

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

Application examples of hydraulic conductivity evaluation
methods at AIST integrated groundwater observation boreholes:

For managing insufficient measurement conditions

木口 努^{*1}・桑原保人^{*2}

KIGUCHI Tsutomu^{*1} and KUWAHARA Yasuto^{*2}

*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

*2 産業技術総合研究所 名誉リサーチャー

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

*2 Emeritus Researcher, AIST

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

Application examples of hydraulic conductivity evaluation
methods at AIST integrated groundwater observation boreholes:
For managing insufficient measurement conditions

木口 努^{*1}・桑原保人^{*2}

KIGUCHI Tsutomu^{*1} and KUWAHARA Yasuto^{*2}

*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

*2 産業技術総合研究所 名誉リサーチャー

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

*2 Emeritus Researcher, AIST

キーワード：孔井内測定、透水性、電気伝導度検層、速度検層、ストーンレー波、ハイドロ
フォン VSP、チューブ波、地下水等総合観測井

Keyword : borehole measurement, hydraulic conductivity, fluid electrical
conductivity logging, sonic logging, Stoneley wave, hydrophone VSP, tube wave,
AIST integrated groundwater observation borehole

内容紹介

産総研では 2006 年から 2013 年までに愛知県から紀伊半島及び四国で 16 の地下水等総合観測点を整備し、そのうちの 15 観測点で孔井内の透水性を評価するために、電気伝導度検層、速度検層（ストレー波）とハイドロフォン VSP のいずれかの手法を適用した。ここではこの経験をもとに、3 手法の測定時の制約やそれによる結果への影響を取りまとめた。観測点の孔井内測定は、孔内観測機器やストレーナの設置深度の判断を主な目的とするため、機器などの設置上は十分であると判断し孔井内の安全確保を優先させ、測定項目や仕様・手順などを変更することがあった。特に、電気伝導度検層は、多くの観測点で、孔壁崩壊の防止を優先し、孔内水の置換、水頭の低下、繰り返し測定などの標準的な手順が変更されるという制約があった。このような制約下で測定した場合に、データの品質や解析などにどのような影響があったかについて、1) 孔内水と地層水の圧力差、2) 孔内水の電気伝導度のノイズレベル、3) 孔内水と地層水の電気伝導度の差という 3 つの観点から測定事例を整理した。また、段階的に水頭を低下させて繰り返し測定することは多くの場合有効であった。さらに、今後の測定時に制約があった場合にも解析可能な品質のデータ取得するための対応策や解析における注意点などについても整理した。

We summarized the application examples of hydraulic conductivity evaluation methods, such as fluid electrical conductivity logging, sonic logging, and hydrophone vertical seismic profiling (VSP) conducted in the boreholes drilled at the 15 AIST integrated groundwater observation stations, southwestern Japan. The main purpose of the borehole measurements at the observation stations is to determine the installation depths of borehole strainers and long-term observation tools. The standard specifications and procedures of the logging techniques were sometimes changed to ensure the safety of the borehole during the measurements, when the change was considered to have little effect to determine the installation depths. The examples of data obtained under insufficient measurement conditions as well as those measured with standard procedures were summarized regarding the effects on data quality and analysis. We also showed the countermeasures to obtain data of analyzable quality even under insufficient conditions on future applications of the methods.

1章 はじめに

産総研は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、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地下水等総合観測点を16か所整備した(小泉, 2013)。それぞれの観測点では最大深度約600mの孔井を掘削し物理検層やVSPなどの多種目の孔井内測定を実施している。これらの孔井内測定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、水位観測を実施するのに必要となる適切な透水性を有する亀裂や透水ゾーンの深度の検出や、地殻歪・地震動を安定して長期間観測できるよう非透水性の深度区間の決定などが目的となる。さらに木口・桑原(2018, 2019, 2021)は、これら測定データを統合して、地下透水性亀裂の向きと応力場の関係や透水性亀裂の方向の支配要因などに関する解析を行っている。

各種孔井内測定のうち孔井内の透水性の評価を目的とするものとしては、電気伝導度検層、速度検層とハイドロフォンVSPの3つの手法を適用した。これらの手法を実施する位置付けとして、電気伝導度検層は原則として全ての観測点・孔井での実施を予定した基本的な手法であり、速度検層とVSPは限られた観測点でのみ補完的に実施された。電気伝導度検層は、地層水の流れそのものを計測でき、水の流入以外の影響を受けにくい探査手法として地下水の水みちを検出するために多くの実績がある(例えば、塚本ほか, 2010)。ハイドロフォンVSPと速度検層は、孔井内を伝播する境界波を用いることから電気伝導度検層とは異なる原理で透水性を評価できる。ハイドロフォンVSPは火成岩地域などの観測点を対象に主に構造探査を目的として実施されたものであるが、地下透水性亀裂を検出した実績(例えば、Kiguchi et al., 1995; 木口ほか, 2003)を参考にしながら透水性亀裂の解析を行なった。速度検層については、3章で説明するように電気伝導度検層では標準的な測定手順などが制限される場合があることが観測点の整備を進める中でわかったため、孔井の深度方向に連続的な透水性を評価した実績(例えば、伊藤ほか, 1996)を参考に、電気伝導度検層の補完的手法として整備の後半において実施した。なお、電気伝導度検層は、流体電気伝導度検層と表記されることもあるが(例えば、塚本ほか, 2010; 関ほか, 2012)、本稿では電気伝導度検層とする。

観測点の整備を進める中で、上記3つの手法については、孔井の掘削状況に応じた測定仕様、得られたデータの品質や解析結果などに関する多く事例が得られた。この中には、当初の仕様・手順の通りに測定が実施され良好な結果が得られた例や、主に掘削時の孔井安全性確保の観点から仕様・測定手順などを変更せざるを得ず、それによる測定条件の制約のため十分に透水性を評価できなかった測定例などがある。本稿では、今後実施される透水性評価のための孔井内測定の仕様や現地での測定手順などの策定に参考にできるように、制約される可能性のある測定手順と制約された場合のデータの品質・特徴などを実用的な観点から整理した。また、測定時に制約がある場合でも解析可能な品質のデータを取得するための対応策についても検討した。なお、3手法のうち電気伝導度検層は適用した事例が最も多く、現地での様々な制約の下で多様な特徴と品質を示す測定データが得られたので、電気伝導度検層の結果を中心に説明する。速度検層とハイドロフォンVSPについては、主にデータ解析上の注意点について記述する。

2章 孔井内測定の概要

第1図に16観測点の位置と名称を示し、各観測点の名称、所在地、座標（世界測地系）、整備完了年などを第1表に東の観測点から順にまとめた。各観測点では3つの鉛直孔井を掘削し、それらの深度はおおよそ600m、200m、30mを基本とし、孔井を深い順に、孔1、孔2、孔3とした。各孔井の掘削時に実施した多種目の物理検層、水圧破碎法による応力測定やハイドロフォンVSPなどの孔井内測定については木口ほか（2014）と木口・桑原（2021）がまとめている。本章では、電気伝導度検層、速度検層、ハイドロフォンVSPの概要と、各手法をどの観測点で実施したかについて説明する。各観測点における孔井内測定の実施項目は予想された孔井地質や掘削状況などにに基づき決定し、先に述べたように3つの手法が全ての孔井で実施されたわけではない。第1表に各観測点の3手法の適用の有無をまとめた。また、3手法により透水性を評価する詳細な原理や特徴などは木口・桑原（2018）が説明しているが、3章と4章でも簡単に紹介する。なお、温度検層により、孔内水と温度が異なる地層水が流入した場合の温度変化から透水性を評価できる場合がある。しかし、TSSの孔2を除いて、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することは難しかったため、本稿では温度検層については取り上げない。

2.1 電気伝導度検層の概要

電気伝導度検層は、孔井内を伝播する波動現象を解析する他の2手法と異なり、亀裂を通じて孔井内に流入する地層水の流れそのものを検出する手法であり、透水性評価の基本的な手法として、HGMを除く15の観測点で実施された。電気伝導度検層では、高い透水性の亀裂が密に近接して存在する場合に、それらを分離して検出するのは困難となるかもしれないが、水位観測をするためのストレーナ（スリットのあるケーシング）を設置する深度区間を決めるには十分な分解能で高い透水性の深度を求めることが期待できる。HGMでは、未固結の軟岩を含む孔井の安全確保を優先し検層全体の作業時間を短縮するなどの理由により電気伝導度検層は適用されなかった。なお、HGMでは3つのいずれの手法も適用されず、ストレーナの設置深度の決定には、他の検層の結果やコア試料による地質情報などを用いた。

透水性を評価するための電気伝導度検層では、次の3段階の測定手順を取ることを標準とした。1)測定前に、孔内の掘削泥水を電気伝導度が地層水とは異なる比重の小さい水（例えば、脱イオン水）に置換する。2)地層水が透水性亀裂や透水ゾーンを通じて孔井内へ流入しやすい圧力状態とするために、測定前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などを確認するために、1時間程度の間隔で数回の繰り返し測定をする。ただし観測点によっては数時間以上の間隔としたり、一晚静置した後に測定した場合もあった。また、掘削状況に応じて標準の手順通りに実施せずに測定した場合もあり、実際の測定状況とデータについては3章で詳しく説明する。

2.2 速度検層の概要

速度検層ではP波やS波の他に孔壁面に沿う境界波であるストーンレー波も観測される。数kHz程度の周波数のストーンレー波が伝播する途中に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・速度低下などを示すため、これらの特徴的な波動現象の検出により透水性亀裂や透水ゾーンの深度を求めることができる。

速度検層はP波あるいはS波の速度を求めるために全ての観測点で実施されているが、ストレー波を対象とした解析は観測点の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解析が行われず、NSZ、ANO、NHK、SSKの4観測点のみで実施された。速度検層に使用した機器の型名・仕様などは、電気伝導度検層の使用機器とともに、木口ほか（2014）がまとめている。

2.3 ハイドロフォン VSP の概要

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P波により亀裂内の流体が孔井内に出されることからその深度でチューブ波と呼ばれる境界波が励起され孔井内を伝播する。チューブ波が発生する深度を検出することによって透水性亀裂の深度が求められる。P波とチューブ波の周波数は、100Hz程度であることが多い。

観測点でハイドロフォン VSP を実施する際には、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などを条件として観測点を選んだ。その結果、TYS、NSZ、ANO、NHK、SSK、TSSの6観測点で実施した。VSP に使用した震源は、270kgの重錘をゴムベルトで助勢して落下させるタイプ（BISON INST. 製、EWG-II）と64kgの重錘を高さ約4mから自由落下させるモンケン式の2種類の重錘落下型であり、受振器には0.5m間隔の24chのハイドロフォンアレイ（Pro-Seismic 製、HTI-96-MIN）を用いた。

