

2022年  
10月号

# NEWS LETTER



IEVG ニュースレター  
Vol.9 No.4

[プレス発表]

## 紀伊半島南部の橋杭岩<sup>はしぐいいわ</sup>周辺で巨大津波の証拠を発見

行谷佑一（海溝型地震履歴研究グループ）・前李英明（法政大学）・宍倉正展（地質調査総合センター 連携推進室 国内連携グループ）・越後智雄（株式会社環境地質）

### はじめに

紀伊半島南部に位置する和歌山県串本町には橋杭岩<sup>はしぐいいわ</sup>と呼ばれる巨岩列が存在します（図1）。巨岩列は海岸に一直線状に並んでおり、まるで橋脚のように見えることからその名が付けられたとされ、国の名勝・天然記念物に指定されています。この橋杭岩はマグマの貫入によって生成された岩石です（豊

島, 1968)。橋杭岩の周辺には、泥岩でできた波蝕棚と呼ばれる平らな岩礁の上に、多数の岩塊（巨礫）が散らばっている様子を見ることができます。これらの巨礫も同じマグマ由来の岩石からなるので、もともとは橋杭岩にあった岩石が分離してすぐ下に落下し、その後周囲に移動したものと考えられます。



図1 和歌山県串本町橋杭岩周辺の巨礫（「震源域」は地震調査研究推進本部（2013）を利用）

### Contents

- 01 研究成果紹介 紀伊半島南部の橋杭岩周辺で巨大津波の証拠を発見 …… 行谷佑一・前李英明・宍倉正展・越後智雄
- 07 研究現場紹介 和歌山県における新規観測点（日高川和佐観測点）の完成報告－南海トラフ地震モニタリングのための地下水等総合観測施設整備工事－ …… 北川有一・木口 努・板場智史・松本則夫
- 08 受賞報告 澤井祐紀研究グループ長が2022年日本第四紀学会学術賞を受賞
- 09 受賞報告 海溝型地震履歴研究グループの篠崎鉄哉 JSPS 特別研究員 PD（現在、国立歴史民俗博物館）が2022年日本第四紀学会若手学術賞を受賞
- 10 新人研究紹介 Image and understand volcanic structure: can we better forecast volcanic eruptions? …… GRESSE Marceau
- 16 外部委員会活動報告 2022年8月～9月

本研究ではこの巨礫の移動の原因について、過去に大きな津波や高潮などで橋杭岩から運ばれたためであると推定しました。そこで、これらの巨礫の位置や大きさを現地で測定し、どのくらいの規模の津波によって巨礫が動くか計算を行いました。この結果、南海トラフ沿いで歴史上最大とされる1707年宝永地震による津波の規模でも動かない巨礫が存在することがわかりました。これは1707年津波を超える大きな津波がかつてこの地を来襲し、巨礫を動かしたと考えられます。この成果の詳細は国際誌「Tectonophysics」誌に掲載されています (Namegaya *et al.* 2022)。

なお、本稿は2022年9月に産業技術総合研究所が行ったプレスリリース ([https://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2022/pr20220912/pr20220912.html](https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2022/pr20220912/pr20220912.html)) に加筆修正したものです。

## 研究の社会的背景

津波に対する防災計画を考える場合、過去にその場所にどのくらい大きな津波が来襲したのかを知ることが基本的かつ重要な知見になります。例えば、将来に大規模地震の発生が懸念される南海トラフ沿いでは、歴史記録によってこれまでに繰り返した大きな地震や津波が発生したことがよく知られています (例えば、石橋, 2004)。このうち1944年昭和東南海地震は南海トラフの東側、1946年昭和南海地震は西側でそれぞれ地震が発生しました。それらの一つ前の1854年安政地震でも南海トラフの東側で地震が発生した後、約30時間後に西側で地震が発生しています。ところが、さらに一つ前の1707年宝永地震では南海トラフのほぼ全域にわたり地震が発生したことが知られており、この地震が現在知られている最大の地震とされています (例えば、地震調査研究推進本部, 2013)。こういった大きな地震津波は過去数千年以上にわたって繰り返して発生してきたと考えられます。しかし、過去に1707年宝永地震津波よりも大きな津波が来襲したか否かという問題に関して、定量的な検討の例はありませんでした。

## 研究の経緯

産業技術総合研究所ではこれまで地質学的な調査を実施し数値シミュレーションと組み合わせて過去に発生した地震を推定する研究を行ってきました (例えば, Pilarczyk *et al.* 2021, Sawai *et al.* 2012)。過去に発生した地震は将来も発生する可能性がある、このような考え方から過去に発生した地震、すなわち古地震の実態解明を進めています。本研究もその一環です。巨礫の分布と津波の数値計算とを組み合わせて地震を推定した研究は過去にも報告例がありますが (例えば, Imamura *et al.* 2008, Goto *et al.* 2010)、本研究は巨礫を形成した母体の岩石の位置が判明している、非常に珍しい調査地を対象としています。

## 研究の内容

橋杭岩とは和歌山県串本町東岸に位置する、南北に直線的に並ぶ巨岩列です (図1)。図2のようにこの巨岩列はマグマの貫入に由来したデイサイトの岩脈が、侵食されずに突出したものであり、その西側には泥岩でできた平坦な波蝕棚が広がります。その波蝕棚の上に橋杭岩と同じデイサイトからなる巨礫が千個以上分布しており、橋杭岩から分離したものと考えられます (豊島, 1968)。波蝕棚はほぼ平坦であるため、橋杭岩から分離して落下しただけでは、巨礫は橋杭岩周辺にあるはずですが、実際には波蝕棚上に広く分布しています。このことから、巨礫は大波によって (前杵・坪野, 1990)、とくに津波や高潮などの波の作用によって現在の位置まで運ばれたと推定しました。

本研究では、まず分布する1,311個の巨礫の位置や大きさを現地で調査しました (図3)。最も大きなものと長径は7 mに及ぶものがありました。最も重いものは220 tonを超えます。調査地域内では、巨礫はランダムに分布しているように見え、密集している部分と全くない部分が観察されます。比較的軽い巨礫は橋杭岩からの距離に関係なく均一に分布していますが、重い巨礫は橋杭岩周辺に分布していることがわかります (図3e)。

