

2013 年度野島注水実験序報

村上英記¹・比嘉哲也²・鈴木健士²・川崎慎吾²・吉村令慧²・後藤忠徳²・
大内悠平³・山口 覚³

1: 高知大学, 2: 京都大学, 3: 大阪市立大学

**Preliminary report of self-potential observation in 2013 water injection experiment at the Nojima
Fault, Japan**

Hideki Murakami¹, Tetsuya Higa², Takeshi Suzuki², Shingo Kawasaki²,
Ryokei Yoshimura², Tada-nori Goto², Yuhei Ouchi³, Satoru Yamaguchi³

1: Kochi University, 2: Kyoto University, 3: Osaka City University

Abstract

This report presents the preliminary results of self-potential variations during the 2013 water injection experiment (15 September – 29 September, 2013) at 1800m depth in the Nojima fault, which is a surface earthquake fault of the 1995 Hyougoken-nanbu earthquake (Mw6.9). Water was injected into the fault system through the open hole part of the borehole (1800m depth). Self-potential variations around the 1800m borehole were very smaller than those in the previous water injection experiments (1997, 2000, 2003, 2004, 2006, and 2008) at 540m depth and did not appear clearly to synchronize with the operation of the water injection. If the line source model to explain the self-potential variations associated with the water injection is correct, the small self-potential variations observed this experiment may suggest that the permeability of the fault fracture zone at 1800m depth is still larger than that around the fault at 540m depth.

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震 (Mw6.9) の地表地震断層である野島断層では, 地下 1800m で断層破砕帯に達しているボーリング孔を使い 1997 年より数年おきに繰り返し注水実験が実施されている。この注水実験の目的は, 一度活動した断層面の固着過程 (断層の回復過程) を注水実験により監視することである。一度活動した断層が次の地震に備えて歪を蓄積するためには固着する必要があるが, この固着過程を水の通り易さの経年変化としてとらえようとしている (Ando, 2001)。注水実験はこれまでに, 1997 年, 2000 年, 2003 年, 2004 年, 2006 年, 2009 年と実施されており, 注水に伴う湧水量の変化, 歪の変化, 自然電位の変化や微小地震の変化などが報告されている (Kitagawa et al., 2007; Mukai and Fujimori, 2007; Murakami et al., 2007; 西上ほか, 2002)。

2000 年の注水実験以降に設置された孔内温度計により, これまでの注水実験では深さ 1800m の断層破砕帯への注水ではなく深さ 540m 付近のケーシング・パイプの継ぎ手部分からの漏水であったことがわかっている (Yamano and Goto, 2005)。すなわち断層破砕部への直接的な注水ではなく, 断層近傍の岩盤の水理特性の監視になっていた。そのため, 2013 年の注水実験では深さ 540m の継ぎ手からの漏水に対する工事をおこない深さ 1800m からの注水を目指した注水実験が実施された。

本報告では、2013年度の注水実験時に注水孔周辺で実施した自然電位の連続観測の結果について報告する。

2. 注水実験概要と自然電位測定

野島断層には3つのボーリング孔がある (Fig.1) ; 1) 1800m 孔 : 深さ 1800m で断層破碎帯を貫いており孔内に地震計が設置されており先端部には注水用のジェット・パフォーレーション (水を流出させる穿孔) がある, 2) 800m 孔 : 孔底で歪・傾斜・地下水 (湧水量)・地震を計測している, 3) 500m 孔 : 深さ 390m で断層を貫通し電流を流すための電極が設置されている裸孔。

注水実験は、1800m 孔を使い 2013 年 9 月 15 日から 9 月 29 日まで実施された。孔口での注水圧力は約 5MPa, 流量 20-24L/min. で実験期間中の総注水量は 44kL であった。注水圧力や流量については従来の注水実験と同程度である。2013 年度の注水実験の主目的は深さ 1800m からの断層破碎帯への直接注水であったが、540m 付近の漏水対策工事の際に孔内温度計のケーブルを切断してしまっただめに、注水に伴う温度変化から流水位置を特定できていない。

