

富士山内部の水の流れを地表の電気の流れから探る
Hydrothermal System in Fuji Volcano Deduced From Self-Potential and Magnetotellurics

(地球電磁気・地球惑星圏学会推薦)

代表研究者 東京大学 相澤 広記 University of Tokyo Koki AIZAWA
協同研究者 東京工業大学 小川 康雄 Tokyo Institute of Technology Yasuo OGAWA
産業技術総合研究所 石戸 恒雄 National Institute of Advanced Industrial
Science and Technology (AIST) Tsuneo ISHIDO

Leading up to eruptions, magmatic fluids may interact with groundwater at shallow depths, and may cause various precursory phenomena. To understand ongoing volcanic activity and conduct a reliable hazard assessment, it is important to image the groundwater in a volcano prior to the initiation of volcanic unrest.

In Mt. Fuji volcano, we conducted electrical resistivity and self-potential surveys, which are the most useful in studying water within volcanic edifices. The prominent feature of the resistivity structure is the low resistivity area below 100 (ohm-m) that extends northwestward and southward from the summit of the mountain. To clarify the origin of this low resistivity zone, we commenced noble gas isotope analyses for the hot spring water sampled from the depth around 1500m collaborating with members of Geochemical Research Center, University of Tokyo. Presently, observed $3\text{He}/4\text{He}$ ratios indicates $3\sim 7R/R_a$, suggesting that hot spring water contain helium derived from deep magma. Furthermore, location of high $3\text{He}/4\text{He}$ ratio seems to coincide with the low resistivity area. These evidences suggest that low resistivity zone represent low temperature hydrothermal system, in which groundwater and volatiles degassed from magma are presently mixing. On the contrary to the hot spring water, cold spring water on the surface did not show the anomalous $3\text{He}/4\text{He}$ ratios, suggesting that the volatiles are trapped by groundwater by dissolution before reaching the surface. Under the quiescent Mt. Fuji, there is low temperature hydrothermal system extensively developed beneath the cold aquifer.

研究目的

富士山はおよそ 300 年の間、見掛け上の静穏を保ってきたが、その山頂火口直下 1 km 以深には、通常の地下水流とは異なる熱水対流系が存在していることが過去の研究から示唆されてきた (Aizawa et al., 2005, EPSL)。また富士山の地下には膨大な降雨を涵養する帯水層が広がっており、その総量は 100 億トンを超えると推測されている。しかしながら富士山全体としての地下水の流量や、熱水系の形成過程はほとんど解明されていないのが現状である。

本研究では、3 次元的な水の流れを定量的に明らかにすることを目的として、水の存在に敏感な電気比抵抗と、水の流動を間接的に表している自然電位の二つの物理量の観測を行う。自然電位は火山体内部を流体（水・熱水）が動くことに伴う界面動電現象により発生する物理量である。そのため自然電位分布は水の流動に関して情報を与える。また、比抵抗は水の存在に敏感であり、特に空隙の多い岩石で構成される火山では、明瞭な比抵抗コントラストが得られることが期待できる。最終的に本研究で得られた水の流れを火山噴火予知に活用する。火山の前兆現象や噴火の多様性には、

火山浅部の水理構造が密接に関係している可能性があるため、本研究で得られた定常状態の水流とマグマの相互作用を熱水流動シミュレーションにより検討し、火山噴火前兆の予測を行う。

研究経過

2008年11月に富士山山麓部で、2009年5-7月に山頂付近も含めた全域で自然電位観測を行った。続いて2009年7-9月に深さ3kmまでの比抵抗構造を求めるため地磁気と地電位差の時間変化連続観測(AMT観測)を行った。研究援助金(160万円)は、主にフィールド調査の旅費および観測消耗品に充当した。Fig. 1に自然電位とAMT観測の測定点を示す。自然電位測定は電線と非分極性電極、および高入力インピーダンス(1Gohm)のテスターを用い、1kmにつき5点前後の測定を行った。AMT観測では大地と電極の接地抵抗を低減するためベントナイトを用い、データは主に周辺の直流電車からの漏洩電流が減少する夜間に取得した。得られた時系列から各観測点において周期10000-0.3Hzの周波数応答関数を求めた。当初AMT観測計画では20点程度を予定していたが、後述の予想外の結果が得られたため、最終的には60点の観測となった。