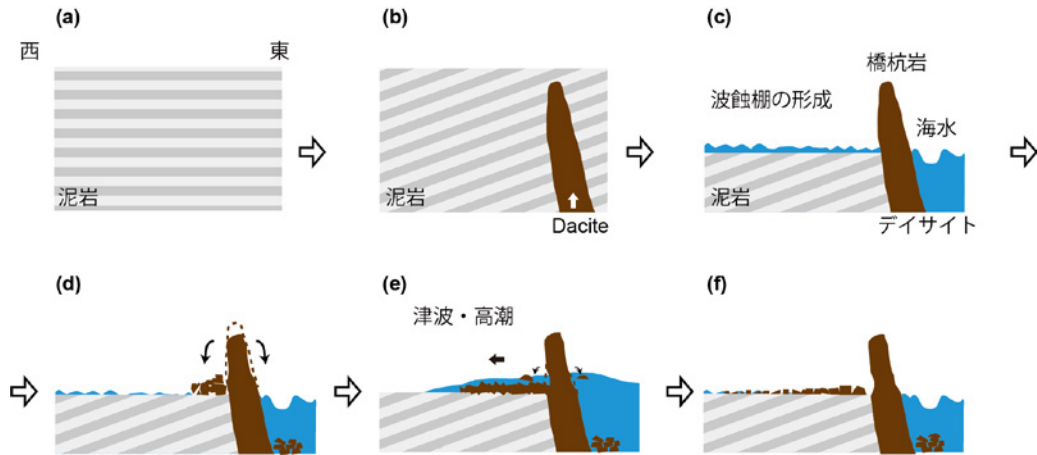


図2 橋杭岩および巨礫形成の概略図。(a) はるか昔の中新世前期頃に泥岩が堆積。(b) 中新世中期頃に地下からマグマが貫入。(c) 第四紀後期頃に海水の存在により橋杭岩周辺の比較的柔らかい泥岩が削られ橋杭岩が露出し、その西側では波蝕棚と呼ばれる平らな地面が形成。(d) 風化やひびが入るなどして橋杭岩の一部が分離し巨礫が形成。(e) 巨礫が津波や高潮といった海の波の作用により橋杭岩西側の波蝕棚上へ運搬。(f) 現在の巨礫の分布。(a)-(d) は豊島(1968)に基づいて作成、Namegaya *et al.* (2022) の Fig. 2 を改変。

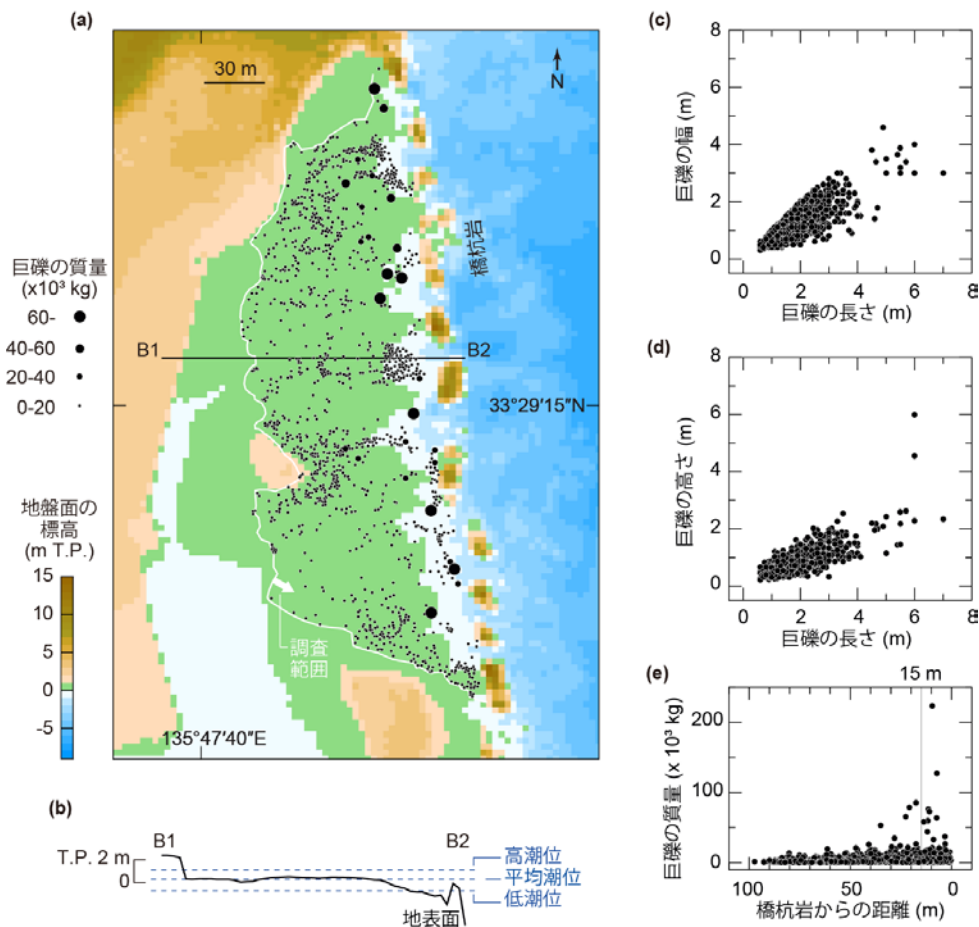


図3 橋杭岩周辺の巨礫の現地調査結果。(a) 巨礫の分布図。(b) 図(a)のB1-B2測線の地形断面図。(c)巨礫の長さに対する幅。(d)巨礫の長さに対する高さ。(e)橋杭岩からの距離に対する巨礫の質量。Namegaya *et al.*(2022)の Fig. 3 を改変。

では、これらの巨礫は津波により動くのでしょうか。これを明らかにするために、これらの巨礫が1707年宝永地震津波で動くかを数値計算で検討しました。計算の条件として、橋杭岩から水平距離で15 mの範囲にある巨礫は単に橋杭岩から自由落下しただけで過去に津波や高潮で移動していないとみなし、それ以外の合計1,103個の巨礫を対象としました。また、1707年宝永地震では地盤が隆起したと考えられており、当時の海面の位置を示す生物化石が現在の海面より1.3 m高い位置にある(宍倉・他, 2008)ので、地盤高を現在の地形から1.3 m低く設定して計算しています。1707年宝永地震以後には1854年安政地震や1944年・1946年昭和地震が発生しており、地震時あるいは地震と地震との間において地盤面の高さは変動していると考えられますが、この1.3 mというのはそれらも含めてトータルで1707年宝永地震の直前の地盤面が現在よりも1.3 m低かったことを意味しています。

1707年宝永地震の断層モデルとして既存の研究成果である安中・他(2003)、相田(1981a, 1981b)、およびFurumura *et al.* (2011)を用い、コンピュータ上で模擬的に津波を発生させ、津波の高さや流速を計算しました。さらに巨礫に働く海水からの流体力と、巨礫と地面との間の最大静止摩擦力を計算し、流体力が最大静止摩擦力を越える場合に巨礫が動き出すという判定を行いました。なお、計算の初期条件として、本来であれば1707年宝永地震の直前における巨礫の位置の状態を復元して計算を実施すべきですが、同地震直前の巨礫の位置を把握することは困難です。そこで巨礫が現在の位置に存在するとして計算した場合と、巨礫が橋杭岩のすぐそばに位置していたと仮定して計算した場合(準原位置)との2種類を計算しました。この結果、いずれの条件とも全てのモデルにおいて多くの巨礫が動くことがわかりました(図4)。しかしながら、特に大きな巨礫など一部で動かない巨礫も存在することがわかりました。このことは1707年宝永地震津波よりも大きな津波が過去にこの地を襲ったことを示しています。

それではどのような津波であれば全ての巨礫が動くのでしょうか。この一つの場合として紀伊半島南東沖合にあるプレート境界の分岐断層(Park *et al.*, 2002; Moore *et al.*, 2007)の活動を考えました。1707年宝永地震の津波波源モデルに加え、同時にこの分岐断層も動いた例を考えると、準原位置において全ての巨礫が動く結果となりました。また別の案とし