自然電位の観測は、注水実験期間を含む 2013 年 9 月 7 日から 10 月 22 日の間に 1800m 孔と 500m 孔周辺で実施した。1800m 孔周辺では従来の観測と同様に注水孔の近くに A 測線 (電極間隔 10m で 7 箇所) と注水孔から西に 30m ほど離れた B 測線 (電極間隔 10m で 9 箇所) を設け共通グラウンドとなる電極を注水孔から南に約 120m の位置に設置した。また、同時に 1800m 孔と 800m 孔のケーシング・パイプを電極として電位測定もおこなった。今回初めて 500m 孔周辺でも E 測線 (電極間隔 10m で 9 箇所) を設け自然電位の観測を実施した。また、500m 孔内に設置されている深さの 4 箇所 (500m, 440m, 380m, 320m) の電極と地表のケーシング・パイプを電極とした電位も観測をおこなった。1800m, 800m, 500m 孔を電極とした以外は銅-硫酸銅電極を電極として使用し、A, B 測線の電位は 1 秒間隔で E 測線は 1 分間隔でデータロガーに収録した。

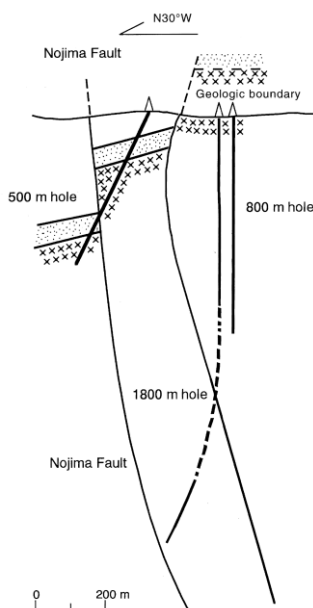


Fig.1 Cross-section perpendicular to the Nojima fault for the three boreholes (from Ando, 2001)

3. 測定結果

自然電位の測定結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3(a), (b) に 1800m 注水孔に近い A 測線と 800m 孔に近い B 測線, Fig. 3(c), (d) に 500m 孔に近い測線 E と 500m 孔内の各電極の自然電位変動を示す。各測線はほぼ南北方向に延びておりそれぞれの測線の電極番号は北側から A1, B1, そして E1 からはじまる。注水期間中の注水の開始と停止に同期した顕著な電位変動はどの測線にも見られない。注水開始の 2013 年 9 月 15 日に各測線に共通に変動が見られるが、生データで見ると注水開始時刻である 13 時以前から始まっている。この時間帯に地磁気擾乱がなかったことは確認済みである。

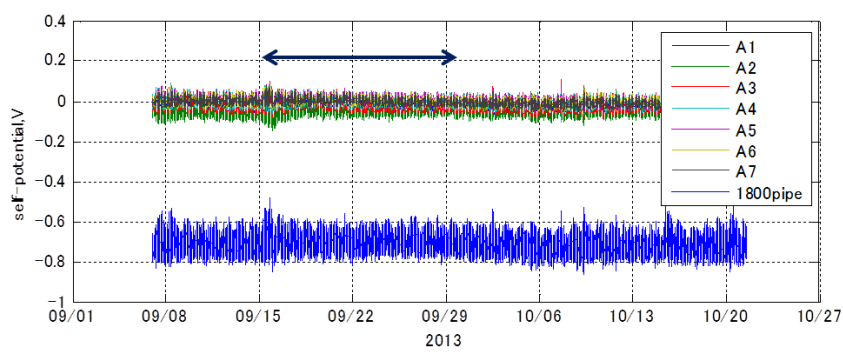
漏洩電流によるノイズが大きいため、平滑化処理をした結果を Fig. 4 に示す。まだ日変化が見られるが、振幅は小さいが長期的な変動も見えるようになった。しかし、注水の開始と停止に同期した明瞭な変動はやはり見られない。注水開始の 9 月 15 日に A, B 測線そして E 測線に共通して変動が見られるものの注水停止の 9 月 29 日まで継続しているようには見えない。

