

流速計、電気伝導度計及び温度計を有する孔内マルチ検層装置による多層帯水層の地層評価

Evaluation of Multilayered Aquifer using Flow Meter including Electric Conductivity Meter and Thermometer

西垣 誠	Makoto NISHIGAKI	(岡山大学大学院)
柴田 卓詞	Takuji SHIBATA	((株)環境総合テクノス)
加藤 裕将	Hirosa KATO	((株)環境総合テクノス)
岩上 聡	Satosi IWAKAMI	((株)アースライズカンパニー)
平田 洋一	Yoichi HIRATA	((株)アースライズカンパニー)

再生可能エネルギーの利用が進む中、近年地下水の熱利用に注目が集まっている。地下水を有効利用するためには、帯水層のポテンシャルを事前に把握しておくことが重要となる。地盤の帯水層の水利ファクターを効率良く求める手法としてフローメータ検層があり、筆者らは大阪平野において多層帯水層を対象にフローメータ検層を実施してきた。しかし、大阪平野の一部の洪積砂礫層は、塩分濃度が高く、揚水井や復水井及び観測井の構築に用いるベントナイトの膨潤に悪影響を与えることが懸念された。そのため、信頼性の高い揚水井の構築には、調査の段階で確実に塩分濃度を把握し、塩分濃度が高い場合は、塩分環境下でも膨潤するベントナイトを用い止水することが必要となる。そこで、従来の流速を測定するフローメータに、電気伝導度と温度を同時に測定できる孔内マルチ検層装置を開発し、大阪平野で適用したところ各帯水層の塩分濃度が計測できる結果が得られたので報告する。

キーワード：地中熱利用、地下水調査、透水係数、自然水位、フローメータ、地下水検層
(IGC : B-02, C-07, E-07)

1. はじめに

省エネルギーとエネルギーの有効利用は今や世界中で叫ばれており、地中熱を利用した冷暖房もその1つである。地中熱の利用に際しては、対象となる帯水層の水利特性を効率よく求める必要がある。筆者らはその手法として孔内流速検層装置(フローメータ)に着目した。フローメータは、一般に亀裂性岩盤内でのボーリング孔内の孔内水位を小型ポンプによる揚水によって低下させて、孔内の鉛直方向の流速変化を高精度の流速計で計測して、亀裂の浸透特性を計測する手法として、1980年代の中期頃より発展してきた¹⁾。

このようなフローメータによる地下水の調査手法を一層コンパクトにするために、下茂らにより水中浮遊型カプセルプローブにメモリ式圧力計を内蔵したコンパクトなフローメータの開発に関する研究報告がなされている²⁾。

不均質な地盤内の帯水層の浸透特性の調査のためのフローメータ計測だけでなく、フローメータによる地下水の水質に関する調査のために、計測器に電気伝導度計を設置した計測もなされている。また、孔内の流速を電磁流量計だけではなくヒートパルス流量計(Heat pulse flow meter)による手法も実施されており^{3),4),5)}、亀裂性の結晶質岩での観測井内で鉛直方向の温度分布を計測したデータを解析した結果による観測井内の鉛直方向の流速分布の計測と、直接ヒートパルス法による流速計測とが良く一致することも示されている⁶⁾。

亀裂性岩盤に対しては、孔内の電気伝導度の鉛直方向の分布を計測することによって、各亀裂の流量の予測、塩水化、透水量

係数そして水頭(自然水頭)を数値解析によって求める研究⁷⁾や、亀裂性岩盤内の孔内の温度分布(精度 $\pm 0.001^{\circ}\text{C}$)を多段温度センサープローブ(temperature vector probe)を用いて孔内の亀裂周囲の温度分布を計測する研究が行われている⁸⁾。

また、原位置で孔内での電気伝導度や温度計測に関する総合的な比較評価に関しては、Frederick,D.らが2017年に実施しているが、この場合も亀裂性岩盤を対象とした研究である⁹⁾。

ここで示したように、フローメータを用いた地盤の浸透特性の計測の多くは、亀裂性岩盤を対象としたものである。著者らは、この亀裂性岩盤で開発された技術を多層の堆積地盤に適用する装置に改良して、堆積層内の複数の帯水層厚(bi)の計測手法、各帯水層の透水量係数(Ti)の算定方法、各帯水層の透水係数(ki)ならびに各帯水層の平衡水位(hoi)の算定方法を示した¹⁰⁾。また、その研究で提示された手法の妥当性とその精度を議論するために大阪市内の中心部で観測井を掘削して、その手法の妥当性を検証した。

大阪平野の地下水のイオン濃度を示すヘキサダイアグラムを図-1に示す。この結果では、Dg1, Dg2及びDg3の各帯水層において、 $\text{Na}^+ + \text{K}^+, \text{Cl}^-$ の値が大きく塩分の影響が見られ、特に第1帯水層には多量の塩分が含まれていることが分かった¹¹⁾。

複数の帯水層にまたがる一本の試験孔において帯水層の透水試験をする際には、各帯水層間に十分に止水する必要があるが、塩分を含む状況下では既存のベントナイトペレットが十分に膨潤しないために、採水時にベントナイト粒子が流入してくることが分かった。このような状況に対して、塩水条件下でも膨潤するベントナイトペレットを試作して、室内試験でその効果を確

