

第 148 回 火山噴火予知連絡会資料

(その1の2)

霧島山

令和 3 年 6 月 30 日

火山噴火予知連絡会資料(その1の2)

目次

霧島山

第5回霧島山部会会議資料

気象庁	3-24
気象研	25-27
九大	28-51
防災科研	52-58
地理院	59-72
海保	73
上智大	74-77
鹿児島大	78-81
東海大	82-85
日本工営	86-90

霧 島 山

(2020 年 12 月～2021 年 5 月 31 日)

霧島山（広域）

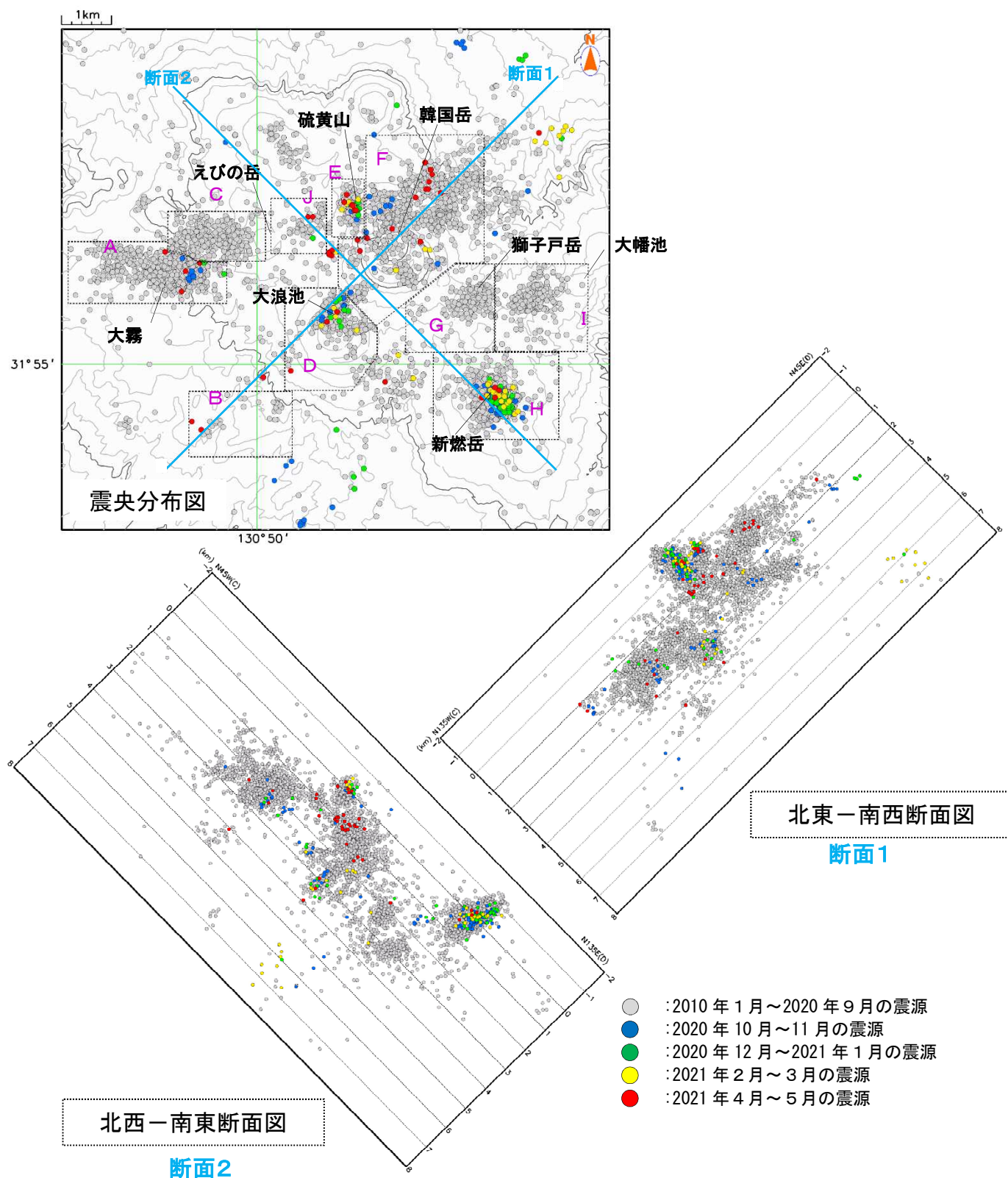


図 1 霧島山 霧島山の震源分布図（2010 年 1 月～2021 年 5 月）

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。

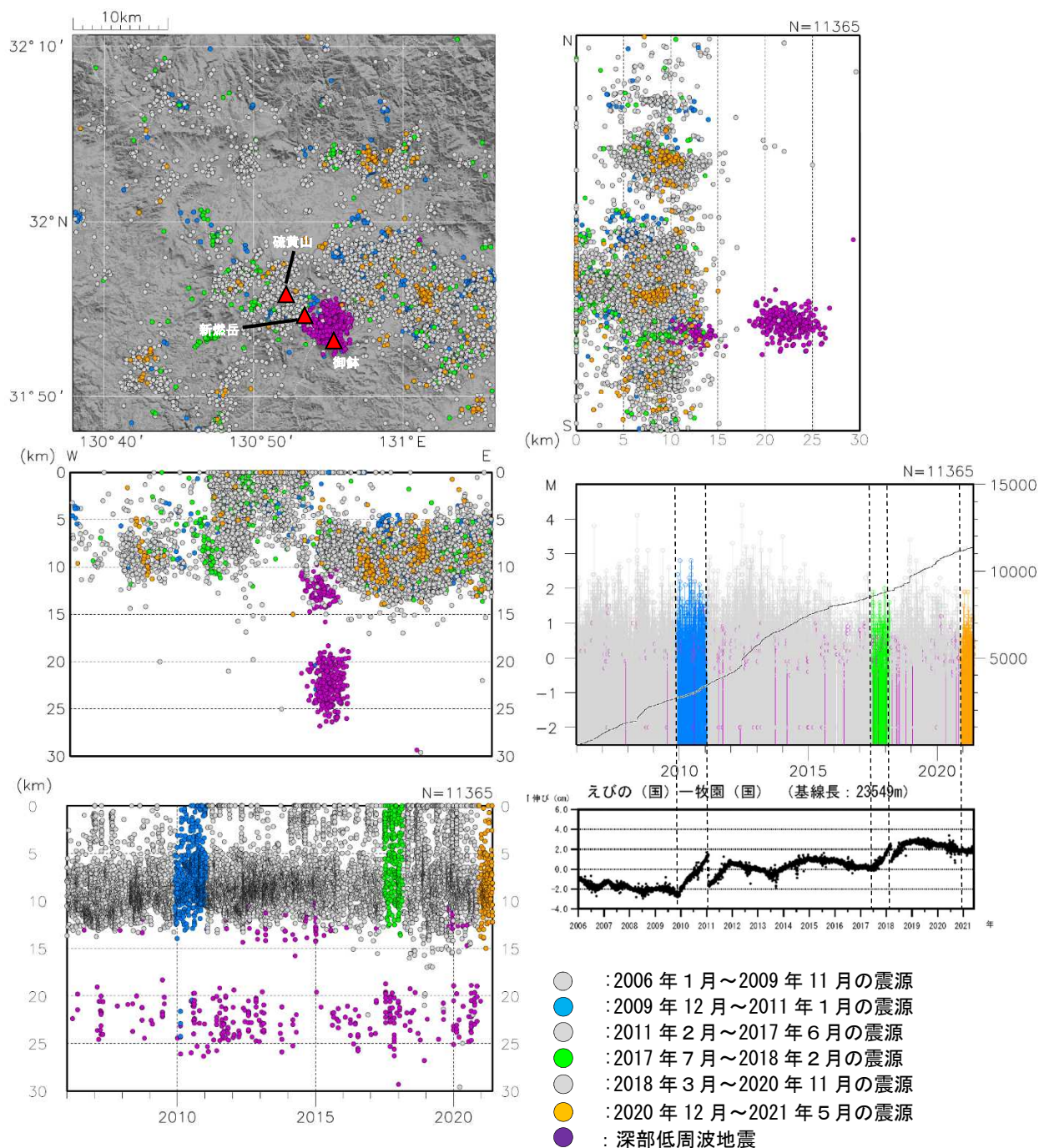


図 2-1 霧島山 一元化震源による広域の地震活動（2006 年 1 月～2021 年 5 月）

※表示している震源には、震源決定時の計算誤差の大きなものが表示されることがある。

※この図では、関係機関の地震波形を一元的に処理し、地震観測点の標高を考慮する等した新手法で得られた震源を用いている（ただし、2020 年 8 月以前の地震については火山活動評価のための参考震源である）。

※2020 年 4 月 18 日から 10 月 23 日までの地震について、暫定的に震源精査の基準を変更しているため、その前後の期間と比較して微小な地震での震源決定数の変化（増減）が見られる。

※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。

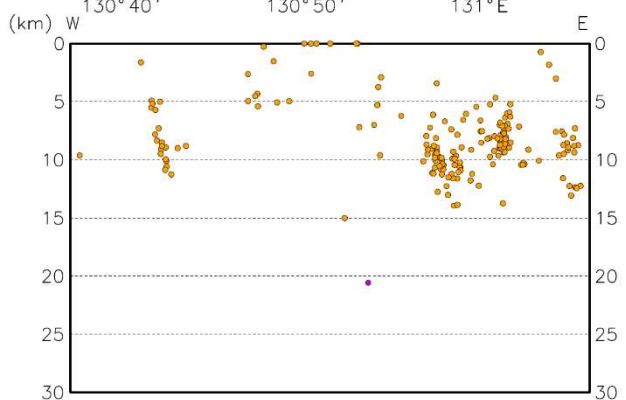
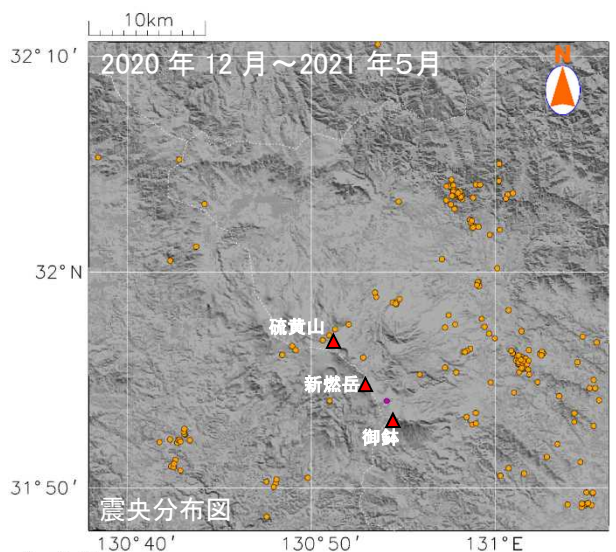
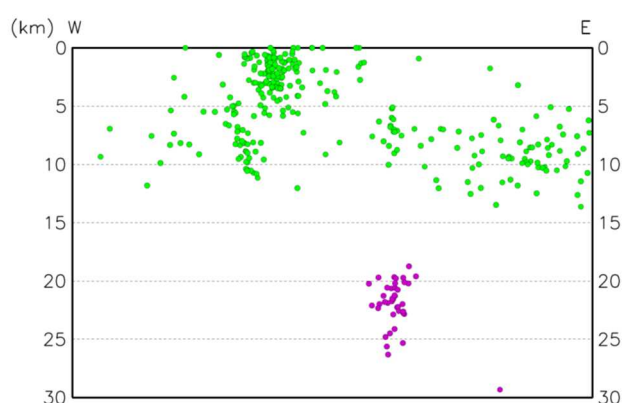
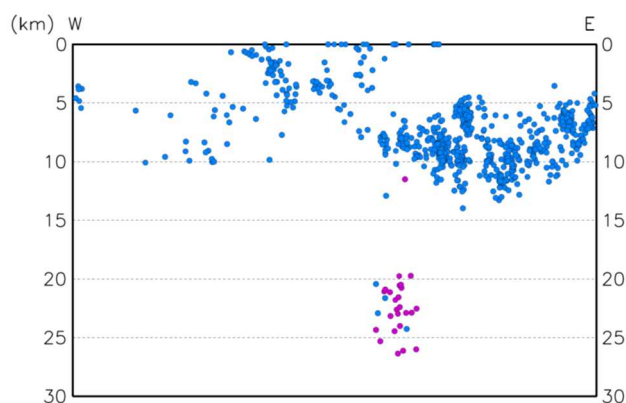
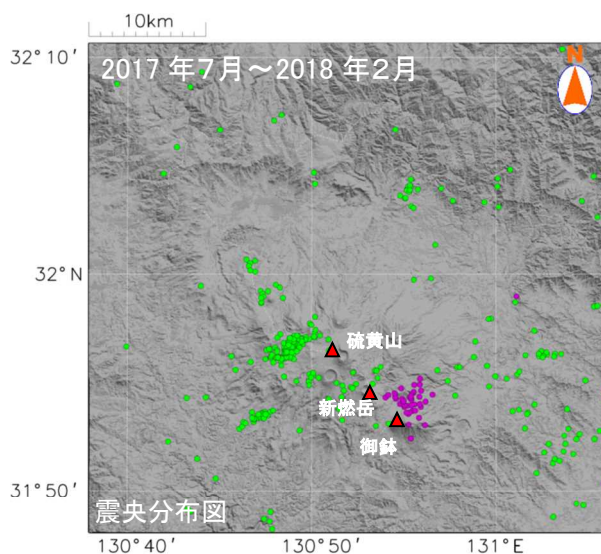
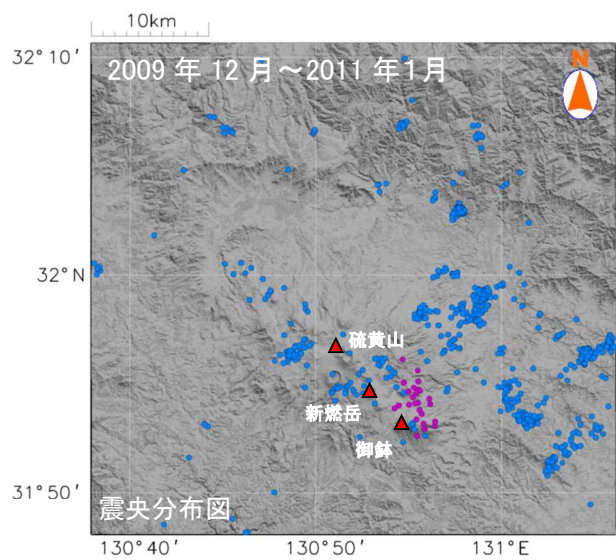


図 2-2 霧島山 一元化震源による広域の地震活動

(左上：2009年12月～2011年1月

右上：2017年7月～2018年2月

左下：2020年12月～2021年5月)

※表示している震源には、震源決定時の計算誤差の大きなものが表示されることがある。

※この図では、関係機関の地震波形を一元的に処理し、地震観測点の標高を考慮する等した新手法で得られた震源を用いている（ただし、2020年8月以前の地震については火山活動評価のための参考震源である）。

※2020年4月18日から10月23日までの地震について、暫定的に震源精査の基準を変更しているため、その前後の期間と比較して微小な地震での震源決定数の変化（増減）が見られる。

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

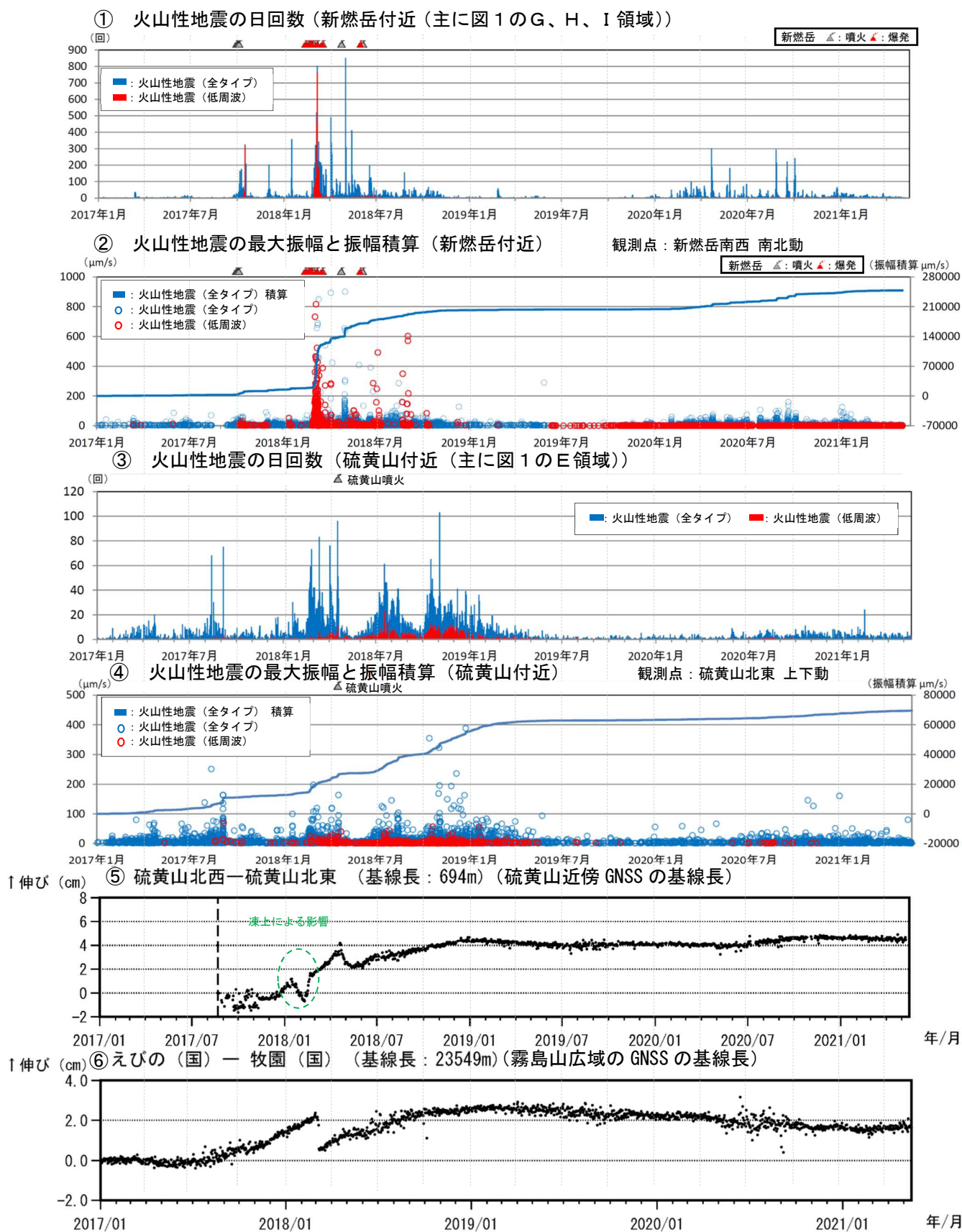


図3 霧島山 新燃岳の火山性地震及び霧島山広域の GNSS の基線長と硫黄山の火山性地震及び硫黄山近傍の GNSS の基線長の活動経過図（2017 年 1 月～2021 年 5 月 15 日）

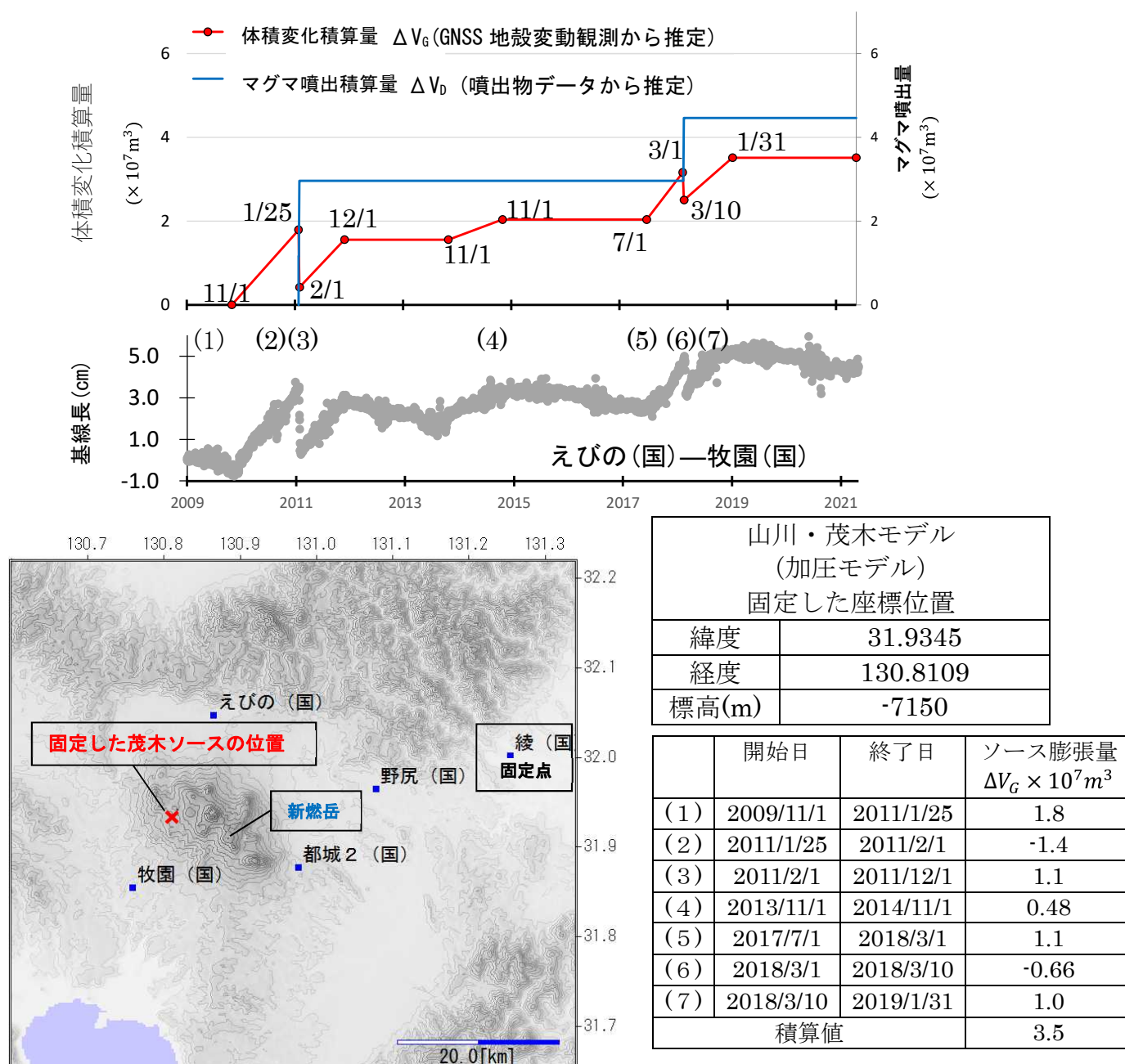


図4 霧島山 噴出物量及び地殻変動から推定した体積変化量の積算の推移

(2009年1月～2021年5月)

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)～(7)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、 $3.5 \times 10^7 \text{m}^3$ 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。

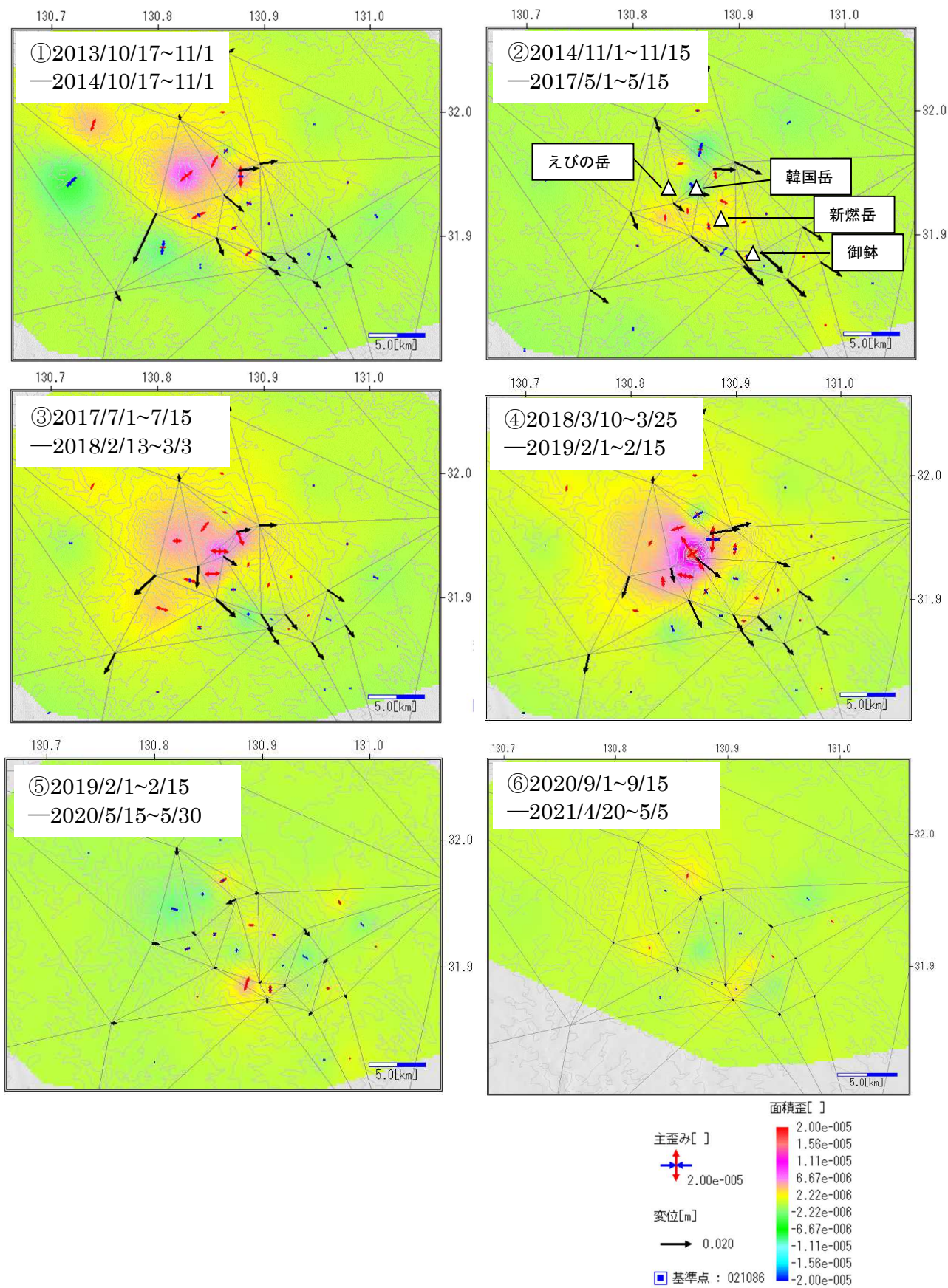


図5 霧島山 霧島山周辺のGNSSの期間毎の水平変位・主ひずみ・面積ひずみ
(2013年10月17日~2021年5月5日)

2019年2月以降は顕著な地殻変動は見られない。

※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。

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、硫黄山西側 500m 付近においてやや活発な噴気活動が続いているが、噴気域及び地熱域のさらなる拡大は認められていない。

火山性地震は 2020 年 5 月以降わずかに増加した状態が続いているが、さらなる増加は認められず、概ね少ない状態で経過している。また、GNSS 連続観測では、同時期から山体浅部の膨張を示すわずかな伸びが認められていたが、2021 年 2 月以降は停滞している。

これらのことから、現在のところ噴火の兆候は認められないが、今後、火山性地震の増加や再び浅部の膨張を示す地殻変動等が認められた場合には、火山活動が活発化する可能性がある。

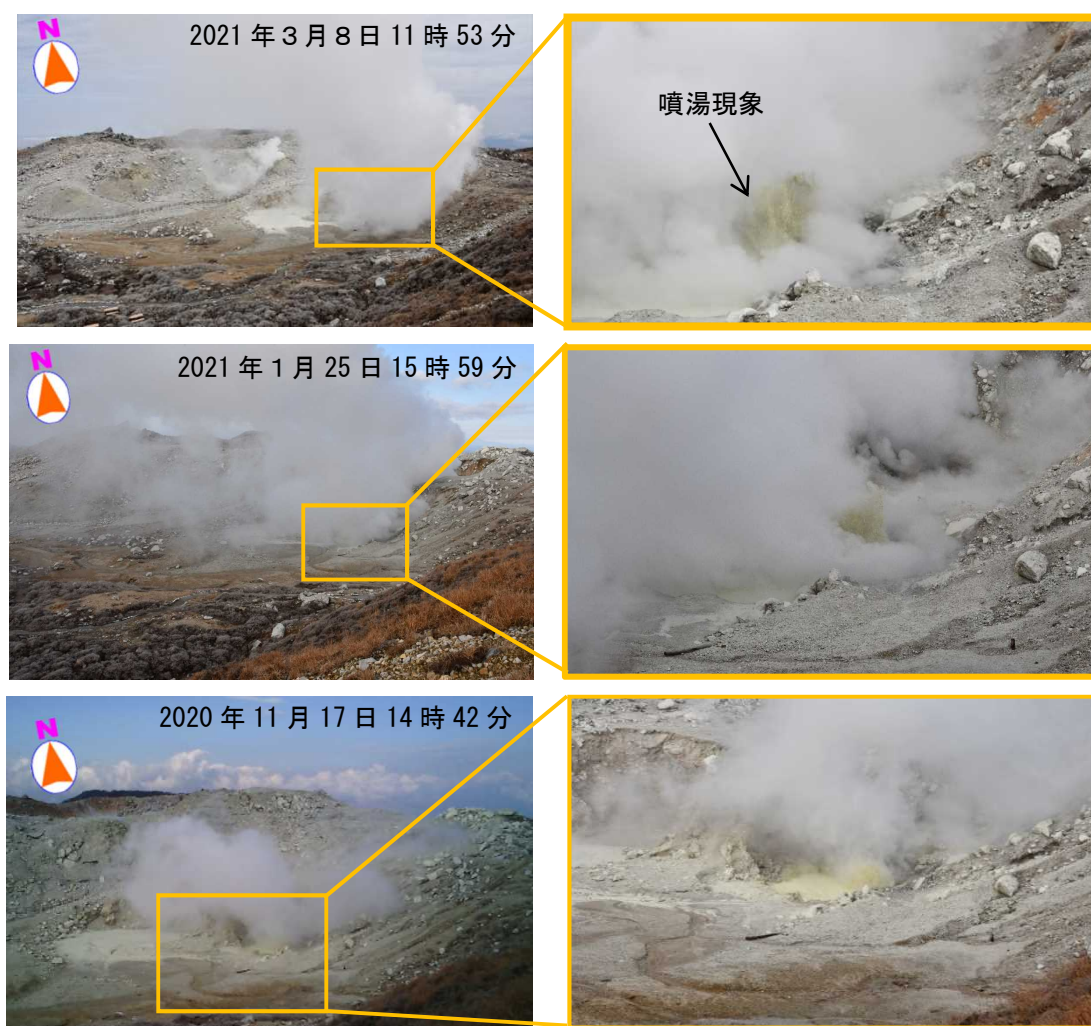


図 1 霧島山（えびの高原（硫黄山）周辺） 硫黄山南側の噴気の状況

硫黄山南側の噴気孔では引き続き活発な噴気活動を確認した。2020 年 11 月の観測時と比較して、2021 年 1 月以降、噴気や噴湯の勢いがわずかに大きくなっている傾向が認められる。

この資料は気象庁のほか、国土地理院、東京大学、九州大学、鹿児島大学、国立研究開発法人防災科学技術研究所、宮崎県及び鹿児島県のデータも利用して作成している。

資料中の地図の作成に当たっては、国土地理院発行の『数値地図 50mメッシュ（標高）』『基盤地図情報』『基盤地図情報（数値標高モデル）』を使用している。



図2 霧島山（えびの高原（硫黄山）周辺） 図1、図4-1の観測位置及び観測方向

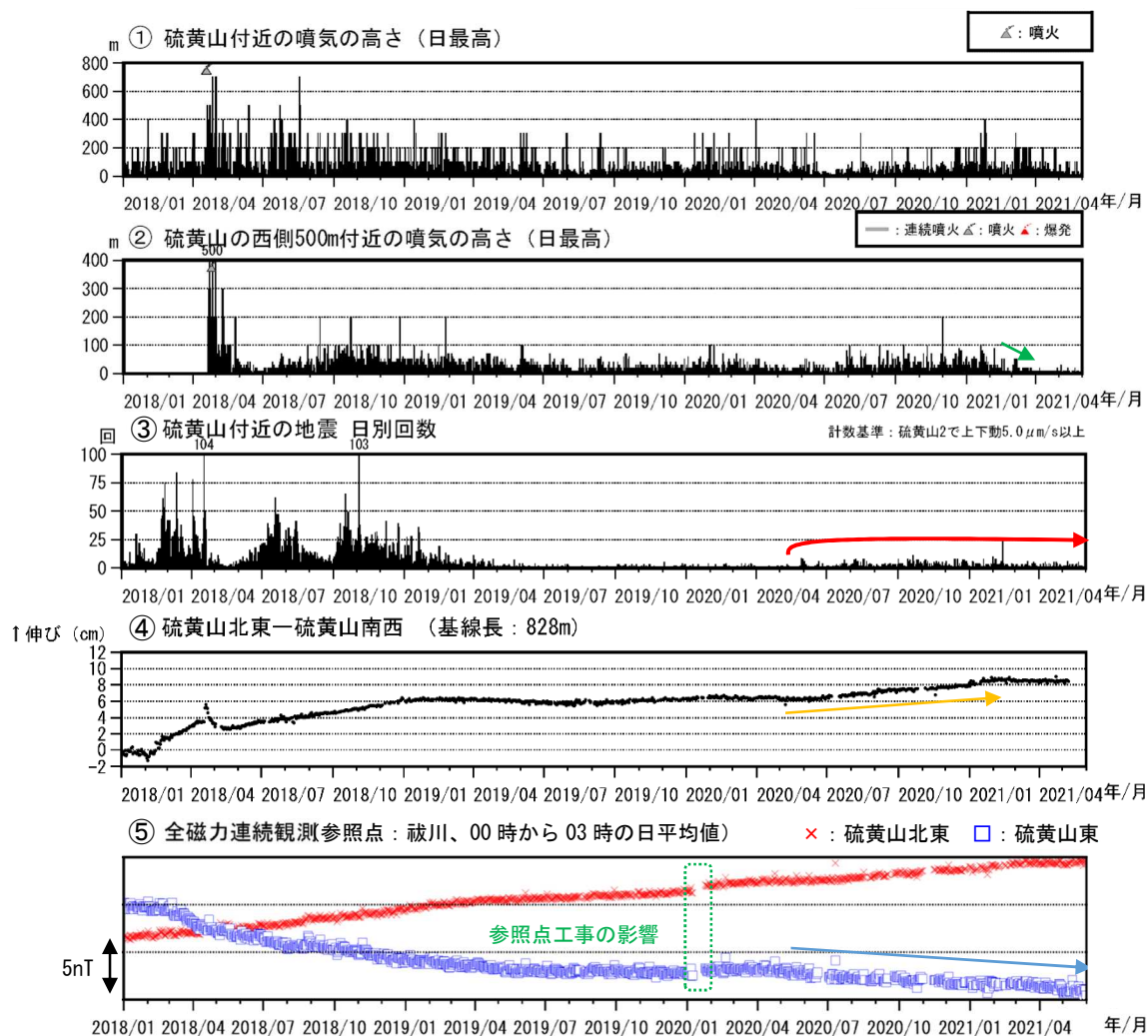


図3 霧島山（えびの高原（硫黄山）周辺） 火山活動経過図

（2018年1月～2021年5月）

- ・硫黄山の南側の噴気地帯では、引き続き活発な噴気活動が続いている。硫黄山の西側500m付近の噴気活動は、2020年7月頃から噴気量のわずかに増加した状態が続いていたが、2021年3月に噴気量が減少した（緑矢印）。
- ・火山性地震は2020年5月以降わずかに増加した状態が続いているが、さらなる増加は認められず、概ね少ない状態で経過している（赤矢印）。
- ・GNSS連続観測では、硫黄山近傍の一部の基線において、2020年5月頃から山体浅部の膨張を示すわずかな伸びが認められていたが（橙矢印）、2021年2月以降は停滞している。
- ・全磁力観測では、消磁傾向が継続し、特に硫黄山の南側の観測点で2020年5月頃から明瞭になっている（青矢印）。

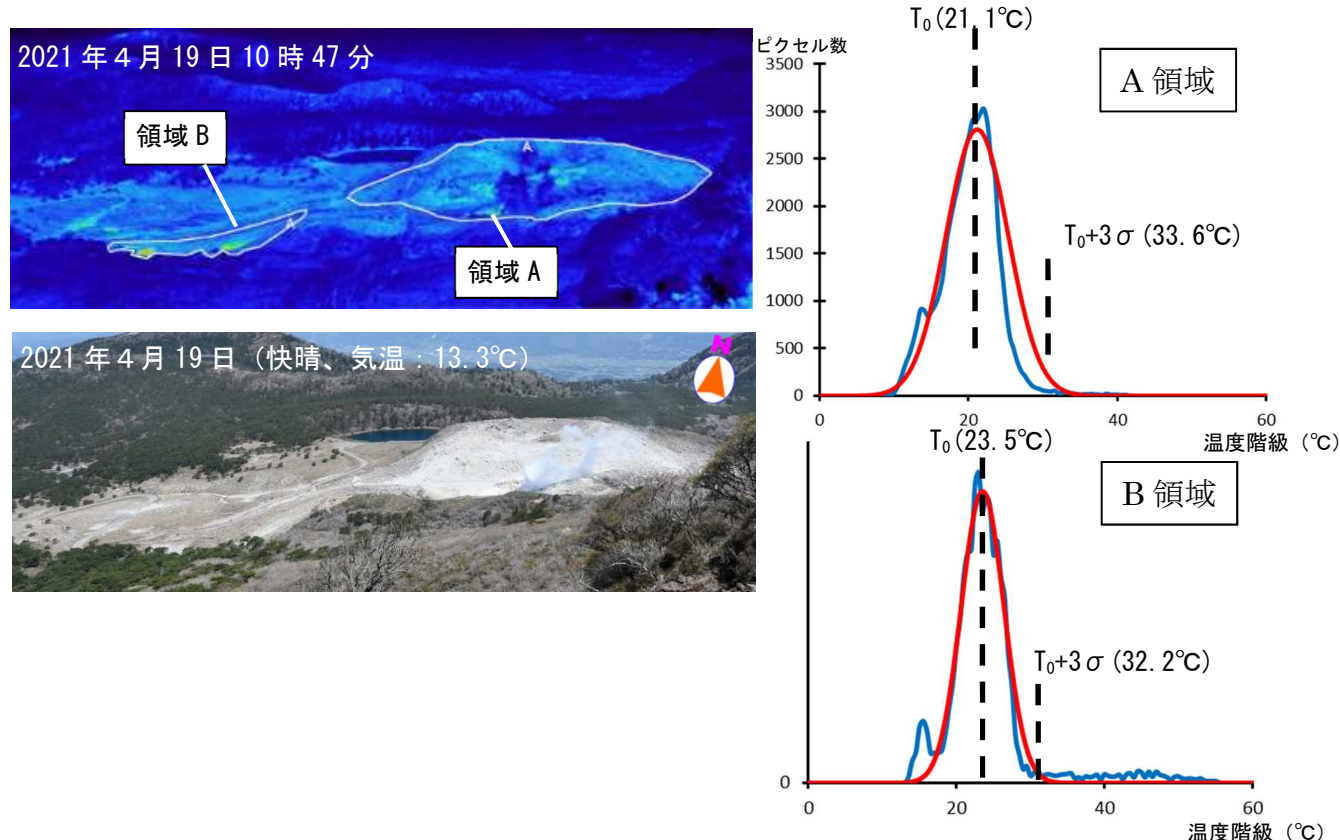


図 4-1 霧島山（えびの高原（硫黄山）周辺） 図 4-2 に示した硫黄山の放熱率算出の解析領域と温度分布の例（2021 年 4 月 19 日 10 時 47 分）

