

野島注水実験時の電磁気観測

村上英記（高知大学理学部）・橋本武志（京都大学理学部）・大志万直人・
住友則彦（京都大学防災研）・山口 覚（神戸大学）・本蔵義守（東工大）

Electromagnetic observations in the water injection experiment at Nojima fault

H.Murakami¹⁾, T.Hashimoto²⁾, N.Oshiman³⁾, N.Sumitomo³⁾, S.Yamaguchi⁴⁾, Y.Honkura⁵⁾

1)Faculty of Science, Kochi University, 2)Faculty of Science, Kyoto University,

3)Disaster Prevention Reserch Institute, Kyoto University, 4)Faculty of Science, Kobe University

5)Faculty of Science, Tokyo Institute of Technology

1. はじめに

野島断層解剖計画の一環として1800mボーリング孔への注水試験が1997年2月9日から13日にかけて実施された。この注水試験の目的は、注水を定期的に行い地震発生後の断層の固着過程や応力状態の時間変化を調査することにある。ボーリング孔への注水に伴い、微小地震の発生や周辺の地下水位変化などが考えられる。電磁気学的には、注水孔からの水の浸透により流動電位の発生が期待される¹⁾。

本研究は、注水試験に伴い観測される電場や磁場の変化に着目して水の流動や断層周辺の大地の物理的な状態を探ろうとするものである。本論文では特に注水試験時に観測された地電位変化とそれから推定される地下の断層近傍の状態について述べる。

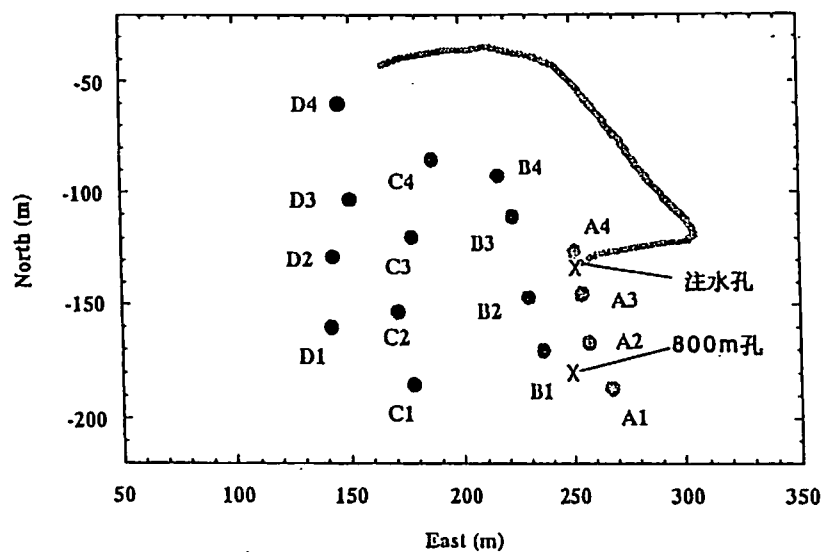
2. 観測方法

1997年2月9日から2月13日にかけて実施された野島断層注水実験の期間中に、1800m注水孔ならびに800m孔・500m孔そして野島断層の周辺の約40個所において地電位の計測を、また4個所において地磁気の連続観測をおこなった。その際の1800m注水孔周辺の電極配置を第1図に示す。この領域から西に400mの地点に電位の基準点を設けた。すなわち得られた電位は、この地点に対する電位差である。また、観測されるノイズの除去をおこなうために注水孔から南西に600mの地点で電場と磁場の観測をおこなった。各地点での電場・磁場データは1秒サンプリングで計測をおこなった。

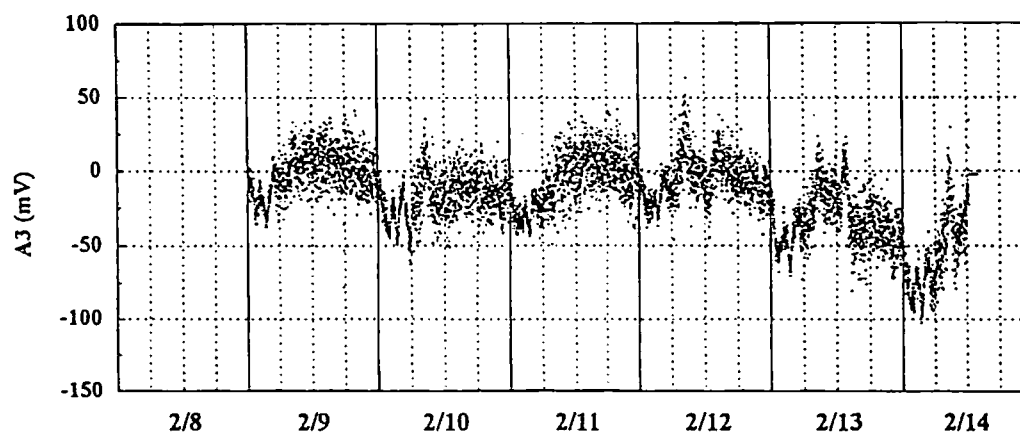
地電位の観測には自作の硫酸銅電極を使用し、磁場計測にはフラックスゲート型磁力計（テラテクニカ製U36）を使用した。

