

# 地下水流動モニターにボーリング孔ケーシングパイプを利用する際の留意点

村上英記・野本和希

高知大学工学部地球環境防災学科

## Points to notice when utilizing borehole casing pipe for groundwater flow monitoring

Hideki Murakami and Kazuki Nomoto

Department of Global Environment and Disaster Prevention,

Faculty of Science and Technology, Kochi University

We report some points to be aware of when utilizing borehole casing pipes as electrodes to monitor groundwater flow. From the results of water injection experiments at Nojima fault and analog experiments simulating water injection, it has become evident that a metallic borehole casing pipe of water injection has changed electrically positive during water injection. The polarity of this electrical change of a casing pipe does not depend on the direction of water flow. It is difficult to estimate the direction of water flow only from the polarity of electrical change of a casing pipe when there is water inflow or outflow into the casing pipe.

### 1. はじめに

地下深部での地震発生だけでなく、地表の地すべりなどの地盤災害においても地下水は重要な発生要因と考えられている。地下水がどこに存在するかについては、地震波速度の計測とともに比抵抗の計測により推定することが可能である。一方、地下水が流動しているかどうかについては、地震波速度の計測から推定することは難しく、比較的浅部の地下水流動については地温測定や自然電位の測定などが使用されることがある（伊藤ほか，1998）。

地下水が地下を流動すれば流動電位が発生することが期待でき、発生した電位分布から地下水の流動方向、電位変動から流速の変化が推定できる。しかし、実際に地下水が流動している深さに電極を設置することは一般的には困難である。そのため、地下で発生した電位変動を地表に伝える仕組みがあることが望ましい。例えば、地すべり地域などでは既設のボーリング孔のケーシングパイプの利用が考えられる。

本報告では、野島断層注水実験（Murakami *et al.*, 2001, 2007; 村上ほか, 2010）により得られた知見及び検証実験から、既設のボーリング孔ケーシングパイプを地下水流動のモニター用の電極として使用する際の留意点について述べる。

### 2. 野島注水実験時の自然電位変動

1995年兵庫県南部地震( $M_w$ 6.9)の地表地震断層である野島断層では、断層の回復過程をモニターする

ために 1997 年から数年おきに注水実験が実施されてきた。この注水実験では、地震直後の破砕された状態の断層に注水した場合には水は容易に拡散するが、断層の固着過程が時間とともに進行すれば水の拡散がしにくくなることを想定し、これを検出する目的で実施された (Ando, 2001)。注水時の微小地震活動、湧水量変化、ひずみ変化とともに地表での自然電位計測が実施され、地震発生後の数年で断層の固着過程がある程度進行していることが明らかとなった (Kitagawa *et al.*, 2007; Mukai and Fujimori, 2007; Murakami *et al.*, 2007)。

野島断層注水実験における注水孔周辺部における自然電位変動には 3 つの特徴がある：1) 注水操作に同期して変動する、2) 注水孔周辺が電位的に負に変動する、3) 注水孔から離れるにしたがい変動の大きさが小さくなる。これらの特性は、地下で注水孔から流出した水により発生する流動電位をケーシングパイプが地表に伝え、結果として注水孔ケーシングパイプが負の線電流源として作用しているというモデルで説明できる (Murakami *et al.*, 2001,2007)。

2006 年以降の注水実験では、注水孔ケーシングパイプそのものを電極に見立てて、注水時の電位変動の計測もおこなった。その結果、注水孔周辺の電極同様に注水操作に同期して変動する電位変動を観測したが、注水孔周辺の電極とは異なり電氣的に正側に変動した (村上ほか, 2010)。一例として、2009 年 2 月の注水実験時の自然電位変動を Fig.1 に示す。注水孔 (1800m 孔) の電位変動が注水の開始と停止に同期しており、約 0.1V 程度正側に変動していることが分かる。また、日変化 (主として漏洩電流) の変動極性が注水孔周辺の電極 (A01~A10) とは逆になっていることも分かる。この注水孔ケーシングパイプの電位変動は、流動電位による線電流源モデルでは説明できない。

