

流動電位の観測 — 滝の上地熱地域における試み —

東京大学理学部 石戸恒雄⁺
水谷仁⁺⁺
地質調査所 馬場健三

現所属先 +地質調査所地殻熱部

++名古屋大学理学部地球科学教室

1. はじめに

地震に先立って地電位の変化することは、ソ連,^{1) 2)} 中国,^{3) 4)} 米国⁵⁾において報告されている。多くの変化は数 mV/km から数百 mV/km であり、地震の数時間から数ヶ月前に始まっている。震源から 150 km 離れた観測点で変化が現われた例もある。この変化の原因としていくつかのメカニズムが考えられているが、水谷ら⁶⁾は震源域での水の流れ（その原因は例えばダイラタンシー・ディフュージョン）に伴う流動電位を提案している。

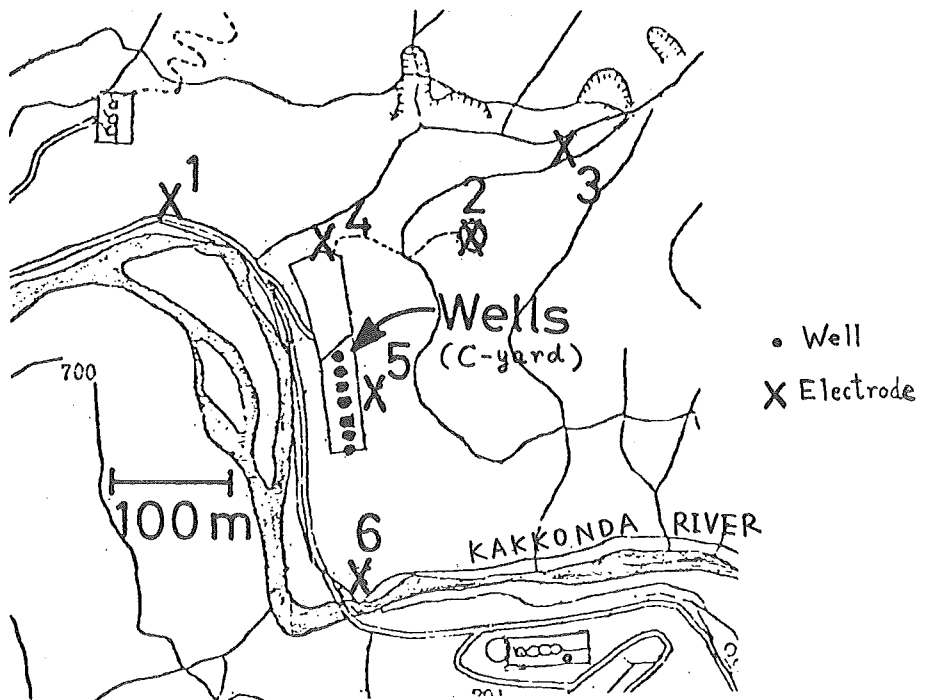
流動電位はまた、いくつかの地熱地域で観測されている正の地電位異常の原因とも考えられている。^{7) 8)}すなわち熱水の上昇運動に伴う流動電位が地表に変化をもたらすと考えられている。

このように地殻岩石中の空隙、クラックを通しての水の流れには流動電位の伴うことが期待されるが、このことは地電位観測が地下での水の流れを推定する有効な手段であること示唆しており、定量的研究が望まれる。

