

大霧地熱地帯での自然電位モニタリング

当舎利行・山澤茂行・井出朋徳

新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 地熱開発利用センター

1 はじめに

自然電位測定は、比較的簡便に観測が行えることから地下での流動計測にしばしば用いられている。地表に電位が現れるのは、地下での流体の流動に伴って界面導電現象により電荷が運ばれるためと考えられているが、その解析は地下に電流ソースを仮定して観測結果と結びつけていることが多い。新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) では、工業技術院地質調査所 (2001 年 4 月より、工業技術院の廃止に伴い他の工業技術院傘下の研究所とともに独立行政法人産業技術総合研究所として発足) との地熱分野でのカップル研究として、地熱地帯での自然電位モニタリング手法の開発並びに熱水流動シミュレーターとの組み合わせた解析方法の開発を行っている。この研究開発 (貯留層変動探査法開発) では自然電位を始め重力などの探査手法により、地熱地域において地熱流体の採取・還元によって生じる変化を捉えて熱水の流動を把握し、精緻な数値モデルを作成することにより生産予測や生産管理などに利用することを目的としている。なお、結果の一部は出口・他 (1999) にてすでに発表を行った。

2 大霧地熱地帯

大霧地熱地帯は、鹿児島県始良郡牧園町にある。この地熱地帯は、霧島山系の西側に位置しており、東大火山観測所のあるえびの高原、霧島山系の主峰である韓国岳から直線距離にして約 4km ほどの至近距離である (図 1)。この大霧地熱地帯は、東北東 - 西南西の走向を持ついくつかの断裂系に支配されている。これらの断裂系は、北から鏑河川断層、銀湯断層、白水越断層などである。鏑河川断層は深部まで冷たい水が循環していると言われており、地熱貯留層として有望な断裂系は銀油断層、白水越断層である。銀油断層は古くより銀湯の噴気として知られており、国の地熱開発のための調査地域にも選ばれていた。1996 年 3 月に大霧地熱発電所が出力 3 万 kW で運転を開始しているが、それ以前の 1984 年頃から試験坑井による、噴気試験が継続して行われていた。なお、大霧発電所では、蒸気の生産を日鉄鹿児島地熱が、発電部門を九州電力が受け持っている。地下からは、1999 年 3 月現在 10 本の生産井にて蒸気 269 t/h、熱水 836 t/h (日本地熱調査会, 2000) が汲み上げられ、蒸気と熱水に分離された後、蒸気は発電所のタービンへ、熱水は還元井に運ばれて地下へ還元されている。

3 分布調査

地質調査所では、各地の地熱地域にて自然電位の測定を実施して、地熱地帯での熱水流動の研究を行ってきた。大霧地熱地域では地熱発電所の運転開始以前の1987年に自然電位測定が実施された(石戸・他, 1997)。この自然電位測定では、電極間の電位差を電位差計で測定してゆき、地熱発電所の建設予定地を含む比較的広域の電位分布としてまとめている。なお、1987年は、同地熱地帯にてすでにいくつかの坑井が掘削されて、蒸気の噴気試験が行われていた時期であるため、厳密な意味での開発開始以前という状態ではない。

1997年に、以前の自然電位分布との比較のため、同地域にて自然電位分布調査を再び実施した。この分布調査では、従来正の電位異常として捉えられていた生産基地周辺の電位場が、発電所の運転開始に伴ってどのように変化をしているかを観測し、地下の流体の流れを推定することを目的とした。この分布調査の結果、銀湯生産ゾーン及び還元井西部に負電位異常が認められ、その経時変化が確認された。このため、これらの変化がどのような時期に起こるのか、また、井戸からの熱水の生産とどのような関連があるかなど、より高精度な自然電位変動を把握するためモニタリング(連続観測)を実施した。

4 連続観測(モニタリング)

分布調査にて銀湯生産ゾーン及び還元井西部に負電位異常が認められ、その経時変化が確認されたので、より高精度な自然電位変動を把握するため、図2に示す東西3km、南北2kmの範囲に自然電位モニタリング網を設置し、連続観測を開始した。観測網設置後に得られた自然電位の分布の一例を図3に示す。同図に示す58の観測点で地表電位の測定を行い、同時に、電極番号37、19、42のそばに水位観測孔A、B、Cを掘削して、100m深孔井内電位および水位を観測し、観測センター近傍で降雨量を観測した。

電位の測定は、あらかじめ定めた基準電極(電極28番)からの電位差を測定する方法によった。各点の電位は電線により観測センターに電送され、A/D変換器を経由して5分間隔で自動的に記録される。各々の地表電極、孔井内電極にはカナダ・フェニックス社製塩化鉛-鉛電極を使用している。

5 電極のドリフトと降雨の影響

連続観測において問題となるのは、電極の長期ドリフトである。この電極のドリフトは、いくつかの地点の電位変動傾向を判断することにより電極のドリフトであるかシグナルであるかを判断することとなる。しかし、測点間隔がまばらである場合などは、シグナルかドリフトかの判断が尽きにくい。このため、54地点の連続観測点のうち数地点を選択して2つの電極を設置して電極のドリフトについてもモニターを行った。同一地点に設置した電極間では15mV程度のオフセットが存在するなど、電位変化は完全に同一とはいえないものの、その変化は似た傾向を示しており、測定に使用している電極(カナダ・フェニックス社製塩化鉛-鉛電極)は、長期モニタリングに際してドリフトの影響はないものと考えられる。

