質はほとんど認められない
約210～250m	ひん岩と思われる貫入岩
約250～260m	花崗岩 わずかに風化で非変質
約260～280m	花崗閃緑岩または閃緑岩 風化や変質はほとんど認められない
約280～313.6m	花崗閃緑岩 風化や変質はほとんど認められない
313.6～317.6m	花崗閃緑岩 風化変質は見られず新鮮硬質
317.6～319.8m	花崗岩の岩脈 変質あり
319.8～333.6m	花崗閃緑岩または閃緑岩 風化変質は見られず新鮮硬質

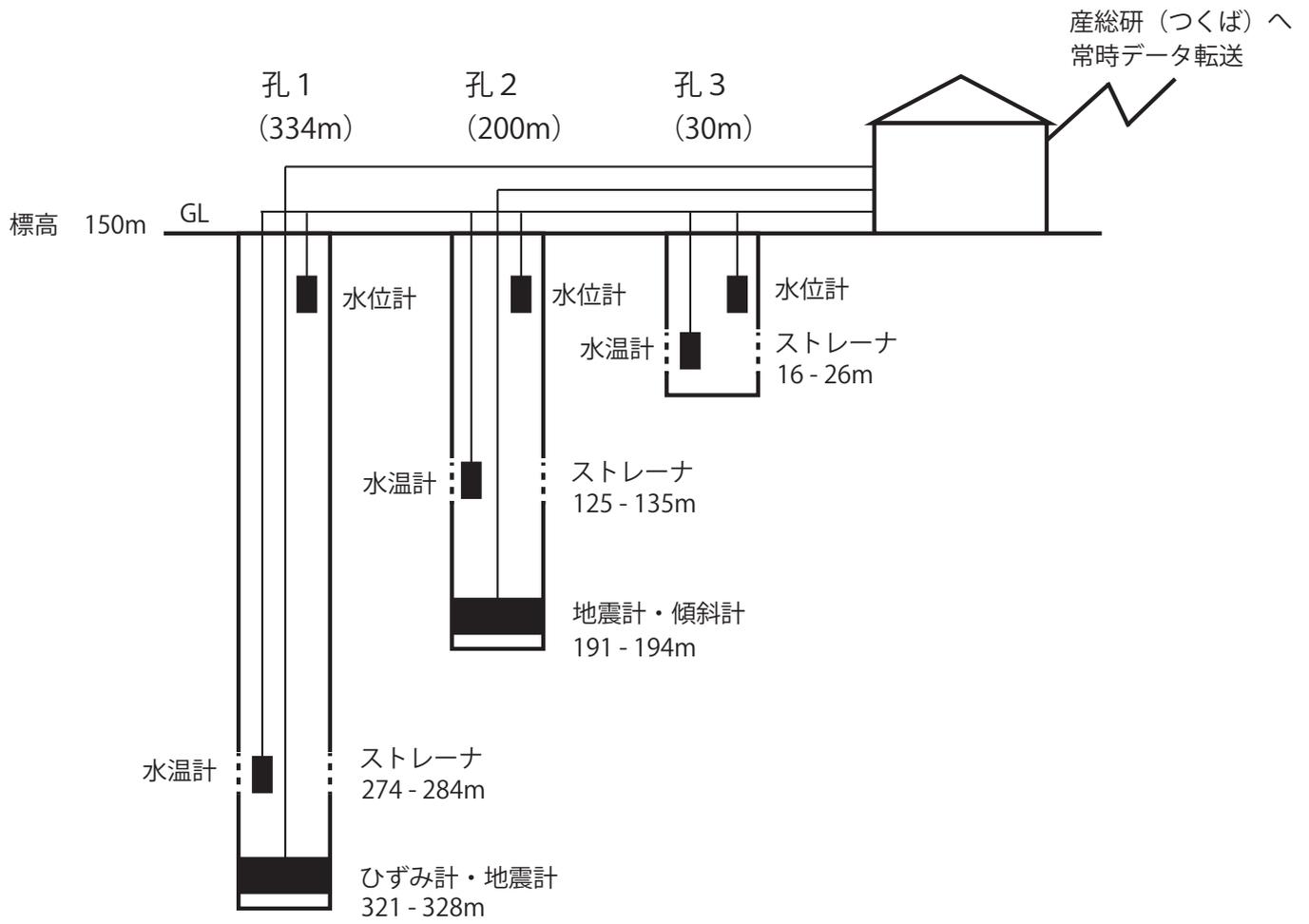
第4表. 綾川千疋観測点の2孔井で実施した検層種目.
Table 4. Geophysical loggings conducted in two boreholes at Ayagawa-Sembiki station.

孔井名 掘削径 ↓ 測定深度 ↓ 測定日 ↓ 検層種目	孔1 (334m)			孔2 (200m)		
	14-3/4 in (374.7mm)	279.0mm	PQコア (123.0mm)	10-5/8 in (269.9mm)	セメンチ ング後	
	32~201m	201~314m	314~334m	34~200m	0~191m	
	2022.12.17	2023.01.21 -22	2023.02.19	2022.11.23 -24	2022.12.16	
温度	—	○ (2回)	—	○ (2回)		
電気	—	○	—	○		
キャリパー	○	○	○	○		
速度(P)	—	○	○	○		
BHTV	—	—	○	—		
比抵抗式 孔壁画像 (XRMI)	—	○	—	○		
方位傾斜	○	○	○	○		
ガンマ線	—	○	—	○		
セメントボンド	—	—	○ (0~314m)	—		○



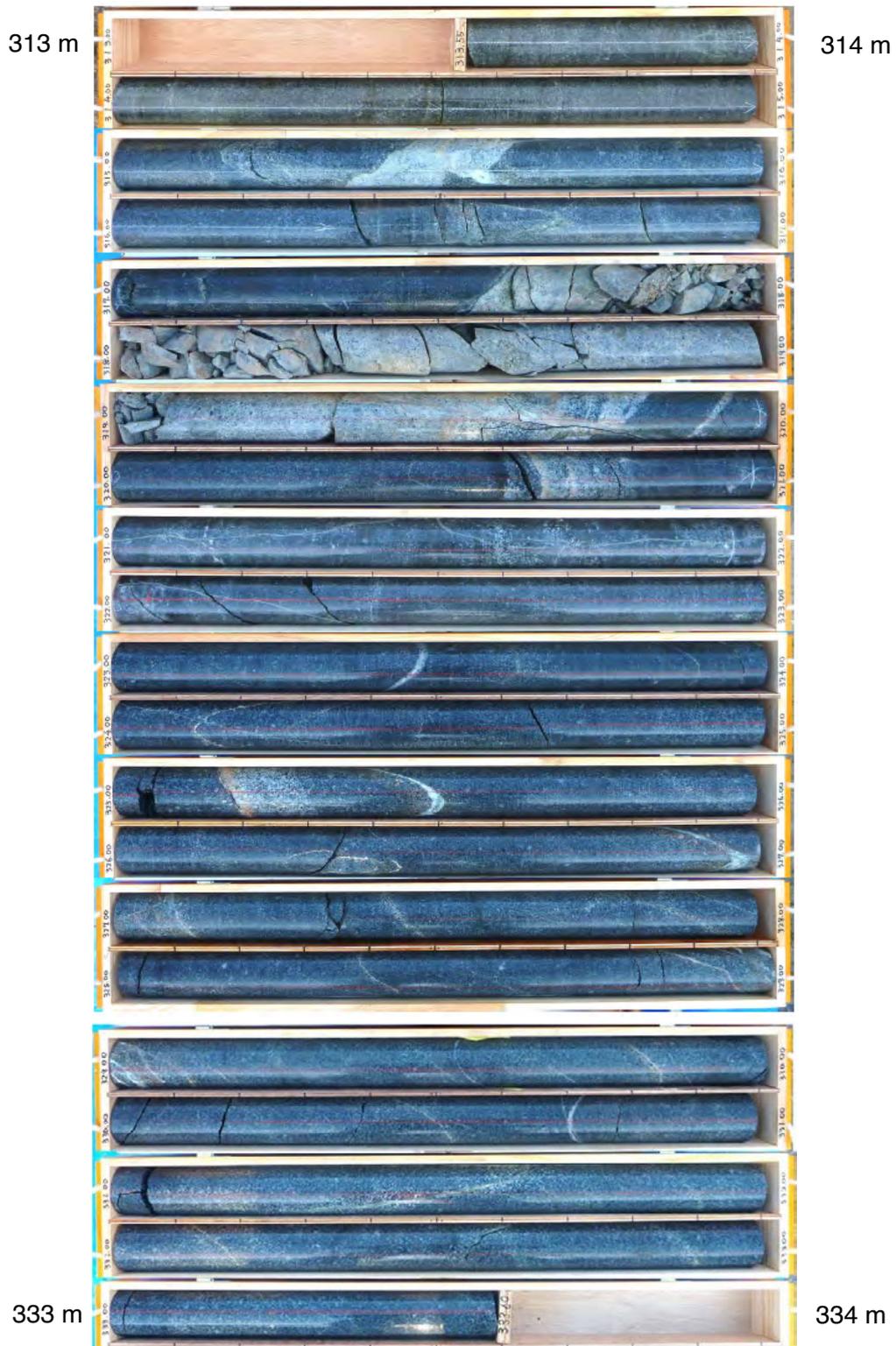
第1図. 綾川千疋観測点の位置図. 20万分の1日本シームレス地質図V2(産業技術総合研究所, 2022)上に赤丸で示す. 右上図に綾川千疋観測点以外の地下水等総合観測点を白丸で示す.

Fig. 1. Location of Ayagawa-Sembiki station plotted on the Seamless digital geological map of Japan 1:200,000 (Geological Survey of Japan, AIST (ed.), 2022). The station is indicated by a red circle. AIST integrated groundwater observation stations except Ayagawa-Sembiki station are also shown in the upper right of the figure by open dots.



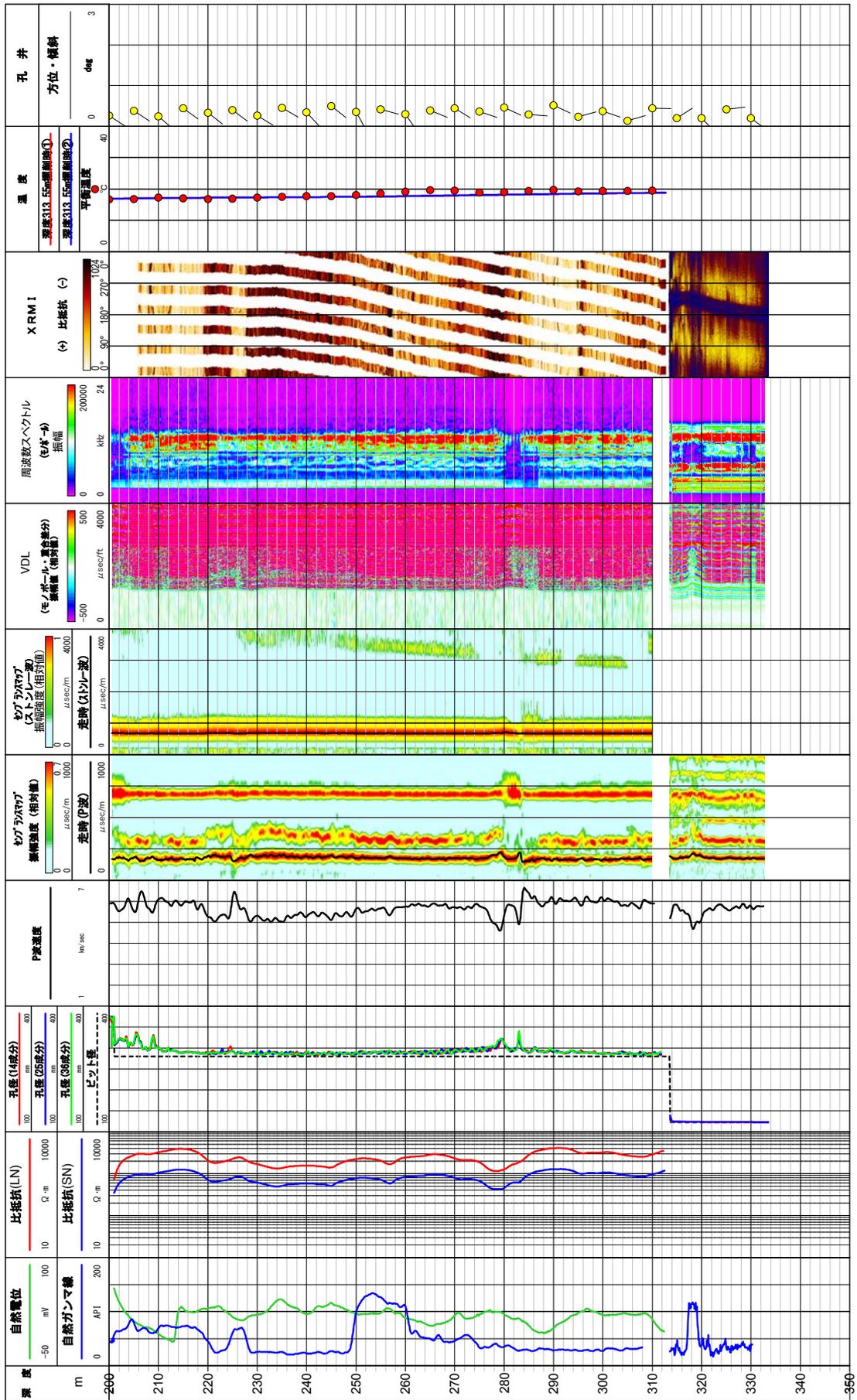
第2図. 綾川千疋観測点の孔井と観測機器などの概要.

Fig. 2. Overview of the boreholes and observation instruments at Ayagawa-Sembiki station.

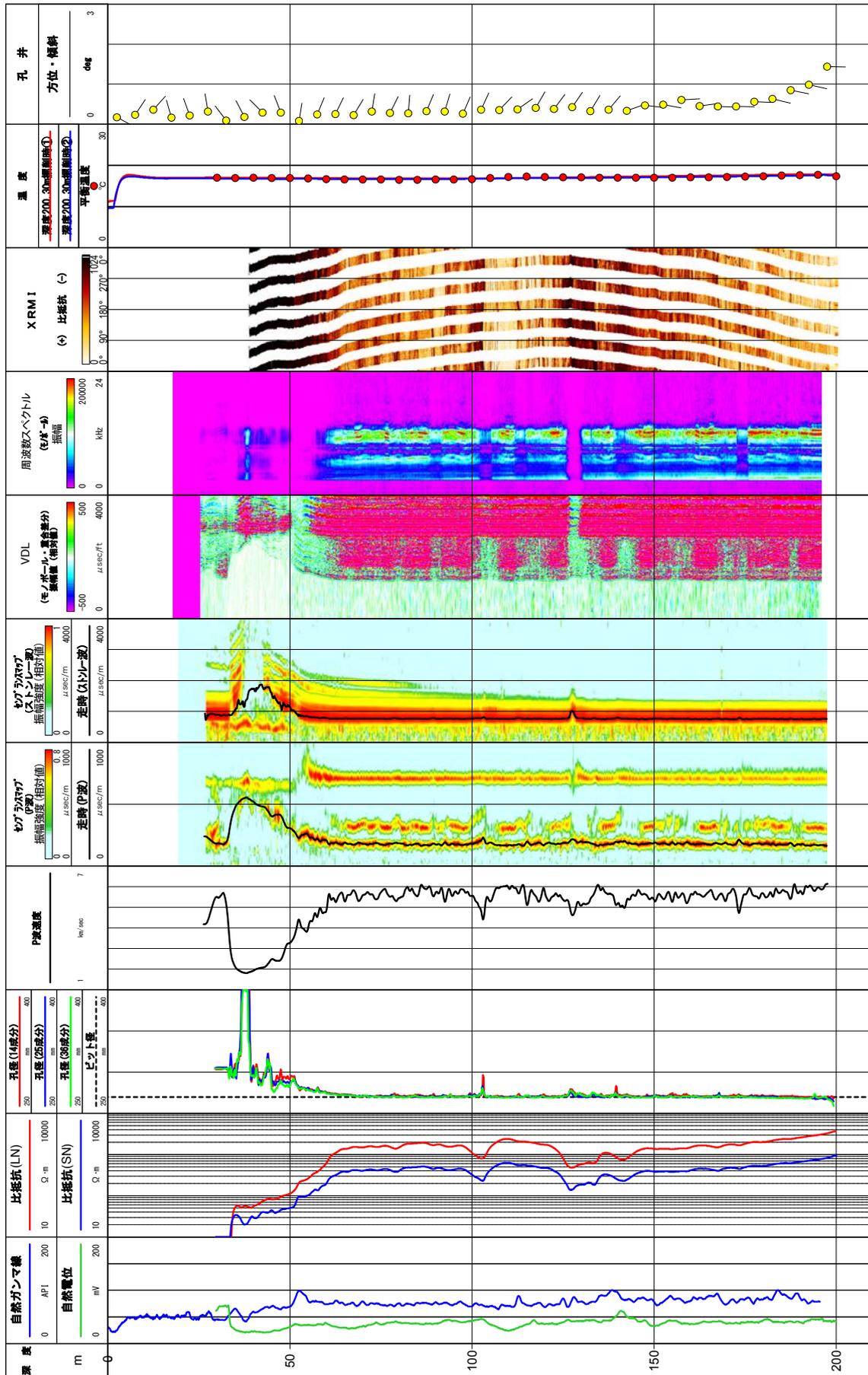


第3図. 孔1の深度313.6~333.6 mの区間のコア写真.

