



# ①課題概要

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旨とする。

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

3)次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進

4)ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動



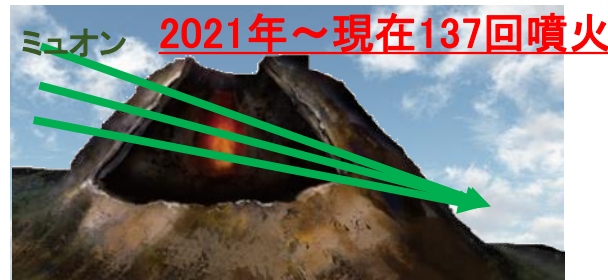
従来の4倍を超える画素を提供する事で、より鮮明な火山透過像を提供

火山体透視画像をオンラインデータベース化する事により、リアルタイムで透視画像にアクセス出来る環境整備を行う。

透視技術  
ミュオグラフィ

我が国で最も噴火回数が多い「桜島」

鹿児島市中心部から火口まで10km(上野-品川間)



(~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。

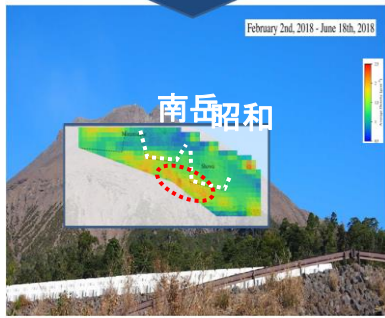
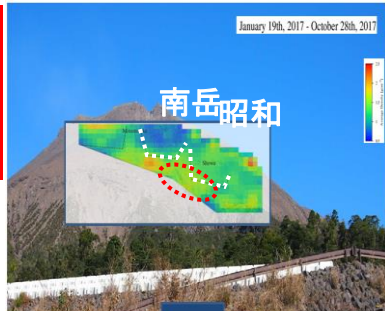
2009-2017年  
7757回(昭和火口)  
50回(南岳火口)

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

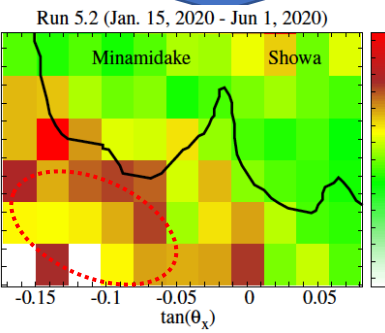
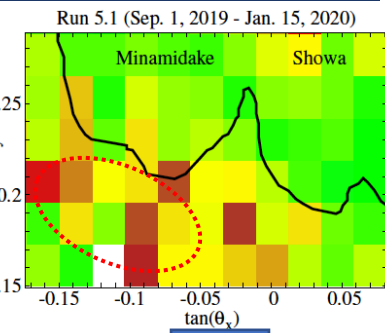
**昭和火口**  
**2019年以降 0回**

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

火道がプラグされ、南岳火口から2018年3月以降噴出

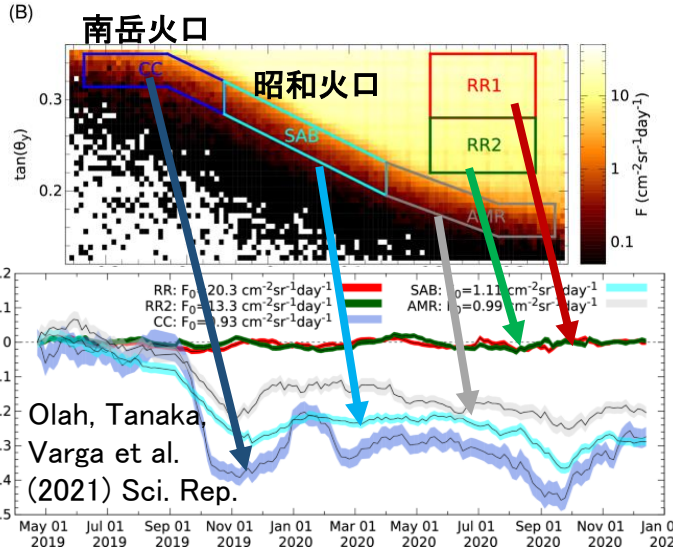
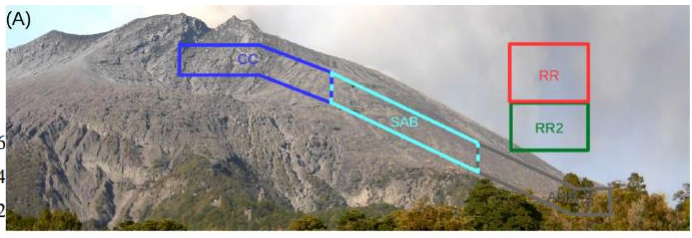
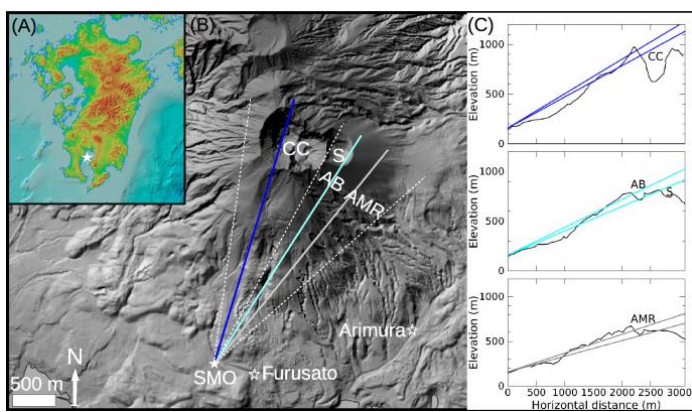


(2020年)噴火後、活発化した南岳火口の下にプラグ様の高密度構造が成長している。



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



解釈

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

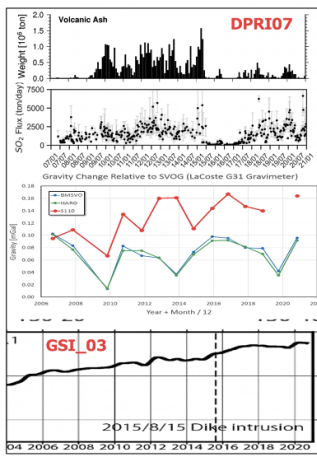
2019

2020

2021

相対透過ミュオン数

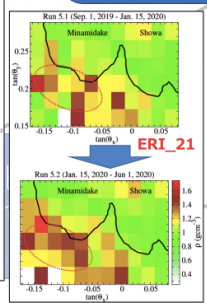
# 課題Bサブテーマ1 ③前年度までに得られた知見(他技術との比較、他課題・機関との連携)



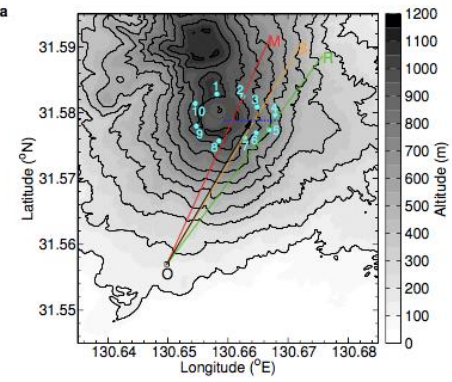
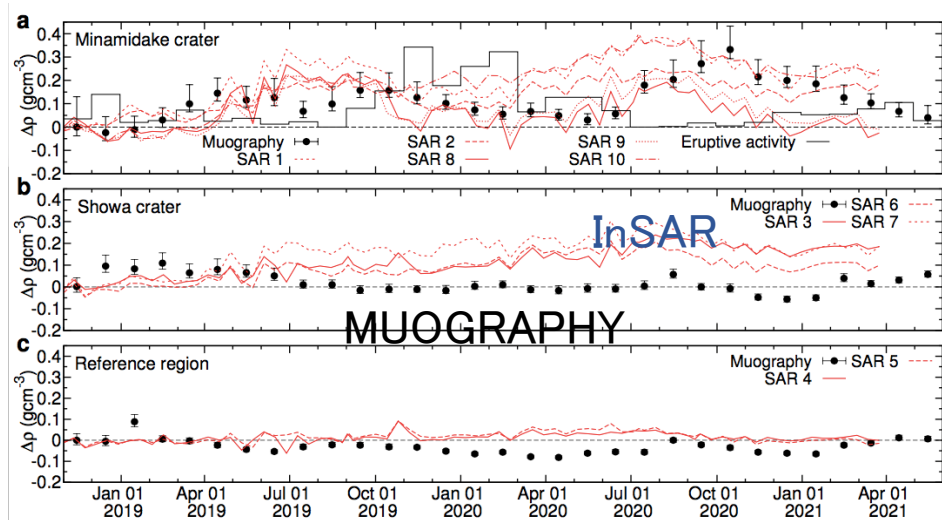
桜島南岳活動におけるガス放出卓越と火口下質量増加

