

霧島硫黄山における3次元比抵抗構造の変化

概要

2018年噴火の前に実施された Tsukamoto et al. (2018) の比抵抗構造探査と同様の観測仕様（観測地点、観測機材、観測周波数）による地下構造探査を実施した。新たに得られた観測データと以前の観測データに対して、同じ解析方法を適用し、インバージョンによって地下比抵抗構造をイメージングするとともに、その差異を明らかにした。その結果、噴火以前の構造に比べ、噴火後の今回の探査では、キャップロック構造に対応すると考えられる釣り鐘状の低比抵抗域がより顕著になっており、その頂部付近や下部の一部がより高比抵抗となっていることが分かった。

霧島硫黄山周辺で2018年4月の水蒸気噴火前（2015～2017年）に行った42点での広帯域MT観測点（Tsukamoto et al. 2018）のうち26点で再測定を行った（図1）。再測定は2024年10月～11月にかけて実施し、測定場所はハンディGPSの精度内で同一とした。機材の種類やサンプリング周波数はTsukamoto et al. (2018) と同一とした。得られた電場と磁場の時系列から Tsukamoto et al. (2018) と同様の方法でMT応答関数を推定した。

図2に表層の不均質の影響をほとんど受けない Induction vector（鉛直地磁気変換関数の実部）と Phase tensor（Caldwell et al. 2004）を示す。両者ともに推定誤差を越える明瞭な変化が見られ、地下の比抵抗構造が変化したと結論づけられる。8Hz（0.125s）に注目すると、噴火前の induction vector は硫黄山のやや東側を示していたが、噴火後は硫黄山方向を示す。これは、硫黄山の低比抵抗化か、硫黄山東側の高比抵抗化、もしくはその両方を示唆する。また、硫黄山周辺では Phase tensor 楕円形状が変化し beta の値も大きくなり、噴火後は3次元性の強い構造に変化したことが示唆される。

インバージョン解析では femtic（Usui 2015, Usui et al. 2024）を用いた。0.001～200s から16個の周期を選定し、インピーダンス4成分、鉛直地磁気変換関数2成分に加え、Phase tensor の4成分も用いた。まず、Tsukamoto et al. (2018) で求められたMT応答関数について解析を行い、その結果を初期条件として再測定で求められたMT応答関数について解析を行った。

噴火前と噴火後（今回の探査）の比抵抗構造の水平断面を図3に示す。表層に近い標高1100m（-1.1km bs1）の断面を見ると、硫黄山や、西火口周辺が噴火後に低比抵抗化していることが分かる。これは地表の地熱活動域の拡大と調和的である。標高800m（-0.8km bs1）では硫黄山の東北東側が高比抵抗化している。これら表層付近の変化は、induction vector の変化と調和的である。標高600m（-0.6km bs1）では、水蒸気噴火地点の南部が高比抵抗化している。標高300m以深（-0.3km bs1以深）では、硫黄山の東西がより低比抵抗化している。

図4に噴火前と噴火後の比抵抗構造の鉛直断面を示す。まず、噴火前の構造については、顕著な低比抵抗域が層状に分布しており、Tsukamoto et al. (2018) と同様に、低比抵抗を示す代表的な粘土鉱物であるスメクタイトを含む層と解釈する。水準測量により求められた圧力源（九州大学, 2025）が低比抵抗域の下部に位置し、釣り鐘状の形状を示すことから水蒸気噴火をもたらすキャップロックの働きを示すと考えている。2018年の噴火地点が釣り鐘状の頂部に位置していることは注目に値する。次に、噴火前後を比較しながら構造の変化を議論する。前述のとおり硫黄山や、西火口周辺の表層から深さ200～300m（顕著な低比抵抗域の上部）が噴火後に低比抵抗化しており、火山性揮発性物質の混入が大きくなったことや、熱水変質が進行し粘土鉱物が増えたことが原因と考えられる。一方で、S67W-N67E断面に見られ