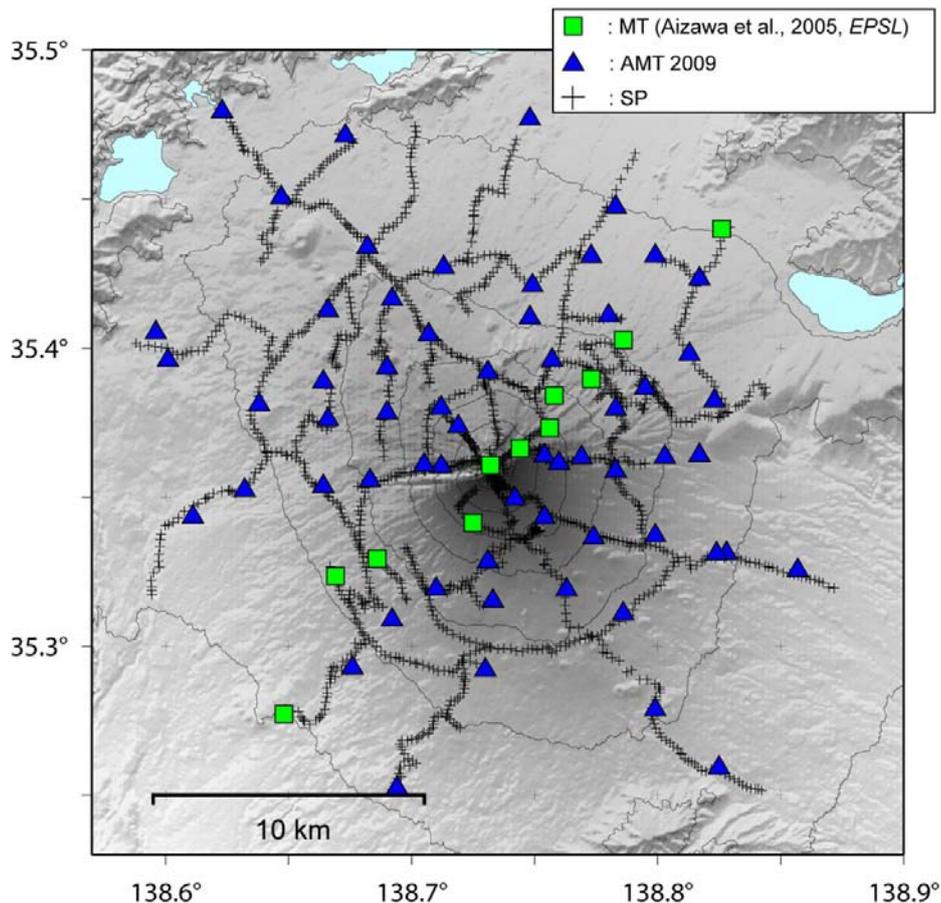


Fig. 1. Topographic maps showing the locations of Self-potential (SP) and magnetotelluric (MT) observation sites. Small black dots represent the sites of electric self-potential (SP) measurements. Blue triangles represent audio-frequency MT (AMT) observation sites. Green squares represent MT sites that were previously conducted. Topographic contours are drawn at intervals of 500 m.

Fig. 2 にボスティック・インバージョン法を用いた比抵抗構造を、Fig. 3 に自然電位分布をそれぞれ示す。比抵抗値のスケールには過去に調べられてきた山麓湧水の比抵抗値(山本, 1992)を併せて示した。

