

坑井を用いた自然電位モニタリング

石戸 経士・西 祐司・當舎利行（産業技術総合研究所・地質調査総合センター）

Self-potential monitoring using boreholes

Tsuneco Ishido, Yuji Nishi and Toshiyuki Tosha (Geological Survey of Japan, AIST)

Abstract. Rainfall is one of the unavoidable noise sources for continuous self-potential measurement. To reduce this noise, we carried out continuous SP measurement by installing non-polarizable electrodes at deeper levels than one meter. Stable records without rainfall effect were obtained with a depth of 2.35 meters at the Okuaizu area, and with a depth of 8 meters at the Ogiri area, where the water table was located ~100 meters deep. At a drilling pad of the Sumikawa geothermal field where the water table was located ~50 meters deep, we installed borehole-type electrodes at depth of 75 meters in a pair of 100-meter deep wells and detected small signals which could not be measured with dipoles of 1-meter-depth electrodes (the records of which were suffered from noise sources nearby).

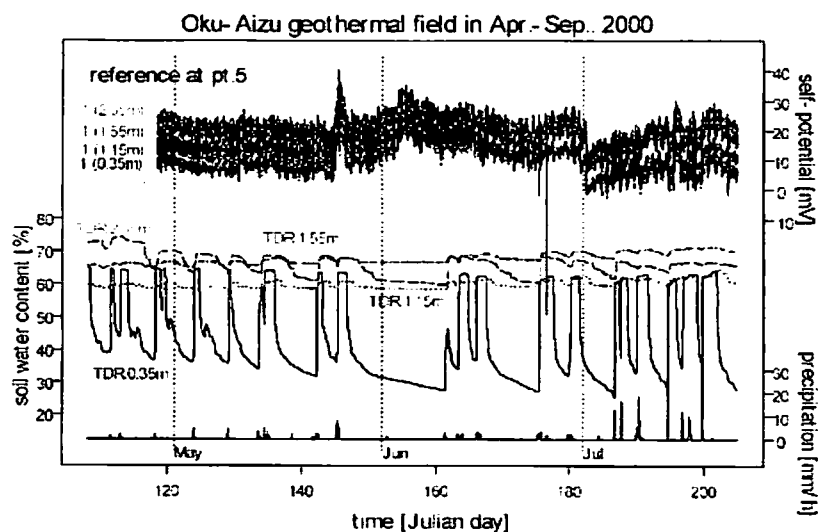
自然電位の連続観測におけるノイズとして降雨による電位変化はかなり大きく、これを軽減するための電極や設置法の工夫が求められる。降雨に伴う電位変動の原因としては、電極近傍の土壌水分・溶存成分濃度・温度の変化、浸透流による流動電位、土壌水分変化による比抵抗変化などがあり、これらが電極設置点ごとに違うために発生すると考えられる。これまでに、降雨の影響を軽減するために坑井を用いた観測を試行したが、その結果を報告する。

1. 土壌水分との並行観測

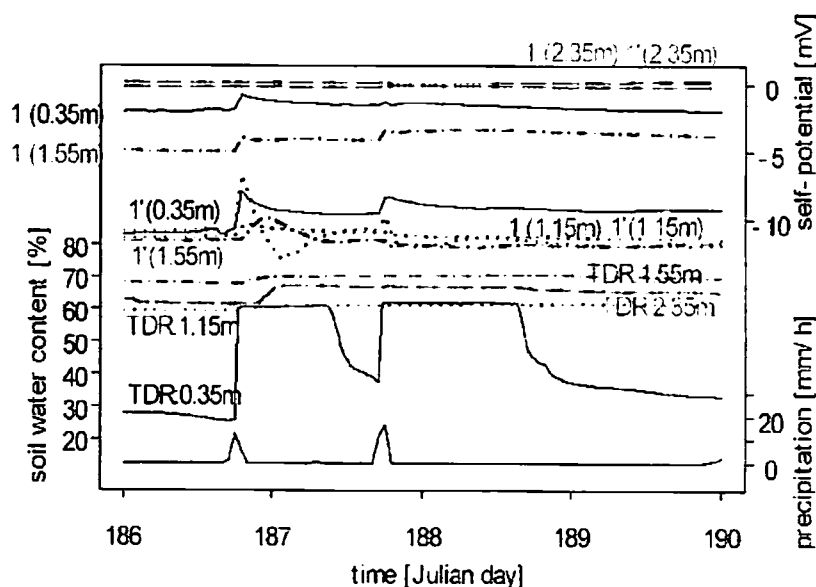
第1図に示すのは、奥会津地熱地域において、土壌水分計深度に対応する0.35, 1.15, 1.55, 2.35 mの4深度に各々2個ずつの電極を設置して、降雨などに伴う土壌水分変化と自然電位変化の対応を測定した結果である（西・石戸，2003）。使用した電極はフェニックス製の非分極性鉛－塩化鉛電極 PE6 型で、塩化カリウム溶液を混ぜた泥と共に埋設し、塩ビ管で雨水の浸入から保護している。この図から明らかなように、土壌水分は深度1m以深では60～70%で降雨による変動は数%～10%程度で比較的安定しているが、深度0.35 mでは乾燥時には30～40%であるが、降雨に伴い60～70%と大きな変動を示す。

