



# 課題Bサブテーマ1: 新たな技術を活用した火山観測の高度化

これまでのミュオグラフィでは難しかった噴火様式の予測や噴火推移予測に情報を提供することを目指す。

現状ではミュオグラフィデータ解析に時間がかかり、データを即透視画像として提供する事が出来ていない。

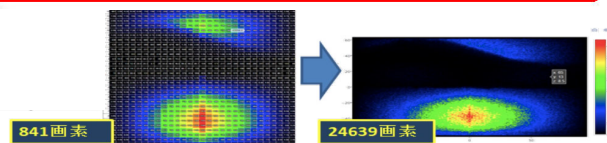
火山活動とミュオグラフィ透視画像の関連について系統的に評価するまでに至っていない。

1) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発

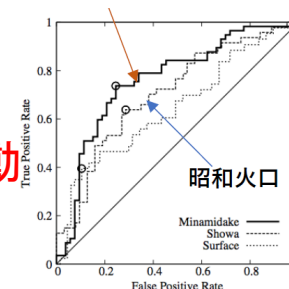
2) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

841画素→2439画素、1日1枚

従来の4倍を超える画素を提供する事で、より鮮明な火山透過像を提供

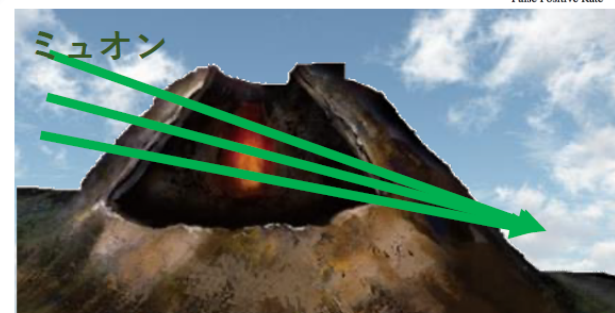


機械学習により、時系列的透視画像を自動判別するソフトウェアを開発



画像から自動で噴火判定

我が国で最も噴火回数が多い「桜島」





# 課題Bサブテーマ1: 新たな技術を活用した火山観測の高度化

(~2019年) 噴火後、活発だった昭和火口の下にプラグ様の高密度構造が生成された

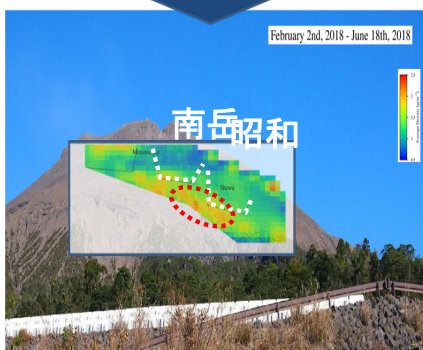
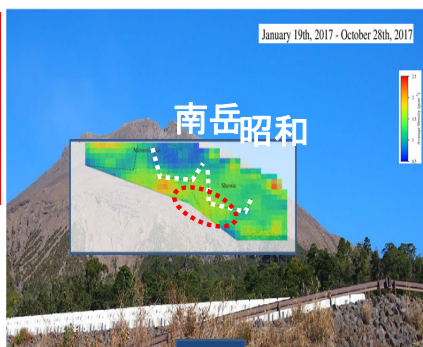
2017年~2018年の間に昭和火口からの噴火が終わり、南岳火口から噴火が始まった。

2009-2017年  
7757回(昭和火口)  
50回(南岳火口)

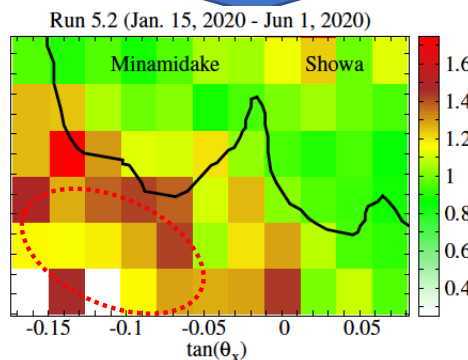
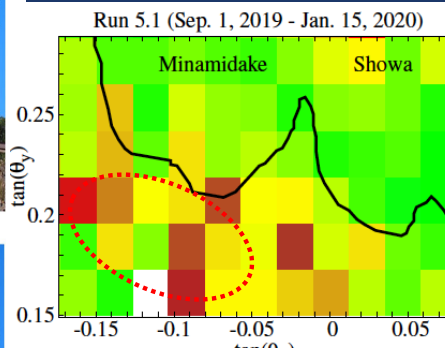
2018-現在(2021)  
4回(昭和火口)  
1437回(南岳火口)

**昭和火口**  
**2019年以降 0回**

Olah, Tanaka, Varga et al.  
(2019) GRL

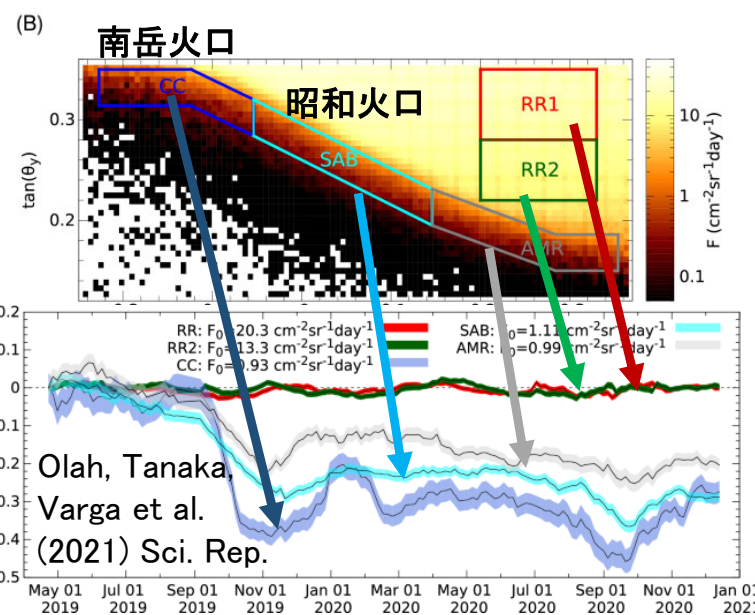
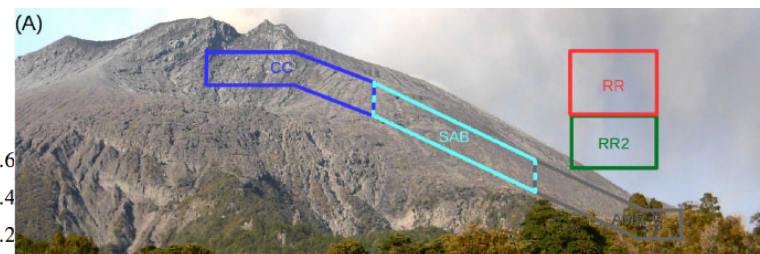
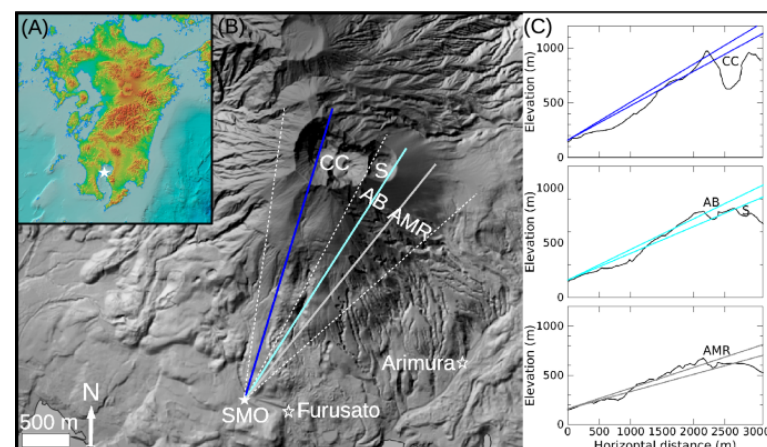


(2020年) 噴火後、活発化した南岳火口の下にプラグ様の高密度構造が成長している。



Olah, Tanaka, Varga et al. Submitted to AGU

(2021年) 活発化した南岳火口付近におけるテフラマスの増減モニタリング



火道がプラグされ、南岳火口から2018年3月以降噴出

解釈

だが、これがどのような過程を経て形成されていったのかは不明。わかれば噴火推移の予測に役立つ。

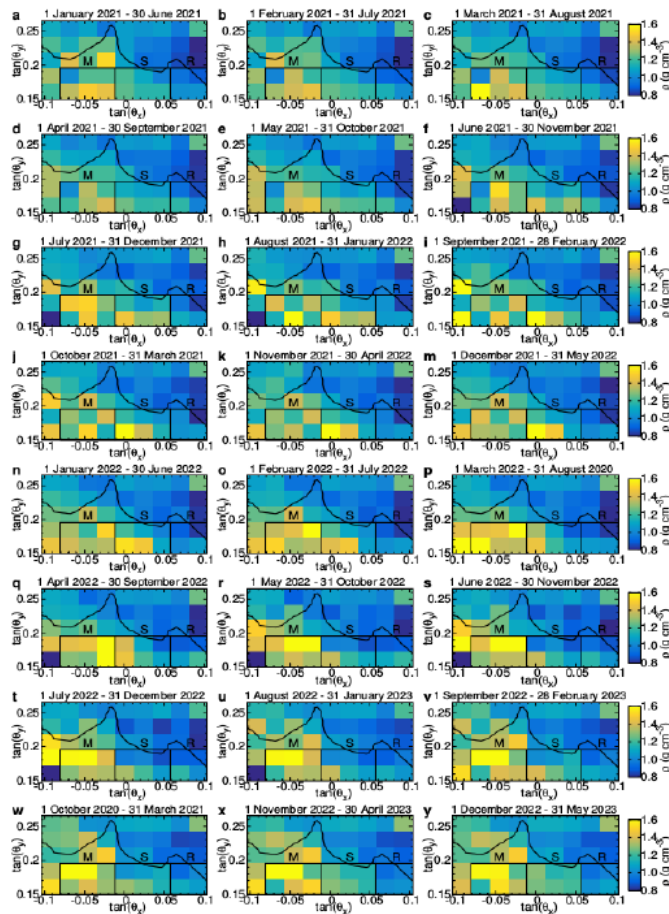
2019

2020

2021

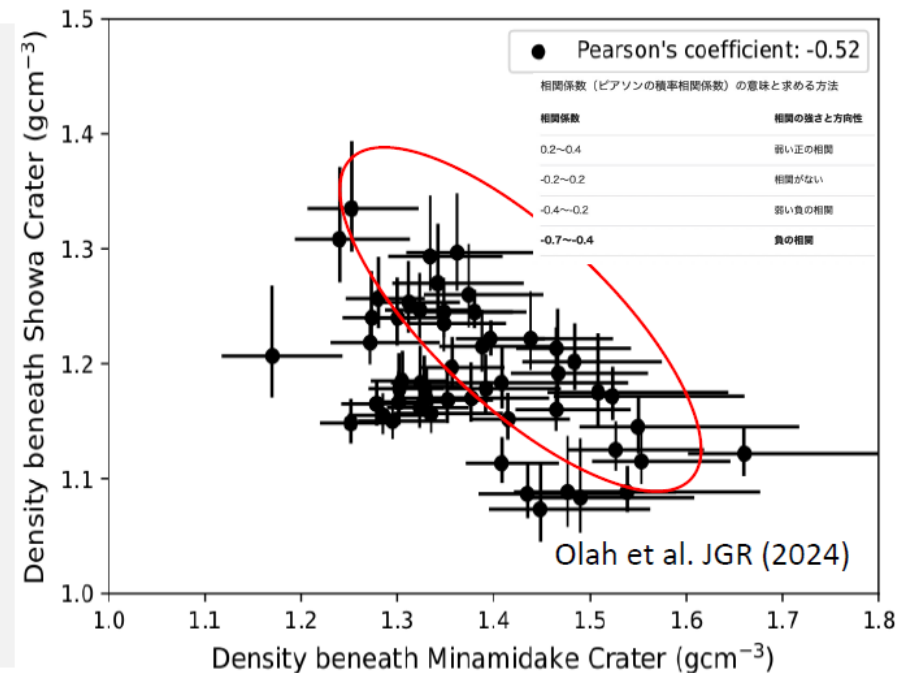
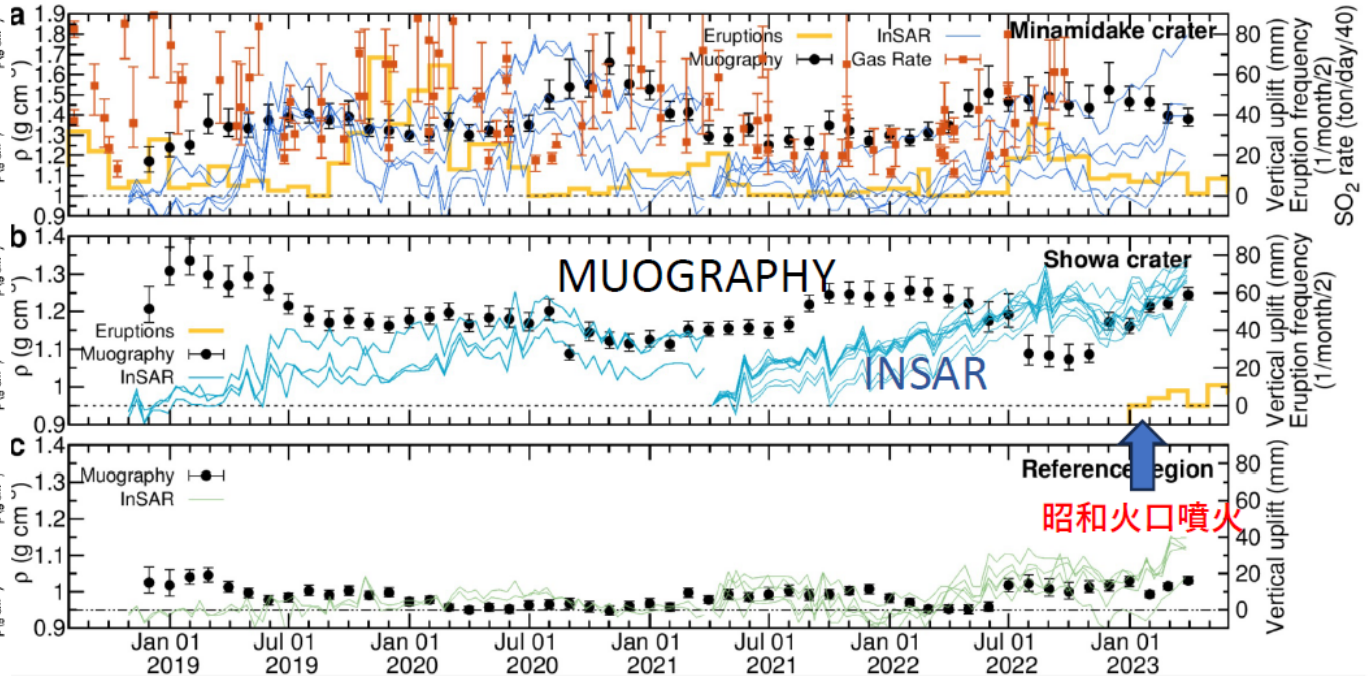
相対透過率モニタリング