3章 測定データ例とデータ取得に関わる制約

前述のようにストレーナや観測機器の設置深度の判断が孔井内測定の主な目的であり、その目的に十分であると判断されれば、孔井内作業の安全を優先させて、各観測点の孔井地質や掘削状況などによって、測定の仕様や手順などが変更される場合もあった。このように当初計画から変更された測定仕様や手順などはデータ取得時の制約となり、その結果、透水性評価の解析に影響を与えたこともあった。今後同様な測定を実施する際の参考となるように、測定において生じる制約や測定データへの影響などについて、実用的な観点から本章で整理する。特に電気伝導度検層は、多くの観測点・孔井の様々な制約の下で特徴的な測定データが多数得られた。なお、本章に示す測定データの例は、木口・桑原（2021）の図から抜粋し編集した。本章で例示されなかった観測点・孔井の測定データは木口・桑原（2021）に示されている。

3.1 電気伝導度検層のデータ例

透水性を評価するための電気伝導度検層を実施する際には、2章で説明したように、1) 孔内水の置換、2) 水頭の低下、3) 繰り返し測定が標準的な測定手順である。このうち、水頭の低下及び掘削泥水よりも比重が小さい脱イオン水などへの置換は、ともに孔井内の圧力を低下させるので水圧による孔壁保護の効果が小さくなり、孔井の裸孔部分に破碎帯などの軟弱な地層が含まれる場合には孔壁崩壊などの危険性が相対的に高くなる。また、繰り返し

返し測定も、低い孔井内圧力が長時間継続することになるため、孔井内の安全確保に悪い影響を与える可能性がある。コア試料や物理検層、掘削状況などから硬質な結晶質岩などが全深度で連続することが推測できた観測点、例えば、TYS、ICU などでは、ある程度の孔井内圧力の低下が測定中に生じても直ちに孔壁崩壊する危険性は低いと判断でき、上記の手順による測定が可能であった。しかし、破碎帯や軟弱な堆積岩の地層を含む地質が予想される孔井では、いくつかの手順を制限して、孔井内の安全確保を優先した場合が多かった。どのような測定手順で実施するかについては、各孔井の掘削状況や孔井地質などを考慮して、現地で調整する必要があった。

電気伝導度検層の各観測点の孔井への適用事例として、3 つの測定手順の実施状況、地層水流入による電気伝導度変化の検出の可否、及びデータ品質と測定時の特記事項などを整理し、その結果を第 2 表にまとめた。第 2 表を参照しながら各測定手順の制約の有無などによるデータの特徴や品質を次に説明する。

(1) 孔内水の置換に関するデータ例

孔内水の置換については、15 地点の全 46 測定のうち、約半数の 25 測定で実施した。この中には、第 2 表に△印で示した浅部の一部の深度区間だけ置換した 2 測定も含む。なお、本節では、ANK の孔 2 などのように 1 つの孔井を浅部と深部の 2 回に分けて測定した場合には「2 測定」として扱う。各観測点で最も浅い孔 3 では、測定した 14 観測点のうち KOC を除く 13 観測点で置換し、測定時に孔壁崩壊などの障害は発生せず、30m 程度の浅い孔井では置換することに概ね問題がなかったと言える。一方、600m 程度の最も深い孔 1 では孔井地質が硬質な結晶質岩などである TYS、ICU、TSS の 3 観測点だけが全深度で置換しており、付加体などの堆積岩あるいは破碎帯が含まれる地質が推測された残りの 12 観測点の孔 1 では、孔壁の保護を優先して置換しないか、あるいは浅部の区間のみの置換だけであった。

置換せずに掘削泥水のままで測定するという制約があった 21 測定のうち、約 70%の 15 測定で電気伝導度の変化を検出できないか、あるいは一部検出可能だがデータの品質に問題があった。置換しないことが電気伝導度の変化の検出を困難にする主な要因としては、孔井内の圧力が高く地層水が孔井内に流入しにくいことが考えられる。

置換した場合と置換しなかった場合の測定データの例を第 2 図に示す。(a) ICU の孔 1 と (b) NHK の孔 3 はともに孔内水を置換して測定し、(c) KOC の孔 1 (深部) は孔内水を置換せず掘削泥水のまま測定した。これらの 3 測定はいずれも水頭の低下、繰り返し測定の手順を踏み、掘削の孔径も同じである。水道水に置換した (a) の ICU では、500m 以深の深部まで地層水の流入によって高いピークを示す電気伝導度の変化を繰り返し測定で再現性良く高分解能で検出でき、高品質なデータが取得されたことがわかる。検出された深度は図中の横線とグラフ右側の数字で示す。脱イオン水に置換した (b) の NHK では、水頭を低下させた 2 回目の測定で地層水が流入し 2 つの深度で電気伝導度が高くなるピークを示す変化が見られる。その後の繰り返し測定でも電気伝導度が同一の深度で変化する再現性を確認できる。一方、掘削泥水のまま測定した (c) の KOC では全深度で高周波数のノイズと思われる変動が見られるだけであり、繰り返し測定で再現性が確認できる有意な振幅を持つ電気伝導度の変化は認められない。この孔井は全深度で難透水性であることも考えられるが、掘削泥水では孔井内圧力が高く地層水が流入しにくいような圧力条件であった可能性がある。なお、置換した (a) (b) と掘削泥水の (c) の電気伝導度の値は、それぞれ、 $10 \sim 100 \mu\text{S}/\text{cm}$ と $2,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ 程度であり、両者の値が大きく異なることにも注目されたい。掘削泥水の電気

伝導度は他の観測点でも、概ね $1,000 \mu S/cm$ 以上を示した。

掘削泥水のままで測定した孔井でも、地層水流入による電気伝導度の変化を検出できた場合がある。その例として、NSZ の孔 2 の結果を第 3 図に示す。繰り返し測定の後半で掘削泥水よりも電気伝導度が低い地層水が流入してノイズよりも大きな振幅の負のピークを示す深度を検出できることがわかる。この孔井では、繰り返し測定の 3~5 回目に水頭を 10~13m と大きく低下させたため地層水が流入できる圧力低下の効果があったと考えられる。ただし、速度検層とハイドロフォン VSP ではこの孔井の 160m より深い深度で透水性亀裂の深度を検出できたが（木口・桑原, 2019）、電気伝導度検層では 160m より深部で変化が認められなかった。このことから、掘削泥水での測定では、水頭の低下などの効果により電気伝導度の変化を検出できる場合があるが、水頭の低下による効果が深部では不十分となり、地層水の流入は浅部に限られ、深部では透水性亀裂の深度を求められない可能性もあると考えられる。

第 4 図の NHK の孔 2 も掘削泥水のままで測定であったが、繰り返し測定の後半で海水起源の成分を含む地層水の流入によると思われる非常に高い電気伝導度の変化が見られた例であった。NHK の孔井は海岸に約 100m の距離で隣接している。5 回目の測定で約 110m 以深のいくつかの深度区間で高い電気伝導度の変化を示し、それ以降の測定で電気伝導度はさらに高くなりその深度範囲が広がっている。さらに、例えば 5 回目の 110~130m 区間の測定に見られるような深度方向に短波長で大きな振幅でパルス状に変化する深度区間があり、ほぼ全深度で高周波の変動がありノイズレベルが高いなどの特徴も見られる。ある深度における変化の再現性を確認することが困難であり、高い電気伝導度を示す深度区間の幅が広いことなどから、地層水が流入する深度を高分解能で求めることはできなかった。繰り返し測定の後半で上記のようなパルス状の変化や大きなノイズが生じた原因は明らかではないが、検層後に実施したハイドロフォン VSP 測定での受振器の付着物などから孔内水が一部ゲル状になっていることが推測されたので、電気伝導度検層の時にも添加物を含む掘削泥水と海水起源の成分を含む地層水とが反応して生成されたゲルが孔井内に分布することによって生じた可能性がある。

掘削泥水での測定で電気伝導度の変化の検出を困難にする要因として、前述した地層水が孔井内に流入しにくい圧力条件の他に、第 2 図(c)や後述の第 7 図(b)のような高いノイズレベルによる影響が考えられる。木口・桑原（2021）が 15 観測点の孔内水の電気伝導度の標準偏差を求めており、ノイズレベルの検討の参考となるが、詳細については 4.1 節で説明する。概要は、掘削泥水中の電気伝導度の標準偏差は脱イオン水に比べて 10~100 倍程度高いことである。掘削泥水のノイズレベルが高くなる原因として、泥水用の各種の添加物が孔内で不均一に存在することや、脱イオン水に比べて高い粘性を持つために均質になりにくいことなどが考えられる。

(2) 水頭の低下に関するデータ例

全 46 測定のうち、約 60% の 28 測定では水頭を低下させる手順を実施した。水頭を低下させなかった 18 測定のうち、4 測定では測定時に孔井内から湧水があり、安定して水頭を低下させることが困難であったが、湧水があった全ての孔井で電気伝導度の変化を検出できた。この 4 測定以外の水頭を低下させなかった 14 測定のうち、6 割以上の 9 測定では電気伝導度の変化を検出できないか、一部検出可能だがデータの品質に問題があった。水頭を低下させなかったが検出できた 5 測定のうち、ANK の孔 3、MUR の孔 1（浅部）、TSS の孔 3

では脱イオン水に置換した効果があったと思われる。残りの ITA の孔 1 と KOC の孔 2（浅部）は、現時点で理由は明らかでないが、泥水よりも低比重の地層水が孔内に流入してきたと考えられ、興味深い。

自然状態に近い水頭の時には地層水が流入せず、水頭を低下させて孔井内圧力が十分下がった時に地層水が流入する状況は、水頭を段階的に低下させた繰り返し測定によって確認できた。第 5 図に示す KST の孔 3 のデータ例では、脱イオン水に置換後に水頭を低下させないかあるいは低下量が小さい 1~3 回目の測定では、全深度で電気伝導度は低い値のまま変化が見られない。しかし、水頭を 4m 以上低下させた 4 回目以降の測定では、地層水の流入により全体に電気伝導度が高くなり、また正のピークの変化を示すいくつかの深度を再現性良く確認できる。ただし、水頭を低下させると必ず電気伝導度の変化が検出されるのではなく、MUR の孔 1 深部や KOC の孔 1 深部などの 9 測定では水頭を低下させても電気伝導度の変化は検出されず、透水性亀裂や透水ゾーンは存在しないと判断した。

