

野島断層注水実験に伴う自然電位変動の再解析

村上英記

高知大学教育研究部自然科学系

Re-analysis of self-potential variations associated with Nojima water injection experiments

Hideki Murakami

Research and Education Faculty, Kochi University

Abstract

The water injection experiments have been repeated at Nojima fault since 1997 to study the properties and healing processes of the fault. The Nojima fault is the surface fault rupture of the Hyogoken-Nanbu Earthquake (Mw6.9) of 1995. The following three characters of self-potential variations were observed in common with the repeated water injection experiments during 1997 to 2003 : 1) self-potential variations appeared to correspond to the operation of water injections, 2) these variations were observed at all the observation sites around the water injection borehole, 3) the negative voltage appeared around the water injection borehole. Observed self-potential variations are explained with an electrokinetic effect due to the subsurface fluid flow of the injected water. However, after 2004 water injection experiments the positive voltage appeared on the far side from the borehole. The local positive voltage is not explained by the electrokinetic model. In this paper, we report a new model, which consists of a line source model and a dipole source model, to explain the observations and its problems.

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震(Mw6.9, Mj7.3)の際に淡路島北部にある野島断層ではずれが地表に現れた。この地表地震断層である野島断層の破砕帯を深さ 1800mで貫通するボーリング孔を使い繰り返し注水実験が 1997年より 2000年, 2003年, 2004年, 2006年, 2009年, そして 2013年と数年おきに実施されている。この注水実験の目的は、一度活動した断層が次に活動を起こすまでの固着過程を水の透水状態の変化としてとらえることである (Ando et al., 2001)。そのために、注水時の微小地震活動、アクロスによる地震波速度変化、注水孔近傍の 800m 孔中に設置された歪計や湧水量、地表における自然電位の測定が行われている (Kitagawa et al., 2007; Mukai et al., 2007; Murakami et al., 2007)。

当初の注水実験の計画では、深さ 1800m に設けられ注水孔先端部のストレーナーから断層破砕帯

への注水をおこなう予定であったが、1997年度から2009年度までの注水実験では深さ540mのケーシング・パイプの継ぎ手部分からの流出であったことが、1800m孔中に設置された温度計の変化から推定されている。2013年の注水実験では、従来の深さ540mからの漏水対策を施し深さ1800mの断層破碎帯への注水を実施した。ただし、孔内温度計の記録がないため実際に深さ1800mから破碎帯への注水であったかは確認できていない。

1997年度から2009年までの注水実験では深さ540mのケーシング・パイプの継ぎ手部分からの流出であり (Yamano and Goto, 2005), 断層破碎帯そのものへの注水ではなかったが、断層破碎帯の近傍領域の深さ540m付近の透水係数が地震後数年で減少して一定値になっていることが明らかになった。これは、地震動により断層周辺部の透水係数が大きくなった状態から、地震後数年で減少しほぼ一定値になっていることを示している。2013年には、深さ540mからの漏水対策を施し注水実験が行われたが、孔内温度計による水の流出箇所の特定はおこなわれていない。

本論文では、2004年以降の観測で観測された1997年から2003年までの注水実験に同期した自然電位変動とは異なる自然電位変動に焦点を当てて解析を試みた。

2. 注水実験に伴う自然電位変動

2-1 注水に伴う流動電位の作る自然電位変動

1800m注水孔の周辺に設置した電極を用いて注水時の自然電位変動の観測をおこなうと、注水に関連すると考えられる自然電位変動が観測される (Murakami et al., 2001, 2007)。1997年から2003年までの観測では、次の3つの特徴を持つ自然電位変動が観測されている：1) 注水の開始・停止に同期して変動する、2) 注水孔周辺 (少なくとも電球を配置した範囲) が電気的に負に変動する、3) 変動の大きさは注水孔からの距離が離れるにつれて小さくなる。Fig.1に2003年の注水実験時の自然電位変動を示す。注水に同期して自然電位が負側に変動していることがわかる。Fig.2に1800m注水孔からの距離に対して変動の大きさをプロットした図を示す。バラツキはあるが距離が遠くなると変動の大きさが小さくなっていることがわかる。

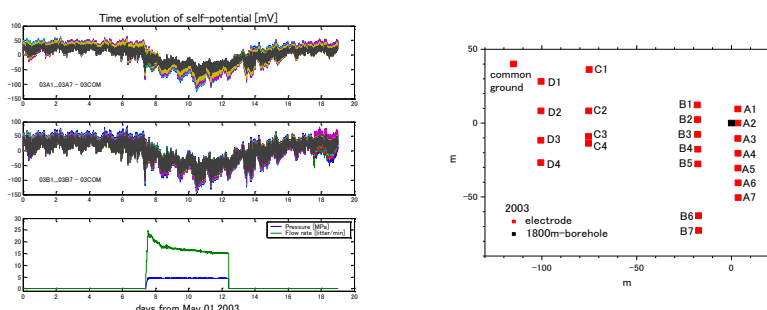


Fig.1 Location of the 1800m borehole and electrodes used during the 2003 water injection experiments (right) and self-potential variations at site A1-A7 and B1-B7 and pressure and flow rate of the injection water (left).