# 課題Bサブテーマ1: 新たな技術を活用した火山観測の高度化



南岳火口直下の密度が  
高い時には昭和火口直下  
の密度が低く  
南岳火口直下の密度が  
低い時には昭和火口直下  
の密度が高い

Similar anti-correlation was observed between the magmatic gas fluxes measured in branched conduits of Mt. Etna, where the eruptive activity between the vertical and slant vents was controlled by water content of the magma (Marchetti et al., 2009; Spina et al., 2017; Zuccarello et al., 2022).





火山活動指数（*VUI*）は、過去の火山活動レベルと比較した火山活動の強度を半定量的に評価するために導入された活動指数。

*VUI*は、相対的な活動のレベルとして定義。

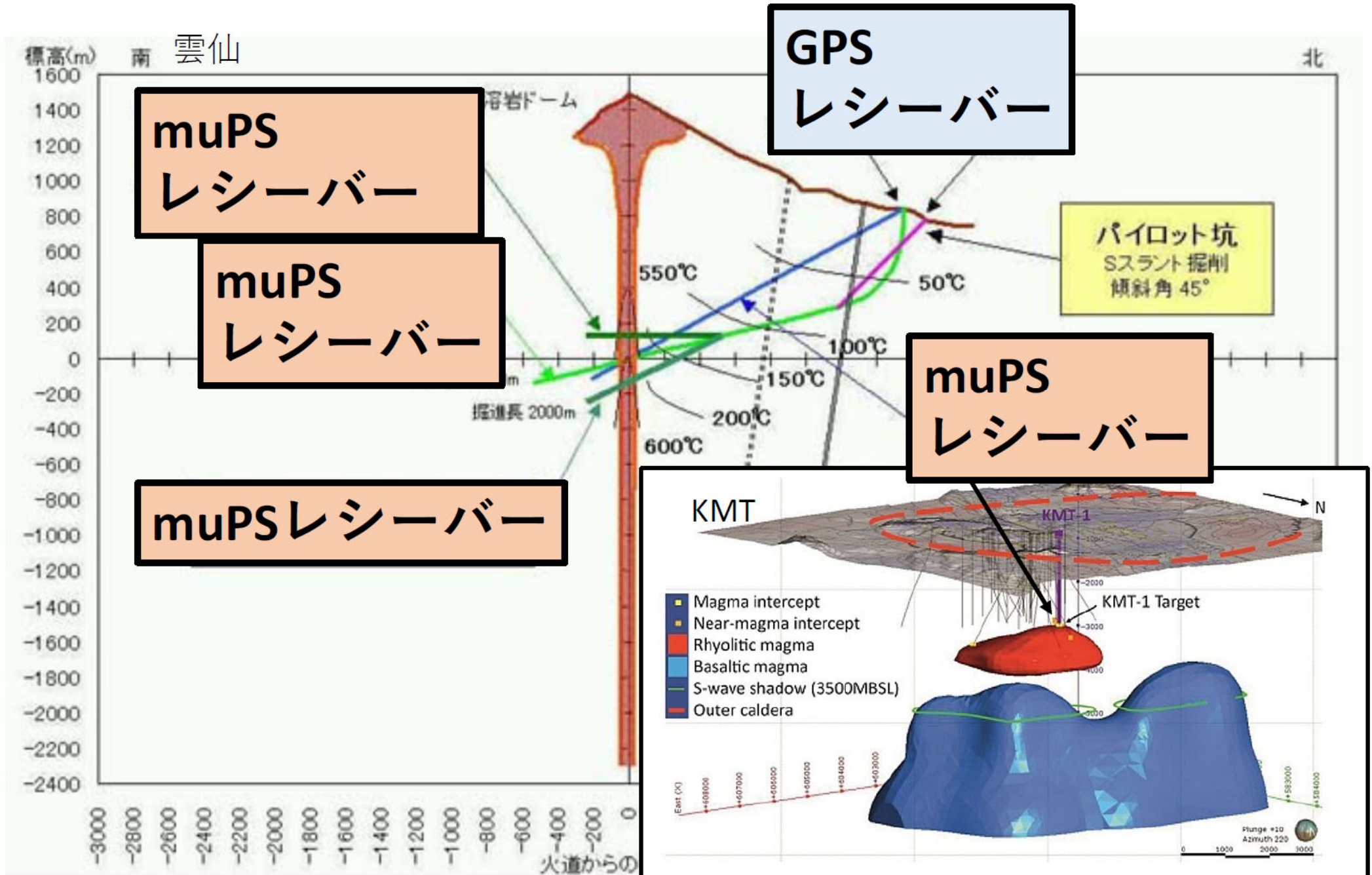
*VUI*自体は噴火予測ツールではなく、複雑で大規模な監視データを社会に伝える役割を持ち、特にハザードレベル評価に適用されるイベントツリーモデルへの入力情報を提供。

|                                   | 0: no unrest                              | 1: negligible unrest  | 2: minor unrest  |
|-----------------------------------|---|---|--|
| Mass density rate                 | No change in the density                  | Low rate of density increase (<0.05 g/cm <sup>3</sup> /month) | Moderate rate of density increase (0.05–0.15 g/cm <sup>3</sup> /month) |
| Vertical ground displacement rate | No deformation                            | Low rate of deformation (<10 mm/month)                        | Moderate rate of deformation (>10 mm/month)                            |
| SO <sub>2</sub> gas flux rate     | Low levels of gas flux rate (<1000 t/day) | Moderate levels of gas flux rate (1000–2500 t/day)            | Moderate levels of gas flux rate (2500–5000 t/day)                     |

世界で最も活発な火山の一つである桜島火口直下で測定された月次ミュオグラフィデータ、隣接する2つの火口周辺で測定された*SAR*データ、そして両火口で収集された気象庁のガス観測データを利用して、2018年9月から2023年7月までの期間に観測された密度、地表の隆起沈降、および火山ガス流量を定量的に関連付け。

# 課題Bサブテーマ1: 新たな技術を活用した火山観測の高度化

火山内部の変動をmm～cmの精度でモニタリングする技術への発展

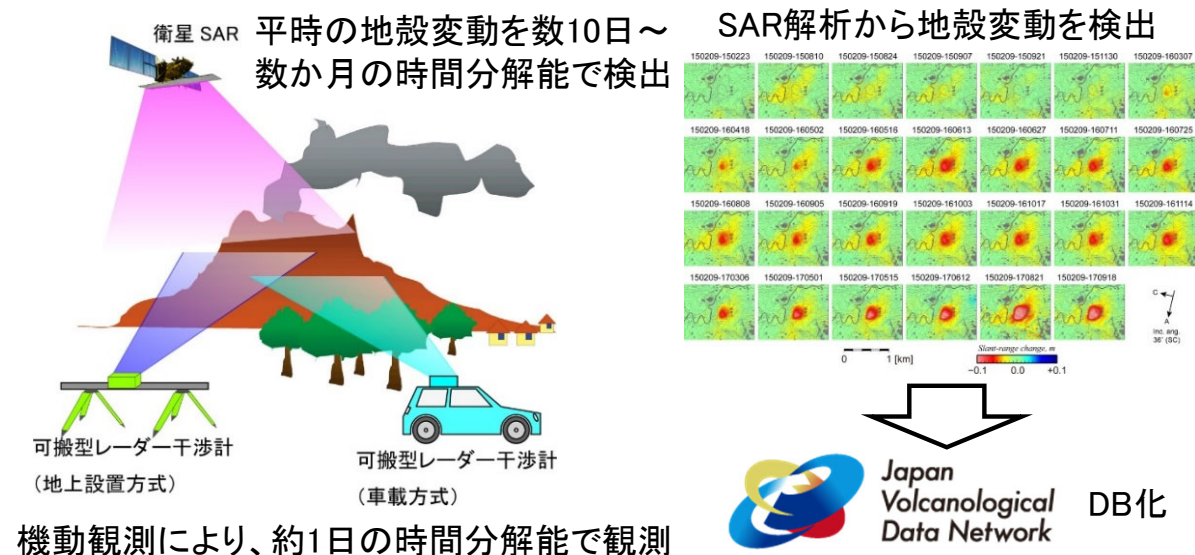




# 課題Bサブテーマ2:リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発

## 10年計画の概要

### サブテーマ2-1:可搬型レーダー干渉計と衛星SARによる精密地殻変動観測技術の開発



衛星SARによる地殻変動情報を、誰でも簡単・迅速に利用可能にするため、データベース化する。

自動解析システムを構築→DB化

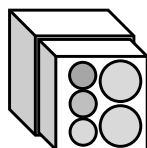
地殻変動を高頻度に観測可能な可搬型レーダー干渉計を開発し、機動観測で得られる地殻変動をデータベースに加える。

