

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23501241

研究課題名(和文) 透水構造の新しい可視化方法に関する研究

研究課題名(英文) Development of new imaging method of hydraulic conductivity structure

研究代表者

後藤 忠徳 (Tada-nori, Goto)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90303685

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：地下水流動パターンの解明は、工学・理学・農学などの多方面で必須の技術である。本研究では自然電位という地下水流動に関連のある物理現象に着目した。本研究で新たに開発した地下水流動・自然電位の数値計算ソフトや、同じく新規開発した逆解析手法をテストしたところ、地表での自然電位分布から地下の透水構造の特徴を概ね正しくイメージできることがわかった。さらに実際に野外で取得された自然電位データに対しても解析を行い、地質断面図や地下水データから予測される地下透水構造と統合的な地下構造を推測することができた。自然電位測定は簡便であるため、地下水流動の解明に貢献しうるといえる。

研究成果の概要(英文)：Understanding of groundwater flow pattern is big issue in science, engineering and agriculture. We focus on the self potential (natural electrical potential) on the surface, which can be generated by groundwater flow. In this study, we developed the numerical forward codes for calculations of the groundwater flow and self-potential distributions. An inverse scheme of hydraulic structure by using the self-potential data is also constructed. The numerical feasibility studies strongly suggested the possibility to image the subsurface hydraulic heterogeneity. Then, we adopted our numerical technique for analyzing the real field data of self-potential. As a result, we succeed in getting a reasonable hydraulic structures from the self-potential data. Our new scheme for analysis of self-potential will be helpful for understanding the subsurface fluid flow.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：地理学

キーワード：水文学 自然電位 透水構造 インバージョン 地下水位 比抵抗 流動電位 透水係数

## 1. 研究開始当初の背景

地下水の流動パターンを可視化することは、地下水の利用・自然災害・環境影響評価・河川堤防などの人工構造物補修など、社会基盤に関するあらゆる側面で重要かつ必須の技術である。従来は、地下水流動の概要把握のために、地下水位分布の調査や井戸水・湧水・河川水の地下水成分測定や同位体化学測定がなされてきた(水文学的観測: 例えば恩田ほか, 1996)。これに加えて、近年の数値計算の進歩によって、パソコンによる地下水流動シミュレーションが一般的になり、水文学的観測データをよく説明するような地下水流動モデルの構築も盛んになっている。

しかし、地下水の流動シミュレーションを行うためには、地下の透水係数分布(=透水構造)の情報が必要である。土壌や岩盤の透水係数は井戸を用いた現場透水試験や注水試験等により測定されるほか、コア試料を用いた室内透水試験により測定されている。しかし、これらの測定には井戸やコア試料が必要であり、時間的・費用的制約のために測定数が限られている。

この欠点を補うため、地下の透水構造を地表などでの調査から予測する方法が提案されている。例えば電気探査によって得られる比抵抗構造を用いて透水係数を求める方法、複数の物理検層データから透水係数を求める方法、地震波探査によって得られる地震波速度構造を用いて透水係数を求める方法等がある。これらは透水構造の可視化において一定の成果を収めてはいるが、いずれも土壌や岩石の状態を仮定して、経験的あるいは間接的に透水係数を求める手法である。

一方で、地下水が流れると界面動電現象のために微弱な電流が発生することが知られている(Ishido and Mizutani, 1981)。これが地表面で観測可能な大きさの自然な電位分布(自然電位)を発生させることから、自然電位を用いて地下水流動パターンの把握する試みが多数見受けられる。例えば自然電位観測データに基づいて、地熱地域での熱水対流の様子が議論されてきた(例えば石戸, 2005)。また山地斜面における地下水面分布の推定について、自然電位分布から推定する試みがなされている(Revil et al., 2004)。