また、ドリフトとともに電極の電位変化に影響を及ぼす要因として、降雨の影響が考えられる。この影響に

についてもドリフト検定用に設置した電極の変化で考察を行った。電極の中には、特に雨が降った後に大きな変化を示すものも見受けられる。降雨がどのように電極電位に影響を与えているかはまだ推定の域を出ないものの、水が浸透することにより土壌水分率が変わり、接地抵抗などが変化することによることが考えられる。この降雨がどの程度電極電位に影響を与えるかを調べる目的で、同位置地点に深さを変えて電極を設置してその影響を調べる実験も実施した。この結果、降雨の影響を取り除くには、電極を 1m 以深にベントナイトなどの接地抵抗を下げる薬剤を散布した上に設置することが有効と考えられる。

6 自然電位分布計算

流れの密度 (J) と電流密度 (I) は、圧力ポテンシャル (ξ) と電位ポテンシャル (ϕ) を用いて

$$J = -L_{vv} \nabla \xi - L_{ve} \nabla \phi \quad (1)$$

$$I = -L_{ev} \nabla \xi - L_{ee} \nabla \phi \quad (2)$$

と表される。 L_{vv} 、 L_{ve} 、 L_{ev} 、 L_{ee} はそれぞれの係数である。(1) 式の第 1 項は圧力勾配に沿って流れができるというダルシー則であり、第 2 項は電位ポテンシャルに沿った流れである。(2) 式の第 1 項は界面導電現象からのドラッグ電流 (流れによる電流) であり、第 2 項はオームの法則による伝導電流となる。

通常の地表での電磁現象では (1) 式の第 2 項は省略できるとともに、電流の沸き出しと沈み込みがないことから $\nabla I = 0$ とできる。したがって、 $I_{\text{cond}} = L_{ev} \nabla \xi$ 、 $I_{\text{drag}} = L_{ee} \nabla \phi$ とおくことにより、

$$\nabla I_{\text{cond}} = -\nabla I_{\text{drag}} \quad (3)$$

となる。これは、流れによるドラッグ電流と反対方向に伝導電流が流れることを表している。この (3) 式をもとのポテンシャルの形に戻すと

$$\begin{aligned} \nabla(L_{ee} \nabla \phi) &= -\nabla(-L_{ev} \nabla \xi) \\ &= -\nabla(-L_{ev}/L_{vv} J) \end{aligned} \quad (4)$$

となることから、流れの密度 (J) の分布が決まることにより電位ポテンシャル (ϕ) を求めることができる。係数 L_{vv} 、 L_{ee} はダルシー則の係数、比抵抗値から推定することができる。一方、界面導電現象に係る係数 L_{ev} は実験的に求めることが行われているが、高温での実験データがないことから低温でのデータからの類推で値を求めている。

地熱地帯では、坑井が数多く掘削されており熱水の温度や圧力のデータが数多く蓄積されている。これらのデータを用いて、熱水のシミュレーションを行って地熱開発を実施する前の自然状態や将来を推定することが可能である。これらの熱水シミュレーションでは流束密度 (J) が求められる。この流れの密度 (J) から (4) 式により電位ポテンシャル (ϕ) を求めることができる。本来は、(1) 式と (2) 式からわかるように圧力ポテンシャルと電位ポテンシャルを同時に解く必要があるが、(1) 式の第 2 項が無視できるため流れの場を求め、その後で電位場を求めればよい。

図 4 に、流動分布と自然電位分布の一例を挙げる。この例では、垂直の断裂系に下部より熱水が流入し、断裂系内に設置された坑井から熱水を汲み上げることが仮定している。図は断裂面内の熱水の流動と自然電位を表している。熱水の流動は、熱水流動シミュレータにより解析され、図中の矢印のような流動パターンを生じさせている。この流動パターンによって導き出される自然電位分布を上記計算式により計算しコンターにより表した。パッチが付いている部分が正異常域であり、熱水が収斂および発散をしているところに、それぞれ正異常域と負異常域が現れているのがわかる。

7 比抵抗構造

前に述べたように、熱水流動から界面導電現象により自然電位分布が計算されるが、電流から電位を計算するときには比抵抗値が必要となってくる。通常は、比抵抗値を一定として計算をすることが多いが、比抵抗構造が MT 法などで推定ができている場合は自然電位の分布に反映させることができる。大霧地域では、プロジェクトの一環として MT 法による比抵抗構造の解析が進められてきており、それらの研究結果を自然電位分布の解析に利用することができる。この比抵抗構造の違いにより自然電位分布モデルとしていくつかのモデルにて検討を重ねた。今回の解析で用いた比抵抗構造を図 5 に示す。比抵抗断面図は同地域を北西 南東方向 (銀湯断層に直交する方向) での比抵抗が示されており、断層沿いに低比抵抗構造が発達していることが認められる。この MT 法比抵抗構造に対応して自然電位計算に用いた比抵抗構造を推定する。MT 法断面図では銀湯断層沿いの低比抵抗構造は途切れているが、MT 法測線の端点に相当していることから、自然電位計算に用いた比抵抗構造では、銀湯断層に沿って延びていると仮定した。

