

第 150 回
火山噴火予知連絡会資料

(その2の5)

霧島山

令和4年7月5日

火山噴火予知連絡会資料(その2の5)

目次

霧島山	
気象庁	3-26
気象研	27-29
東海大・気象研	30-33
東京大他	34-36
東大震研	37-38
九大	39-42
九大・日本工営	43-60
神戸大・九大	61-64
防災科研	65-70
地理院	71-84

霧 島 山

(2021 年 12 月～2022 年 6 月 15 日)

霧島山（広域）

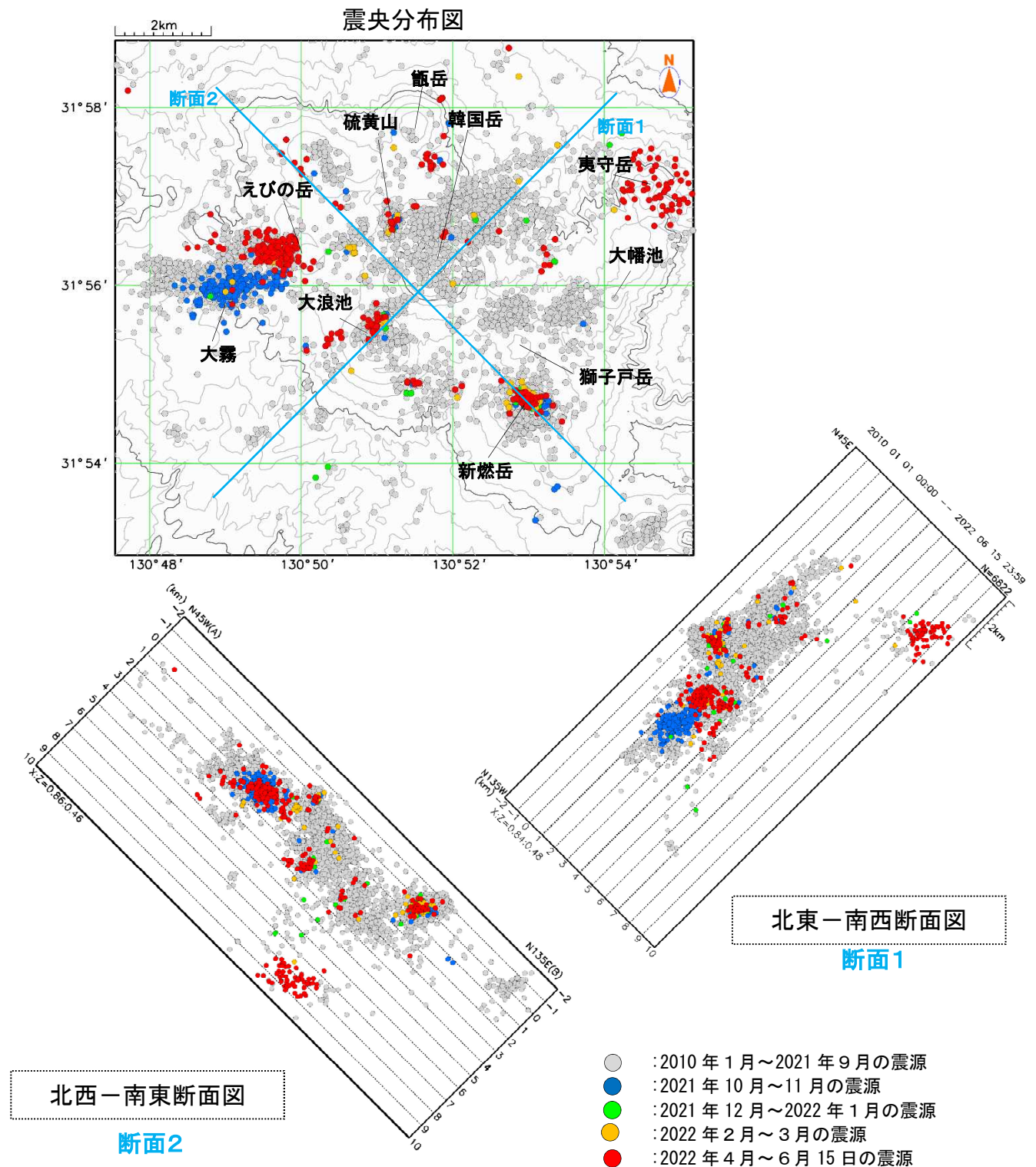


図 1 霧島山 震源分布図 (2010 年 1 月～2022 年 6 月 15 日)

- ・ 2022 年 3 月 31 日から 4 月 7 日にかけて、えびの岳付近（硫黄山の西南西約 3～4 km）の深さ 1～3 km 付近において火山性地震が一時的に増加した。
- ・ 4 月 2 日及び 29 日に大浪池付近の深さ 3～4 km 付近、5 月 14 日には甑岳付近の深さ 1～2 km 付近において火山性地震が一時的に増加した。

この地図の作成には、国土地理院発行の『数値地図 50mメッシュ（標高）』を使用した。

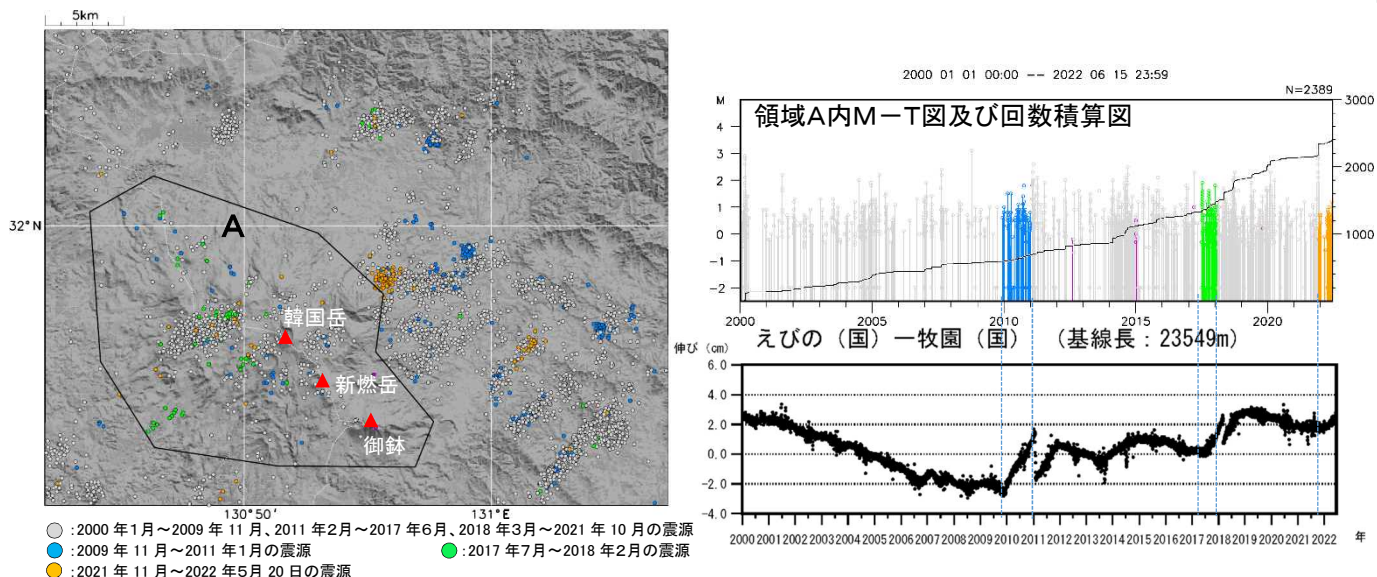


図2 霧島山 一元化震源による広域の地震活動 (2000年1月～2022年6月15日)
 (左図: 一元化震源の震央分布図 (深さ10km以浅、 $M \geq 0.5$)、
 右上図: 震央分布図中の領域A内M-T図及び回数積算図、
 右下図: GNSS連続観測による霧島山を挟む基線の基線長変化)

2011年1月及び2018年3月の新燃岳の噴火に先行するマグマの蓄積 (霧島山を挟むGNSS基線の伸び) に対応する地震活動の明瞭な活発化は認められないが、マグマの蓄積が進む2010年頃から、地震活動に緩やかな活発化傾向が認められる。

※この地図の作成には、国土地理院発行の『数値地図50mメッシュ (標高)』を使用した。

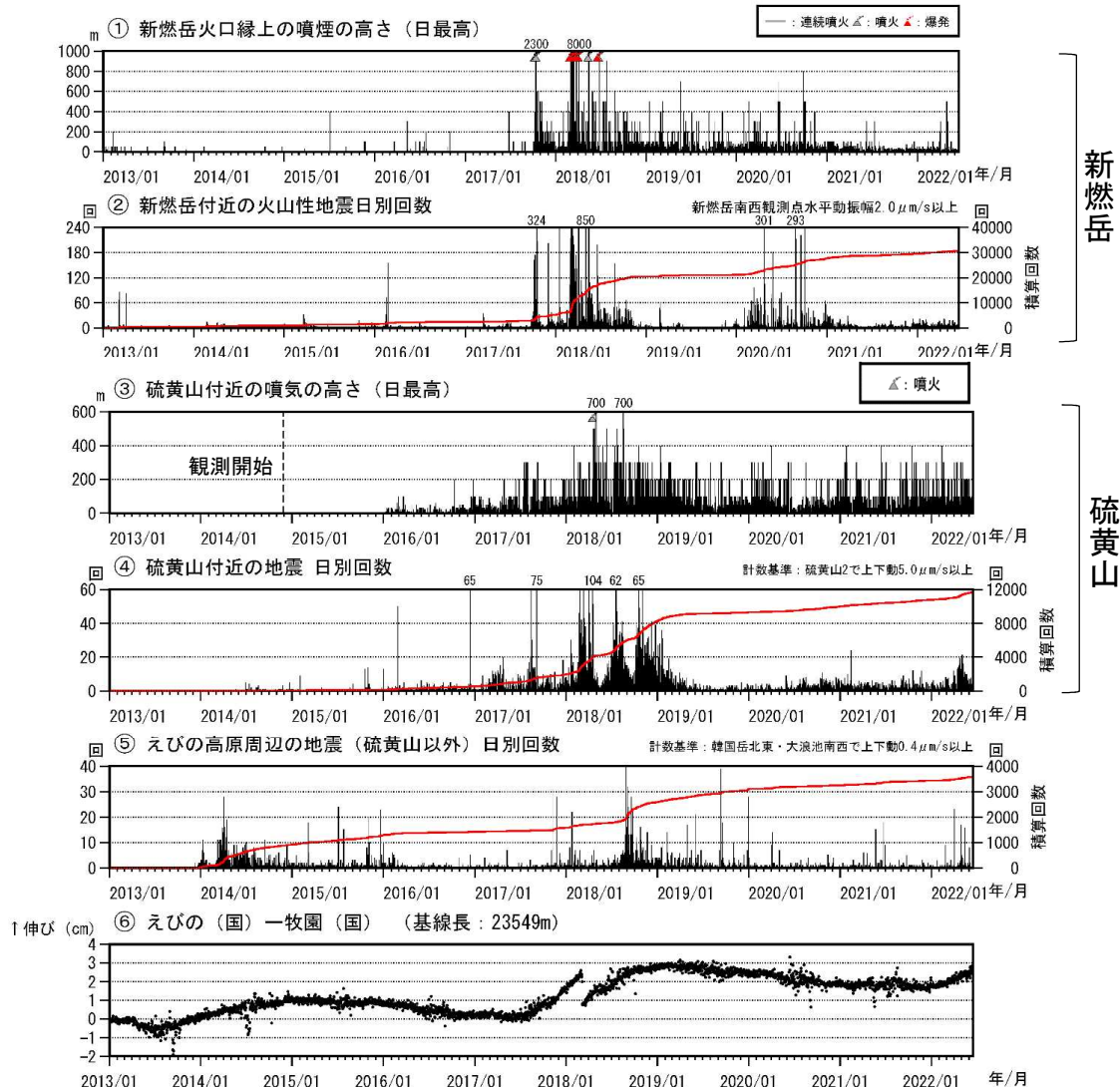
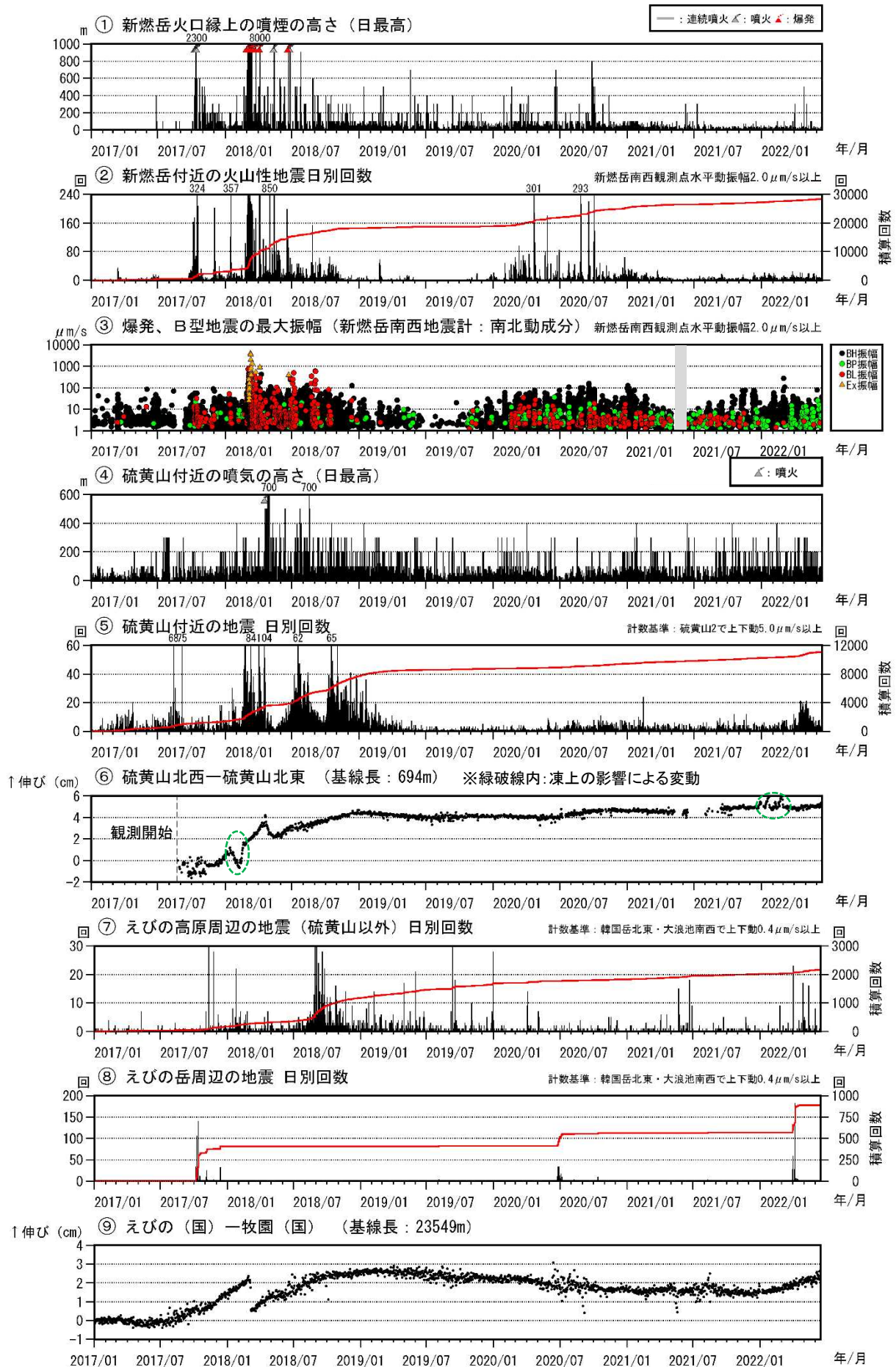


図3-1 霧島山 活動経過図 (2013年1月～2022年6月15日)



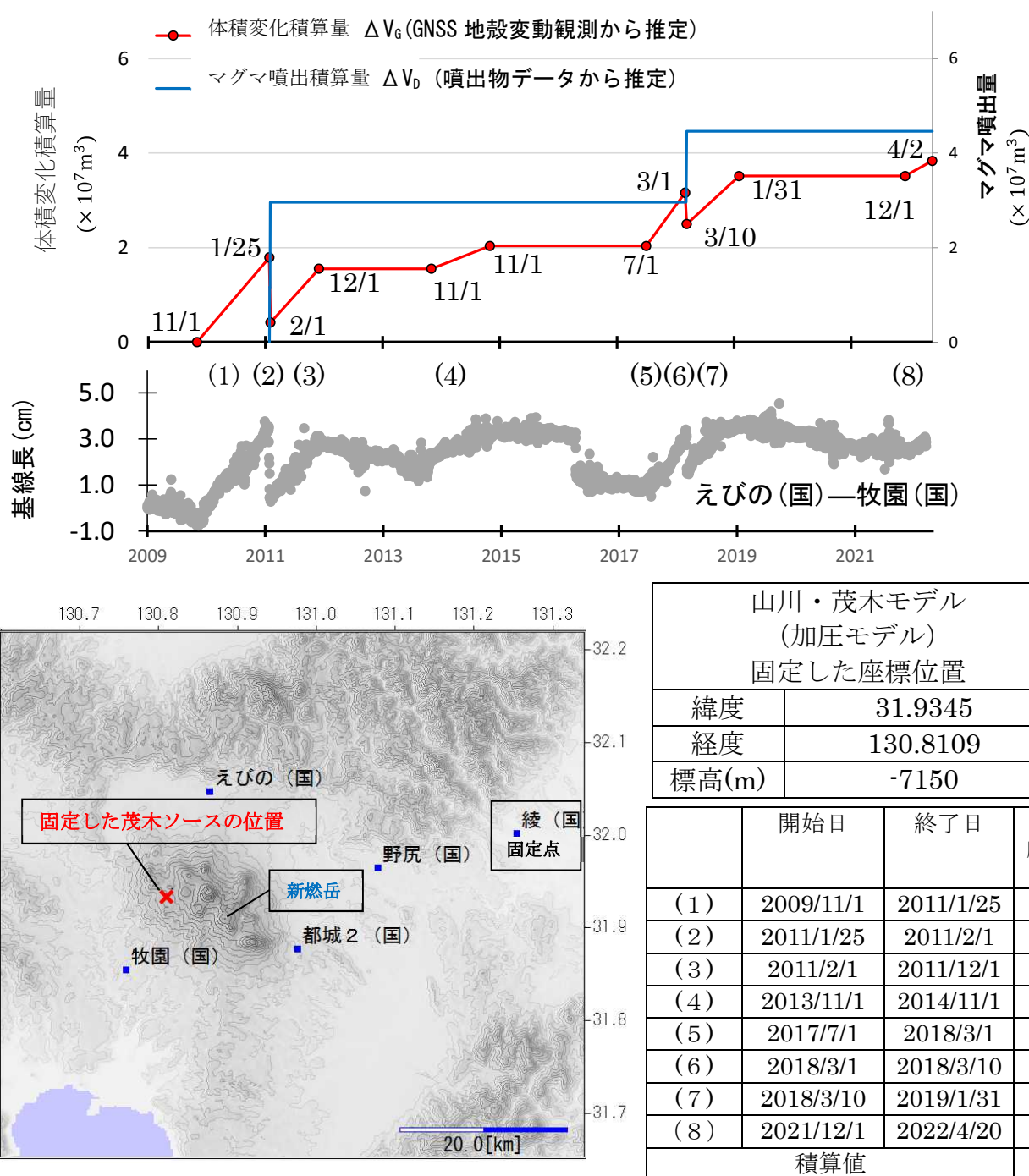


図 4-1 霧島山 噴出物量及び地殻変動から推定した体積変化量の積算の推移

(2009 年 1 月～2022 年 4 月 20 日)

霧島山の物質収支として、噴出物量とマグマの蓄積と考えられる体積変化量についてとりまとめた。ここでは揮発性物質の放出については取り扱わない。体積変化量については、GNSS 地殻変動観測からえびの岳地下付近をソースとする球状モデル(山川・茂木モデル)の膨張量を期間ごとに計算(図 4-2)し、積算したものから時間変化を推定している。マグマ噴出積算量については、2011 年、2018 年の噴火における噴出物データ(火砕物及び火口内の蓄積溶岩の総和)から見積もられたマグマ噴出量を積算したものから時間変化を推定しており、ソース位置は 2017 年 7 月から 2018 年 3 月初頭までの GNSS 地殻変動観測から推定し、2009 年からソース位置は変わらないと仮定している(第 141 回火山噴火予知連絡会、気象庁資料)。また、その座標を図中に示す。

期間(1)～(8)について、期間の日時及び GNSS 地殻変動観測から見積もったソース膨張量を図中に示す。2009 年 11 月 1 日からの膨張量収支としては、 $3.8 \times 10^7 \text{m}^3$ の膨張と推定される。

※(国)：国土地理院 えびの(国)―牧園(国)の基線長については、国土地理院の解析結果(F3 解及び R3 解)を使用した。

※この地図の作成には、国土地理院発行の『数値地図 50mメッシュ(標高)』を使用した。

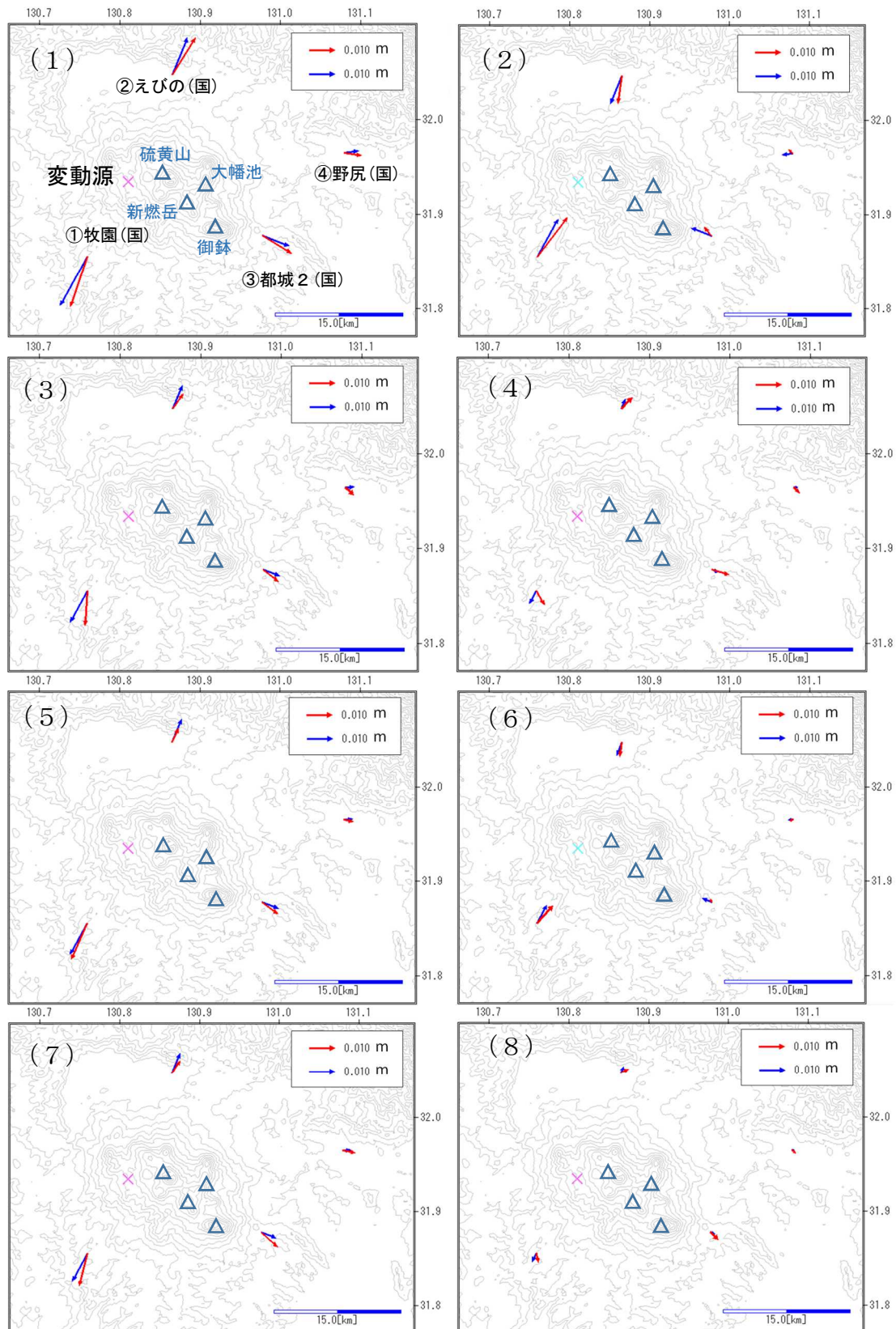


図 4-2 霧島山（新燃岳） 霧島山周辺の GNSS 変動源推定

図 4-1 で示した変動源位置を固定し、GNSS の水平変位量から球状モデルの膨張量を図 4-1 中の期間(1)～(8)で推定した。

使用観測点は、①牧園(国)、②えびの(国)、③都城2(国)、④野尻(国)、綾(国)の5点である。基準点は、綾(国)である。(国)：国土地理院 国土地理院の解析結果 (F3 解及び R3 解) を使用した。この地図の作成には、国土地理院発行の『数値地図 50m メッシュ (標高)』を使用した。図中では、各観測点での GNSS 変動の観測結果を→、求めた球状モデルでの GNSS 変動の理論値を→で示している。また、推定された膨張源を×、収縮源を×で示している。

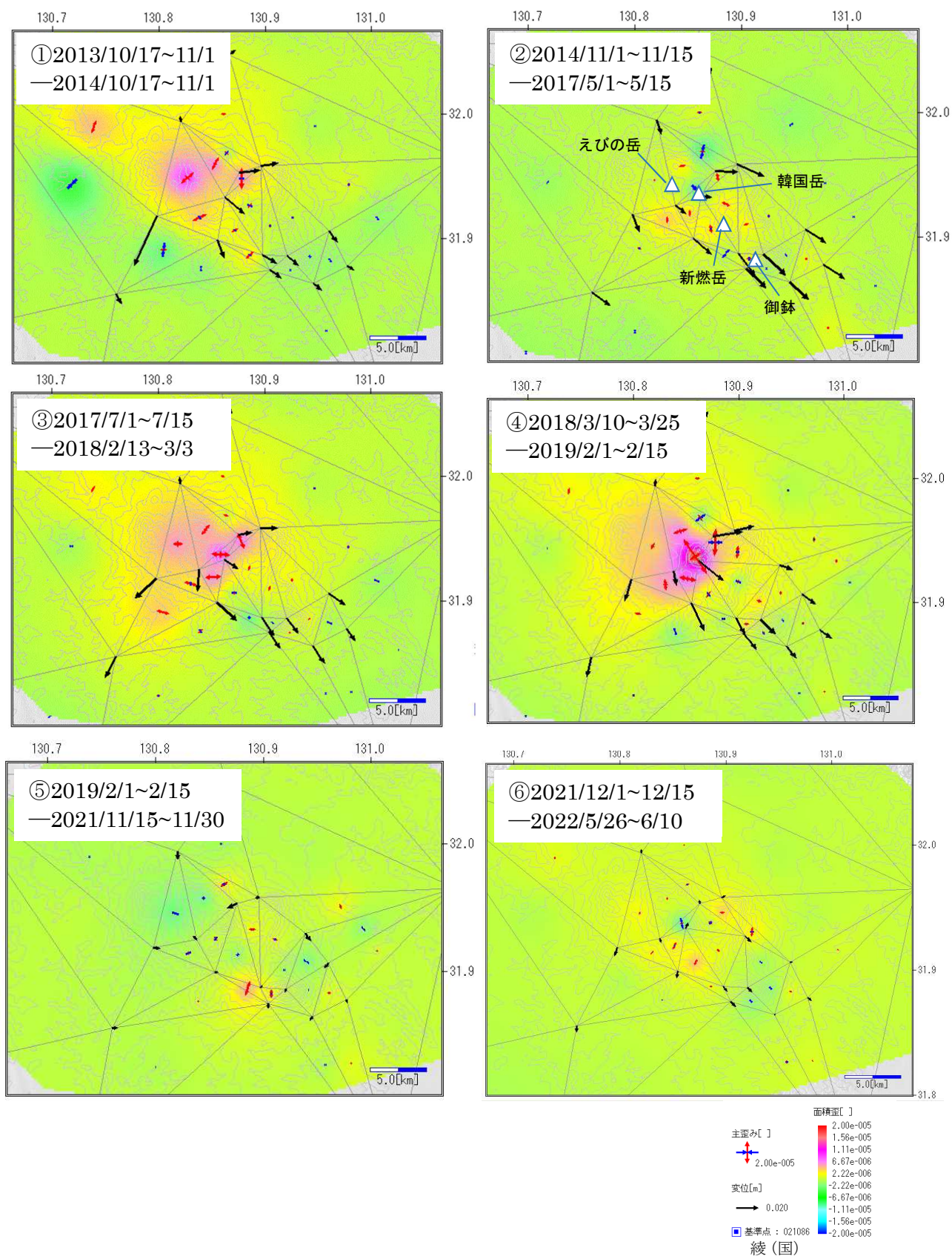


図5 霧島山 霧島山周辺のGNSSの期間毎の水平変位・主ひずみ・面積ひずみ
(2013年10月17日~2022年6月10日)

⑥では、えびの岳を囲む広い範囲で、面積ひずみのわずかな増加を反映して平均的に暖色化がみられる。

※この地図の作成には、国土地理院発行の『数値地図50mメッシュ(標高)』を使用した。

新燃岳

新燃岳では、火口直下を震源とする火山性地震の回数が 2022 年 1 月頃からわずかに増加し、2022 年 3 月 27 日にさらに増加し多い状態となった。また、3 月 28 日には新燃岳周辺の傾斜計において新燃岳方向が隆起する傾斜変動を伴う火山性微動を観測した。その後、火山性地震はやや多い状態で経過していたが、5 月中旬以降は多少の増減はあるものの減少傾向がみられている。

新燃岳の西側斜面の割れ目では、2021 年 6 月以降認められなくなった噴気が 2022 年 1 月末から再び観測されており、2022 年 2 月には、割れ目付近において地熱域のわずかな拡大が認められた。その後の観測では噴気及び地熱域の状況に特段の変化は認められていない。

火山ガス（二酸化硫黄）の放出量は、検出限界未満で経過している。

GNSS 連続観測では、2021 年 12 月頃から霧島山の深い場所でのマグマの蓄積を示すと考えられる基線の伸びが認められている。また、2022 年 4 月頃から新燃岳を挟む基線においてわずかな伸びが認められている。

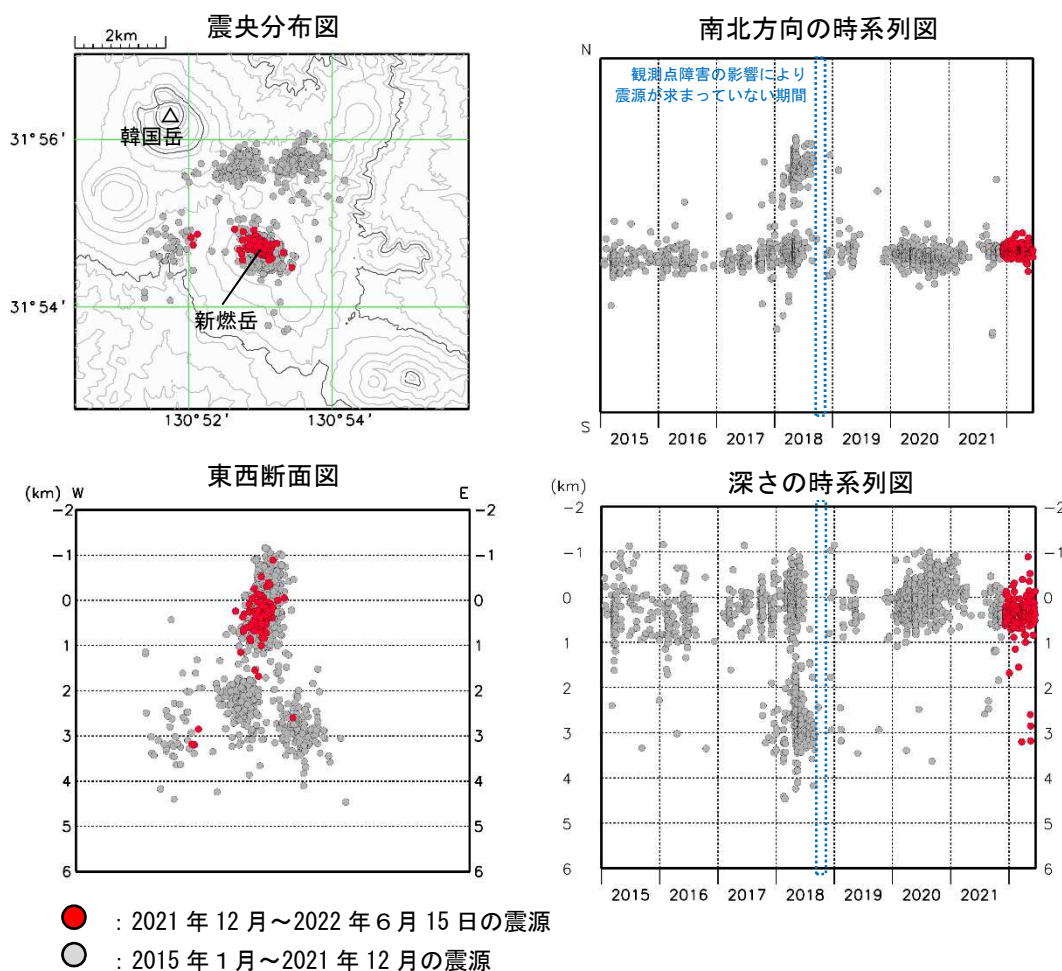


図 1 霧島山（新燃岳） 震源分布図（2015 年 1 月～2022 年 6 月 15 日）

＜2021 年 12 月～2022 年 6 月 15 日の状況＞

震源は、大部分が新燃岳火口直下のごく浅いところから深さ 1 km 付近に分布した。

※新燃岳周辺の震源のみ図示している。

※この地図の作成には、国土地理院発行の『数値地図 50mメッシュ（標高）』を使用した。



図2-1 霧島山（新燃岳） 図2-2、2-3の観測位置及び撮影方向



図 2-2 霧島山（新燃岳） 新燃岳火口内及び西側斜面の状況

- ・火口内を覆う溶岩の中心部及び縁辺部の一部で白色の噴煙が上がっているのを確認した。
- ・火口西側斜面の割れ目付近（黄破線内）では、2022年2月24日以降の調査で白色の噴煙が上がっているのを確認した。

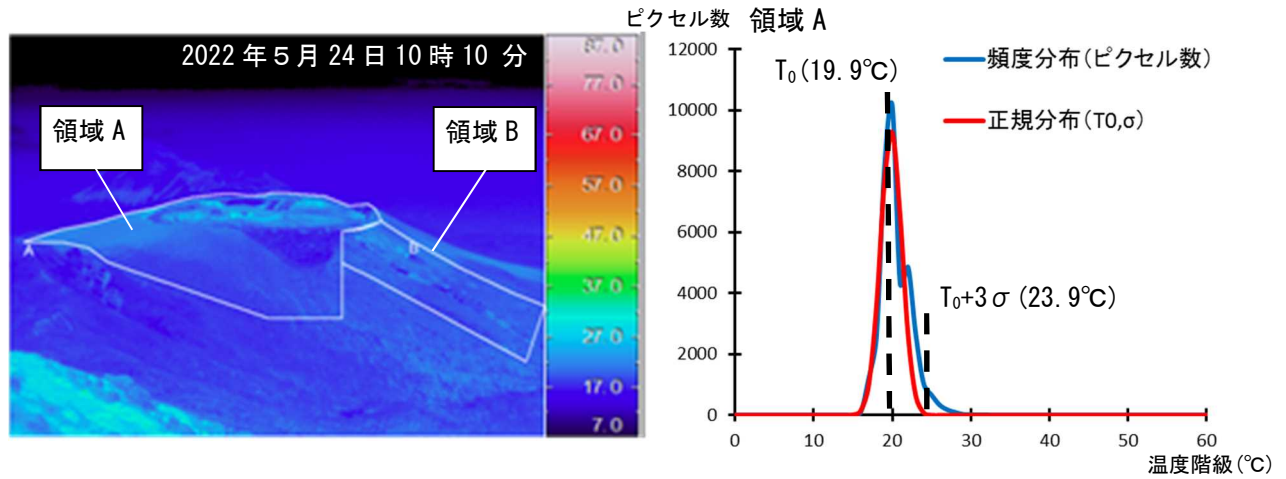


図 2-3 霧島山（新燃岳） 図 2-4 に示した新燃岳の放熱率算出の解析領域と温度分布の例（2022 年 5 月 24 日 10 時 10 分）

- ・ 左図の領域 A 及び B 内を解析領域とした。
- ・ 右図は領域内の温度ピクセルの頻度分布、それを正規分布に当てはめた結果との比較であり、概ね正規分布の平均値 T_0 と頻度のモードが一致しているため非地熱域を正規分布で近似した。
- ・ $T_0+3\sigma$ 以上を明らかな地熱域とみなし、地熱域の面積及び放熱率を算出した。

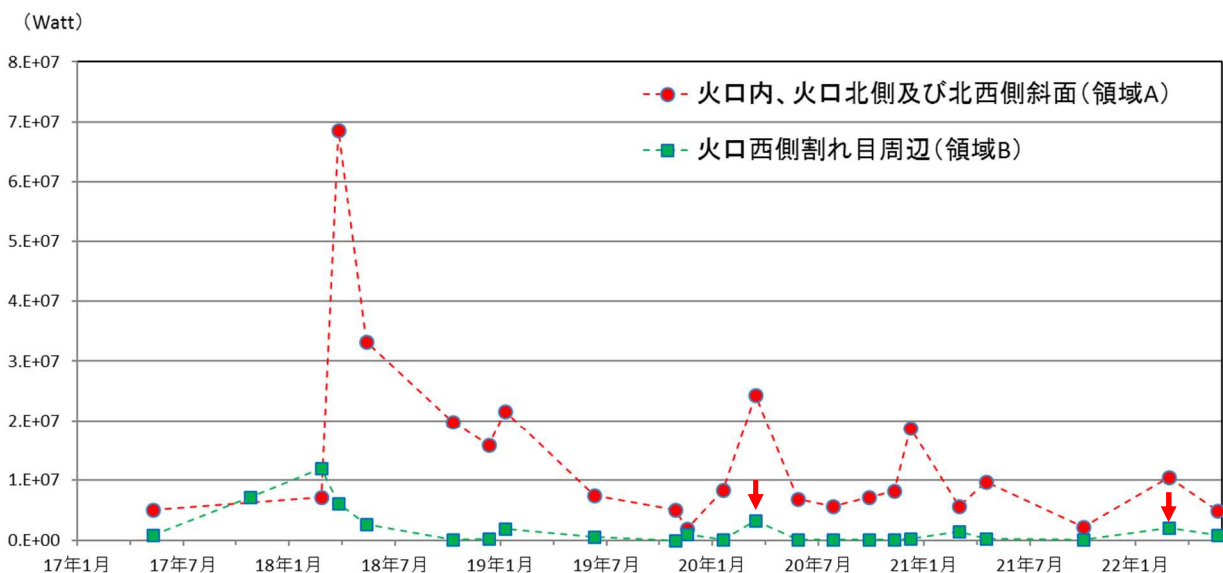


図 2-4 霧島山（新燃岳） 地表面温度分布より算出した新燃岳の放熱率の推移（値を観測日ごとに平均）（2017 年 5 月 11 日～2022 年 5 月 24 日）

<2021 年 12 月～2022 年 5 月の状況>

- ・ 領域 A（主に新燃岳火口内）では、放熱率に特段の変化は認められない。
- ・ 領域 B（火口西側割れ目付近）では、2020 年 4 月と同様に、2022 年 2 月に地熱域の拡大に伴うと考えられる放熱率のわずかな増加（赤矢印）が認められた。

※韓国岳山頂からの赤外熱映像装置による観測データを用い、Sekioka(1983)の手法により放熱率を算出し、値を観測日ごとに平均した。図 2-3 に示した領域 A、B を解析範囲とし、領域内の温度頻度分布を正規分布に当てはめた時の平均値 T_0 と偏差 σ から、 $T_0+3\sigma$ 以上を明らかな地熱域とみなした。

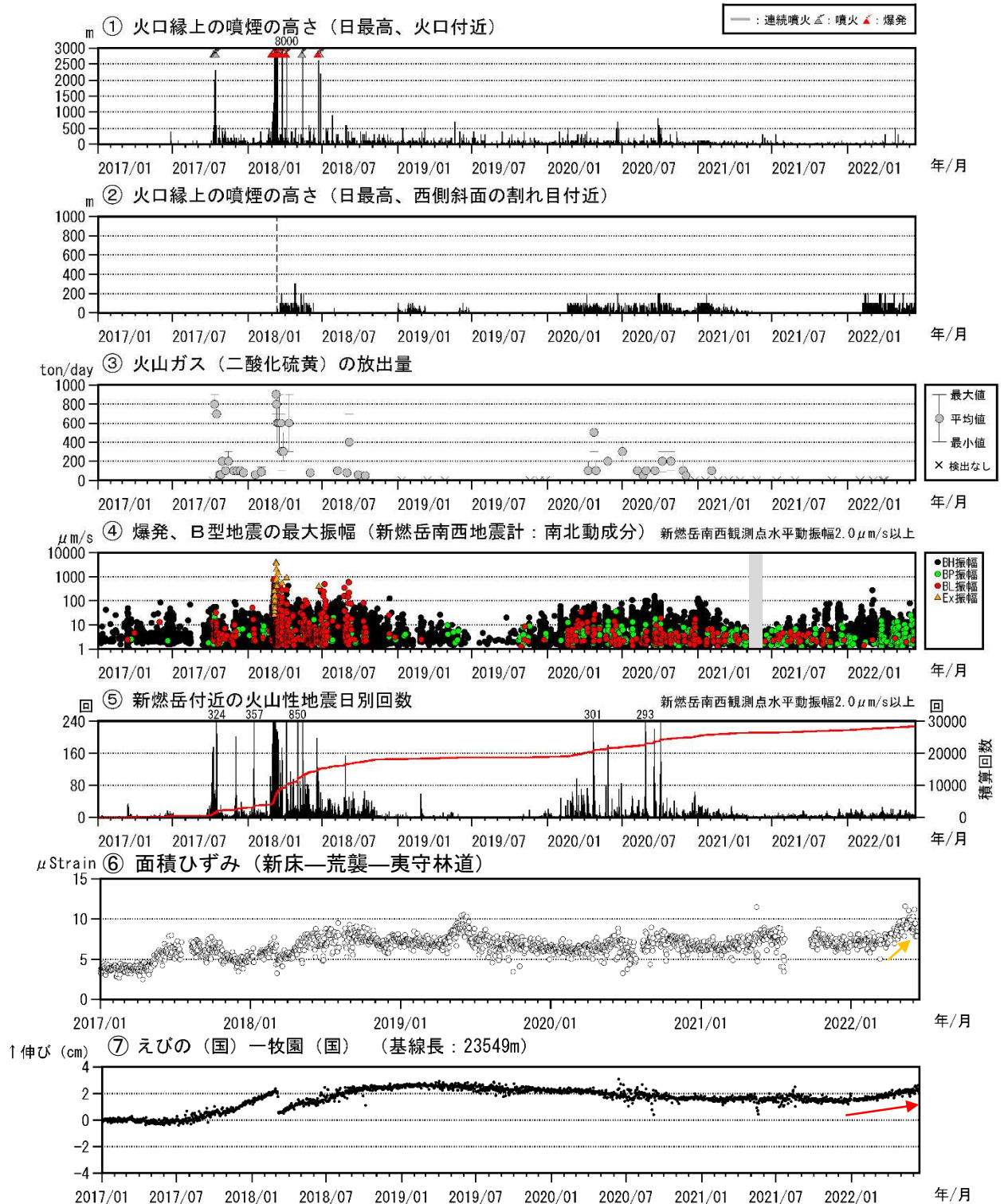


図 3-1 霧島山（新燃岳） 火山活動経過図（2018 年 1 月～2022 年 6 月 15 日）

<2021年12月～2022年6月15日の状況>

- ・新燃岳火口では、白色の噴煙の高さは概ね火口縁上80m以下で経過した。西側斜面の割れ目では、2021年6月以降認められなくなった噴気が2022年1月末から再び観測されている。
- ・火山ガス（二酸化硫黄）の放出量は、2021年2月下旬以降は検出限界未満で経過している。
- ・新燃岳の火口直下を震源とする火山性地震は、2022年1月頃からわずかに増加し、2022年3月27日にさらに増加し多い状態となった。その後、火山性地震はやや多い状態で経過していたが、5月中旬以降は多少の増減はあるものの減少傾向がみられている。
- ・GNSS連続観測では、2021年12月頃から、霧島山を挟む基線において、霧島山の深い場所でのマグマの蓄積を示すと考えられる伸びが認められている（赤矢印）。また、2022年4月頃から新燃岳付近の基線においてわずかな伸びが認められている（橙矢印）。

