

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

Overview and analysis of geophysical loggings conducted at 3 boreholes of AIST integrated groundwater observation station in Hidakagawa Town, Wakayama Prefecture, southwestern Japan

木口 努^{*1}・北川有一^{*1}・松本則夫^{*1}

KIGUCHI Tsutomu^{*1}, KITAGAWA Yuichi^{*1} and MATSUMOTO Norio^{*1}

*1 産業技術総合研究所地質調査総合センター 活断層・火山研究部門

*1 Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, GSJ, AIST

キーワード：物理検層、核磁気共鳴検層、電気伝導度検層、透水性。孔壁画像検層、応力方位、Drilling Induced Tensile Fracture (DITF)、地下水等総合観測点、日高川町、南海トラフ

Keyword : geophysical logging, nuclear magnetic resonance logging, fluid electrical conductivity logging, hydraulic conductivity, borehole imaging tool, stress orientation, Drilling Induced Tensile Fracture (DITF), AIST integrated groundwater observation station, Hidakagawa Town, Nankai trough

内容紹介：

産総研が愛知県から紀伊半島及び四国で整備を進める地下水等総合観測点のうち、2021年度に和歌山県日高郡日高川町で整備した日高川和佐観測点において、3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（600m）、孔2（201m）、孔3（33m）の孔井で、合計12種類の物理検層を実施した。それぞれの検層種目の測定方法を説明し、本観測点で得られたデータを示しながら各検層種目の測定と解析結果をまとめた。特に、物理検層データを用いた解析例として、透水性の評価と応力方位の推定について詳細に説明した。

引用例：

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, no. 742, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.

Contents:

We summarized the overview and analysis results of the geophysical loggings conducted in the boreholes drilled at AIST integrated observation station in Hidakagawa Town, Wakayama Prefecture, southwestern Japan. A total of 12 types of logging were carried out in 3 boreholes. The measurement and analysis results for each logging were explained. Especially as examples of analysis using geophysical logging data, we showed the permeability evaluation and the estimation of the stress orientation in detail.

Citation :

KIGUCHI Tsutomu, KITAGAWA Yuichi and MATSUMOTO Norio (2023) Overview and analysis of geophysical loggings conducted at 3 boreholes of AIST integrated groundwater observation station in Hidakagawa Town, Wakayama Prefecture, southwestern Japan. Open-File Report of the Geological Survey of Japan, AIST, no. 742, 47p.

1章 はじめに

南海トラフ沿いの地殻活動のモニタリングの高度化のために、産総研は2006年から、愛知県から紀伊半島及び四国において地下水等総合観測点の整備を順次進めている（小泉, 2013）。2021年度には、和歌山県日高川町地区に17番目の観測点として、日高川和佐観測点を整備した。日高川和佐観測点では、これまでの観測点と同様に、3つの鉛直孔井が掘削された。孔1、孔2、孔3の掘削深度は、それぞれ、600m、201m、33mである。孔1の孔底には、地殻歪と地震を観測するデジタル式地殻活動総合観測装置が設置され、3つの孔井内に水位計・水温計が設置された。また、3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。観測点で物理検層を実施する主な目的は、地下水位・地殻歪・地震を観測する機器を適切に設置する深度を判断することである。例えば、水位観測をするためにストレーナ（スリットのついたケーシング（孔井保護の鋼管））を設置する深度区間は、孔井内の透水性を評価する物理検層の結果を用いて決定している。

本原稿では、日高川和佐観測点で、3孔井の掘削中に実施した物理検層について、実施した種目や測定深度、使用機器、測定方法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それぞれ説明した。その中で、物理検層データを用いた解析例として、孔井内の透水性の評価と応力方位の推定について詳細に取りまとめた。

2章 観測点の地質概要

日高川和佐観測点は、和歌山県日高郡日高川町大字和佐字南山1030番-175に位置する、第1図に本観測点の位置を地質図上に赤丸で示す。観測点の3つの孔井の座標（世界測地系）と標高を第1表に示す。孔井掘削を含む観測点整備工事は、2021年6月23日に現地作業を開始し、2022年3月19日に完了した。

観測点は、日高川町西部の御坊市との境界付近に位置し、北側の千疋山と南側の講山に挟まれた標高50~100mの丘陵地である。周辺の谷地形の特徴から、付近の大局的な地質構造は東西方向であると推測される。

観測点周辺には、四万十帯に分布する後期白亜紀末の付加体である竜神層が分布しており、掘削前に砂岩頁岩互層の孔井地質が予想された。

孔1は、地表から571mまではノンコアで掘削し、571~600mの間ではPQサイズ（外径約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、571mまではカッティングス、571-600mはコアの観察により以下のように整理できる。なお、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。

- ・地表から約4mまで、主に碎石からなる表土および盛土
- ・それ以深は、砂岩泥岩互層であり、全体を通して硬質
- ・約200mまで砂岩頁岩互層（砂岩と頁岩がほぼ等量）で、ガンマ線検層の結果から約30mまでは風化の影響の可能性あり
- ・約200~360mで、等量互層または頁岩優勢互層
- ・約360~400mで、砂岩優勢互層

- ・約 400～450m で、等量互層または頁岩優勢互層
- ・約 450m 以深で、砂岩優勢互層
- ・571m 以深のコアは砂岩優勢の砂岩頁岩互層であり、岩級区分は A～B に相当すると思われる。ただし、粘土化・珪化した凝灰岩層や破碎帯を含む深度がある。

孔 1 のコアの例として、深度 591～593m の区間のコア写真を第 2 図に示す。この深度区間は、デジタル式地殻活動総合観測装置の歪計の水平成分の深度にほぼ対応する。この区間のコアは棒状であり、暗灰色で砂岩優勢の砂岩頁岩互層を示す。

3 章 物理検層の種目と測定方法

日高川和佐観測点では、3 つの孔井毎に、それぞれの掘削段階に応じた必要な物理検層の種目を選択し、合計 12 種類の検層種目を実施した。3 つの孔井で実施した検層種目、測定深度、掘削径、測定日をまとめて第 2 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、透水性を評価するための核磁気共鳴検層や電気伝導度検層、硬質・均質な岩盤を確認するための速度検層や孔壁画像検層などの種目が含まれている。なお、地下水等総合観測点で核磁気共鳴検層と比抵抗式孔壁画像検層を実施したのは本観測点が初めてである。また、観測機器を設置する深度付近の温度環境を確認するための温度検層、孔井を適切に仕上げのために孔井内の情報を得るためのキャリパー検層や方位傾斜連続検層なども実施した。これまでの観測点とは異なり、本観測点では HQ サイズ（外径約 98mm）のコア掘削を行わないので、小孔径の孔井を対象とする物理検層は実施していない。本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種目や結果などについては、木口ほか（2014）が取りまとめている。

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を第 3 表にまとめる。

実施した物理検層の各種目の測定方法や原理などを以下に説明する。

・温度検層

サーミスター式または白金式の温度センサーにより、孔内水の温度を深度方向に連続して測定することから地層の温度を推定する。地層の温度を反映した温度を得るためには孔井を長時間静置する必要がある。地層流体による微細な温度変化から逸湧水層や帯水層などの深度を推測できることがある。

・電気検層

導電性のある孔内水で満たした孔井内で、地層に電流を流して地層の比抵抗を測定する。異なる電極間隔を持つセンサーを用いることで、異なる探査深度（孔壁からの距離）の地層の比抵抗を測定できる。また、本観測点では、地上と孔井内の電極間の電位差を測定する自然電位も同時に測定した。

・キャリパー検層（孔径検層）

孔内ツールに内蔵したモーターにより、地上から測定用アームを開閉できる。測定開始深度でアームを開き孔壁に接触させて、ツールを巻き上げながら孔径変化を連続して測定する。孔壁の亀裂、崩壊や空洞などの深度とその形状を把握でき、また孔径の補正が必要となる物理検層の解析や品質評価にも使用される。

・速度検層（音波検層）

孔内ツールは超音波発振器と異なる距離に複数設置された受振器から構成される。発振器から発振した音波は孔内水を経て孔壁面に到達し、屈折波として孔壁面に沿って伝播する。その後、再び孔内水を経てそれぞれの受振器に到達し測定される。音波の区間走時や振幅等が連続的に記録される。クロスダイポール速度検層では、従来型のモノポール部と低周波発振のダイポール部の2つの異なる測定系から構成される。モノポール部では、モノポール発振子から発生したP波を主に測定する。ダイポール部は、直交する2方向の発振子と同様に直交する8組のピエゾ型受振子で構成され、ダイポール発振子から発生し孔壁を伝搬するFlexural Waveが測定される。Flexural Waveは分散を示さない低周波数領域においてS波とほぼ同じ速度となることから、S波速度を間接的に求めることができる。

・BHTV 検層（超音波式孔壁画像検層、Borehole Televiewer）

流体で満たされた孔井の孔壁を、孔内ツール内の高速回転するトランスデューサーから発振した超音波で走査し、孔壁から反射する超音波を受振する。受振した反射波の走時と振幅を色調変換して、孔壁全周方位の2種類（走時と振幅）の画像を得ることができる。孔内ツールには、ツールの方位・傾斜を調べる3軸加速度・地磁気センサーが含まれ、反射波は、ツール内のデジタル・シグナル・プロセッサによる波形処理後に、収録システムへ伝送される。

・比抵抗式孔壁画像検層（XRMI 検層：eXtended Range Micro Imager）

孔内ツールの開閉式のパッド（フラップ）に埋め込まれた直径約4mmのボタン電極を孔壁に密着させて、孔壁表面の導電率を測定する。導電率に基づいた色調変化（配色）に変換することから孔壁のイメージを出力する。比抵抗値の低下（導電率の増加）に従い、一般に、色調は淡色から濃色に変化させる。本観測点で用いた孔内ツールにはパッドが6本あり、各パッドには電極が合計25個設置されている。孔壁をイメージングできる面積は孔径により変化するが、8-1/2インチのビットで掘削した孔井では約60%の孔壁情報を得ることができる。

・方位傾斜連続検層

3軸の加速度計と磁力計の孔内ツールにより、孔井の方位角と傾斜角を深度方向に連続的に測定する。

・ガンマ線検層（自然ガンマ線検層）

一般に岩石中には天然放射性元素が存在し、それらの崩壊に伴い放射線である自然ガンマ線が放出される。自然ガンマ線を検出するために、ガイガー・ミュラー計数管あるいはヨ

ウ化ナトリウムシンチレータを用い、光電子倍增管により自然ガンマ線を電気信号に変換する。自然ガンマ線量の変化を明らかにすることから、地層の同定や対比などが可能となる。スペクトルガンマ線検層の場合は、地層中に存在するカリウム、トリウム、ウラニウムの比率の測定が可能である。

・電気伝導度検層

孔内ツールは流体伝導度センサーと温度センサーから構成され、電気伝導度と温度を深度方向に連続的に測定することにより、地層からの湧水（あるいは逸水）の深度を求めたり、地層の透水性を評価する。透水性を評価するための標準的な測定手順は、測定前に孔内水を脱イオン水などに置換し、揚水により段階的に水頭を下げながら、繰り返し測定することである。

・核磁気共鳴検層

多孔質な地層中の孔隙にある水分子の水素原子核を孔内ツールの永久磁石で磁化し、さらに 1MHz 程度の高周波の照射により励起した核スピンの、照射停止後に熱平衡状態に回帰する過程（緩和過程）をツールのコイルで計測する。この緩和過程をインバージョンして緩和時間 T2 の分布を得ることにより、その振幅から孔隙率を求め、緩和時間の長短の分布から孔隙のサイズや孔隙に含まれる可動性流体の分布率を求めることができる。また、T2 分布の結果に解析モデルを適用することにより透水係数が得られる。このようにして、深度方向に連続して、孔隙率や可動性流体の分布、透水係数を求め、透水性を評価する。測定原理や解析について、中島（2008）や寺部・下川（2012）などが詳しく説明している。

・密度検層

孔内ツールに装着した線源（セシウム 137 : 137Cs）から地層に照射されたガンマ線は、地層中の原子の電子や原子核と衝突し核反応により減衰する。検出機に到達したガンマ線の強度から地層の見掛け密度を連続的に求める手法である。測定時は、泥壁と孔内泥水による減衰の影響を小さくするために、デセントライザーで地層に線源と検出器を直接接触させることが必要である。

・セメントボンド検層

孔井掘削後に挿入した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、セメンチングした後、速度検層と同様な音波の測定を行う。セメンチングが良好な場合には、音波の振幅は著しく減衰する。一方、セメンチングが不良の場合は減衰量が小さくなる。

第 4 章 解析結果

4.1 物理検層結果の概要

3 孔井で予定した各種の物理検層は、当初の仕様通りに実施した。孔 1 の裸孔で実施し

た 600m までの検層結果を全て表示した物理検層総合柱状図を第 3 図に示す。また、深度方向に拡大した総合柱状図を第 4 図に示す。孔 2 と孔 3 の物理検層総合柱状図も、それぞれ、第 5 図、第 6 図に示す。

孔 1 で各種の物理検層により得られた結果の概要を下記にまとめる。なお、核磁気共鳴検層、電気伝導度検層、孔壁画像検層 (XRMI) と速度検層のストンレー波の解析については、本章の 4.2 以下で詳しく説明する。

・温度検層

第 7 図に温度検層の結果を示す。3 回の掘削段階で、それぞれ 2 回繰り返して測定した温度を重ねて表示した。2 回の繰り返し測定は、検層実施初日の最初と検層実施最終日の最初に測定した。原則として、測定の約 12 時間以上前に泥水循環などの孔井内作業を停止した。深くなるに従い温度は上昇し、深度 600m で約 33 度であり、地温勾配は約 0.03°C/m である。地層から孔井内への湧水や孔井内から地層への逸水がある場合などに期待される、局所的で顕著な温度の変化は見られない。

・電気検層

第 8 図に電気検層から求めた比抵抗と自然電位の結果を示す。比抵抗では、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とロングノルマル比抵抗の 2 種類の結果を重ねて示す。ロングノルマルの方が探査深度が深くなり孔壁からより離れた距離の地層の情報を得られるが、深度方向の分解能が低下する。571m までの全体的な比抵抗の傾向として、深度 201~470m の高比抵抗区間と 470m 以深の低比抵抗区間に分けられるように見える。それぞれの区間が、頁岩優勢層、砂岩優勢層の地質に対応する可能性がある。298m、406m、456m 付近などのいくつかの深度で見られる、局所的な低比抵抗の変化は、カッティングスで確認された凝灰岩や粘土による影響かもしれない。自然電位は、局所的に低比抵抗を示す深度にほぼ対応して低い値を示す傾向がある。

・キャリパー検層

第 9 図にキャリパー検層から求めた孔径値を示す。571m 以浅は 3 方向、571m 以深は 2 方向の孔径を測定しており、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記入した。201m 以深について、約 430m までの区間では、299m、323m、389m などと相対的に大きく孔径が拡大し、全体として深度ビットサイズより 10~20mm 程度孔径が拡大する傾向である。一方、430~530m の区間では、孔径の拡大はそれ以浅よりも小さく、また孔径の拡大がほとんど見られない深度区間もある。全深度を通じて、30mm を超えるような大きく孔径が拡大する深度は見られない。