るように顕著な低比抵抗域の底部付近は、より深くなり、かつ東西に拡大し、より釣り鐘状となるように変化した。図3の-0.3km bs1の水平断面での変化がこれに対応する。また釣り鐘状の頂部付近や、水蒸気噴火地点の南部が高比抵抗化している。これはスメクタイトに含まれる層間水が、温度上昇や酸性化により部分的にはき出され、高比抵抗化したと解釈することができる。

噴火前の構造に対し、噴火後はキャップロックの働きをすると考えられる顕著な低比抵抗域が水平方向に拡大し、その形状もより釣り鐘状になっており、高間隙水圧の流体をためこみやすい構造に変化した。この結果は、より規模の大きな水蒸気噴火を起こす可能性が増したと考えられる。また、顕著な低比抵抗領域の頂部付近は高比抵抗化しており、高温化や酸性化により流体をためこむ「蓋」の頂部が弱くなっている可能性を指摘できる。ただし、本結果は、おおよそ水蒸気噴火1年半前のスナップショットと、噴火6年半後のスナップショットを比較したものであり、比抵抗構造の変化がどの時点で、どのようなタイムスケールで進行したかは明らかではない。比抵抗構造をモニタリングし、火山活動予測に活用するためには、本課題のような繰り返し観測だけでなく、複数観測点を設置しての連続観測が望ましい。

謝辞

文部科学省令和6年度「火山の総合的な評価に資する火山の地下構造・噴火履歴等の基礎情報調査事業」において実施した。観測で使用した機器は東京大学および防災科学技術研究所から借用した。また現場で機器を展開するために東京大学霧島火山観測所の車庫を借用した。

引用文献

- Caldwell, T.G., H.M. Bibby and C. Brown The magnetotelluric phase tensor. *Geophys J Int* 158 (2). doi:10.1111/j.1365-246X.2004.02281.x. 2004.
- 九州大学(2025) 文部科学省 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト 2023 年度, 課題 B 成果報告書
https://www.kazan-pj.jp/wp-content/uploads/2025/04/00_2023b.pdf
- Tsukamoto, K., K. Aizawa, K. Chiba, W. Kanda, M. Uyeshima, T. Koyama, M. tsugi, K. Seki and T. Kishita Three-Dimensional Resistivity Structure of Iwo-Yama Volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan: Relationship to Shallow Seismicity, Surface Uplift, and a Small Phreatic Eruption. *Geophys Res Lett* 45 (23):12821-12828. doi:10.1029/2018gl080202. 2018
- Usui, Y. 3-D inversion of magnetotelluric data using unstructured tetrahedral elements: applicability to data affected by topography. *Geophys J Int* 202 (2):828-849. doi:10.1093/gji/ggv186. 2015
- Usui, Y., M. Uyeshima, H. Hase, H. Ichihara, K. Aizawa, T. Koyama, S. Sakanaka, T. Ogawa, Y. Yamaya, T. Nishitani, K. Asamori, Y. Ogawa, R. Yoshimura, S. Takakura, M. Mishina and Y. Morita Three-Dimensional Electrical Resistivity Structure Beneath a Strain Concentration Area in the Back-Arc Side of the Northeastern Japan Arc. *J Geophys Res-Solid Earth* 129 (5). doi:10.1029/2023JB028522. 2024