8 シミュレーションにより求められる電位分布

図 6 は、熱水流動シミュレーションにより自然状態を計算し、この比抵抗構造により電位分布を計算した結果である。現在発電所が建設されている解析中心部に正の異常があり、その西側に負異常が計算され、発電所が建設される以前の大霧地域の自然電位を表しているものと考えられる。しかし、このモデルでは解析中心部の正異常や負異常を囲んで大きく正異常が出現している。大霧地域の東側は熱源と考えられる霧島火山帯になっており熱水の流出が存在しても説明が付けられる。しかし、西側は流動の流出域となっていることから大きく負電位異常が観測されることはあり得ないと考えられる。熱水流動の結果を吟味すると、西方に流動していった流れの一部が地表に湧出していることがわかった。実際には、地下水の湧出は大霧地域のさらに西側の低地に認められていることから、熱水流動モデルの改良が必要と考えられる。中心域の電位分布はほぼ正しく表現されているので、自然状態から 5,000 日から 6,000 日の間の電位変化 ($\Delta\phi = \phi(6,000) - \phi(5000)$) を表すと図 7 のようになる。この 5,000 日~6,000 日の間は、ほぼ自然電位の連続観測 (モニタリング) が行われていた時期に一致する。シミュレーションによる結果 (図 7) では、いくつかの異常域が表現されているが、正異常は発電所の北側と南側および西方の負異常のより西方に現れている。一方、負異常は、発電所の西側 (現在熱

水を地下に還元している地域) に現れている。この西方域に見られる電位分布の正異常は、本来大霧地域のさらに西側の低地にまで流動すべき流れが一部地表に湧出することに起因するものと考えられ、モデルを改良することにより消失すると思われる。

9 モニタリングの結果

図 8 は、連続観測 (モニタリング) での電位分布結果である。シミュレーションの結果と比較するために、ほぼ同じ時期の結果を選択した。生産基地 A に隣接する P1、P7、P8、P19 近傍にて正の異常がまた、還元基地 D および E の周囲である P22、P12、P42 近傍にて負の異常が観測される。自然電位分布は、熱水が収斂および発散をしているところに、それぞれ正異常域と負異常域が現れている。地熱地帯では、生産域にて熱水を採取して還元域にて蒸気を採取した後の熱水を地下に戻している。このため、生産域では熱水が周辺から集まってきており還元域では熱水の拡散が起こっていると考えられる。このような地下の水の流動に関し、重力や自然電位でその動きを見知しようとするのが、大霧地熱地帯でのモニタリングの目的である。

重力モニタリングでは、生産域にて質量の減少に対応する負の異常が、還元域では質量の増加に対応する正の異常が観測されることが期待される。自然電位では、生産域では熱水の収斂に対応する正の電位異常が、また、還元域では熱水の拡散に対応する負の電位異常が期待される。大霧地域の自然電位モニタリングでは、熱水の生産域で熱水の収斂が引き続き起こり、地下への還元域で発散が起こっていることを示している。この生産、還元に伴う自然電位変化はほぼシミュレーションによる変化と同様のパターンを形成している。これは、地下での熱水の流動が、シミュレーションによりほぼ再現できていると考えられる。このシミュレーションによる熱水流動の検証を自然電位や重力などのモニタリングにより得られた結果と照合することにより、より精緻な熱水流動モデルの構築ができあがると考えられる。このような数値モデルが完成すると、地下の状況を数値モデルにて可視化することが可能となるほか、熱水をどのようにすれば、安定して採取することが可能となるか熱水の生産管理を行うことが出来る。地下からの熱水を利用して発電器を回す地熱発電所では熱水の計画的な採取が必須であるが、過剰採取による熱水圧力の低下や熱水採取量の低下などが大きな問題となっている。控えめな採取であれば、圧力の低下などの事態を避けることが出来るものの、過剰設備が問題となってくる。モニタリング技術による地下の熱水流動の把握は、このような工学的な見地から現在最も必要とされている技術であり、より精緻な数値モデルを作っていく方向で技術開発を進めている。

参考文献

石戸経士・菊地恒夫・杉原光彦・松島喜雄, 地熱貯留層の SP モニタリング, 地熱, 32, No.2, 1997.

出口知敬・横井浩一・米田吉宏・根木健之・井手朋徳, 霧島地熱地域における自然電位連続観測について, 物理探査学会第 100 回学術講演会論文集, 70, 1999.

日本地熱調査会, 我が国の地熱発電所設備要覧, 2000.