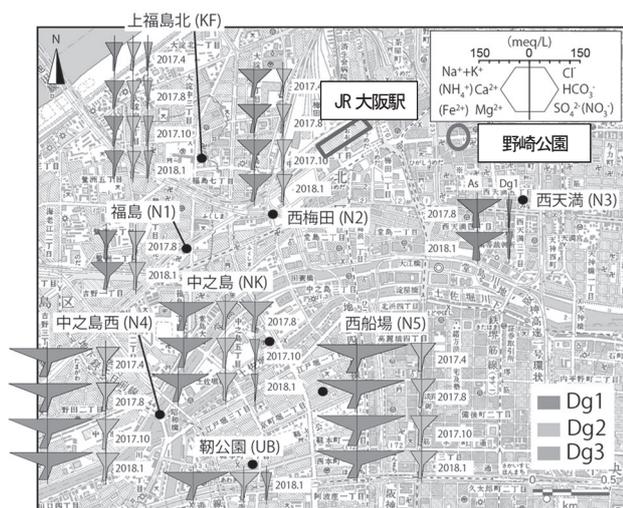


図-1 大阪市中心部の水質組織 (平成 29 年度)¹¹⁾
基図は国土地理院発行 1:25000 地形図「大阪西北部」「大阪東北部」

認した後¹²⁾、実際の現地での帯水層間の止水に適用した。このベントナイトを以降塩水対応ベントナイトペレットと称する。

本研究では、このような原位置の状況に対応するために、孔内の地下水の流出流量、電気伝導度及び地下水温を同時に計測することのできる孔内マルチ検層装置を開発し、複数の帯水層の浸透特性や地球化学特性をより厳密に評価する手法を示した。さらに、帯水層間の止水を確実にする手法も開発した。

また、フローメータに電気伝導度計を設置して、そのデータの変化から、亀裂からの流出流量を用いて数値解析によって求める手法も研究されている^{13),14)}。しかし、これらの手法はあくまで亀裂性岩盤内での手法で、未固結の帯水層地盤に適用されたものではなく、本研究において帯水層地盤での有効性を確認した。

2. 流量計、電気伝導度計及び温度計を設置した孔内マルチ検層装置の概要と試験場所の状況

2.1 孔内マルチ検層装置の開発

筆者らは、フローメータによる地盤内の帯水層の透水特性の調査手法の妥当性に関しては、2017年の研究成果として発表した¹⁰⁾。本研究は、都市部のオープンループシステムによる地下水熱利用を考慮し、効率的な揚水井及び還元井に必要なデータを提供すること及び安価で信頼性の高い観測井の構築方法を確立することを目的としている。そのために、ボーリング調査段階において透水係数等の水理特性とともに、塩分濃度等を示す電気伝導度及び温度を同時に測定できる孔内マルチ検層装置(以後、改良型フローメータと称する。)を開発した。電気伝導度計及び温度計は、図-2に示すように従来型フローメータのプロープ内に設置した(詳細写真を付録に示す)。改良型フローメータのプロープの全長は1600mm、直径はφ50mmである。それぞれのセンサーの仕様については表-1及び表-2に示す。

表-1 温度計仕様

使用素子	測定範囲	精度	分解能	耐圧
Pt	0~50℃	±0.5℃	0.01℃	5MPa

表-2 電気伝導度計仕様

測定原理	測定範囲	精度	分解能	耐圧
2極法	0.2~4mS/cm	±2%	0.10%	2MPa

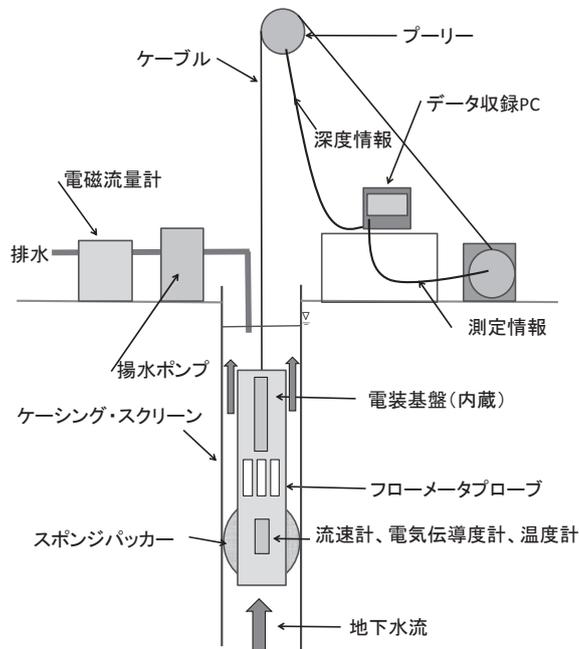


図-2 孔内マルチ検層装置(改良型フローメータ)概略図

2.2 改良型フローメータ試験位置のボーリング結果

試験は図-1に示す野崎公園(図-1の赤丸印点)において実施した。野崎公園はJR大阪駅の東側で、上町台地のすぐ西側となる。

ボーリングは、孔径283mmで、深度100mまで実施し、コア観察結果によりストレーナ位置を決定する必要があることから、ワイヤライン式サンドサンプラーを用いてコア採取を行った。なお、サンドサンプラーによるコア採取率は93%であった。写真-1に深度10m~20mのコア写真を示す。このコア観察の結果より大まかな帯水層深度を評価し、ストレーナ位置を決定した。