④の灰色の枠内は、新燃岳南西観測点の障害のためデータが抜けている期間を示す。

⑤の赤線は、地震の回数の積算を示す。

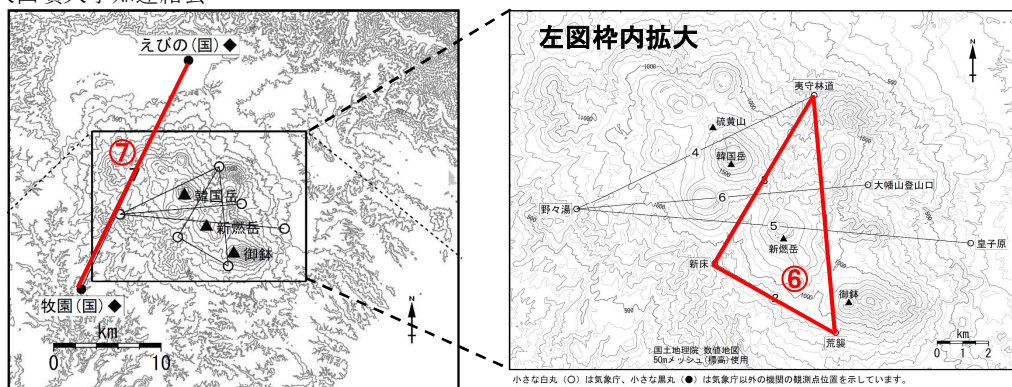


図 3-2 霧島山（新燃岳） 図 3-1 に使用した GNSS 基線図（赤線）

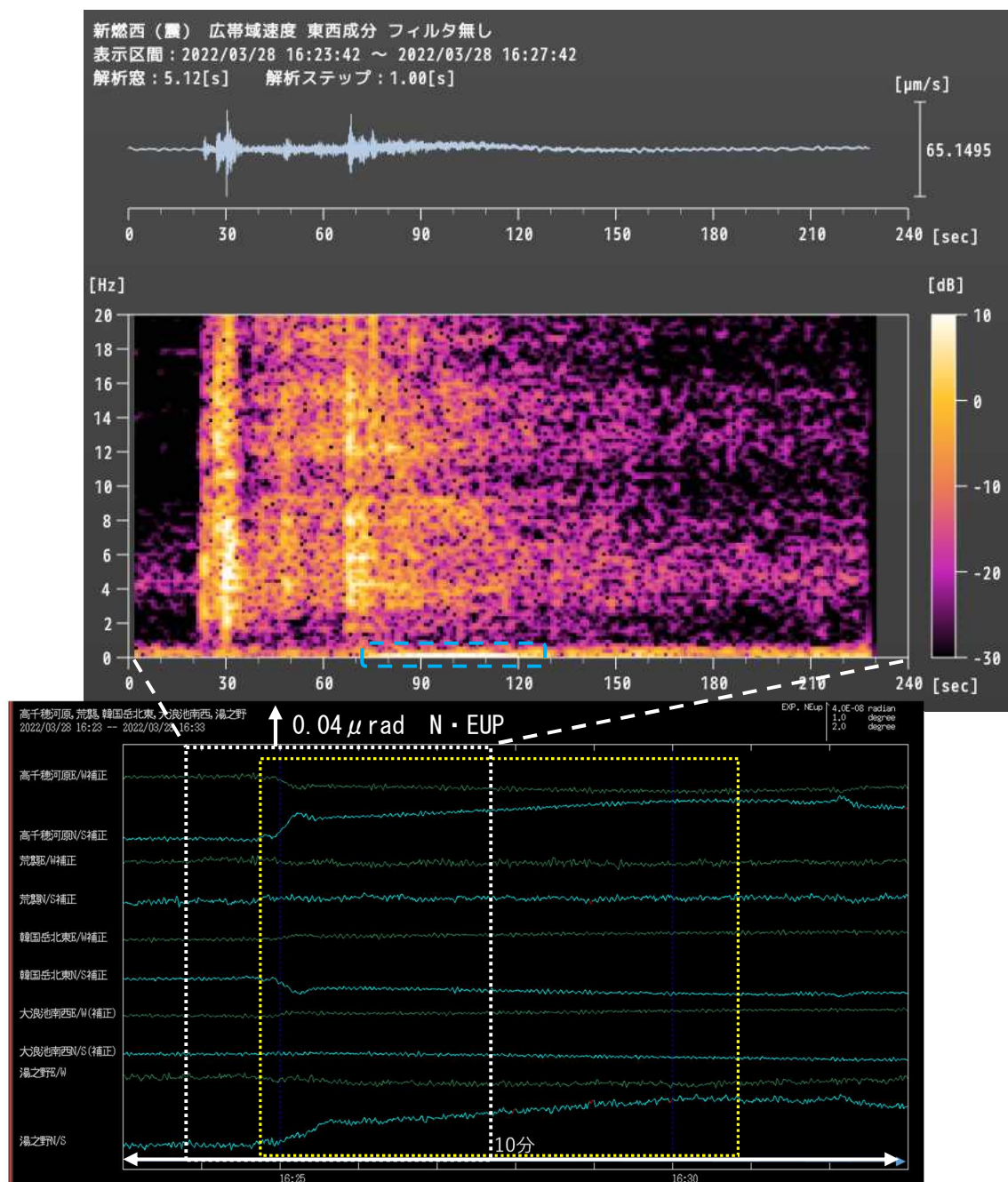


図 4 霧島山（新燃岳） 3月28日16時24分に発生した火山性微動のランニングスペクトル及び微動に伴う傾斜変動
（上段：新燃北広帯域地震計（東京大学地震研究所）：速度波形東西成分、
下段：傾斜計（潮汐補正済み秒値））

観測された火山性微動は主に 2～3 Hz 以上のやや高周波～高周波成分が卓越しているが、16 時 24 分の終わり頃から非常に周期の長い震動が重畳した（水色破線内）。また、火山性微動に伴い、新燃岳周辺の傾斜計で新燃岳方向がわずかに上がる傾斜変動を観測した（下段黄破線内）。

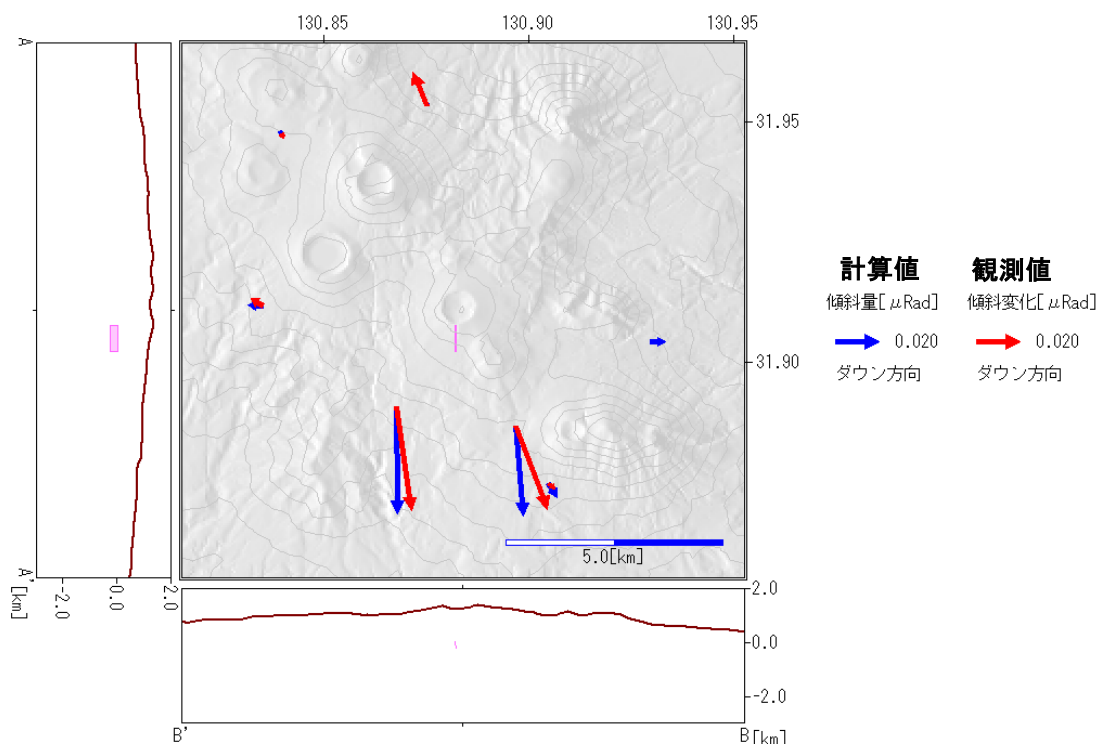


図 5-1 霧島山（新燃岳） 火山性微動に伴い観測された傾斜変動ベクトル
 (2022 年 3 月 28 日 16 時 24～30 分)

新燃岳方向がわずかに上がる傾斜変動を観測した。開口圧力源モデルを仮定した際、南北方向に走行を持つ開口量約 $5 \times 10^3 \text{m}^3$ の圧力源と推定され、2017 年 10 月 9 日の開口量（図 5-2）に比べ 1 桁程度小さい。

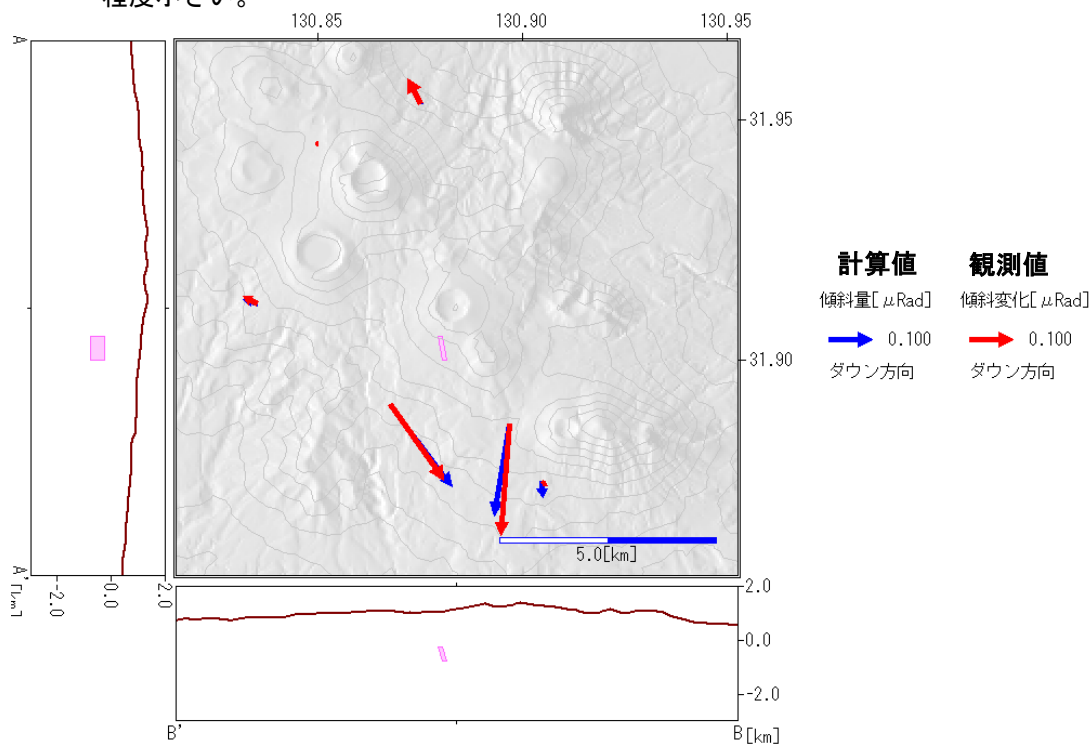


図 5-2 霧島山（新燃岳） 2017 年 10 月 9 日の火山性微動に伴い観測された
 傾斜変動ベクトル (2017 年 10 月 9 日 15 時 11～26 分)

2017 年 10 月 9 日にも傾斜変動を伴う火山性微動を観測している。開口圧力源モデルを仮定した際、南北方向に走向を持つ開口量約 $2 \times 10^4 \text{m}^3$ の圧力源と推定される。

えびの高原（硫黄山）周辺

硫黄山では、硫黄山南側において活発な噴気活動が続いているが、噴気域及び地熱域の顕著な拡大は認められていない。なお、硫黄山の西側 500m 付近の噴気は 2021 年 8 月以降認められなかったが、12 月頃から再び観測されるようになった。

硫黄山付近では火山性地震は概ね少ない状態で経過しているが、2022 年 4 月中旬から 5 月上旬にかけてやや増加した。

一方、GNSS 連続観測では、硫黄山近傍の基線長の変化は 2021 年 2 月以降停滞していることから、現在のところ噴火の兆候は認められない。

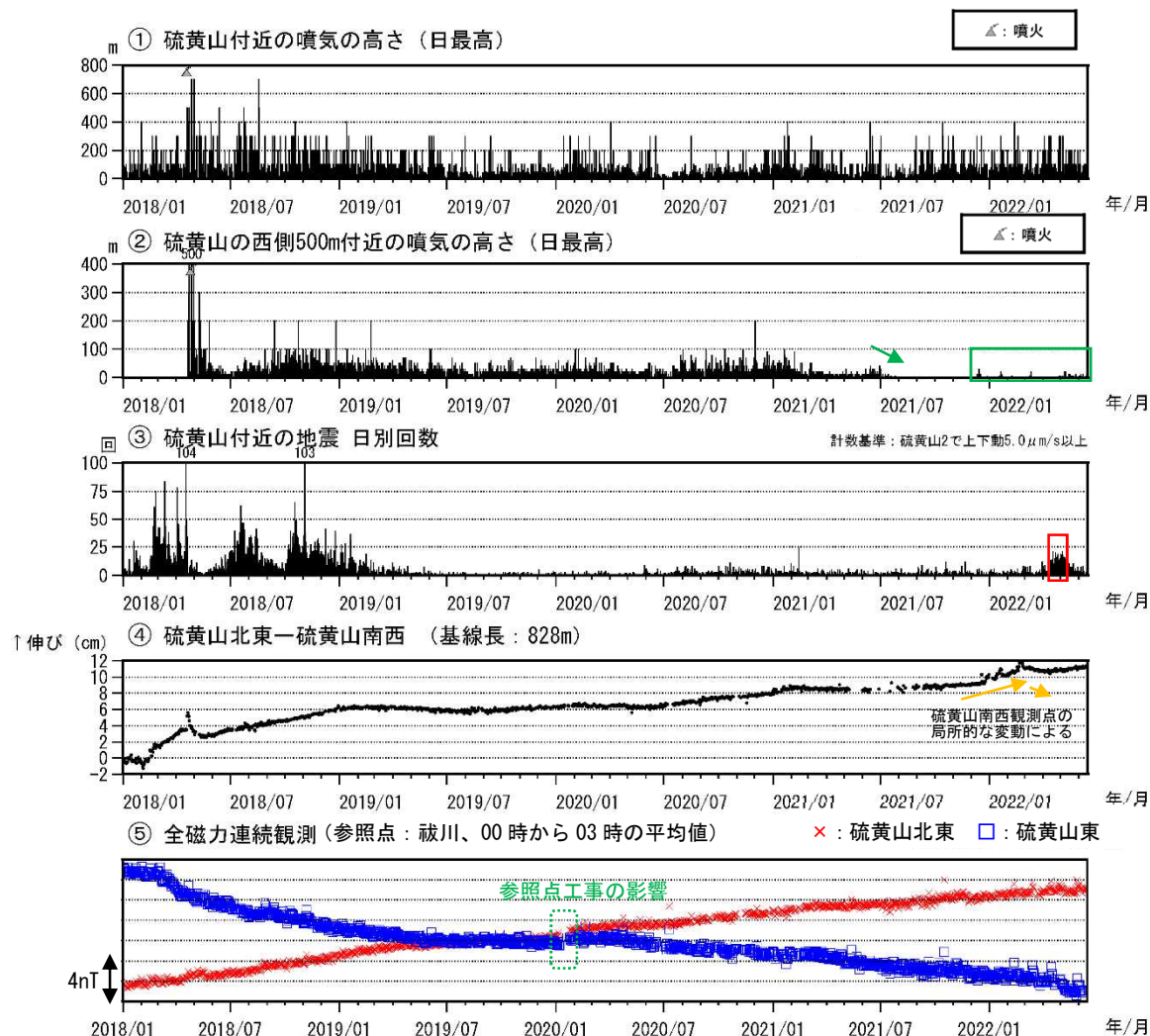


図 1 霧島山（えびの高原（硫黄山）周辺） 火山活動経過図

（2018 年 1 月～2022 年 6 月 15 日）

<2021 年 12 月～2022 年 6 月 15 日の状況>

- ・硫黄山の南側の噴気地帯では、活発な噴気活動が続いている。硫黄山の西側 500m 付近の噴気は、2021 年 7 月に低下し（緑矢印）8 月以降認められなかったが、12 月頃から再び観測されるようになった（緑四角内）。
- ・火山性地震は概ね少ない状態で経過したが、2022 年 4 月中旬から 5 月上旬にかけてやや増加した（赤四角内）。
- ・GNSS 連続観測では、硫黄山近傍の基線長の変化は 2021 年 2 月以降停滞している。
- ・全磁力観測では、硫黄山周辺の地下における消磁の進行を示す変動が継続している。

※④の基線は図 5 の③に対応している。

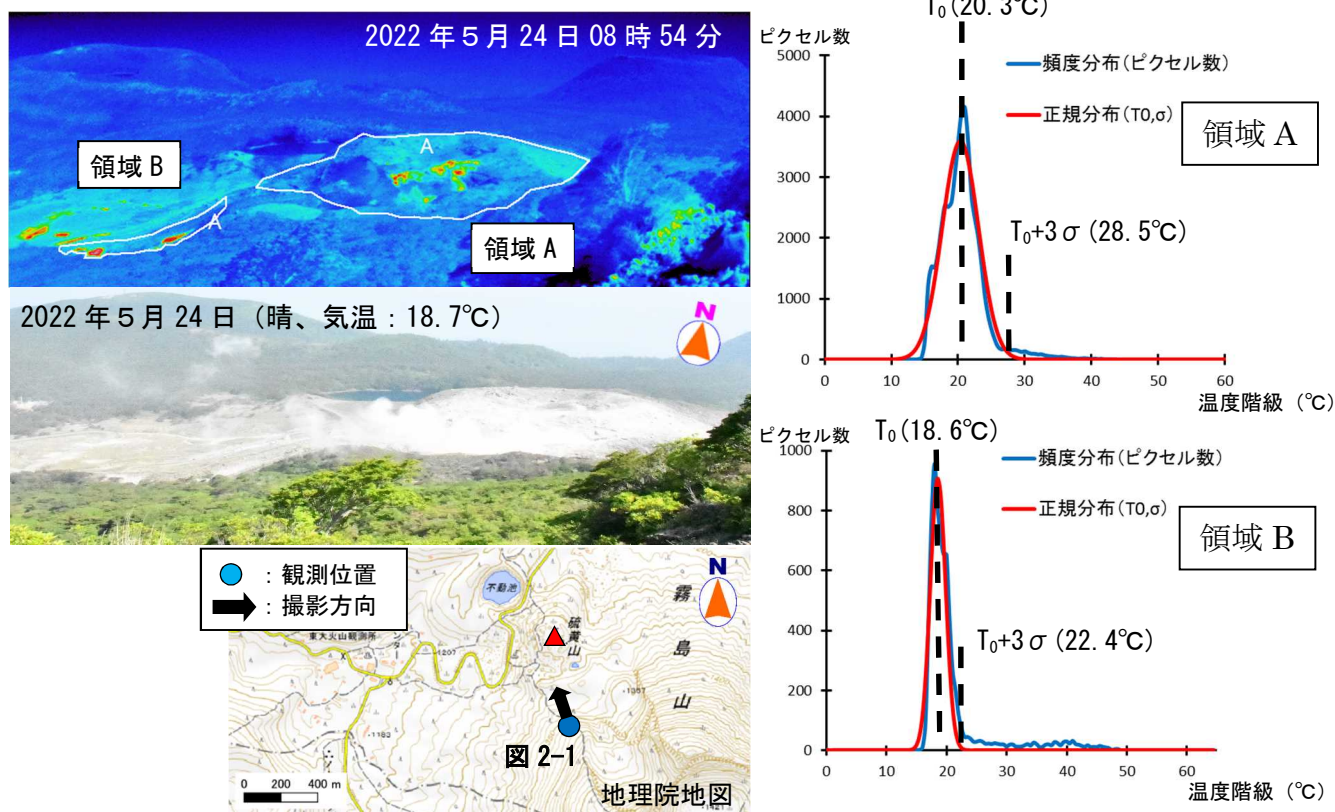


図 2-1 霧島山（えびの高原（硫黄山）周辺） 図 2-2 に示した硫黄山の放熱率算出の解析領域と温度分布の例（2022 年 5 月 24 日 08 時 54 分）

- ・韓国岳 4 合目において撮影した赤外熱映像装置による観測データを使用した。
- ・右図は領域 A 及び B 内の温度ピクセルの頻度分布と、それを正規分布に当てはめた結果との比較であり、概ね正規分布の平均値 T_0 と頻度のモードが一致しているため非地熱域を正規分布で近似した。 T_0 と σ については、まず全温度範囲の頻度分布について最小二乗法で近似した正規分布から T_0 と σ を得る。その後、鍵山 et al. (1979) と同様に $T_0 - 3\sigma \leq T \leq T_0 + \sigma$ の温度範囲の頻度分布について最小二乗法で近似した正規分布から再び T_0 と σ を得て採用した。
- ・ $T_0 + 3\sigma$ 以上を明らかな地熱域とみなし、地熱域の面積及び放熱率を算出した（図 2-2）。

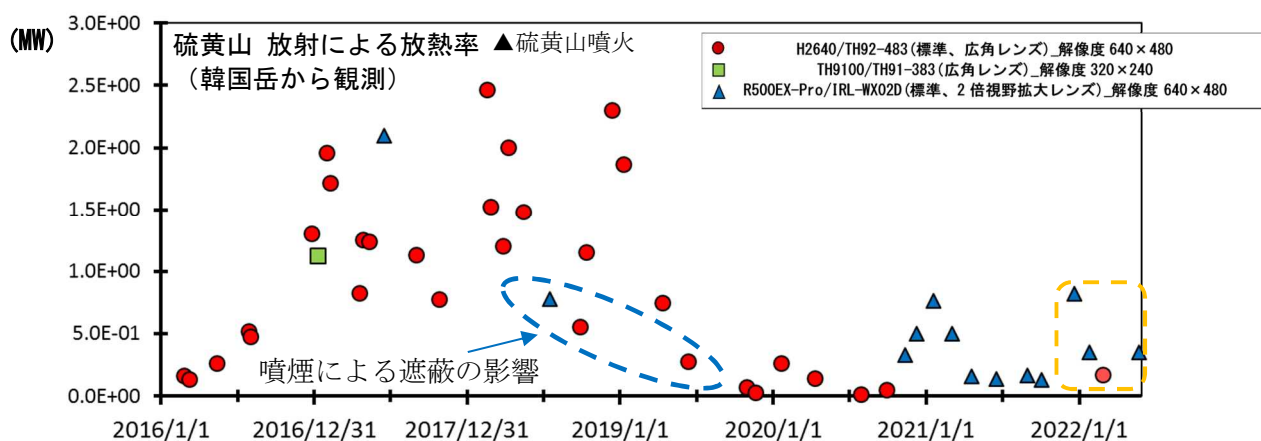


図 2-2 霧島山（えびの高原（硫黄山）周辺） 地表面温度分布より算出した硫黄山の放熱率の推移（値を観測日ごとに平均）（2016 年 1 月～2022 年 5 月）

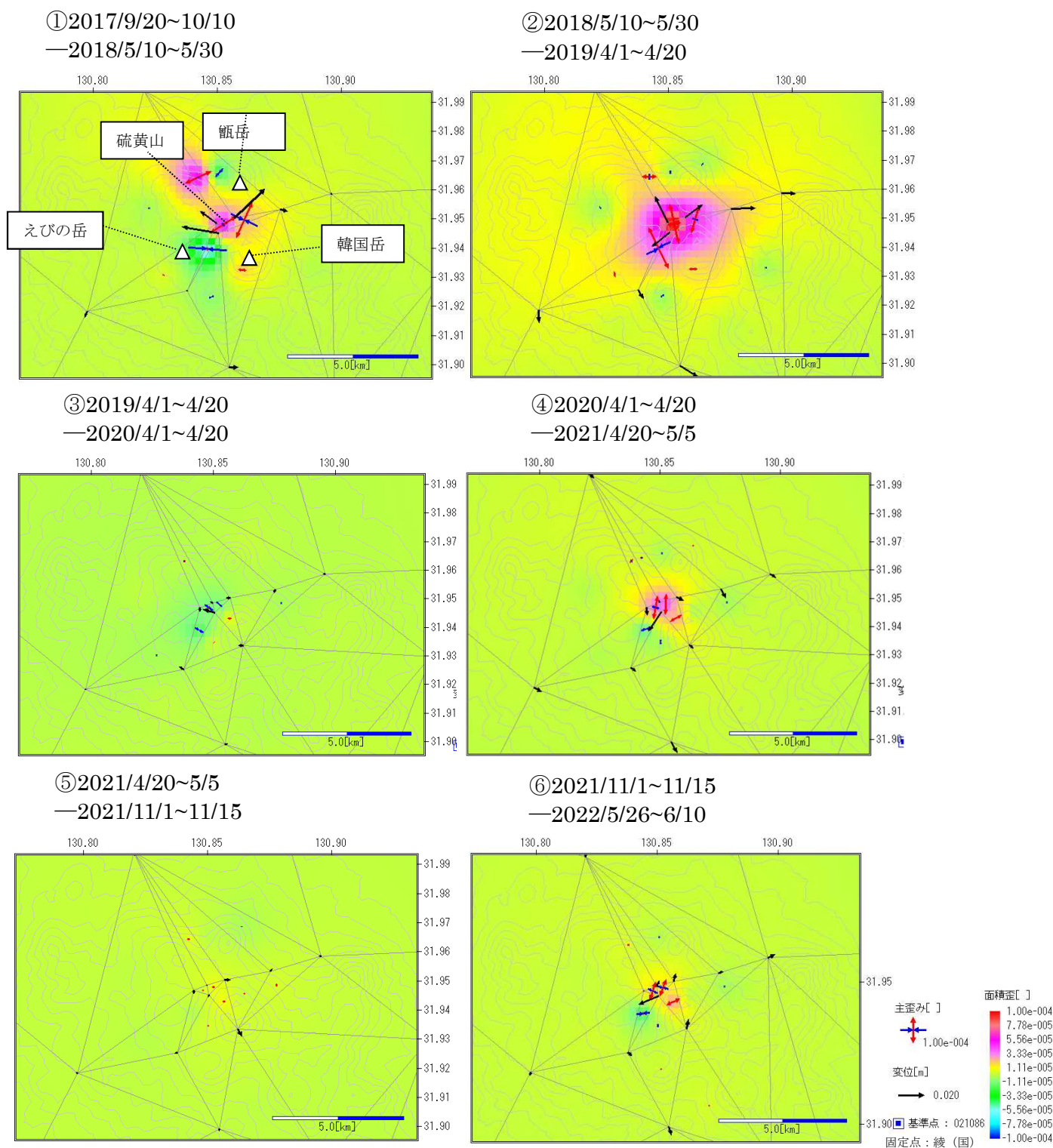
＜2021 年 12 月～2022 年 5 月の状況＞

2021 年 12 月頃から放熱率の増加が認められる（橙破線内）。

※Sekioka(1983)の手法により放熱率を算出し、値を観測日毎に平均した。

※噴気活動による放熱は考慮されていない。

※2018 年 2 月 26 日以降は規制区域の変更に伴い、観測位置を変更した。



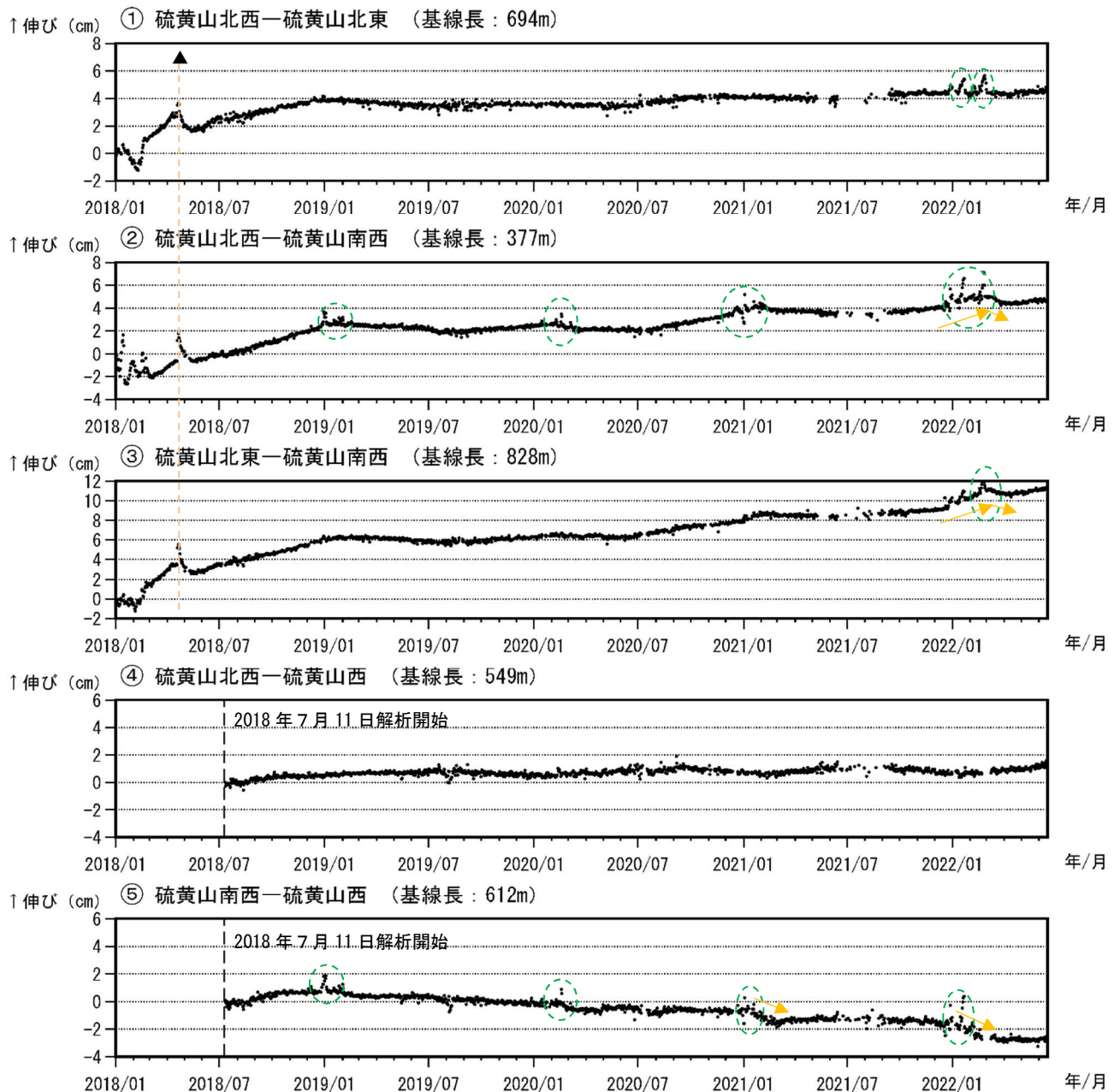


図 4 霧島山（えびの高原（硫黄山）周辺） GNSS 連続観測による基線長変化
(2018 年 1 月～2022 年 6 月 15 日)

GNSS 連続観測では、硫黄山近傍の基線において特段の変化はみられない。

これらの基線は図 5 の①～⑤に対応している。

基線の空白部分は欠測を示している。

緑色の破線内の変化は、地面の凍上の影響と考えられる。

②③⑤の基線において 2021 年 1 月及び 12 月頃から認められる変化（橙矢印）は、硫黄山南西観測点の局所的な変動によるものと考えられる。

※図上部の黒三角及び橙破線は、2018 年 4 月 19 日および 4 月 26 日の噴火の発生を示している。

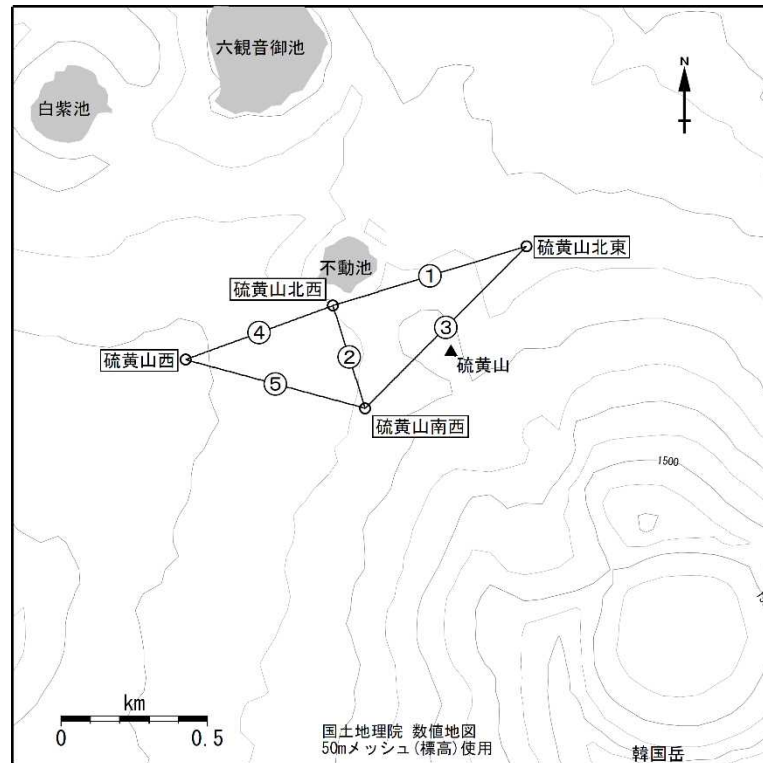


図 5 霧島山（えびの高原（硫黄山）周辺） 図 1 及び図 4 の GNSS 連続観測点と基線番号
小さな白丸（○）は気象庁の観測点位置を示している。

大幡池

噴気は認められず、火山性地震は少ない状態で経過した。火山性微動は観測されなかった。

地殻変動観測では、火山活動によると考えられる特段の変化は認められなかった。大幡池では、火山活動の活発化を示す兆候は認められない。

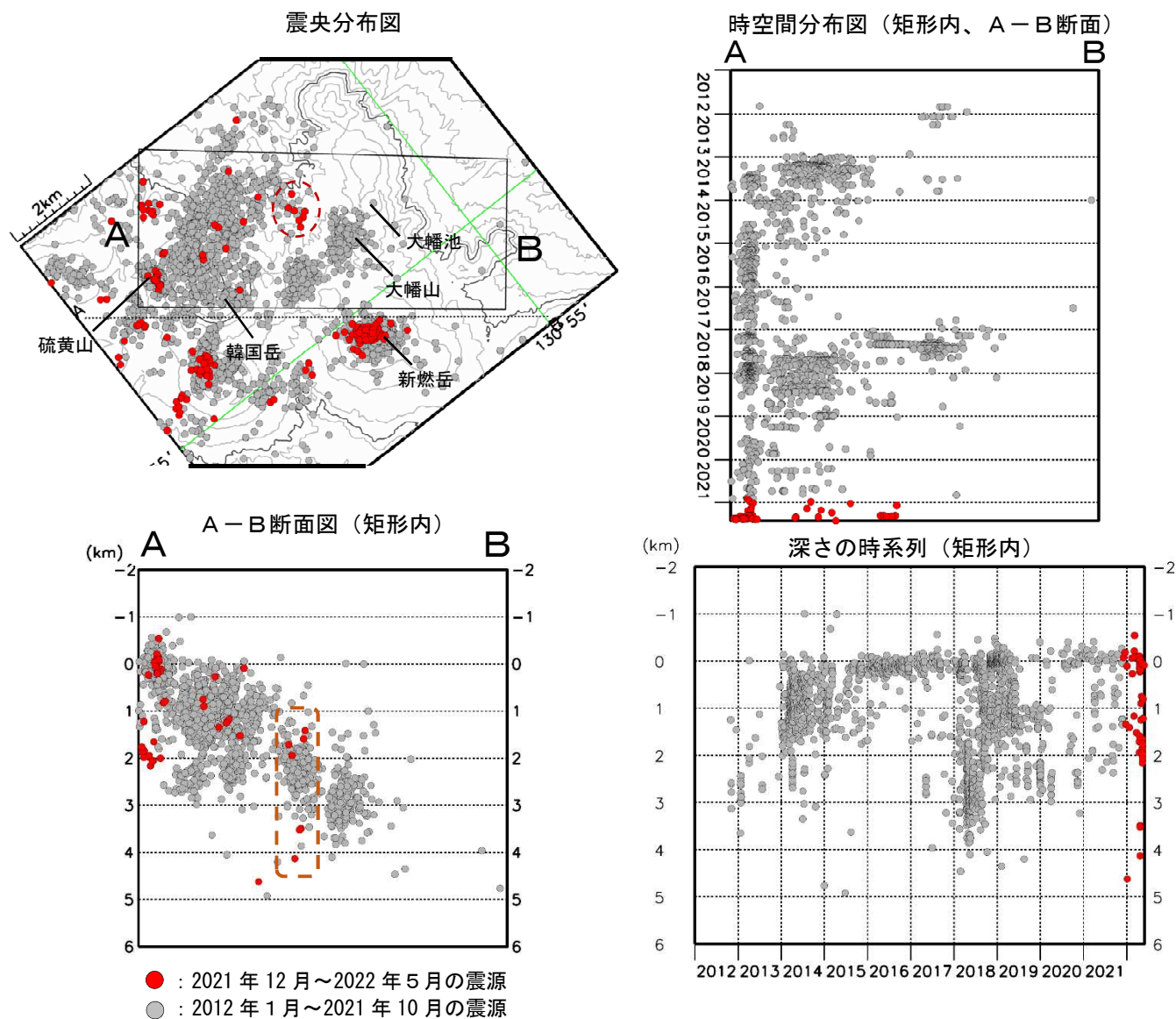


図 1 霧島山（大幡池） 震源分布図（2012 年 1 月～2022 年 5 月）

<2021 年 12 月～2022 年 5 月の状況>

大幡池及び大幡山付近に震源の求まった火山性地震はなかった。なお、韓国岳周辺（韓国岳の東側約 2 km）の深さ 2 ～ 4 km 付近に震源が求まる地震を観測した（茶色破線内）。

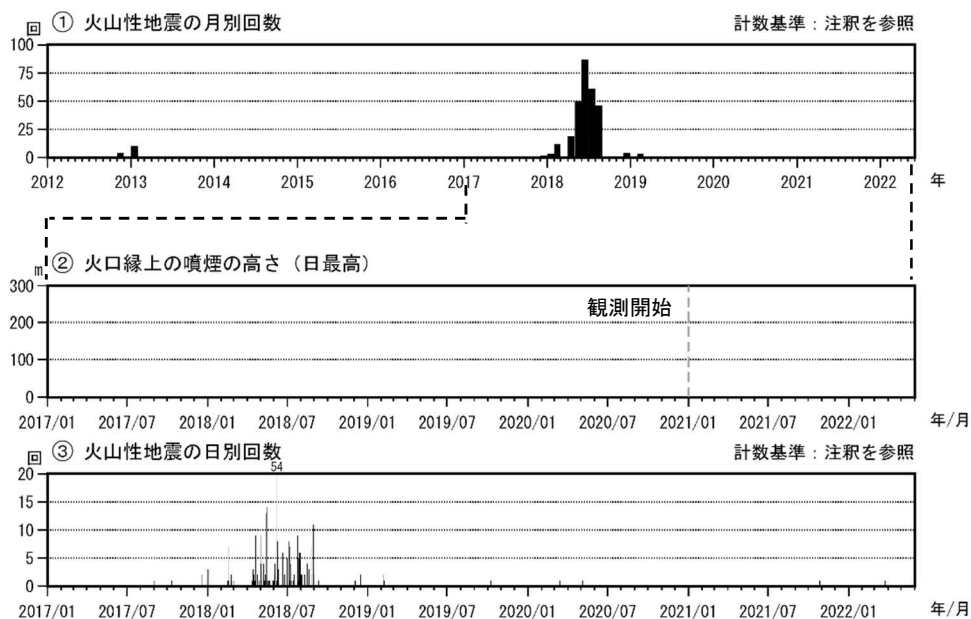


図 2 霧島山（大幡池） 火山性地震の発生状況（2012 年 1 月～2022 年 5 月）

＜2021 年 12 月～2022 年 5 月の状況＞

- ・ 噴気は観測されなかった。
- ・ 火山性地震は少ない状態で経過した。

※大幡池付近の火山性地震の回数について、2020 年 12 月 31 日までは「新燃岳南西観測点（計数基準水平動：2.0 $\mu\text{m/s}$ ）」で計数していたが、大幡池付近の地震活動をより正確に捉えるため、2021 年 1 月から「大幡山登山口観測点（計数基準：南北成分：6.0 $\mu\text{m/s}$ ）」で計数している。