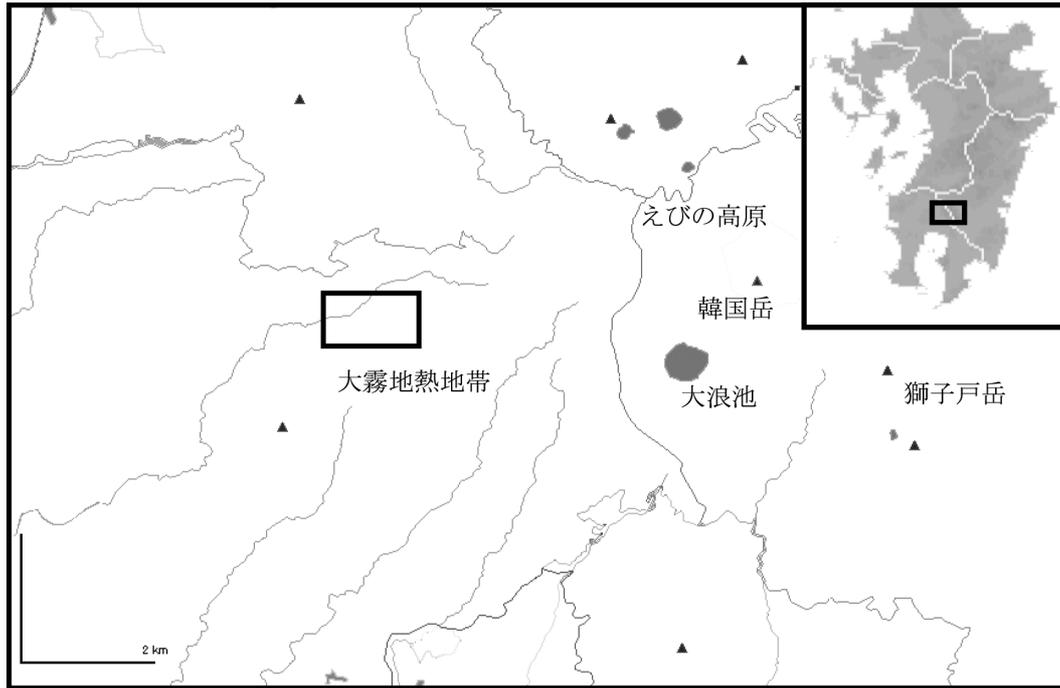


図 1: 大霧地熱地帯の位置。