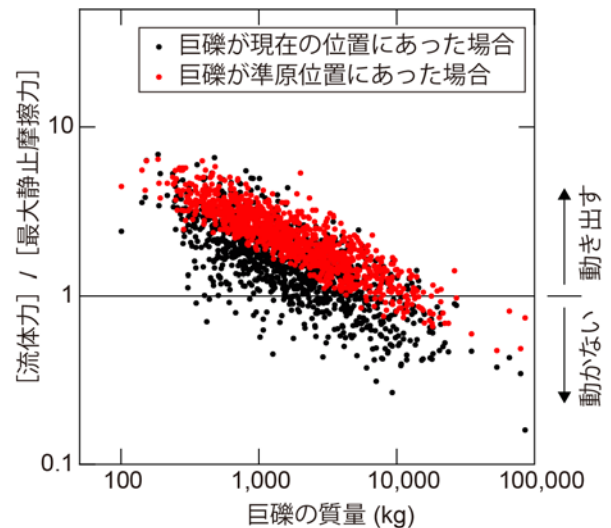


図4 1707年宝永地震の断層モデル(安中・他, 2003)により計算された津波により巨礫が受ける流体力と最大静止摩擦力との比。黒点は巨礫が現在の位置に存在した場合の結果、赤点は巨礫が準原位置に存在した場合の結果。縦軸の流体力と最大静止摩擦力との比が1を超えた場合にその巨礫は動き出すと判定。原位置および準原位置においても、1707年宝永地震の津波では動かない巨礫が存在することがわかる。Namegaya *et al.* (2022)のFig. 5cを改変。



図5 台座に乗った巨礫の例。周辺の地面に比べ一段高く位置する。立てかけてあるのは標尺で下側の黄色部分が1 m。

て、1707年宝永地震の津波波源モデルのすべり量を2倍にして計算を行ったところ、より多くの巨礫が動く結果となりましたが動かない巨礫もまだ存在する結果となりました。このほか、本研究では定量的な解析をしていませんが、紀伊半島南東沖合での海底地滑りも巨礫を動かす原因かもしれません。ただし、ここで検討した例はあくまで可能性の一つとして挙げたに過ぎず、当然のことながらほかの要因もありえると考えられます。いずれにせよここで重要なことは、橋杭岩周辺において、歴史上最大と言われる1707年宝永地震による津波よりも大きい津波が過去にあったということでしょう。

一方、台風高潮による影響についても検討しました。2012年9月に台風17号がこの地を来襲し、当地における1951年以降の観測統計の中で最大級の潮位の上昇がありました。この台風来襲の前後の期間において橋杭岩周辺の巨礫も含めた地形をレーザースキャンにより測定し、両期間の地形を比較することで巨礫が動いたか否かを調べました。この結果、動いたのは巨礫の中でも小さいもののみで、ほとんどの巨礫は動いていませんでした。さらに、1976年と2007年に撮影された空中写真から巨礫の移動を調べた結果でも、判読可能な範囲では大きな巨礫の移動は確認できませんでした。もちろん未知の巨大な高潮が過去に存在した可能性は排除できません。しかしながら、巨礫の中には図5のように台座状の泥岩の上に乗ったものも散見されました。これらは巨礫周辺の岩盤面が風化や波の侵食作用で削られ、高度を下げたのに対し、巨礫の直下の岩盤面がそういった侵食作用から免れた結果と考えられます。これは巨礫が比較的長期間その場所にとどまった証拠であると考えられます。どの程度の期間その場所にとどまったかは不明ですが、おそらく数十年、数百年といった長いスケールでその場所に留まっていると推定されます。したがって台座の存在からも、毎年来る台風の高潮で大きな巨礫は動かず、巨礫が現在の分布をしているのは津波によると考えるのが合理的だと思われます。

## 今後の予定

今後は、この巨礫がいつ移動したのか、すなわち巨大津波がいつ襲ったのかについても地質試料の年代測定等を通じて解明することを目指します。また橋杭岩周辺以外にも南海トラフ沿いで宝永地震を超える規模の津波の証拠を探し、検証していく予定です。

## 謝辞

和歌山県庁、串本町役場、南紀熊野ジオパークのみなさまから現地調査の便宜を図っていただきました。現地調査においては永井亜沙香氏にご協力いただきました。本研究の一部はJSPS科研費(JP18500779, JP20500895, JP24300319, JP16K01223)の援助を受けて実施しました。本稿の図1の挿絵、図3、および図4はGeneric Mapping Tools (GMT) (Wessel *et al.*, 2013)により作成しました。記して感謝いたします。

## 参考文献

- 相田 勇, 1981a, 東海道沖におこった歴史津波の数値実験, 地震研究所彙報, 56, 367-390.
- 相田 勇, 1981b, 南海道沖の津波の数値実験, 地震研究所彙報, 56, 713-730.
- 安中正, 稲垣和男, 田中寛好, 柳沢 賢, 2003, 数値シミュレーションに基づく南海トラフ沿いの大地震の特徴, 土木学会地震工学論文集, <http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00578/2003/27-0307.pdf>.
- Furumura, T., Imai, K., and Maeda, T., 2011, A revised tsunami source model for the 1707 Hoei earthquake and simulation of tsunami inundation of Ryujin Lake, Kyushu, Japan, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2010JB007918.
- Goto, K., Kawana, T., and Imamura, F., 2010, Historical and geological evidence of boulders deposited by tsunamis, southern Ryukyu Islands, Japan, *Earth-Sci. Rev.*, 102, pp. 77-79.

- Imamura, F., Goto, K., and Ohkubo, S., 2008, A numerical model for the transport of a boulder by tsunami *J. Geophys. Res.*, 113, DOI: 10.1029/2007JC004170
- 石橋克彦, 2014, 叢書 震災と社会 南海トラフ巨大地震 歴史 科学 社会, 岩波書店, pp. 205.
- 地震調査研究推進本部, 2013, 南海トラフの地震活動の長期評価 (第二版), 平成 25 年 5 月 24 日発表, 94 pp.
- 前杵英明, 坪野賢一郎, 1990, 紀伊半島南部の完新世地殻変動, *地学雑誌*, 99, 43-63.
- Moore, G.F., Bangs, N.L., Taira, A., Kuramoto, S., Pangborn, E., Tobin, H.J., 2007, Three-Dimensional Splay Fault Geometry and Implications for Tsunami Generation, *Science*, 318, pp. 1128–1131.
- Namegaya, Y., Maemoku, H., Shishikura, M., and Echigo, T., 2022, Evidence from boulders for extraordinary tsunamis along Nankai Trough, Japan, *Tectonophysics*, DOI: 10.1016/j.tecto.2022.229487.
- Park, J., Tsuru, T., Kodaira, S., Cummins, P.R., Kaneda, Y., 2002, Splay Fault Branching along the Nankai Subduction Zone, *Science*, 297, pp. 1157–1160.
- Pilarczyk, E. J., Sawai, Y., Namegaya, Y., Tamura, T., Tanigawa, T., Matsumoto, D., Shinozaki, T., Fujiwara, O., Shishikura, M., Shimada, Y., Dura, T., Horton, P. B., Parnell, C. A., and Vane, H. C., 2021, A further source of Tokyo earthquakes and Pacific Ocean tsunamis, *Nature Geoscience*, DOI: s41561-021-00812-2.
- Sawai, Y., Namegaya, Y., Okamura, Y., Satake, K., and Shishikura, M., 2012, Challenges of anticipating the 2011 Tohoku earthquake and tsunami using coastal geology. *Geophys. Res. Lett.* 39, L21309 (2012).
- 穴倉正展, 越後智雄, 前杵英明, 石山達也, 永井亜沙香, 2008, 南海トラフ沿いに起きた歴史地震に伴う隆起を記録した紀伊半島南部沿岸の生物遺骸群集, *歴史地震*, 23, 21-26.
- 豊島吉則, 1968, 和歌山県串本町付近の海蝕台と海蝕棚, *鳥取大学教育学部紀要*, 19, 41-48.
- Wessel, P., Smith, W.H.F., Scharroo, R., Luis, J., Wobbe, F., 2013, Generic Mapping Tools: improved version released *EOS Trans. AGU*, 94, pp. 409-410