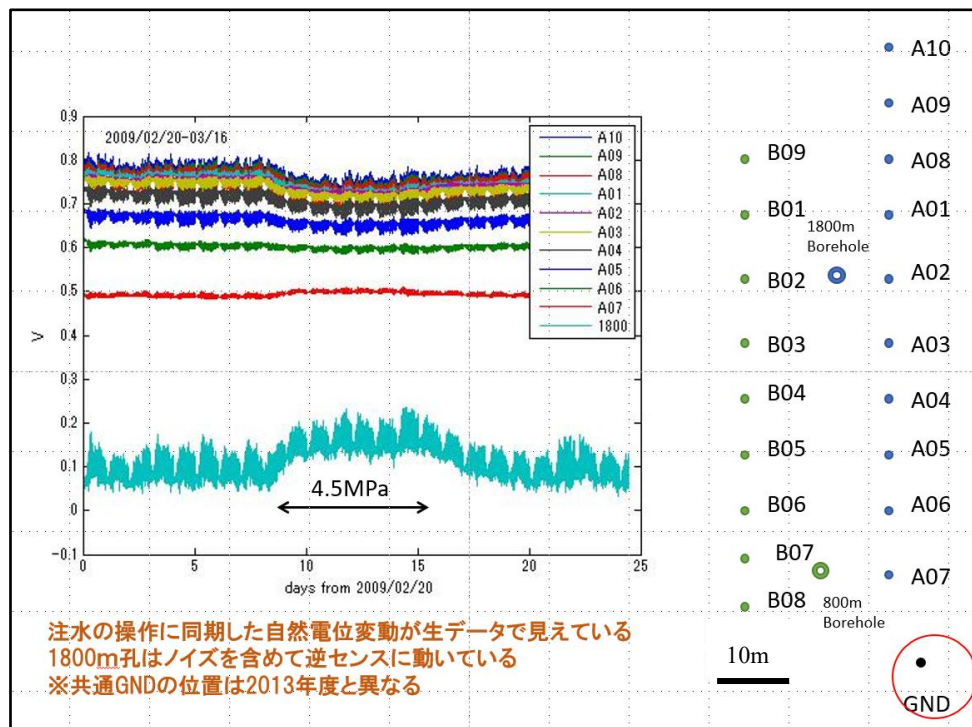


Fig.1 Location of electrodes and self-potential variations associated with water injection

●:electrode,◎:1800m Borehole (water injection pipe)

### 3. 注水孔ケーシングパイプの電気的特性を調べるためのアナログ実験

野島断層注水実験で観測された注水孔ケーシングパイプの電気的特性を調べるためのアナログ実験を Fig. 2 に示す実験装置を作成して行った。注水実験を模擬するために、アクリル水槽（横 26 cm×縦 16 cm×幅 16 cm）に珪砂を入れ、注水孔ケーシングパイプとしてステンレスパイプを使用した。水の流れをコントロールするために、アクリルケースの側面や底面に穴をあけ必要に応じて塞ぐなどした。注水による電位変動を計測するために、ステンレスパイプからの距離 4.0 cm, 7.5 cm, 11.0 cm, 15.0 cm, そして 19.0 cm の位置に電位電極としてステンレス釘（あるいは螺旋状にしたもの）を配置し、19 cm の位置を基準点として電位を計測した。電位の計測には白山工業のデータ収録装置 DATAMARK LS-3350 を使用して、0.5 秒間隔で電位計測を行った。注水操作は、水道の蛇口の開閉により行った。また、使用した水の特性は、pH7.2, 電気伝導度 80~100 $\mu$ S/cm(at 18.6 $^{\circ}$ C)である。

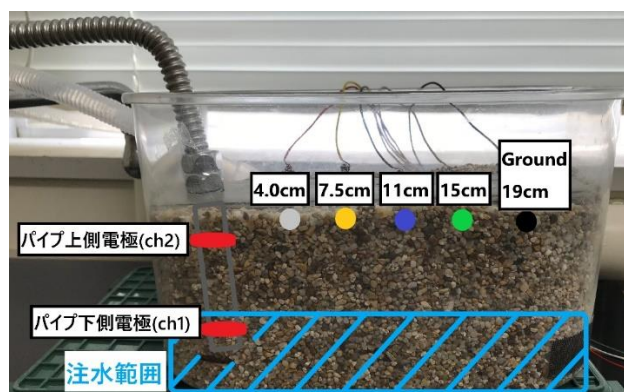


Fig.2 Analog experiment apparatus simulating water injection experiment

このアナログ実験では、注水孔ケーシングパイプの電気的特性を明らかにすることを主目的としているため、水の流動・圧力については定量的な計測は実施していない。また、電極配置についても実際の注水実験に対するスケール則を満たしていない。

