

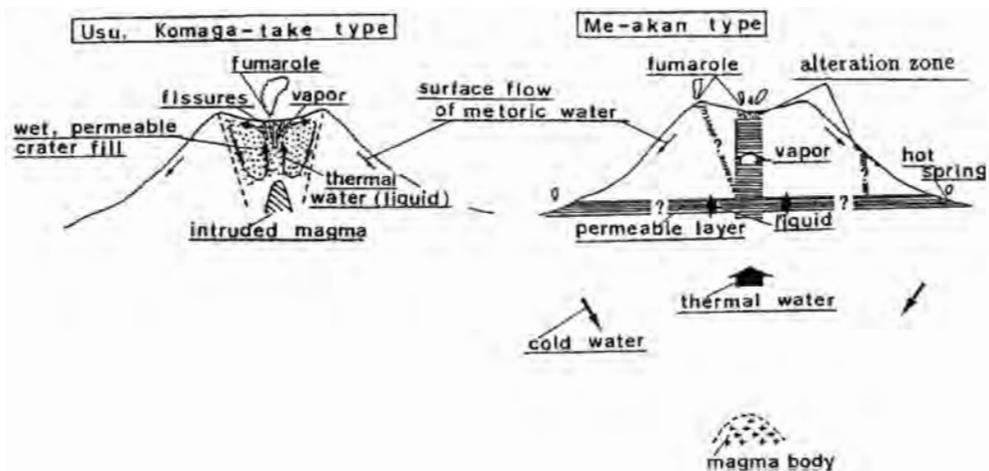
# 自然電位の経時変化に関わるいくつかの研究の紹介

松島 喜雄<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

自然電位 (SP) には標高が高くなるにつれてその値が減少する, いわゆる地形効果というものがあります。ところが活動的な火山においては, 地形効果に反して標高が高くなっても値が減少しない, あるいは逆に増加するといった, いわゆる正のSP異常を示すことが知られ (W型プロファイル, 後述), その原因として熱水対流が考えられてきました (石戸, 1981)。以下の議論では, 地下の流体の流れに伴って電荷が運ばれる流動電位現象によってSPが発生していると考えています。この現象は多孔質媒質中を熱水が流動する際に, 界面動電現象によって電荷が共に運ばれるために生じていると考えられます。第1図は, 筆者がまだ学生の頃, 北海道内の有珠山, 駒ヶ岳および雌阿寒岳の3火山においてSPを観測した結果をもとに描いたものです (松島ほか, 1994)。地表での噴気

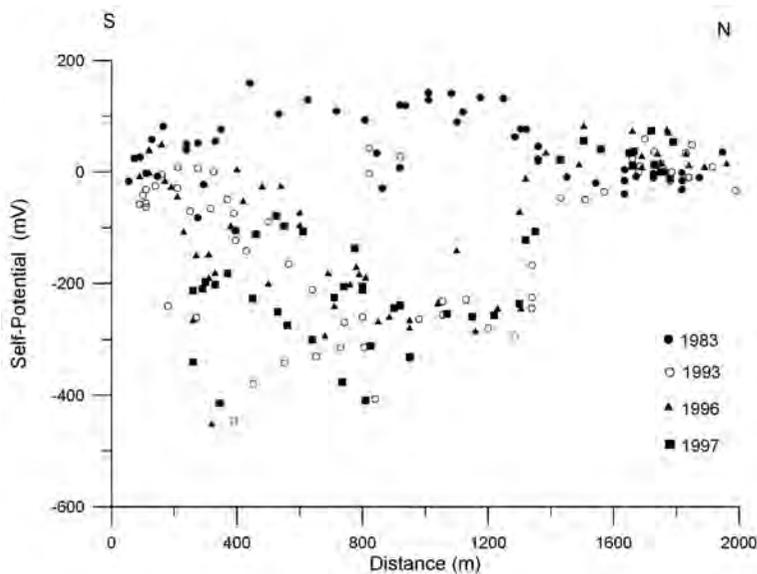
活動等の熱的活動の規模はそれほど変わらないものの, 雌阿寒岳には顕著な正異常はなく, それに対して有珠山や駒ヶ岳では山頂部に数百mVに達するような立派な正異常があり, その違いを概念的に示しています。熱水と異なり蒸気の流動はSPの異常をもたらさないので, 雌阿寒岳 (第1図の右側) では, 深部で気液分離した蒸気が上昇していると考えました。一方, 有珠山や駒ヶ岳 (第1図の左側) では浅部に火口原規模の熱水対流が存在し, 正異常を示す場所に対応して, その上昇部が存在すると論じています。近年においてはそのような分布において比抵抗が大きく影響していることが明らかになってきていますが (例えば, Onizawa *et al.*, 2009), このようにSPと熱水流動は密接に関係していると考えられてきました。ところが, 熱水が流動したときに生じたSPの変化を実際に体感したことがある人は少ないのではないのでしょうか。小論では, 地圏資源環境研究部門の石戸さんが