## 研究現場紹介

## 和歌山県における新規観測点（日高川和佐観測点）の完成報告－南海トラフ地震モニタリングのための地下水等総合観測施設整備工事－

北川有一・木口 努・板場智史・松本則夫（地震地下水研究グループ）

南海トラフ沿いでは今後 30 年以内に M 8～9 クラスの地震が 70～80% の確率で発生するとされ（地震調査研究推進本部・地震調査委員会，2022），最悪の場合には 169 兆円を超える被害が内閣府によって推計されています。

産総研では，南海トラフ沿いで発生する地震の予測精度向上を目的として，20 観測点で構成される南海トラフ地震モニタリングのための地下水等総合観測ネットワークの構築を計画し，2006 年以降，地下水・ひずみ観測点を 16 カ所整備しました。17 カ所目として，令和 2 年度第 3 次補正予算にて和歌山県日高郡日高川町に新規の地下水・ひずみ観測点 1 点（以下，日高川和佐観測点）の整備を進めました（松本，2021）。

日高川和佐観測点の位置は図 1 に示す通りです。同観測点の直下では深部低周波微動や深部ゆっくりすべり（SSE）が発生しており，紀伊半島西部における深部 SSE 発生域をより高精度に把握するために重要な観測点となります。同観測点では深さ 30 m，200 m，600 m の 3 本のボーリング孔を掘削しました。2022 年 2 月に深さ 600 m のボーリング孔

の孔底にデジタル式地殻活動総合観測装置を埋設しました。同年 3 月に観測施設が完成し，同年 4 月に 3 本のボーリング孔に水位計を設置して，一連の作業は完了しました。

## 謝辞

和歌山県日高郡日高川町のご理解とご協力を得て，整備工事を開始することができました。現地作業におきましては，地元自治会・住民・近隣施設のご理解を得て，住鉱資源開発株式会社を始めとする



写真 1 日高川和佐観測点の外観。



写真 2 デジタル式地殻活動総合観測装置の埋設作業風景。

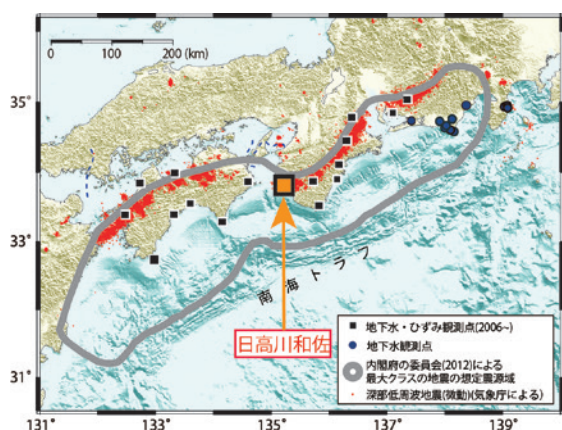


図 1 産総研の地下水等総合観測ネットワークおよび日高川和佐観測点の位置。

関係者の皆様のご尽力により完成しました。ここに記して感謝申し上げます。

### 参考文献

地震調査研究推進本部・地震調査委員会, 2022, 長期評価による地震発生確率値の更新について, 地震調査研究推進本部・地震調査委員会

報道発表資料, [https://www.static.jishin.go.jp/resource/evaluation/long\\_term\\_evaluation/updates/prob2022.pdf](https://www.static.jishin.go.jp/resource/evaluation/long_term_evaluation/updates/prob2022.pdf), 2022年10月7日閲覧.

松本則夫, 2021, 和歌山県において新規観測点のボーリング孔の掘削を開始—南海トラフ地震モニタリングのための地下水等総合観測施設整備工事—, 活断層・火山研究部門ニューズレター, 8, No.3, 1-2.

## 受賞報告 澤井祐紀研究グループ長が2022年日本第四紀学会 学術賞を受賞

活断層・火山研究部門海溝型地震履歴研究グループの澤井祐紀研究グループ長が2022年日本第四紀学会学術賞を受賞しました。同賞は第四紀学の発展に貢献した優れた学術業績をあげた正会員に授与されるものです。今回の受賞は、2022年6月18日に行われた2021年度第3回評議員会において受賞者として決定され、8月27日に開催された日本第四紀学会総会直後の授賞式で、鈴木毅彦会長から授与されました。

澤井氏の受賞研究テーマは「珪藻分析にもとづく環境復元と海溝型地震に関する一連の研究」です。珪藻類は、水分の存在するあらゆる環境に適応している単細胞藻類で、非常に多くの種が報告されています。これらの種は塩分などに応じて異なった分布域を持っており、この特性を利用して過去の環境を推定することができます。澤井氏は、北海道において現生と堆積物中の珪藻群集を比較し、過去に発生した海溝型巨大地震に関係した地殻変動を復元しました。その後は、関東地域や東北地方を対象地域を広げ、過去の巨大津波の浸水域を明らかにする研究に取り組みました。特に、西暦869年貞観津波の実態解明に関する研究は、社会的にも大きなインパクトを与えることになりました。また、国際共同研究として、チリ、タイ、アメリカ、カナダなどで研究を行ってきました。こうした業績が評価され、2022年日本第四紀学会学術賞が授与

されました。受賞理由の詳細は、日本第四紀学会の広報誌 (<http://quaternary.jp/report/QRNL2904.pdf>) からご覧いただけます。



授賞式の様子。写真は活断層・火山研究部門藤原副部門長が撮影。

### 受賞者のコメント

これまでの研究活動を評価いただき、大変嬉しく思います。推薦して下さった方、選考に関わった方々に厚くお礼申し上げます。また、これまでに指導して下さった先生や先輩方、共同研究者の方々、また野外調査や室内作業に協力していただいた方々に深く感謝いたします。これまでの研究の経緯は、日本第四紀学会の広報誌に執筆させていただきました ([http://quaternary.jp/report/QRNL2905\\_rev.pdf](http://quaternary.jp/report/QRNL2905_rev.pdf))。今回の受賞を励みに研究を進めたいと思います。



## 受賞報告

## 海溝型地震履歴研究グループの篠崎鉄哉 JSPS 特別研究員 PD（現在、国立歴史民俗博物館）が 2022 年日本第四紀学会若手学術賞を受賞

海溝型地震履歴研究グループの篠崎鉄哉 JSPS 特別研究員 PD（現在、国立歴史民俗博物館）が 2022 年度日本第四紀学会若手学術賞を受賞し、8 月に開催された日本第四紀学会 2022 年大会で表彰されました。日本第四紀学会若手学術賞は国際誌等における研究発表を通して第四紀学に貢献した優れた学術業績をあげた若手会員（2022 年 4 月 1 日時点で 39 歳以下の会員）に授与されるもので、受賞対象は過去 2 年間の国際誌等に掲載された論文（オンライン化された論文を含む）の筆頭著者とされています。

### 受賞対象論文

対象論文 1: Shinozaki, T. (2021) Geochemical approaches in tsunami research: current knowledge and challenges. *Geoscience Letters*, vol. 8: 6, <https://doi.org/10.1186/s40562-021-00177-9>

対象論文 2: Shinozaki, T., Yamaguchi, N., Sekiguchi, T. (2020) Flume experiments test grain-size distribution of onshore tsunami deposits. *Sedimentary Geology*, vol. 407, 105750, <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2020.105750>.

