

草津白根火山における高密度電気探査・自然電位調査

橋本武志¹・茂木透¹・西田泰典¹

小川康雄²・平林順一²

及川光弘²・斎藤政城²・水橋正英²

氏原直人³・ヌルハッサン³・若林 亨³

1：北海道大学大学院理学研究科

2：東京工業大学火山流体研究センター

3：東京工業大学地球惑星科学専攻

High-density electrical sounding and self-potential profiling at Kusatsu-Shirane volcano

T. Hashimoto¹, T. Mogi¹, Y. Nishida¹, Y. Ogawa²

J. Hirabayashi², M. Oikawa², M. Saito², S. Mizuhashi²

N. Ujihara³, Nurhasan³, T. Wakabayashi³

1: Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido Univ.

2: Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

3: Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

1. はじめに

草津白根火山は、群馬県と長野県の境界付近に位置する安山岩～デイサイト質の第四紀火山である（宇都他, 1983）。この火山では 1805 年以降少なくとも 14 回の噴火が記録されており、我が国有数の活動的火山といえる。ただし、有史時代における草津白根火山の活動は、湯釜・水釜火口等の白根火砕丘周辺での水蒸気爆発に限られており、溶岩流や火砕流を伴う大規模な噴火はみられない（宇都他, 1983）。山頂火口には強酸性の火口湖（湯釜）が存在し、山頂部および山腹域に点在する噴気活動は現在もなおさかんである。地下には熱水流動系が発達して山麓部の温泉に熱と流体を供給していると考えられている。我々は、この草津白根山において、火山噴火予知計画による第 4 回の集中総合観測の一環として、高密度電気探査および自然電位調査を実施した。調査期間は 2003 年 9 月 17 日から 19 日である。調査域および調査測線を第 1 図に示す。今回の調査で我々が目的としたところは以下の通りである。

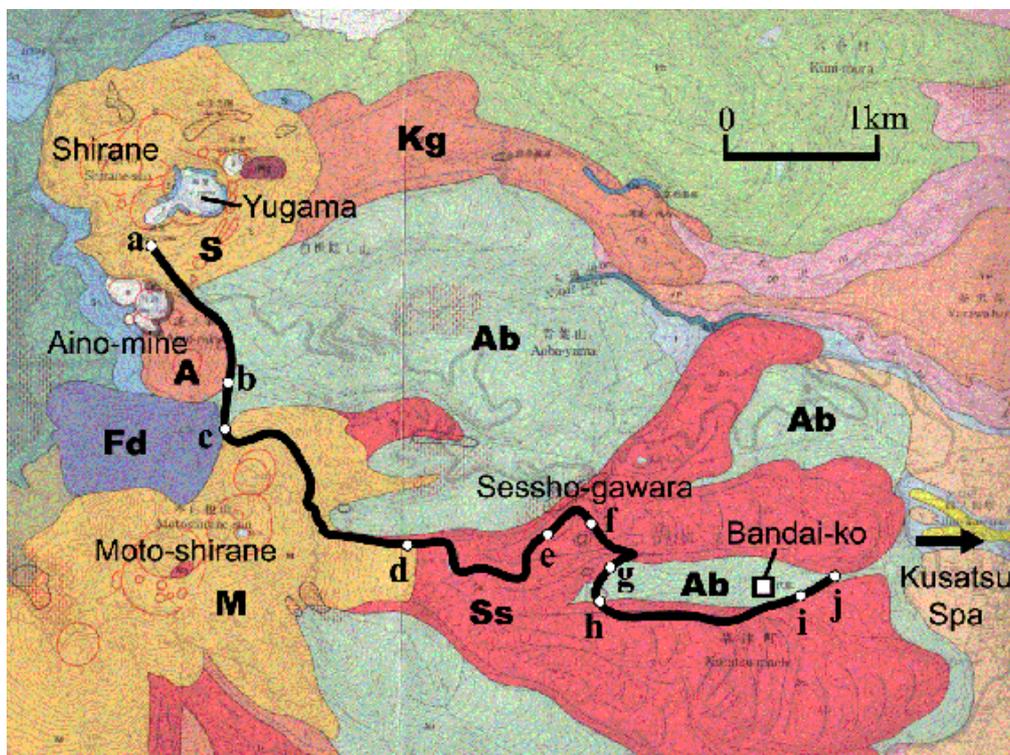
(1) 高密度電気探査

湯釜火口北東～東斜面では、これまでの観測から、熱異常・負の重力異常・火山性地震の震源の集中・熱消磁源など各種のソースが近い位置に求まっている。前回の集中総合観測（1992 年実施）では、桂他（1996）による CSAMT 法および TDEM 法による比抵抗調査も行われており、やはり湯釜火口の北東側の深さ 2 km に 0.1 Ω m 程度の低比抵抗中心が報告されている。また、最近では、山頂火口周辺域で広帯域 MT 法を用いた比抵抗の稠密調査（Tank et al., 2002）が行われており、予察的な 2 次元構造解析の結果からは、複数の測線において 300~500 m 程度の深