しかしこれらは主に、自然電位の発生要因を地下水流動の湧き出しや浸み込みで説明できると仮定しており、地下の透水構造の不均質性などをあまり考慮してこなかった(先見的に透水構造を与える場合が多く、自然電位観測から透水構造を求める研究例は少ない)。ただし自然電位発生の基礎方程式(Revil et al., 2004)から導かれるように、地下の不均質境界においても電流源が発生することが知られている。つまり自然電位分布は、前述の比抵抗構造や地震波速度構造のように透水構造を間接的に反映したものではなく直接的に反映した観測量であるが、透水構造推定には用いられてはこなかった。

## 参考文献:

- Ishido, T. and Mizutani, H., Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics, *J. Geophys. Res.*, 86, 1763-1775, 1981.
- 石戸経士, 岩石の輸送特性と貯留層工学, 地学雑誌, 114, 885-900, 2005.
- 恩田裕一ほか編, 水文地形学—山地の水循環と地形変化の相互作用, 古今書院, 267pp., 1996.
- Revil, A. et al., The hydroelectric problem of porous rocks: inversion of the position of the water table from self-potential data, *Geophys. J. Int.*, 159, 435-444, 2004.

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、地表での自然電位分布から透水構造をどの程度"定量的"に求められるかを3年間の研究目標と定め、以下の研究を実施した。

- ・ 地下水流動シミュレータのおよび自然電位数値計算ソフトの開発
- ・ 地下透水構造の逆解析法の開発および逆解析の実施
- ・ 野外における自然電位観測および透水構造推定

本研究では、地表での自然電位観測と地下水位・湧水量・降雨観測を組み合わせ、全く新しく、かつ効果的な透水構造の可視化方法の確立を目指している。自然電位観測は、その原理式に不透水層や透水層からの影響(水頭の不連続性)を直接含んでいるため、従来の地下探査による透水構造推定法よりも高い信頼性が期待される。しかも井戸掘削や他の地下探査法と比べると、自然電位観測は大掛かりな観測装置を用いず簡易である。従って、本研究で提案する新たな透水構造の可視化技術は、多くの地下水分野の技術者にとって実施可能な手法である点が重要であり、従来の井戸でのデータを補完し、地下水流動の可視化を推し進める効果が期待される。

## 3. 研究の方法

### 3-1. 数値計算ソフトの開発

本研究では地下水流動とその時に発生する自然電位分布に関する数値計算を行い、地下不均質構造の自然電位分布に与える影響を定量的に評価した。地下のモデルパラメータとして、地下水流動域の透水係数や、流動電位係数及び堆積物の電気伝導度などを想定した。これらパラメータを変化させた場合の、地下水流動の変化や自然電位分布の変化を求めるために、新たに2次元の数値計算シミュレータを作成し、どのパラメータが自然電位分布のパターンに大きな影響を及ぼすのかを議論した。

地下水流動に伴う界面導電現象による自然電位発生のシミュレーションを行うためには、解くべき基礎方程式が必要である。電流の発生原因が地下水流動のみによる場合、地下水流動  $\mathbf{q}$  と電流分布  $\mathbf{I}$  の関係式は、透水係数  $k$ ・流動電位係数  $L$ ・電気伝導度  $\sigma$  を用いて以下の次の2式表される。

$$\mathbf{I} = -\sigma \nabla \phi - L \nabla h$$

$$\mathbf{q} = -L \nabla \phi - k \nabla h$$

第1式の左辺第1項はオームの法則を表し、第1式第2項及び第2式第1項は、電場と地下水流動の相互作用、第2式の第2項はダルシー則を表す。透水性がそれほど小さくない場合、第2式の右辺第1項は無視できる (Ishido and Pritchett, 1999; Revil, 2003)。そこで第1式に連続式を適用することで、水頭と電位を関係付ける次の式を得ることができる。

$$\nabla(\sigma(\nabla\phi)) = -\nabla(L\nabla h)$$

ここで、電気伝導度  $\sigma$ ・電気ポテンシャル  $\phi$ ・流動電位係数  $L$ ・水頭  $h$  である。従って、右辺のパラメータが計算や仮定により求められれば、地中での電荷密度の分布を求めることができる。計算手法は、陰的解法である有限要素法で行った。計算手順は以下のようである。