対象論文 3: Shinozaki, T., Sawai, Y., Ito, K., Hara, J., Matsumoto, D., Tanigawa, K., Pilarczyk, J. E. (2020) Recent and historical tsunami deposits from Lake Tokotan, eastern Hokkaido, Japan, inferred from nondestructive, grain size, and radioactive cesium analyses. *Natural Hazards*, vol.103, 713-730, <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04007-7>.

篠崎 JSPS 特別研究員 PD は、地層中における津波堆積物の識別およびその形成過程に関する研究を進めています。今回の評価対象となった論文は、地球化学的な指標から過去に起きた海水の浸水を検出する手法についてのレビュー（対象論文 1）、津波堆積物の形成過程を復元するための水路実験について（対象論文 2）、堆積物コアに非破壊検査を導入して目視では分からなかった薄く細粒な津波堆積物を識別する試み（対象論文 3）です。受賞理由の詳細は、日本第四紀学会の広報誌 (<http://quaternary.jp/report/QRNL2904.pdf>) からご覧いただけます。

### 受賞者のコメント

この度、日本第四紀学会若手学術賞という栄誉ある賞を頂戴することができ、大変光栄に存じます。今回対象となった 3 本の論文は全て津波堆積物に関する研究ですが、それぞれ研究のアプローチは大きく異なるものとなっています。このような様々な視点での論文を出すことができたのも、共著者の皆様やこれまで係わってくださった多くの皆様のおかげだと実感しております。どの研究も論文になるまで様々な苦労がありましたので、今回このように評価してくださったのは大変喜ばしいことですし、今後の励みになります。10 月より研究活動の場を国立歴史民俗博物館に移しましたが、引き続き津波・地震のリスク評価に貢献できるよう、尽力していきたいと思います。

新人研究紹介

# Image and understand volcanic structure: can we better forecast volcanic eruptions?

GRESSE Marceau (水文地質研究グループ)

## Introduction

Approximately 550 volcanoes have erupted on Earth’s surface since recorded history. Four hundred of these eruptions caused more than 275,000 fatalities [Brown *et al.*, 2017], half of which occurred during the last century due to the rapid population growth near volcanoes [Simkin *et al.*, 2001]. The Japanese archipelago accounts for 20 % of all active volcanoes, and most of its 120 million inhabitants live within 100 km. Therefore, refining eruption prediction capabilities is one of the major goals of research institutions in Japan to mitigate volcanic hazards.

Nowadays, the forecast of volcanic eruptions remains extremely difficult and challenging at volcanoes that develop extensive hydrothermal systems (Figure 1) during their repose periods [e.g., Chiodini *et al.*, 2016]. Indeed, the long-term interactions between heat, water, and magmatic fluids at depth lead to modifications of

physical properties of rocks and geochemical fluids composition [Browne and Lawless, 2001]. For example, hydrothermal alteration processes can greatly reduce host-rock permeability which allows the formation of a gas-dominated region (Figure 1). The latter can lead to a phreatic steam explosion when the pressure exceeds that of the surrounding rock (e.g., Hakone eruption in 2015, Mannen *et al.* [2019]). In addition, altered rocks can also enhance flank instabilities, which can generate partial tsunamigenic edifice collapse, and laterally directed explosions due to the sudden depressurization of hydrothermal fluids [e.g., López and Williams, 1993]. Finally, explosive phreatic, or phreato-magmatic eruptions, can be triggered when magmatic fluids are injected into a pre-existing hydrothermal system, or when magma directly encounters water.

Despite considerable progress to better understand volcanic edifices over the last century, fatal recent

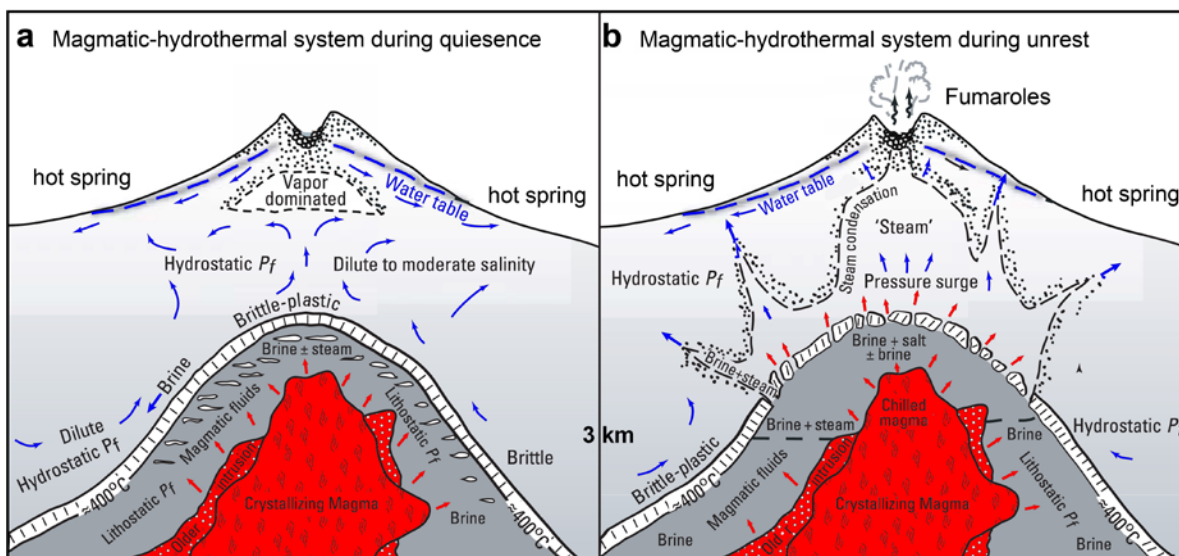


Figure 1: Evolution of a magmatic-hydrothermal system (0–3 km depth) from a) quiescence to b) unrest state. During unrest periods, pressurized magmatic fluids are injected into the overlying hydrothermal system, increasing the temperature and pressure conditions while forming a large gas dominated region. Blue and red arrows indicate fluid circulation within the hydrothermal and the magmatic system, respectively. Figure modified after Fournier [2007].

volcanic hazards (e.g., eruptions of Mt Ontake in 2014 and White Island in 2019) originating from magmatic-hydrothermal interactions have outlined that their assessment remains limited. Indeed, for all these volcanic hazards, classic precursory signals (i.e., seismicity and ground deformation) are difficult to interpret, hidden

or just absents [Montanaro *et al.*, 2022; Terakawa *et al.*, 2016]. Therefore, new combined multidisciplinary methods need to be developed in order to better detect volcanic unrest, and therefore prevent tragic events related to volcanic hazards.