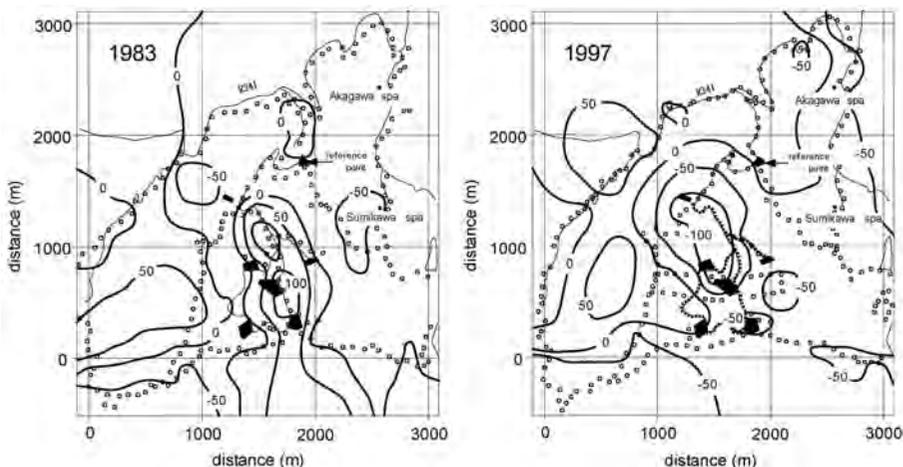
第1図 火山における熱水系の概念モデル。山頂部でSPの顕著な正異常が見られるタイプ (左側) と見られないタイプ (右側)。

1) 産総研 地質情報研究部門

キーワード: 自然電位, 経時変化, 熱水対流, 流動電位, 数値シミュレーション



第2図  
澄川地熱発電所周辺での自然電位測定結果の南北断面投影。



第3図  
澄川地熱発電所周辺での自然電位平面分布 (左: 1983年, 右: 1993-97年)。

中心になって進めてきた多くの研究のうち、特に筆者が関わった熱水の流動に伴うSPの時間変化に関するいくつかの結果についてこの機会にまとめておこうと思います。

**2. 地熱貯留層の変動に伴う変化**  
—秋田県 澄川地熱発電所周辺—

貯留層変動探査法ではモニタリング手法の開発を行ってきましたが、そのさきがけともなるべき観測に関わらせてもらいました。澄川地熱発電所は1995年に運開されましたが、それに先立つ1993年当時は既に生産井や注入井などを使用した長期噴気試験が始ま

っていました。そのような地熱地域でSPの分布観測を1993年から1997年にかけて行ったのです。発電所の敷地を含めた観測でしたので三菱マテリアルの関係者の方々にご協力をいただきながらの観測でした。同地域ではその約10年前にSP測定が行われていたので(菊地ほか, 1987)、それとの比較が主目的でした。私はまだ社会人になりたての頃で、学生時代は調査と言えば安宿での自炊だったので、食事つきの宿に泊まっての観測にとっても感激したものです。そして精力的に調査を行いました。その甲斐あってか測定結果には顕著な差が現れ(第2図)、小躍りしながら石戸さんのところへ報告しに行ったのを覚えています。しかし、残念ながら、それらは見かけのもので