第2図では、土壌水分が大きく変化した4日間について、電位基準を最深部2.35mに設置した2つの電極の平均値として示した。降雨の後、深さ0.35 mの土壌水分は急激に上昇し、その後、数時間掛けてより深い深度でも土壌水分の上昇が発生している。各深度の電極には最大数mVの電位変化が生じるが、0.35 mの電位変化が土壌水分の急上昇する時点で発生していること以外は、電位変化と土壌水分変化の間には直接的な対応関係が見られない。各深度での電位変化は電極近

傍の土壌水分変化というよりも、浸透流に伴う流動電位によって発生していると考えられる。また、同一深度の2つの電極の挙動もかなり違うので、局所的な不均一性の影響がかなり強いと考えられる。ただし、2.35 mの2つの電極はその平均値に対し一定値を保っている。これがこの地域全般に当てはまるのであれば、深度 2.35 mに電極を設置すれば、降雨の影響はかなり小さくなることが期待できる。

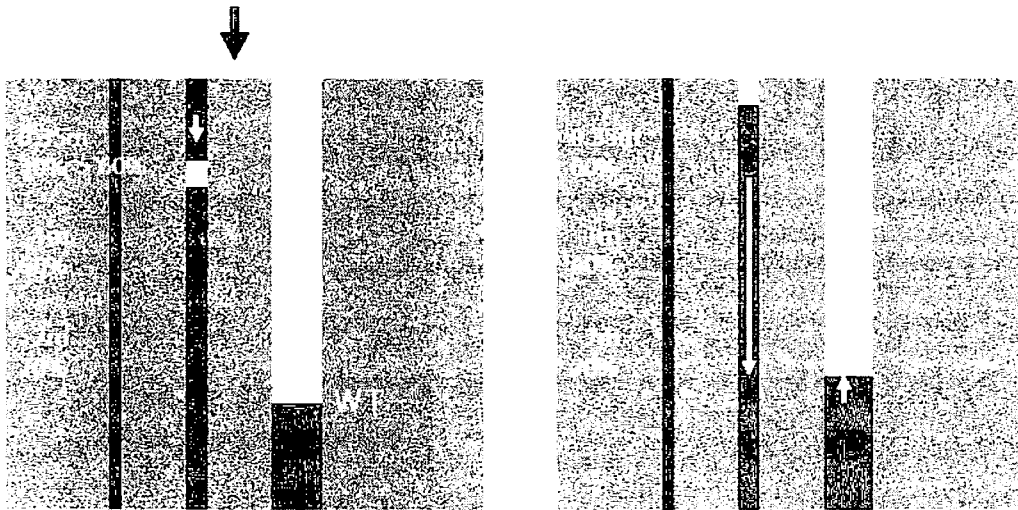


第1図 深度別の自然電位変動（上）と土壌水分変動（中）及び雨量（下）：電位基準=遠方電極。



第2図 深度別の自然電位変動（上）と土壌水分変動（中）及び雨量（下）：電位基準=深度 2.35m の 2 電極の電位平均値。

第3図は、土壌水分の変化を説明するための1つのモデルである。地下水位より上、不飽和帯では、毛管圧の効果により、細い孔隙中は地表近くまで飽和、中くらいの孔隙は中間深度まで飽和していると考えられるが、降雨時には地下への浸透水は中くらいの孔隙中を流下する（浸透量がさらに大きくなると、最も太い孔隙中も水が流下することになる）。中くらいの孔隙中を水がピストン状に流下する際、下端には（ゼータ電位が負であれば）プラス、上端にはマイナスの余剰電荷が発生するが、これが電位変動の原因と考えられる。電極サイズあるいは少し大きめのスケールで下降流が完全に一様であると、電位変化は（流下する水のピストンの）下端より浅い深度でしか発生しないが、実際には浸透の流路にはかなり不均一性があるので、観測されたような電位変化をもたらすものと考えられる。