- ・ 透水係数の空間分布及び水頭の境界条件を与え水頭分布を求める。
- ・ 流動電位係数の空間分布及び得られた水頭分布を入力条件として、地中に発生する電荷密度の分布を求める。
- ・ 電気伝導度の空間分布及び得られた電荷密度の分布から地表面での電気ポテンシャルを求める。

ここで取り扱う計算モデルは2次元モデルである。地下水面の勾配の自然電位分布への影響は、浸み込み・吹き出しの高度差を一定にしたままモデルの幅を広げ評価した。地下構造の不均質性は、地下水流動中に異常体を配置し、サイズ・位置・物性値を変化させ評価した。評価したパラメータは透水係数、流動電位係数及び電気伝導度である。

自然電位を数値計算により得るためには、地下水流動の数値モデル化が必要である。本研究では、不飽和層を鉛直に流れる地下水流動が発生させる自然電位にも着目するために、降雨によって発生する地下水流動及び自然電位分布に着目し、発生する地下水流動の流量及び自然電位異常の大きさに関する定量的な評価を行った。

### 3-2. 地下透水構造の逆解析法の開発

次に地表での自然電位分布と、地下水の流入・流出情報が既知の場合に、これらから地下の透水構造を逆解析する方法を考える。まず簡単のため、不飽和層は考えず、飽和地下水流動のみを考慮する。この場合の基礎方程式は、ダルシー則と連続式を用いて次式で表される。

$$\mathbf{q} = -\nabla(k\nabla h)$$

ここで、 $\mathbf{q}$  は地下水の流入出量、 $k$  は透水係数、 $h$  は水頭である。また 3-1 に示したのと同様に水頭と電位は次式のように関連付けられる。

$$\nabla(\sigma(\nabla\phi)) = -\nabla(L\nabla h)$$

有限要素法により上の2式は行列とベクトルにより記述される。

$$F_1(k)\mathbf{h} = \mathbf{q}(k)$$

$$F_2(\sigma)\phi = -F_3(L)\mathbf{h}$$

ここで  $F_1$  は第1式の右辺、 $F_2$  は第2式の左辺、 $F_3$  は第2式の右辺に有限要素法を適用して得られる行列である。

次に透水構造の逆解析の定式化を行う。まず目的関数  $U$  を作成し、目的関数  $U$  を水頭  $\mathbf{h}$  で最小化することによりインバージョンを行うこととする。自然電位分布と水頭分布は、先の自然電位に関する有限要素法の式により関連付けられるため、自然電位分布から水頭分布を求めるインバージョンにおける目的関数は次式となる。

$$U = \|\phi_{obs} - (-F_2(\sigma)^{-1}F_3(L)\mathbf{h})\|^2 + \lambda\|\mathbf{C}\mathbf{h}\|^2$$

ここで、 $\phi_{obs}$  は観測された自然電位分布、 $\lambda$  はハイパーパラメータ、 $\mathbf{C}$  は平滑化制約を表す行列である。さらに地下水流動に関する有限要素法の式から、透水係数と自然電位分布を直接関連付けることができる。そこで、水頭分布の推定手法と同様に次式で目的関数  $U$  を新たに作成し直して、目的関数  $U$  を透水係数  $\mathbf{k}$  で最小化することで透水構造のインバージョンを行うこととした。

$$U = \|\phi_{obs} - (-F_2(\sigma)^{-1}F_3(L)F_1^{-1}(k)\mathbf{q}(k))\|^2 + \lambda\|\mathbf{C}\mathbf{m}\|^2$$

ここで、 $\mathbf{m}$  は  $\log_{10}(\mathbf{k})$  である。この関数  $U$  を最小にするためには、Tikhonov 正則化法を用いて反復解法を行うと良い。つまりある(妥当な)透水構造を初期モデルとし、目的関数  $U$  が小さくなるように、このモデルを更新する。モデル更新量が十分小さくなるまでこの更新作業を繰り返し、結果として目的関数  $U$  を最小とするモデル、すなわち自然電位分布を最もよく説明する地下透水構造を得ることが可能となる。