さに数 Ω m の低比抵抗層が明瞭に確認できる．ただし，これらの調査では，手法上の特性から，浅部構造（数百 m 以浅）に対する分解能は十分でなく，こうした低比抵抗層と湯釜北東斜面の優勢噴気域（通称「北側噴気」と呼称されている）の存在との関係は必ずしも明らかではない．同様のことは他の物理観測についても言え，やや広域的な構造・異常と，噴気周辺の浅部構造との関連を明らかにすることがひとつの課題となっている．今回の調査では，北側噴気地帯の浅部構造を高密度電気探査によって明らかにし，地質構造との関係や噴気の放出機構について考察する．なお，今回の調査では，湯釜北東斜面の他に，殺生河原噴気地帯においても高密度電気探査を実施した．殺生河原では，従来から東工大グループによって種々の地球化学的研究が行われており，地下の流体供給系に関する議論がある．噴気地帯直下の詳細な比抵抗構造を知ることで，地球化学モデルに何らかの拘束条件が与えられることを期待した．また，「北側噴気」における比抵抗構造との比較において，共通する特徴があるかどうかを見ることも目的のひとつである．

(2) 自然電位調査

草津白根山の山頂域では，1994 年に山崎他（1997）が白根火砕丘・湯釜周辺域の自然電位分布調査を行っている．それによれば，草津白根山頂部には，他の多くの活動的火山で報告されているような顕著な高電位異常が認められない．地下熱水系が発達していると考えられている草津白根火山で明瞭な自然電位異常が見られない原因として，山崎他（1997）は，山頂部が低比抵抗であるためではないかと推測した．この考えを検証するため，山頂部を含む，より長い測線での電位分布を調べることにした．



第 1 図： 高密度電気探査の調査域（おおよび）と自然電位調査測線（a-j）．地質図は，宇都他（1983）による．図中の記号は，S: 白根火砕丘堆積物，A: 逢ノ峰火砕丘堆積物，M: 本白根火砕丘堆積物，Fd: 双子山溶岩円頂丘，Ss: 殺生溶岩，Ab: 青葉溶岩，Kg: 香草溶岩，を表す．

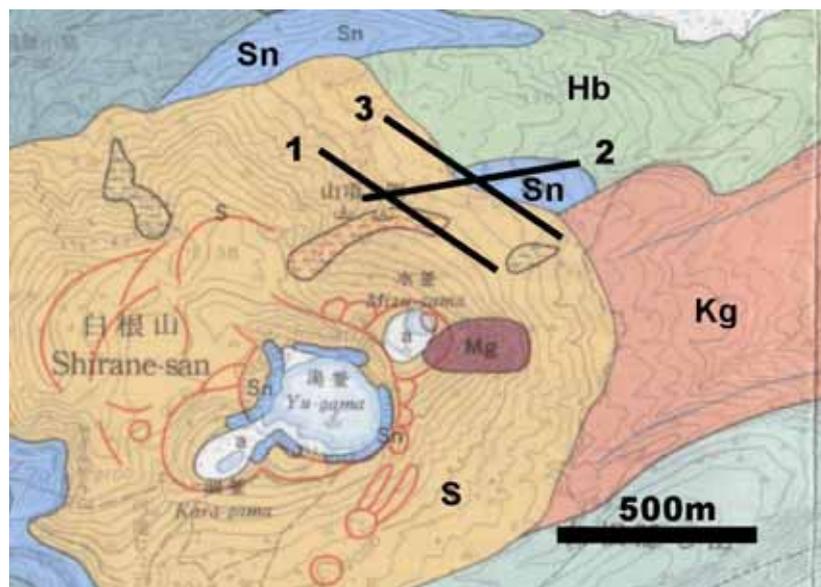
2. 高密度電気探査

2.1 測定の概要

第2図に、湯釜火口北東斜面における高密度電気探査の測線位置（第1図中の領域周辺）を示す。この地域には従来から噴気活動（通称「北側噴気」）があり、谷沿いに変質域が分布している。今回の調査では、まず測線1として、等高線にほぼ沿う北西-南東方向を設定し、優勢な噴気をその中央部に配した。2次元構造を仮定した構造解析を行うことを想定したため、測線3を測線1に平行に配置し、構造に連続性があるかどうかを確認することとした。なお、測線3の中央部は、測線1上の噴気を谷沿いに延長した位置にあたり、現在では噴気活動はないものの、表層に熱水変質が認められる。さらに、測線2はこれら両測線に斜交する形で、やや斜度のある東西方向に配置した。測線2は、優勢噴気からの距離に応じて構造にどのような変化があるかを調べようとしたものである。