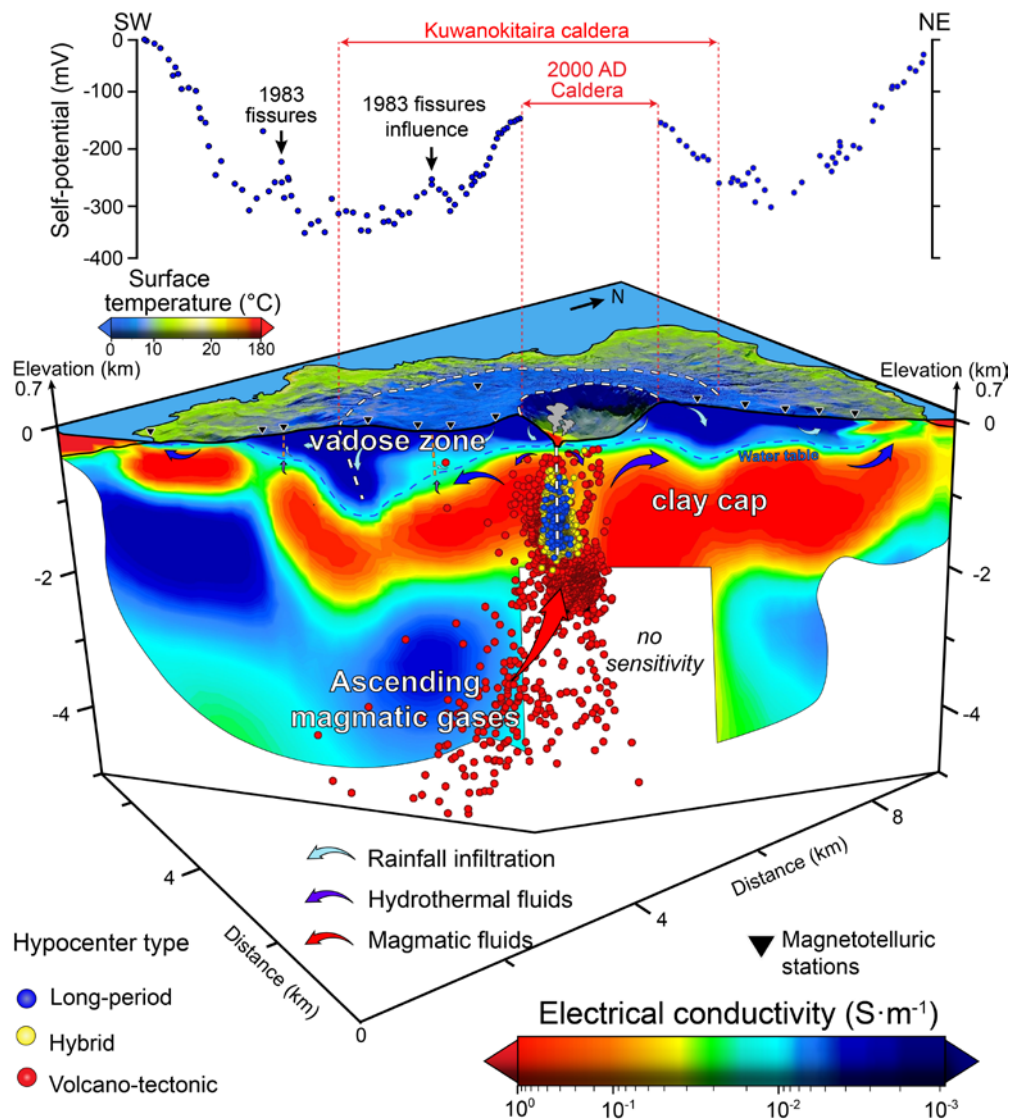


Figure 2: SW-NE cross-section of the electrical conductivity model of Miyakejima volcano with hypocenters, overlain with surface temperature map (in °C) and self-potential (in mV). The vadose zone represents low temperature unsaturated deposits (0–500 m depth, blue color at  $5 \times 10^{-4}$ – $7.7 \times 10^{-3} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ ) where rainfall water infiltrates (light blue arrows) until it reaches the water table. The clay cap is a conductive region (0–2 km depth, red color,  $3.3 \times 10^{-2}$ – $0.4 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ ) associated with hot hydrothermal fluid circulation (blue arrows). At 2–4.5 km depth, a seismogenic resistive region (volcano-tectonic events, red dots) is interpreted as a magmatic gas-rich reservoir (blue color,  $2 \times 10^{-3}$ – $5.10^{-3} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ ). From this reservoir, gases rise through a fractured conduit before being released in the fumarolic area at  $\sim 180^\circ\text{C}$ . This fluid upwelling is associated with a positive self-potential anomaly. During their ascent, these hot fluids cross a  $\sim 1.2$ -km-long liquid-dominated zone causing local steam explosions (long period events, blue dots) revealing the volcanic conduit. Figure modified from Gresse *et al.* [2021].

### Imaging volcanoes: classical geophysical techniques

Subsurface image of volcanoes can be obtained by measuring the electrical conductivity of rock. This physical property describes how an electrical current flow within rocks. The electrical conductivity is highly sensitive to change in temperature, water, and gas content in porous media. Since these parameters are highly variable on volcanoes, the measurement of electrical conductivity is extremely effective in investigating spatio-temporal changes at depth.

Electrical Resistivity Tomography and Magnetotellurics are two geophysical methods used to image shallow (< 1 km depth) [e.g., Gresse *et al.*, 2017] and deep (0–20+

km depth) electrical conductivity structures, respectively [e.g., Matsushima *et al.*, 2020].

When joined with seismic hypocenter locations, electrical conductivity models can reveal magmatic-hydrothermal fluid paths and interactions [Gresse *et al.*, 2021; Peacock *et al.*, 2022; Usui *et al.*, 2017] (Figure 2). In addition, subaerial mappings including self-potential, soil temperature, and CO<sub>2</sub> flux are often used to delineate shallow fluid circulation, and thus better interpret electrical resistivity models [e.g., Finizola *et al.*, 2009]. In general, the upper part of a conductive hydrothermal plume is correlated with positive self-potential, thermal, and degassing anomalies (Figure 2 and 3).