3. 観測結果

磁場データについては解析中のため、本論文では1800m注水孔周辺の電場変化についてのみ紹介する。第2図に1800m注水孔に近いA3地点において観測された地電位変化を示す。この記録に見られるように、観測された電位変化には明瞭な日変化と非常に短周期のノイズが見られる。この短周期ノイズは人工的なもの（例えば電車からの漏洩電流）と考えられる。これらのノイズを除去するために、以下のような操作を各地点において得られたデータについておこなった。



第1図. 1800m注水孔周辺の電極配置



第2図. A3地点における地電位変化（生データ）

1) 人工ノイズ（短周期）の除去

リファレンス点の電場との差を取ることで短周期ノイズを除去する。

2) 日変化の除去

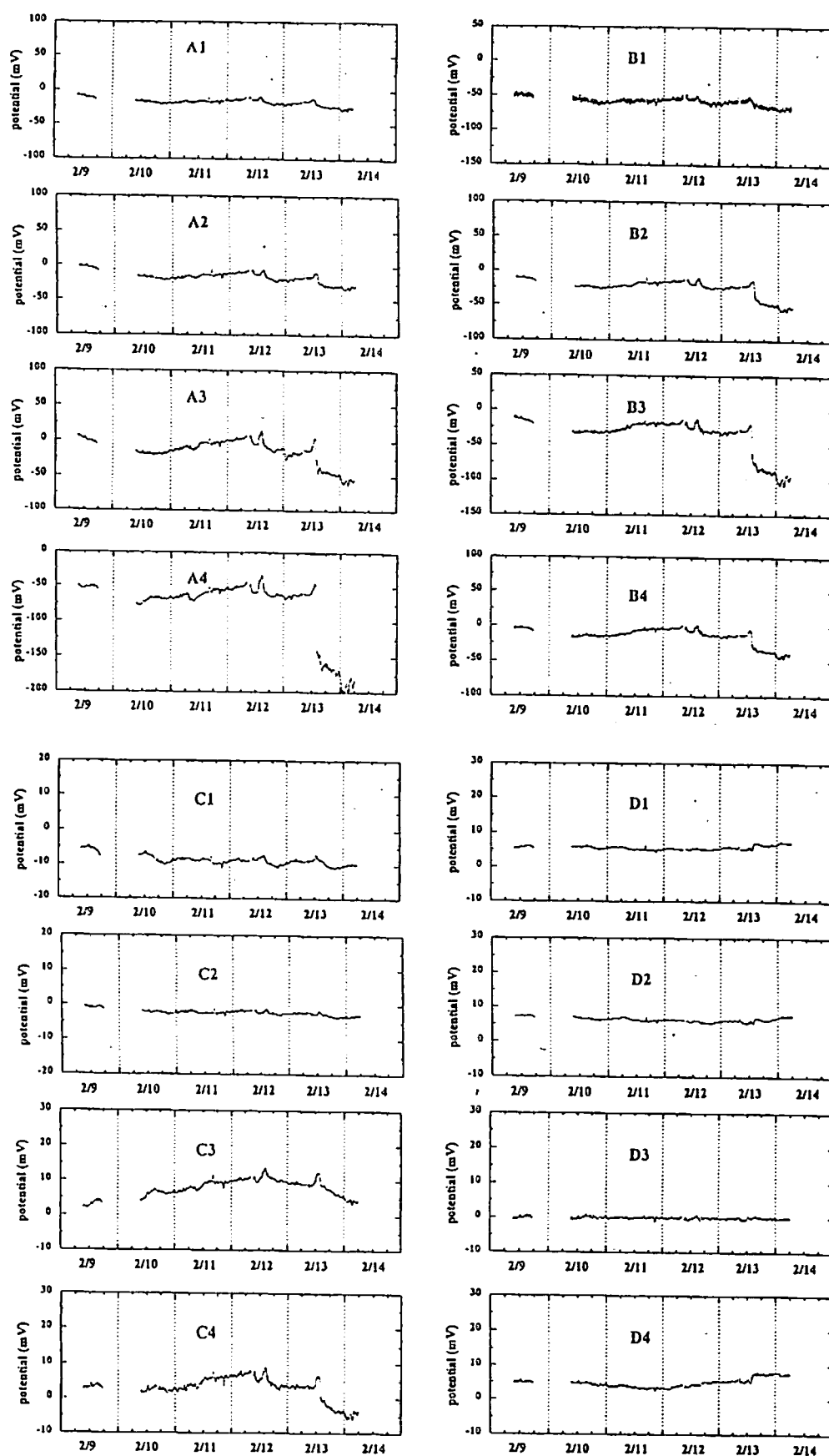
D3地点の時系列データを平滑化して求めたデータを差し引くことで日変化を除去する。