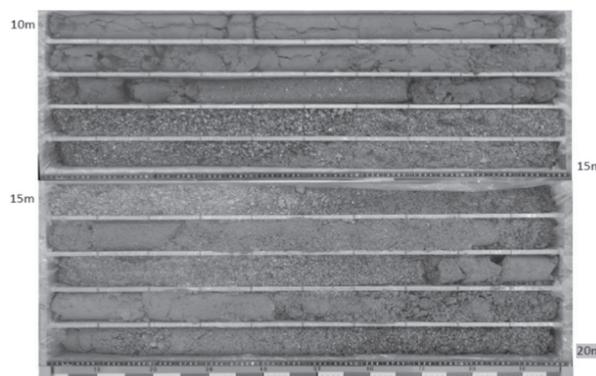


写真-1 現場で採取したコア写真例

図-3は、帯水層の深度、スクリーンの設置深度及びボーリング孔とケーシングの止水構造を示したものである。コア観察の結果より、深度70m以浅において3層の砂礫層を確認したことから、それぞれの層にスクリーンを設置し、上層より第1帯水層、第2帯水層及び第3帯水層と呼ぶ。なお、サンプリングした試料の花粉分析の結果より、第1帯水層と第2帯水層が沖積の砂礫から第1天満砂礫層(Dg1)であり、第3帯水層が第2天満砂礫層(Dg2)であることが確認された。

調査孔内における止水構造では、各帯水層の地下水に直接接するところには塩水用ベントナイトペレットを用い、層厚を確保するために塩水用ベントナイトペレットの間に通常のベントナイトペレットを挟み込む構造とした。

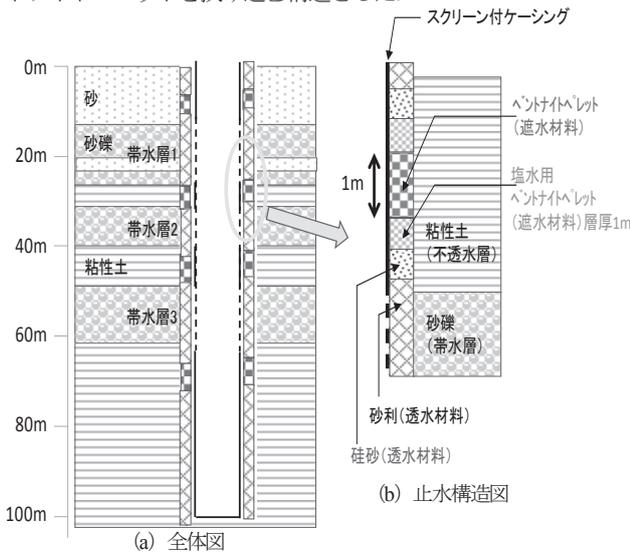


図-3 帯水層の深度及び観測孔構造図

表-3 観測井戸の緒元

項目	緒元
掘削孔径(mm)	φ 283
ケーシング材質	塩ビ管
ケーシング内径(mm)	φ 150
スクリーン開口率(%)	10

2.3 改良型フローメータ試験の条件

改良型フローメータの試験は以下の手順で実施した。

2.3.1 自然状態下での試験

試験孔内を十分に洗浄した後、改良型フローメータセンサーを地上より孔内に降下させて、揚水流量 $0\text{m}^3/\text{s}$ の条件で各深度における鉛直方向の流速を計測した。

2.3.2 揚水条件下での試験

孔口にポンプを設置して、揚水流量を $1.93 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ に設定して孔内水位が一定になるまで揚水を実施して、改良型フローメータセンサーを孔底より一定速度(0.05m/s)で徐々に引き上げて各深度の鉛直方向の流速と温度、さらに電気伝導度を計測した。

3. 改良型フローメータ試験結果

3.1 流速検層結果より得られる各帯水層の浸透特性

図-4に揚水流量を $1.93 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ とした時の流速の測定結果より算出した各深度の流量とボーリングコアによる粒度組成を示す。この結果より、著者らが提示している手法によって各帯水層の自然水位(H_i)と透水係数(k_i)を求めた。

その計算式を以下に示す¹⁰⁾。

$$k_i = \frac{(Q_{i2} - Q_{i1})}{2\pi b_i (h_1 - h_2)} \ln(b_i / r) \quad (1)$$

ここに、

Q_{in} : 帯水層*i*の*n*回目の流入出流量

b_i : 帯水層*i*の層厚

k_i : 帯水層*i*の透水係数

h_n : 観測井の*n*回目の試験水位

r : 揚水井の半径(m)

$$H_i = \frac{Q_{i2} h_1 - Q_{i1} h_2}{Q_{i2} - Q_{i1}} \quad (2)$$

H_i : 帯水層*i*の自然水位

Q_{in} : 帯水層*i*の*n*回目の流入出流量(m^3/s)