宇都他（1983）の火山地質図によれば、測線1は、白根火砕丘堆積物（S）の上に位置している。測線3は、同じく白根火砕丘堆積物の北東縁を通過しており、その中央部はわずかに白根溶岩（Sn）を通過している。白根溶岩の下位には平兵衛池溶岩（Hb）があり、その南東側には香草溶岩（Kg）が流れている。白根火砕丘堆積物は、これらの溶岩を覆っている。

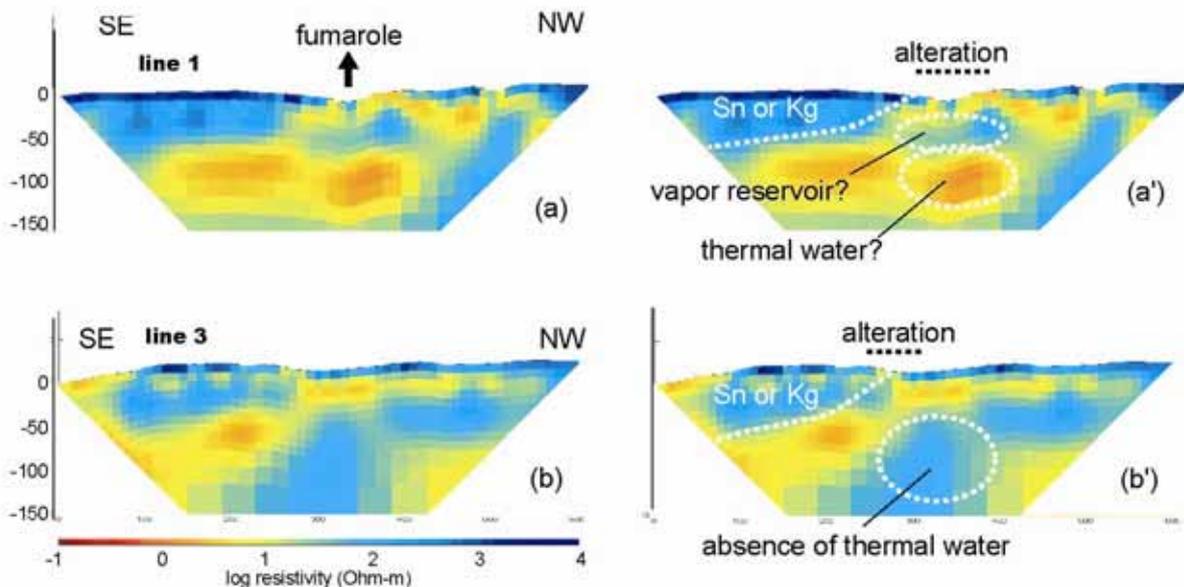
測線1~3の総延長はいずれも600mとし、最小電極間隔は10mとした。測定方法は、ウェンナー電極配置とエルトラン電極配置による交替直流を用いた比抵抗法である。最小電極間隔10mから最大電極間隔190mまでが制御用パソコンにより自動選択され、4本の電極系が測線上を平行移動する。このような測定方法により、各測線の中央部で150m程度の探査深度と10m程度の空間分解能を得ることができる。送信電圧は100~600Vとした。送信電流は電極（真鍮棒）の接地抵抗に依存し、今回の測定では数10~100mA程度であった。なお、比抵抗測定中に測角・測距測定を行い、測線に沿った地形標高を求めた。これを用いて地形を考慮した2次元構造解析を行った。



第2図： 湯釜北東斜面における高密度電気探査測線（1~3）。地質図は宇都他（1983）による。Hb: 平兵衛池溶岩, Sn: 白根溶岩, Kg: 香草溶岩, S: 白根火砕丘。

2.2 測定結果とその解釈

内田 (1993) の2次元インバージョンによって 測線 1~3 の比抵抗構造を推定した 第3 図に、測線 1 および 3 の推定比抵抗断面を示す。両測線とも、表層の 10 m 程度は数 k m の高比抵抗媒質に覆われているが、地表に変質が認められる部分では数 10 m を示している。深さ 50 m 程度までの部分に注目すると、いずれの測線でも、南東側に数 k m の高抵抗域が存在するのに対し、北西側では比抵抗が低くなっている。さらに、深度 50~150 m の部分に着目すると、南東側で数 m~数 10 m 程度の低比抵抗域が認められる。このように、両測線は大局的には類似の構造を示しており、斜面の上下で構造の連続性が確認できる。すなわち大局的には2次元構造の仮定がほぼ成り立っていると考えて良い。一方、両測線の顕著な違いは中央部に表れている。測線 1 では、噴気の直下約 50 m 付近に数 100~数 k m のやや高比抵抗の領域があり、その下位には数 m 程度の低比抵抗域が認められる。これに対し、噴気の出ていない測線 3 では、中央部の直下はむしろ低比抵抗であり、その下位には数 k m の高比抵抗が分布している。表層地質および噴気・変質帯の分布を考慮すると、こうした比抵抗分布の特徴は以下のように解釈できる。