(3) 繰り返し測定に関するデータ例

繰り返し測定について、15 地点の全 46 測定のうち、3 測定が 1 回だけの測定であり、ほとんどの測定で繰り返し測定を実施した。全測定で繰り返し数の最大は 8 回であり、平均約 4 回である。水頭を低下させない自然状態から次第に水頭を低下させながら 1 時間程度の間隔で測定を繰り返すことにより、地層水の流入による変化を検出した例が多く見られる。なお、1 回だけの測定だった ANO の孔 1 では測定時にツールの降下が不能となり、ツールの抑留を避けるために繰り返し測定を行わなかった。また、ITA の孔 1 と KOC の孔 2（浅部）では孔壁崩壊を防止し孔井内の安全を優先するために、孔内水の置換と水頭の低下も行わずに 1 回の測定だけとなった。

繰り返し測定によって、より深部の電気伝導度の変化を検出した例として、掘削泥水で測定した UWA の孔 1 の結果を第 6 図に示す。測定データは全体としてノイズレベルが高いが、水頭を自然状態から 20m、30m、40m、50m と段階的に低下させて繰り返し測定した効果により、ノイズよりも大きな振幅の負のピークを示す深度をいくつか検出できる。例えば、約 300m 以浅では 2~3 回目の測定、約 300~400m 区間は 3~4 回目の測定、400m 以深は 4~5 回目の測定により電気伝導度の変化を検出できる。水頭を大きく低下させながら繰り返し測定することによって、より深部の地層水が流入する深度が検出できたと言えるであろう。

(4) 掘削孔径に関するデータ例

本節の上記 (1)~(3) は、孔井掘削後の測定時の手順に関することであるが、それ以外に、孔井掘削の仕様上の制約が測定データに影響を与える場合があり、大きな掘削孔径が挙げられる。地層水がわずかな量でも流入した場合に孔井内の電気伝導度の変化を高感度に検出できるように、孔内水の体積を小さくすることが望ましい。このため、各観測点では孔径が小さい HQ コアリング（直径約 98mm）の孔井での電気伝導度検層の実施を基本とした。前述の第 2 図から第 6 図までの全てのデータは HQ コアリングの孔井で測定された。しかし、コア掘削を省略するなどの掘削仕様の都合により小孔径の掘削が行われなかったため、大孔径（例えば直径約 270mm）の掘削孔井で測定した場合もある。第 2 表の「孔井」欄のアスタリスク記号はその孔井が大孔径であることを意味する。このような大孔径で測定したのは 10 測定であり、このうち 7 測定で電気伝導度の変化を検出できないか、データの品質に問題があった。検出できなかった理由の 1 つとして、孔内水の体積が大きく、地層水流入に

よる電気伝導度の変化を捉えられなかった可能性が考えられる。一方、大孔径だが電気伝導度の変化が検出できた 3 測定のうち 2 測定では、湧水や掘削時の全量逸水があり、顕著な透水ゾーンがあったため検出できたと推測される。大孔径の孔井で測定した例として、直径約 270mm の MUR の孔 3 と UWA の孔 2 の結果を第 7 図に示す。2 つの孔井とも繰り返し測定を実施したが、再現性を確認できるような顕著な電気伝導度の変化を検出できなかった。これらの孔井では全深度で難透水性であった可能性も考えられるが、小さい孔径の孔井で測定すれば透水性をより適切に評価できた可能性もある。このように電気伝導度検層で変化を検出できなかった場合は、ストレーナを設置する深度を決めるために、他の検層やハイドロフォン VSP の結果、コア試料による地質情報などを用いた。

3.2 速度検層のデータ例

ストンレー波を対象とした処理と解析が適用された 4 観測点では、速度検層は標準的な計画・仕様に従い適切に実施され孔内作業の安全性に問題もなく、データの品質に影響を与える測定時の制約はなかったと考えられる。4 観測点の速度検層データから透水性亀裂・透水ゾーンの深度を求めるときには、波形処理後の画像データを使用した。速度検層では、この 4 観測点を含めてデジタルの波形データが保存されていなかったため、残りの 12 観測点で、後年にストンレー波を対象とした再処理・再解析が実施できなかった。

4 観測点でのストンレー波の周波数、ノイズレベル、反射波と他の波形の分離や減衰・速度低下の特徴などのデータの品質について整理した結果を第 3 表の左列に示す。いずれの観測点でも透水ゾーンの深度区間を検出できる良好な結果であった。ストンレー波を対象としたデータ処理後の速度検層の受振波形の例として、NSZ の孔 1 と SSK の孔 1 のそれぞれ約 50m の深度区間の結果を第 8 図に示す。各図中の左の黒線は、ストンレー波の反射・減衰・速度低下を検出した深度を意味する。(b) の SSK では約 600 μ s 付近に見られるストンレー波の初動以降の振幅が相対的に強調されている。一方、(a) の NSZ の方が初動付近以外の波形の振幅が小さくノイズも低いという特徴が見られる。これは、各観測点で使用するデータ処理で適用したパラメータが波形データに影響を与えたと考えられる。

3.3 ハイドロフォン VSP のデータ例

ハイドロフォン VSP による手法は、標準的な計画・仕様に従い適切に実施され測定中の孔内作業の安全性に問題もなく、速度検層と同じように、データの品質に影響を与える測定時の制約はなかったと考えられる。なお、ハイドロフォン VSP を適用した 6 地点は、観測点の整備以前にハイドロフォン VSP を適用した地点の地質や得られた結果などを基にして決めた。

ハイドロフォン VSP の波形データの特徴やチューブ波の発生深度の検出などのデータ品質について整理した結果を第 3 表の右列に示す。いずれの観測点でも透水性亀裂の深度を検出できる良好な結果であった。測定データの例として、第 9 図に NHK の孔 1 と TYS の孔 1 の結果を示す。(b) の TYS では、(a) の NHK と比べると初動 P 波の振幅が小さく波形の確認が困難な場合がある。振幅が小さくなる原因として、TYS の震源位置の地盤が他の観測点に比べると軟弱であり震源エネルギーが小さくなった可能性が考えられる。TYS を含めて VSP を実施する際には、予定された期間内にデータ取得するなどの作業時間の制約も考慮しつつ、初動波形を明瞭に確認できるように深部の測定では震源のスタック回数を増やすな

どの工夫を行っている。

4章 データ取得時の制約への対応策

透水性評価が必要な将来の新たな掘削プロジェクトなどでも、測定の実施目的や孔井地質、掘削状況などに合わせて、孔井内測定の実施仕様や手順から変更することがありうると思われる。その場合に、仕様や手順の変更などによるデータの品質や解析への影響をなるべく小さくするような対応や、各手法の測定・データ解析における注意点などをあらかじめ検討できるように、観測点での多くの測定で得られた知見から有効と思われる対応策などを本章で整理した。

4.1 電気伝導度検層の対応策

測定する手順の制約の有無などにより様々な品質のデータが取得され、その結果、地層水の流入による電気伝導度の変化を検出できた測定データとできなかったデータがあった。これら 46 測定のデータと電気伝導度変化の検出の有無を合わせて検討すると、測定データから電気伝導度の変化を検出できるかどうかは、1) 孔内水と地層水の圧力差、2) 孔内水の電気伝導度のノイズレベル、3) 孔内水と地層水の電気伝導度の差の 3 つの要素から判断できると考えられる。1) は地層水が孔井内に流入できるように、孔井内の圧力を十分に低くすることであり、測定においては水頭を低下させる深度や孔内水の比重などが直接関係する。2) は流入する地層水によって電気伝導度が増加する量よりも、孔内水の電気伝導度のノイズレベルが有意に低いこと、3) は地層水の流入による孔内水の電気伝導度の変化を検出できるように、両者の電気伝導度に十分な違いが必要であることをそれぞれ意味する。これら 3 要素の条件を満たすような仕様や手順で測定すれば、地層水流入によって電気伝導度が増加する深度を検出できることになる。

1) の圧力差は、地層水を流入させるために必要であり 3 要素の中で最も基本的な条件と考える。亀裂から地層水が流入するために必要な水頭の低下深度は、亀裂の深度と透水係数、孔内水の比重、地層水の圧力、流入量などのパラメータを設定し、流体移動の関係式（例えばダルシーの法則）に適用すれば、そのモデルに基づいた推定が可能であろう。第 2 表に示した通り、深度約 600m の孔 1 の場合には、様々な地質において水頭を最大 50m 程度低下させた場合が多く、これらの最大低下深度は今後の測定において孔井内の安全性を考慮して水頭を低下させる際に参考となる値である。しかし、電気伝導度の変化を検出するために必要な水頭の低下量は、観測点によって大きく異なる。例えば、100m 低下させた MUR の孔 1 を含めて水頭を低下させた 9 測定で電気伝導度の変化が検出されず、一方、水頭を低下させなかった 14 測定（湧水した孔井を除く）のうち 5 測定で電気伝導度の変化を検出した。検出に必要な水頭の低下量はその孔井の透水係数に大きく依存することが推察できる。また、測定時には、孔井内の安全性の確保や作業時間、揚水能力なども考慮するため、測定前にモデルに基づいて推定したり第 2 表に示す低下深度を参照して決めた深度まで水頭を低下させられない場合がある。従って、実際の測定では、事前に推定した低下深度などを参考とし、孔井内の安全性の確保なども考慮して水頭の最大低下深度を設定して、繰り返し測定の最後までに最大深度まで低下させられるように、低下させる深度を段階的に深くし繰り返す。

返して測定することが考えられる。もし、安全性の優先などにより最大低下深度を十分に深く設定できない場合には、繰り返し測定の早い段階で最大低下深度まで低下させ、安全性に問題がないことを確認した後にさらに低下させていくなどの工夫も必要である。安全性を考慮すると、少ない測定回数で十分深い深度まで水頭に低下させることが困難となる可能性があるため、必要な圧力差を実現するためには孔井内の安全性を確認しながら繰り返し測定することも重要であり、段階的に水頭を低下させる繰り返し測定により電気伝導度の変化を検出できる可能性が高くなると考える。

2) の孔内水の電気伝導度のノイズレベルについては、木口・桑原 (2021) が 15 観測点の電気伝導度の標準偏差を求めている。掘削泥水で測定した 21 の観測例のうち 20 で、電気伝導度の絶対値は概ね $1,000 \sim 4,500 \mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲にあり、標準偏差は $5 \sim 10 \mu\text{S}/\text{cm}$ 程度を示した。残り 1 例の UWA 孔 1 のみは、理由は明らかでないが、絶対値が約 $10,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、標準偏差が $60 \mu\text{S}/\text{cm}$ と例外的に高い値であった。掘削泥水の電気伝導度の絶対値やノイズレベルが孔井によって異なる原因は、測定直前に、掘削時の泥水から添加物の種類や量などを変更し比重や粘性を低下させた薄い泥水を孔井内に循環させた場合などがあることが考えられる。今後、掘削泥水で電気伝導度検層を実施する場合にも、ノイズレベルとしては $5 \sim 10 \mu\text{S}/\text{cm}$ 程度を想定するのが良いだろう。一方、観測点で脱イオン水に置換した場合の標準偏差はいずれもおよそ $0.5 \mu\text{S}/\text{cm}$ であり、地層水の流入による電気伝導度の変化を検出する上で十分小さい。なお、木口・桑原 (2021) は、地層水流入による電気伝導度の変化を検出する際には、標準偏差の 2 倍以上の大きさの変化量を検出条件の 1 つとした。また、掘削孔径が大きい場合には孔内水の体積が大きくなることから地層水流入による電気伝導度の変化を捉えにくくなる。この変化を捉えるためには小孔径での測定よりもノイズレベルを低くすることが必要となるので、掘削孔径の違いによる変化の検出はノイズレベルの問題として扱うことができる。大孔径で測定した観測点の結果では、ノイズレベルの低い脱イオン水に置換した 4 測定のうち 3 測定で変化を検出できた。