- ・ 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 4-2）。

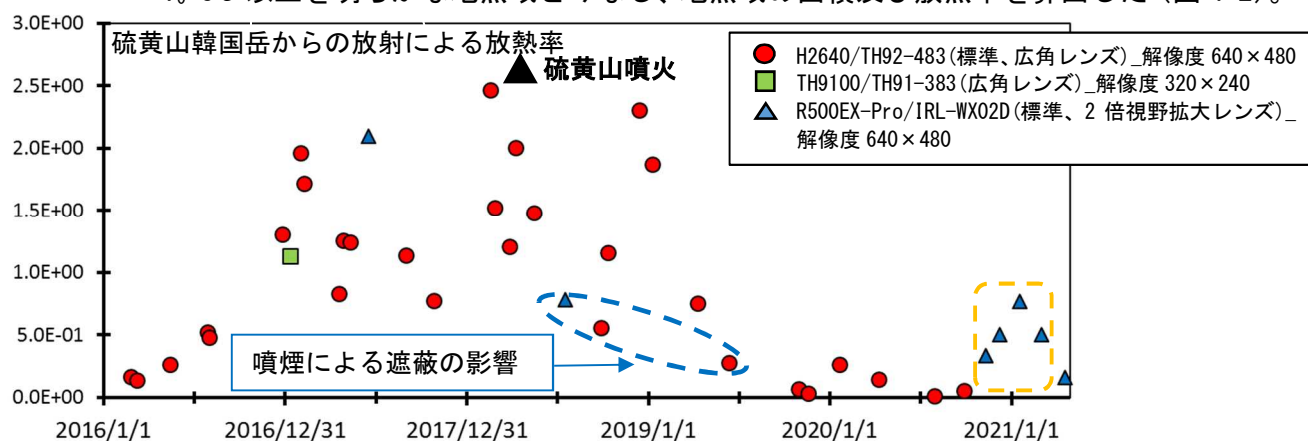


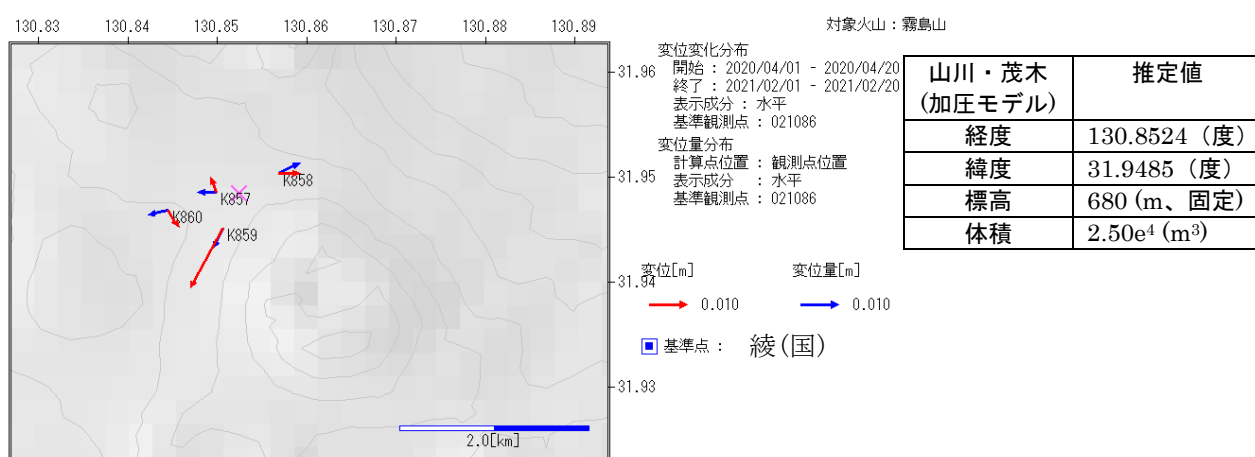
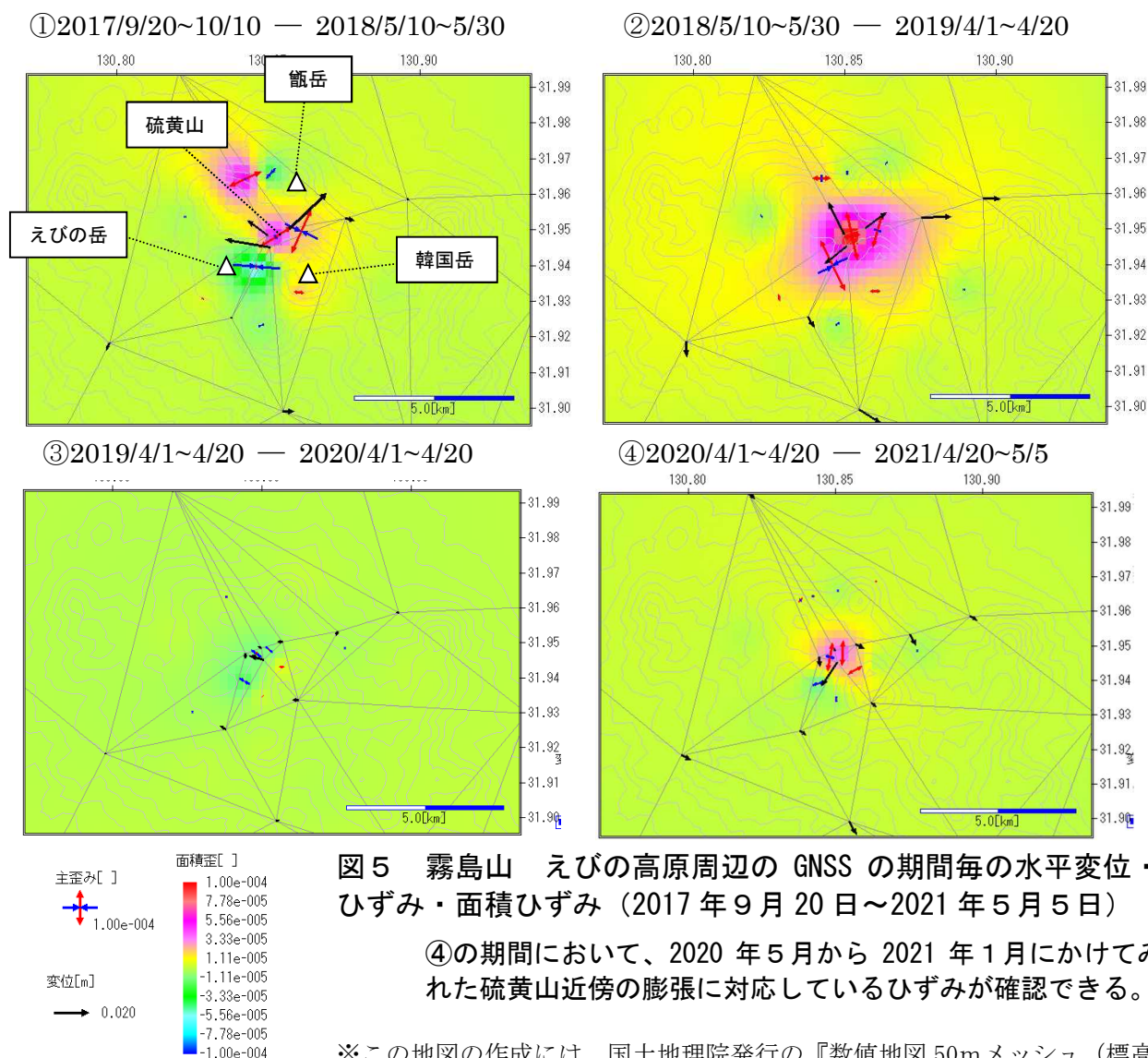
図 4-2 霧島山（えびの高原（硫黄山）周辺） 地表面温度分布より算出した硫黄山の放熱率の推移（値を観測日ごとに平均）（2016 年 1 月～2021 年 4 月）

2020 年 10 月頃から 2021 年 3 月頃にかけて放熱率が一時的に増加した（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。



- ・ 2020 年 5 月以降から 2021 年 1 月にかけてみられた硫黄山近傍の地殻変動に対応した膨張量を計算 (茂木モデルの深さを固定し、水平位置及び膨張量を変動) した。
- ・ ソースの深さは第 146 回予知連絡会九州大学資料を参考にしている。

※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。

大幡池

噴気は認められず、火山性地震及び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） 火口内及び火口周辺の状況

(①：2021年1月19日、②：2020年10月13日)

噴気は認められず、火口内及び火口周辺の状況に特段の変化は認められなかった。

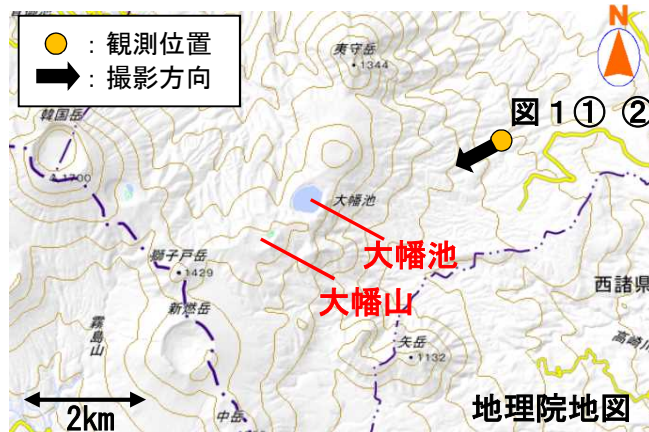


図2 霧島山（大幡池） 図1の観測位置及び撮影方向

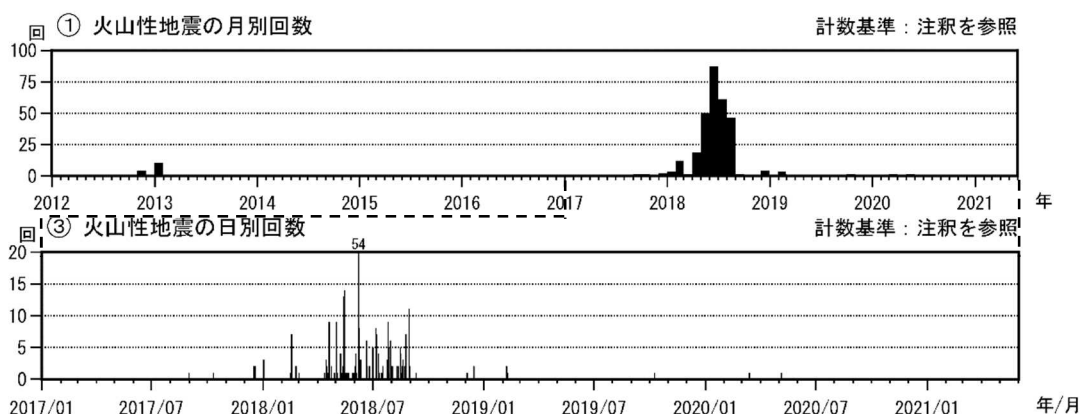


図3 霧島山（大幡池） 火山性地震の発生状況 (2012年1月～2021年5月)

<2020年12月～2021年5月の状況>

・火山性地震は観測されなかった。

※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。

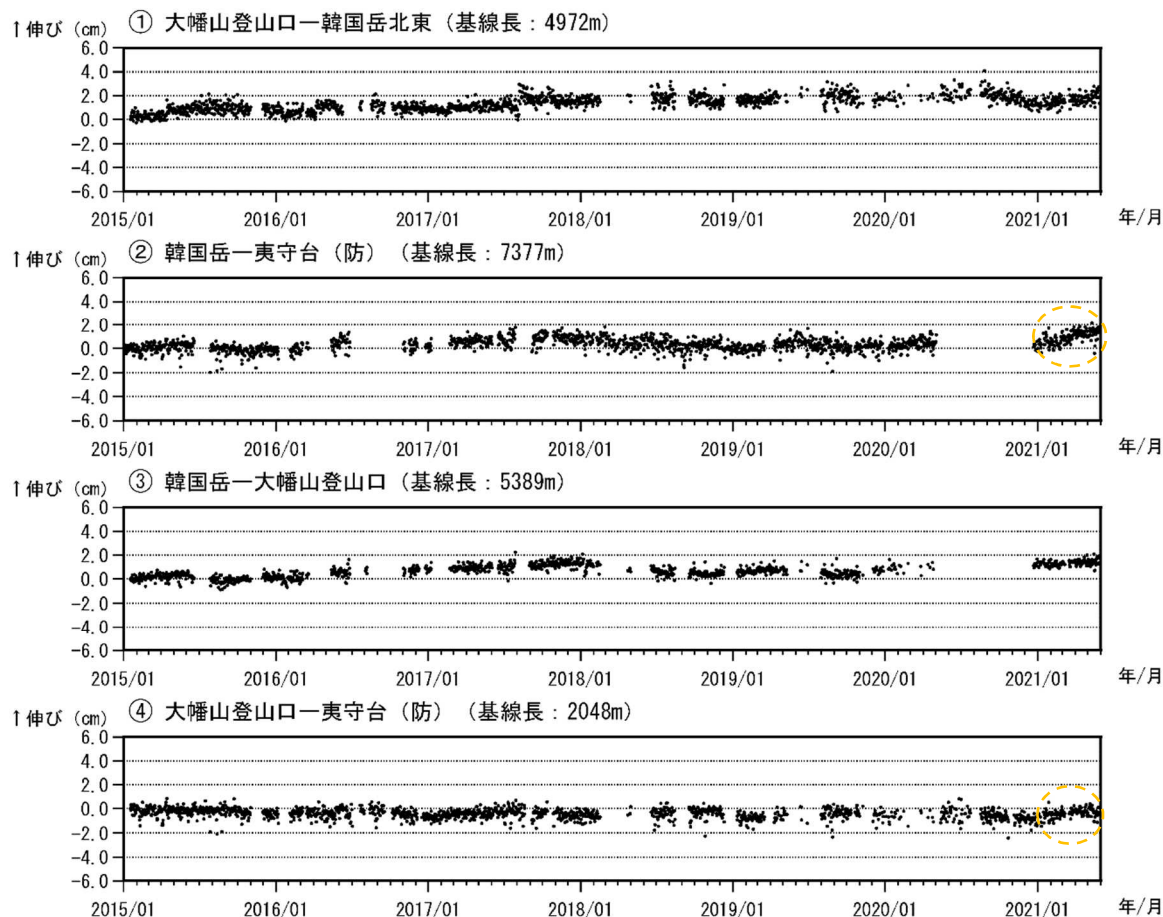


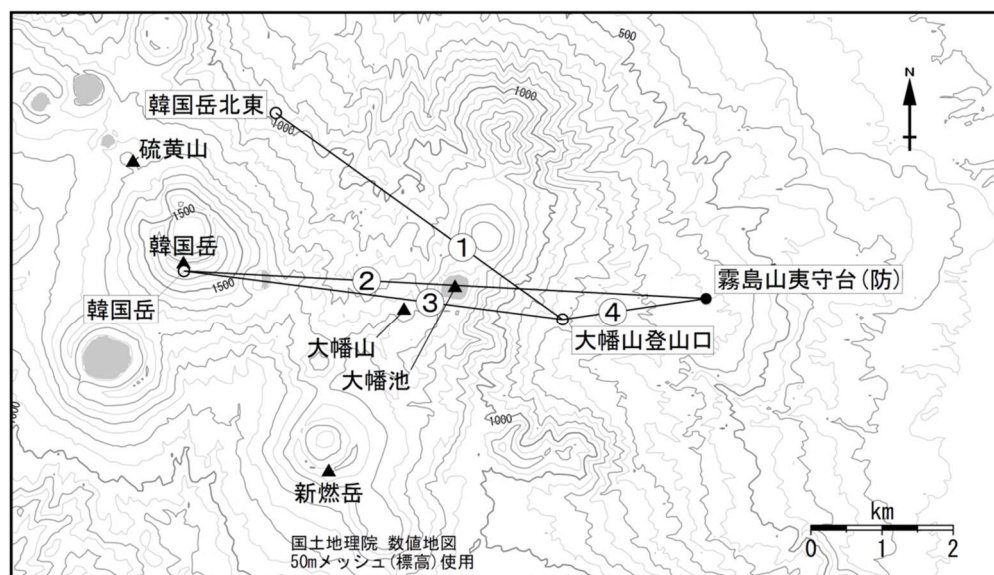
図4 霧島山（大幡池） GNSS 連続観測による基線長変化（2015 年 1 月～2021 年 5 月）
火山活動によると考えられる変化は認められなかった。

この基線は図5の①～④に対応している。

基線の空白部分は欠測を示している。

2010 年 10 月及び 2013 年 1 月に、解析方法を変更している。

橙色の破線内の変化は、夷守台観測点の局所的な変化に伴うものと考えられる。



小さな白丸 (○) は気象庁、小さな黒丸 (●) は気象庁以外の機関の観測点位置を示しています。
(防)：防災科学技術研究所

図5 霧島山（大幡池） GNSS 観測点基線図

新燃岳

新燃岳では2018年6月28日以降、噴火は観測されていない。

火口直下を震源とする火山性地震の回数は、2019年11月以降増減を繰り返しているが、2021年2月以降は少なくなっている。

新燃岳火口内及び西側斜面の割れ目付近の噴気や地熱域には、拡大傾向は認められない。

火山ガス（二酸化硫黄）の放出量は、2020年12月以降少ない状態となっている。

GNSS 連続観測では、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は2019年2月頃から認められない。

これらのことから、現在のところ噴火の兆候は認められない。



図1 霧島山（新燃岳） 新燃岳火口周辺および西側斜面の状況

①：2021年1月19日、②：2020年10月13日

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、西側斜面の割れ目において白色の噴気が引き続き上がっているのを確認した。



図2 霧島山（新燃岳） 観測位置及び撮影方向

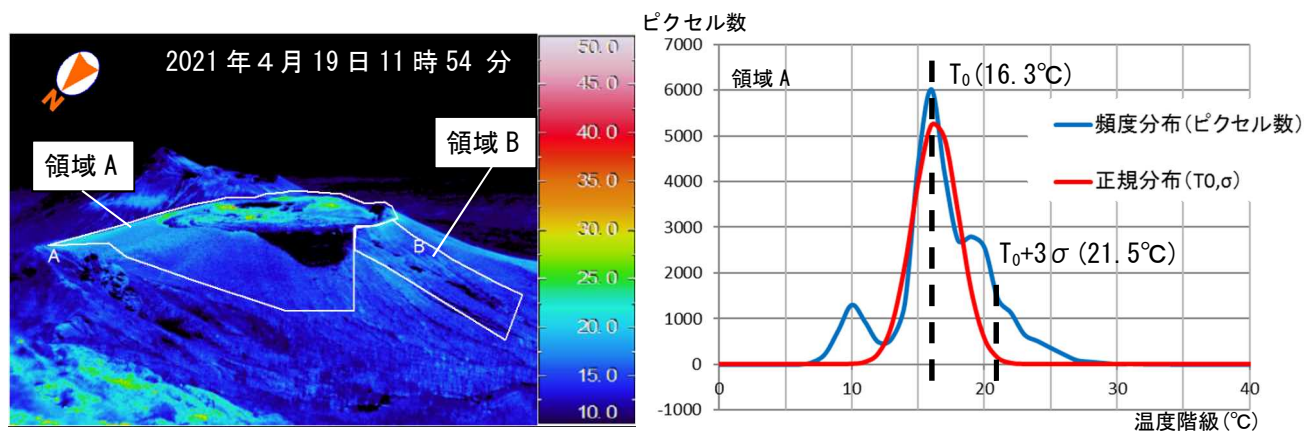


図 3-1 霧島山（新燃岳） 図 3-2 に示した新燃岳の放熱率算出の解析領域と温度分布の例（2021 年 4 月 19 日 11 時 54 分）

- ・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。

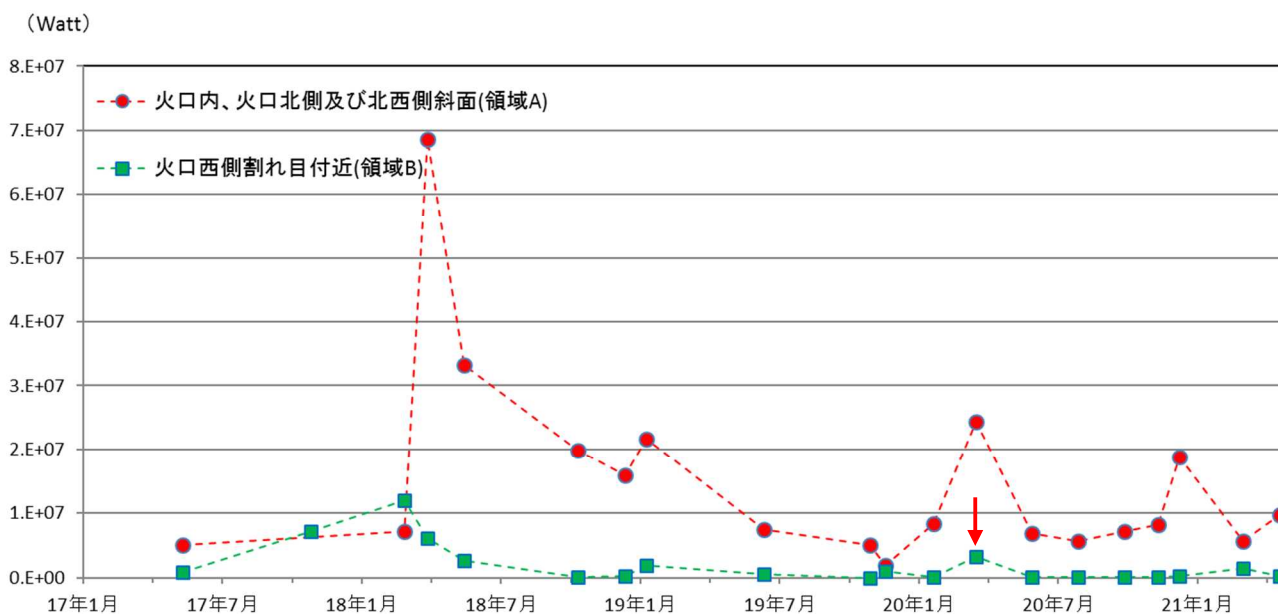


図 3-2 霧島山（新燃岳） 地表面温度分布より算出した新燃岳の放熱率の推移（値を観測日ごとに平均）（2017 年 5 月 11 日～2021 年 4 月）

- ・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 月に地熱域の拡大に伴うと考えられる放熱率の増加が認められる（赤矢印）が、その後は特段の変化は認められない。

※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 3-1 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。

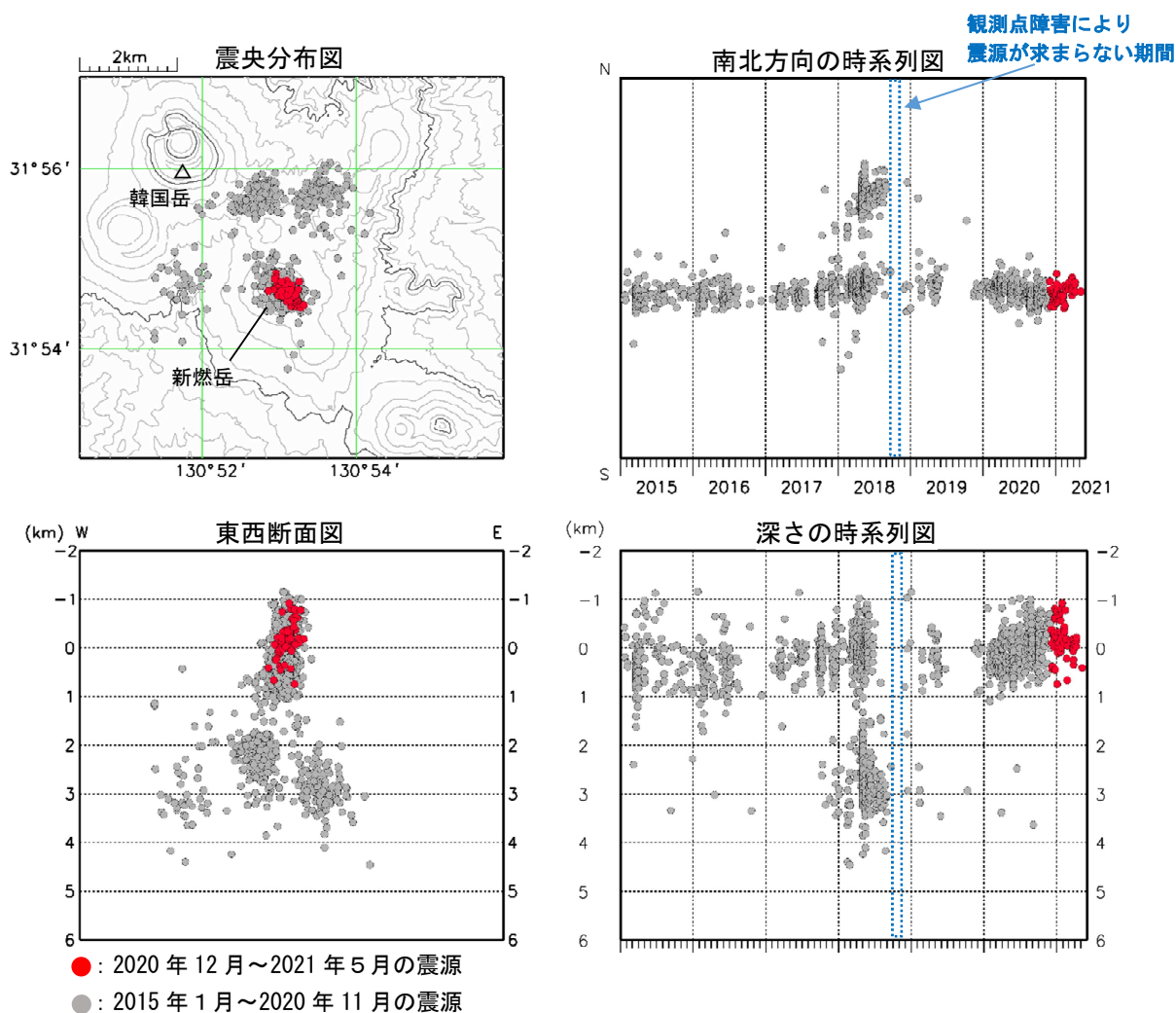


図 4 霧島山（新燃岳） 震源分布図（2015 年 1 月～2021 年 5 月）

<2020 年 12 月～2021 年 5 月の状況>

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。

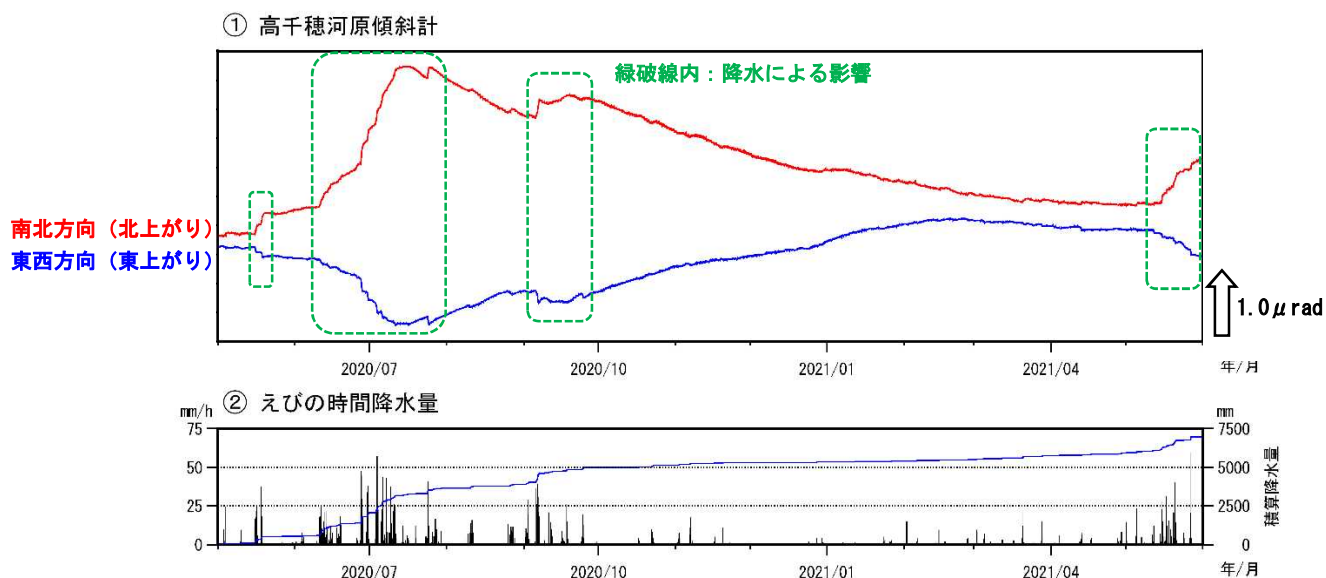


図 5 霧島山（新燃岳） 地殻変動の状況（2020 年 5 月～2021 年 5 月）

山体膨張を示す顕著な変化は観測されていない。

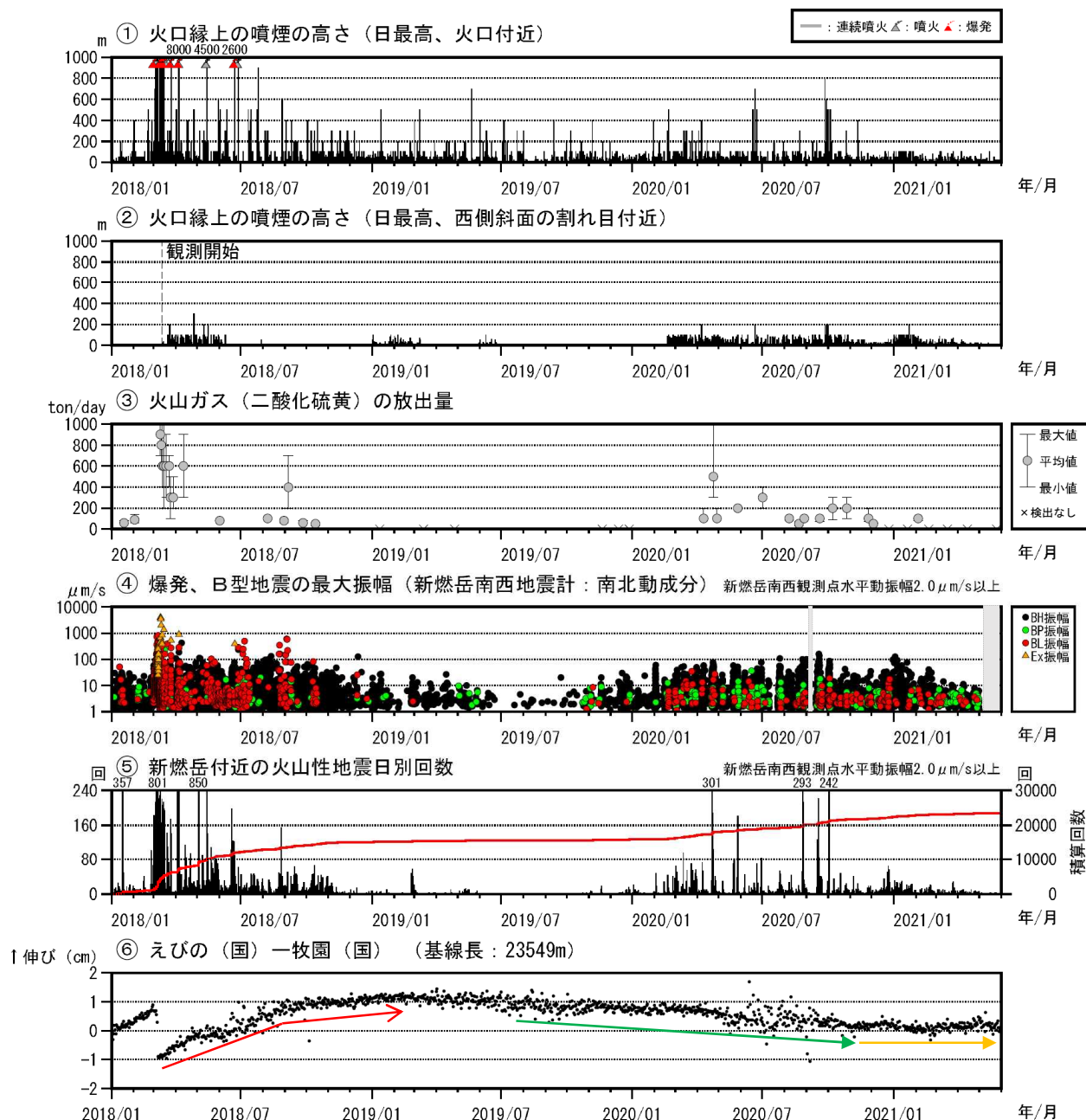


図6 霧島山（新燃岳） 火山活動経過図（2018年1月～2021年5月）

<2020年12月～2021年5月の状況>

- ・ 白色の噴煙の高さは火口縁上100m以下で経過した。
- ・ 火山ガス（二酸化硫黄）の放出量は2020年12月以降減少し、少ない状態で経過している。
- ・ 新燃岳の火口直下を震源とする火山性地震は、2019年11月以降増減を繰り返しているが、2021年2月以降は少ない状態で経過している。また、BL型及びBP型地震が時々観測された。火山性微動は観測されていない。
- ・ GNSS観測では、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（赤矢印）は2019年2月頃から停滞し、同年7月頃から縮み（緑矢印）に転じていたが、2020年11月頃から停滞（橙矢印）している。

④の灰色の領域は、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。

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） 御鉢の火口内及び火口周辺の状況
（①：2021年1月19日、②：2020年10月13日）