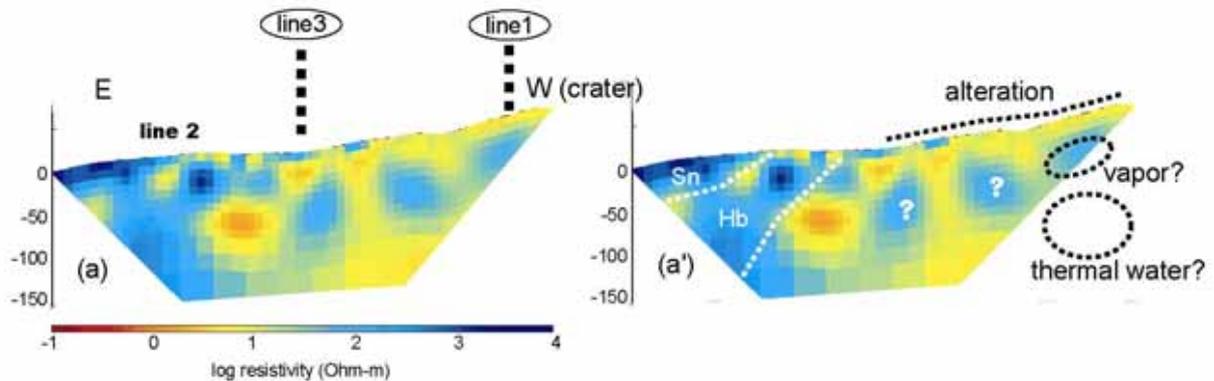


第3図： 測線 1 および 3 の推定比抵抗断面（左）とその解釈図（右）。Sn および Kg はそれぞれ白根溶岩，香草溶岩を意味する。各断面は，山麓側から山頂側を見た表示になっていることに注意。

まず、変質域以外の表層 10 m 程度を覆っている高比抵抗は、白根火砕丘堆積物であろうと推測される。この火砕丘堆積物は比較的大きな火山礫や岩塊を含んでおり、透水性が高いため水が保持されず高比抵抗を示していると考えられる。一方、変質帯の比抵抗が低いことは従来からよく知られた事実であり、その存在位置から考えても観察事実との矛盾はない。次に、その下位、両測線の南東側に共通してみられる厚さ 50 m 程度の高比抵抗体（数 k m）は、地質層序から考えて、白根溶岩 (Sn) もしくは香草溶岩 (Kg) であろうと推定される（第3図の右側の解釈図

を参照)。両測線における比抵抗構造の違いは、噴気の有無との関連において次のように解釈することができる。測線 1 には、噴気直下の深さ約 50 m と約 100 m にそれぞれ直径 100 m 程度の高比抵抗域と低比抵抗域が上下に連なって存在するが、これらはそれぞれ蒸気溜まりと熱水溜まりに対応しており、地表の噴気口へ流体を供給する一連のシステムであると推測される。すなわち、深さ約 100 m に蓄積された熱水が、深さ約 50 m で減圧に伴って蒸気相に変わり、噴気口から放出されていると考えられる。北側噴気直下のこうした構造モデルは、以下の観測事実からも支持される。北側噴気の温度は 101~105 であり(平林・大場, 1996)、過熱蒸気にはなっていないものの、この地点の沸点よりはやや高い。このことから、この噴気は少なくとも地表付近で気化したものではないことが推測される。鈴木(2002)は、北側噴気の噴気圧振動を管の共鳴モデルで解釈し、その長さは 43 m(両端開口の場合)もしくは 21.5 m(一端開口の場合)であると述べている。彼のモデルによれば、共鳴管の下端には、振動の励起源および圧力振動伝達速度の不連続面が存在することが示唆されており、不連続面としては気液の境界面、すなわち液相の沸騰開始深度を想定している。このモデルは、共鳴体の形状はともかく、噴気の直下に蒸気相(あるいは気液 2 相)で満たされた空間が存在するという意味では我々の電気探査から推定されるものと調和的である。一方、噴気のない測線 3 の中央部にはこのような構造は認められず、測線中央部はむしろ高比抵抗となっている。これは、測線 1 にみられたような噴気に伴う流体供給系が測線 3 の直下には存在しないことを反映したものである。

