

カムチャッカ半島ムトノフスキーでの地熱井周辺の自然電位モニタリング

松島喜雄, 当舍利行, 石戸経士 (地質調査所)

I. Delemen, A. Kiryukhin (ロシア科学アカデミー火山研究所)

Self-potential monitoring around a well in Mutnovsky geothermal field, Kamchatka, Russia.

N. Matushima, T. Tosha, T. Ishido (Geological Survey of Japan)

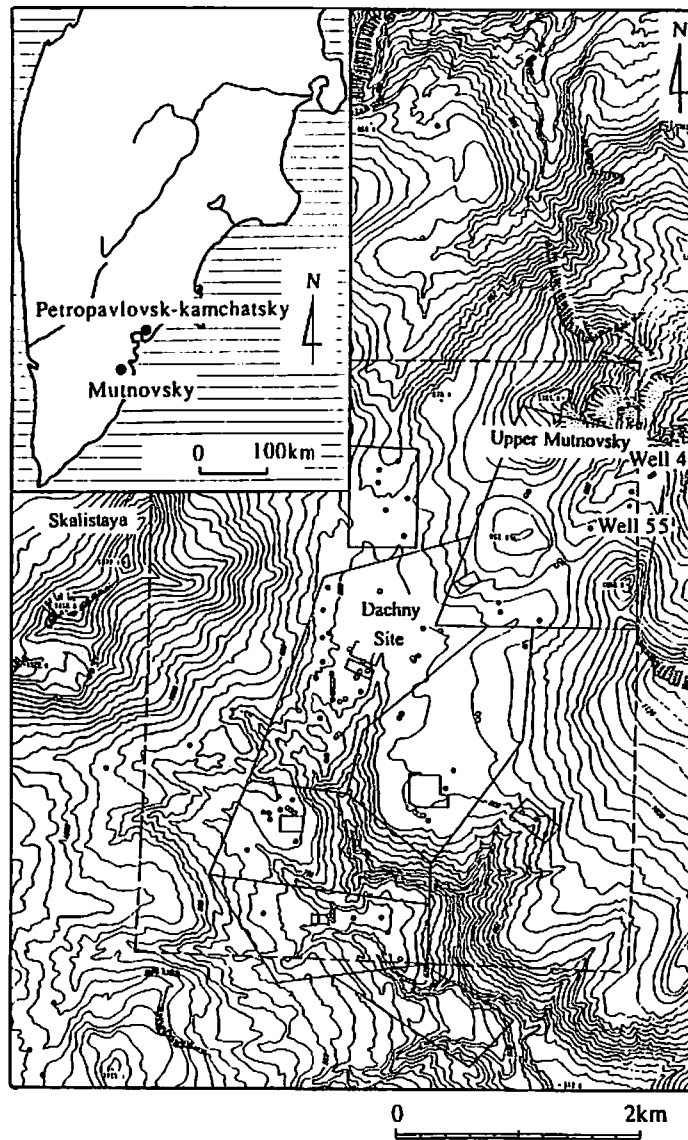
I. Delemen and A. Kiryukhin (Academy of Sciences, Institute of Volcanology).

1. はじめに

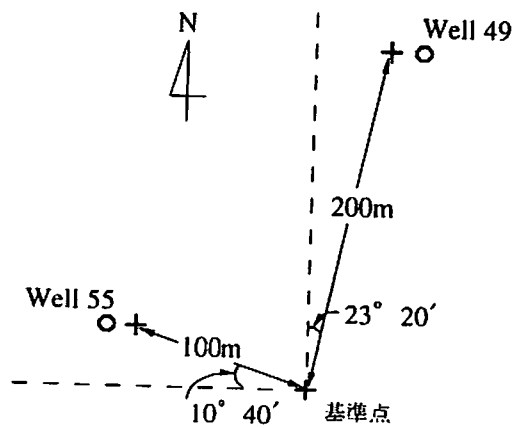
地質調査所では1993年より, ロシアの研究者とともに地熱の共同研究を実施している(川村他, 1995). 1995年には共同観測を実施するために, カムチャッカ半島の州都ペトロバプロフスク・カムチャッキーから南へ80kmのムトノフスキー地熱地域(第1図)を訪れた. この観測の主目的は, 坑井から蒸気を噴出させながら貯留層圧力の経時変化を測定し透水係数等の貯留層構造を求めること(すなわち噴気テスト)であった. 一方, このような噴気テストに伴っては, 地下の貯留層において地熱水の比較的急激な流動が生ずる. 熱水の流動に伴う界面動電現象による自然電位の発生(例えば石戸, 1991)を確認するためには良い機会であり, その結果によっては地下構造をさらに考察するためのデータとなり得る. そこで, 噴気テストと同時に坑井周辺に配置した電極とデータロガーによって自然電位のモニターを行った. その結果について報告する.