h_n : 観測井の*n*回目の試験水位

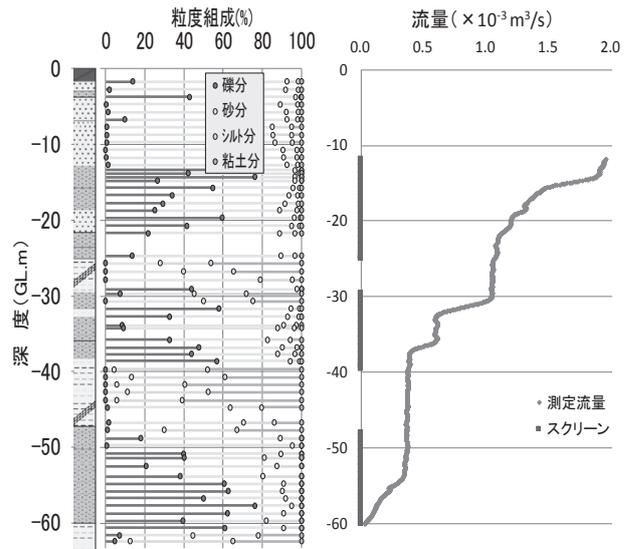


図-4 地層の粒度組成と流速検層測定結果

流速測定結果より、ストレーナ設置深度において一様に地下水が流入しているわけではなく、例えば第3帯水層の50~54mでは地下水の流入は全く見られておらず、不透水と判定される箇所や、第1帯水層と第2帯水層では2層に分かれることを確認した。

第1帯水層と第2帯水層を2層、第3帯水層を1層として算出した透水係数を、表-4に示す。これによると改良型フローメータで透水性の高い深度は、粒度分析結果で礫分の多い深度と良く対応していることが分かる。このことから、流速検層により各深度の流速を測定することで、詳細なサンプリングや粒度試験と同等の評価が可能になることから、それらの試験を将来は

表-4 透水係数計算結果

層区分	詳細区分	流量 m^3/s	層厚 m	透水係数 m/s	平均 m/s
第1	上	4.1×10^{-4}	1.4	1.8×10^{-4}	5.0×10^{-5}
	下	3.8×10^{-4}	8.5	2.6×10^{-5}	
第2	上	4.1×10^{-4}	2.9	8.9×10^{-5}	7.9×10^{-5}
	下	2.1×10^{-4}	2.1	6.4×10^{-5}	
第3		3.2×10^{-4}	6.2	3.1×10^{-5}	3.1×10^{-5}

表-6 自然水位計算結果と実測値との比較

計算水位(GL-m)	実測水位(GL-m)
2.83	2.80
3.07	3.09
2.95	2.95

省略することが出来る可能性を示唆しているものと考えられる。

図-5は揚水流量 $0.0m^3/s$ 場合の流量検層結果である。ここでは第1帯水層から第2帯水層に向かって $1 \times 10^{-4}m^3/s$ 弱の地下水が流れており、第3帯水層ではほぼ地下水の移動は認められない。

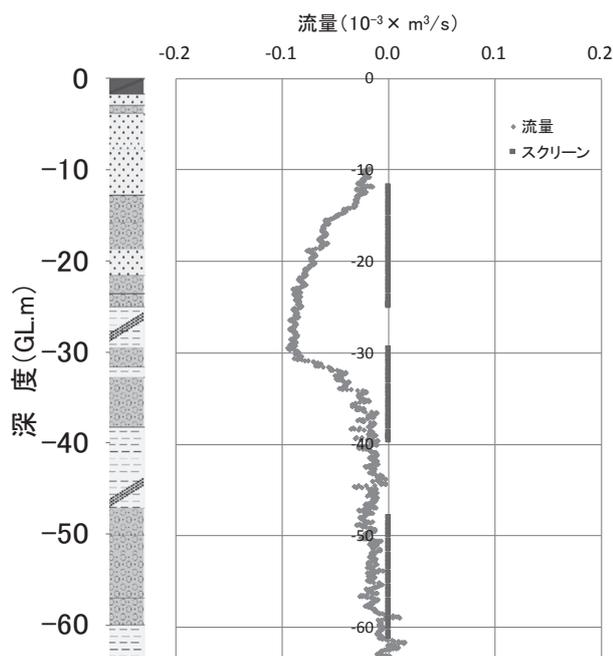


図-5 流量検層結果 (揚水流量 $0.0m^3/s$)

揚水流量 $0.0m^3/s$ と $1.93 \times 10^{-3}m^3/s$ の検層結果より自然水位算出のための各層の流出入流量を表-5に示す。この結果を式(2)に代入し、自然水位を求めた。

表-5 自然水位算定のための各層の流出入流量

揚水流量	$0.0 m^3/s$	$1.9 \times 10^{-3} m^3/s$ 注1)
孔内水位(GL-m)	2.95	3.97
第1帯水層	$8.3 \times 10^{-5} m^3/s$	$7.9 \times 10^{-4} m^3/s$
第2帯水層	$-8.3 \times 10^{-5} m^3/s$	$6.2 \times 10^{-4} m^3/s$
第3帯水層	$0.0 m^3/s$	$3.2 \times 10^{-4} m^3/s$

注1) 透水係数算出範囲以外からの流入があるため、合計は一致しない。

表-6は計算した水位と実測の水位を比較したものであり、実測水位は、流速検層終了後、観測井の仕上げとして内径150mmのケーシング内に各帯水層の水位を連続観測するために設置したケーシング(内径40~50mm)内で測定したものである(図-6参照)。自然水位の測定は、流速検層のおおよそ10日後に測定したものであるが、両者はよく一致していると判断できる。