・速度検層

第 10 図に速度検層により求めた P 波速度 V_p と S 波速度 V_s の結果を示す。 V_p が 4km/s 以上となる深度区間が多く、これらの深度は硬岩と推測できる。220m 以深では一部の区間を除いて 4.5km/s 以上の深度が連続する傾向であり、特に 560~600m では 5km/s 程度を示す高速度区間である。 V_p の平均値は、220m 以浅で 4.17km/s、220m 以深で 4.52km/s である。なお、560~600m 区間の平均値は 4.84km/s である。

Vs は、大局的には Vp と同様に、220m 以深でそれ以浅よりも高速度となる傾向であり、220m 以浅と以深の平均速度は、それぞれ、1.88km/s、2.13km/s である。

Vp が低速度を示す区間として、260m 付近、320~340m 付近、320~340m 付近、410m 付近、460m 付近、500~510m 付近などがあるが、これらの区間では、Vs も低下を示す傾向が見られる。さらに、これらの区間では、Vp の低下に対応して、電気検層による低比抵抗と自然電位の低下、密度検層による低密度、核磁気共鳴検層による孔隙率の上昇などの変化が見られる。

・密度検層

第 11 図に密度検層から求めた密度の結果を示す。全深度を通じて、密度の上限値は約 2.7g/cm³、下限値は約 2.4g/cm³ であり、平均値は 2.63g/cm³ である。他の検層データが変化する深度とのほぼ対応して密度の値が整合的に変化するため、密度検層の結果は全体として信頼性があると考えられる。しかし、孔径が拡大している区間では、検層ツールが孔壁に密着せずに泥水の影響を受け、密度値が実際よりも低く測定されている可能性がある。

・セメントボンド検層

第 12 図にセメントボンド検層の結果を示す。第 12 図では、左の列から順に、ケーシングの設置深度、深度、自然ガンマ線と受振波形のトラベルタイム (TT) の値、受振波形の振幅値 (AMP) と 5 倍した振幅値、受振波形の VDL 表示 (Variable Density Log)、セメント膠着度をそれぞれ示す。孔 1 のストレーナは深度 378.1~388.4m に設置しており、ストレーナ区間を含む 368.0~395.4m は砂利を、355.8~368.0m の区間に粘土をそれぞれ入れている。砂利と粘土の区間 (355.8~395.4m) はセメンチングしていないため、音波は膠着していないケーシングを伝播するので減衰が小さくなり、図中の振幅は約 60mV と大きな値を示す。VDL の波形でもケーシングを伝播する大きな振幅が認められる。深度 10~320m 間は、減衰が大きく振幅が 10~35mV と小さいので、ケーシング、セメント、地層がほぼ一体となり音波が伝播していると考えられ、セメント膠着度はやや良好であると評価した。セメンチングをしたが相対的に大きい振幅を示す 320~355.8m の区間については、その直下に入れた粘土がセメントと混ざりゲル状になった可能性があり、膠着度をやや不良と評価した。395.4m 以深は、振幅値が 18~45mV であり、膠着度はやや良好の評価である。

4.2 物理検層による透水性評価

日高川和佐観測点以前に整備した 16 の観測点において、孔井掘削時に、電気伝導度検層、速度検層 (ストンレー波解析) とハイドロフォン VSP を実施しており、孔井内の透水性を深度方向に連続的に評価している。これらの測定により 16 観測点の各 3 孔井で、孔井を横切る透水性亀裂の深度を決定し、孔壁画像からその亀裂の向きを求めることにより、木口・桑原 (2018, 2019, 2021a) は、透水性亀裂の向きと水圧破碎法などから求めた応力場との関係などの解析結果を取りまとめている。また、木口・桑原 (2021b) は、観測点で実施した電気伝導度検層、速度検層 (ストンレー波解析)、ハイドロフォン VSP の適用事例を整理しており、電気伝導度検層を中心に、標準的な測定手順が現地で制約される場合にデータ品質や解析に与える影響や制約がある場合への対応策などを説明している。ここでは、透水

性評価のために本観測点で実施した、核磁気共鳴検層、電気伝導度検層と速度検層のストレーナ波解析の結果をまとめる。

4.2.1 孔1と孔2の核磁気共鳴検層

本観測点の孔1と孔2では、孔井内の透水性を評価し、水位観測のためのストレーナ設置深度区間を決定するために、核磁気共鳴検層を実施した。実施した深度は、孔1の201～571m区間と孔2の30～201m区間である。

核磁気共鳴検層は、石油・天然ガスなどの資源開発の分野を中心に、貯留層などを対象に透水性を評価するために適用されているが、従来は、大型ツールや専用システムの使用、海外のエンジニアの動員などが必要であり、また費用が高額であることなどから、これまでの地下水等総合観測点の掘削孔井では使用していなかった。しかし、最近の技術開発により測定ツールの小型軽量化や操作性の向上などが進んだため、本観測点への適用が可能となった。また、本観測点の予想地質や掘削仕様などから、孔1と孔2で電気伝導度検層を実施する場合には、孔内水の置換や水頭低下などの標準的な測定手順が制限されることが予想されたので、電気伝導度検層よりも核磁気共鳴検層の方が、本観測点の透水性評価に有効であると判断した。その結果、孔1と孔2では核磁気共鳴検層を実施し、電気伝導度検層は実施しなかった。ここでは孔1における核磁気共鳴検層の結果を中心に説明する。

核磁気共鳴検層の結果から、地層中の孔隙率、孔隙に含まれる可動性流体の分布率と透水係数を深度方向に連続的に得ることができた。孔1の結果を第13図に示す。図中の左列は緩和時間T2の分布を示しており、緩和時間が長い右側に振幅があると大きなサイズの孔隙が存在することを意味する。本図では相対的に大きな振幅が緩和時間の短い左側に多く存在しており、孔井全体の傾向として孔隙サイズは小さいと推測できる。中央の列の実線は絶対孔隙率 (Total Porosity: その深度に存在する異なるサイズの孔隙の総和) の分布を示す。多くの深度で0.05程度であり0.1を超える深度は少なく、孔隙率は小さい傾向である。中央の列の色分けは、孔隙に含まれる流体の可動性による分類を表し、本図で多く分布する濃茶色は粘土拘束水と呼ばれる粘土鉱物の格子に含まれる水に該当し、移動(流動)しないことを意味する。次に多く分布する黄緑色の毛細管拘束水も、粒子間などの狭い隙間に毛細管現象により拘束されており、地層中の流体移動にはほとんど寄与しないと考えられる。図中で僅かに見える水色が自由流体であり可動流体として地層の透水性に関与できる流体である。これらの流体分布を見ると、可動流体が存在する深度は限定的であり、またその量も少ないことから孔井全体として透水性が低いと予想される。右列はT2分布を用い、2つの解析モデルを適用して算出した透水係数である。ここで用いたTIM (Timur Coates) モデルとSDR (Schlumberger-Doll Research) モデルは、経験的に、それぞれ、高透水ゾーン、低透水ゾーンへの適用が良好であると考えられている。本観測点では全深度を通じて低い透水性と推測できることから、以降で使用する透水係数は、SDRモデルによる値である。図中の黒線で示すSDRモデルによる透水係数は、最大でも $1E-8$ (m/s) 以下、つまり標準的な水を仮定すると約1mdarcyよりも小さい値であり、また大部分の深度で $1E-10$ (m/s) 以下であることから孔井全体は低透水性と言える。

孔1のストレーナを設置する深度区間を決定する際に、まず区間長を約10mとすることとしたので、核磁気共鳴検層の結果から10m区間における透水性が相対的に大きい深度区間を求める方針として、SDRモデルにより0.1mごとに得られた透水係数の10m深度区間の

移動平均を求めた。移動平均した透水係数の値を第 14 図に示す。移動平均の透水係数も絶対値として低く、最大でも $1\text{E-}9$ (m/s) 以下であり、多くの深度は $1\text{E-}10$ (m/s) 以下である。水位観測する深度は 300m 以深が望ましいと考えたので、第 14 図において 10m 程度の深度区間で相対的に高い透水係数を示す 379~386m の区間が水位観測に適すると判断し、ストレーナ設置区間を 378.1~388.3m に決定した。移動平均を取る前の透水係数においても、383m を中心として約 4m の区間で $1\text{E-}9$ (m/s) 以上の相対的に大きい値を示すことが第 13 図からわかる。第 13 図と第 14 図にストレーナ設置区間を青線で示す。

ストレーナ設置区間で核磁気共鳴検層により 0.1m 間隔で得られた透水係数を用いて、ストレーナの約 10m 区間の透水量係数を求めると、 $5.91\text{E-}9$ (m^2/s) となる。なお、孔 1 ではストレーナを設置した後に揚水試験を実施している。連続揚水試験の後の回復試験での水位回復のデータを用いて、ストレーナ区間の透水量係数を暫定的に算出した結果は、 $2.77\text{E-}7$ (m^2/s) である。検層実施時と揚水試験時では、ストレーナの有無や孔内洗浄による孔壁近傍の地層透水性の変化などにより測定条件が異なるが、両者から求めた透水量係数をそのまま比較すると、揚水試験による結果の方が約 47 倍大きい透水性を示す。

孔 2 の核磁気共鳴検層の結果を第 15 図に示す。孔 1 と同様に、T2 分布から孔隙サイズは小さく、流体分布から絶対孔隙率は小さく可動流体は少なく、また SDR モデルから得られた透水係数は最大でも $3. \text{E-}10$ (m/s) (約 0.03mdarcy) 程度であり孔井全体として低透水性であることがわかる。ストレーナ設置区間を決めるために、孔 1 と同じく、10m 区間の移動平均の透水係数を求めた結果、100m 以深では、161~164m の区間で最大の値を示した (第 16 図)。従って、ストレーナ設置区間として、この区間を含むように、155.8~166.1m と決定した、第 15 図と第 16 図にストレーナ設置区間を青線で示す。なお、孔 2 のストレーナ区間で得られた透水係数から求めた透水量係数は、 $3.08\text{E-}10$ (m^2/s) である。孔 1 のストレーナ区間内の透水量係数と比べると約 1/20 であり孔 1 よりも小さい。また、孔 2 の揚水試験から暫定的に求めた透水量係数は $1.18\text{E-}7$ (m^2/s) であり、揚水試験による結果の方が約 380 倍大きい透水性を示す。核磁気共鳴検層から求めた透水量係数が揚水試験による暫定的な結果と大きく異なる原因は明らかでないが、測定時の孔井内環境が異なることや解析対象・原理の違いなどによる影響があるかもしれない。

4.2.2 孔 3 の電気伝導度検層

孔 3 では電気伝導度検層を実施し、透水性の評価を試みた。電気伝導度検層を実施する際に、測定前に孔内水を掘削泥水から脱イオン水に置換し、水頭を低下させながら、繰り返し測定とする透水性評価のための標準的な手順 (木口・桑原, 2021b) を採用している。電気伝導度検層では微小な伝導度の変化を検出できるように孔井内の体積を小さくすることが望ましく、小孔径 (掘削径 98mm など) の孔井が適しているが、孔 3 は大孔径 (掘削径約 270mm) の孔井である。このため、大孔径の孔井という点で制限された (望ましくない) 条件で測定したことになる。

5 回の繰り返し測定を行い、測定時の水頭と経過時間は以下の通りである。

1 回目 水頭：管頭まで満水

2 回目 水頭：GL -3.0m 1 回目からの経過時間：約 55 分

3 回目 水頭：GL -3.0m 1 回目からの経過時間：約 1 時間 30 分

4 回目 水頭 : GL -7.7m 1 回目からの経過時間 : 約 2 時間

5 回目 水頭 : GL -10.5m 1 回目からの経過時間 : 約 3 時間 30 分

5 回目の測定以降に、さらに水頭を低下させ繰り返して測定することは、10m 以浅の盛土や風化層の孔壁が崩壊する可能性が大きくなり検層ツールの抑留などの危険が高くなると現地で判断して、5 回までの測定で終了とした。

繰り返し測定した電気伝導検層の結果を色分けして、第 17 図に示す。5 回の測定とも、電気伝導度は深くなるに従い低下する傾向を示し、孔底付近を除いて局所的な顕著な変動を示さない。孔底付近で電気伝導度が急激に高い値を示すことは、置換されなかった掘削泥水の成分が孔底付近に沈澱しているためと考えられる。また、測定を繰り返すうちに、孔井全体の電気伝導度が高くなることを示すが、この変化は孔底や孔壁に残った掘削泥水の成分が孔内水に徐々に拡散する影響によるものと推測できる。

各測定において、微小な変動をいくつかの深度で示すが、その変動はノイズレベルと比べて優位に大きな値ではなく、また、繰り返し測定において同じ深度でその変動を示す再現性を確認できない。従って、本測定では、地層水の流入による電気伝導度の変化は認められないと判断し、高い透水性を示す深度を決められなかった。

この結果から、孔 3 は透水性亀裂や透水ゾーンが存在せず、全体として低透水性であると推測できる。しかし、もし孔 3 が小孔径の孔井であれば、微細な電気伝導度の変化を確認し、微量の地層水が流入する深度を検出できたかもしれない。

孔 3 のストレーナ深度を設置するために、電気伝導度検層以外の検層の測定データの検討を行った。しかし、速度検層のストレーン波解析では透水性亀裂を顕著に示唆する深度は得られず、また地層水の存在と関係する可能性がある低比抵抗や低速度の明瞭な変化は見られず、温度検層の結果でも局所的な変化を確認できなかった。そのため、キャリパー検層で孔径の拡大を示し、孔壁画像検層により比較的明瞭な形状の亀裂を確認できた深度 17.6 ~ 19.0m を水位観測の対象とすることに決定し、ストレーナを 15.7 ~ 25.9m の区間に設置した。

4.2.3 速度検層のストレーン波解析

速度検層では孔壁（地層）を伝播する P 波や S 波の波形が得られるが、孔井内の境界波であるストレーン波の波形も測定可能である。モノポール震源から発生するストレーン波は孔井を横切る透水性亀裂や透水ゾーンが存在すると、その深度で反射・減衰・速度低下の変化を示す（例えば、Winkler *et al.*, 1989; Tang *et al.*, 1991）。これらの特徴的な波形を検出することから、ストレーン波を用いて透水性亀裂や透水ゾーンが存在する深度を求め、深度方向に連続的に透水性を評価できる。

本観測点の 3 つの孔井で、ストレーン波に注目した速度検層データの処理と解析を実施したが、ここでは孔 1 の 201 ~ 571m 区間の結果について説明する。ストレーン波を対象とした解析結果を第 18 図に示す。図の左列は各深度の受振波形の相対的振幅値を色で表示しており、白色または薄い色で示される深度では波形が減衰し振幅が小さいことを意味する。右列は周波数スペクトラムを示しており、左列で減衰を示す深度において全ての周波数で赤紫色を示して、全周波数で減衰し振幅が小さいことがわかる。

透水性亀裂などが存在する深度において見られるストレーン波の波形の特徴のうち、こ

ここでは減衰を取り上げて、第 18 図から明瞭な減衰を示す深度を検出すると、222m、250m、260m、300m、322m、335m、376m、383m、406m、458m、505m、556m である。これらの深度は、相対的に高い透水性が期待されるが、ストーンレー波は透水ゾーンや透水性亀裂の存在以外に、透水性とは関係のない地層境界などの岩盤の弾性定数が変化する深度や孔径が変化する深度などでも減衰や反射を示す可能性があるため、上記の深度の透水性を評価するときには他の測定データと比較するなどの検討が必要である。核磁気共鳴検層から相対的に高い透水性を示すとした孔 1 の深度区間 379~386m は、上記の 383m のストーンレー波の減衰深度と対応する。