3) 平滑化

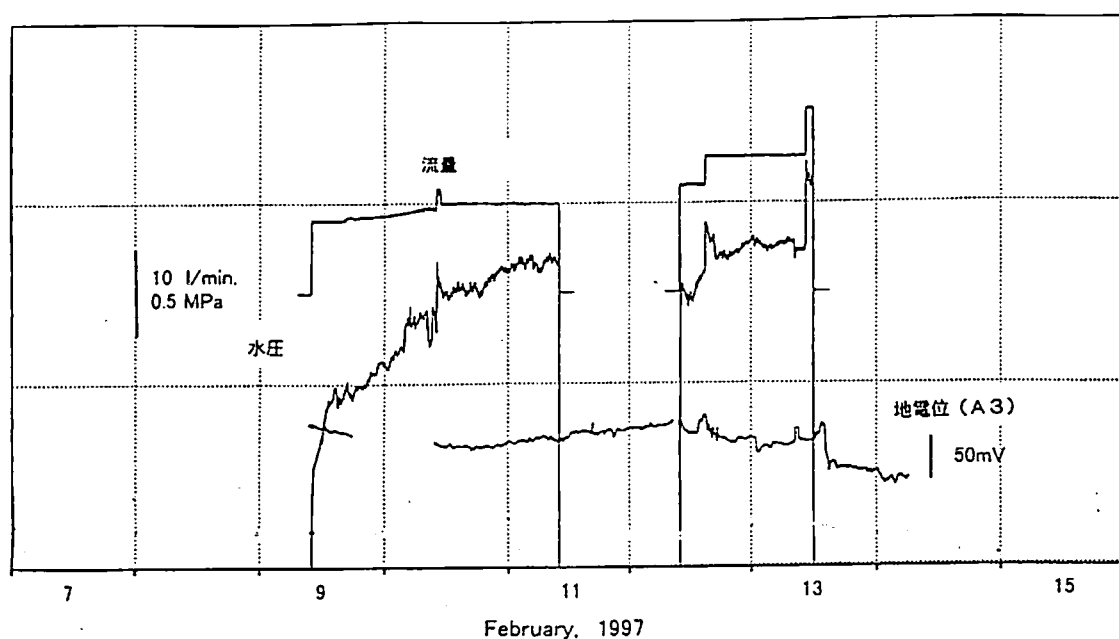
さらに10秒の移動平均を施して平滑化をする。

以上の操作をおこない得られた注水孔周辺の各地点における電位変化を第3図に示す。

第3図より、(1)注水孔に近い点ほど地電位変化が大きく、(2)地電位変化の大きな領域は注水孔から



第3図. 1800m孔周辺の地電位変化 (ノイズ除去後)



第4図. 注水量・水圧と地電位変化

北西方向に伸びていることがわかる。

第4図に1800m注水孔における注水量・水圧の変化とA3における地電位変化を示す。注水実験は前半（2月9日から11日）と後半（2月12日から13日）に分けて実施されたが、前半の注水試験では顕著な地電位変化が観測されていない。後半では、単純な対応ではないが水圧の変化に対応した地電位変化が観測された。また、注水試験が終了して約1時間後の13日13時くらいからステップ上の大きな地電位変化が観測されている。この変化は、注水孔周辺だけでなく500m孔や地表断層付近でも振幅は非常に小さいものの観測されている。しかし、この時のD1地点からD4地点までの変化のセンスは他の地点の変化センスとは逆になっている。