3) の孔内水と地層水の電気伝導度の差について、観測点で脱イオン水に置換した場合に地層水が流入した深度の電気伝導度は $100 \sim 200 \mu\text{S}/\text{cm}$ 程度の値を示し、また深さが 30m 程度の孔 3 の繰り返し測定で地層水の流入により孔井全体の電気伝導度が高くなった場合の値は $100 \mu\text{S}/\text{cm}$ のオーダーであることから、脱イオン水に置換した孔井の地層水流入による電気伝導度の変化量は $100 \mu\text{S}/\text{cm}$ のオーダーであると考えられる。脱イオン水の電気伝導度はおよそ $10 \mu\text{S}/\text{cm}$ 以下であり、地層水による変化の値とはオーダーで異なるため、脱イオン水に置換した場合には地層水との電気伝導度の差は検出が可能となる大きさと言える。掘削泥水のままで測定した結果を見ると、各孔井で使用する泥水の調査が異なるために孔井によって泥水の電気伝導度のばらつきが見られ、 $1,000 \sim 4,500 \mu\text{S}/\text{cm}$ 程度の範囲の値が多い。掘削泥水で地層水の流入による変化を検出したときの電気伝導度の値は、海水起源の成分を含む高い電気伝導度の地層水が流入した NHK の孔 1 と 2 を除き、掘削泥水の値よりも低下し、その値にばらつきがあるが多くはおよそ $1,000 \sim 3,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲である。従って、地層水の流入による電気伝導度の値は、掘削泥水の値と同じオーダー程度であり、2) で説明したノイズレベルの大きさを考えると、電気伝導度の変化を捉えることは、脱イオン水に置換した場合よりも難しくなると言える。例えば、測定前に薄い泥水を循環させる場合には、電気伝導度の値が小さくなり、地層水の流入による変化の値の範囲に近づく傾向となるので、電気伝導度の変化を捉えにくくなる可能性もあることに留意する必要がある。

ある。一方、高い電気伝導度（例えば、 $5,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ 以上）の泥水中で測定すれば地層水との値の差が大きくなり検出が容易となる傾向であるが、このような泥水では大きい比重による孔内圧力の上昇などの他の要素への影響の検討も必要であろう。

以上のように、測定前に、これらの3要素の条件を考慮して仕様や測定手順を策定し、さらに繰り返し測定も組み込んだ測定を計画することにより、今後の測定で電気伝導度の変化を検出できる可能性を高くすることができると思う。

3.1節で説明したように、3つの標準的な手順のうち、実施できたのが最も少なかったものは孔内水の置換であり、その次に実施できなかったのが水頭の低下であった。今後電気伝導度検層を実施する際にも、現地では、孔内水の置換や水頭の低下の手順が制約される可能性があることを想定すると、測定時の手順への制約に関して以下のような対応策が考えられる。

a) 一部の深度区間（ケーシング内など）だけでも置換

置換せずに掘削泥水のまま測定した21測定のうち、約70%で電気伝導度の変化を検出できないか、あるいはデータの品質に問題があった。また、掘削泥水のまま水頭を低下させた11測定でも、約半数で電気伝導度の変化を検出できなかった。従って、脱イオン水などに置換することが望ましいが、孔内の安全性を優先し孔井全体を置換することが困難である場合には、所定の深度まで降下した掘削ロッドで脱イオン水などを循環させることによって浅部側の一部の深度区間だけでも置換することの検討が必要である。観測点の例では、KST や MAT の孔1では孔壁保護のケーシングを挿入した浅部の深度区間を対象に脱イオン水に置換しており、これらの孔井では電気伝導度の変化を検出できた。検出できた原因には、一部区間の置換によって孔内水の比重を低下できた効果なども含むと思われる。

b) 掘削泥水でも水頭を低下

掘削泥水で測定する場合にも、可能な範囲でなるべく水頭を低下させることが重要である。観測点では、NSZ、MYM、UWA などの孔1において、孔内水を置換しなかったが水頭の低下させた繰り返し測定により電気伝導度の変化を検出できた。従って、水頭をある程度低下させて測定したデータを現地ですぐに確認し、変化が見られない場合には、次の測定の前に水頭をさらに低下させ、地層水が流入できる圧力条件に近づけることを検討するべきである。

c) 水頭を段階的に低下

まず水頭を低下させない自然状態で測定し、地層水が流入しにくい初期状態の電気伝導度の値を確認し、それから水頭を段階的に深く低下させ、繰り返し測定により地層水が次第に流入し電気伝導度が増加する深度の再現性や地層水の拡散などの経時変化を把握することによって、高い信頼性で検出できると考えられる。また、繰り返し測定の中で地層水が流入し始める水頭の深度を明らかにできれば、透水性の定量的な解析につながる。さらに、急激に水頭を低下させると孔井内圧力の急な低下が大きな孔壁崩壊を引き起こす可能性があるため、水頭を段階的に低下させて繰り返し測定しながら孔内状況を確認することが、安全確保にも役立つと考えられる。

上記の他に、大孔径の孔井で電気伝導度検層を実施するときの注意点として、孔内容量が大きくなるために、置換する脱イオン水を大量に生成できる機材や水頭を十分に低下できる大型の揚水ポンプなどを調達する必要がある。

4.2 速度検層とハイドロフォン VSP の対応策

ストンレー波の減衰や反射などを用いる速度検層の解析において、ストンレー波は透水ゾーンや透水性亀裂の存在以外にも、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増加する深度や孔径が増加する深度などでも減衰や反射などを示す可能性がある（例えば、Tezuka *et al.*, 1997）。このため、速度検層から検出した深度を評価するには他の測定データと比較するなどの検討も必要と考えられる。観測点では、深度の誤差を考慮すると、電気伝導度検層やハイドロフォン VSP から検出した深度は速度検層でも概ね検出できたという結果が得られたが、一方、他の 2 手法で検出していない深度を検出する場合もあった。また、ハイドロフォン VSP と速度検層の 2 つを適用した孔井では、VSP よりも速度検層の方が多くの深度を検出しており、その原因として、より高周波数での測定のため、VSP よりも敏感な変化を捉えて深度の検出に影響を与えた可能性が考えられる。これらを考慮して、VSP と速度検層の両方を実施した観測点の孔井においては、両方の手法でともに検出した深度に透水性亀裂が存在するとした（木口・桑原, 2018, 2019, 2021）。

これまでの観測点整備では一部の観測点だけでアナログ画像によるストンレー波による解析を行ったが、その有効性は確認できたと考える。今後は、測定時に速度検層のデジタルの波形データを使用する予定がない場合にも、将来に再解析をする可能性を考慮して、どのような処理段階の波形データが必要となるのかなどを含め、デジタルデータの保存について検討することも重要である。

ハイドロフォン VSP で観測されるチューブ波は、透水性亀裂の存在だけが発生の原因ではなく、透水性とは関係なく孔径変化により発生する可能性がある。観測点では、木口ほか（1996）と同様な考え方で、VSP を実施した各孔井においてキャリパー検層で取得した孔径値を用いて深度 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、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、チューブ波を発生する多くの深度ではそれよりも小さい平均勾配の値となるため、これらの深度ではチューブ波の発生に孔径変化が与える影響は小さく透水性亀裂が存在すると考えた（木口・桑原, 2018, 2019, 2021）。

透水性亀裂から発生するチューブ波の振幅は、亀裂の透水性だけでなく、亀裂面と入射する P 波がなす角度にも依存するため（Beydoun *et al.*, 1985）、VSP 記録で見られるチューブ波の振幅を用いるだけでは亀裂の透水性の大きさを評価できないことにも注意が必要である。また、100Hz 程度の周波数のデータであるため、チューブ波が発生する深度を検出する分解能は、数 kHz の周波数のストンレー波を用いる速度検層よりも低くなる。

ハイドロフォン VSP を実施する際に、より高周波数でより高エネルギーの震源を使用できれば、深部まで高い S/N (signal/noise) で初動 P 波が確認でき、チューブ波の発生深度のより高分解能な検出が期待できる。例えば、本報告以外で実施したハイドロフォン VSP で、火薬あるいは電気雷管を震源に用いることにより高周波数のデータを取得できた例がある（Kiguchi *et al.*, 1995 ; 木口ほか, 2003）。

孔井内の境界波を解析する速度検層とハイドロフォン VSP では、上記に説明したような特徴や注意点があるため、各手法から得られた結果を比較し透水性について統合的に評価できるように 2 つの手法を併用することが望ましいと考える。しかし、費用や測定日数などの制約により 2 手法を実施することが難しい場合には、下記に整理する各手法の特徴を考慮してその孔井での測定目的により適した手法を選択することも考えられる。速度検層は

ハイドロフォン VSP に比べて高分解能の解析が可能であり測定に要する時間が短い利点がある一方、敏感な変化を捉えて深度の検出に影響を与える可能性がある。ハイドロフォン VSP は流体が透水性亀裂から孔内に流れる原理を用いることから水みちの検出に適していると考えられ、速度検層に比べて分解能が低いがストレーナの設置深度を決める程度の分解能は有するであろう。

4.3 その他の対応策

3つの手法への対応策ではないが、掘削仕様や孔井地質などの条件によっては、3手法とは異なる原理の手法の適用が有効となるかもしれない。孔井掘削の仕様作成の時点で、大孔径による掘削や掘削泥水中での測定などが想定される場合には、電気伝導度検層を実施するよりもその代わりの手法として核磁気共鳴検層の適用が考えられる。核磁気共鳴検層は、核磁気共鳴センサーを内蔵したツールを用いて、孔井近傍の孔隙内流体の水素原子核のスピ状態を直接測定することから、地層孔隙サイズの分布と孔隙率を計測し、透水係数の算出が可能となる検層である（例えば、中島，2008；寺部・下川，2012）。石油・天然ガスを開発する分野では、貯留層などを対象に深度方向に連続的な透水性を評価するために適用されているが、従来は、大型のツールや専用の検層システム、海外からのエンジニアの動員などが必要となり測定費用が高額であることにより、資源開発以外の分野への適用は少なく、産総研観測点の整備でもこれまで使用していない。しかし、最近の技術開発によりツールの小型軽量化や操作性の向上などが進み、資源開発以外の孔井においても使用されつつある。核磁気共鳴検層では、電気伝導度検層とは異なり、孔内水の置換、水頭低下や繰り返し測定などの手順が不要であり、大孔径の孔井への適用も可能である。一方、核磁気共鳴検層に関する現時点での課題として、測定費用が電気伝導度検層と比較して高額、従来からの汎用ツールは外径が大きく小孔径の孔井に適用不可、海外からツールをレンタルする際には手配（輸送）に長期間要することなどが挙げられる。