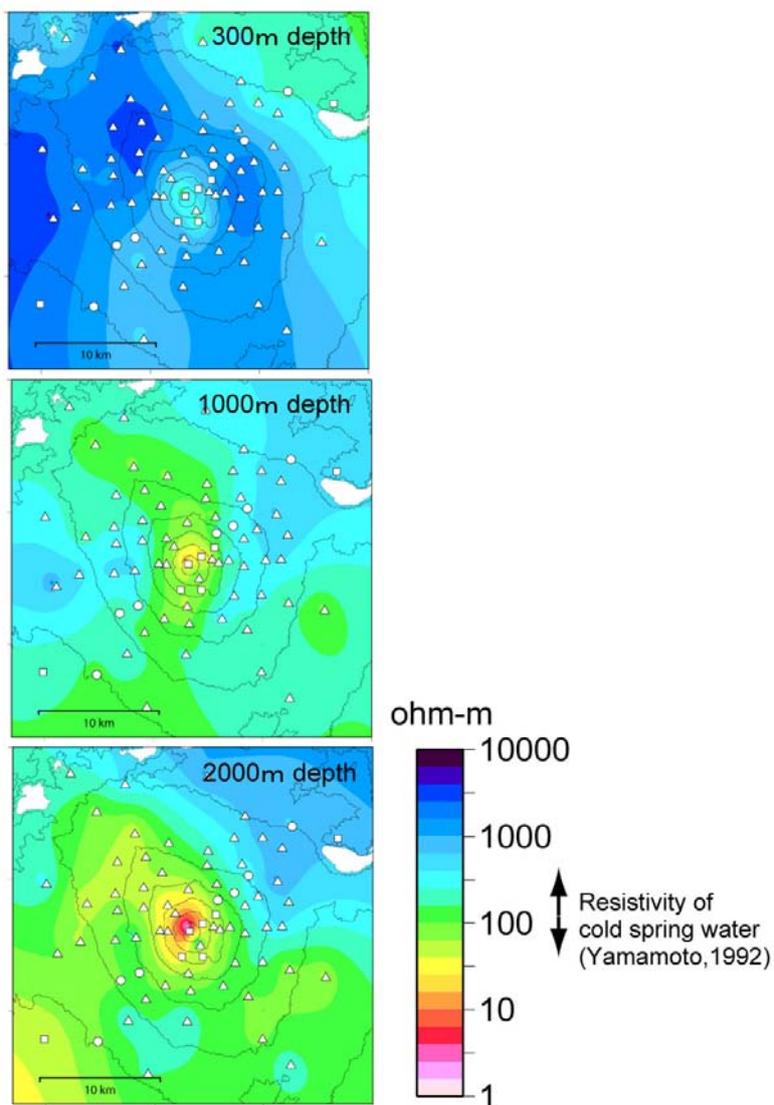


Fig. 2. Electric Resistivity structure beneath Mt. Fuji. The figures represent 300m, 1000m, and 2000m depth from the surface, respectively