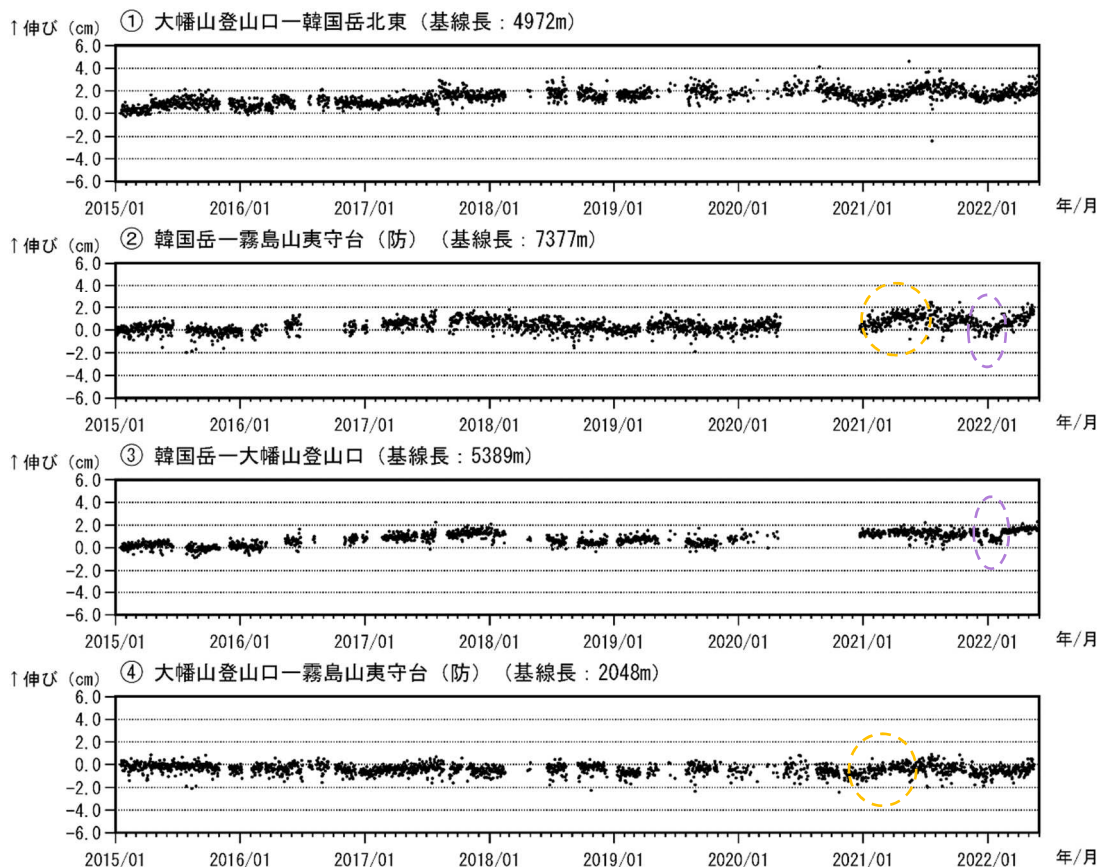


図 3 霧島山（大幡池） GNSS 連続観測による基線長変化（2015 年 1 月～2022 年 5 月）

火山活動によると考えられる変化は認められなかった。

基線の空白部分は欠測を示している。

橙色の破線内の変化は、霧島山夷守台(防)観測点の局所的な変化に伴うものと考えられる。

紫色の破線内の変化は、韓国岳観測点の局所的な変化に伴うものと考えられる。

御鉢

火山性地震は少ない状態で経過した。火山性微動は観測されなかった。
地殻変動観測では、火山活動によると考えられる特段の変化は認められなかった。
御鉢では、火山活動の活発化を示す兆候は認められない。

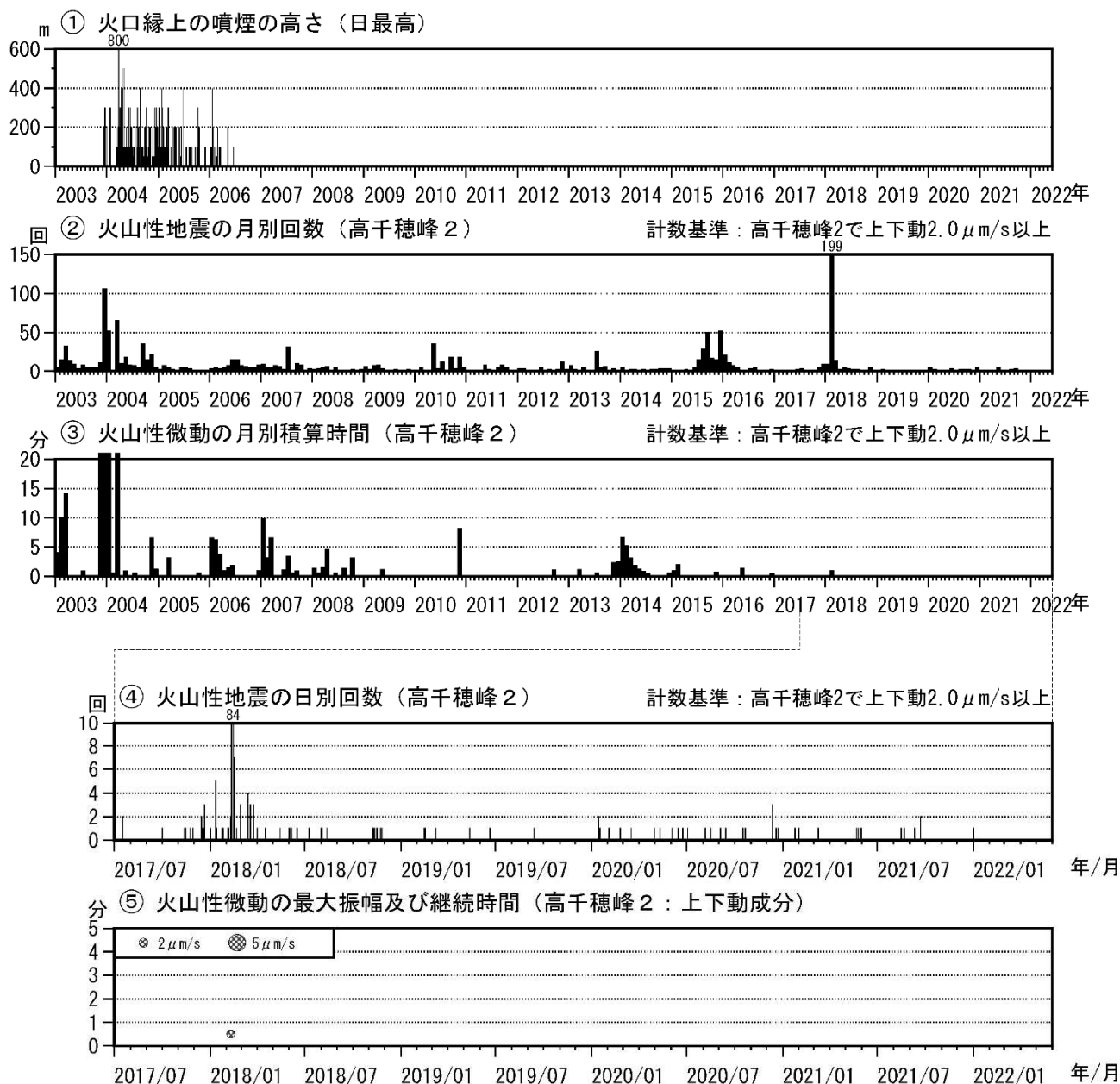


図1 霧島山（御鉢） 火山活動経過図（2003年1月～2022年5月）

<2021年12月～2022年5月の状況>

- ・火口縁を越える噴煙は観測されなかった。
- ・火山性地震は少ない状態で経過した。
- ・火山性微動は観測されていない。

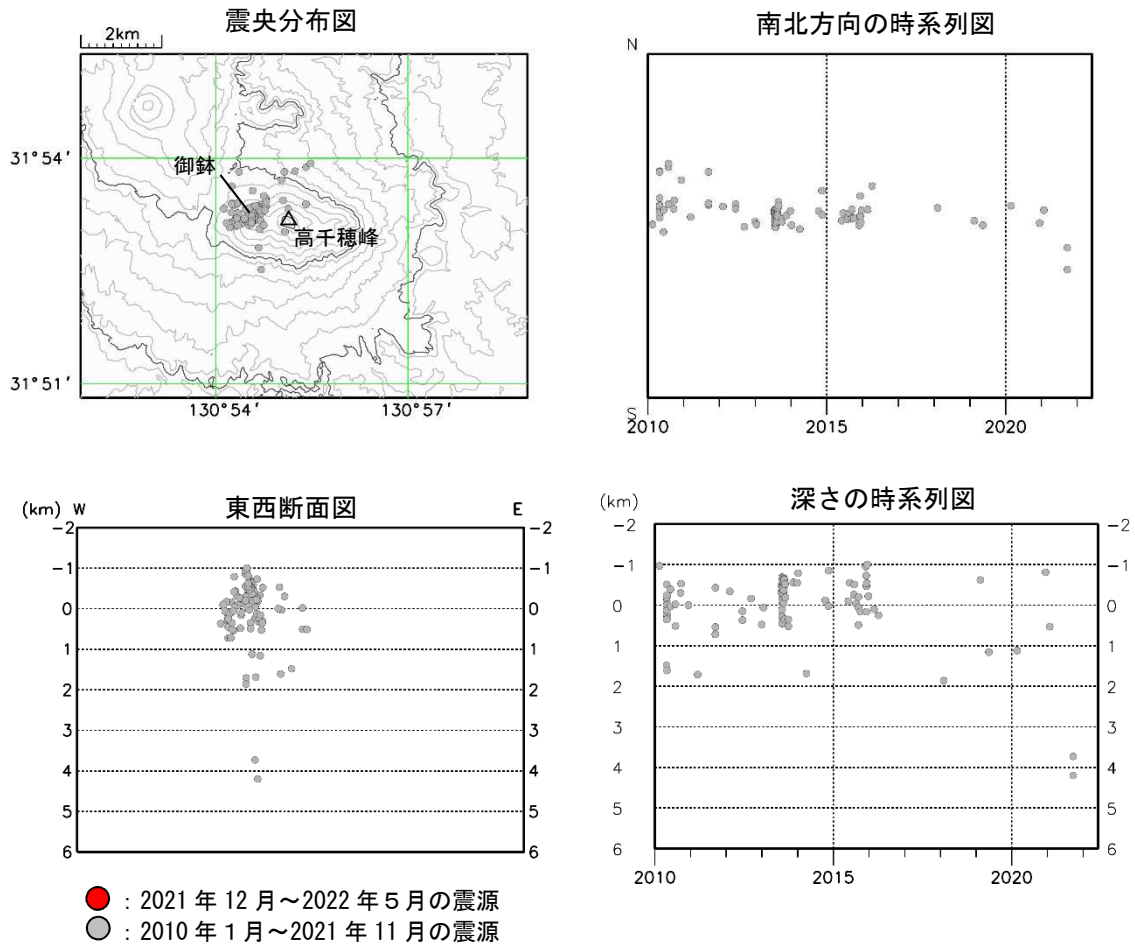


図 2 霧島山（御鉢） 震源分布図（2010 年 1 月～2022 年 5 月）

<2021 年 12 月～2022 年 5 月の活動状況>

震源が求まった火山性地震はなかった。

※御鉢周辺の震源のみ図示している。

この地図の作成には、国土地理院発行の『数値地図 50mメッシュ（標高）』を使用した。

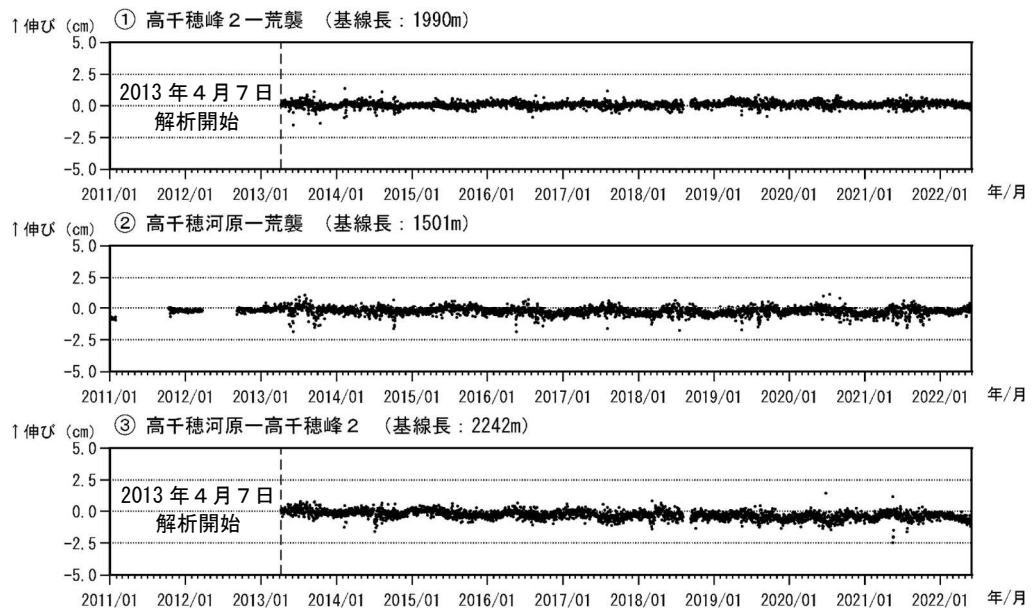


図 3 霧島山（御鉢） GNSS 連続観測による基線長変化（2010 年 1 月～2022 年 5 月）

火山活動によると考えられる変化は認められなかった。

※基線の空白部分は欠測を示している。

※2013 年 1 月に、解析方法を変更している。

ALOS-2/PALSAR-2 データを用いた 霧島山における SAR 干渉解析結果

新燃岳火口内で視線距離伸長の位相変化が認められる。その他の地域ではノイズレベルを超えるような位相変化は認められない。

1. はじめに

ALOS-2/PALSAR-2 で撮像された霧島山周辺のデータについて干渉処理を行ったので報告する。

2. 解析データ

解析に使用したデータを第 1 表に示す。

第 1 表 干渉解析に使用したデータ

Path-Frame	Orbit	Looking	Inc. angle	Earliest Scene	Latest Scene	Figure No.
131_620 (SM1_U2-9)	北行	右	42.9°	2021. 03. 09	2022. 04. 05	第 1 図- A, B, C

3. 解析結果

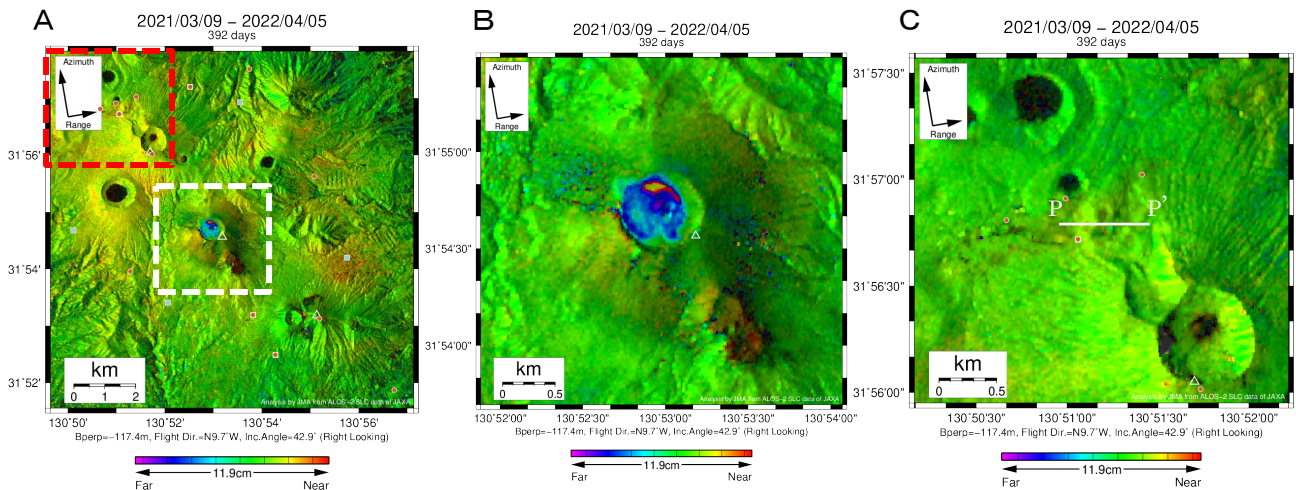
第 1 図に霧島山周辺の北行軌道の長期ペアによる干渉解析結果画像を示す。新燃岳付近では、火口内で視線距離伸長の位相変化が認められる。えびの高原（硫黄山）付近及びその他の地域ではノイズレベルを超えるような位相変化は認められない。

第 2 図にはえびの高原（硫黄山）周辺の地表変位の時間変化を示す。直近では A、B ともに視線距離の変化は停滞している。

なお、各干渉解析結果について、電離圏遅延補正を行っていないため、ノイズが重畳している可能性がある。

謝辞

本解析で用いた PALSAR-2 データは、火山噴火予知連絡会が中心となって進めている防災利用実証実験（衛星解析グループ）に基づいて、宇宙航空研究開発機構（JAXA）にて観測・提供されたものである。また、一部のデータは、PIXEL で共有しているものであり、JAXA と東京大学地震研究所の共同研究契約により JAXA から提供されたものである。PALSAR-2 に関する原初データの所有権は JAXA にある。PALSAR-2 の解析ソフトウェアは、防災科学技術研究所の小澤拓氏により開発された *RINC* を使用した。また、処理の過程や結果の描画においては、国土地理院の数値地図 10m メッシュ（標高）を元にした DEHM を、地形の描画には数値地図 25000（行政界・海岸線）のデータを使用した。ここに記して御礼申し上げます。



第 1 図 霧島山の干渉解析結果

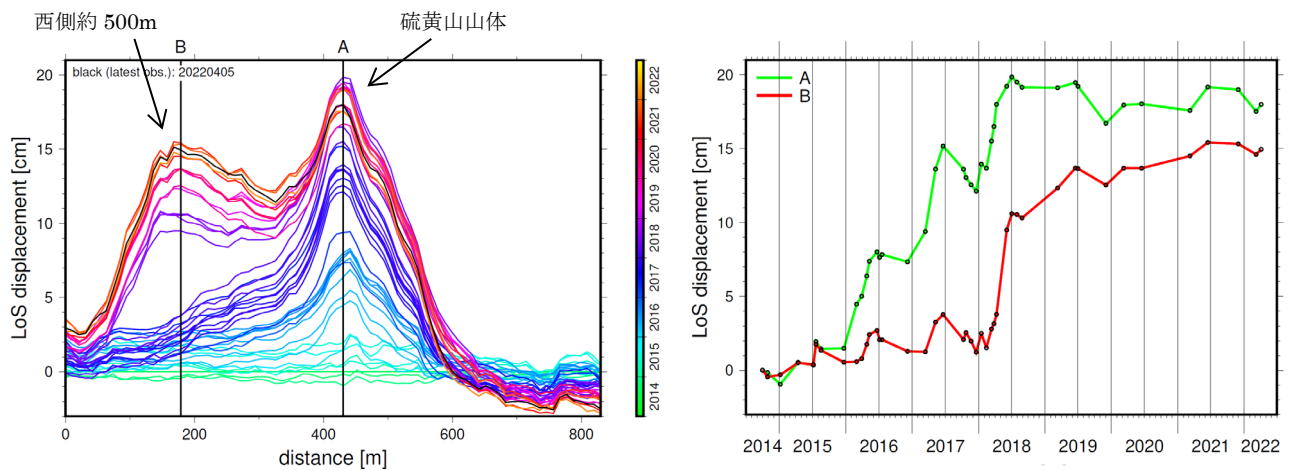
パス 131 (SM1_U2-9) (A, B, C) による干渉解析結果

霧島山及びその周辺 (A)、新燃岳付近の拡大図 (B)、えびの高原 (硫黄山) 付近の拡大図 (C)

図中の白三角印は山頂位置を示す。丸印は GNSS 観測点、四角印は傾斜観測点を示す。

A の白破線は新燃岳付近、赤破線はえびの高原付近の拡大図を示す。

新燃岳付近では、火口内で視線距離伸長の位相変化が認められる。えびの高原 (硫黄山) 付近及びその他の地域ではノイズレベルを超えるような位相変化は認められない。



第 2 図 えびの高原 (硫黄山) 付近の地表変位の時間変化 (パス 131)

左は東西断面 (第 1 図-C 中の P-P')、右は時系列を示す。視線距離短縮を正とする。

直近では A、B ともに視線距離の変化は停滞している。

気象庁資料に関する補足事項

1. データ利用について

- ・資料は気象庁のほか、以下の機関のデータも利用して作成している。

北海道地方（北方領土を含む）：国土交通省北海道開発局、国土地理院、北海道大学、国立研究開発法人防災科学技術研究所、国立研究開発法人産業技術総合研究所、北海道、地方独立行政法人北海道立総合研究機構エネルギー・環境・地質研究所及び公益財団法人地震予知総合研究振興会

東北地方：国土交通省東北地方整備局、国土地理院、東北大学、弘前大学、北海道大学、国立研究開発法人防災科学技術研究所、青森県及び公益財団法人地震予知総合研究振興会

関東・中部地方：関東地方整備局、中部地方整備局、国土地理院、東北大学、東京工業大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、国立研究開発法人防災科学技術研究所、国立研究開発法人産業技術総合研究所、長野県、新潟県、山梨県、神奈川県温泉地学研究所及び公益財団法人地震予知総合研究振興会

伊豆・小笠原地方：国土地理院、東京大学、国立研究開発法人防災科学技術研究所、国立研究開発法人産業技術総合研究所、東京都

九州地方・南西諸島：九州地方整備局大隅河川国道事務所、九州地方整備局長崎河川国道事務所（雲仙砂防管理センター）、国土地理院、九州大学、京都大学、鹿児島大学、東京大学、国立研究開発法人防災科学技術研究所、国立研究開発法人産業技術総合研究所、宮崎県、鹿児島県、大分県、十島村、三島村、屋久島町、公益財団法人地震予知総合研究振興会及び阿蘇火山博物館

2. 一元化震源の利用について

- ・2001 年 10 月以降、Hi-net の追加に伴い検知能力が向上している。
- ・2010 年 10 月以降、火山観測点の追加に伴い検知能力が向上している。
- ・2016 年 4 月 1 日以降の震源では、M の小さな地震は、自動処理による震源を表示している場合がある。自動処理による震源は、震源誤差の大きなものが表示されることがある。
- ・2020 年 9 月以降の震源は、地震観測点の標高を考慮する等した手法で求められている。

3. 地図の作成について

- ・資料内の地図の作成には、国土地理院発行の『数値地図 25000 (行政界・海岸線・地図画像)』、『数値地図 50m メッシュ (標高)』、『基盤地図情報』及び『電子地形図 (タイル)』を使用した。

霧島山(硫黄山)周辺の湧水・火口跡熱水の化学組成

(2022 年 6 月 13 日まで)

概要

2016 年 8 月から硫黄山周辺の湧水・火口跡熱水の化学組成を分析している。水中の Cl/SO_4 比に関して、硫黄山西麓の湧水(A)では 2021 年 6 月から 12 月にかけて以降わずかに高まり、硫黄山西頂域の火口跡熱水(Pa)では 2021 年 12 月から 2022 年 6 月にかけて明瞭に増加した。

背景・試料の採取と分析

一般に火山活動の活発化に伴って噴出する火山ガスの温度が上昇すると火山ガスに含まれる HCl の SO_2 に対する比率(HCl/SO_2)が増大することが知られている[1][2]。本研究では火山ガスの供給を受けた熱水や湧水に溶存する Cl^- と SO_4^{2-} の比率 (Cl/SO_4 比) も火山活動の盛衰に応じて変化すると期待して、硫黄山の火口跡熱水(図 1: P, V)や山麓の湧水(図 1: A)の化学組成の分析を続けている。

本資料では、2022 年 6 月 13 日の調査で観測できた山麓湧水(A)、硫黄山南火口跡熱水(Pa)についての分析結果を報告する。なお、6 月 13 日の観測では視界不良のため V1, Pb 地点への接近はできず、また硫黄山西火口跡(V2)は同日時点で噴気や熱水の上昇は停止して雨溜りとなっていた(図 2)。採取した試料水は孔径 $0.45\mu\text{m}$ メンブレンフィルターでろ過した後に適宜希釈し、イオンクロマトグラフ法で Cl^- , SO_4^{2-} 濃度を分析した。

結果

(1) 西麓湧水(A)

2016 年 8 月の観測開始時点で 0.07 だった Cl/SO_4 比は 2018 年 4 月噴火の前後で顕著に高まり(最高値は 2018 年 10 月=1.6)、2019 年 3 月頃から明瞭に減少し、翌年 2020 年 3 月以降は 0.1 以下まで低下した(表 1, 図 2)。最近の観測では同比は 2021 年 6 月から 12 月にかけて 0.02 から 0.06 に増加し、2022 年 6 月 13 日時点で 0.05 を維持している。

(2) 硫黄山南火口跡(Pa)

湯だまり形成直後は高い Cl/SO_4 比 (最大は 2019 年 1 月=1.8) を示していたこの地点の熱水は 2019 年 3 月から 2021 年 12 月までの間比較的低い Cl/SO_4 比(0.0~0.15 程度)で推移していたが、2022 年 6 月 13 日時点で同比=1.0 と明瞭に増加した(表 1, 図 2)。

最近の Cl/SO_4 比の増加は硫黄山西頂域で明瞭である一方、山麓湧水ではわずかにとどまっており、かつ西火口跡の噴気・熱水活動は停止していることを考慮すると、硫黄山では少なくとも山頂域を中心に熱水活動が高まっている可能性がある。

参考文献 [1] I. Iwasaki et al. (1966) Bull. Tokyo Inst. Tech., 74, 1–57. [2] 小坂丈予ほか (1988) 火山, 43, 25–31. [3] 気象研究所ほか (2018) 火山噴火予知連絡会会報, 130, 285–291.

*本研究の一部には文部科学省次世代火山研究推進事業(課題 B3)の研究費を使用しました。

霧島山 (硫黄山)

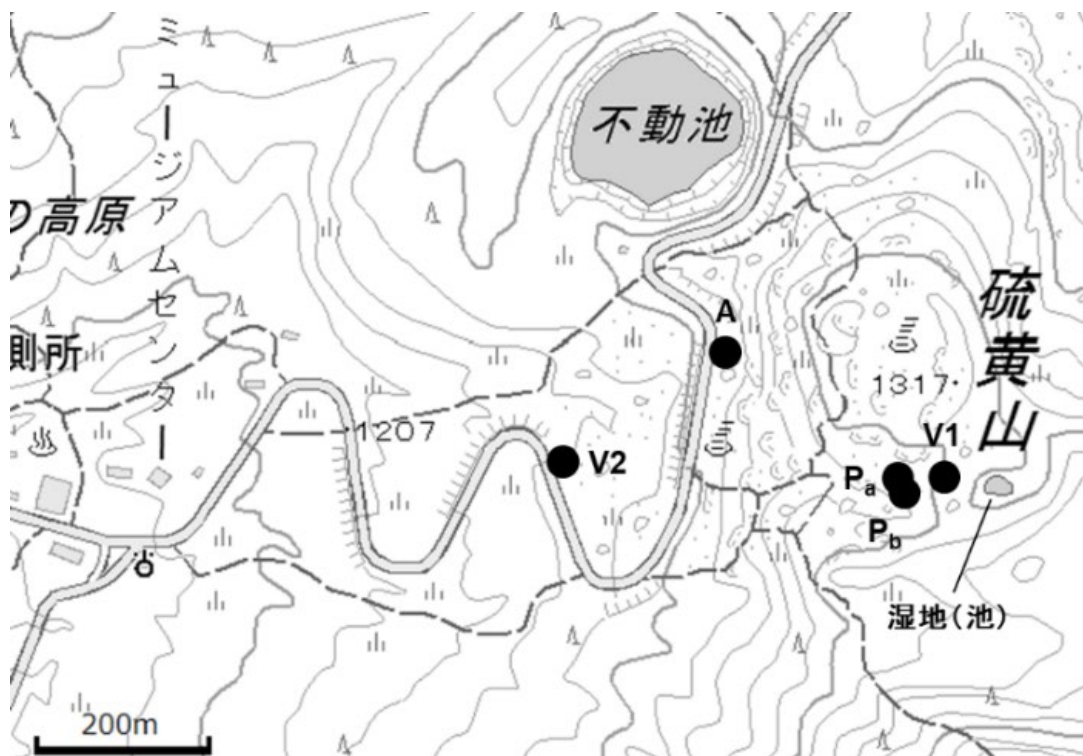


図 1. 試料採取および観測地点 (背景地図に地理院地図を使用した)



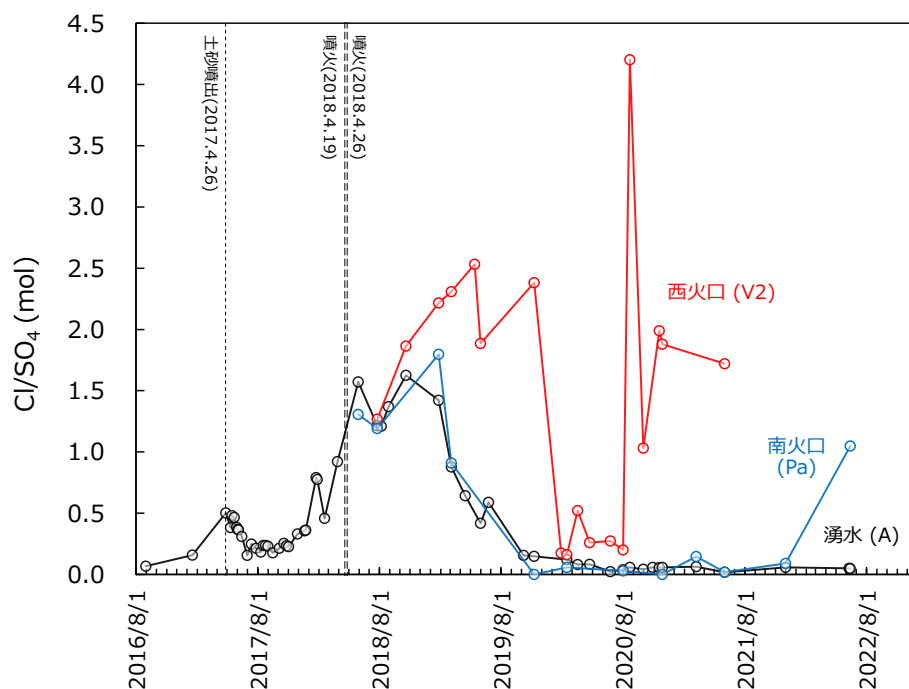
図 2. 硫黄山周辺の湧水・火口跡熱水の様子 (2022.6.13)

霧島山 (硫黄山)

表 1. 硫黄山周辺の湧水・火口跡熱水の化学組成 (抜粋)

採水地点	採取日	WT ?C	pH	E.C. S/m	Cl ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	Cl/SO ₄ モル比
湧水(A)	2020/11/26	41.3	1.79	0.90	63.8	2950	0.059
	2021/3/8	44.3	1.94	0.65	47.6	2005	0.064
	2021/6/1	57.9	1.51	1.61	32.9	5221	0.017
	2021/12/1	35.7	1.87	0.76	57.2	2640	0.059
	2022/6/9	52.6	1.109	1.68	69.2	3750	0.050
	2022/6/13	53.0	1.08	1.68	64.7	3570	0.049
南火口跡(Pa)	2020/11/26	20.9	1.44	1.55	1.6	2970	0.0015
	2021/3/8	74.1	1.06	4.39	526	9764	0.15
	2021/6/1	50.3	1.77	0.74	10.5	1381	0.021
	2021/12/1	29.3	1.03	4.28	325	9780	0.090
	2022/6/13	74.8	1.32	2.45	1700	4400	1.047
南火口跡(Pb)	2020/11/26	88.4	0.82	9.77	3.6	24200	0.000
	2021/3/8	87.0	0.82	7.97	947	18100	0.14
	2021/6/1	83.0	1.19	2.84	21.6	5870	0.010
	2021/12/1	91.0	0.68	10.8	1260	25600	0.13
	2022/6/13	視界不良により接近できず					
西火口跡(V2)**	2020/11/26	90.2	1.26	2.83	2370	3410	1.88
	2021/3/8	枯渇					
	2021/6/1	91.8	0.91	6.58	6400	10100	1.72
	2021/12/1	枯渇					
	2022/6/13	枯渇 (降水による雨溜)					

pHおよびECの測定にはガラス電極(HORIBA, 9615S)および白金-白金黒電極(HORIBA, 3552-10D)を接続したポータブルpH/EC計(HORIBA, D-74)を使用した。Cl, SO₄の分析にはイオンクロマトグラフ法(Thermo, Integriion)を使用した。分析値は修正する可能性があります。

図 3. 硫黄山周辺の湧水・火口跡熱水の Cl/SO₄ モル比の変化

* 南火口周辺には複数の湯だまりがあるが、本資料では Pa について表示している。

霧島えびの高原硫黄山噴気の化学組成(2015 年 12 月～2022 年 6 月) Chemical composition of the fumarolic gases at Ebinokogen Iwoyama volcano、Kirishima、Japan (From Dec. 2015 to June 2022)

1. 概要

えびの高原硫黄山では 2021 年 12 月から 2022 年 6 月にかけて、噴気孔 c、h で採取した火山ガスの SO_2/CO_2 比や $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比に明確な上昇が観測された。このことからマグマ性ガスの浅部熱水系に対する供給量は増加傾向にあると推定される。一方で、噴気孔 c の火山ガスに含まれる H_2O の酸素同位体比は低い値を維持しており、2018 年 4 月の水蒸気噴火の直前に観測されたような高い値には達していない。

2. 噴気の採取・分析

2015 年 12 月から 2022 年 6 月の期間、硫黄山の山頂付近の図 1 に示す噴気孔 a、b、c、h、V2 で噴気を繰り返し採取・分析した。噴気 a、b は 2019 年以降、放出の勢いが著しく低下し、採取そのものができない場合や、大量の空気の混入が認められる場合があった。

噴気を採取するために、金属チタン管を噴気孔に差し込み、管と孔の隙間を砂などで注意深く塞いだ。次にチタン管にゴム管を接続し、ゴム管の出口を真空ガラス瓶のコックに接続した。真空ガラス瓶にはあらかじめ高濃度のアルカリ性水溶液 (KOH) 20ml を封入した。真空ガラス瓶のコックを慎重に開けることにより火山ガスをアルカリ性水溶液に吸収させた。真空瓶を用いた採取とは別に、安定同位体比の測定のために噴気を水冷したガラス二重管に通し、凝縮水を採取した。また、 SO_2 と H_2S の分別定量のためヨウ素溶液を噴気で洗気し、試料として持ち帰った。

3. 結果・考察

噴気の SO_2/CO_2 比と $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の変化を、それぞれ、図 2、3 に示す。噴気 c では、2021 年 12 月から 2022 年 6 月にかけて顕著な増加が観測された。しかし、2022 年 6 月の値は、2018 年 4 月の水蒸気噴火の直前に当たる 2018 年 3 月 28 日に観測された値には達していない。

噴気 h の SO_2/CO_2 比は、2021 年 6 月から 12 月にかけて低下したが、2022 年 6 月に上昇し、これまでで最大の値を示している。噴気 h の $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比は 2020 年 11 月から 2022 年 6 月にかけて一定の割合で上昇が継続している。

噴気に含まれる H_2O の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) の変化を図 4 に示す。噴気 h では 2020 年 7 月は -14.2‰ と低く、その後上昇し、2022 年 6 月には $+0.9\text{‰}$ に達した。このことは、噴気 h においてマグマ起源 H_2O の寄与が最近になり相対的に増大していることを示唆している。噴気 c の酸素同位体比は、2020 年 7 月から 2022 年 6 月にかけて低い値を維持した。噴気 c の酸素同位体比は、2018 年 4 月の水蒸気噴火前の 2018 年 3 月 28 日に -3.3‰ という高い値を示している。2022 年 6 月の -14.8‰ という低い値は、火山ガスに含まれる水蒸気の一部が、地表近くで凝縮したことを示唆している (Ohba et al., 2021)。

図 5 に、噴気の $\text{SO}_2\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{S}$ 三成分組成を示す。この三成分図では、左下の SO_2 の頂点に近づくほど、マグマ起源成分の影響が強くなると判断される。噴気 h の 2022 年 6 月の組成は、これまでで最もマグ

マ起源成分の組成に近づいたと判断される。

気象庁の観測によると、2022 年 4 月と 5 月に、それぞれ 280 回程度の火山性地震が観測されている。2022 年 3 月の地震回数が 100 回程度であったことから地震活動の活発化が起きている。これに対応するように、噴気の SO_2/CO_2 比と $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比は 2021 年から 2022 年 6 月にかけて明確に上昇した。これらの変化を考慮すると、2022 年 4 月以降に、浅部熱水系に対するマグマ起源成分の供給量が増大したと推定される。一方で、噴気 c の酸素同位体比や SO_2/CO_2 比と $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比に着目すると、2018 年水蒸気噴火直前の値には達していない。マグマ起源成分の供給量は、水蒸気噴火を引き起こす程度まで増加していないと推定される。

4. 謝辞

本研究実施のために、文部科学省次世代火山研究推進事業（課題 B 3）の研究費を使用しました。福岡管区気象台は安全確保のために調査実施中に硫黄山の地震活動をモニタリングして下さいました。ここに記して心より感謝いたします。

5. 文献

T Ohba, M Yaguchi, U Tsunogai, M Ito, R Shingubara (2021) Earth, Planets and Space (2021)
doi:10.1186/s40623-021-01405-4

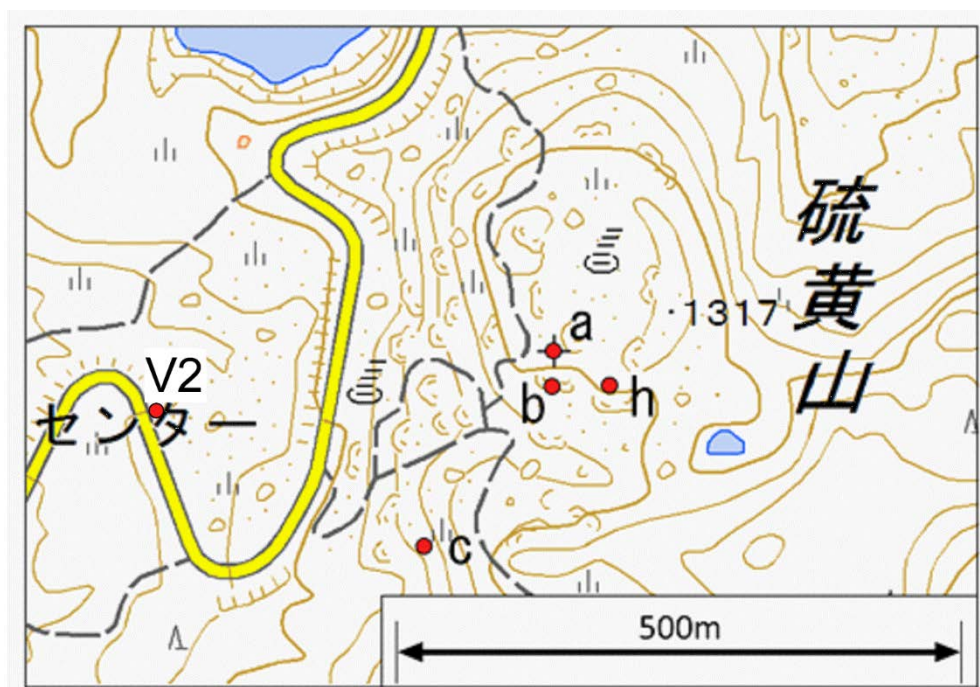


図 1. 硫黄山噴気 a, b, c, h, V2 の位置（背景の地図として、国土地理院 1/25000 地形図を使用した）

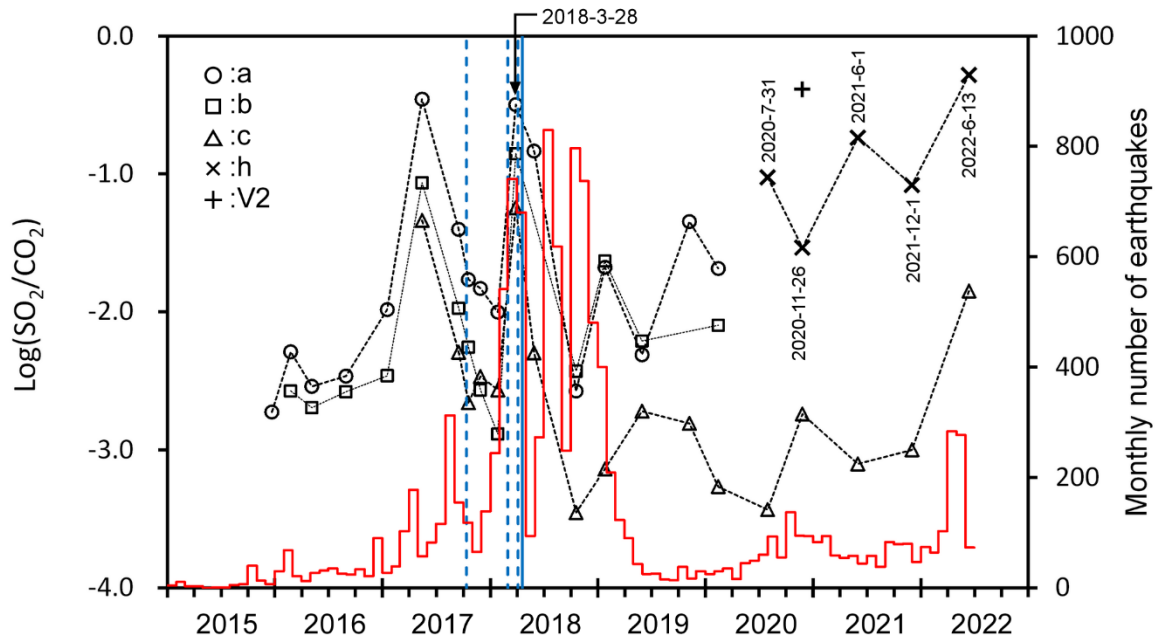


図 2. SO_2/CO_2 比の時間変化（赤線は気象庁による月別地震回数、青の実線は硫黄山における噴火、青破線は新燃岳における噴火を示す）

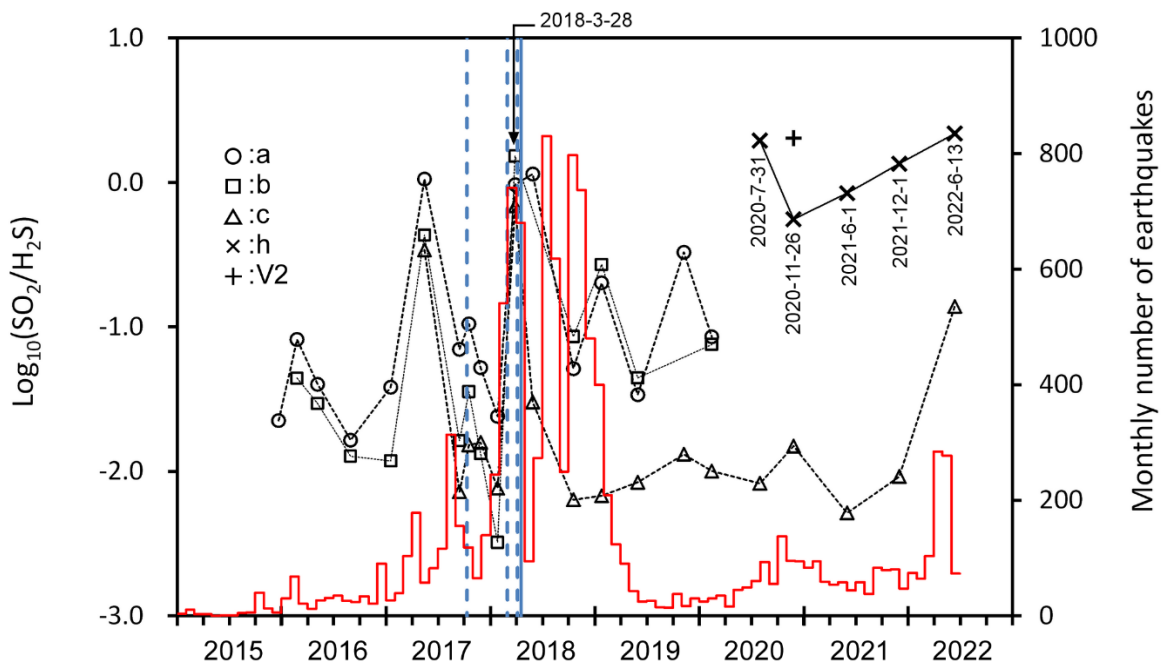


図 3. $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の時間変化（赤線は気象庁による月別地震回数、青の実線は硫黄山における噴火、青破線は新燃岳における噴火を示す）