注水操作に同期して変動する自然電位は、地下の岩石中を水が流動することにより生じる流動電位を観測しているものと考えられる。また、注水孔は伝導性の金属パイプであるため地下水の流出箇所が発生する流動電位をパイプ全体に伝える役目を果たしている。いわば、ケーシング・パイプを有限長の電流電極と考えて、この電流電極が地表に作る電位を観測しているとするモデル (Line Source Model:LSM) により注水実験に伴う自然電位変動を説明することが可能である。Fig.2 中の直線は LSM モデルから期待される電位変動である。

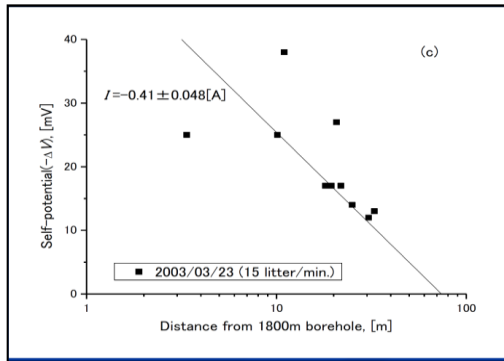


Fig.2 Semilogarithmic plot of distance vs. self-potential changes. Solid line is LSM.

2-2 Line Source Model では説明できない自然電位変動

2004 年までの注水実験、すなわち 1997 年、2000 年、2003 年の注水実験では注水に伴い共通する自然電位の変動が観測された。しかし、2004 年以降の注水実験では、これまでと異なる変動が観測されるようになった。2004 年以降、注水孔に最も近い測線 A において注水孔から 30m の範囲では従来通り注水操作に同期した自然電位の負の変動が見られたが、注水孔から離れた 30m から 50m の範囲の電極の変動極性が逆 (すなわち電氣的に正) に変動し、正の変動の大きさは 50m の地点が大きくなるというものである。Fig.3 に 2004 年の注水実験時における測線 A の各サイトにおける自然電位変動を示す。注水孔に近い A1 から A4 では注水に同期した負側への変動が見られるがそれ以遠では逆に正側に変動していることがわかる。B 測線では逆の変動は観測されていない。

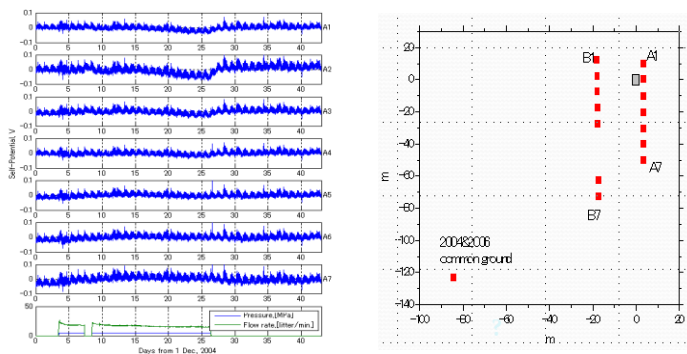


Fig. 3 Location of the 1800m borehole and electrodes used during the 2004 water injection experiments (right) and self-potential variations at site A1-A7 and pressure and flow rate of the injection water(left).

Fig.4 に 2004 年の観測データについて、観測時の基準点ではなく A7 を規準とした場合の自然電位変動と変化量の空間分布を示す。A7 を電位の基準点とした場合には、従来の電位変動の 3 つの特徴が見られるが、遠方の電位が LSM で期待されるよりも大きくなるのがわかる。