透水性を評価する手法を適用する一般的な考え方として、掘削状況や孔井地質などにより当初の仕様や手順通りの測定が困難となる可能性も考慮し、異なる原理を用いる複数の手法を適用することは有効であると考えられる。本稿の例では、NSZ、ANO、NHK、SSK の4地点では3手法を適用しており、その結果、各手法により検出した深度の比較なども行いながら検出の信頼性を考慮して最終的な検出深度を決定した。また、測定手順の制約のために電気伝導度検層による評価が困難となった深部では速度検層とハイドロフォン VSP の結果を採用するなど、各手法による結果を統合して解析できた。

5章 まとめ

産総研が2006年から2013年までに愛知県から紀伊半島及び四国で整備した16の地下水等総合観測点のうち、孔井掘削時に孔井内の透水性を評価するために、電気伝導度検層、速度検層（ストーンレー波）とハイドロフォン VSP のいずれかの手法を適用した15観測点における3手法の測定結果を取りまとめた。観測点の孔井内測定は、孔内観測機器やストレーナの設置深度の判断を主な目的とするため、機器などの設置上は十分であると判断し孔井内の安全確保を優先させた場合には、測定項目や仕様・手順などを変更することがあった。

特に、電気伝導度検層は、多くの観測点・孔井で、孔壁崩壊の防止を優先し、孔内水の置換、水頭の低下、繰り返し測定などの標準的な手順が変更されるという制約があった。このような制約下で測定した場合に、データの品質や解析などにどのような影響があったかについて、1) 孔内水と地層水の圧力差、2) 孔内水の電気伝導度のノイズレベル、3) 孔内水と地層水の電気伝導度の差という3つの観点から測定事例を整理した。また、段階的に水頭を低下させて繰り返し測定することは多くの場合有効であった。さらに、今後の測定時に制約があった場合に解析可能な品質のデータ取得するための対応策や解析における注意点などについても整理した。今後、透水性評価が必要な新たな掘削プロジェクトなどで、透水性を評価するための孔井内測定を実施する際には、本稿による適用事例や対応策が参考になると考える。

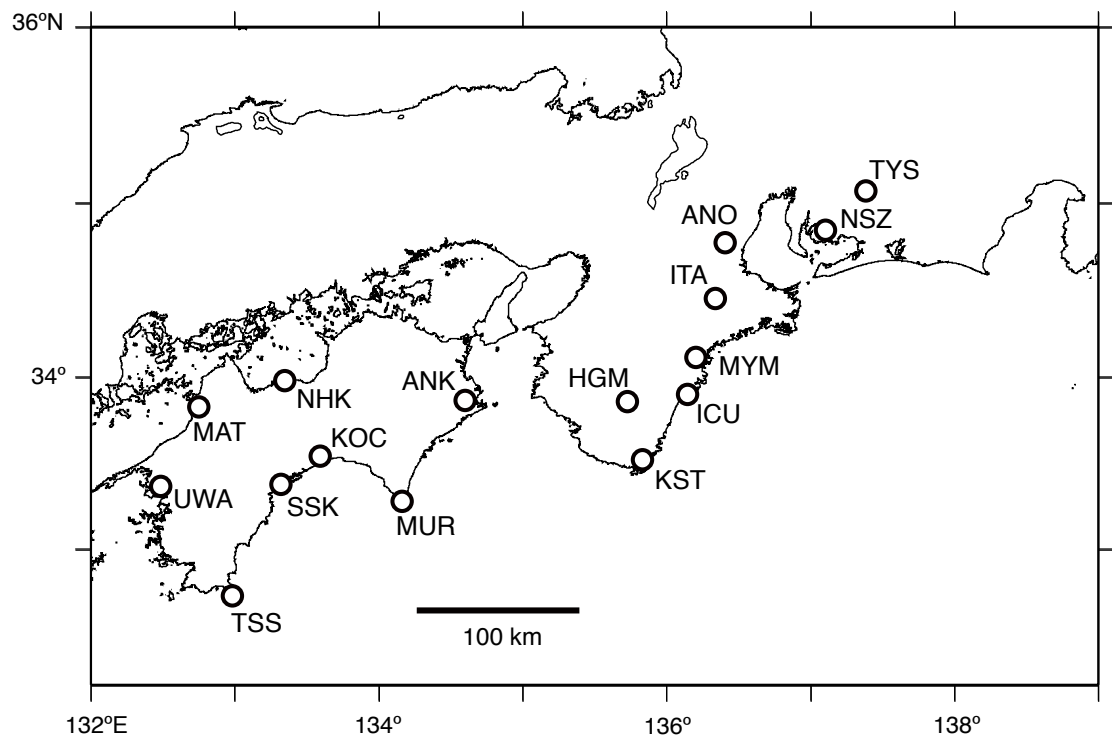
謝辞

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：J×金属探開株式会社）により掘削されました。物理検層とハイδροフォンVSP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により実施されました。ここに記して感謝いたします。

文献

- Beydoun, W. B., Cheng, C. H. and Toksöz, M. N. (1985) Detection of open fractures with Vertical Seismic Profiling, *J. Geophys. Res.*, 90, 4557-4566.
- 伊藤久男・桑原保人・宮崎光旗・西澤 修・木口 努・藤本光一郎・大谷具幸・田中秀実・樋口孝幸・Agar, S.・Brie, A.・山本裕祥 (1996) 断層を貫く坑井調査による野島断層の深部構造, *物理探査*, 49, 522-535.
- 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 (2021) 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.

- Kiguchi, T., Ito, H., Kuwahara, Y., Nakao, S. and Ohminato, T. (1995) Evaluation of permeable fractures by multi-offset hydrophone Vertical Seismic Profiling (VSP). *Geotherm. Sci. & Tech.*, 5, 21-29.
- 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・伊藤久男・桑原保人 (2003) : ハイドロフォン VSP で観測されるチューブ波を用いた野島断層の透水性評価, *物理探査*, 56, 157-170.
- 木口 努・桑原保人・小泉尚嗣・塚本 齊・板場智史・佐藤 努・佐藤隆司・関 陽児・梅田康弘・北川有一・重松紀生・高橋 誠 (2014) 南海トラフ巨大地震予測のための地下水等総合観測点の孔井における物理検層資料. *地質調査総合センター研究資料集*, 598, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 小泉尚嗣 (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.
- 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.
- 関 陽児・内藤一樹・鈴木庸平・伊藤一誠・渡部芳夫 (2012) ボーリング孔での原位置地下水試料の採取法と留意点. *資源地質*, 62, 235-247.
- 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 検層の活用例, *石油技術協会誌*, 77, 61-71.
- Tezuka, K., Cheng, C. H. A. and Tang, X. M. (1997) Modeling of low-frequency Stoneley-wave propagation in an irregular borehole. *Geophysics*, 62, 1047-1058.
- 塚本 齊・牧野雅彦・住田達哉・渡邊史郎 (2010) 物理探査・検層に基づく花崗岩体中の「水みち」の調査法. *日本水文科学会誌*, 39, 103-116.



第 1 図 産総研地下水等総合観測点 16 か所の位置図。

第1表 産総研地下水等総合観測点の名称、所在地、座標、標高、整備完了年、透水性を評価する孔井内測定手法の適用の有無。観測点を東から順に示し、適用の有無の欄には適用した孔井の番号を示す。

観測点		所在地	緯度 (°N)	経度 (°E)	標高 (m)	整備 完了年	孔井内測定		
							電気伝導度 検層	速度検層 (ストンレー波)	ハイドロフォン VSP
TYS	豊田神殿	愛知	35.0405	137.3578	480	2008	1・2・3	—	1・2
NSZ	西尾善明	愛知	34.8442	137.1057	39	2013	1・2・3	1・2	1・2
ANO	津安濃	三重	34.7870	136.4019	163	2010	1・2・3	1・2	1
ITA	松坂飯高	三重	34.4534	136.3129	301	2008	1・2・3	—	—
MYM	紀北海山	三重	34.1123	136.1815	29	2008	1・3	—	—
ICU	熊野磯崎	三重	33.9001	136.1379	28	2007	1・2	—	—
KST	串本津荷	和歌山	33.5201	135.8363	25	2008	1・3	—	—
HGM	田辺本宮	和歌山	33.8675	135.7318	120	2007	—	—	—
ANK	阿南桑野	徳島	33.8661	134.6045	36	2008	1・2・3	—	—
MUR	室戸岬	高知	33.2856	134.1563	62	2008	1・3	—	—
KOC	高知五台山	高知	33.5505	133.5990	5	2008	1・2・3	—	—
NHK	新居浜黒島	愛媛	33.9904	133.3423	9	2013	1・2・3	1・2	1・2
SSK	須崎大谷	高知	33.3896	133.3229	17	2010	1・2・3	1・2	1
TSS	土佐清水松尾	高知	32.7357	132.9757	125	2008	1・2・3	—	1
MAT	松山南江戸	愛媛	33.8422	132.7393	44	2008	1・2・3	—	—
UWA	西予宇和	愛媛	33.3859	132.4823	214	2009	1・2・3	—	—

第2表 電気伝導度検層の15観測点への適用結果。孔井地質、標準的な測定手順の実施状況、電気伝導度変化による地層水流入深度の検出の可否、及びデータ品質と測定時の特記事項を孔井毎にまとめる。孔番号のアスタリスク(*)は、孔径がHQ(約98mm)よりも大きいことを示す。孔番号に添付のS、Dは、孔井の浅部、深部に分けた測定を意味する。深度の検出では、○:高品質なデータで検出可能、△:一部検出可能だがデータ品質に問題あり、×:有意な変化が確認できないを意味する。