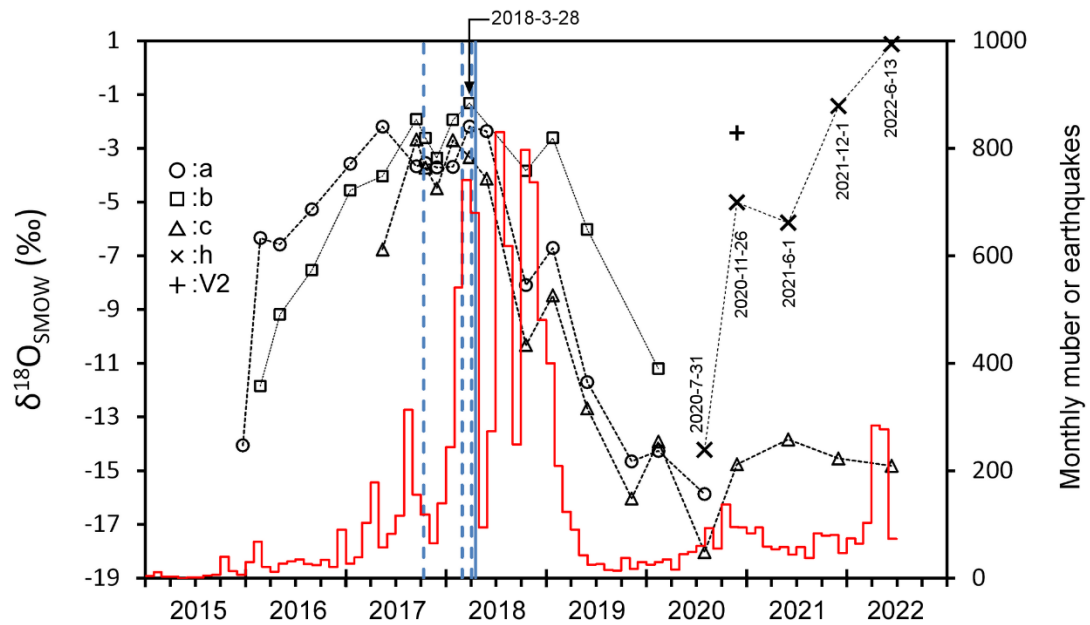


図 4. H_2O 酸素同位体比の時間変化（赤線は気象庁による月別地震回数、青の実線は硫黄山における噴火、青破線は新燃岳における噴火を示す）

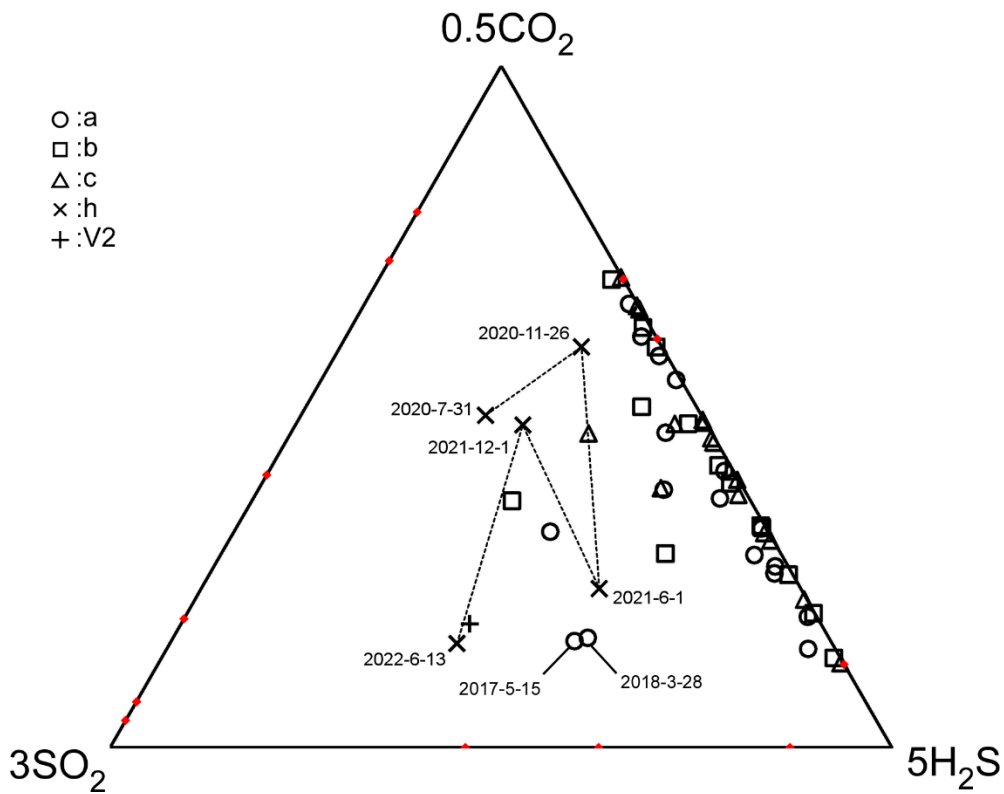


図 5. 噴気の SO_2 - CO_2 - H_2S 三成分図

霧島山硫黄山噴気のヘリウム同位体比

1. 概要

2016 年 10 月から 2021 年 12 月にかけて霧島山硫黄山の 5 地点で噴気を採取し、ヘリウム同位体比 ($^3\text{He}/^4\text{He}$ 比) を測定した。 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の経時変動は新燃岳や硫黄山の火山活動と関連がある。2020 年以降 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比はやや高い値で推移しているため、今後も注意深く観測していく必要がある。

2. はじめに

ヘリウム (He) などの希ガスは、化学的に不活性であり化学反応に関与しないため、その同位体比 ($^3\text{He}/^4\text{He}$ 比) は地下深部からの移動過程で変動しにくく、起源の異なる複数の供給源からの寄与率の違いを反映する。 ^3He は地球形成時から存在する始原的成分がほとんどを占めている一方、 ^4He では始原的成分に加えて、U や Th の放射壊変によって生成された成分 (放射壊変起源成分) も多く存在している。この始原的成分と放射壊変起源成分の寄与率の違いを反映して、大気、マントル、地殻の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は大きく異なる。大気の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の絶対値 ($R_A = 1.4 \times 10^{-6}$) を基準とすると、マントルの値は $8 R_A$ 程度であり相対的に始原的成分に富んでいる一方で、地殻の値は $0.02 R_A$ 以下であり、放射壊変起源成分が卓越している。このことを利用してマグマ活動度が評価できると期待される^[1]。

3. 試料採取地点・分析法

図 1 に示した地点 (硫黄山の 5 つの噴気孔 : a, b, c, h, V2) において、真空コック付きのガラス製容器に噴気を採取し、試料の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比と、ヘリウムとネオン濃度の比 ($^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比) を希ガス質量分析計^[2,3]を用いて測定した。

試料中のヘリウムには、地下でのガスの移動中、あるいは試料採取時に混入した大気由来のヘリウムが含まれている。このような大気起源ヘリウムの混入による $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の改変は、 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比を用いて補正できる。これ以降、本報告で示す $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比はすべて、大気起源ヘリウムの混入を補正している。

4. 結果・考察

図 2 に 2016 年から 2019 年にかけての硫黄山の噴気 (a, b, c, h, V2) における、大気混入を補正した $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比 (Air-corrected $^3\text{He}/^4\text{He}$) の経時変化を示す。a, b, c, h 地点の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の経時変化は、2019 年 5 月を除いて同期しており、値も概ね一致している。また、2020 年に出現した噴気 V2 の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は、直近に採取した c, h 地点における $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比と誤差の範囲で一致している (空気混入率が高く誤差の大きい 2020 年 9 月の試料を除く)。これらのことは、それぞれの噴気が共通のリザーバーから火山ガスの供給を受けていることを示唆する。 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の経時変化と新燃岳や硫黄山の火山活動との関連に着目すると、2017 年 10 月に発生した新燃岳の噴火の 2 週間前まで (2016 年 8 月 30 日から 2017 年 9 月 19 日にかけて) の 3 地点の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の平均値は約 $6.9 R_A$ から約 $7.5 R_A$ へと上昇していたが、噴火後の 2017 年 10 月 18 日から 2017 年 11 月 28 日にかけて、 $7.5 R_A$ から $7.2 R_A$ へ減少した。また、2018 年 3 月から 6 月にかけての新燃岳の噴火と 2018 年 4 月の硫黄山の噴火前には、2017 年 11 月 28 日の $7.2 R_A$ から 2018 年 3 月 28 日の $7.4 R_A$ へとわずかに上昇していたが、噴火活動が終息しかけていた 2018 年 5 月 29 日には、 $7.1 R_A$ まで減少した。その後、2018 年 10 月 19 日には $7.5 R_A$ へと上昇したが、2019 年 5 月 31 日に

かけてわずかに減少傾向を示している。

以上のように、硫黄山の噴気の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の経時変化は、新燃岳の噴火前に増加傾向を、噴火後には減少傾向を示している。噴火の準備過程におけるマグマだまりの圧力上昇に伴い、マグマだまり起源ガスの供給量が増加すると、地殻など他の供給源からヘリウムの寄与は相対的に減少し、噴気の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は上昇すると考えられる。一方、噴火に伴う大規模なガス放出によりマグマだまりの圧力が減少すると、他の供給源からのヘリウムの寄与が相対的に増加し、噴気の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は減少すると考えると、上記の経時変化は説明できる。また、2018 年 5 月から 10 月の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の上昇と、2019 年 1 月 25 日にかけてのわずかな減少は、同 10 月に噴火は起こっていないものの、同 5 月には約 100 回、同 10 月には約 800 回と増加していたえびの高原周辺の地震回数が、2019 年 1 月には約 400 回へと減少したことに対応して、火山活動との関連を示していると考えられる（地震回数は気象庁ホームページ内の火山の状況に関する解説情報及び月別地震回数を参照）。

また 2017 年以降継続的に観測している噴気 c の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比に着目すると、2018 年～2019 年の平均値が $7.46 \pm 0.12 R_A$ (1σ) であるのに対し、2020 年以降の平均値は $7.60 \pm 0.05 R_A$ (1σ) とやや上昇している。このことから、マグマだまり起源ガスの供給量が相対的に増加している可能性があり、今後も継続して観測していく必要がある。

[参考文献]

- [1] Padrón, E., Pérez, N.M., Hernández, P.A., Sumino, H., Melián, G.V., Barrancos, J., Nolasco, D., Padilla, G., Dionis, S., Rodríguez, F., Hernández, I., Calvo, D., Peraza, M.D., Nagao, K., 2013. Diffusive helium emissions as a precursory sign of volcanic unrest. *Geology* 41, 539-542.
- [2] Sumino, H., Nagao, K., Notsu, K., 2001. Highly sensitive and precise measurement of helium isotopes using a mass spectrometer with double collector system, *J. Mass Spectrom. Soc. Jpn.* 49, 61-68.
- [3] 角野浩史, 2015. 希ガス同位体質量分析の温故知新. *J. Mass Spectrom. Soc. Jpn.* 63, 1-30.

[謝辞]

本報告の観測データの一部は、文部科学省「次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト」により取得された。福岡管区気象台は安全確保のために、調査実施中に硫黄山の地震活動をモニタリングして下さいました。ここに記して感謝いたします。

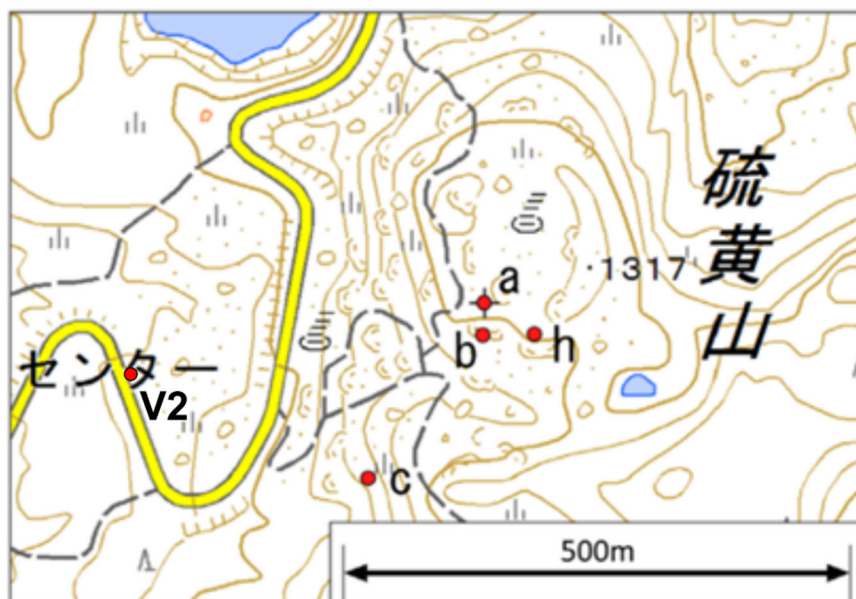


図 1. 硫黄山の噴気 a, b, c, h, V2 の位置（背景の地図として、国土地理院 1/25000 地形図を使用した）

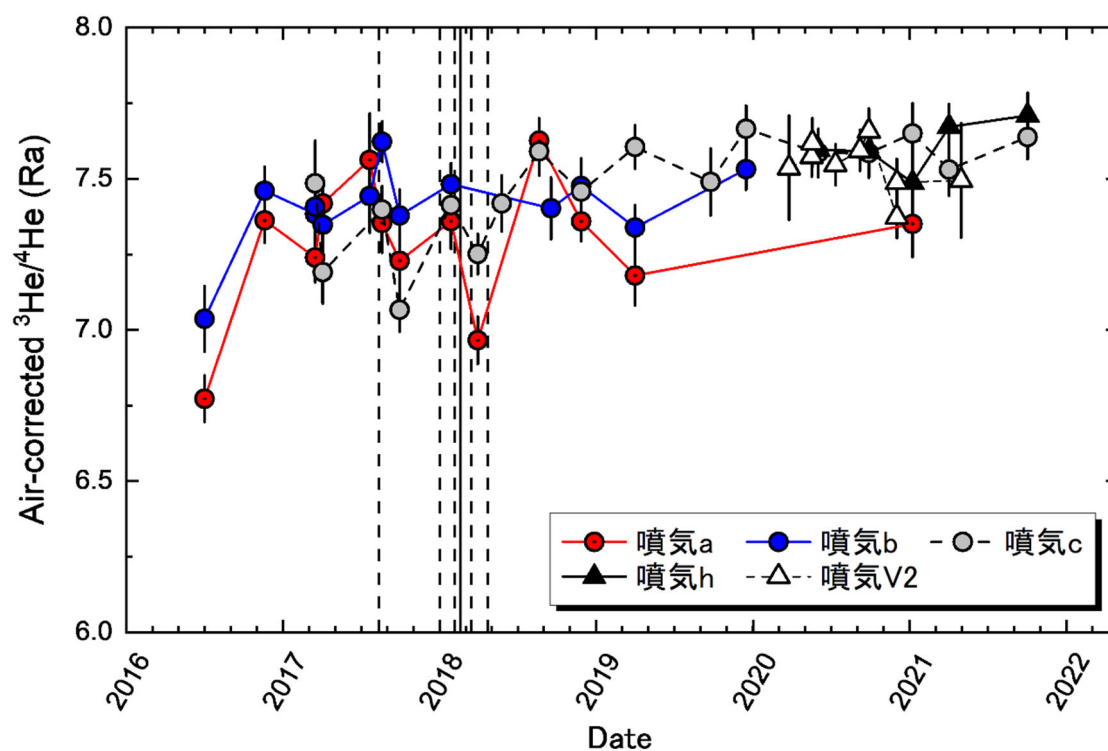


図 2. 硫黄山の噴気 (a, b, c, h, V2) における $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比（大気起源ヘリウムの混入の効果は補正済み）の経時変化。エラーバー（ 1σ ）は、測定誤差と大気ヘリウム混入の補正に伴う誤差を含む。点線は新燃岳における噴火を、実線は硫黄山における噴火を示している。

霧島火山における Seismic background level の時間変化

新燃岳における微弱な火山性微動を反映している地震波背景振幅レベル（Seismic background level, 以下 SBL）の長期活動の解析を行った。新燃岳での SBL の時間変化は火山活動との関連していることが指摘されており、例えば 2008 年 8 月の水蒸気爆発以降の約 8 か月ほぼ同じレベルで継続していたことと、2010 年 10 月から 2011 年噴火に向けては、顕著に振幅の増加が進んだことが報告されている。さらに、2017 年新燃岳噴火の数か月以上前から振幅の加速的増加が発生し、2018 年噴硫黄山火まで続いた（図 2）。SBL の成長期は、深部マグマだまりの膨張を示す地殻変動も発生していること、その震源は新燃岳火口近傍の 2 km 以浅にあると考えられることから、噴火前の長期的なマグマ移動に伴う振動であると解釈されている。2020 年以降の変動をみると、2020 年から約 1 年間 EV.SMN や EV.SMW といった新燃岳火口近傍の観測点で SBL の一時的な高まりがみられ、その後 SBL は減少したが、2022 年 1 月頃より EV.SMN や EV.SMW において再び増加し、現在高止まりの傾向が続いている（図 2）。

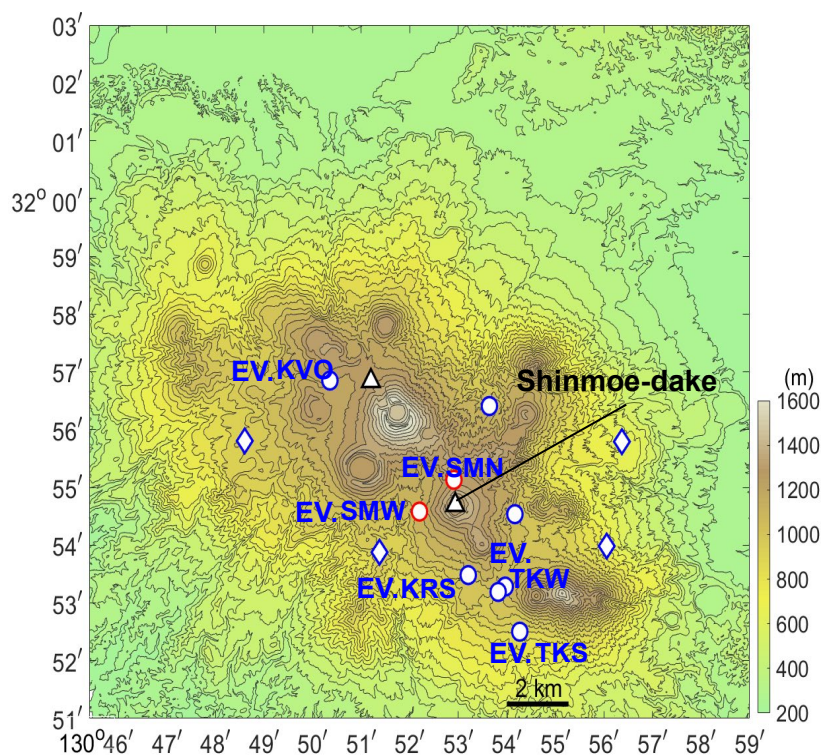


図 1 Seismic background level (SBL)の時間変化推定に使用した観測点の分布図。

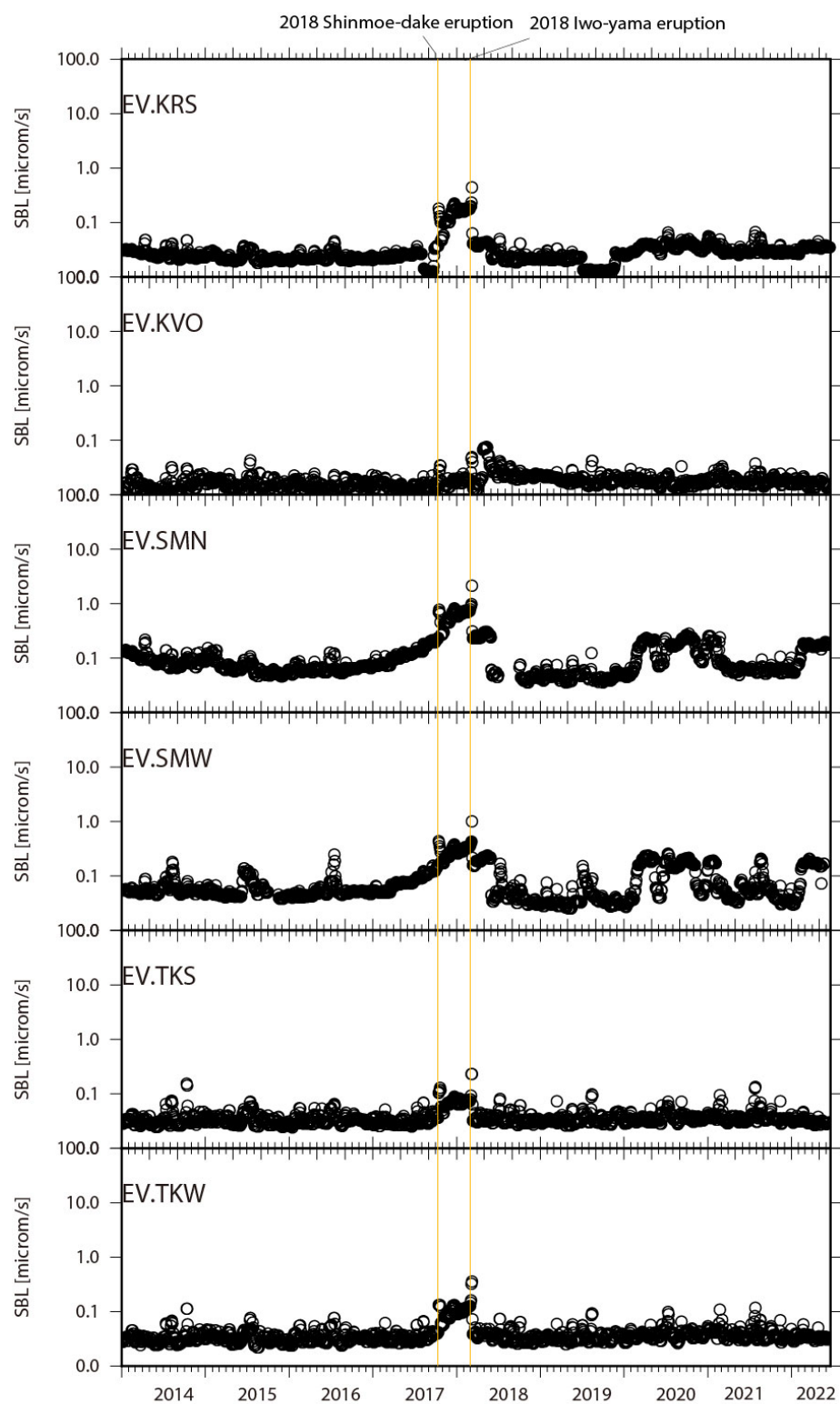
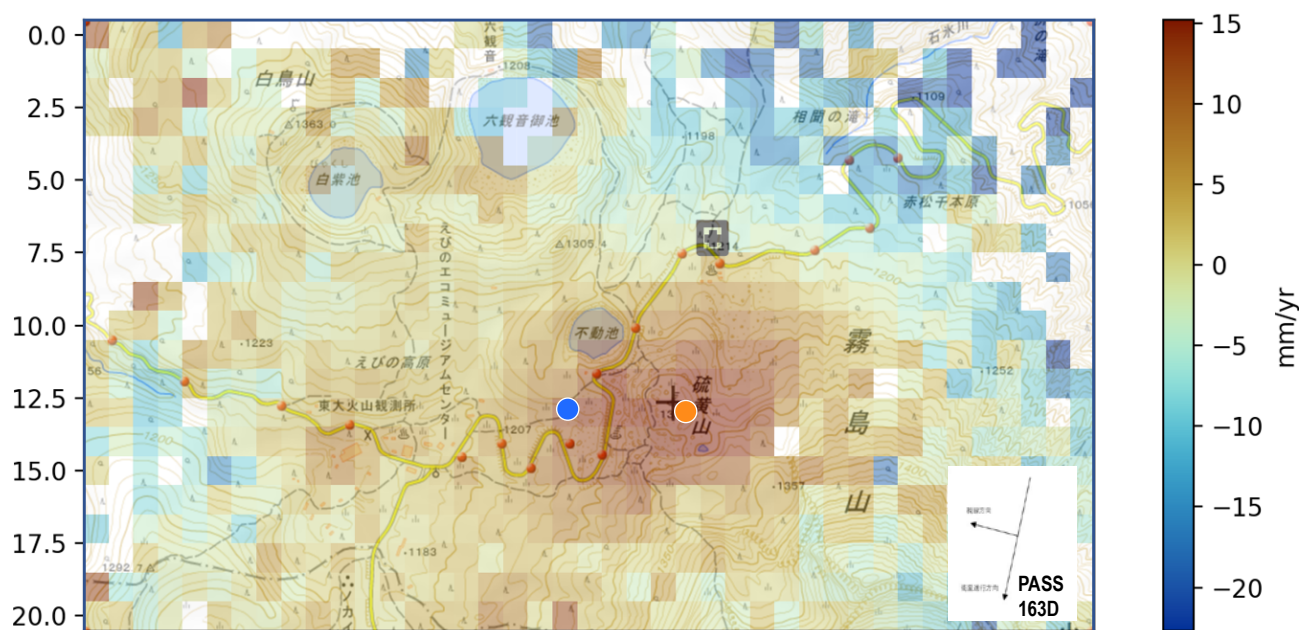


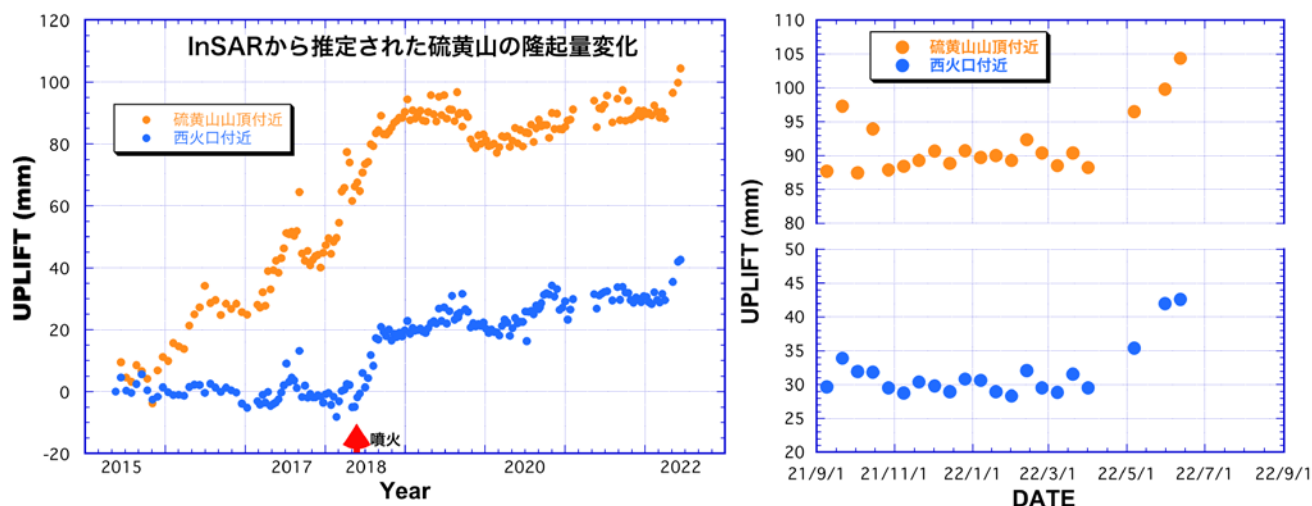
図2 2014年1月1日～2022年6月19日における期間での、各観測点でのSBLの変化。最近では2022年1月頃にEV.SMNとEV.SMWでSBLの増加が起き、振幅レベルが高い状態が続いている。なお、EV.SMWにおける夏季のSBL増加は降雨の影響である。

InSAR 解析から推定された硫黄山の隆起活動

霧島硫黄山の InSAR 解析により、2022 年 4 月上旬より硫黄山頂から西火口にかけての地域で隆起現象が生じていることがわかった。最新の解析データは 2022 年 5 月 7 日および 31 日、6 月 12 日の 3 回であるが、地表の地熱現象も活発化の様相をみせており、今後の地殻変動に注意が必要であろう。



第 1 図 Sentinel-1 の InSAR 解析から得られた視線方向変位速度図(2021/12~2022/05)



第 2 図 InSAR 解析から推定された硫黄山山頂および西火口付近の隆起量の時間変化。右図は最近期間の拡大図。今回は南行軌道の視線方向の距離の変化のデータのみ使用しているが、唐(2022)より、硫黄山山頂部ではほぼ上下変動のみ、西火口付近では上下方向の約 0.6 倍の西向き変位が平均的に求められているので、その値を使用して上下変位に換算している。

謝辞：LiCS プロジェクト (COMET) が公開している Sentinel-1 衛星のバスの自動干渉済み SAR データおよび時系列解析ツール LiCSBA (Morishita, 2020) を使用した。地図描写には地理院地図を用いた。ここに記して感謝する。

精密水準測量で検出された霧島・硫黄山の地盤上下変動

(2015 年 6 月～2022 年 7 月)

2022 年 7 月 1～2 日に霧島えびの高原において精密水準測量を実施した。その結果、2021 年 10 月以降の隆起の範囲は硫黄山西麓の地表に地熱活動が高い領域にかざられており、2018 年 4 月の硫黄山噴火直前のキャップロック下の圧力源膨張・隆起パターンとは異なっていることがわかった。

九州大学を中心とした大学合同水準測量班は、2015 年 6 月にえびの高原周辺に水準路線を増設した（第 1 図）。その後、硫黄山では火山性地震の群発や傾斜変動をとまなう火山性微動がたびたび発生し、2015 年 12 月中旬には地表に新たな噴気帯が生じ、2017 年 5 月には火山泥の噴出が確認されている。その後噴気活動は一時沈降傾向になったが、2018 年 2 月には火山性地震が増加し、噴気現象も再度活発になってきた。4 月上旬から硫黄山の南側に沿って東西に新たな噴気孔列が生じ、一部で小噴火を発生させた。また InSAR 解析では 2022 年 4 月ごろより、硫黄山山頂および西麓で隆起現象が観測されている（本会議別資料）。

2017 年 10 月以降の主な水準測量結果を第 2 図に示す。また主な水準点における隆起量の時間変化を第 3 図に示す。いずれも 2015 年 6 月および、測線の西端の BM1120 を基準としている。2021 年 10 月～2022 年 7 月の期間の隆起量を図 1 の等値線で示す。硫黄山山頂に近い BM3050 では 2015 年 6 月～2022 年 7 月の期間で 99.0 mm の隆起が見られる。

第 4 図に 2018 年 4 月の噴火前の隆起量と、2021 年 10 月以降に観測された隆起量の比較を示す。2018 年 4 月の噴火前は水準路線の広い範囲で隆起が観測されているが、2021 年 10 月以降の隆起は、西火口を中心に局所的な隆起となっていることがわかる。噴火前の隆起は、深さ 600～700m のキャップロックの直下で熱水溜まりの圧力が増加しているものと推定される。一方最近の隆起は硫黄山西麓のごく浅い部分が膨張していると考えられる。この領域は 2022 年 5 月以降、噴気や熱水の湧出、地熱異常が多く確認されている領域であり、膨張の原因としては地温上昇や間隙水圧増加に伴う浅部の地層の体積増加が想定される。

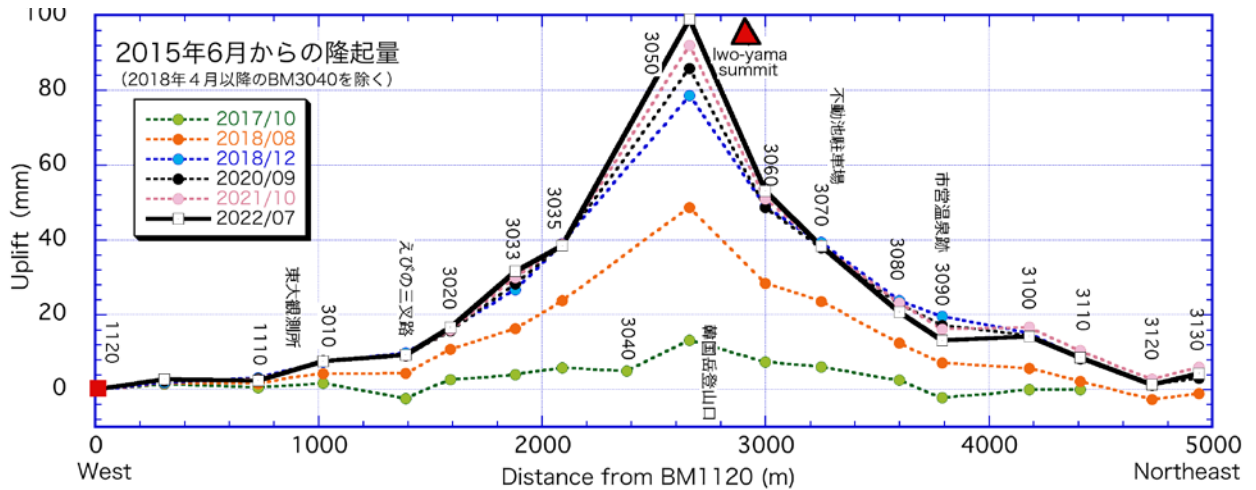
謝辞

現地調査の際には、安全確保のために気象庁鹿児島地方気象台に火山活動監視を依頼した。本調査の一部は、文部科学省による「次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト（JPJ005391）」、「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第 2 次）」、東京大学地震研究所共同研究プログラムおよび九州大学「実践的火山専門教育拠点」プログラムの援助を受けた。

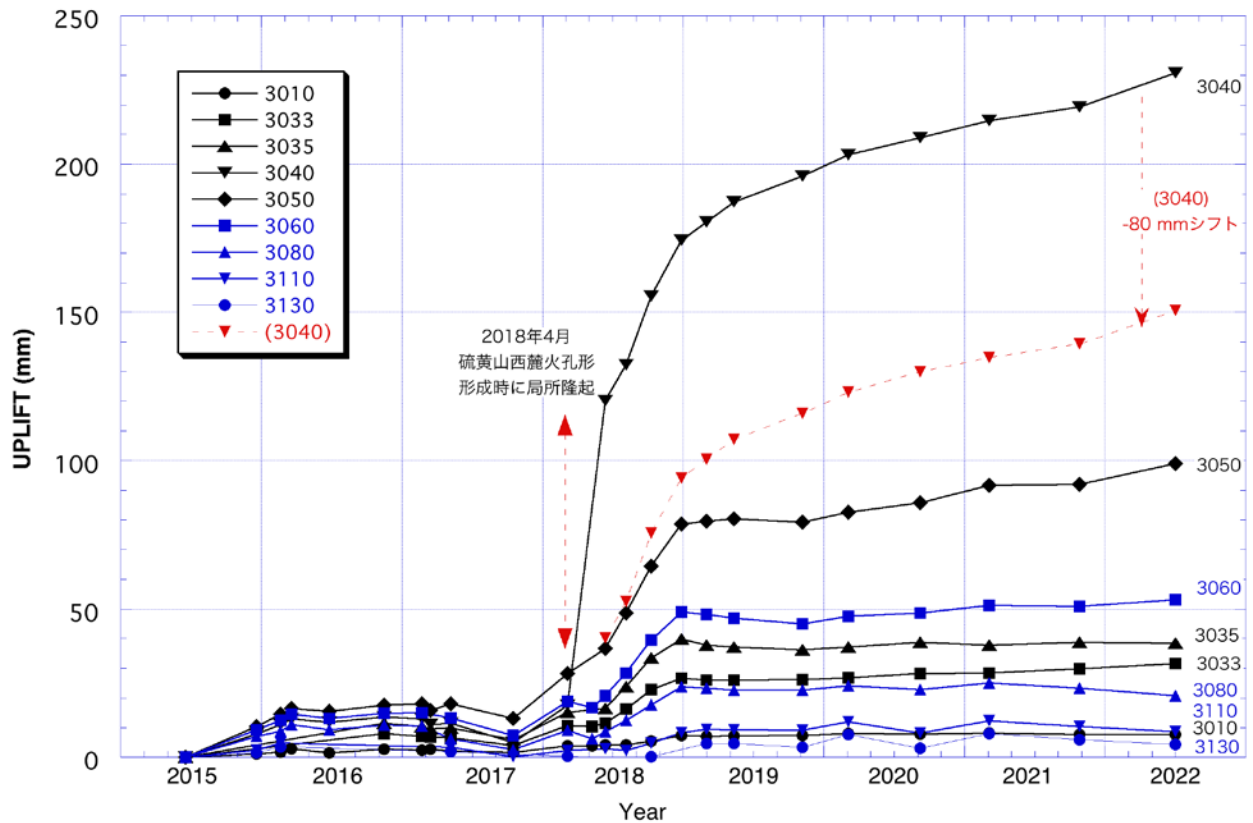
2022 年 7 月の測量作業は 内田和也・松島 健・吉永光樹・田辺暖柊・十川尚也・河野太紀・上土井歩佳が行った。これまでの測量作業は九州大学のほか、京都大学・北海道大学・日本大学・東京大学・気象庁・次世代火山人材育成コンソーシアムの協力で実施されている。ここに記して感謝する。



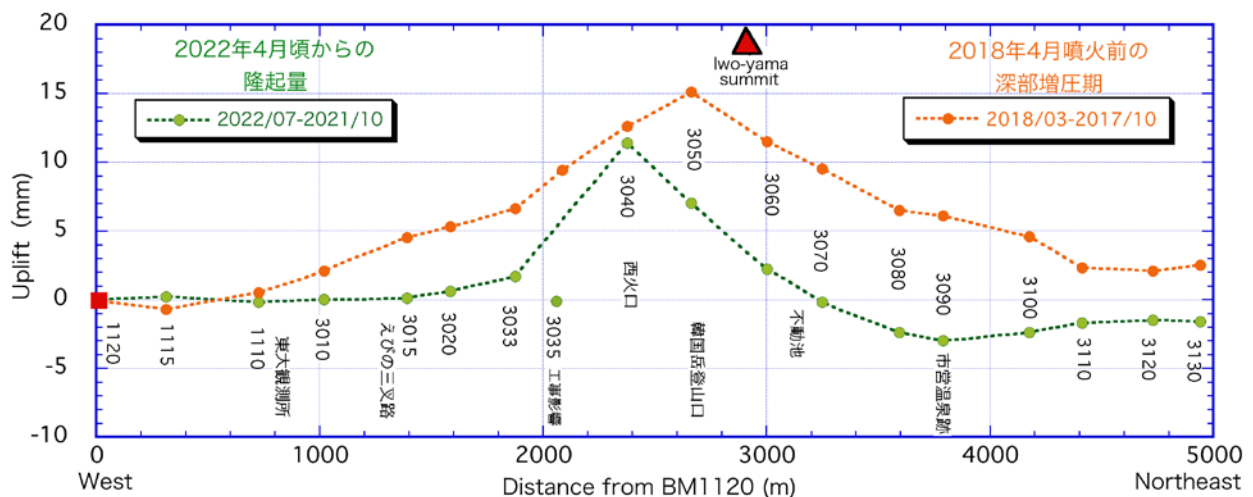
第 1 図 えびの高原～硫黄山区間の水準路線と 2021 年 10 月から 2022 年 7 月までの隆起量を示す。2018 年 4 月から活発化した噴気領域や、これまでの水準測量から推定された圧力源の水平位置も同時に示す。国土地理院電子地形図（タイル）を使用した。



第 2 図 2017 年 10 月以降の主な水準測量結果（BM3040 を除く）。隆起・沈降の中心は硫黄山付近の浅部と考えられる。2018 年 12 月以降は硫黄山西麓の 3035～3060 間で若干の隆起傾向が見える。



第 3 図 主な水準点の標高の時間変化。2017 年 10 月以降は隆起傾向がみられ、地下の圧力源の急膨張が推定されていたが、2018 年 12 月以降は多くの観測点でほぼ停止状態である。BM3040 は硫黄山西側噴気孔近傍の県道沿いに位置し、2018 年 4 月 20 日からの硫黄山西側噴気の活発化に伴い局所的に約 8 cm の隆起がみられ、その後も局所的に変化が大きい。また、2021 年 10 月以降は、硫黄山西麓にあたる 3033～3060 の基準点で隆起傾向となっている。



第 4 図 2018 年 4 月の噴火前の隆起量と、2021 年 10 月以降に観測された隆起量の比較。2018 年 4 月の噴火前は水準路線の広い範囲で隆起が観測されているが、2021 年 10 月以降の隆起は、西火口を中心に局所的な隆起となっている。

硫黄山周辺（硫黄山・硫黄山西噴気帯）の地熱活動の変化について

活発な活動が継続していた硫黄山噴気帯の硫黄山南火口では、非常に活発な噴湯現象や湯だまりの形成を確認し、活動の推移に注意を要する。また、南火口北側斜面の噴気箇所では噴気域の拡大が見られ、地熱活動も活発な状態が続いている。

硫黄山西噴気帯では、川湯沿いに新たな熱水湧出や噴気活動の活発化が見られた。以前活発であった W4 火口は低調であるが、それ以外の噴気箇所は活発化しており、これらの噴気箇所ではジェット噴気孔形成等の地熱活動の活発化に注意を要する。

1. 概 要

えびの高原（硫黄山）周辺の南火口、西火口周辺を含む硫黄山及び硫黄山西噴気帯では（図 1）、2022 年 5 月に入り、表面活動に活発化がみられたため、5 月 18 日～22 日にかけて緊急的な調査を実施し、その後の調査を含む結果を報告する。

2. 硫黄山南火口及び周辺の活動（硫黄山噴気帯）

硫黄山南火口及び周辺の活動では、2022 年 5 月 18 日の調査によって、Y2a 火口湯だまりにおいて噴気孔が増加し、複数箇所の噴湯や直接噴気が生じていることを確認した。Y3 火口において 2018 年 12 月以来と考えられる高水位の湯だまり形成（図 3、図 4）、Y2b 火口湯だまりにおいて噴湯（図 3、図 5）が見られるなど、非常に活発な活動が生じていた。Y2b からは水位上昇に伴う泥水の流出跡も認められた（図 6）。硫黄山噴気帯では G、I 周辺及び B、噴気孔 A 周辺で地熱域が拡大し（図 2）、2021 年 10 月頃より上昇を初めた噴気孔 H の噴気温は、2021 年 12 月頃に 100℃を超え、2022 年 4 月まで上昇が続いており（107.1℃、2022/4/20）、活発な活動が示唆される（図 11）。噴気孔 H の温度上昇と調和するように、Y2a、Y3 湯だまり pH 値の著しい低下傾向が生じていた（図 11）。また噴気活動の活発化により放出される SO₂ 量も増加しており、えびのエコミュージアムセンター付近でもしばしば SO₂ 臭が感じられた。なお、6 月 7～9 日の調査では、Y2b からの泥水流出は見られず、Y3 の水位が下がり噴気となり、Y2a の pH がやや戻ったが、噴気孔 H の温度上昇（108.5℃、6/7）は続いている（図 11）、引き続き注意を要する。

3. 硫黄山西火口及び周辺の活動（硫黄山西噴気帯）

硫黄山西噴気帯の川湯周辺では、昨年 12 月頃には地熱域の減少が見られたが、2022 年 5 月になって、K7、K2 などの噴気活動の変化を確認した（図 7）。5 月 18 日の調査では、K2 では噴気音を伴う高さ約 10 m の噴気が生じ、噴気地点には長径 1.1 m、短径 0.8 m、深さ 0.3 m の熱水を伴う陥没孔が形成され、陥没孔から白濁水が川湯（赤子川）へ直接流出していることも確認した（図 9）。なお、4 月 20 日調査の際には音を伴う噴気は見られず、5 月 14 日の調査においてはじめて湧出・噴気を確認されたことから、この頃に活発化したと考えられる。同様に、川湯と西火口の間にある U3 においても熱泥水を伴う陥没孔が新たに形成されていることを確認し（図 8）、簡易測定による火山ガスの SO₂ 量も高濃度を示した。以前より活動している M8 では、熱泥水孔周辺に、泥の飛沫が 2.5 m ほどの拡がりで見られ

ている状況も確認できた(図 10). 2017 年 4 月 26 日のジェット噴気孔(噴気孔 A)形成に伴い数百 m に広がるような泥質灰(Tajima et al., 2020)が認められたが, 2022 年 5 月 18 日の調査において M8 では広範囲の降灰は認められていない. その他, K3 湧水点では 4 月 20 日に 33.0℃であった湯温が, 5 月 18 日には 55.0℃と上昇していた(図 12). その後, 6 月 7 日には 50.2℃に若干低下したが, 引き続き注意を要する. また, K2 の水位は, 6 月 7 日にわずかに低下していたが, 河床での湧出のため降雨等により容易に流出すると推定される.