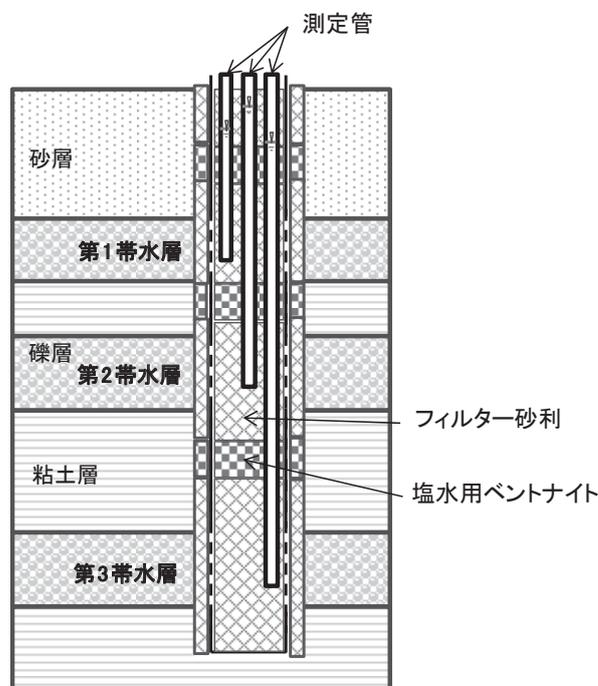


図-6 観測孔の設置構造図

各帯水層の観測井完成後には、この観測井を利用した原位置透水試験を実施した。透水試験は、一定揚水量で水位が一定した条件の定常法とし、透水係数の計算式は式(3)を用いた。

原位置透水試験実施時の孔内水位の測定結果を図-7に示したが、比較的短時間で定常に達しておりほぼ1000秒で揚水は終了した。

$$k = \frac{Q}{2\pi bs} \ln(b/r) \tag{3}$$

ここに、

Q: 揚水流量(m^3/s)

k: 透水係数 (m/s)

b: 帯水層の層厚(m)

s: 水位低下量(m)

r: 揚水井の半径(m)

原位置透水試験の結果を表-7に示す、また、原位置透水試験結果と改良型フローメータ試験結果から得られた透水係数の比較を表-8に示す。これらは、非常に良い対応を示しており、改良型フローメータによる流速検層の信頼性は高いものと考えられる。

表-7 透水試験による測定結果

項目	単位	第1帯水層	第2帯水層	第3帯水層
流量	(m^3/s)	1.5×10^{-3}	1.9×10^{-3}	1.5×10^{-3}
自然水位	(GL-m)	2.8	3.09	2.9
揚水水位	(GL-m)	5.49	5.8	6.38
透水層厚	(m)	9.9	5	6.2
掘削半径	(m)	0.1415	0.1415	0.1415
透水係数	(m/s)	3.8×10^{-5}	8.2×10^{-5}	4.3×10^{-5}

表-8 原位置透水試験と流速検層との比較

項目	第1帯水層	第2帯水層	第3帯水層	単位
フローメータ検層	5.0×10^{-5}	7.9×10^{-5}	3.1×10^{-5}	m/s
透水試験	3.8×10^{-5}	8.2×10^{-5}	4.3×10^{-5}	m/s

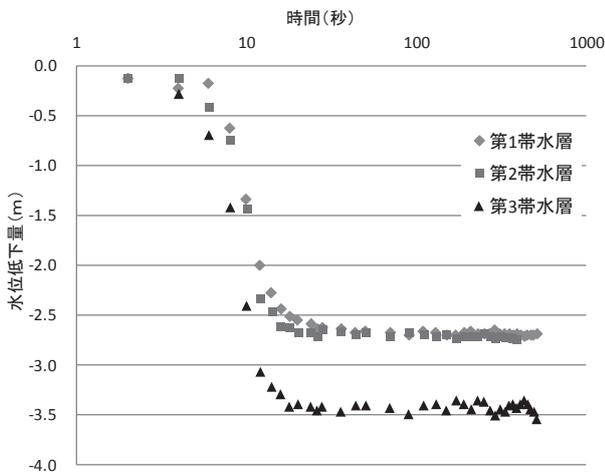
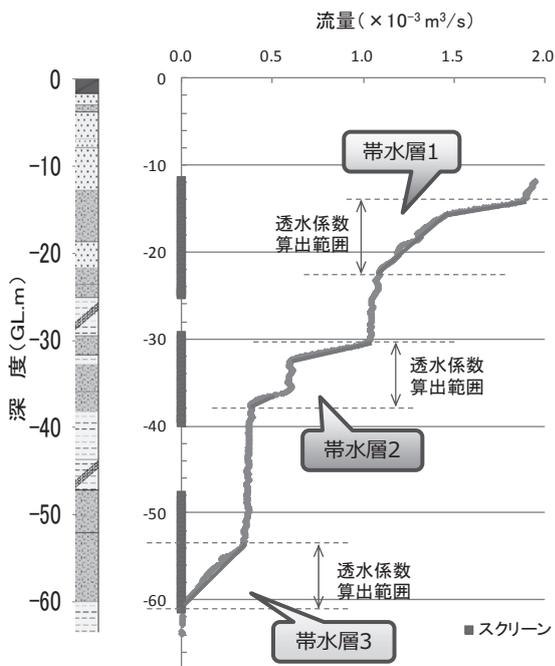
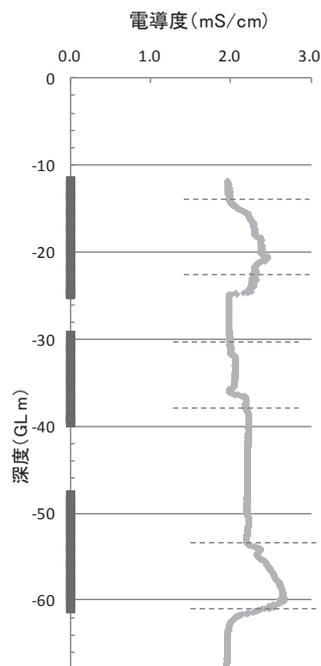