可搬型レーダー干渉計の開発→DB化

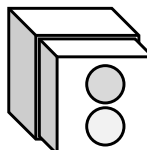
### サブテーマ2-2:火山表面現象遠隔観測技術の開発

小型温度ガス可視化カメラ(SPIC)を開発

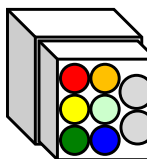
非冷却赤外マルチバンドカメラ  
SPIC-UC



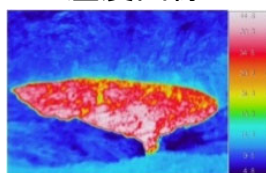
冷却赤外マルチバンドカメラ  
SPIC-C



可視スペクトル・構造推定マルチバンドカメラ  
SPIC-SS



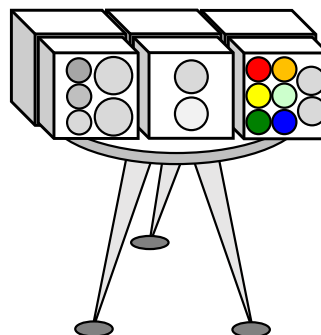
温度画像



ガス濃度画像



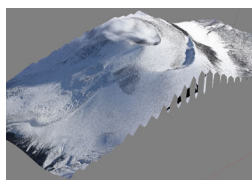
地上設置・車載  
航空機搭載仕様を  
実現



降灰、岩石種識別



地形計測



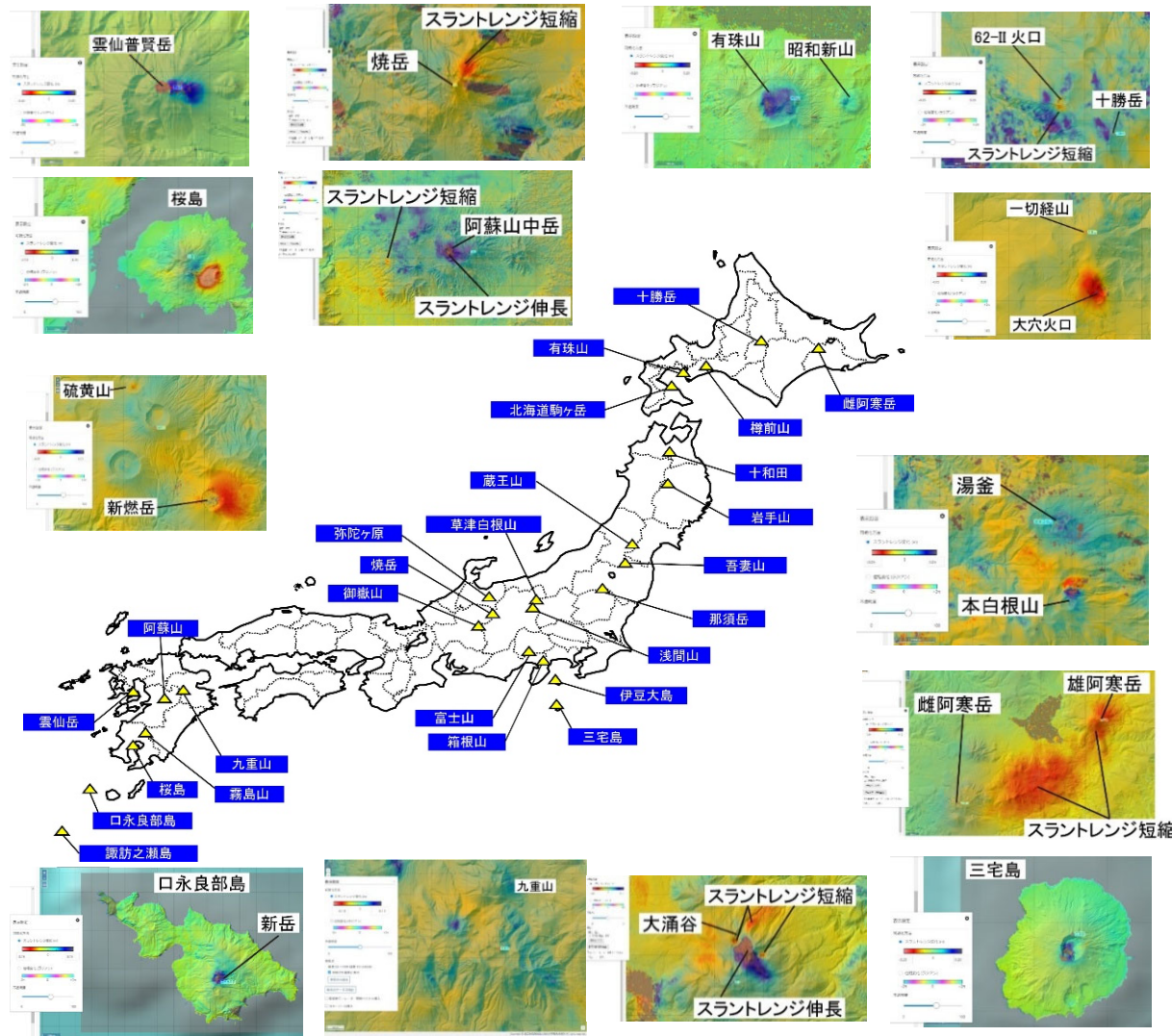
➤ 温度・ガス分布を定量的に計測かつ昼夜計測可能

➤ 降灰・岩石種識別、地形情報を計測可能

➤ 観測機会を増加させるため、高い可搬性を有する。

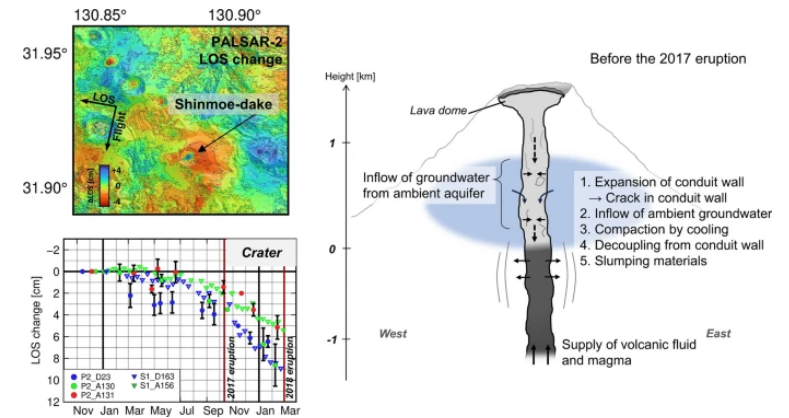
# 実施内容① 衛星SARによる地殻変動情報のデータベース

26火山について衛星SAR自動解析システムを構築し、得られた地殻変動をJVDNにおいて共有。また、顕著な地殻変動が検出された火山に関し、活動メカニズムに関する研究を実施。



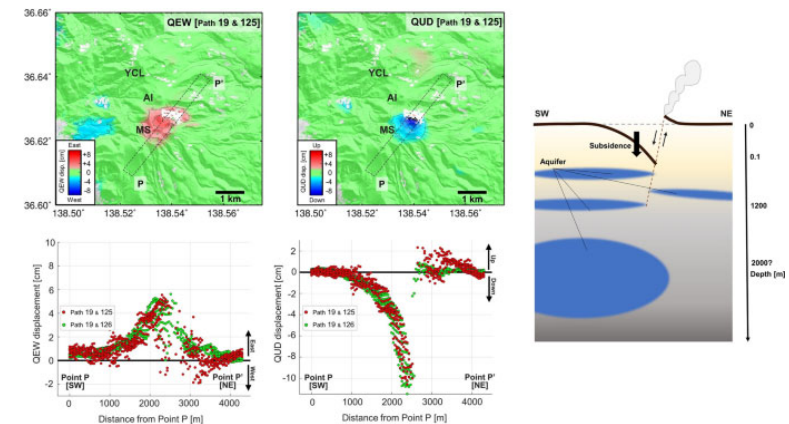
多くの火山で火山性の地盤変動を検出  
火山研究に役立つ地殻変動DB

## 2017,2018年新燃岳(霧島山)噴火



2017年新燃岳噴火の約5か月前から発生した地殻変動  
に関するメカニズムについて考察

## 2018年本白根山噴火



2018年本白根山に伴う地殻変動について考察

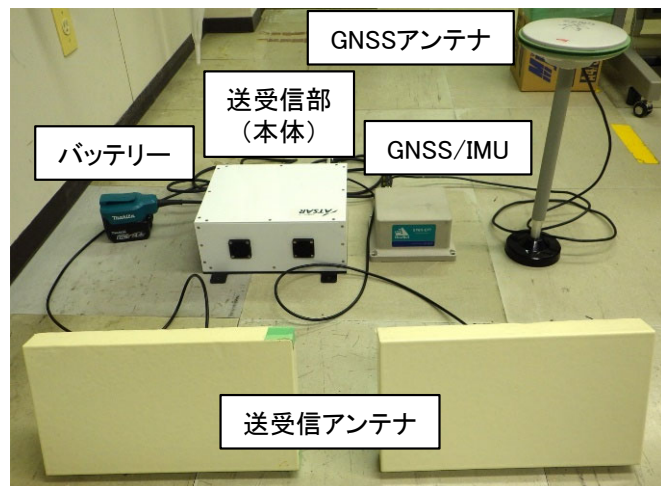
火山研究事例  
(ほかには三宅島、有珠山、吾妻山など)



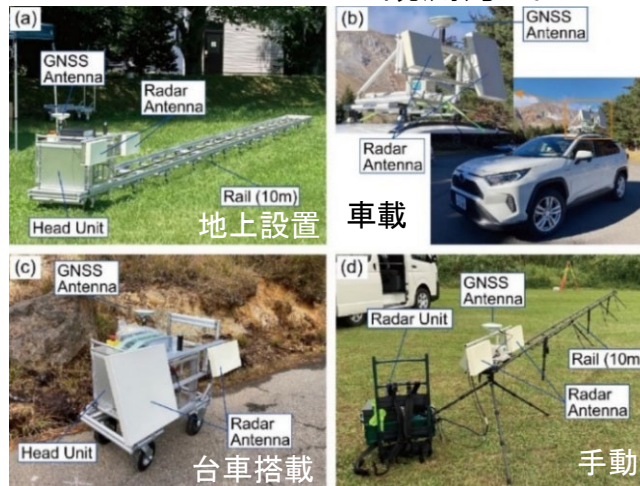
# 実施内容② 可搬型レーダー干渉計SCOPEの開発

火山活動が活発化した場合等に、機動的に計測を実施することにより、効率的に面的な地殻変動を計測することが可能なレーダーセンサー(可搬型レーダー干渉計)を開発

## 可搬型レーダー干渉計(SCOPE)

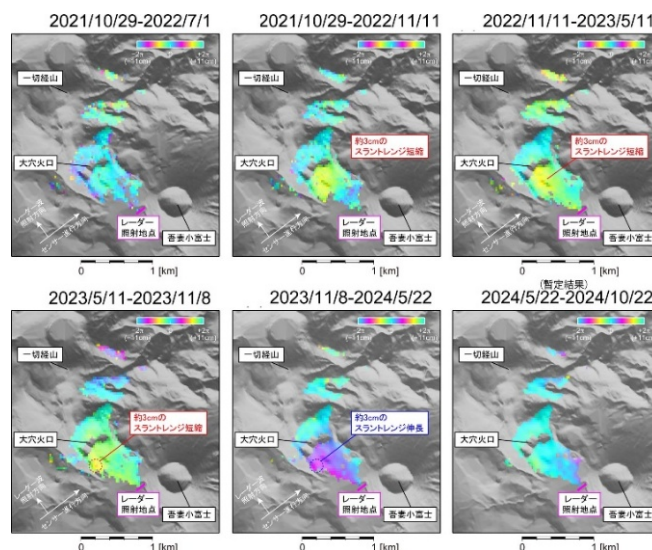


## SCOPEの4つの観測方式

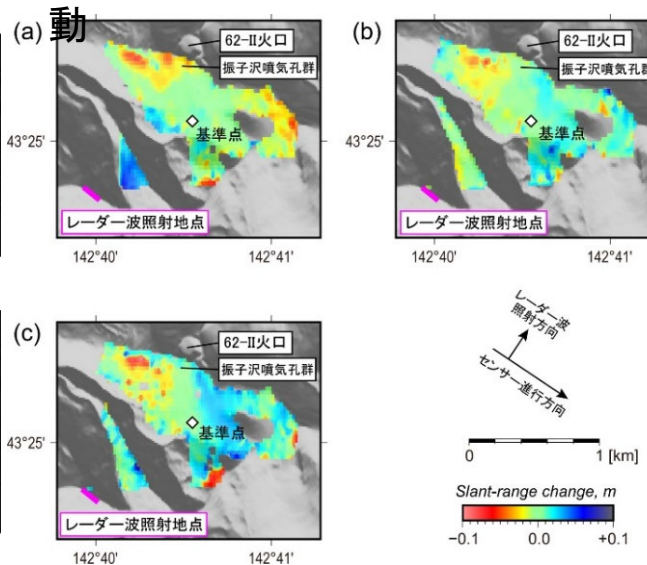


- ✓ 可搬性が高いコンパクトなシステム
- ✓ 観測方式を選択することにより、効率的に機動的な観測を実施可能
- ✓ 大気遅延による影響がなければ、数mmの精度で距離変化を計測可能
- ✓ 植生に覆われた領域においても高い干渉性
- ✓ SCOPE (SAR for crustal deformation with portable equipment) と命名