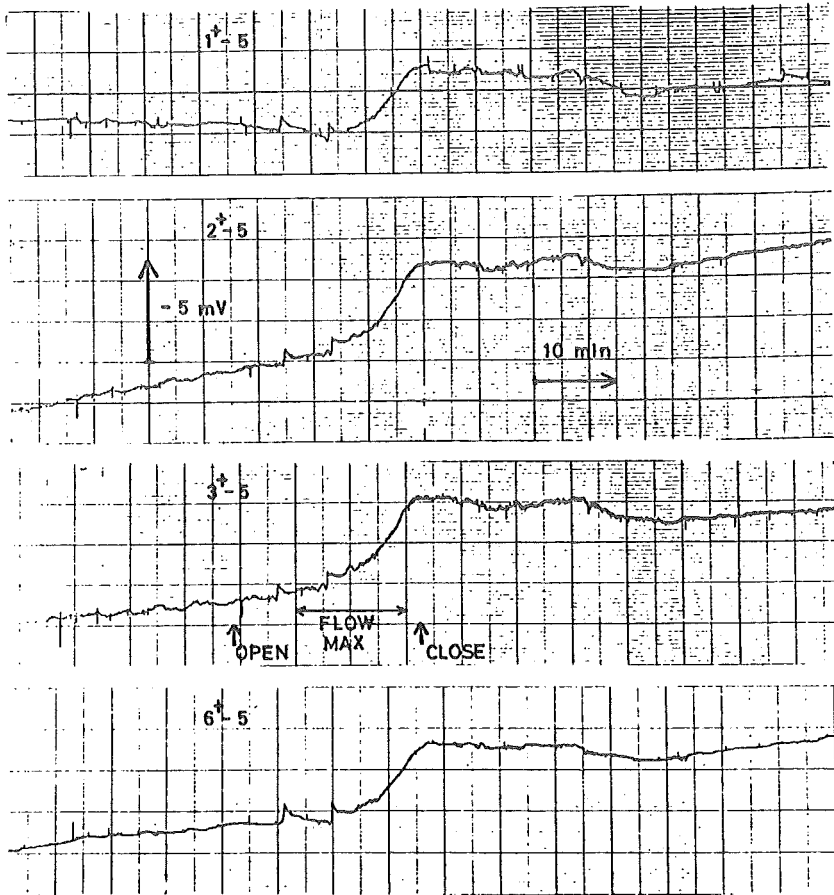
今回、八幡平の地熱地域の1つである滝の上において流動電位の観測を行なったが、ここをフィールドとして選んだのは次のような理由による。第1に、この地域に掘さくされた地熱井を利用して、地下（熱水貯留層）での水の流れを変化させ、それに対応する地電位変化から流動電位の大きさを測定できること。第2に、比抵抗の構造、温度分布、地質構造、熱水の化学成分等について調査がなされているので、測定された流動電位から熱水貯留層におけるゼータ電位（流動電位等の界面動電現象を記述する基本量であり、岩石/水界面に発生している電位差）を推定できること、である。ゼータ電位を観測から求めることは現在まで行われておらず、実験室のデータ⁹⁾と比較するという興味もある。

2. 観 測

図1に示すように銅—硫酸銅電極を6点、地熱井周囲に配置し、1977年8月26日～30日の間、地電位の連続観測を行った。観測期間中に2回、坑口バルブ開放による熱水放出が行われた。1回目のときには、人工的ノイズ(電気溶接)が大きく変化を検出できなかった。2回目の放出は8月28日に行われたが、このときの電極ペア $1^+ - 5$ 、 $2^+ - 5$ 、 $3^+ - 5$ 、 $6^+ - 5$ (+は記録計の正端子に入力された電極を示す)に対する電位の記録は図2に示すとおりである。いずれのペアに対しても坑口バルブ開放後10分ほどから電位が変化しはじめており、変化のセンスはいずれも井戸に最も近い電極5が正になっている。最大変化は約4 mVで、坑口バルブ締切直前に測定されているが、このときの坑底圧変化は開放前に比べ約-3 barと推定されている。⁹⁾ 坑底圧減少によって周囲から井戸への熱水の流入が起こり、それに伴って生じた流動電位が、図2に示す電位変化の原因と考えられる。電位のもとのレベル(ドリフトしている)への回復は、坑底圧の回復に対応している。