本研究では、流動電位係数  $L$  が未知の係数として残されている。ただし Jardani et al. (2009)によれば、浸透率  $k$  ( $m^2$ ) と  $L$  には以下の関係があることが知られている。

$$\log(Q_v) = -9.2849 - 0.8219 \log(k)$$

$$L = Q_v K$$

ここで、 $Q_v$  ( $C m^3$ ) は自然電位発生に有効な間隙中の電荷である。上の関係式を用いることで、透水係数と流動電位係数を同時に推定

することが可能となる。またハイパーパラメータ $\lambda$ についてはLカーブ基準を用いて最適化を行い、逆解析の安定化を図った。

### 3-3. 実データへの適用

以上の地下水・自然電位分布の数値計算ソフト、および地下透水構造の逆解析ソフトを実データに対して適用することを試みる。ここでは、米国アイダホ州ボイジの Boise hydrogeophysical research site (BHRS)において2007年に行われた注水試験のデータを用いた。2本の井戸(深さ20m)を用いた揚水・注水時に、地表において自然電位データが取得されており、これを用いた地下透水構造解析を行なった。

参考文献:

藤縄克之, 環境地下水学, 共立出版, 第4章, 79-106, 2010.

Ishido, T. and J. W. Pritchett, Numerical simulation of electrokinetic potentials associated with subsurface fluid flow, *J. Geophys. Res.*, 104, 247-259, 1999.

Jardani, A. and A. Revil, Stochastic joint inversion of temperature and self-potential data: *Geophys. J. Int.*, 179, 640-654, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04295.x, 2009.

Revil A, V.Naudet and J.D.Meunier, The hydroelectric problem of porous rocks: inversion of the position of the water table from self-potential data, *Geophys. J. Int.*, 159, 435-444, 2004.

## 4. 研究成果

### 4-1. 数値計算ソフトの開発

今回新たに開発した地下水流動の数値計算ソフトおよび自然電位の数値計算ソフトを用いて、地下透水構造の不均質によって、どのような自然電位分布の異常が現れるかを調査した。図1にその一例を示す。図1では水平方向に層状に伸びた高透水異常を想定している。また地下水は図1の左側の1地点(0m地点)から流入し、右側の1地点(800m地点)から流出しているものとする。このような高透水異常は地下水の水頭分布を著しく変化させる。つまり地下水は高透水層を選択的に流れようとするために、水頭の勾配は高透水層周辺で極端に緩やかになる。

このような水頭勾配の急変が自然電位の異常を生み出すことが本研究で初めて明らかとなった。図1eに示したように、高透水層がない場合は、自然電位は地下水の上流から下流にかけて単調に上昇する傾向しか見られない。一方、高透水層がある場合は、アルファベットの「N」の字のように、水平位置300m付近で自然電位は相対的に正の異常を示しており、水平位置500m付近で自然電位は相対的に負の異常を示している。これらの

ローカルな自然電位異常は、異常体がない場合の自然電位の単調上昇傾向に対して約30%に達する大きさである。従来の自然電位分布の定性的解釈では、このようなローカルな自然電位異常は、ローカルな地下水の湧出や涵養で説明がなされてきた。しかし今回の研究成果によって、地下透水構造の急変によってもこのような自然電位異常が形成されることが明らかとなった。