4. 考察と課題

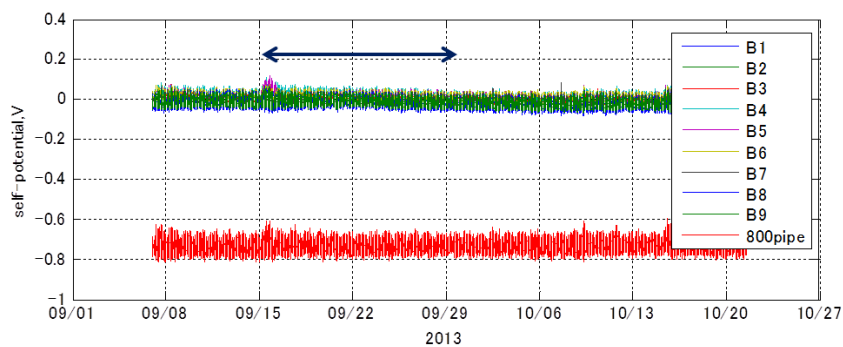
1997 年からの繰り返し注水実験において観測した自然電位変動には 3 つの特報があった ; 1) 注水の操作 (開始と停止) に同期して自然電位が変動する, 2) その変動の振幅は注水孔からの距離が大きくなると小さくなる, 3) 自然電位の極性は注水孔周辺が負になるように変動する。このような注水実験時の自然電位特性は、流動電位として解釈が可能であることを示してきた (Murakami et al., 2001)。また、同じような注水圧力・流量での注水実験において、自然電位の変動の大きさが大きくなっていったことから、深さ 540m 付近の岩盤の水力係数 (透水率等) の大きさが年々小さくなっているという推定をおこなった (Murakami et al., 2007)。この推定は、800m 孔の歪 (Mukai and Fujimori, 2007) や湧水量 (Kitagawa et al., 2007) から透水係数の経年変化に関する推定とも一致している。

しかし、今回の注水実験では注水に同期した明瞭な電位変動は見られない。従来と同じように深さ 540m 付近からの流出であれば、従来の注水実験と同程度の注水圧力・流量での注水実験であるので漏洩電流のノイズレベルよりも大きな自然電位変動が期待されるので、540m 付近からの流出ではないことが推定できる。すでに述べたように今回の注水実験では事前に 540m 付近からの漏水対策を施して実験をおこなっているため、この対策が有効であったことが自然電位の変動からもわかる。

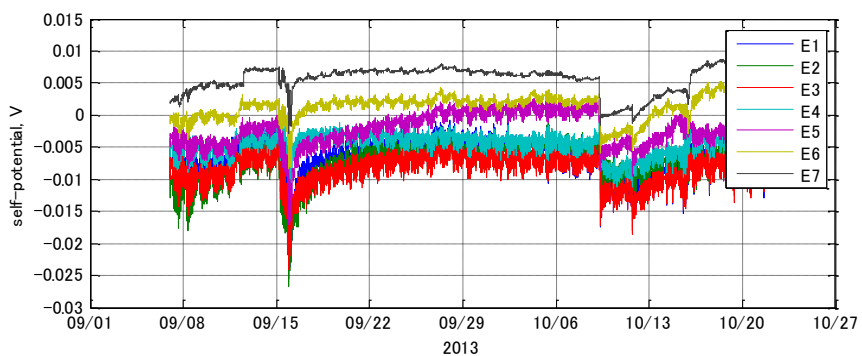
すでに述べたように、今回の実験では漏水対策の工事の途中で孔内温度計のケーブルを切断してしまったために、直接的に 1800m 注水孔のどこから水が流出しているかを示すデータはない。1800m 孔先端部の穿孔からなのか、その途中のケーシング・パイプの継ぎ手からなのかは現状では不明であるが、従来の注水に伴う自然電位変動を解釈してきた 1800m 注水孔のケーシング・パイプが電流電極の役目をするというモデル (Murakami et al., 2001) が正しいとすると、流出の深さのいかに関わらず注水により発生した流動電位が地表で観測できる。仮に注水の操作に同期した自然電位変動が起きておりその振幅が小さいとすると、注水した水が流出している深さの岩盤の水力係数が深さ 540m 付近のそれよりも大きいため発生する電位が小さくなっている可能性がある。これまでの注水でも、1997 年の注水では生データのレベルでは注水に同期した電位変



