

### 3. 研究報告

#### 3.1 陸域火山の総合的な評価に資する基礎情報調査:霧島硫黄山

##### 3.1.1 水蒸気噴火前後でのキャップロック構造の変化の解明

###### (1) 業務の内容

###### (a)業務題目 水蒸気噴火前後でのキャップロック構造の変化の解明

###### (b)担当者

所属機関	役職	氏名
国立研究開発法人産業技術総合研究所	キャリアエキスパート	松島 喜雄
同	研究員	松永 康生
国立大学法人九州大学	准教授	相澤 広記

###### (c)業務の目的

水蒸気噴火発生の必要条件と考えられている火山体浅所構造探査手法の高度化並びに水蒸気噴火準備過程評価手法の開発

###### (d)業務の要約

陸域火山の霧島硫黄山では、2018年4月の水蒸気噴火前後でのキャップロック構造と考えられる低比抵抗域の変化に着目し、噴火前に実施された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の比抵抗構造をイメージするとともに、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、噴火後には、キャップロック構造に対応すると考えられる「つりがね状」の低比抵抗域がより顕著になっており、その内部や下部がより高比抵抗となっていることが分かった。

###### (e)業務の実施方法

霧島硫黄山周辺で2018年4月の水蒸気噴火前の2015年、2016年、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。

噴火前と噴火後のMT応答関数を比較し、時間変化の有無を調べた。特に観測点近傍の表層付近の不均質の影響を受けない鉛直地磁気変換関数や、Phase tensor(Caldwell et al., 2004)に注目して時間変化の有無やその特性を判断した。また、インピーダンスの見かけ比抵抗や位相の変化の特徴から、観測点近傍の表層付近の比抵抗変化によるstatic shift的な変化の有無について検討した。

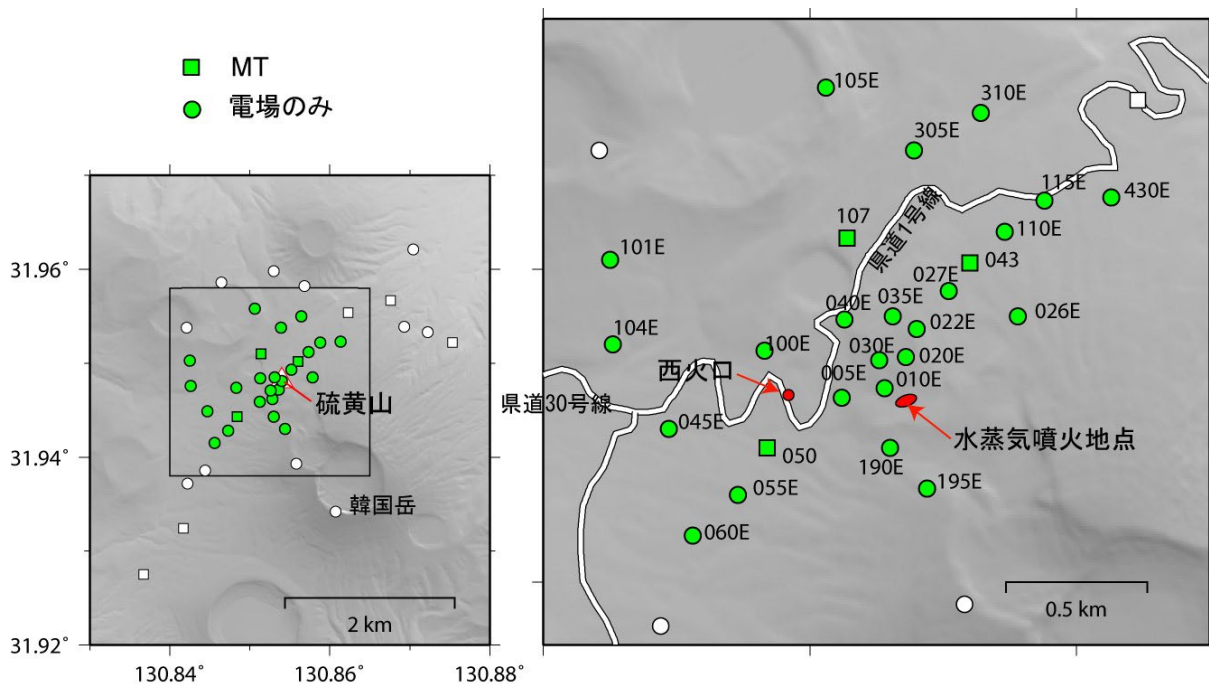


図1 広帯域 MT 観測点配置図。Tsukamoto et al. (2018)で観測を実施した 42 点(□及び○)のうち、緑で示した 26 点において 2024 年 10～11 月に再測定を行った。Tsukamoto et al. (2018) の測定は噴火前の 2015 年 12 月、2016 年 10 月～11 月、2017 年 10 月～11 月に行われた。そのうち硫黄山に近い観測点での測定は 2016 年である。