2018 年 4 月 20 日から活動を始めた西火口は, 特に W4 火口では噴火後から長期に渡り噴湯を伴う湯だまりが継続してみられ, 活発な活動を行ってきた. しかしこの活動における噴気温は 2020 年 12 月をピーク(125.6℃)に低下し(図 12), 何度かの活動の波があったものの, 2022 年 5 月 18 日にはほぼ活動停止状態になっている.

一方, W4 の北側に隣接する W3, W2 周辺では熱泥水を伴う噴気が生じるなど 2~3 年ぶりに地熱活動が活発化している.

* 田島靖久・松島 健・石橋純一郎・前野 深

【謝辞】

本研究の一部は、文部科学省による「次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト(課題 B4)」, 「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画(第 2 次)」, 東京大学地震研究所共同研究プログラムおよび九州大学「実践的火山専門教育拠点」プログラムの援助を受けた. 現地調査の際には, 噴気温等の測定は九州工業(株)に, 安全確保のために気象庁鹿児島地方気象台に火山活動監視を依頼した.

【文献】

Tajima, Y., Nakada, S., Maeno, F., Huruzono, T., Takahashi, M., Inamura, A., Matsushima, T. Nagai, M. and Funasaki, J. (2020) Shallow magmatic hydrothermal eruption in April 2018 on Ebinokogen Ioyama volcano in Kirishima volcano group, Kyushu, Japan. *Geosciences*, 10:183.

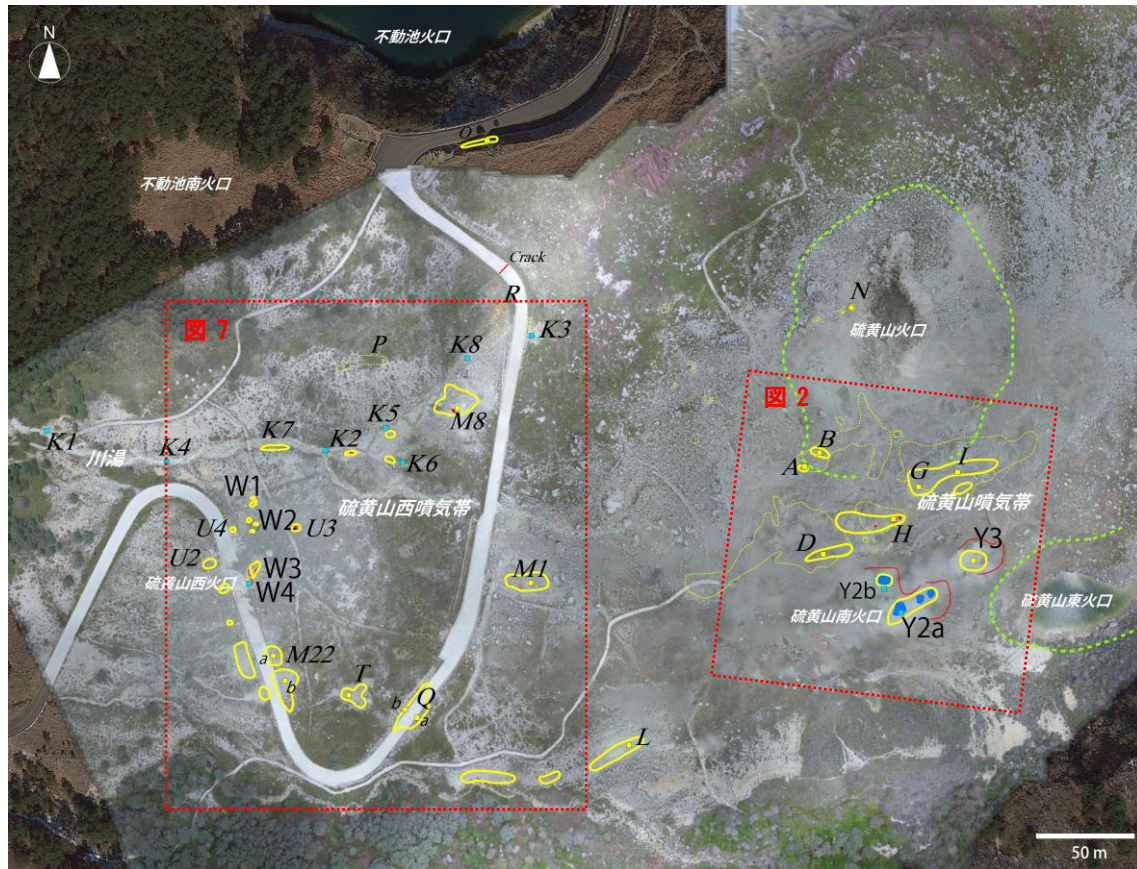


図 1 硫黄山噴気帯・硫黄山西噴気帯周辺の熱異常及び熱水の位置図 (2022 年 5 月 18-22)

基図はドローン撮影より図化し, 色調の異なる外側は Google Earth (Google Earth © 2018 ZENRIN 2018)による。緑破線:旧火口地形。黄線:2020 年 11 月 25 日噴気域。黄破線:2018 噴火前に見られた噴気域。赤線:2018-火口地形。赤塗:噴気・熱水孔。赤破線は活動が停止。黄四角:噴気観測定点, 青四角:水温観測定点。位置や名称は, Tajima et al.(2020)に基づく。

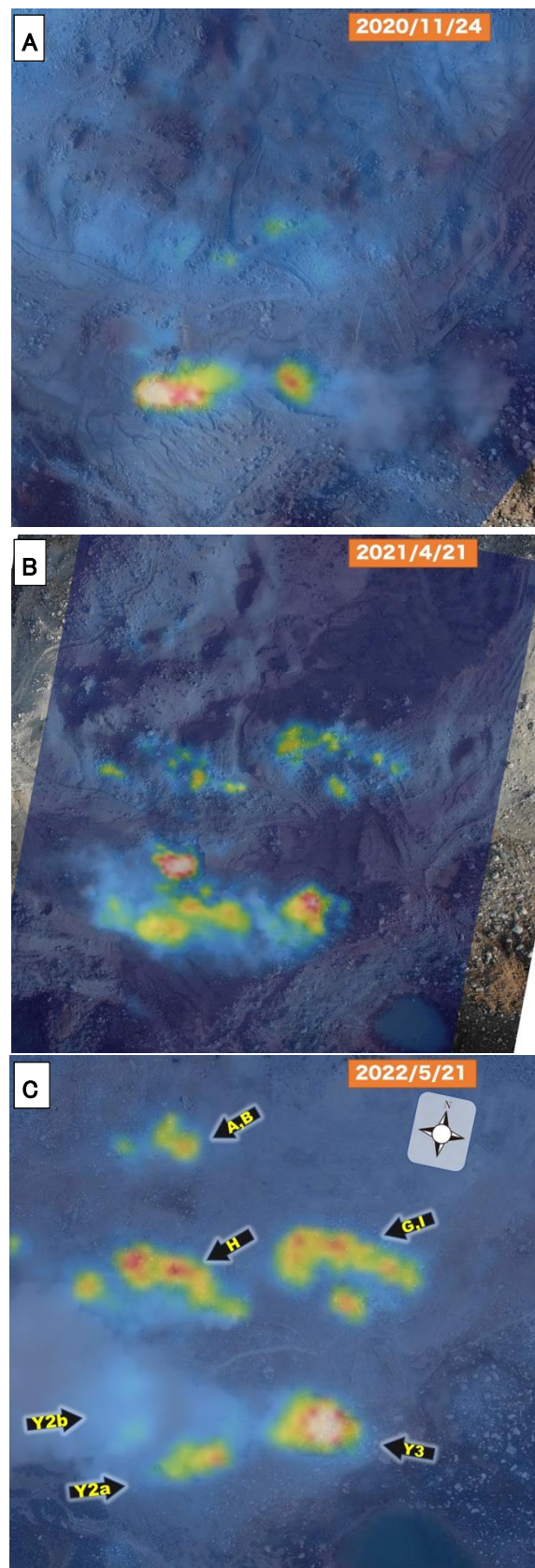


図 2 ドローン調査による硫黄山噴気帯の地熱活動

A. 2020年11月24日, Y2a, Y3以外の地熱活動が衰える. B. 2021年4月21日, H, G, I周辺の地熱域が拡大する. C. 2022年5月21日, H, G, I周辺の地熱域が鮮明となり, A, B周辺の地熱域も広がる.

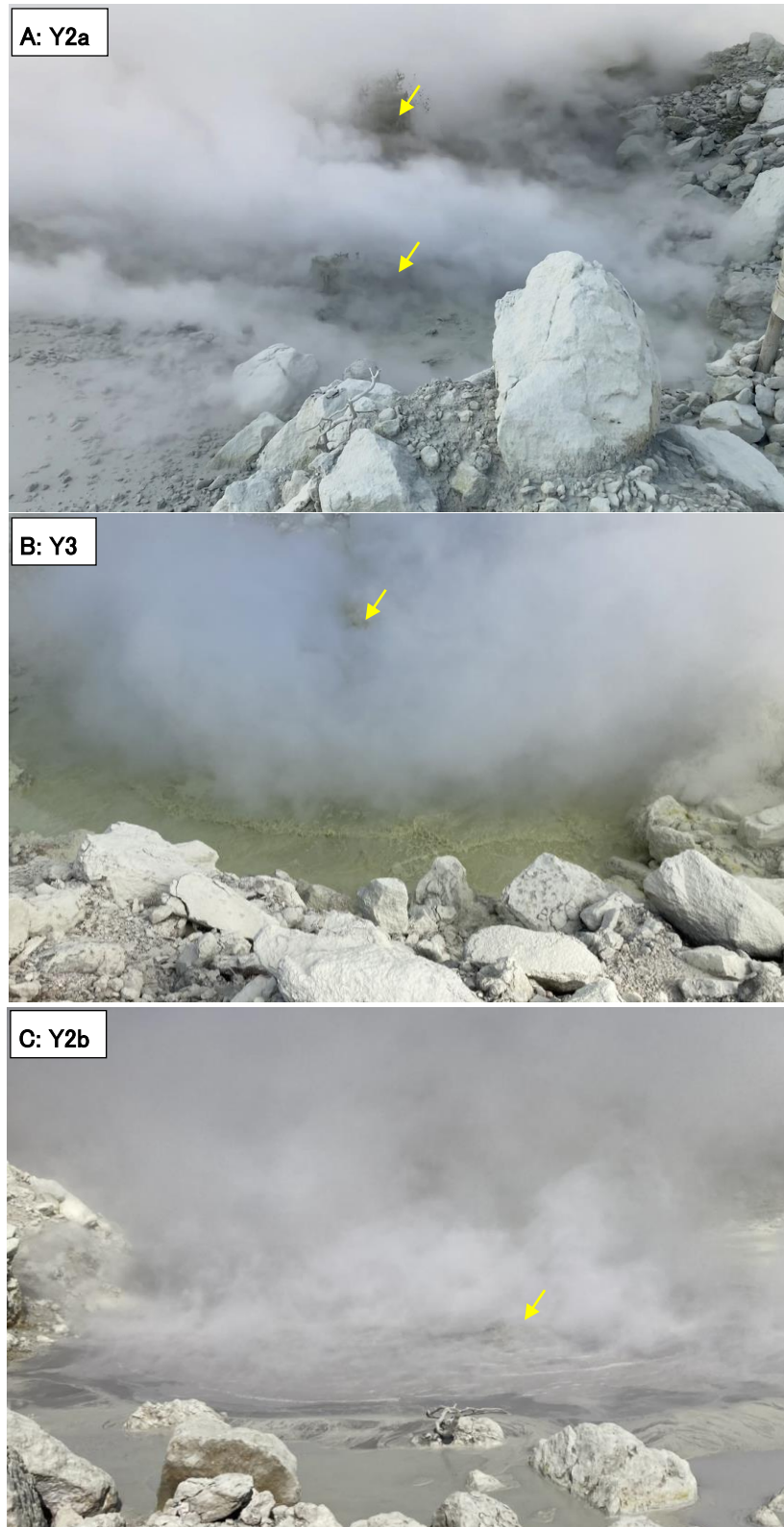


図 3 硫黄山南火口の活動(2022 年 5 月 18 日)

A. Y2aでは, 複数地点から噴湯(黄矢印)が生じていた. B. Y3では, 湯だまりが形成され, 1mを超える噴湯(黄矢印)が生じていた. C. Y2bでは, 湯溜まりに高さ約50cmの連続的な噴湯(黄矢印)が生じていた.

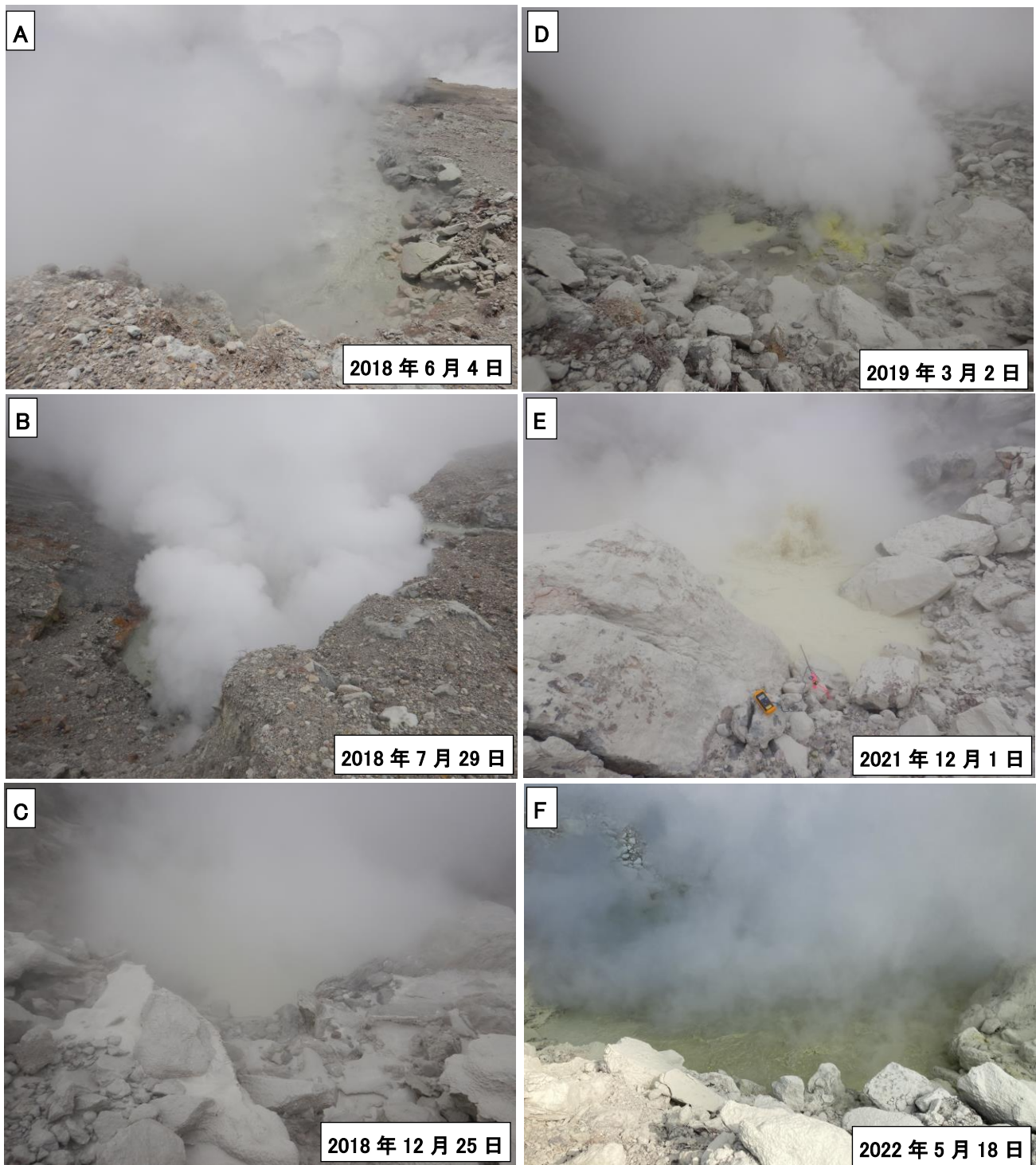


図 4 硫黄山南火口(Y3)で生じた過去の湯だまりと 2022 年 5 月 18 日の湯だまり

A. 2018年6月4日, 灰～緑灰色の湯だまり. B. 2018年7月29日, 灰～緑灰色の湯だまり. C. 2018年12月25日, 灰～緑灰色の湯だまり. これ以降, 湯だまりはほぼ見られなくなる. D. 2019年3月2日, 小さな湯だまりが見られる. E. 2021年12月1日, 一時的に湯だまりが見られたが, Y3火口の底に浅く溜まる程度である. F. 2022年5月18日, 湯だまりはC写真に近い水位であり, 5月22日もほぼ同水位であることを確認した.

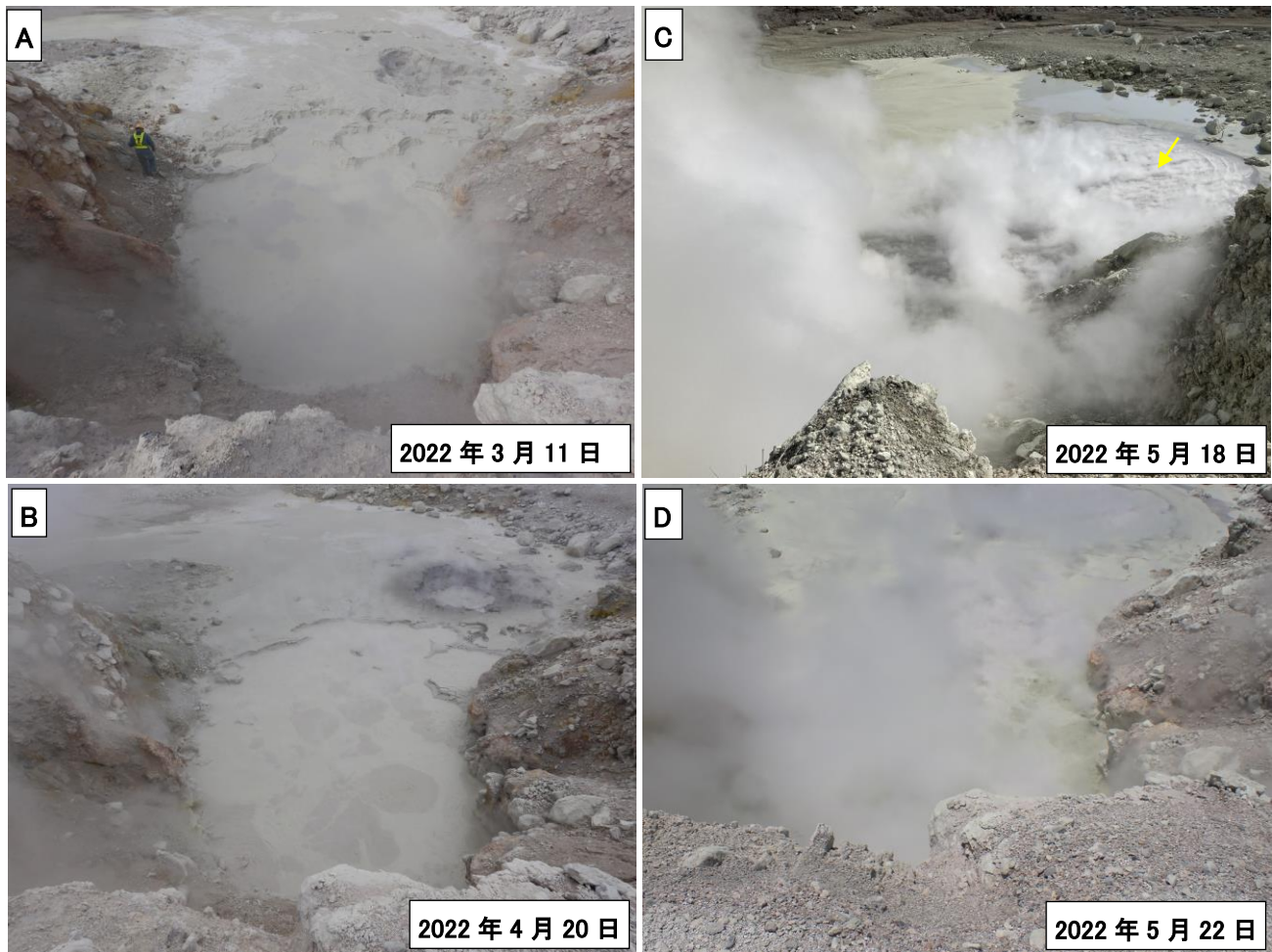


図 5 硫黄山南火口(Y2b)の地熱活動

A. 2022年3月11日, 灰色に濁った湯だまり。灰暗パッチ部はガス湧出箇所。写真奥の小穴に湯は見られない。B. 2022年4月20日, 灰暗パッチ部はガス湧出箇所。写真奥の小穴に湯が見られる。C. 2022年5月18日, ガス湧出量が多く噴気に覆われる。写真奥の小穴からはドーム状の噴湯が見られる(図2C)。D. 2022年5月22日, ガス湧出量が多く噴気に覆われる。奥の小穴の水位がやや低下した。



図 6 硫黄山南火口 Y2b からの泥水流出跡(2022 年 5 月 18 日)

A. Y2bから流出した泥水の跡。B. 下流に流出した泥水跡。堆積物は湿っており, ごく最近流出したものと推定される。

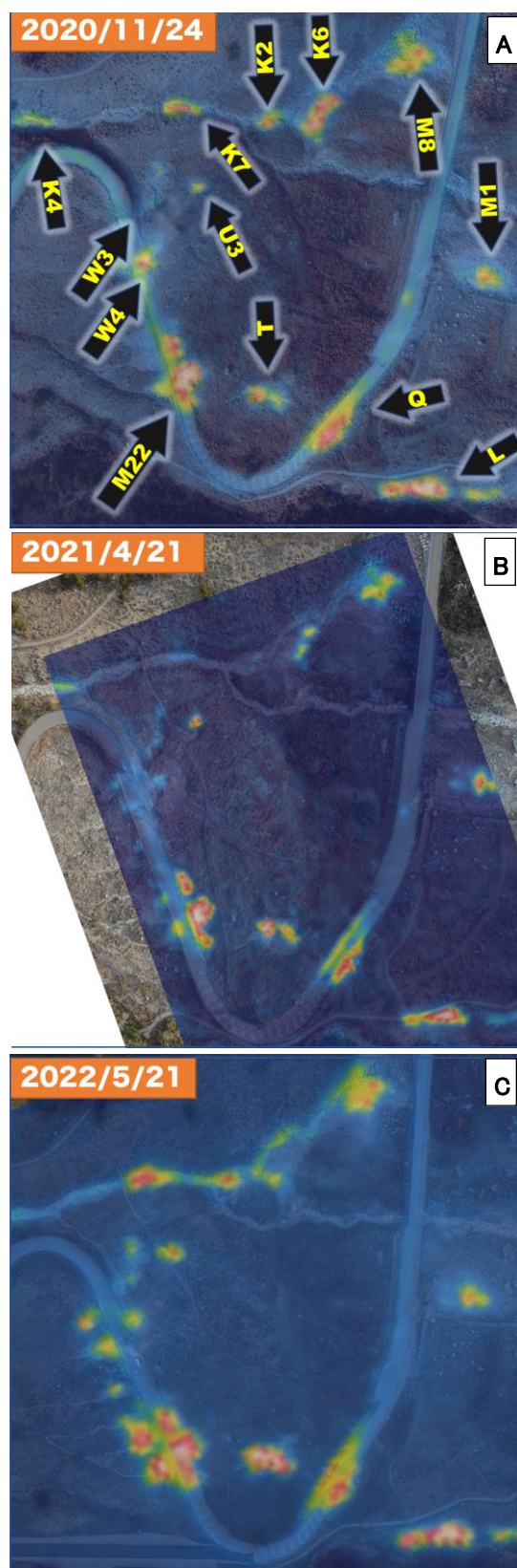


図 7 ドローン調査による硫黄山西噴気帯の地熱活動

A. 2020年11月24日. B. 2021年4月21日, W4及びK7, K2, K6の川湯沿いの地熱活動が衰える. C. 2022年5月21日, 川湯沿いの地熱活動が活発化し, M22周辺の地熱域も広がる.

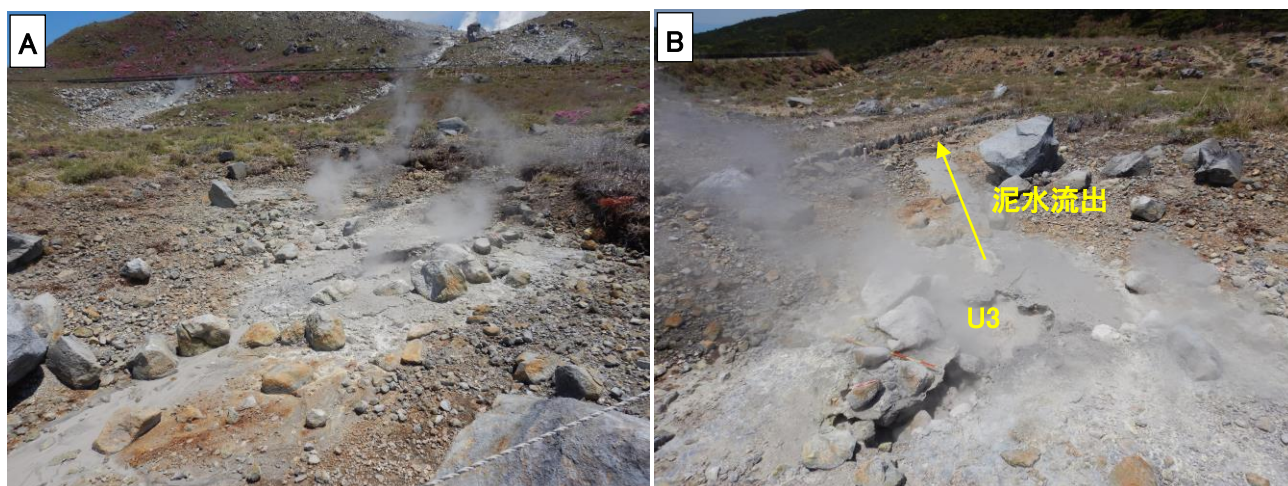


図 8 硫黄山西噴気帯 U3 に新たに形成された熱泥水孔と噴湯(2022 年 5 月 18 日)

A. U3に形成された熱泥水孔, 長径1.1m, 短径0.8m, 深さ0.3m. B. U3熱泥水孔は噴湯しており, 下流への泥水流出も見られた.

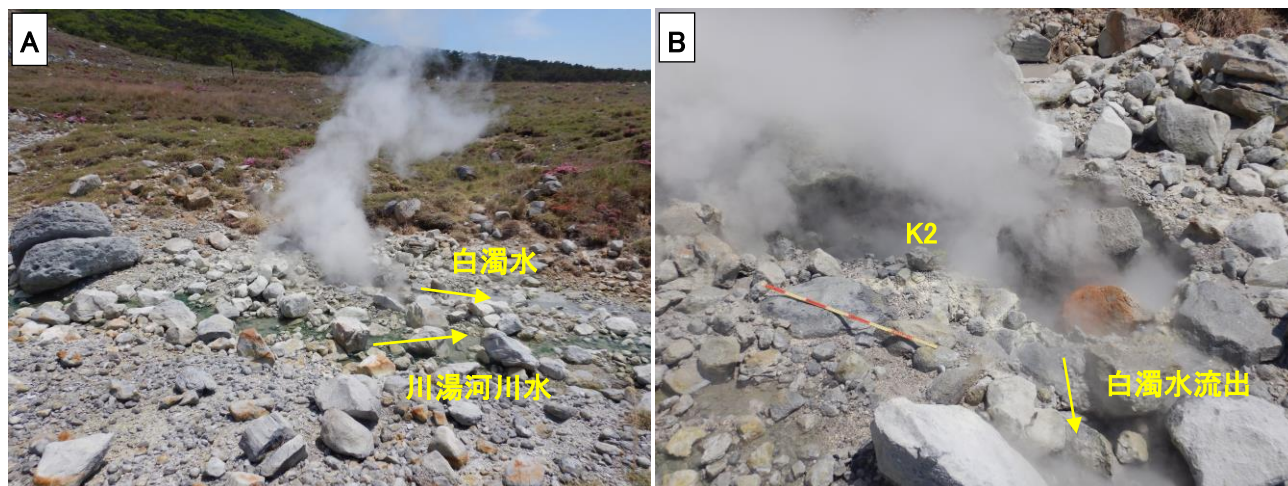


図 9 硫黄山西噴気帯 K2 に新たに形成された熱水孔と噴湯(2022 年 5 月 18 日)

A. 川湯河床に形成された熱水孔, 下流へ白濁水が流出していた. B. K2熱水孔(長径2.0m, 短径1.2m, 深さ0.4m)は噴湯しており, 下流への白濁水流出が確認できる.

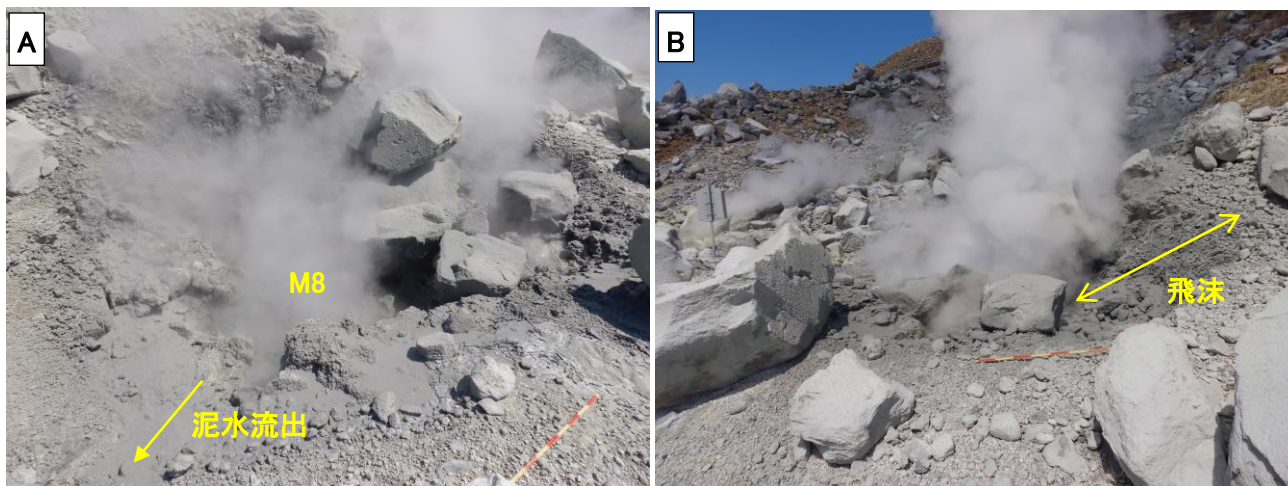


図 10 硫黄山西噴気帯 M8 の熱泥水孔と噴湯(2022 年 5 月 18 日)

A. M8から流出した泥水. B. M8周辺(約2.5m)は泥の付着により変色しており, 飛沫が飛散したと考えられる.

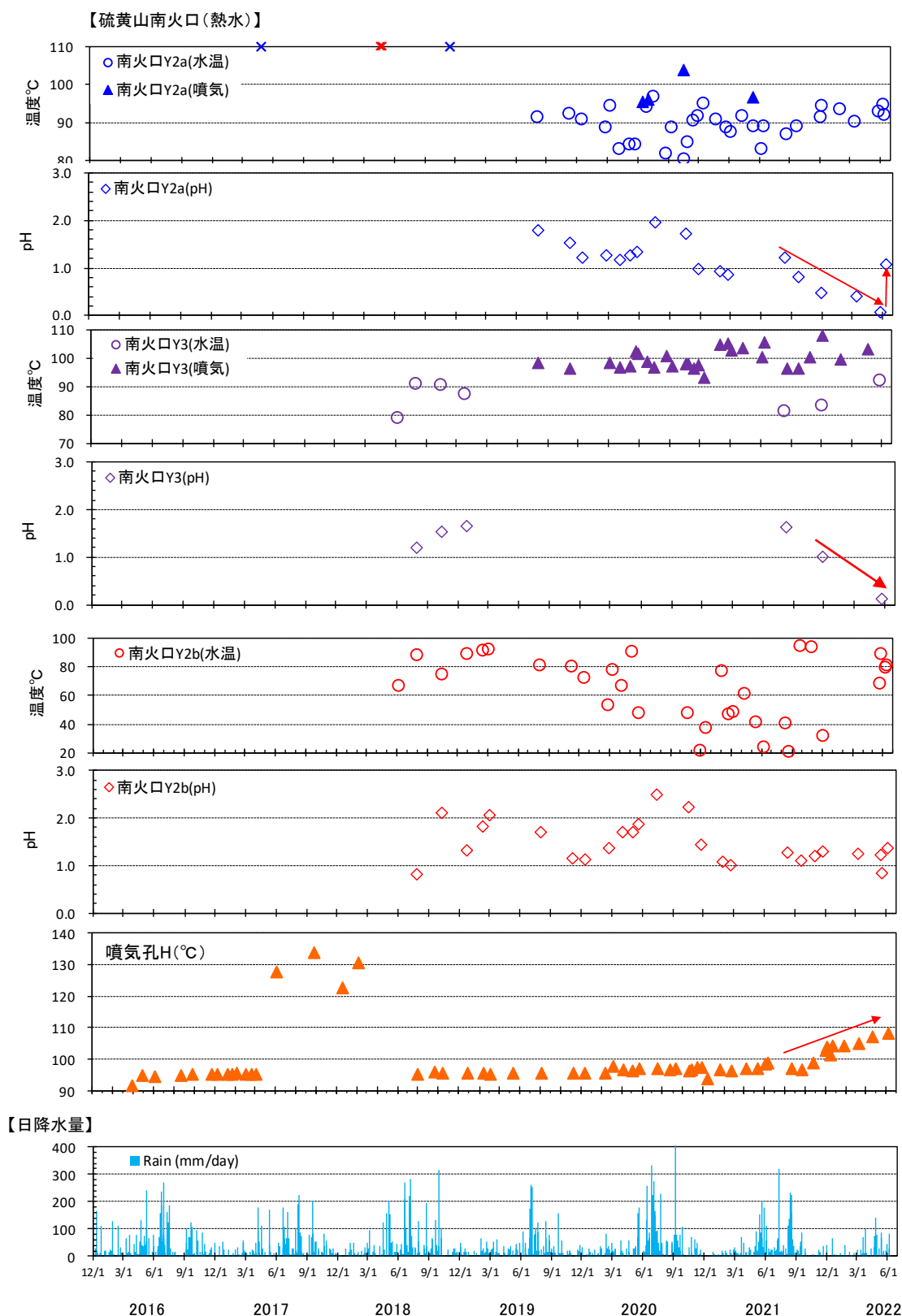


図 11 硫黄山南火口周辺の湯だまり・噴気の測定結果(位置は図 1 参照)

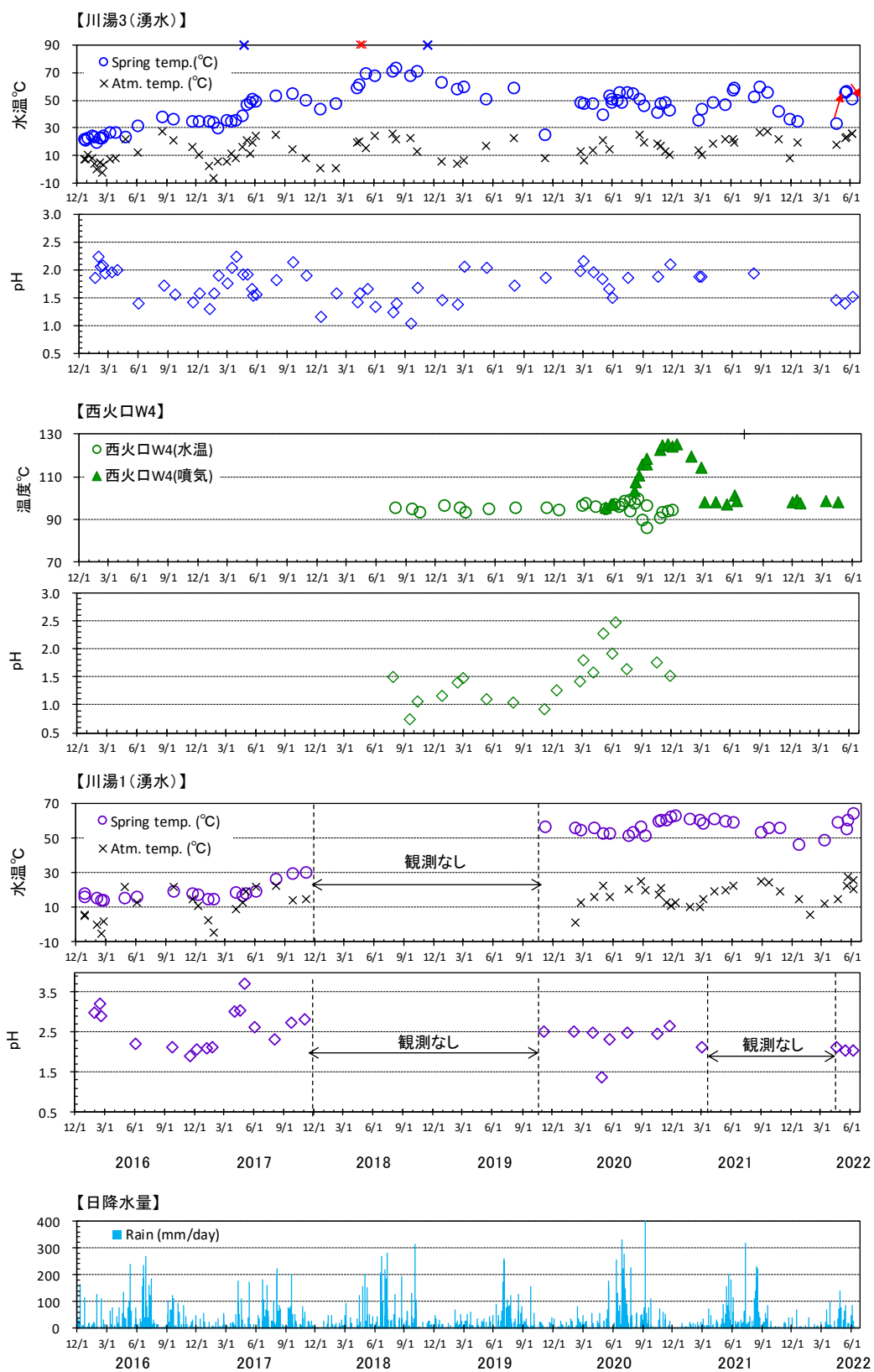


図 12 硫黄山西噴気帯の湯だまり・噴気・湧水の測定結果(位置は図 1 参照)