火口内及び火口周辺の状況に特段の変化は認められなかった。

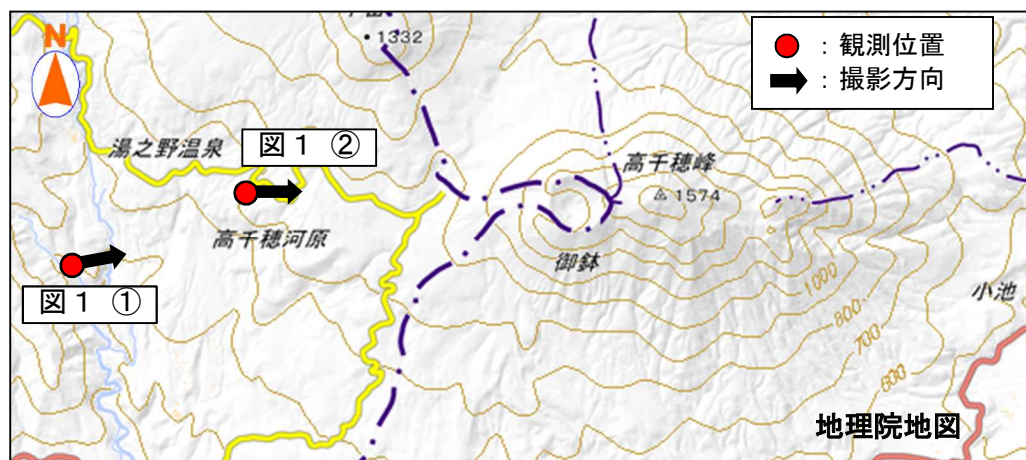


図2 霧島山（御鉢） 図1の観測位置及び撮影方向

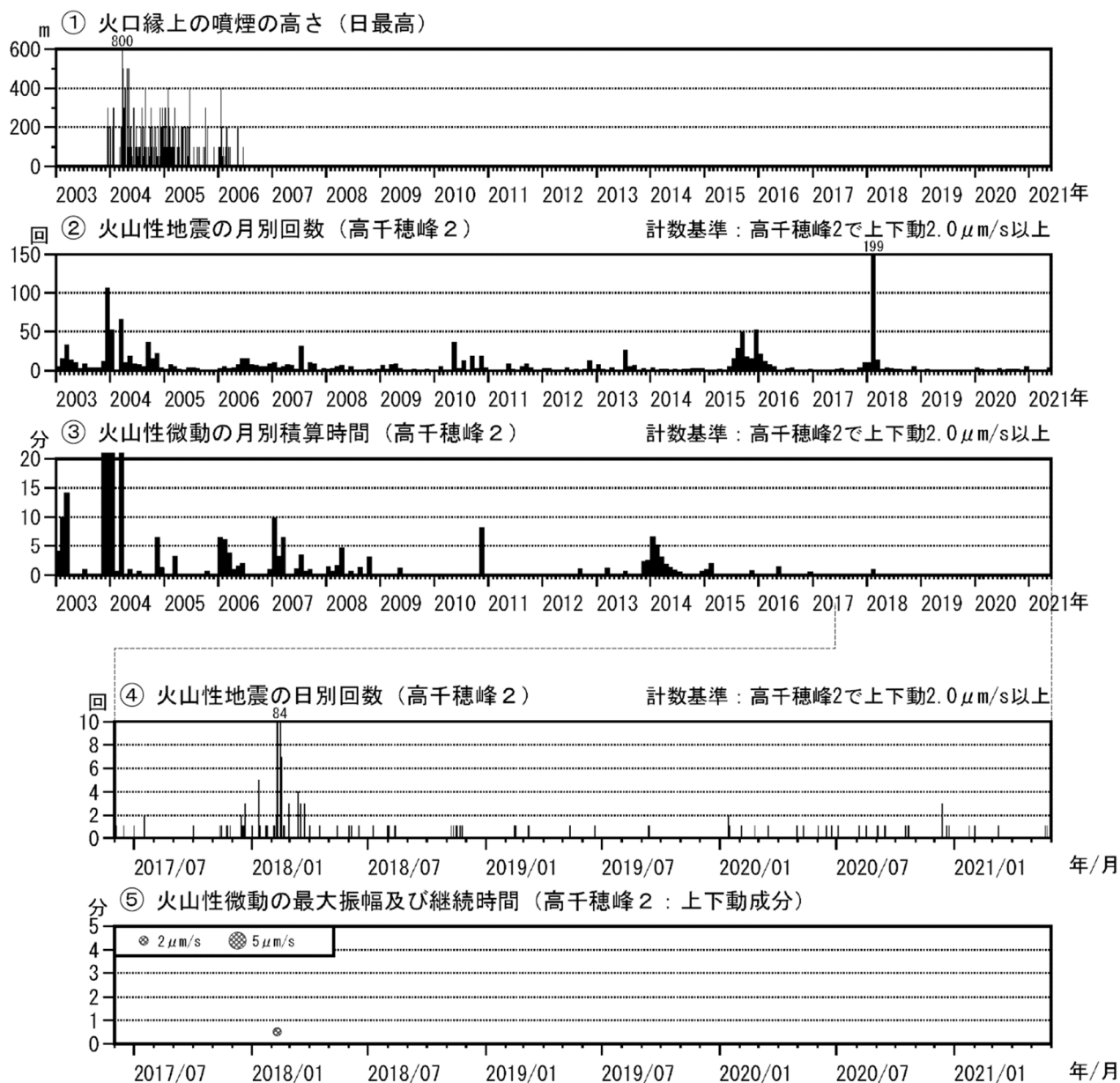


図3 霧島山（御鉢） 火山活動経過図（2003年1月～2021年5月）

<2020年12月～2021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。

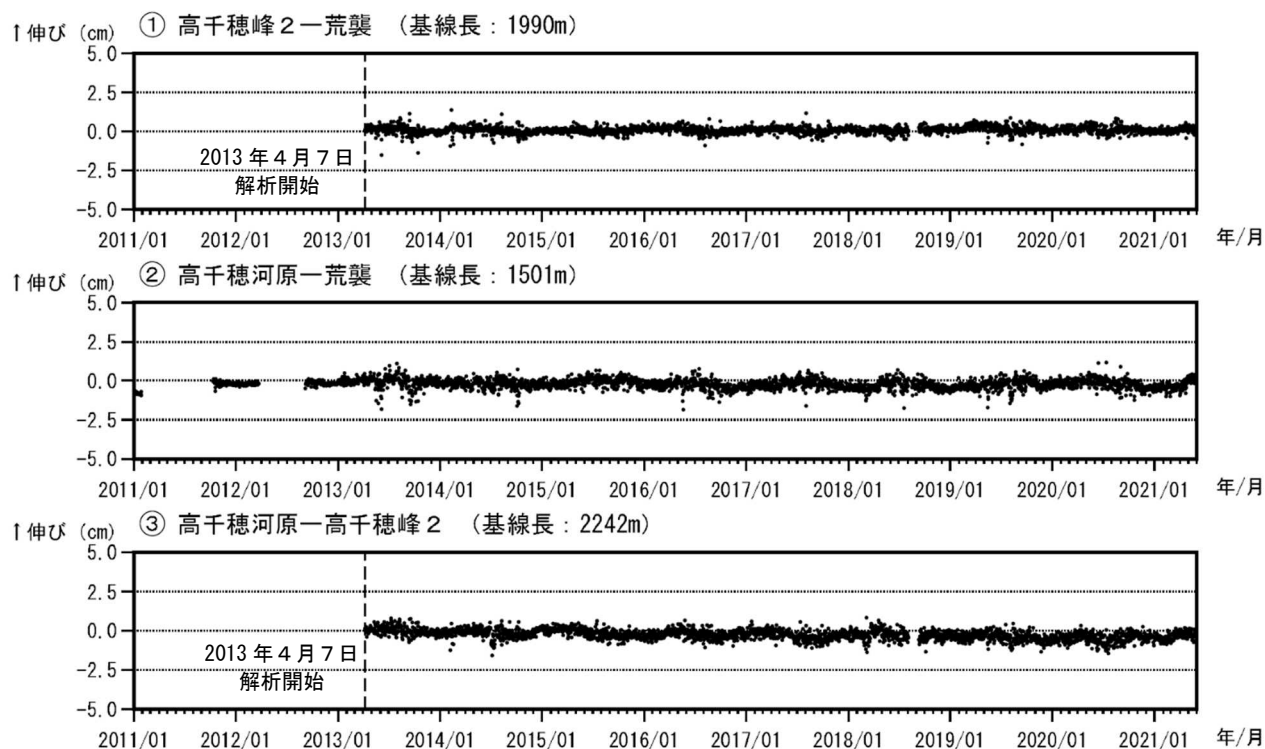


図4 霧島山（御鉢） GNSS 連続観測による基線長変化（2010年1月～2021年5月）

火山活動によると考えられる変化は認められなかった。

※この基線は図5の①～③に対応している。

※基線の空白部分は欠測を示している。

※2010年10月及び2013年1月に、解析方法を変更している。

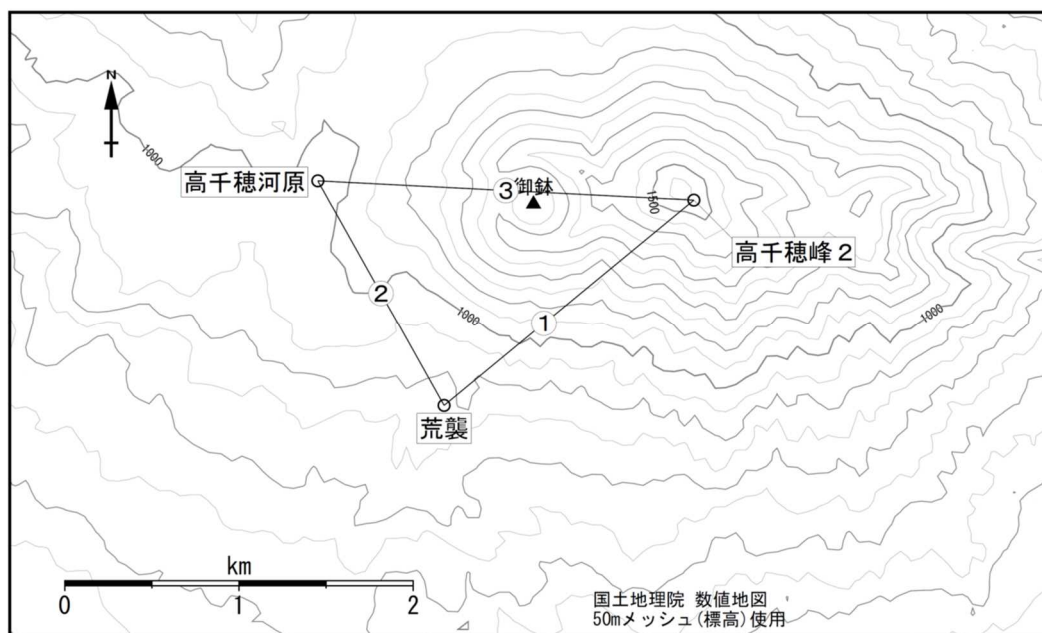


図5 霧島山（御鉢） GNSS 観測点基線図

※白丸 (○) は気象庁の観測点位置を示している。

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。また、硫黄山付近で視線距離短縮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.
23_2970 (SM1_U2-7)	南行	右	36.1°	2020.03.02	2021.03.01	第 1 図- A, B, C
130_630 (SM1_U2-6)	北行	右	32.4°	2020.05.14	2021.05.13	第 1 図- D, E, F
131-620 (SM1_U2-9)	北行	右	42.9°	2020.03.10	2021.03.09	第 1 図- G, H, I

3. 解析結果

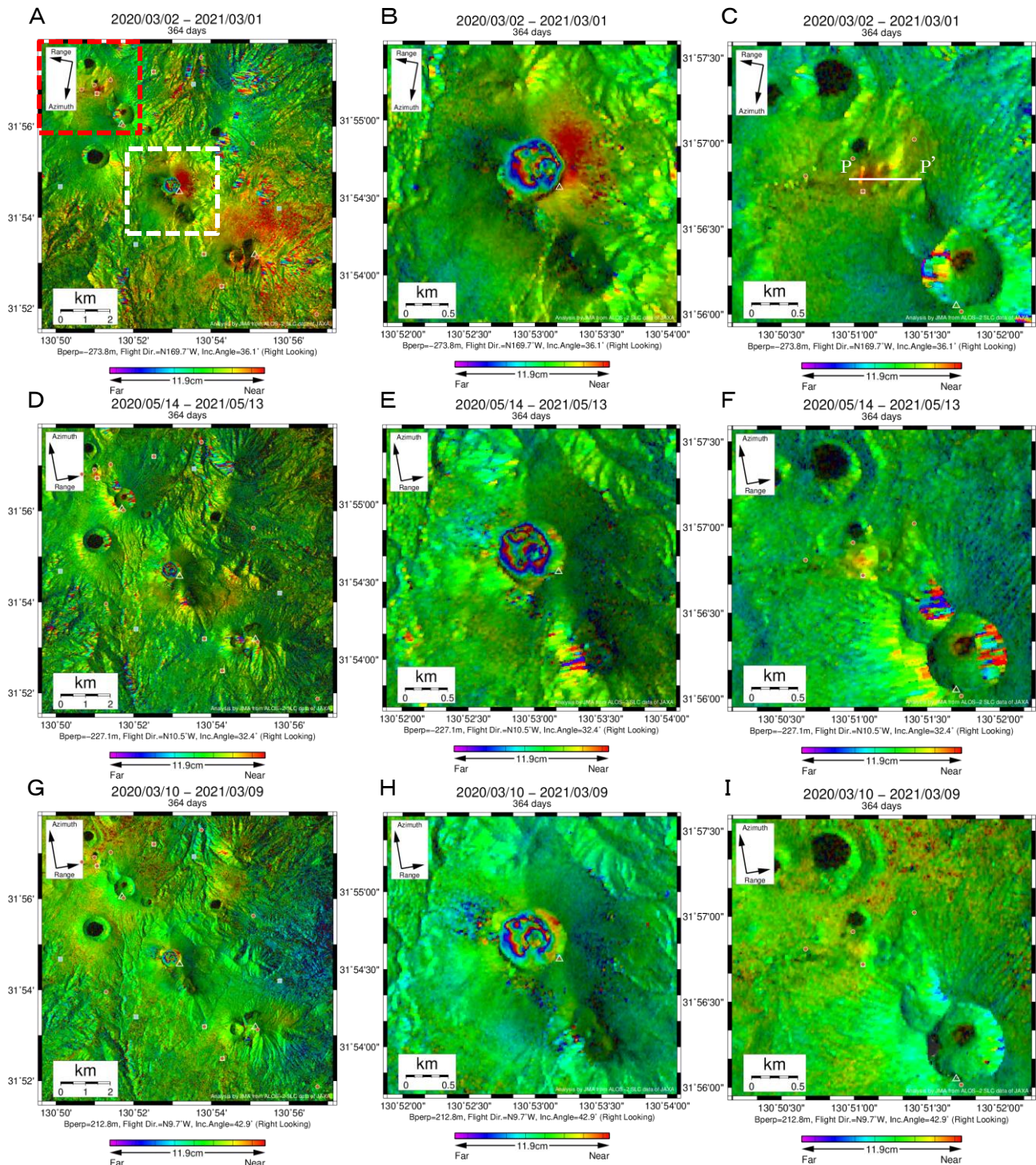
第 1 図に霧島山周辺の長期ペアによる干渉解析結果画像を示す。新燃岳付近の拡大図 (B, E, H) において、火口内で視線距離伸長の位相変化が認められる。また、えびの高原 (硫黄山) 付近の拡大図 (C, F, I) において、硫黄山付近で視線距離短縮の位相変化が認められる。その他の地域ではノイズレベルを超えるような位相変化は認められない。

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。B またはその付近において視線距離の短縮が認められる。

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 23 (SM1_U2-7) (A, B, C)、130 (SM1_U2-6) (D, E, F)、131 (SM1_U2-9) (G, H, I) による干渉解析結果
霧島山及びその周辺 (A, D, G)、新燃岳付近の拡大図 (B, E, H)、えびの高原 (硫黄山) 付近の拡大図 (C, F, I)

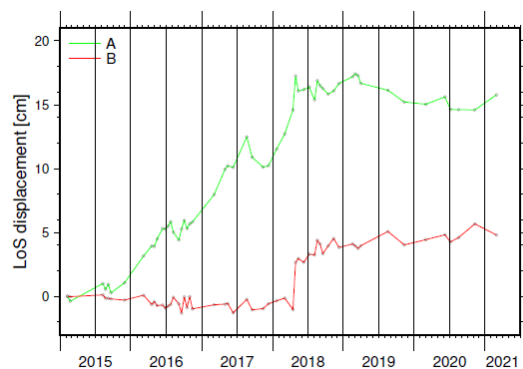
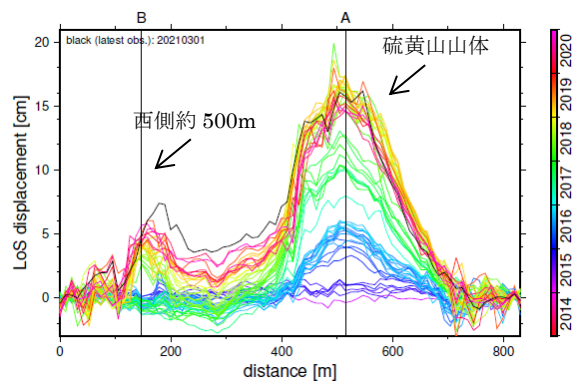
図中の白三角印は山頂位置を示す。丸印は GNSS 観測点、四角印は傾斜観測点を示す。

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。

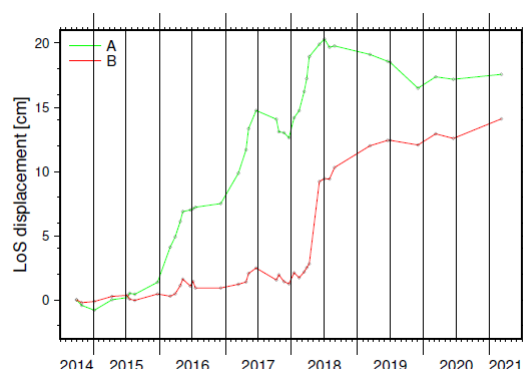
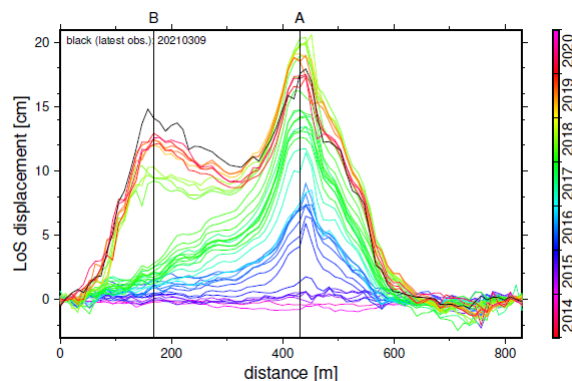
新燃岳付近の拡大図 (B, E, H) において、火口内で視線距離伸長の位相変化が認められる。また、えびの高原 (硫黄山) 付近の拡大図 (C, F, I) において、硫黄山付近で視線距離短縮の位相変化が認められる。その他の地域ではノイズレベルを超えるような位相変化は認められない。

霧島山

パス 23



パス 131



第 2 図 えびの高原（硫黄山）付近の地表変位の時間変化（左：パス 23、右：パス 131）
上は東西断面（第 1 図-C 中の P-P'）、下は時系列を示す。視線距離短縮を正とする。
B またはその付近において視線距離の短縮が認められる。

霧島山(硫黄山)周辺の湧水・火口跡熱水の化学組成

(2021 年 6 月 1 日観測まで)

2021 年 6 月 1 日までに採取した霧島山(硫黄山)周辺の湧水および火口跡熱水の化学組成を分析した.

(1) 硫黄山山頂域の南火口跡(P), 湧水(A)の Cl/SO_4 比は, 2020 年 11 月から 2021 年 3 月にかけて増加したが, 2021 年 6 月には再び低下した.

2018 年 4 月噴火の前後で高まった湧水 A の Cl/SO_4 比は 2019 年 3 月頃から明瞭に減少し, 翌年 2020 年 3 月以降は 0.1 以下を維持している(表 1, 図 2). 直近の観測では, Cl/SO_4 比が 2020 年 11 月に 0.059, 2021 年 3 月に 0.064, 同 6 月に 0.017 と推移した(表 1, 図 2).

硫黄山南火口跡(Pb)の湯だまりは, 湧水 A と同様に 2019 年 3 月頃から Cl/SO_4 比が減少して 2019 年 11 月以降は 0.1 以下を維持していたが, 直近の観測では, Cl/SO_4 比が 2020 年 11 月に 0.000, 2021 年 3 月に 0.142, 同 6 月に 0.010 と推移した.

(2) 硫黄山西火口跡(V2)の熱水の Cl/SO_4 比は 2020 年 11 月から 2021 年 6 月にかけて低下したが, 溶存成分濃度や Cl/SO_4 比は山頂域の湧水・熱水よりも高い値を維持している.

西火口跡の湯だまりは 2020 年夏以降, 産状(形状や水量の変化, 噴気の出現など)が大きく変化している. 2021 年 6 月の観測では湯だまりは間欠化しており, 午前 11:20 頃には湯だまりが枯渇していたが, 少なくとも午後 15:00 頃には熱水が噴出していた. 現地での聞き取りによると, 同様の現象は 2021 年 3 月頃から観察されている様である.

西火口跡湯だまりの Cl/SO_4 比は, 山頂域の湧水や火口跡熱水よりも高い. 一方, 2020 年 11 月(Cl/SO_4 モル比=1.88)から 2021 年 6 月(同 1.72)にかけて低下した点は, 山頂域の湧水・熱水と共通する.

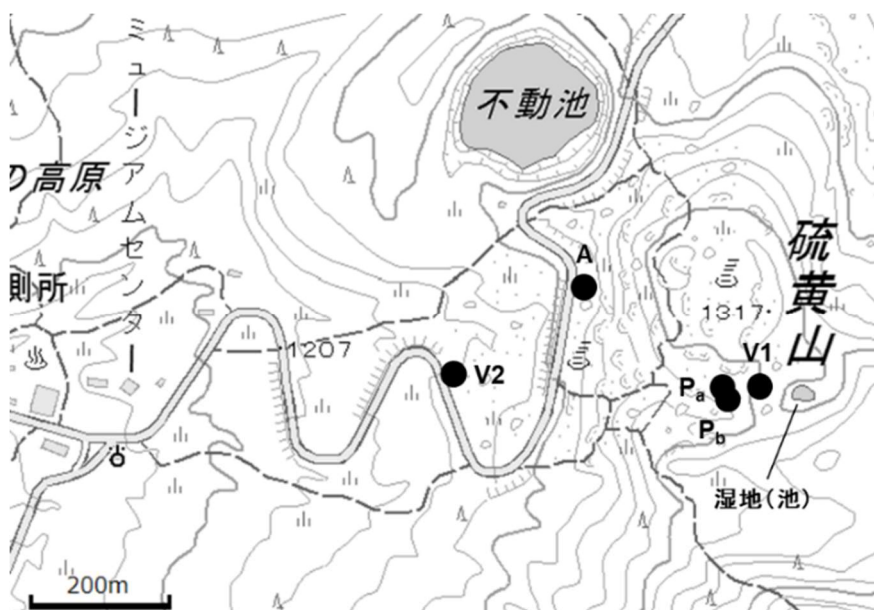


図 1. 試料採取および観測地点 (背景地図に地理院地図を使用した)

霧島山 (硫黄山)

第148回火山噴火予知連絡会

気象研・東海大・東大院・福岡管区气象台・鹿児島地方气象台・宮崎地方气象台

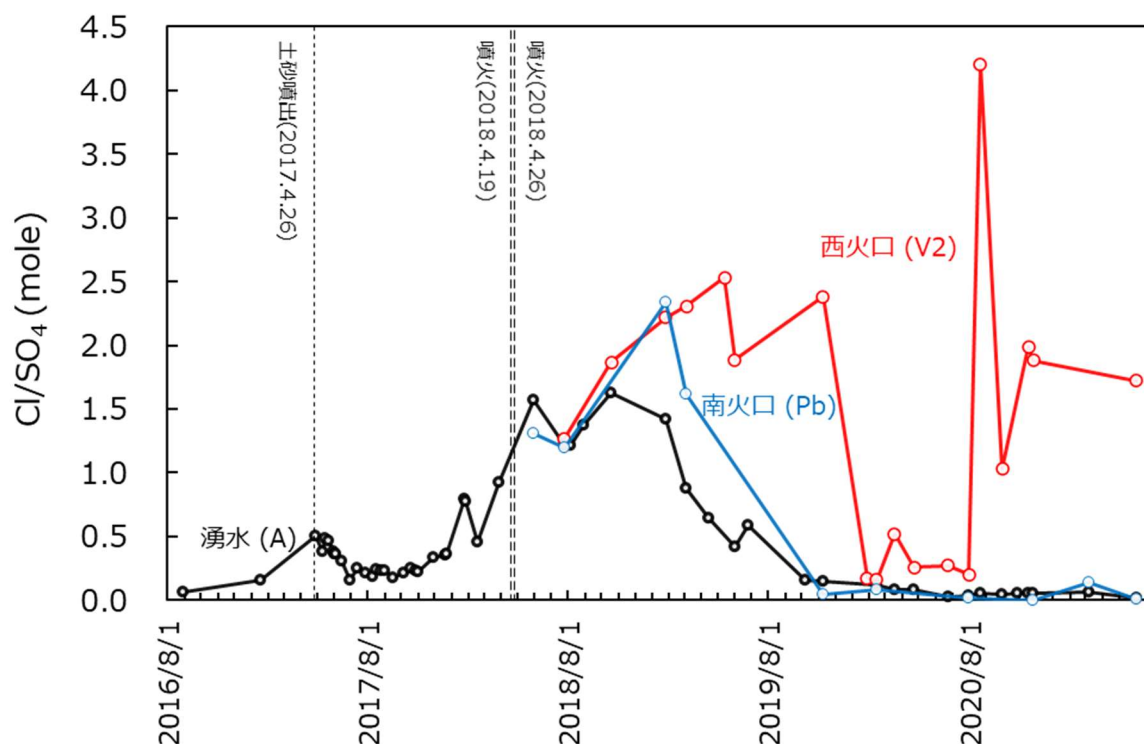


図 2. 硫黄山周辺の湧水，火口跡熱水の Cl/SO_4 モル比の変化



図 3. 観測地点の様子(2020.6.1)

霧島山（硫黄山）

表 1. 霧島山(硫黄山)周辺の湧水および湯だまりの化学組成 (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
硫黄山南火口跡熱水(Pa)	2020/11/26	20.9	1.44	1.55	1.6	2970	0.001
	2021/3/8	74.1	1.06	4.39	525.9	9764	0.146
	2021/6/1	50.3	1.77	0.74	10.5	1381	0.021
硫黄山南火口跡熱水(Pb)	2020/11/26	88.4	0.82	9.77	3.6	24200	0.000
	2021/3/8	87.0	0.82	7.97	947.2	18129	0.142
	2021/6/1	83.0	1.19	2.84	21.6	5875	0.010
硫黄山西火口跡熱水(V2)	2020/11/26	90.2	1.26	2.83	2370	3410	1.883
	2021/3/8				枯渇		
	2021/6/1*	91.8	0.91	6.58	6429	10121	1.721

* 11:20頃には枯渇していた。15:00頃、熱水の噴出を確認し、採取した。

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, Integrion)を使用した。分析値は修正する可能性があります。

*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), 東京大学地震研究所共同利用(2020-K0B011)の研究費を使用しました。

硫黄山噴気帯及び硫黄山西噴気帯における地熱異常

硫黄山噴気帯では、硫黄山南火口において高さ 10mに達する噴湯現象 (Y2a, 2021 年 2 月) や湯溜まりの再出現 (Y2b, 1 月) があり, Y3 では依然 100℃前後の噴気が観測されている。また 2 月には地熱域 (B 域, D 域, H 域) の拡大や噴気温の上昇 (A 域) が認められたが, その後継続した活発化は見られなかった。従って, 硫黄山噴気帯では地熱活動が一時期高まったが, 現在は安定していると考えられる。一方, 硫黄山西噴気帯では, 硫黄山西火口 (W4) における水位変動が認められるが, 川湯沿いの地熱活動域などに大きな変化はない。ただし直近 6 月 6 日に W4, M1, M8 の噴気が約 100℃となり, 地熱活動の継続した監視が必要となる。

1. 硫黄山噴気帯

- ・硫黄山南火口の Y2b では, 2020 年は淡い緑色を呈する湯だまりが形成され, 12 月には水位が低下し活動が停止状態だったが, 2021 年 1 月以降は泥質物を伴う灰色の濁った湯だまりに変わった (図 4)。また, Y2a では 2 月 19 日に高さ約 10 m の噴湯を確認した (図 3B)。Y2b は 2 月に高い水位だったが, 5 月には低下を確認した。南火口 (Y2a, b) では水温が安定せず, 引き続き浅層地下水の影響が示唆される (図 6)。
- ・南火口 (Y3) では, 2020 年 5 月以降 100℃前後の噴気温が観測されており, 2 月 24 日に 105.2℃, 4 月 7 日 103.6℃, 6 月 6 日 100.4℃, 6 月 11 日 105.6℃を記録した (図 6)。
- ・周辺の噴気帯では, 2 月に H 噴気孔の南西側, D 域の南側において地熱域の拡大が認められた (図 1), B 噴気孔周辺にも地熱域の僅かな拡大が認められた。H 噴気孔南西側では, 2 月に直径約 1m の噴気を伴う陥没孔の形成 (Fb) が認められたが, 熱泥水の湧出は見られない (図 3F)。A 噴気孔 (図 7) では 1~4 月にかけ噴気温の上昇が見られたが, 直近では低下した。

2. 硫黄山西噴気帯及び川湯の湧水

- ・硫黄山西噴気帯では, 第 147 回火山噴火予知連絡会に報告した地熱活動域から顕著な変化は認められない (図 1) が, W4 で間欠泉の現象が 4 月から確認されており (九大別途報告), 4 月 21 日には水位上昇時に溢れた泥水が赤子川に流入していることを確認した。
- ・W4 孔 (西火口) の噴気温は 2020 年 12 月 10 日に 125.6℃を記録したが, その後は低下し, 6 月は 101.3℃ (6 日), 98.7℃ (11 日) であった (図 6)。また, W4 孔の火山ガスの主噴出地点が南西側の道路上に移ったため (図 5C~H), それまで活発な噴湯現象が生じていた道路外の W4 孔では去年 11 月 25 日後は安定した湯だまりが見られず, 水温は示していない。
- ・W2 孔では弱い噴気が生じていたが, 2 月 19 日に直径 30 cm ほどの噴気孔の形成を確認した。噴気温度は 97.6℃ (2 月 21 日), 97.3℃ (5 月 13 日), 74.5℃ (6 月 6 日) であった。
- ・西噴気帯の M1, M8 では 5 月 13 日まで 96~97℃であった噴気温が, 6 月 6 日に 100.5℃ (M1), 100.4℃ (M8) となった (図 7)。M8 が 100℃を超えるのは 2018 年 12 月 25 日以来, M1 が 100℃を超えたのは初めてであるが, 6 月 11 日 98.1℃ (M1), 97.9℃ (M8) と低下した。これらの温度は, 当地域の沸点 (約 96℃) よりわずかに高い。
- ・川湯 3 (K3) は, 2020 年 9 月以降湧水温が低下傾向となっていたが 2021 年 3 月以降 43~

48℃と安定し、6月6日に56.6℃、6月11日に58.6℃と上昇した(図6)。

3. ドローン調査

2020年4月21日にサーマルセンサーを搭載した小型ドローン(DJI社製 MAVIC 2 ENTERPRISE DUAL)を使用して硫黄山およびその周辺の地熱地帯を撮影した(図2)。4月21日調査では、硫黄山噴気帯、硫黄山西噴気帯、川湯などの熱異常域に大きな変化は認められない(図2)。

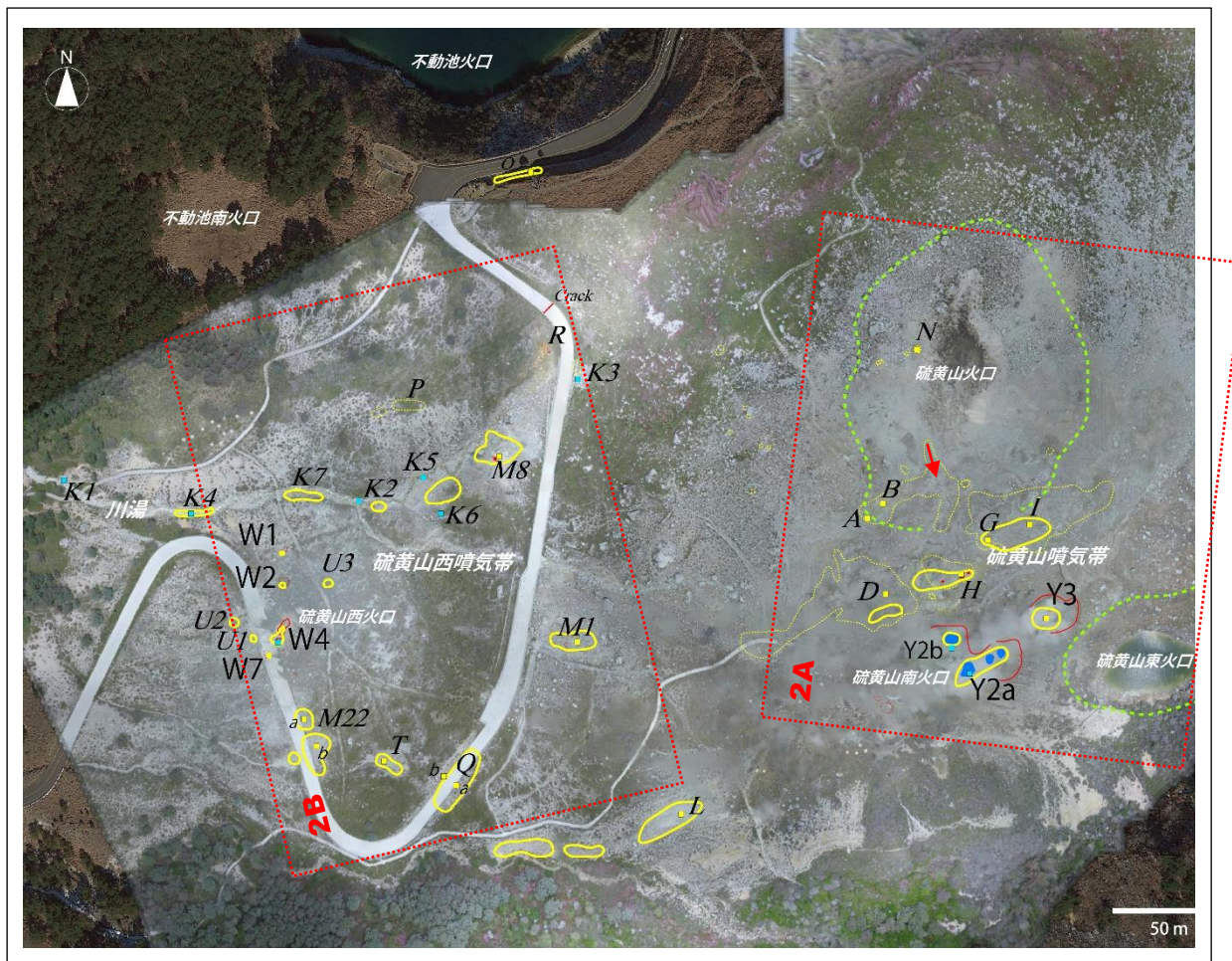


図1 硫黄山噴気帯・硫黄山西噴気帯周辺の熱異常及び熱水の位置図

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4月21日地熱域。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。赤点線枠は熱異常気域撮影範囲(図2)。赤矢印は新たに形成された噴気を伴うFb陥没孔(図3)。

【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.

【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(温度観測)は、古園俊男氏に依頼した。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火山活動監視を依頼した。

*田島靖久・松島 健・前野 深・石橋純一郎・益田晴恵

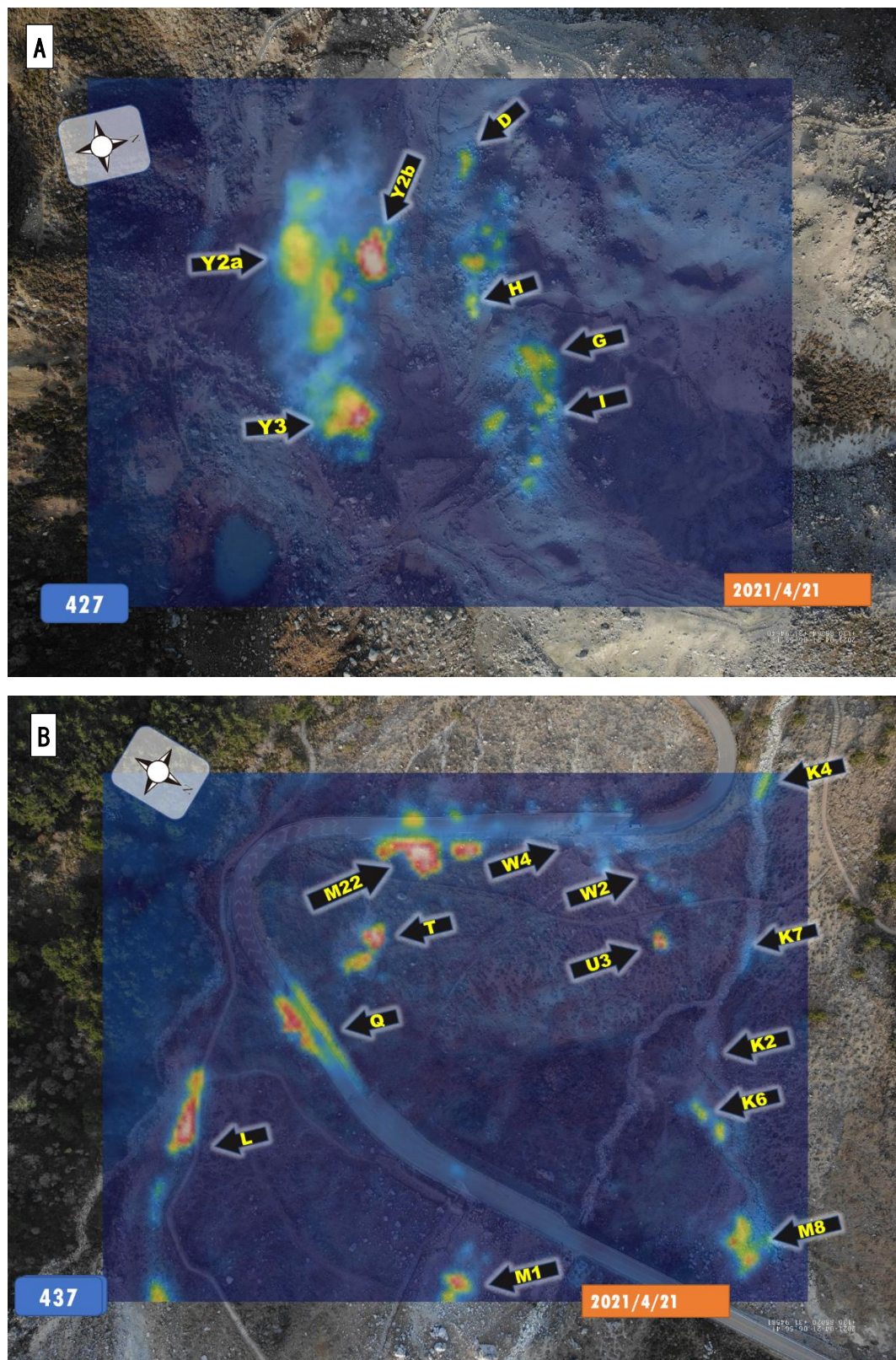


図2 ドローン調査による硫黄山の地熱活動（2021年4月21日）

A. 硫黄山南火口（Y2a, Y3, Y2b）を含む硫黄山噴気帯の地熱異常. B. 硫黄山西火口（W4）を含む硫黄山西噴気帯の地熱異常.

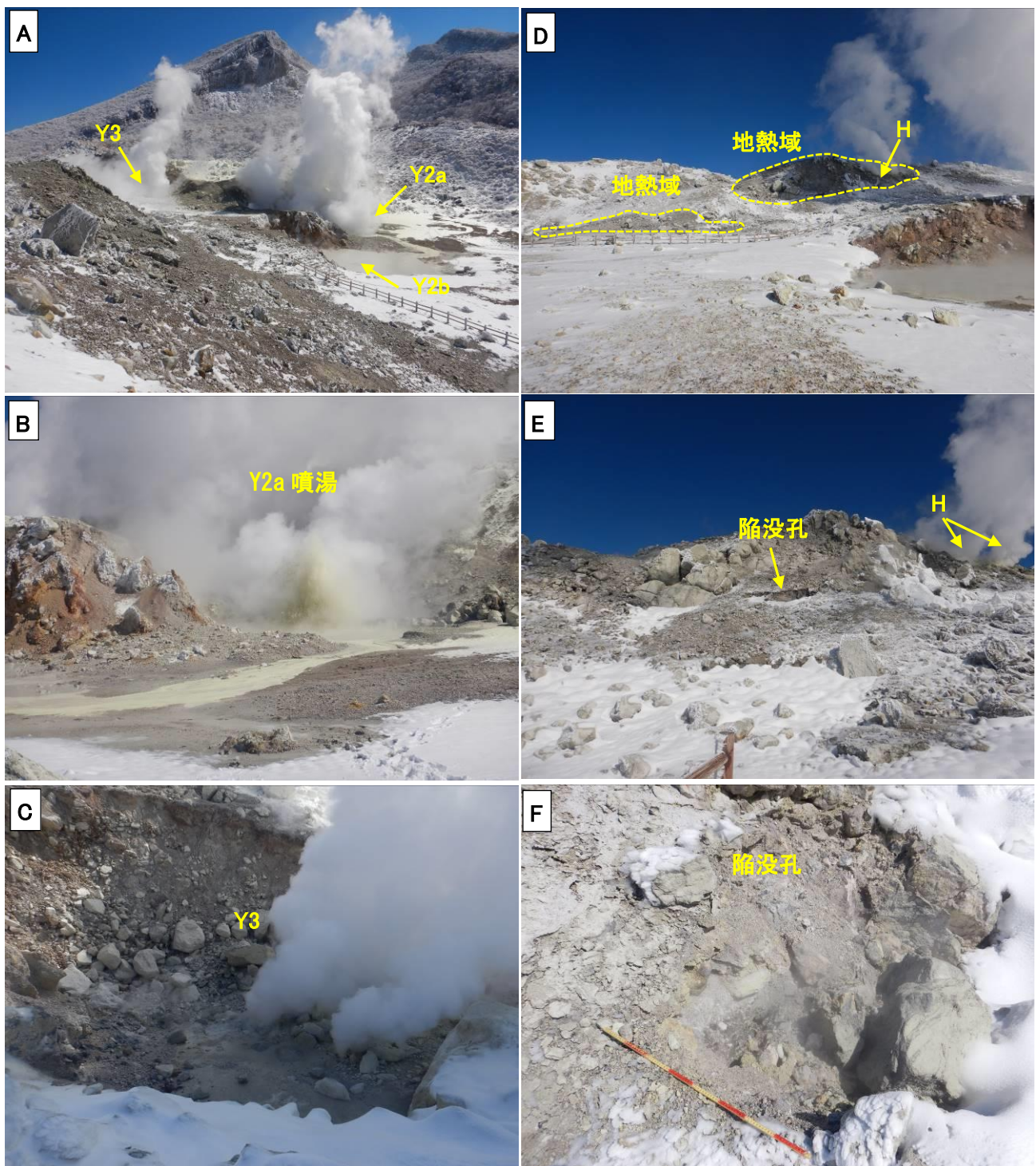


図3 硫黄山噴気帯の地熱活動（2021年2月19日）

A. 硫黄山南火口周辺の地熱活動. B. Y2aの噴湯状況. 高さ約10mのしぶきを上げる噴湯が生じていた. C. Y3におけるジェット音状の噴気活動. D. 硫黄山溶岩南斜面の地熱域. 11月25日に比べ地熱域（融雪域）が拡大した. E. 地熱域に形成された噴気を伴う陥没孔（Fb）. 他にも数カ所陥没が生じていた. F. 噴気を伴う陥没孔（Fb）の状況. 泥水湧出は見られない. Fb孔の位置は、図1に示す.