4.3 孔壁画像を用いた応力方位の推定

掘削孔井を利用した応力場の解析はこれまでの観測点でも実施している。例えば、パッカーにより密閉した孔井区間内に水圧を加えて孔壁面に亀裂を生成する水圧破砕法（例えば、Haimson and Cornet, 2003）を適用して、6 観測点で、各孔井の複数の深度において最大水平圧縮応力の方位と最大および最小水平圧縮応力の値を求めている（Sato *et al.*, 2013; 木口・桑原, 2021a）。また、Sato *et al.* (2013) は、孔壁画像に見られるボアホールブレイクアウト（例えば、Zoback *et al.*, 1985）の孔壁崩壊などの方位分布から、11 観測点の応力方位を推定している。掘削孔井から回収した直後のコアの非弾性的なひずみの回復を現地で計測して応力測定する手法である ASR 法（非弾性ひずみ回復法）（例えば、Matsuki and Takeuchi, 1993）も適用しており、Lin *et al.* (2016) は新居浜黒島観測点のコアを用いて応力方位を推定した。さらに、木口ほか (2017) は、応力方位を直接測定する手法ではないが、各観測点に設置された孔井内歪計で観測される長期トレンドを解析して最大水平主歪方位を求め、他の手法で得られた応力方位と比較した。

本観測点の孔 1 の深度 571m 以浅と孔 2、孔 3 では XRMI 検層、孔 1 の 571~600m 以深では BHTV によって、それぞれ孔壁画像が得られているため、孔壁画像の観察から応力方位の情報を得ることを試みた。その結果、掘削により誘発されて生成した Drilling Induced Tensile Fracture（以下、DITF とする）の縦型亀裂が認められたので、DITF が分布する方位から推定した応力方位について以下に説明する。なお、ボアホールブレイクアウトの孔壁崩壊は全深度で見られなかった。

DITF とボアホールブレイクアウトは、ともに孔井掘削時に自然に発生する孔壁の破壊現象であり、水圧破砕法などの能動的な測定とは異なる。DITF は孔壁面に発生する引張り破壊により発生し、一方、ボアホールブレイクアウトは圧縮破壊により発生する。DITF は、水平面内で差応力がある岩盤を掘削するとき、比重の大きい掘削泥水の使用などにより孔内水の圧力が孔壁面の引張り破壊強度を超えると発生する水圧破砕亀裂である（例えば、Brudy and Zoback, 1999; 山本, 2007; 横山, 2017）。泥水循環の影響も考慮した孔内圧力や岩盤の応力などのその深度での条件により、DITF が発生するか否かが決まる。1 つの主応力軸が鉛直方向であると仮定すると、最大水平圧縮応力の方向に DITF が発生するので、DITF の向きが応力方位となる。原理的に、DITF は孔壁面上で、方位 180° 離れた 2 つの方向に発生する。

本観測点の孔壁画像では縦型亀裂と思われる亀裂がいくつかの深度で見られ、その形状は必ずしも直線でなく、細かく曲折しながら全体としては一定の方向に伸展したり、一部不

連続となる箇所も含めて雁行状に配列するなどの特徴が認められる。これらの中には、亀裂の長さが短かったり、約 180° 離れた方位に 2 つの亀裂を確認できない場合などがある。このような縦型亀裂は DITF である可能性があるが、DITF とする信頼性は低いと考える。そのため、本原稿では、長さ約 1m 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と、同一深度で約 180° 離れた方位に 2 つの縦型亀裂が認められることの 2 つの条件を満たす亀裂を DITF とした。その結果 DITF を 6 深度で目視により検出した。6 深度の DITF 付近の孔壁画像を第 19 図に示す。第 19 図では、XRMI 検層の異なる出力処理による 2 通りの画像を並べて表示している。左側の Static 画像は、測定区間全域 (370m 長) において同一のカラースケールを用いて出力しており、一方、右側の Dynamic 画像は、深度 0.1m 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ており、高いコントラストにより微細な変化の確認が可能である。なお、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。

6 深度で得られた DITF の 2 つの方位を第 4 表にまとめ、第 20 図に DITF の方位分布をローズダイアグラムで示す。DITF は必ずしも孔軸方向に平行な直線とならず、曲折したり孔軸にやや斜交する場合があるが、DITF が各深度区間で存在する平均的な方位をここでは求めた。方向統計学に従って平均合成ベクトル長を用いて、6 深度の DITF の方位の平均値と標準偏差を求めると、

方位 1 平均値 101.4° 標準偏差 14.1°

方位 2 平均値 279.7° 標準偏差 14.3°

である。なお、方位は真北から時計回りの角度である。

上記 6 深度の結果から、深度によってばらつきがあるが、DITF の方位から推定した応力方位はおおよそ東西方向に分布し、6 深度の平均値を用いると約 N100° E - N280° E となる。

今回求めた応力方位と、他の手法を用いて本観測点の周辺で得られた応力場の結果とを比較する。本観測点の北、約 20km 離れた和歌山県内において、深度 385m で応力解放法により測定された結果では、最大水平圧縮応力の方位は N275° E であった (Tanaka, 1986)。掘削孔井を用いて得られた 2 つの地点の応力方位は、ともにおよそ東西方向であり整合する結果である。また、掘削孔井よりも深い深度を対象とするが、20km より浅い地殻浅部の地震メカニズム解から Uchide *et al.* (2022) が求めた日本列島のストレスマップによると、和歌山県の北部～中部一帯の最大水平圧縮応力の方位は、東西方向、あるいは東南東～西北西の向きを示す。この向きは DITF から求めた応力方位と整合する。本観測点の位置で、DITF を確認した深度 (約 130～380m) とそれよりも深い地震発生域の深度において、ともに同じ応力方位が得られたことは興味深い。なお、フィリピン海プレートが南海トラフ付近で沈み込む方向である N55° W (Miyazaki and Heki, 2001) と比較すると、応力方位は斜交する向きである。

第 5 章 まとめ

産総研が愛知県から紀伊半島及び四国で整備を進める地下水等総合観測点のうち、2021 年度に和歌山県日高郡日高川町で整備した日高川和佐観測点において、3 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 (600m)、孔 2 (201m)、孔 3 (33m) の孔井毎に、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物理検層の種目を選択し、合計 12 種類の物理検層を実施した。それぞれの検層種目の測定方法を説明し、本観測点で得られたデータを示しながら各検層種目の測定と解析の結果をまとめた。特に、物理検層データを用いた解析例として、透水性の評価と応力方位の推定について詳細に説明した。透水性評価では、孔 1 と 2 で実施した核磁気共鳴検層により、0.1m の深度間隔で孔隙率、流体分布や透水係数を求めた結果、最大の透水係数が $1E-8$ (m/s) よりも小さく、孔井全体が低透水性であることがわかった。その中でも相対的に高い透水性を示す深度を検出して、水位観測のためのストレーナの設置深度を決定できた。孔 3 では電気伝導度検層を標準的な測定手順に従って実施したが、地層水の流入と関係する電気伝導度の変化は見られず、高い透水性を示す深度はなかった。また、速度検層で得たストレー波の減衰を用いた透水性評価の結果を示した。応力方位の解析では、XRMI 検層により得た孔壁画像を観察し、掘削中に引張り破壊により生成された DITF の縦型亀裂を検出することにより、本観測点の応力方位はおよそ東西方向の約 $N100^{\circ} E - N280^{\circ} E$ であると推測した。この方位は、約 20km 離れた地点の応力解放法による孔井内測定、及び和歌山県北部・中部の 20km 以浅の地震のメカニズム解からそれぞれ求められた応力方位と整合する。

謝辞

日高川和佐観測点の 3 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。日高川町役場、地元自治会や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。多くの関係者の方々に感謝いたします。

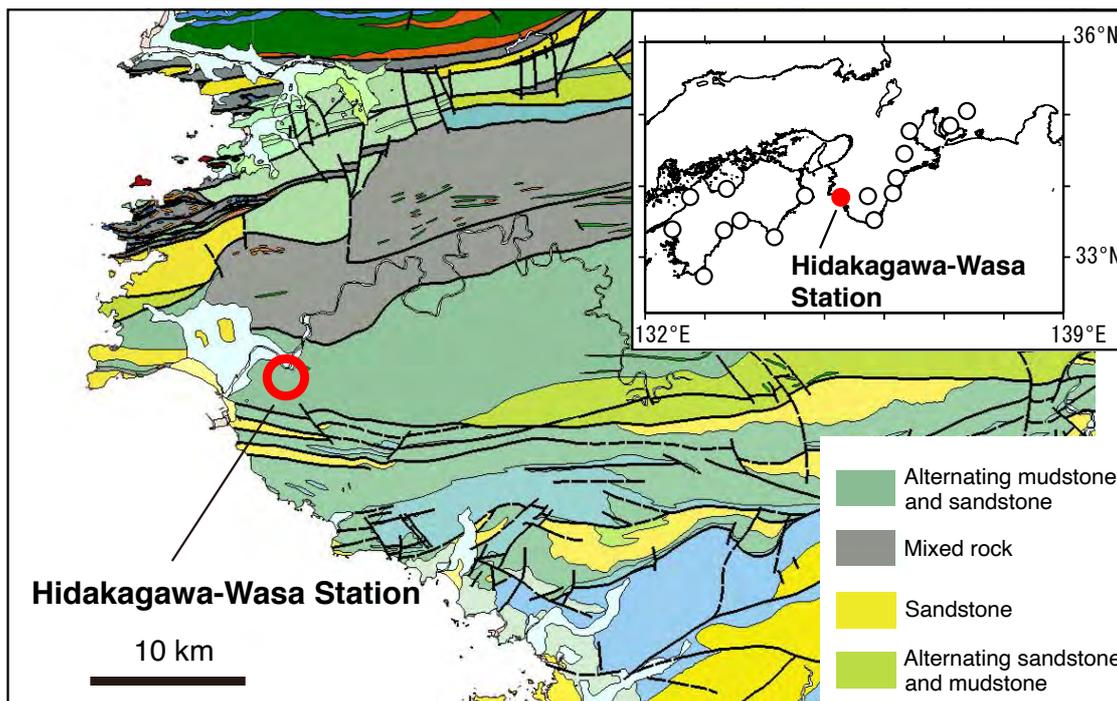
文献

- Brudy, M. and Zoback, M. D. (1999) Drilling-induced tensile wall-fractures: implications for determination of in-situ stress orientation and magnitude, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 36, 191-215.
- 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.
- 木口 努・桑原保人 (2018) 産総研新居浜黒島観測点の孔井内透水性亀裂の方向と応力場の関係について. 活断層・古地震研究報告, 18, 73-114.
- 木口 努・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, 19, 33-59.
- 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 齊・板場智史・佐藤 努・佐藤隆司・関 陽児・梅田康弘・北川有一・重松紀生・高橋 誠 (2014) 南海トラフ巨大地震予測のための地下水等総合観測点の孔井における物理検層資料。地質調査総合センター研究資料集, 598, 産業技術総合研究所地質調査総合センター。
- 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, 17, 91-116。
- 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。
- Lin, W., Kiguchi, T., Satoh, T., Nagano, Y. and Kuwahara, Y. (2016) A case study of stress measurement by the core-based anelastic strain recovery method in a scientific borehole of Geological Survey of Japan. *Proc. of 7th. Int. Symp. on In-Situ Rock Stress*, 405-414.
- Matsuki, K. and Takeuchi, K. (1993) Three-dimensional in-situ stress determination by anelastic strain recovery of a rock core. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 30, 1019-1022.
- Miyazaki, S. and Heki, K. (2001) Crustal velocity field of southwest Japan: Subduction and arc-arc collision. *J. Geophys. Res.*, 106, 4305-4326.
- 中島善人 (2008) 核磁気共鳴物理探査技術の最近の動向, 地質ニュース, 644, 7-13.
- 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。
- 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.
- Tanaka, Y. (1986) State of crustal stress inferred from in situ stress measurements, *J. Phys. Earth*, 34, S57-S70,
- Tang, X.M., Cheng, C.H. and Toksöz, M.N. (1991) Dynamic permeability and borehole Stoneley waves: A simplified Biot-Rosenbaum model, *J. Acoust. Soc. Am.*, 90, 1632-1646.
- 寺部和伸・下川修司 (2012) フラクチャー型低浸透率石灰岩貯留槽における NMR 検層の活用事例, 石油技術協会誌, 77, 61-71.
- Uchide, T., Shiina, T. and Imanishi, K. (2022) Stress map of Japan: Detailed nationwide crustal stress field inferred from focal mechanism solutions of numerous microearthquakes, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2022JB024036.
- Winkler K.W., Liu, H.L. and Johnson, D.L. (1989) Permeability and borehole Stoneley waves: Comparison between experiments and theory. *Geophysics*, 54, 66-75.
- 山本晃司 (2007) 坑井取得データによる応力計測の実際—総合的検討の一部として。物理探査, 60, 113-129.

横山幸也 (2017) 初期地圧測定法の現状と基準化. 応用地質技術年報, 598, 71-91.

Zoback, M. D., Moos, D., Mastin, I. and Anderson, R. G., (1985) Wellbore breakouts and in situ stress, *J. Geophys. Res.*, 90, 5523-5530.