第1図 電 極 配 置

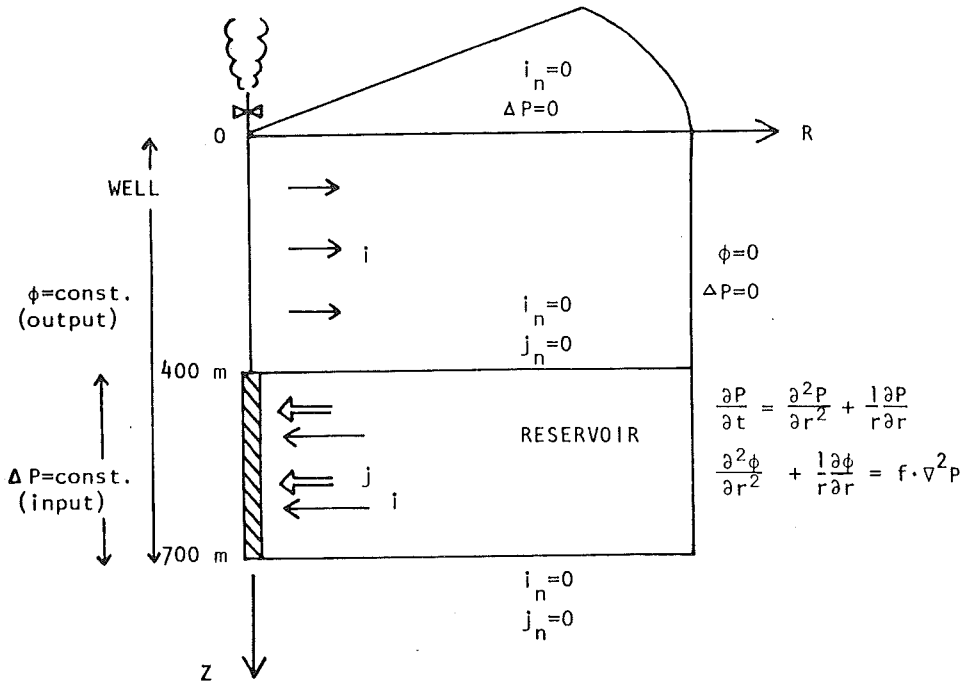


第2図 地電位の記録。OPEN, CLOSEは坑口バルブの開閉時を示す。

3. 熱水貯留層におけるゼータ電位

図2に示した電位変化は、図3に示すモデルによって説明可能である。もし熱水貯留層におけるゼータ電位が負であれば、水の流れたと同じ方向に電流が流れるので、熱水流入に伴って井戸は正に帯電する。井戸全体は等電位と考えられるから（ケーシングパイプでつながっているため）、地表においても井戸を中心に正の電位が現われる。これが図2に示した地電位変化の原因と考えられる。

次に図3のモデルにもとずいて定量的に観測データを見てみよう。まず流動電位等、岩石中での界面動電現象を記述する現象方程式は⁹⁾



第3図 観測データを説明するモデル

$$\vec{j} = \Phi T^{-2} \frac{\epsilon \zeta}{\eta} \text{grad } \phi - \frac{k}{\eta} \text{grad } P$$

$$\vec{i} = -Lee \text{grad } \phi + \Phi T^{-2} \frac{\epsilon \zeta}{\eta} \text{grad } P$$

ここで \vec{j} ; 水の流量密度, \vec{i} ; 電流密度, P ; pore pressure, ϕ ; 電位, Φ ; porosity, T ; tortuosity, k ; permeability, Lee ; 電気伝導率, ϵ ; 水の誘電率, η ; 水の粘性係数, ζ ; ゼータ電位。

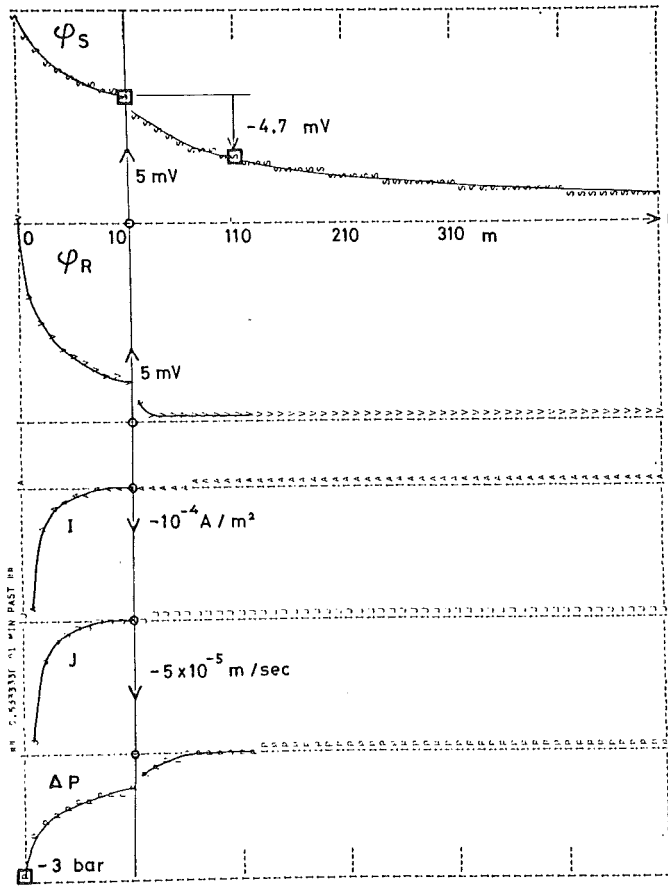
pore pressure および電位の分布を空間, 時間の関数として記述する方程式系は, 上の現象方程式に保存則を適用して得られるが, \vec{j} に対する $\text{grad } \phi$ の寄与は無視しうること, および pore pressure の変化に比べ電位は非常に早く定常値に達する(準定常状態)こと, を考慮すると⁹⁾

$$\frac{\Phi}{K} \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k}{\eta} \nabla^2 P$$

$$Lee \nabla^2 \phi = \Phi T^{-2} \frac{\epsilon \zeta}{\eta} \nabla^2 P$$

となる。ここで K ; 水の体積弾性率。

この方程式系を図3に示す境界条件のもとで解けばよいが、図3のモデルでは井戸の熱水流入部のある深さ $400 \sim 700 \text{ m}$ 以外では水の流れはないと仮定してある。また井戸の電位は流入、流出する電流が釣り合うよう決められている。流入する電流は水の流入に伴うものであり、流出する電流は井戸が正に帯電した結果生じるものである。方程式の諸係数の値は、観測値(一部推定値)を用いた。⁹⁾