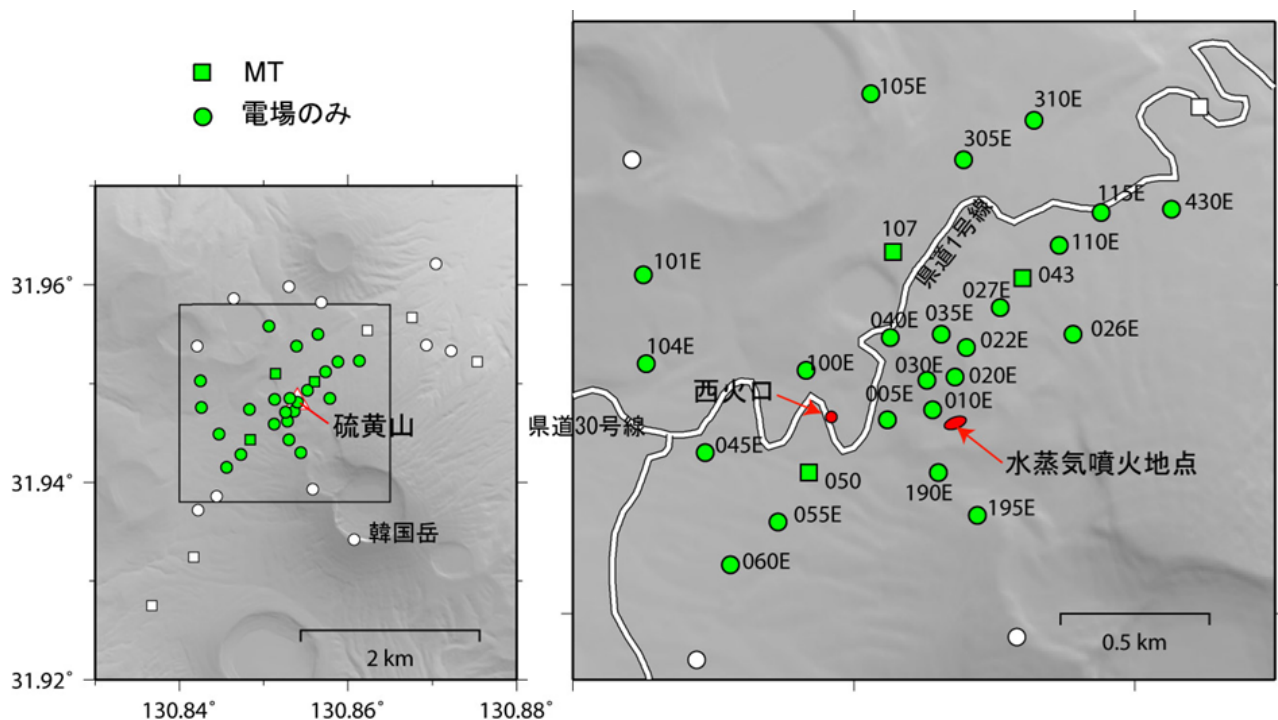


図1 広帯域 MT 観測点配置図。緑色は再測定の見測点、白色は Tsukamoto et al. (2018) のみの観測点

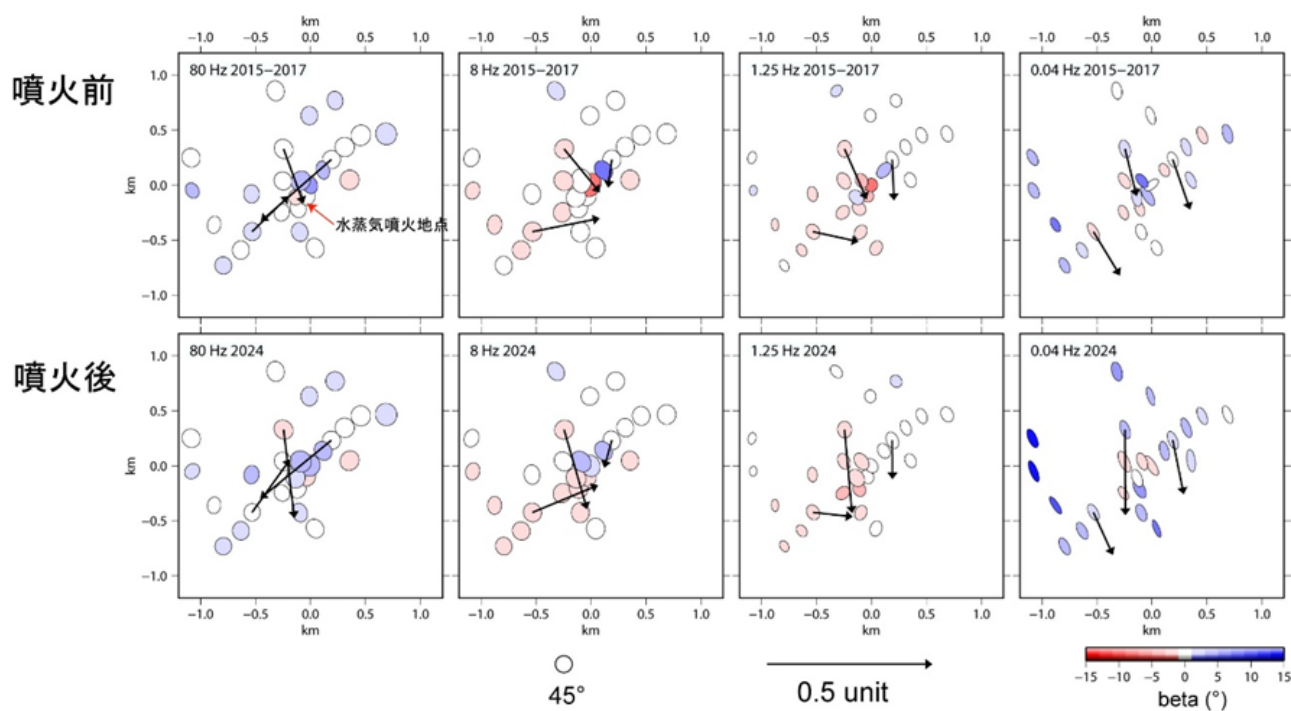


図2 噴火前と噴火後の Induction vector (Parkinson convention) と、Phase tensor 楕円の比較。Induction vector は相対的に電流が集中する（低比抵抗）場所を示し、Phase tensor には比抵抗構造の3次元性の指標である beta（絶対値が小さいと1次元性、大きくなると3次元性）を色で示す。