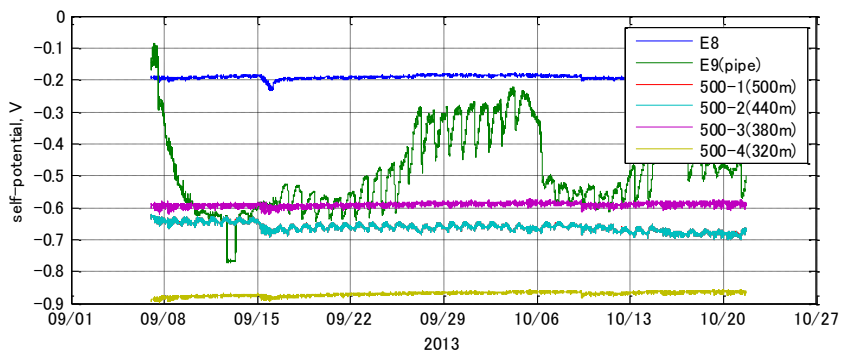
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig.2 Self-potential variations around 1800m (a), 800m (b), and 500m borehole (c and d)

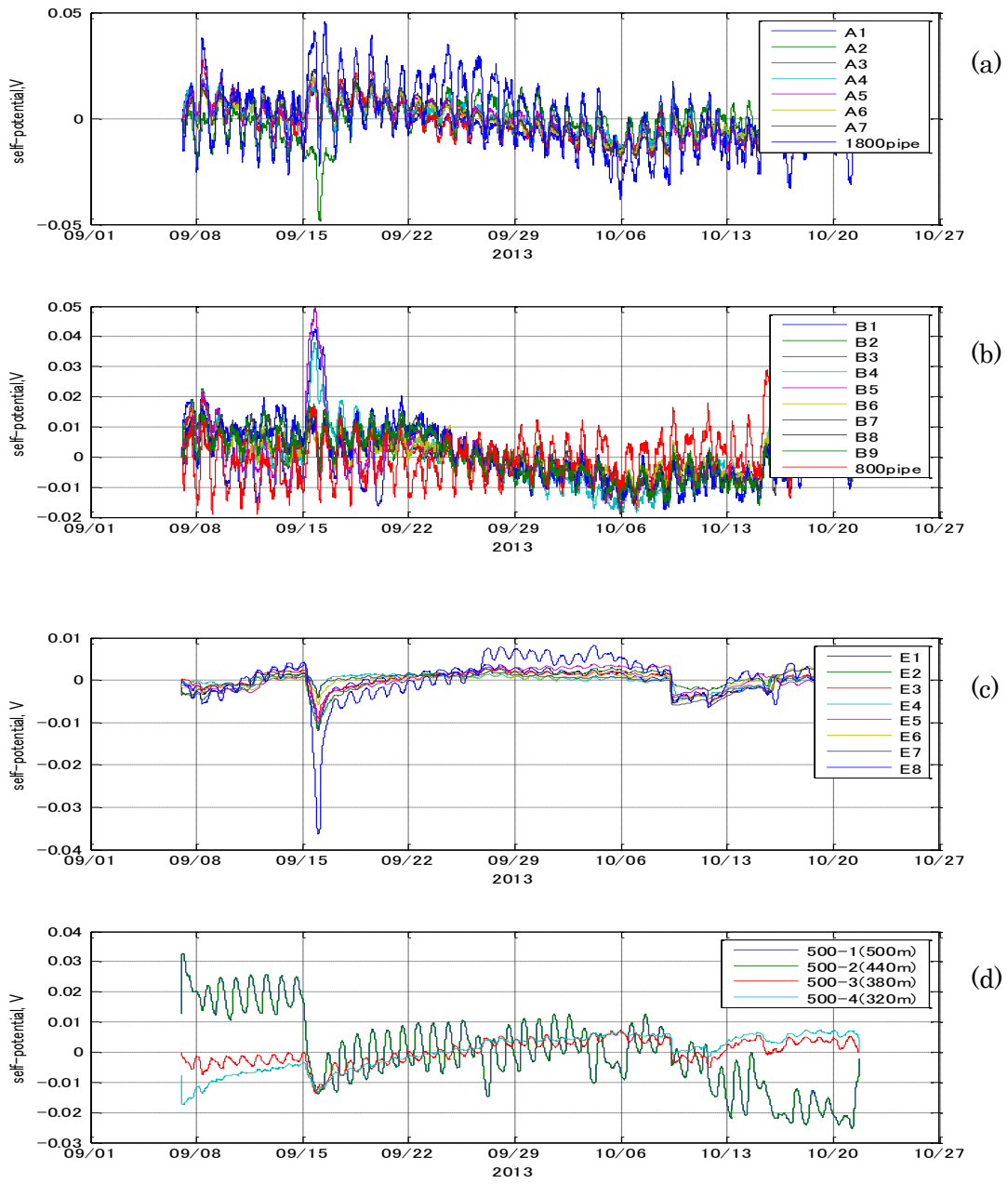