物理量 (地物・噴出物)  
量・レート・位置・サイズ

- 近年の膨張の停滞
- 放出火山灰量の停滞
- ガス放出の卓越
- 桜島中央部の重力増加
- 南岳火口下の密度増加



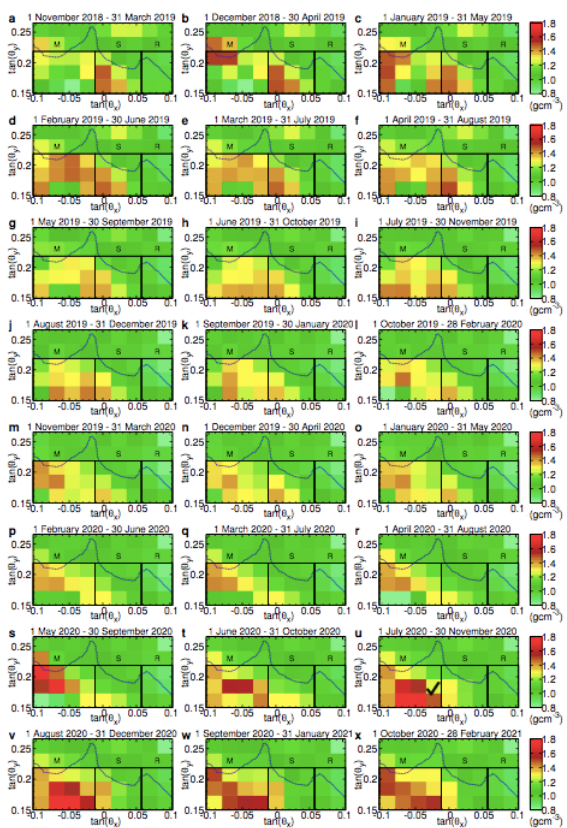
火山構造  
密度・破壊強度

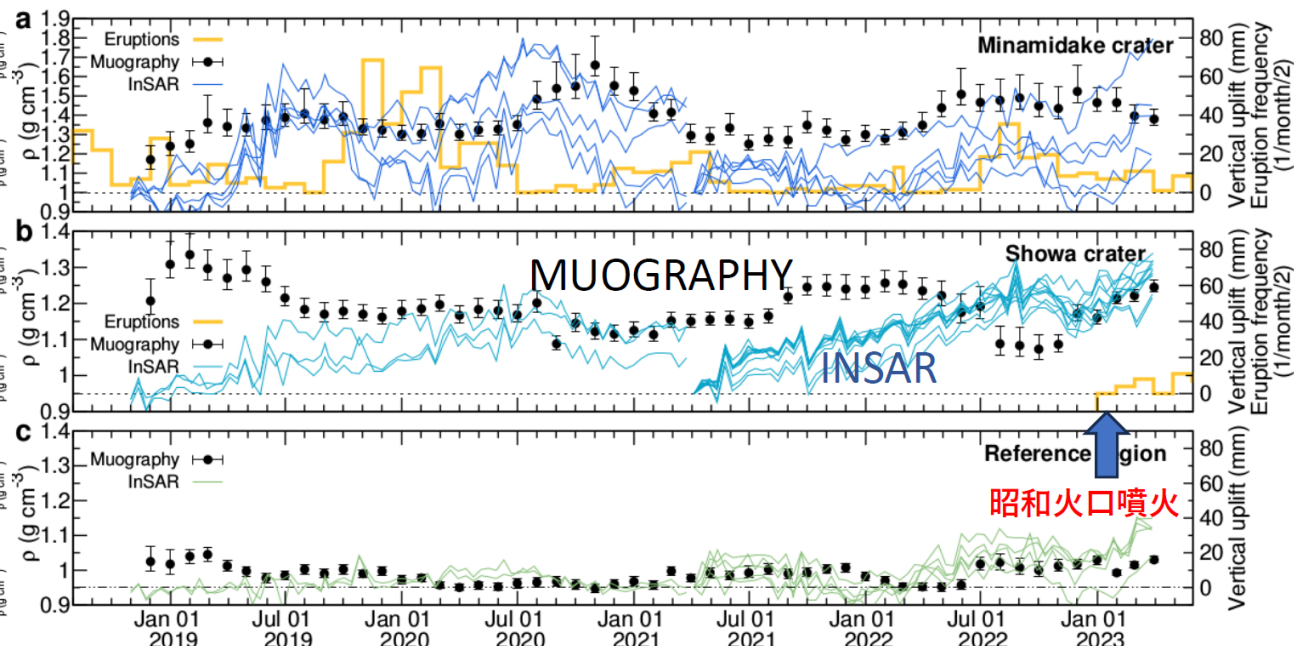
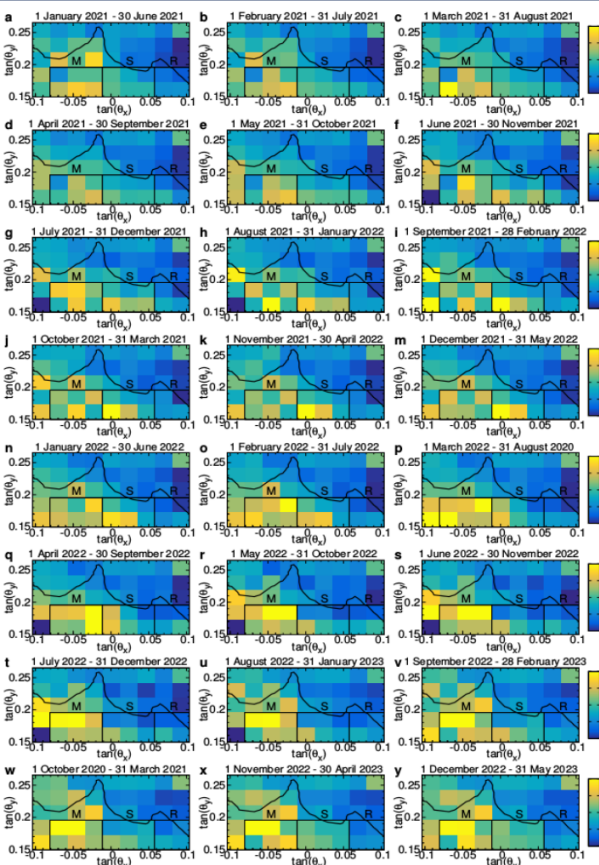


## InSAR, Muographyと噴火頻度が逆相関

- 他課題、他機関との連携例
- 火山PJ課題間
  - 災害軽減研究
  - 日本電気
  - カタールニア大学
  - ダラム大学
  - アタカマ大学

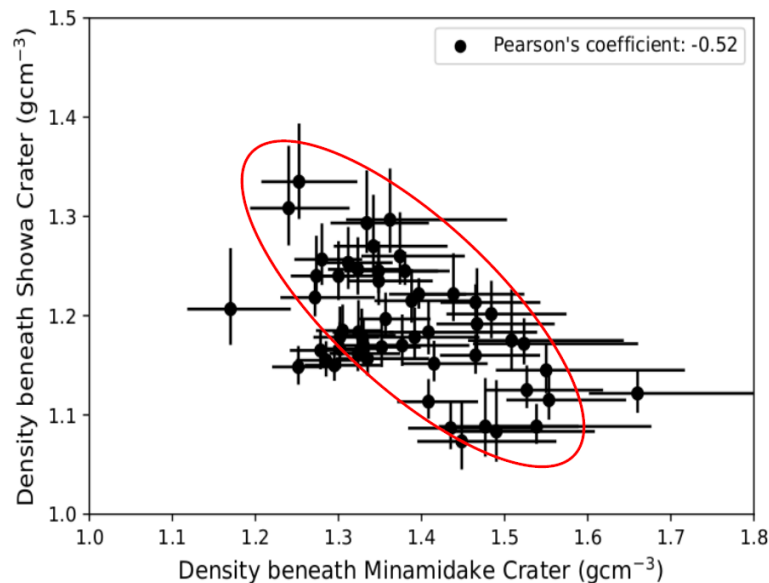
気泡を多く含むマグマの注入の減少により温度低下しマグマ粘性が上昇する→プラグ形成が始まり火道内圧力が上昇する。→気泡に富む新鮮なマグマ注入されるとガスポケットとプラグが加熱されて爆発が起き火道収縮 (Caricchi et al., 2021)。





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**

Pearson's coefficient  $-0.52$  that suggests a moderate anti-correlation between the mass densities. 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).



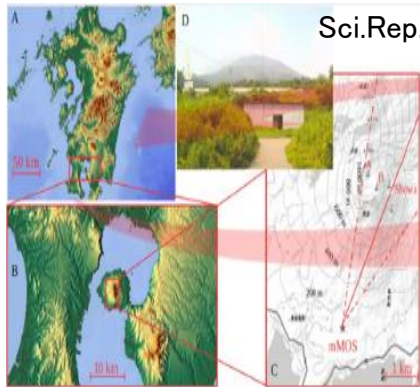
# ⑤得られた新解析技術

(~2019年) 1日1枚のミュオグラフィ画像を提供できる環境を整備

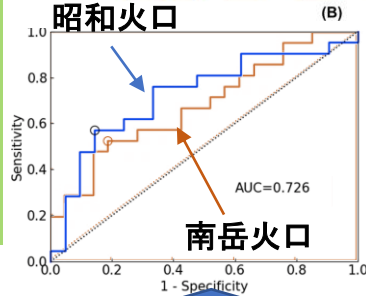
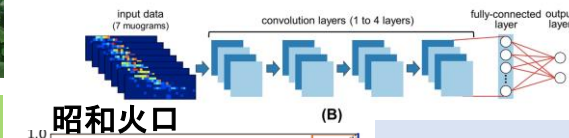
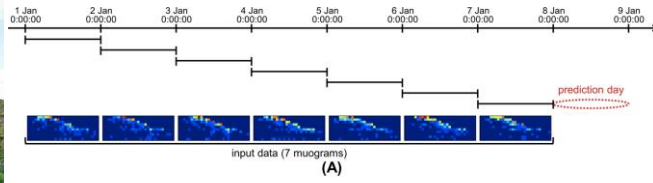


装置の出力データをWEBベースリアルタイム解析環境へと接続することにより、その結果、リアルタイムに最新情報に更新される高精細画像を閲覧できる環境が実現

Nomura, Hayashi, Tanaka et al. (2019) Sci.Rep.



(2020年) 日毎のミュオグラフィ画像データ(低解像度画像)を機械学習(CNN)することで翌日の噴火判定を行う技術(MuNET)を開発(2016~2017年データ)



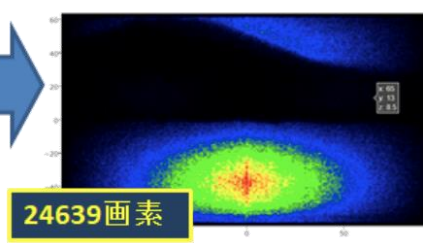
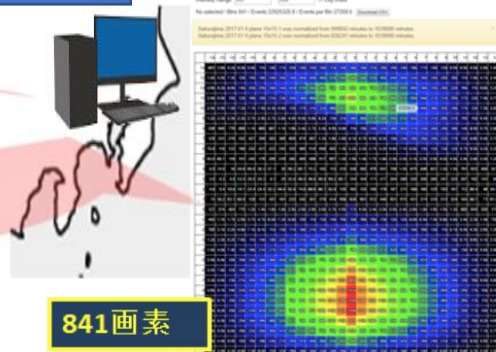
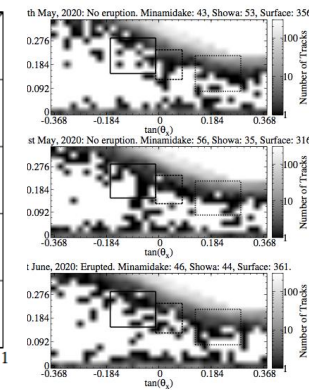
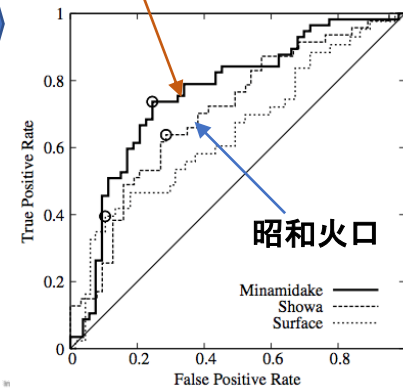
南岳火口  
AUC=  
0.678  
昭和火口  
AUC=  
0.726

(2021年) 日毎のミュオグラフィ画像データ(高解像度画像)を機械学習(CNN)することで噴火判定を導出する技術(MuNET-2)を開発(2019~2020年データ)