比抵抗構造の時間変化推定の第1ステップとして、噴火前に得られていた MT 応答関数を入力とした3次元比抵抗インバージョンを行った。Tsukamoto et al. (2018)と、本課題のインバージョン手法の比較を表1に示す。Tsukamoto et al. (2018)では、インバージョンコードの制約から地形を階段状に表現しており、さらに電場のみの観測点で別の場所の磁場を用いてインピーダンスを推定していることが表現できなかった。また、硫黄山山頂部の2点を間引いて解析しており、時間変化推定には不利であった。本解析では有限要素法によるインバージョンコード femtic (Usui 2015, Usui et al., 2024) を用いて地形を滑らかに表現し、インピーダンス推定において電場と磁場が異なる場合もあることも考慮し、さらに全ての観測点のデータを入力として利用した。インバージョンの入力として、周期 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 (Caldwell et al., 2004) 4成分も用いた。Phase tensor を加えることで、表層付近の比抵抗変化を、地下の比抵抗構造変化と誤って解析してしまうことを避ける狙いである。データに与える誤差は、インピーダンスは各成分の 10%、鉛直地磁気変換関数は 0.01、Phase tensor は各成分の5%とした。水平方向の最小メッシュは Tsukamoto et al. (2018)と同様に 100m と設定し、硫黄山から 1.5km 以上離れた場所はメッシュサイズを大きくした。計算領域は 450km (南北) × 450km (東西) × 320km (鉛直) として、陸上地形と海底地形を組み込んだ。初期比抵抗構造は大地  $100\Omega\text{m}$ 、海水  $0.3\Omega\text{m}$ 、空気  $10^{10}\Omega\text{m}$  として、イタレーションごとにデータを説明する大地の比抵抗構造を推定した。femtic におけるパラメータは  $\alpha=3$ 、 $\beta=0.01$  を採用した。 $\alpha$  は残差と比抵抗構造の粗さのバランスを取り持つパラメータであるが、これは両者の L カーブから最もバランスがとれたパラメータとして  $\alpha=3$  を採用した。 $\beta$  は表層の不均質 (distortion) 補正の重みであるが、 $\beta=0.01$  の場合、distortion 補正に関わる  $2 \times 2$  の実行列を比較的自由に推定することに相当し、実

質、Phase tensor や鉛直地磁気変換関数を説明するように distortion 補正が推定されることになる。第1ステップでは RMS 残差は初期構造の 26.7 から、最終モデルでは 2.29 に低下した。

比抵抗構造の時間変化推定の第2ステップとして、噴火後の 2024 年に得られた MT 応答関数を入力とした 3 次元比抵抗インバージョンを行った。メッシュやインバージョンの入力パラメータは、噴火前データを用いた計算と同一とした。ただし、2024 年は Tsukamoto et al. (2018) で観測を実施した全 42 点のうち 26 点しか再測を行っていないため、残りの 16 点は噴火前のデータを使用した。再測を行っていない点は硫黄山から距離が離れており (図1)、硫黄山から離れた場所は比抵抗構造が変化していないと仮定していることに相当する。本事業の目的は硫黄山周辺の比抵抗構造の時間変化推定であるため、この仮定をおいても大きな支障はないと考えられる。インバージョンでは、比抵抗構造と distortion 補正に関わる  $2 \times 2$  の実行列は、噴火前のデータから得られた結果を初期設定として用いた。RMS 残差は初期構造の 6.00 から、最終モデルでは 2.18 に低下した。

表1 Tsukamoto et al. (2018) と本課題で実施したインバージョン手法の比較。  
インバージョンの入力データとなる MT 応答関数の推定は同一の手法で行った。

	Tsukamoto et al. 2018 <i>GRL</i>	本研究
3次元インバージョンコード	WSINV3DMT (Siripunvaraporn and Egbert 2009 <i>PEP</i> )	FEMTIC (Usui 2015 <i>GJ</i> ; Usui et al. 2017 <i>GJ</i> )
使用データ	40 点	42 点
インバージョンの入力	$Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{xx}, Z_{yy}, T_{zx}, T_{zy}$	$Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{xx}, Z_{yy}, T_{zx}, T_{zy}$ and $\phi$ (Phase tensor)
エラー	10%	$Z$ 10%, $\phi$ 5%, $T$ 0.001
表層の不均質の影響 (distortion)	考慮しない	計算の中で $Z_{..}$ を補正 (FEMTICにおいて $\beta=0.01$ 固定)
周波数帯域	80 Hz ~ 0.005 Hz (11周期)	160 Hz ~ 0.005 Hz (16周期)
地形	階段状	スムーズ
電場のみ観測点における磁場の位置	考慮せず	考慮する

## (f) 業務の成果

### 1) MT 応答関数の時間変化

MT 応答関数の推定精度が高い周期1秒より短周期において、複数の観測点でインピーダンスや鉛直地磁気変換関数の時間変化が見られた。図2にインピーダンスの変化がほとんど見られなかった観測点の例、図3にインピーダンスに明瞭な変化が見られた観測点の例、図4にインピーダンスに変化が見られたが、観測点近傍の表層付近の比抵抗変化の疑いが高い static shift 的な変化の例をそれぞれ示す。static shift 的な変化では、平均化した  $S_{sq}$  インピーダンス (Rung-Arunwan et al., 2016) の見掛け比抵抗に変化が見られるが、位相に変化は見られない。比抵抗構造推定を拘束するには見掛け比抵抗の情報が必要であるが、static shift 的な変化をしている観測点の取り扱いには注意が必要であることを示している。図5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を描画)と Phase tensor 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。例として8Hz (0.125s) のデータに注目すると、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。