2. 噴気試験の概要と観測結果

噴気テストは, ムトノフスキーの北東部, アッパームトノフスキーと呼ばれる地区にある2本の坑井(第1図)で順次行われた. ここは開発有望地区となっており, 地下には約270°Cの優勢な地熱貯留層があることが確認されている(Kiryukhin, 1993). まず, Well 49と呼ばれる坑井にて2時間かけて噴気の放出が行われ, その2.5時間後にWell 55と呼ばれる坑井にて6時間にわたり噴気の放出が行われた. 後に解析の対象となるWell 49の噴気について若干の説明を行う. メインバルブを経て直上に噴出される噴気の流量は30 kg/sec, 噴気を構成しているのは大気圧で100°Cの気液2相状態の水で, 質量比にして約80%が蒸気であると見積もられている. 100°Cの飽和水の比エンタルピーが419 kJ/kgで飽和蒸気の比エンタルピーが2676 kJ/kgであるから噴気の比エンタルピー(h)は2225



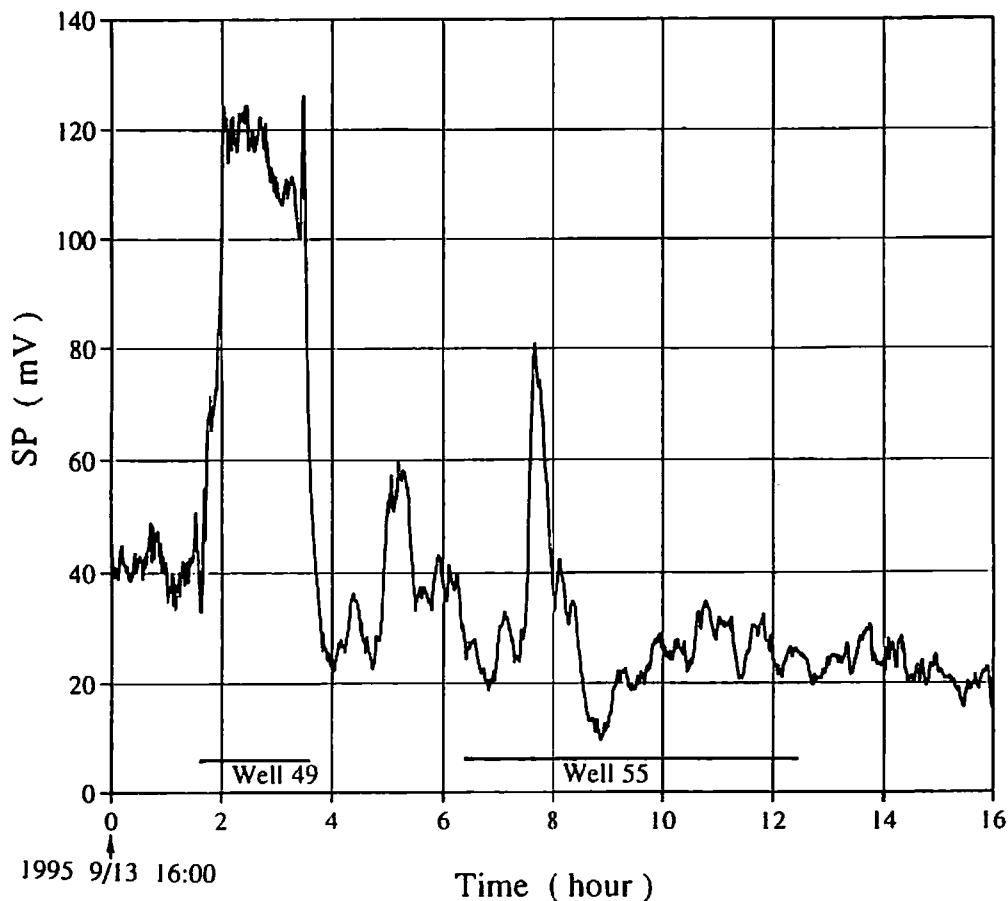
第1図 ムトノフスキー地域の地形と坑井分布 (川村他, 1995). 白丸が坑井を示す.
 Fig. 1 Topography of Mutnovsky geothermal field and distribution of wells (open circle).