## 大穴火口(吾妻山)周辺の地盤変動



## 62-II火口(十勝岳)周辺の地盤変動



吾妻山、十勝岳等において、地盤変動の検出に成功

### 【吾妻山】

膨張の開始から収縮への変化およびその停止までの1サイクルの変化を観測

### 【十勝岳】

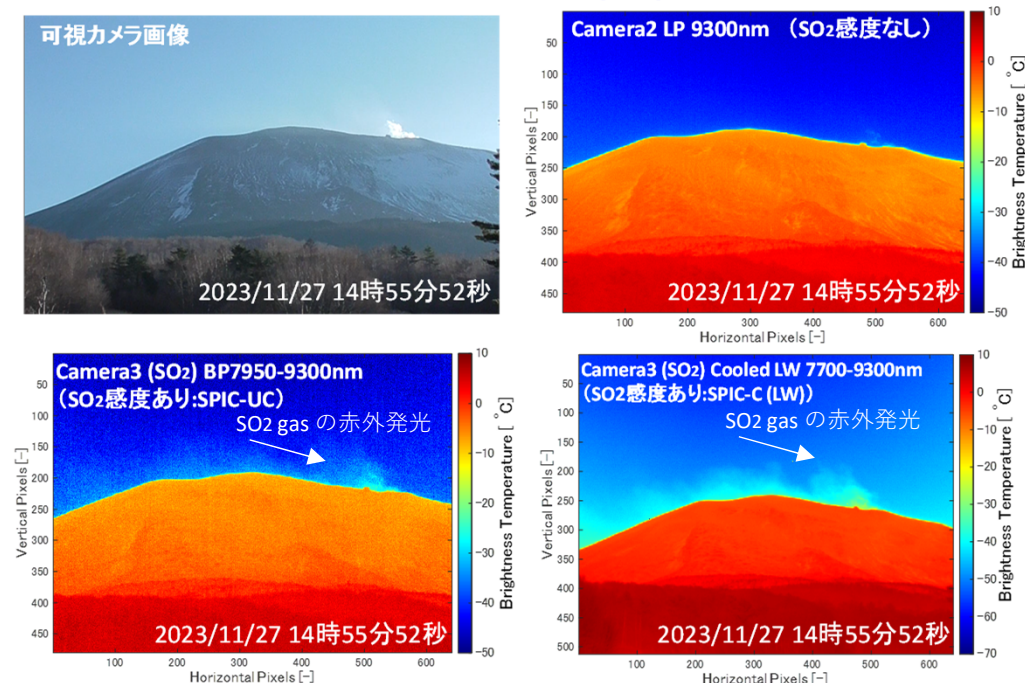
他の観測手法では計測困難な、62-II火口南に位置する振子沢噴気孔群の西側において、三段山との距離が短縮する変化を検出



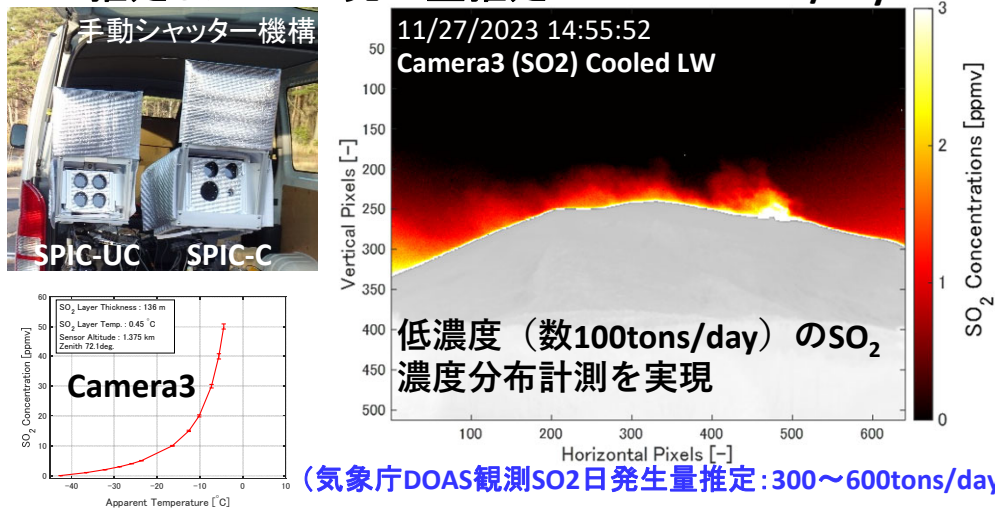
# 実施内容③ 小型温度ガス可視化カメラSPICの開発

達成目標である温度・ガス分布を定量的に計測かつ昼夜計測可能な地上設置装置を実現

## (1) 火山噴煙観測実施 (浅間山, :R5/11/27)



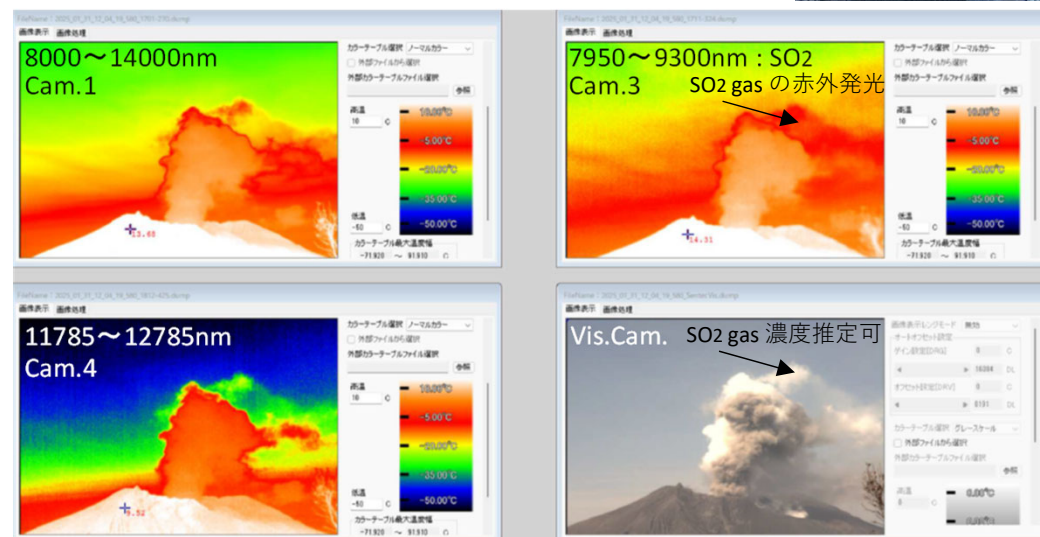
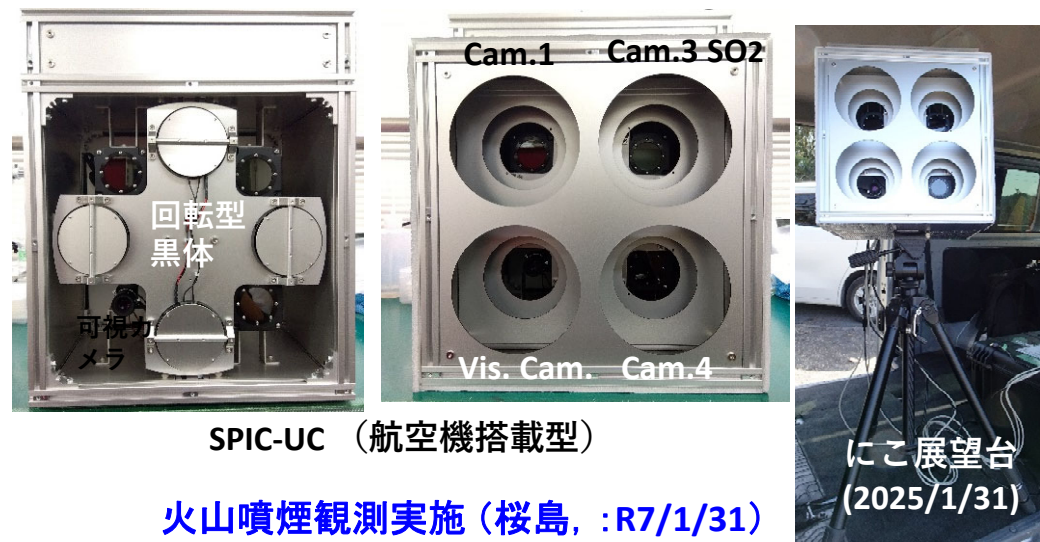
推定したSO<sub>2</sub>日発生量推定: 100~600tons/day



(気象庁DOAS観測SO<sub>2</sub>日発生量推定: 300~600tons/day)

## (2) 自動校正機能付きSPICを開発 (電動型回転型黒体を開発) (R5/4~)

PC制御で黒体が自動回転, 校正データを取得装置バイアス除去。



有色噴煙 (火山灰含有) を観測



## 事業完了時の成果目標

**火山ガスの化学組成+新たな指標：同位体比の地球化学的観測技術の開発により  
噴火切迫性評価の高度化・噴火タイプの迅速判別に貢献**

### ・ 成果目標と達成状況

- － 従来法による試料採取/分析によるマグマ起源ガス上昇状況の把握  
@箱根山、草津白根山、伊豆大島、桜島、有珠山、富士山  
+ 霧島硫黄山、九重山、阿蘇山、那須岳
- － 航空機を用いた噴煙の同位体比観測技術の確立  
⇒ ドローン搭載型自動噴煙採取装置を実用化、阿蘇中岳/霧島新燃岳噴火で実証実験
- － 火山ガス成分連続観測装置の開発  
⇒ ガスセンサーを用いた噴気CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比の直接観測を箱根山で運用中
- － オンサイト同位体測定技術の確立  
⇒ 可搬型装置によるHe/CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O同位体比測定技術の開発はほぼ完了
- － 海底火山直上での底層水/ガスの採取・分析法の実証実験  
⇒ R2年度に完了
- － 大学院修士課程修了以上の研究者の養成  
博士学位取得（1名:東大）、博士課程進学（2名:東海大、1名:名大、2名:東大）  
+ 分野外出身のポスドク8名、うち1名は火山研究機関、2名は大学に就職

## 水蒸気噴火を起こす火山での地球化学的な活動指標の探索とモニタリングの実践 (気象研)

### □熱水・湧水の化学組成@霧島山硫黄山

2018年山頂火口  
の熱水活動

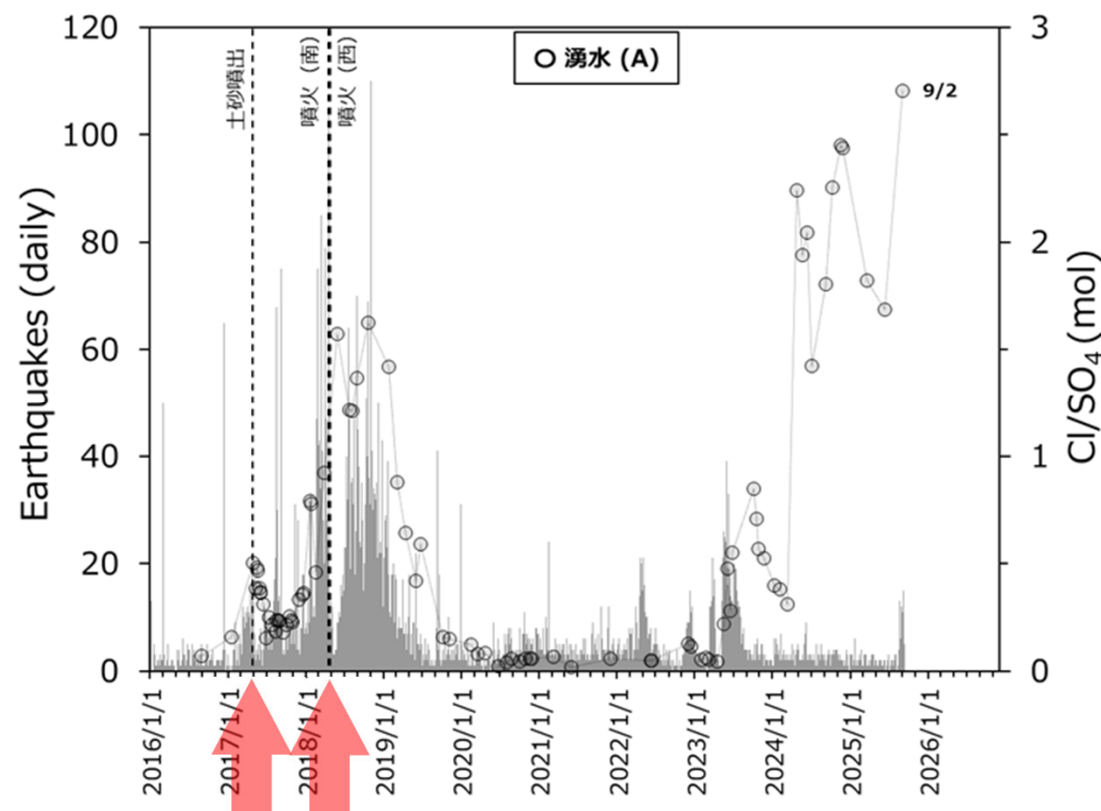


湧水 (A)  
山頂火口の北西200m  
比較的安全に観測可能



Cl = 主に マグマ性ガスの気液分離で  
生じた深部熱水

SO<sub>4</sub> = 主に 天水を主体とする蒸気加熱  
型の地表付近の熱水



2017年の土砂噴出、2018年の水蒸気噴火の  
前後でCl/SO<sub>4</sub>比が顕著に増加

対象の熱水は深部熱水と地表付近の蒸気加  
熱型熱水の混合物と考えられる。

火山活動の活発期には熱水系にマグマ性の  
深部熱水の割合が相対的に高まり、Cl/SO<sub>4</sub>比  
が増加する。



## 霧島新燃岳2025年噴火に即応したドローン観測(名古屋大)

### 「噴煙の水蒸気・水素の同位体比測定技術の開発」、および「ドローン搭載用自動噴煙試料採取装置(SeIPS)の開発」の集大成&実戦的観測



新燃岳山頂火口の  
空撮写真 (7/5)