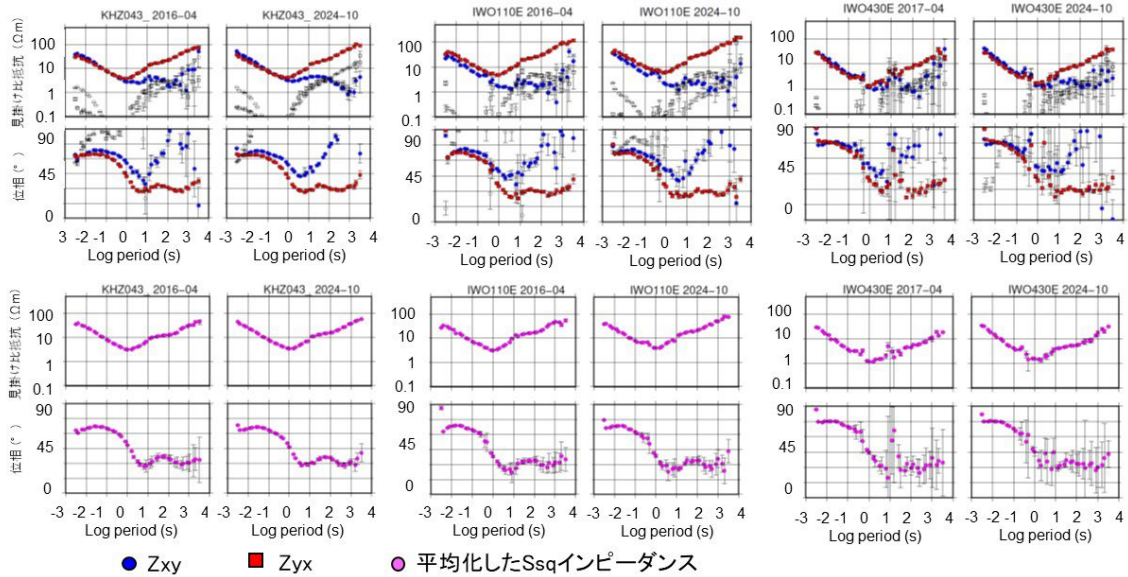


図2 インピーダンスの変化がほとんど見られない観測点の例 (043、110E、430E)。

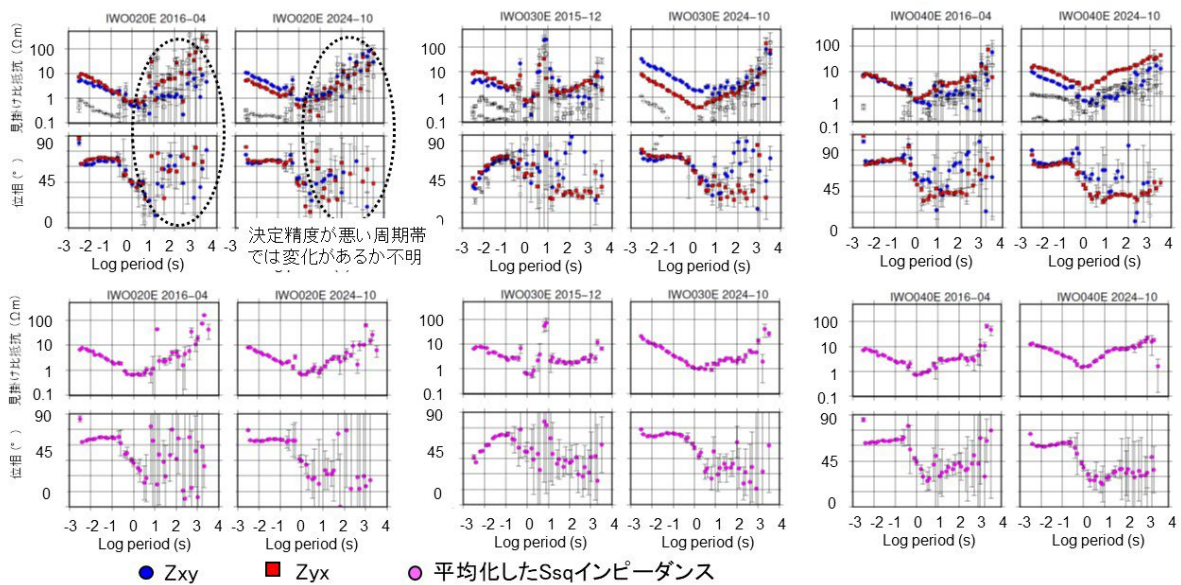


図3 インピーダンスの変化が見られた観測点の例 (020E、030E、040E)。見かけ比抵抗だけでなく、位相も変化していることが分かる。

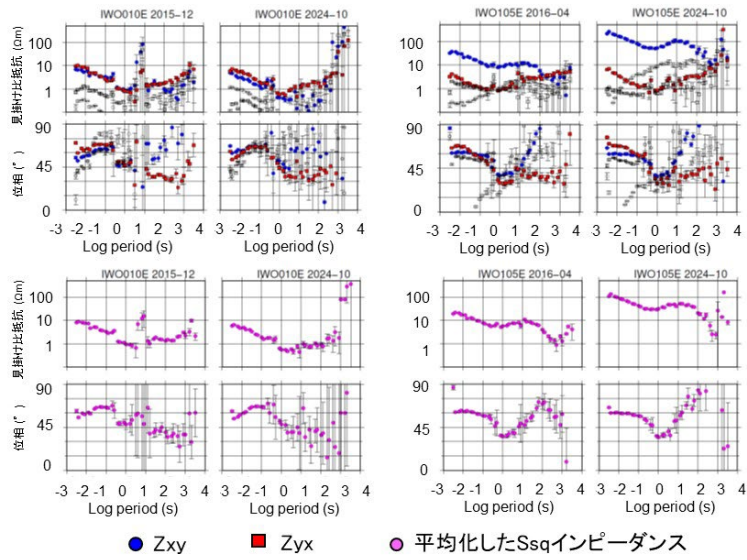


図4 インピーダンスの変化が見られたが、static shift 的である観測点の例 (010E、105E)。平均化した Ssq インピーダンスに注目すると、見かけ比抵抗の変化は明瞭であるが、位相の変化は明瞭でない。