#### 3-1. ステンレスパイプを使用した注水実験

電極の接地抵抗を下げるために実験前に珪砂全体を水に濡らす操作をおこなった後に、Fig. 2 に示した実験装置のステンレスパイプと水道の蛇口をビニールホースで接続し、蛇口の開閉にて水をステンレスパイプから珪砂に流す操作を行った。この実験では、注水した水が Fig. 2 の注水範囲内を流動するように流量をコントロールし、ステンレスパイプからの距離 4.0 cm, 7.5 cm, 11.0 cm, 15.0 cm の表面に配置した電極に注水した水が直接に接しないようにした。

実験結果を Fig. 3 に示す。注水にともなうステンレスパイプの上下における電位変動の大きさはまったく同じ大きさで約 40mV 程度であり、ステンレスパイプが等電位面を形成していることがわかる。電位変動の極性は正側である。珪砂の表面に設置した他の電極の変動も注水の操作に同期して変化を始め

ているが、変動の極性は負側であり、ステンレスパイプに最も近い位置 (4.0 cm) の変動が最も大きい。これらの注水にともなう電位変動の特性は、Fig.1 に示した野島断層注水実験における電位変動の特性を再現している。アナログ実験が、実際の野島断層注水実験を定性的に模擬したものになっていると考えられる。

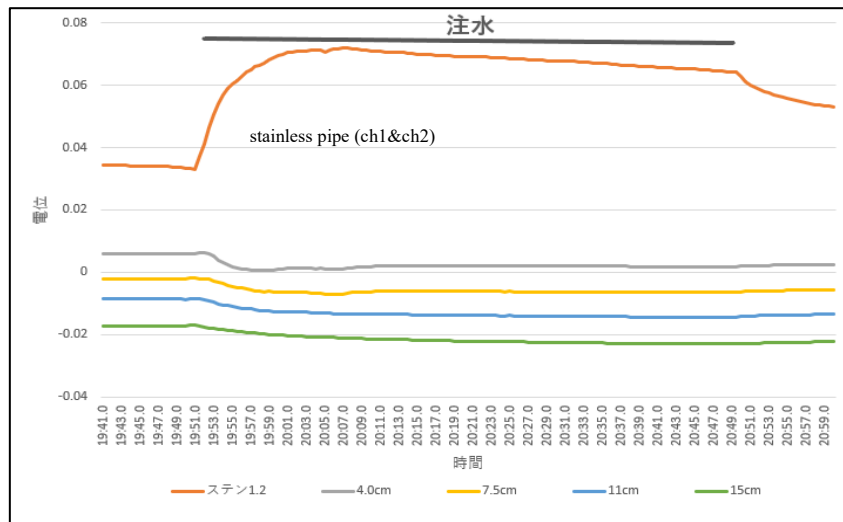


Fig.3 Self-potential variations associated with water injection from a stainless pipe

次に、ステンレスパイプを使用して注水を行うが、珪砂の量を少なくして珪砂全体に水が行き渡るような状態（飽和状態）で水が流動する条件で注水実験を行った (Fig.4)。ステンレスパイプの上下に設けた電極 (Fig.4 中の ch1 及び ch2) は直接水に接しない状態で、他の電極は注水による流水が接する状況で実験を行った。