4. 考察

地下水の流動に伴い岩石・水系の界面動電効果により電場や磁場が発生することが知られている^{1),2),3)}。この界面動電現象を数式で表すと次のようになる。

$$I = -\phi \sigma \text{grad } E + (\phi \varepsilon \zeta / \eta) \text{grad } P \quad (1)$$

$$J = (\phi \varepsilon \zeta / \eta) \text{grad } E - (k / \eta) \text{grad } P \quad (2)$$

ここで、 I は地電流、 J は地下水の流量フラックス、 E は地電位、 P は地下水の圧力、 σ は電気伝導度、 k は透水率、 η は粘性率、 ζ はゼータ電位、 ε は水の誘電率、 ϕ は地下の空隙率である。(1)式の右辺第1項はオームの法則を表しており、(2)式の右辺第2項は水の流動を表すダルシー則を表している。(1)式の右辺第2項と(2)式右辺第1項が界面動電効果を表している。(1)式より明らかなように電圧をかけなくても圧力勾配が地下に生じて地下水の流動がおこれば電流が地下に流れることになる。しかし、圧力勾配 $\text{grad } P$ が急激に変化したり媒質の異方性や不均質がない場合には、電流 I をさまたげるように地下に電圧 E が発生し定常状態では $I=0$ となる。このような状態では(1)式は次のようになる。

$$\text{grad } E = (\epsilon \zeta / \sigma \eta) \text{grad } P \quad (3)$$

と電位が負の場合には、地下水が流動してゆく方向が電位的には正になるように電場が発生する。と電位の符号は多くの環境要素により決まるが、多くの場合負の値をとることが知られている²⁾。

それで、今回観測された注水試験に関連する地電位変化が水の流動による界面動電効果であるならば、注水孔周辺の電位が下降するような変化が期待される。第4図に示した水圧と地電位の関係を見ると注水試験前半(2月9日から11日)では特に地電位の変化は見られないが、後半(2月12日から13日)の注水試験の始まる部分で圧力上昇に同期して地電位が下がっていることがわかる。また注水をしている期間をとおして地電位が下がっていることもわかる。また、この変化は1800m注水孔周辺の全ての地点で観測されており、変化のセンスも同じであることが第3図からわかる。これらのことから、観測された地電位変化は注水に伴う界面動電効果と考えられる。しかしながら水圧と電圧の変化は単純な一対一対応にはなっていない。それは電位勾配は圧力値ではなく圧力勾配に比例するからである。2度目の注水試験の最初の部分を見ると圧力上昇に伴い電位は降下するが一旦は元に戻っている。その間、圧力は一度降下してまた上昇するという変化をしている。この間の流量はほぼ一定であるので、最初は注水した水が周辺に流動してゆくので注水孔の圧力が下がるが、そのうち周辺との圧力差が小さくなり実際に流動する量が減るのでまた圧力が上昇してゆくという現象を反映しているものと考えられる。地電位の変化を詳細に解析することで実際の水の動きが解析できる可能性がある。

今回の注水試験では注水実験に使用した1800m孔のケーシング・パイプが地面にたいして絶縁されていないので、このケーシング・パイプが地下で発生した電位を地表に伝える役目を果たしている。つまり、ケーシング・パイプが直線電流電極として作用している。この場合、地表においてケーシング・パイプからの距離がaとbの2地点間の間に生じる電位差は近似的に次式で与えることができる。