南岳火口 AUC=0.761  
昭和火口 AUC=0.704

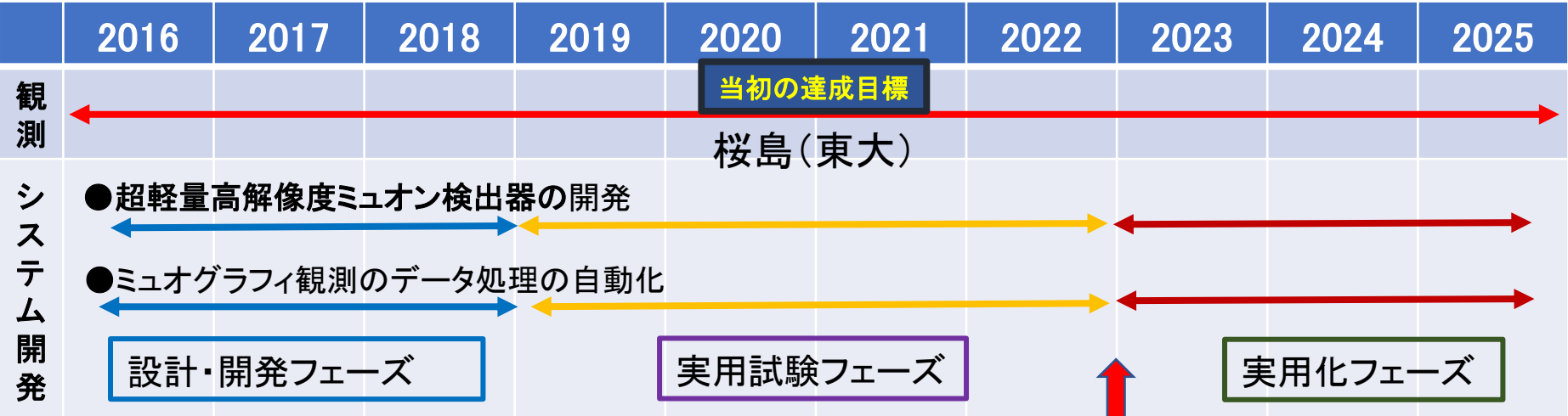
・判定性能が向上  
・昭和火口と南岳火口が逆転

南岳火口

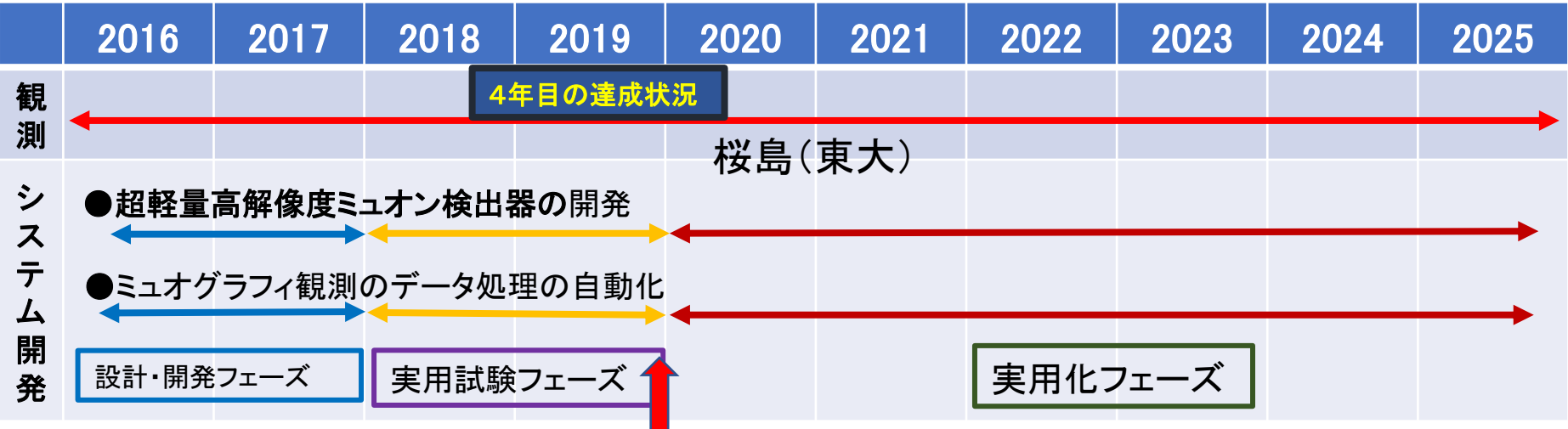


Olah and Tanaka (2021) AGU Geophysical Monograph

⑦目標達成度



事業開始後7年目に「1日1枚の高解像度透視画像（画素数3481）の提供を開始」及び「高解像度火山透視画像自動生成、データベース自動構築システムの試験運用」



事業開始後4年目において目標を大きく上回る24,639画素の透視画像自動生成、データベース自動構築システムの試験運用に到達した。→実用化フェーズ早期化でより多くの統計値を得る。

# 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

## 課題Bサブテーマ2に関する令和5年度成果の概要

### 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

#### 可搬型レーダー干渉計の開発

R3年度に可搬型レーダー干渉計運用機(センサー名:SCOPE)が完成。地殻変動検出を目的とした観測、効率的な観測実施方法(事前調査、機器運搬)について検討を進めている。

#### R5年度の実施内容・成果:

- 火山における計測実験(十勝岳、吾妻山、草津白根山、霧島山、雲仙岳)
- 岩手山の観測場所調査

#### 衛星SARによる地殻変動情報のデータベース

当初に計画していた解析手法の検討は終了。システム構築を進めるとともに、衛星SARを用いた火山研究を進めている。

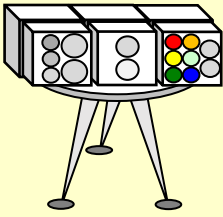
#### R5年度実施内容・成果:

- 自動解析システムの構築(北海道駒ヶ岳、諏訪之瀬島、樽前山、十和田、九重山)
- 衛星SARを用いた地殻変動研究(十勝岳)

### 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)の開発

#### 全体計画概要

火山観測に有用な各種画像情報を取得する地上設置・車載・航空機搭載小型カメラ:SPICを開発



温度画像

ガス濃度画像

岩石種, 地形計測

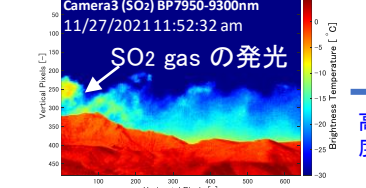
#### SPIC各プロトタイプを開発

4年目の目標を達成: 2020/3



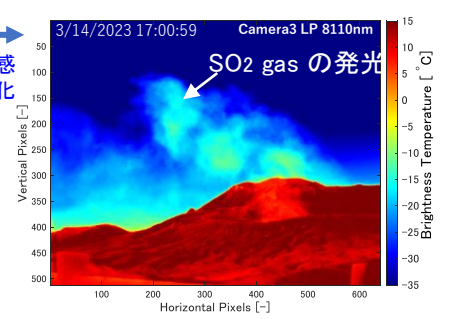
#### R2~4年度: プロトタイプでの観測, 地上設置・車載型開発

SO<sub>2</sub>ガス可視化実現: SPIC-UC



#### R5年度: プロトタイプによる火山観測, 航空機搭載型を開発開始

・高感度SO<sub>2</sub>ガス可視化実現: SPIC-C (冷却型カメラによるR5/3月観測データを解析し高感度噴煙濃度観測を実現: 日本初)

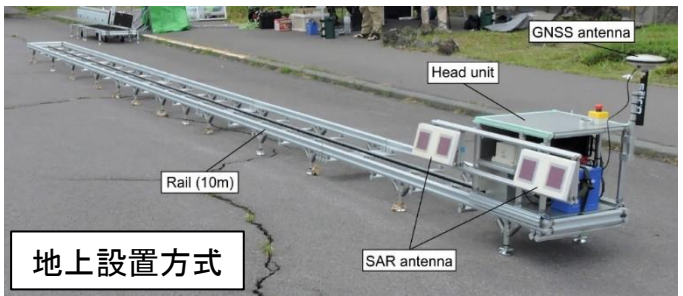


・SPIC-UC, -C航空機搭載型開発中



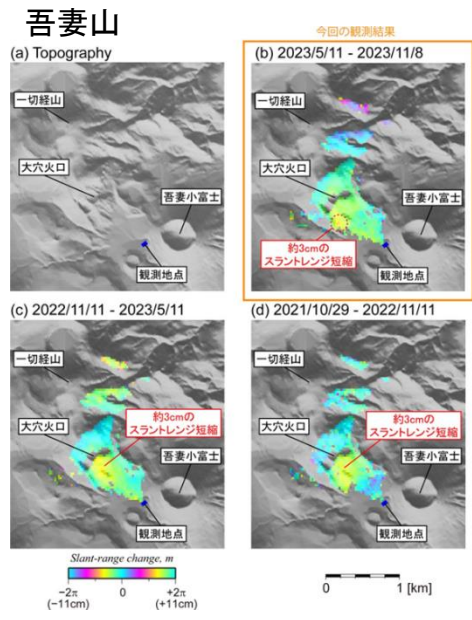
# 実施内容① 火山観測用可搬型レーダー干渉計の開発

設置場所に応じて観測方式(地上設置方式, 車載方式, 台車方式, 手動方式)を選択し, 効率的に火山周辺における地殻変動を面的に検出するレーダーセンサーの開発を進めている。



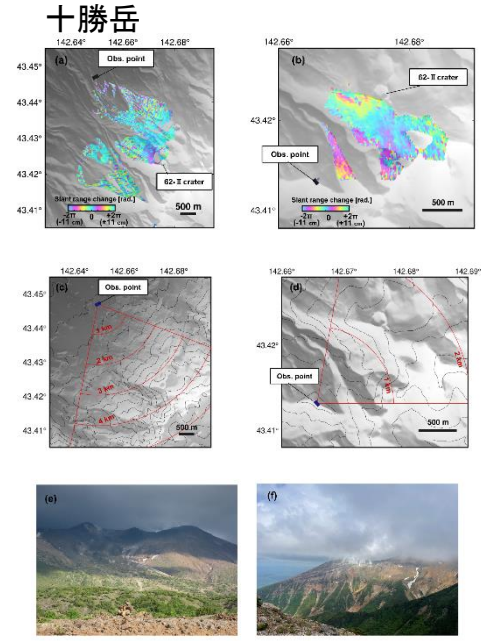
## 火山における計測実験(吾妻山、十勝岳、草津白根山、霧島山、雲仙岳)