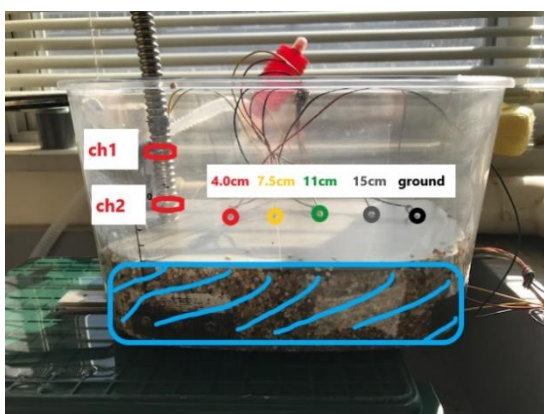


Fig.4 Analog experiment apparatus

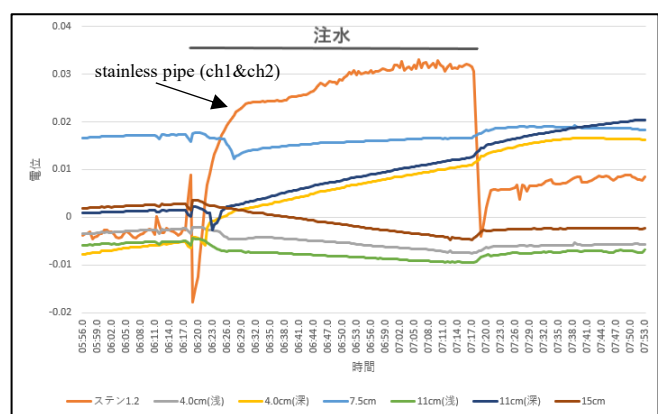


Fig.5 Self-potential variations associated with water injection from a stainless pipe (ref.Fig.4)

実験結果を Fig.5 に示す。この実験においても、ステンレスパイプは電氣的に正側に変動し、他の電

極は負側に変動することが確認できた。また、珪砂の量を少なくし注水の停止時に飽和状態に近い状態が作られたために、停止の操作に素早く対応してステンレスパイプの電位も変化している。他の電極も先の実験では不明瞭であった停止に伴う変化が観測されている。この実験では、4.0cm と 11.0cm の位置に表面付近(0.5~1.5cm)とやや深い位置(4.0~5.0cm)での電位を計測するための電極を設置したが、深い位置の電極は注水と同時に正側にドリフトしているが、他の電極と同様に注水と停止に対応した変化も示している。大きなドリフト的变化については、排水のための穴がケースの側面底部及び底部にあるため、表面付近と少し深い位置で水の流動に違いが生じているためと考えられる。

ステンレスパイプを使用した注水実験で、実際に野島注水実験時に観測されている電位変化が再現できた。1800m 注水孔ケーシングパイプを模擬したステンレスパイプそのものの電位は注水操作に同期して電氣的に正側に変動するが、他の表面の電極の変動はステンレスパイプの極近傍が負の電流源として作用していることで説明できる。

### 3-2. ステンレスパイプを使用した吸水実験

珪砂中を水が流動することで流動電位が発生する。水の流動の方向が逆になれば発生する電場は逆になることが期待される。ステンレスパイプの電位変動が、流動電位に関連するものであるかを確認するために注水ではなく吸水実験を実施した。この実験では、ケース内の珪砂全体に水を満たした状態 (Fig.2 の電極配置において水を表面まで満たした状態) を初期状態とし、外部から水の補給がない状態で、ステンレスパイプに手動式の給油ポンプを取り付け、手動にて吸水をおこなった。

吸水実験の結果を Fig.6 に示す。ステンレスパイプの上下の電位は、同一で正側に約 10mV 程度変動した。他の電極における電位については、水の流れが注水とは逆になるので正側に変動することが期待されたが、吸水操作の開始に同期した明瞭な正側への変動は見られなかった。注水と異なり、手動による吸水のため流量としても小さなものであることが主要な原因と考えられる。

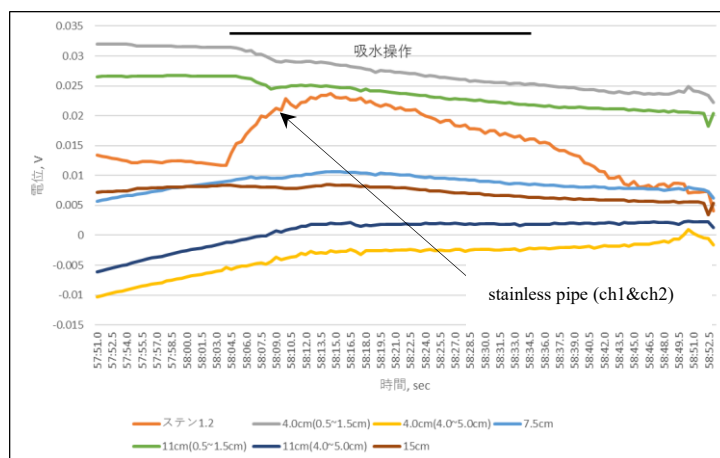


Fig.6 Self-potential variations associated with water absorption using a stainless pipe



ステンレスパイプの電位変動は吸水開始に同期して変化し、注水操作時と同様に正側に変動した。珪砂中の水が流動することにより発生が期待される流動電位とは別のメカニズムによる電位変動と推測できる。