第4図 ムトノフスキーの宿舎周辺の様子。



第5図 噴気試験の様子。

した。パイプラインなどの構造物の影響を受けていることが分かったのです (Matsushima *et al.*, 2000)。

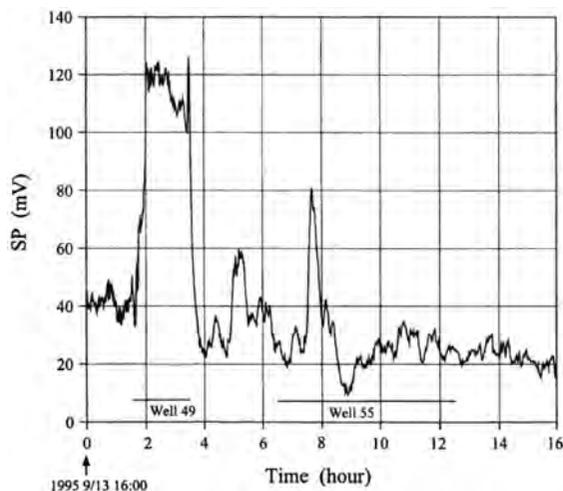
細かく測定したところ、おおむね20mより大きく距離を離せば、その影響が小さくなることが分かりました。そこで、影響を受けていると思われる測点を除いて描いたコンターを1983年のものと比較して示したのが第3図です。開発前は50mV程度の正異常を示していたところが、開発開始以降は-100mV程度に減少しているようです。しかしながら、測点が少なく、はっきりしたことは言えません。残念ながら、その後の観測を行っていないため中途半端な結果に終わってしまいましたが、地熱貯留層の変動をSPでも観測し得る可能性を示したものと評価できます。ただし、繰り返し測定による比較は注意深く行わなければならないという教訓をこの観測から得ました。

### 3. 噴気試験に伴うダイナミックな変化 —ロシア カムチャッカ半島—

カムチャッカ半島の州都ペトロパブロフスク・カムチャッキーから南へ約80kmのところにムトノフスキーという地熱地帯があります。石戸さん達につれられて、1995年にここを訪れました。あまり記憶が定かではありませんが、ペトロパブロフスク・カムチャッキーから、いかついトラックに現地の研究者と乗って現地に向かいました。途中、かつては軍の施設であったという、きれいな川の畔に温泉のプールなどがついた施設があり、そこで昼食を取ったりしました。ようやくたどり着いた現場は、周りにはいっさい人家のない山間にあり、とんでもない悪路を歩いていくしかないような、まさに陸の孤島でした。そこには作業員用の宿舎が

新旧2棟あり、私達はそのうちの(本当に)半分崩れかけて放棄されたような宿舎に滞在しました(第4図)。とても印象に残っているのは、人物画があちこちに掲げられており、ここに、画家が滞在して作業員の似顔絵を描いていたそうです。孤独との向かい合わせでいったい何を考えていたのでしょうか。宿舎の周りには、見たところ廃井のような井戸があちこちにあり、蒸気がモクモクと上昇していました。宿舎には温水が引かれ、暖房として利用されているほか、風呂もありました。ただしシャワーのノズルを開くと「シュー」と加熱蒸気が噴出してくるのには閉口しましたが、地熱地帯は広大で、地熱資源は豊富であろうことは容易に想像がつかしました。

前置きが長くなってしまいましたが、我々がここへ来た目的は、キャピラリーチューブという圧力センサを使って坑井内の圧力観測をすることでした(矢野ほか, 1996)。その際に、井戸のバルブを一時的に開放し、熱水混じり蒸気を噴出させることになっていました。私に与えられた役目は、電極とロガーを持参し熱水混じり蒸気の噴出に伴うSPの時間変化を観測することでした。そこで、井戸元と遠方に200mの間隔で電極を設置し、その間の電位差をデータロガーにて記録することとしました。熱水の流動に伴って、SPがいかなる変動をするか実験する機会を得たわけです。私は初めてのことであり、どのように熱水混じり蒸気を井戸から噴出させるのか興味津々でした。するとおもむろに、現地の研究者が坑口のハンドルを手動で回しバルブを開け始めました。ほどなく作業をしている研究者のすぐ脇の坑口から、ものすごい勢いで熱水混じり蒸気が噴出し始めたので、とてもびっくりしたものです(第5図)。



第6図 噴気試験 (Well49)に伴うSP変動.