地点	孔井地質	電気伝導度検層					データ品質・ 測定時の特記事項
		孔井	孔内水 置換	水頭低下 (最大低下 深度)	繰返 測定数	地層水流 入深度の 検出	
TYS	トータル岩	1	○	○(15m)	5	○	・孔2は湧水中(10ℓ/min)での測定。 ・孔1と3では測定ツールの測定限界(6~10μS/cm)よりも孔内水の伝導度が小さくなる深度区間あり。
		2	○	× (湧水)	2	○	
		3	○	○(17m)	5	○	
NSZ	片麻岩	1	×	○(80m)	5	△	・孔1の400m以深では掘削泥水のために孔井内圧力低下が不十分となり、地層水が流入できなかった可能性あり。
		2	×	○(13m)	5	○	
		3	○	○(5m)	5	○	
ANO	花崗閃緑岩	1	×	×	1	×	・孔1はツール降下不能のために再測定し、その深度でデータが不連続。 ・孔2は湧水中(1ℓ/min)での測定。
		2	×	× (湧水)	3	○	
		3	○	○(不明)	3	○	
ITA	トータル岩・ 結晶片岩	1	×	×	1	○	・孔1は1回のみでの測定だが高品質。 ・孔2は大孔径(約150mm)で湧水中(湧水量不明)の測定。 ・孔3の14m以深では、測定ツールの測定限界(40μS/cm)よりも孔内水の伝導度が小さい。
		2*	○	× (湧水)	2	○	
		3	○	○(不明)	3	×	
MYM	花崗斑岩	1	×	× (湧水)	3	○	・孔1は湧水中(5~9ℓ/min)の測定。 ・孔3で測定ツールの測定限界(40μS/cm)よりも孔内水の伝導度が小さくなる深度区間あり。
		2	—				
		3	○	○(不明)	5	×	
ICU	花崗斑岩・ 凝灰岩	1	○	○(不明)	3	○	・孔1は500m以深でも高品質であり検出可能。 ・孔2は大孔径(約270mm)で、掘削時の全量逸水深度で伝導度が顕著に変化した。
		2*	○	○(不明)	3	○	
		3	—				

第2表 (続き)

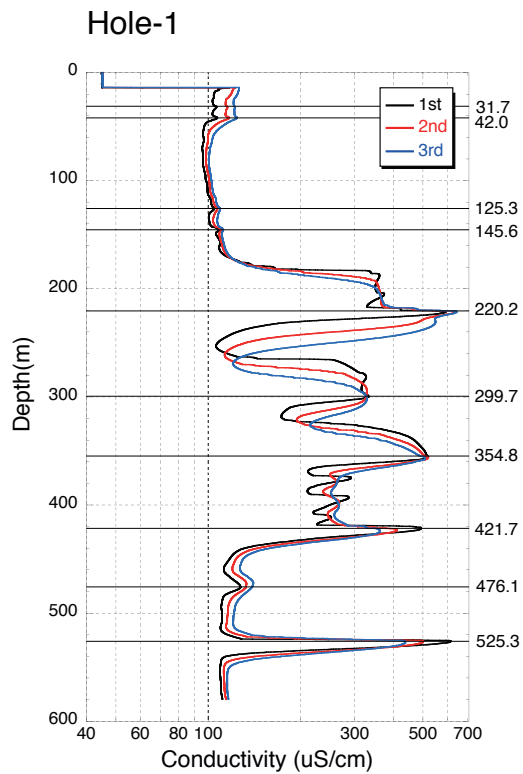
地点	孔井地質	孔井	孔内水置換	水頭低下 (最大低下 深度)	繰返 測定数	地層水流 入深度の 検出	データ品質・ 測定時の特記事項	
KST	泥岩	1*	△ 150m以 浅で置換	○(45m)	4	△	<p>・孔1は大孔径(約270mm)で、45mの水頭低下後に伝導度の変化あり。350m以深では掘削泥水のために孔井内圧力低下が不十分だった可能性あり。</p> <p>・孔3は4m以上の水頭低下後に伝導度の変化あり。</p>	
		2	—					
		3	○	○(16m)	8	○		
HGM	頁岩・ 砂岩	1～3	—				—	
ANK	砂岩・ 頁岩	1	×	×	4	△	<p>・孔1は高周波数のノイズがあり、深部での検出なし。</p> <p>・孔2は大孔径(約270mm)で、160m以浅と以深で2回に分けて測定したが、検出なし。</p>	
		2*S	×	○(不明)	3	×		
		2*D	×	×	2	×		
		3	○	×	3	○		
MUR	含礫 泥岩	1S	○	×	4	○	<p>・孔1は240m以浅と以深で2回に分けて測定。</p> <p>・孔3は大孔径(約270mm)での測定。</p>	
		1D	×	○(100m)	4	×		
		2	—					
		3*	○	○(6m)	3	×		
KOC	砂岩・ 泥岩	1S	×	×	3	×	<p>・孔1と2は、それぞれ、200mと180mの以浅と以深で2回に分けて測定。</p> <p>・孔2と3は大孔径(約270mm)で、繰返し測定数が1～2回と少なかった。</p>	
		1D	×	○(不明)	3	×		
		2*S	×	×	1	○		
		2*D	×	×	2	×		
		3*	×	×	2	×		
NHK	花崗 閃緑岩	1	×	○(58m)	5	×	<p>・孔1と2では、多くの深度区間で大振幅のパルス状の変化が高頻度に出現した。</p> <p>・孔1と2で海水起源の高伝導度の地層水流入が推測される幅広い深度範囲があった。</p>	
		2	×	○(20m)	7	×		
		3	○	○(12m)	4	○		

第2表 (続き)

地点	孔井地質	孔井	孔内水置換	水頭低下 (最大低下深度)	繰返測定数	地層水流入深度の検出	データ品質・ 測定時の特記事項
SSK	頁岩	1	×	○(50m)	5	△	<ul style="list-style-type: none"> ・孔1と2のノイズが大きい、浅部で繰返し測定の後半に検出した。 ・孔1と2の深部では掘削泥水のために孔井内圧力低下が不十分で検出できなかった可能性あり。
		2	×	○(20m)	4	△	
		3	○	○(10m)	4	○	
TSS	花崗岩	1	○	×	4	△	<ul style="list-style-type: none"> ・孔1で伝導度が変化する深度が繰返し測定で深部へ移動した。 ・孔2は変化が緩やかなため検出は困難。孔2の温度検層により地層水流入による温度変化を検出した。
		2	○	×	3	×	
		3	○	×	4	○	
MAT	砂岩・ 泥岩・ 花崗閃緑岩	1S	○	×	2	×	<ul style="list-style-type: none"> ・孔1は350m以浅と以深で2回に分けて測定。 ・3孔井とも、全体にノイズが小さく高品質である。
		1D	△ 350m以浅で置換	○(40m)	2	○	
		2	○	○(不明)	6	○	
		3	○	○(不明)	5	○	
UWA	砂岩・ 粘板岩・ チャート	1	×	○(50m)	5	○	<ul style="list-style-type: none"> ・孔1はノイズがやや大きい、繰返し測定の後半で深部まで検出が可能。 ・孔2は大孔径(約270mm)での測定で、ノイズが大きい。
		2*	×	○(10m)	4	×	
		3	○	○(不明)	7	○	

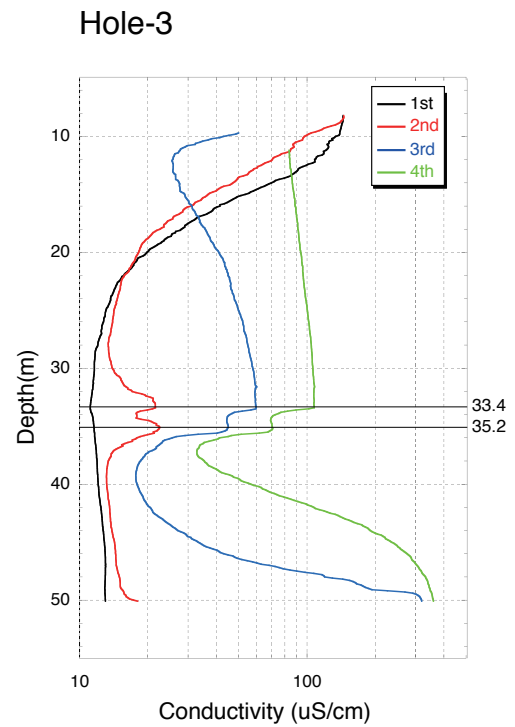
(a)

ICU



(b)

NHK

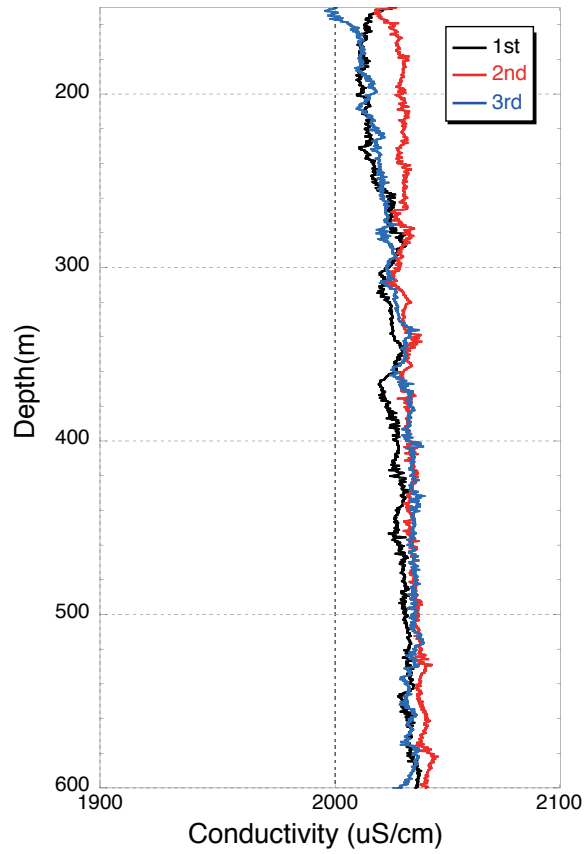


第2図 電気伝導度検層を実施する際に掘削泥水から水道水に置換した ICU の孔 1(a)、脱イオン水に置換した NHK の孔 3(b)、置換せず掘削泥水のままの KOC の孔 1 (深部) (c) の測定データの比較 (木口・桑原, 2021 から抜粋・編集)。繰り返し測定したデータを色分けして示す。電気伝導度の変化を検出した深度をグラフ右側の数字で示す。各図で深度と電気伝導度のスケールが異なる。(a)と(b)では地層水流入による電気伝導度の変化の検出が可能であるが、(c)では検出できなかった。

(c)