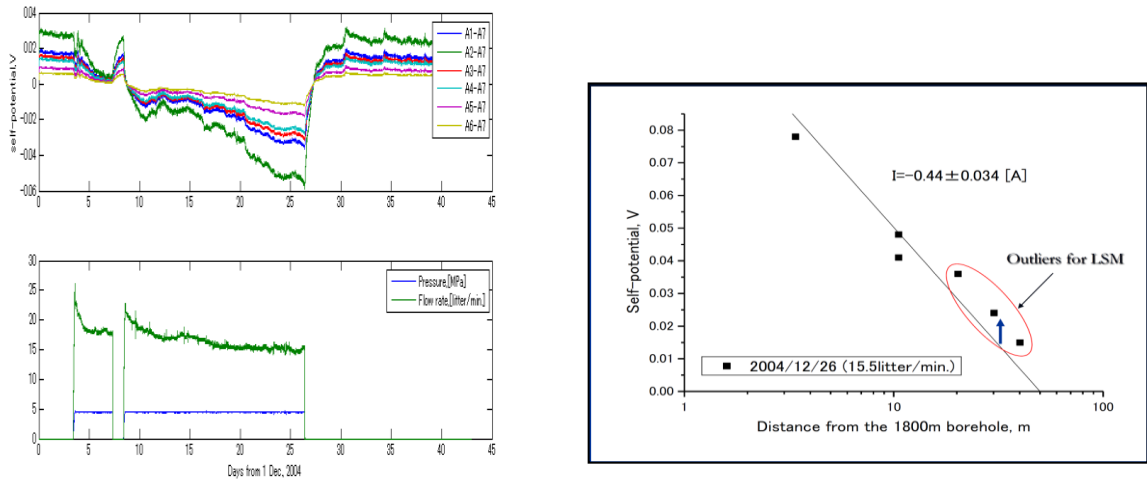


Fig.4 Self-potential variations at site A1-A6 to the A7 electrode during the 2004 experiment (Left) and semilogarithmic plot of distance vs. self-potential changes. Solid line is LSM.

2004 年以降の変動は、従来の LSM で説明するのは難しい。2004 年と 2006 年のデータに対して A7 を基準点としたデータに LSM を仮定して当てはめをおこない、流量と電流量の比を求めた結果を Fig.5 に示す。流量と電流量の比は、水理係数と界面動電パラメータの比を表しており、界面動電パラメータに変化がないとすれば、水理係数の変化を表すことになる。1997 年から 2004 年までは減少しているが、2006 年は増加している。2004 年も LSM では期待されない正側への変動があり検討の余地が残されている。

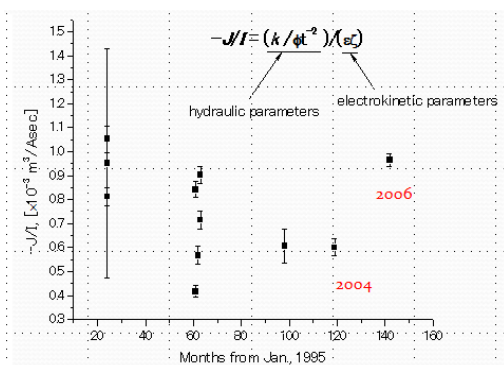


Fig.5 Time evolution of the ratio of hydraulic parameter to electrokinetic parameters.

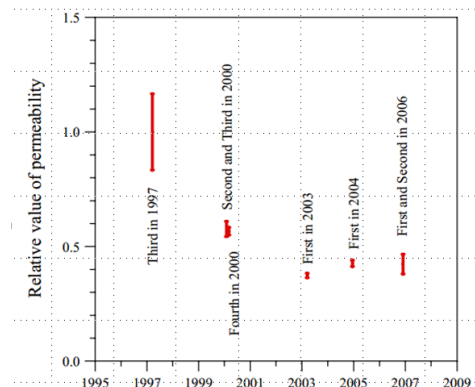


Fig.6 The temporal change in permeability estimated by the water injection experiments.(Kitagawa et al.,2007)

Kitagawa et al.(2007)による 800m 孔の湧水量から求めた透水係数の推定結果を Fig.6 に示す。こちらのデータでは 2006 年については 2004 年の実験とは変わらず透水係数が地震後の時間経過とともに小さくなり 2003 年以降はほぼ一定値になっていることを示している。

注水実験時の自然電位変動から地下の水力係数の変動を適切に推定するためには、ローカルではあるが正側に変動するという現象について考慮する必要がある。

3. 考察

従来のモデルでは、注水に伴い地下で発生する流動電位を良導体である注水孔が地表まで伝達するというメカニズムを、1800m 注水孔を線電流源と見なしたモデル (LSM) で表現した。実際には、地表での電位分布に LSM を当てはめ総電流量を推定し、注水流量との比から地下の透水に関わるパラメータを推定した(Murakami et al.,2001,2007)。このモデルでは注水孔から離れた距離の電位変動は負で変動量は小さくしなければならないが、2004 年度の実験以降に観測されている正側への変動は LSM では説明できない。また、注水孔から少し離れた B 測線では正側への変動は観測されていない。きわめて限定的な変動と考えられる。