このときのSPの記録を第6図に示します。熱水混じり蒸気の噴出と共におよそ80mV変動していることがはっきりと見てとれます。この現象は多孔質媒質中を熱水混じり蒸気が流動する際に、界面動電現象によって電荷が共に運ばれるために生じていると考えられます。パルプの開放によって地下の地熱貯留層の熱水混じり蒸気は、その深さに空けられたストレーナーを通して井戸に進入し地表から噴出します。そのときに、井戸に進入する地点において電場のソースが発生するわけです。1,000m以深と考えられる貯留層の深さに対して観測されたSP異常はとても大きいものでした。そこで、石戸さんの指導のもと、金属のケーシングからなる井戸を導体とみなし、電場のソースは井戸全体に均一に分布すると仮定することにより、観測した記録は無理なく説明することができたのです(松島ほか, 1997)。また、今回のように気液二相である場合、蒸気は電荷を運ばないので、電荷を運ぶ液相の割合がどの程度、電場のソースに影響しているか見極めることは難しく、その度合いを表す係数を導入しました。これらの考えは、その当時の私にはよくわかりませんでした。現在のSPの研究において最も関心の高い話題となっているものです。

伊豆大島の項で再度述べますが、近年の研究によって、多くの火山では、空隙に空気が含まれる、水に不飽和な地層が地表付近にはあることが分かってきました。従って、そのような場所でのSP現象を理解するためには、気液二相での定量化が重要になってく

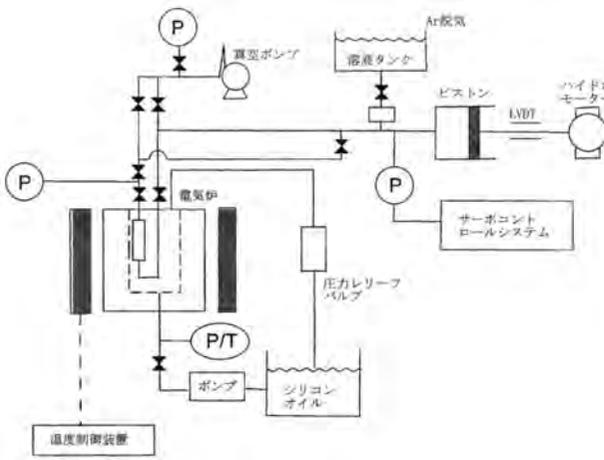
るのです。また、熱水変質により比抵抗が著しく小さくなるような地層が現れると顕著なSP異常が現れることが分かってきました。これは、先のケーシングの効果と同様です。いずれの現象も石戸さんが精力的にそのモデルを提案してきたことですが、既にこの頃から頭の中にあっただことが分かります。

#### 4. 室内実験で見られる制御された変化 —産総研 高圧実験装置—

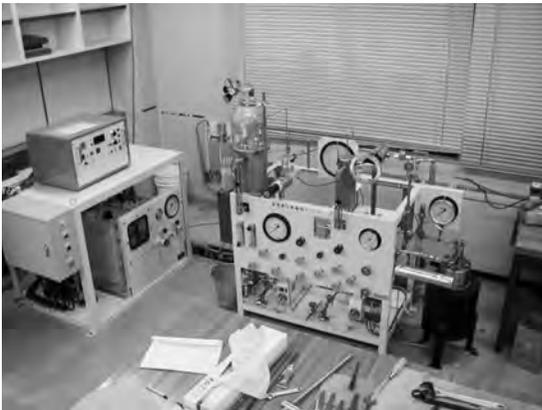
先に述べたように、SPの発生原因のひとつとされる流動電位現象は地下の流体の流れに伴って電荷が運ばれることによって生じる現象です。その場合、流体の流れの圧力差に比例した電位差が発生することになります。地表で観測されるSPから、地下の流体流動を把握しようとする場合、圧力差と電位差を結びつける流動電位係数と呼ばれるカップリング係数が重要となってきます。ところが、火山や地熱地帯でしばしば観測されるような100℃より高温な状態における流動電位係数はよく分かっていないのが現状です。そこで、実験装置を作成し、そのような高温でかつ地下深部を想定した高圧下での流動電位を計測することとなりました。