Fig. 3. Core photographs at the depth interval of 313.6 to 333.6 m in Hole-1.

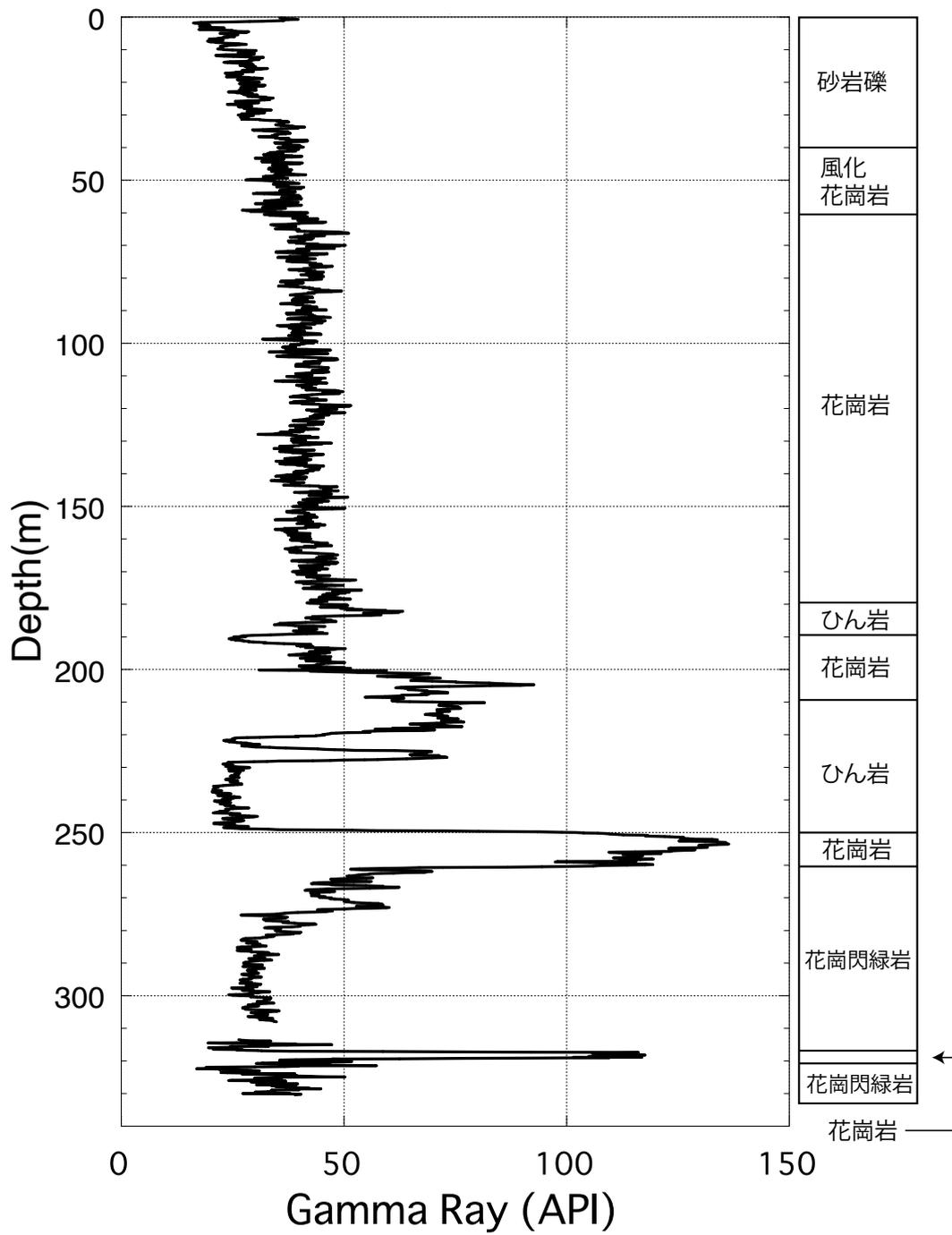


第5図. 孔1の物理検層総合柱状図 (200~334 m 区間).
 Fig. 5. The same as Fig.4 for Hole-1 (200 to 334 m depth interval).

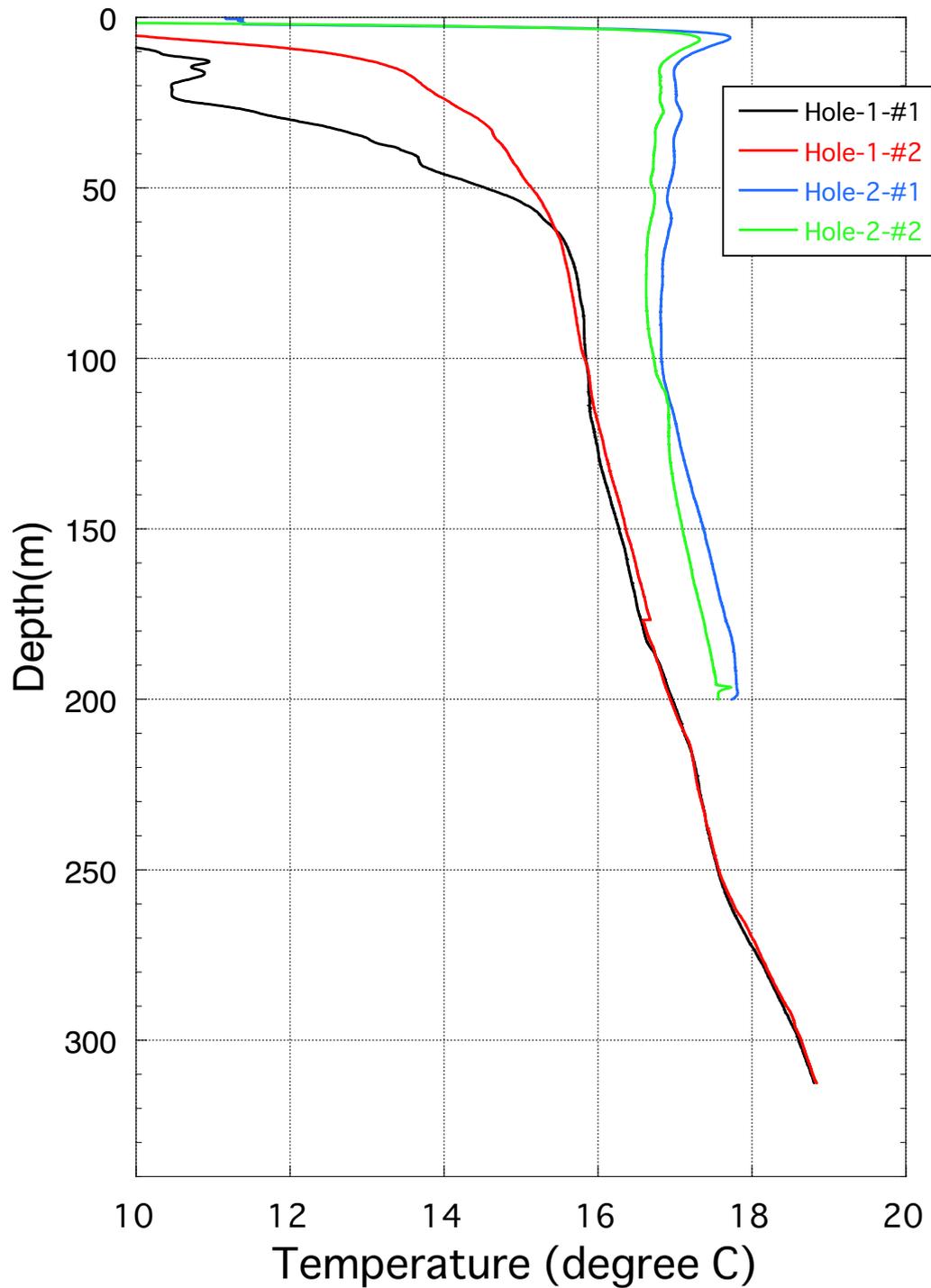


第6図. 孔2の物理検層総合柱状図.

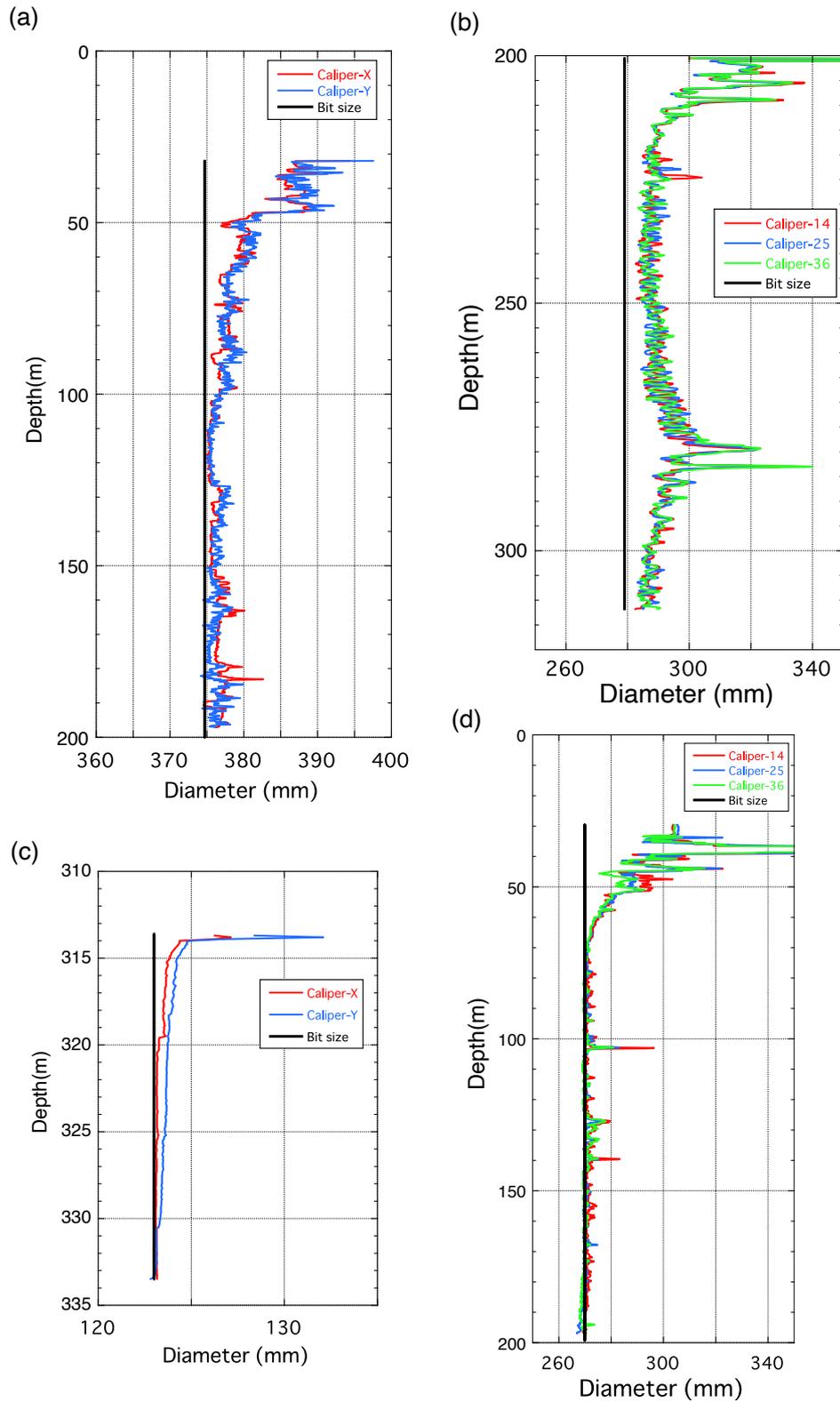
Fig. 6. The same as Fig.4 for Hole-2.



第7図. 孔1の自然ガンマ線検層の結果とカッティングス・コア観察による孔井地質の比較.
 Fig. 7. Comparison between the result of natural gamma ray logging and borehole geology based on cuttings and core observation in Hole-1.

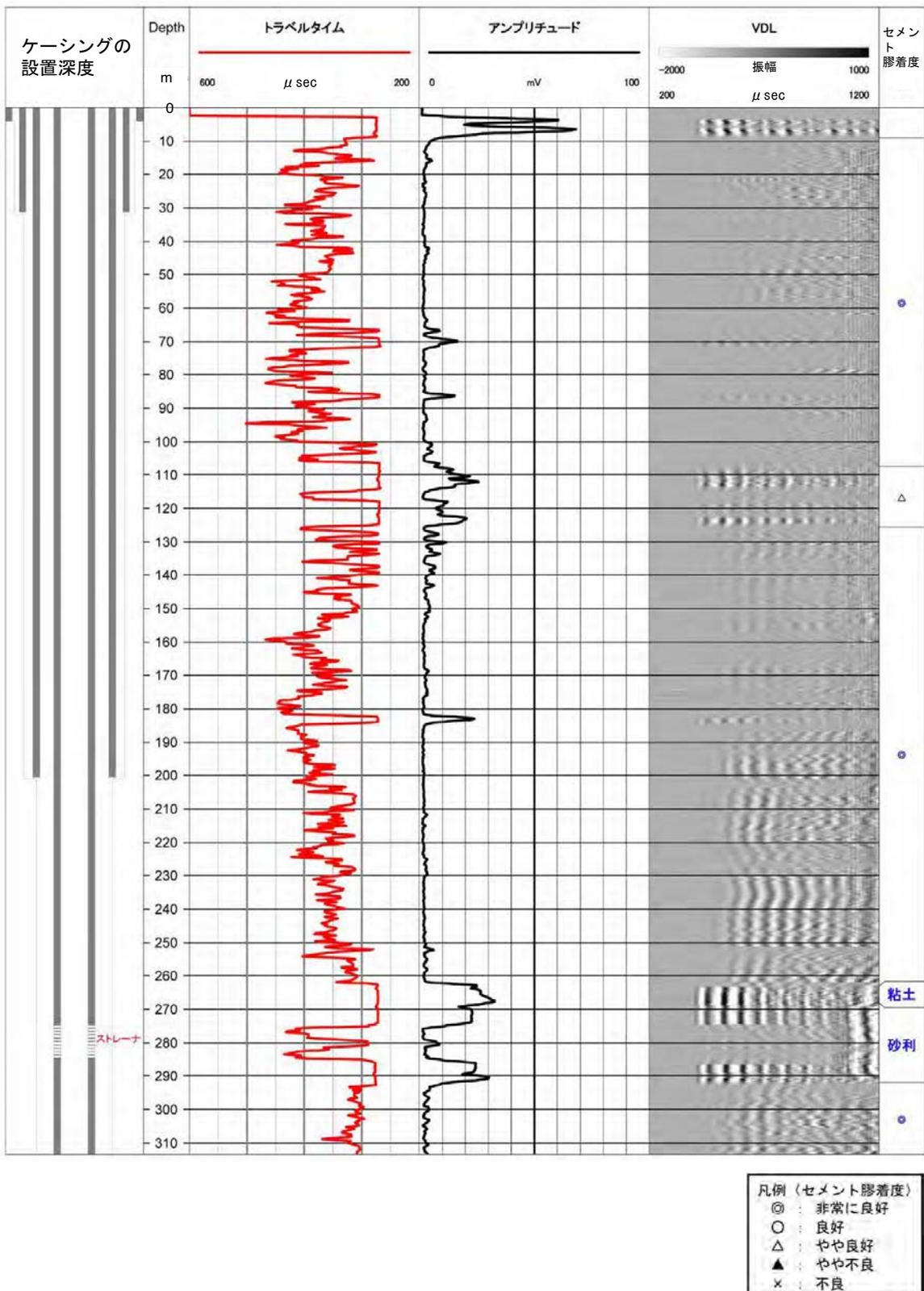


第 8 図. 孔 1 と孔 2 の温度検層の結果. それぞれの孔井で 2 回繰り返し測定したデータを色分けし重ねて示す.
Fig. 8. Results of temperature loggings in Hole-1 and 2. The data obtained from two repeated measurements in each borehole are color-coded and overlaid for comparison.