吾妻山、十勝岳において火山活動に伴う地殻変動由来のシグナルを検出した。



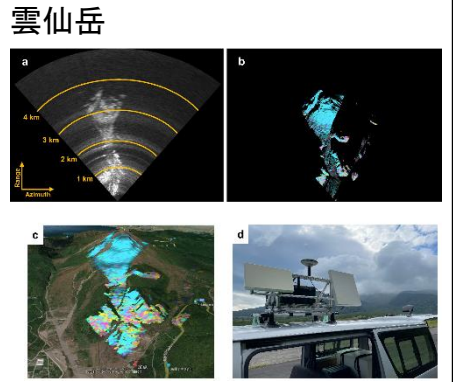
←吾妻山を対象としたSCOPE観測を2021年10月29日から2023年11月8日までに4回実施。

大穴火口を中心とした膨張を示唆する視線距離短縮が継続していることを明らかにした。



←十勝岳の前十勝(左列)では収縮を示唆する最大3cmの視線距離伸長を、振子沢噴気孔群(右列)では7cmを超える視線距離短縮を検出した。

来年度以降も繰り返し観測を実施予定。



↑R5年度は雲仙岳溶岩ドームを対象とした観測を開始した。来年度以降も継続して繰り返し観測を実施予定。SCOPE観測から得られた5分間の干渉画像(変動なし)と車両上部に搭載したアンテナ部。

霧島山を対象とした観測は12月に実施予定。草津白根山を対象とした観測では地殻変動は検出されなかった(衛星SARと整合的)。

# 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

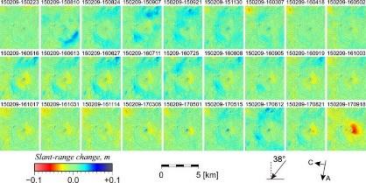
## 実施内容② 衛星SARによる地殻変動情報のデータベース

衛星SARデータの自動解析システムを構築し、得られる地殻変動情報をデータベース化する。また、衛星SARデータから得られる地殻変動情報を用いた火山研究を進める。

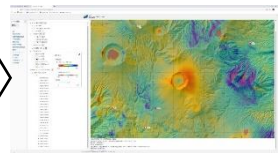
### 自動解析システムの構築

R元年度までに自動解析システムのための解析方法を決定し、その解析方法に基づいて、R4年度までに16火山の自動解析システムを構築した。そのシステムから得られる地殻変動検出結果は、JVNDで公開している。

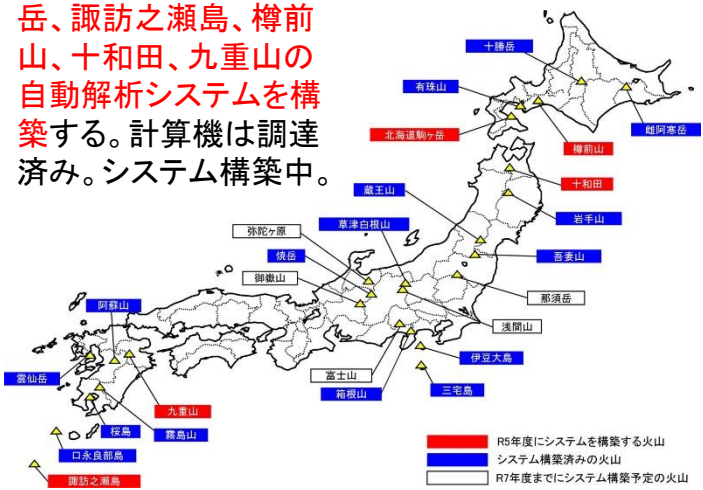
#### 霧島山(新燃岳)の地殻変動検出結果



JVNDでの公開



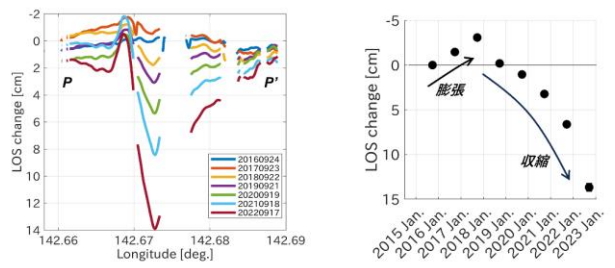
R5年度には北海道駒ヶ岳、諏訪之瀬島、樽前山、十和田、九重山の自動解析システムを構築する。計算機は調達済み。システム構築中。



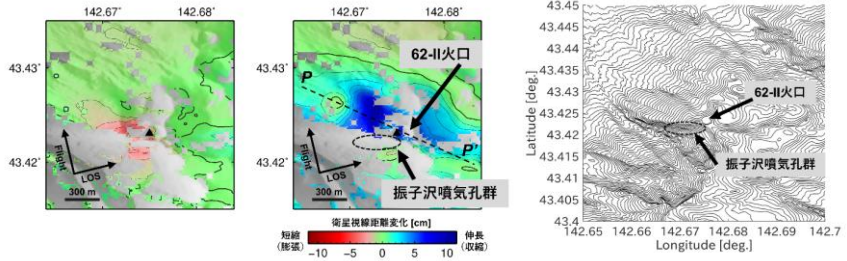
### 衛星SARを用いた地殻変動研究: 十勝岳

#### 62-II火口周辺における地殻変動

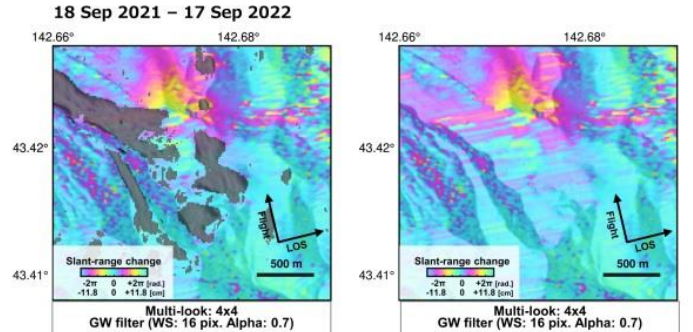
2015年以降のデータの解析により活発な噴気が認められている62-II火口周辺において、2017年までは膨張をしており、その後収縮に転じたことを明らかにした。



地殻変動は1キロ程度の局所的な範囲で生じたため、浅部熱水系の圧力変化によって駆動されたと推測される。



衛星SARでは急峻な地形においてレイオーバー(画像の幾何学的ゆがみ)の影響を受けるため、南向き斜面に位置する振り沢噴気孔群における地殻変動を高精度に検出することが困難であることを確認した。SCOPEによる機動的な地殻変動観測の必要性・重要性を示唆している。



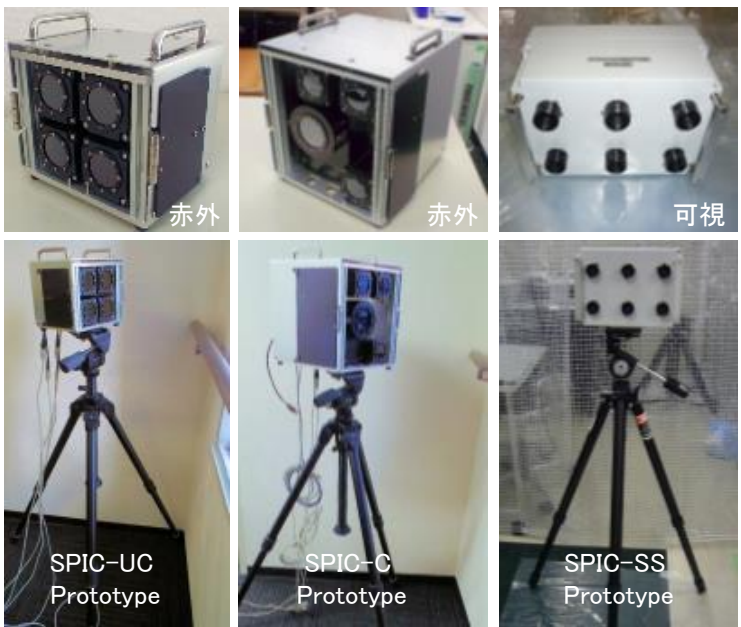
振り沢噴気孔群周辺ではレイオーバー領域(灰色)となり、正確な位相変化量を求めることができない。

# 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

## 実施内容③全体計画との関連 SPICの開発、スペクトル推定用データベース構築

	H28	H29	H30	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	
計画 a. SPICの開発	3つのカメラ(SPIC)および画像分光前置光学系(ISH)のプロトタイプ開発				各カメラを小型化し統合した, 地上設置型, 車載型装置の開発				車載型を改良した航空機搭載型装置の開発, 装置の試験提供		
計画 b. 岩石スペクトル	スペクトル計測・データベース構築手法の開発				データベース試作				データベース作成・提供		
	設計・開発フェーズ				実用試験フェーズ				実用化フェーズ		

**計画a.** SPIC各プロトタイプ完成(2020/3)  
**可搬型, 三脚搭載, 耐環境仕様**  
**(野外での装置試験が可能になった)**



活用 → **プロトタイプで試験観測を実施** → **地上設置・車載型開発** → **耐衝撃性向上** → **航空機搭載型開発**

R5年度: 噴煙観測, 可視化, 濃度推定手法開発, 航空機搭載型開発開始

R5成果例: SPIC-C車載型(航空機搭載型へ改良中)による天空観測試験⇒火山噴煙観測予定

冷却型LWIR(7.5~11.5μm)領域の8バンド冷却カメラと高速回転フィルタ(43Hzで8バンド計測を実証)⇒航空機へ搭載可能

8.02-9.27umバンド

SO2ガス感度あり

9.34-11.5umバンド

SO2ガス感度なし

SO2ガスに感度あり・なしのバンド演算でSO2ガス定量可能

**計画b.** コア試料の画像分光計測を継続実施(DB化を計画)

R4年度  
コア箱をスキャンできる大型試料ステージ完成. 試験計測実施.

大型試料スキャンステージ

R5年度: 50cmコア箱のままスキャンしデータ取得中.