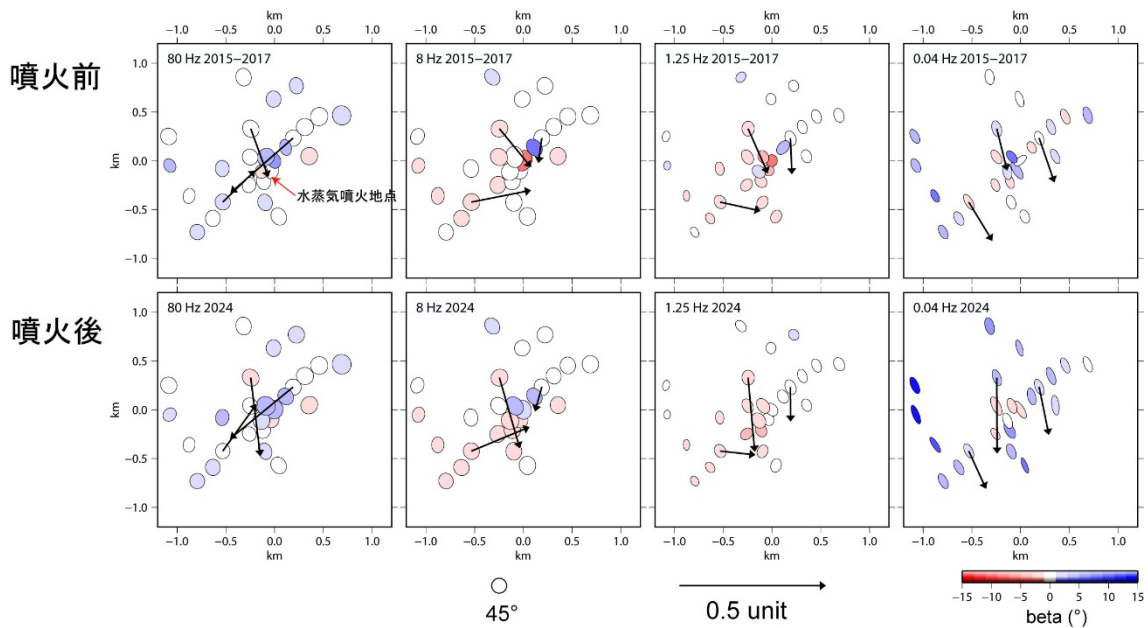
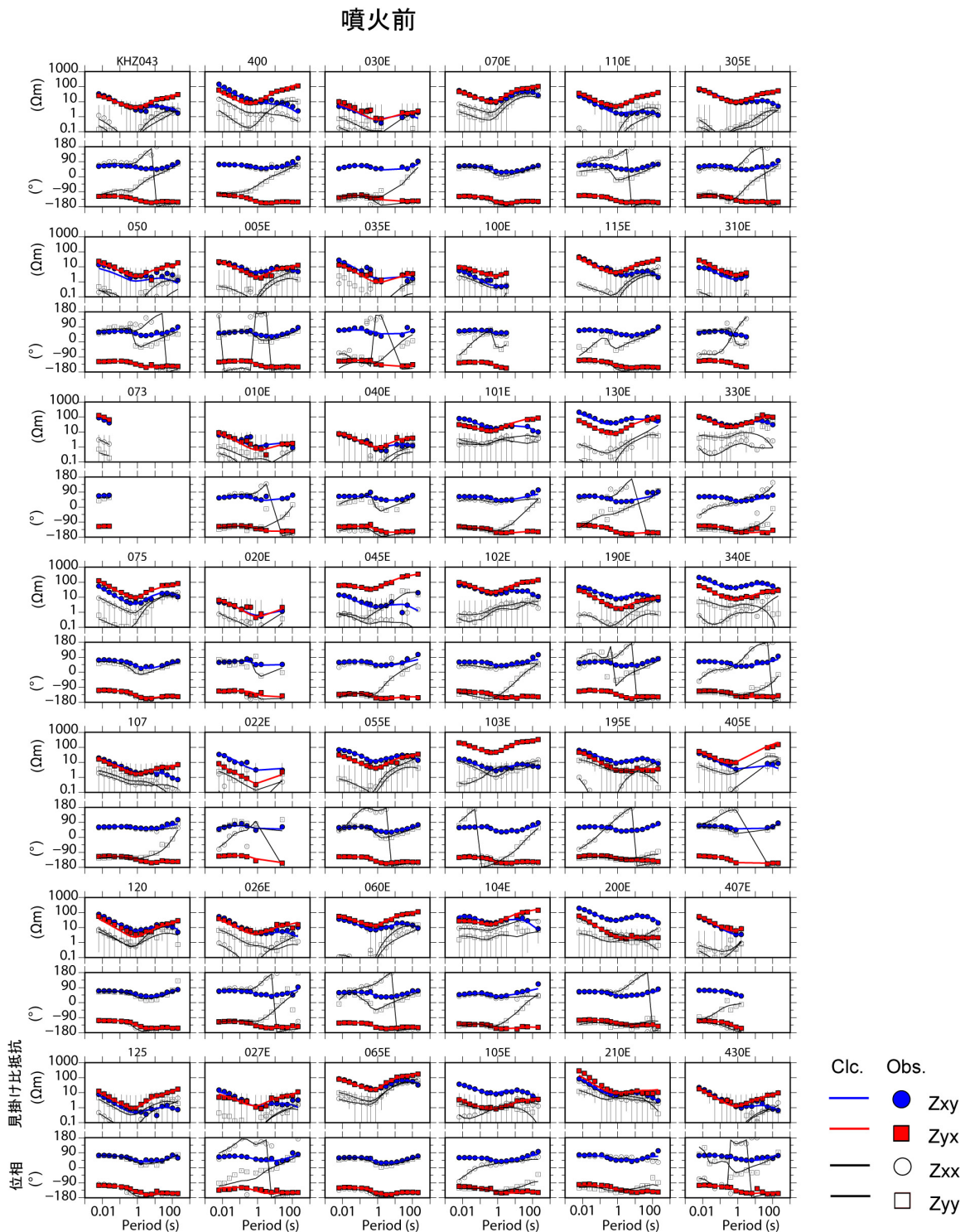