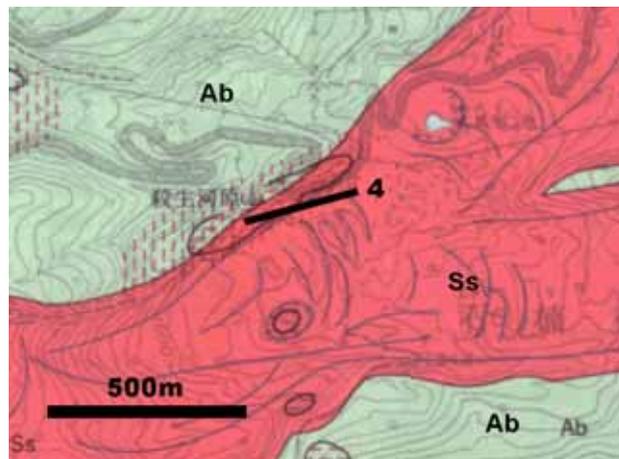
次に、上記測線 1 および 3 に斜交する測線 2 について述べる。第 4 図に推定比抵抗断面を示す。この測線の大傾向として、山頂側(画面右側)で低比抵抗、山麓側(画面左側)で高比抵抗となっていることが指摘できる。このことは、山頂側に変質帯が広がっていることと調和的である。断面図の山頂側半面に注目すると、数 m の低比抵抗の中に、100 m 程度の相対的高比抵抗域がパッチ状に 3 箇所認められる。山麓側半面に顕著な高比抵抗は、数 k m~10 k m 程度を示し、地質図との対比から考えて、白根溶岩(Sn)およびその下位にある平兵衛池溶岩(Hb)に対応する可能性が高い。比抵抗値も、先に述べた測線 1 および 3 において推定された溶岩流のそれと一致しており、矛盾しない。測線 1 は測線 2 の断面図では右端付近に位置しているため、測線 1 の中央部で見られた構造のうち、蒸気溜まりに対応すると考えた高比抵抗(パッチ状の高比抵抗のひとつ)がこの測線でも認められる。下位の低比抵抗は検出領域の外にあり、この測定では捉えられていない。これ以外の 2 つの高比抵抗パッチについてはその実体は明らかではないが、ひとつの解釈は、地表に噴気として出現していない蒸気溜まりの存在である。



第4図： 測線2の推定比抵抗断面（左）とその解釈図（右）. SnおよびHbはそれぞれ白根溶岩および平兵衛池溶岩を意味する．

2.3 殺生河原における測定

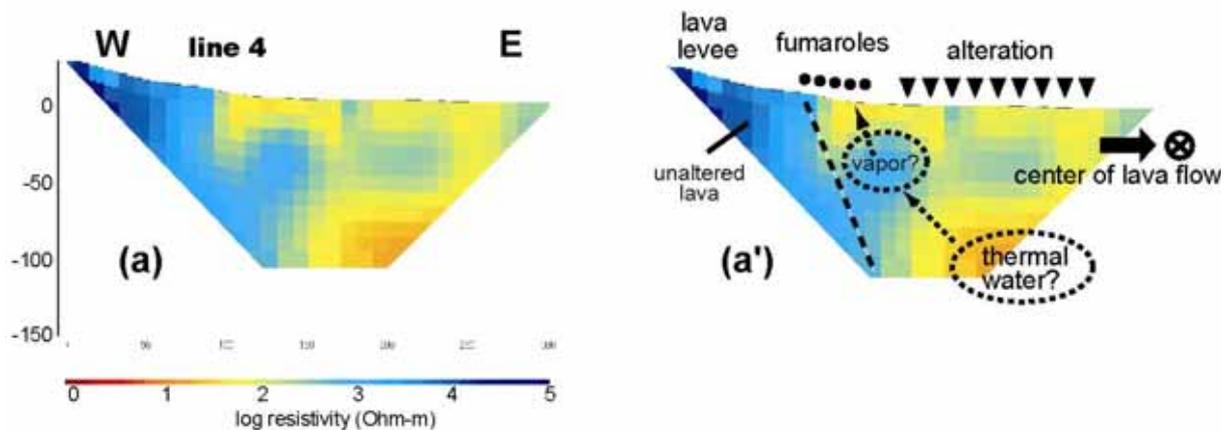
今回の調査では、北側噴気周辺域の測定とは別に、殺生河原噴気地帯においても高密度電気探査を実施した．第5図に測線の位置を示す．測定方法は、先述の湯釜北東斜面におけるものと同様であるが、地形的な制約から、測線長は300mとした．宇都他（1983）の地質図によれば、この地域には青葉溶岩（Ab）の上位に殺生溶岩（Ss）が流れており、現在殺生河原と呼称されている噴気地帯は、この殺生溶岩と青葉溶岩の境界部にあたる（第5図参照）．殺生溶岩の境界部では溶岩堤防（溶岩流の冷却過程において、流れの周縁部に形成される堤防様の構造）が形成されており、噴気は、この溶岩堤防のとりつき付近に顕著である．測線の東側（溶岩流の中軸に近い側）では、噴気活動に伴って変質を受けた細粒の砂層が地表を覆っている．我々の測線は、この変質域から溶岩堤防の斜面中腹までの範囲を含んでいる．