第4図 計算結果。横軸は井戸からの水平距離($0 \sim 10 \text{ m}$ の間を拡大)。
 ϕ_s は地表における電位変化。それ以外はすべて熱水貯留層における値で、 ϕ_R は電位、 I は電流密度、 J は水の流量密度、 ΔP は pore pressure 変化(井戸を -3 bar と固定)。ゼータ電位は -100 mV と仮定。

ゼータ電位を -100 mV と仮定し、坑底圧変化 $\Delta P = -3 \text{ bar}$ をインプットした場合の計算結果を図4に示す。 $t = 0$ 以降 $\Delta P = -3 \text{ bar}$ と固定して5分後の結果であるが、地表での電位分布 ϕ_s は1分から10分後にかけてほとんど同じであった。井戸から 10 m の点と $100 \sim 200 \text{ m}$ の点の間には約 5 mV の電位差が現われるが、これは図2に示した観測値と良い一致を示す。すなわち観測された電位変化は、熱水貯留層におけるゼータ電位を -100 mV と仮定することによって、センス、大きさともに説明可能のようである。

4. おわりに

観測データをうまく説明する約 -100 mV というゼータ電位は、室内実験の結果⁹⁾からもある程度予想しうる値であった。ただし 200°C (滝の上熱水貯留層の温度) といった高温下においては室内実験は行われておらず、そのような条件下で実際にゼータ電位を決めたことは重要と考える。

我々のグループは、地熱地域における流動電位観測を、1977年12月に滝の上で、また1978年7月に熊本県岳の湯で行っている。いずれも観測された電位変化は、ゼータ電位を $-50 \sim -100 \text{ mV}$ 程度とすることによって説明可能である。この2回の観測においては、地磁気の観測も行ったが、熱水流動に対応した変化は見い出せなかった。地表で磁場変化が検出されるためには、媒質の非等方性等、電流ループを生ずるような“構造”が必要と考えられる。

地下での水の流動パターンおよびその時間変化を推定するのに、地電位観測は有効な方法と考えられるが、問題点は他の原因による地電位の分布および変化といかに区別するかであろう。そのために観測方法等について今後の研究が望まれる。

5. 謝 辞

滝の上での観測に際し、多大の御協力をいただいた日本重化学工業(株)に感謝いたします。また観測に御協力いただいた花岡尚之(地質調)、横倉隆伸、柳沢正久(東大理)の方々に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) G. A. Sobolev, Application of Electric Method to the Tentative Short-term Forecast of Kamchatka Earthquakes, *Pure Appl. Geophys.*, 113, 229-235, 1975.
- 2) G. A. Sobolev, V. N. Morozov, and N. I. Migunov, The Electrotelluric Field and a Strong Earthquake on Kamchatka, *Isvestia, Earth Physics*, 2, 73-80, 1972.
- 3) 尾池和夫, 中国の地震事業 — 海城地震の予知・予報と防災 —, *自然*, 4月号, 47-56, 1976.
- 4) 乗富一雄, 中国における電磁気測定と地震に伴う電磁気現象, 1977年地震学会訪中代表団報告集, 地震学会, 57-87, 1978.
- 5) R. F. Corwin and H. F. Morrison, Self-potential Variations Preceding Earthquakes in Central California, *Geophys. Res. Lett.*, 4, 171-174, 1977.
- 6) H. Mizutani, T. Ishido, T. Yokokura, and S. Ohnishi, Electrokinetic Phenomena Associated with Earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 3, 365-368, 1976.
- 7) A. A. R. Zohdy, L. A. Anderson, and L. J. P. Muffler, Resistivity, self-potential, and induced polarization surveys of a vapor-dominated geothermal system, *Geophysics*, 38, 1130-1144, 1973.
- 8) C. J. Zablocki, Mapping thermal anomalies on an active volcano by the self-potential method, Kilauea, Hawaii, in *Proceedings Second united nations symposium on the development and use of geothermal resources, Vol.2, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California*, pp.1299-1309, 1975.
- 9) T. Ishido, A study of electrokinetic phenomena in rock/water systems and its application to geophysics, Ph. D. Thesis, University of Tokyo, 1977.