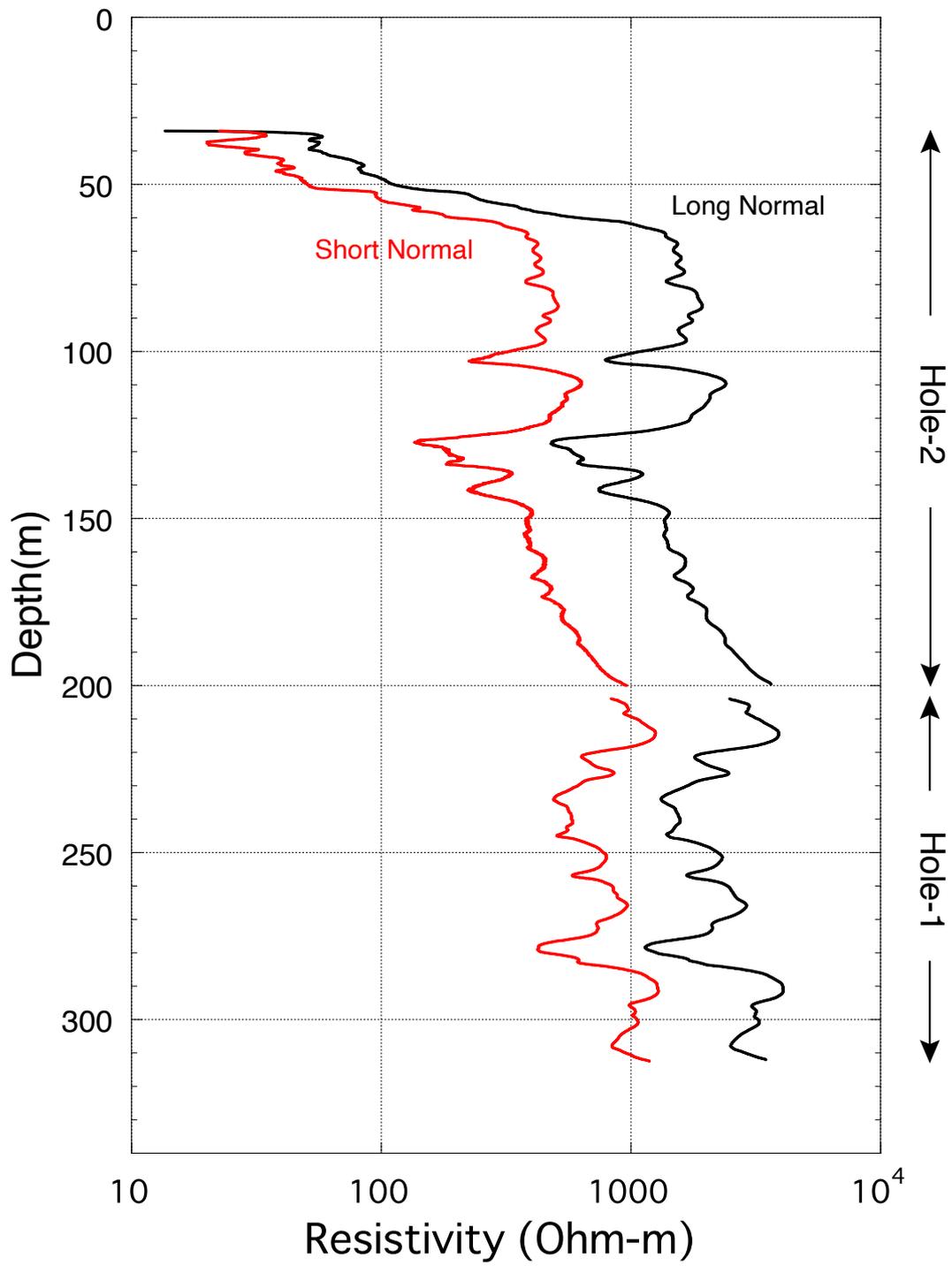
第9図. 孔1と孔2のキャリパー検層の結果. (a) 孔1の200 mまでの区間で2方向の孔径. (b) 孔1の200~314 m区間の3方向の孔径. (c) 孔1の314~334 m区間の2方向の孔径. (d) 孔2の200 mまでの区間の3方向の孔径. 各方向の孔径値を色分けして示す. ビットサイズを黒線で示す. 各図の縦軸と横軸のスケールは異なる.

Fig. 9. Results of caliper loggings in Hole-1 and 2. (a) Borehole diameter in two directions for the interval up to 200 m in Hole-1. (b) Diameter in three directions for the interval between 200 and 314 m in Hole-1. (c) Diameter in two directions for the interval between 314 and 334 m in Hole-1. (d) Diameter in three directions for the interval up to 200 m in Hole-2. Diameter value for each direction is color-coded. The bit size is indicated by a black line. Note that the vertical and horizontal scales are different for each figure.



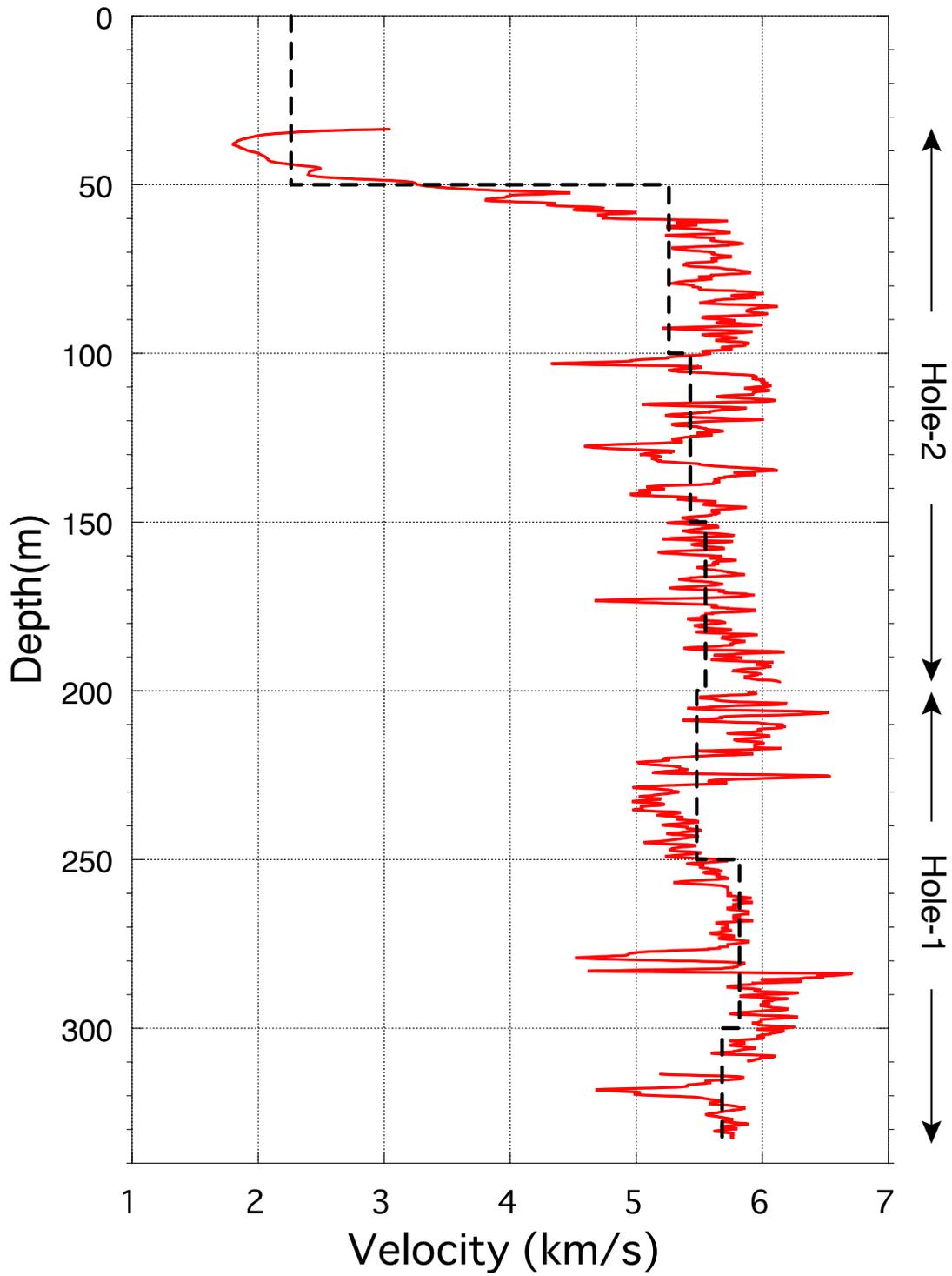
第 10 図. 孔 1 のセメントボンド検層の結果. 左の列から順に, ケーシングの設置深度, 深度, 受振波形の走時 (トラベルタイム), 振幅 (アンプリチュード), VDL 表示 (Variable Density Log) およびセメント膠着度をそれぞれ示す. 走時を示す列では右側が走時が小さい (速度が速い) ことを意味する.

Fig. 10. Results of cement bond logging in Hole-1. From the left column, the casing depth, depth, travel time of the received waveforms, amplitude of the waveforms, Variable Density Log (VDL) of the waveforms and cement bond index are shown. The right side of the travel time column indicates a smaller travel time (higher velocity).



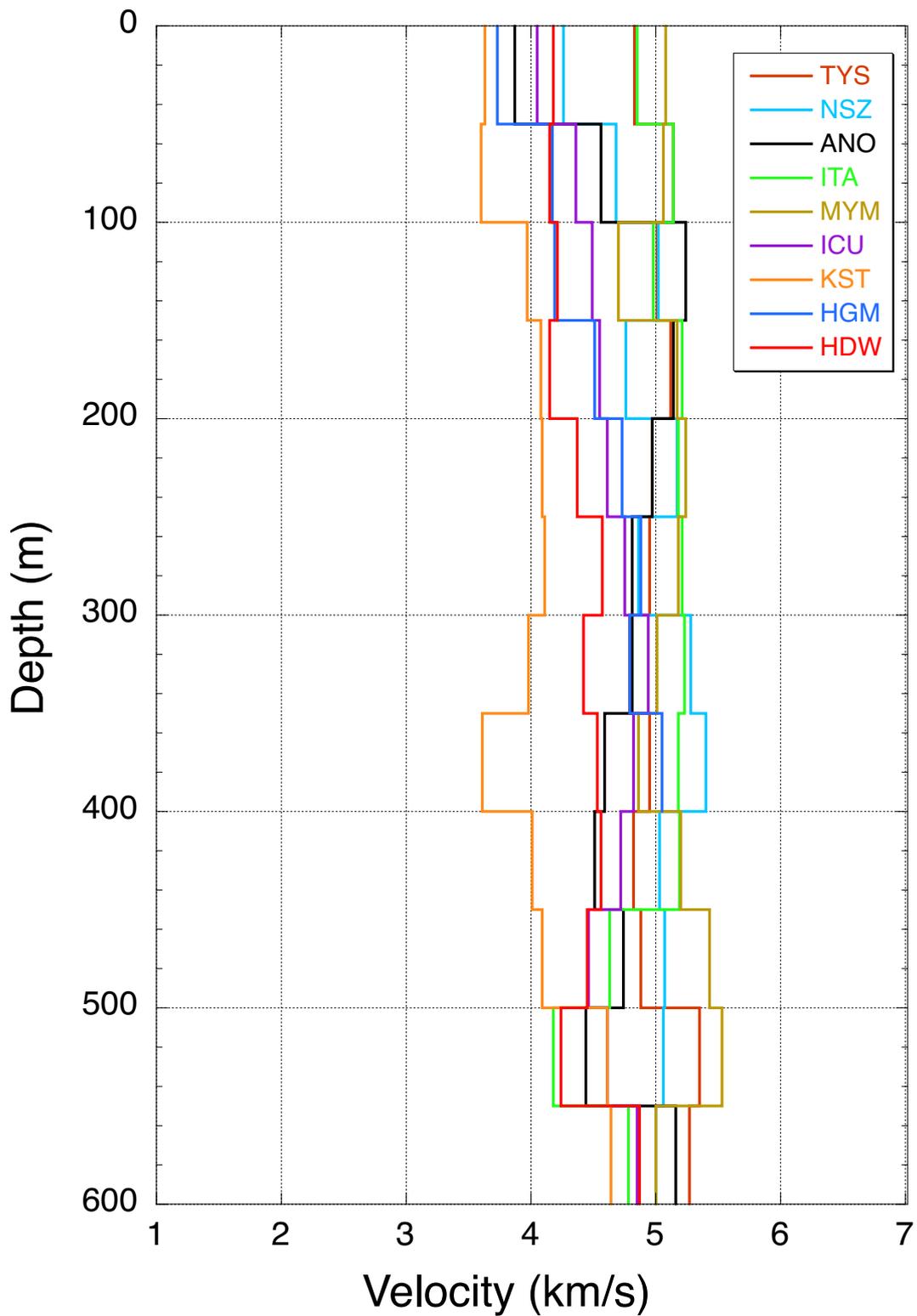
第 11 図. 孔 1 と孔 2 の電気検層による比抵抗の結果. ロングノルマルとショートノルマルの 2 つのデータを色分けして示す.

Fig. 11. Resistivity results from electrical loggings of Hole-1 and 2. The data from both long normal and short normal measurements are color-coded for comparison.



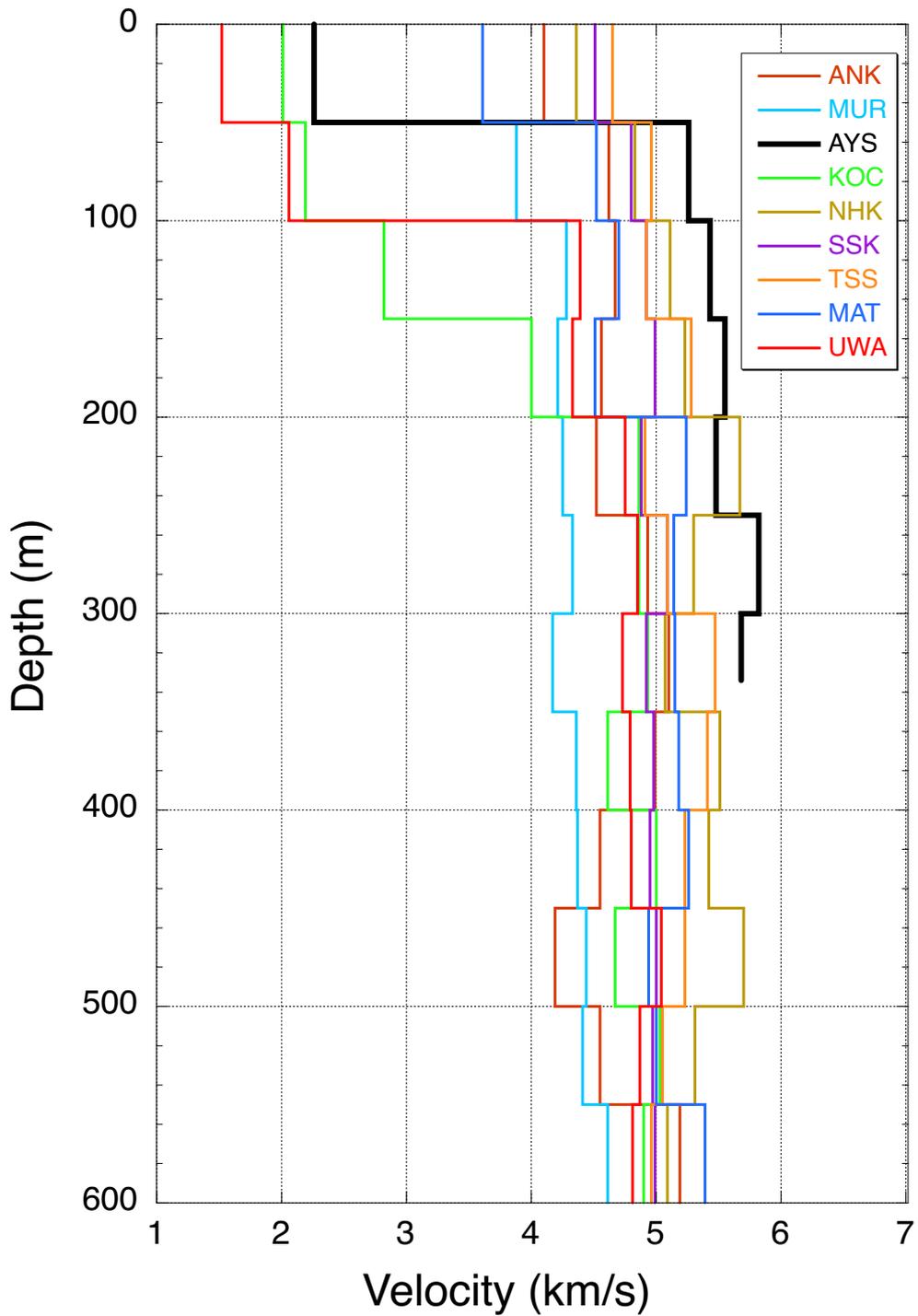
第 12 図. 孔 1 と孔 2 の速度検層で得られた P 波速度. 赤線は原データ, 黒破線は 50 m 区間の平均速度をそれぞれ示す.

Fig. 12. P-wave velocities obtained from sonic loggings in Hole-1 and 2. The red line represents the raw data, while the black dashed line indicates the average velocity for 50 m interval.