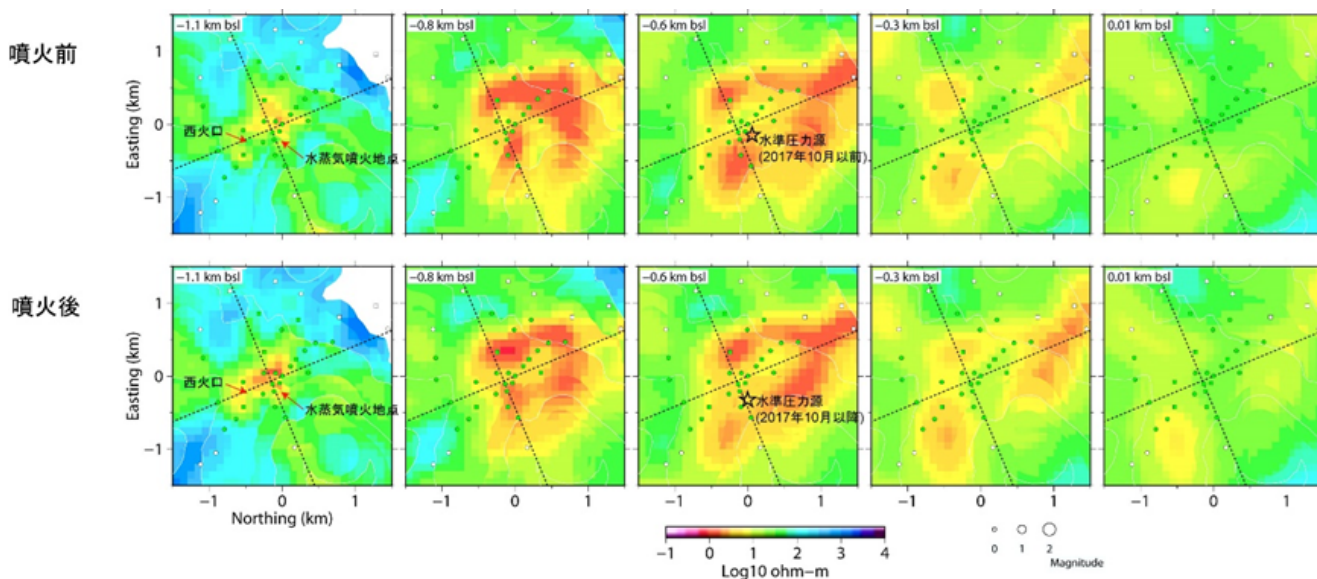


図3 噴火前と噴火後の比抵抗構造（水平断面）の比較。2つの破線は鉛直断面の位置（図4）を示す。☆印は水準測量による圧力源（九州大学, 2025）を示す。

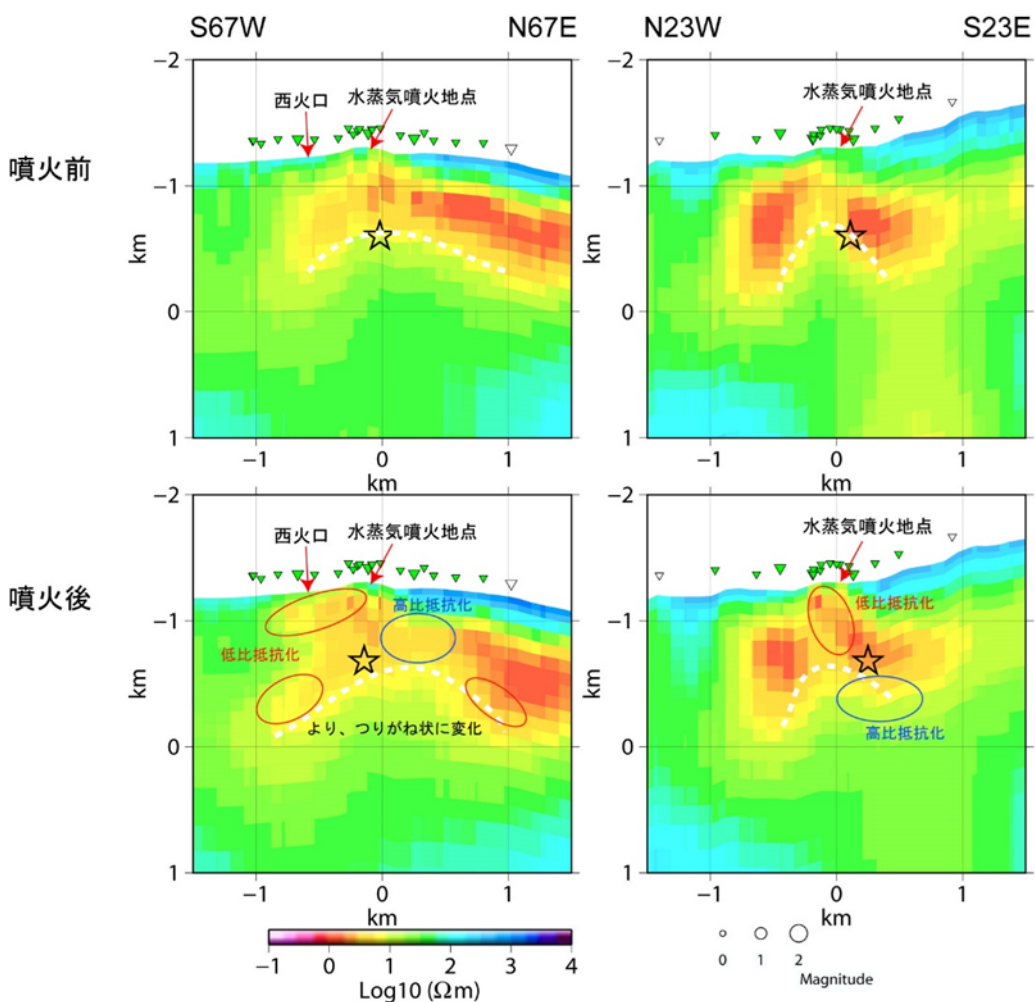


図4 噴火前と噴火後の比抵抗構造（鉛直断面）の比較。白破線は低比抵抗層の底を示す。その他のシンボルは図3と同様。☆印の水準測量による圧力源の位置（九州大学, 2025）は、噴火前と噴火後で異なる事に注意。