第2図 自然電位の測線配置.
 Fig. 2 Measurement lines of the self-potential monitoring.

kJ/kgとなる。一方、270℃の飽和水の比エンタルピー（ h_L ）が1185 kJ/kgで飽和蒸気の比エンタルピー（ h_s ）が2790 kJ/kgであるから、エンタルピーが保存されているとすると、地下の貯留層も気液2相の状態になっていることになる。ちなみに、噴気中の蒸気量が34%以下の場合には、噴気の比エンタルピーは1185 kJ/kg以下となり、貯留層の状態は液単相になる。

自然電位のモニターは、ゲル状KClタイプの電極とデータレコーダーを用いて1分間隔で行った。電極は第2図に示すように基準点、Well 49 およびWell 55 から2mの地点の3箇所に設置し、それぞれ200m, 100mからなる2測線を設けた。しかしながら、現地作業員によって誤って測線が取り払われるトラブルが生じたため、取得できたのは基準点とWell 49 との間の200mの測線の信号のみであった。その結果を第3図に示す。図の下部にある横棒は、それぞれWell 49 および Well 55 の噴気テストの期間を示す。全測定期間にわたる1.2mV/hour程度のトレンドを除くと、Well 49 の噴気テストにともない2地点間の電位差は80 mV増加していることがわかる。坑井から遠方の点を基準としているので、噴気テスト期間中に坑井周辺其自然電位がより正に変化したことになる。