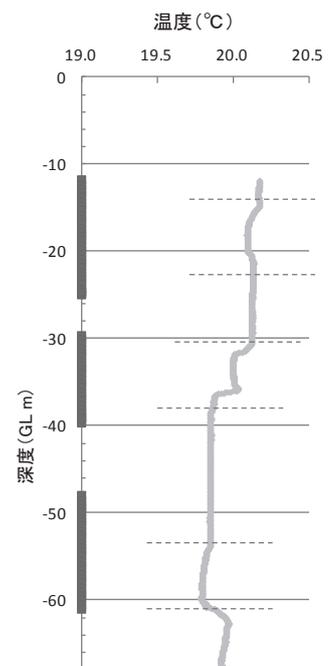
図-7 原位置透水試験での水位変化



(a)流量検層結果



(b)電気伝導度検層結果



(c)温度検層結果

図-8 改良型フローメータ測定結果

3.2 水質検層の評価

今回の改良型フローメータでは，流速検層と同時に温度と電気伝導度の検層も行っている．図-8 は，各深度における流速，電気伝導度及び温度の結果を示したものである．これらの測定結果では，各深度の流速の変化点において，温度及び電気伝導度に変化しており，各帯水層の地下水がその帯水層独自の温度特性及び電気伝導度特性を持っていることが確認できた．

3.3 温度分布の計測結果

図-8(c)の揚水流量を $1.93 \times 10^{-3} m^3/s$ とした時の各深度の温度検層結果を見ると，各深度の温度の変化量は極めて少なく， $0.5^\circ C$ 程度の変動幅であることが分かった．傾向的には，地下深部の第3帯水層の温度が低く，第2帯水層及び第1帯水層にかけて上昇している．地下水温度は地下滞留時間が長くと，温度拡散により均一化する傾向にある．その中で35m付近と31m付近で明らかな変化が見られるのは特徴的である．また，一般的には地下深部の方が温度は上昇し，その平均地温勾配は $3^\circ C/100m$ とされている．しかし，今回の測定では逆に深い方が温度が低下しているのもまた特徴である．

3.4 電気伝導度分布の評価

図-8(b)のグラフは揚水流量を $1.93 \times 10^{-3} m^3/s$ とした時の各深度の電気伝導度の検層結果である．揚水時の電気伝導度分布は概ね $1.5 mS/cm \sim 2.5 mS/cm$ の値を示しており，各帯水層からの地下水の流入により電気伝導度に変化している．

また、第1帯水層と第3帯水層で見られるように、一つの帯水層では深部に電気伝導度の高い地下水があり、浅部に電気伝導度の低い地下水があるようである。これは、塩分濃度の高い地下水は、低いものに比べ比重が大きいので、深い深度に移動したとも考えられる。

特に、第1帯水層では、表層部より第1帯水層までに明確な不透水層が確認されていないことから、雨水の侵入により浅部の電気伝導度が小さくなった可能性も考えられる。

ただし、ここで得られる観測孔内の電気伝導度は、深い地下水から浅い方に向かい複数帯水層の地下水が合成された電気伝導度であり、各帯水層の地下水の真の電気伝導度とは異なっている。

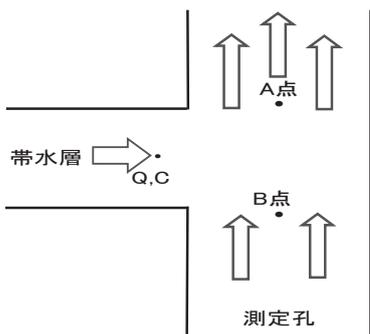


図-9 電気伝導度計算のモデル図

図-9のモデル図は、井戸の中の流れを示しており、そこに帯水層からの流れが合流すると考える。改良型フローメータ検層では鉛直方向に流れに対し、 Q_A, Q_B, C_A, C_B を計測している。

ここで、A点での電気伝導度は式(4)であり、帯水層から流入した地下水の電気伝導度と流量の積は式(5)となる。

$$C_A = \frac{Q_B C_B + Q_C}{Q_A} \quad (4)$$

$$Q_C = \int_{z(B)}^{z(A)} q(z) \cdot c(z) dz \quad (5)$$

ここに

C_A : A点における電気伝導度(mS/cm)

C_B : B点における電気伝導度(mS/cm)

Q_A : A点における流量(m^3/s)

Q_B : B点における流量(m^3/s)

$q(z)$: 帯水層内の深さZにおける流出流量(m^3/s)

$c(z)$: 帯水層内の深さZにおける電気伝導度(mS/cm)

この帯水層の平均の電気伝導度は、改良型フローメータ検層により鉛直方向に流れに対し、 Q_A, Q_B, C_A, C_B を計測していることから、式(4)を変形し電気伝導度Cを求めた。

図-10は、改良型フローメータで測定した電気伝導度の変化であるが、各帯水層の個別の電気伝導度を算定するため、電気伝導度の変化点を考慮して、さらに表-9及び図-10に示す5つの層に分割した。分割した各層の電気伝導度を式(4)より算出した結果が表-9である。