対象火山: **霧島新燃岳**

日時: 2025年7月4-5日

動作閾値SO<sub>2</sub>濃度: 10-20 ppm

使用UAV: DJI M300 RTK

離発着地点: 霧島新湯温泉

観測協力: 産総研・東大地震研・東大理・

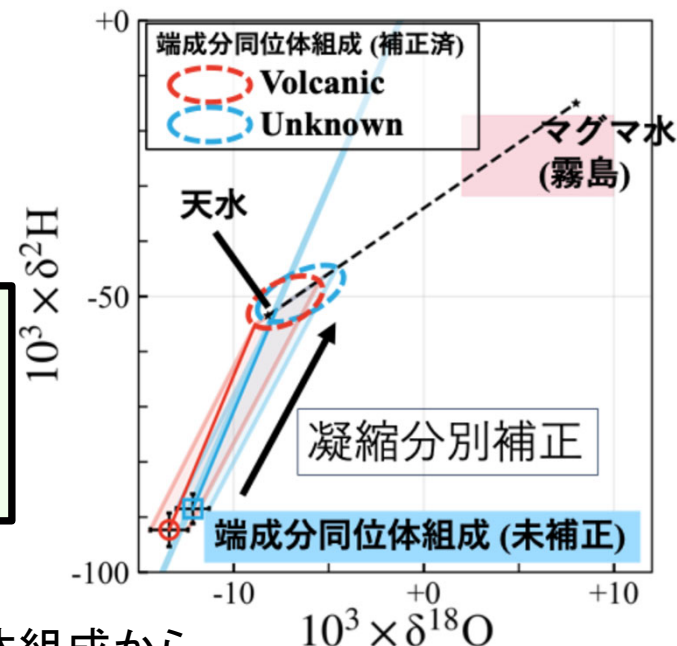
JDRONE社

備考: **2025年6月22日の火山活動再開に即  
応した観測。全面的に成功**

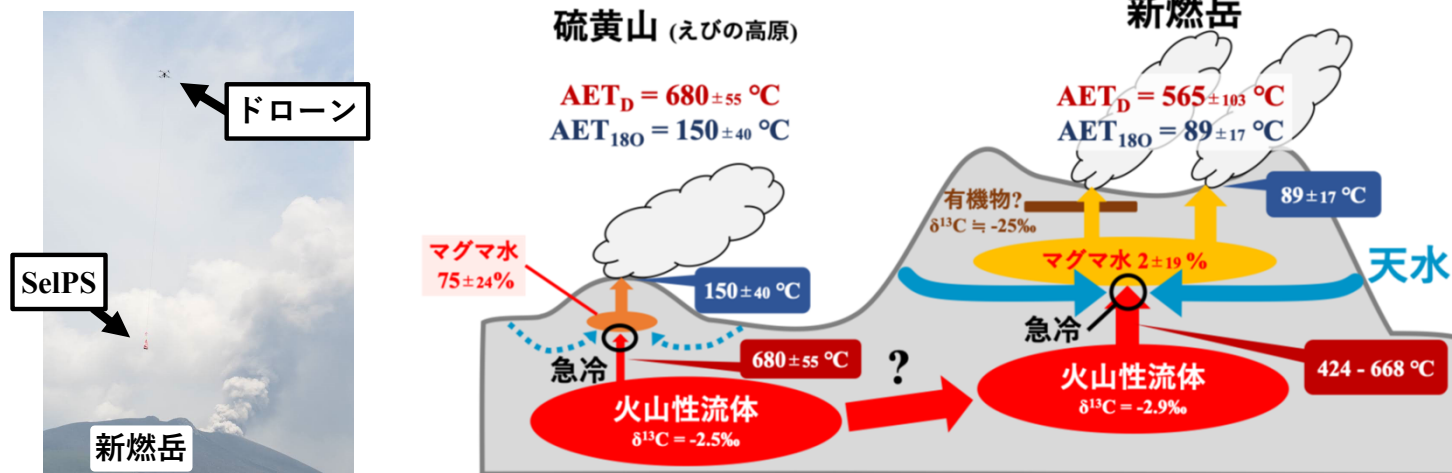
□噴煙中のH<sub>2</sub>O同位体組成から推  
定した火口放出H<sub>2</sub>Oの同位体組  
成(端成分同位体組成)

マグマ水混合比:  $2.2 \pm 19.7 \%$

↓  
ほぼ100%天水起源でマグマ水の有  
意な寄与なし。マグマ噴火の兆候は  
見られない (2025年7月上旬時点)

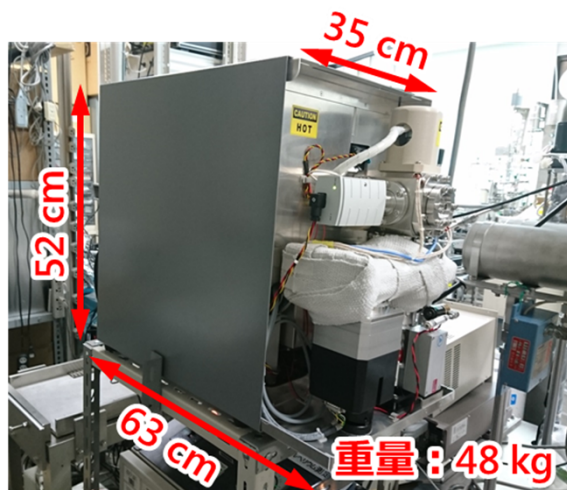


□噴煙中のH<sub>2</sub>・H<sub>2</sub>O・CO<sub>2</sub>同位体組成から  
推定した火山性流体の地下温度構造



- CO<sub>2</sub>の $\delta^{13}\text{C}$ 値は、同時に観測した硫黄山と誤差内で一致
- $\text{AET}_{180} = 89 \pm 17^\circ \text{C}$   
→ 噴気温度 (流体の出口温度) は沸点前後で”低温”
- $\text{AET}_{180} \ll \text{AET}_D$   
→ 大気放出による急冷以前に地下水による急冷 &  $\text{AET}_D$  (424-668 °C) は地下水による急冷直前の火山流体温度

## オンサイトヘリウム同位体比測定技術の開発 (東大)



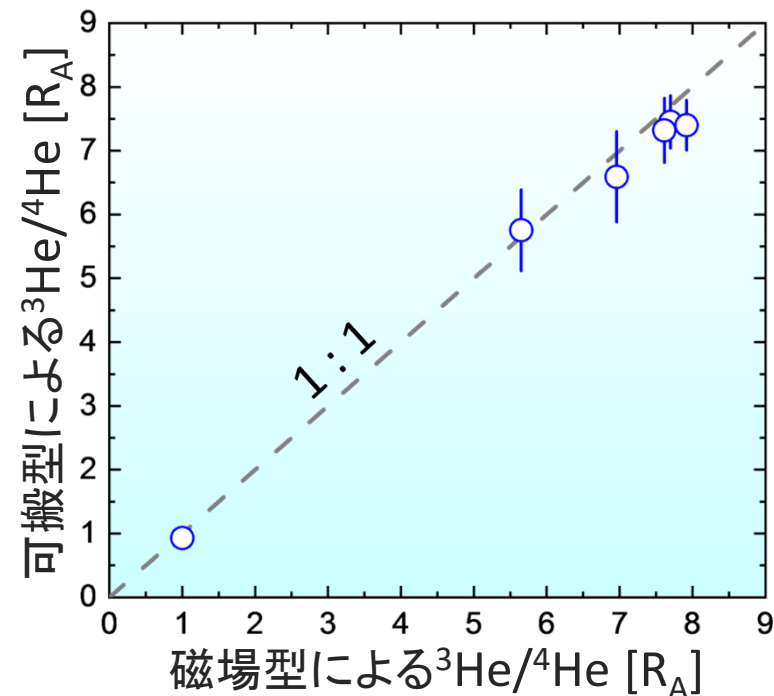
可搬型質量分析計“infiTOF”

- 検出器シグナルの波高弁別
- 試料導入時に静作動化
- イオン光学の透過率向上

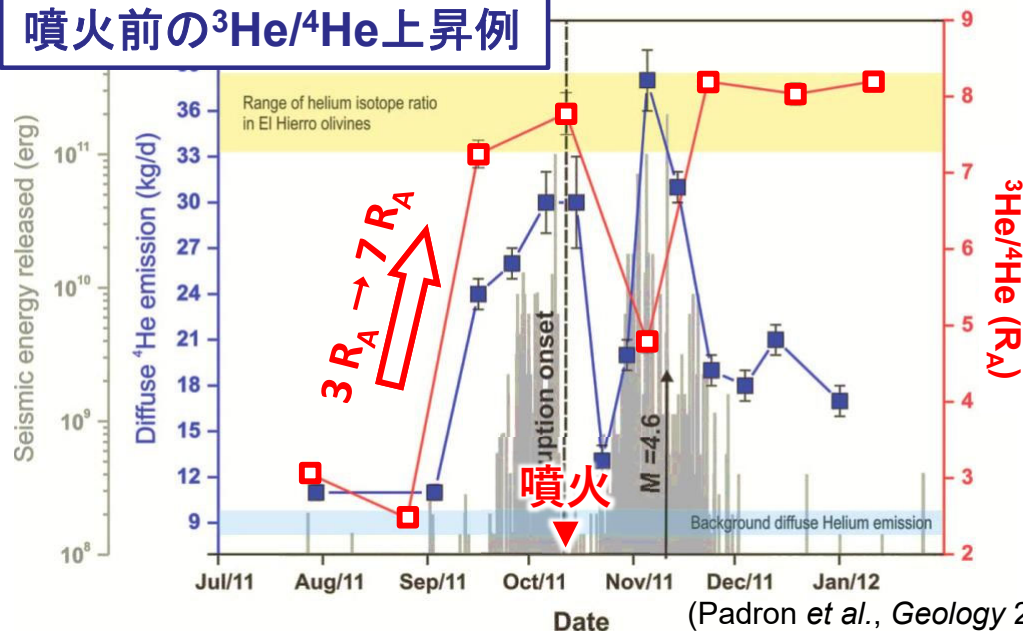


5000倍の高感度化！

- 可搬型装置で初めて $^3\text{He}$ を検出
- 通常の採取試料 (50 mL) で分析可能
- 磁場型より精度は劣るが、噴火前の変動を十分に検出可能



### 噴火前の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 上昇例



### 現状の課題

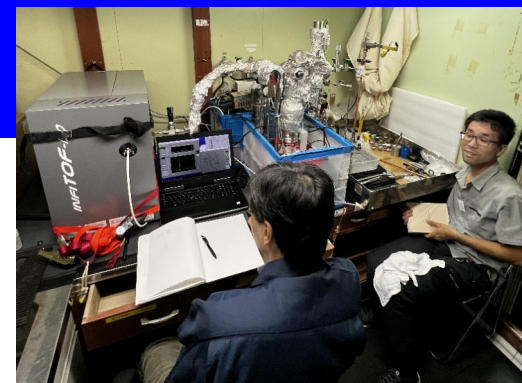
- オンサイトでのヘリウム以外の成分の除去
  - 簡便に使えるための自動化
- ⇒ 従来法での知見の蓄積