開発した装置の概要を第7図に、写真を第8図に示します。この装置の特徴は、単に試料を高温高圧状態にするだけでなく、その状態で試料内に流体を流動させるところにあります。装置は主に、試料のホルダーと電極、電気炉、封圧を加えるためのポンプと配管系、試料に間隙水を流すためのポンプと配管系、試料内の流動を制御するためのコントローラーからなります。封圧を加えた試料内で一定の化学成分の間隙水を流動させ、そのとき発生する電位差を試料の両端に設置した電極で測定します。岩石の円柱形試料(直径3cm, 長さ5cm)はテフロンチューブで覆われ、200気圧程度まで封圧を加えることと、350℃程度まで昇温することが可能です。測定手順としては、化学成分を調整した間隙水を試料に導入し、間隙水圧と封圧を設定します。その後昇温し、設定する温度になったら、試料の下流側のバルブを閉じ、上流側に一定周期の任意波形を加えます。そのときに、試料両端に発生する圧力と電位差を測定するわけです。

流動電位係数は電位差を圧力差で除することによ

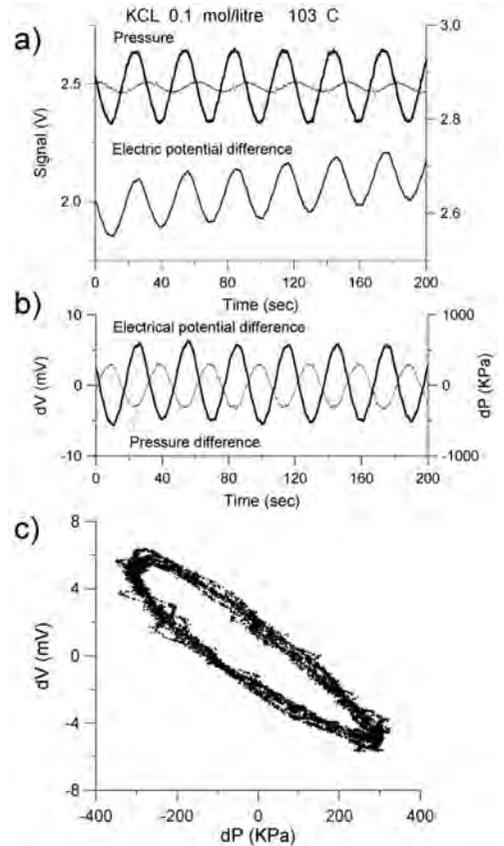


第7図 高温高压実験装置の概要.



第8図 高温高压実験装置の様子.

って求められます。しかしながら、実際の実験においては、間隙水の導入がうまくいかなかったり、封圧と間隙圧のバランスが悪くてサンプルやチューブが破損したりとなかなかうまく運びませんでした。ある晩、疲れてしまった私が居室へ戻って休んでいると石戸さんから電話がかかってきました。めずらしく感情のこもった声で、「期待どおりの波形を書いているので見に来てください」というものでした。そのときのものではありませんが、同様なものを第9図に示します。これは花崗岩のサンプルに対し、封圧を80気圧、間隙水压を50気圧にし、常温から200℃までの範囲で設定した温度値のもとで、振幅±3気圧の正弦波を試料に与えた場合の測定結果の一例です。間隙水は0.001mol/lのKCL溶液で、温度を103℃にしてい



第9図 高温高压実験装置による測定結果. a) 上段は上流側圧力(太線)と下流側圧力(細線), 下段は試料両端の電位差, b) 圧力差(太線)とトレンドを除去した電位差(細線), c) 電位差(縦軸)と圧力差(横軸)の関係.

す。

第9図aは上段に試料の上流側(太い実線)と下流側(細い実線)の圧力を、下段に試料の両端の電極で測定した電位差を示します。上流側の圧力と下流側の圧力には位相のずれが見られますが、これはまさに、透水性のあまりよくない試料中をその圧力差に従って流体が流動していることを意味します。おおよそ両者の差が最大になるところで電位差が大きくなっていることが分かります。つまり流れに伴って発生している流動電位の効果を見ているのです。当たり前のことかもしれませんが、実際にそれが生じている様子を目の当たりにしたときには感動しました。