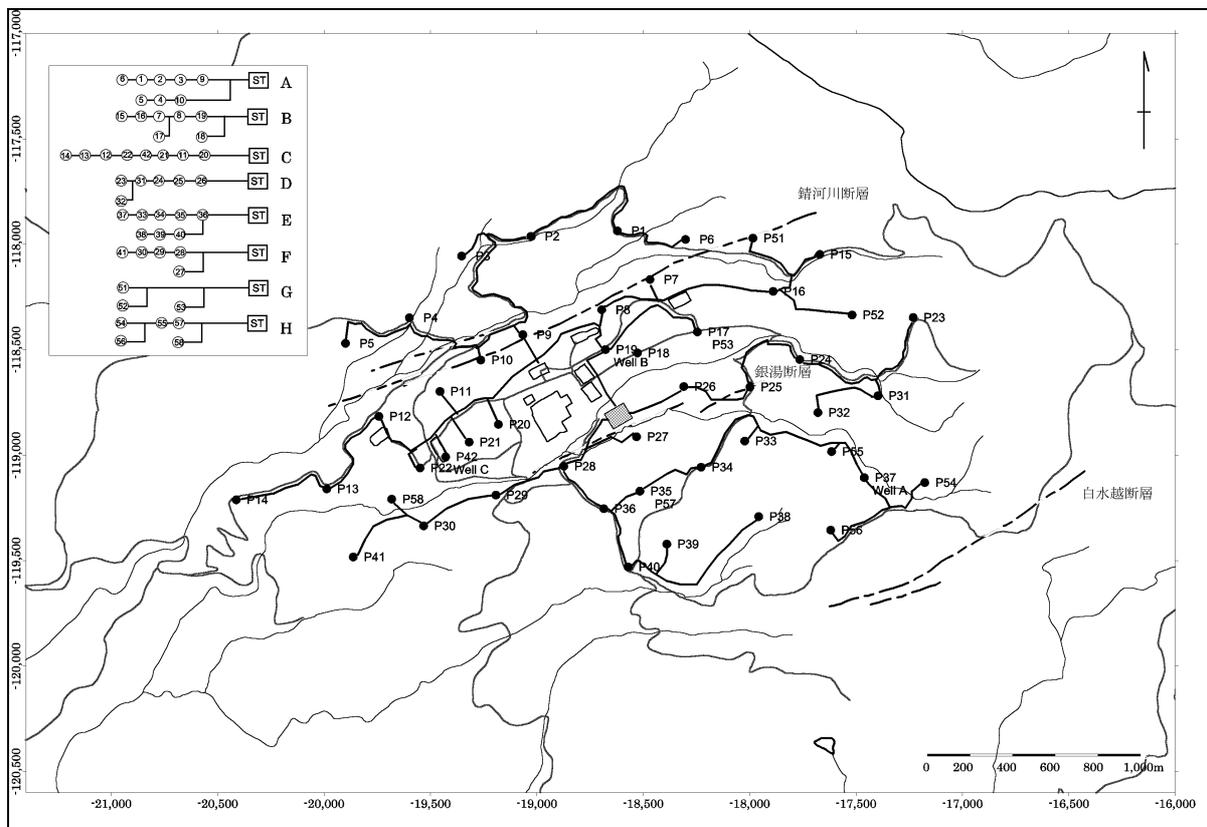
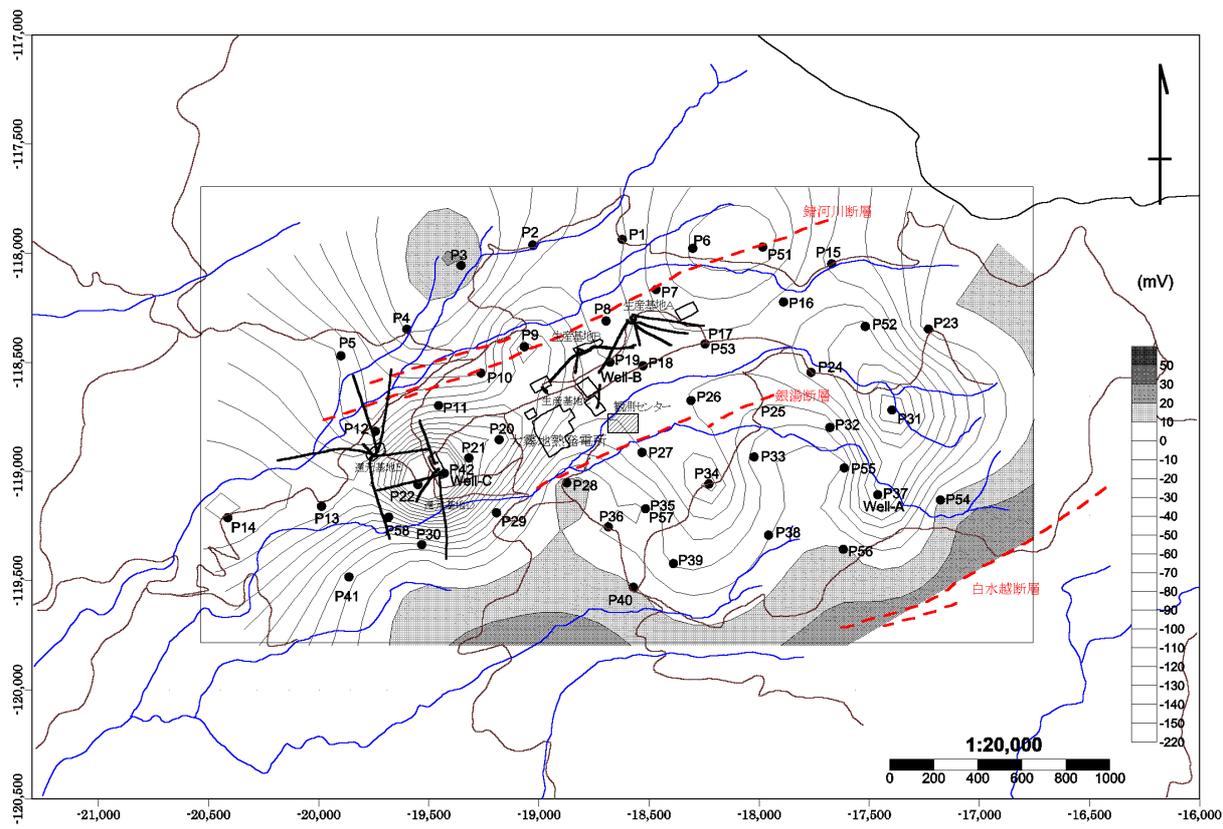