硫黄山・硫黄山西噴気帯の K3 湧水及び噴気孔 H, A の温度変化

硫黄山噴気帯・硫黄山南火口では，非常に活発な噴湯現象や湯だまりの形成を確認され，硫黄山西噴気帯では，川湯沿いに新たな熱水湧出や噴気活動の活発化が見られた。

K3 湧水，噴気孔 H・A の過去の温度変化とイベントの関係を整理し，2022 年 5 月からの活発化は K3 湧水温から見ると 2018 年噴火直前の温度上昇以上である。直近観測において K3 湧水の温度上昇，噴気孔 H の高温噴気が継続しており，南火口周辺での活動度が高まっていると考えられる。

1. 概 要

えびの高原（硫黄山）周辺の南火口，西火口周辺を含む硫黄山及び硫黄山西噴気帯では（図 1），2022 年 5 月に入り表面活動に活発化がみられた。地熱活動と相関性があると考えられる K3 湧水，噴気孔 H 及び A の噴気の温度変化とイベントの関係を整理した。

2. K3 湧水地点の温度変化とイベント

K3 は硫黄山溶岩の西端の湧水地点であり，2015 年 12 月より温度，pH の観測を続けている。本湧水地点は，2017 年のジェット噴気孔形成とその後，2018 年の噴火前に水温の上昇が認められ，水温上昇はイベントと何らかの関連があると考えられている（Tajima et al., 2020）。以下に水温上昇期とそれに比較するイベントを整理する（図 2）。

A：2017 年 3 月～5 月の水温上昇：ジェット噴気孔 H, A の形成イベント（図 2A）

B：2018 年 2 月～5 月の水温上昇：熱水噴火（硫黄山南火口・西火口の形成）（図 2B）

C：2022 年には 4 月 20 日に 33℃であった K3 水温が，5 月 18 日には 55℃と上昇した（図 2C）。現地調査において 5 月 14 日頃から K2 地点で熱水孔形成と音を伴う噴気が見られ，5 月 18 日には硫黄山南火口において湯だまり形成や噴湯などの活発な活動を確認した。その後，K3 水温は 6 月 7 日に 50.2℃と一端低下したが，6 月 28 日には 58.4℃と上昇し，7 月 1 日は 57.3℃であった。

3. ジェット H 噴気孔・噴気孔 A の温度変化とイベント

ジェット噴気孔 H は，2017 年 4 月以降に活動を開始し，2018 年 4 月 19 日噴火前は約 130℃の噴気温を維持していた（図 3）。また，噴気孔 A は，2018 年噴火直前には沸点（約 96℃）より高い温度（約 98℃）となっていた（図 3）。2018 年の噴火場所は Y2a, Y3, Y2b と噴気孔 H・A とは異なるが，これらの噴気孔の温度変化も，地熱域での活動の活発化を反映している可能性が考えられる。

ジェット噴気孔 H は，2021 年 12 月 1 日に 103.4℃と明らかに高い温度を確認し，その後徐々に上昇し 6 月 7 日には 108.5℃となった（最新は 6 月 28 日の 106.2℃）。また，噴気孔 A は 2021 年 8 月 21 日に 86.8℃まで低下したが，その後上昇し，12 月 1 日に 98.0℃，最新では 2022 年 6 月 7 日に 97.0℃となっている。

現在のジェット噴気孔 H の噴気温は 2018 年 4 月噴火直前より低い，加圧された状態の噴気が噴出していることに疑いがない。なお，噴火後は噴気孔 H に近接した硫黄山南火口

で活発な熱放出活動が行われているため，その影響を受けている可能性も考えられる．

噴気孔 A は，僅かな温度変化のため評価が難しいが，2021 年 12 月以降は沸点よりやや高い温度（概ね 97℃台）となっている．97℃台の噴気温度は，2018 年 4 月噴火後から 2021 年 12 月まで観測されておらず，この結果も地下熱水系の加圧状態が示唆される．

4. 2022 年の地熱活動活発化について

ジェット噴気孔 A 形成を挟んだ 2017 年 4 月 2 日～5 月 23 日の K3 湧水温の上昇率は 0.30 °C/day，2018 年噴火を挟んだ 2018 年 4 月 10 日～5 月 9 日間の上昇率は 0.34 °C/day であった．2022 年 4 月 20 日～5 月 18 日もしくは 6 月 28 日間でもみた場合，それぞれ 0.79 °C/day，0.37 °C/day となり，上記のイベント時に匹敵もしくはそれ以上の上昇率を示した（各上昇率は暫定値）．一方 2017 年のジェット噴気孔 A 形成，2018 年の熱水噴火では，いずれも直前に熱泥水湧出が伴っていたが（図 4，図 5），今回硫黄山噴気帯では新たな熱泥水の湧出は見られず，5 月 18 日の Y2b や Y3 での高水位や活発な噴湯は，2018 年噴火後と似た状態であった（本報告資料）．K3 水温の上昇は，極浅部の熱水系（図 8 の IhA）での圧力増加によると推定され，直近観測でも温度が上昇しており熱水系 IhA で増圧が継続している可能性が考えられる．また，噴気孔 H・A の温度上昇も IhA 付近での増圧を示唆しており，南火口周辺での活動が高まっていると考えられる．IhA での増圧は，熱水溜まり IhB からの火山性流体の供給によって生じると推定され，継続的な監視が必要となる．

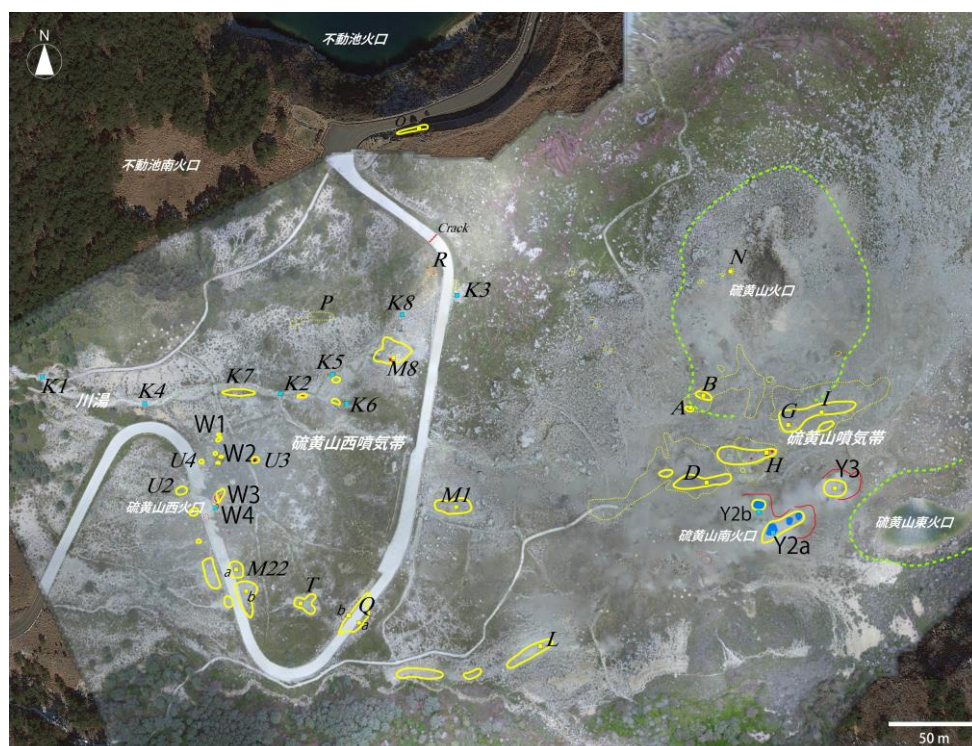


図 1 硫黄山噴気帯・硫黄山西噴気帯周辺の位置図（2022 年 5 月 18-22 及び 6 月 8 日）

基図はドローン撮影より図化し，色調の異なる外側は Google Earth (Google Earth © 2018 ZENRIN 2018)による．緑破線：旧火口地形．黄線：2022 年 5 月 18-22 日及び 6 月 8 日の噴気域．黄破線：2018 噴火前に見られた噴気域．赤線：2018-火口地形．赤塗：噴気・熱水孔．赤破線は活動が停止．黄四角：噴気観測定点，青四角：水温観測定点．Tajima et al.(2020)に基づく．

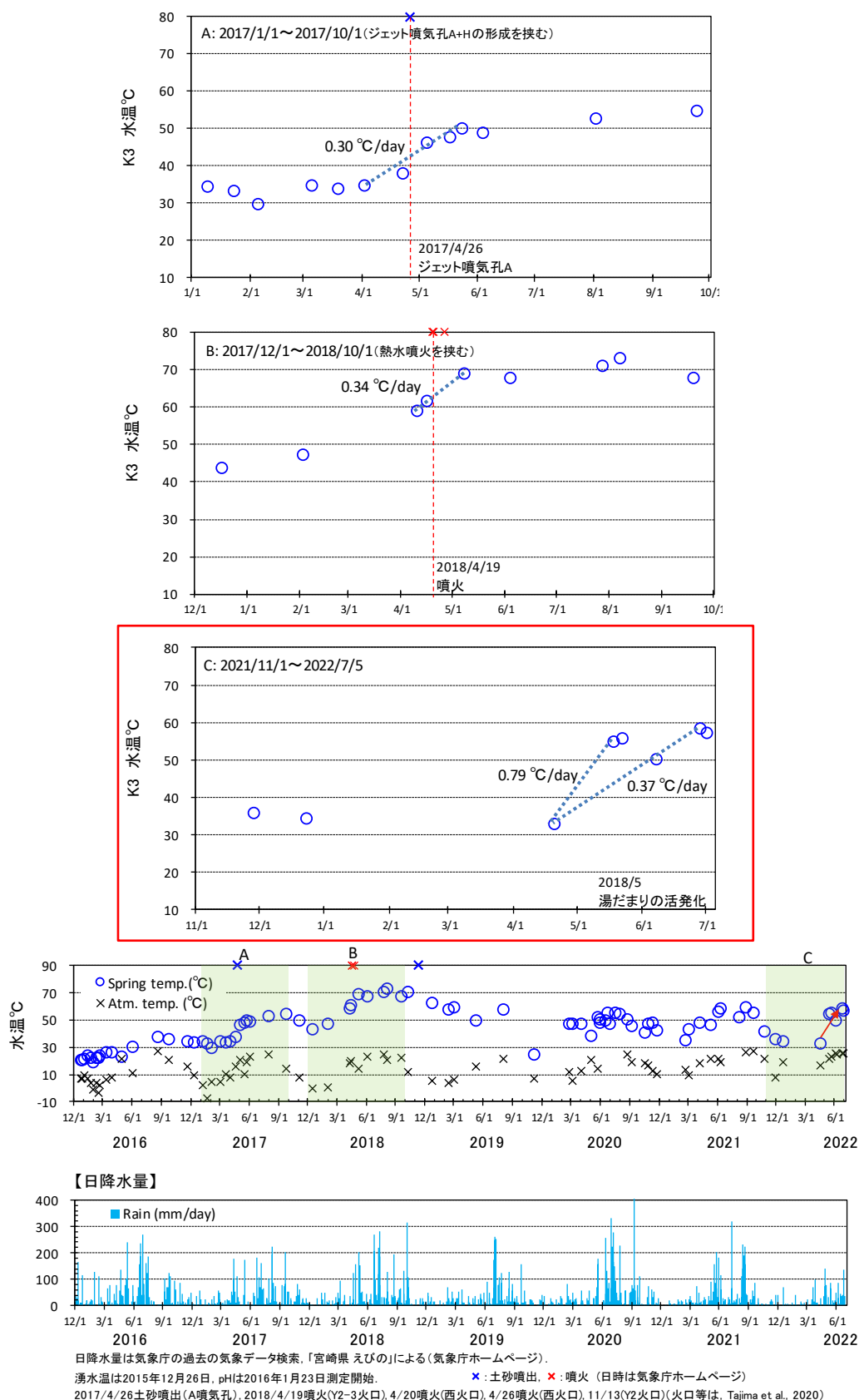


図 2 K3 湧水点の水温上昇とイベントの関係（位置は図 1 参照）

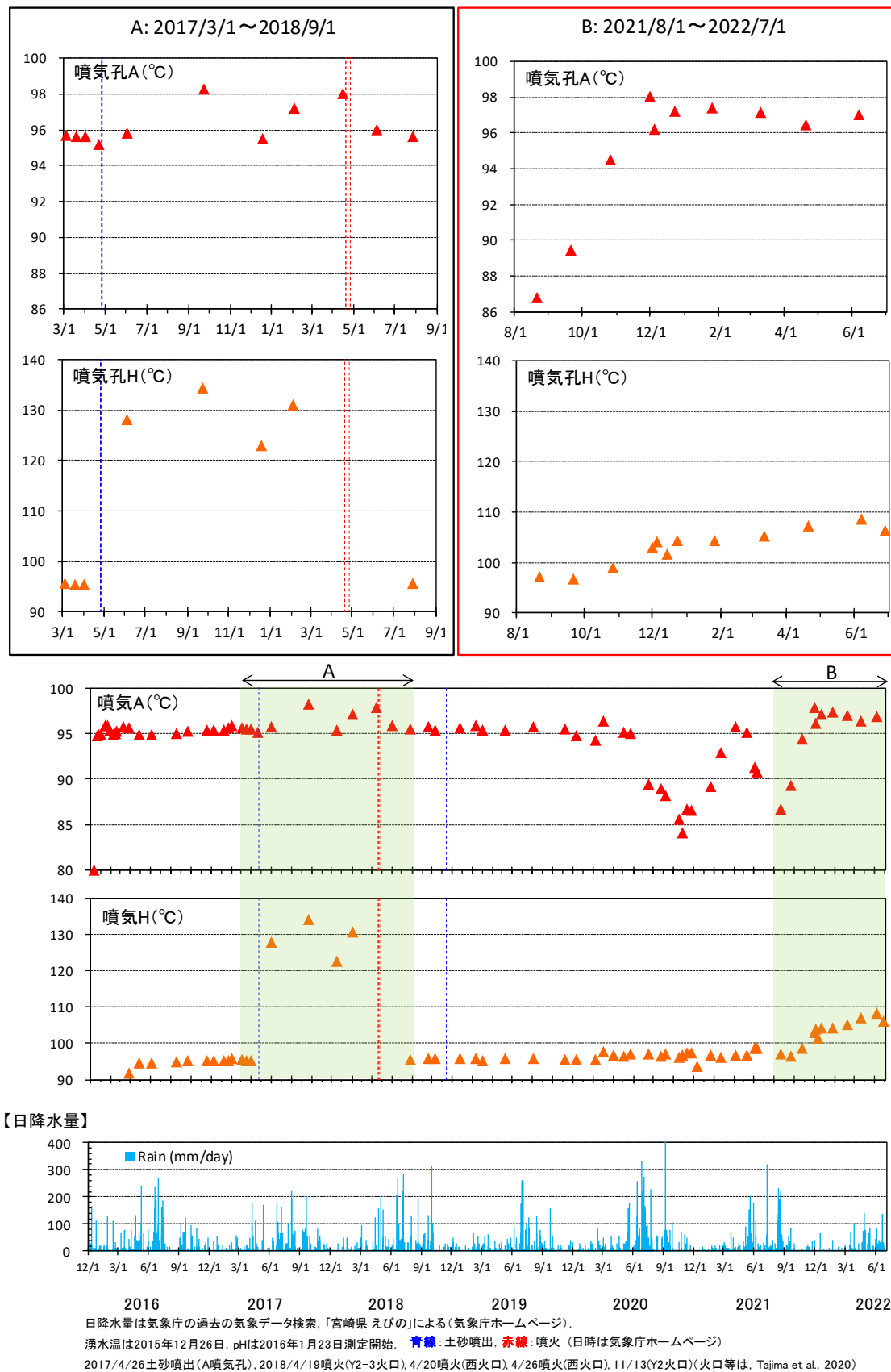


図 3 噴気孔 A・噴気孔 H の噴気温度とイベントの関係 (位置は図 1 参照)

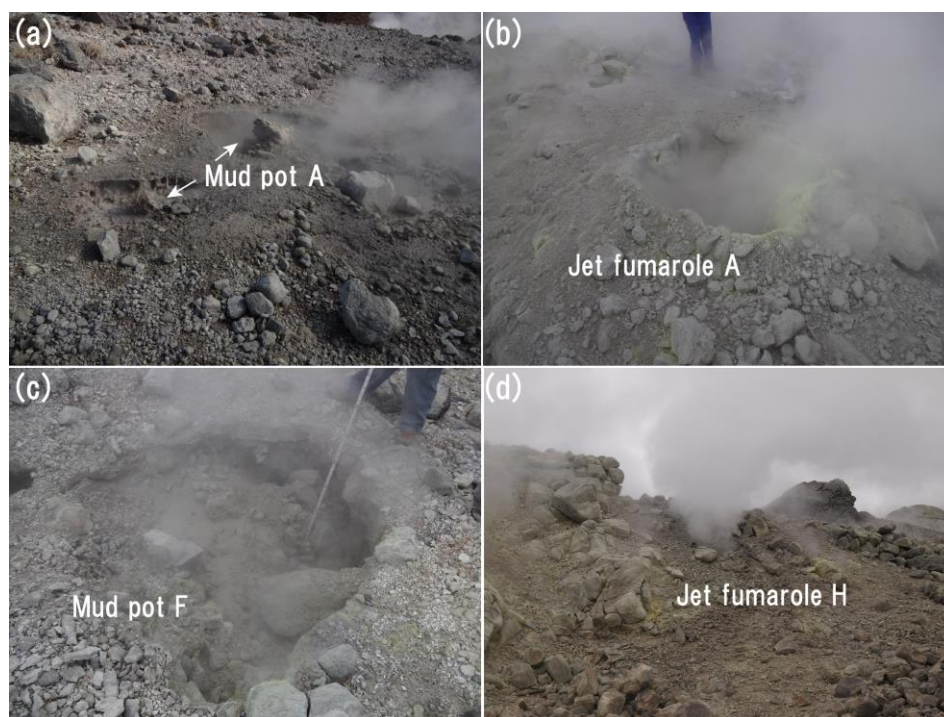


図 4 2017 年ジェット噴気孔形成イベント直前に生じた現象 (Tajima et al., 2020)

(a) 2017 年 3 月 19 日直前に現れた熱泥水孔 A (撮影: 2017 年 3 月 19 日), (b) 2017 年 4 月 26 日に形成されたと推定されるジェット噴気孔 A (撮影: 2017 年 5 月 7 日), (c) 2017 年 3 月 19~21 日に現れたと推定される熱泥水孔 F (撮影: 2017 年 4 月 22 日), (d) 2017 年 4 月 15~18 日間に形成されたと推定されるジェット噴気孔 H (撮影: 2017 年 4 月 22 日).

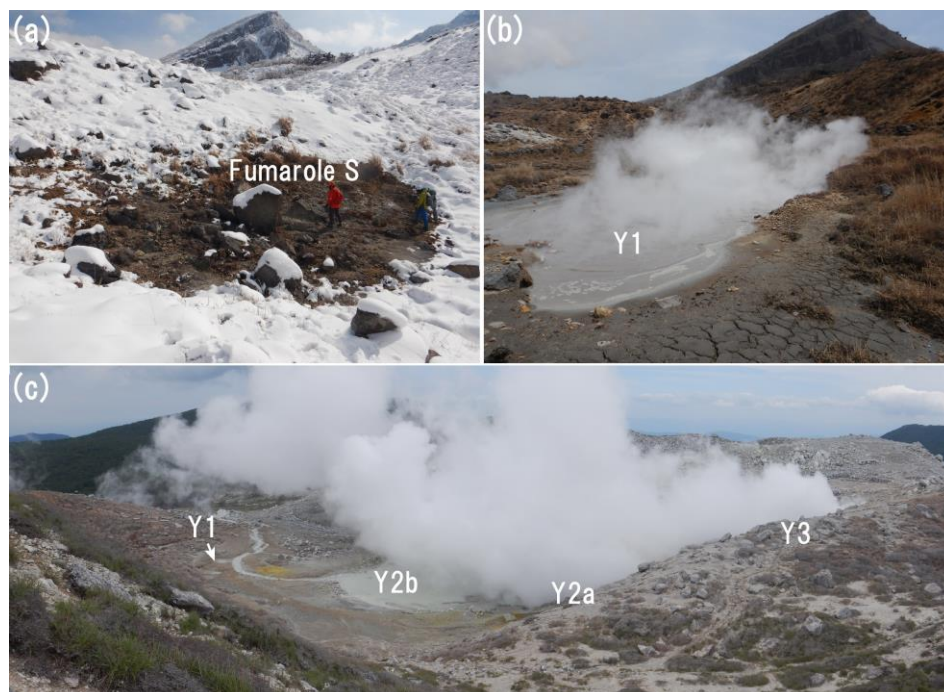


図 5 2018 年 4 月噴火直前に生じた現象 (Tajima et al., 2020)

(a) 噴火地点付近に突然現れた新噴気域 S (撮影: 2018 年 2 月 3 日), (b) 噴火直前の 4 月 7 日から現れた湯だまり (撮影: 2018 年 4 月 16 日), (c) 2018 年 4 月 19 日からの噴火によって形成された硫黄山南火口 (撮影: 2018 年 6 月 4 日).

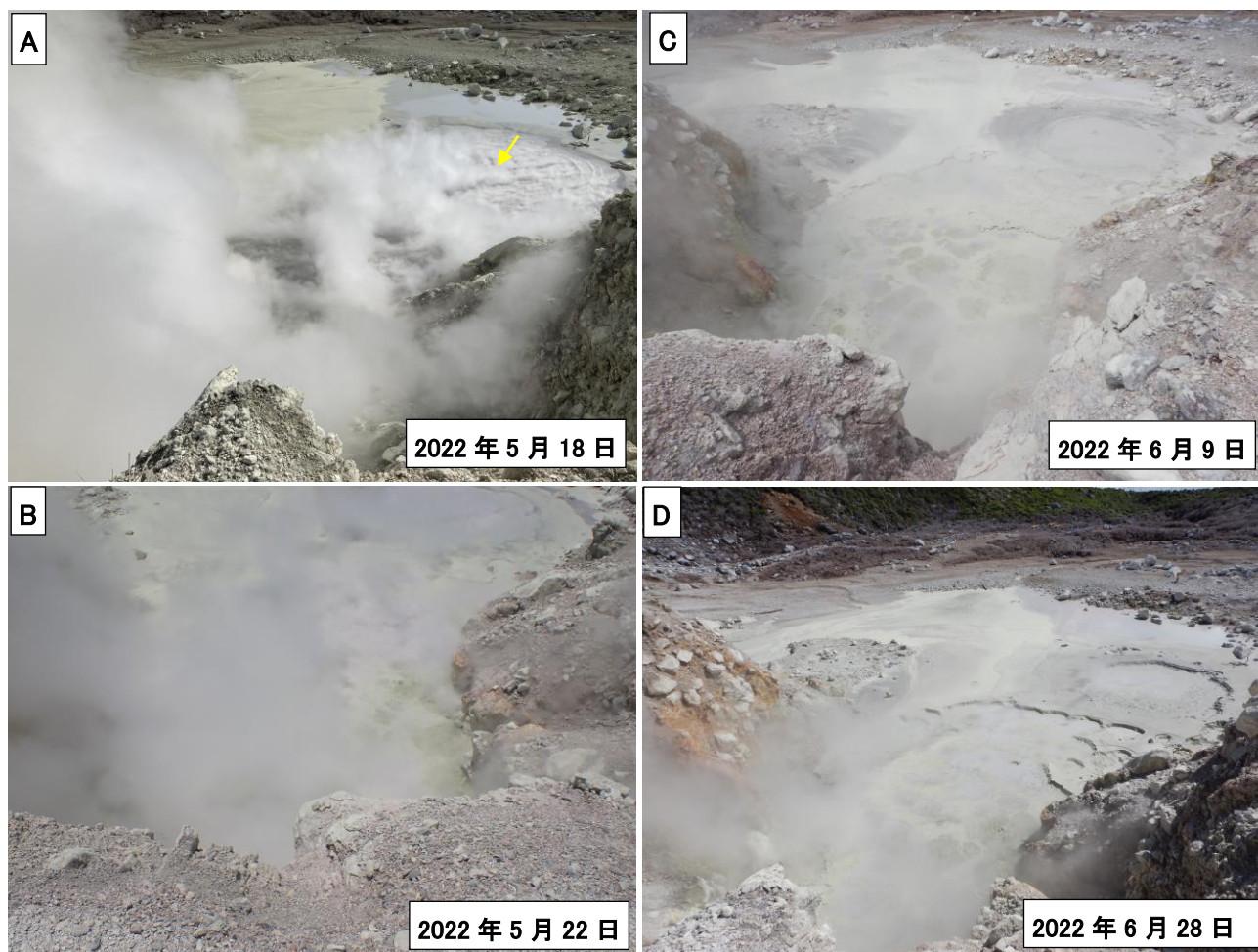


図 6 硫黄山南火口(Y2b)の湯だまりの変化

A. 2022年5月18日，ガス湧出量が多く噴気に覆われる。写真奥の小穴からは活発な噴湯が見られる。B. 2022年5月22日，ガス湧出量が多く噴気に覆われる。奥の小穴の水位がやや低下した。C. 2022年6月9日，ガス湧出量が多く，写真奥の小穴には湯だまりが見られる。D. 2022年6月28日，ガス湧出量が多く噴気に覆われる。奥の小穴の水位に大きな変化はない。



図 7 硫黄山西噴気帯 K2 に形成された熱水孔と噴湯

A. K2熱水孔（長径2.0m，短径1.2m，深さ0.4m）は噴湯しており，下流への白濁水流出が確認できる。B. K2熱水孔は噴湯しており，下流への白濁水流出はやや減っていたが，降雨時には流出すると推定される。

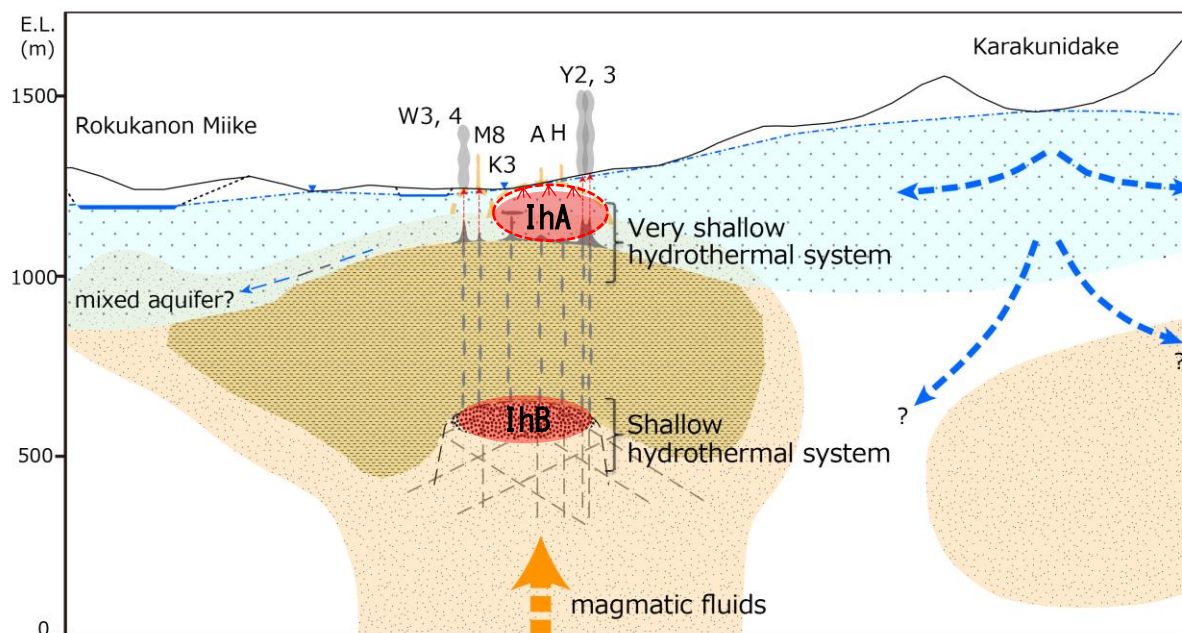


図 8 硫黄山付近の地下における熱水系モデル(Tajima et al., 2020 を一部変更)

【謝辞】

本研究の一部は、文部科学省による「次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト（課題 B4）」、「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第 2 次）」、東京大学地震研究所共同研究プログラムおよび九州大学「実践的火山専門教育拠点」プログラムの援助を受けた。現地調査の際には、噴気温度等の測定は九州工業(株)に、安全確保のために気象庁鹿児島地方気象台に火山活動監視を依頼した。

【文献】

Tajima, Y., Nakada, S., Maeno, F., Huruzono, T., Takahashi, M., Inamura, A., Matsushima, T. Nagai, M. and Funasaki, J. (2020) Shallow magmatic hydrothermal eruption in April 2018 on Ebinokogen Ioyama volcano in Kirishima volcano group, Kyushu, Japan. *Geosciences*, 10:183.

* 田島靖久・松島 健

硫黄山周辺の熱水・湧水の化学組成の経時変動について

霧島・硫黄山周辺では 2022 年 5 月から地表の地熱活動の活発化が認められているが、南火口の湯だまりでは熱水の $\text{Cl} / (\text{Cl} + \text{HSO}_4)$ 比が 0.5 より高いことが確認された。この値は 2018 年 4 月の噴火後数か月間に観察された熱水の成分比の範囲と一致しており、噴火後の期間と同様な組成のマグマ由来成分が南火口の湯だまりに供給されていると考えられる。一方で県道から西火口にかけての地域の湯だまりには、大きな成分変化は認められなかった。

1. 試料の採取と分析

試料採取は、硫黄山南火口から県道をはさみ西火口にわたる地域で行っている。継続して採取分析を続けているのは、南火口の Y2a, Y2b, Y3 に形成された湯だまり、西火口の W4 の湯だまり、そのほぼ中間にある M8 噴気孔に形成された湯だまり、および硫黄山の北側に位置する旧市営露天風呂の源泉 Ro である。ただし南火口の Y3 では湯だまりが消滅し、噴気のみが認められる時期が長く、また西火口の W4 では 2021 年夏以後には湯だまり、噴気ともに認められなくなった。図 1 にこれらの採取地点の位置を示す。

水温, pH, EC (電気伝導度) は採水時に計測機器を用いて現場測定を行なった。化学組成については、陽イオン (Na, K, Mg, Ca) と Si, B を ICP 発光分析法により、陰イオン (Cl , SO_4) をイオンクロマトグラフィーにより、九州大学で分析を行った。

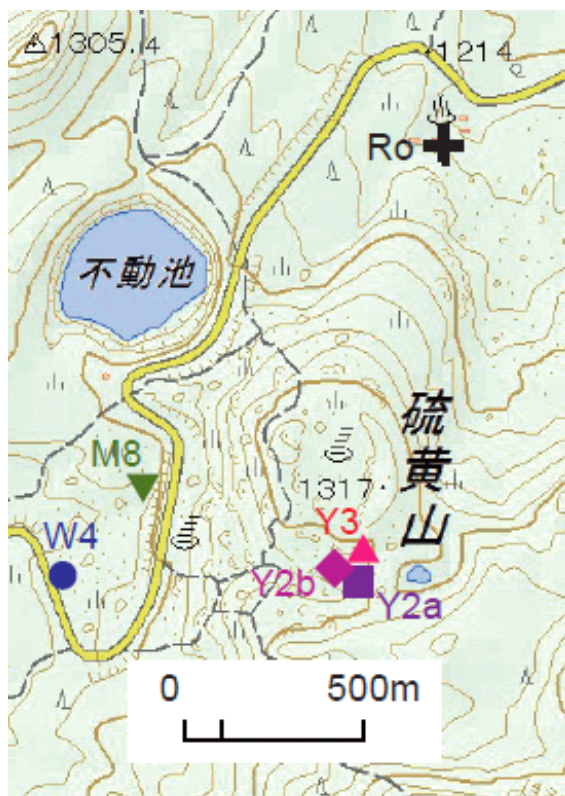


図 1 試料採取地点 (国土地理院の地図「電子国土 web」に追記)

2. 分析結果

表 1 に 2021 年 7 月以降に主な湯だまりから採取した熱水試料の測定・解析結果を示す。また図 2 に、2018 年 7 月から 2022 年 7 月までの期間における湯だまりの熱水と温泉水の $\text{Cl} / (\text{Cl} + \text{HSO}_4)$ 比 (モル比) の経時変動を示す。

表 1 硫黄山周辺の湯だまり (Y2a, Y2b, Y3, M8) の現場計測結果と陰イオン化学組成

採取地点	採取日	水温 (°C)	pH	EC (S/m)	Cl (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	Cl/SO ₄ モル比	Cl/(Cl+HSO ₄) モル比
南火口湯だまりY2a	2021/7/19	77.2	1.07	2.5	39	13200	0.01	0.008
	2021/8/10	79.6	1.23	2.4	69	7080	0.03	0.026
	2021/9/20	86.9	0.82	3.6	172	19100	0.02	0.024
	2021/11/26	81.7	0.49	10.6	1790	37800	0.13	0.115
	2021/12/17	88.1	1.04	5.7	690	13300	0.14	0.124
	2022/1/8	84.5	0.53	15.4	2760	56400	0.13	0.118
	2022/2/4	88.2	0.57	-	3190	61300	0.14	0.125
	2022/3/11	91.2	0.41	16.1	2300	51400	0.12	0.109
	2022/5/22	92.9	0.07	12.0	18500	10000	5.06	0.835
	2022/6/8	92.0	1.09	6.8	8990	8750	2.81	0.738
南火口湯だまりY2b	2021/7/19	33.7	1.24	1.5	21	6580	0.01	0.008
	2021/8/10	41.0	1.27	-	26	4290	0.02	0.016
	2021/9/20	51.3	1.09	2.8	57	7330	0.02	0.021
	2021/11/1	68.0	1.18	1.5	46	9140	0.01	0.014
	2021/11/26	61.6	1.29	1.3	78	6450	0.03	0.032
	2021/12/17	32.0	1.20	2.7	204	5510	0.10	0.092
	2022/1/8	78.1	1.27	2.8	114	6300	0.05	0.047
	2022/2/4	69.3	1.42	2.1	99	6650	0.04	0.039
	2022/3/11	76.9	1.23	2.1	51	6280	0.02	0.022
	2022/5/22	89.9	0.84	1.6	30	3240	0.03	0.025
	2022/6/8	82.0	1.35	2.8	2620	5330	1.34	0.573
南火口湯だまりY3	2021/8/10	81.4	1.63	2.1	1	6290	0.00	0.000
	2021/11/26	85.6	1.02	4.7	11	12300	0.00	0.002
	2021/12/17	87.4	1.41	1.7	6	3740	0.00	0.004
	2022/5/22	92.3	0.14	11.3	16140	4770	9.26	0.903
湯だまりM8	2021/7/19	96.6	1.72	0.5	13	3020	0.01	0.011
	2021/8/10	94.5	1.83	0.7	5	1920	0.01	0.008
	2021/9/20	93.8	1.57	0.7	18	3330	0.01	0.014
	2021/11/1	95.5	1.33	1.9	57	8500	0.02	0.018
	2021/11/26	94.5	1.67	1.9	25	6590	0.01	0.010
	2021/12/17	93.7	1.62	1.5	29	4840	0.02	0.016
	2022/1/8	93.2	-	0.9	55	3880	0.04	0.038
	2022/2/4	94.2	1.70	0.8	50	3490	0.04	0.038
	2022/3/11	94.8	1.40	1.9	48	6000	0.02	0.021
	2022/5/22	95.5	1.36	0.8	28	3220	0.02	0.023
	2022/6/8	95.2	1.84	0.7	39	2730	0.04	0.037
	2022/7/4	94.7	1.93	0.8	60	3672	0.04	0.043

- : 機器不良や安全確保などの理由で計測データなし。

3. 結果の解釈

2018 年 7 月に観測を開始して以来、湯だまり熱水・温泉水の $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{HSO}_4)$ 比が時間の経過とともに低下する長期的傾向が観察され、2020 年以降には季節的と考えられる小幅な変動が目立つようになってきた。しかし、2022 年 5 月から表面活動の活発化が認められた際には、南火口の湯だまりで $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{HSO}_4)$ 比が著しく高い比となっていることが観察された。

南火口の湯だまり Y2a, Y2b では 2019 年の 4 月から 7 月の間に熱水の $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{HSO}_4)$ 比の著しい低下があり、それ以降は $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{HSO}_4) < 0.05$ の低い値を保っていた。その中で、2021 年 1 月から 4 月および 2021 年 11 月以降の冬季に、熱水の $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{HSO}_4)$ 比が 0.1 程度まで高くなる現象が観察された。2021 年は 5 月以降に湯だまりの水位が低下し $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{HSO}_4)$ 比も元の低い値に戻ったので季節的な変動の可能性が示唆された。しかし 2022 年の 5 月には、Y3 噴気孔に再び湯だまりが形成されるなど噴気活動の活発化が認められ、これに合わせて $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{HSO}_4) > 0.5$ を超える高い比が Y3, Y2a で観察された。6 月には Y3 の湯だまりが消失し噴気のみになったが Y2a, Y2b の湯だまりで $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{HSO}_4) > 0.5$ を超える高い比が観察された。このような高い $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{HSO}_4)$ 比は 2018 年の噴火後数か月の期間に観察された熱水の $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{HSO}_4)$ 比の範囲と一致しており、噴火後の期間と同様な組成のマグマ由来成分が南火口の湯だまりに供給されていることを反映していると考えられる。

県道のすぐ下から西火口にかけての地域でも 2022 年 5 月に噴気活動の活発化が観察されているものの、この地域の湯だまりの熱水には高い $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{HSO}_4)$ 比が今のところ観察されていない。県道のすぐ下側に位置する湯だまり M8 では、水位の変動はあるものの $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{HSO}_4) < 0.05$ の低い値のままである。西火口では、2021 年の夏季以降湯だまりが消失した W4 に隣接する W3 において新たな湯だまりの形成が認められたが、この熱水の Cl 濃度は極めて低かった。これらの結果は、マグマ由来成分の直接的な供給が南火口周辺に限定されていることを示唆する。

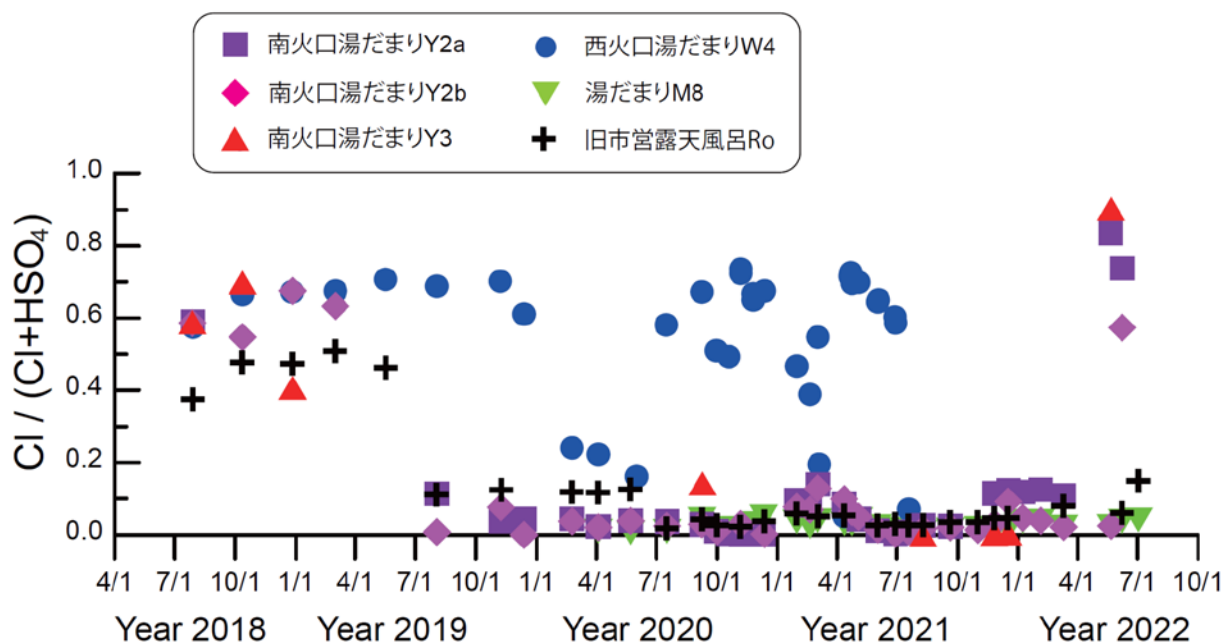
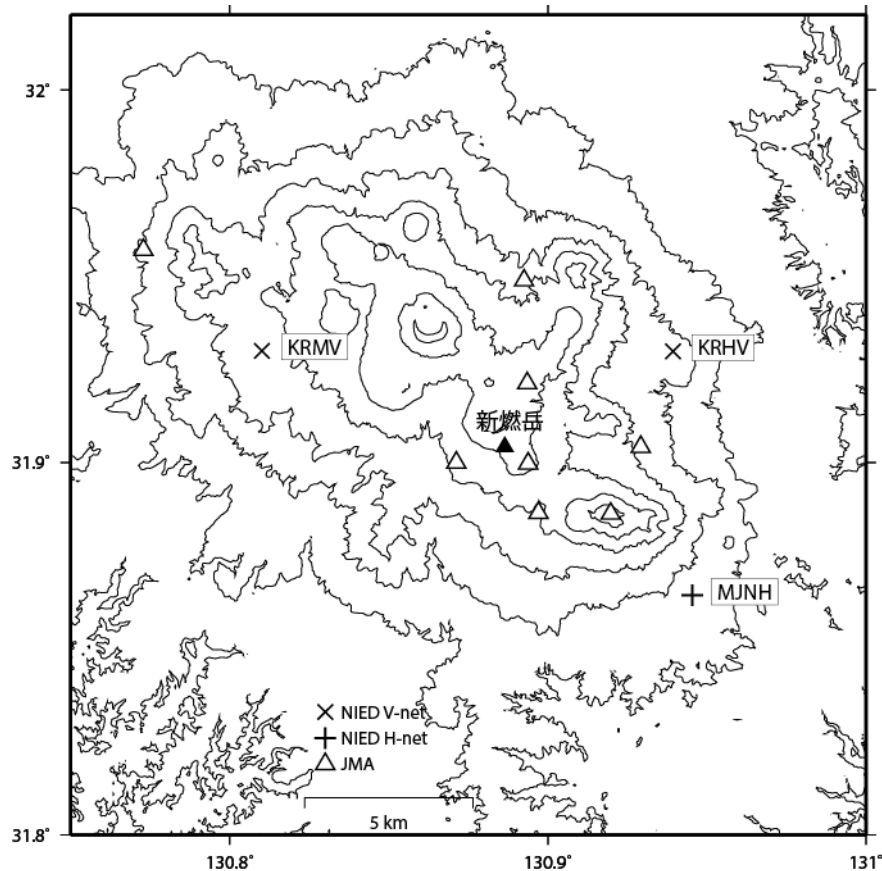