## オンサイトヘリウム同位体比測定技術の開発 (東大)

### 海底熱水のヘリウム同位体比の船上分析

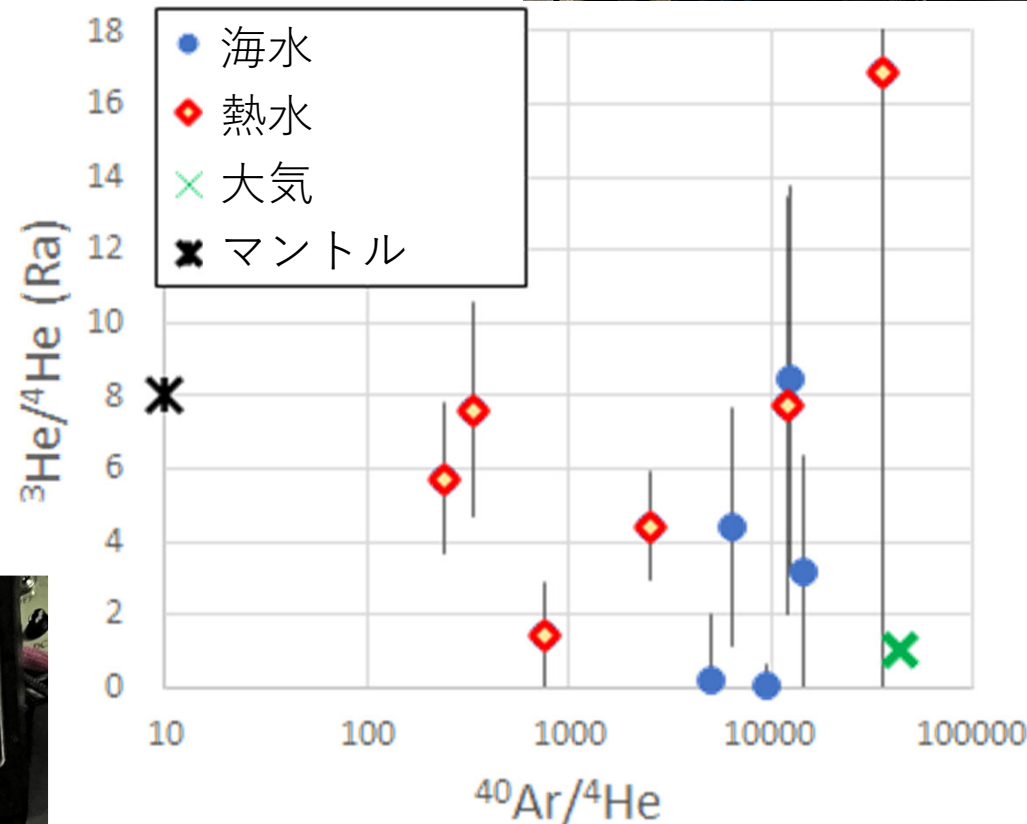
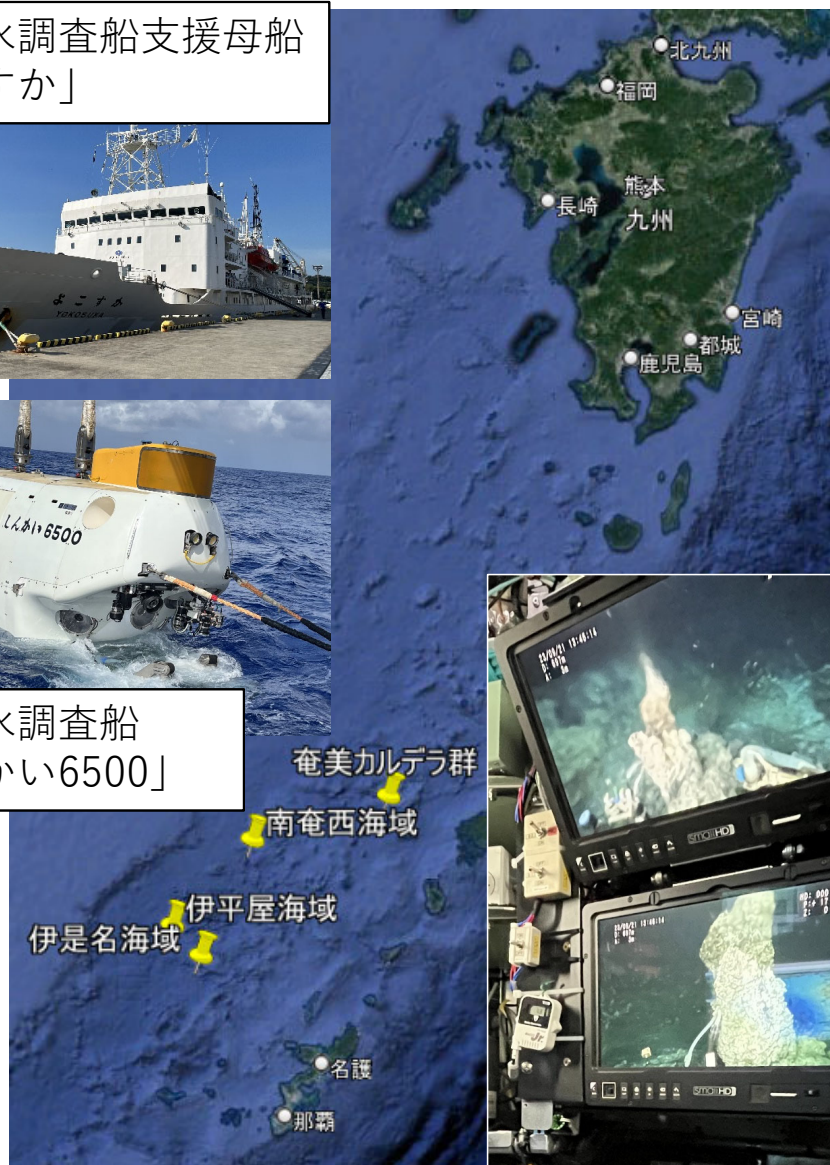
海洋研究開発機構 よこすか YK23-16S航海 (2023年9月15-29日)



深海潜水調査船支援母船  
「よこすか」



有人潜水調査船  
「しんかい6500」



- 世界初の船上分析
  - マントル起源ヘリウムを現場で検出
- 今後の課題：
- 妨害成分（アルゴン）の除去
  - 空気混入の小さい試料の採取

### ① 機動的な観測及び電磁気構造探査による高精度な火山内部構造・状態の把握

- 約10火山で、機動的に各種の精密な観測や地下比抵抗構造探査を行い、現状の活動や火山体内部構造を把握実施
  - 詳細な電磁気構造を把握し、各種観測を実施。データ蓄積にもとづく現状把握が進む。
- 新たな切迫度指標を見出す
  - ・空間的な切迫度: 地下構造に基づく切迫度指標につながる情報を得た。
  - ・時間的な切迫度: 火山によっては、新たな観測データに基づく切迫度を評価
  - ・切迫度評価を迅速化するためのツール開発
- 火山活発化の際、取得データと比較し噴火切迫度評価の高度化に繋げる。
  - 取得データをJVDNへ提供済。比較評価のための準備はできている。
- 観測データや解析結果をJVDNシステムに提供し広く活用を図る。 → 提供済み
- 火山研究人材育成コンソーシアムと連携、ポスドクやRA受け入れ、現場教育 → 実施済み

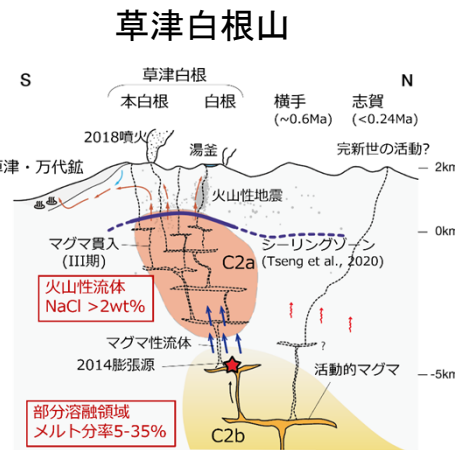
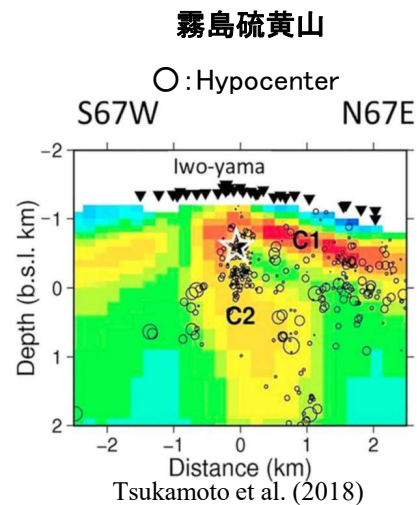
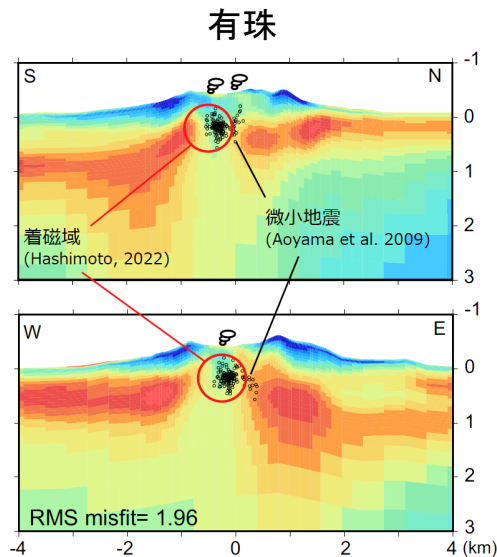
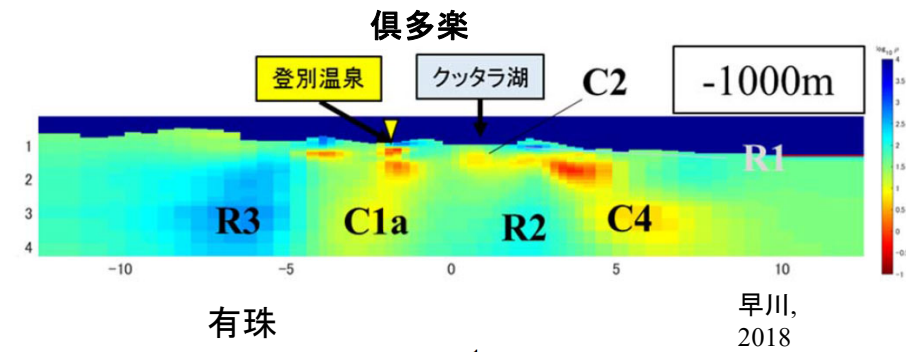


### ② 火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発

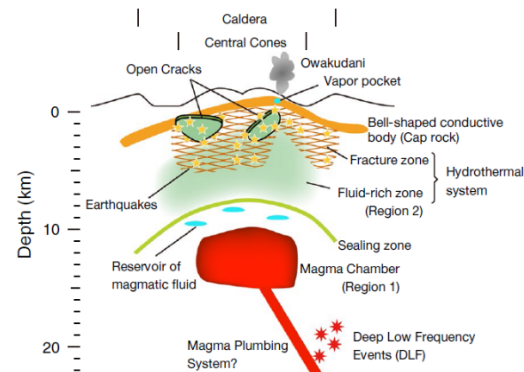
- 地震計アレイデータ解析システムの開発  
→ データ表示ツールとして、研究者が活用。大学院の実習でも使用
- 地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発  
→ 浸透率モデル構築などに活用、どのモデルパラメタが重要であるかの評価が可能になる
- 火山性地震活動総合解析システムの開発  
→ 機械学習による検測の高度化、波形分類などに活用
- 遠隔熱情報解析システムの開発  
→ ドローンによる観測システムを構築。熱観測・火山ガス採取・防災対応などに活用
- 地震波動場連続解析システムの開発  
→ 速度時間変化、特異波形の検出などに活用