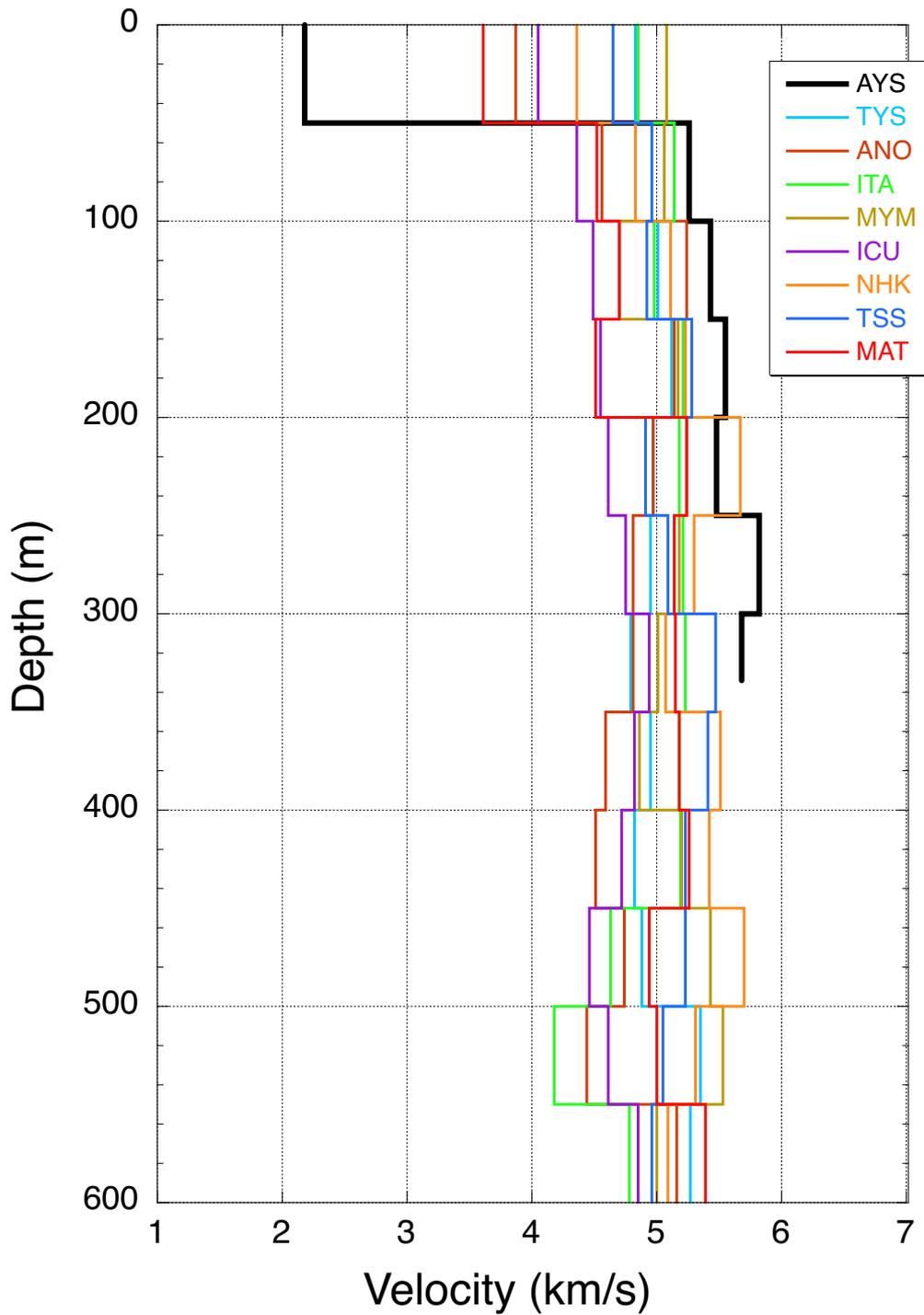


第 13 図. 愛知県・紀伊半島に位置する 9 観測点の速度検層で得られた P 波速度の 50 m 区間の平均値. 各地点の平均速度を色分けして重ねて表示する.

Fig. 13. Average P-wave velocities for 50 m interval obtained from sonic loggings at nine stations located in Aichi Prefecture and the Kii Peninsula. The average velocities for each station are color-coded and overlaid for comparison.

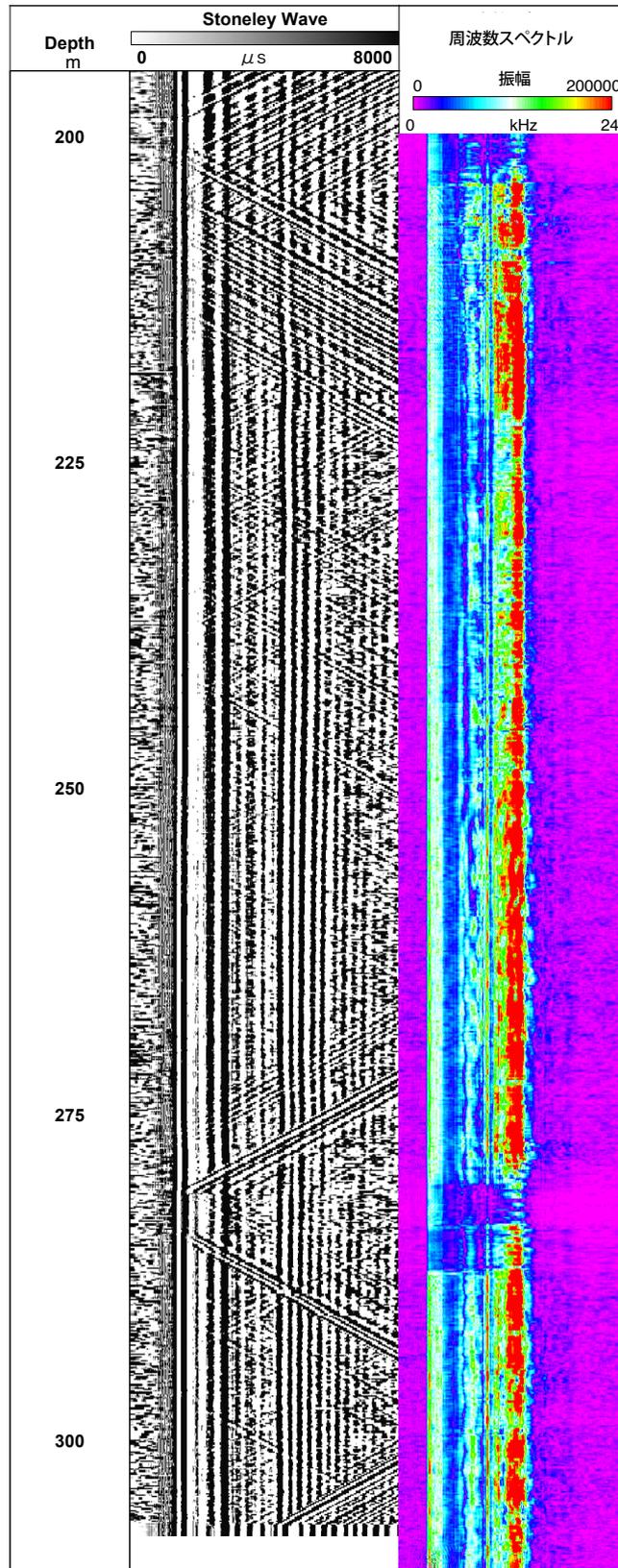


第 14 図. 四国に位置する 9 観測点(本観測点を含む)の速度検層で得られた P 波速度の 50 m 区間の平均値. 各地点の平均速度を色分けして重ねて表示する. 本観測点のデータを AYS の名称の黒線で示す.
 Fig. 14. The same as Fig.13 for nine stations located in Shikoku (including this station). The data for this station is represented by a black line labeled as AYS.

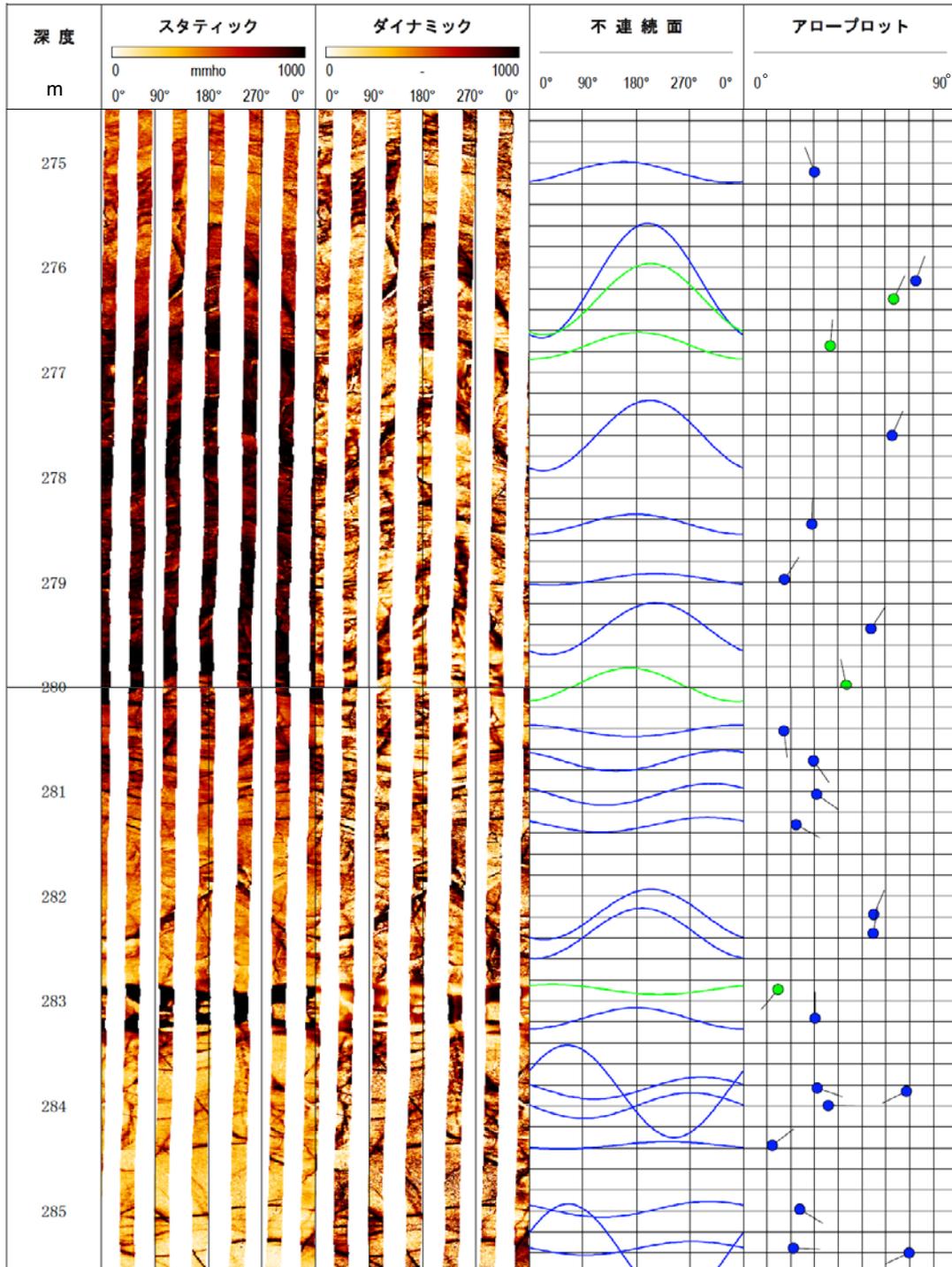


第 15 図. 花崗岩あるいはそれに類する深成岩を孔井地質に含む 9 観測点 (本観測点を含む) の P 波速度の 50 m 区間の平均値. 本観測点のデータを AYS の名称の黒線で示す.

Fig. 15. The same as Fig. 13 for nine stations containing granite or similar plutonic rocks in the borehole geology (including this station).

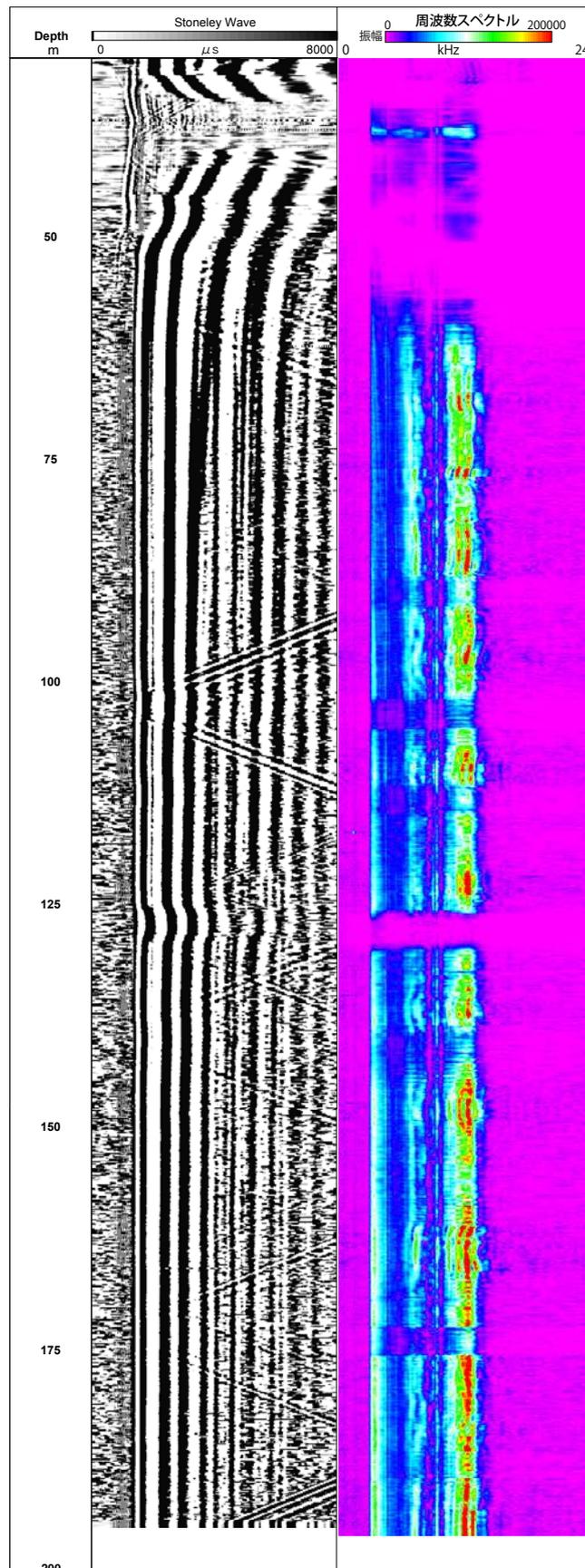


第 16 図. 孔 1 の速度検層から得られたストーンレー波を対象とした波形 (左列) と周波数スペクトル (右列).
Fig. 16. Waveforms (left column) and frequency spectrum (right one) of the Stoneley waves obtained from sonic logging in Hole-1.

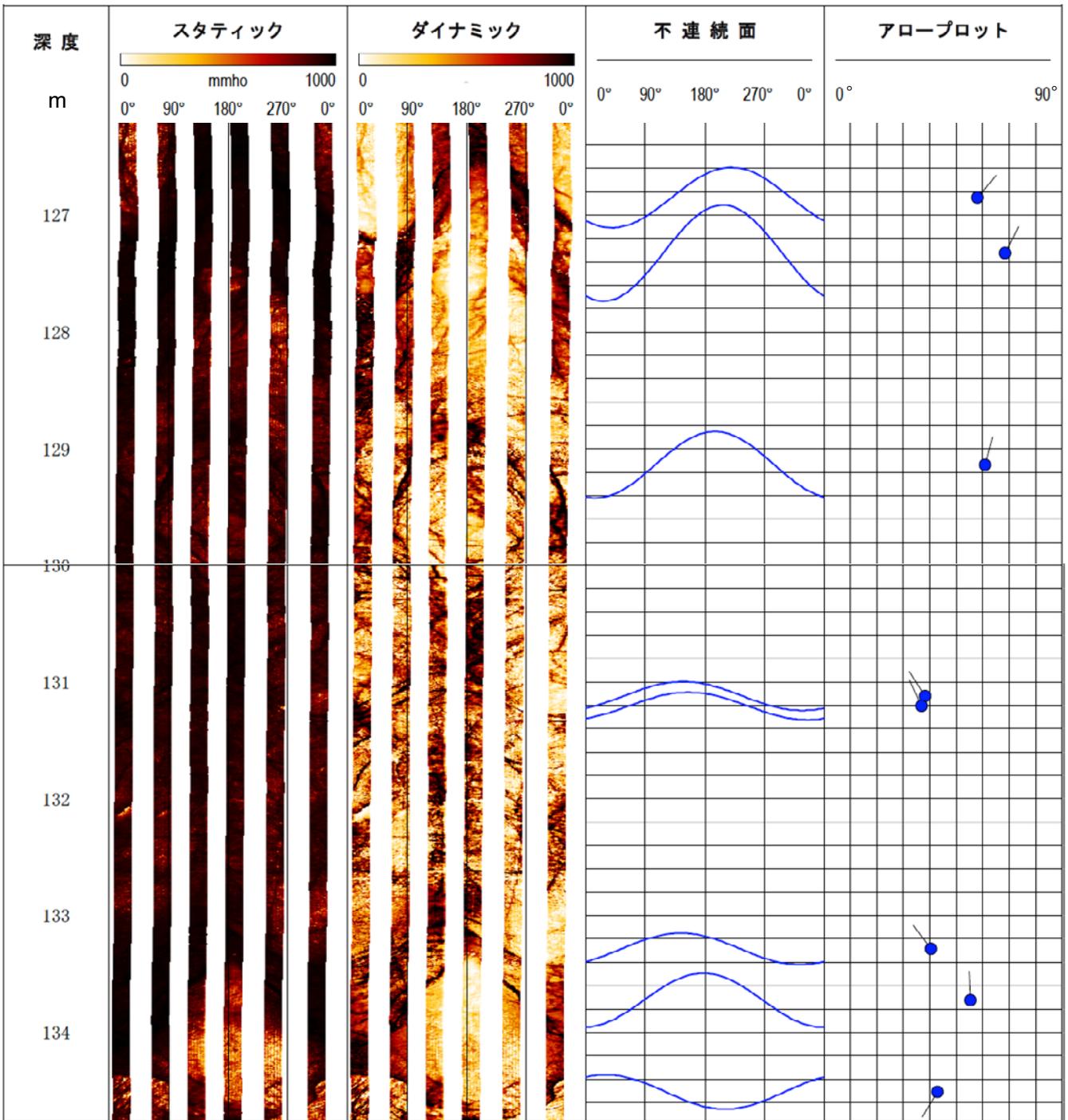


第 17 図. 孔 1 のストレーナ区間付近の深度 275~285 m の XRMI 検層 (比抵抗式孔壁画像検層) による孔壁画像および亀裂の形状と向き. 左列から, 深度, スタティックとダイナミックの孔壁画像, サインカーブの形状として検出した亀裂, 亀裂の傾斜方位と傾斜角を示すアロープロットを示す. スタティック画像は測定した全深度において同一のカラースケールを用いて出力した画像. ダイナミック画像は, 深度 0.1 m 区間ごとに動的に規格化した移動スケールにより出力した画像. アロープロットは, 丸印が傾斜角, 線分の方が傾斜方位を意味する. サインカーブによる亀裂形状とアロープロットでは, 亀裂のランクの 3 つの分類 (1, 2, 3) を, それぞれ, 赤, 緑, 青に色分けして示す. 亀裂のランクの区分は本文 p.31 右段を参照.