Fig.4 Smoothed self-potential variations around 1800m (a), 800m (b), and 500m borehole (c and d)

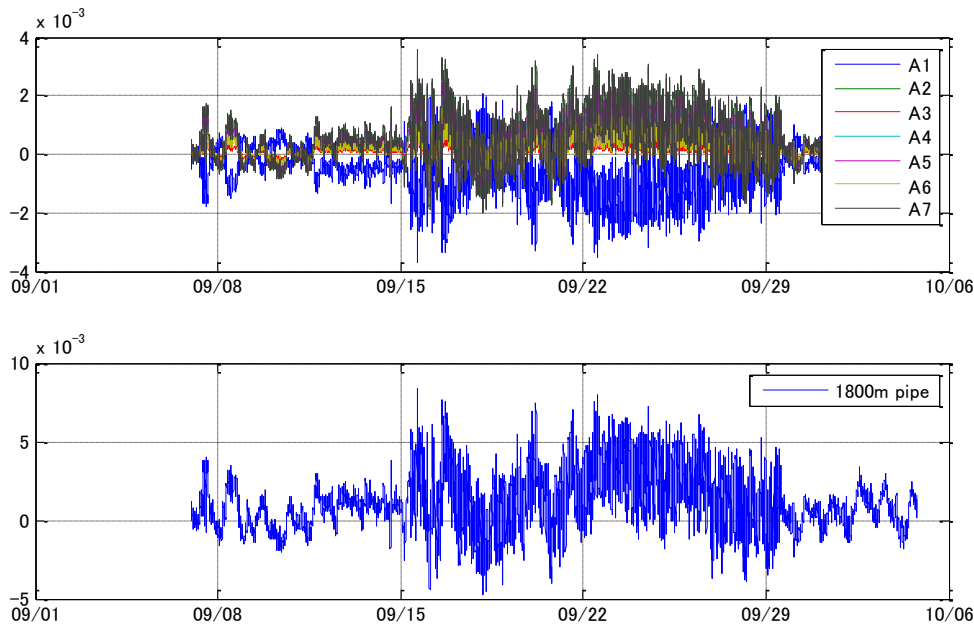


Fig.5 Self-potential variations synchronized with water injection operations obtained using independent component analysis