# 課題Bサブテーマ4: 火山内部構造・状態把握技術の開発

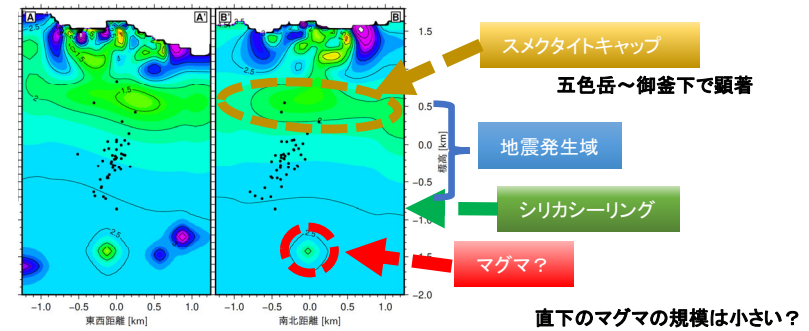
## 地下構造把握



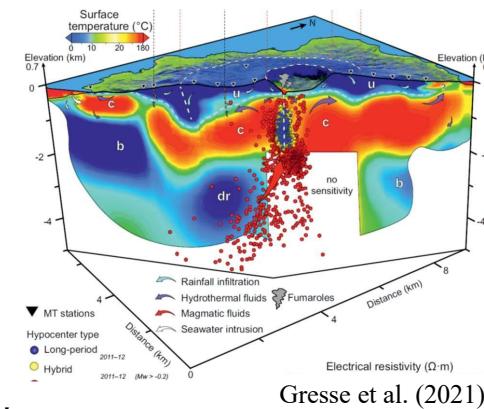
### 箱根山



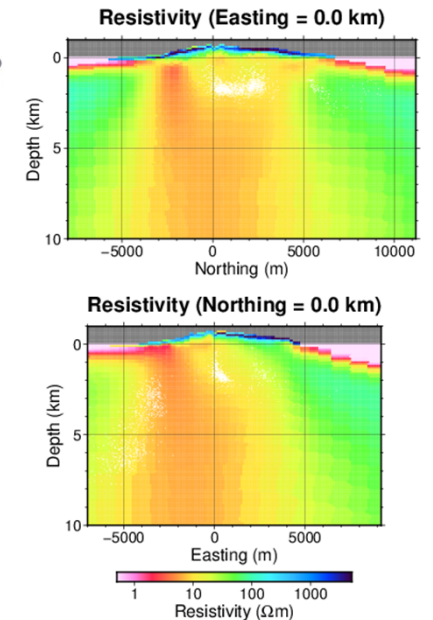
### 蔵王



### 三宅島



### 伊豆大島

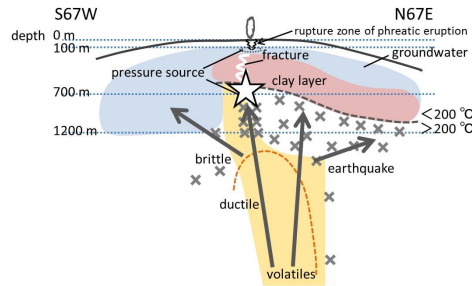




# 課題Bサブテーマ4: 火山内部構造・状態把握技術の開発

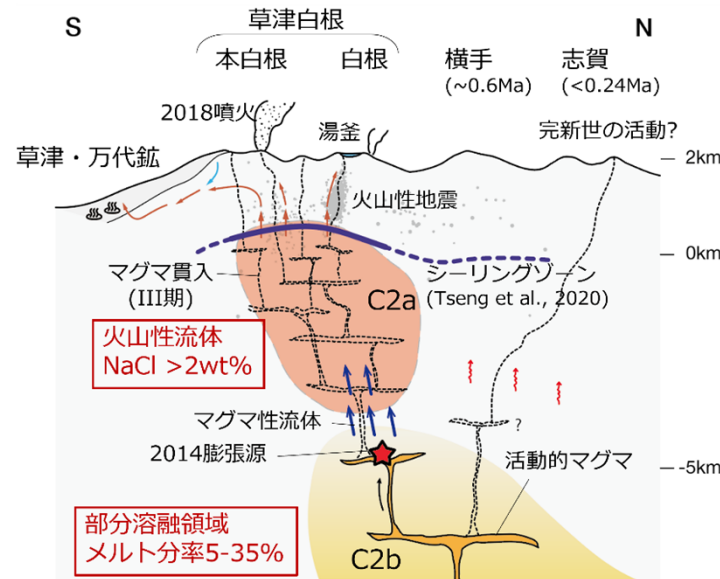
## 構造の共通性、個性

### 霧島硫黄山



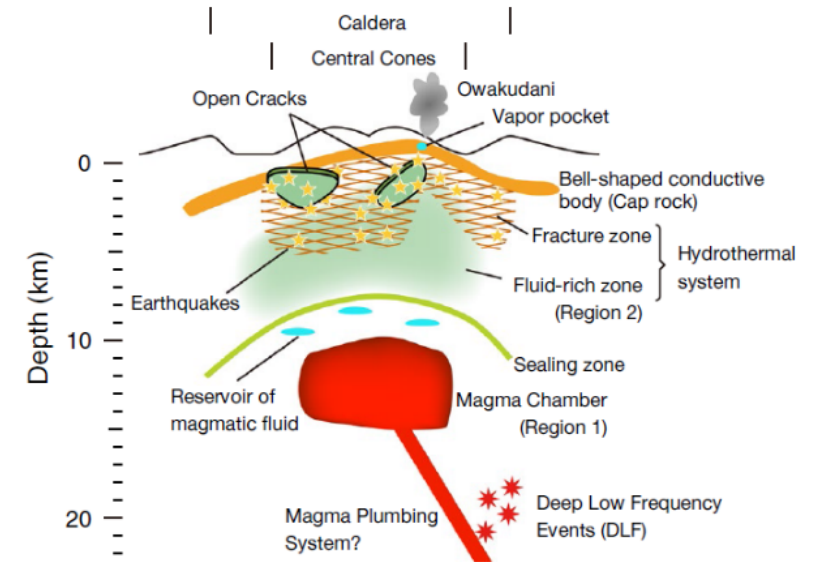
深さ2km程度までの詳細な構造と震源分布・圧力源の位置関係に基づき、水蒸気噴火発生場のモデルを提案

### 草津白根山



深さ10km程度までの熱水系・マグマ供給系の構造を、3次元比抵抗構造モデルに基づき推定。

### 箱根山



深さ20km程度までの熱水系・マグマ供給系の構造を、地震波速度トモグラフィ、震源分布、地殻変動解析に基づき推定。

共通の特徴:

①浅部から深部へ向かう構造

低比抵抗層(キャップロック) → 地震発生域 → シーリングゾーン  
→ 熱水溜まり → 部分熔融域

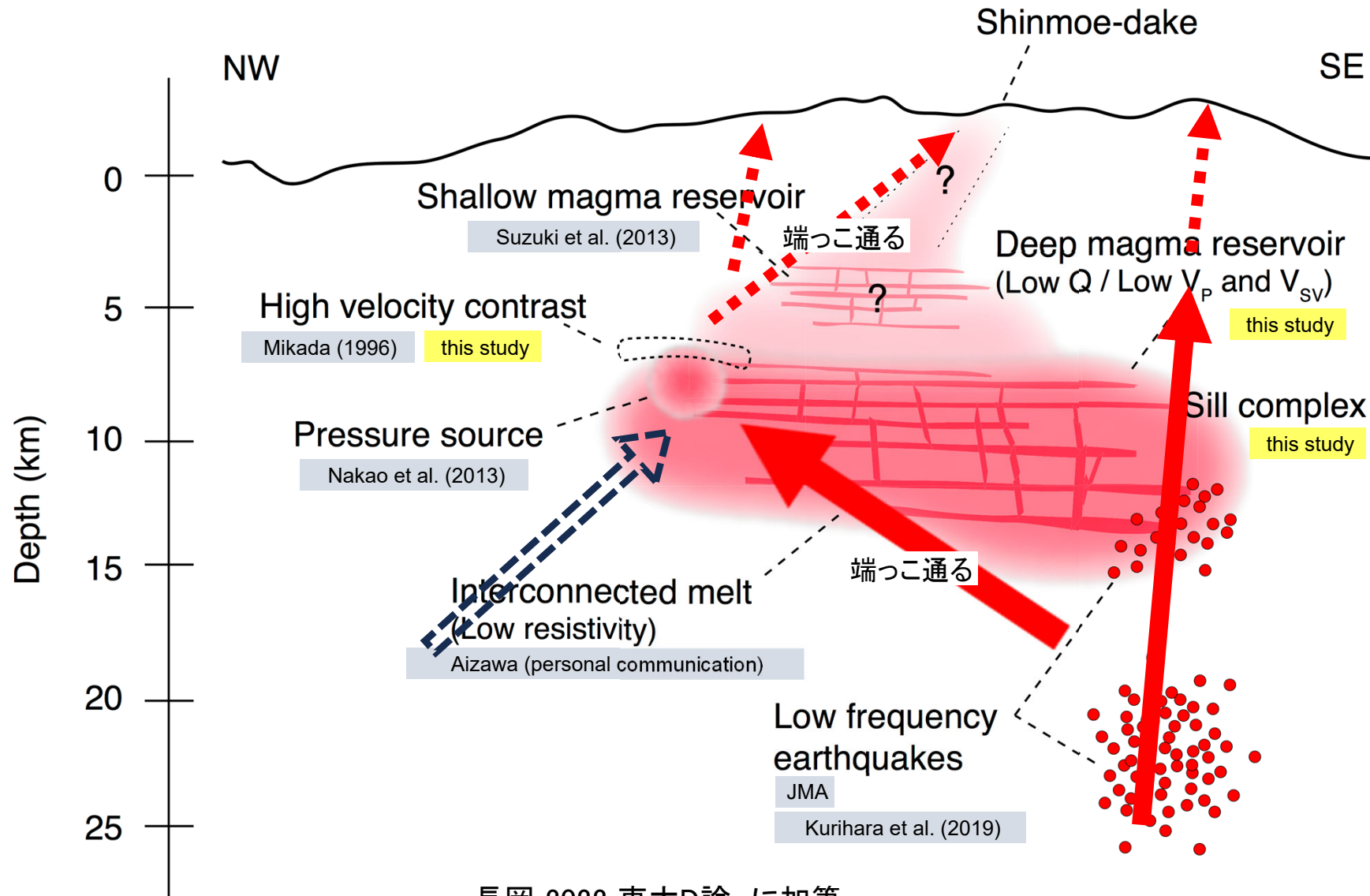
②複数の圧力源

極浅部(噴火直前に膨張)、やや深部(火山活動活発化と連動)