図5 噴火前と噴火後の実部 Induction vector (Parkinson convention) と、Phase tensor 楕円の比較。Phase tensor には比抵抗構造の3次元性の指標である beta (絶対値が小さいと1次元、大きくなると3次元) を色で示した。Induction vector は相対的に電流が集中する(低比抵抗)場所を示す。

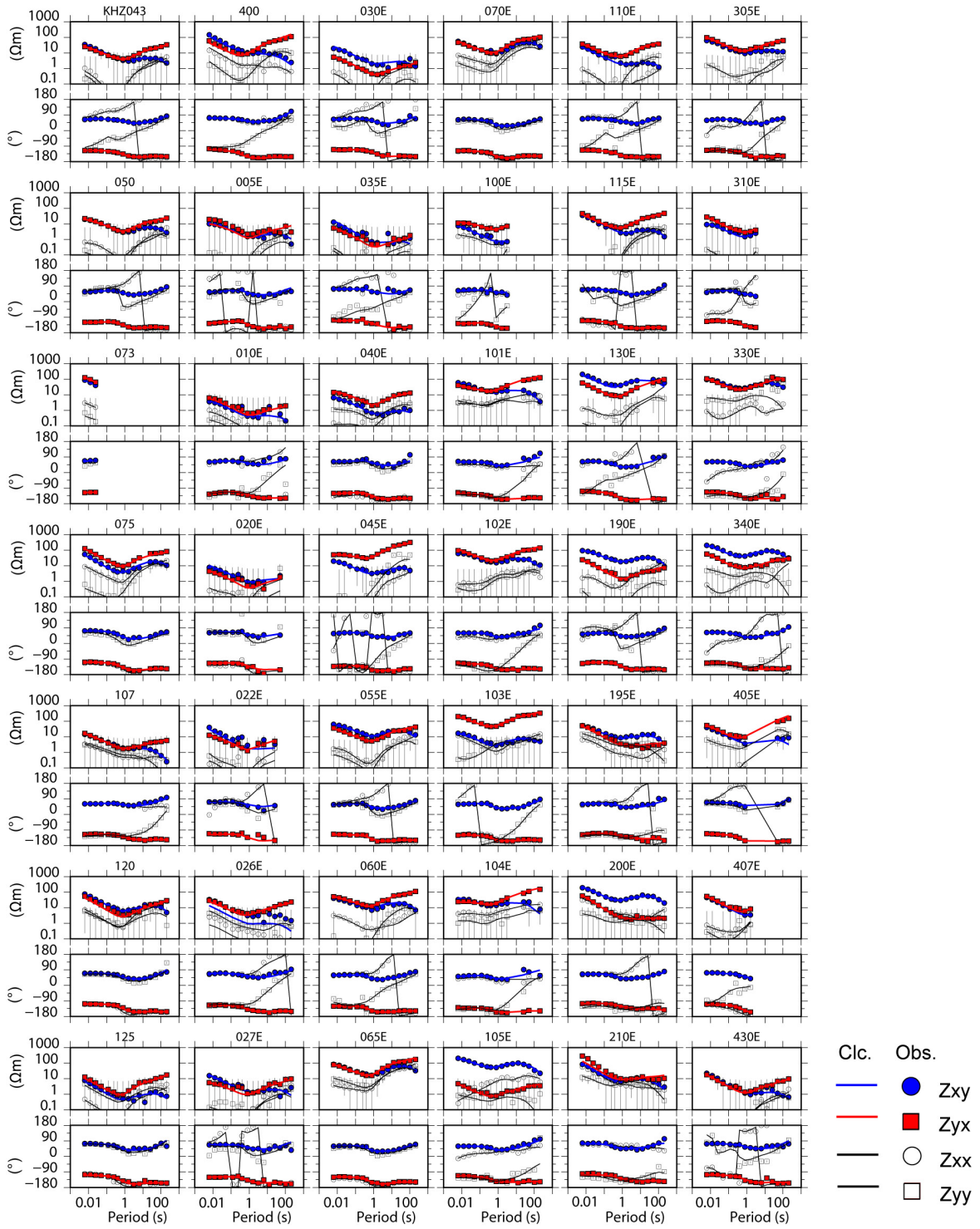
## 2) Tsukamoto et al. (2018) の比抵抗構造の再解析

噴火前のデータセットのインバージョンの結果、得られた比抵抗構造が MT 応答関数を良く説明

していることを確認した (図6)。図7に最終モデルと Tsukamoto et al. (2018) による比抵抗構造の比較を示す。両者の比抵抗構造は概ね類似しており、特に本課題で重要である、浅部低比抵抗層の形状や、圧力源との位置関係は良く再現されている。Tsukamoto et al. (2018) において間引かれていた硫黄山直上の2点のデータを新たに加えることで、硫黄山地下の解像度は向上したと考えられる。海水準より深部の低比抵抗領域については Tsukamoto et al. (2018) より 500m ほど南の韓国岳方向にイメージングされているため図7には一部しか現れていないが、従来の解釈に変わりない。