第 1 図 産総研の日高川和佐観測点の位置図。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。右上図に日高川和佐観測点以外の地下水等総合観測点を白丸で示す。

第 1 表 日高川和佐観測点の 3 孔井の座標 (世界測地系) と標高。

	緯度 上段：度分秒 下段：10進法	経度 上段：度分秒 下段：10進法	標高 (m)
孔 1 (600m)	33° 53′ 10.29 33.886192	135° 11′ 55.54 135.198761	54.36
孔 2 (201m)	33° 53′ 10.17 33.886158	135° 11′ 56.05 135.198903	53.94
孔 3 (33m)	33° 53′ 10.13 33.886147	135° 11′ 56.19 135.198942	53.88



第2図 孔1の深度591～593mの区間のコア写真。

第2表 日高川和佐観測点の3孔井で実施した検層種目。

検層種目 測定日 測定深度 掘削径 孔井名	孔1 (600m)			孔2 (201m)		孔3 (33m)	
	14-3/8 in (374.7mm)	10-5/8 in (269.9mm)	PQコア (123.0mm)	10-5/8 in (269.9mm)	セメンチ ング後	10-5/8 in (269.9mm)	セメンチ ング後
	30～201m	201～571m	571～600m	30～201m	0～191m	3～33m	0～32m
	2021.10.07 -08	2022.01.08 -10	2022.02.09 -10	2021.09.16 -18	2021.10.07	2021.10.24 -26	2022.01.11
温度	○ (2回)	○ (2回)	○ (2回)	○ (2回)		—	—
電気	—	○	○	○		○	
キャリパー	○	○	○	○		○	
速度(P)	—	—	○	○		○	
速度(P・S)	○	○	—	—		—	
BHTV	—	—	○	—		—	
比抵抗式 孔壁画像	—	○	—	○		○	
方位傾斜	○	○	○	○		○	
ガンマ線	○	○	○	○		○	
電気伝導度	—	—	—	—		○ (5回)	
核磁気共鳴	—	○	—	○		—	
密度	—	○	—	○		—	
セメントボンド	—	—	○ (0～570m)	—		○	—

第3表 日高川和佐観測点で使用した物理検層の機器。

機種	種別	製造元	仕様
基本装置			
検層車	【孔1深度600.00m】掘削時以外 三菱ファイター EC-135号車	(株)物理計測コンサルタント	エンジン形式：ディーゼル 総重量：13.1 ton 測定深度：4,500 m
	【孔1深度600.00m】掘削時 三菱ファイター EC-150号車	(株)物理計測コンサルタント	エンジン形式：ディーゼル 総重量：4.9 ton 測定深度：1,000 m
ケーブル	7芯硬鋼線検層用 アーマードケーブル	ROCHESTER	外径：3/8" (9.5mm) 耐熱：260℃ 破断強度：3.7 t 絶縁体：TEFEテフロン
捲上装置	6,000m級油圧ウィンチ	北海道車体工業(株)	油圧PTO切替式 チェーンドライブ 引張強度：3.0t 捲上速度：0~100 m/min
データ収録 データ処理 ツール制御	LOGIQ	Halliburton	ツール制御インターフェイス 使用OS：Windows 7 以降 電源：AC100-240V 50/60 Hz DSP
	System VII	Century	ツール制御インターフェイス 使用OS：Windows 7 以降 電源：AC115-120V 50/60 Hz ツール供給電源：250mA、180V (Max)
	OPAL / SCOUT	ALT	ツール制御インターフェイス 使用OS：Windows 7 以降 電源：AC100-240V 50/60 Hz Dual DSP
深度計	深度パネル (DCP-HG1)	(株)物理計測コンサルタント	深度表示範囲：0~9999.9m ケーブル速度表示範囲：0~240.0m/min. 適用エンコーダ：5V電源2相出力タイプ 外部深度パルス出力：1000パルス/1m 許容速度：0~240m/min(1000Pulse/m ² 時)
エンコーダー	インクリメンタルロータリーエンコーダー (OIS-68 500C/T-C3-5V)	多摩川精機(株)	出力形態：オープンコレクタ(DC5V電源) 分解能：500カウント/回転 許容速度：2,500cm/min 最大応答周波数：125kHz
温度検層 (サーミスター式温度検層ツール)			
地上機器	BIN [®] ジュール型 GSC検層データ 収録システム	(株)物理計測コンサルタント	電源：AC 100 V ±10% 50/60 Hz 出力電圧：0~100 mV 測定温度範囲：0~100℃ 測定精度：±1.0 %/F.S. 分解能：0.1℃ 出力：TEMP(100℃), DIF(10℃/m)
	TL-100		
孔内機器			外径：38 mm 全長：1.5 m センサー：サーミスター

第3表 日高川和佐観測点で使用した物理検層の機器（続き）。

機種	種別	製造元	仕様
電気伝導度検層・温度検層（FTC検層ツール）			
地上機器	SCOUT	ALT	（〔基本装置〕参照）
孔内機器	自然ガンマ線測定部 QL40-GR		外径：40mm 全長：90cm 耐圧：20MPa 耐温：70℃ 自然ガンマ線センサー：NaIシンチレーション
	温度・電気伝導度測定部 QL40-FTC	外径：43mm 全長：78cm 耐圧：20MPa 耐温：80℃ 温度センサー：白金センサー（クラスA） 測定範囲：-20～80℃ 精度：<1% 分解能：0.004℃ 電気伝導度センサー： 測定方式：交流7電極方式 測定範囲：5～2.5×10 ⁵ μS/cm 精度：1%（500～2.5×10 ⁵ μS/cm）	
電気検層			
地上機器	BIN [®] ジュール型 GSC検層データ 収録システム	(株)物理計測コンサルタント	
	ELM-204 SCM-304		電源：AC 100V ±10% 50/60 Hz 出力電圧：150V 出力電流：0～50 mA 測定動作周波数：240 Hz ±10 Hz
孔内機器			外径：68mm 全長：300cm 電極間隔：25, 100cm 耐圧：98MPa 耐温 300℃
孔径検層（大孔径用）			
地上機器	LOGIQ	Halliburton	（〔基本装置〕参照）
孔内機器	自然ガンマ線測定部 GTET		テレメトリーサブ 外径：92mm 全長：219cm 耐圧：137.9MPa 耐温：177℃ サンプル周期：10 Sample/m, 48 Sample/m 自然ガンマ線センサー：NaIシンチレーション 測定範囲：0～1,000API 測定誤差：±5%
	方位傾斜測定部 IDT		外径：92mm 全長：12cm 耐圧：137.9MPa 耐温 177℃ 3軸加速度センサー、3軸地磁気センサー 精度：傾斜±0.5°，方位±5.0°
	孔径測定部 ICT	外径：92mm 全長：393cm 耐圧：137.9MPa 耐温 177℃ 測定範囲：101～609cm（6方向独立型）	
孔径検層（小孔径用）			
地上機器	BIN [®] ジュール型 GSC検層データ 収録システム	(株)物理計測コンサルタント	
	LPM-202		電源モジュール 電源：AC 100V ±10% 50/60 Hz 測定電圧 90 mA
	RMM-2003	レートメータモジュール 電源：BIN DC 300 V 出力電圧範囲：0～1V	
孔内機器	XY-CAL	MLS	外径：45mm 全長：127cm 測定範囲：5～71cm 耐圧：15,000 psi 耐温：120℃

第3表 日高川和佐観測点で使用した物理検層の機器（続き）。

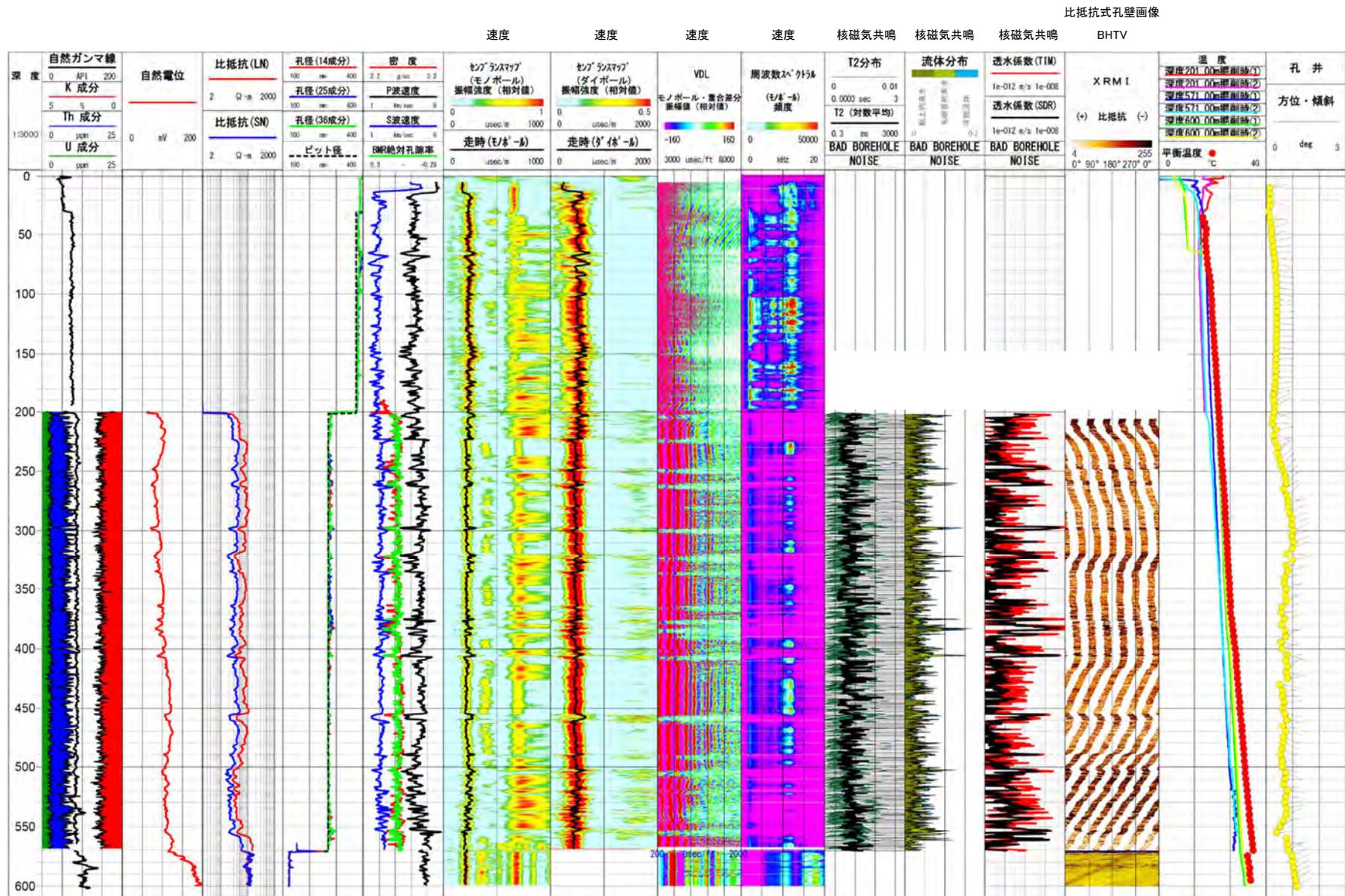
機種	種別	製造元	仕様
音波検層（クロス・ダイポール音波検層ツール）			
地上機器	LOGIQ		（〔基本装置〕参照）
孔内機器	自然ガンマ線測定部 GTET	Halliburton	テレメトリーサブ 外径：92mm 全長：219cm 耐圧：137.9MPa 耐温：177℃ サンプリング周期：10 Sample/m, 48 Sample/m 自然ガンマ線センサー：NaIシンチレーション 測定範囲：0～1,000API 測定誤差：±5%
	低周波ダイポール型 音波検層測定部 WAVE		外径：92mm 全長：864cm 対応孔径：6-1/8～16in 耐圧：124.1MPa 耐温：177℃ 発振器： ピエゾ円筒型（モノポール） 2～20kHz バンダーバー型（ダイポール） 0.5～6kHz 受信器：ピエゾ型受振器アレイ 4個（0°，90°，180°，270°） ×8列（0.5ft 間隔） セサスベージング：10.24～14.24ft（モノポール） セサスベージング：9.23～13.23ft（ダイポール）
音波検層・セメントボンド検層（小口径用フルウェーブ音波検層ツール）			
地上機器	SCOUT		（〔基本装置〕参照）
孔内機器	自然ガンマ線測定部 QL40-GR	ALT	外径：40mm 全長：90cm 耐圧：20MPa 耐温：70℃ 自然ガンマ線センサー：NaIシンチレーション
	QL40-FWM		外径：50mm 全長：222cm 対応孔径：4-14in 耐圧：20MPa 耐温：70℃ セサスベージング：60，80，100，120cm 基本周波数：20kHz
セメントボンド検層			
地上機器	LOG-IQ		（〔基本装置〕参照）
孔内機器	RBT004	Halliburton	外径：79mm 全長：6.37m 耐圧：137.8MPa 耐温：150℃ 音響センサー：トランスデューサー セサスベージング：3ft, 5ft [オムニ型] セサスベージング：3ft [ラジアル型] 基本周波数：22kHz 温度センサー：白金センサー 自然ガンマ線センサー：NaIシンチレーション ケーシングカラーロケータセンサー：磁気式

第3表 日高川和佐観測点で使用した物理検層の機器（続き）。

機種	種別	製造元	仕様
密度検層検層			
地上機器	System VII	Century	（〔基本装置〕参照） テレメトリーサブ 外径：63.5mm 全長：132cm 耐圧：34.5MPa 耐温：125℃ 自然ガンマ線センサー：NaIシンチレーション 測定範囲：0～10,000API 測定誤差：±5%
孔内機器	自然ガンマ線測定部 NGT		外径：63.5mm 全長：697cm 耐圧：34.5MPa 耐温：125℃ 対応孔径：4～14in 線源：137Cs (11.1GBq) 孔径センサー（シングルアーム） 測定範囲：66.5～356mm 測定誤差：±6.35mm 密度センサー デテクター：NaIシンチレーション 測定範囲：0.5～3.5g/cc 測定誤差：±0.02g/cc
孔内機器	密度検層測定部 LDT		
XRMI検層（比抵抗型孔壁画像検層）			
地上機器	LOGIQ	Halliburton	（〔基本装置〕参照） テレメトリーサブ 外径：92mm 全長：219cm 耐圧：137.9MPa 耐温：177℃ サンプル周期：10 Sample/m, 48 Sample/m 自然ガンマ線センサー：NaIシンチレーション 測定範囲：0～1,000API 測定誤差：±5%
孔内機器	自然ガンマ線測定部 GTET		外径：9.2cm 全長：737cm 対応孔径：5-7/8～21in 耐圧：137.9MPa 耐温：177℃ ポタン電極（マイクロ比抵抗）： 測定範囲：0.2～20,000Ω・m パット数：6個 電極数：25個/パット 水平方向走査度（カバーレージ）： 80% (5-1/2in), 60% (8in), 40% (12in) 解像度：5mm 孔径（6方向独立型）： 測定範囲：153～533mm 精度：2.5mm 方位センサー： 3軸加速度センサー，3軸地磁気センサー 精度：傾斜±0.4°，方位±5.0°
孔内機器	孔壁画像測定部 XRMI		
BHTV検層（超音波型孔壁画像検層）			
地上機器	SCOUT	ALT	（〔基本装置〕参照） 外径：40mm 全長：2.47m 耐圧：20MPa 耐温：70℃ 音響センサー：トランスデューサー 基本周波数：1200kHz 方位分解能：1.25°，2.5°，5.0°（任意） 最小深度サンプリング深度：3mm （方位分解能2.5°，測定速度2m/min時） 方位センサー： 3軸加速度センサー，3軸地磁気センサー 精度：傾斜±0.5°，方位±1.0°
孔内機器	ABI-40		