Fig. 17. Borehole images, fracture shapes and orientations obtained from XRMI logging at depths of 275 to 285 m around the strainer interval in Hole-1. From the left column, it shows depth, static and dynamic borehole images, detected fracture shapes as sinusoidal curves and arrow plots indicating the dip direction and dip angle of the fractures. Static images are generated using the same color scale for the entire measurement interval. Dynamic images are output using a dynamically normalized moving scale for each 0.1 m interval. The arrow plot uses a circle to represent the dip angle and the azimuth of the line segment to indicate the dip direction. In both the columns of the fracture shape based on the sinusoidal curve and the arrow plot, the three classifications of fracture ranks (1, 2, 3) are color-coded as red, green and blue, respectively. For the classification of fracture ranks, refer to the right column on page 31 of the main text.

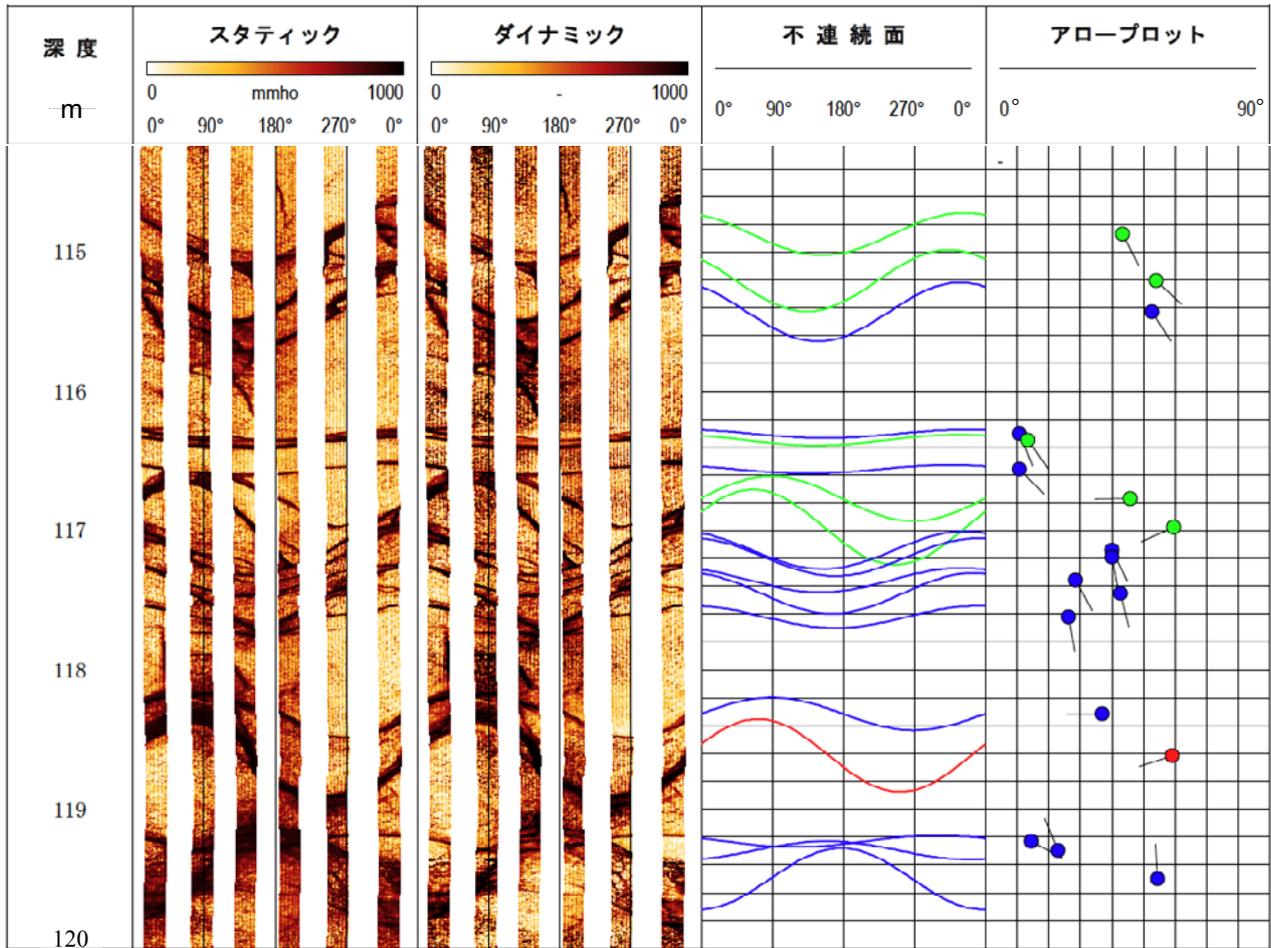


第 18 図. 孔 2 の速度検層から得られたストーンレー波を対象とした波形 (左列) と周波数スペクトル (右列).
Fig. 18. The same as Fig. 16 for Hole-2.



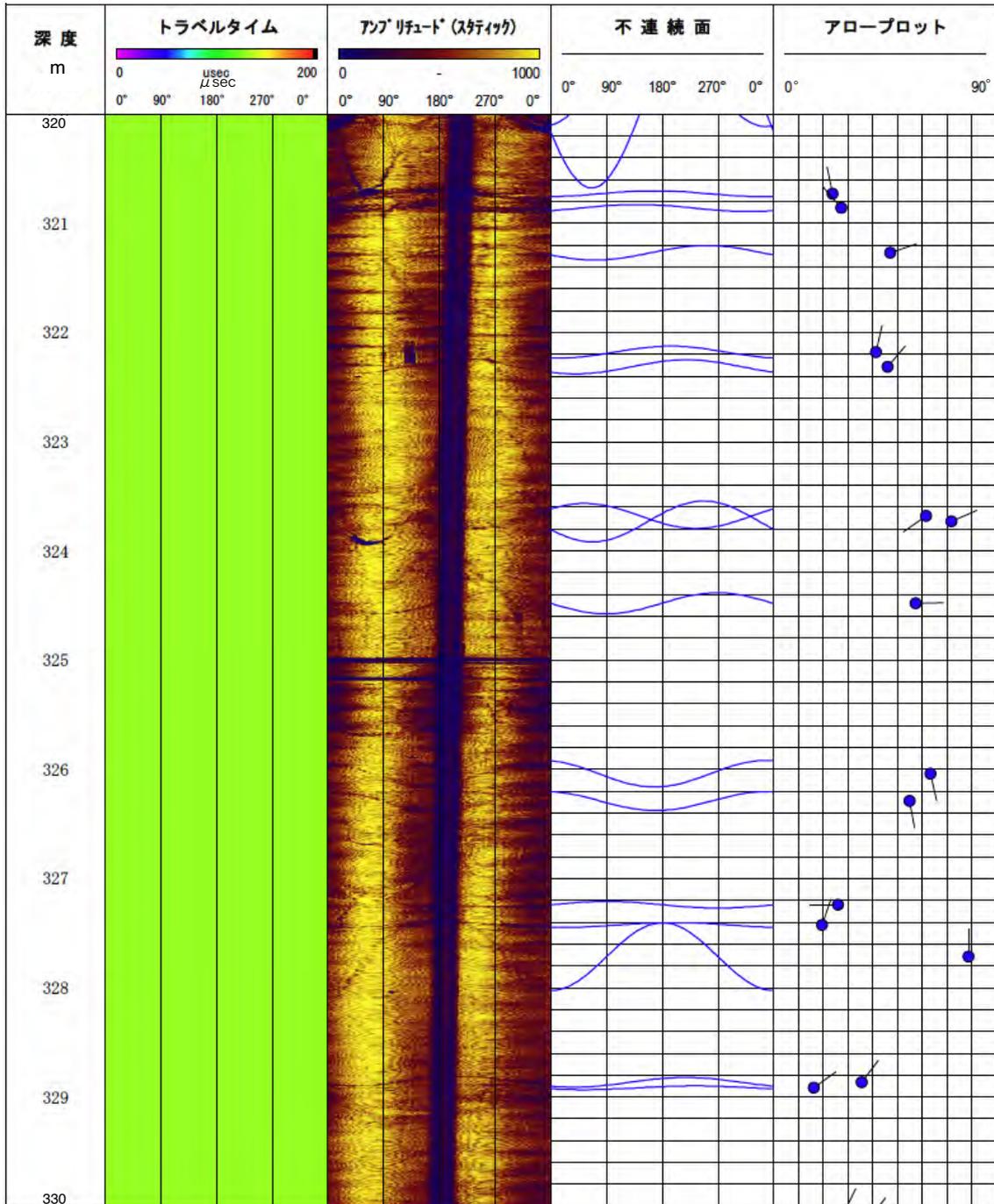
第19図. 孔2のストレーナ区間付近の深度127～134mのXRMI検層による孔壁画像および亀裂の形状と向き.
図の見方は第17図と同じ.

Fig. 19. The same as Fig.17 for depths of 127 to 134 m around the strainer interval in Hole-2.



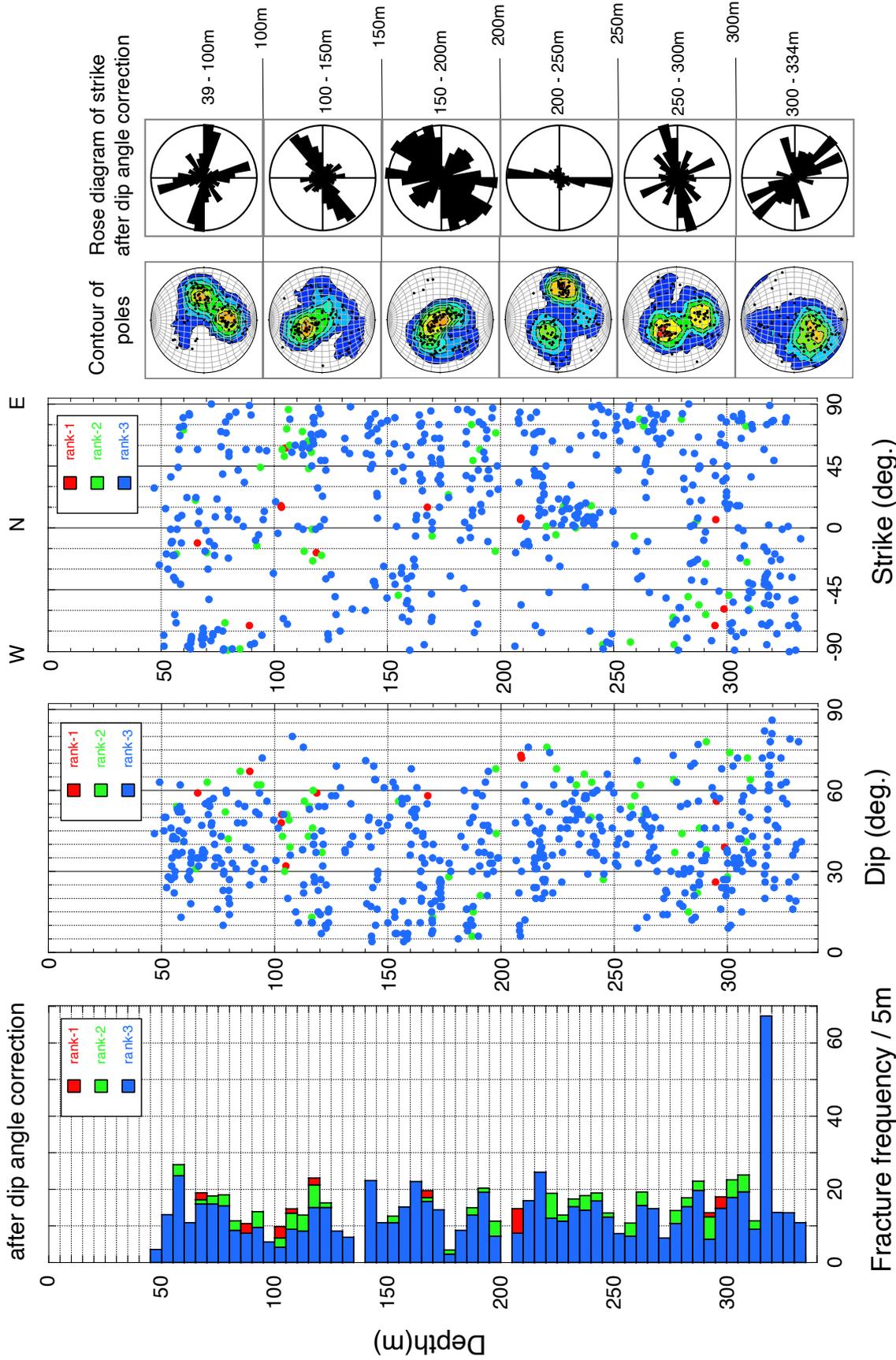
第20図. 孔2の深度115～120 mのXRMI検層による孔壁画像および亀裂の形状と向き. 3種類のランクの亀裂を含む.
図の見方は第17図と同じ.

Fig. 20. The same as Fig.17 for depths of 115 to 120 m in Hole-2. Fractures of three different ranks are displayed.



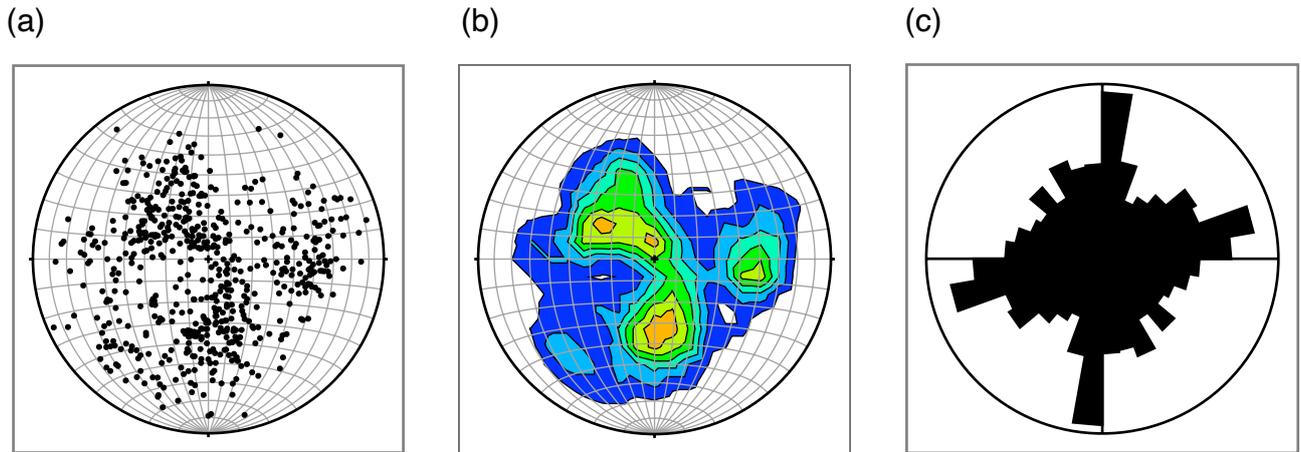
第 21 図. 孔 1 の 320 ~ 330 m 区間の BHTV による孔壁画像および亀裂の形状と向き. 左列から, 深度, トラベルタイム (走時) とアンプリチュード (振幅) の孔壁画像, サインカーブの形状として検出した亀裂, 亀裂の傾斜方位と傾斜角を示すアロープロットを示す.

Fig. 21. Borehole images and fracture shapes and orientations obtained from BHTV (borehole televiewer) logging in 320 to 330 m interval of Hole-1. From the left column, it shows depth, travel time and amplitude images of BHTV, detected fracture shapes as sinusoidal curves and arrow plots indicating the dip direction and dip angle of the fractures.



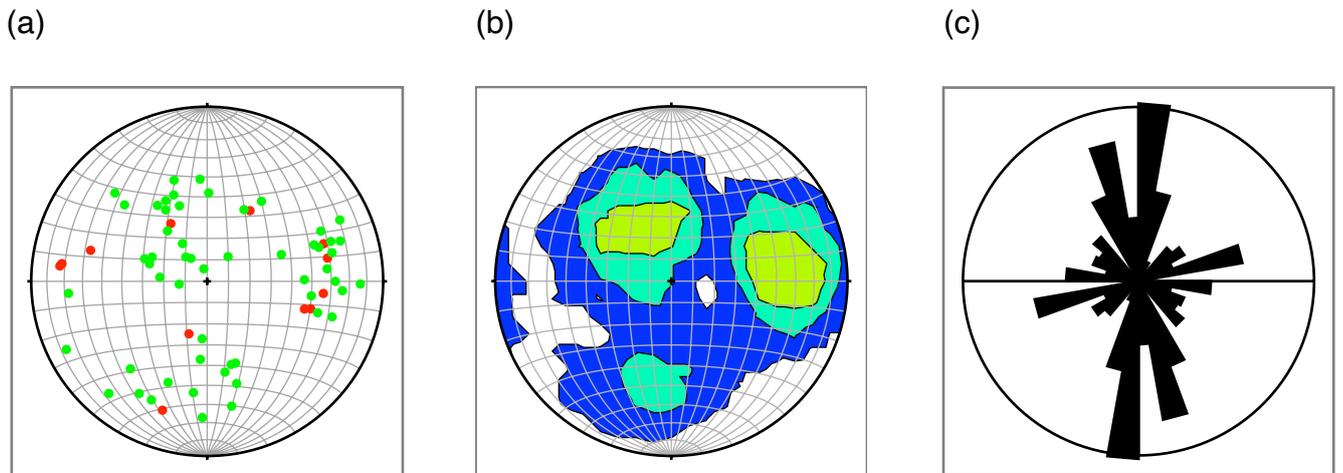
第 22 図. 亀裂の各種特性に関する深度方向の分布図. 左から, 5 m 間隔の亀裂頻度 (傾斜角の補正適用後), 亀裂の傾斜角, 亀裂の走向, 亀裂面の法線方向の下半球面への等積投影のコンター図, および亀裂走向のローズダイアグラム (傾斜角の補正適用後) である. 亀裂頻度, 傾斜角, 走向は 3 種類の亀裂ランク別に色分けして示す. コンター図とローズダイアグラムは, 50 m 区間を基本として 6 深度区間に分けて表示する.