動が極めて小さく注水の操作に同期した自然電位変動は明瞭ではなかった。リモート点の電位変動を参照したノイズ処理 (Murakami et al., 2001) を施したり、独立成分分析による解析 (村上・山口, 2007) により注水操作に同期した変動を見つけることができた。2000 年以降の注水実験では生データで注水に同期した自然電位変動が確認されるようになり、地下の水理係数が経年的に小さくなっていることを示唆していた。

独立成分分析をおこない注水操作に同期しているという視点で選び出した自然電位の変動成分を Fig. 4 に示す。注水期間は 2013 年 9 月 15 日 13 時から 9 月 29 日 13 時までであるが、この自然電位変動の期間はおよそ 9 月 15 日 8 時から 9 月 29 日 13 時までと変動開始時刻が早い。注水のための作業開始時間が 8 時なので注水とは別に作業に伴う電気的なノイズが重合しているものと考えられる。また、短周期変動とは別に長周期の変動が見られる。しかし、極性を含めて注水操作に単純に対応した変動ではない。これまでの観測例でも、注水期間中に自然電位の変化が振動的になった事例もあったので、一様に水が流動しているのではないことを示しているのかもしれない。また、注水停止に同期して長周期の変動もおさまっているように見えるが、これは注水の流出深度の水理係数がまだ大きいことを示唆しているのかもしれない。近年の注水実験では停止後に自然電位変動が元のレベルに回復するまでの時間が長くなっており、その様子からも水理係数が小さくなっていることと調和的であった。

以上、2013 年度の注水実験に伴う自然電位変動について簡単な考察を含めて報告してきたが、まだ注水による自然電位変動があるのかどうかを含めて S/N 比を改善する必要がある。また、1800m 孔を電流電極とするモデルではケーシング・パイプを理想的な導体として扱っているが今回の注水実験ではそのような扱いが妥当なのか、さらに 1800m 孔のケーシング・パイプを電極と

した時の電位変動やA測線の南側（観測施設の近く）の電位変動が2004年あたりから逆センスに変動するようになったことなどを含めてモデルの再検討が今後の課題である。

参考文献

- 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.
- Kitagawa,Y., K.Fujimori and N.Koizumi, Temporal change in permeability of the Nojima fault zone by repeated water injection experiments, *Tectonophysics*, 443, 183-192, 2007.
- Mukai,A. and K.Fujimori, Secular change of permeability in fracture zone nearby the Nojima fault estimated using strain changes due to water injection experiments, *Tectonophysics*, 443, 193-199,2007.
- Murakami,H., T.Hashimoto, N.Oshiman, S.Yamaguchi, Y.Honkura and N.Sumitomo, Electrokinetic phenomena associated with a water injection experiment at the Nojima fault on Awaji Island,Japan, *The Island Arc*, 10, 244-251, 2001.
- 村上英記・山口 覚, 独立成分分析によるノイズの大きな地電位データからの微小信号の抽出, *情報地質*, 18, 29-37, 2007.
- Murakami,H., N.Oshiman, S.Yamaguchi, T.Hashimoto, and R.Yoshimura, Time evolution of hydraulic and electrokinetic parameters around the Nojima fault, Japan, estimated by an electrokinetic method, *Tectonophysics*, 443,200-208, 2007.
- 西上欽也・田所敬一・永井悟・水野高志・加納靖之・平松良浩, 注水に伴う誘発地震の発生特性-野島断層注水実験を中心として-, *地学雑誌*, 111, 268-276, 2002.
- Yamano,M. and S.Goto, Long-term monitoring of the temperature profile in a deep borehole: temperature variations associated with water injection experiments and natural groundwater discharge, *Phys.Earth Planet.Inter.*, 152, 326-334, 2005.