大型スキャンステージ

関係機関へ装置を試験提供予定

# 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

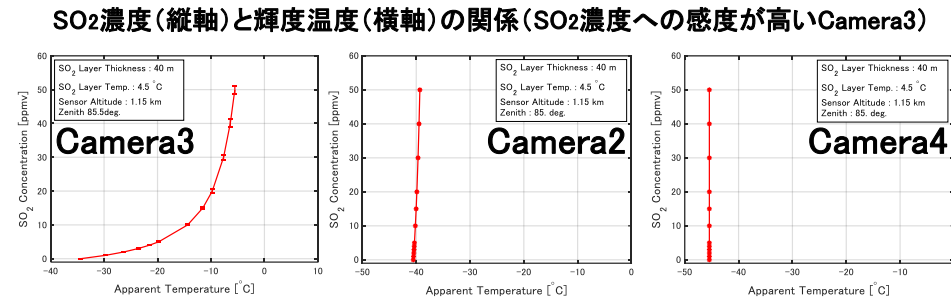
## 実施内容③ 令和5年度成果(トピック): SPICの開発～試験観測

計画:a. SPICの開発: (1)火山噴煙観測実施(阿蘇, R5/3), (2)高感度SO<sub>2</sub>ガス定量化手法開発(R5/4～)

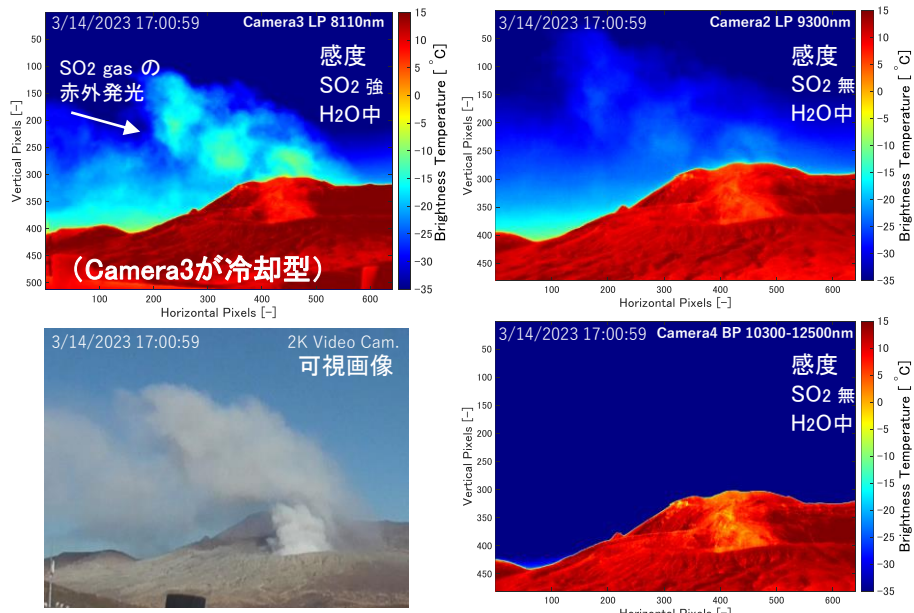
(1)火山噴煙観測実施(阿蘇, :R5/3/14~17)  
 SPIC-C (LW-2VGA) (冷却型3波長赤外カメラ)等を用いた火山噴煙試験観測を実施⇒冷却型赤外面像によるSO<sub>2</sub>ガスの可視化を実現(日本初)



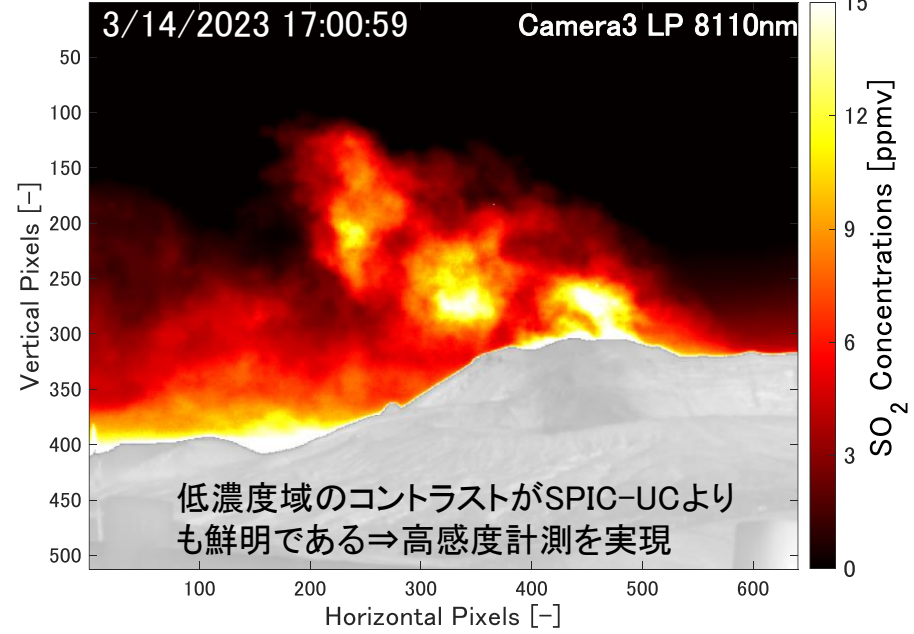
(2)高感度 SO<sub>2</sub>ガス定量化手法開発(R5/4～)  
 SO<sub>2</sub>濃度とSPIC-Cが観測した分光放射輝度の関係の解析:放射伝達モデルを構築し計算⇒SO<sub>2</sub>濃度と輝度温度の関係を導出しSO<sub>2</sub>濃度を定量



### 輝度温度で可視化したSO<sub>2</sub>ガスの濃度分布



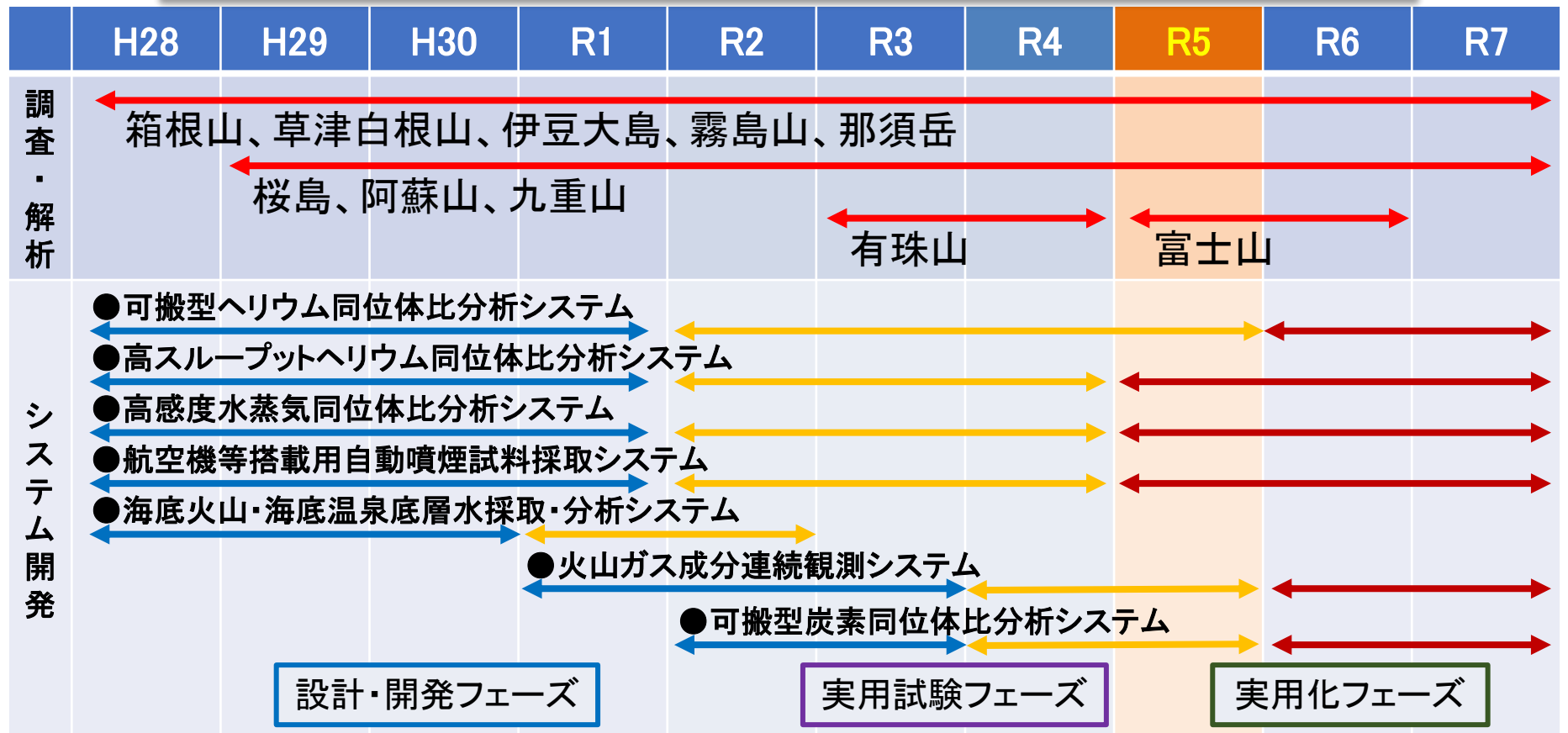
### 観測輝度値(輝度温度表示)をSO<sub>2</sub>濃度に換算



推定したSO<sub>2</sub>日発生量推定: 2000~3000tons/day

サブテーマ3: 地球化学的観測技術の開発 (1)