$$\Delta V = (I / 2\pi\sigma d) \log(a/b) \quad (4)$$

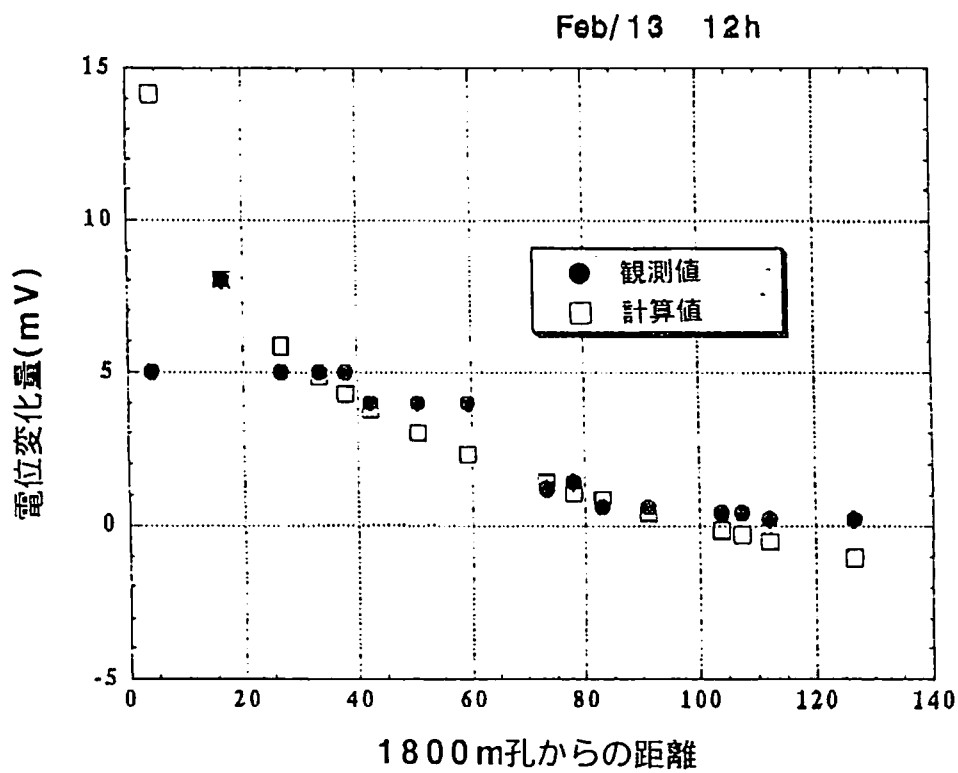
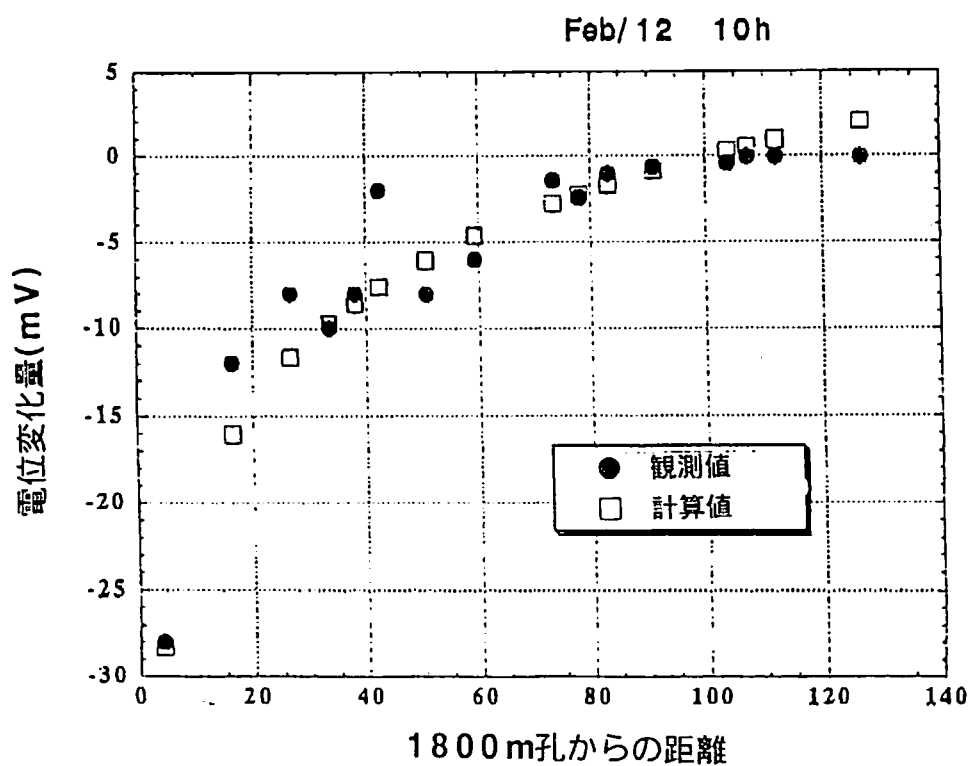
Iは電流、dはケーシング・パイプの長さ、 σ は電気伝導度を表す。ここで、実際のケーシングパイプの長さdとして1800m、 σ として0.001S/mを使い、実際に観測された地電位と比較すると注水開始時(12日)で1A、注水終了時(13日)で0.5A程度の電流が流れたと推定される。第5図に注水孔周辺の各地点の電位変化量(●)を孔からの距離に対してプロットしたものを示す。また中の□印は注水開始時の場合1A、注水終了時の場合0.5Aを仮定して上の式で計算した電位変化量である。上の直線電流電極モデルによる計算値が観測値をよく説明していることがわかる。