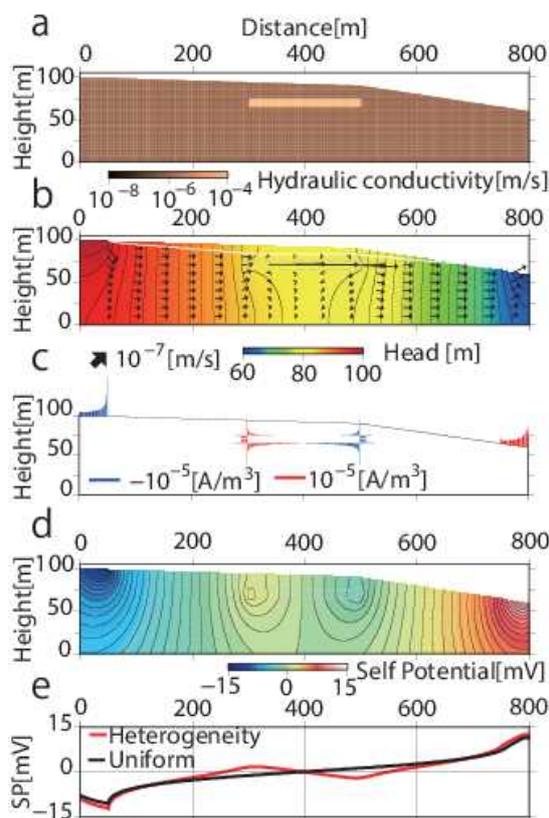


図1. 数値計算結果の一例。高透水異常体が埋没している場合。a) 地下の透水構造、b) その際の水頭分布および地下水流動、c) 地下での電流源分布、d) この時発生する自然電位分布、e) 地表での自然電位分布 (赤=図1aの中央部に示された透水異常体がある場合、黒=ない場合)

本研究では、他の様々な地下構造に対しても数値計算を実施した。例えば低透水異常体に対しても自然電位分布が大きく変化することが明らかとなった。この場合は図1とは逆に、低透水異常体の左側で自然電位は相対的に負の異常を示し、右側では相対的に正の異常を示した。従って、これらの異常の符号や大きさから、地下の透水構造を定性的に推定できる可能性が示唆された。

また地下に透水異常体があっても自然電位には異常が現れないケースがあることも明らかとなった。特に、低透水異常体が層状に分布する場合や、高透水異常体が鉛直に立った状態で分布する場合には、自然電位分布には大きな異常が現れにくいことが明らか

となった。これらの透水異常体は、地下水の水頭分布に与える影響が小さく、従って自然電位に与える影響も小さいと考えられる。

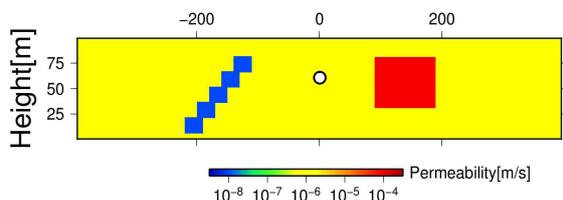


図 2：シミュレーションに用いた透水構造モデル。白い点は、井戸の位置を示している。

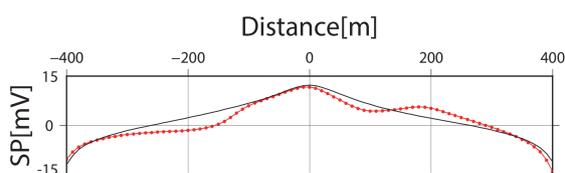


図 3：数値計算により得られた地表面での自然電位分布。黒い線は透水構造が均質な場合の自然電位分布。

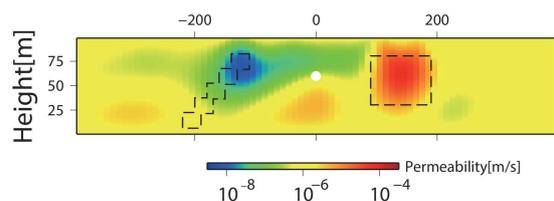


図 4：不飽和層を考慮した場合の逆解析結果。

#### 4-2. 地下透水構造の逆解析法の開発

次に本研究で新たに開発を行った地下透水構造の逆解析法のテストを行なった。逆解析例を図 2~4 に示す。この例では図の中心に井戸を 1 つ設けており、そこでの揚水を行い、定常状態となった時の自然電位分布および揚水量を観測データとして、地下構造の逆解析を実施している。さらに不飽和層中の地下水流動も加味できるように逆解析ソフトを改良している。