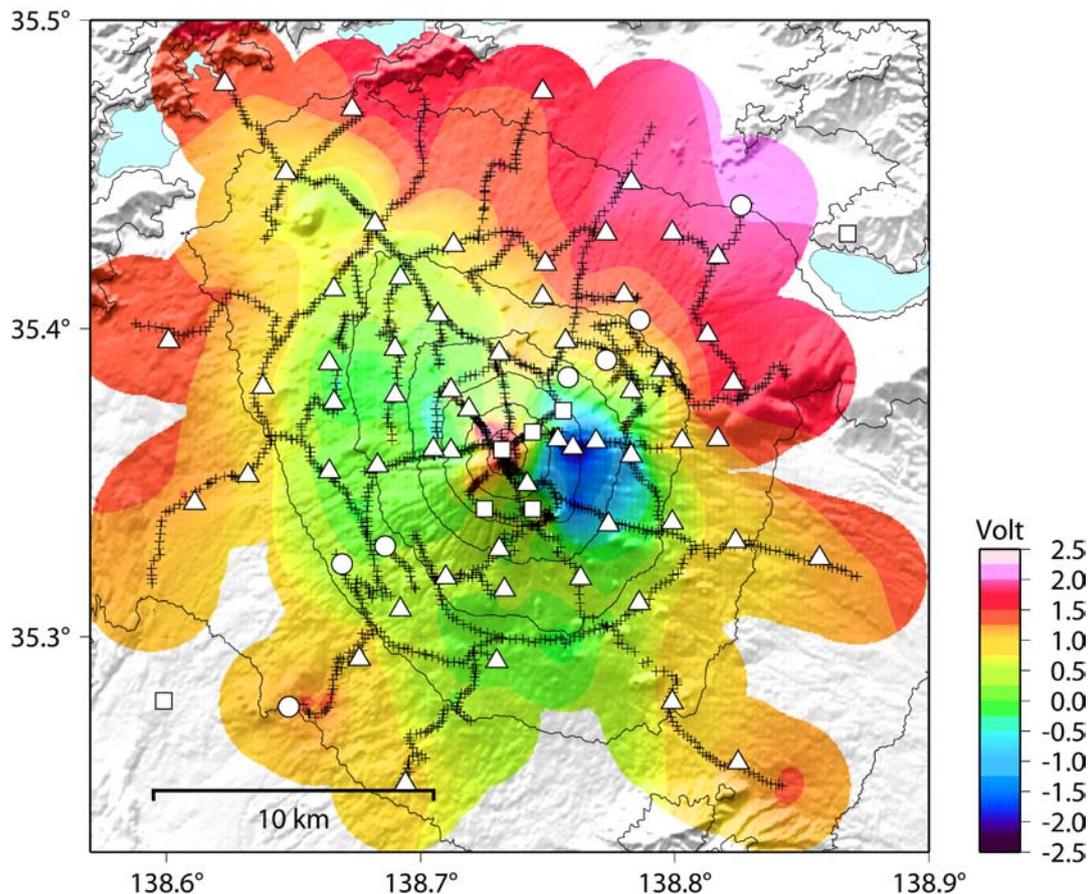


Fig. 3. Electric self potential map on the surface of Mt. Fuji

考察

Fig.2 において予想外の結果は富士山の 1000m 以深に 100(ohm-m)前後の領域が存在することである。この低比抵抗領域は山頂を中心として北西、および南方向に広がっている。過去に測定されてきた富士山周辺の湧水の比抵抗値は数 10~200(ohm-m)程度であり低比抵抗領域の値と一致している。しかしながら MT 法で得られた比抵抗は水と岩石の混合状態のものであり、水だけの比抵抗値と直接比較することはできない。ここでボーリング(科学掘削 FJ-3: 東京大学地震研究所)で得られた空隙率の情報を参考に、Archie の式により水-岩石の混合状態の比抵抗値を推定すると、水だけの比抵抗値の 10 倍以上となり、100(ohm-m)前後の低比抵抗領域は通常の地下水の存在では説明がつかない。温度が上がれば比抵抗値は低下するが、その寄与は 1°C 上昇につき約 2%の低下と僅かであり、地温勾配を考慮しても低比抵抗値は説明することができない。山頂から北西、南方向に広がる低比抵抗領域の 1 つの解釈として、深部マグマから上昇してきた揮発性成分を多く溶かしこみ、電気を通し易くなっている低温熱水帯であることが示唆される。

この解釈を検証するために、東京大学地殻化学実験施設の研究者と共に 2010 年 2 月より温泉水中に含まれる He(ヘリウム)同位体比測定に着手した。マグマ起源の $3\text{He}/4\text{He}$ 比は大気に比べ 8 倍程度と大きく、マグマからの揮発性成分の寄与を調べる有力なトレーサーとして用いられている。富士山では山麓部に限られるが深度 1500m までの掘削温泉が点在し、温度 20~50°C 程度の温泉水が汲み

上げられ利用されている。大気が混入しないよう泉源に出来るだけ近い位置での温泉水のサンプリングを行い、実験室に持ち帰り分析を行っている。現在までの結果では $3\text{He}/4\text{He}$ 比は大気の 3~7 倍程度と明らかにマグマ起源の揮発性成分の寄与を示し、さらに $3\text{He}/4\text{He}$ が高い場所は前述の低比抵抗領域延長部に相当し、解釈の妥当性を示している。従来、熱水は山頂直下で半径 2km 程度にのみ存在していると考えられてきたが、本研究から、さらに北西、および南方向を中心として広がる深度 1000m 以深の低温熱水系の存在が明らかになった。揮発性成分はマグマの上昇に先立って上昇する。本研究で明らかになった低温熱水系はマグマの上昇に先行する変化が最も表れる易い領域であると考えられる。今後熱水流動シミュレーションによりマグマ上昇に先立つ揮発性成分の上昇で山体内部の圧力や、重力、比抵抗、自然電位などの物理量にどのような時間変化が現れるのかも検討する予定である。

深度 1500m までの掘削温泉に対し、地上の湧水の $3\text{He}/4\text{He}$ 比はほぼ大気の色を示し、低温熱水と地下水はそれほど混合せずに流動していることが示唆される。今後、 $3\text{He}/4\text{He}$ 比の調査を継続すると共に、地下水流動を反映する自然電位の情報を取り入れ熱水流動シミュレーションにより地下水流動を明らかにする予定である。

Fig. 3 の自然電位分布は全体的に山麓部が高電位で標高が上がると共に低電位となっている。これは定性的には地下水の山麓部への流動を表している。その全体的な傾向の中で以下に示すような特徴的な自然電位異常域が存在する。

1、山頂部のプラス電位

山頂直下はマグマから脱ガスした揮発性物質の上昇中心であると考えられる(Fig.2)。山頂直下は特に低比抵抗域、プラス電位異常域となっており、山頂直下への熱水上昇、それに伴う熱水変質を表していると考えられる。

2、東斜面のマイナス電位

富士山の山腹は全体としてマイナス電位となっているが、その中でも東斜面のものは顕著である。火山山腹のマイナス電位異常のうち顕著なものは、過去の山体崩壊の痕跡を表していることが示唆されている(Aizawa et al., 2009, JGR)。富士山の東斜面では 2900 年前に、およそ 1 立方 km にわたって崩壊した御殿場岩なだれが知られている。富士山の東斜面では 2 万年、1.4 万年前にも山体崩壊を起こしている。現在は新しい噴出物によって覆い隠されている過去の山体崩壊構造に沿った地下水の流れが、東斜面の顕著なマイナス電位の原因と考えられる。

3、北東麓のプラス電位

北東麓は他の斜面に比べ 0.5~1V ほど電位が高くなっている。特に北東の山中湖周辺は特徴的であり、プラス電位、高比抵抗領域となっている。定性的に大量の地下水が浅い深度まで存在していると解釈される。

研究発表

口頭発表

1. 相澤広記、神田径、小川康雄、石戸経士、長谷英彰; 「比抵抗構造調査から推測される火山地下の側方脱ガス」、地球惑星科学連合大会 (千葉、2010)