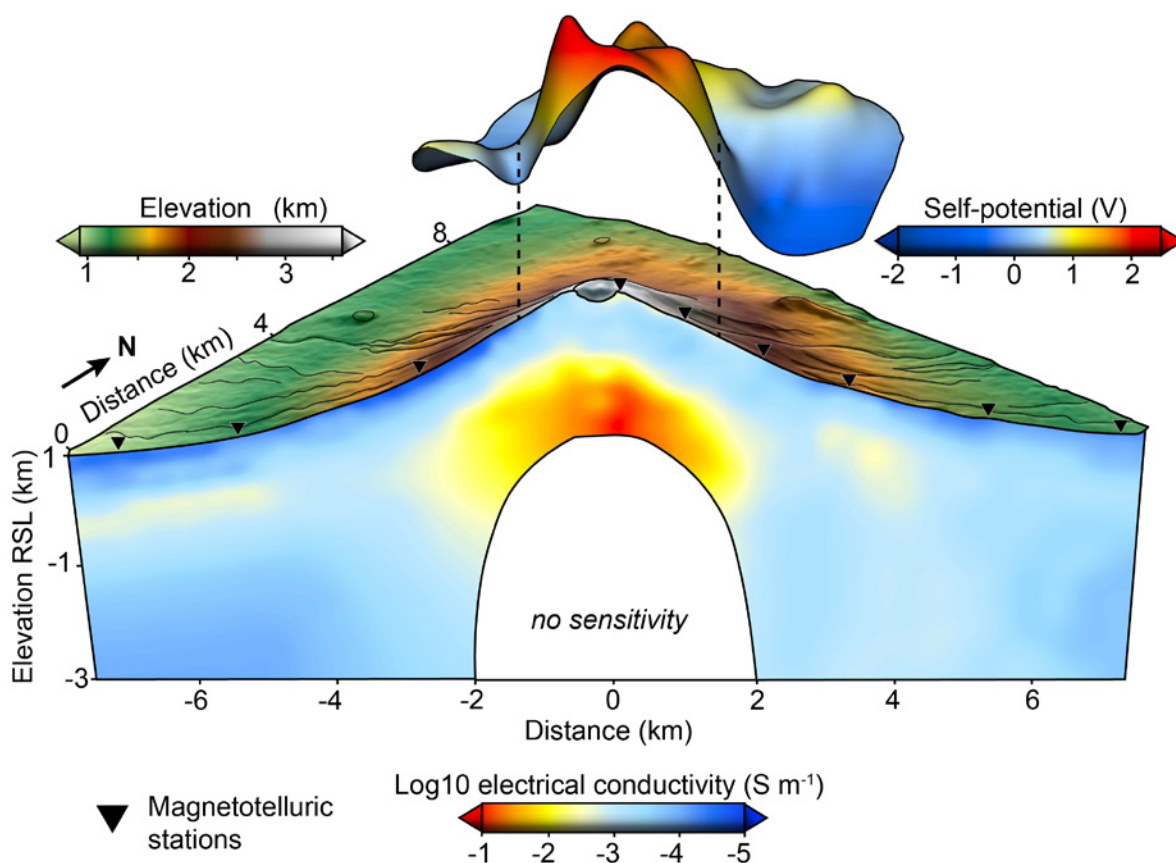


Figure 3: 3-D self-potential anomaly of Mt Fuji volcano and its associated 2-D conductive cross section obtained from Magnetotellurics (black triangles). The positive self-potential anomaly (+2V) is induced by the rising hydrothermal fluids and the hot conductive zone beneath the edifice (red color,  $10^{-1}$ – $10^{-2}$  S·m<sup>-1</sup>). This figure was created by combining results from Aizawa [2004] and Aizawa *et al.* [2005].

### Joint multidisciplinary approach: the future of volcanic research?

Geophysical imaging techniques measure a physical property of rock that is influenced by many parameters. Consequently, results are often ambiguous and non-univocal. In other words, it means that different interpretations can be obtained from the same geophysical image. For this reason, geophysical images often rely on a qualitative interpretation, which can limit their applications for decision-making.

To solve this problem, combined approach between geophysical imaging and numerical modeling could be helpful. Indeed, extracting accurate physical information of volcanic structure is scientifically feasible when joining geophysical data and multi-phase flow modeling. Multiphase flow modeling represents the coupled transport of water, gas, and heat in porous and fractured rocks. Such simulation can be used to model

heat and fluid flow transfer within a volcanic edifice [e.g., *Ingebritsen et al.*, 2010; *Ishido*, 2004], and be compared/combined with geophysical observations: electrical conductivity, seismicity, ground deformation, temperature, gravity, self-potential (e.g., Figure 4).

Despite very encouraging recent studies [e.g., *Aizawa et al.*, 2009; *Byrdina et al.*, 2013; *Zhan et al.*, 2022] joint multiphase flow-geophysical imagery approach remains largely underdeveloped in the volcanological community.

At the IEVG, I intend to participate in the further advancement of this multidisciplinary field, as I believe it will provide important and promising perspectives for more comprehensive volcano monitoring strategies.

### Reference

Aizawa, K. (2004), A large self-potential anomaly and its changes on the quiet Mt. Fuji, Japan, *Geophysical Research Letters*, 31(5). <https://doi.org/10.1029/2004GL019462>

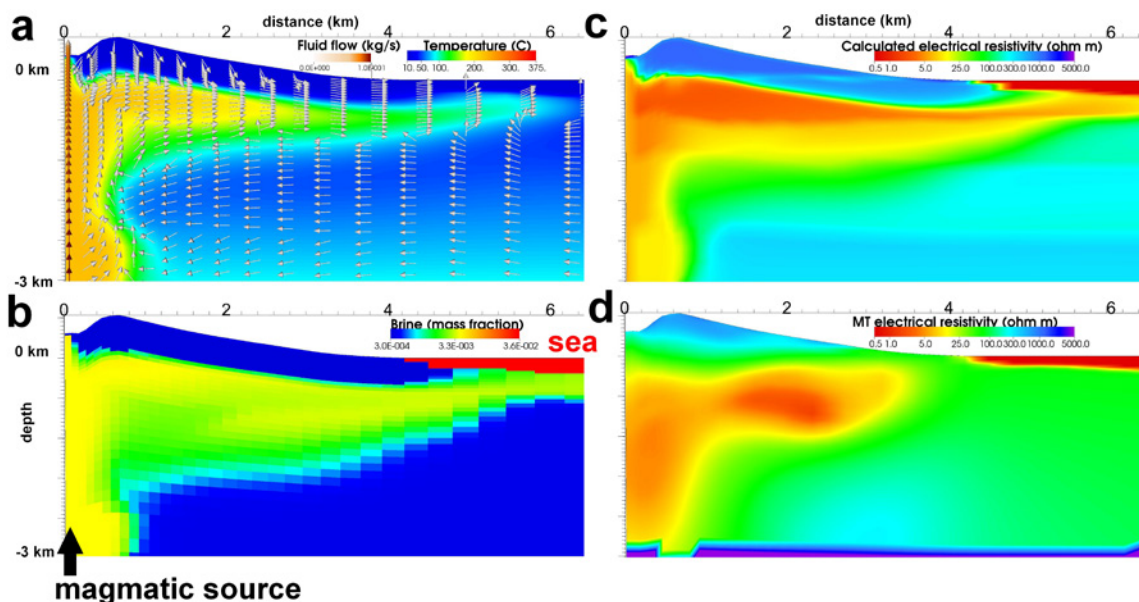


Figure 4. 2-D axisymmetric multiphase flow model of Miyakejima volcano. Magmatic fluids are injected at 3 km depth. Atmospheric and seawater boundary conditions are defined at the surface. a) Temperature and fluid flow distribution, b) Brine concentration, c) Calculated electrical resistivity, and d) Measured electrical resistivity from *Gresse et al.* [2021] (electrical resistivity is the opposite of electrical conductivity). A good match between c) and d) indicates that the numerical simulation can explain the geophysical data in terms of temperature, salinity, gas saturation, and thus, help at reducing the ambiguity of the electrical conductivity model.