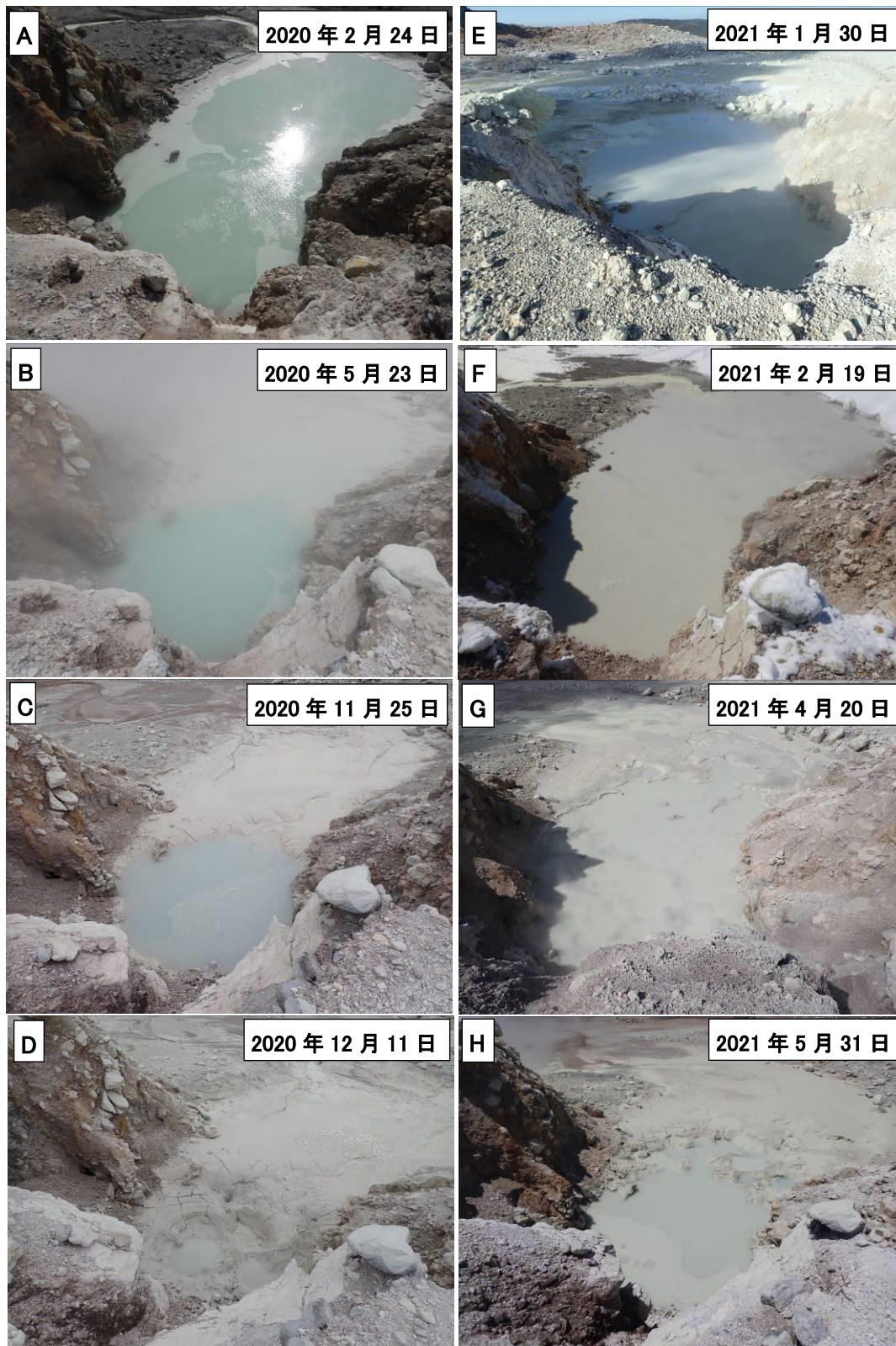


図4 硫黄山南火口(Y2b)の地熱活動

A. 2020年2月24日, 緑がかった薄い色の湯だまり. B. 2020年5月23日, 緑がかった薄い色の湯だまり, 水温48.1°C. C. 2020年11月25日. D. 2020年12月11日, 湯だまりがほぼなくなる. E. 2021年1月30日, 灰色に濁った湯だまり. F. 2021年2月19日, 泥で灰色濁った湯だまり. G. 2021年4月20日, 灰色濁った湯だまり, やや水位が低下する. H. 2021年5月31日, 灰色濁った湯だまり, 水位が低下する.

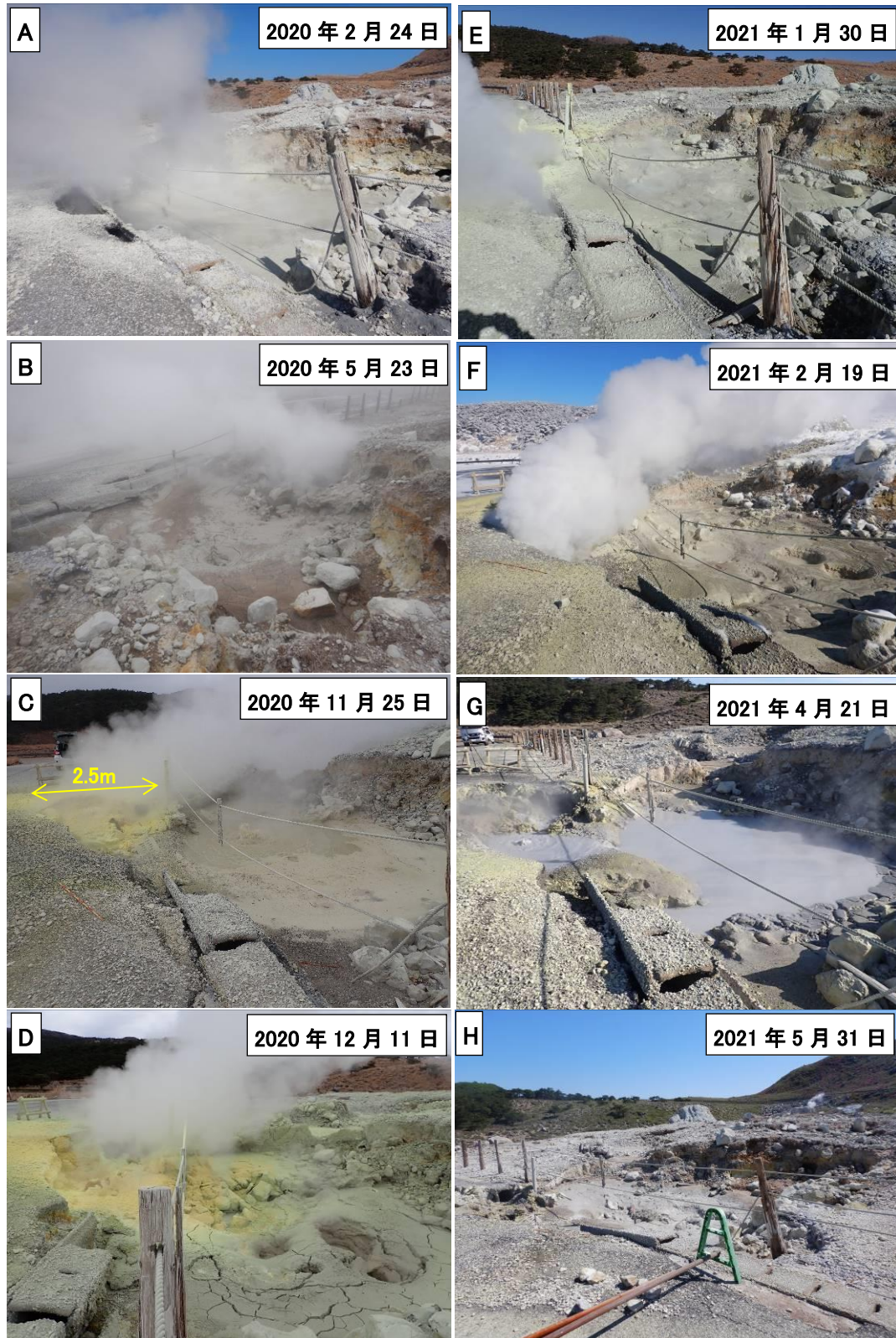


図5 硫黄山西火口(W4)の地熱活動

A. 2020年2月24日, 湯だまりが見られる. B. 2020年5月23日, 湯だまり消失. C. 2020年11月25日, 噴気移動によって孔が拡大. 黄色矢印は5月23日後の拡大範囲. D. 2020年12月11日, 湯だまりがほぼ消失. E. 2021年1月30日, 噴気位置が僅かに南側に移動. F. 2021年2月19日, 湯だまりは消失しジェットエンジン音状の噴気が認められる. G. 2021年4月21日, 間欠泉現象中の湯だまり形成. H. 2021年5月31日, 間欠泉現象中の湯だまり消失.

第148回火山噴火予知連絡会

九州大学,日本工営中央研究所,
東京大学地震研究所,神戸大学,大阪市立大

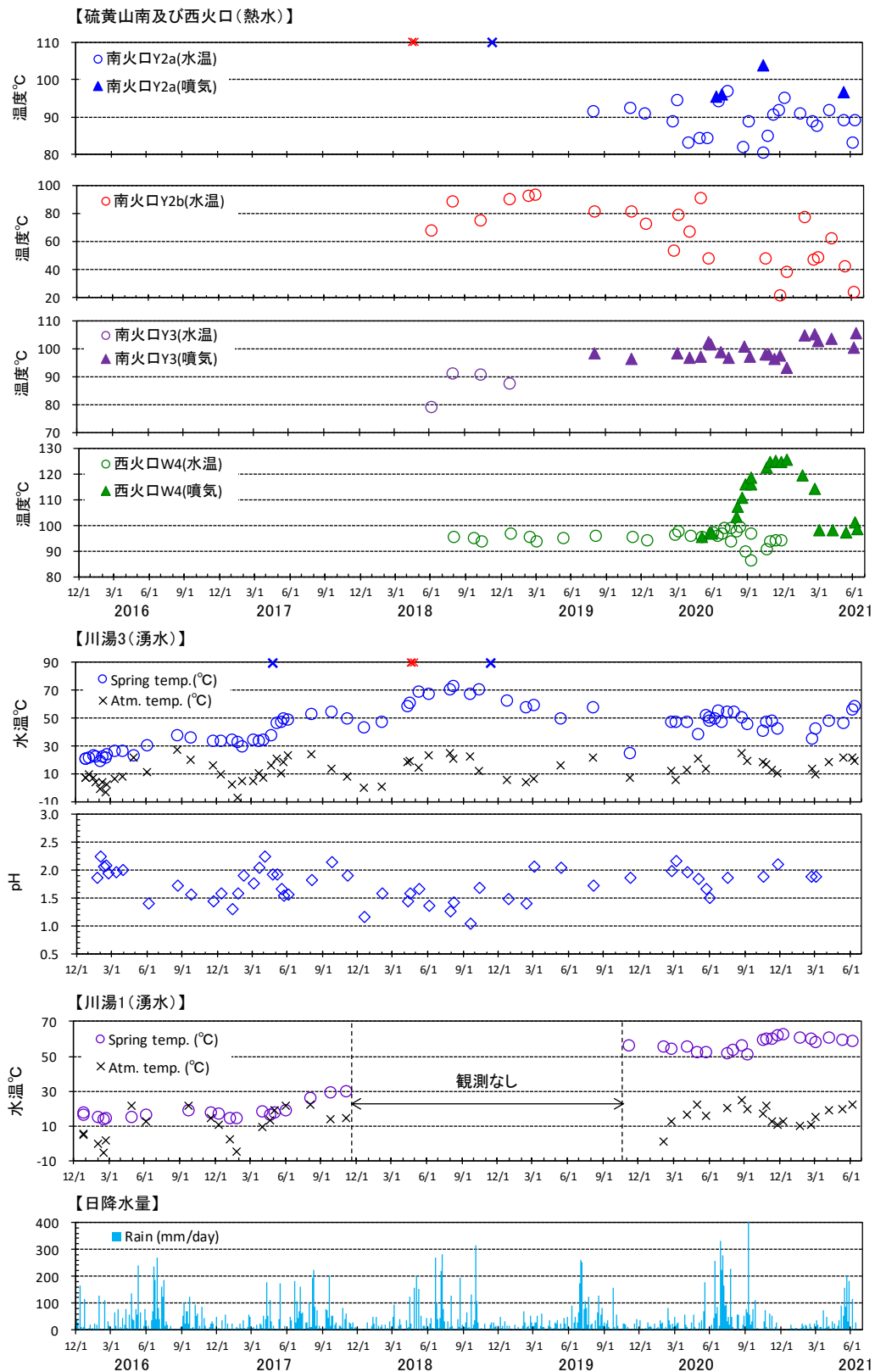


図6 硫黄山周辺の湯だまり・湧水の測定結果(位置は図1参照)

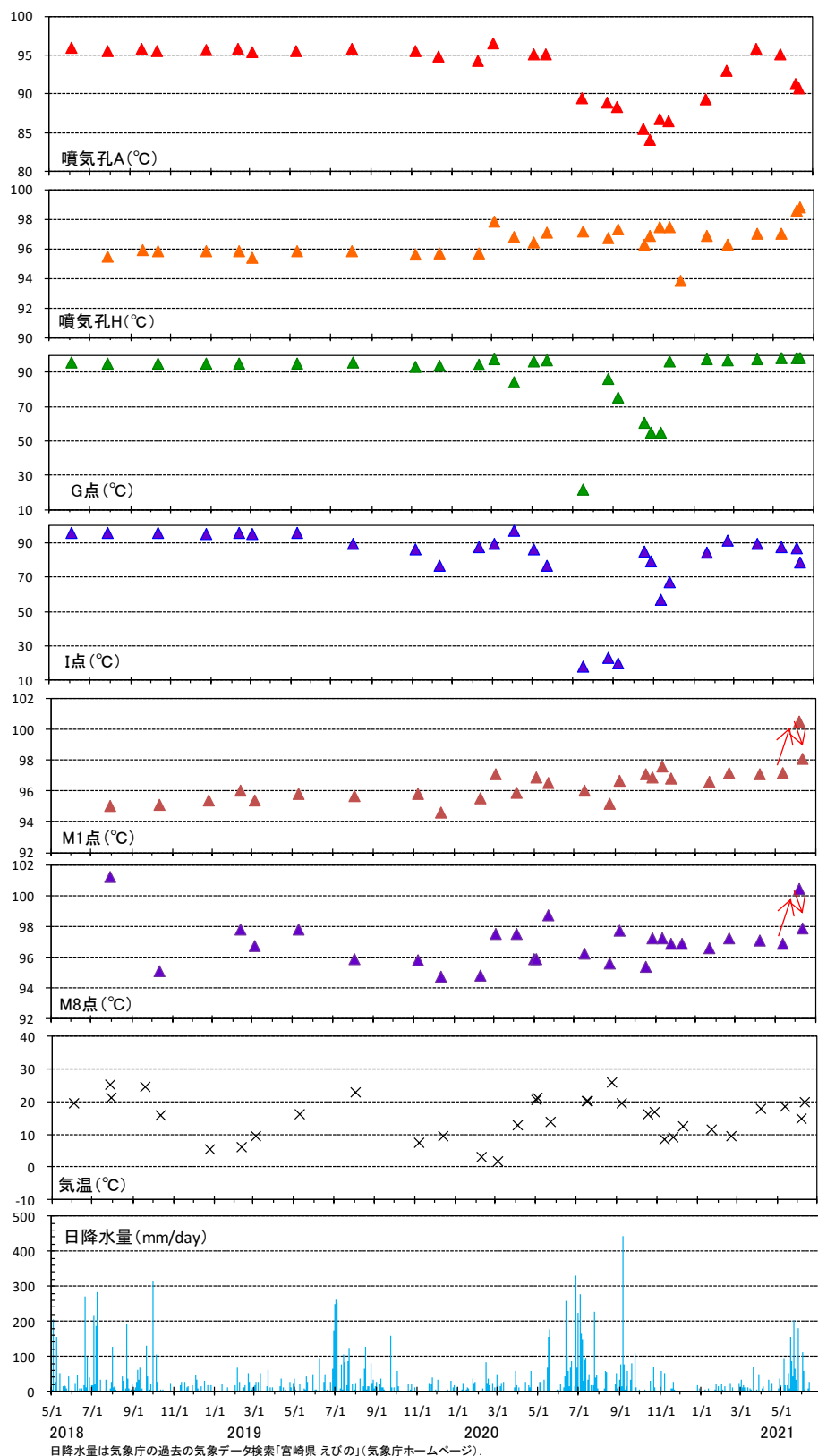


図 7 硫黄山西噴気帯の噴気温度測定結果(位置は図 1 参照)

赤矢印は、5 月 13 日、6 月 6 日、6 月 11 日の変化。

硫黄山西火口湯だまりの間欠泉的水位変動について

霧島硫黄山西麓の県道沿いの湯だまり（W4 火口）では、湯だまりが満水状態の時や、完全に干上がっている状態の時が観測されていたが、タイムラプスカメラや温度計・電位差計を設置することで 2021 年 4 月 21 日にその変化の状態の一部始終を捉える事に成功した。湯だまりは噴気が止まったあと、噴気孔から熱泥水が湧き出し、2 時間ほど継続したあとは、徐々に水位が下がり、泥水が地下に吸い込まれて、湯だまりが消滅するというサイクルを 10～20 数時間ごとに繰り返していることがわかった。

2018 年 4 月 20 日に形成された霧島硫黄山西麓の県道沿いの噴火孔（W4 火口）では、当初高温のジェット噴気が噴出していたが、その活動の低下とともに湯だまりが形成され、湯だまりの底から火山ガスが噴出する噴湯現象が発生していた。その後 2020 年 5 月以降は定常的な湯だまりが消滅し、降雨のたびに湯だまりが短期間生成される状態となっていた。また噴気孔が西側(県道側)に広がり、常時 90 度以上の高温ガスが噴出し、火口周辺には硫黄昇華物が生成されていた。さらに 2021 年 3 月ごろより、気象庁えびの高原監視カメラの映像で、W4 火口の噴気がしばしば停止する現象がみられるようになり、またまとまった降雨がなかったにも関わらず、湯だまりが満水であったり、ドライアップしてたりする状況が観測されていた。

そこで、九州大学では、4 月 20 日より、タイムラプスカメラ（1 分間隔・昼間のみ）を W4 火口の北・南（C1,C2）に設置し湯だまりの状況を撮影した。また熱電対温度計（1 分間隔）を県道側の高温の噴気孔（T1,T2）に、W4 火口の北東側に 30m スパンの地電位計（E1,E2）を設置、他にも各種センサーを設置して観測を開始した。

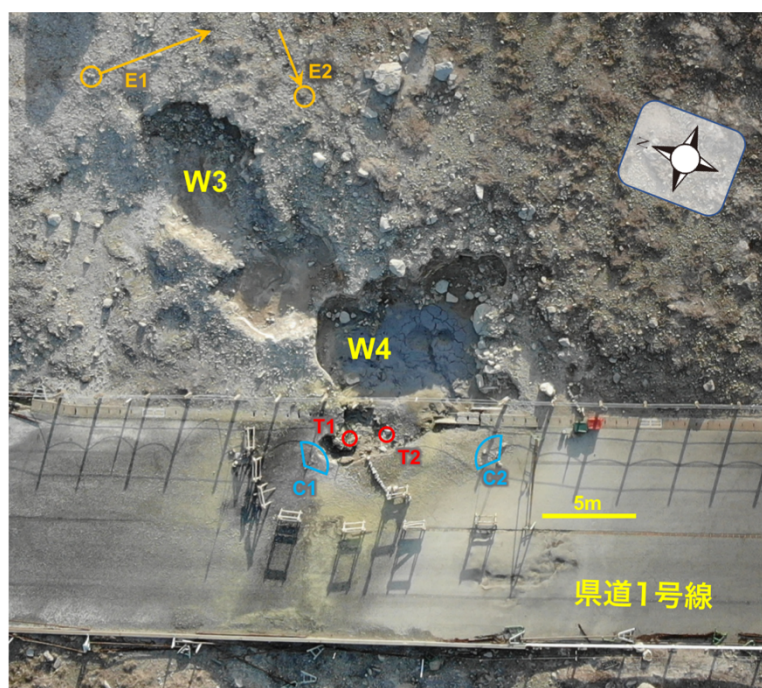


図1 W4 付近の上空写真。2021 年 4 月 21 日 07:00 撮影。T1,T2 の噴気口に熱電対温度センサーを設置、C1,C2 にはタイムラプスカメラを設置し、E1,E2 には 30m スパンの地電位センサーを設置した。



図2 W4 湯だまりの変化. (a) 4月20日温度センサー設置時の写真. 90度以上の高温のガスが勢い良く噴出. (b) 翌朝噴気がすっかり止まり, T2 噴気口から泥水が徐々に湧き出す. (c) 湧出した泥水は T2 噴気口からオーバーフローして, 東側の湯だまりに泥水がたまりはじめる. (d) 泥水の湧出が止まり, T1,T2 噴気孔からは高温ガスのみ噴出し, 噴湯現象に移行した.

図2に4月21日7時ごろから発生した湧出現象を示す. また図3にタイムラプスカメラC2のキャプチャー画像を示す. 前日 T1・T2 噴気孔から勢い良く噴出していた高温のガスは 4/21 06:20 にはすっかり止まり, 07:00 噴気孔から泥水が湧出をはじめ, 09:00 に湯だまりが満水となり, T1,T2 噴気孔からは火山ガスのみ噴出する噴湯現象*に移行した. このときの湧水は W4 の下流側の川にはごく僅かに流出した. 湯だまりの大きさは 8m×8m 程度であり, 湯だまりの深度が 0.2～0.3m 程度とすると, 湧出した泥水の量はおよそ 15～20m³ と推定される.

図4に噴気孔 T1・T2 の温度変化と地電位 E1・E2 の変化を示す. 地電位は地表面象に先行して, 04:30 頃から E1 成分に徐々に変化が現れ, 05:20 に E1・E2 に大きな変化が生じている. 06:20 頃に噴気が止まったことが, T2 の温度の低下で確認できる. その後地電位値は終息するように変化し, 07:00 に T2 噴気孔から高温の泥水が湧出始めたことが, T2 の温度上昇で確認出来る. T1 は T2 より 10cm 程度高い位置にあり, 07:20 ごろに湯だまりの水位が T1 に達したことがわかる. 09:00 過ぎには泥水の湧出から高温ガスの噴出に移行したことが, T1 噴気孔の温度安定からも裏付けられる.

*噴湯現象: 火山ガスの噴気孔が水没し, 水面が「ボコボコ」と盛り上がる現象. 液体の湧出は無いので, 水位は変化しない.

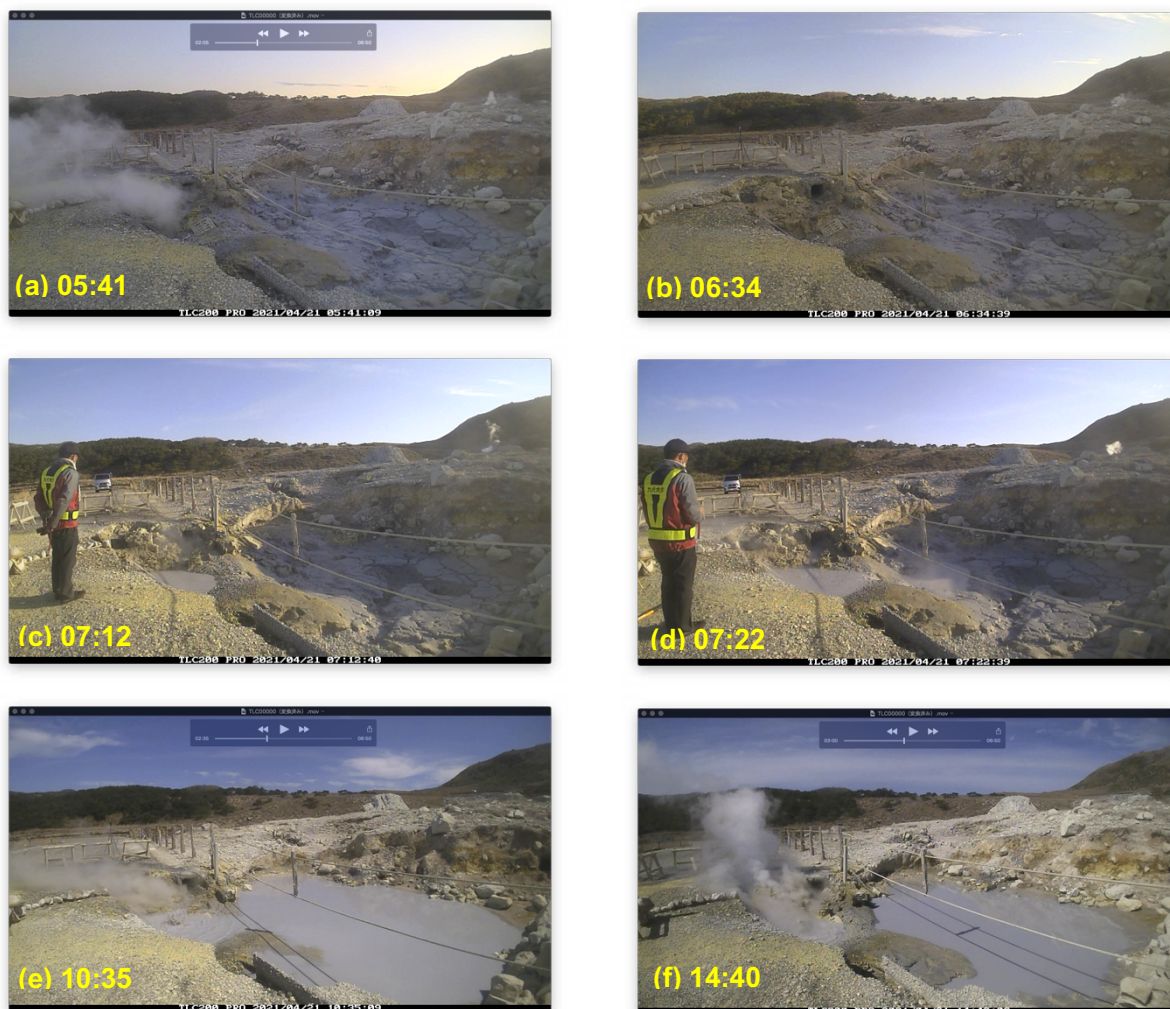


図3 タイムラプスカメラC2のキャプチャー画像。(a)夜が明けた段階では噴気が出ている。(b)噴気が止まっている。(c)T2噴気孔から泥水が湧出し、(d)東側の湯だまりにオーバーフロー始めた。(e)満水状態になり、T2では噴湯現象が起きている。(f)水位が少し下がり始めている。

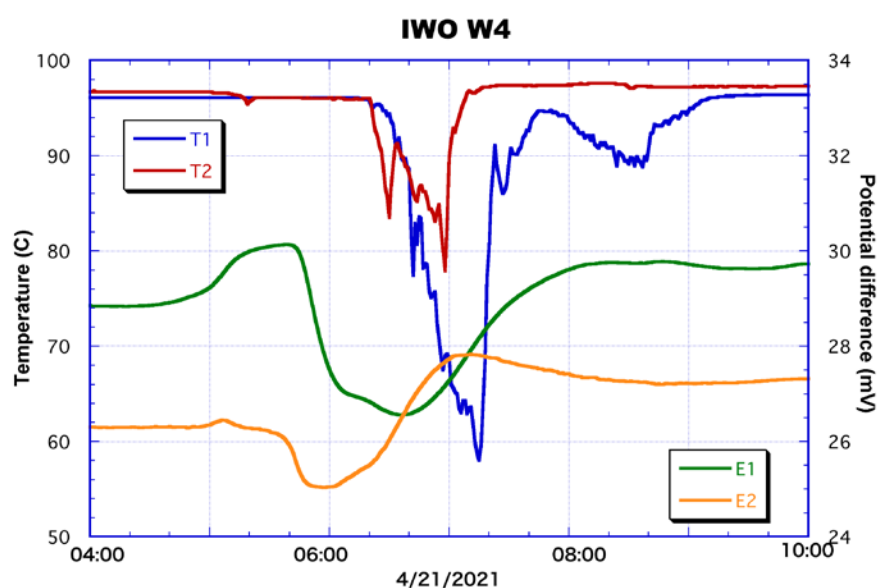


図4 噴気孔T1・T2の温度変化と、W4火口北東側に設置された地電位差E1・E2の変化。地表の温度変化に先立って、地電位の変化が発生していることがわかる。

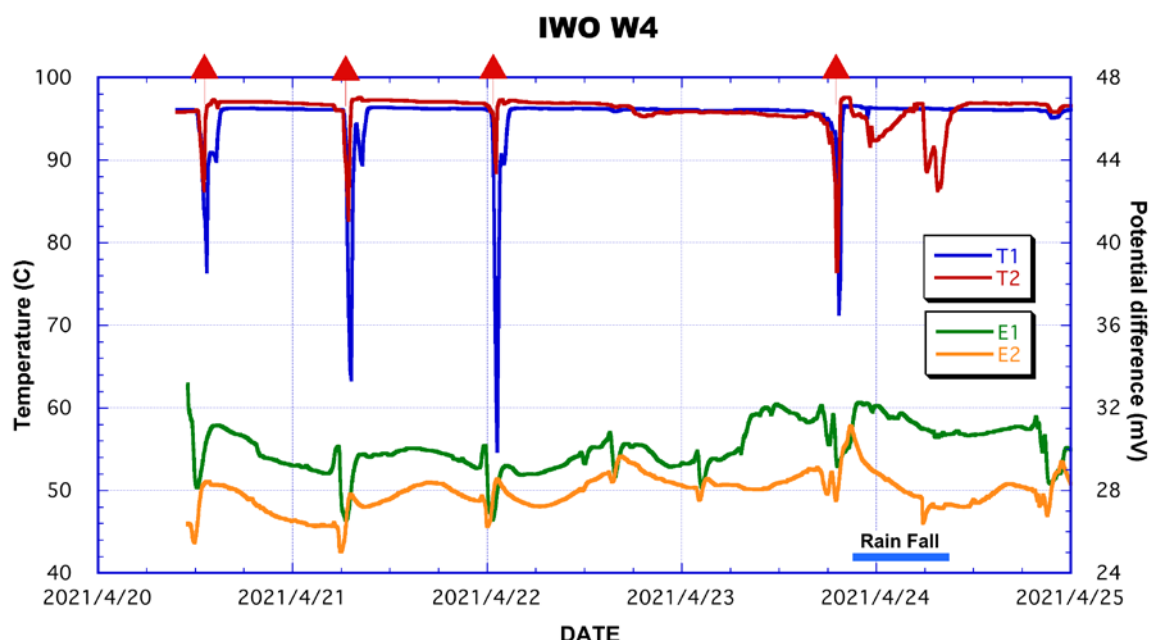


図5 4月20～25日の噴気孔T1・T2の温度変化と、W4火口北東側に設置された地電位差の変化。

4月20～25日の噴気孔T1・T2の温度変化と、W4火口北東側に設置された地電位差の変化を図5に示す。この期間、4サイクルの湯だまり回復・消滅現象が記録されているが、地電位差ではさらに2回の小さな変化が起きていることがわかる。これらの現象を表1にまとめた。この期間では泥水の湧出をともなう現象は約17時間のサイクル周期で発生しているが、他の期間も含めてみると長期間の休止期間があったり、湧出量が多く川にまで泥水が溢流したりなどいくつかのパターンがあることがわかった。宮崎県でも4月21日以降下流の赤水川がしばしば白濁していることを確認している。

今後他の観測データやその後の観測結果から、地下のモデリングも含めた湯だまりの間欠泉現象のメカニズムの解明をめざす計画である。

表1 湧出現象の状況とその時間間隔

F	状況	間隔
4/20/2021 13:15		17:45
4/21/2021 07:00		17:35
4/22/2021 00:35		14:25
4/22/2021 15:00	地電位差変化のみ、地表面現象なし	11:30
4/23/2021 02:30	地電位差変化のみ、地表面現象なし	16:55
4/23/2021 19:25	後半に降水の流入もあり	

【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（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の支援をうけた。調査には田島靖久博士、古園俊男氏、吉永光樹氏、渡辺卓司氏、安仁屋智氏、鈴木陽太氏、森啓悟氏、唐澤塵氏、田辺暖柊氏の協力を得た。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火山活動監視を依頼した。ここに記して感謝する。

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・硫黄山周辺の湯だまりの熱水化学組成に、これまでとは異なる経時変動が観察された。南火口の湯だまり Y2a, Y2b では、2020 年 11 月ごろから上昇を始めた $\text{Cl} / (\text{Cl} + \text{SO}_4)$ 比が、2021 年 1~2 月を境に再び低下に転じ、6 月初めには 0.01 程度の低い値に戻った。一方、西火口では 2020 年 11 月ごろから $\text{Cl} / (\text{Cl} + \text{SO}_4)$ 比が大きな変動幅を示しながら低下する傾向にあったが、4 月以降に間欠的に出現するようになった湯だまりにおいては比較的高い $\text{Cl} / (\text{Cl} + \text{SO}_4)$ 比が観察された。

1. 試料の採取と分析

試料採取は、硫黄山南火口とその北東に広がる湿地帯を中心に行っている。継続して採取分析を続けているのは、南火口に形成された Y2a, Y2b の湯だまり、西火口の中で最も活発な W4 の湯だまり、硫黄山の北側に位置する旧市営露天風呂の源泉 Ro、硫黄山の北東に広がる湿地帯にある湧水池 Sg である。ただし湯だまりは水位が低下した際に安全に近づくことができないなどの理由で採水できなかったことが何回かある。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)

*石橋純一郎・森啓悟・益田晴恵・松島健

2. 分析結果

2020年7月以降に湯だまりから採取した熱水試料の測定・解析結果を表1に示す。また図2に、2018年7月から2021年6月までの期間における湯だまりの熱水と温泉水の $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{SO}_4)$ 比（モル比）の経時変動を示す。

3. 結果の解釈

2018年7月に観測を開始して以来、湯だまり熱水や温泉水の $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{SO}_4)$ 比が時間の経過とともに低下する長期的傾向が見られていたが、2020年7月以降にこれとは異なる特徴を示す経時変動が観察された。

南火口の湯だまり Y2a では $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{SO}_4)$ 比が 0.05 より低い値を保っていたが、2020年11月から SO_4 濃度の顕著な増加、続いて2021年1月から Cl 濃度の顕著な増加があり、 $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{SO}_4)$ 比が 0.1 程度まで高くなった。隣接する湯だまり Y2b においても、2021年1月から Cl 濃度、 SO_4 濃度の顕著な増加があり併せて $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{SO}_4)$ 比が 0.1 程度まで高くなった。その後、2021年4月以降は Y2a, Y2b とともに Cl 濃度、 SO_4 濃度が減少に転じ、これに伴って $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{SO}_4)$ 比も低下して6月には 0.01 程度まで下がった。この $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{SO}_4)$ 比が高かった2021年1月から4月の期間は地熱域の拡大を示す現象が観察された時期に対応しており、湯だまりの熱水の化学組成の変動もそうした現象の一端であると考えられる。

西火口の湯だまり W4 では2020年7月に急変してから $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{SO}_4)$ 比が 0.4 以上の高い値を保っていたが、2021年1月以降に低い値を示すようになった。これは、西火口の噴気の中心が県道側に移動して湯だまり W4 に吹き込む噴気量が変化しやすくなり、 $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{SO}_4)$ 比が大きな変動幅を示しながら低下していると考えたと説明できる。2021年4月以降に湯だまりが間欠的に出現するようになってからは、 $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{SO}_4)$ 比は高い値を示している。このことは、湯だまりを満たすお湯に、それまでと同じように火山性の噴気が寄与していることを示唆している。

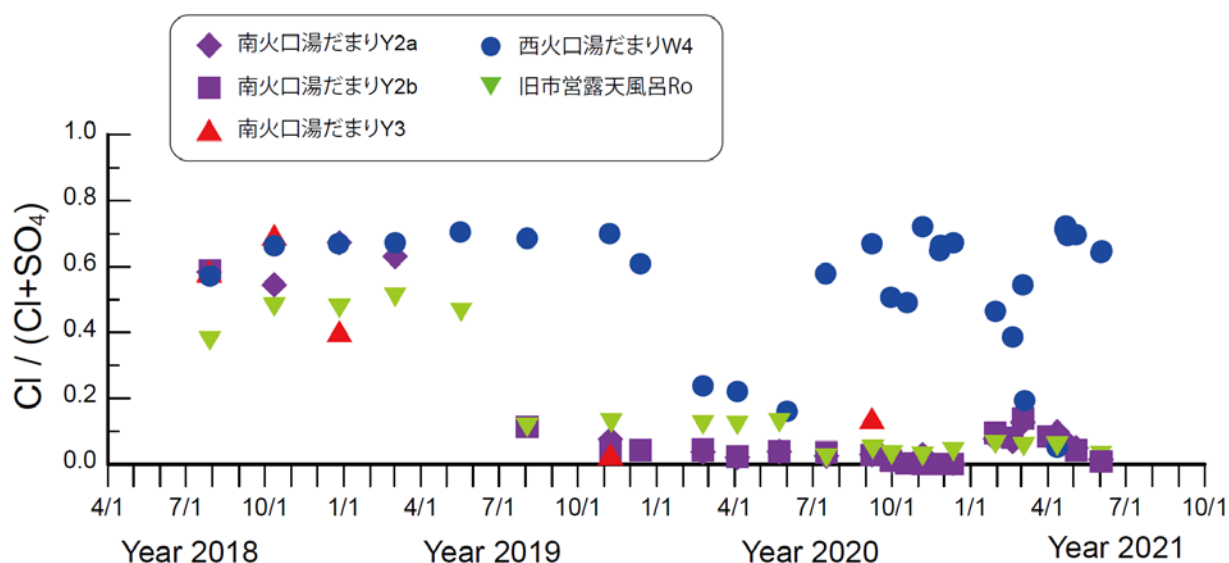


図2 霧島硫黄山周辺の湯だまりおよび温泉水の $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{SO}_4)$ 比（モル比）の経時変動