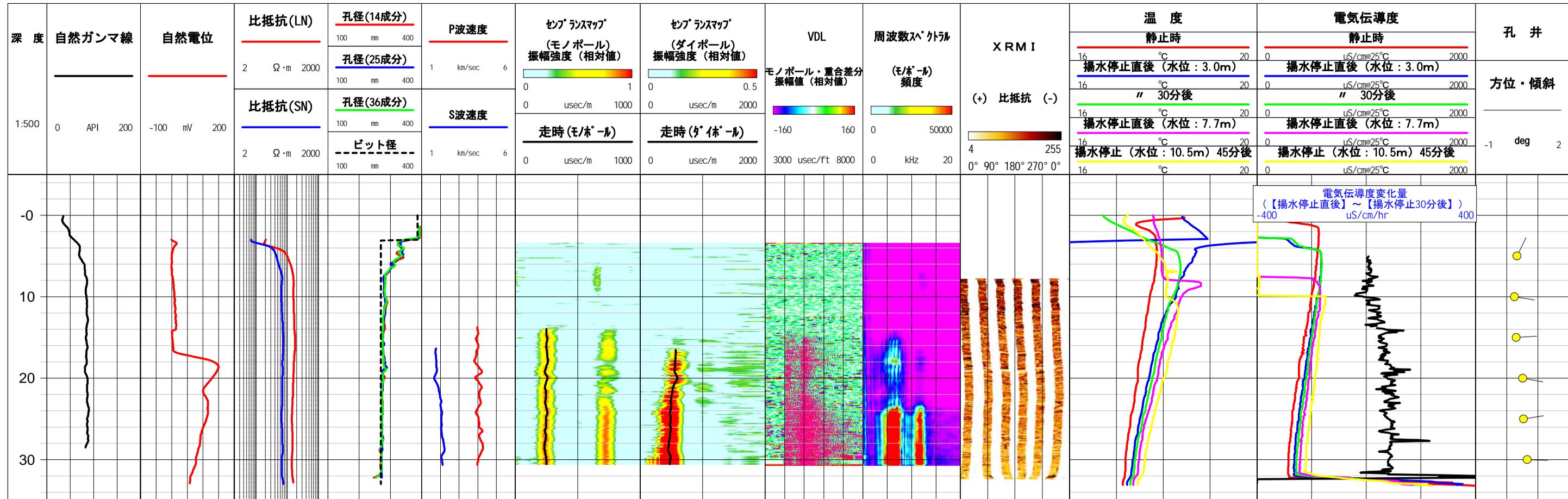
第3表 日高川和佐観測点で使用した物理検層の機器（続き）。

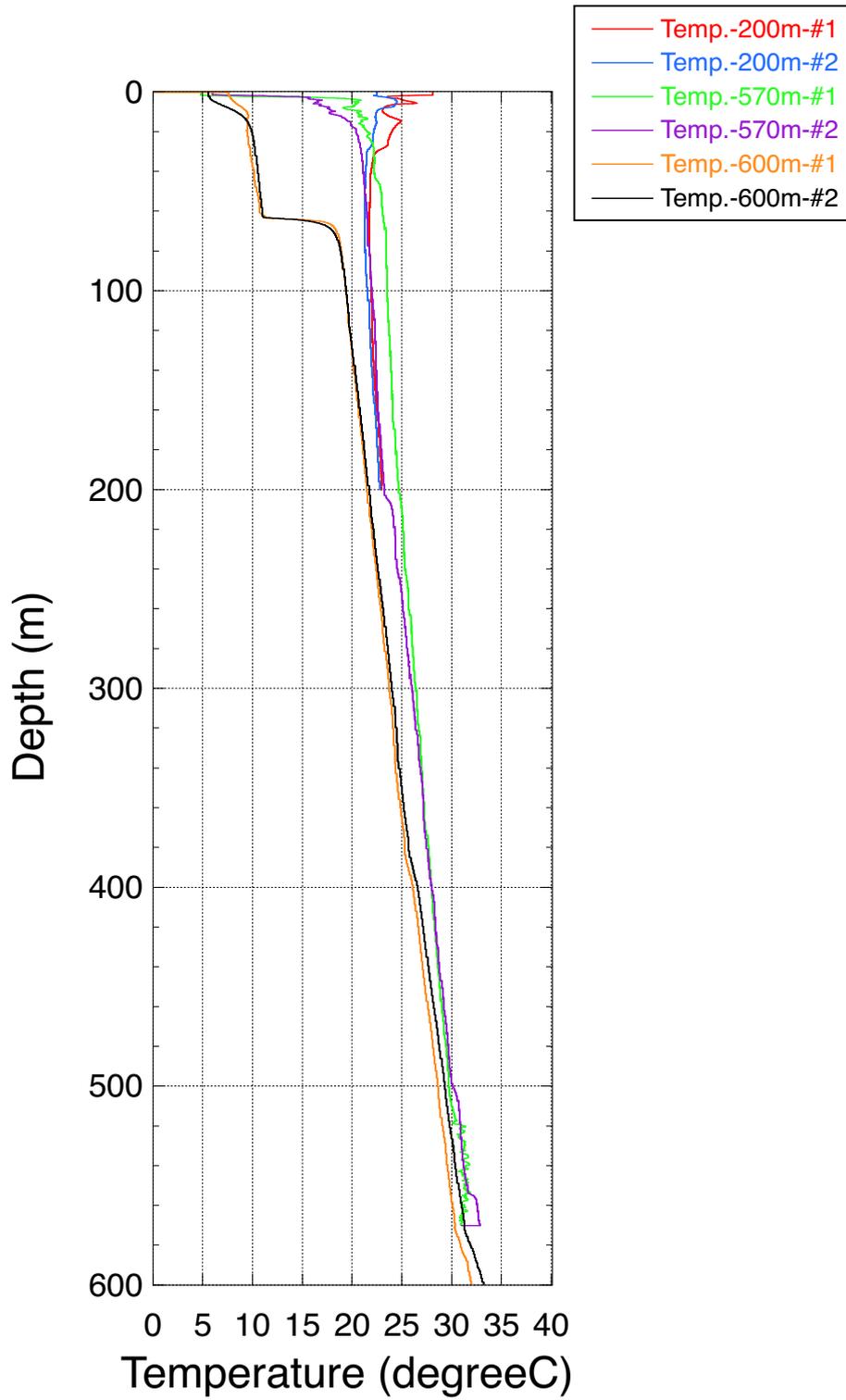
機種	種別	製造元	仕様
核磁気共鳴検層			
地上機器	OPAL		(〔基本装置〕参照)
孔内機器	自然ガンマ線測定部 (スペクトラ・ガンマ線) QL40-SGR	ALT	外径：40 mm 全長：93 cm 耐圧：20MPa 耐温：70℃ デテクター：NaIシンチレーション, BGO(Bi4Ge3O12)シンチレーション 測定範囲：0～10,000API(自然ガンマ線) 3,000 keV以下(256チャンネルスペクトル) 測定精度：±5% 以内
	核磁気共鳴測定部 QL40-BMR-90	NMR Services	外径：90 mm 全長：216 cm 耐圧：20MPa 耐温：100℃ 探査深度：360mm エコー時間(Te)：500μ sec T2測定範囲：0.5×Te～5sec 孔隙率測定範囲：0～100% 孔隙率測定精度：±2%
セメントボンド検層			
地上機器	LOG-IQ		(〔基本装置〕参照)
孔内機器	RBT004	Halliburton	外径：79mm 全長：6.37m 耐圧：137.8MPa 耐温：150℃ 音響センサー：トランスデューサー ササベ・シング：3ft, 5ft [オムニ型] ササベ・シング：3ft [ラジアル型] 基本周波数：22kHz 温度センサー：白金センサー 自然ガンマ線センサー：NaIシンチレーション ケーシングカーローケセンサー：磁気式



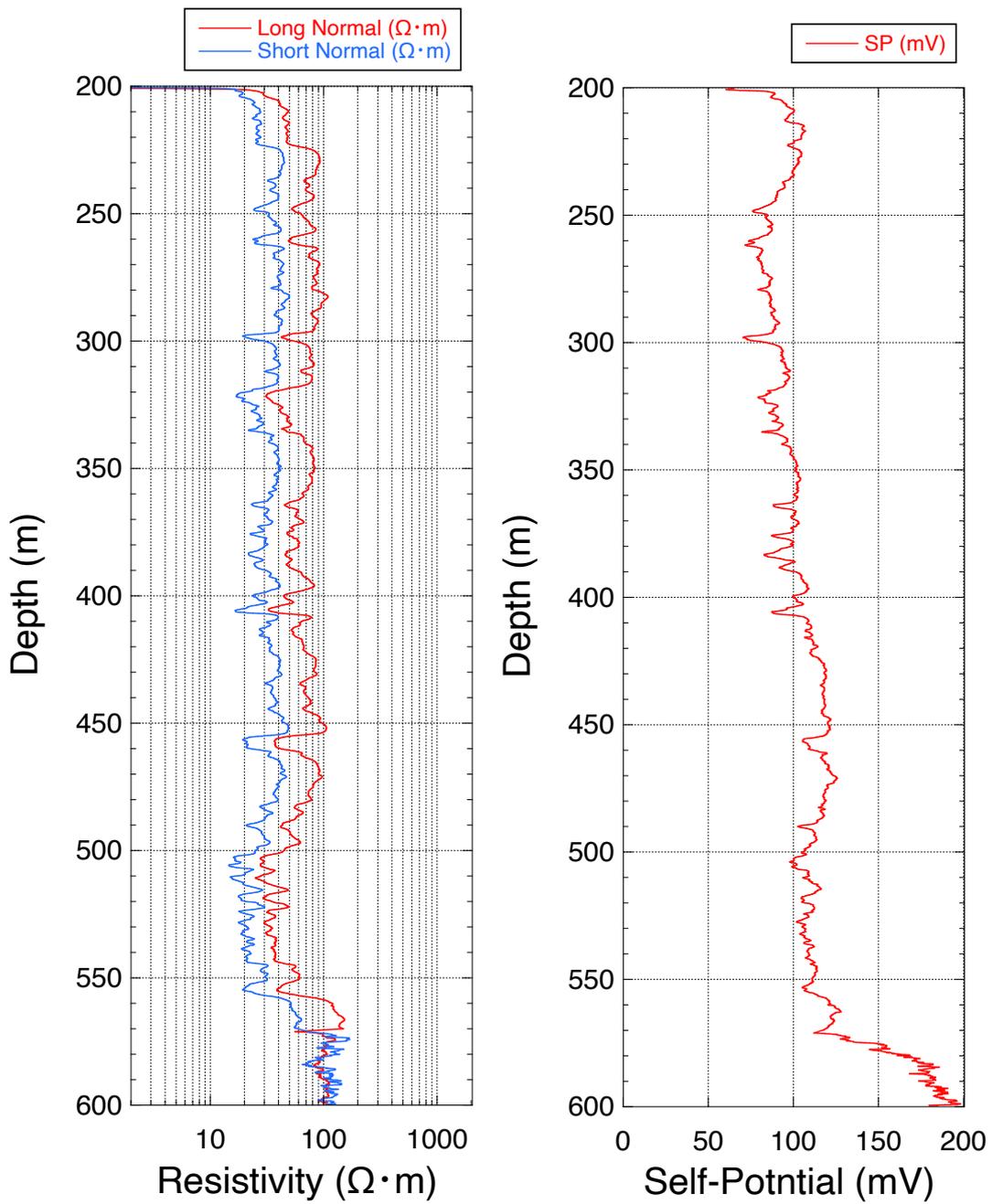
第3図 孔1の物理検層総合柱状図。

第6図 孔3の物理検層総合柱状図。

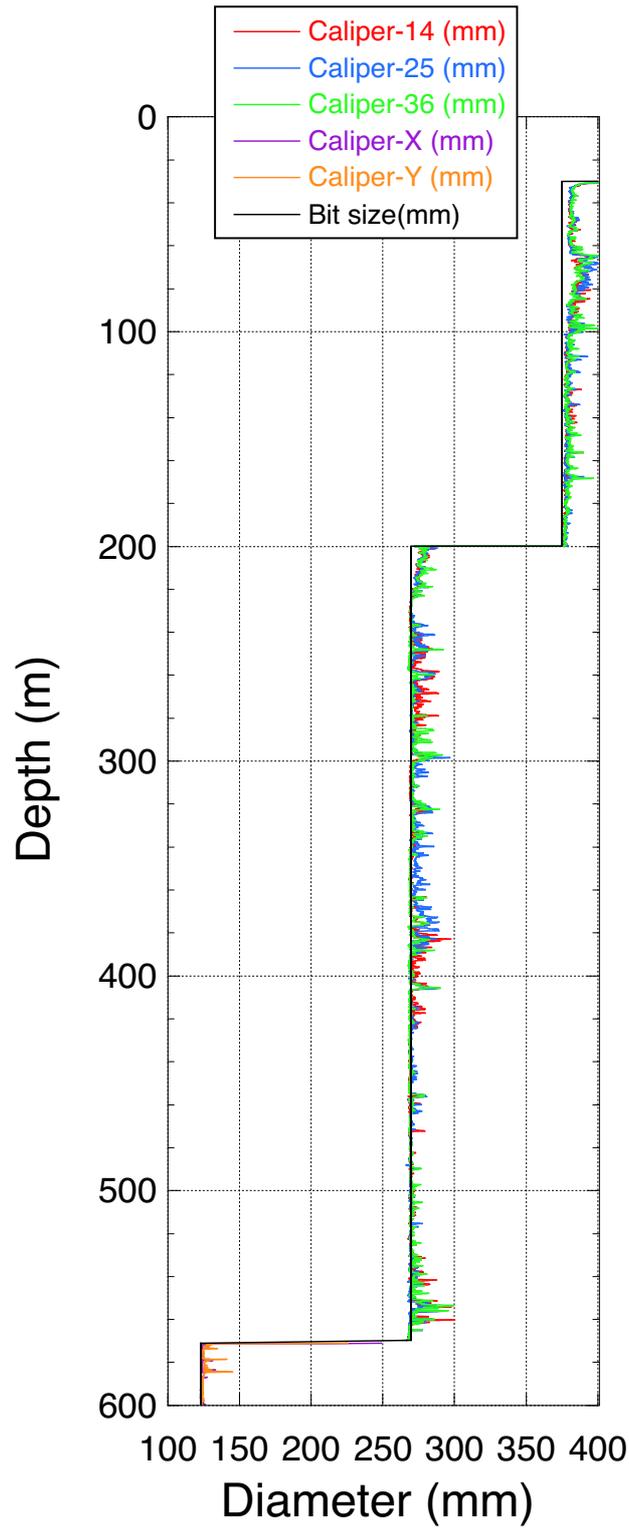




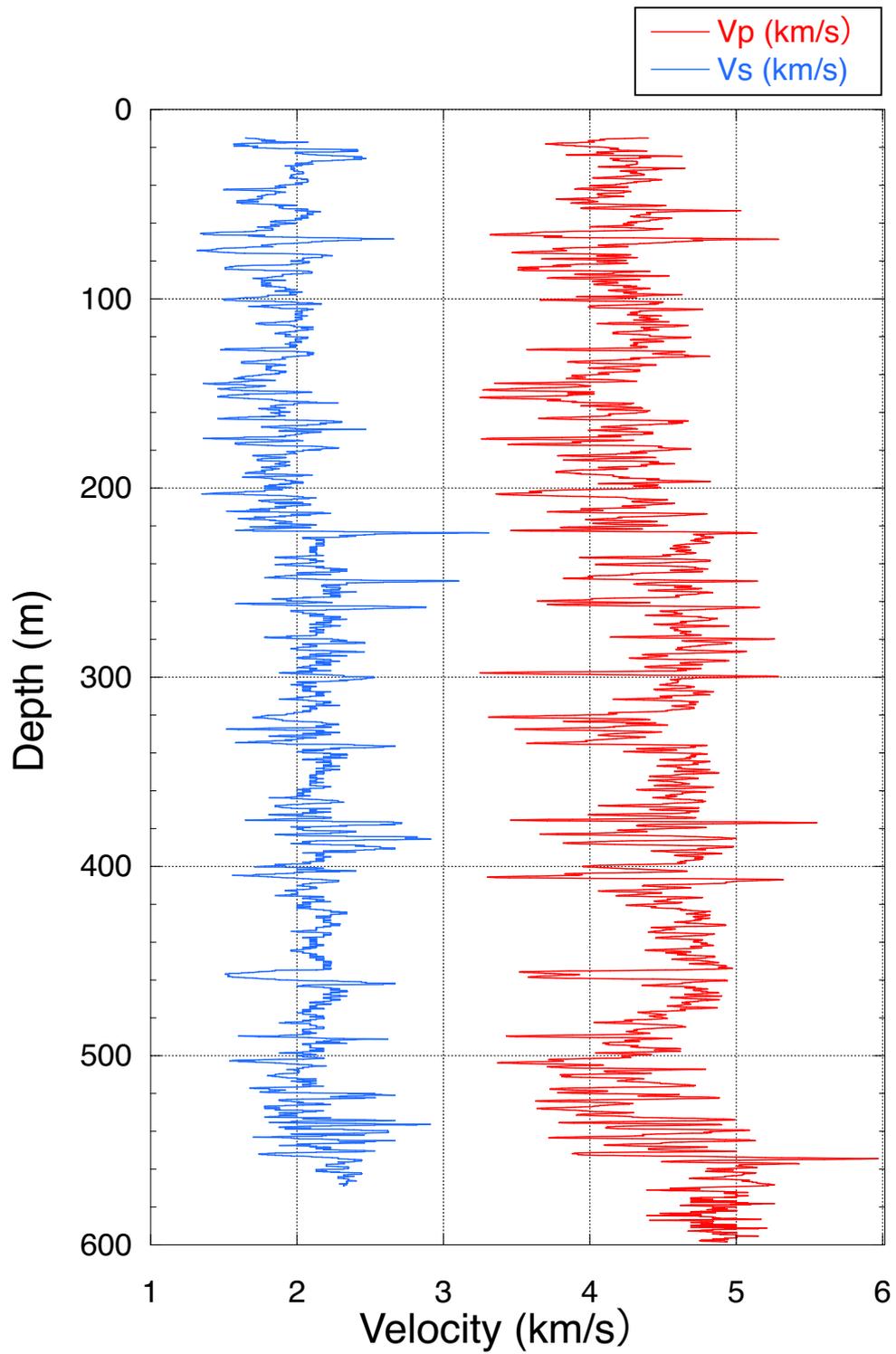
第7図 孔1の温度検層の結果。3回の掘削段階で、それぞれ2回繰り返して測定した温度を色分けして示す。