表-9 各層の電気伝導度

帯水層	層番号	上部深度(m)	下部深度(m)	流量(m^3/s)	電気伝導度(mS/cm)
第1	1	14.36	21.15	6.80×10^{-4}	1.37
	2	21.15	26.02	1.10×10^{-4}	5.90
第2	3	31.47	37.81	4.14×10^{-4}	1.68
第3	4	53.38	60.31	3.31×10^{-4}	2.19
	5	60.31	63.79	1.26×10^{-5}	2.62

各層の個別の電気伝導度をみると、概ね1~3mS/cm付近に集中しているが、第一帯水層の下部(層2)に5.9mS/cmと大きな値がみられることが特徴である。また、第1帯水層の上部(層1)は1.37mS/cmの電気伝導度で、今回の測定結果の中では最も低い値である。これは降雨の浸透が理由の1つと考えられ、地表面付近に不透水層がないことと一致する。

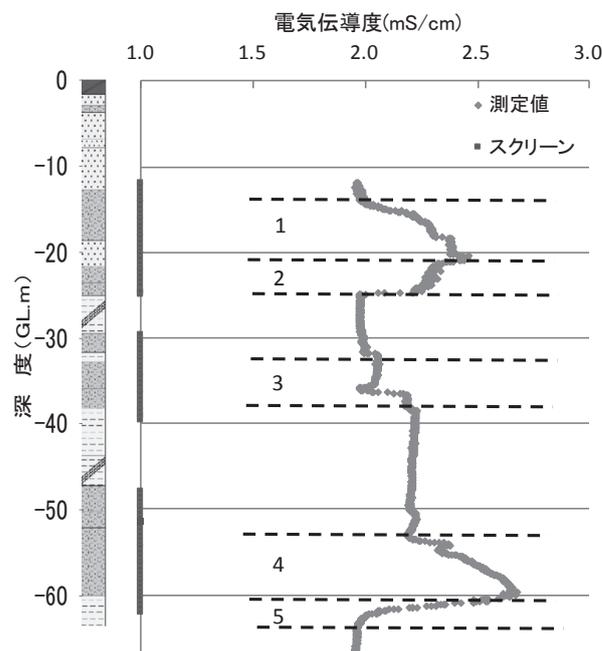


図-10 電気伝導度分布の層区分

表-10に観測井完成後(図-6参照)に各帯水層から採水して、実測した電気伝導度(8/17, 10/22)の値と電気伝導度検層で測定された結果より3つの帯水層のそれぞれの平均値を計算したもの(7/31)を示す。この結果では比較的良好な対応を示している。しかし、各帯水層から採水した値では、電気伝導度検層でみられた第1帯水層下部の大きな値を検出することは出来ないことが分かる。これは観測井からの採水による分析では、ストレーナ区間の平均的な値しか測定できないことに対し、改良型フローメータでは連続的に電気伝導度を測定することが出来るため、各深度の塩分濃度を詳細に検出することが出来ることを示している。

以上の結果より地下水の電気伝導度を測定することで塩分濃度を推定することができ、塩分濃度の高い範囲には塩水用ベントナイトを用いる等、塩分濃度に応じた揚水井、還元井及び観測井の止水構造を検討することが出来るようになり、信頼性の向上が図れるものと考えられる。

表-10 電気伝導度の計算値と実測値の比較

地層区分	7/31測定値	8/17実測値	10/22実測値
第1帯水層	2.23	1.48	1.22
第2帯水層	2.08	1.24	1.25
第3帯水層	2.37	1.96	2.09

単位 mS/cm

4. 結論

本研究により得た結論を以下に列挙する。

- (1) 自然水位の算定結果はその後の実測値と比較して良い一致をみており，自然水位算出手法の妥当性が確認できた。
- (2) 改良型フローメータで得られた透水係数は他の方法との比較で良い一致を示しており，本研究で提案した方法は十分実用性があると判断できる
- (3) 改良型フローメータは帯水層の透水係数を深度毎に把握することができることを確認した。
- (4) 改良型フローメータにより，孔内の流速とともに電気伝導度及び温度を連続的に測定できることを確認した。
- (5) 流量と温度，あるいは電気伝導度検層を組み合わせることにより，より詳細な地層の特徴を捉えられることが分かった。
- (6) 電気伝導度や温度の値は，地下水の特徴を示していると考えられることから，複数の箇所検層を行うことにより，地下水の連続性を評価できる可能性を示唆している
- (7) 改良型フローメータにより地盤の透水性や電気伝導度等を把握することで揚水井や還元井の計画に反映でき，地中熱利用の促進に寄与することができる。

5. 今後の課題とそれに対応した観測井の提案

本研究の今後の課題として，掘削時のベントナイトによる透水性への影響があること及び各帯水層の範囲をコア観察の結果より想定しているため，帯水層の評価に問題があることが考えられる。これらの課題を改善するため，以下のような観測井の設置方法を提案する。

- (1) 掘削時の孔壁安定にベントナイト泥水を用いた場合，掘削後の孔壁を洗浄してもマッドケーキが残留することがあるため，ボーリング掘削において十分に孔壁を保持できる例えば CMC 系の安定液を開発し，掘削中は孔を保持させる。
- (2) その後最初は細いが，その後バネの力で拡張し，孔壁に密着するスクリーン付きのケーシングを設置する。
- (3) ケーシング設置後安定液を分解する酵素を投入して，安定液の粘性を低下させた後，孔内を洗浄する。
- (4)十分に洗浄した後，孔内で改良型フローメータにより流速，温度，電気伝導度を計測して，帯水層内の浸透特性と地球化学特性を求める。
- (5) 地盤内の浸透特性，地球化学特性に対応した地下水圧，水