水蒸気噴火の発生場に共通する構造 → 個別構造の抽出 → 活動の違いとの関係

# 課題Bサブテーマ4: 火山内部構造・状態把握技術の開発

## マグマ供給系のたたき台を提案



長岡 2022 東大D論 に加筆

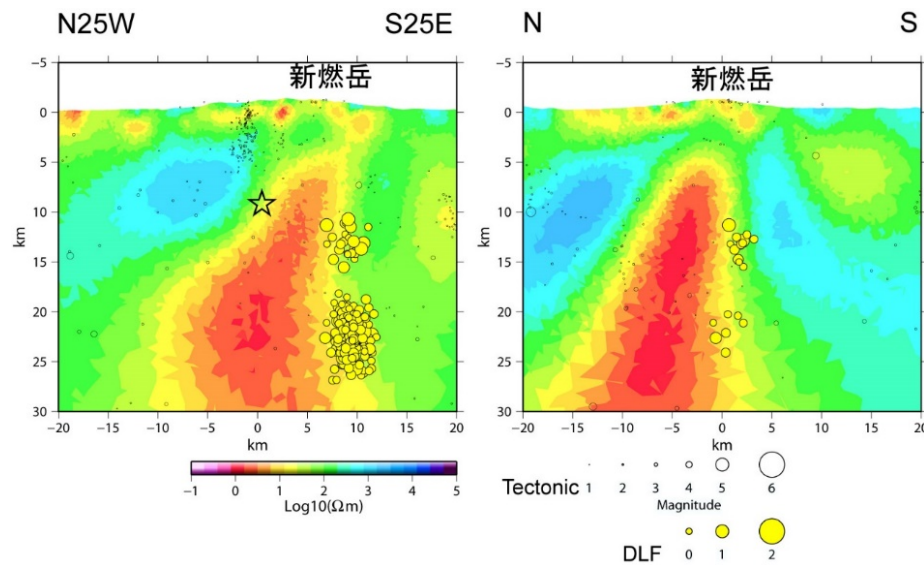


# 課題Bサブテーマ4: 火山内部構造・状態把握技術の開発

## 構造と切迫性の関係

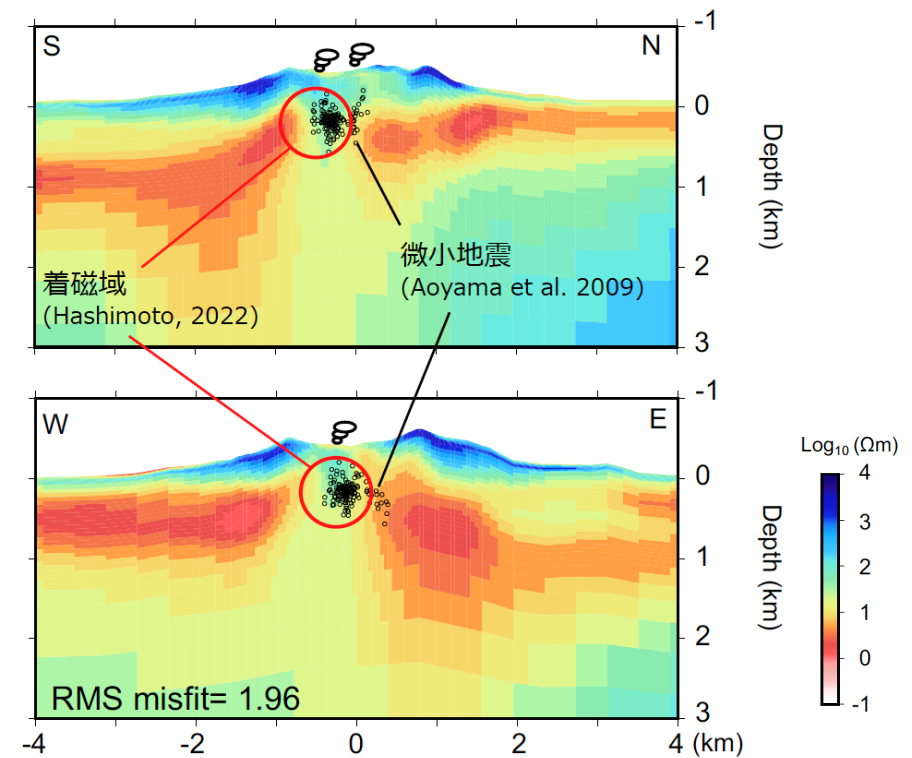
### 霧島

- 深部に延びる明瞭な低比抵抗構造  
→ 深部からの流体通路が確立している  
→ マグマ蓄積が静かに進む



### 有珠

- 深部に延びる低比抵抗構造は不明瞭？  
→ 深部からの流体通路が確立していない？  
→ 流体は通路を作りながら上昇し、地震発生を伴う



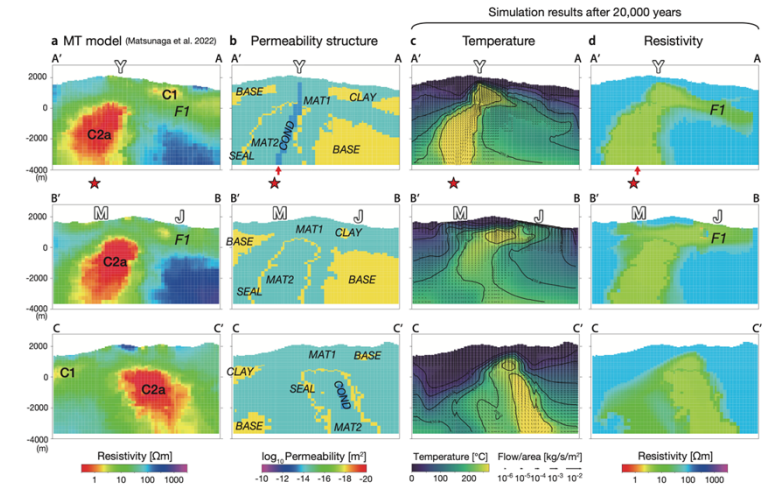
# 課題Bサブテーマ4: 火山内部構造・状態把握技術の開発

## 地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発

→ 草津白根山の機動観測で得られた比抵抗構造を基に熱水流動計算を実施

□ 探査で得られた比抵抗構造から浸透率構造を仮定し、熱水流動計算（多相・多成分）を実施。パラメータ探索により何が地下構造を決定する鍵となるパラメータかを調査

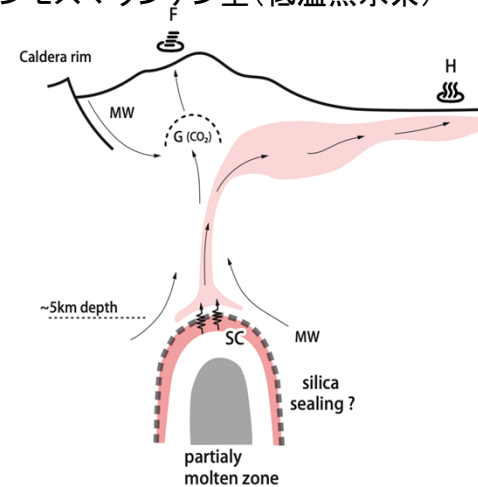
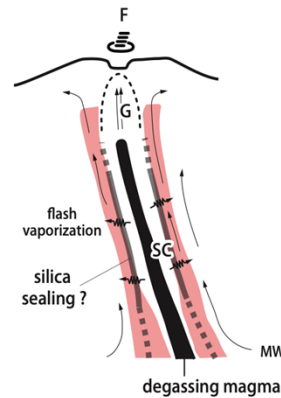
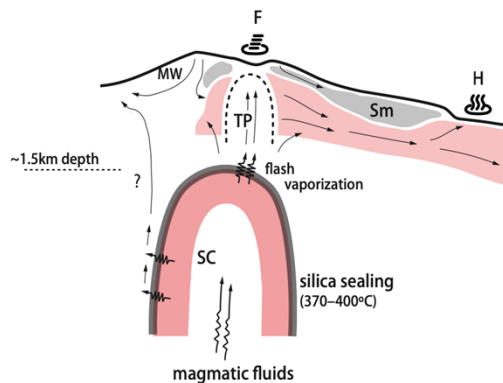
- ✓ シーリング層（ $\sim 400^{\circ}\text{C}$ の温度境界に相当）は不可欠で、マグマ性流体経路周辺の圧力構造分布に大きく影響することから、火山下の鉛直状低比抵抗領域の形成に影響する
- ✓ 母岩の浸透性、基盤岩の形状、延性領域での浸透性の低下などは、火山体全体の熱水循環を決定する重要な要因となる
- ✓ 表層付近の粘土層は熱水流動にそれほど影響を与えない



草津白根山型熱水系

阿蘇山型（高温熱水系）

マンモスマウンテン型（低温熱水系）



高塩分濃度の熱水の移動・蓄積により形成されることが予想される低比抵抗領域（左図赤色）と実際の探査により推定されている比抵抗構造との比較から、3タイプの火山熱水系を提案

Matsunaga & kanda (2025; JGR)



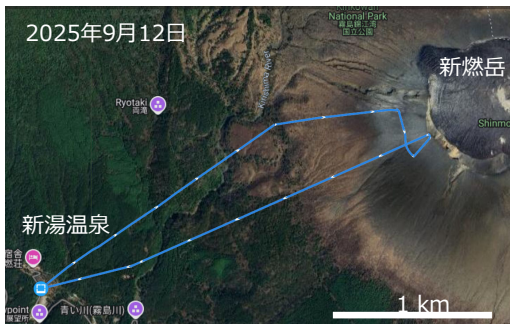
# 課題Bサブテーマ4: 火山内部構造・状態把握技術の開発

- 遠隔熱情報解析システムの開発  
➡全自動型ドローンによる遠隔火山観測

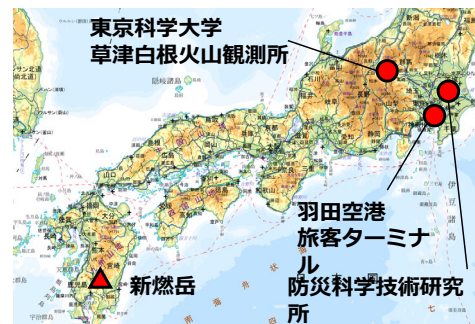
2025年9月21日にドローンポート（全自動ドローン）を霧島火山新湯温泉付近（鹿児島県霧島市）に設置して、新燃岳上空を飛行するドローンが撮影する可視・赤外線映像を複数拠点でリアルタイム共有したほか、遠隔からの口頭指示に基づき飛行および撮影を実施した。本試験は、現地にて機体操作および立入管理措置を行った。

本装置を草津白根山に2025年9月26日に設置した。現地を完全に無人化したうえ、遠隔運用を日中・夜間に実施している（国土交通省航空局：東空運航第26887号）。この結果、火山性微動等に前後して湖面が黒灰色変色していることを確認した。

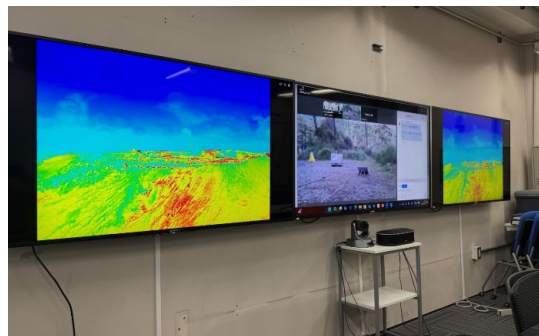
## 新燃岳での試験



飛行経路の例。

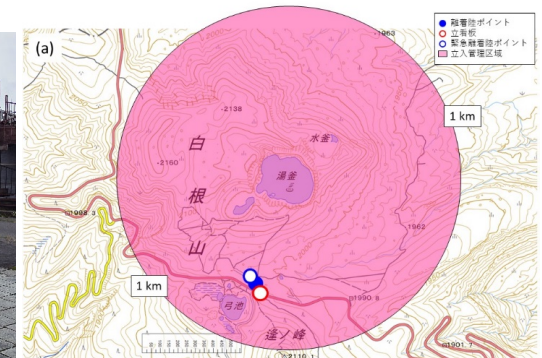


新燃岳▲と映像共有場所●。



（左）新燃岳山頂の可視画像、（右）防災科学技術研究所内でのリアルタイム赤外線映像表示

## 草津白根山での運用



草津白根山・白根レストハウスに設置したドローンポート。当地はレベル2における警戒区域内にあたるため、衛星通信（Starlink）を介して遠隔地から飛行管理および映像伝送を行う

（左上）草津白根山に設置したドローンポート。（右上）設置場所（青丸）および飛行範囲。（左下）本システムが伝送した湯釜変色画像（2025年10月12日15時頃）

本資料では国土地理院地図，Google Earth写真データを使用させて頂きました

# 課題Bサブテーマ4: 火山内部構造・状態把握技術の開発 切迫性を評価する指標の試行

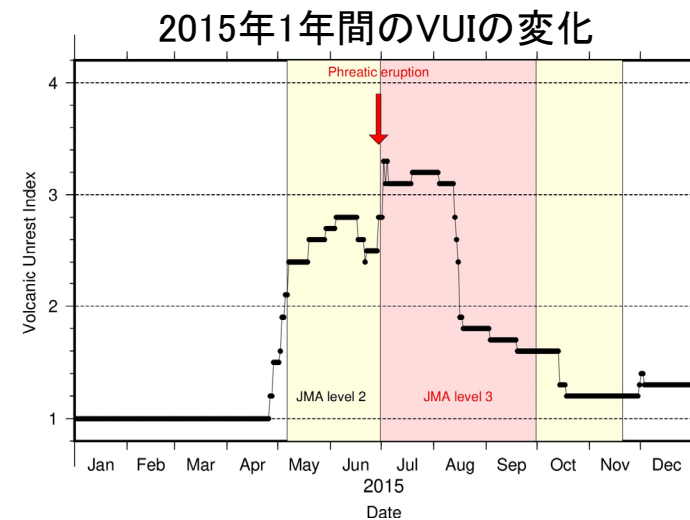
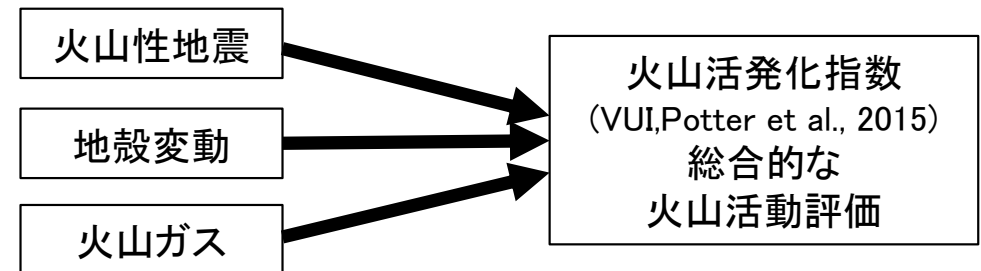
## 火山活発化指数(VUI)の箱根火山への適用

火山活発化指数VUI: もともとは、地元住民や行政機関といった非専門家にわかりやすく火山の活動状況を伝えることを意図したもの。専門の異なる科学者による火山活動評価の材料にもなる。

直近45日間の各項目のデータを1～4の指数で評価し、全体を平均して総合的な評価を決める

| Volcanic Unrest Index for Hakone Volcano |   |                    |          |               |               |                    |
|--|---|--------------------|----------|---------------|---------------|--------------------|
| Time window (45 days)                    |   |                    |          | Date created  |               |                    |
| 26 Oct. 2023–09 Dec. 2023                |   |                    |          | 09 Sep. 2025  |               |                    |
| Earthquake                               | Swarm Earthquake                              | 10.11<br>hour      | 1<br>0   | 2<br>48       | 3<br>96       | 4<br>(hours)       |
|  | Earthquake Rate                               | 169<br>EQs/45 days | 1<br>100 | 2<br>1000     | 3<br>10000    | 4<br>(earthquakes) |
|  | LFEs, Tremor                                  | No                 | 1<br>No  | 2<br>Few LFEs | 3<br>Tremor   | 4<br>Many events   |
| Geodetic                                 | Deep Deformation                              | 0.20<br>cm         | 1<br>0.2 | 2<br>0.6      | 3<br>1.2      | 4<br>(cm)          |
|  | Shallow deformation                           | No                 | 1<br>No  | 2<br>Minor    | 3<br>Moderate | 4<br>Heightend     |
| Thermal, Volcanic Gas                    | Thermal                                       | No                 | 1<br>No  | 2<br>Minor    | 3<br>Moderate | 4<br>Heightend     |
|  | Gas Flux                                      | 17.87              | 1<br>30  | 2<br>80       | 3<br>200      | 4<br>(ton/day)     |
|  | Owakudani (SO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> S) | 2.02               | 1<br>1.5 | 2<br>3.0      | 3<br>4.5      | 4<br>(ratio)       |
|  | Kamiyu (CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> S)    | 48.5               | 1<br>30  | 2<br>45       | 3<br>60       | 4<br>(ratio)       |
| Overall VUI = 1.6                        |   |                    |          |               |               |                    |

火山では多様な観測が実施されている



2015年1年間のVUIの推移。2015年4月末からVUIが上昇、5月から数値が高止まり、6月末の噴火時に急上昇。火山活動推移を定量的に捉えやすくなる。



伊豆大島(主として課題B、C)

伊豆大島WS(地震研) 2022年10月7日～8日

現地討論会(伊豆大島) 2022年10月9日～10日

箱根(課題B + 温泉地学研究所)

箱根に関する情報交換会(Zoom) 2024年4月9日

霧島火山(主として課題B、C)

連携集会(鹿児島大) 2025年3月15日～16日

データ共有、共通のフィールドでの観測実施

通期 JVDNへのデータ提供

R6 桜島(課題B1,B2,B3)

R7 霧島観測(課題B2,B3,B4、課題B+C)