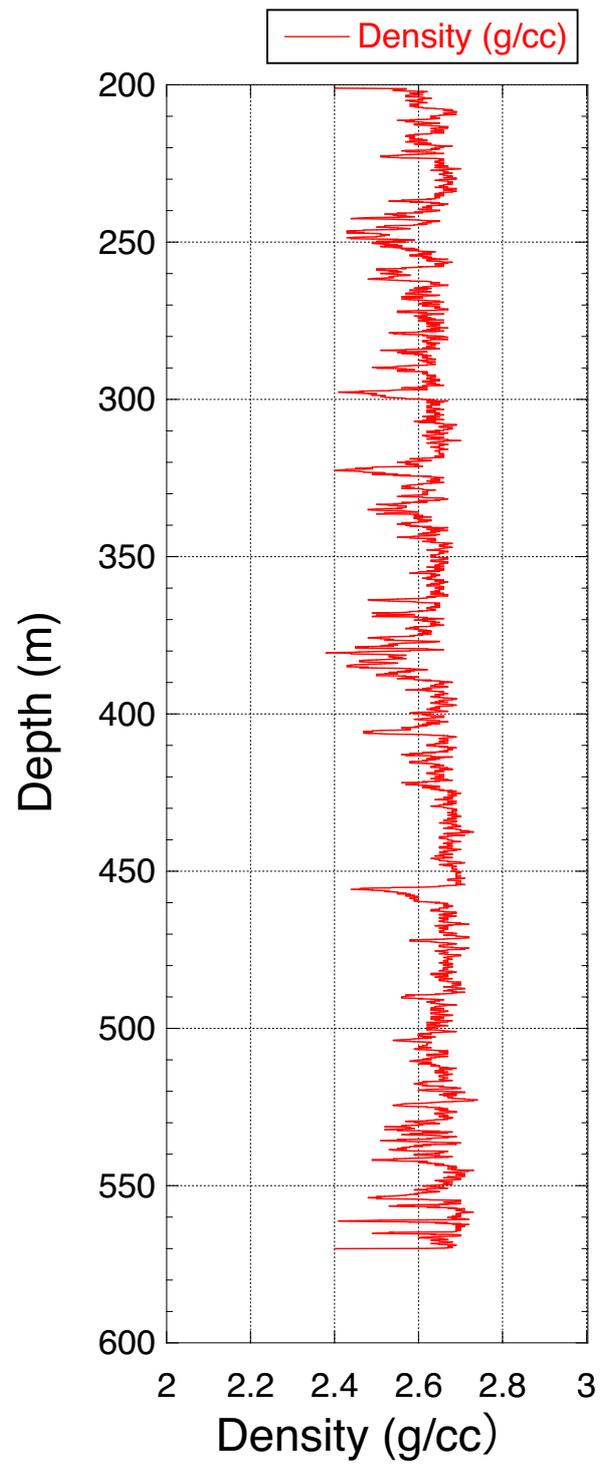
第 8 図 孔 1 の電気検層による比抵抗 (左) と自然電位 (右) の結果。比抵抗はロングノルマルとショートノルマルの 2 つのデータを色分けして示す。



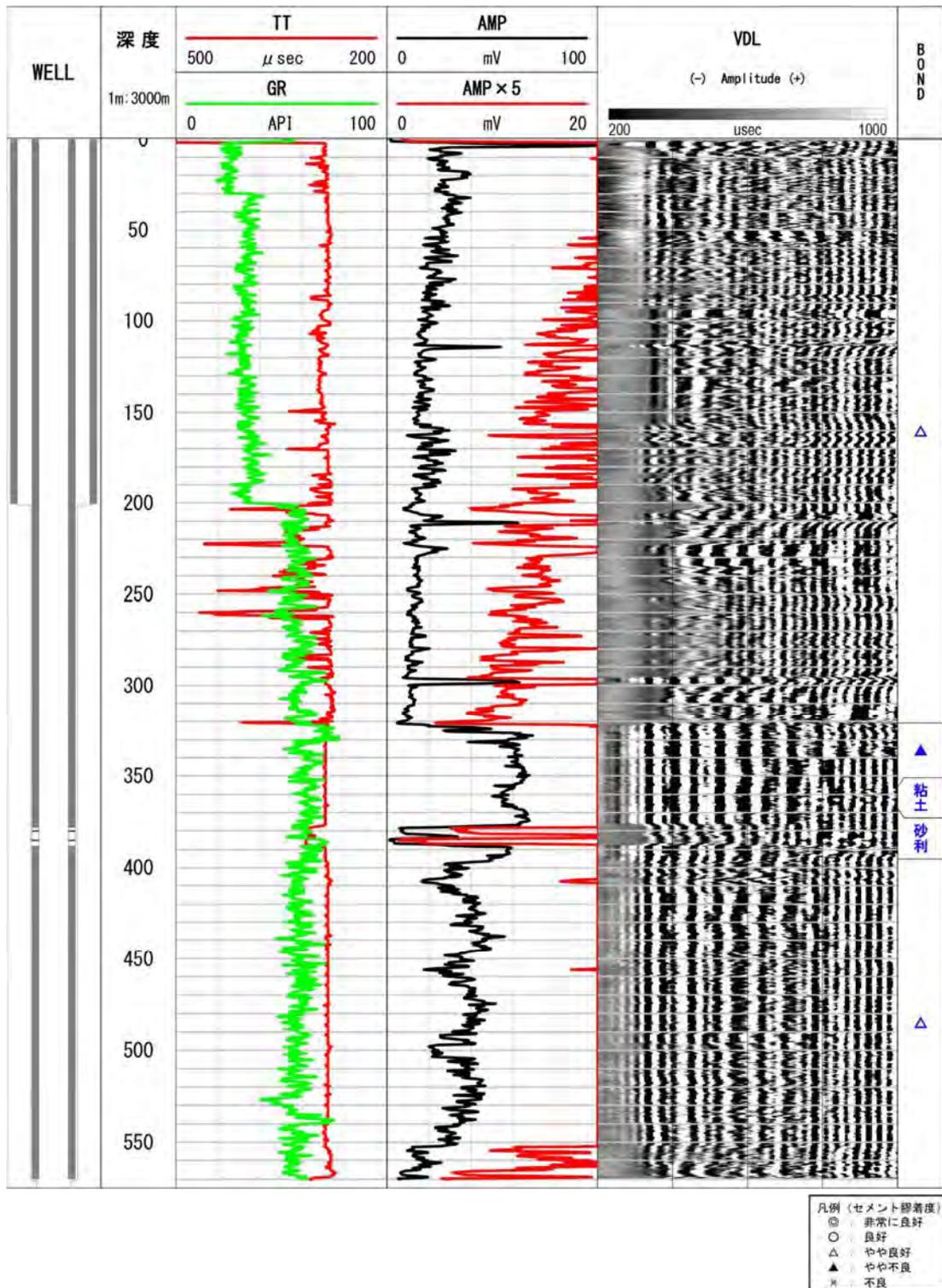
第9図 孔1のキャリパー検層の結果。570m以浅は3方向、570m以深は2方向の孔径を測定した。各方向の孔径値を色分けして示す。ビットサイズを黒線で示す。



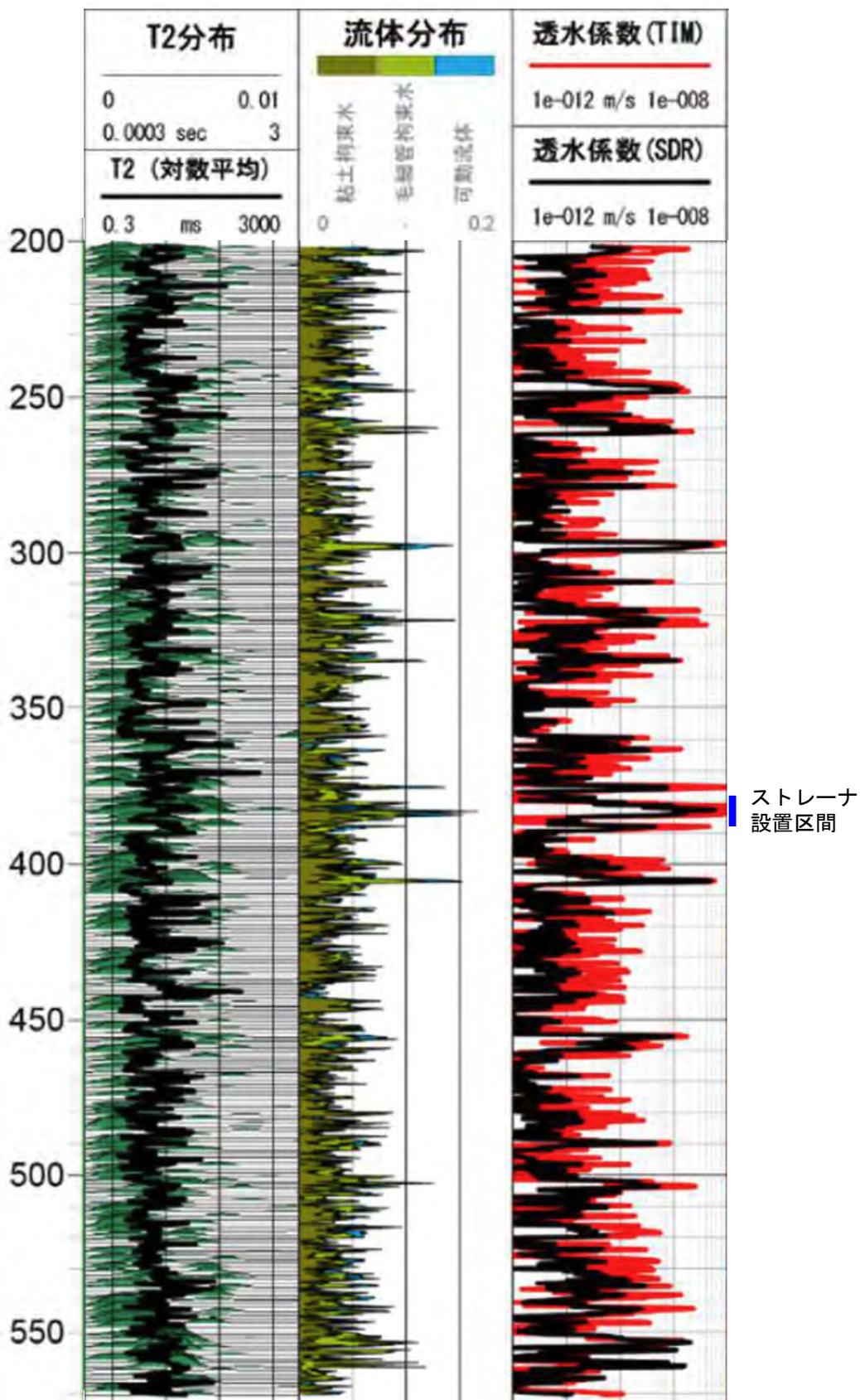
第 10 図 孔 1 の速度検層による P 波速度 (Vp: 赤) と S 波速度 (Vs : 青) の結果。