#### 4. まとめ

野島断層注水実験の観測結果及びその結果を検証するためのアナログ実験の結果より、注水のための金属ケーシングパイプそのものは注水操作により電氣的に正側に変動することが確かめられた。一方、注水孔周辺の地表に設置した電極における注水に同期した負側への電位変化はケーシングパイプが負の電流源となっていることを示している。野島断層注水実験時の地表における電位の空間分布は、ケーシングパイプ全体が負の線電流源とすると観測量をよく説明できる。これらの結果から得られる注水時のケーシングパイプの電氣的状態のイメージを Fig.7 に示す。

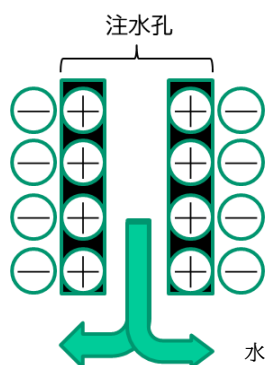


Fig.7 Electrical image of a metallic casing pipe during water injection

アナログ実験の結果では、注水や吸水といった水の流動方向には関係なく金属ケーシングパイプが電氣的に正に帯電した。そのため、この電位変動の原因は、水が動くことに起因しているが流動電位とは異なるメカニズムによるものと考えられる。絶縁体流体（例えば、石油）が金属管中を流れると流動帯電と呼ばれる現象が起きる事が知られており、金属管と絶縁体流体の境界面に電気二重層が発生することで説明されている。しかし、金属管と電気伝導度の高い水(80~100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )では電気二重層が形成されるとは考えにくい。また、水が急激に微粒子化する際に、水滴の表面の負に帯電している部分が微粒子として剥ぎ取られ、残りの大きいな粒子が正に帯電するというレナード効果による

帯電も、微粒子化するような流動ではないので考えにくい。水の流動に伴い発生する現象であることは現象には確認できているが、これら以外のメカニズムを考慮する必要がある。

地震だけでなく地すべりなどの地盤災害においても地下水流動がその発生要因の重要なものと考えられている。地下水流動をモニターする一つの方法として、地下水流動により発生する流動電位を計測することが考えられる。その際に、地下で発生する流動電位を計測するために既存のボーリング孔ケーシングパイプを電極として利用する方法も考えられるが、ボーリング孔と外部に水の出入りがある場合にはその電位変動の解釈には注意を要することが今回の実験結果からわかる。ボーリング孔と外部との水の出入りがある場合には、地電位変動から水の流動方向を推定するには単にケーシングパイプの電位変動を計測するだけでなく、ボーリング孔周辺の地表面における電位観測を同時にすることが望ましい。

## 引用文献

- Ando, M., Geological and geophysical studies of the Nojima Fault from drilling : An outline of the Nojima Fault Zone Probe, *The Island Arc*, 10, 206-214, 2001.
- 伊藤芳朗・楠見晴重・竹内篤雄 編, 斜面調査のための物理探査－地すべり・地下水・岩盤評価－, 吉井書店, 1998.
- Kitagawa, Y., Fujimori, K., and Koizumi, N., Temporal change in permeability of the Nojima fault zone by repeated water injection experiments, *Tectonophysics*, 443, 183-192, 2007.
- Mukai, A., and Fujimori, K., Secular change of permeability in the fracture zone near the Nojima fault estimated using strain changes due to water injection experiments, *Tectonophysics*, 443, 193-199, 2007.
- Murakami, H., Hshimoto, T., Oshiman, N., Yamaguchi, S., Honkura, Y., and Sumitomo, N., Electrokinetic phenomena associated with a water injection experiment at Nojima Fault on Awaji Island, Japan, *The Island Arc*, 10, 244-251, 2001.
- Murakami, H., Oshiman, N., Yamaguchi, S., Hashimoto, T., and Yoshimura, R., Time evolution of hydraulic and electrokinetic parameters around the Nojima fault, Japan, estimated by an electrokinetic method, *Tectonophysics*, 443, 200-208, 2007.
- 村上英記・大志万直人・山口 覚・吉村令慧・藤 浩明, 野島注水実験における自然電位変動の問題点, 第 128 回地球電磁気・地球惑星圏学会秋季大会後援予稿集, 2010.