Fig. 22. Depth distributions of various fracture characteristics. From left to right, the fracture frequency at 5 m interval (after applying dip angle correction), fracture dip angle, fracture strike, contours of lower hemisphere equal-area projection of the poles to fracture planes and rose diagrams representing a histogram of the strike of the fractures (after applying dip angle correction) are shown. The fracture frequency, dip angle and strike are displayed with color-coding based on three different fracture ranks. The contours and rose diagrams are presented by dividing them into six depth intervals, with a 50 m section as a basis.



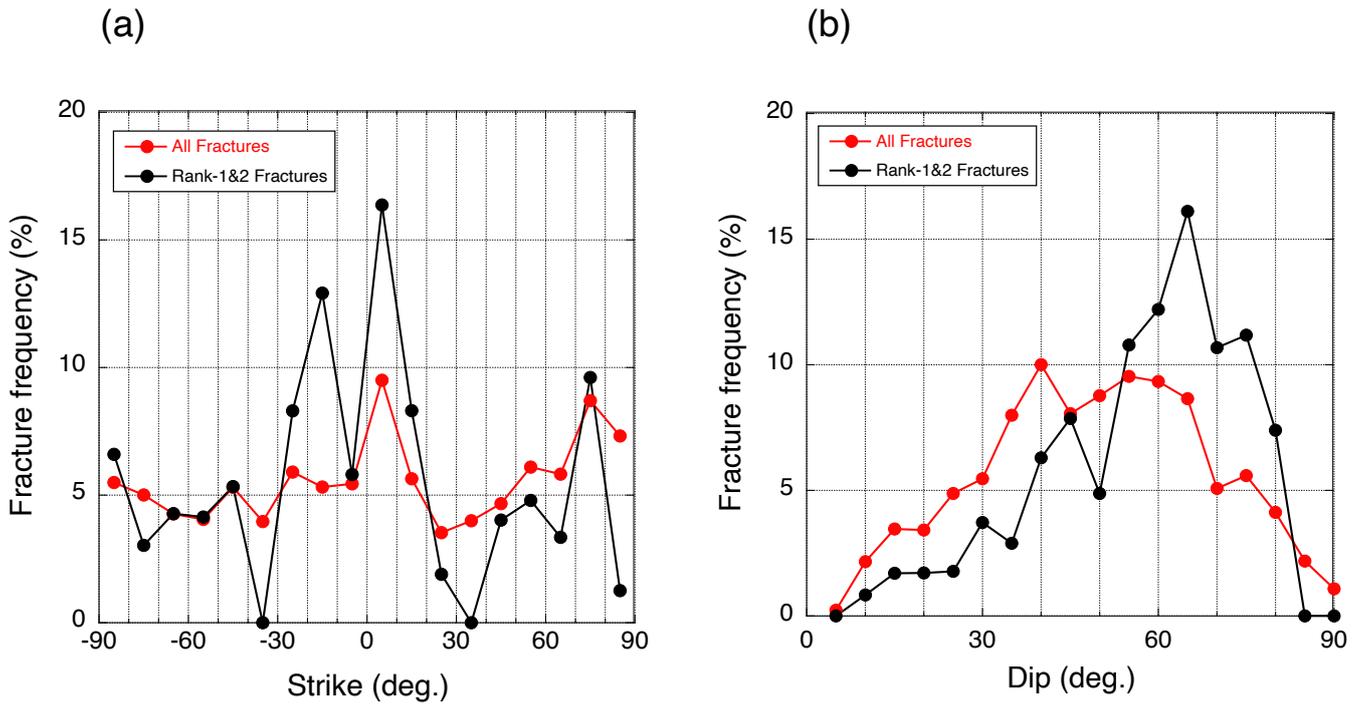
第 23 図. 全ての亀裂の向きの分布. (a) 亀裂面の法線方向の下半球面への等積投影図. (b) (a) の分布のコンター図.
(c) 傾斜角の補正適用後の亀裂走向のローズダイアグラム.

Fig. 23. Distributions of the orientations for all fractures. (a) Lower hemisphere equal-area projection of the poles to fracture planes. (b) Contour for the distribution of Fig. (a). (c) Rose diagram representing a histogram of the strike of the fractures after applying dip angle correction.



第 24 図. ランク 1 と 2 の亀裂の向きの分布. 図の見方は第 22 図と同じ. 図 (a) の赤丸はランク 1, 緑丸はランク 2 の亀裂をそれぞれ示す.

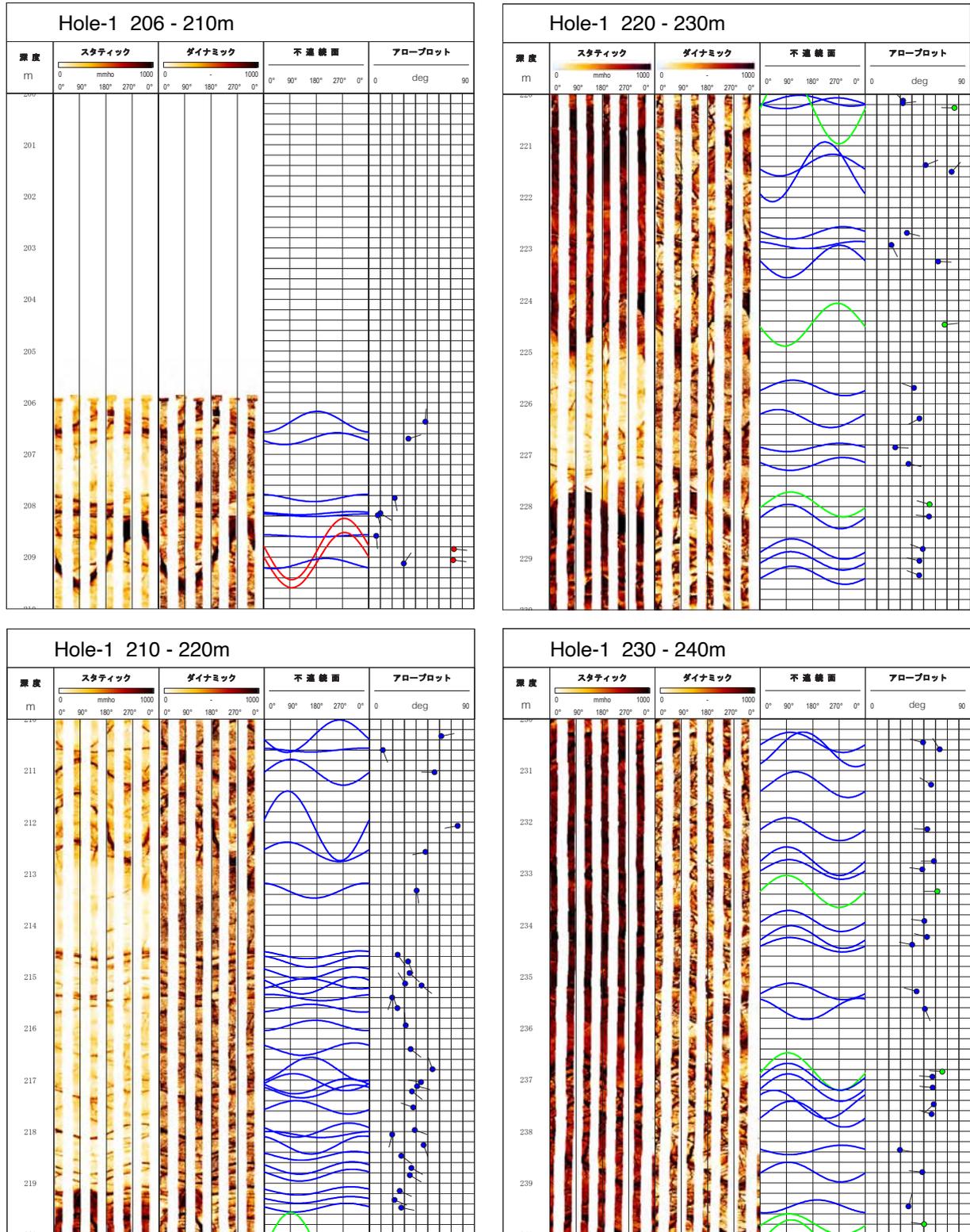
Fig. 24. The same as Fig. 22 for rank-1 and 2 fractures. Red circles and green ones in Fig. (a) indicate fractures of rank-1 and rank-2, respectively.



第 25 図. 全ての亀裂およびランク 1 と 2 の亀裂について, 傾斜角の補正後のそれぞれの走向と傾斜角の頻度分布図. (a) 走向. (b) 傾斜角. 全ての亀裂を赤丸で, ランク 1 と 2 の亀裂を黒丸で示す. 縦軸は, 各亀裂の頻度の亀裂頻度総数に対する割合 (%) である. (a) 図の横軸の正の値は, 亀裂の走向が北から時計回りであることを意味する.

Fig. 25. Frequency distributions of fracture strikes and dip angles after applying dip angle correction for all fractures, as well as rank-1 and 2 ones. (a) Strike. (b) Dip angle. All fractures are represented by red circles, while rank-1 and 2 ones are represented by black ones. The vertical axis denotes the ratio (%) of the frequency of fractures to the total number of fracture frequency. Positive values in the horizontal axis of Fig. (a) indicate the clockwise direction from north.

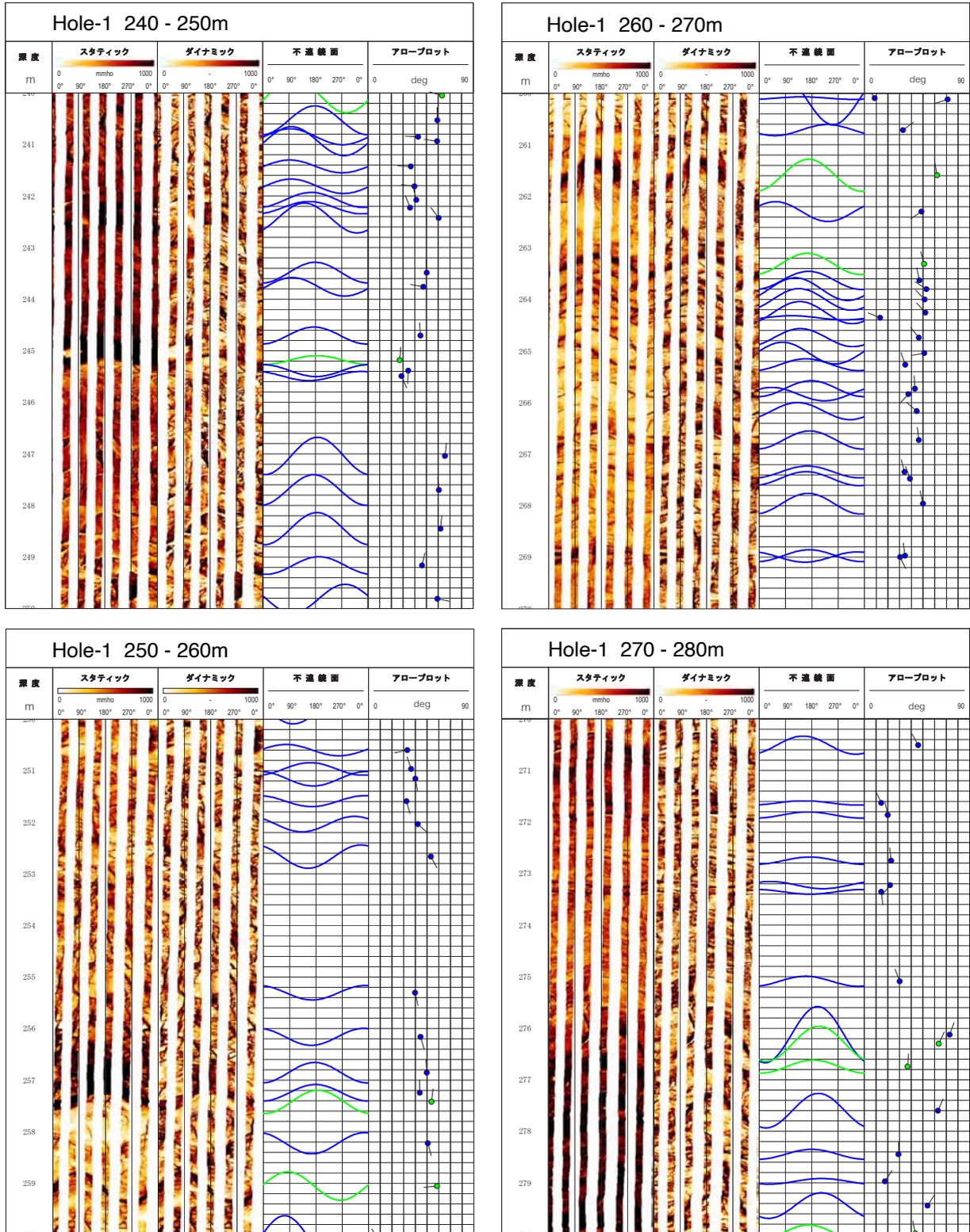
(a) XRMI images for Hole-1 (206-313 m)



付図 A1. 孔 1 と孔 2 の孔壁画像検層による全ての孔壁画像および亀裂の形状と向き. 図の見方は第 17 図, 第 21 図と同じ. (a) 孔 1 の XRMI 検層による画像 (206~313 m). (b) 孔 1 の BHTV による画像 (313~334 m). (c) 孔 2 の XRMI 検層による画像 (39~200 m).

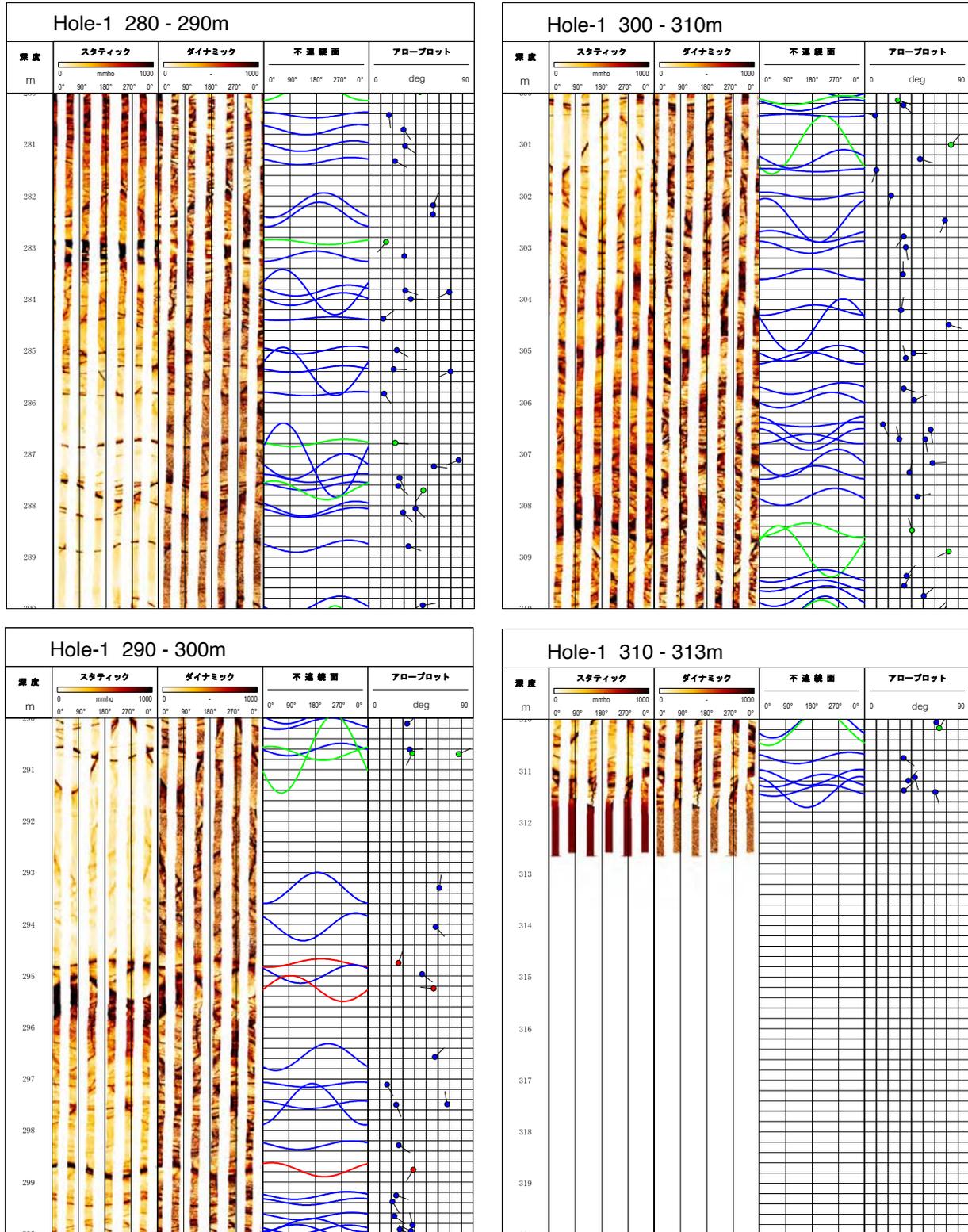
Fig. A1. Borehole images and fracture shapes and orientations obtained from XRMI and BHTV loggings in Hole-1 and 2. The view of the figures are the same as Figures 17 and 21. (a) XRMI images for Hole-1 (206-313 m). (b) BHTV images for Hole-1 (313-334 m). (c) XRMI images for Hole-2 (39-200 m).