図2 霧島硫黄山周辺の湯だまりおよび温泉水の $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{HSO}_4)$ 比（モル比）の経時変動

謝辞

本研究の一部は、文部科学省による「次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト(課題 B4)」、「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画(第 2 次)」、東京大学地震研究所共同研究プログラムおよび九州大学「実践的火山専門教育拠点」プログラムの援助を受けた。また現地調査の際には、安全確保のために気象庁鹿児島地方気象台には火山活動監視を依頼した。ここに記して感謝する。

霧島山の火山活動について



この地図の作成にあたっては、国土地理院発行の
数値地図 50mメッシュ（標高）を使用した。

KRMV=地震計（短周期・広帯域）、傾斜計、気圧計、温度計、雨量計、GNSS

KRHV=地震計（短周期・広帯域）、傾斜計、気圧計、温度計、雨量計、GNSS

資料概要

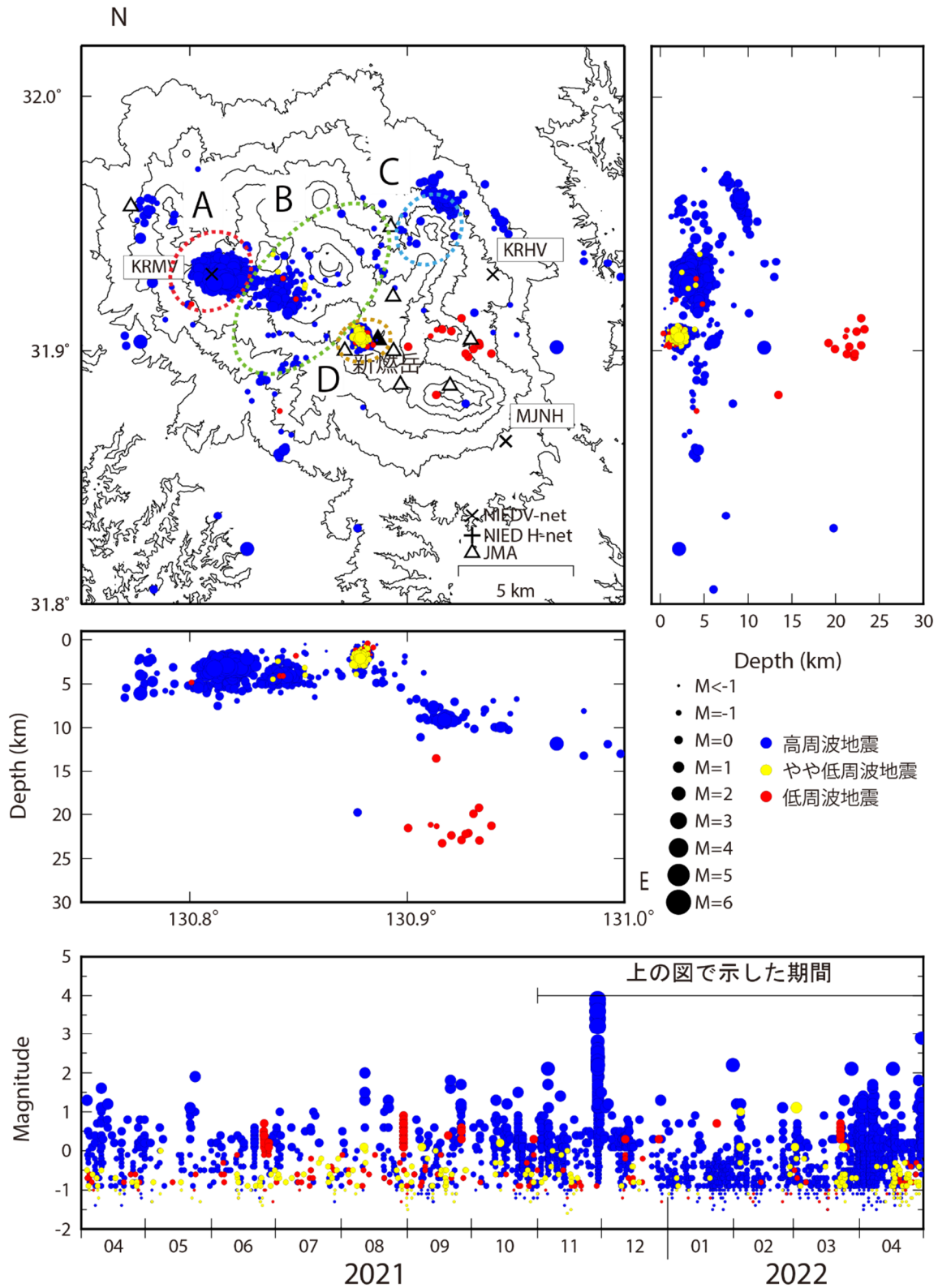
○ 地震活動

2021 年 11 月から 2022 年 4 月 30 日の震源分布を図 1 に示した。2021 年 11 月 29 日に領域 A で地震活動が活発化した。

○ 地殻変動

傾斜計記録（図 2）には、火山活動に伴う変動は観測されていない。KRHV-KRMV の GNSS 基線長変化は（図 3）は、2022 年 1 月ごろからわずかな伸びがみられる。

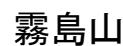
霧島山の地震活動(2021/11/1- 2022/4/30)



震源決定には、気象庁の観測点（位置は図中）も使用した。

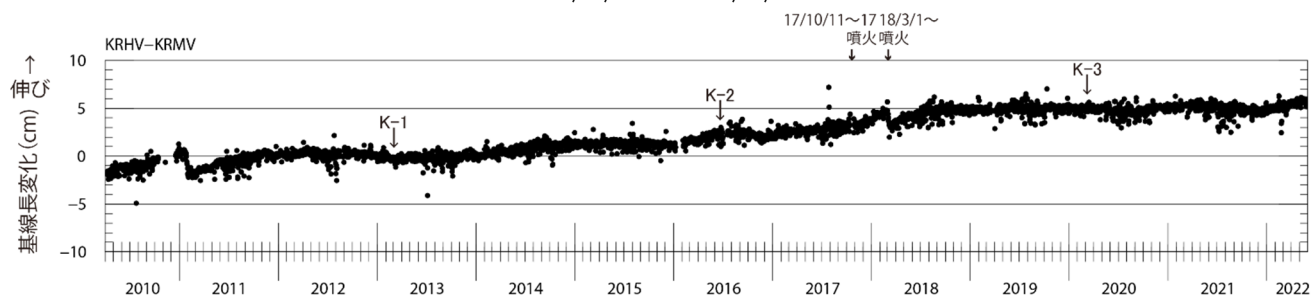
地図の作成にあたっては、国土地理院発行の数値地図 10mメッシュ（標高）を使用した。

図 1 霧島山の地震活動(2021/11/1 - 2022/4/30)



防災科学技術研究所 GNSS 観測点及び国土地理院 GEONET 観測点で得られた地殻変動

2010/4/1～2022/5/31



2021/5/1-2022/5/31 の地殻変動【大口 (950485) 固定】

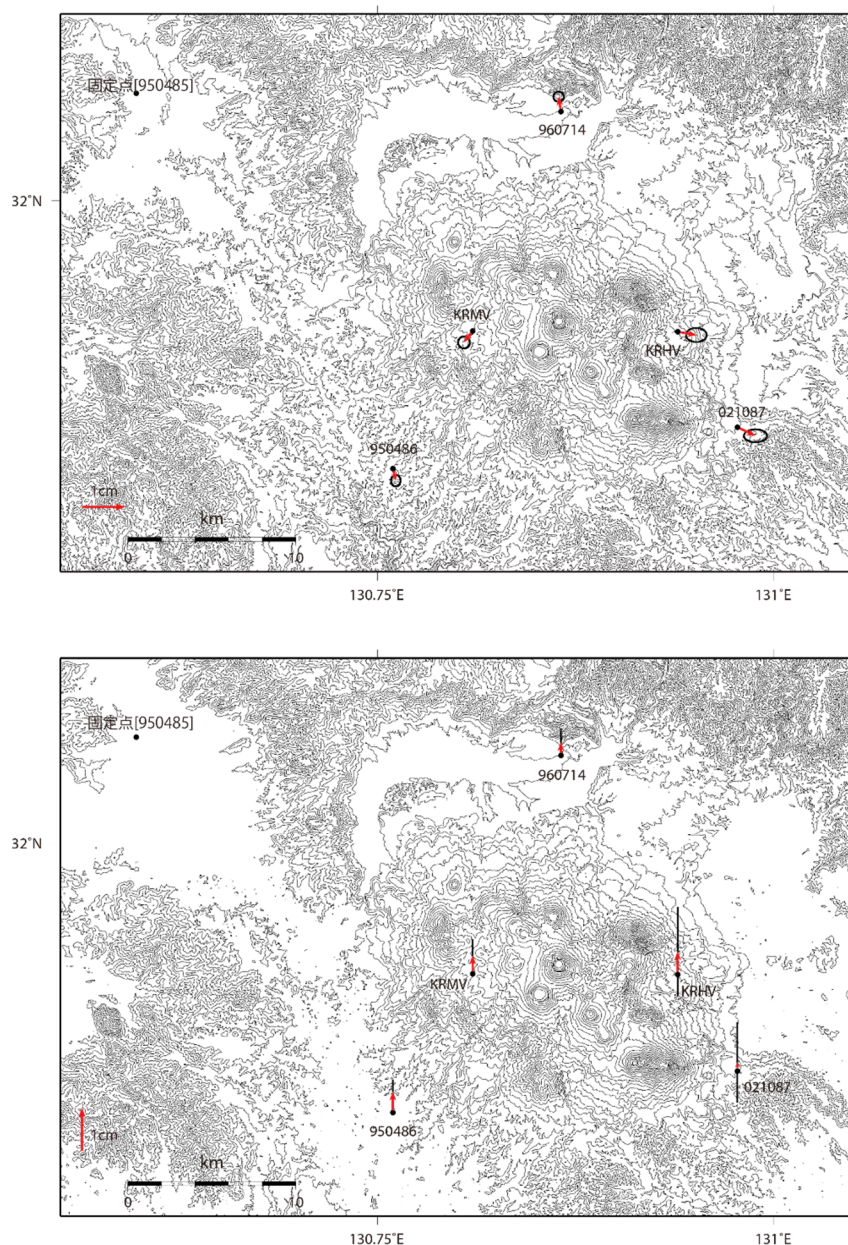


図 3 霧島山 GNSS 解析結果. ※ベクトル図は速報暦使用
(上段：水平成分、下段：上下成分)

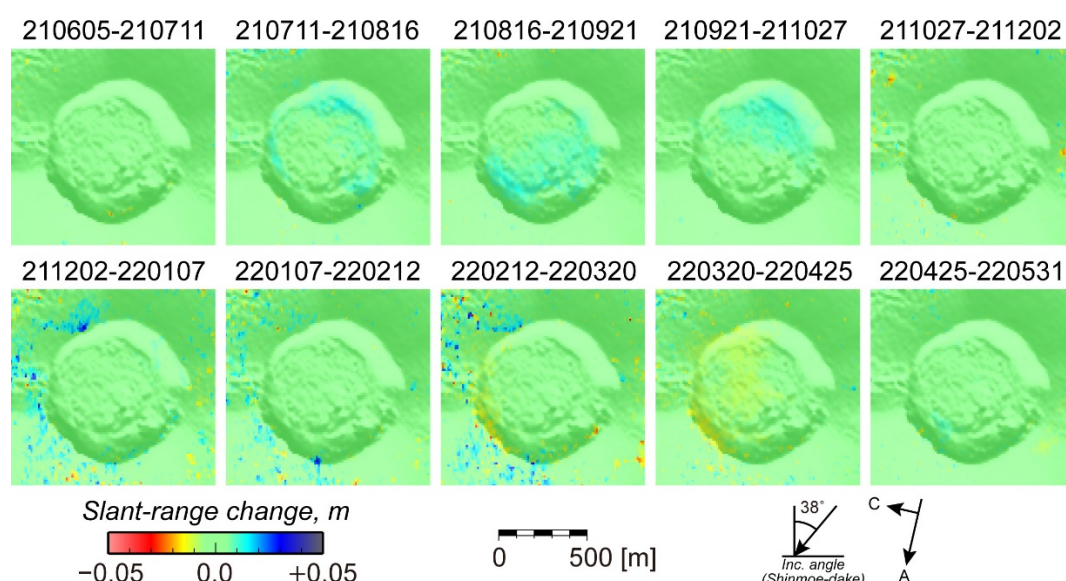
表1 GNSS観測履歴

観測点番号	観測点名	図中記号	日付	保守内容
	霧島山夷守台 (KRHV)		2010/4/10	2周波観測開始
		K-1	2013/2/14	アンテナ台改善作業
		K-2	2016/7/3～7/19	通信断による欠測
			2016/8/1～8/10	
			2016/9/18～9/29	
			2020/11/13	GNSS観測装置更新
	霧島山万膳 (KRMV)		2010/4/9	2周波観測開始
			2010/11/13	受信機故障
			2010/12/17	受信機再設置
		K-1	2013/2/15	アンテナ台改善作業

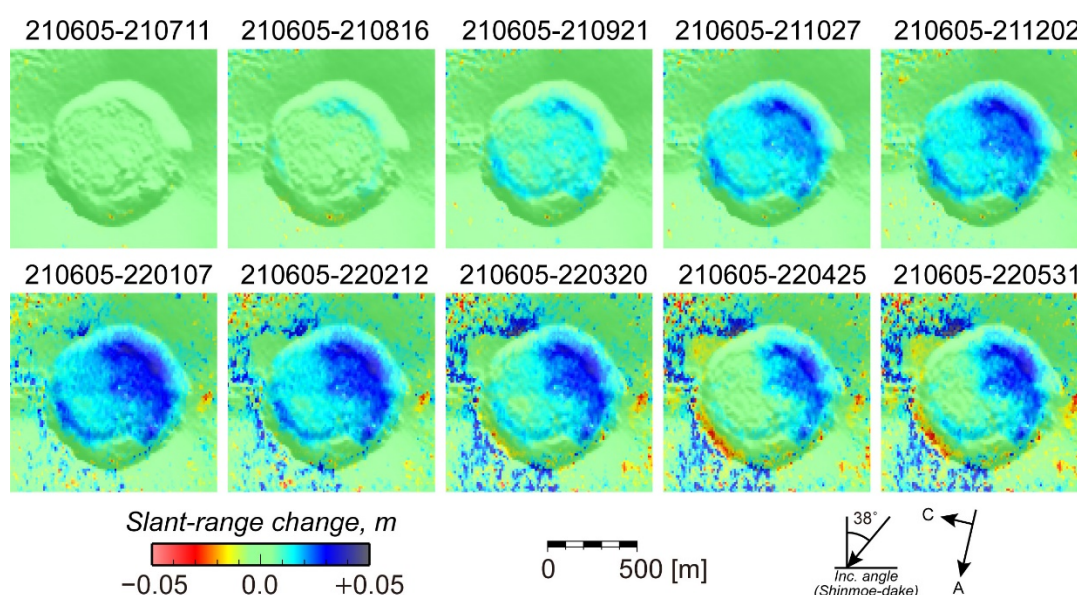
SAR 干渉解析による新燃岳火口内変形

新燃岳火口内の変形を調査するため、Sentinel-1 データを用いた SAR 干渉解析を実施した。第 1 図に、得られた 36 日毎のスラントレンジ変化を示す。短期的に大きく変化するような変形は見られない。第 2 図に、2021 年 6 月 5 日からのスラントレンジ変化の積算量を示す。火口北縁付近にスラントレンジ伸長変化(西進もしくは沈降が卓越)が見られるが、その変化速度は時間の経過とともに減少しつつある。

謝辞. 本解析で使用した Sentinel-1 データは Copernicus Open Access Hub を通じて提供されたものである。Sentinel-1 データの所有権は欧州宇宙機関が有する。解析および描画においては、国土地理院の基盤地図情報 10m メッシュ DEM を使用した。



第 1 図. Sentinel-1 データから求めた、新燃岳火口周辺の 36 日間ごとのスラントレンジ変化分布。陰影は 2018 年噴火以前の地形を示す。



第 2 図. Sentinel-1 から求めた、新燃岳火口周辺の 2021 年 6 月 5 日からのスラントレンジ変化の積算量。

霧島山周辺の地殻変動

Crustal Deformations around Kirishima Volcano

第1図から第6図は、霧島山周辺におけるGNSS連続観測結果である。

第1図上段に基線の配置を、中段に各観測局の保守履歴を示した。第1図下段及び第2図は、第1図上段に示した基線の基線長変化グラフであり、左列は最近約5年間（2017年5月～2022年5月）の時系列、右列は最近約1年間（2021年5月～2022年5月）の時系列である。

第3図上段に気象庁、防災科学研究所の観測点を含む各点への基線の配置を示した。第3図下段及び第4図及び第5図は、第3図上段に示した基線の基線長変化グラフであり、第1図下段及び第2図と同様に、左列は最近約5年間（2017年5月～2022年5月）の時系列、右列は最近約1年間（2021年5月～2022年5月）の時系列である。第6図上段に硫黄山、韓国岳、新燃岳を囲む基線の配置を示した。第6図下段は、第6図上段に示した基線の基線長変化グラフであり、最近約25年間（1997年1月～2022年5月）の時系列である。霧島山を挟む「えびの」－「牧園」等の基線で2021年12月頃から伸びが見られる。

第7図は、霧島山周辺の電子基準点、気象庁及び防災科学技術研究所のGNSS観測点の統合解析から得られた水平変動ベクトル図であり、「野尻」を固定局としている。上段に最近6か月間（2021年11月～2022年5月）を、下段に最近1年間（2021年5月～2022年5月）を示す。新燃岳西側を中心にわずかに膨脹性の地殻変動が見られる。

第8図は「だいち2号」のSAR干渉解析結果である。ノイズレベルを超える変動は見られない。

第9図は、「だいち2号」の干渉SAR時系列解析結果である。第9図上段は、2015年2月～2022年4月の変位速度である。第9図下段は、上段に示した各地点における変位の時系列データである。硫黄山の地点A周辺に、衛星に近づく変動が見られる。

第10図は、GNSS観測データに基づき、時間依存のインバージョン手法により霧島地域の変動源を茂木ソースと仮定して体積の増減を時系列的に推定した結果である。解析に使用するGNSS観測点の一部は、桜島の活動の影響を受けるため、今回の解析では桜島地域との同時解析を行った。第10図上段は推定に用いた観測点の配置と変動源の位置図で、下段は推定された体積変化の時系列である。2020年以降わずかな収縮が見られていたが、2021年後半以降は膨脹が見られる。

第11図は推定された各観測点の地殻変動（計算値）と観測値を比較した時系列グラフである。このモデルから推定した計算値は比較的よく再現されている。

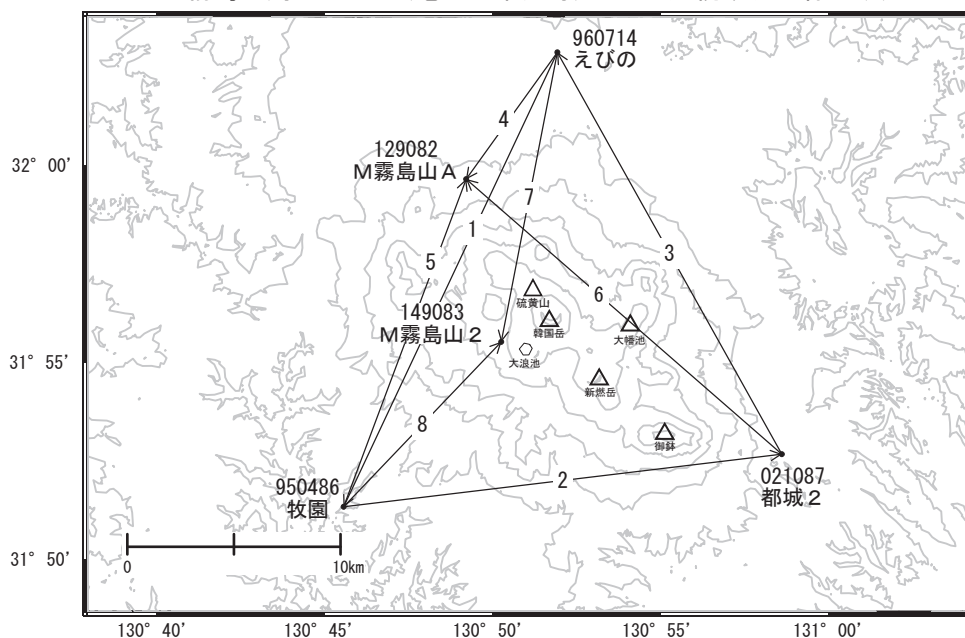
謝辞

ここで使用した「だいち2号」の原初データの所有権は、JAXAにあります。これらのデータは、「だいち2号」に関する国土地理院とJAXAの間の協定に基づき提供されました。

霧島山

霧島山を挟む「えびの」－「牧園」等の基線で2021年12月頃から伸びが見られます。

霧島山周辺GEONET(電子基準点等)による連続観測基線図(1)

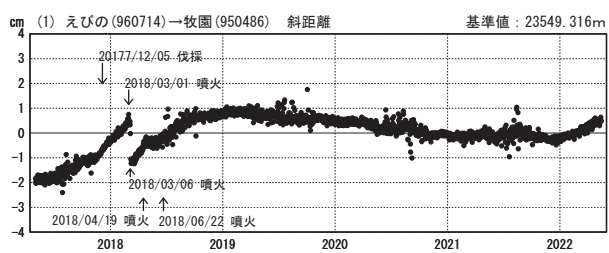


霧島山周辺の各観測局情報

点番号	点名	日付	保守内容
950486	牧園	20171205	伐採
960714	えびの	20191004	受信機交換
021087	都城2	20210125	受信機交換

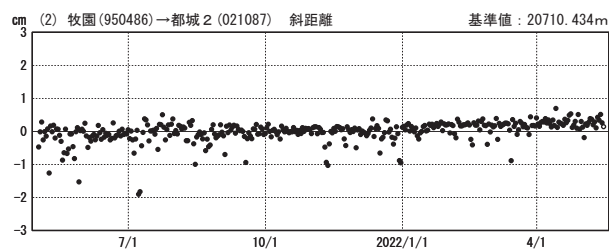
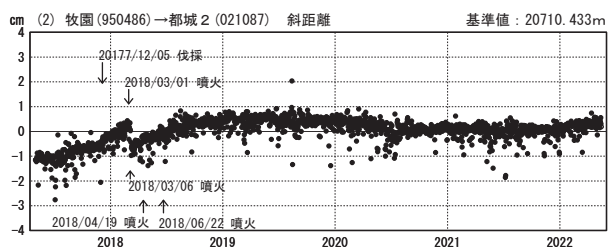
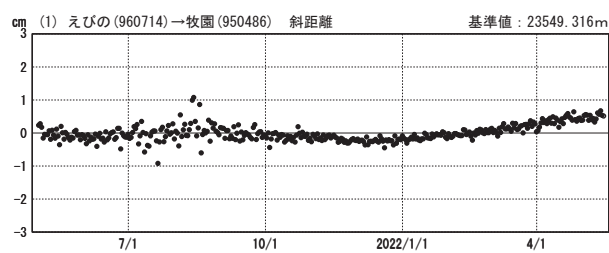
基線変化グラフ(長期)

期間: 2017/05/01~2022/05/15 JST



基線変化グラフ(短期)

期間: 2021/05/01~2022/05/15 JST



●---[F5:最終解] ○---[R5:速報解]

国土地理院

※[R5:速報解]は暫定値、電子基準点の保守等による変動は補正済み

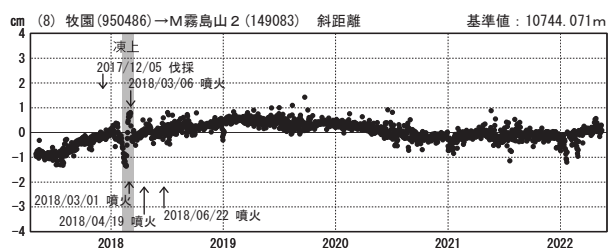
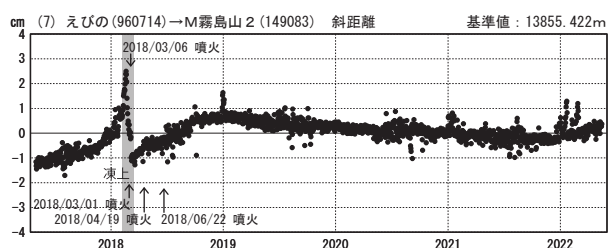
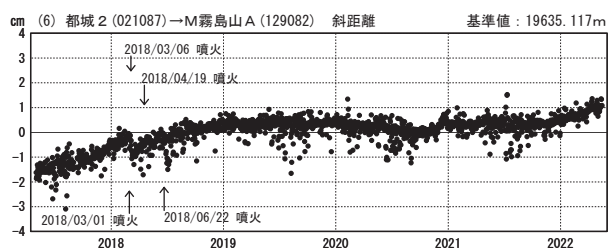
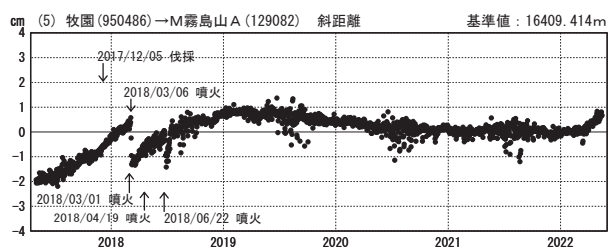
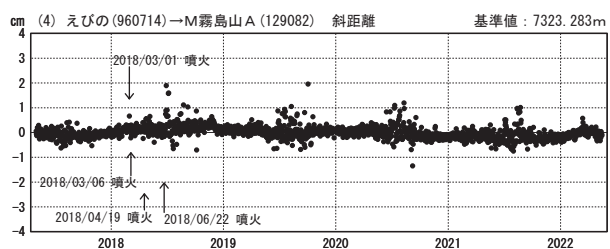
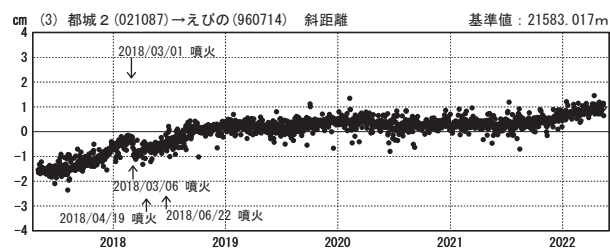
第1図 霧島山周辺のGNSS連続観測基線図(上段)、観測局の保守履歴(中段)、

基線変化グラフ(下段 左列: 2017年5月~2022年5月、右列: 2021年5月~2022年5月)

霧島山

基線変化グラフ（長期）

期間：2017/05/01～2022/05/15 JST



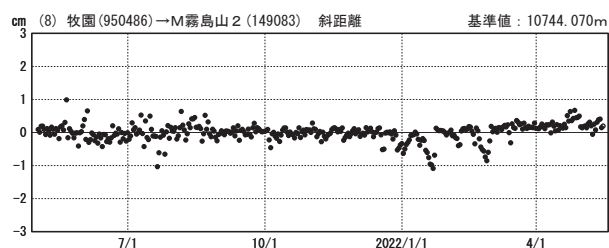
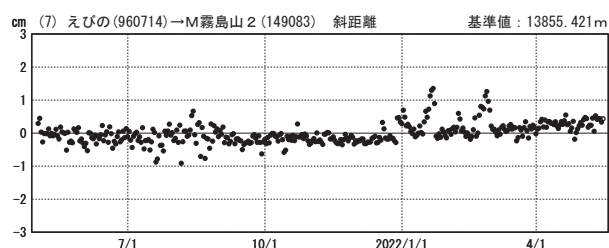
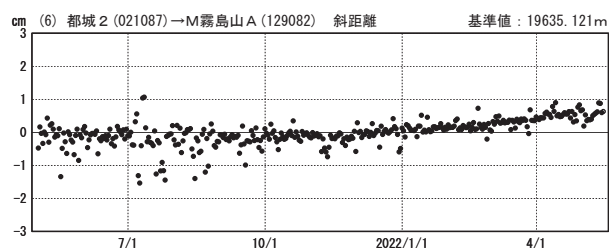
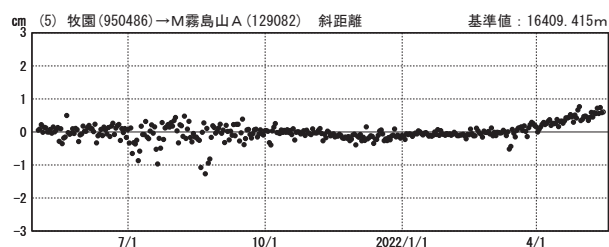
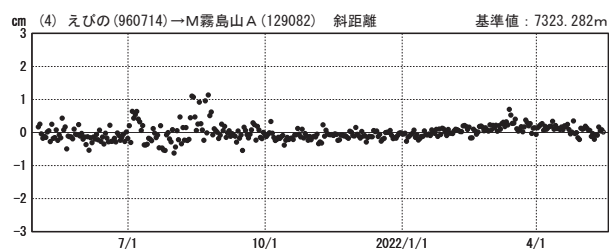
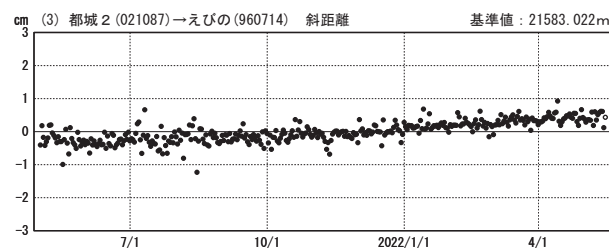
●---[F5:最終解] ○---[R5:速報解]

国土地理院

※[R5:速報解]は暫定値、電子基準点の保守等による変動は補正済み

基線変化グラフ（短期）

期間：2021/05/01～2022/05/15 JST

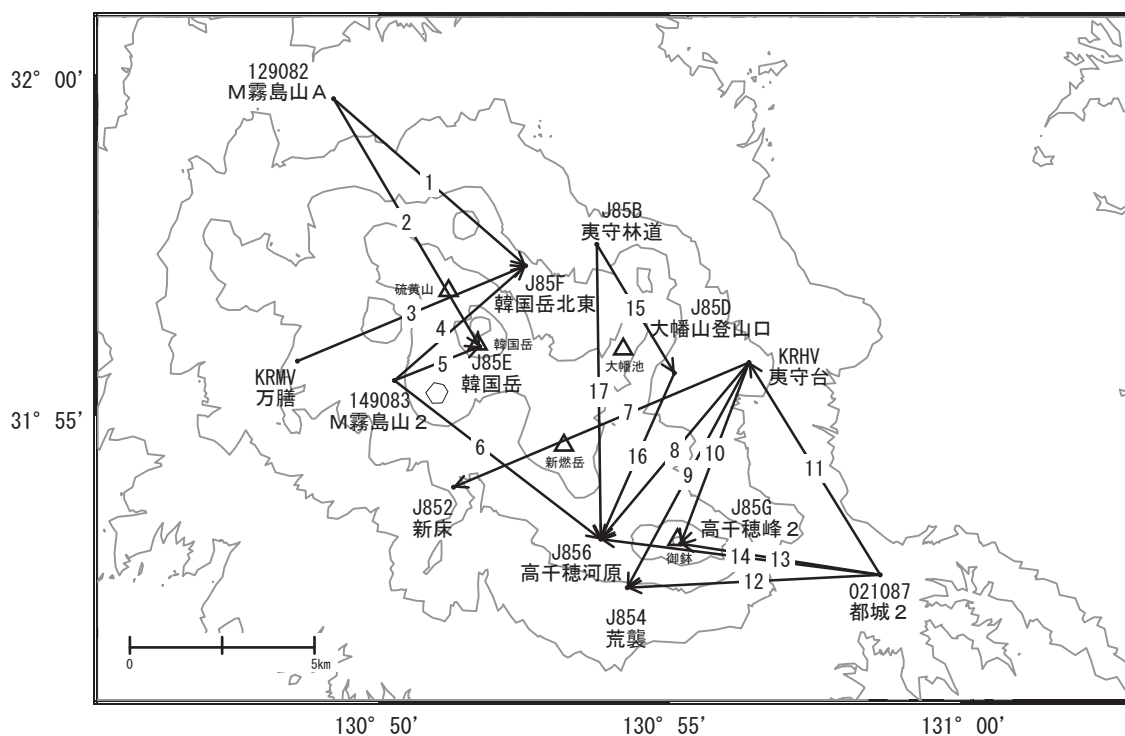


第2図 霧島山周辺のGNSS連続観測による基線変化グラフ

(左列：2017年5月～2022年5月、右列：2021年5月～2022年5月)

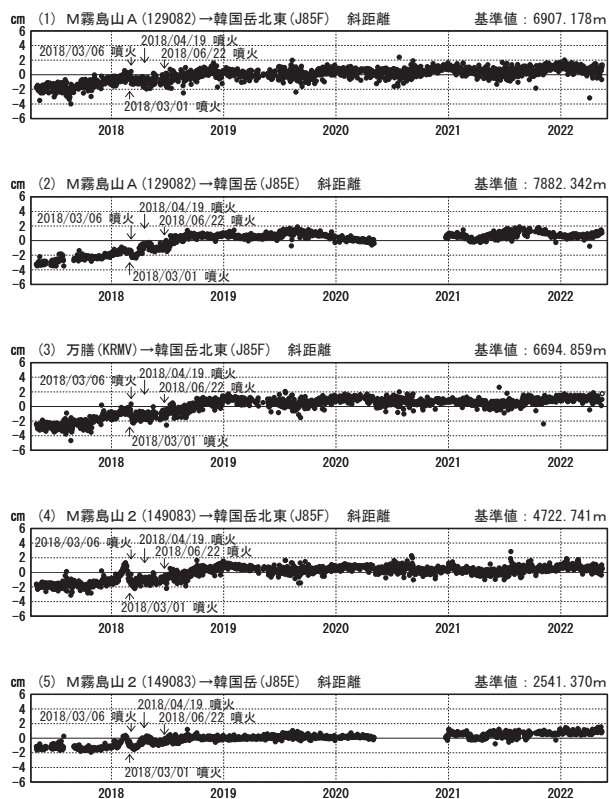
霧島山

霧島山周辺GEONET(電子基準点等)による連続観測基線図(2)



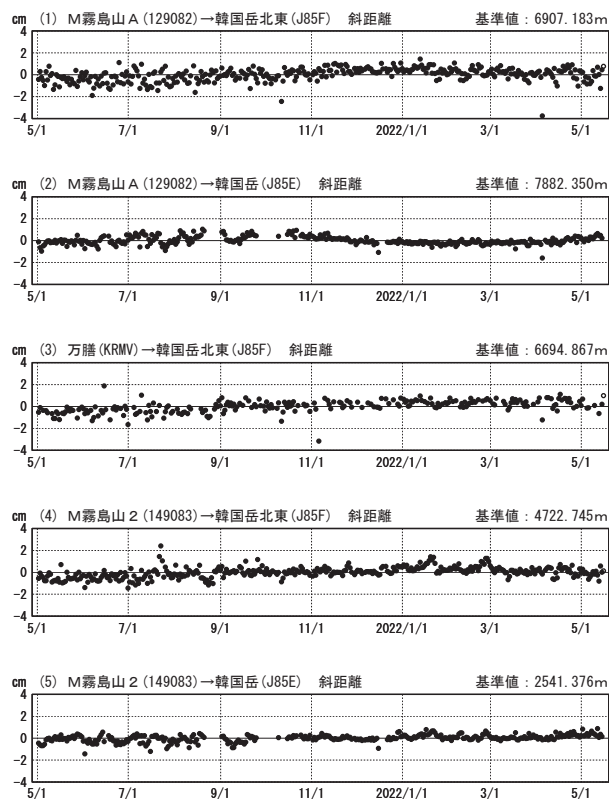
基線変化グラフ(長期)

期間: 2017/05/01~2022/05/15 JST



基線変化グラフ(短期)

期間: 2021/05/01~2022/05/15 JST



●—[F5:最終解] ○—[R5:速報解]

国土地理院・気象庁・防災科学技術研究所

※[R5:速報解]は暫定値、電子基準点の保守等による変動は補正済み

第3図 霧島山周辺のGNSS連続観測基線図(上段)、
基線変化グラフ(下段 左列: 2017年5月~2022年5月、右列: 2021年5月~2022年5月)

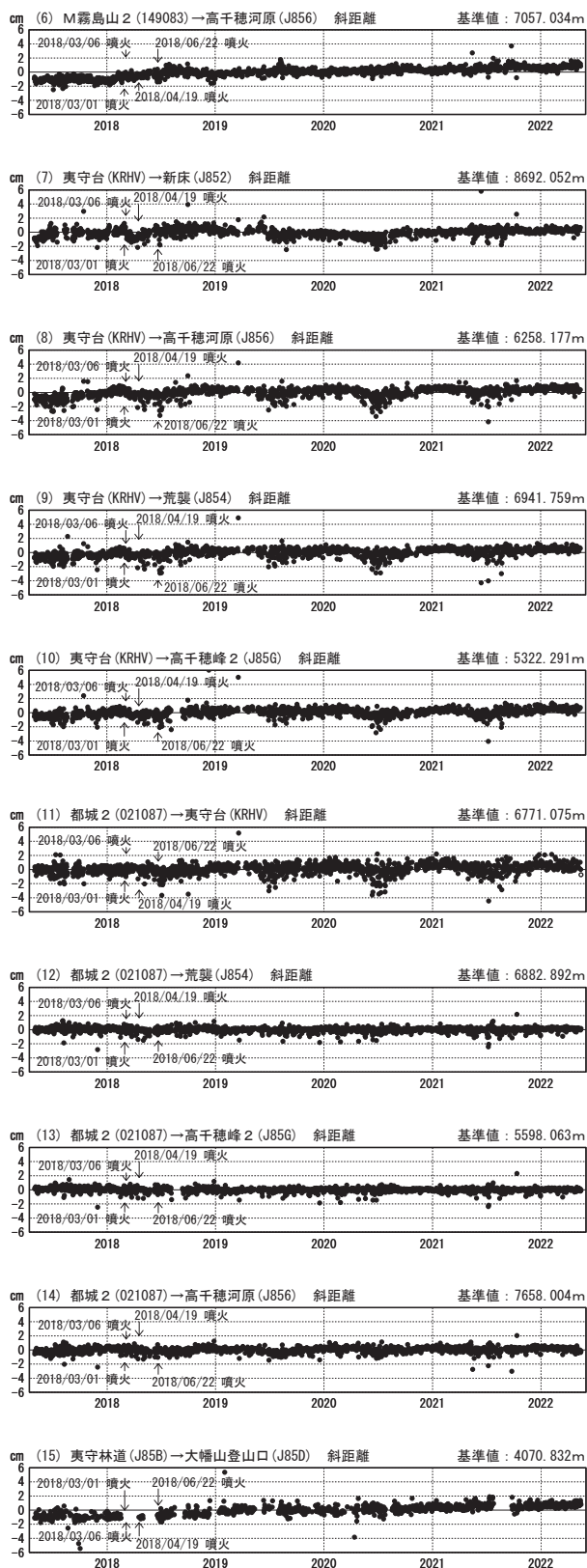
霧島山

第150回火山噴火予知連絡会

国土地理院・気象庁・防災科学技術研究所

基線変化グラフ（長期）

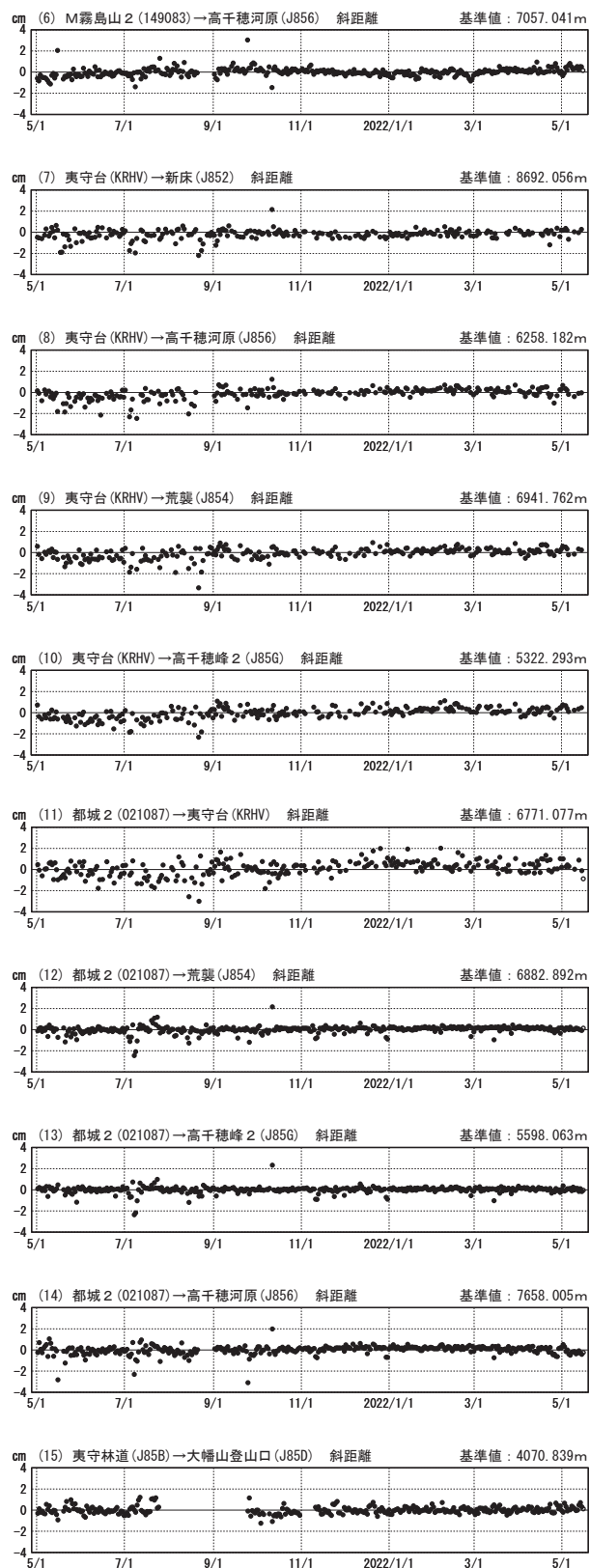
期間：2017/05/01～2022/05/15 JST



●---[F5:最終解] ○---[R5:速報解]