**火山ガスの地球化学的観測による噴火切迫性評価(火山噴火予測)手法の開発**  
 これまでの主たる成果: 火山ガス組成・同位体比に基づく活動度評価の高度化



**現時点までの主たる成果**

- 火山活動に対応した化学組成・同位体比変動の検出
- 噴煙試料を用いた噴気孔同位体比の決定
- 噴煙試料自動採取装置、可搬型同位体比分析装置の評価

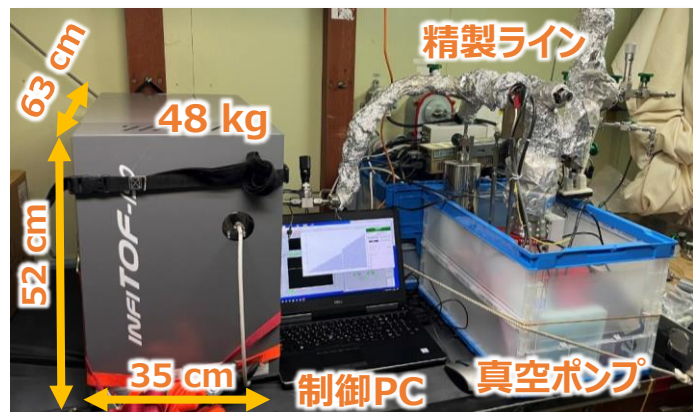


**火山ガス組成・同位体比に基づく活動度評価の高度化**

- マグマ成分の寄与率の変動
- 安全な場所での高精度観測

# マグマ起源ヘリウム・二酸化炭素測定に関わる技術開発(東大)

## 可搬型質量分析計の実証実験



- 小型, 軽量, 高質量分解能
- 現場でデータが得られる
- 測定頻度(時間分解能)の向上
- 100 V電源で運用可

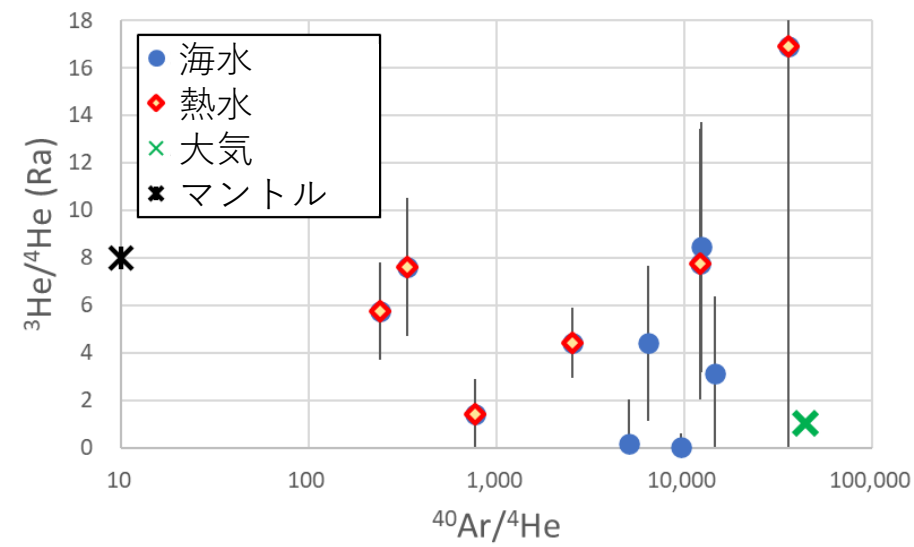
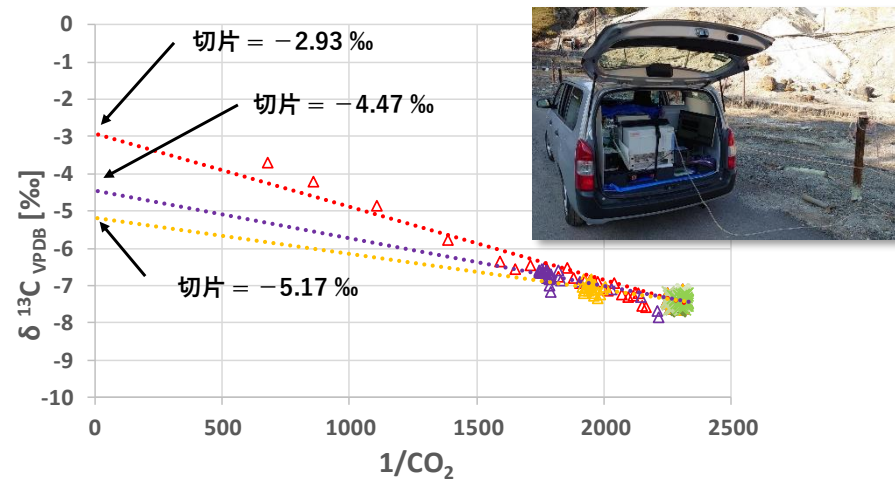


よこすか (JAMSTEC) 調査航海中、しんかい6500 で採取した海底熱水の溶存ガスを船上で分析 (2023年9月)

## 可搬型質量分析計+前処理用小型真空ライン

## 同位体比赤外分光計の実証実験

草津白根山付近万座干俣噴気現場分析 (2023年5月)



➤ 世界初の船上でのヘリウム同位体比分析  
 ➤ マントル起源ヘリウムを含む熱水が確実に採取されていることを現場で確認

➤ 大気成分との混合線の切片として、短時間の噴気成分の同位体比変動を検出

# 火山活動に対応した化学組成・同位体比変動の検出 (東海大・気象研)

□火山ガスの化学組成モニタリング:火山活動評価に適した指標とは？

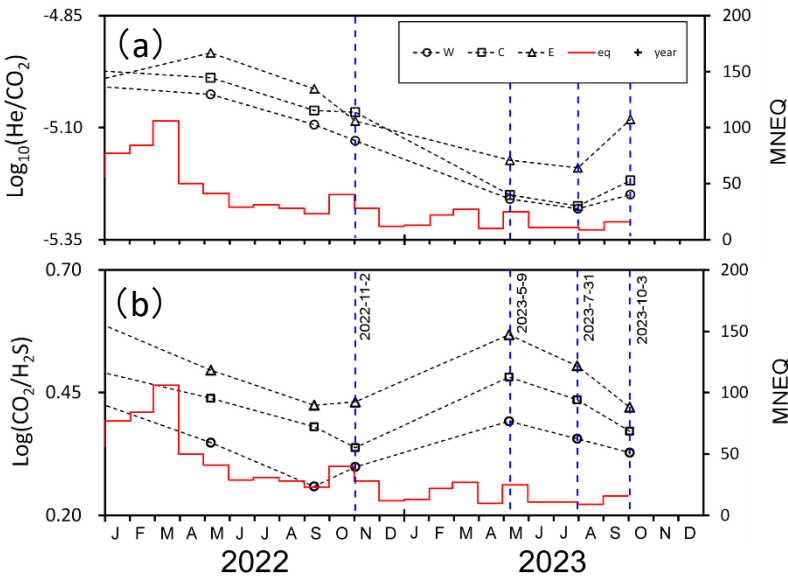


図1. 草津白根山北側地熱地帯噴気 (W, C, E) の(a) He/CO<sub>2</sub>比と(b) CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比の変動。月別地震回数(MNEQ)は気象庁の観測による

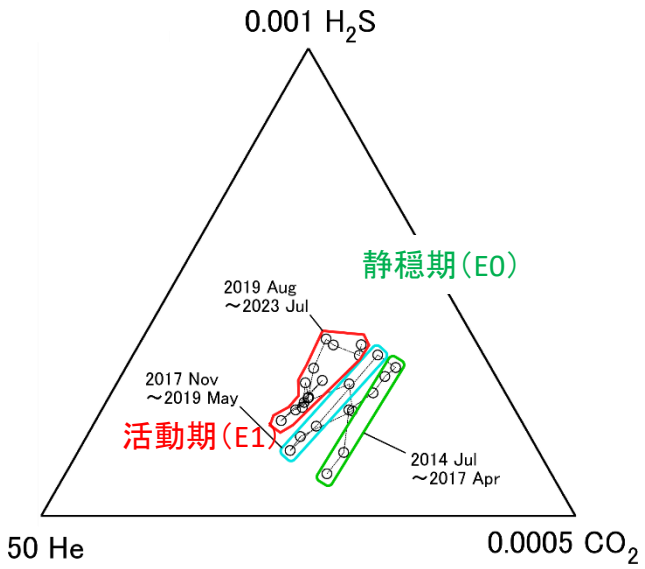


図2. 草津白根山北側地熱地帯噴気 (W) の He-H<sub>2</sub>S-CO<sub>2</sub>三成分比

## 草津白根山の火山活動評価に関する研究成果

- ◆ 2022年11月～2023年10月の期間、火山ガスのHe/CO<sub>2</sub>比とCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比には非協調的な変動(デカップリング)が起きている(図1a, b)。
- ◆ 2014年～2023年の期間で、火山ガスのHe-H<sub>2</sub>S-CO<sub>2</sub>三成分比は、H<sub>2</sub>S成分が多い端成分(E0)とH<sub>2</sub>S成分が少ない端成分(E1)の間を往復する変動が見られ、H<sub>2</sub>S成分が多い時期は、地震活動が静穏で、H<sub>2</sub>S成分が少ない時期は、地震活動が活発である(図2)。さらに、E0とE1にはH<sub>2</sub>S成分が増加する経年的な変動が見られる。
- ◆ 火山ガスのH<sub>2</sub>Sは、マグマ起源のSO<sub>2</sub>が熱水系で不均化反応を経て生成すると考えられる。SO<sub>2</sub>からH<sub>2</sub>Sが生成する効率は、熱水系が還元的環境の場合、上昇すると考えられる。火山ガスのCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比は熱水系の環境に影響される可能性があり、火山活動の評価には、CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比よりもHe/CO<sub>2</sub>比が適切であると考えられる。

# 噴煙の水蒸気・水素の同位体比測定技術の開発(名古屋大)

□噴煙中水蒸気の水素・酸素同位体比測定(桜島)

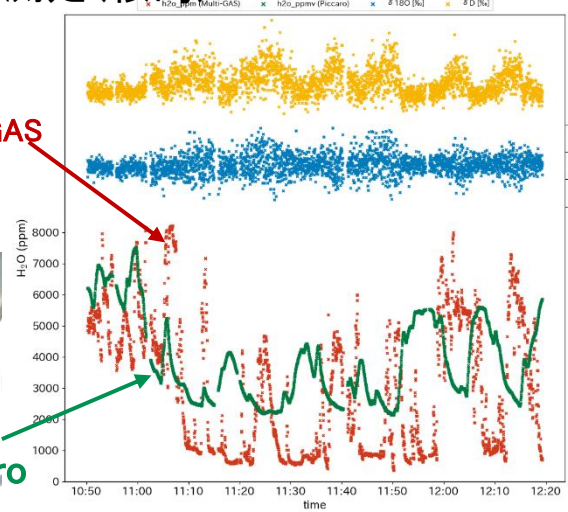
## 同位体アナライザーPicarro

セスナ機への搭載&噴煙の試験観測

日時:2023年3月15日

場所:桜島

Multi-GASと同時観測実施



### 観測結果

- 長期変化はMulti-GASと概ね一致するが、Picarroだけに短期のゴーストピーク出現
- 噴煙に伴う同位体比の変化がほとんど見えない  
→ 分光キャビティの体積が大き過ぎる可能性大
- 一般大気中のH<sub>2</sub>O同位体比の高度変化大  
→ 桜島では高濃度の噴煙を観測する必要

# ドローン搭載用自動噴煙試料採取装置(SelPS)の開発(名古屋大)

## SelPSの開発&作動試験

日時:2023年9月24-25日

場所:阿蘇中岳

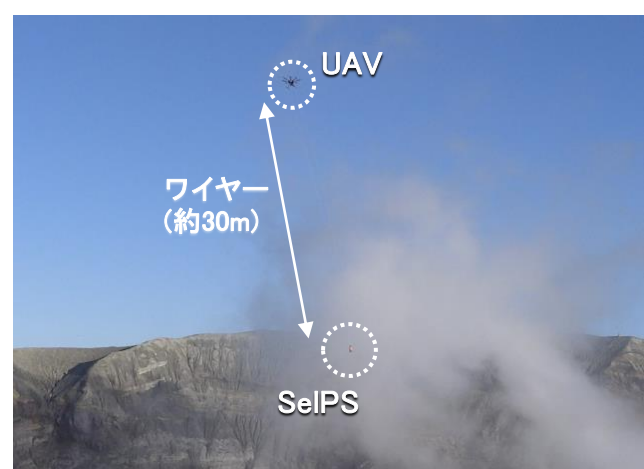
動作閾値SO<sub>2</sub>濃度: 5 or 10 ppm

使用UAV: 京大DJI S1000 (搭載試験&観測)