温，採水区間を決定して，フィルター材とペレット材(塩水対応型)によって上下の帯水層を止水して，多層の位置に複数の観測用採水孔を設置する。

謝辞

本研究は NEDO「再生可能エネルギー熱利用技術開発/再生可能エネルギー熱利用のポテンシャル評価技術の開発/都市域における，オープンループシステムによる地下水の大規模熱源利用のための技術開発」(研究代表者：北田奈緒子)として行ったものであることを記して謝意を表する。

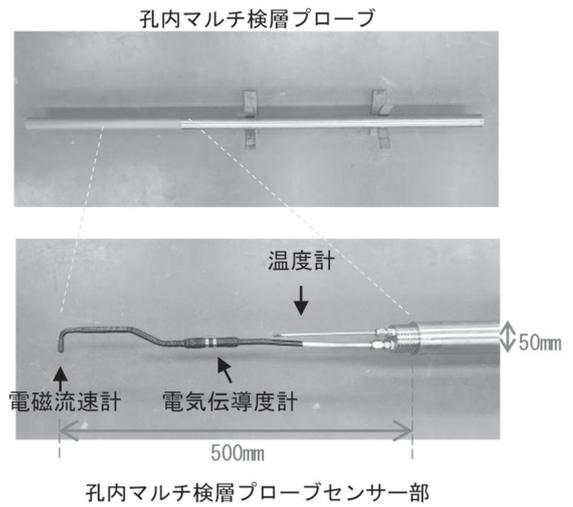
参考文献

- 1) Alfred. E. H. :Identifying hydraulically conductive fractures with a slow velocity borehole flowmeter, Can. Geotech.J., Vol.23, pp.69-78, 1986.
- 2) 下茂道人, 竹内真司, 竹内竜史, 後藤和章, 中野勝志 : 水中浮遊型カプセルプローブを用いた新しい地下水検層技術の開発, 公益財団法人深田地質研究所年報, No.19, pp.181, 2018.
- 3) Hess. A. E: A heat-pulse flowmeter for measuring minimal discharge rates in boreholes, U.S.Geological survey, OFR, pp.82-699, <https://pubs.usgs.gov/of/1982>.
- 4) Szekely. F, A. Galsa : Interpretation of transient borehole flow metering data in a fissured granite formation, Journal of Hydrology, Vol.327, pp.462-471, 2006.
- 5) Hung-Chieh Lo, Po-Jui Chen, Po-Yi Chou, Shih-Meng Hsu :The combined use of heat-pulse flowmeter logging and packer testing for transmissive fracture recognition, Journal of Applied Geophysics, Vol.105, pp. 248-258, 2014.
- 6) Klepikava. M.V., T.L.Borgne, O.Bour, and P.Davy : A methodology for using borehole temperature-depth profiles under ambient single and cross-borehole pumping conditions to estimate fracture hydraulic properties, Journal of Hydrology, Vol.407, pp.145-152, 2011.
- 7) Doughty, C, C.F.Tsang, S.Yabuuchi, T.Kunimaru : Flowing fluid electric conductivity logging for a deep artesian well in fractured rock with regional flow, Journal for Hydrology, Vol.482, pp.1-13, 2013.
- 8) Pehme.P, B.L.Parker, J.A.Cherry, D.Blohm: Detailed measurement of the magnitude and orientation of thermal gradients in lined boreholes for characterizing groundwater flow in fractured rock, Journal of Hydrology, Vol.513, pp. 101-114, 2014.
- 9) Frederick. D.D.L, L.D.Slater, J.Robinson, C.D.Johnson, N.Terry, D.Werkema : An overview of geophysical technologies appropriate for characterization and monitoring at fractured-rock sites, Journal of Environmental Management, Vol.204, pp. 709-720, 2017.
- 10) 西垣誠, 柴田卓詞, 加藤裕将, 平田洋一 : 孔内流速検層装置(フローメータ検層)による多層帯水層の透水性評価, 公

益社団法人地盤工学会中国支部論文報告集, 地盤と建設, Vol.36, No.1, pp.65-70, 2018.

- 11) 伊藤浩子, 北田奈緒子, 越後智雄, 藤原照幸: モニタリング調査結果からみた西大阪地域の被圧地下水の特徴ー地下水の熱利用を見据えた検討ー, Kansai Geo-Symposium 2018 ー地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウムー, pp.13-18, 2018.
- 12) 中村朋弘, 皆瀬眞, 柴田卓詞, 加藤裕将, 西山哲, 西垣誠: 各種電解質水溶液で膨潤するベントナイトペレットの開発とその性能評価, 公益社団法人地盤工学会中国支部論文報告集, 地盤と建設, Vol.36, No.1, pp.105-110, 2018.
- 13) Chin-Fu Tsang, Peter Hufschmied, Frank V. Hale :Determination of fracture inflow parameters with a borehole fluid conductivity logging method, Water resources research, Vol. 26, No. 4, pp. 561-578, 1990.
- 14) Chjn-Fu Tsang, Christine Doughty :Multirate flowing fluid electric conductivity logging method, Water resources research, Vol. 39, No. 12, pp. 12-1-12-10, 2003.

付録



(2019年6月20日 受付)