ここでは高透水異常体と低透水異常体が井戸の周りに両方存在する地下構造を想定する (図 2)。地下の電気伝導度は簡単のため  $0.01\text{S/m}$  一様とした。水平方向  $0\text{m}$ ・標高  $60\text{m}$  に配置した井戸より毎秒  $10^{-1}\text{kg}$  で揚水した場合の自然電位分布を数値計算により推測した (図 3)。4-1 でも見られたように、透水性に不均質構造がある場合には高透水性の不均質構造及び低透水性の不均質構造の直上でローカルな自然電位異常が認められる。この自然電位分布を逆解析に利用した。逆解析の際の初期モデルには  $10^{-6}\text{m/s}$  一様の透水構造モデルを与えた。また  $0.01\text{S/m}$  一様の電気伝導度構造及び揚水量を先見情報として

与え、地表面での自然電位分布から透水構造を推定した。こうして得られた地下構造 (図 4) をみると、高透水性の不均質構造はほぼ正しくイメージされている。また低透水性の領域はやや広い範囲に現れているが、地表付近においては低透水異常体は正しく可視化できている。この結果より、本逆解析手法は地下透水構造の概要をイメージ化できることが分かった。

#### 4-3. 実データへの適用

以上の数値計算手法や逆解析手法について、実データへの適用を試みる。ここでは米国アイダホ州において、地表で得られた自然電位分布に逆解析を適用する (図 5)。この自然電位観測時には井戸 (C1、C4) において注水・揚水がそれぞれ行われていたため、自然電位データにはその際の地下水流動の影響が強く表れている。例えば、C1 と C4 で注水・揚水を入れ替えて実施しているが、自然電位のパターンもそれに伴い反転している様子が分かる。本研究ではこの時の注水量・揚水量、および図 5 の自然電位分布を用いて地下透水構造の逆解析を行なった。なおここでは地下水および自然電位は定常状態になっていると仮定し、時間変化を考慮してはいない。

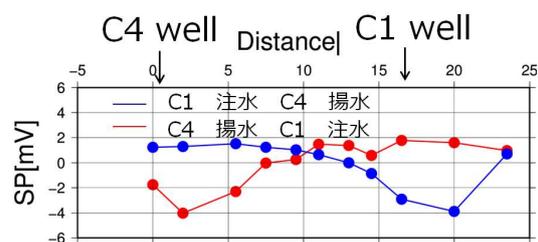


図 5. 注水・揚水時に地表で観測された自然電位分布。

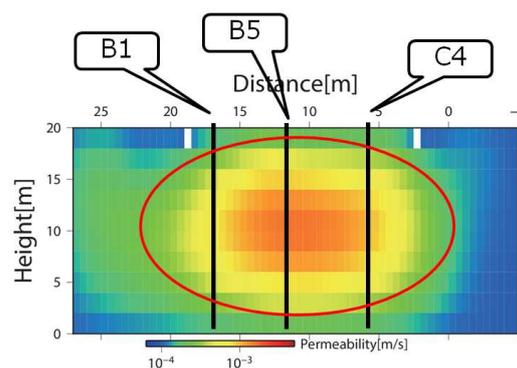


図 6. 逆解析手法によって得られた透水構造。

地下構造の逆解析の結果、調査地域の地下  $5\text{m}$ ~ $15\text{m}$  付近には、幅広く高透水層が広がっていることが明らかとなった。これは既存の地下水トモグラフィーの結果と整合的である。井戸における地下水データのみを用いた解析結果では (Cardiff and Barrash, 2011)、深さ  $4\text{m}$  付近~ $13\text{m}$  付近において、高透水層が認められており、自然電位データの逆解析結

果と類似している。地下水トモグラフィーでは通常は地下水データのみを用いているが、本研究成果によれば、自然電位データを追加することで、より簡便に、正確な地下透水構造の把握が可能となることが示唆された。