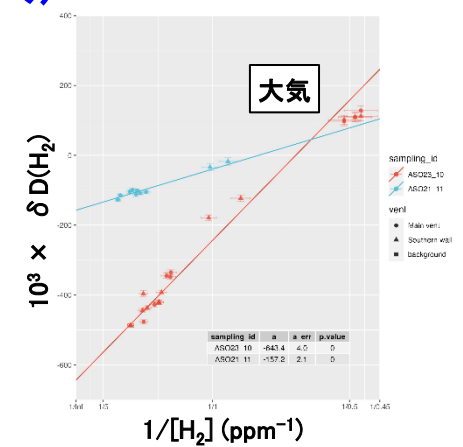
&京大DJI M200V2 (搭載試験のみ)

## 本年度の進捗

- 中型UAVに搭載して作動試験実施  
→ 問題なし
- SelPSを20m超のワイヤーの下に連結  
→ Inletチューブ短縮&軽量化実現、安全性および安定性確認



阿蘇中岳における観測の様子

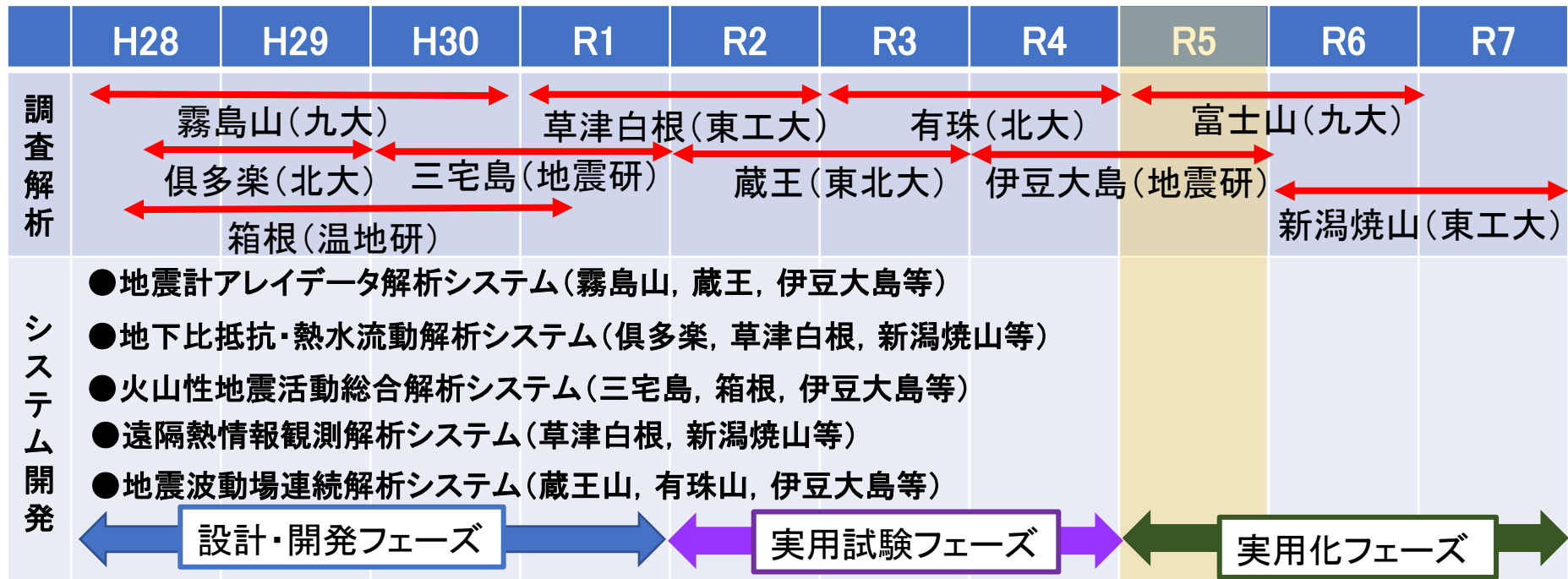


噴煙中のH<sub>2</sub>濃度(逆数)と delta D(H<sub>2</sub>) の関係  
2021年(青)と比較して2023年(赤)はAET<sub>D</sub>の大幅な低下を観測



噴火切迫性評価高度化(火山噴火予測)手法の開発

→ 噴火切迫性の高い火山での構造探査(噴火発生場の検証)や機動的な観測(状態把握)が鍵



これまでの主たる成果

- 比抵抗構造, 地震活動, 地震波速度構造, 地盤変動源の関係、共通性
- 広域比抵抗構造と熱水流動解析の比較
- 各種ツール開発 等

総括



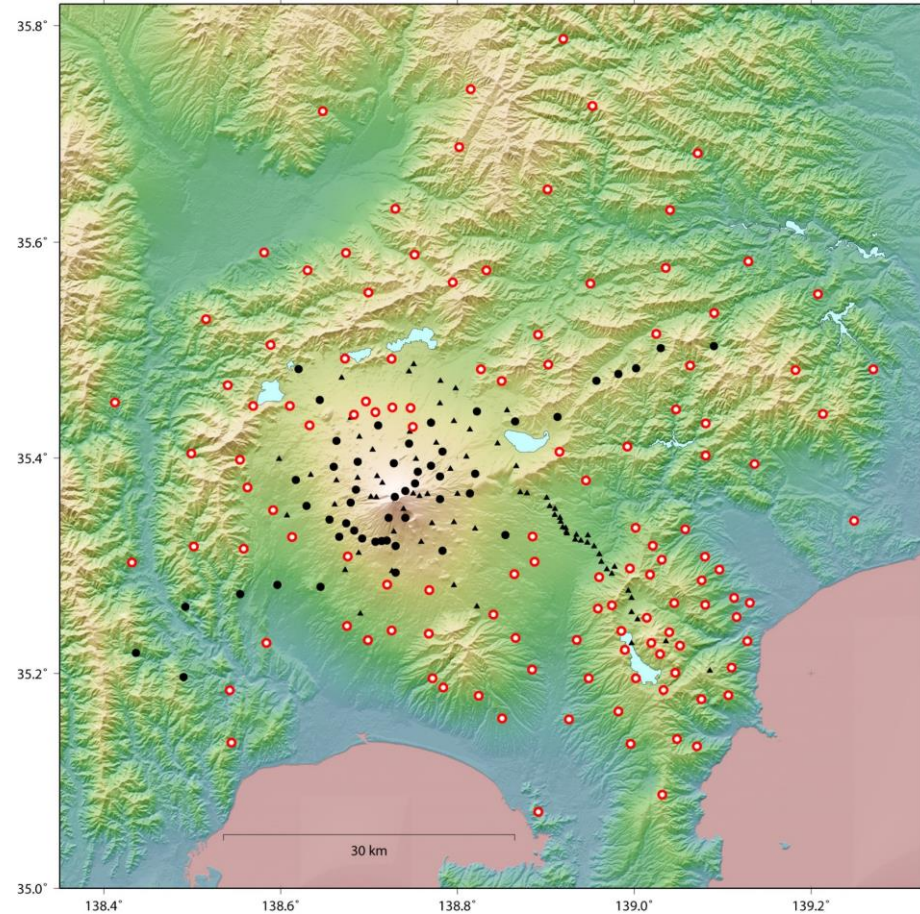
水蒸気噴火準備過程標準モデル

による噴火切迫性評価の高度化

- 浅部不透水層のある場所
- 地震活動と地盤変動源
- 熱水活動特有の地震波形

# 富士・箱根山における機動観測(MT探査120点)

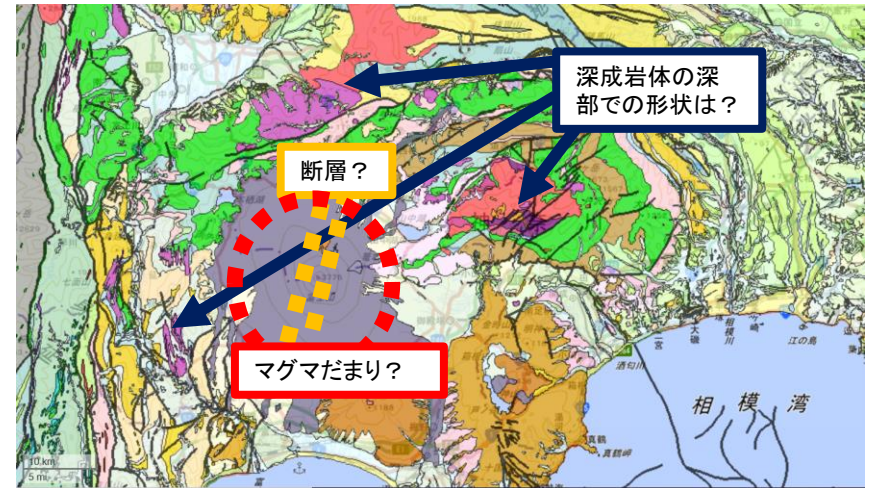
ここ数年が太陽活動のピーク。良データが期待できる。  
1観測点につき、約30日間のデータを取得



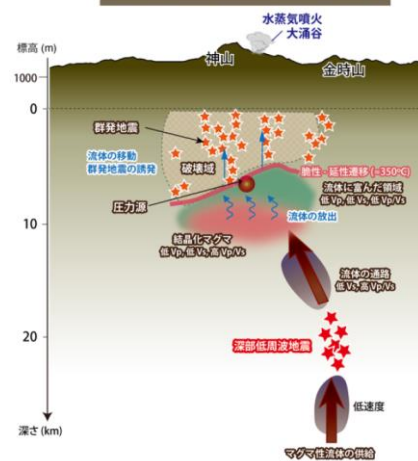
- 2023年度広帯域
- 既存広帯域点 (Aizawa et al., 2016)
- ▲ 短周期のみ (< 1s)

## 富士山での狙い

- 深さ15km以深に存在すると思われる **マグマだまり**の形状把握 (ほんとにある?)
- 富士山直下の弱面推定 (Aizawa et al. 2016, geologyで示唆された南北性の構造 (**断層?**) の詳細把握)
- 周辺との比較 (特に丹沢山地、御坂山地、身延山地、大月などの**深成岩**や、フィリピン海プレートとの形状との関係)
- 地震活動の理解と、火山活動活発時のシナリオの検討