第5図：殺生河原噴気地帯における高密度電気探査測線（測線4）．地質図は宇都他（1983）による．Ab：青葉溶岩，Ss：殺生溶岩．

第6図に、2次元インバージョンにより推定した比抵抗断面（a）およびその解釈図（a'）を示す．一見して、測線の東西で顕著な比抵抗のコントラストがあることがわかる．西側の溶岩堤防では、数k m～数10k mの高比抵抗を示すのに対し、東側の変質域では10~100 mと低比

抵抗である。また、西側の深さ 100 m 程度にはもっとも比抵抗の低い領域があり、数 m を示している。このような比抵抗構造は、溶岩堤防の形成過程を考えれば次のように解釈することが可能である。溶岩堤防は、溶岩流の周縁部が中軸部よりも早く固結することにより形成される。中軸側（断面図の右側）では未固結の溶岩が下流（紙面に向かう方向）に流されるため、溶岩堤防との境界部にはシアが生じ、必然的に破断面が形成されるはずである（第 6 図 (a) の破線）。このような構造をもつ殺生溶岩を通過して噴気が地表にもたらされる場合、選択的に溶岩堤防の破断面付近を通ってくることは想像に難くない。測線東側の深さ 100 m 付近にみられる低比抵抗域を熱水溜まりであると考えれば、破断面である比抵抗境界に沿って数 k m の蒸気溜まりがあり、その上部に表層の低比抵抗を伴って噴気が出現していると推定することができる。こうした（熱水溜まり - 蒸気溜まり - 噴気）の系は、先述の「北側噴気」域で推定したものと類似しており、比較的低温の噴気域に共通する構造である可能性がある。