図 2: 自然電位モニタリング観測網。



1998.12.15
 図 3: 1998 年 12 月 15 日 (モニタリング開始時) の自然電位分布。

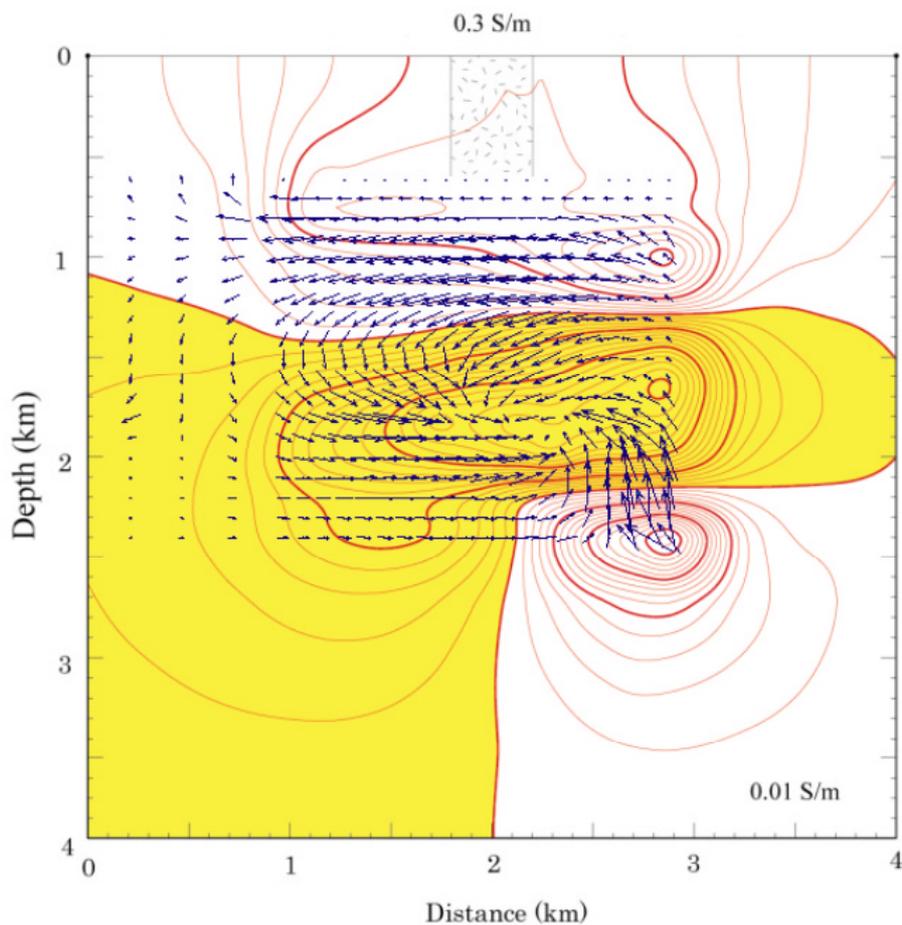


図 4: 流動分布と自然電位分布の一例。

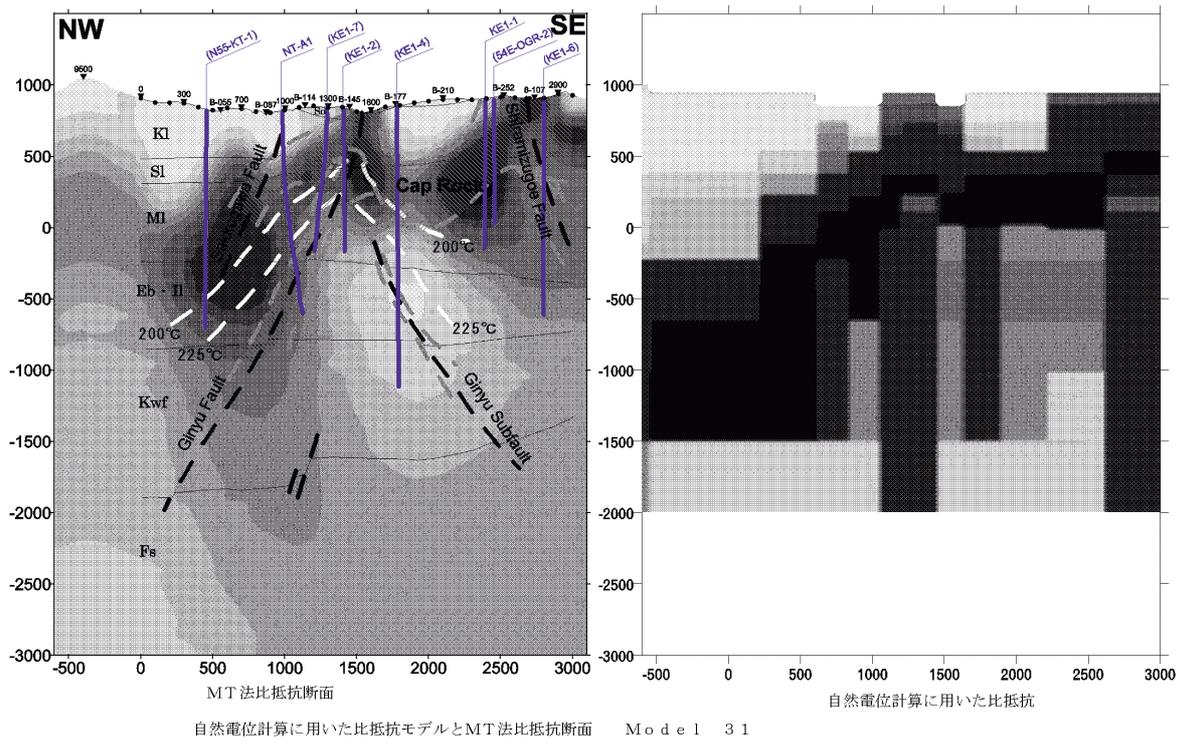


図 5: MT 法による比抵抗構造 (左図) と自然電位計算に用いた比抵抗構造 (右図: 色の濃い部分が低比抵抗)