LSM では、流れて行く水とともに移動する正の電荷は無限遠方 (少なくとも観測範囲外) としている。これが有限の距離にあり観測範囲内にある場合について考えてみる。水の流動は等方的として扱っているので、注水孔から有限の距離 (50m) に正の電荷が分布する場合 (環状モデル:CSM) について、LSM と CSM の重ね合わせで地表にて観測される電位分布を Fig.7 に示す。

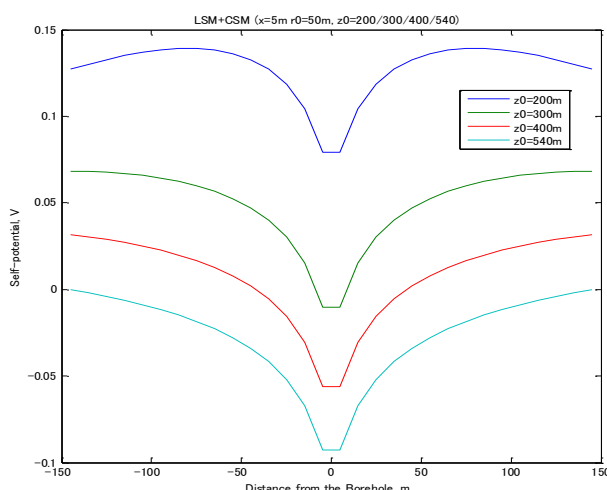


Fig.7 Self-potential variations (LSM+CSM)

注水の流出深度である 540m の深さで注水孔から 50m の距離に正の電荷が分布する場合には、観測されている 30m から 50m の範囲が正側に変動する結果が得られない。観測されている変動では、注水孔から 120m から 150m 地点を電位の基準点としているので、観測されたような電位分布を説明

できるのは深さ 200m 程度に正の電荷を配置した場合であることがわかる。この場合には、深さ 540 mから流出した水が深さ 200m くらいまで上昇している場合に相とする。しかし、距離 50mの電極を規準にしたときの Fig.4 に示したような距離 20m 以遠での変動の大きさが LSM から期待される大きさよりも大きくなることはない。また、測線 B において正側への変動が観測されていないので、正の電荷が注水孔からある距離に一様に分布するとするこのモデルはやはり考えにくい。

次に、測線 A の距離 50m 付近のみの変動として、正の電荷を配置した場合について考える。ここでは便宜的に注水孔から 50m の A 測線の電極 A7 の深さ 5m に正の電流限 ($1.8 \times 10^{-3} \text{A}$) を置いた場合 (Point Source Model: PSM) の電位分布を Fig.8 に示す。LSM としては、 -0.44A の電流を仮定している。LSM と PSM を重ね合わせることで、注水孔からの距離 120m 付近を電位の基準点とした場合に、注水孔からの距離 30m から 50m にかけて電位が正側に変動する様子が再現できる。しかし、距離に対する変動の大きさに見られる特性は再現できない。そもそも、電荷のバランスが取れておらず、注水孔から 50m の地下浅部に電荷を持ち込むメカニズムも不明である。

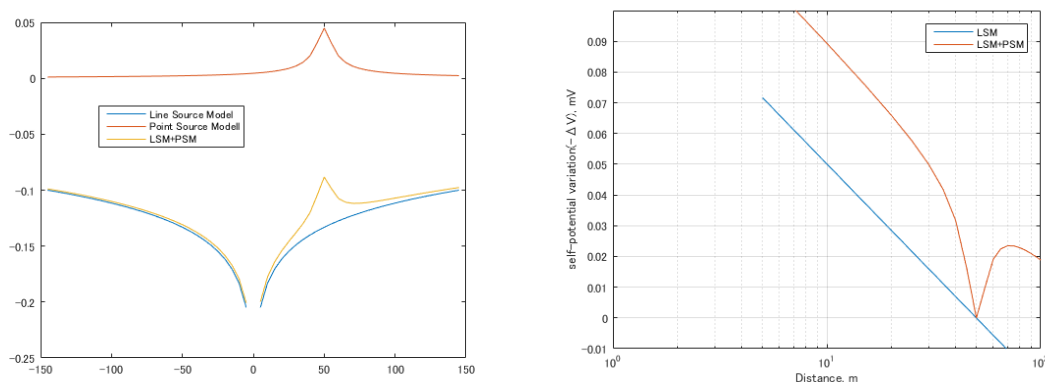


Fig.9 Self-potential variation produced by LSM and PSM (left) and semilogarithmic plot of distance vs. self-potential changes(right).