- Aizawa, K., Y. Ogawa, and T. Ishido (2009), Groundwater flow and hydrothermal systems within volcanic edifices: Delineation by electric self-potential and magnetotellurics, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B1), B01208. <https://doi.org/10.1029/2008JB005910>
- Aizawa, K., R. Yoshimura, N. Oshiman, K. Yamazaki, T. Uto, Y. Ogawa, . . . W. A. Hurst (2005), Hydrothermal system beneath Mt. Fuji volcano inferred from magnetotellurics and electric self-potential, *Earth and Planetary Science Letters*, 235(1–2), 343–355. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.03.023>
- Brown, S. K., S. F. Jenkins, R. S. J. Sparks, H. Odbert, and M. R. Auker (2017), Volcanic fatalities database: analysis of volcanic threat with distance and victim classification, *Journal of Applied Volcanology*, 6(1), 15. <https://doi.org/10.1186/s13617-017-0067-4>
- Browne, P. R. L., and J. V. Lawless (2001), Characteristics of hydrothermal eruptions, with examples from New Zealand and elsewhere, *Earth-Science Reviews*, 52(4), 299–331. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00030-1](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00030-1)
- Byrdina, S., D. Ramos, J. Vandemeulebrouck, P. Masias, A. Revil, A. Finizola, . . . O. Macedo (2013), Influence of the regional topography on the remote emplacement of hydrothermal systems with examples of Ticsani and Ubina volcanoes, Southern Peru, *Earth and Planetary Science Letters*, 365(0), 152–164. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.01.018>
- Chiodini, G., A. Paonita, A. Aiuppa, A. Costa, S. Caliro, P. De Martino, . . . J. Vandemeulebrouck (2016), Magmas near the critical degassing pressure drive volcanic unrest towards a critical state, *Nature Communications*, 7, 13712. <https://doi.org/10.1038/ncomms13712>
- Finizola, A., M. Aubert, A. Revil, C. Schütze, and F. Sortino (2009), Importance of structural history in the summit area of Stromboli during the 2002–2003 eruptive crisis inferred from temperature, soil CO<sub>2</sub>, self-potential, and electrical resistivity tomography, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 183(3–4), 213–227. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.04.002>
- Fournier, R. O. (2007), Hydrothermal systems and volcano geochemistry, in *Volcano Deformation: Geodetic Monitoring Techniques*, edited by D. Dzurisin, pp. 323–341, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-49302-0\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-540-49302-0_10)
- Gresse, M., J. Vandemeulebrouck, S. Byrdina, G. Chiodini, A. Revil, T. C. Johnson, . . . L. Metral (2017), Three-Dimensional Electrical Resistivity Tomography of the Solfatara Crater (Italy): Implication for the Multiphase Flow Structure of the Shallow Hydrothermal System, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(11), 8749–8768. <https://doi.org/10.1002/2017JB014389>
- Gresse, M., M. Uyeshima, T. Koyama, H. Hase, K. Aizawa, Y. Yamaya, . . . M. Hata (2021), Hydrothermal and Magmatic System of a Volcanic Island Inferred From Magnetotellurics, Seismicity, Self-potential, and Thermal Image: An Example of Miyakejima (Japan), *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(6), e2021JB022034. <https://doi.org/10.1029/2021JB022034>
- Ingebritsen, S. E., S. Geiger, S. Hurwitz, and T. Driesner (2010), Numerical simulation of magmatic hydrothermal systems, *Reviews of Geophysics*, 48(1), RG1002. <https://doi.org/10.1029/2009RG000287>
- Ishido, T. (2004), Electrokinetic mechanism for the “W” -shaped self-potential profile on volcanoes, *Geophysical Research Letters*, 31(15). <https://doi.org/10.1029/2004GL020409>
- López, D. L., and S. N. Williams (1993), Catastrophic Volcanic Collapse: Relation to Hydrothermal Processes, *Science*, 260(5115), 1794–1796. <https://doi.org/10.1126/science.260.5115.1794>
- Mannen, K., T. Tanada, A. Jomori, T. Akatsuka, G. Kikugawa, Y. Fukazawa, . . . K. Fujimoto (2019), Source constraints for the 2015 phreatic eruption

- of Hakone volcano, Japan, based on geological analysis and resistivity structure, *Earth, Planets and Space*, 71(1), 135. <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1116-5>
- Matsushima, N., M. Utsugi, S. Takakura, T. Yamasaki, M. Hata, T. Hashimoto, and M. Uyeshima (2020), Magmatic–hydrothermal system of Aso Volcano, Japan, inferred from electrical resistivity structures, *Earth, Planets and Space*, 72(1), 57. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01180-8>
- Montanaro, C., E. Mick, J. Salas-Navarro, C. Caudron, S. J. Cronin, J. M. de Moor, . . . K. Strehlow (2022), Phreatic and Hydrothermal Eruptions: From Overlooked to Looking Over, *Bulletin of Volcanology*, 84(6), 64. <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01571-7>
- Peacock, J., D. Alumbaugh, M. Mitchell, and C. Hartline (2022), Repeat magnetotelluric measurements to monitor The Geysers steam field in northern California. Oral presentation at 47th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, USA.
- Simkin, T., L. Siebert, and R. Blong (2001), Volcano Fatalities - Lessons from the Historical Record, *Science*, 291(5502), 255. <https://doi.org/10.1126/science.291.5502.255>
- Terakawa, T., A. Kato, Y. Yamanaka, Y. Maeda, S. Horikawa, K. Matsuhira, and T. Okuda (2016), Monitoring eruption activity using temporal stress changes at Mount Ontake volcano, *Nature Communications*, 7, 10797. <https://doi.org/10.1038/ncomms10797>
- Usui, Y., Y. Ogawa, K. Aizawa, W. Kanda, T. Hashimoto, T. Koyama, . . . T. Kagiya (2017), Three-dimensional resistivity structure of Asama Volcano revealed by data-space magnetotelluric inversion using unstructured tetrahedral elements, *Geophysical Journal International*, 208(3), 1359-1372. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw459>
- Zhan, Y., H. Le Mével, D. C. Roman, T. Girona, and P. M. Gregg (2022), Modeling deformation, seismicity, and thermal anomalies driven by degassing during the 2005-2006 pre-eruptive unrest of Augustine Volcano, Alaska, *Earth and Planetary Science Letters*, 585, 117524. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117524>

外部委員会等 活動報告 (2022年8月~9月)

6月-7月追加分

2022年6月29日

地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部  
会・強震動評価部会地震動予測地図WG (近藤出  
席 /web 会議)

2022年7月1日

地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部  
会活断層分科会 (近藤出席 /web 会議)

2022年7月7日

南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会, 地震防  
災対策強化地域判定会 (松本・板場出席 /web 会議)

2022年7月11日

地震調査研究推進本部地震調査委員会 (宮下・岡村  
出席 /web 会議)

8月-9月

2022年8月2日

第9回火山防災に係る調査企画委員会 (田中出席 /  
web 会議)

2022年8月5日

南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会, 地震防  
災対策強化地域判定会 (松本出席 /web 会議)

2022年8月23日

地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部  
会活断層分科会 (近藤出席 /web 会議)

2022年8月29日

第236回地震予知連絡会 (今西・松本出席 /web  
会議)

2022年9月6日

火山噴火予知連絡会あり方報告の具体化作業部会  
(篠原出席 / 気象庁)

2022年9月7日

南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会, 地震防  
災対策強化地域判定会 (松本出席 /web 会議)

2022年9月13日

地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部  
会活断層分科会 (近藤出席 /web 会議)

2022年9月20日

地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部  
会・強震動評価部会地震動予測地図WG (近藤出  
席 /web 会議)

2022年9月21日

火山噴火予知連絡会あり方報告の具体化作業部会  
(篠原出席 / 気象庁)

2022年9月27日

科学技術・学術審議会 測地学分科会 (第46回)  
地震火山観測研究計画部会 (第47回) 合同会議 (田  
中出席 /web 会議)

2022年9月29日

地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部  
会 (岡村・穴倉出席 /Web 会議)

IEVG ニュースレター Vol.9 No.4 (通巻52号)

2022年10月発行

発行・編集 国立研究開発法人 産業技術総合研究所  
活断層・火山研究部門  
編集担当 黒坂朗子

問い合わせ 〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1 中央第7

Tel: 029-861-3691 Fax: 029-861-3803

URL <https://unit.aist.go.jp/ievg/index.html>