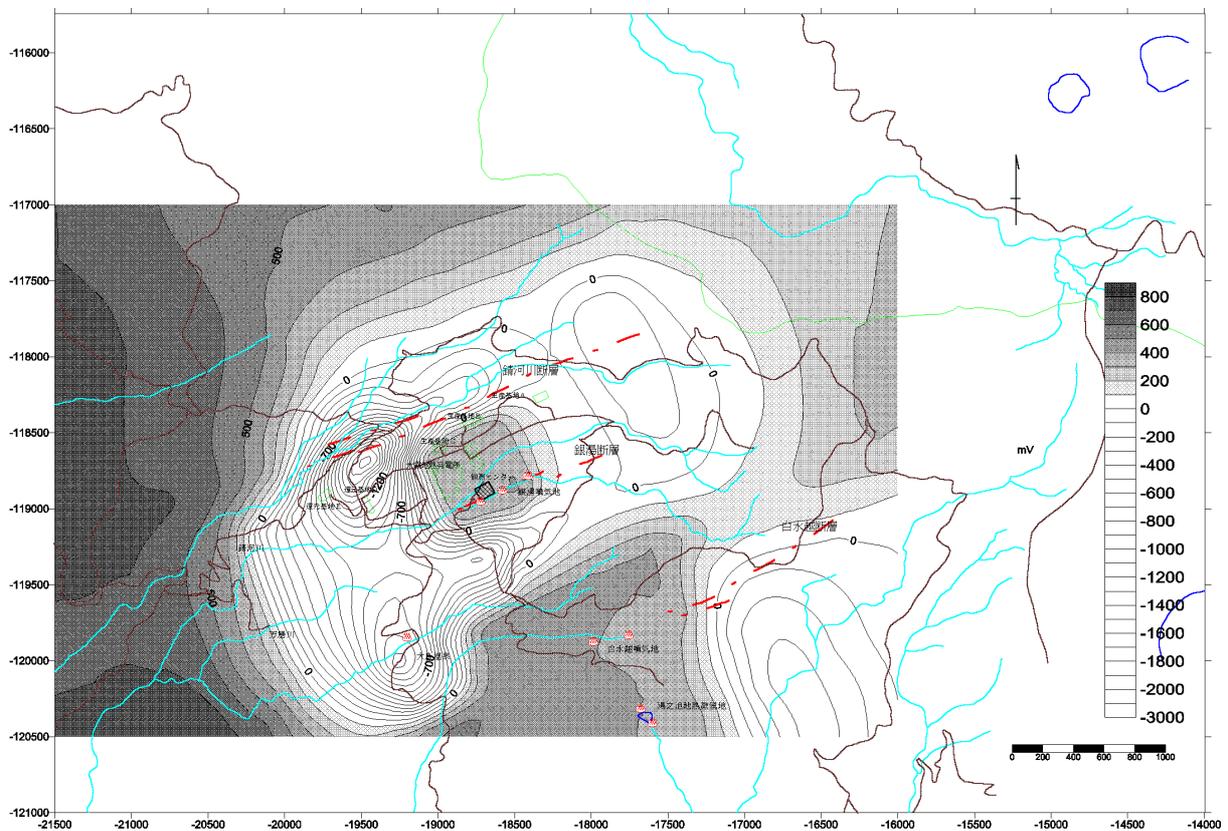


図 6: 熱水流動シミュレーションから期待される自然電位分布 (自然状態)