# 噴火後



# 地磁気変換関数

噴火前

噴火後

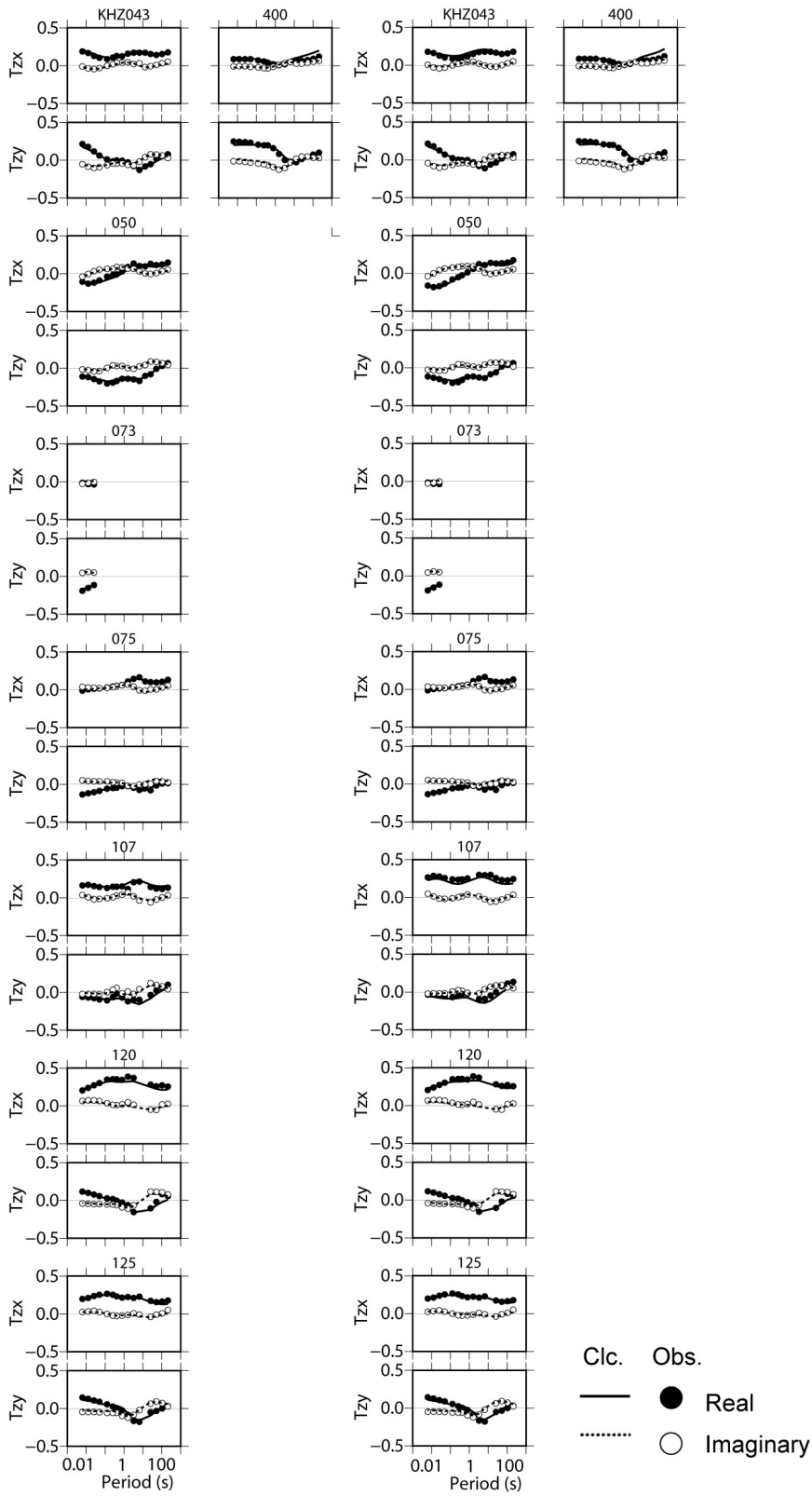


図6 噴火前、噴火後のサウンディングカーブ（シンボル）と、比抵抗構造からの計算値（実線）の比較。

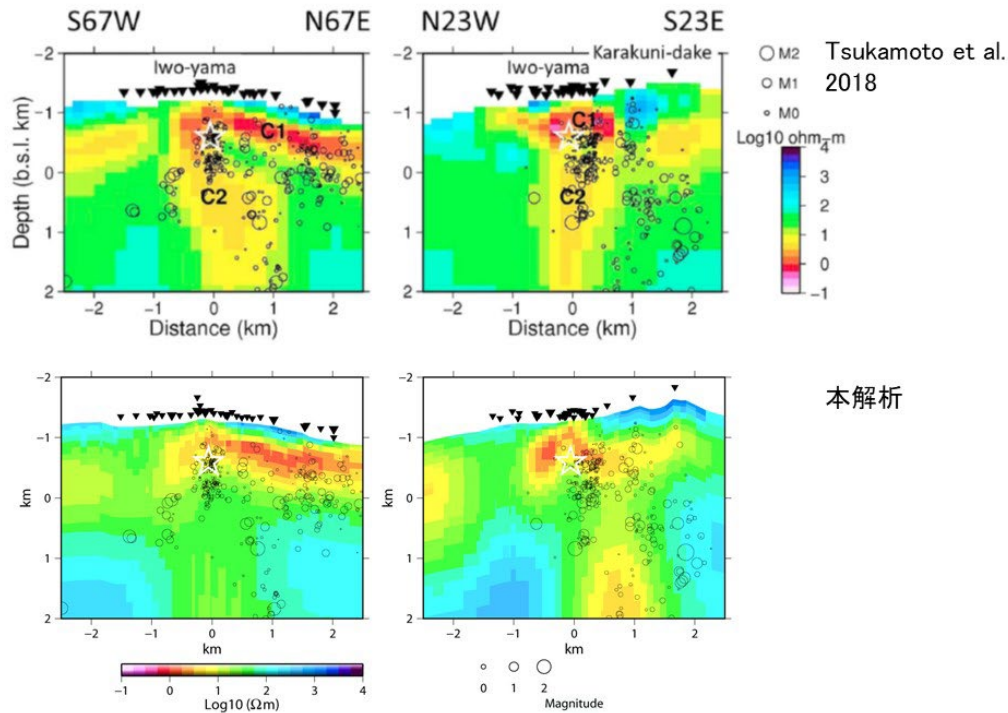


図7 Tsukamoto et al. (2018) と本課題による再解析の結果の比較。☆印は噴火前の水準測量から推定された圧力源。

### 3) 比抵抗構造の時間変化

MT 応答関数の質が良く、よく拘束できている浅部低比抵抗層の時間変化について議論する。噴火前と噴火後の比抵抗構造の水平断面における比較を図8に示す。表層に近い標高 1,100m (-1.1km bsl)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り、地下水への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。標高 800m (-0.8km bsl)では硫黄山の東北東側が高比抵抗化していることが推定された。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 bsl)では、水蒸気噴火地点の南部が高比抵抗化していると推定された。