箱根火山下のマグマ供給過程の模式図

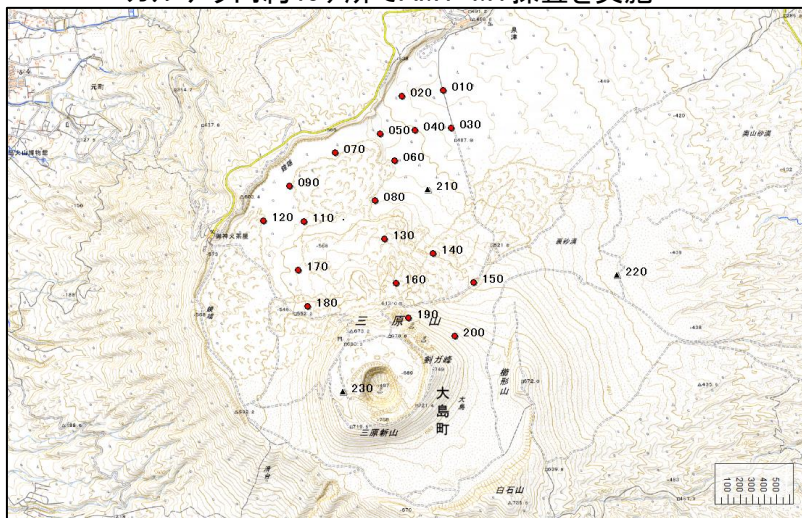


## 箱根山での狙い

- 地震波速度構造と地震活動の研究が進んでおり、深部→浅部の火山活動を理解する箱根モデルが提案されている。
- 新たに深部比抵抗構造を推定し、物性や流体の移動経路の理解につなげる
- 地震波速度と比抵抗の対応について雲仙火山との比較をしたい (特にVp/Vsと比抵抗)。

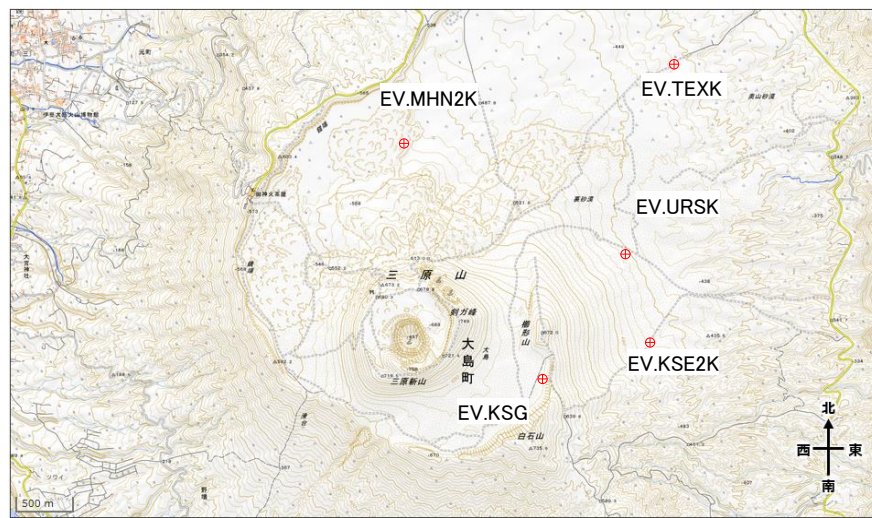
# 伊豆大島カルデラ内における電磁気および広帯域地震観測

伊豆大島三原山周辺の浅部構造を把握するため、カルデラ内約40ヶ所でAMT・MT探査を実施

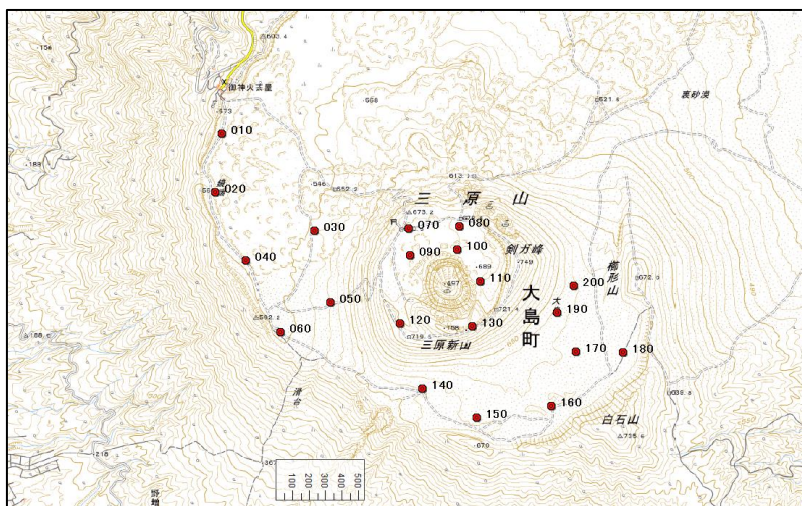


2022年11月～2023年1月実施 (AMT19ヶ所, MT3ヶ所)

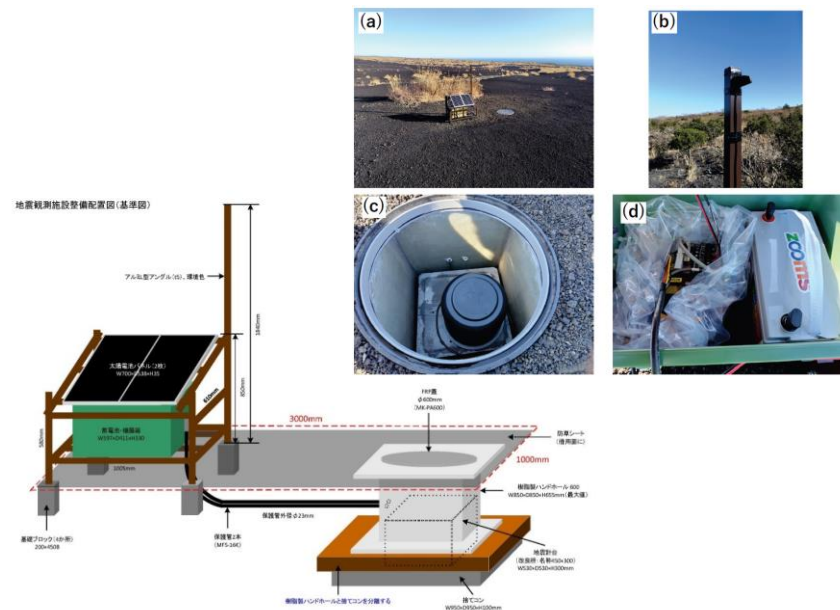
伊豆大島三原山周辺の震源を精密に決定するため、新たに広帯域地震観測点5か所を設置



2023年3月から観測実施中



2024年1月実施予定 (AMT 20ヶ所)

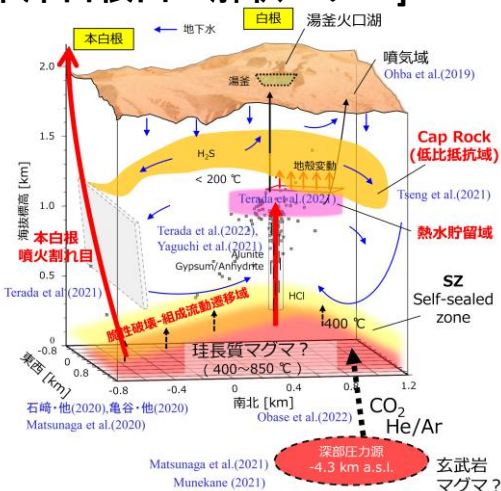


霧島硫黄山・草津白根・箱根山等では、熱水系火山に共通する構造が見えている。

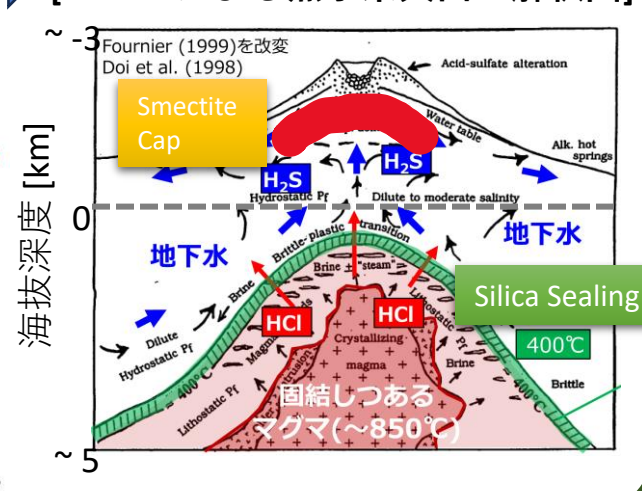
帯水層

- 低比抵抗(キャップロック)
- 浅部圧力源
- 地震発生域
- シーリングゾーン
- 熱水溜まり
- やや深部圧力源
- 部分溶融域

[草津白根山の解釈モデル]

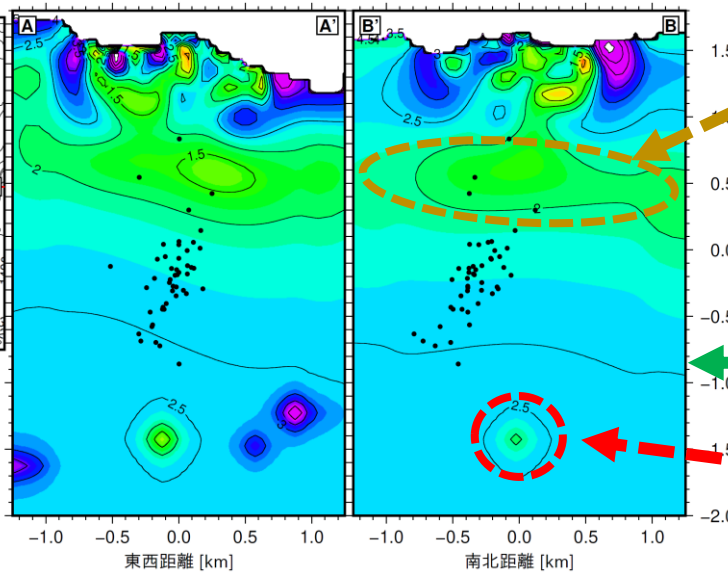
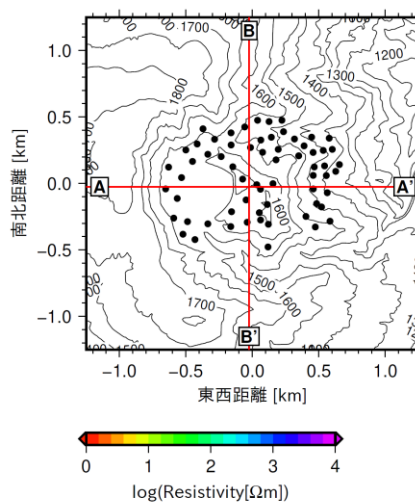


[Fournierによる熱水系火山の解釈図]



### 蔵王山の場合

構造の共通点と異なる点を整理。構造の違いと噴火切迫度の関係は？



- スメクタイトキャップ  
五色岳～御釜下で顕著
- 地震発生域
- シリカシーリング
- マグマ?

直下のマグマの規模は小さい?