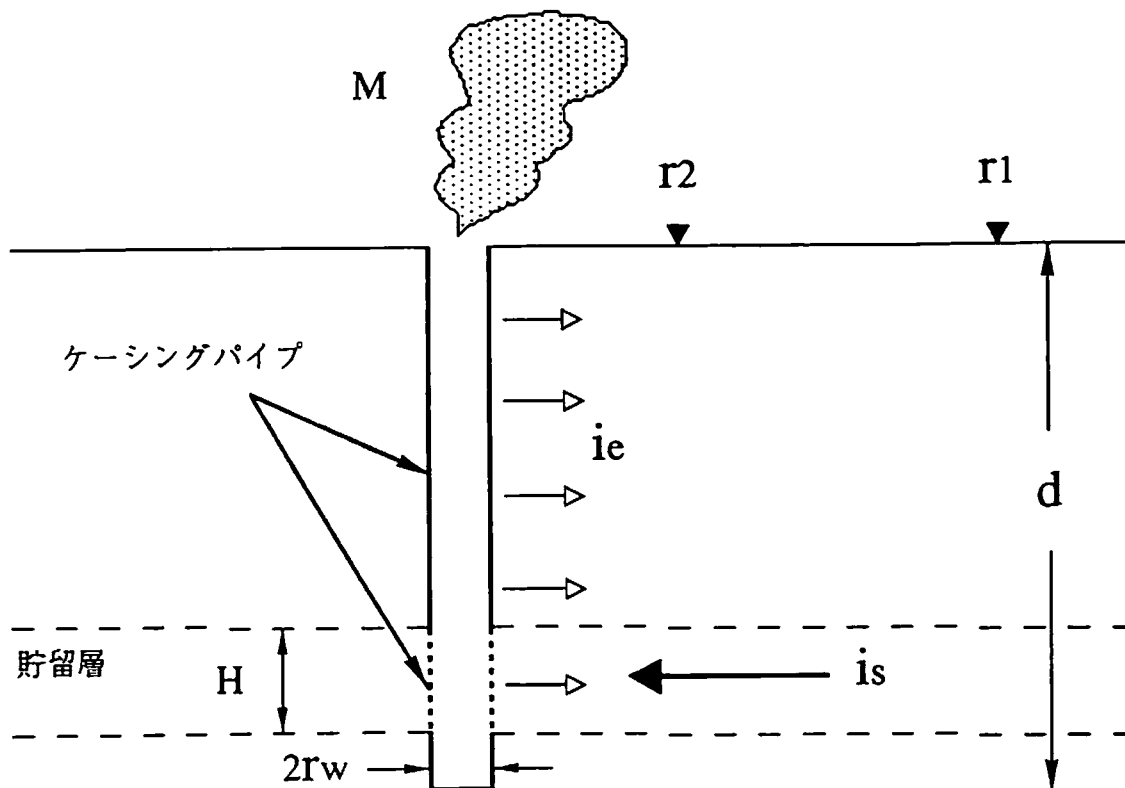


第3図 自然電位の測定結果。図の下部の横棒はそれぞれWell49およびWell55の噴気を示す。
 Fig. 3 Result of the self-potential monitoring. Underlines indicate the periods of the well test.

このような自然電位の変化は、既に Ishido et al. (1983) によって報告されている。それによると、噴気テスト期間中に坑井周辺の自然電位がより正に変化して、坑井近傍と 200 m 遠方の 2 地点間の電位差が 5mV 程増加した。変化の傾向は今回の測定も同様である。ただし、今回の変化量は 80mV であり、Ishido et al. (1983) に比べてかなり大きいという違いがある。

3. 噴気テストにともなう自然電位の変動

噴気テストにともなう自然電位の変動を熱水の移動にともなう界面動電現象で説明するために、まず第 4 図のモデルを考える (Ishido et al., 1983)。坑口からの蒸気・熱水の噴出によって地下の貯留層では坑井に向かって地熱水が流動する。そのトータルの流量を M (kg/sec) とする。なお、坑井の境界はケーシングと呼ばれる金属パイプになっているが、貯留層に相当する深度区間ではスリット状に穴があいており流体が通り抜けられるようになっている。界面動電現象によって、流体の移動にカップルして電流が流れる (これを流動電流と呼ぶ)。この流動電流が生じるのは、多孔質媒質内を地熱水が流れる貯留層内に限られ、坑井の境界に向かって運ばれる電流の総量 I_s は、井戸の半径を r_w 、貯留



第 4 図 坑井周辺での電流を示す概念図.

Fig. 4 Schematic diagram of induced electric current (i) around a geothermal well.; subscripts s and e mean streaming and electric, respectively.

層の厚さを H , $r=r_w$ での電流密度を i_s とすると

$$I_s = i_s \times 2\pi r_w H \quad (1)$$

である。 i_s は石戸 (1991) によって定式化されているが、気液 2 相を取り扱うので、体積流量 (流速) を質量流量 ($M/2\pi r_w H$) に、粘性係数を動粘性係数 (ν) で置き換えることによって、

$$i_s = -\eta t^{-2} \text{Re}v \varepsilon \zeta / \mu \frac{M/(2\pi r_w H)}{k/\nu} \quad (2)$$

となる。ここで、 η , t , k はそれぞれ媒質の空隙率、トーチユオシテイ、浸透率である。 ζ は界面動電現象を特徴づけるゼータ電位で、負の場合は流体の流れの方向に正の電荷が運ばれ、正の場合はその逆になる。なお、蒸気のゼータ電位は 0 となり電荷を運ばないので、流れが気液 2 相のときは間隙流体の誘電率 ε , 粘性係数 μ として液相の値を用い、液相の量比に依存するパラメーター $\text{Re}v$ (流れが液単相の場合には 1 となる) を導入する。