表 1 硫黄山周辺の湯だまり（南火口 Y2a, Y2b と西火口 W4）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+SO ₄) モル比
南火口湯だまりY2a	2020/7/17	96.7	1.98	0.4	18	1260	0.04	0.036
	2020/9/8	88.7	-	-	24	2190	0.03	0.029
	2020/9/30	80.4	1.19	-	33	8810	0.010	0.010
	2020/10/18 #	80.8	-	-	8	8790	0.002	0.002
	2020/11/6	88.7	1.21	7.0	5	23000	0.001	0.001
	2020/11/25 #	-	-	-	6	22000	0.001	0.001
	2020/12/11	88.1	0.82	7.4	4	25000	0.001	0.001
	2021/1/30	87.3	0.95	9.3	1070	27700	0.10	0.095
	2021/2/19	86.0	0.86	7.1	620	19100	0.09	0.081
	2021/3/3	86.6	0.93	5.5	1020	17100	0.16	0.138
	2021/4/2	90.3	0.73	6.0	1400	41300	0.09	0.084
	2021/5/4	88.8	0.81	-	524	31700	0.05	0.043
	2021/6/2	-	1.31	2.0	21	4960	0.011	0.011
南火口湯だまりY2b	2020/7/17	17.3	1.92	0.7	1	63	0.03	0.024
	2020/9/8	22.9	2.49	-	7	684	0.03	0.029
	2020/10/1	40.4	1.54	-	6	1700	0.01	0.010
	2020/11/6	23.0	1.56	0.8	17	1530	0.03	0.030
	2020/12/12	38.1	1.41	1.0	3	3900	0.002	0.002
	2021/1/30	62.4	1.06	5.8	570	18900	0.08	0.076
	2021/2/19	56.0	1.00	5.1	360	13400	0.07	0.069
	2021/3/3	45.2	1.32	4.2	604	11200	0.15	0.127
	2021/4/12	60.1	1.16	6.7	671	16700	0.11	0.098
	2021/4/24	-	0.55	6.7	460	18500	0.07	0.063
	2021/5/4	72.2	1.11	3.6	174	9040	0.05	0.050
	2021/6/2	52.3	1.59	0.8	10	1890	0.015	0.014
西火口湯だまりW4	2020/7/16	92.5	1.57	1.8	2070	4080	1.37	0.57
	2020/9/8	86.3	-	0.9	1050	1400	2.03	0.67
	2020/9/30	89.6	1.96	-	462	1210	1.03	0.50
	2020/10/19 #	95.8	-	-	757	2130	0.96	0.49
	2020/11/6	96.0	1.45	2.2	2890	3020	2.59	0.72
	2020/11/26 #	-	-	-	2050	3020	1.84	0.64
	2020/12/12	95.4	1.54	1.0	3620	4760	2.06	0.67
	2021/1/30	60.3	1.76	0.7	410	1280	0.87	0.46
	2021/2/19	51.7	1.74	0.8	400	1740	0.63	0.38
	2021/3/3	89.1	-	-	328	743	1.20	0.54
	2021/3/5#	32.9	-	-	20	226	0.24	0.19
	2021/4/12	22.7	3.03	0.1	2	101	0.05	0.05
	2021/4/21 #!	-	-	-	10100	11000	2.48	0.71
	2021/4/24	39.5	1.43	1.0	1380	1650	2.26	0.69
	2021/5/4	89.8	1.13	4.6	6830	8060	2.30	0.70
	2021/6/2	91.7	1.00	5.6	7050	10600	1.84	0.65

の試料（2020/10, 2020/11, 2021/3, 2021/4）は、持ち帰り試料を数日後にろ過をして分析をした。

! の試料（2021/4/21）は、湯だまり W4 に湯が噴出し始めた際に採取した試料である。

- : 機器不良や安全確保などの理由で計測データなし。 n. a. : 定量限界以下などの理由で分析結果なし。

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。

硫黄山西火口の 2018 年 4 月の噴火について

霧島硫黄山に設置されている複数の空振動のデータを相関解析した結果、硫黄山西火口の噴火活動は 2018 年 4 月 20 日 21:05 ごろに W6 孔で始まり、21:42 頃に W3+W4 孔の噴火が開始したことがわかった。また 4 月 26 日 18:15 頃には空振動の変化がなく、噴火現象が発生していないこともわかった。

2015 年 12 月に地熱活動が再活発化した硫黄山は、2018 年 4 月 19 日に硫黄山南火口において火山灰や泥・熱水を吹き出す噴火活動が確認されていた（田島他, 2019）。翌 20 日の夕方には南火口から西に約 500m 離れた県道 1 号線沿いにおいて、監視カメラにより新たな噴気現象が確認された（図 1）（福岡管区気象台地域火山監視・警報センター・鹿児島地方気象台, 2018）。翌朝には 7 つの活発な噴気孔（W1～W7）が確認され、隣接した県道上には岩塊・礫の噴出物を伴った泥が 10cm 以上堆積していた。また 100m 以上離れた火山灰の堆積が確認されたため、噴火現象が発生したと考えられ西火口と命名された（田島他, 2019）。しかし、当時は硫黄山南火口からも活発な噴気活動が続いており、火山性微動の変化の識別もできず、詳細が不明のままとなっていた。その後 4 月 26 日 18 時 15 分に硫黄山西火口から着色噴煙が見えたとして噴火速報が発表され、この日時が硫黄山西火口の噴火開始時とされている。

Muramatsu *et al.* (2021) は硫黄山に設置された 2 つの低周波マイクロフォン（図 2）の空振データを相関解析し、硫黄山で発生した噴火現象の場所や時系列を詳細に解明した。それによると南火口の活動は 2 つのマイクロフォンで記録される空振波形の時間差が 1.5 秒程度であるのに対し、西火口のそれは約 0.8 秒であることがわかった。また詳細に見ると西火口では時間差に 2 つのピークがあり、それぞれ W6 孔からの空振、W3+W4 孔からの空振であることが分かった（図 3）。

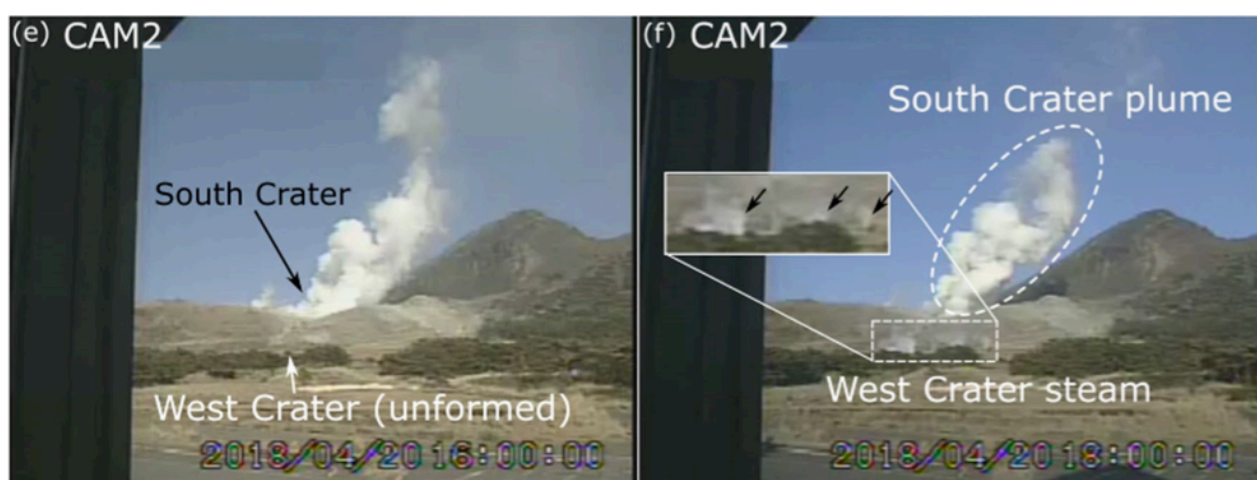


図 1 えびの高原から見た硫黄山西火口付近の噴気の状況。（左）4 月 20 日 16 時では噴気は確認できない。（右）同 18 時には、わずかな噴気を確認できる。（福岡管区気象台地域火山監視・警報センター・鹿児島地方気象台, 2018）

*松島 健・村松 弾

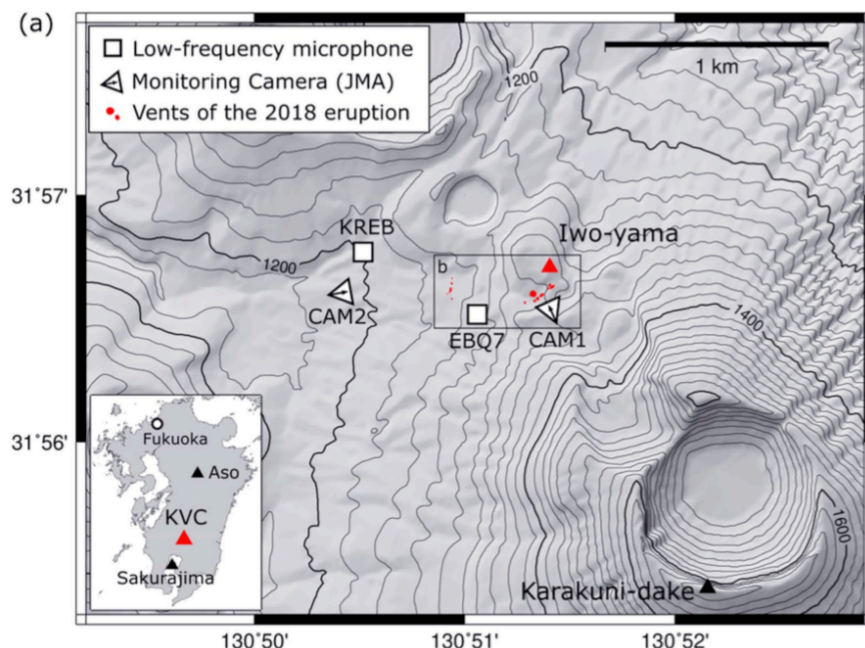


図 2 えびの高原に設置された低周波マイクロフォンの位置 (KREB 及び KBQ7). (Muramatsu *et al.*, 2021)

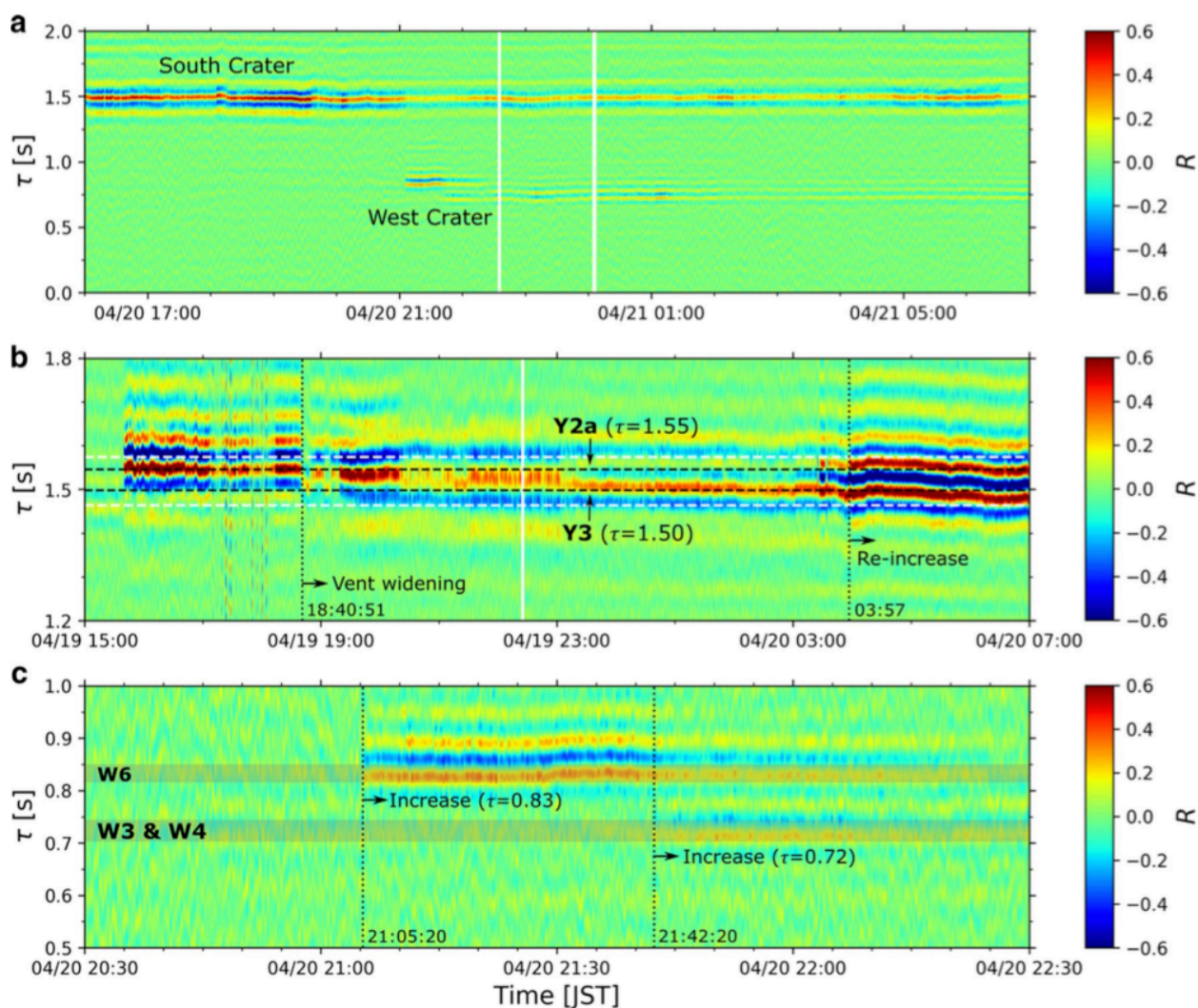


図 3 空振動の相関ラグの時間変化. (a)4/20 16:00～4/21 07:00. (b)硫黄山南火口の活動時. (c)西火口の活動時 (Muramatsu *et al.*, 2021)

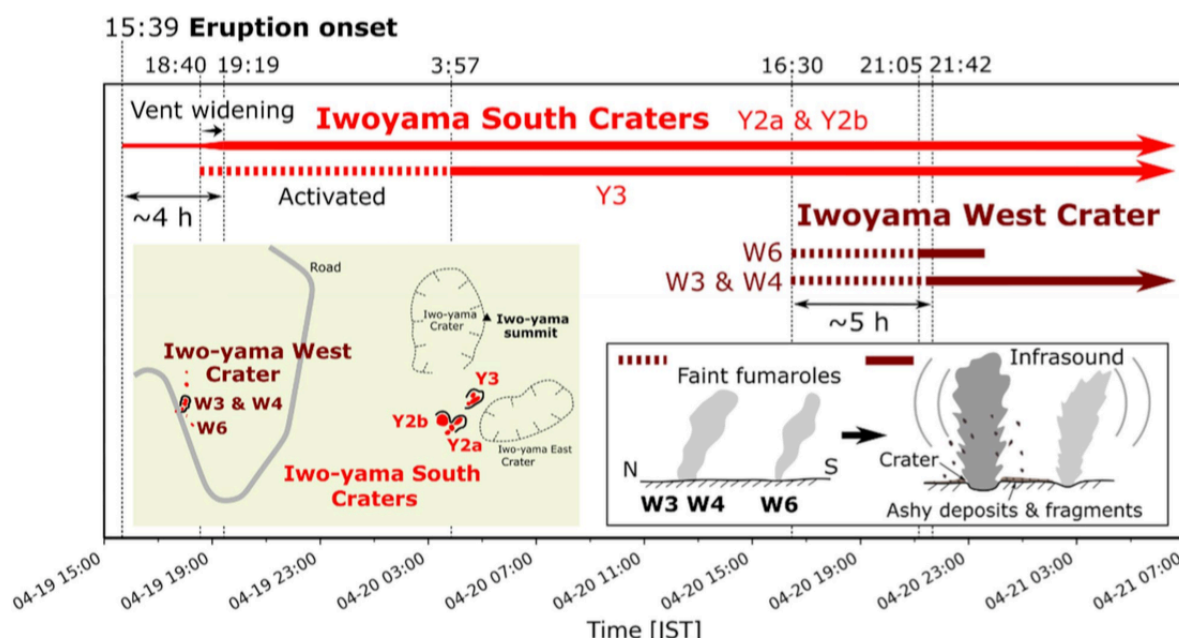


図 4 空振動相関解析から推定された、各火孔の活動推移, (Muramatsu et al.,

時系列を比較することにより、4月20日21:05にW6孔の噴出が活発化し、その後21:42からW3+W4孔付近の噴気が活発化したものと推測された(図4)。したがって、W3+W4孔を中心とする火山灰や泥、熱水は4月20日21:42以降、強い相関が出ている21日02:00頃までの間に噴出したものと推測される。

図5に噴火速報が発出された4月26日18時台の空振動波形の相関図を示す。硫黄山南火口、硫黄山西火口からの定常的な空振動が記録されているが、着色噴煙が確認されたとされる18:15～18:26にその強度や相関の変化はみられていない

図6に同時刻にえびの高原展望台から撮影されたライブカメラ映像を示す。W4孔からの噴気が赤く染まっている事がわかる。これが当時着色噴煙と認識されていたものと考えられる。当日は曇天で夕方まで太陽が見えなかったが、19時の日没前に雲下の間から夕日が差し込んでいることが確認されており、この夕日があたたか噴気が赤く見えたものと推測される。また、翌日の夕方にも同様に噴気が夕日で赤く染まる現象が発生している。

以上のことから、硫黄山西火口の噴火開始は4月20日21時頃であり、4月26日の噴火現象は、なかったと考えるのが妥当である。

参考文献

- 福岡管区気象台地域火山監視・警報センター・鹿児島地方気象台, (2018) 霧島山の火山活動解説資料(平成30年4月) えびの高原(硫黄山)周辺.23 p
- Muramatsu, D., T. Matsushima, M. Ichihara, (2021) Reconstructing surface eruptive sequence of 2018 small phreatic eruption of Iwo-yama volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan, by infrasound cross-correlation analysis, Earth, Planets and Space, 73:8, doi: /10.1186/s40623-020-01344-6
- 田島靖久・中田節也・長井雅史・前野深・渡邊篤志, (2019) 霧島火山群, えびの高原硫黄山の2018年4月の小噴火, 火山, 64, 147-151

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。

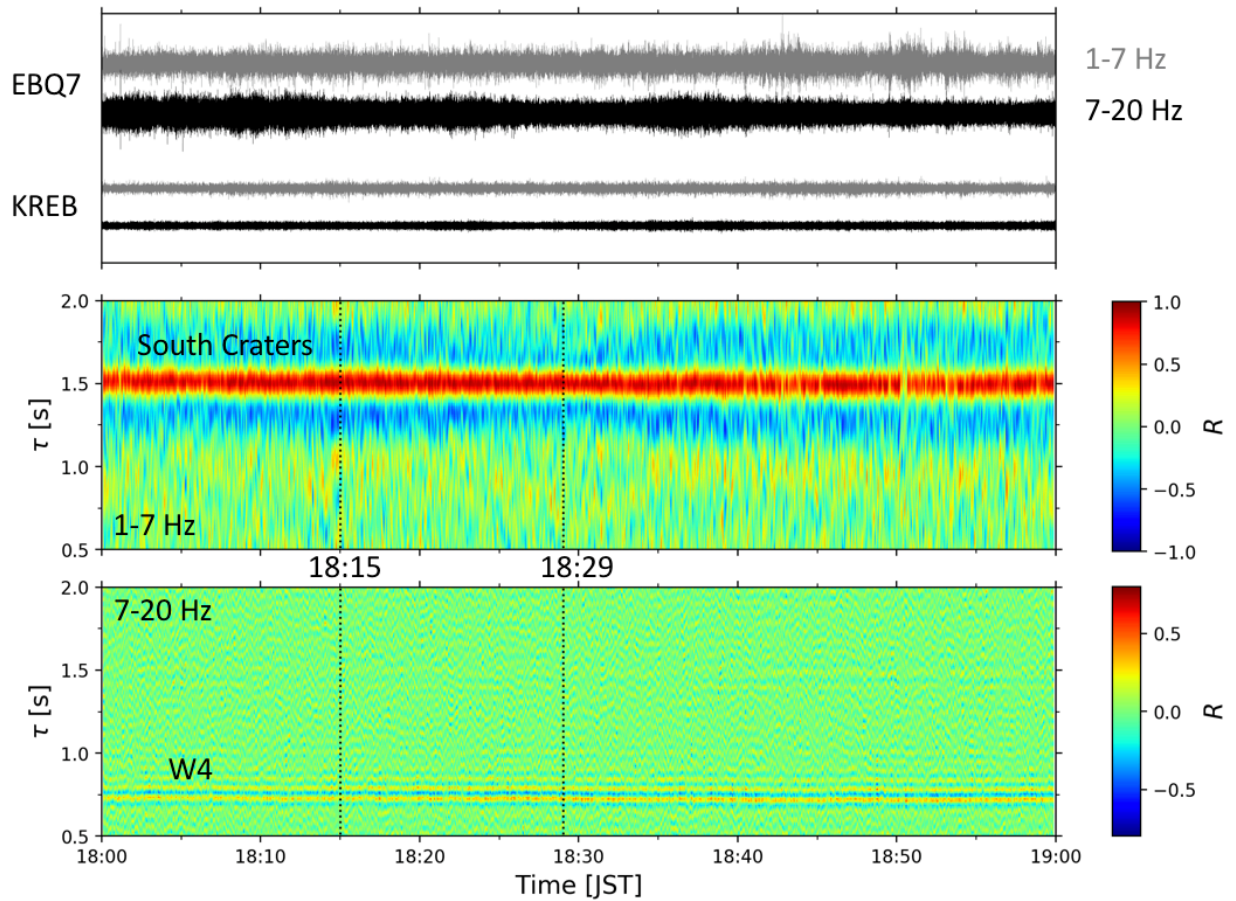


図5 2018年4月26日18時台の空振動の相関記録



図6 MRT 宮崎放送の2018年4月26日18:15頃のライブカメラ映像.

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～2021年3月)

2021年3月上旬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、硫黄山の地下600～700 mにあると推定される圧力源の膨張は、2018年12月以降ほぼ停滞状態であるが、2019年11月～2021年3月は硫黄山西麓を中心として局所的に隆起が確認された。

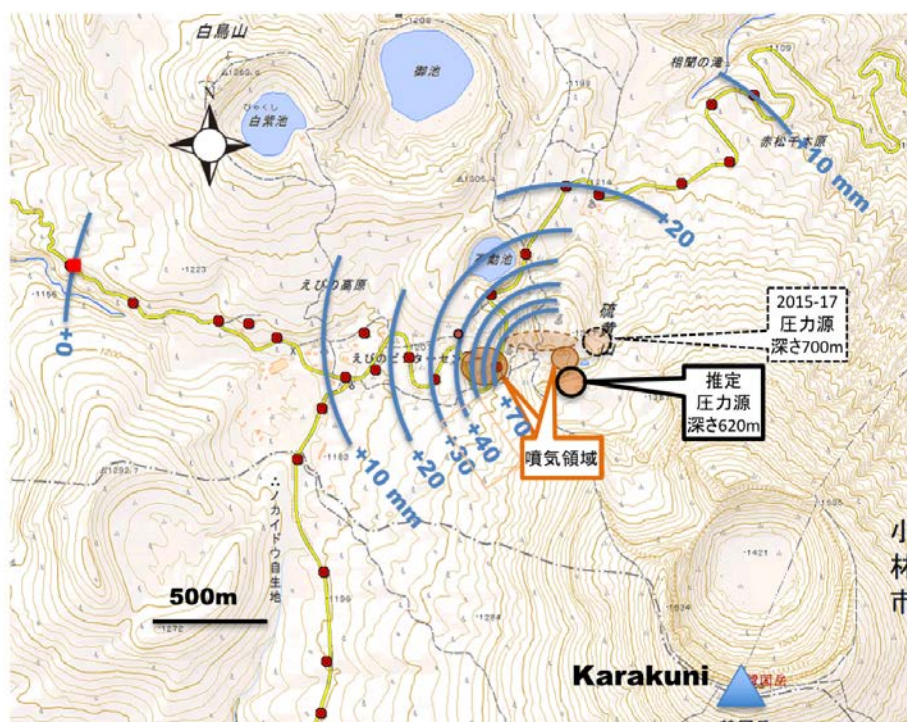
九州大学を中心とした大学合同水準測量班は、2015年6月にえびの高原周辺に水準路線を増設した(第1図)。その後、硫黄山では火山性地震の群発や傾斜変動をとともなう火山性微動がたびたび発生し、2015年12月中旬には地表に新たな噴気帯が生じ、2017年5月には火山泥の噴出が確認されている。その後噴気活動は一時沈降傾向になったが、2018年2月には火山性地震が増加し、噴気現象も再度活発になってきた。4月上旬から硫黄山の南側に沿って東西に新たな噴気孔列が生じ、一部で小噴火を発生させた。

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。再隆起が始まった2017年10月以降の隆起量を図1の等値線で示す。硫黄山山頂に近いBM3050で2021年3月までに78.6 mmの隆起が見られる。隆起中心も2017年5月以前よりは南西側に移動しており、地表の噴気領域の移動と調和的である。

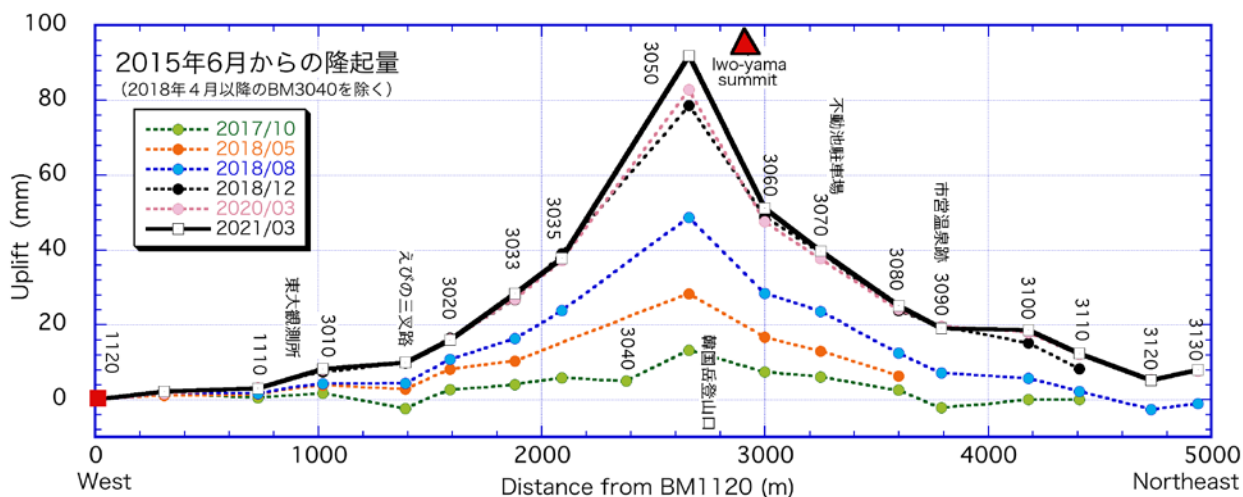
第1表に推定された圧力源の位置を示す。圧力源の位置は、2017年10月以前は硫黄山噴気群の東側約100 mであったが、2017年10月以降は硫黄山南火口の南側に存在していると考えられる。またその深さもこの地点の標高を1300mと考えると、地表からそれぞれ、700m、620 mとなり、圧力源の位置も徐々に上昇したと考えられる。硫黄山直下では厚さ700 m程度の低比抵抗層(スメクタイト層と推定)が3次元MT解析で推定されており(Tsukamoto *et al.*, 2018)、これがキャップロックとなりこの直下で熱水溜まりの圧力が増加しているものと推定される。

第4図に水準測量から推定された硫黄山下の圧力源の体積変化量を示す。この際、圧力源の位置は第1表の場所に固定し、体積変化量のみを変化させて最適値を求めている。2015年6月を基準とした体積増加量は、2018年12月では15.7万 m^3 、2019年3月15.6万 m^3 、11月15.2万 m^3 、2020年3月15.9万 m^3 、9月16.2万 m^3 、2021年3月17.0万 m^3 と推定された。2017年10月からの地下圧力源の膨張は2018年12月以降停滞状態である。2019年以降は硫黄山南火口や西火口の熱水湧水量や水蒸気量に明らかな減少が見られることから、地下深部から圧力源への熱水の供給が衰えつつあると考えられる。

第5図に最近の地殻変動の比較を示す。左図は2017年10月から2018年12月まで、右図は2019年5月から2021年3月の水準測量による上下変位を示す。前者の期間は硫黄山全体が隆起傾向にあったが、後者の最近1年間は硫黄山西麓の狭い領域に隆起がとどまっている。このことから、2019年11月以降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2020年以降、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。



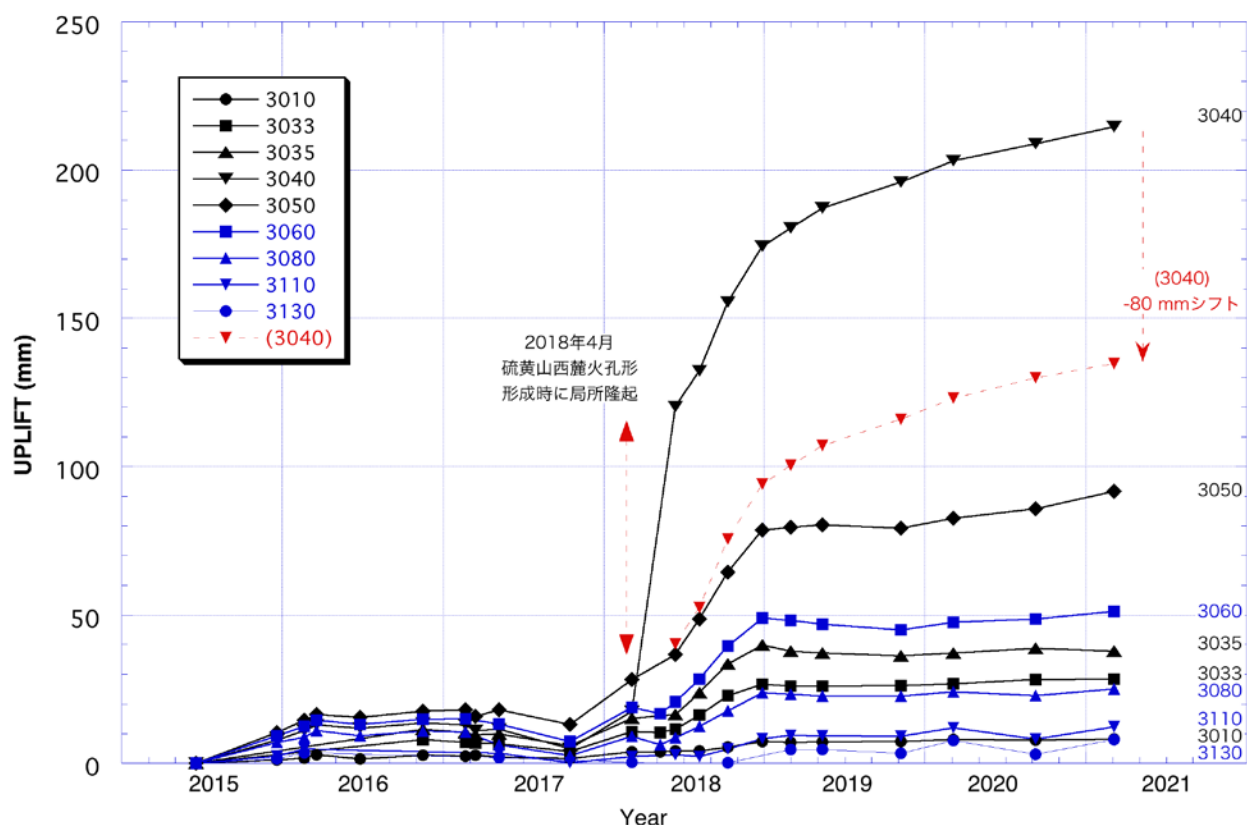
第1図 えびの高原～硫黄山区間の水準路線と2017年10月から2021年3月までの隆起量を示す（BM3040を除く）。2018年4月から活発化した噴気領域や、これまでの水準測量から推定された圧力源の水平位置も同時に示す。国土地理院電子地形図（タイル）を使用した。



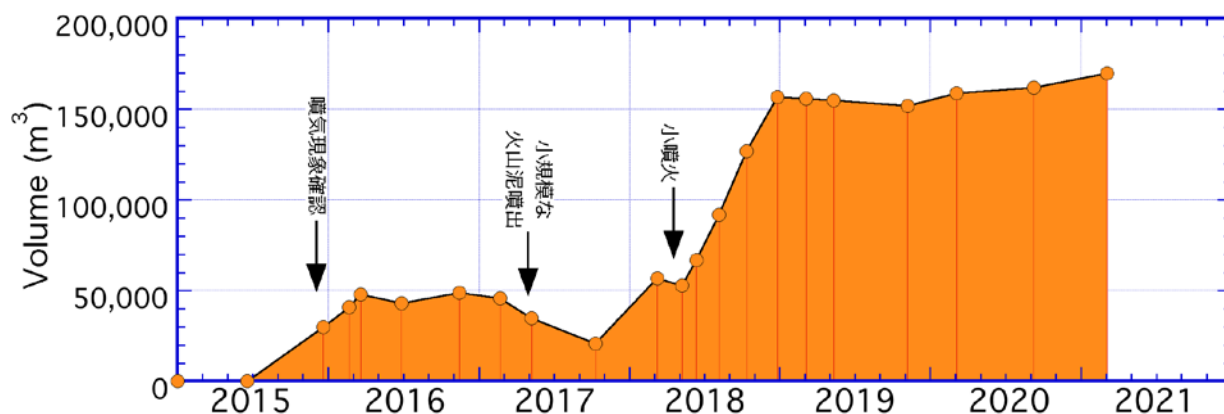
第2図 2017年10月以降の主な水準測量結果（BM3040を除く）。隆起・沈降の中心は硫黄山付近の浅部と考えられる。2018年12月以降の値はほとんど重なっているが、2019年11月以降は硫黄山西麓の3033～3060間で若干の隆起傾向が見える。

第1表 推定された圧力源の位置。

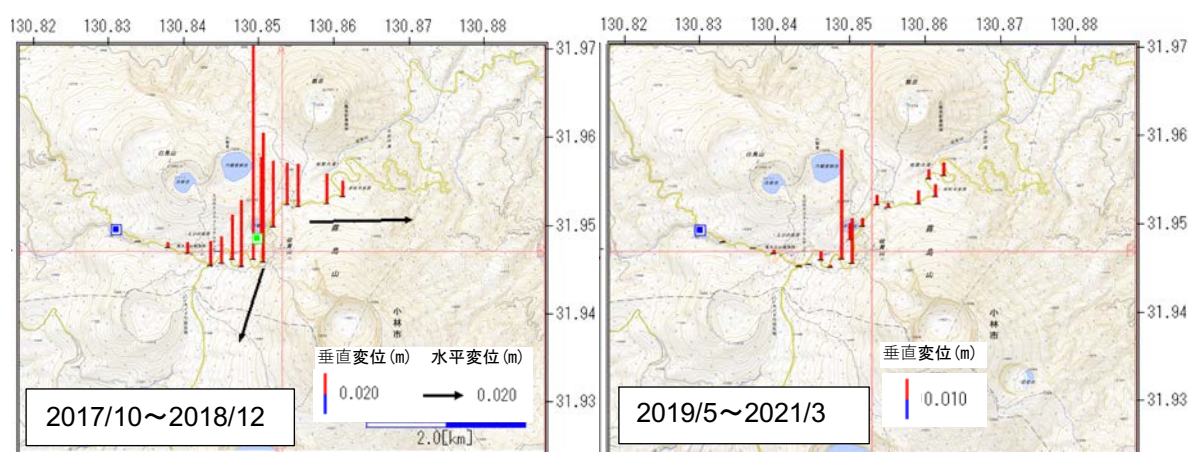
	2017年10月以前	2017年10月以降
北緯	31.946777	31.94517
東経	130.85460	130.853975
海拔高度	600m	680m



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, 2019 年 11 月以降は, 硫黄山西麓にあたる 3033~3060 の基準点でわずかに隆起傾向となっている.



第 4 図 水準測量から推定された硫黄山下の圧力源の体積の時間変化. 2015 年夏から始まった圧力源の膨張は 2017 年には一端収縮に向かったが, 2017 年末から再度急激な膨張が始まり, 2018 年 4 月には小噴火が発生した. しかしその膨張も 2018 年 12 月以降は, ほぼ停滞状態となっている.



第 5 図 最近の地殻変動の比較。左図は 2017 年 10 月から 2018 年 12 月まで、右図は 2019 年 5 月から 2021 年 3 月の水準測量による上下変位を示す。前者の期間は硫黄山全体が大きく隆起傾向にあるが、後者の最近 1 年間は硫黄山西麓の狭い範囲に隆起がとどまっている。このことから、2019 年 11 月以降は硫黄山西麓のごく浅い部分がわずかに膨張していると考えられる。地形図には国土地理院電子地形図（タイル）を使用した。

参考文献

Tsukamoto K., Aizawa K., Chiba K., Kanda W., Uyeshima M., Koyama T., Utsugi M., Seki K., and Kishita T., Three-dimensional resistivity structure of Iwo-yama volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan: Relationship to shallow seismicity, surface uplift, and a small phreatic eruption, *Geophysical Research Letters*, 45, 12821-12828.