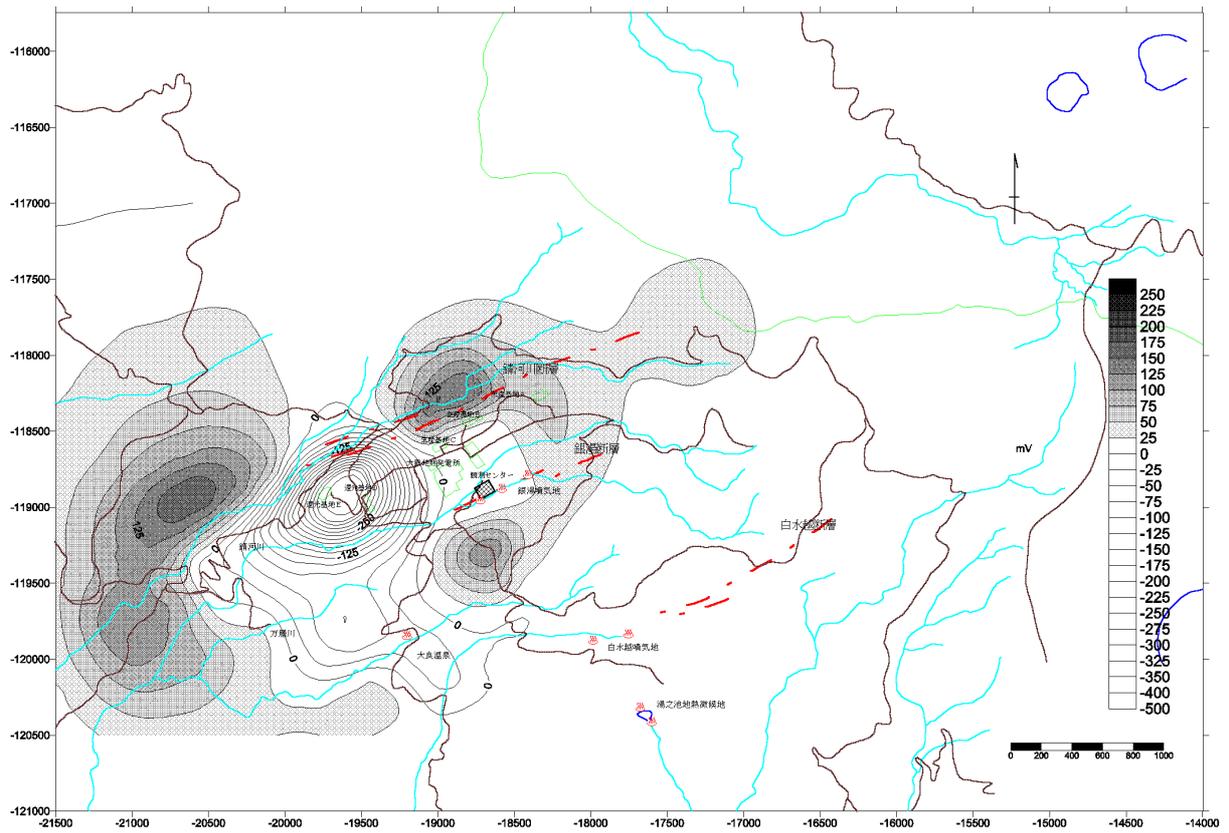


図 7: 自然状態から 5,000 日から 6,000 日間の電位変化 (シミュレーション結果)

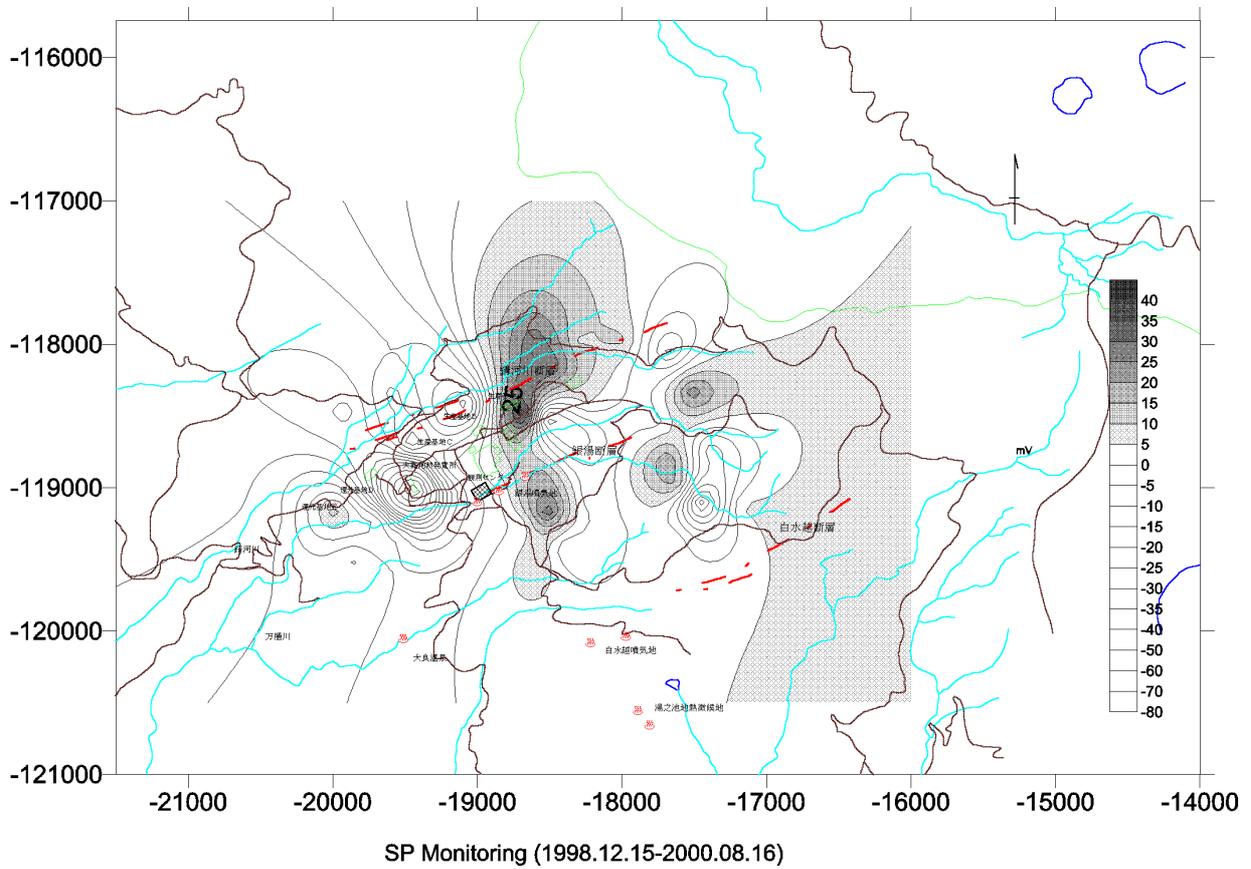


図 8: 連続観測 (モニタリング) での電位分布変化 (1998.12.15 ~ 2000.8.16)