さて、電荷の保存からケーシングでは井戸に向かって運ばれる流動電流の総量 I_s に等しい電流が外向きに流れることになり伝導電流 (i_e) のソースとなる。ケーシングを導体とみなすとこのような電流ソースはケーシングの表面に均一に分布していることになる。そして、地表においても電位分布が生じる。ラインソースを仮定すると地表における 2 地点間の電位差は

$$\phi_{r_2} - \phi_{r_1} = \frac{I_s}{2\pi\sigma d} \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) \quad (3)$$

である。ただし、 r_1 , r_2 は坑井からの距離を表わし、 σ は大地の電気伝導度、 d は坑井の全長である。

次にこのモデルで観測値がうまく説明されるか検討する。石戸 (1991) にならい貯留層に一般的な値を用いると、 $\eta t^{-2} \sim 0.1$, $\varepsilon \sim 3 \times 10^{-10} \text{ F/m}$, $\zeta \sim -0.1 \text{ V}$, $\mu \sim 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ である。 M は坑口での噴気量から 30 kg/sec である。また、既に述べたように貯留層は気液 2 相の状態なので、 $\text{Re}v$ は 1 以下の値となるが、気液 2 相の流れでも固体との境界は常に液相で覆われていること、界面導電現象はそのような境界部で生じることから $\text{Re}v \sim 1$ とした。 ν は、気相と液相の相対浸透率 R_S と R_L , および動粘性係数 ν_S と ν_L によって

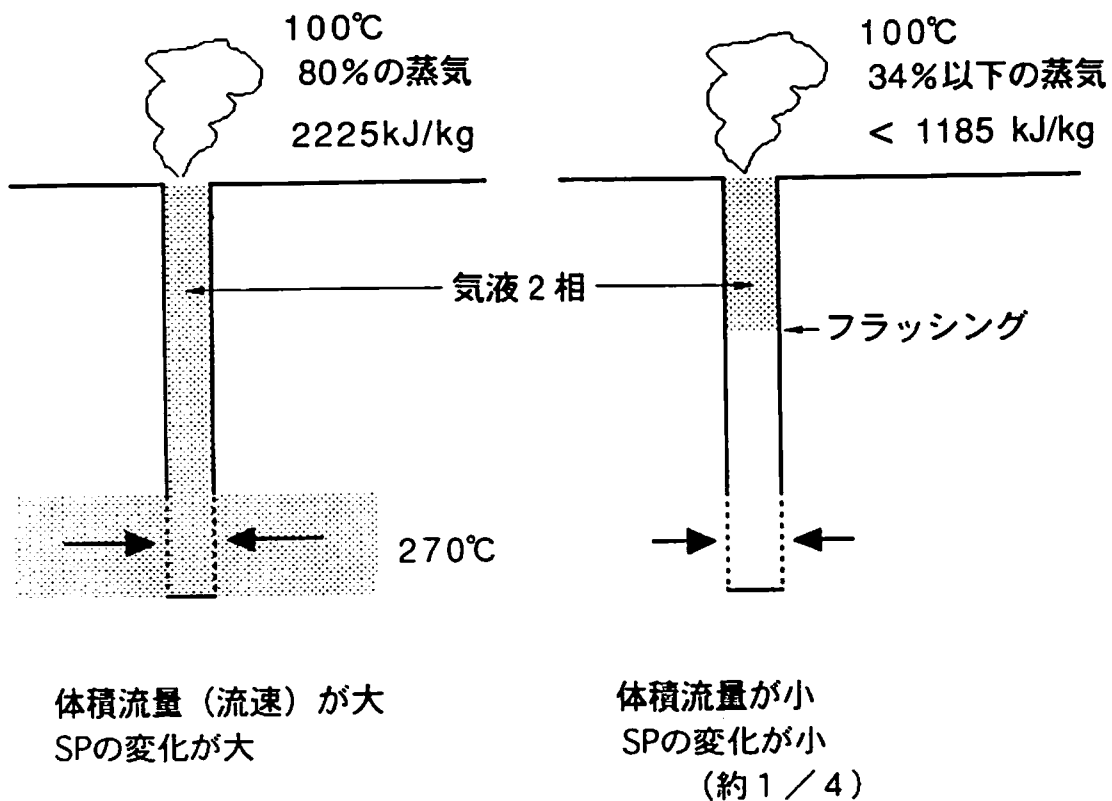
$$\nu = \frac{1}{\left(\frac{R_L}{\nu_L} + \frac{R_S}{\nu_S}\right)}$$