KOC

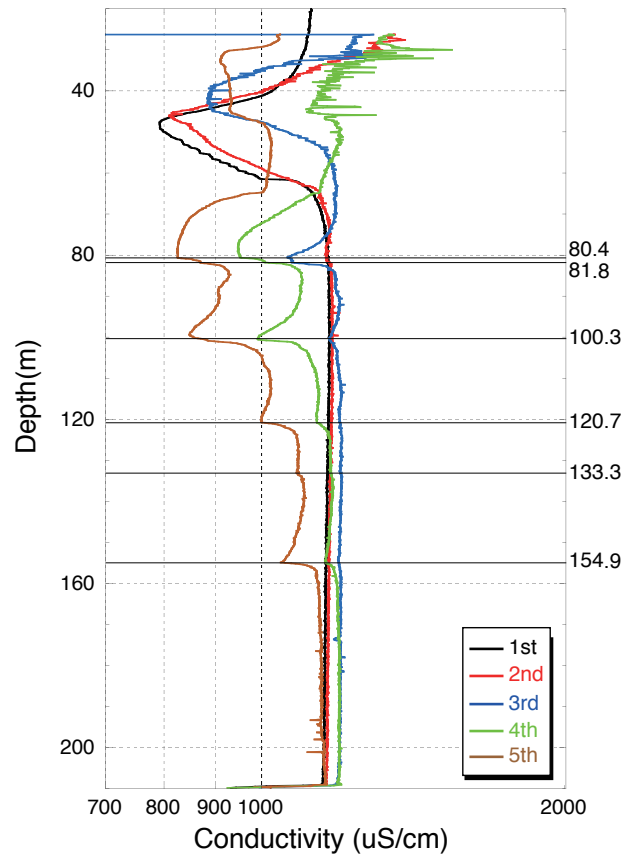
Hole-1 Deep



第2図 (続き)

NSZ

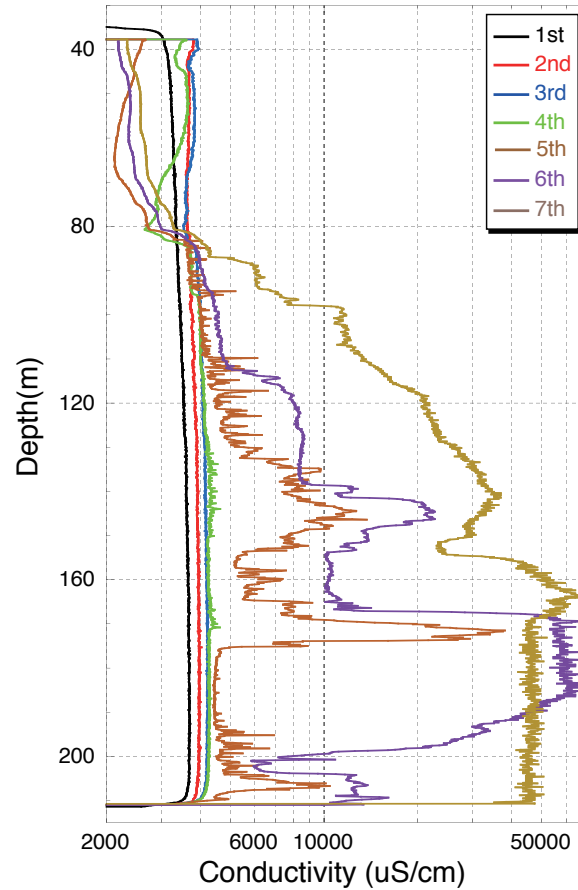
Hole-2



第3図 電気伝導度検層を実施する際に脱イオン水に置換せず掘削泥水のままであったが、電気伝導度の変化を検出したNSZの孔2の測定データ（木口・桑原, 2021 から抜粋）。

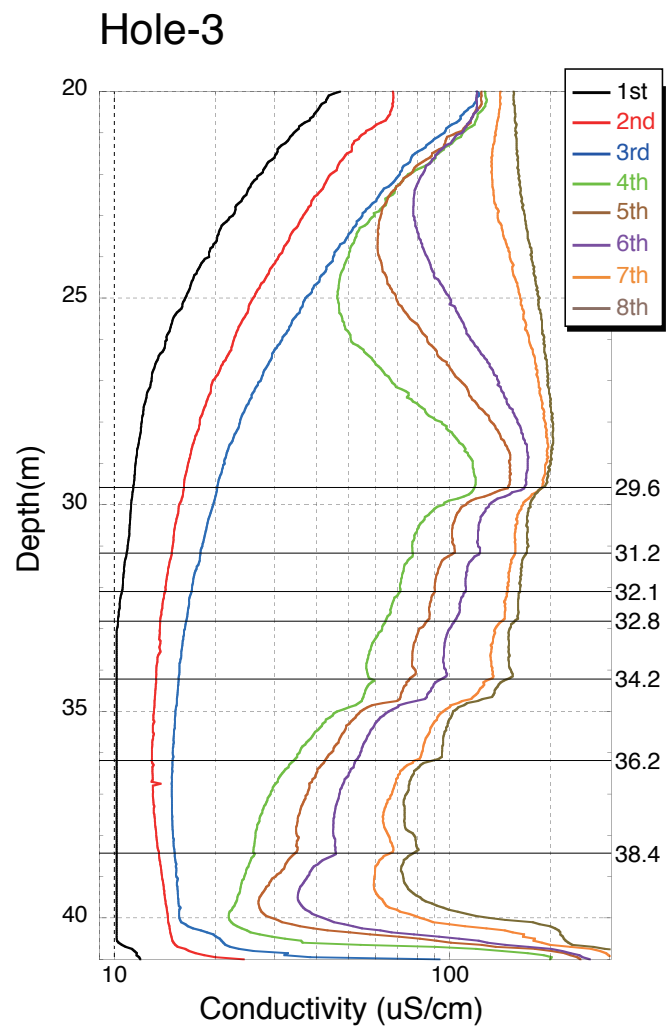
NHK

Hole-2



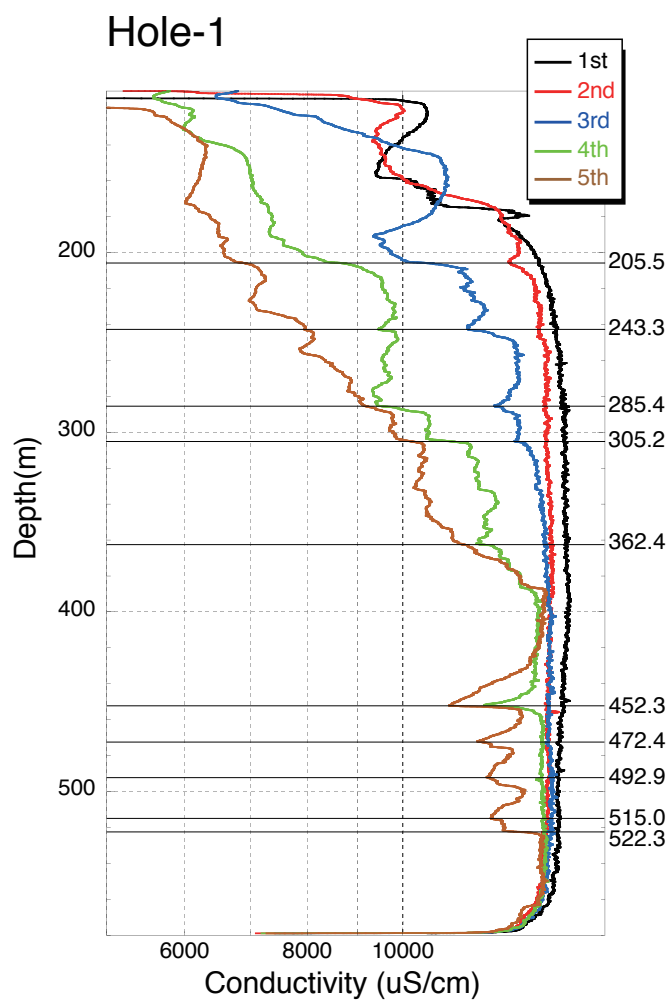
第4図 脱イオン水に置換せず掘削泥水のままで測定したNHKの孔2の測定データ（木口・桑原, 2021 から抜粋）。繰り返し測定の後半で、海水起源の成分を含む地層水の流入と思われる非常に高い電気伝導度の変化を示す。5回目以降の測定で、深度方向に短波長で大きな振幅でパルス状に変化する深度区間があり、ほぼ全深度で高周波の変動がありノイズレベルが高いなどの特徴が見られる、ある深度における変化の再現性を確認することが困難であり、高い電気伝導度を示す深度区間の幅が広いことなどから、地層水が流入する深度を高分解能で求めることはできなかった。

KST



第5図 電気伝導度検層を実施する際に水頭を大きく低下することにより電気伝導度の変化を検出したKSTの孔3の測定データ（木口・桑原, 2021 から抜粋）。4回目以降に水頭を4m以上低下させた測定で、地層水が流入し電気伝導度に変化する深度を検出した。

UWA

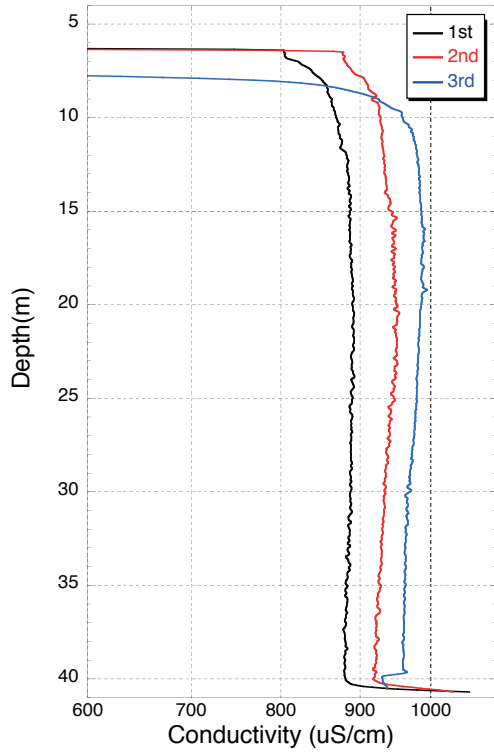


第6図 掘削泥水中で電気伝導度検層を実施する際に、水頭を段階的に低下させながら繰り返して測定した効果により、深部まで電気伝導度の変化を検出したUWAの孔1の測定データ（木口・桑原, 2021 から抜粋）。

(a)