第9図bには下流側の圧力から上流側の圧力を差し引いた圧力差(太い実線)と、トレンド成分を除去し

た電位差(細い実線)をあわせて示します。このようにして得られた圧力差と電位差の関係を示したのが第9図cです。周期的に変動する両者には若干の位相のずれがあるためリサージュ図形になっています。従って、厳密に両者の関係を表すのは難しいのですが、ここでは一次直線をあてはめ、その傾きをもって電位差と圧力差の比、つまりカップリング係数である流動電位係数としました。このようにして、各溶液についていろいろな温度ごとの流動電位係数を求めました(Tosha *et al.*, 2003 ; Ishido and Matsushima, 2007)。このような実験はいまだ充分に行われているとは言えず、火山や地熱地帯など高温の場所で発生している自然電位現象をよりよく理解するためには今後進めていかねばならないものです。

## 5. 火山の噴火現象の解明に向けて

### — 東京都 伊豆大島 —

伊豆大島では石戸さんを中心にして1989年から2000年まで計7回、三原山を東西に横切る約8kmの測線でSP分布を測定してきました。筆者もそのうちの数回に参加しています。当時の測定方法は、中心に固定の電極を設け、その両側に電線を延ばしつつ移動の電極を設置し、その電極間の電位差を中心にいる石戸さんが一歩も動かずに測定するというものでした。電極や電線を持って移動する我々はトランシーバーを携え、石戸さんの「はい、移動」という号令で走り回っていたのです。例えば悪いですが、これでは石戸さんは「コマンダー」で我々は「ソルジャー」だ、とそのシステムの問題点をふざけながら指摘していたものです。そのソルジャーには、現在の地圏資源環境研究部門長の矢野さんなども含まれていました。

この伊豆大島での観測を通して、いくつかの重要な問題提起がなされてきました。そのひとつがいわゆるW型プロファイルと呼ばれるもので、これについては本誌前回の特集号でふれられています(石戸・當舎, 2010 ; 相澤, 2010)。まず山腹では標高と共に自然電位の値が下がる地形効果を示していました。これは雨水の地下への浸透によるものです(例えば, Onizawa *et al.*, 2009)。ところが山頂部に行くに従いその傾向はなくなり、逆に標高と共にSPの値が高くなります。そのような分布を示すことからW型プロファイルと呼ばれています。その高くなる原因について

は、既に述べたように熱水の上昇がまず考えられましたが、その他に、高温のガスが上昇することによって雨水の浸透が遮られ、それによって地形効果が打ち消される可能性が考えられました(Ishido *et al.*, 1997)。しかしその後、数値シミュレーションによる詳細な検討によって、それだけでは不十分であり、低い比抵抗の構造があることによって現れていると考えられるようになりました(Ishido, 2004)。

一般的に、SPは深くなるにつれて高くなりますが、山頂部の比較的浅いところから深いところまで連続する比抵抗の低い構造があるとその部分の電位が深部の高い電位に近づくため、地表では相対的に周囲に比べて電位が高くなるのです。火山ガスが上昇するような噴気地帯では岩石が変質することによって極めて低い比抵抗になることが知られています(例えば, 高倉, 2000)。また、マグマそのものも低い比抵抗を示します。そのような変質帯やマグマの存在によって、山頂部では高いSPを示すと考えられたのです。そして、このようなW型のプロファイルはその他の火山でもよく見られ、その原因として比抵抗の分布が注意深く考えられるようになってきました(Aizawa *et al.*, 2009)。

もうひとつの重要な問題提起はいわゆる不飽和層の存在です。伊豆大島では地下水位が海水準に近く、その上には空隙が水で不飽和な地層が厚く堆積しています。そのような場所では、気液二相の流れとなっています。従来、流動電位は液単相の場合について主に考察されてきましたが、その結果をそのまま採用するわけにはいきません。なぜなら気相は電荷を運ばないと考えられているからです。そこで、液相の割合が流動電位に及ぼす影響を示すパラメータを導入し、そのパラメータがどのような形を持つかが伊豆大島を舞台に議論されてきました(石戸, 2004 ; Onizawa *et al.*, 2009)。気液二相の状態は、地下のマグマの周辺でも生じていると考えられ、マグマや火山ガスの上昇によって生じるSPの変動を考察する上で極めて重要な情報となります。

これらの点を踏まえた上で、伊豆大島では今後の火山活動の活発化に備えて、固定点を設けてSPの連続観測を行っています(第10図)。この観測は、地質情報研究部門の重点研究課題の一環として行っています。測線長はおよそ3kmですが、国立公園内であるため電線は埋設することになっています。この作業