(a) XRFI images for Hole-1 (206-313 m)



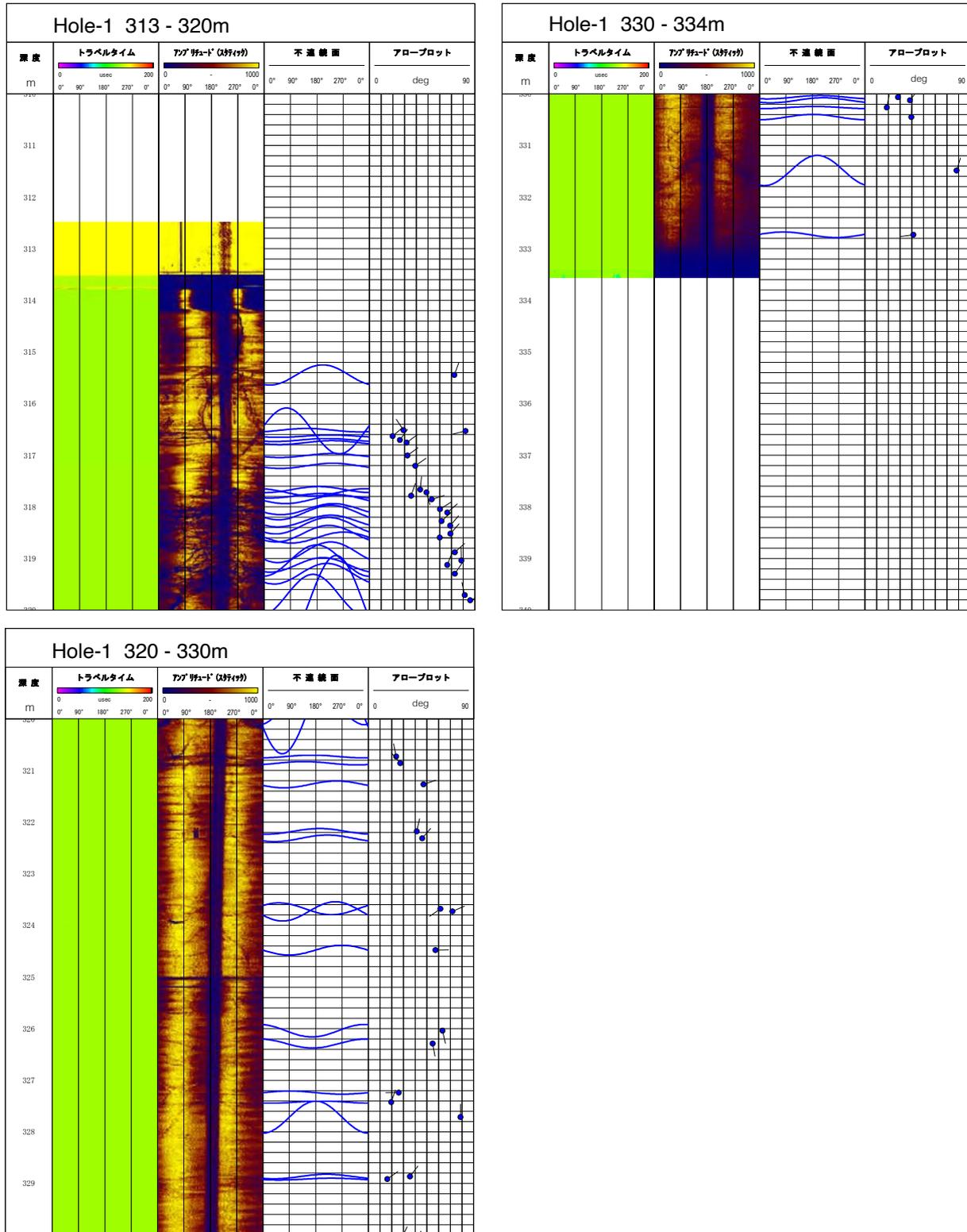
付図 A1. (続き)
Fig. A1. (continued)

(a) XRFI images for Hole-1 (206-313 m)



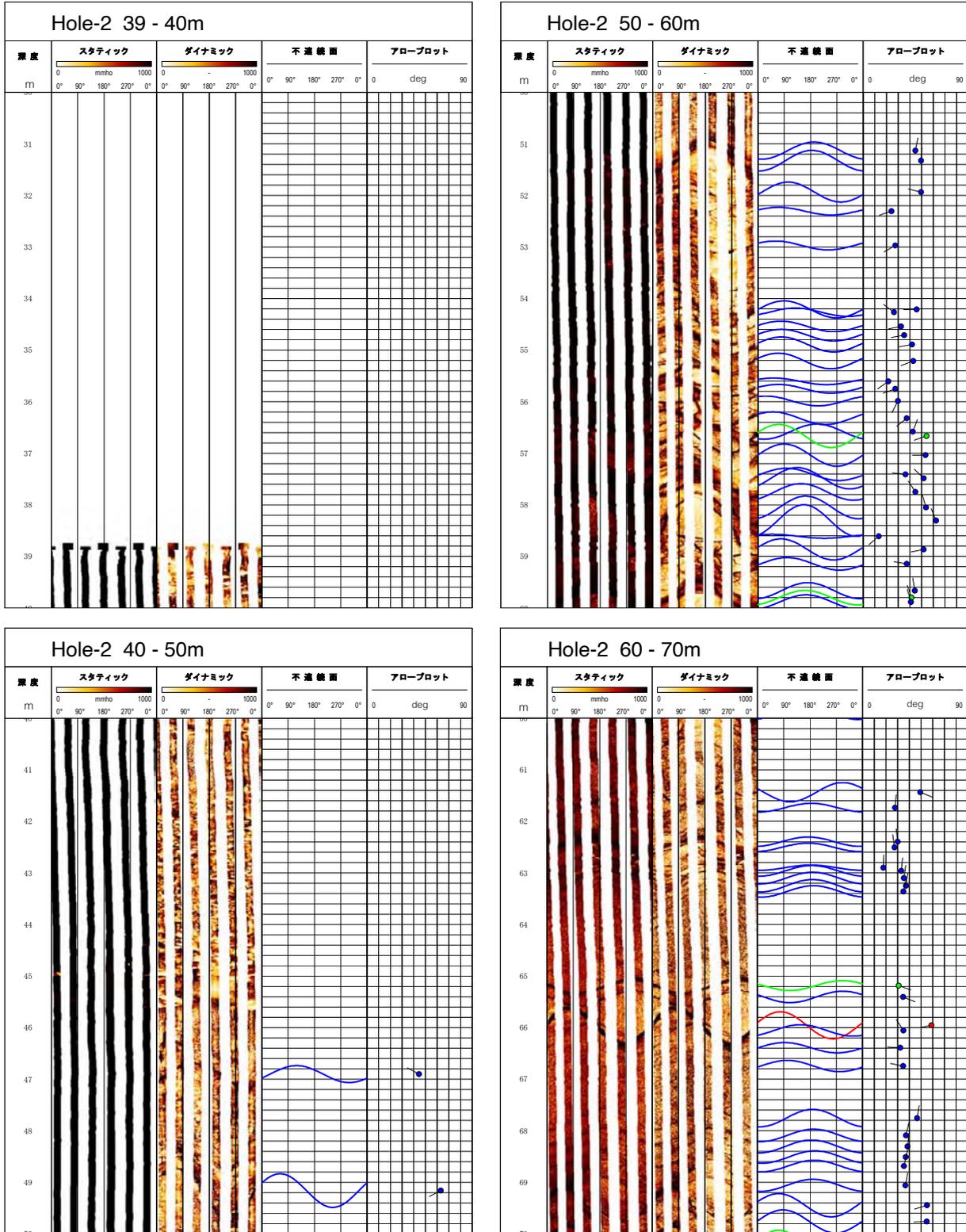
付図 A1. (続き)
Fig. A1. (continued)

(b) BHTV images for Hole-1 (313-334 m)



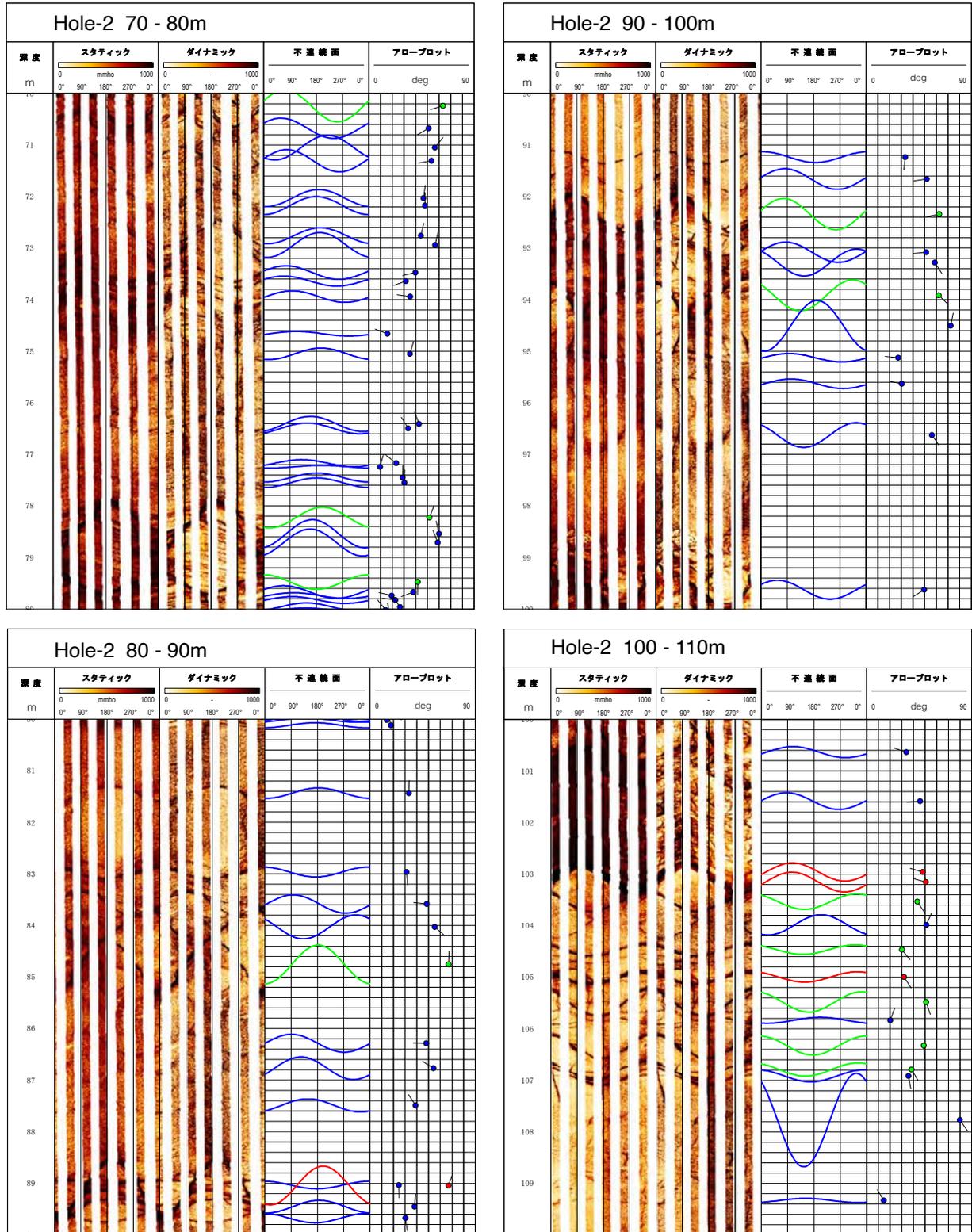
付図 A1. (続き)
Fig. A1. (continued)

(c) XRMI images for Hole-2 (39-200 m)



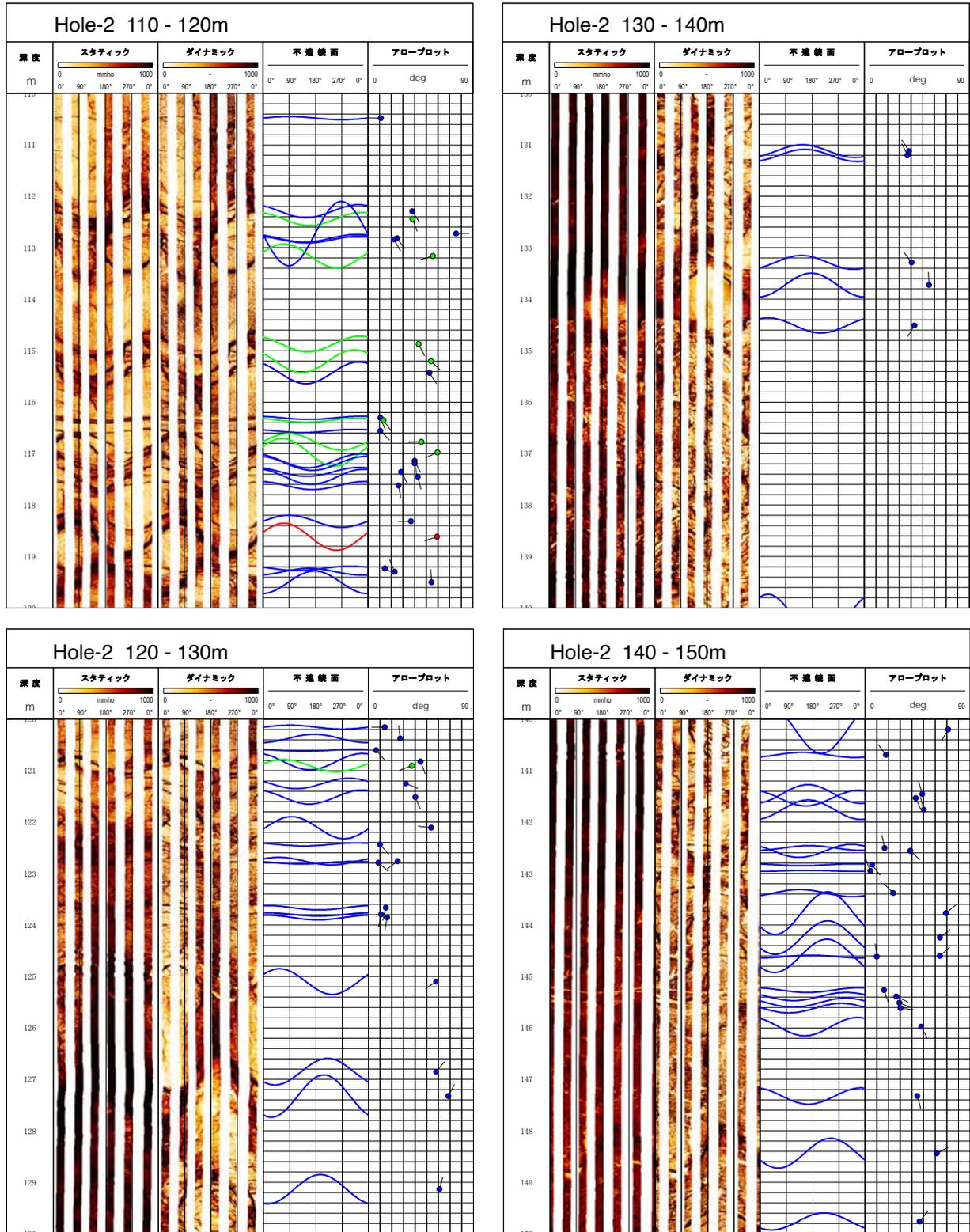
付図 A1. (続き)
Fig. A1. (continued)

(c) XRFI images for Hole-2 (39-200 m)