第3図 降雨に伴う不飽和帯中の天水下降流と土壌水分の変動。(左) 降雨初期、(右) 降雨終了後。

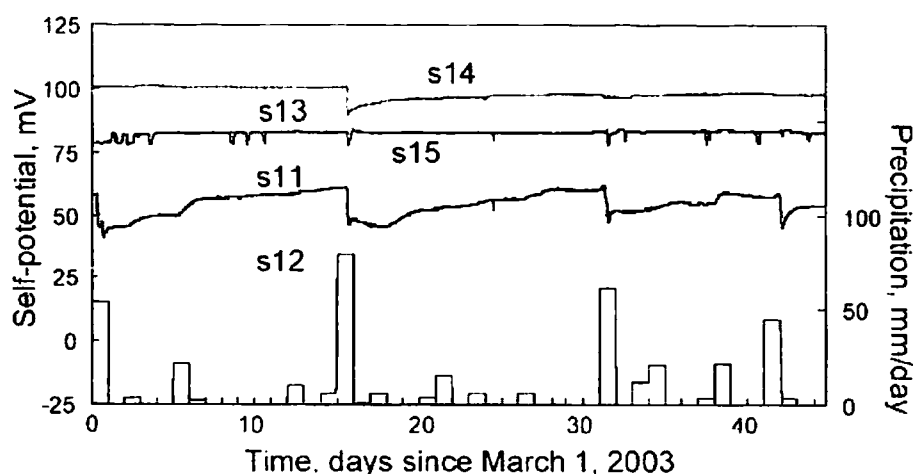
2. 8 m 坑を用いた観測

第4、5図は大霧地熱地域において、数100 m 間隔の5地点にカーノベル製の非分極性銀―塩化銀電極 G01 型を1 m と8 m の深度に設置し、比較観測を行った結果である。設置にあたっては、いずれの深度も、穴の底に飽和塩化カリウム溶液で溶いたベントナイトを20 cm 程度置き、その中に電極先端のセラミック部分を挿入した。図に示すのは、電極を設置して半年以上経過した時点での約1ヶ月半の記録である。

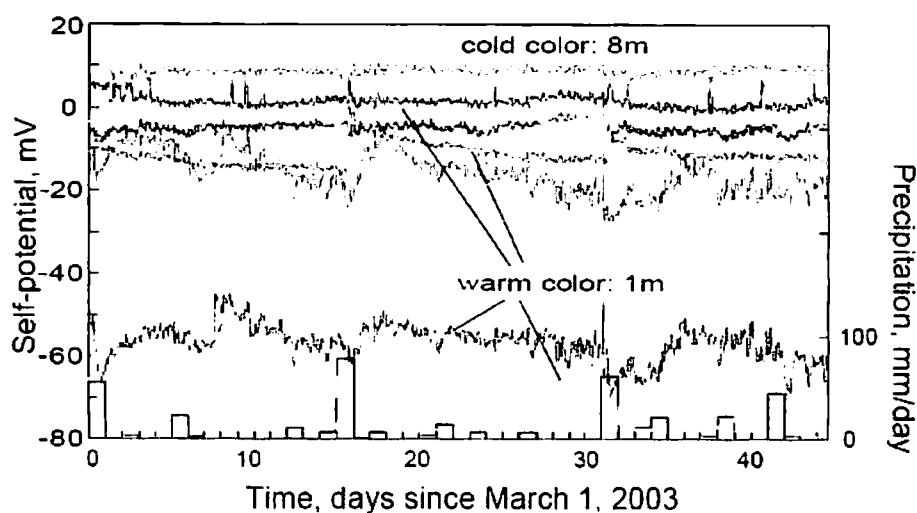
第4図では、各地点の2つの電極間の電位差（8 m 深を基準にした1 m 深の電位）を示している。図から明らかなように、降雨時に1 m 深の電極の電位は（s15を除いて）10-20 mV 低下し、10日程度を掛けてもとのレベルへもどる傾向を示した。これは第6図に示すモデルによって、下降流に伴う流動電位によるものとして説明できる。8 m 深の電極は降雨の影響をあまり受けないと考えられるが、これは第5図の1 m 深どおしと8 m 深どおしの電位差変化の比較からも明らかである。大