と表わされる。蒸気表から、 270°C で ν_S は $6.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$, ν_L は $1.3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$ である。また、

$$\frac{R_S}{R_L} = \frac{v_S}{v_L} \frac{h - h_L}{h_S - h}$$

~ 9

なので、 $R_S + R_L = 1$ を仮定すれば $R_S = 0.9$ ， $R_L = 0.1$ となる。これを(4)式に代入して $v \sim 4.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$ が得られる。貯留層の浸透率 k は噴気テストの圧力挙動解析から求まるが、まだデータの取得を継続中であり解析を行っていない。ここでは優勢な噴気井ということで k を 10^{-13} m^2 と仮定した。これらの値を(1)，(2)式に代入することによって、熱水の移動にカップルした流動電流によって運ばれるトータルの電流 I_s を計算することができ 4 A となった。さらに(3)式から、坑井の深度 d を 1500 m ，坑井から電極までの距離 r_1 ， r_2 をそれぞれ 200 m ， 2 m として、観測された電位差 80 mV を満たすためには大地の比抵抗 ($1/\sigma$)が $40 \Omega \cdot \text{m}$ であるという結果になった。残念ながら比抵抗の信頼できる観測値はないが、この結果は地熱地帯の値としてはもっともらしい。よって、粗い見積もりではあるが、今回提示したモデルで観測結果を矛盾なく説明できたと考えている。ちなみに、貯留層の状態が液単相の飽和熱水であった場合には、(2)式で $v = v_L$ となるので I_s は 1 A となる。従って、(3)式からわかるように、観測される電位差は約 $1/4$ になる。気液2相の場合には液単相の場合に較べて動粘性係数が大きい。



第5図 観測結果のまとめ
Fig. 5 Summary of this study.

このことは、(2)式の右辺からわかるように、気液2相になると、同じ質量流量であっても体積流量(すなわち流速)が大きくなることを意味している。そのため今回は80 mVと比較的大きな変化がでたことになる。

4. まとめ

噴気テストによって100℃で80%の蒸気を含んだ噴気が30 kg/secの質量流量で放出された。この噴気の比エンタルピーは2225 kJ/kgである。エンタルピーが保存されると、地下の地熱貯留層は気液2相の状態になっている(第5図左)。今回、噴気テストにもなると80 mVと大きな自然電位の変化が現われたのは、貯留層での流れが気液2相で流速が大きかったことによるのであろう。仮に貯留層内の流れが液単相であるとする(第5図右)発生電位は1/4程度になる。このようなことから、蒸気まじりであっても液相と一緒に流れている限り流動電流は全体の流速に比例しているといえる。

参考文献

- 石戸経士, 1991. 自然電位から推定される火山地域の地下流体流動, CA研究会論文集, p. 86-93.
- Ishido, T., Mizutani, H. and Baba, K., 1983. Streaming potential observations, using geothermal wells and in situ electrokinetic coupling coefficients under high temperature, *Tectonophysics*, v. 91, p. 89-104.
- 川村政和・石戸経士・中尾信典・山口靖, 1995. カムチャッカ半島ムトノフスキー地域の地熱開発, *地熱*, v. 32, p. 37-50.
- Kiryukhin, A. V., 1993. High-temperature fluid flows in the Dachny field of the Mutnovsky hydrothermal system, Russia, *Geothermics*, V. 22, p. 49-64.