参考文献：

Cardiff, M. and W. Barrash. "3-D transient hydraulic tomography in unconfined aquifers with fast drainage response." *Water Resources Research* 47: W12518, 2011.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- 1) Goto, T., K. Kondo, R. Ito, K. Esaki, Y. Oouchi, Y. Abe and M. Tsujimura, Implications of self-potential distribution for groundwater flow system in a non-volcanic mountain slope, *Int. J. Geophys.*, doi:10.1155/2012/640250, 2012.
- 2) Chiang, C. W., T. Goto, H. Mikada, C. C. Chen, and S. K. Hsu, Sensitivity of deep-towed marine electrical resistivity imaging using two-dimensional Inversion: a case study on methane hydrate, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 23, 725-732, doi: 10.3319/TAO.2012.06.19.01(T), 2012.
- 3) Seama, N., N. Tada, T. Goto and M. Shimoizumi, A continuously towed vertical bipole source for marine magnetometric resistivity surveying, *Earth Planets Space*, 65, 883-891, doi:10.5047/eps.2013.03.007, 2013.
- 4) Ozaki, Y., H. Mikada, T. Goto and J. Takekawa, Self-potential inversion for the estimation of permeability structure, *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, accepted, 2014.
- 5) Ozaki, Y., H. Mikada, T. Goto and J. Takekawa, Effect of subsurface hydraulic conductivity structure on self potential, *Near Surface Geophys.*, accepted, 2014.

[学会発表] (計 7 件)

- 1) 尾崎裕介・三ヶ田均・後藤忠徳・武川順一, 地下不均質性や降雨浸透により生じる自然電位異常シミュレーションと解釈, 物理探査学会第 125 回学術講演会, 2011 年 9 月 13 日, 秋田大学.
- 2) Y. Ozaki, H. Mikada, T. Goto, J. Takekawa, M. Tsujimura and F. Hachani, Effect of Heterogeneity of Hydraulic Conductivity on Groundwater Flow and Spontaneous Potential, *International Union of Geodesy and Geophysics*, 2011 年 7 月 5 日, メルボルン(オーストラリア).
- 3) Ozaki, Yusuke, Hitoshi Mikada, Tada-nori

Goto and Junichi Takekawa, Forward simulation of Self-Potential and inversion of hydraulic head, *The 21st Electromagnetic (EM) Induction Workshop*, 2012 年 07 月 25 日~2012 年 07 月 31 日, ダーウィン(オーストラリア).

- 4) Ozaki, Yusuke, Hitoshi Mikada, Tada-nori Goto and Junichi Takekawa, Effects of subsurface permeability structure on self-potential distribution, *Society of Exploration Geophysicists Annual Meeting 2012*, 2012 年 11 月 4 日~2012 年 11 月 9 日, ラスベガス(アメリカ).
- 5) Ozaki, Yusuke, Hitoshi Mikada, Tada-nori Goto and Junichi Takekawa, Estimation of permeability structure with Self Potential inversion, *The 16th International Symposium on Recent Advances in Exploration Geophysics*, 2012 年 11 月 19 日, 京都大学.
- 6) 尾崎裕介・三ヶ田均・後藤忠徳・武川順一, 透水係数と流動電位係数の関係を考慮した自然電位インバージョン, 物理探査学会第 128 回学術講演会, 2013 年 10 月 22 日, 高知会館.
- 7) 尾崎裕介・三ヶ田均・後藤忠徳・武川順一, 不飽和層の影響を考慮した自然電位インバージョン, 物理探査学会第 129 回学術講演会, 2013 年 6 月 3 日, 早稲田大学.

[図書] (計 1 件)

- 1) 後藤忠徳, 地底の科学 地面の下はどうなっているのか, ベレ出版, ISBN-10:4860643704, 199 pp., 2013.

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等  
<http://obem.jpn.org/>

#### 6. 研究組織

- (1)研究代表者  
後藤 忠徳 (Goto, Tada-nori)  
京都大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：90303685
- (2)研究分担者  
なし
- (3)連携研究者  
辻村 真貴 (Tsujimura, Maki)  
筑波大学・生命環境科学研究科・教授  
研究者番号：10273301