噴火地点の 200m 南に位置する 190E 観測点の変化 (図6) と対応していると思われる。標高 300m 以深 (-0.3km bsl 以深)では、硫黄山の東西がより低比抵抗化していると推定された。これは浅部低比抵抗層が、より「つりがね状」に変化していることに対応する(後述)。

図9に噴火前と噴火後の比抵抗構造の鉛直断面における比較を示す。前述のとおり硫黄山や、西火口周辺の表層から深さ 200~300m 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。S67W-N67E 断面における低比抵抗層の形状に注目すると、山頂部を除いて、その底部付近の低比抵抗部分が深くなり、かつ東西に拡大し、より「つりがね状」に変化した。また「つりがね状」の頂部や、水蒸気噴火地点の南部が高比抵抗化していることも推定された。これは低比抵抗を示す代表的な粘土鉱物である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。

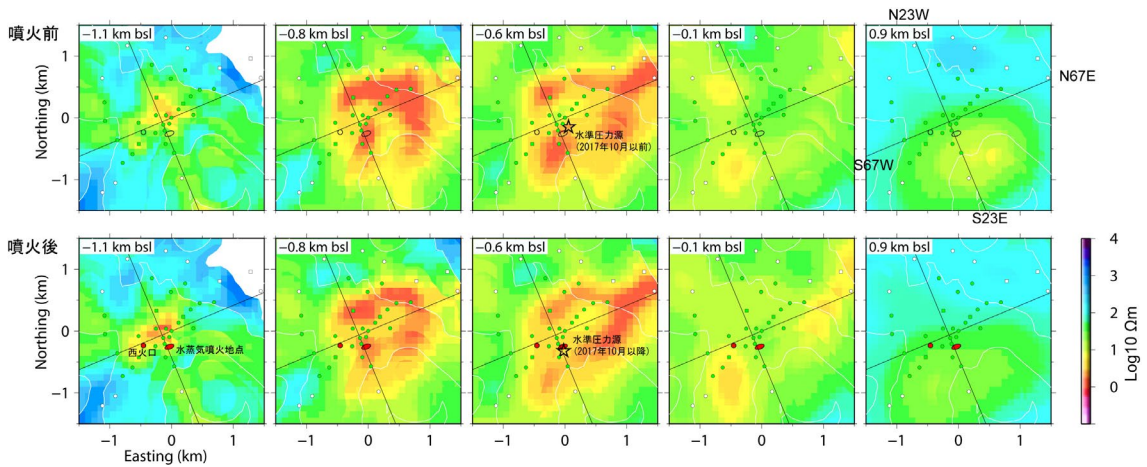


図8 噴火前と噴火後の比抵抗構造（水平断面）の比較。緑シンボルは再測を行ったMT及び電場観測点(図1)、白シンボルは再測を行っていない観測点をそれぞれ示す。2つの破線は鉛直断面の位置(図9)を示す。☆印は水準測量による圧力源を示す。