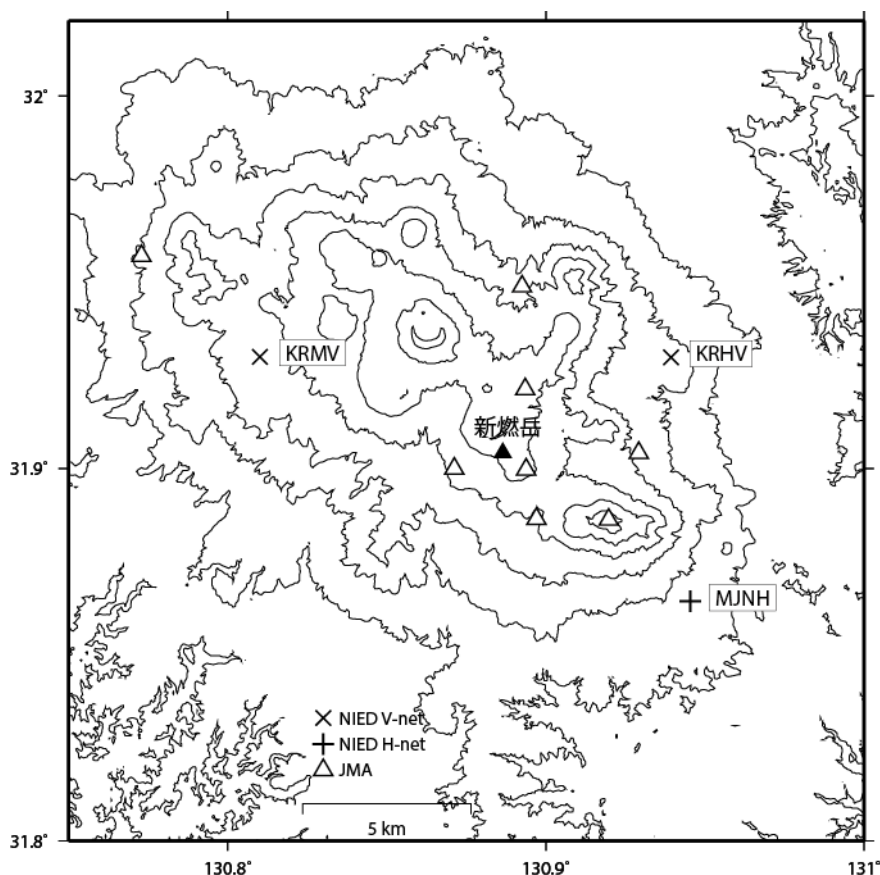
謝辞

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。また気象庁からは硫黄山周辺の GNSS 測量結果の提供を受けた。地下の圧力源の推定には、気象研究所の火山用地殻変動解析ソフトウェアの MaGCAP-V を使用した。

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。

2021 年 3 月の測量作業は 内田和也・松島 健・清水 洋・村松 弾・唐 懌塵・吉永光樹・田辺暖柊・山下裕亮が行った。また一部区間は次世代火山人材育成コンソーシアムの学生実習の一環として実施された。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・気象庁の協力で実施されている。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

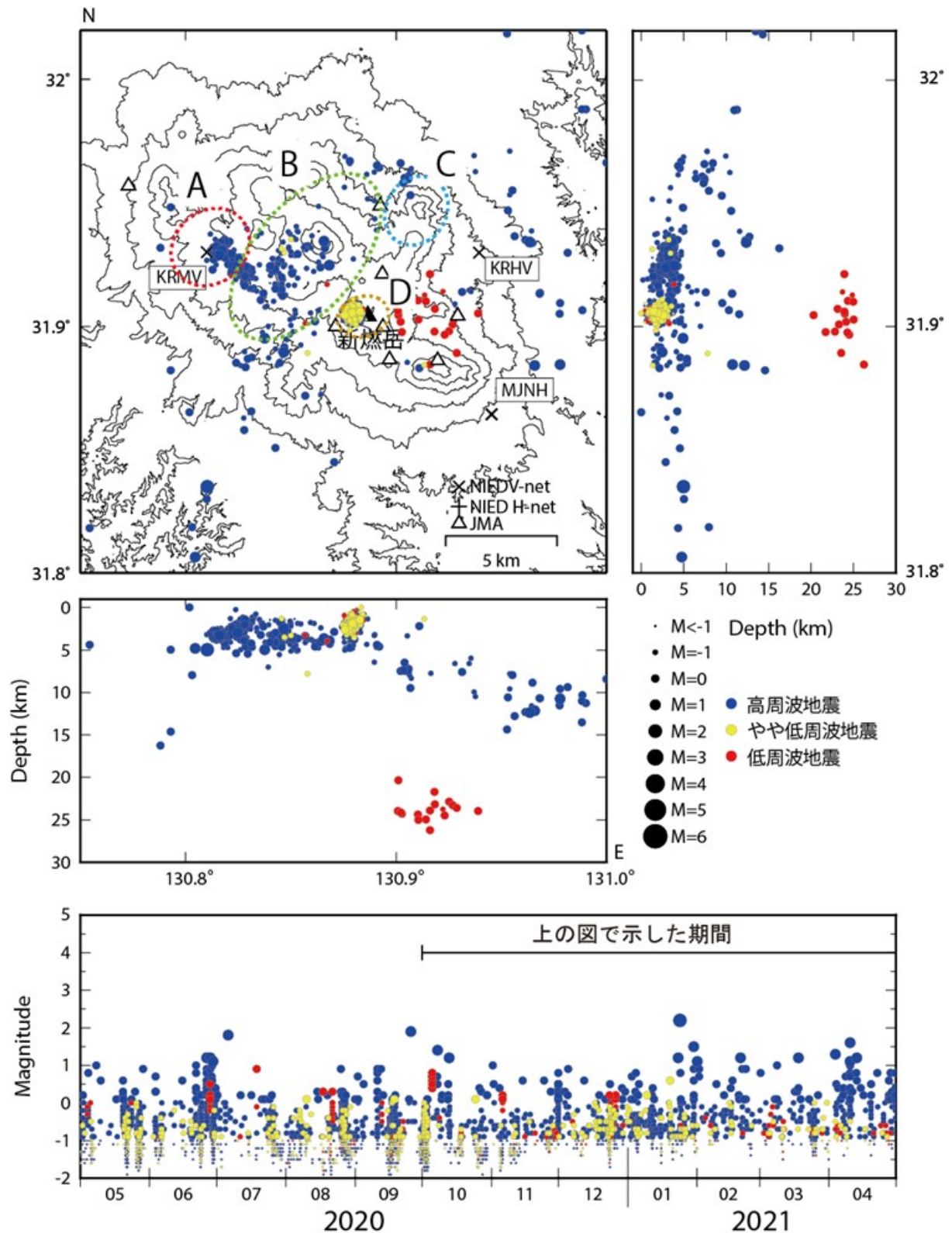
2020年10月から2021年4月30日にかけての震源分布を図1に示した。特に顕著な活動は見られなかった。

○ 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、2018年から2020年中頃まで停滞していたが、その後伸びに変化したように見える。

霧島山の地震活動(2020/10/1 - 2021/4/30)

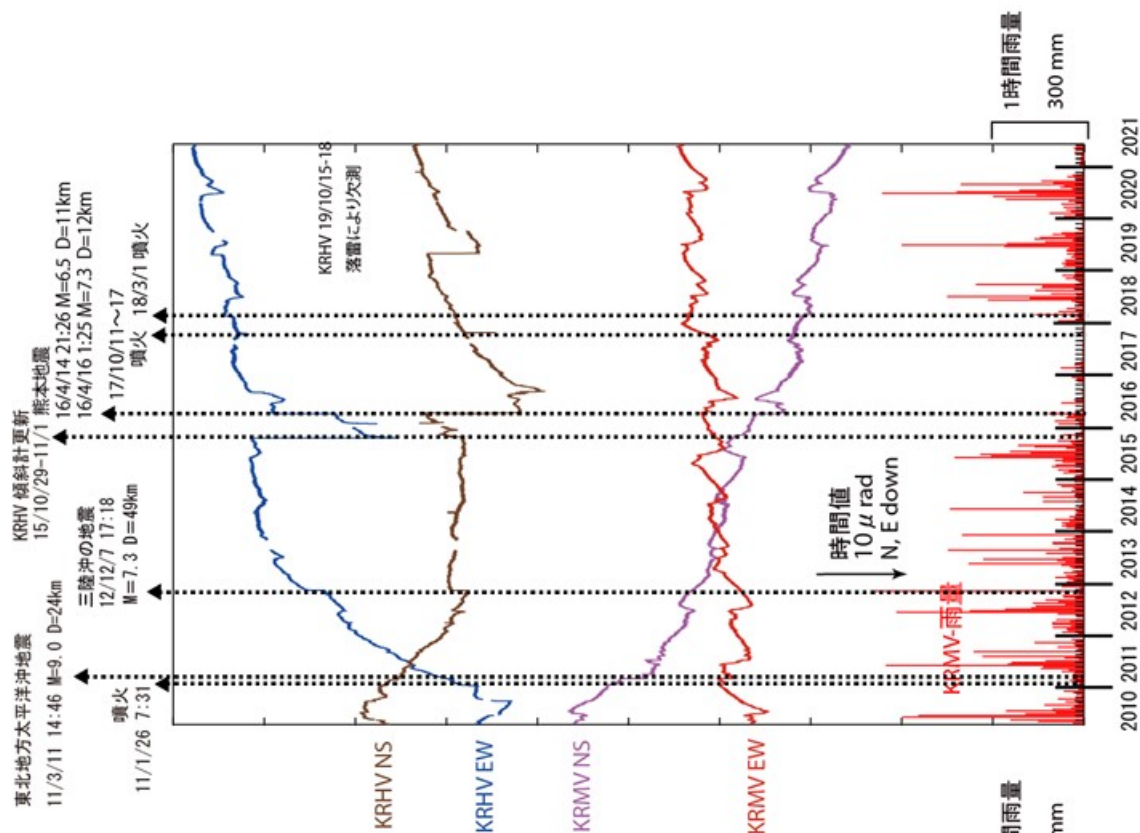


震源決定には、気象庁の観測点（位置は図中）も使用した。

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(2020/10/1 - 2021/4/30)

霧島山の傾斜変動 (2010/5/1~2021/5/31)



霧島山の傾斜変動 (2020/10/1~2021/5/31)

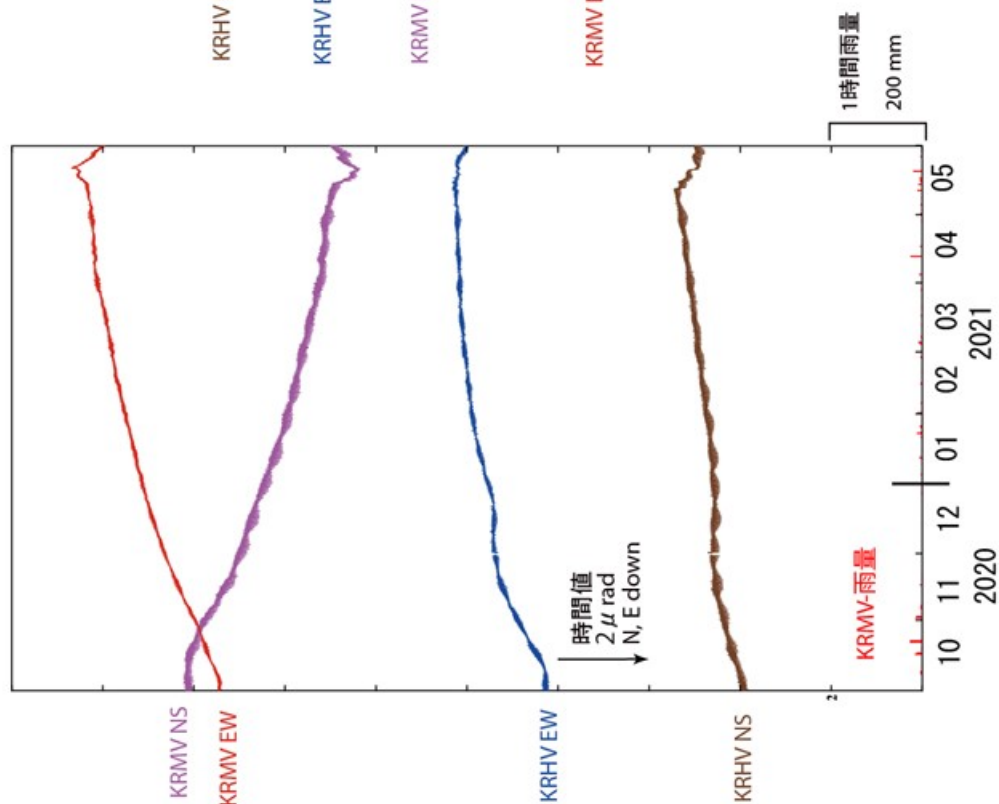
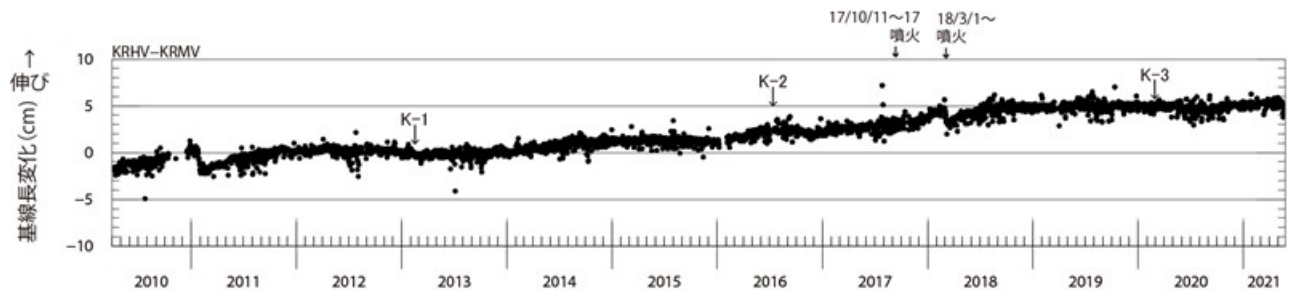


図2 霧島山の傾斜変動

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
2010/4/1～2021/5/31



2020/5/1-2021/4/30 の地殻変動【大口 (950485) 固定】

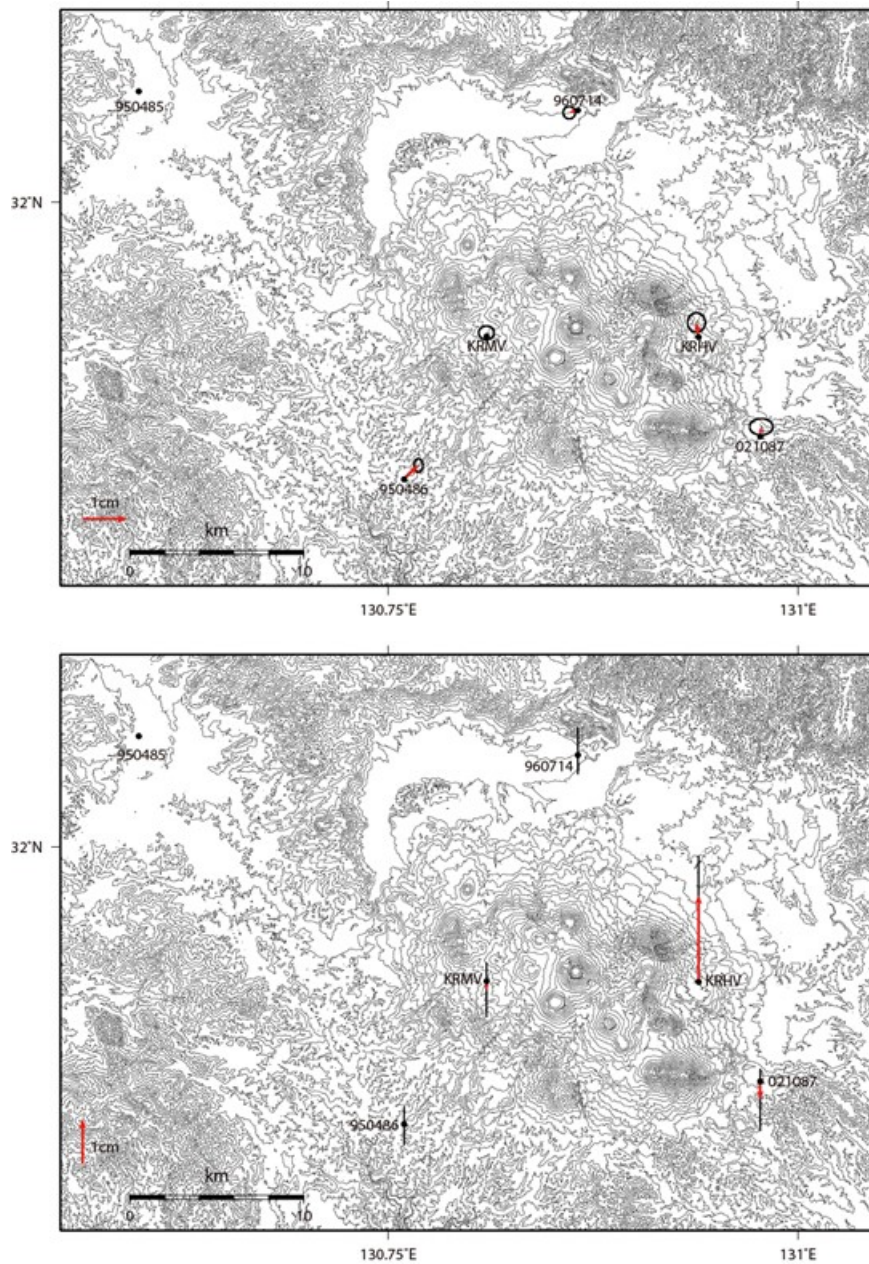


図3 霧島山 GNSS 解析結果. ※ベクトル図は速報暦使用
(上段：水平成分、下段：上下成分)

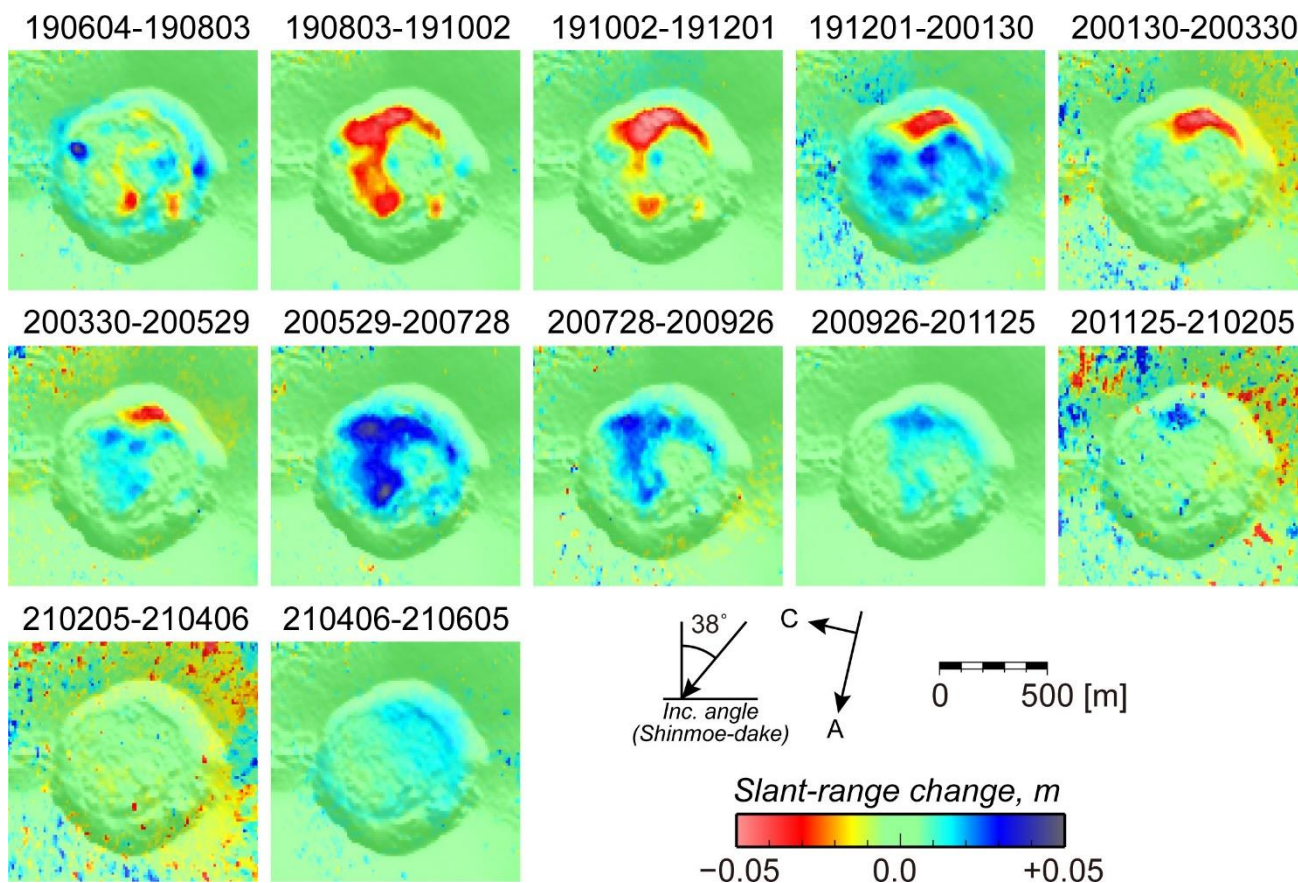
表1 GNSS観測履歴

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

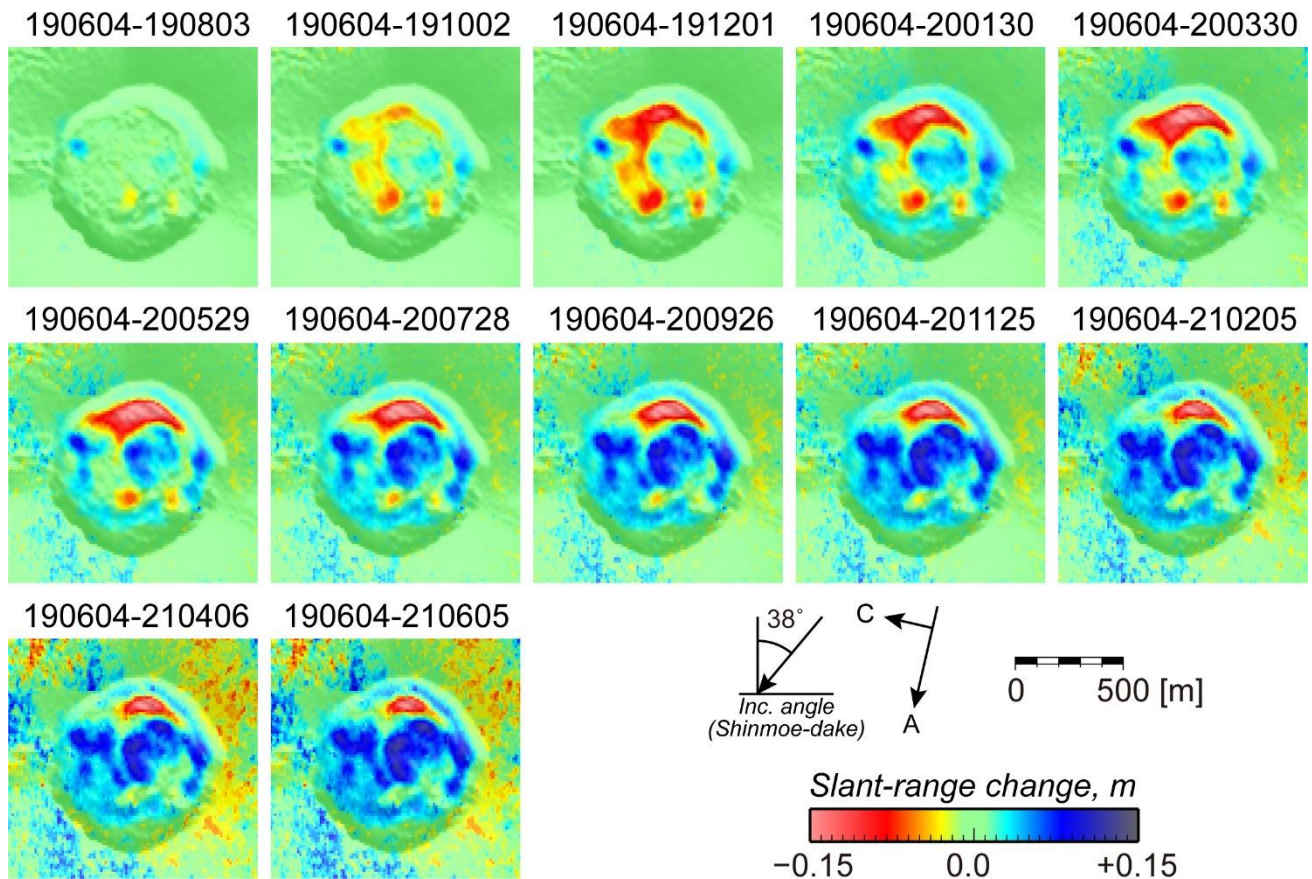
SAR 干渉解析による新燃岳火口内変形

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 60 日毎のスラントレンジ変化を示す。2018 年噴火の終息以降に見られていた火口内溶岩域の衛星－地表間距離(スラントレンジ)短縮変化(隆起もしくは東進)は時間の経過とともに大きさ、範囲ともに小さくなり、2020 年 6 月以降に顕著なスラントレンジ短縮は見られない。それ以降、火口内ではスラントレンジ伸長変化(沈降もしくは西進)が見られたが、そのスラントレンジ変化も時間とともに減速し、2021 年 2 月以降に、顕著な変化は見られない。

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 60 日間ごとのスラントレンジ変化分布。



第2図. Sentinel-1 から求めた、新燃岳火口周辺の2019年6月4日からのスラントレンジ変化の分布。

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（2016年5月～2021年5月）の時系列、右列は最近約1年間（2020年5月～2021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（2016年5月～2021年5月）の時系列、右列は最近約1年間（2020年5月～2021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24年間（1997年1月～2021年5月）の時系列である。霧島山を挟む基線の伸びは2018年9月以降停滞し、最近では多くの基線でわずかな縮みが見られる。

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3か月間（2021年2月～2021年5月）を、下段に最近1年間（2020年5月～2021年5月）を示す。

GNSS観測からは、顕著な地殻変動は観測されていない。

第8図から第10図は「だいち2号」のSAR干渉解析結果である。第8図に霧島山周辺の解析結果を、第9図に新燃岳の拡大図を、第10図に硫黄山の拡大図を示す。新燃岳では火口内において北西側を中心として衛星から遠ざかる変動が見られる。併せて(c)のペアでは、硫黄山付近で衛星に近づく変動が見られる。

第11図は、「だいち2号」の干渉SAR時系列解析結果である。第11図上段は、2015年2月～2020年11月の変位速度である。第11図下段は、各地点における変動の時系列データである。硫黄山の地点Aでは、衛星に近づく変動が見られる。

第12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12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る。

第13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良好に再現されている。

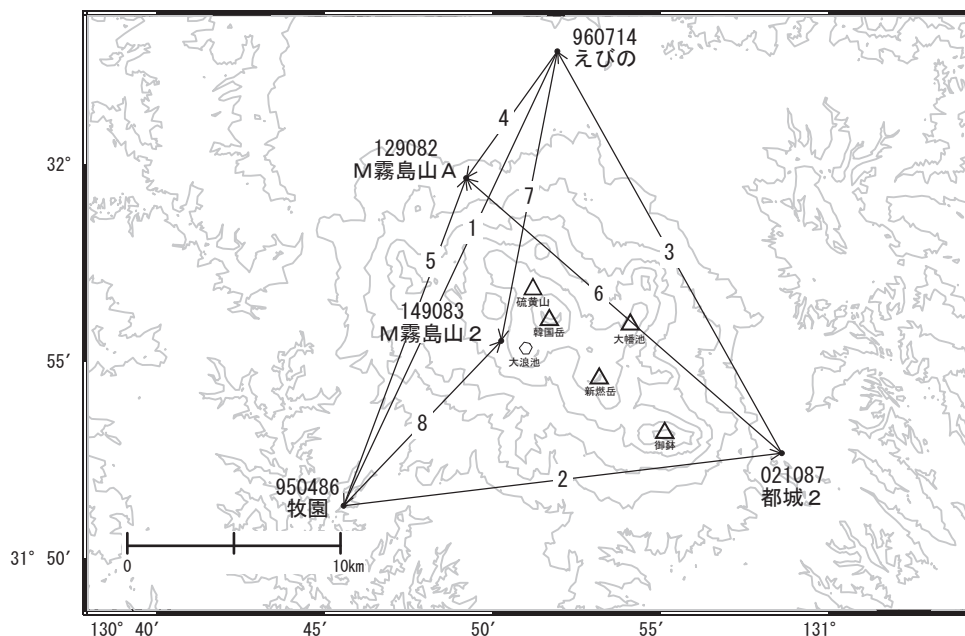
謝辞

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

GNSS連続観測結果では、顕著な地殻変動は観測されていません。

霧島山周辺GEONET(電子基準点等)による連続観測基線図(1)

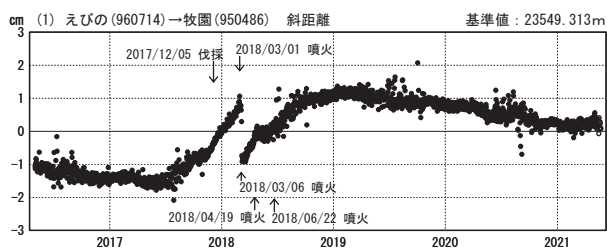


霧島山周辺の各観測局情報

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

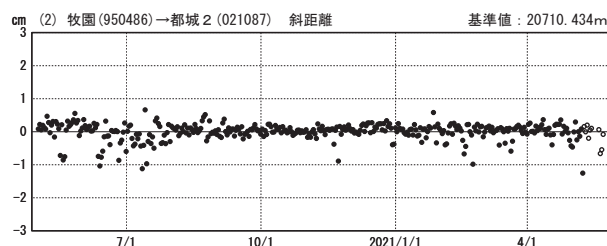
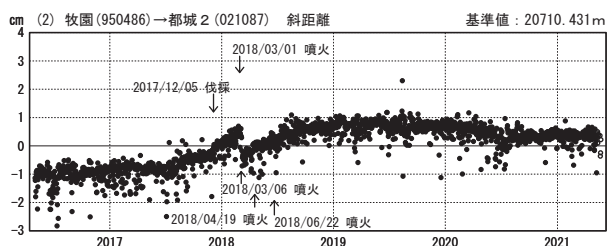
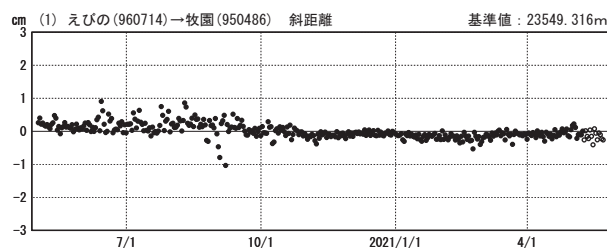
基線変化グラフ(長期)

期間: 2016/05/01~2021/05/22 JST



基線変化グラフ(短期)

期間: 2020/05/01~2021/05/22 JST



●—[F5:最終解] ○—[R5:速報解]

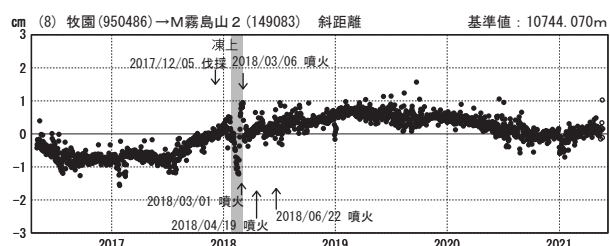
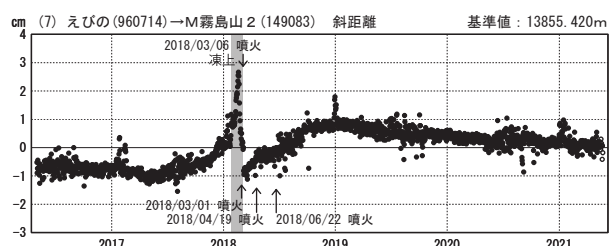
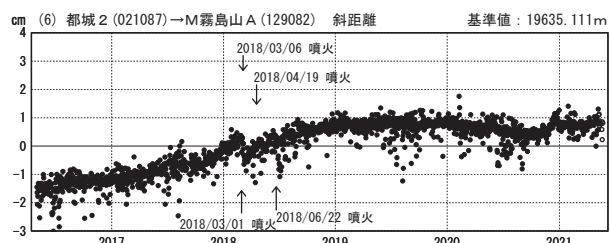
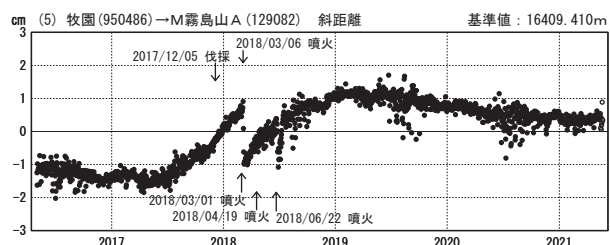
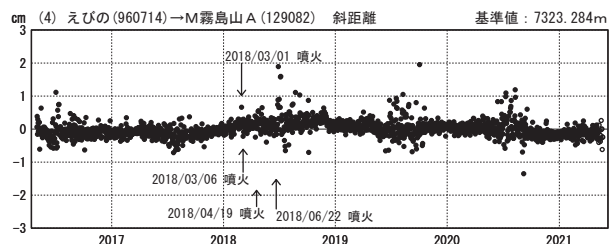
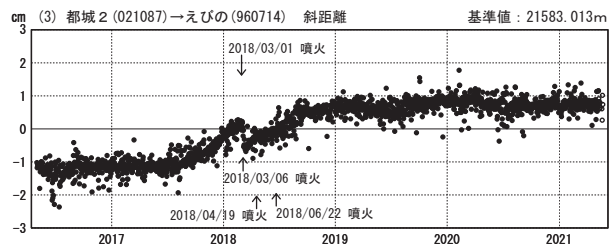
※[R5:速報解]は暫定値、電子基準点の保守等による変動は補正済み

国土地理院

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: 2016年5月~2021年5月、右列: 2020年5月~2021年5月)

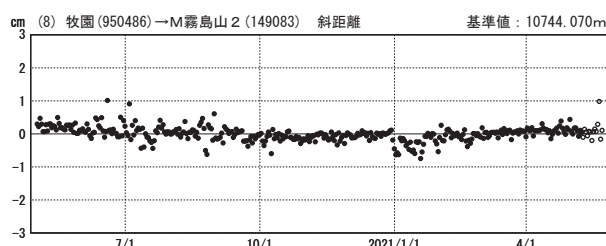
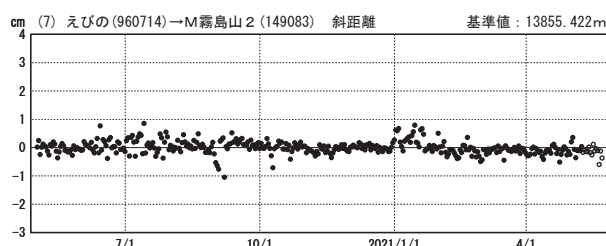
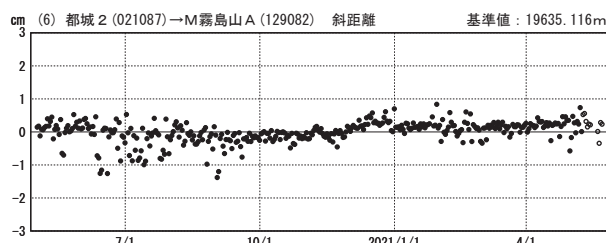
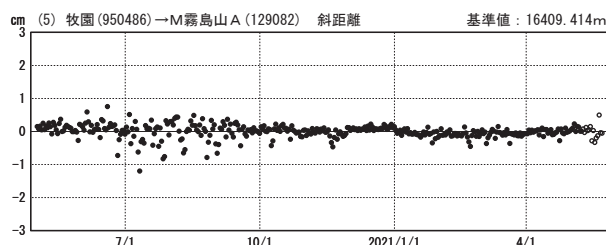
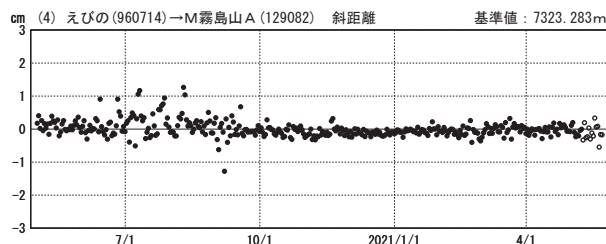
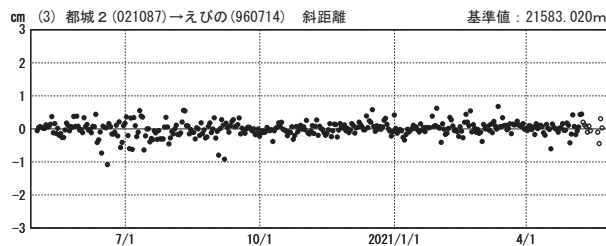
基線変化グラフ（長期）

期間：2016/05/01～2021/05/22 JST



基線変化グラフ（短期）

期間：2020/05/01～2021/05/22 JST



●---[F5:最終解] ○---[R5:速報解]

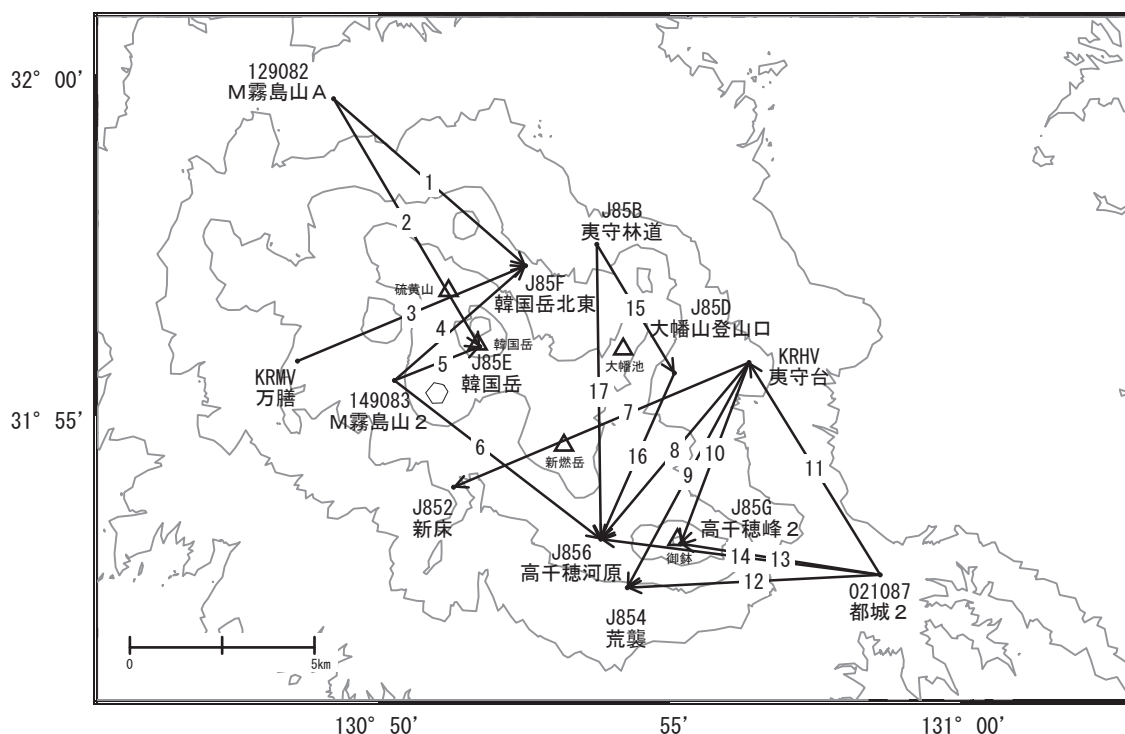
国土地理院

※[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2図 霧島山周辺のGNSS連続観測による基線変化グラフ

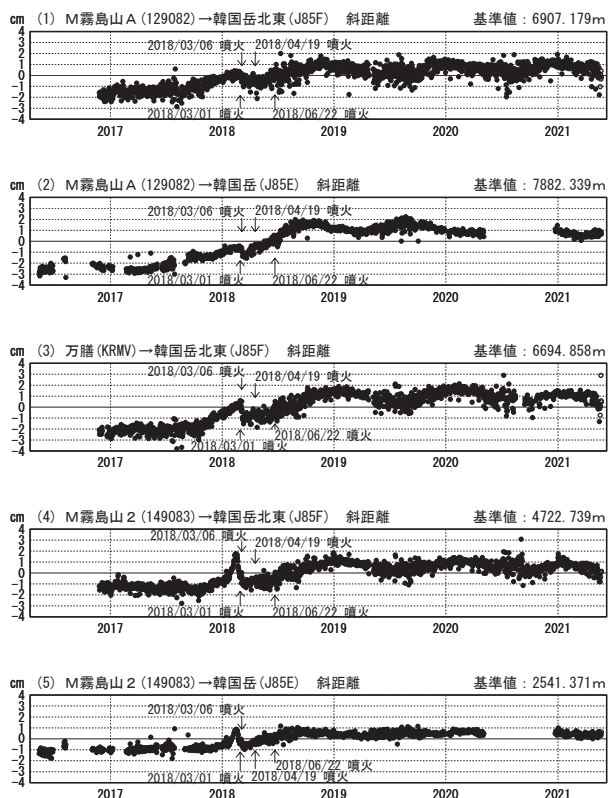
..... 6年5月～2021年5月、右列：2020年5月～2021年5月)