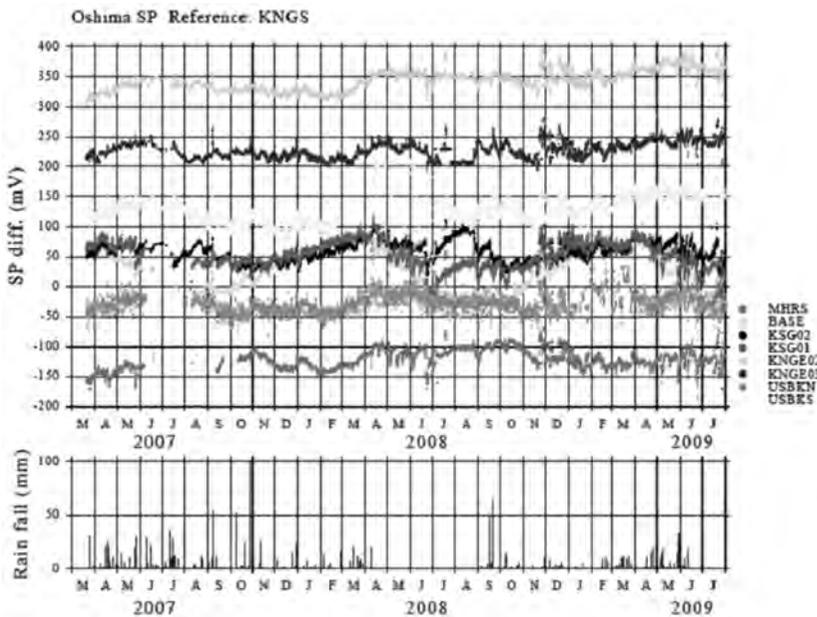


第10図 櫛形山から眺めた伊豆大島山頂火口原南側の様子。丸印は電極の位置(黒丸ではロガー等も設置), 点線は電線の位置を示す。図には表れないが, 南側の裏砂漠まで測線は延びている。



第11図 雷の被害にあった黒焦げのロガーの様子。

はいろいろな方に手伝っていただき全て手作業で行いました。手伝っていただいた地圏資源環境研究部門の高倉さん曰く「地調に入ってからいろいろやってきたが、一番辛い仕事だった」ほどです。伊豆大島は雷が頻繁に起きるところであるため、火山観測が難しいところです。我々の機械も被害にあっています(第11図)。このときはプラスチックの中継ボックスが粉々になったり、ケーブルが部分的に溶けたり、写真でご覧になれるようにロガーが真っ黒になりました。しかし奇跡的にその後回復しました。観測システムは主に地圏資源環境研究部門の西さんが担当しておりますが、長期的に安定した観測システムの作成や電極の選定、埋設方法などには、石戸さんが主導して



第12図 伊豆大島における各固定点におけるSP連続測定結果。下段は雨量。

きた貯留層変動探査法におけるSPの観測で培われた技術が大いに役立っています。観測は2006年より始め、現在までに季節的な変化や降雨に伴う変動は見られるものの、火山活動に伴うような変動は見られません(第12図)。しかし、今後、火山活動の活発化に伴い、様々な信号が現れ、その解析を通じてSPの発生メカニズムや火山活動そのものの理解が深まると期待されます。

## 6. おわりに

澄川でのSP測定のことを書きましたが、実は当時の状況はあまりよく覚えていません。年を数えてみたら17年も前のことになるのです。ここに書いた研究の多くは地熱のプロジェクトに関わるものですが、そのプロジェクトの名前をすぐに思い出すことはできません。しかし、いずれも当時、関わった研究者達にとっては希望に満ちたプロジェクトであったらうと思います。サンシャイン計画と名づけられた、長年続けられてきた地熱のプロジェクト体制は既に終了しましたが、それに多少なりとも関わったものとして、全体にわたる研究の総括をする機会がないのは残念なことです。筆者がサンシャイン計画本部へ併任していた当時、地熱は実用化されたので研究開発の対象とはならないという言葉をよく聞きましたが、そうではないと思います。しかし、では今、何を研究するべきでしょうか。地熱が有望な代替エネルギーであることは間違いありません。今後、さらにその開発を効果的に進めていくためには、プロジェクトが終わったとしても常に考えていかねばならないことのように思います。