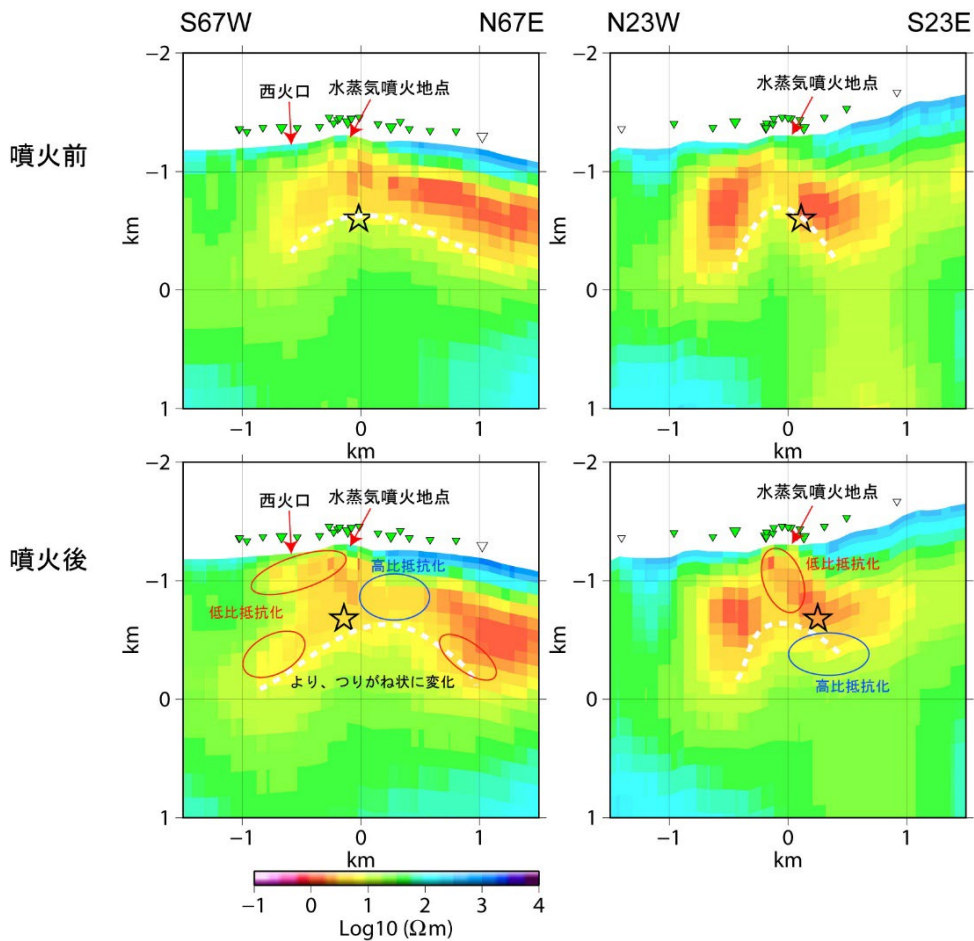


図9 噴火前と噴火後の比抵抗構造（鉛直断面）の比較。白破線は低比抵抗層の底を示す。その他のシンボルは図8と同様。☆印の水準測量による圧力源の位置は、噴火前と噴火後で異なる事に注意。

### (g) 結論並びに今後の課題

2018年4月の水蒸気噴火前と、噴火後のMT応答関数の比較から、霧島硫黄山地下の比抵抗構造が変化していることが分かった。特に表層の不均質の影響をほとんど受けないInduction vectorとPhase tensorに、推定誤差を越える明瞭な変化が見られたことが決め手となった。Induction vectorとPhase tensorの説明を重要視したインバージョンから、噴火以前の構造に対し、噴火後はキャップロック構造に対応すると考えられる低比抵抗域が水平方向に拡大し、その形状もより「つりがね状」になっており、高間隙水圧の流体を貯めこみやすい構造に変化したと推定された。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、「つりがね状」の低比抵抗領域の頂部付近は高比抵抗化したと推定され、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がある。一方で、地表の地熱活動の活発化が見られる領域の地下で、表層から深さ200m程度が低比抵抗化していることが明らかであり、この低比抵抗化が熱水変質の進行を意味するのか、それとも熱水の寄与が大きくなっているのかを明らかにすることは、水蒸気噴火を予測する上で重要な課題といえる。

本課題では、2018年4月の水蒸気噴火前と噴火後のMTデータを比較し、比抵抗構造変化を推定した。噴火前では硫黄山周辺の計測のほとんどは2016年10月～11月に行われた。他方、噴火後の計測は2024年10月～11月に行われた。本課題の結果は、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。本課題で得られたInduction vectorの変化は予想外に大きく明瞭で、時間変化を捉える上で鉛直磁場も含めた磁場3成分の連続観測が有効であることが示された。Induction vectorは観測点に対して横方向の比抵抗構造コントラストに敏感なため、火口近傍でなく、やや離れた場所からでも比抵抗構造変化の検出に期待が持てる。今後、火山でのMT調査では、可能な限り磁場3成分の測定も含めること、磁場3成分を含めたMT連続観測点を設置することが望まれる。

本課題では、Induction vectorとPhase tensorの変化から、比抵抗構造の変化が生じたことが明らかになったが、実際の比抵抗構造変化推定では、深部、特に低比抵抗層の底より下部の変化は拘束が弱く、本報告書では議論していない。これは深部に対応する周期1秒より長周期のMT応答関数の質が悪いこと、磁場3成分を測定している観測点が3点しかないことが大きな理由である。前者はより長期間のデータ取得、後者は磁場3成分観測の空間カバレッジを上げることで改善される。しかし、労力をかけた繰り返し観測を行うことは大きな負担となり、結果的に時間分解能が犠牲になる。連続観測においては、長期間データ取得の問題が解決されるため、将来的には磁場3成分を含んだMT法の連続観測を複数観測点で行うことが有効である。MT法による比抵抗構造モニタリングを実用的なものにするためには安価、低消費電力のMT測定機の開発も望まれる。

### (h) 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.
- Rung-Arunwan, T., W. Siripunvaraporn and H. Utada On the Berdichevsky average. *Phys Earth Planet Int* 253:1-4. doi:10.1016/j.pepi.2016.01.006. 2016.

- 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.
- 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](https://www.kazan-pj.jp/wp-content/uploads/2025/04/00_2023b.pdf)