MUR

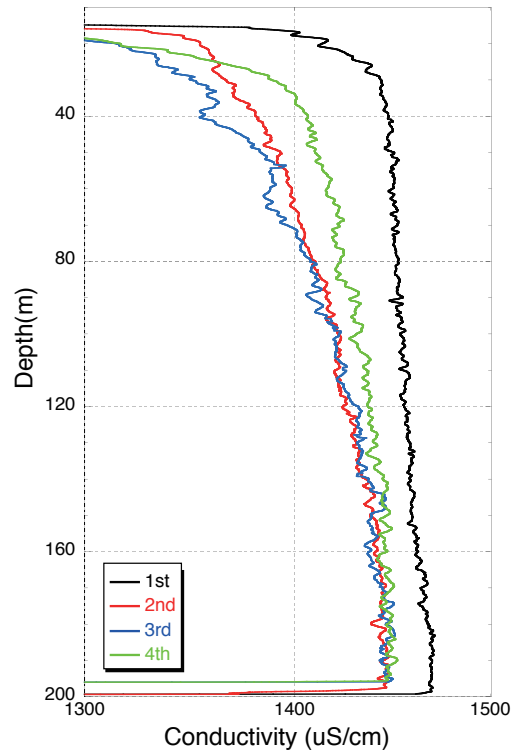
Hole-3



(b)

UWA

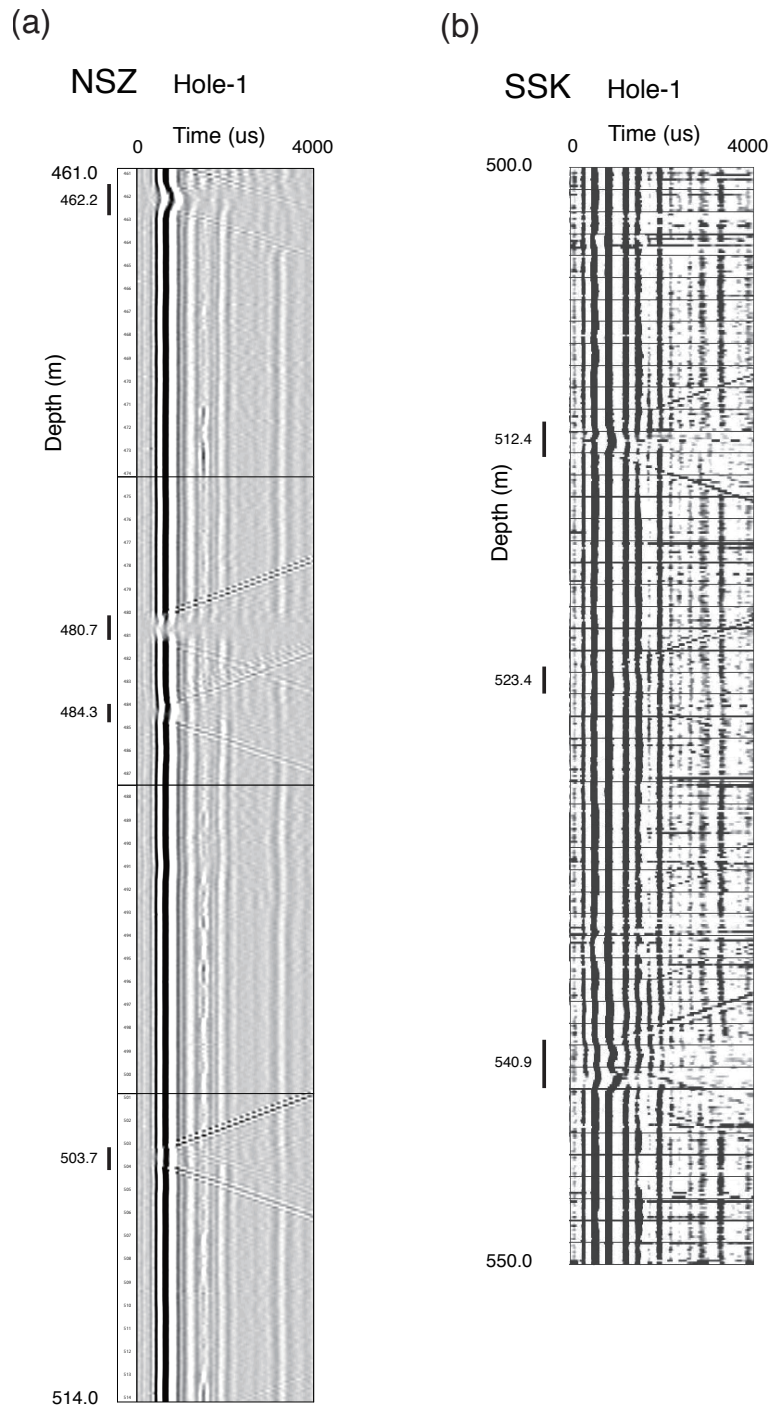
Hole-2



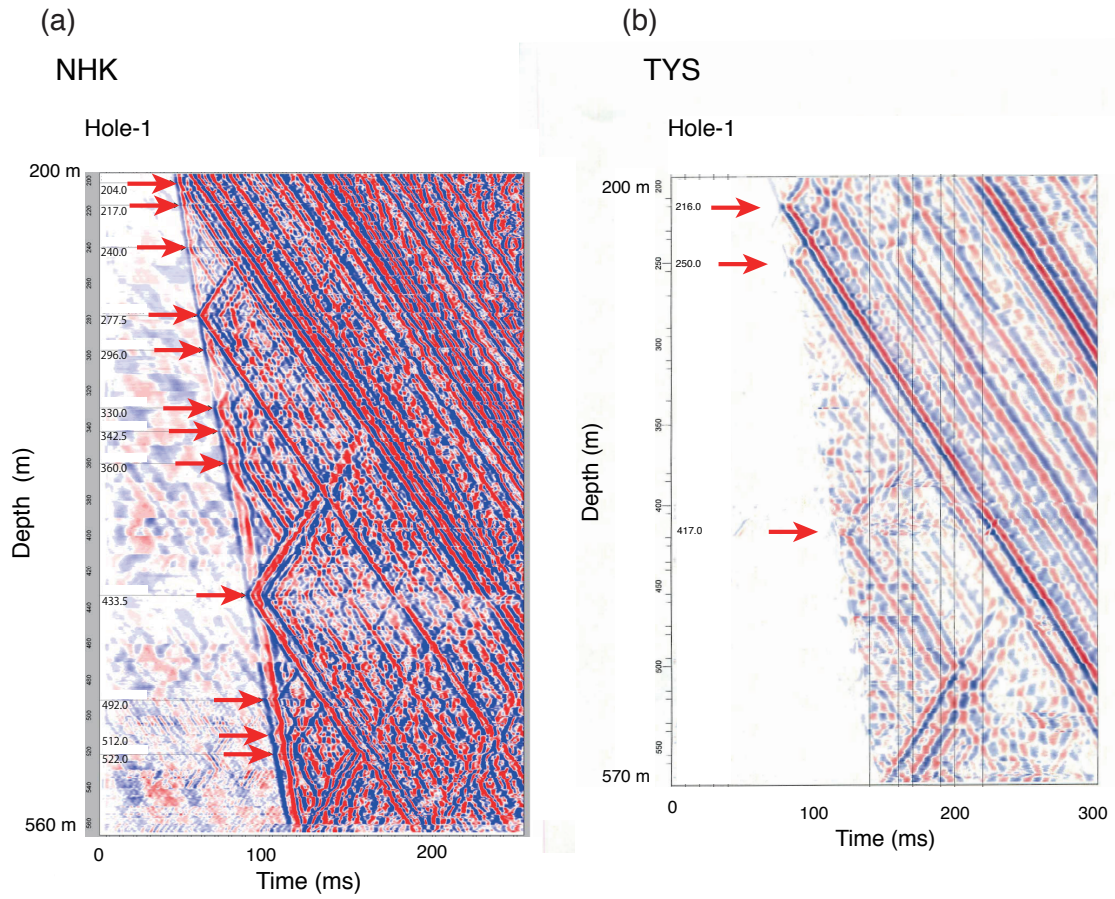
第7図 電気伝導度検層を大孔径（直径約 270mm）の孔井で適用した MUR の孔 3(a)と UWA の孔 2(b)の測定データ（木口・桑原, 2021 から抜粋・編集）。(a)と(b)で深度と電気伝導度のスケールが異なる。(a)、(b)ともに地層水流入による電気伝導度の変化を検出できなかった。

第3表 速度検層（ストンレー波解析）とハイドロフォン VSP の適用結果。速度検層（左列）とハイドロフォン VSP（右列）は、それぞれ、4 観測点と 6 観測点で適用し、各観測点におけるデータの品質などの特徴をまとめる。

地点	速度検層 (ストンレー波解析)		ハイドロフォンVSP	
	実施 孔井	データ品質	実施 孔井	データ品質
TYS	—	—	1・2	<ul style="list-style-type: none"> ・周波数：約100Hz。 ・孔1では他の観測点に比べて震源エネルギーが小さいと推測され、初動付近の波形の確認が困難な場合がある。 ・初動P波の到達前をミュートする（振幅低減）処理をしている。
NSZ	1・2	<ul style="list-style-type: none"> ・周波数：約3～4kHz。 ・全体的にノイズが低く、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変化も明瞭に確認できる。 	1・2	<ul style="list-style-type: none"> ・周波数：約150～200Hz。 ・高周波数のデータで、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。
ANO	1・2	<ul style="list-style-type: none"> ・周波数：約3kHz。 ・孔1では反射波が他の波形と重なる傾向だが、検出は可能。減衰や速度低下は低周波数となる場合がある。 ・孔2では反射・減衰・速度低下を示す波形を明瞭に確認できる。 	1	<ul style="list-style-type: none"> ・周波数：約150Hz。 ・高周波数のデータで、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	1・2	<ul style="list-style-type: none"> ・周波数：約3kHz。 ・孔1では孔2に比べて初動以降のノイズが高い傾向だが、反射波の検出は可能。 ・孔2では反射・減衰・速度低下を示す波形を明瞭に確認できる。 	1・2	<ul style="list-style-type: none"> ・周波数：約200Hz。 ・高周波数のデータで、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。
SSK	1・2	<ul style="list-style-type: none"> ・周波数：約3～3.5kHz。 ・孔1では初動以降の振幅が相対的に強調され、反射波がやや不明瞭となる場合がある。 ・孔2では反射波の波形を明瞭に確認できる。初動及び後続波が振幅低下を示す場合があり、この特徴から減衰の深度区間の検出が可能。 	1	<ul style="list-style-type: none"> ・周波数：約200Hz。 ・高周波数のデータで、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	—	—	1	<ul style="list-style-type: none"> ・周波数：約100Hz。 ・初動付近のS/Nは他の観測点と比べて相対的に低い。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可能である。



第8図 ストンレー波を対象とした速度検層の受振波形データの例。NSZの孔1の461～514m区間(a)とSSKの孔1の500～550m区間(b)（木口・桑原, 2021 から抜粋・編集）。図中の黒線は、ストンレー波の反射・減衰・速度低下から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。



第9図 ハイドロフォン VSP の波形データの例。NHK の孔 1(a)と TYS の孔 1(b) (木口・桑原, 2021 から抜粋・編集)。初動 P 波からチューブ波が発生する深度を赤矢印で示す。