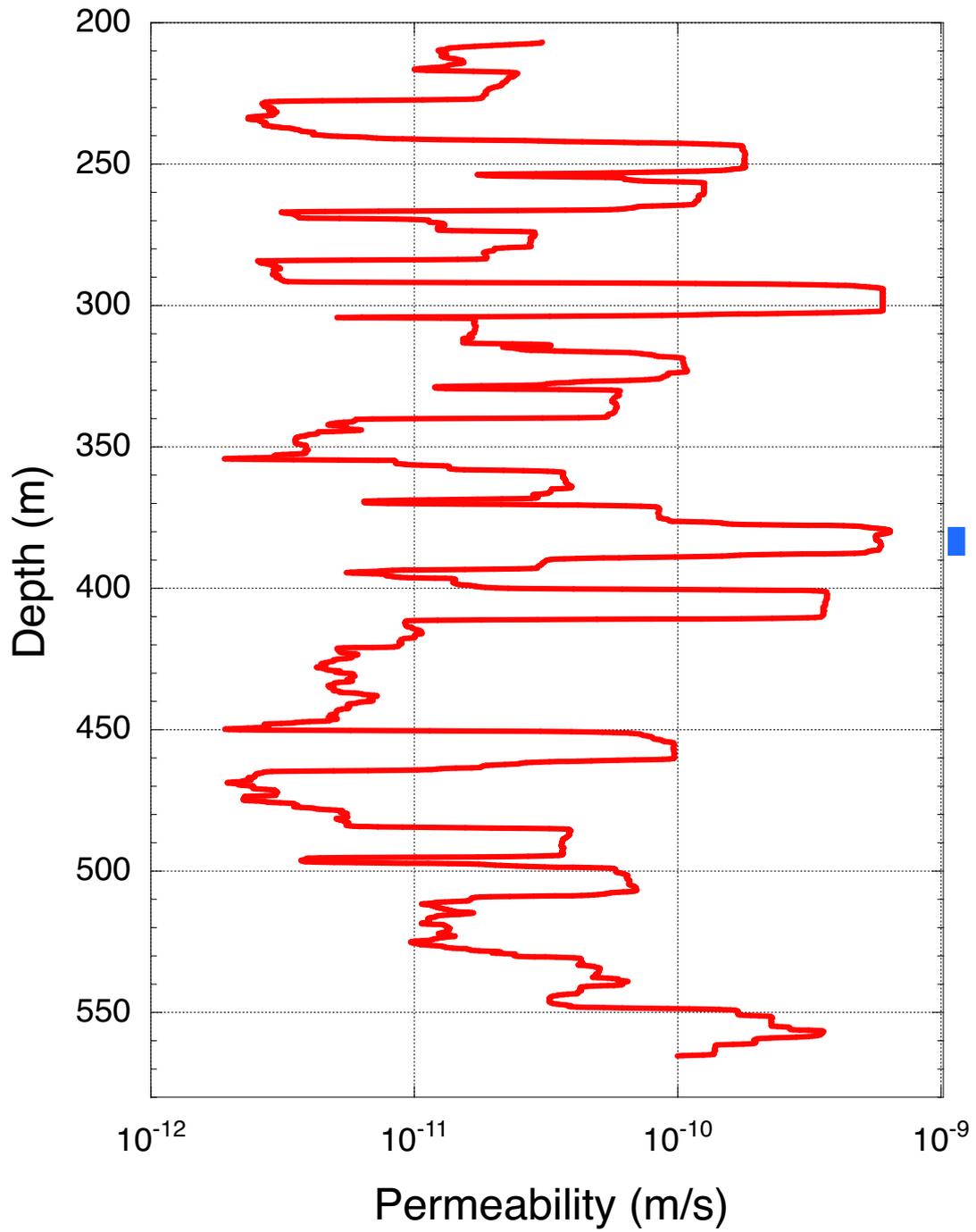
第 11 図 孔 1 の密度検層の結果。



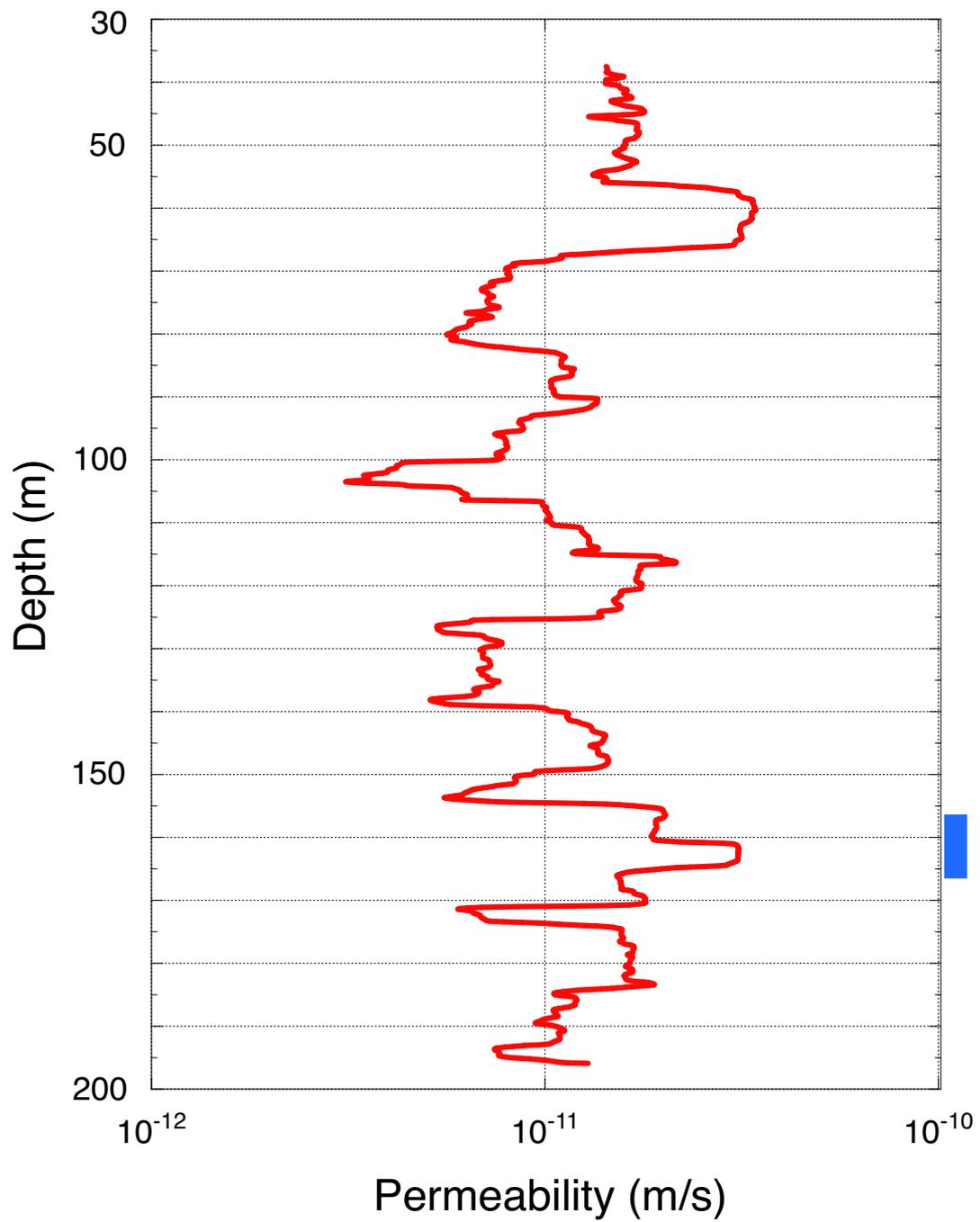
第 12 図 孔 1 のセメントボンド検層の結果。左の列から順に、ケーシングの設置深度、深度、自然ガンマ線と受振波形のトラベルタイム (TT)、受振波形の振幅値 (AMP) と 5 倍した振幅値、受振波形の VDL 表示 (Variable Density Log)、セメント膠着度をそれぞれ示す。



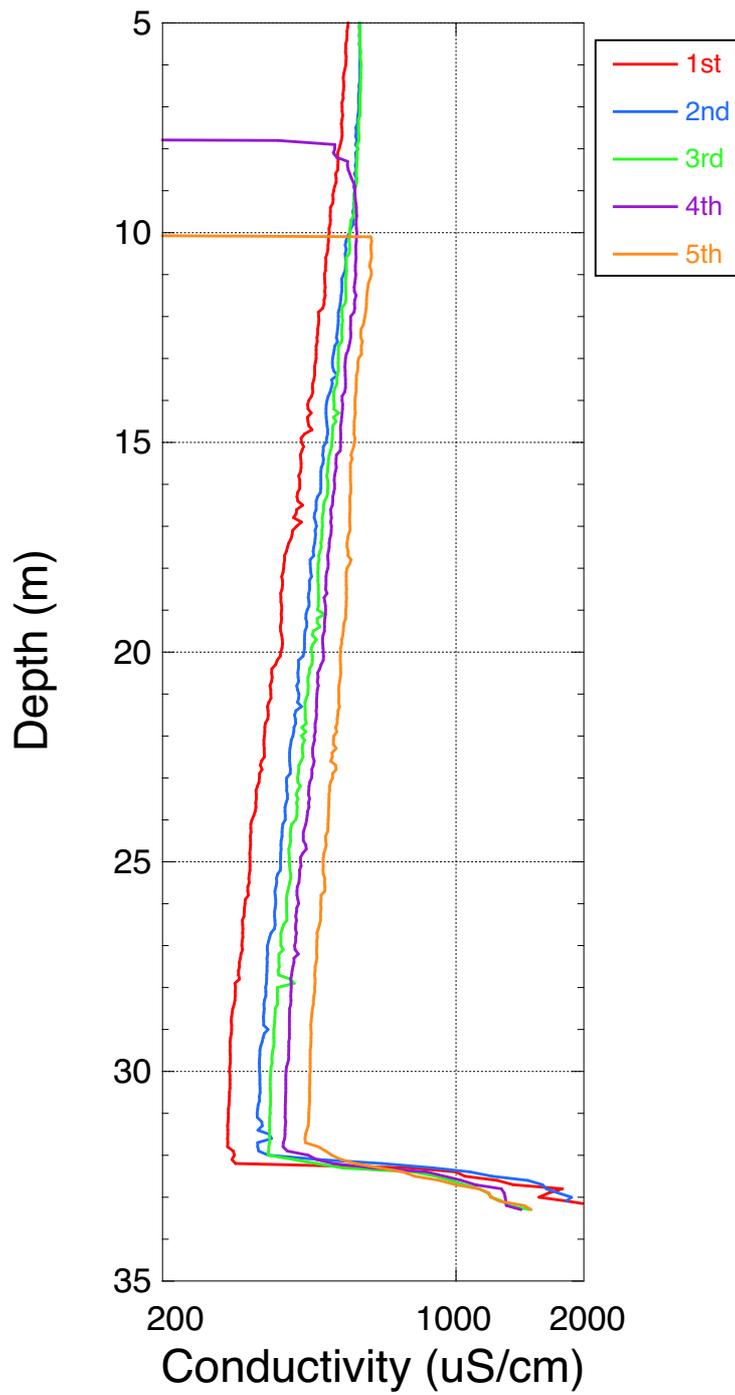
第 13 図 孔 1 の核磁気共鳴検層検層の結果。左の列から順に、T2（緩和時間）分布、絶対孔隙率（Total Porosity）と孔隙内の流体の分布、TIM モデルと SDR モデルから求めた透水係数を示す。ストレーナ設置区間を図の右端の青線で示す。



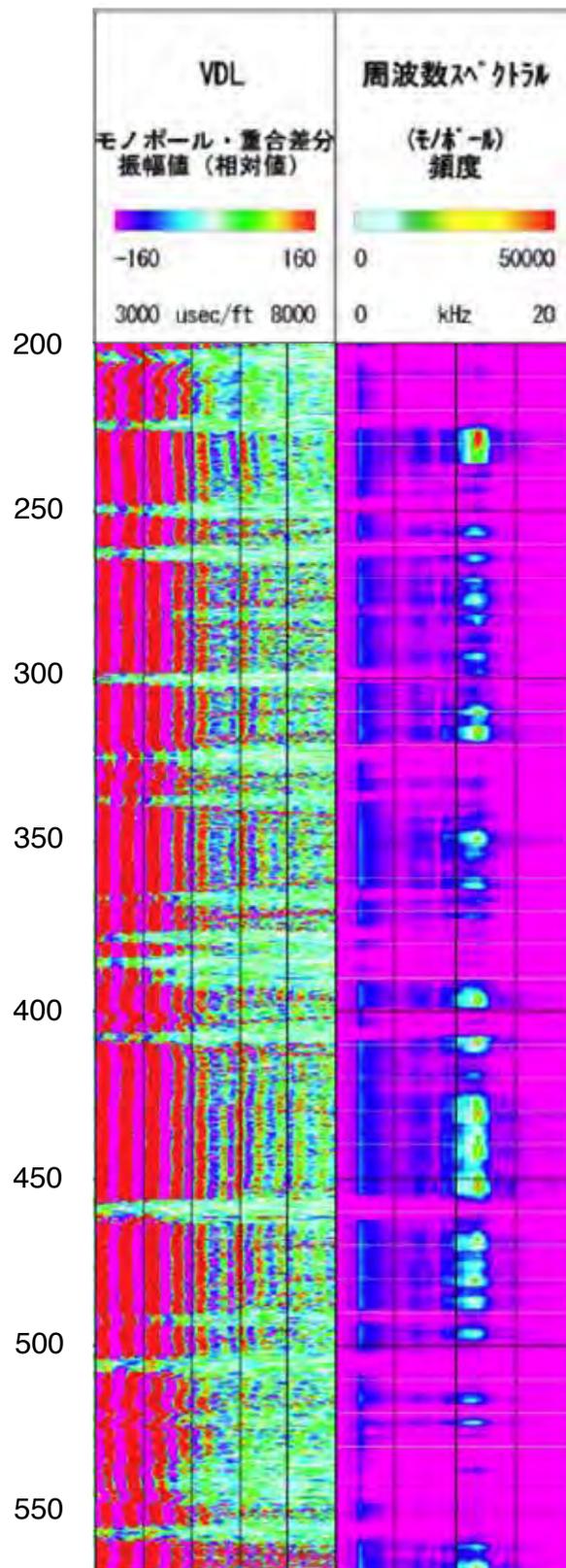
第 14 図 孔 1 の核磁気共鳴検層から求めた透水係数 (SDR モデル) の 10m 深度区間の移動平均値。ストレーナ設置区間を図の右端の青線です。