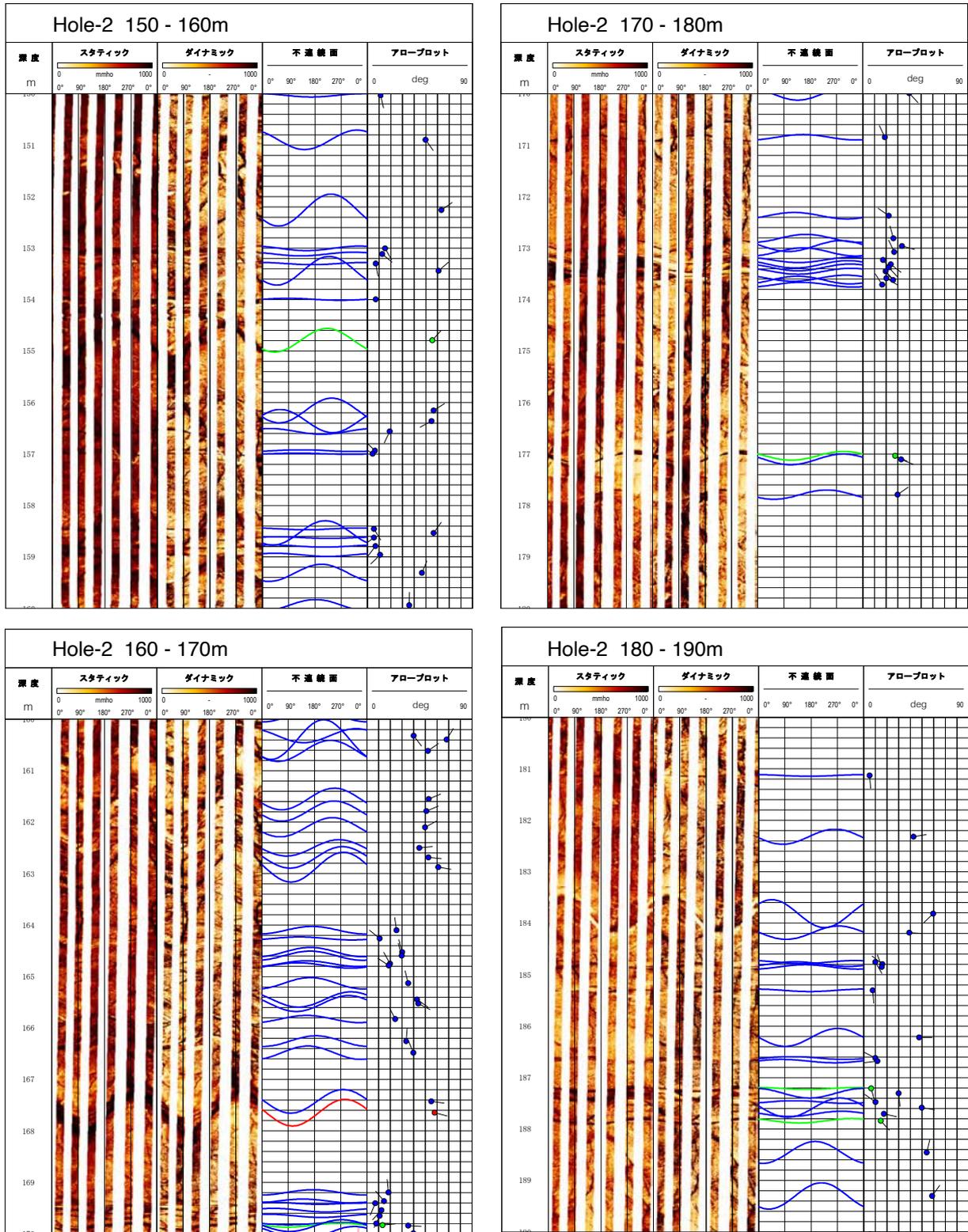
付図 A1. (続き)
Fig. A1. (continued)

(c) XRMI images for Hole-2 (39-200 m)



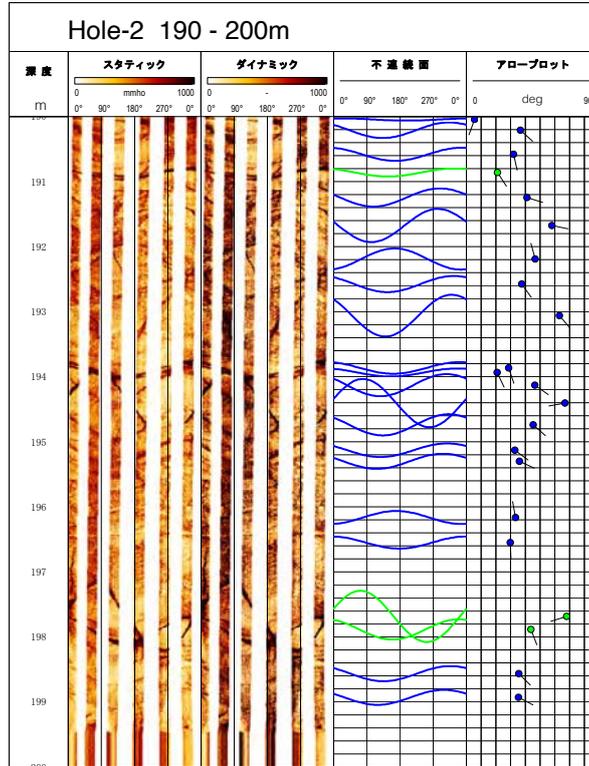
付図 A1. (続き)
Fig. A1. (continued)

(c) XRMI images for Hole-2 (39-200 m)

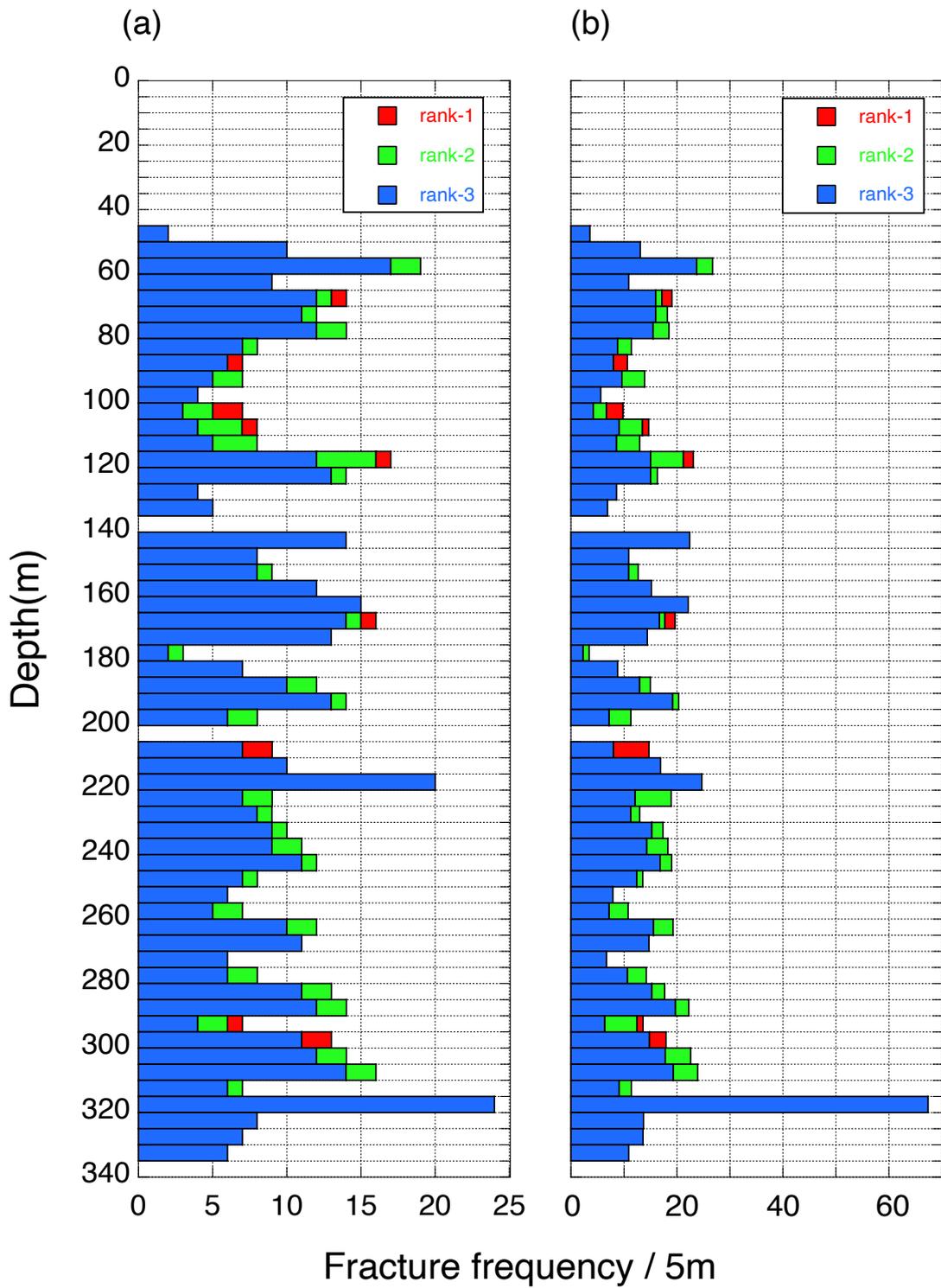


付図 A1. (続き)
Fig. A1. (continued)

(c) XRFI images for Hole-2 (39-200 m)

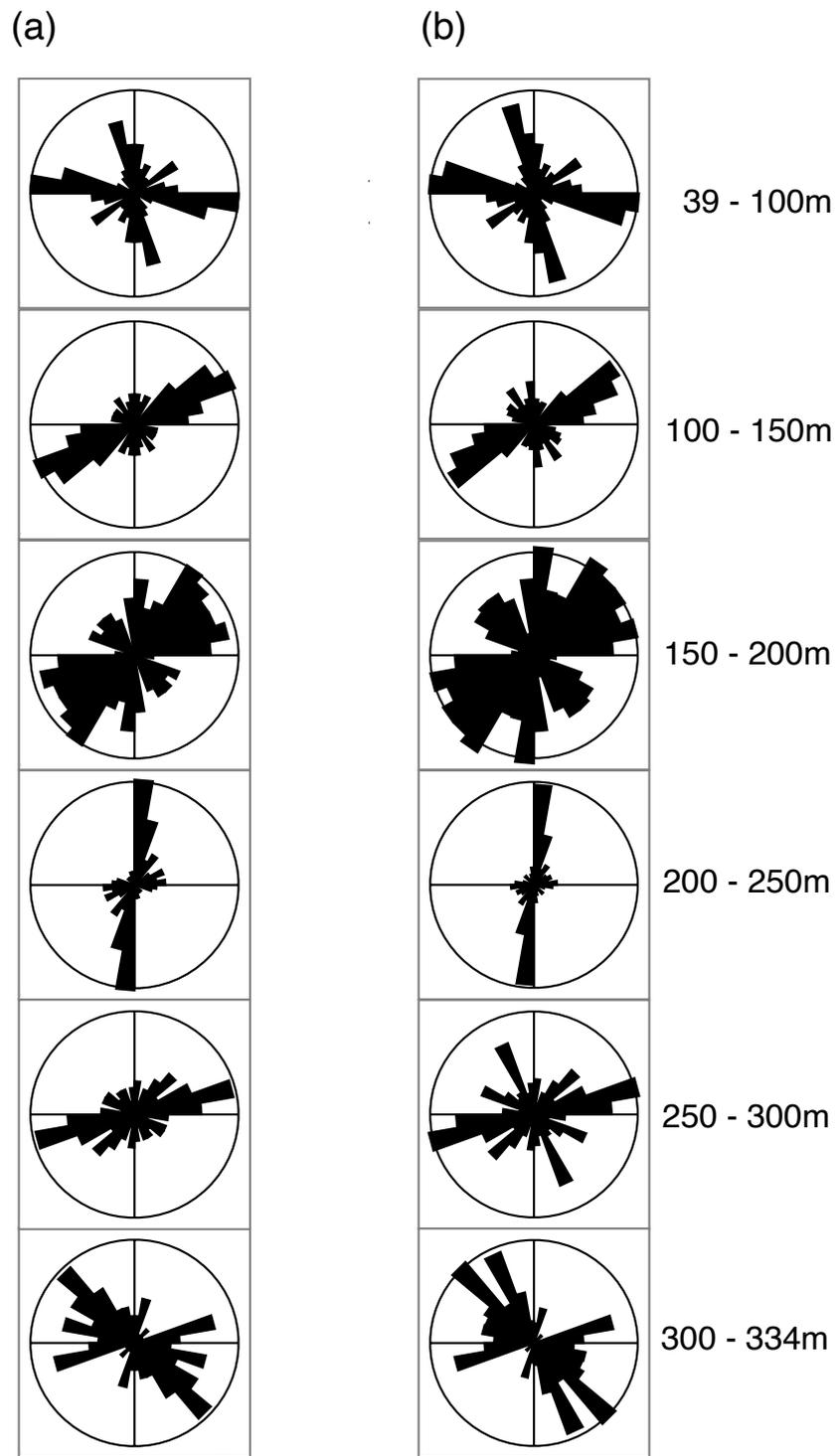


付図 A1. (続き)
Fig. A1. (continued)

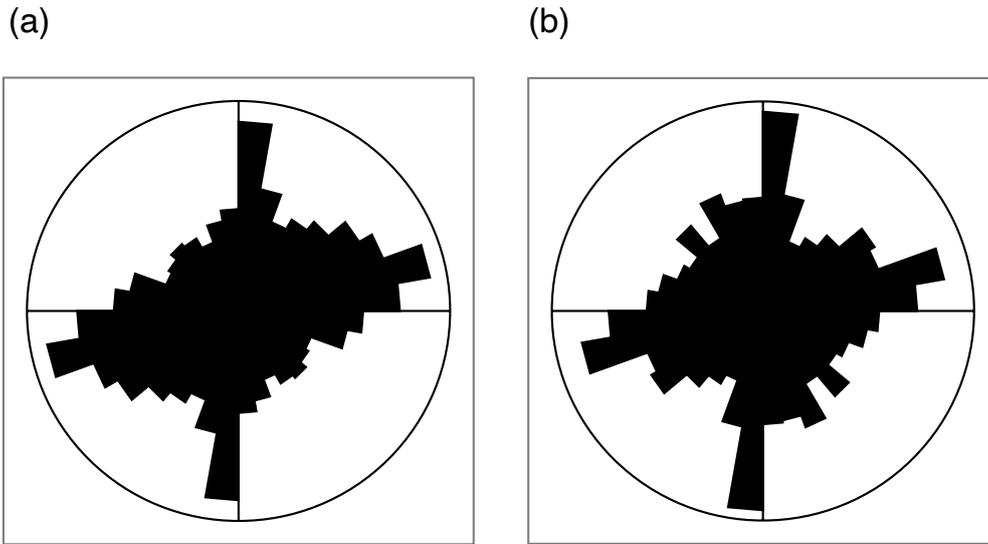


付図 A2. 3 種類の亀裂ランク別の 5 m 間隔の亀裂頻度. 傾斜角の補正前 (a) と補正後 (b) の比較.

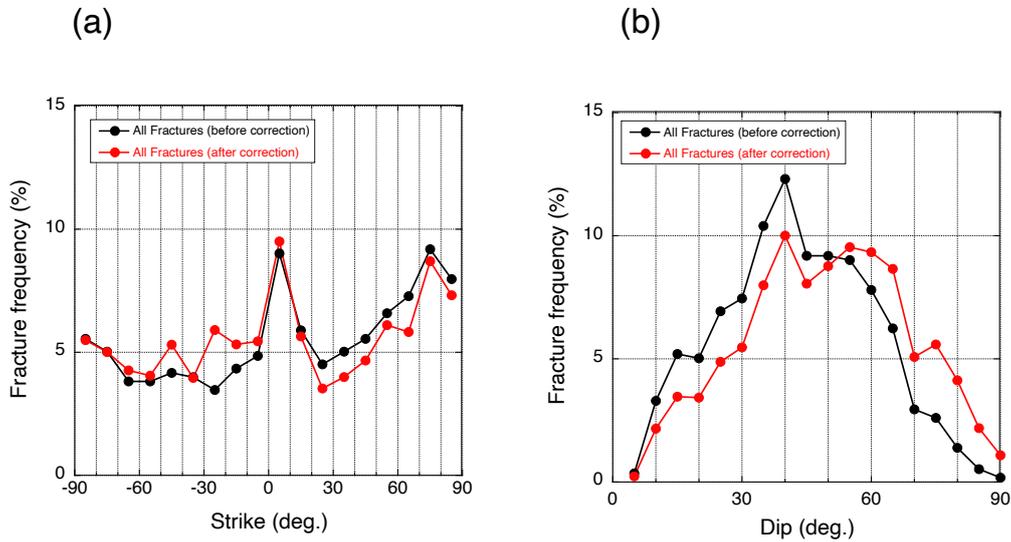
Fig. A2. Frequency of all fractures at 5 m interval for three different fracture ranks (a) before and (b) after applying dip angle correction.



付図 A3. 6 深度区間に分けた全ての亀裂の走向のローズダイアグラム. 傾斜角の補正前 (a) と補正後 (b) の比較.
Fig. A3. Rose diagrams representing a histogram of the strike of all fractures divided into six depth intervals (a) before and (b) after applying dip angle correction.



付図 A4. 全深度の亀裂走向のローズダイアグラム. 傾斜角の補正前 (a) と補正後 (b) の比較.
 Fig. A4. Rose diagram representing a histogram of the strike of fractures at all depths (a) before and (b) after applying dip angle correction.



付図 A5. 全ての亀裂の走向と傾斜角の頻度分布図. 傾斜角の補正前と補正後の比較. (a) 走向. (b) 傾斜角. それぞれの図で, 補正前を黒, 補正後を赤で示す. 縦軸は, 各亀裂の頻度の亀裂頻度総数に対する割合 (%) である. (a) 図の横軸の正の値は, 亀裂の走向が北から時計回りであることを意味する.
 Fig. A5. Frequency distributions of fracture strikes and dip angles for all fractures before and after applying dip angle correction. (a) Strike. (b) Dip angle. In each figure, black circle represents the data before correction, and red one represents the data after correction. The vertical axis denotes the ratio (%) of the frequency of fracture to the total number of fracture frequency. Positive values in the horizontal axis of Fig. (a) indicate the clockwise direction from north.