次に、上のモデルにより求めた電流値を使って透水率を求めてみる。それには次の関係式を使う。

$$I = -(\phi \epsilon \zeta / k) J \quad (5)$$

この式は水の流動により発生する電流の大きさを表している。(2)式の右辺第1項は第2項に比べて無視できるくらい小さいとして、(1)式と(2)式により求めることができる。空隙率 ϕ を0.1、水の誘電率 ϵ を 7×10^{-10} (F/m)を仮定し、流量Jとして実際の値すなわち注水開始時で12(l/min)、終了時で20(l/min)という値を使うと、 (k/ζ) は注水開始時で 1.4×10^{-14} (m²/V)、終了時で 4.6×10^{-14} (m²/V)となる。ゼータ電位 ζ の値は得られていないので、妥当な範囲の値として-0.1から-0.01Vとすると、透水率は注水開始時で0.14～1.4darcyで、終了時で0.46～4.6darcyと見積もることができる。これらの値は、他の観測から求められている透水率とオーダー的には一致している。

上記のように2度目の注水に伴う電位変化を流動電位と解釈すると、1度目の注水の時になぜ電位変化が検出されなかったかを考える必要がある。例えば、と電位がゼロないしは非常に小さかったというケースが考えられる。しかし、と電位の値を直接求めるということは今回の観測ではおこなっていないので水の分析



第5図. 注水孔からの距離と地電位変化量

●は観測値, □は直線電流電極モデルにより計算された値

値を使って推定をしてみる。ζ電位は同一の岩石・鉱物であっても水のpH値や温度またイオン濃度に依存して大きさや符号が変わることがわかっている²⁾。注水実験時の水に関する分析値ならびに800m孔の水の分析値を第1表に示す（小泉私信）。pH値が6.2で温度が22℃で岩石として石英を想定した場合には、注水に

第1表. 注水に使用した水の分析値		
	1800m孔 1997.2.13採取	800m孔 1997.2.12採取
Na+	21.4 mg/l	129 mg/l
K+	2.88	12.2
Ca ²⁺	34.0	13.2
Mg ²⁺	5.72	0.16
Al ³⁺	0.1 以下	0.54
Cl-	18.0	22.1
SO ₄ ²⁻	21.1	80.5
HCO ₃ ⁻	107	257
小泉尚嗣（地質調査所）による		

使われた水のAl³⁺イオン濃度ではちょうど電位がゼロ付近の値になる²⁾。一方、800m孔の方のAl³⁺のイオン濃度は今回の注水実験に使用した水よりもはるかに高い。この場合には、ζ電位は+25mV程度になる²⁾。水のpH値に関する情報が現在入手できていないので、ここで推定した値がどの程度たしかなものかはわからないが実際に観測された電位変化を説明することはできない。実際に観測された電位変化を説明するためには、ζ電位は負の値を取る必要がある。仮に、pH値等によりζ電位が負の側に25mV程度移動することがあれば、次のように考えることができる。つまり、1800m孔の注水孔近傍には掘削時に使用した水（800m孔の水とほぼ同じ成分）があり、最初の注水ではこの水（ζ電位がほぼゼロ）が押し出される形で流動したので電位としてはほとんど観測されなかったが、2度目の注水ではζ電位が-25mV程度になるような水が流動したので電位の変化が観測された。

5. まとめ

野島断層において実施された注水実験に伴う数十mV程度の電場変化を地表で観測することができた。それは水の流動に伴う流動電位として解釈が可能である。また、その結果から地下の透水係数（0.14～4.6darcy）を推定することを試みたが、求められた結果はオーダー的には他の観測量から推定されているものとも良い一致が得られた。

まだ、未解明な電位変化等の問題は残されているが、今回のような計測方法を使うことで深部の地下水の流動の様子や地下の物理的な状態の推定ができる可能性が確かめられた。今後は、関連する物理量を個別につめてゆき各々の取りうる範囲を狭めて行く必要がある。

参考文献

- 1) Mizutani, H., Ishido, T., Yokokura, T. and Ohnishi, S.: Electrokinetic Phenomena associated with earthquakes, Geophys. Res. Lett., 3, 365-368, 1976.
- 2) 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.
- 3) 村上英記・山田功夫, 水圧破碎に伴う地電位変化, Conductivity Anomaly 研究会論文集1990年, 49-54, 1990.