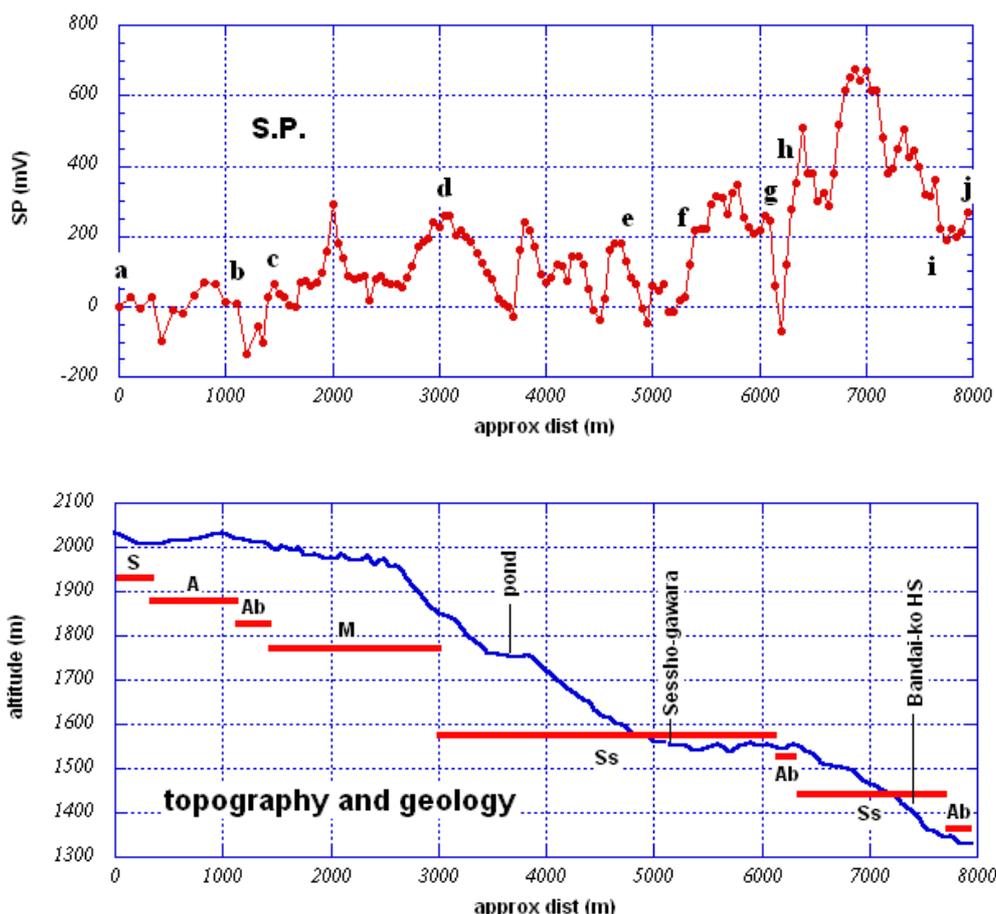


第 6 図： 測線 4 の推定比抵抗断面（左）と解釈図（右）。

3. 自然電位調査

草津白根火山では、1994 年に山崎他 (1997) による白根火砕丘・湯釜周辺域の調査報告がある。彼らの報告によれば、近年の活動中心である湯釜周辺域には顕著な自然電位の異常は確認されていない。一方、湯釜火口には強酸性の火口湖が存在し、そこには数 ton/day の地熱流体が供給されていることが明らかにされている (Ohba et al., 1994)。また、草津白根火山が周辺地域の温泉水の熱源となっていることから、山体内部には大規模な熱水系が発達していることが伺い知れる。にもかかわらず、こうした地域で顕著な自然電位異常が観測されない原因として、山崎他 (1997) は、山体の電気比抵抗が極めて低い (桂他, 1996) ためではないかと推測している。

今回の調査では、湯釜火口域から草津温泉方面にかけてほぼ東南東方向にのびる登山道沿いに総延長約 8 km の測線を設定し、山崎他 (1997) よりも広範囲の自然電位分布を調べることを主目的とした。調査測線は、宇都他 (1983) の地質図に重ねて第 1 図に示した。測線は、湯釜火口南西部から逢ノ峰火砕丘および本白根火砕丘の東縁を經由して殺生河原噴気地帯を抜け、草津温泉の泉源のひとつである万代鉦付近に至っている。この測線上での優勢な噴気もしくは熱水活動は、湯釜火口・殺生河原・万代鉦にある。



第7図： 山頂部から殺生河原を経て万代鉱に至る測線に沿った自然電位分布(上)と、地形標高(下). 下図の横棒と記号は、地質図(第1図参照)中の表層地質に対応する .S: 白根火砕丘堆積物, A: 逢ノ峰火砕丘堆積物, Ab: 青葉溶岩, M: 本白根火砕丘堆積物, Ss: 殺生溶岩 .

第7図に、測線沿いの自然電位プロフィールと地形標高をあわせて示す。観測された電位分布の特徴は次のように要約できる。(1) 近年の活動中心である湯釜火口を中心とした高電位異常は認められない。また、殺生河原噴気地帯(第1図のeからf付近)にも顕著な高電位は認められず、むしろ周辺部に比べると電位は低い傾向にある。(2) 電位分布は全体として山麓側に高電位の傾向を示している。電位分布のトレンドに着目すると、山頂部から殺生河原噴気地帯にかけてはほぼ平坦であるのに対し、殺生河原から万代鉱にかけては電位が上昇傾向にあり、山頂側に対して最大でおよそ700 mV 高電位を示している。万代鉱からさらに山麓側では電位が低下傾向にある。(3) 水平方向に数百 m 程度のスケールをもつ電位異常が全体のトレンドに重畳しており、それらのいくつかは表層地質の違いに対応しているように見える。例えば、測線が青葉溶岩を横切っている部分(第1図のb-c, g-h, i-j)では、周辺と比較して100~300 mV 程度低電位になっていることがわかる。また、本白根火砕丘(M)と殺生溶岩(Ss)の境界(第1図のd)は、電位プロフィールの変曲点になっている。

今回の調査でも山崎他 (1997) と同じく、山頂域では顕著な電位異常が認められなかった。しかし、広域的に見ると山麓側が明らかに高電位となっていることを考えると、山崎他 (1997) の主張するように山体の電気抵抗が低いために山頂側の高電位がマスクされているとは考えにくい。むしろ我々は、湯釜火口湖の湖水 (pH=1.1; Ohba et al., 1994) や白根山東麓の温泉水 (pH=1.4~3.6; 小坂他, 1998) のpHが極めて低いことや、温泉水に含まれる Al^{3+} イオンの濃度が比較的高い($\sim 10^{-3}$ mol/l; 小坂他, 1998) ことに注目したい。Hase et al. (2003) の電位測定実験によれば、電位の符号の転向点 (Iso Electric Point) は多くの場合pH=2 付近にあり、Ishido and Mizutani (1981) のquartzを用いた電位測定によれば、流動水中の Al^{3+} イオンの濃度は 10^{-5} mol/l程度以上で電位を負から正にする効果を持つ。これらのことから、草津白根火山では、少なくとも、山体規模の対流系に関しては電位がほぼゼロかやや正になっている可能性がある。殺生河原を境に電位分布のトレンドが変化していることは、山頂から山麓に向かう流動水に殺生河原の噴気が吹き込み、その溶存成分が変化することで電位に変化を与えているためではないかと推測される。こうした可能性を検証するためには、今後、草津白根火山の実際の地下流動系に近い環境で電位測定を行う必要がある。また、万代鉱の周辺で高電位になっていることは、通常の負の電位を仮定すれば、温泉水の上昇による流動電位と解釈することも可能であるが、先に述べたとおり、他の領域との整合性において矛盾のない解釈を得るためには電位の実験が必要である。