霧島山周辺GEONET(電子基準点等)による連続観測基線図(2)



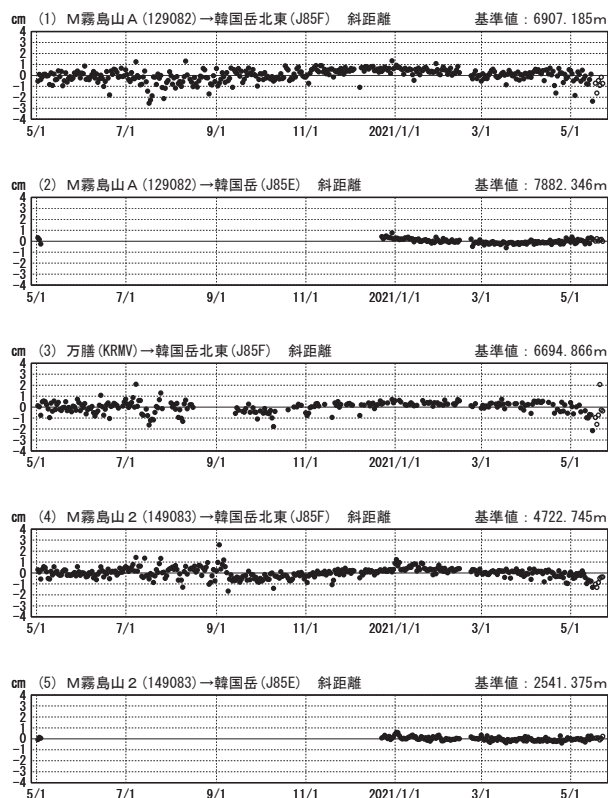
基線変化グラフ (長期)

期間: 2016/05/01~2021/05/22 JST



基線変化グラフ (短期)

期間: 2020/05/01~2021/05/22 JST



●—[F3:最終解] ○—[R3:速報解]

国土地理院・気象庁・防災科学技術研究所

※[R3: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

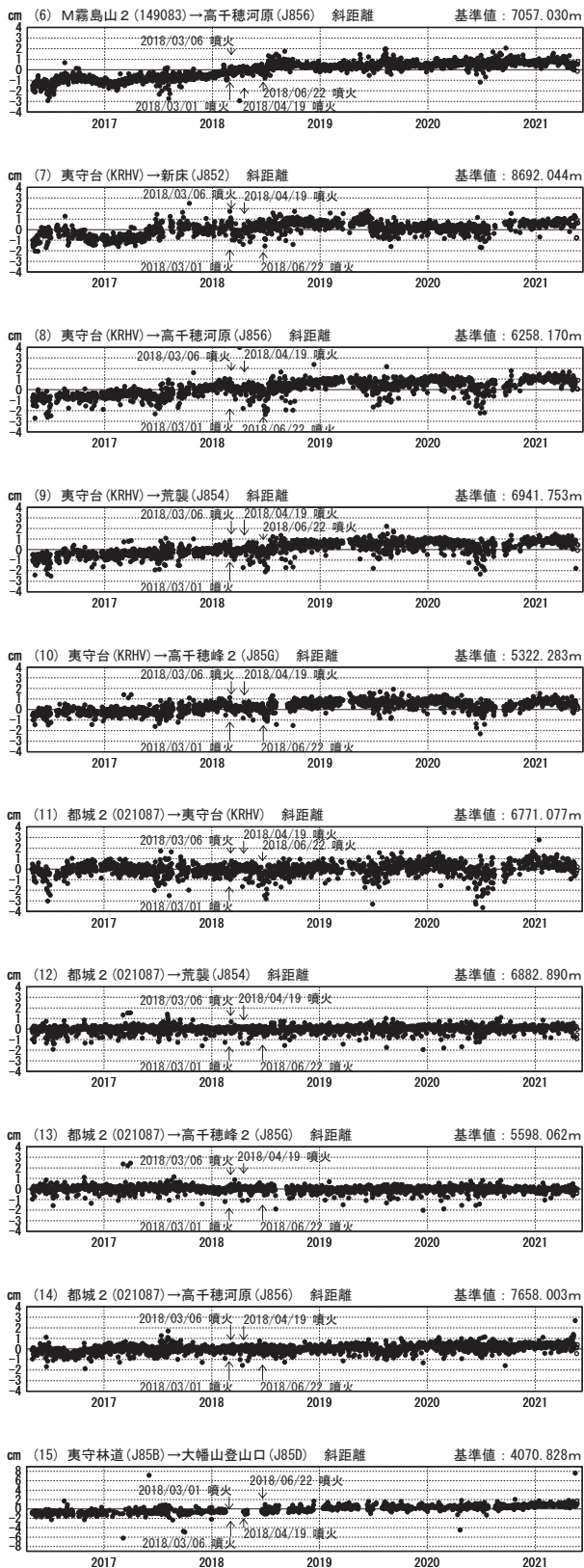
第3図 霧島山周辺のGNSS連続観測基線図(上段)、
基線変化グラフ(下段 左列: 2016年5月~2021年5月、右列: 2020年5月~2021年5月)

第148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

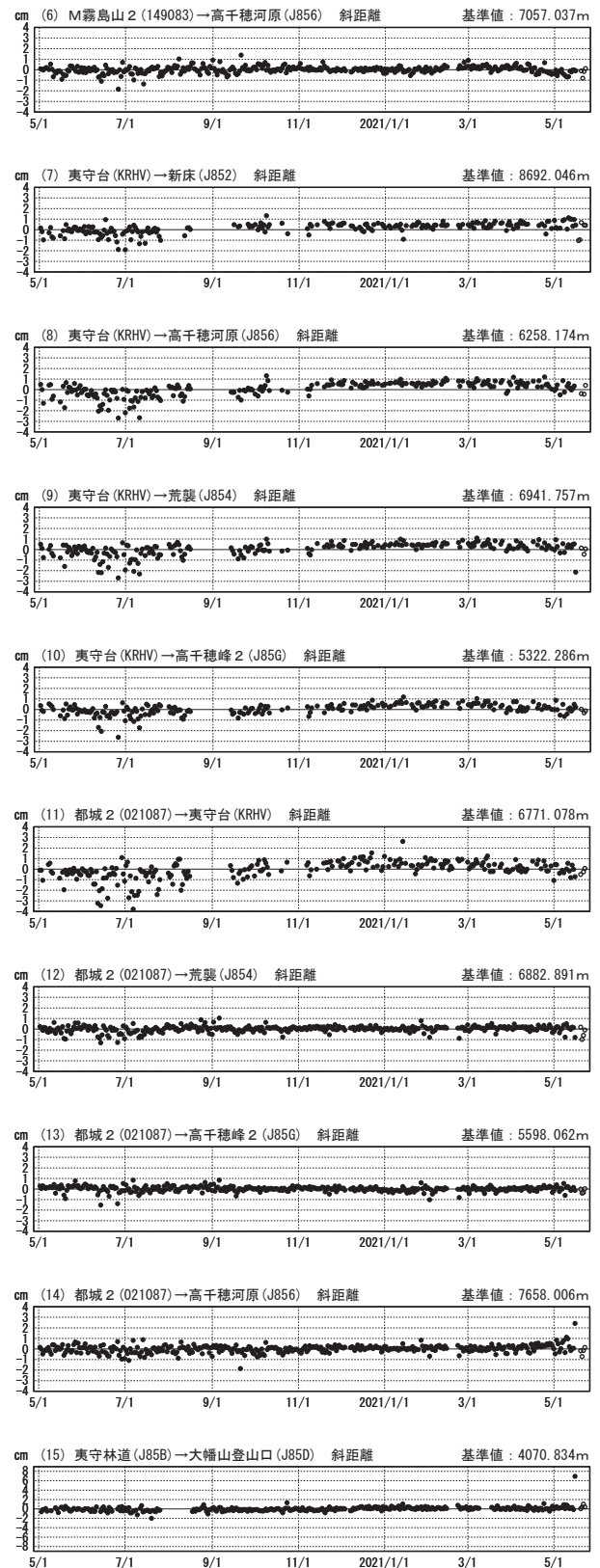
基線変化グラフ（長期）

期間：2016/05/01～2021/05/22 JST



基線変化グラフ（短期）

期間：2020/05/01～2021/05/22 JST



国土地理院・気象庁・防災科学技術研究所

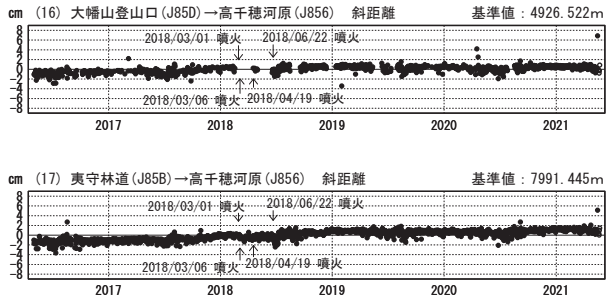
※[R3:速報解]は暫定値、電子基準点の保守等による変動は補正済み

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：2016年5月～2021年5月、右列：2020年5月～2021年5月)

基線変化グラフ（長期）

期間：2016/05/01～2021/05/22 JST

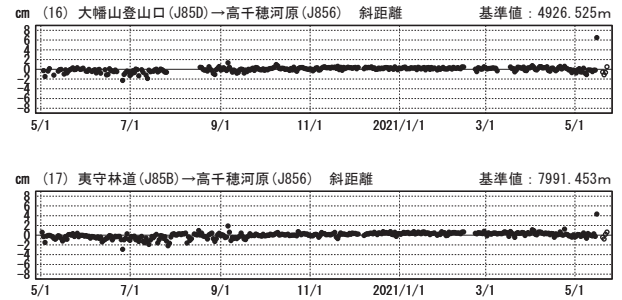


●—[F3:最終解] ○—[R3:速報解]

※[R3: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：2020/05/01～2021/05/22 JST



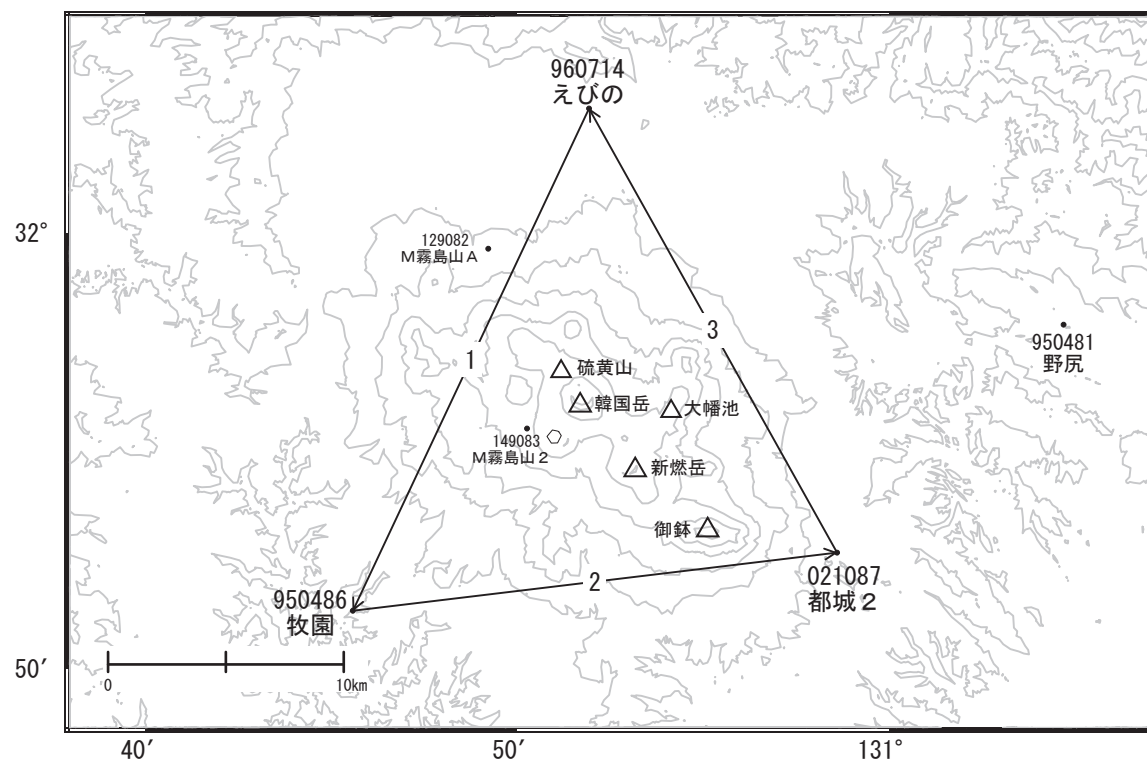
国土地理院・気象庁・防災科学技術研究所

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：2016年5月～2021年5月、右列：2020年5月～2021年5月）

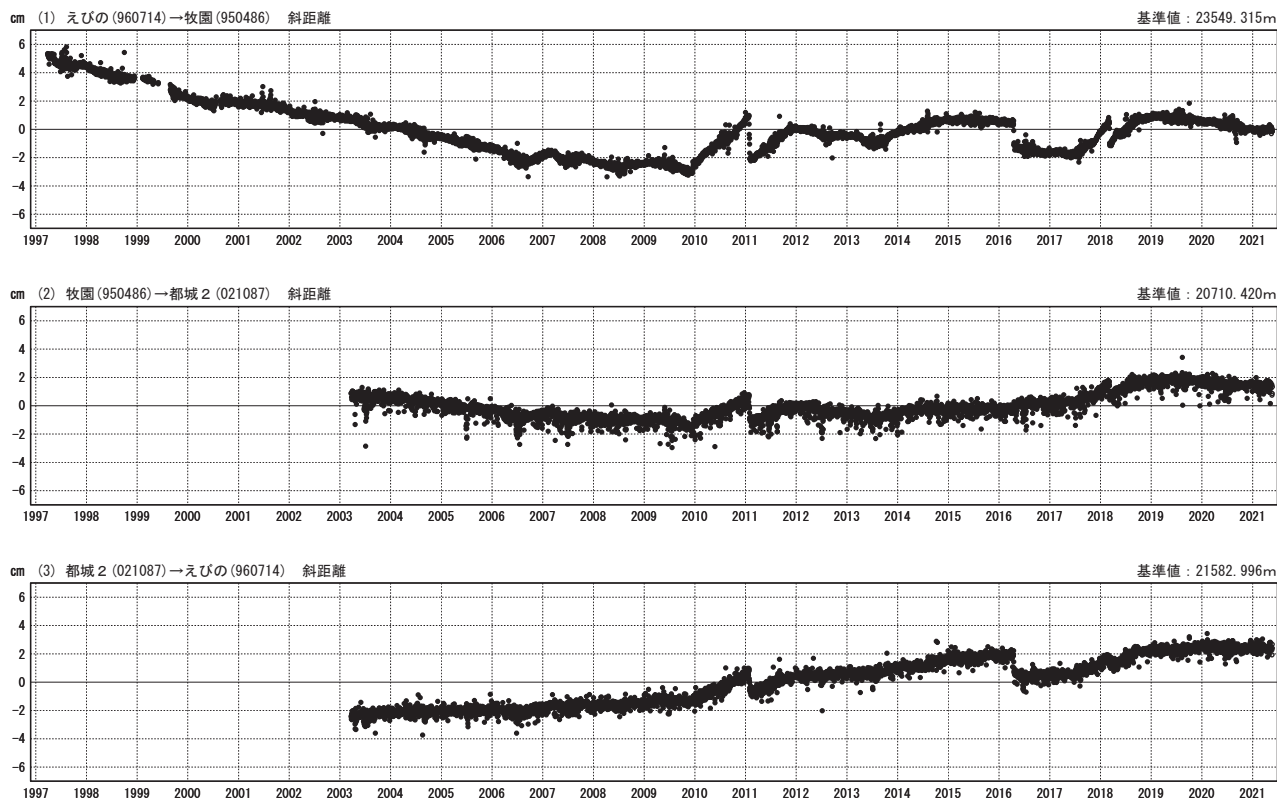


霧島山周辺GEONET(電子基準点等)による連続観測基線図(3)



基線変化グラフ

期間: 1997/01/01~2021/05/22 JST



●—[F5:最終解] ○—[R5:速報解]

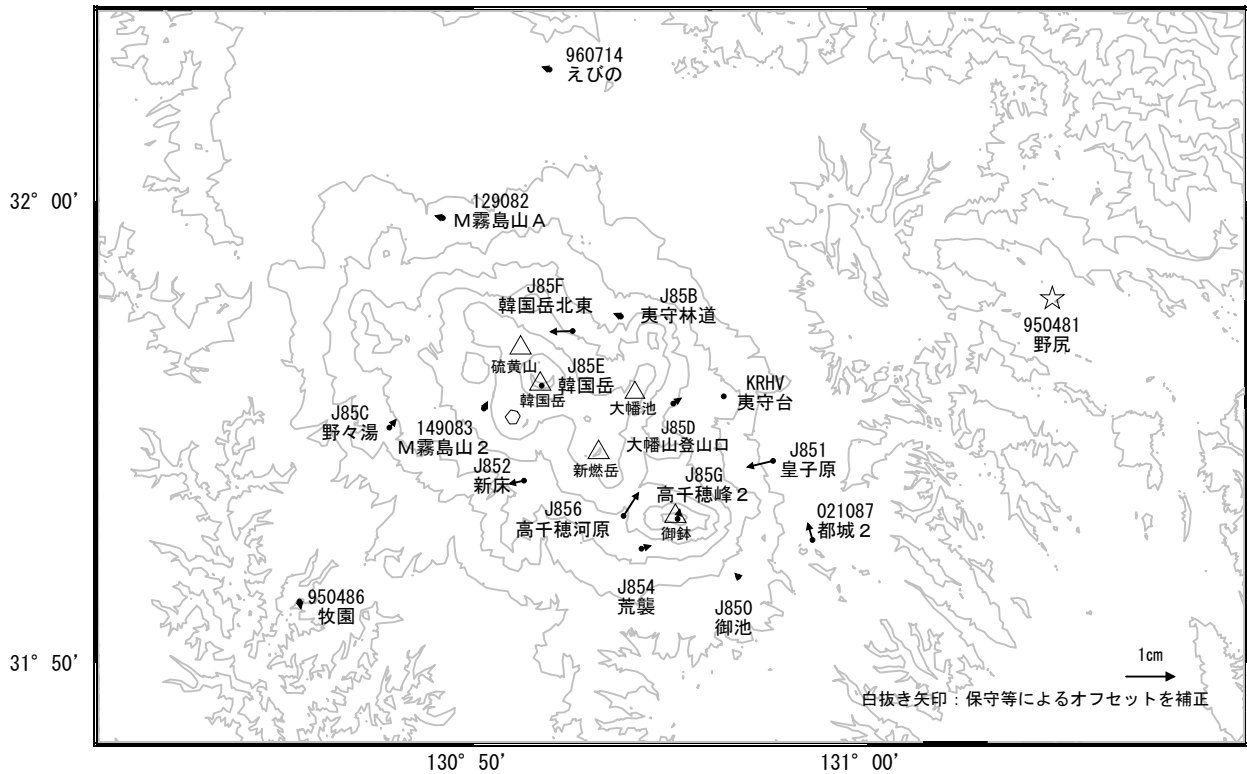
国土地理院

※[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~2021年5月)

霧島山周辺の地殻変動(水平:3か月)

基準期間:2021/02/13~2021/02/22[F5:最終解]
比較期間:2021/05/13~2021/05/22[R5:速報解]

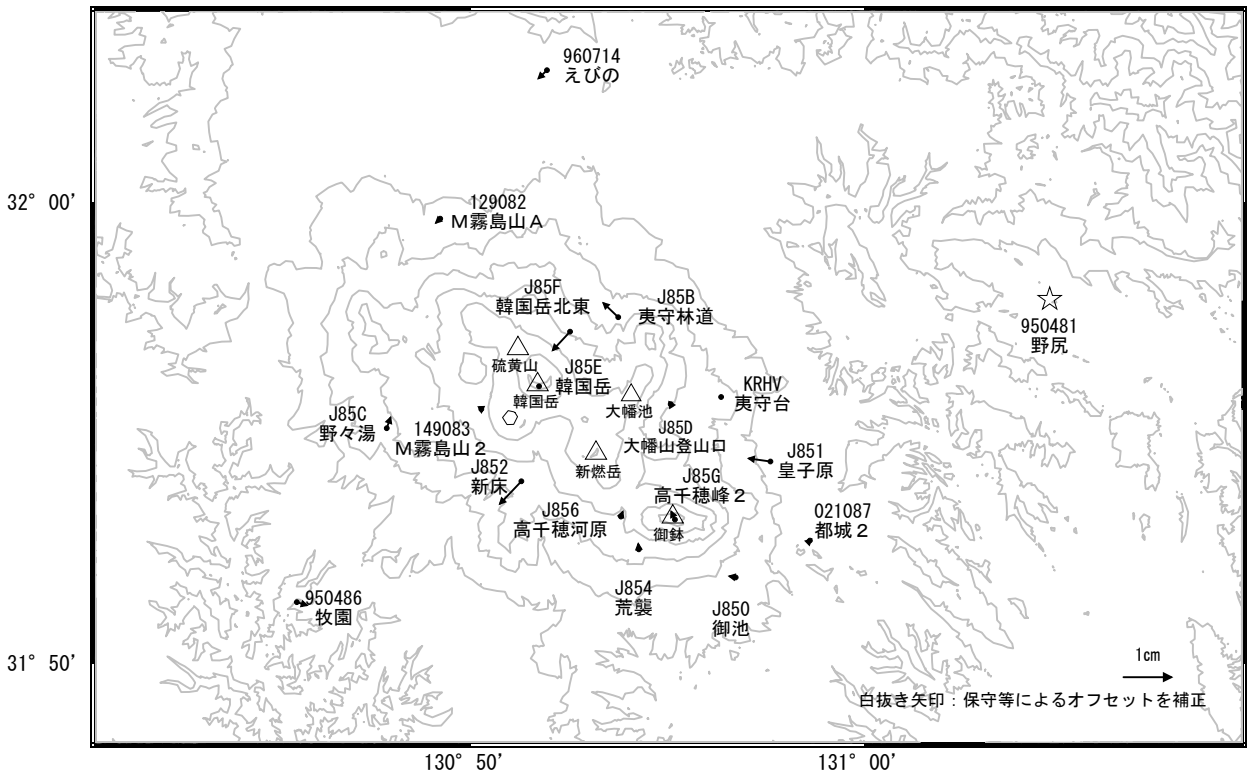


☆ 固定局:野尻(950481)

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:2020/05/13~2020/05/22[F5:最終解]
比較期間:2021/05/13~2021/05/22[R5:速報解]



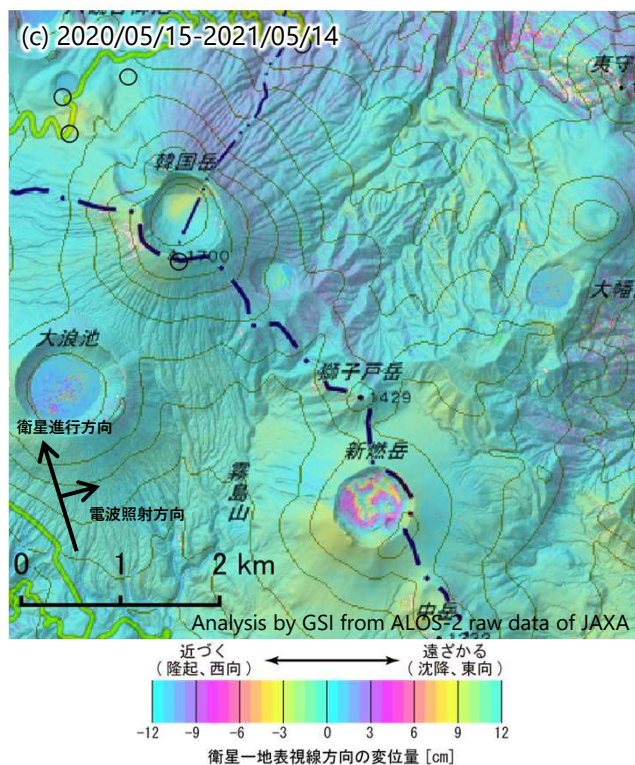
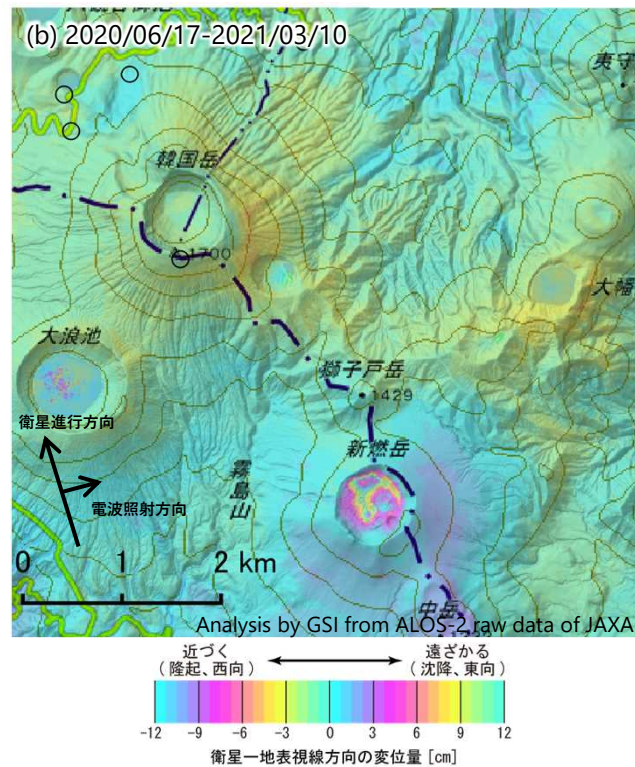
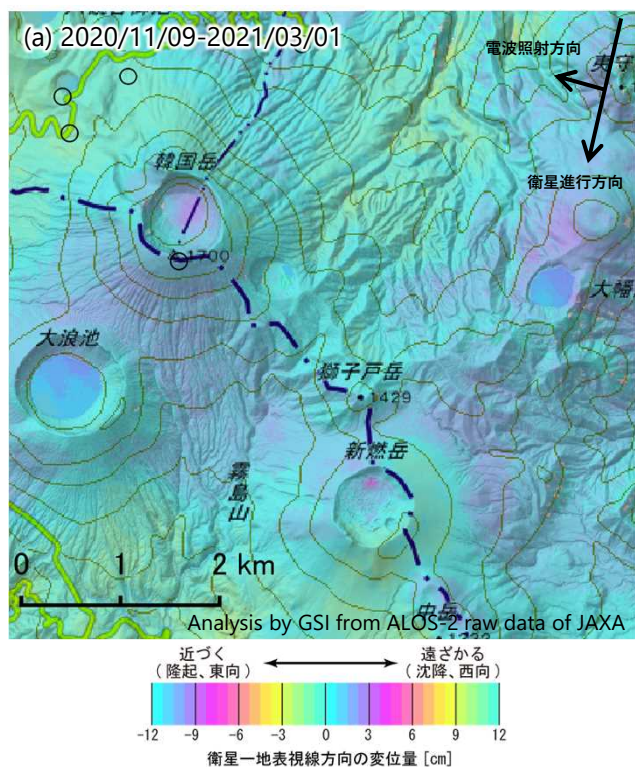
☆ 固定局:野尻(950481)

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2月~2021年5月、下段:2020年5月~2021年5月)

霧島山のSAR干渉解析結果について

新燃岳火口内北西側を中心として衛星から遠ざかる変動が見られます。
(c)では、硫黄山付近で衛星に近づく変動が見られます。



	(a)	(b)	(c)
衛星名	ALOS-2	ALOS-2	ALOS-2
観測日時	2020/11/09 2021/03/01 12:19頃 (112日間)	2020/06/17 2021/03/10 0:19頃 (266日間)	2020/05/15 2021/05/14 0:12頃 (364日間)
衛星進行方向	南行	北行	北行
電波照射方向	右(西)	右(東)	右(東)
観測モード*	U-U	U-U	U-U
入射角	35.5°	42.9°	32.1°
偏波	HH	HH	HH
垂直基線長	+ 173 m	+ 82 m	- 227 m

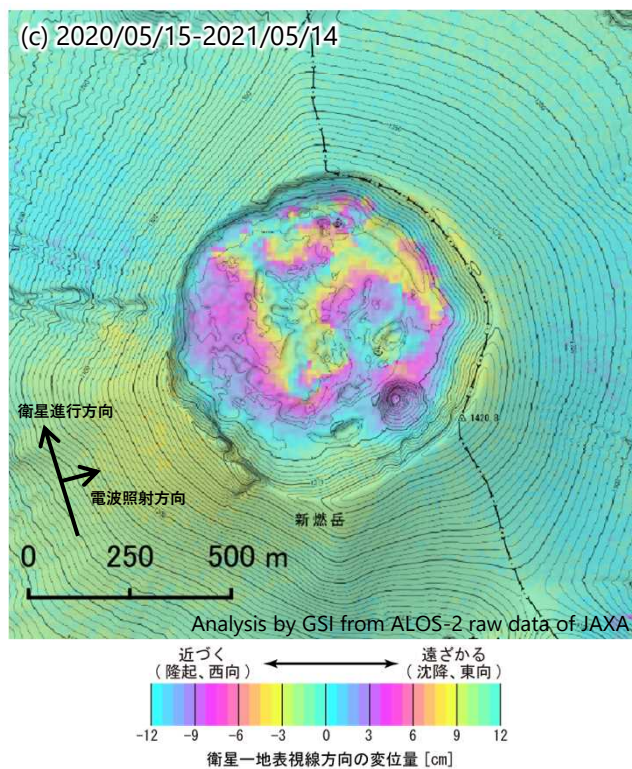
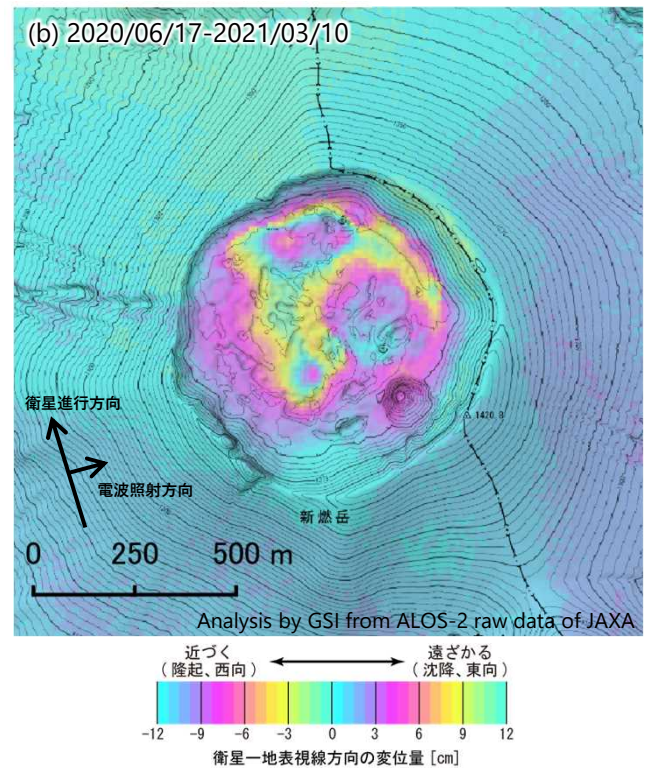
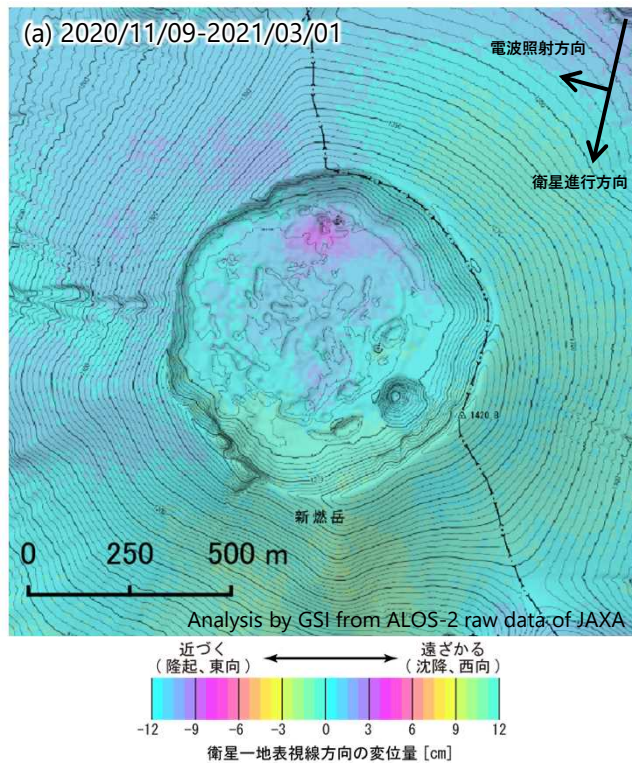
* U：高分解能(3m)モード

○ 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

第8図 「だいち2号」PALSAR-2による霧島山周辺地域の解析結果(1)

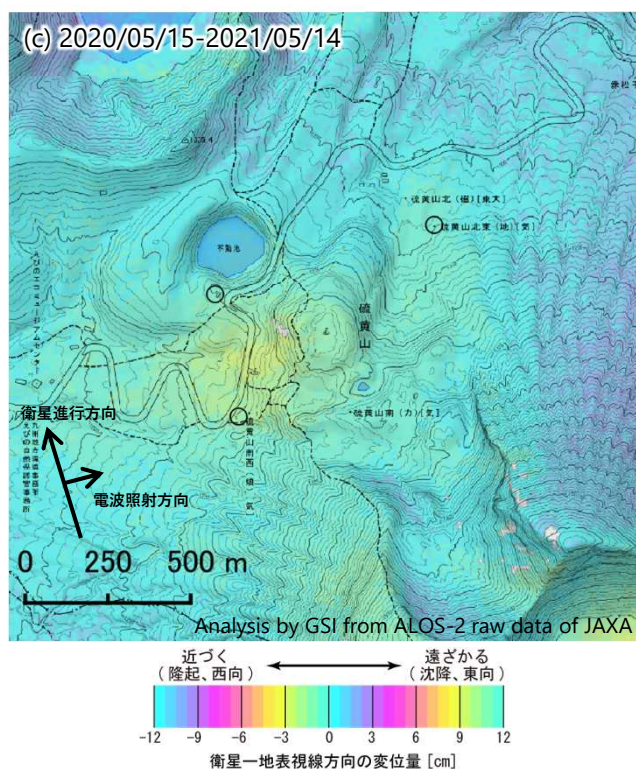
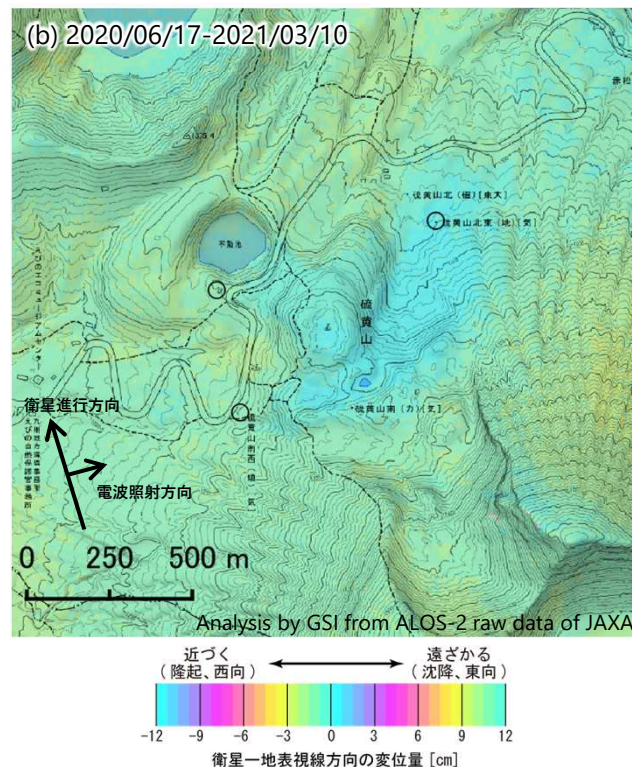
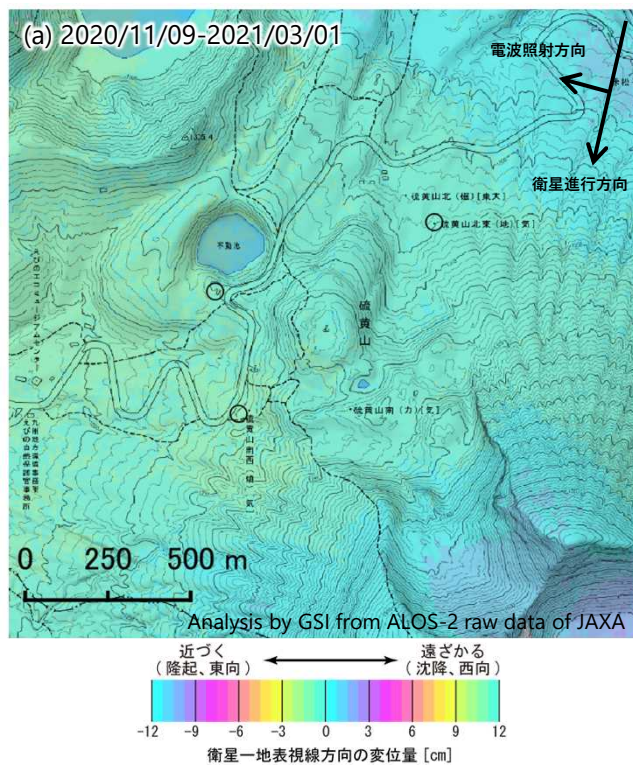
【新燃岳の拡大図】



背景：地理院地図 火山基本図・陰影起伏図・傾斜量図

第9図 「だいち2号」PALSAR-2による霧島山周辺地域の解析結果（2）

【硫黄山の拡大図】

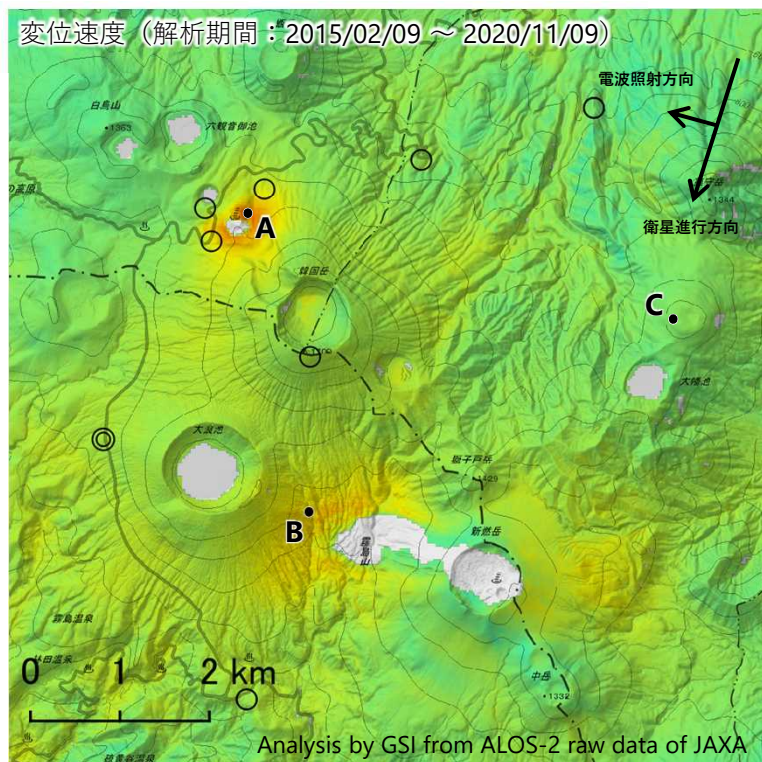


背景：地理院地図 火山基本図・陰影起伏図・傾斜量図

第10図 「だいち2号」PALSAR-2による霧島山周辺地域の解析結果（3）

霧島山の干渉SAR時系列解析結果（南行）

硫黄山の地点Aでは、衛星に近づく変動が見られます。

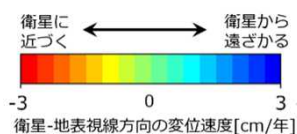


衛星名	ALOS-2
観測期間	2015/02/09 ～ 2020/11/09 (2100日間)
衛星進行方向	南行
電波照射方向	右(西)
観測モード*	U-U
入射角	35.5°
偏波	HH
データ数	55
干渉ペア数	314