霧のように地下水位が深さ 100 m 程度の場合でも、ある程度の深度を確保すれば、降雨に影響されなかなり安定した自然電位観測が可能と考えられる。

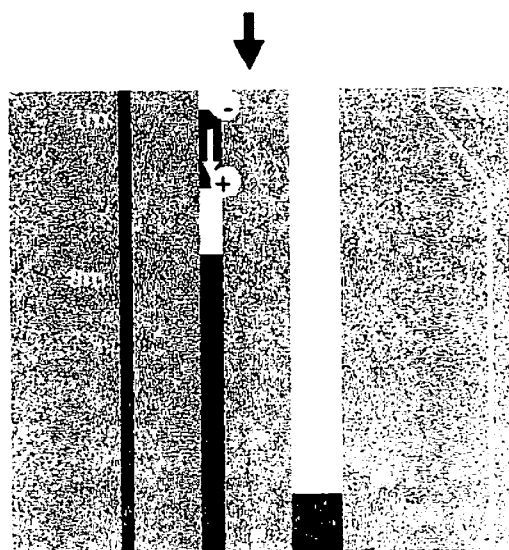
第4図をみると、1 m 深の電極は 8 m 深の電極に比べ、(同じ電極を同じ仕方で設置しているにもかかわらず) 数 10 から 100mV 近く電位が高い。この原因として1つ考えられるのは、(地温勾配の高い地域であるから) 1 m と 8 m における地温の差である。電極電位については Petiau and Dupis(1980), 橋本 (1994) 等に説明があるが、銀-塩化銀電極は塩化銀が難溶性であるので金属第2種単極に分類され、電極電位は、次の反応式についての Nernst の式から与えられる。



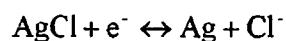
第4図 深度1mと8mに設置した電極間の電位差 (2003年3月から4月)。S11 から S15 の5地点における観測結果。



第5図 5地点間の電位差。深度1m設置の電極間と8m設置の電極間の記録。



第6図 降雨に伴う不飽和帯中の天水下降流と流動電位による垂直方向の電位変化。



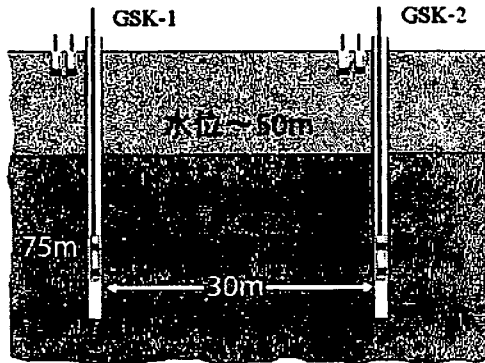
$$E = E^\circ - \frac{RT}{F} \ln[\text{Cl}^-]$$

ここで E° は標準電極電位である。 $E^\circ = 0.2224 \text{ V}$ (25℃), $d E^\circ / d T = -0.658 \text{ mV/deg}$ (沖, 1994) の値を使い, 塩素イオンの濃度を飽和 KCl 濃度とすると, 25℃での電極電位は～190 mV, その温度変化はおおよそ $-7 \text{ mV/10}^\circ\text{C}$ となる。実際の 8 m 深の地温は S12 が一番高く 24°C 程度, 他はほぼ 16°C 程度であるので, 第4図のデータのうち, S12 については3月から4月に掛けての電位差の減少を含め温度効果で説明できるかもしれない。S12 以外については温度効果で説明できる範囲を超えているが, 他の原因, 例えば 1 m と 8 m の間にある土壌の化学的性状の変化などによるものかもしれない。(ちなみに, 大霧地域では同時期に複数の地点でフェニックス製の鉛-塩化鉛電極を用いた測定も行ったが, これらの測定値は銀-塩化銀電極に対し 400 から 500 mV 低い値を示した。この電位差は 25℃での鉛-塩化鉛の電極電位が～ -300 mV であることから説明される。)