数百mスケールの電位異常についてはそのメカニズムを特定することが難しいが、表層地質の違いによる比抵抗や透水係数の違いが流動電位に表れたものか、電気化学的效果による可能性が考えられる。地質図からもわかるように、草津白根では溶岩流や火砕物など様々な噴出物が積み重なっており、こうした表層地質が自然電位に与える影響にも注意を払う必要がある。

殺生河原噴気地帯が周辺に比べて低電位となっている理由については、ふたつの可能性を指摘できる。第1は、噴気に伴う上昇流は存在するが、先に述べたように電位が正になっているため地表の電位異常は負になっている可能性。第2は、電位は負であるが、地下では気液二相状態にあり、界面動電現象を担っている液相の流下によって地表では負の電位異常が発現している可能性である。いずれにしても、現実的な環境 (流動水の化学成分, pH, 温度) における電位測定を行うことが、この地域における自然電位の解釈には欠かせない。また、硫化物の電位についても実験データを得ることが望ましい。

4. まとめ

草津白根火山において、高密度電気探査と自然電位調査を行った。湯釜火口北東域 (通称「北側噴気」地帯) における電気探査では、溶岩流や火砕物等の表層地質に対応する比抵抗構造を確認することができた。また、噴気口直下の構造として、深さ約 100 m に熱水溜まりと思われる低比抵抗体、その上位 (深さ約 50 m) に蒸気溜まりと推定される高比抵抗体を認めた。同様の比抵抗構造は、殺生河原の噴気地帯に対しても確認でき、比較的低温の噴気直下に共通する構造である可能性が示唆された。

山頂部から殺生河原を経て万代鉱に至る自然電位分布調査では、大局的に見て山頂側が低電位を示した。この結果は、熱水系の発達した火山において通常期待される電位分布とは逆センス

であり，山崎他 (1996) の推測した，山頂部の低比抵抗による高電位異常のマスクではあり得ないことが明らかになった．強酸性環境における 電位の逆転がひとつの可能な解釈であるが，室内実験による検証が必要である．

謝辞

今回の調査は，東京工業大学火山流体研究センターの強力な支援の下に行ったものである．関係諸氏に深く感謝申し上げます．また，気象庁柿岡地磁気観測所の大和田毅氏と池田清氏には，一般の調査に御協力を頂いた．ここに記して感謝申し上げます．

引用文献

- Hase H., T. Ishido, S. Takakura, T. Hashimoto, K. Sato and Y. Tanaka (2003) ζ potential measurement of volcanic rocks from Aso caldera. *Geophys. Res. Lett.*, 30, No.23, 2210, DOI:10.1029/2003GL018694.
- 平林順一・大場 武 (1996) 草津白根山の地球化学的観測，第3回草津白根山の集中総合観測報告書, 3-11.
- Ishido T. and H. Mizutani (1981) Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics, *J. Geophys. Res.*, 86, 1763-1775.
- 桂 郁雄, 川東慶子, Djedi S. Widarto, 西村 進, 茂木 透, 下泉政志, 西田潤一, 楠建一郎, 鈴木浩一, 藤光康宏, 城森 明, 山本哲也, 山崎 明, 田口陽介 (1996) 草津白根火山でのCSMTおよびTDEM探査，第3回草津白根山の集中総合観測報告書, 61-72.
- Ohba, T., J. Hirabayashi, and K. Nogami (1994) Water, heat and chloride budgets of the crater lake, Yugama at Kusatsu-Shirane volcano, Japan. *Geochem. Jour.*, 28, 217-231.
- 小坂丈予, 小坂知子, 平林順一, 大井隆夫, 大場 武, 野上健治, 木川田喜一, 飛田典子 (1998) 万代鉱温泉の湧出に伴う草津温泉源泉群の水質変化について, *温泉科学*, 47, 4, 166-178.
- 鈴木 隆 (2002) 火山ガス放出量と放出圧力振動メカニズム, 東京工業大学修士論文.
- Tank S. B., Y. Ogawa, Y. Honkura, M. Matsushima, J. Hirabayashi (2002) Crustal resistivity structure imaged by magnetotellurics method under Kusatsu-Shirane volcano, Gunma, Japan, abstract of The 16th EM Induction Workshop, Santa Fe, USA.
- 内田利弘 (1993) ABIC 最小化法による最適平滑化拘束の比抵抗法 2次元インバージョン, *物理探査*, 46, 105-119.
- 宇都浩三, 早川由紀夫, 荒牧重雄, 小坂丈予 (1983) 草津白根火山地質図, 地質調査所.
- 山崎 明・熊坂信之・上田義浩 (1997) 草津白根山における自然電位測定, *地磁気観測所技術報告*, 36, 22-32.