異論は多々あると思いますが、長期にわたり継続してきた地熱の研究の成果として、筆者が上げたいベスト3は葛根田における高温花崗岩体への掘削とその解明、電磁探査法の解析および測定手法の確立、そしてSP現象を含む熱水流動シミュレータの開発です。このシミュレーション技術の開発は石戸さんが長年にわたり携わってきたものであり、その研究業績の一部を凝縮したものと言えます。筆者は現在、火山の研究現場にいますが、火山現象の解明にこれらの研究成果は大いに役立ち、次々と最新の研究成果を生み出す原動力になっていることを記しておわりの言葉とさせていただきます。

## 引用文献

- Aizawa, K., Ogawa, Y. and Ishido, T. (2009) : Groundwater flow and hydrothermal systems within volcanic edifice: Delineation by electric self-potential and magnetotellurics, *Jour. of Geophys. Res.*, 114, B01208, doi: 10.1029/2008JB005910.
- 相澤広記 (2010) : 電磁気観測で推定する火山体内部の地下水流動, *地質ニュース*, 665, 46-52.
- 石戸経士 (1981) : 地熱水対流に伴う流動電位-地熱地域における自然電位異常の1つのメカニズムとして-, *日本地熱学会誌*, 3, 87-100.
- Ishido, T., Kikuchi, T., Matsushima, N., Yano, Y., Nakano, S., Sugihara, M., Toshi, T., Takakura, S. and Ogaya, Y. (1997) : Repeated self-potential profiling of Izu-Oshima volcano, Japan, *J. Geomag. Geoelectr.*, 49, 1267-1278.
- 石戸経士 (2004) : 火山活動に伴うSP変動, *CONDUCTION ANOMALY* 研究会論文集, 33-37.
- Ishido, T. (2004) : Electrokinetic mechanism for the "W"-shaped self-potential profile on volcanoes, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L15616, doi:10.1029/2004GL020409.
- Ishido, T. and Matsushima, N. (2007) : Streaming potential measured for an intact granite sample at temperatures to 200°C, *Proc. 32<sup>nd</sup> Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University.
- 石戸経士・当舎利行 (2010) : 貯留層変動探査法の目指したこと, *地質ニュース*, 665, 7-11.
- 菊地恒夫・杉原光彦・石戸経士 (1987) : 八幡平・焼山周辺の自然電位, *地質調査所報告* 266号, 533-542.
- 松島喜雄・岡崎紀俊・市川隆一・道脇正則・西田泰典 (1994) : 雌阿寒岳における地球電磁気および地温調査, *北海道大学地球物理学研究報告*, 57, 1-10.
- 松島喜雄・当舎利行・石戸経士・I. Delemen・A. Kiryukhin (1997) : 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, *日本地熱学会誌*, 19, 157-164.
- Matsushima, N., Kikuchi, T., Toshi, T., Nakao, S., Yano, Y., Ishido, T., Hatakeyama, K. and Arikai, K. (2000) : Repeated SP measurements at the Sumikawa geothermal field, Japan. *Proceedings of the world geothermal congress*, 2000, 2725-2730.
- Onizawa, S., Matsushima, N., Ishido, T., Hase, H., Takakura, S. and Nishi, Y. (2009) : Self-potential distribution on active volcano controlled by three-dimensional resistivity structure in Izu-Oshima, Japan, *Geophys. J. Int.*, 178, 1164-1181.
- 高倉伸一 (2000) : 粘土鉱物を含む試料の比抵抗と物理・化学・力学的特性との関係, *物理探査*, 53, 415-426.
- Toshi, T., Matsushima, N. and Ishido, T. (2003) : Zeta potential measured for an intact granite sample at temperatures to 200°C, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1295, doi:10.1029/2002GL016608.
- 矢野雄策・中尾信典・松島喜雄・当舎利行・石戸経士・A.V. Kiryukhin・I. Delemen・M.D. Lesnykh・A.Y. Polyakov・D.G. Zorin (1996) : カムチャッカ半島ムトノフスキー地熱地域の噴気試験と長期圧力観測について, *日本地熱学会平成8年度学術講演会講演要旨集*, B44.

MATSUSHIMA Nobuo (2010) : An introduction to the studies about the temporal variation of Self-potential phenomena.

<受付: 2010年7月27日>