基線変化グラフ（短期）

期間：2021/05/01～2022/05/15 JST



国土地理院・気象庁・防災科学技術研究所

※[R5:速報解]は暫定値、電子基準点の保守等による変動は補正済み

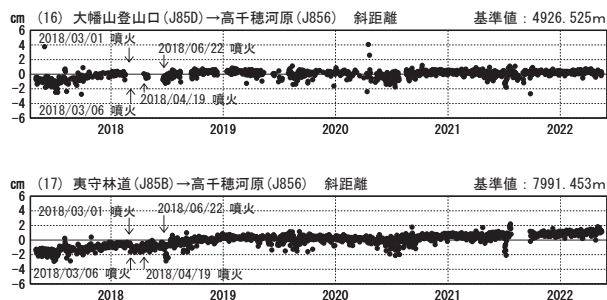
第4図 霧島山周辺のGNSS連続観測による基線変化グラフ

(左列：2017年5月～2022年5月、右列：2021年5月～2022年5月)

霧島山

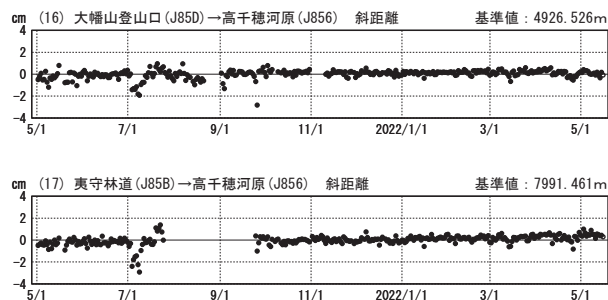
基線変化グラフ（長期）

期間：2017/05/01～2022/05/15 JST



基線変化グラフ（短期）

期間：2021/05/01～2022/05/15 JST



●——[F5:最終解] ○——[R5:速報解]

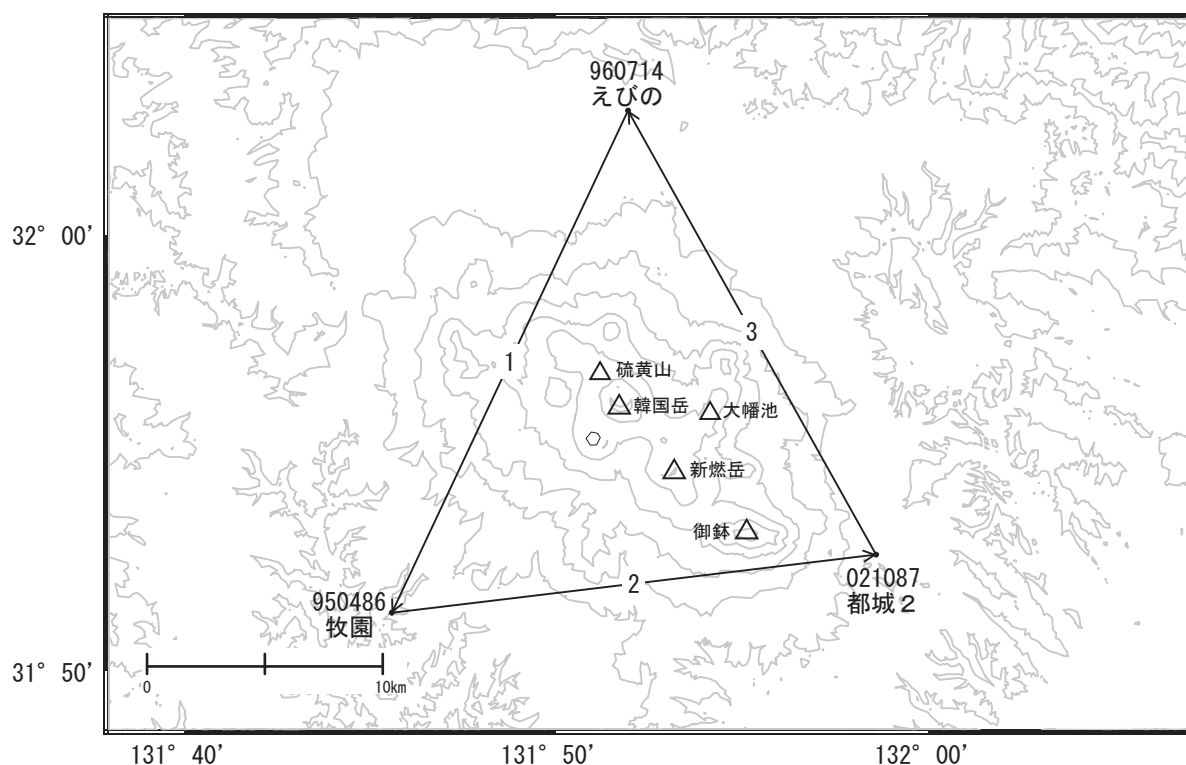
国土地理院・気象庁・防災科学技術研究所

※[R5:速報解]は暫定値、電子基準点の保守等による変動は補正済み

第5図 霧島山周辺のGNSS連続観測による基線変化グラフ

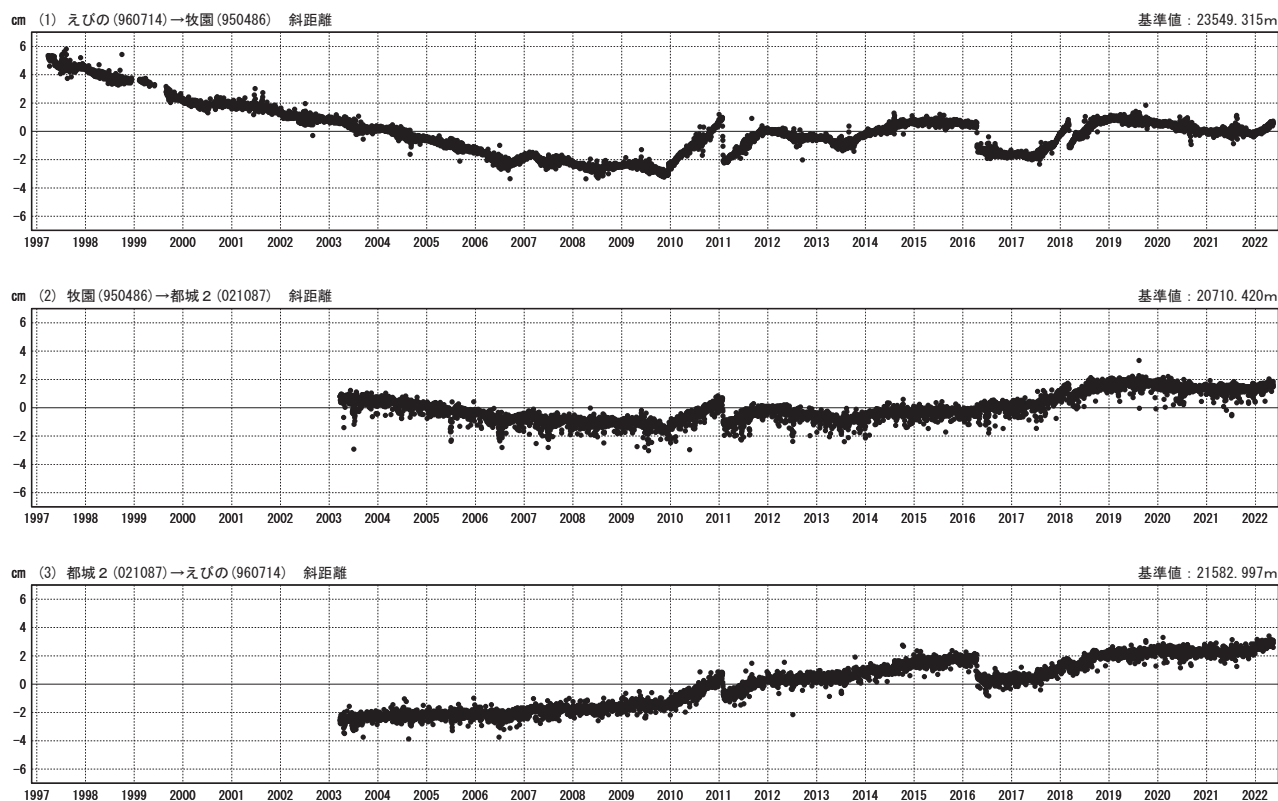
(左列：2017年5月～2022年5月、右列：2021年5月～2022年5月)

霧島山周辺GEONET(電子基準点等)による連続観測基線図(3)



基線変化グラフ

期間: 1997/01/01~2022/05/15 JST



● [F5: 最終解] ○ [R5: 速報解]

国土地理院

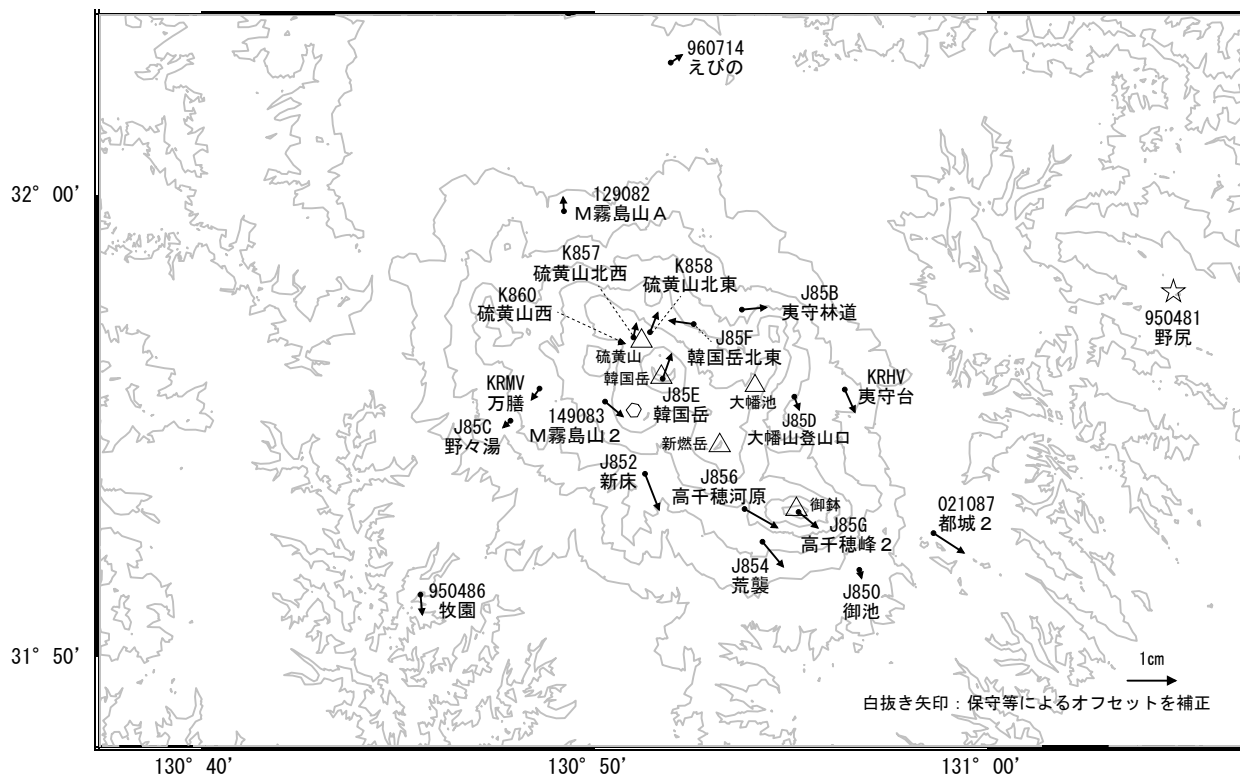
※ [R5: 速報解] は暫定値、電子基準点の保守等による変動は補正済み

第6図 霧島山周辺のGNSS連続観測基線図(上段)と基線変化グラフ(下段 1997年1月~2022年5月)

霧島山

霧島山周辺の地殻変動(水平:6か月)

基準期間:2021/11/06~2021/11/15[F5:最終解]
比較期間:2022/05/06~2022/05/15[F5:最終解]

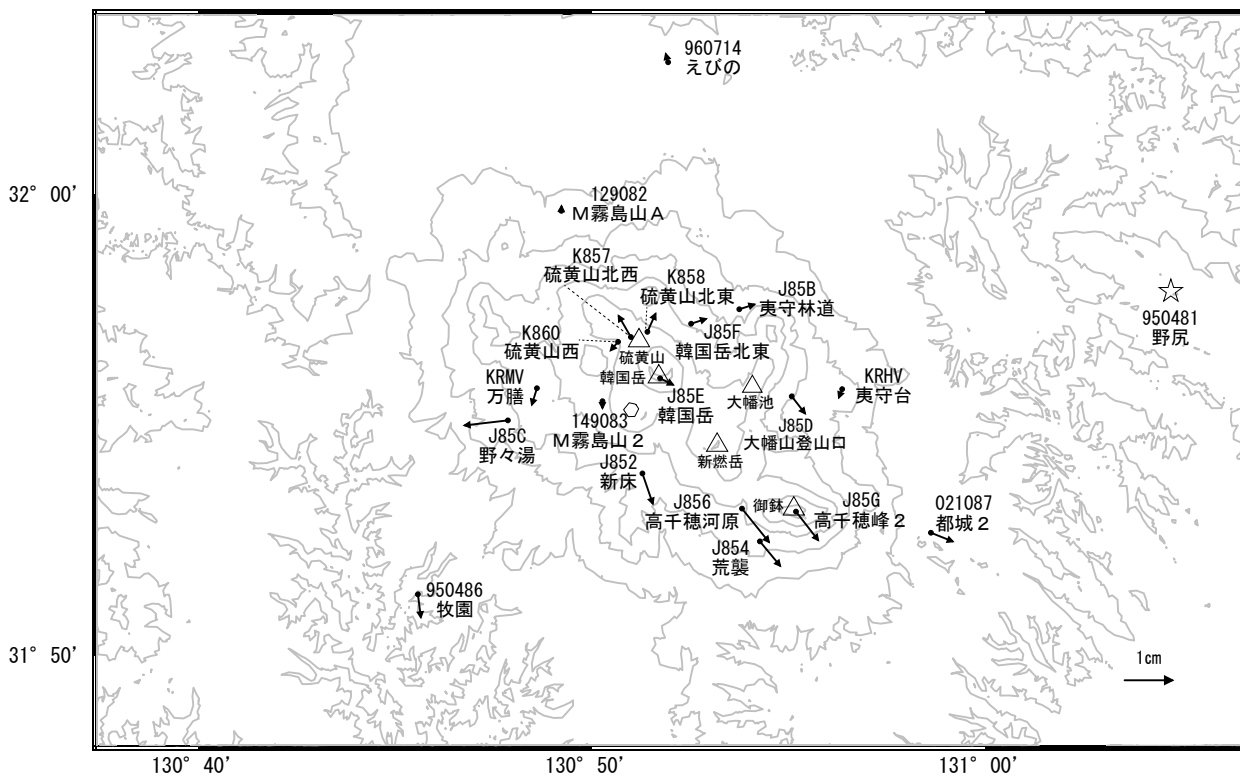


☆ 固定局:野尻(950481)

国土地理院・気象庁・防災科学技術研究所

霧島山周辺の地殻変動(水平:1年)

基準期間:2021/05/06~2021/05/15[F5:最終解]
比較期間:2022/05/06~2022/05/16[F5:最終解]



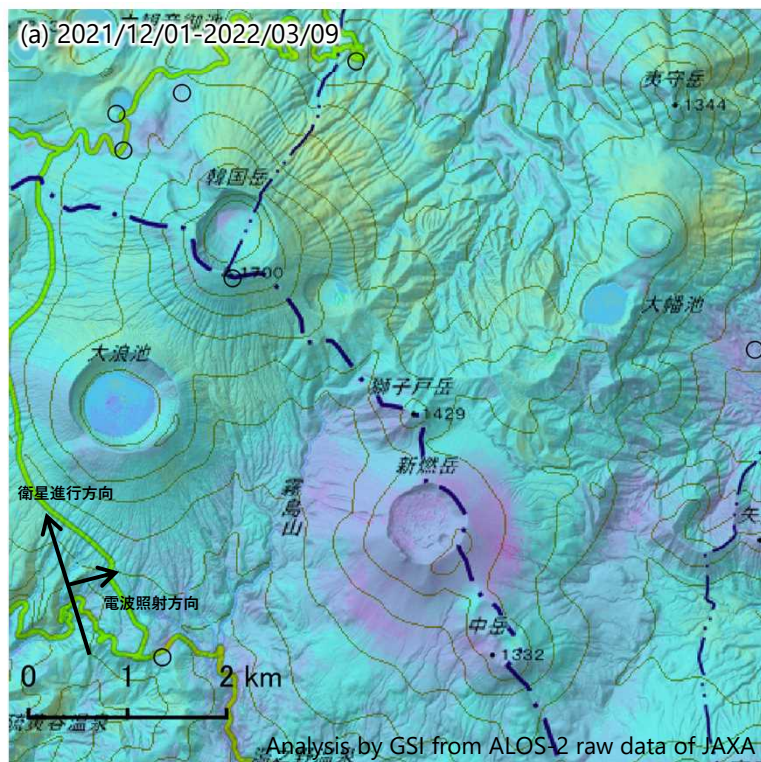
☆ 固定局:野尻(950481)

国土地理院・気象庁・防災科学技術研究所

第7図 霧島山周辺の電子基準点・気象庁・防災科学技術研究所GNSS観測点の統合解析による
水平変動ベクトル図(上段:2021年11月~2022年5月、下段:2021年5月~2022年5月) 霧島山

霧島山のSAR干渉解析結果について

ノイズレベルを超える変動は見られません。

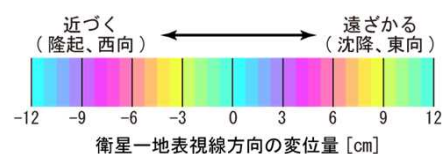


背景：地理院地図 標準地図・陰影起伏図・傾斜量図

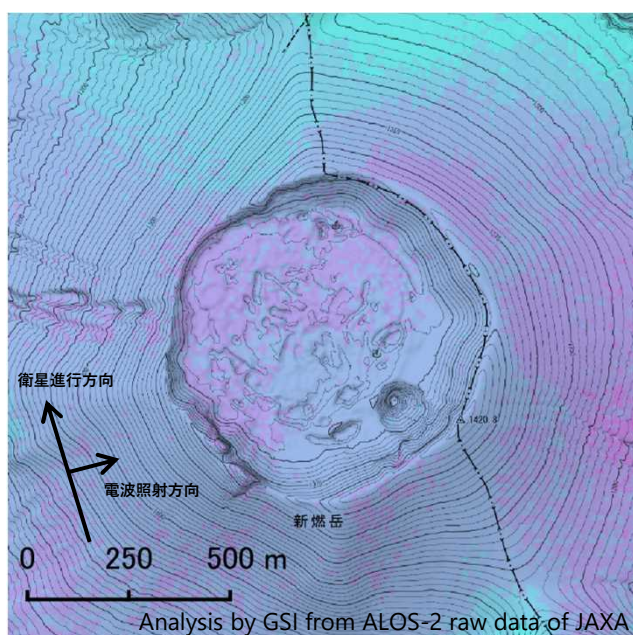
	(a)
衛星名	ALOS-2
観測日時	2021/12/01 2022/03/09 0:19頃 (98日間)
衛星進行方向	北行
電波照射方向	右(東)
観測モード*	U-U
入射角	42.9°
偏波	HH
垂直基線長	+ 50m

* U：高分解能(3m)モード

○ 国土地理院以外のGNSS観測点

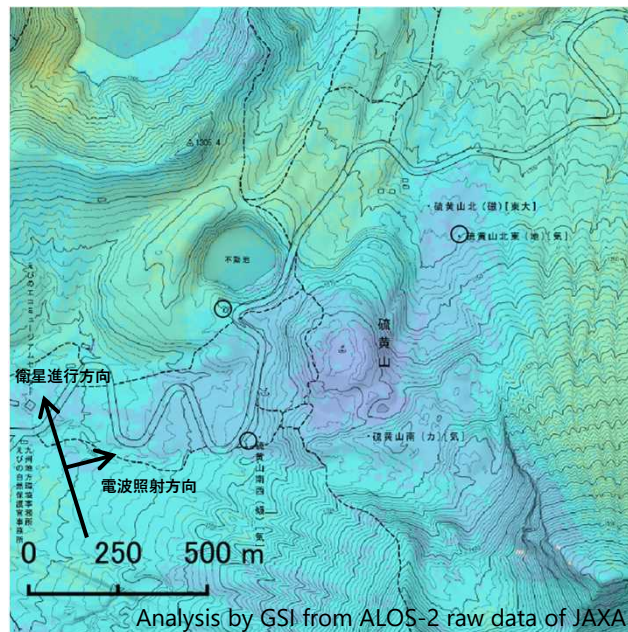


【新燃岳の拡大図】



背景：地理院地図 火山基本図・陰影起伏図・傾斜量図

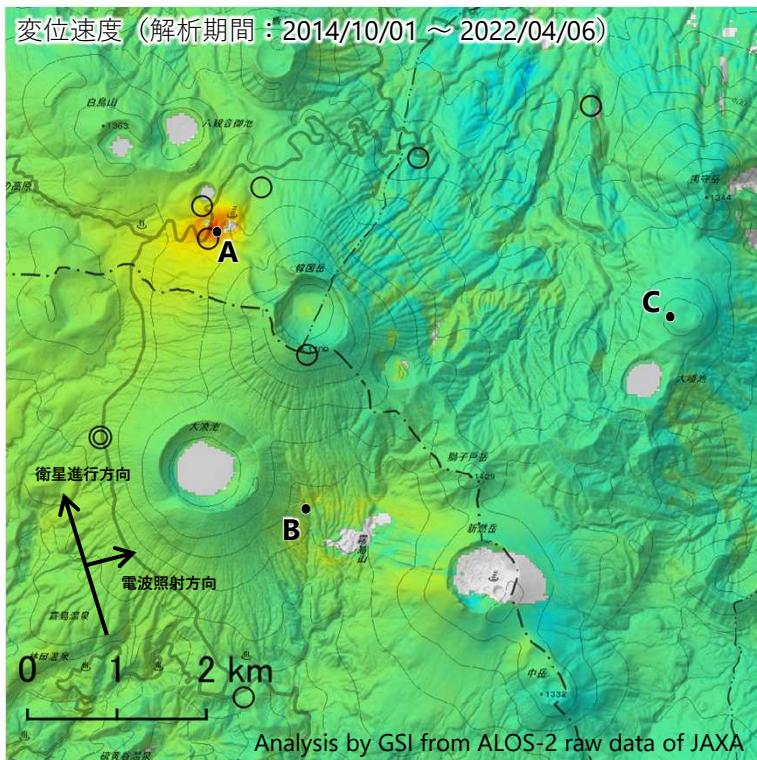
【硫黄山の拡大図】



霧島山

霧島山の干渉SAR時系列解析結果（北行）

硫黄山の地点A周辺に、衛星に近づく変動が見られます。

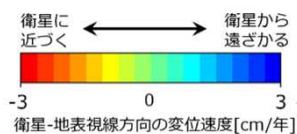


衛星名	ALOS-2
観測期間	2014/10/01 ～ 2022/04/06 (2744日間)
衛星進行方向	北行
電波照射方向	右(東)
観測モード*	U
入射角	42.9°
偏波	HH
データ数	44
干渉ペア数	170

* U：高分解能(3m)モード

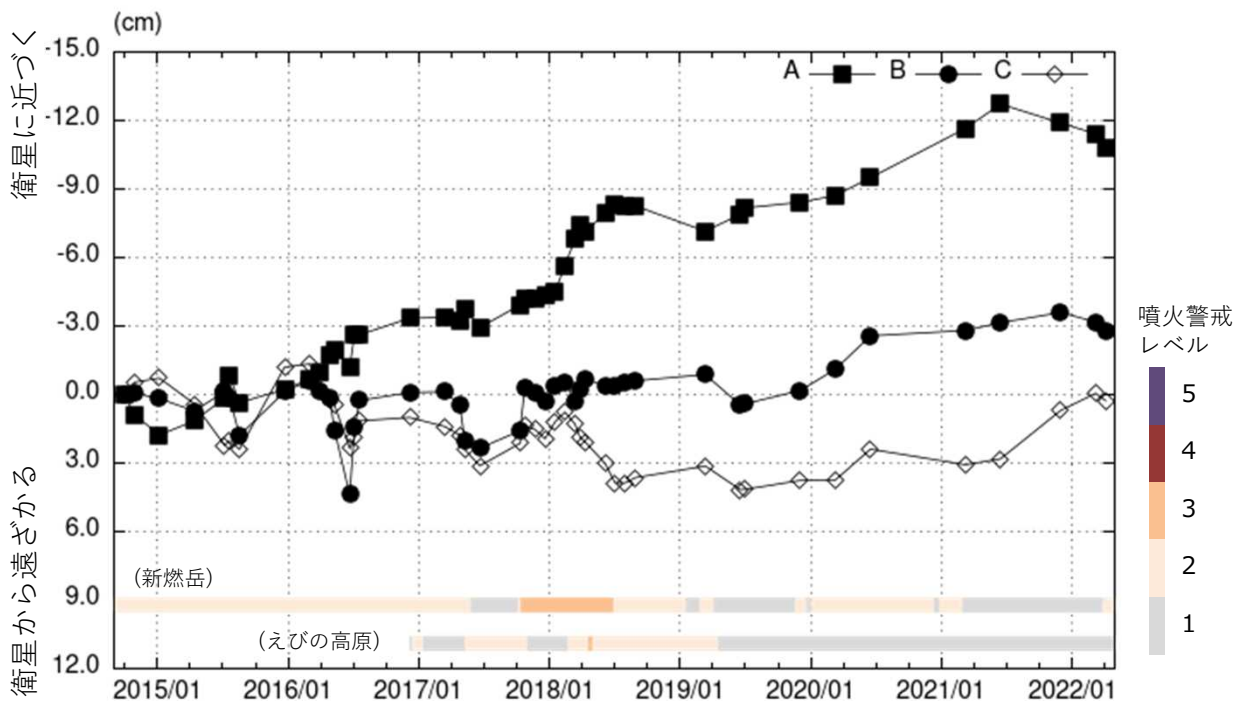
◎ 国土地理院GNSS観測点

○ 国土地理院以外のGNSS観測点



背景：地理院地図 標準地図・陰影起伏図・傾斜量図 ※参照点は電子基準点「牧園」付近

干渉SAR時系列解析手法：SBAS法



地点A・B・Cにおける衛星-地表視線方向の変位の時系列

本解析で使用したデータの一部は、火山噴火予知連絡会衛星解析グループの活動を通して得られたものです。

霧島山

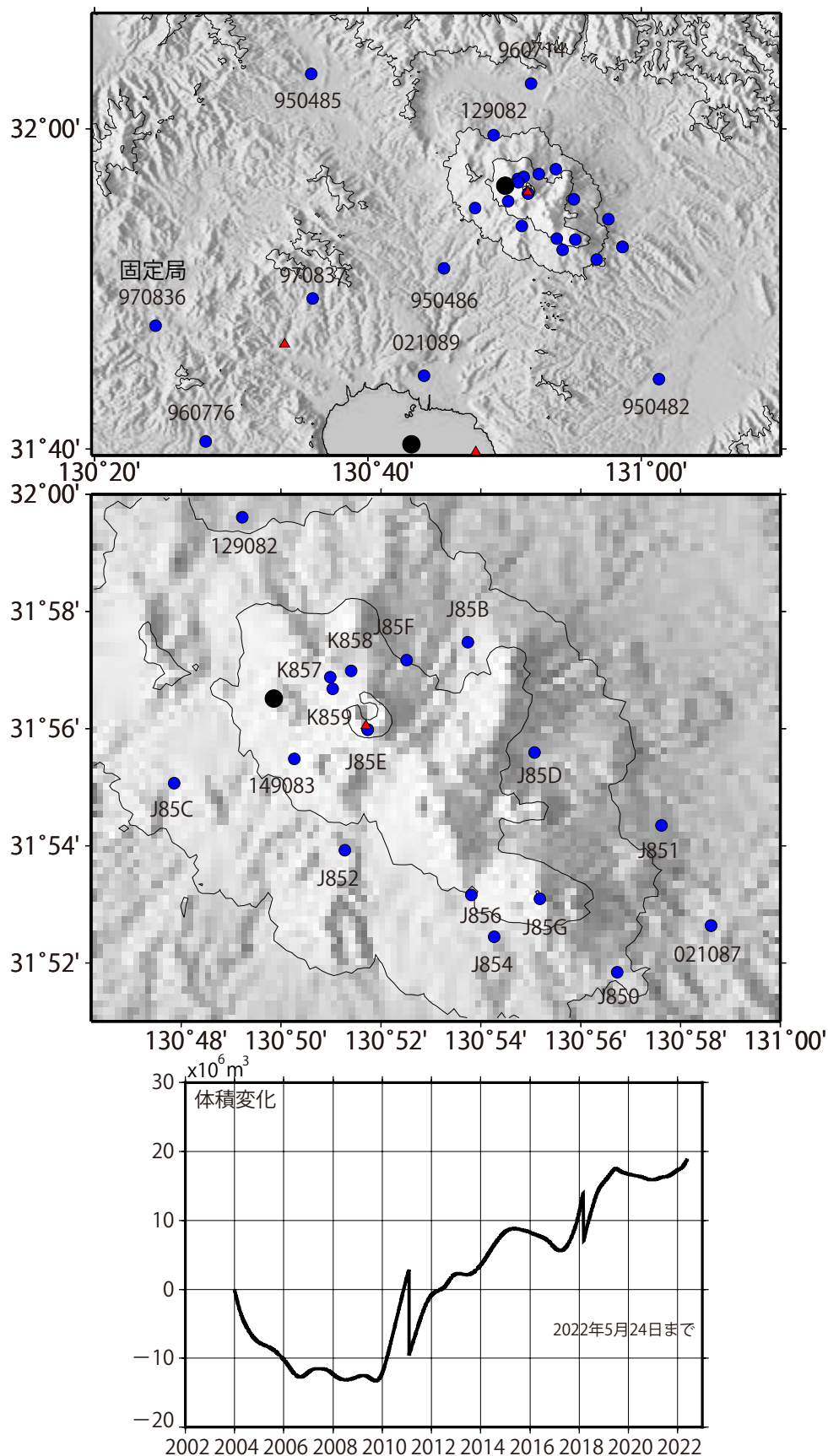
第9図 霧島山の干渉SAR時系列解析結果（2014年10月～2022年4月）

（上段）変位速度の分布 （下段）変動の時系列データ

霧島山の茂木ソースの位置と体積変化

時間依存のインバージョン解析

2021年以降膨張



茂木ソース: 緯度 31.94 経度 130.83 深さ 7.6km

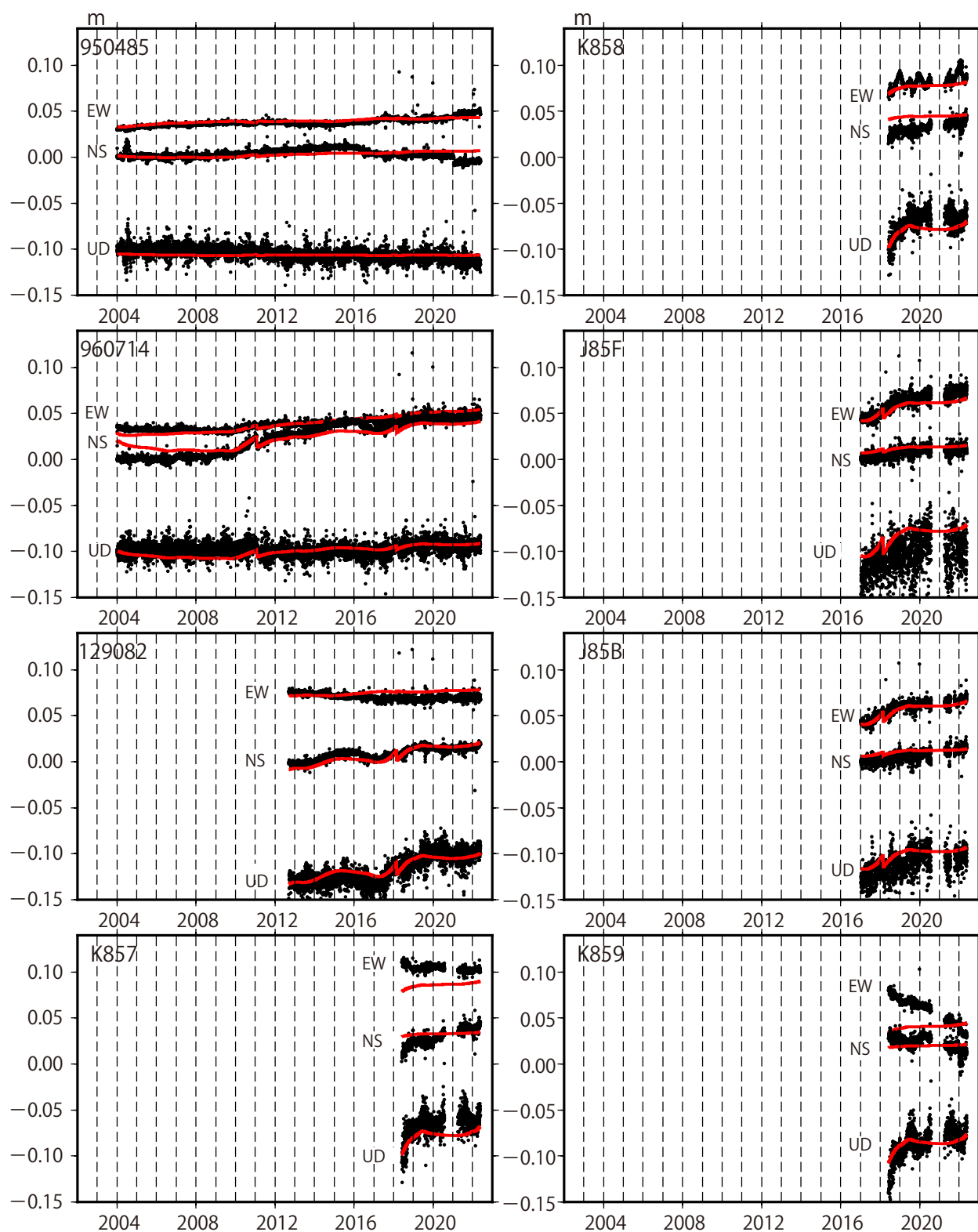
*電子基準点の保守等による変動は補正済

第10図 時間依存インバージョンの手法による霧島山地域の変動源の体積変化推定
 (上段・中段: 推定に用いた観測点 (青点) 配置と茂木ソース (黒丸) の位置、
 下段: 推定された茂木ソース体積の時間変化)

霧島山

霧島・桜島周辺の観測点の座標時系列(黒丸)と計算値(赤線)

時間依存のインバージョン



固定局970836.EW,NS,UDは東西、南北、上下変動.周期成分は除いている.

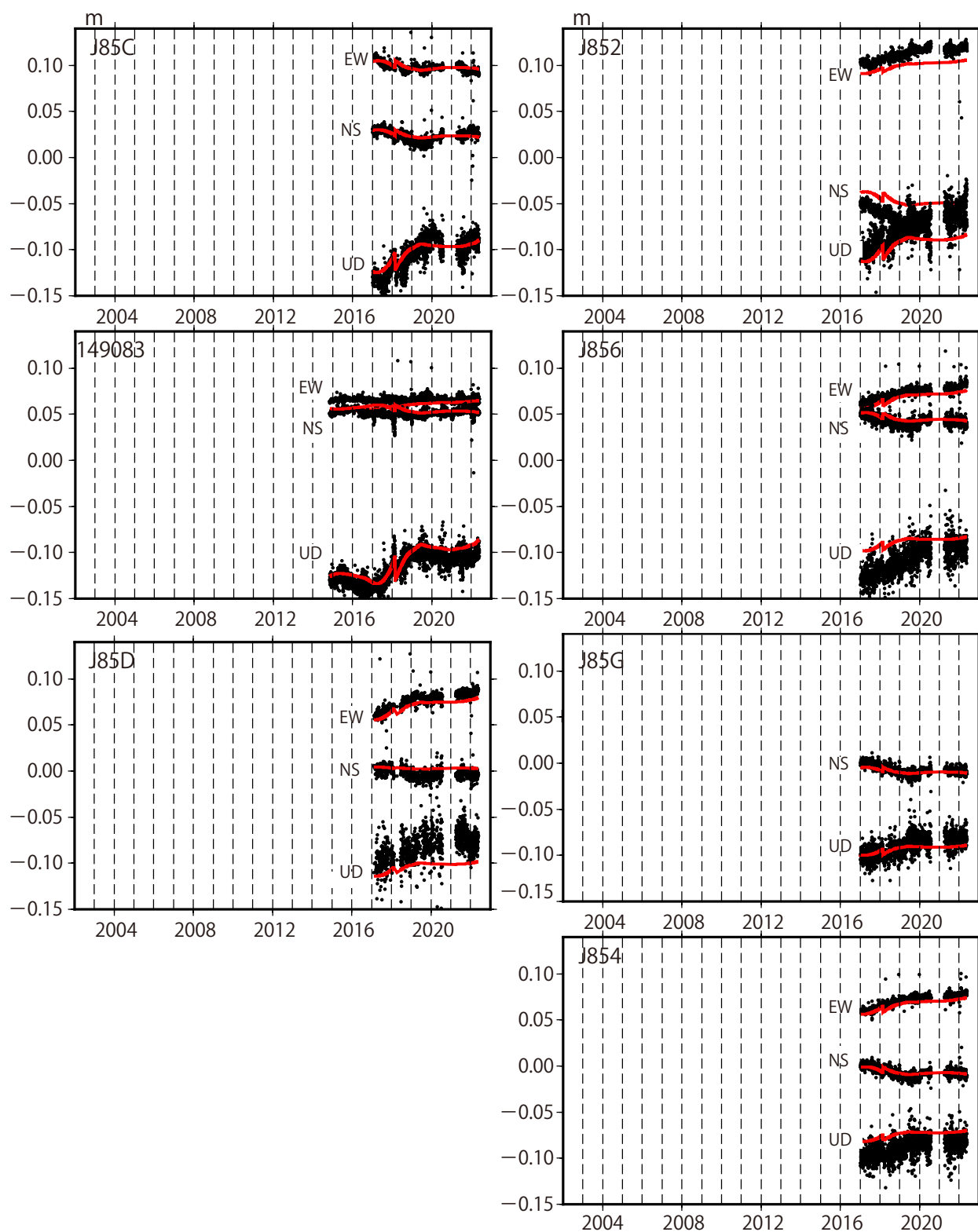
*電子基準点の保守等による変動

第11図 推定された茂木ソースによる地殻変動計算値(赤実線)と観測値(黒点)の比較

霧島山

霧島・桜島周辺の観測点の座標時系列(黒丸)と計算値(赤線)

時間依存のインバージョン



固定局970836.EW,NS,UDは東西、南北、上下変動.周期成分は除いている.

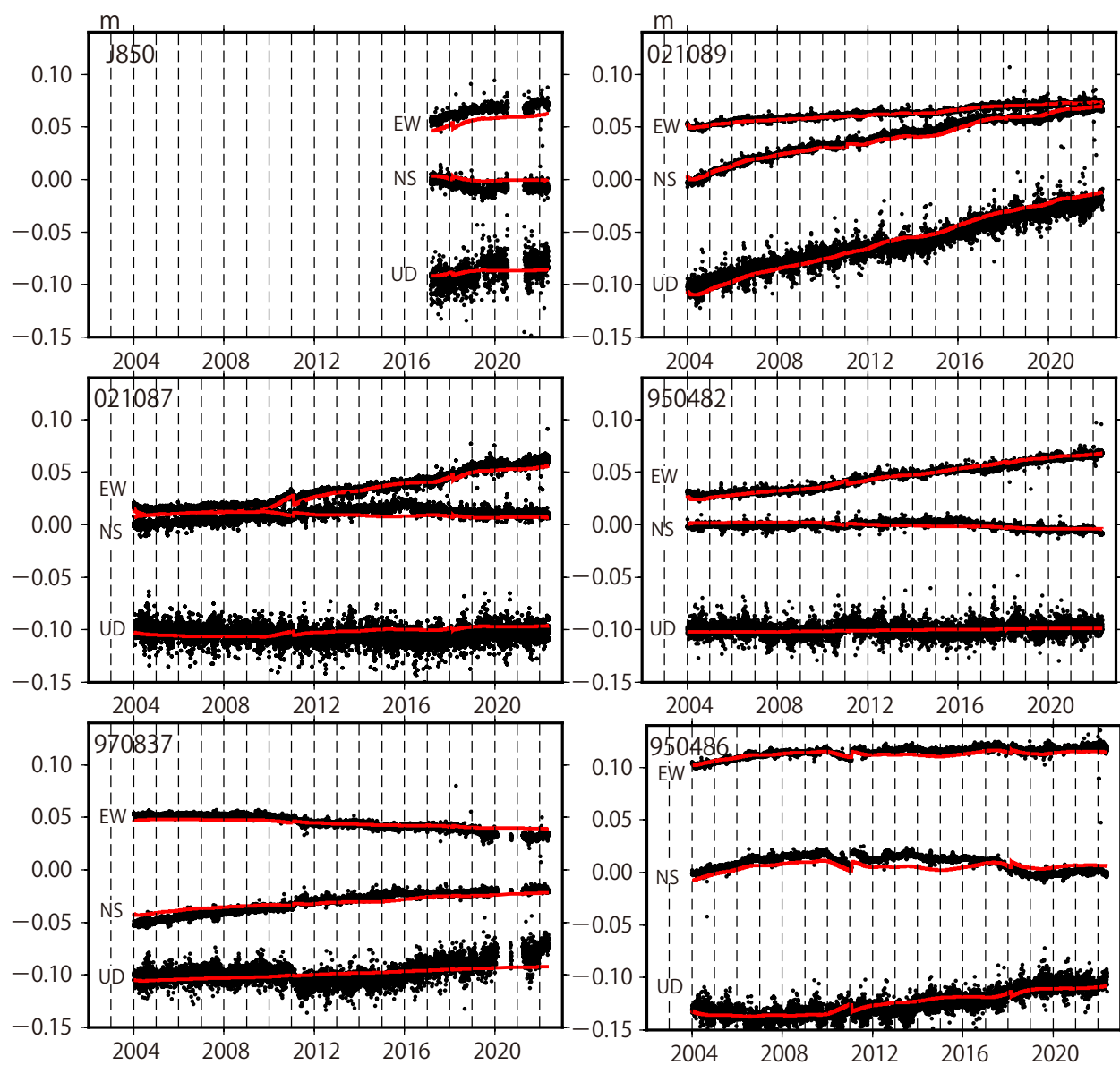
*電子基準点の保守等による変動は補正済み

第11図つづき 推定された茂木ソースによる地殻変動計算値(赤実線)と観測値(黒点)の比較

霧島山

霧島・桜島周辺の観測点の座標時系列(黒丸)と計算値(赤線)

時間依存のインバージョン



固定局970836.EW,NS,UDは東西、南北、上下変動.周期成分は除いている.

*電子基準点の保守等による変動は補正済み

第11図つづき 推定された茂木ソースによる地殻変動計算値(赤実線)と観測値(黒点)の比較