第 16 図 孔 2 の核磁気共鳴検層から求めた透水係数 (SDR モデル) の 10m 深度区間の移動平均値。ストレーナ設置区間を図の右端の青線で示す。

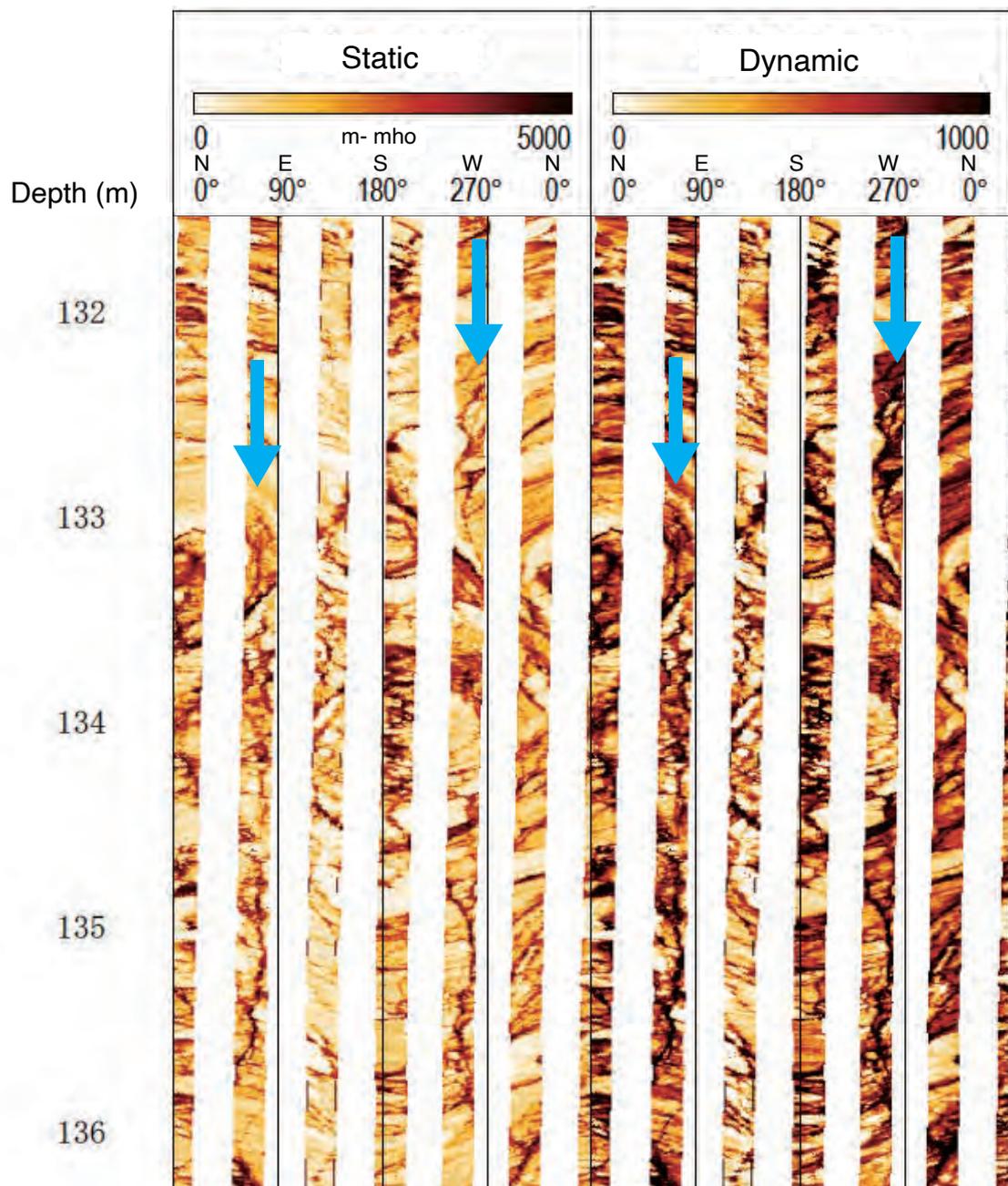


第 17 図 孔 3 の電気伝導度検層の結果。5 回の繰り返し測定の結果を色分けして表示する。



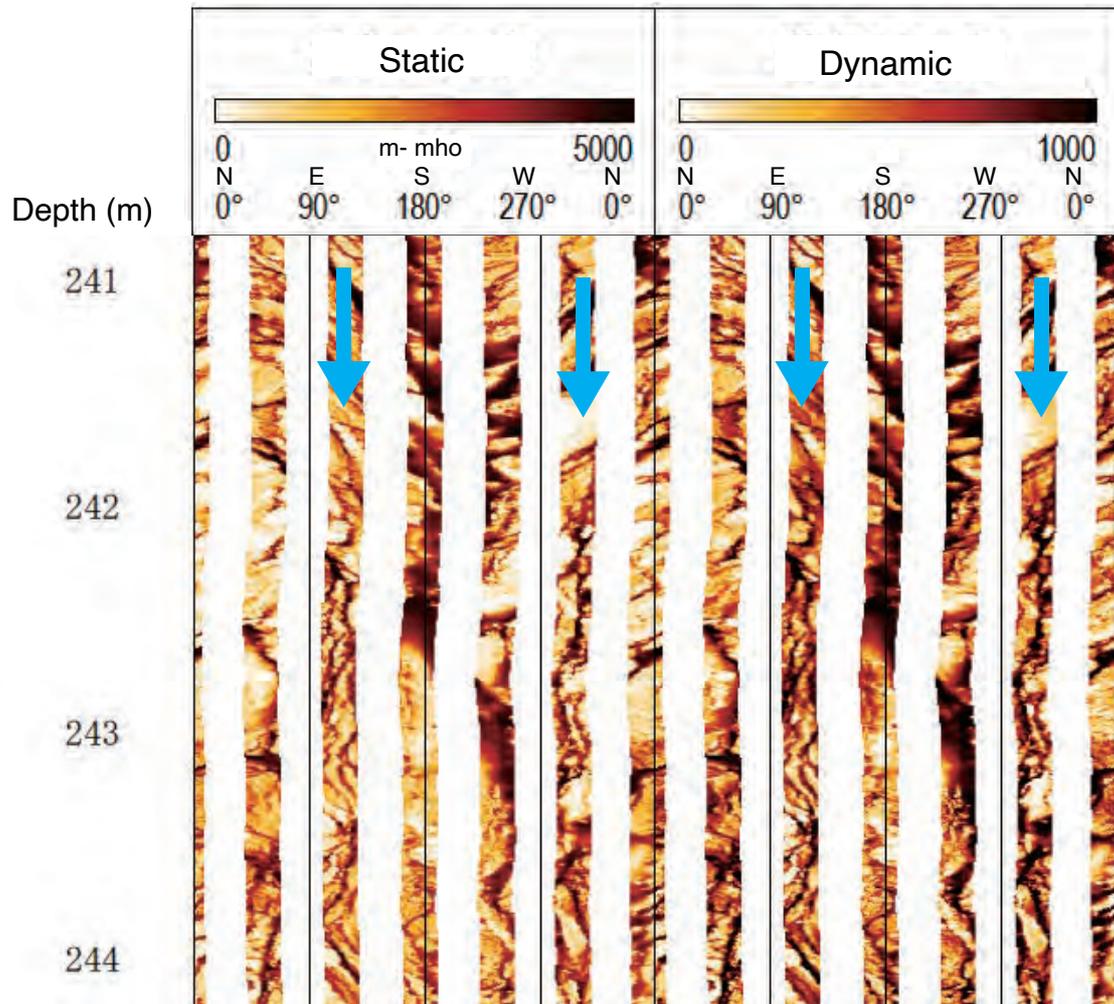
第 18 図 孔 1 の速度検層から得られたストーンレー波を対象とした解析結果。左列はモノポール震源による受振波形の相対的振幅値、右列はモノポール震源による周波数スペクトラムをそれぞれ示す。

(a) 132.4 - 135.8 m

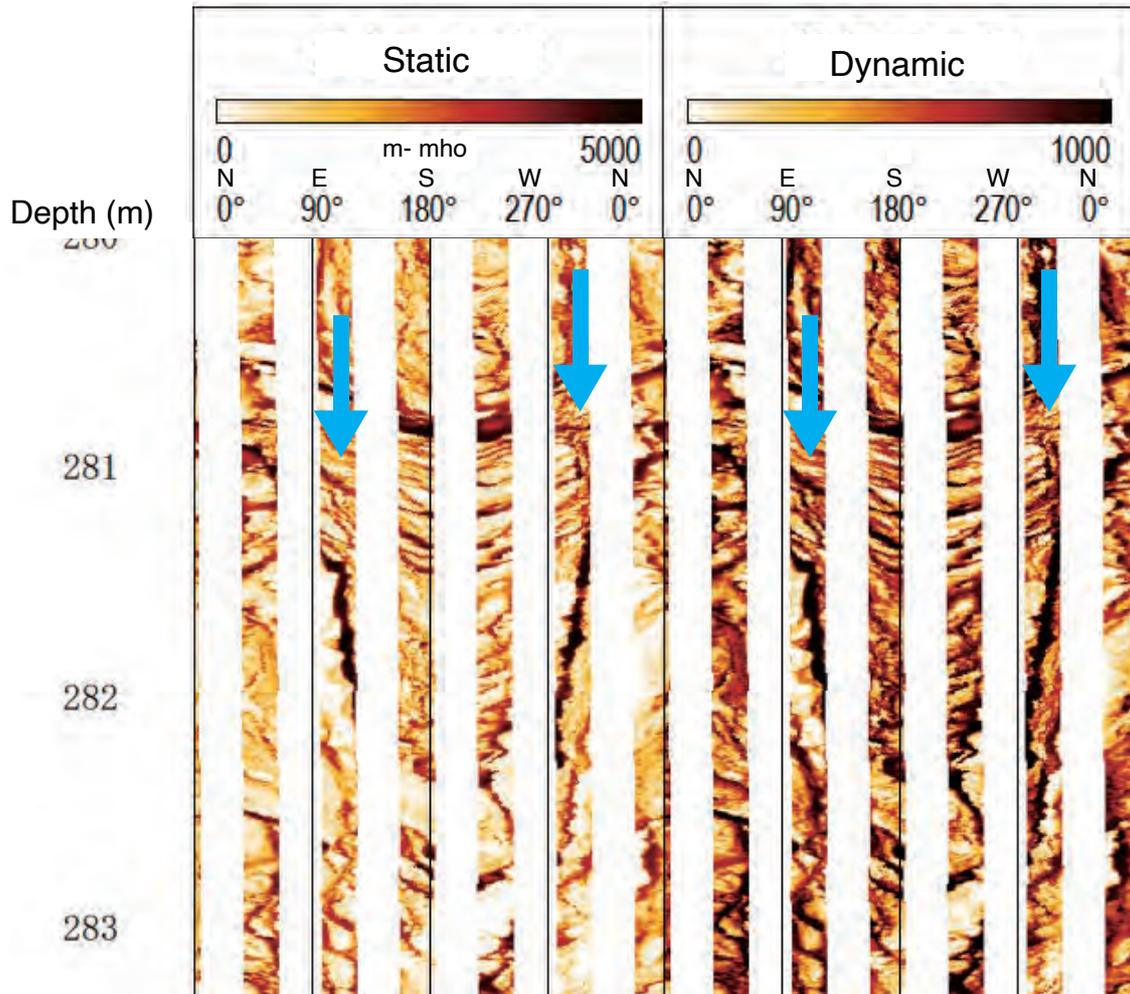


第 19 図 DITF を検出した深度付近の XRFI 検層による孔壁画像。DITF が認められる方位を図中の青矢印で示す。Static 画像は、測定区間全域において同一のカラースケールを用いて出力した画像。Dynamic 画像は、深度 0.1m 区間ごとに動的に規格化した移動スケールにより出力した画像。(a)DITF の深度区間 132.4-135.8m (孔 2)、(b)241.8-243.2m (孔 1)、(c)280.8-282.6m (孔 1)、(d)288.4-289.6m (孔 1)、(e)354.6-355.6m (孔 1)、(f)379.0-382.0m (孔 1)

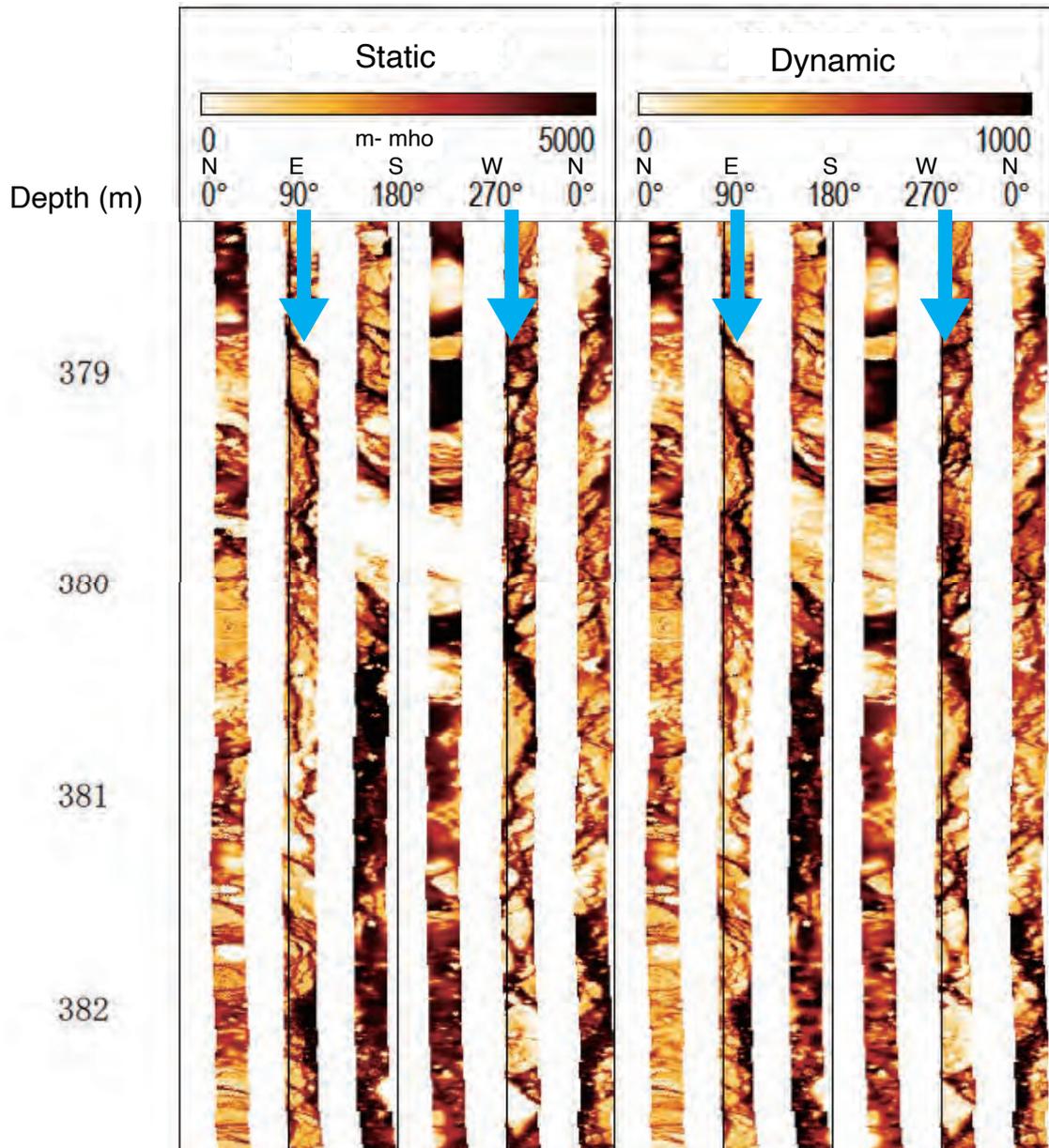
(b) 241.8 - 243.2 m



(c) 280.8 - 282.6 m



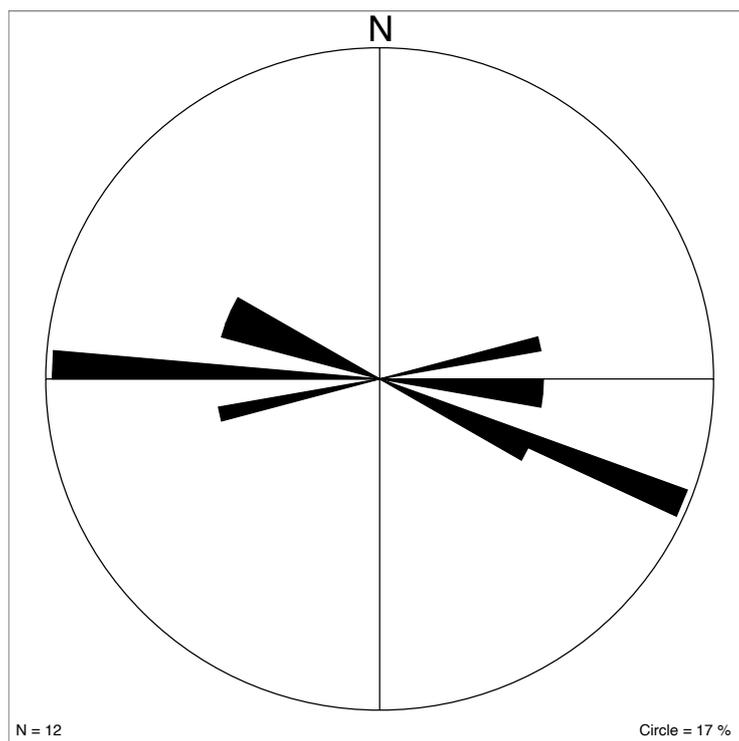
(f) 379.0 - 382.0 m



第 4 表 DITF の方位読み取り結果。

検層ツール	孔井	深度 (m)	亀裂方位- 1 * (deg.)	亀裂方位-2* (deg.)
XRMI (比抵抗式 孔壁画像 検層)	孔 2	132.4 - 135.8	78	256
	孔 1	241.8 - 243.2	118	296
		280.8 - 282.6	112	288
		288.4 - 289.6	112	294
		354.6 - 355.6	90	270
		379.0 - 382.0	98	274

*真北から時計回りの角度



第 20 図 第 4 表に示す DITF の方位の分布を示したローズダイアグラム。