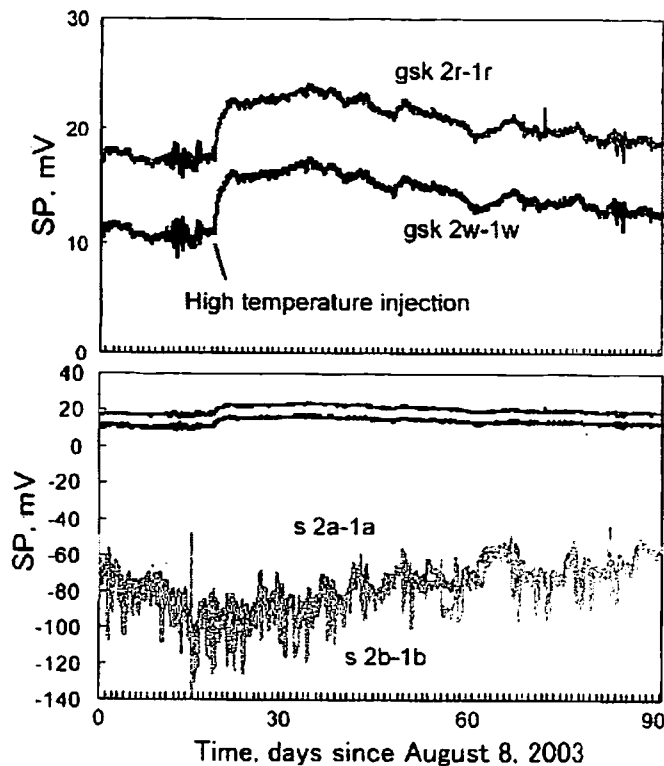
3. 地下水位以深での観測

現在, 産総研では澄川地熱発電所 E 基地内の 100m 級観測坑 GSK-1, 2 を用いて自然電位の連続観測を実施している。第6図に電極の配置を示すが, 2本の井戸の水位より約 25m 下に坑内電位測定用に開発したカーノベル製の電極を設置している (1つのゾンデに銀-塩化銀電極が2つ組み込まれている)。また, 比較観測用にそれぞれの井戸の口元から 2-3m の距離に, 大霧で用いたのと同じカーノベル製の電極 (以下, 地上電極と呼ぶ) を2個ずつ 1 m の深度に設置している。

測定データの一例を第 7 図に示す。2 坑井の口元の地上電極間の電位差は日変化を含め大きく変動しているが、これに比べ坑内電極間の電位差は極めて安定している。上図には、縦軸のスケールを拡大して坑内電極のデータを示すが、20 日目付近に見られる 5 mV ほどの急激な上昇はノイズではなく、観測坑 GSK-2 から約 30 m ほど離れたところにある 1000 m 級還元井のオペレーションに関して発生している。原因については未解明であるが、還元流体の温度を変えたときに同様の変化が繰り返し観測されている。



第 6 図 GSK-1, 2 坑を用いた坑内電位観測。GSK-1, 2 とも 30-100 m 間は裸坑仕上げ。



第 7 図 GSK-1 と 2 の坑内電位の差 (gsk 2r-1r と gsk 2w-1w) と坑口付近の電位の差 (s 2a-1a と s 2b-1b)。(上) 坑内電位差の拡大図。

地上電極の記録は、澄川地域に展開している他の地上電極の記録に比べてもノイジーである。これは付近にある構造物や GSK-1, 2 坑の 0-30 m に設置された鉄製ケーシングパイプに関係するものと思われる。地表付近の酸化環境と地下の還元環境の間を（電子伝導体である）金属が繋いで、その結果、井戸の口元周囲に負電位異常が発生しているが、この負異常が気温変化や降雨によって大きく変動するためと考えている。

4. おわりに

自然電位モニタリングにおいて安定した記録を得るためには、使用する電極とともに、その設置方法が重要である。1 年以上に及ぶ電極の比較テストの結果 (Perrier et al., 1997) からは、対象地域の気候条件に適合した設置方法をとることや、かなりの冗長性をもって余分に電極を設置すること、設置深度は少なくとも 1 m 以上とることなどが提案されている。

今回、報告した観測結果は必ずしもシステムティックに実施したものではないが、設置深度を 2 m 程度にすると降雨の影響が小さくなるケースや、地下水位が 100 m と深い地域でも 8 m 坑を用いた電極設置が効果的であることなどを見出した。また、100 m 級の観測坑を用いた地下水位より深いレベルでの観測では、地表近くではノイズに埋もれて測定できないような信号を捉えることに成功した。

引用文献

橋本武志 (1994) 電極問題についての一考察, CA 研究会 1994 年論文集, 86-97.

西 祐司・石戸経士 (2003) 奥会津地域における H12・13 年度 SP 連続測定, 貯留層変動探査法開発の解析・評価 総括報告書, AIST03-C00018, IR4-4.

沖 猛雄 (1994) 金属電気化学 (増補版), 共立出版.

Perrier, F.E., G. Petiau, G. Clerc, V. Bogorodsky, E. Erkul, L. Jouniaux, D. Lesmes, J. Macnae, J.M. Meunier, H. Toh, M.J. Valiant, K. Vozoff and O. Yazici-Çakin (1997) A one-year systematic study of electrodes for long period measurements of the electric field in geophysical environments, *J. Geomag. Geoelectr.*, **49**, 1677-1696.

Petiau, G. and A. Dupis (1980) Noise, temperature coefficient, and long time stability of electrodes for telluric observations, *Geophys. Prosp.*, **28**, 792-804.