Fig.4 に示した距離に対する変動の大きさの振る舞いに着目すると、距離 50m の A7 を規準とした場合の電位変動では距離 20m から 40m の範囲での電位変動は LSM で期待されるよりも負側に大きく変動しなければならない。A7 における変動が正側で最も大きいので、A7 を規準にすると必ず負側の変動になるが正の電荷が作る電場 (PSM) と LSM を重ね合わせただけでは説明できない。距離 20m から 40m の範囲で負側への変動を大きくするには負の電流源が必要になる。そこで正の電流源と負の電流源を組み合わせたダイポール・モデル (DSM) の作る電場と LSM の電場を加えた電場の計算例と距離に対する変動の大きさを Fig.10 に示す。距離に対する変動の大きさは観測されているものに近くなったが、注水孔からの距離 120m 付近を基準点とした場合に注水孔からの距離 30m から 50m で変動の極性が正側になることは説明できていない。

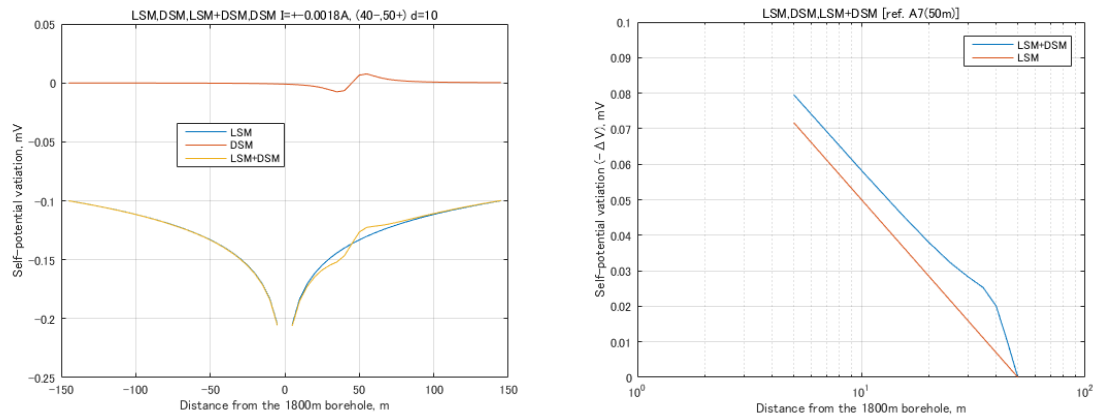


Fig.10 Self-potential variation produced by LSM and DSM(left) and semilogarithmic plot of distance vs. self-potential changes(right).

現状では、表層付近の比抵抗構造は均一として計算しているが、A7 サイト近傍は盛り土であるので比抵抗構造の違いもフィッティングを向上させるためには考慮する必要がある。注水に同期してこのような変動が現れるメカニズムについては現状では不明である。

A 測線の注水孔からの距離 30m から 50mにおける自然電位変動が、注水の操作に同期しているが変動の極性が正側であるという観測は、2004 年以降継続している。少なくとも 2004 年以前と以後で地表の比抵抗構造を変えるような人為的な操作はおこなわれていない。2004 年以前と以後で測定上の変更点は、自然電位の測定基準となる電極を北西側に設置したか南西側に設置したかである。本論文では詳細は述べないが、漏洩電流の極性の変化が観測されているが、これについてはこの基準電極の位置と漏洩電流の流れる方向の関係で説明可能であった。しかし、注水に同期した変動については、A7 サイトを規準として処理した場合にも違いが見られるため、何らかの地下の変化を表しているものと考えられる。

限定的ではあるが正側に変動する自然電位変化を説明するためのモデル化を試みたが、観測値の変化を十分に説明できるモデル構築には至っていない。地下の水理係数の変化を評価するには観測されている自然電位の変化を説明するモデルの構築が必須である。表層の比抵抗構造の不均質性も含めた検討が今後の課題となる。

謝辞 本研究の観測は、『地震予知のための新たな観測研究計画』の研究課題「断層の回復過程の研究 - 野島断層および周辺活断層の深部構造の研究-」(京都大学), 『地震予知のための新たな観測研究計画 (第 2 次)』の研究課題「断層における注水実験および応力状態の時間変化」(京都大学)において実施された注水実験の際に行った。観測にあたり協力をいただきました西上欣也教授(京都

大学), 大志万直人教授 (京都大学), 山口 覚教授 (大阪市大), 吉村令慧准教授 (京都大学) をはじめとする関係者の皆様に感謝いたします。

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.
- 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.
- 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.
- 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.