* U：高分解能(3m)モード

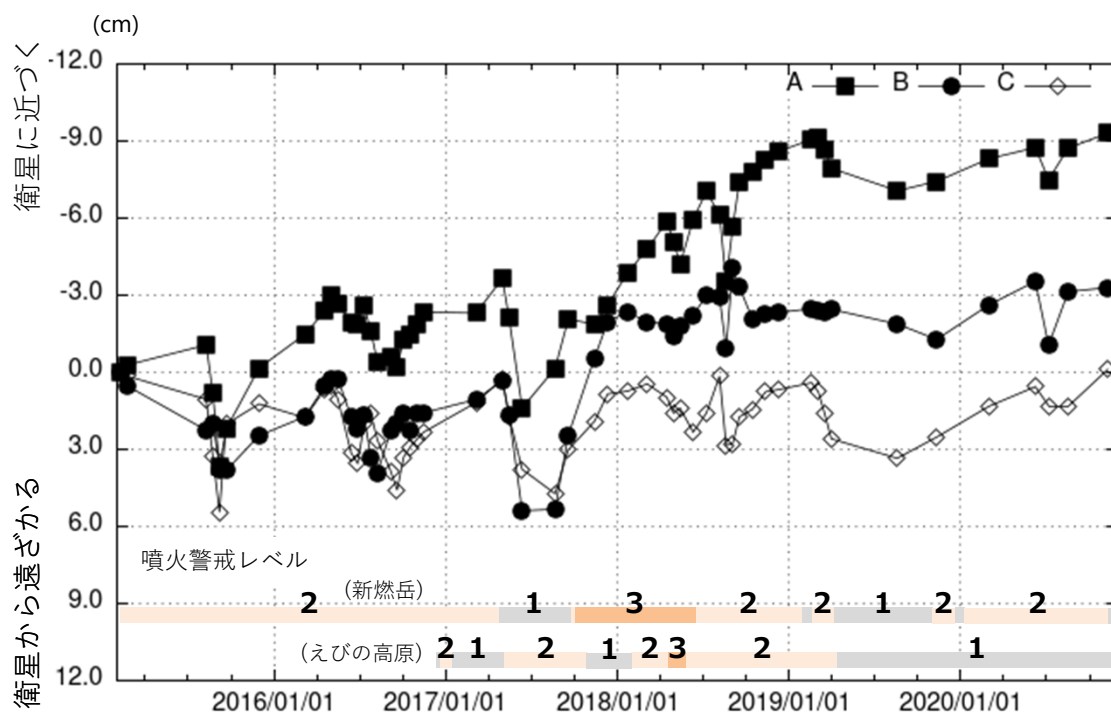
◎ 国土地理院GNSS観測点

○ 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

本解析で利用したデータの一部分は、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。

第11図 霧島山の干渉SAR時系列解析結果

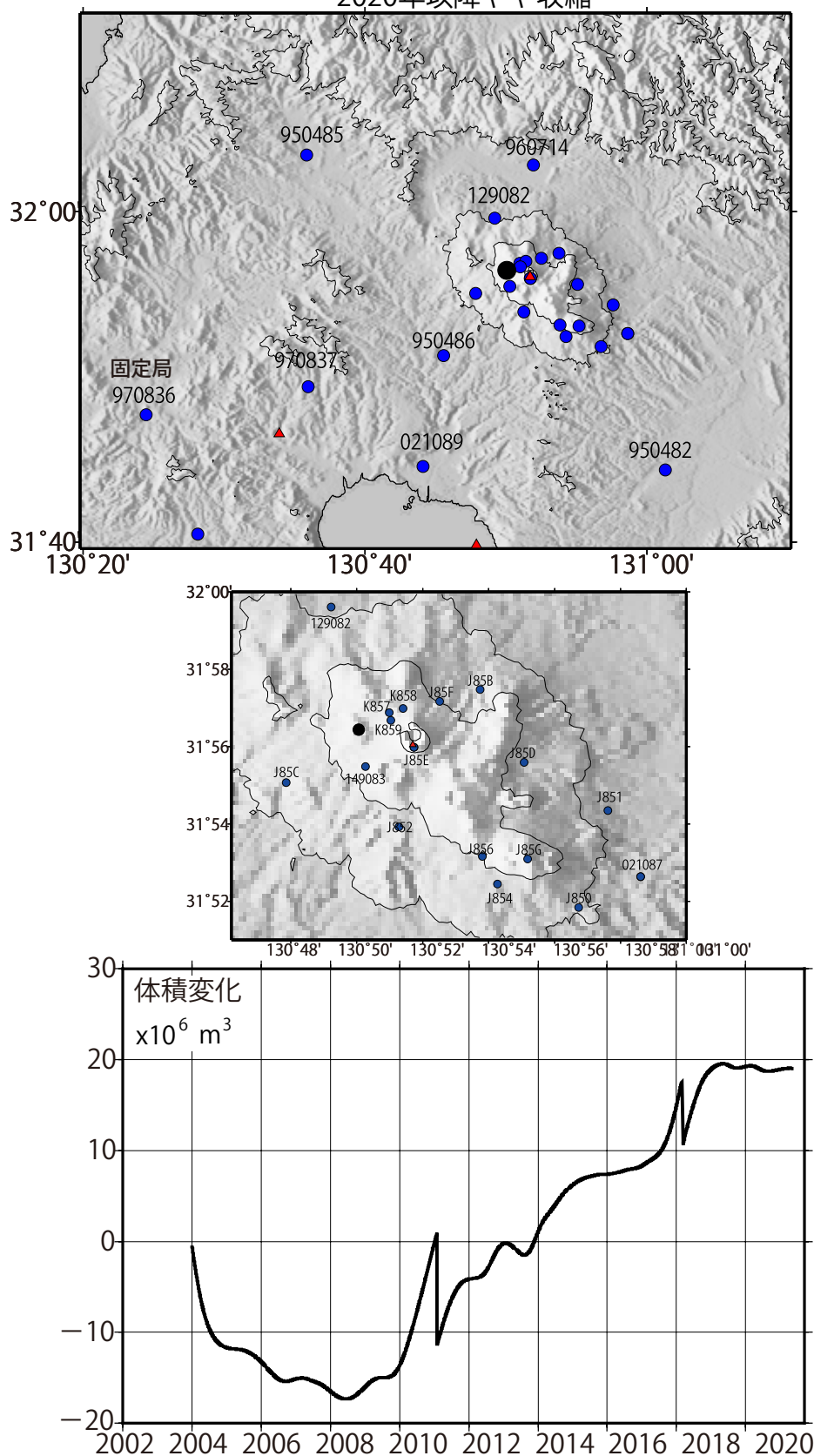
(上段) 変位速度の分布 (2015年2月～2020年11月)

(下段) 変動の時系列データ (2015年2月～2020年11月)

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

2020年以降やや収縮



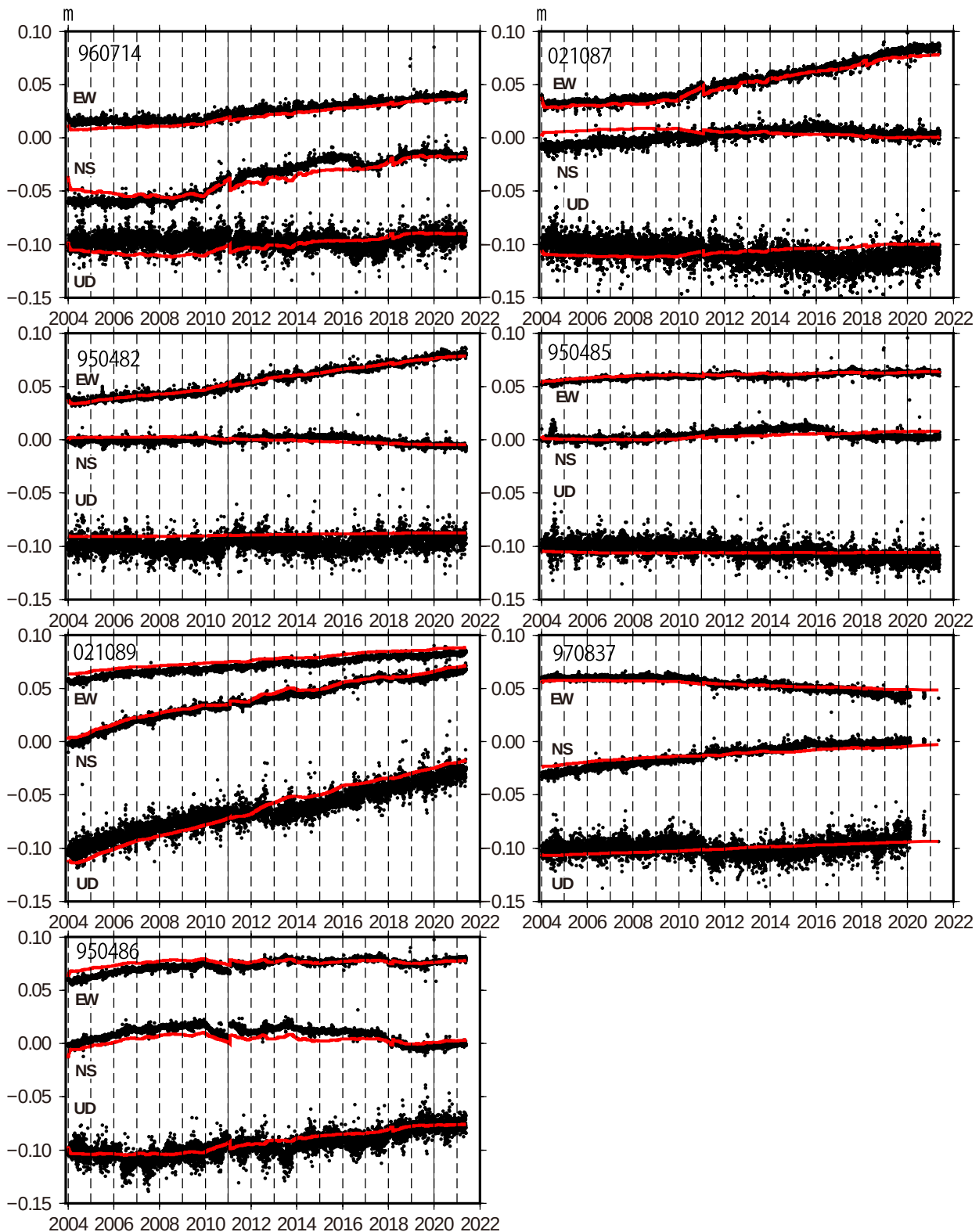
茂木ソース: 経度130.837, 緯度31.946, 深さ7.6km

電子基準点の保守などによる変動は補正済み

第12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)

霧島地域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



*電子基準点の保守等による変動は補正済み

*熊本地震の変動は補正済み

*使用データ:F3解

第13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



第1図 霧島山

地形図は国土地理院の電子地形図（タイル）を使用した

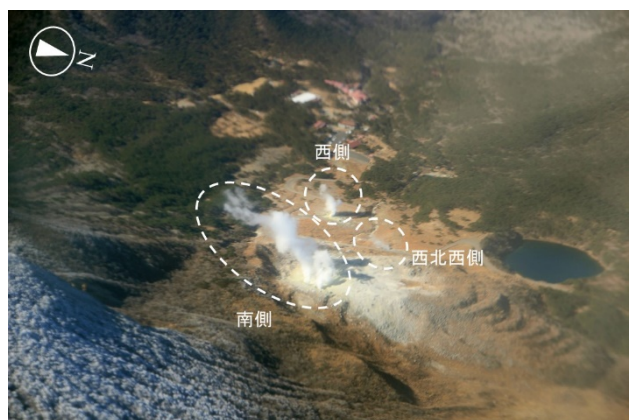
矢印は画像の撮影場所を示す

○最近の活動について

年月日	調査機関等	活動状況
2020/12/17	第十管区 海上保安本部	新燃岳火口では2020年9月観測時よりも小規模な白色噴気の放出が認められた（第2図）。 硫黄山の南側・西北西側・西側の噴気地帯で白色噴気が放出されていた（第3図）。特に南側から活発に放出されていた。 御鉢火口に特異事象は認められなかった。



第2図 霧島山 新燃岳火口
2020年12月17日 10:59撮影



第3図 霧島山 硫黄山噴気地帯
2020年12月17日 11:00撮影

えびの高原硫黄山周辺の熱水・湧水組成

えびの高原硫黄山周辺の熱水（噴湯・湯だまり）および湧水の化学組成について報告する．試料水の採水地点を図 1 に示す．直近の試料採取は 2021 年 4 月 18 日～19 日である．

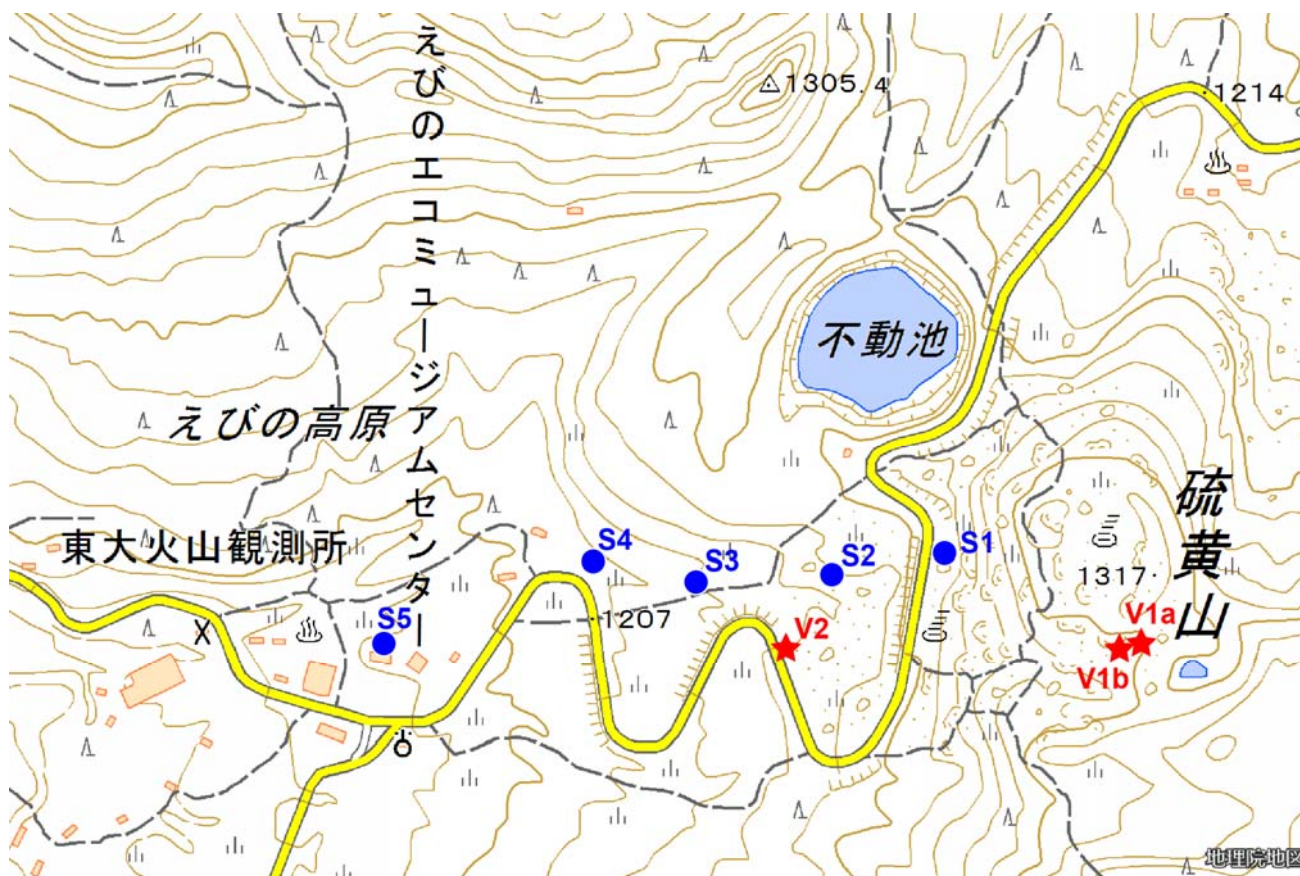


図 1 湧水の採取地点(えびの高原内)(地理院地図「電子国土 web」を使用した)

S1～S5 は湧水の位置を示し, V1a, b は硫黄山南湯だまり, V2 は硫黄山西火孔である．

図 2～図 8 に湯だまり・熱水・湧水の水質に関わる時系列データを示す．試料名の記号は図 1 の採取地点に対応している．なお、湧水 S2 については 2018 年秋以降、湧出を確認していない．また、湧水 S5 については 2020 年 12 月以降の採水が行えていない．

2021 年 4 月の西火孔噴湯(V2)の $\text{Cl}^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ 濃度(図 2)や $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比(図 4)は、その前回(2021 年 2 月末)の採水時に比べて大きく上昇した．また、ほう素濃度の上昇も見られることから(図 6)、これらの変化は深部熱水の寄与によるものと考えられる．西火孔の噴湯(V2)については 2021 年に入ってその活動は極めて不安定である．2021 年 2 月 28 日から 3 月 1 日に実施した調査の際には、2 月 28 日の夜から 3 月 1 日の朝までに間に V2 の噴気活動が一時的に停止したことを確認し、また、4 月 18 日から 4 月 19 日に実施した調査では、V2 の火孔プールが干上がった状態であったところに、突如、プール脇の噴気孔から熱泥水が溢れ出した後、噴湯状へと推移し、プールに流入した大量の熱泥水がプール底の火孔に導入されて再び地中へと戻っていく様子を確認した(図 9)．このようなことから、西火孔の噴湯は(V2)は噴出した熱泥水が環流しながら間欠的に噴出することを

霧島山（硫黄山）

繰り返している可能性がある。

湧水 S1 の $\text{Cl}^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ 濃度 (図 3) および $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比 (図 5) は低い状態であり、噴火前のレベルとなっており、山頂火口域へと供給される火山性流体のフラックスは 2018 年噴火後の活動活発化当時に比べ大きく低下している。なお、2020 年 12 月 13 日、14 日の調査時には湧水 S1 の湧出は認められなかった。

えびの高原の湧水 S3, S4 は、噴火後に $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比 (図 5) と水温 (図 7) の大きな上昇と pH (図 8) の低下が生じた後、2019 年以降にはそれらの観測値が噴火前の状態に戻る傾向を示したものの、現時点では噴火前の値には戻ることとはなく、硫黄山西側の浅部熱水系への火山性流体の供給は継続的・安定的に行われていると考えられる。

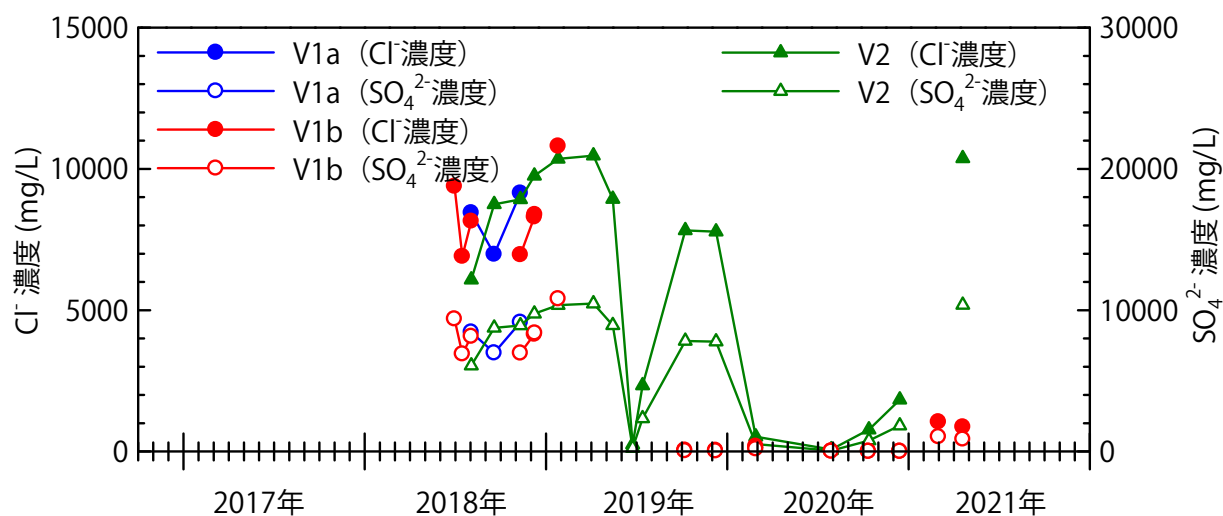


図 2 湯だまり・熱水の Cl^- , SO_4^{2-} 濃度の推移

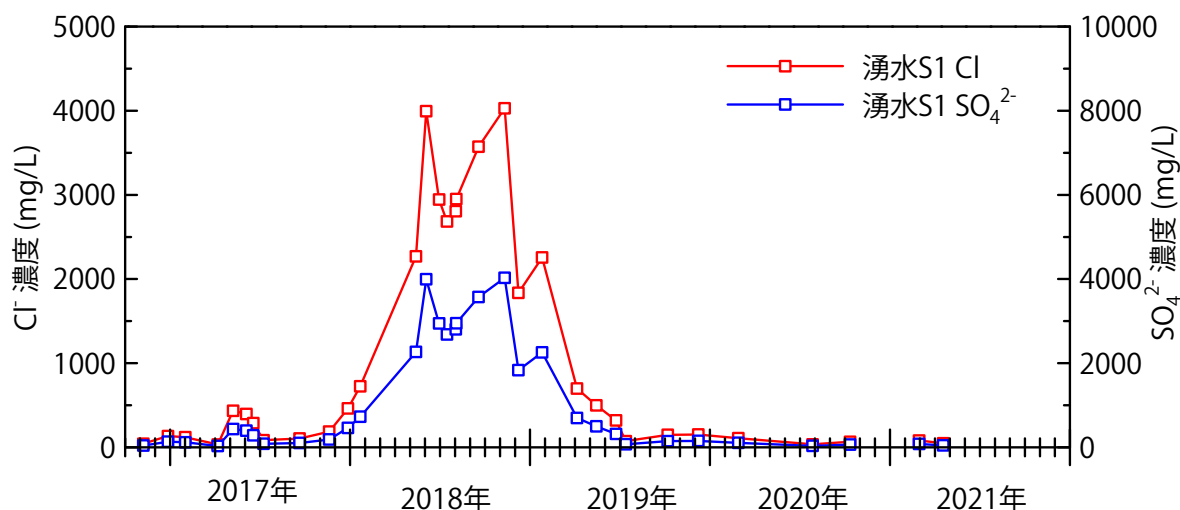


図 3 湧水 S1 の Cl^- , SO_4^{2-} 濃度の推移

霧島山 (硫黄山)

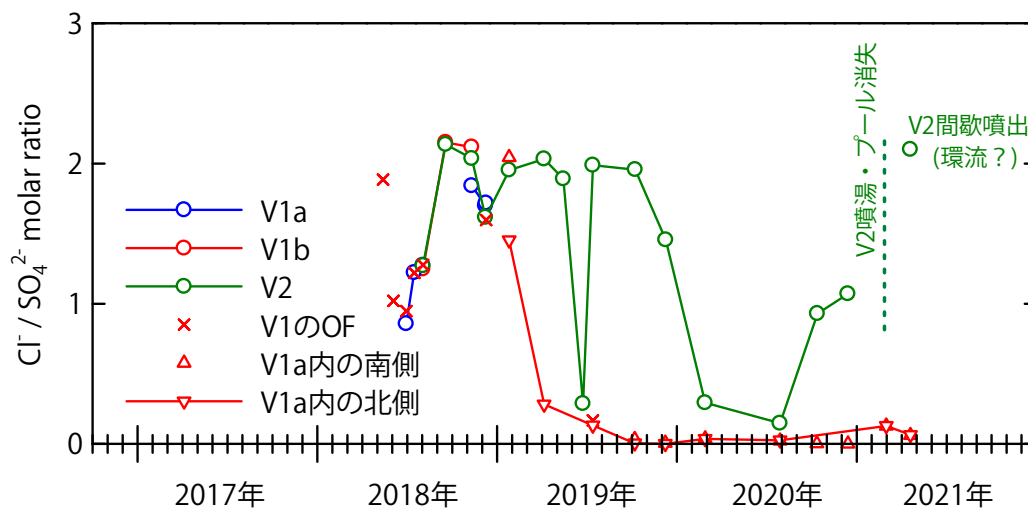


図4 湯だまり・熱水の $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ モル比の推移

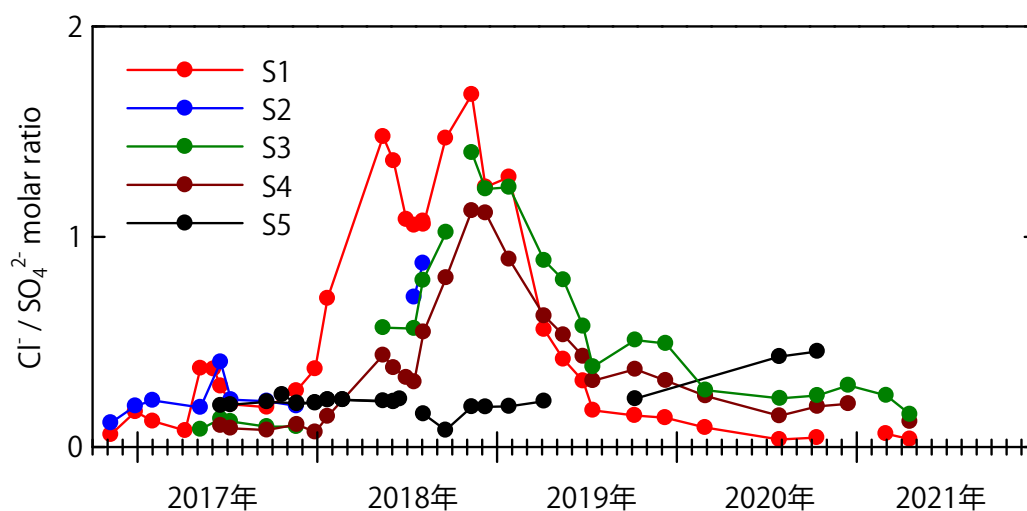


図5 湧水 S1～S5 の $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ モル比の推移

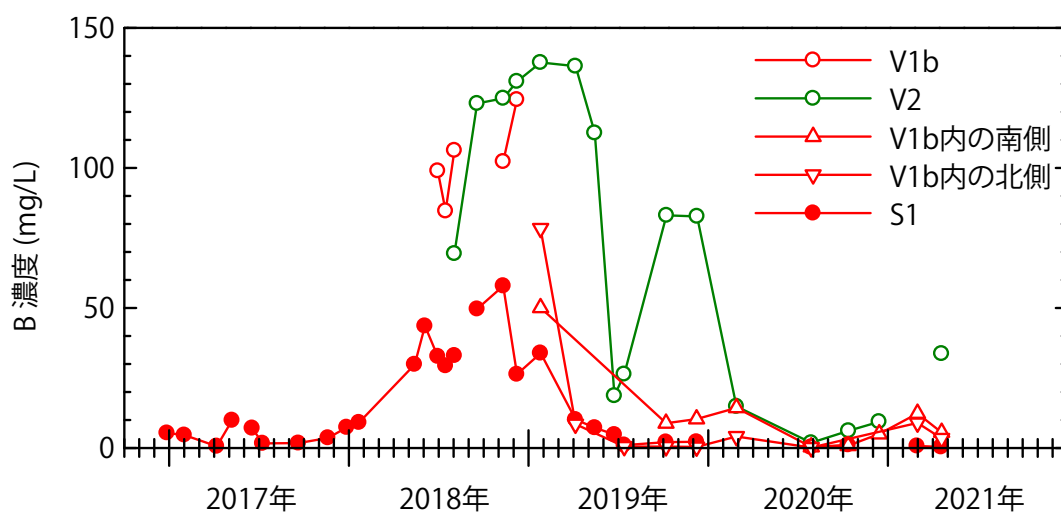


図6 湯だまり・熱水・湧水 S1 のホウ素濃度の推移

霧島山（硫黄山）

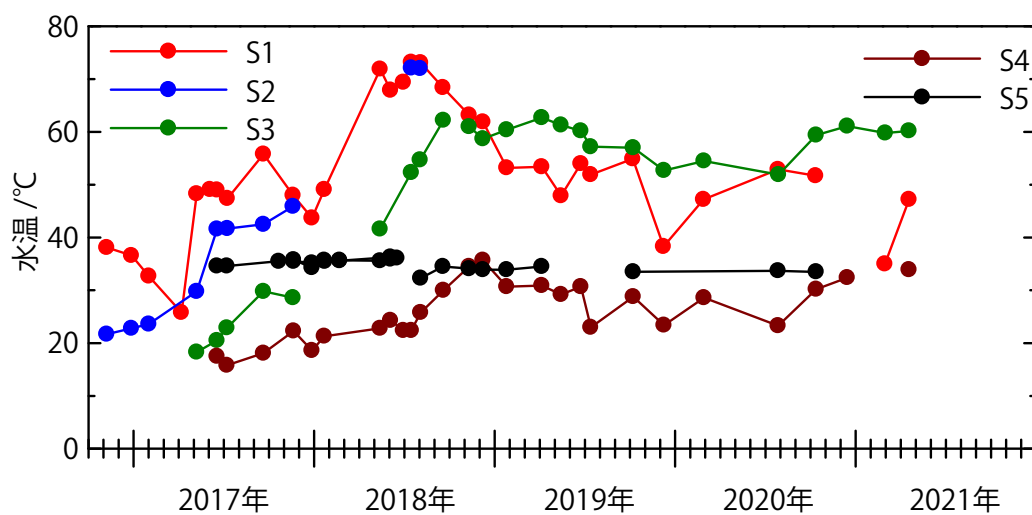


図7 湧水 S1～S5 の水温変化

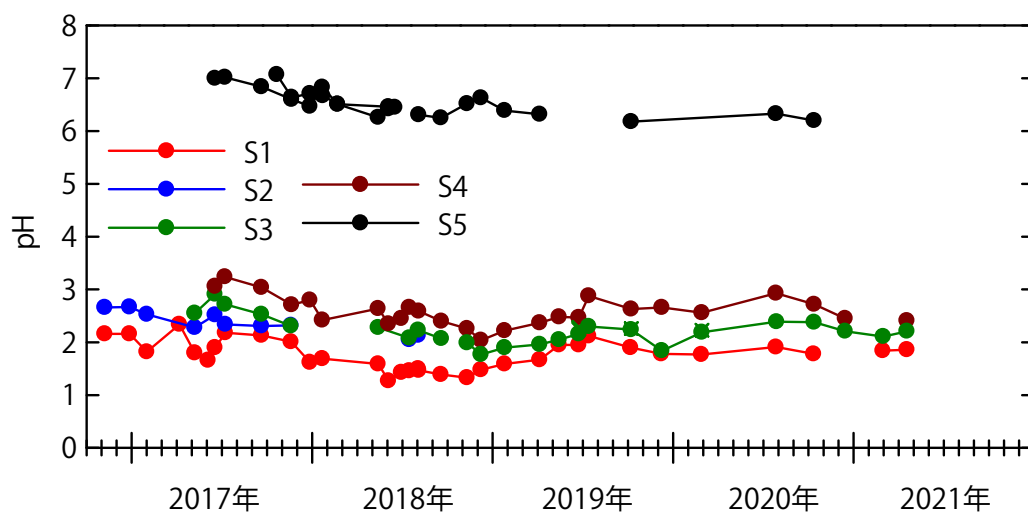


図8 湧水 S1～S5 の pH 変化



図9 硫黄山西火孔の间歇噴湯の様子

以上

霧島山（硫黄山）

鹿児島大学理工学研究科
東京大学地震研究所・他①

霧島火山

鹿児島大学理工学研究科と東京大学地震研究所は、2011年1月の噴火前より霧島山（新燃岳）周辺にGNSS観測点を4点設置し、東北大学、北海道大学、九州大学と共同で観測点を増設し、京都大学防災研究所、防災科学技術研究所、国土地理院、気象庁のデータと併せて地殻変動データの解析を行っている。観測点配置を図1に示す。

長期的な変動（図2、図3）としては、2011年1月末の噴火後にも継続していたマグマ蓄積は2011年11月頃一旦停止したが、2013年10月頃より再開し、2014年9月頃に一旦停止した。2017年2月ごろから一部の基線長の伸びが見られはじめ、2017年10月の噴火に至った。その後すぐに基線長の伸長が再開し、2018年3月上旬の噴火の際に収縮した。その後伸長が再開したが、2011年噴火時の収縮源をはさむ基線のうち、2019年1月上旬から2019年6月くらいまでに基線長の収縮が始まり、継続している。

図4、図5に2017年1月から2021年5月までの拡大図を示す。2018年9月上旬から停滞しているように見える。そのなかでもKKCD-KRS、KKCD-KRSP（どちらも図4）の新燃岳の直上を通る基線では速度は遅いものの伸長しているように見えていたが、2019年4月ころより停滞ののち収縮に転じている。また、KKCD-950486、KKCD-MNZS（どちらも図4）、950486-960714、950486-KVO（どちらも図5）は2019年7月ごろから緩やかに縮んでいたが、2021年に入り停滞しているように見える。

なお、この基線長変化は日々更新され、以下のHPの「GPS即時解析」で公開している。

<http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/MS/>

解析には、国土地理院、防災科学技術研究所、気象庁の観測データも利用した。また、次世代火山研究人材育成総合プロジェクトの課題B-4「火山内部構造・状態把握技術の開発」の支援を受けている。ここに謝意を表す。

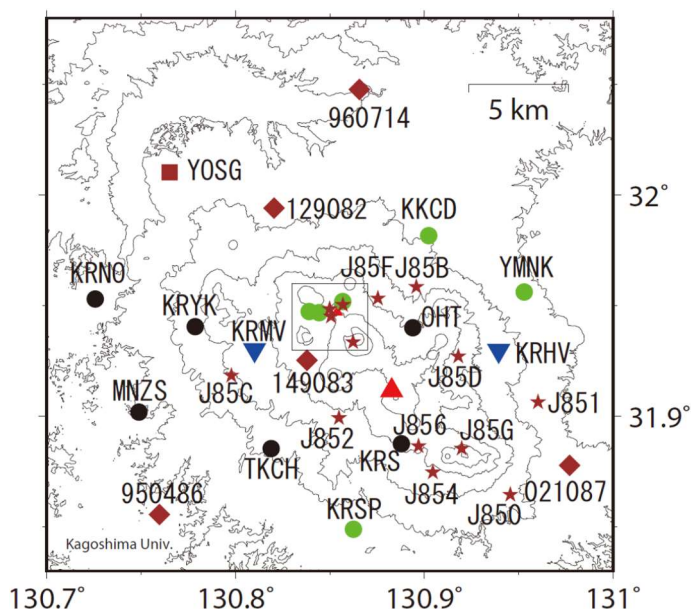


図1. 霧島山（新燃岳）周辺のGNSS観測網

霧島火山

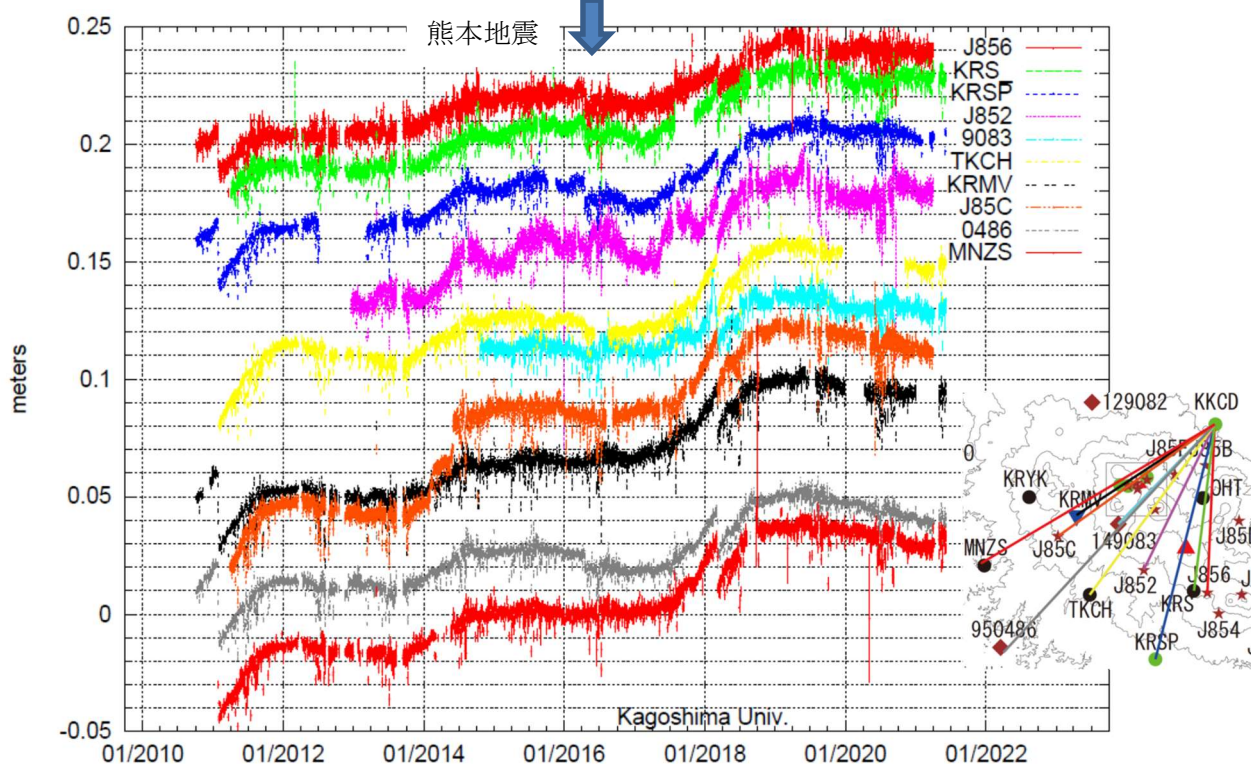


図 2. 霧島山（新燃岳）をはさむ基線の基線長の時間変化（2010 年 10 月～2021 年 5 月）. 基準点は KKCD 観測点

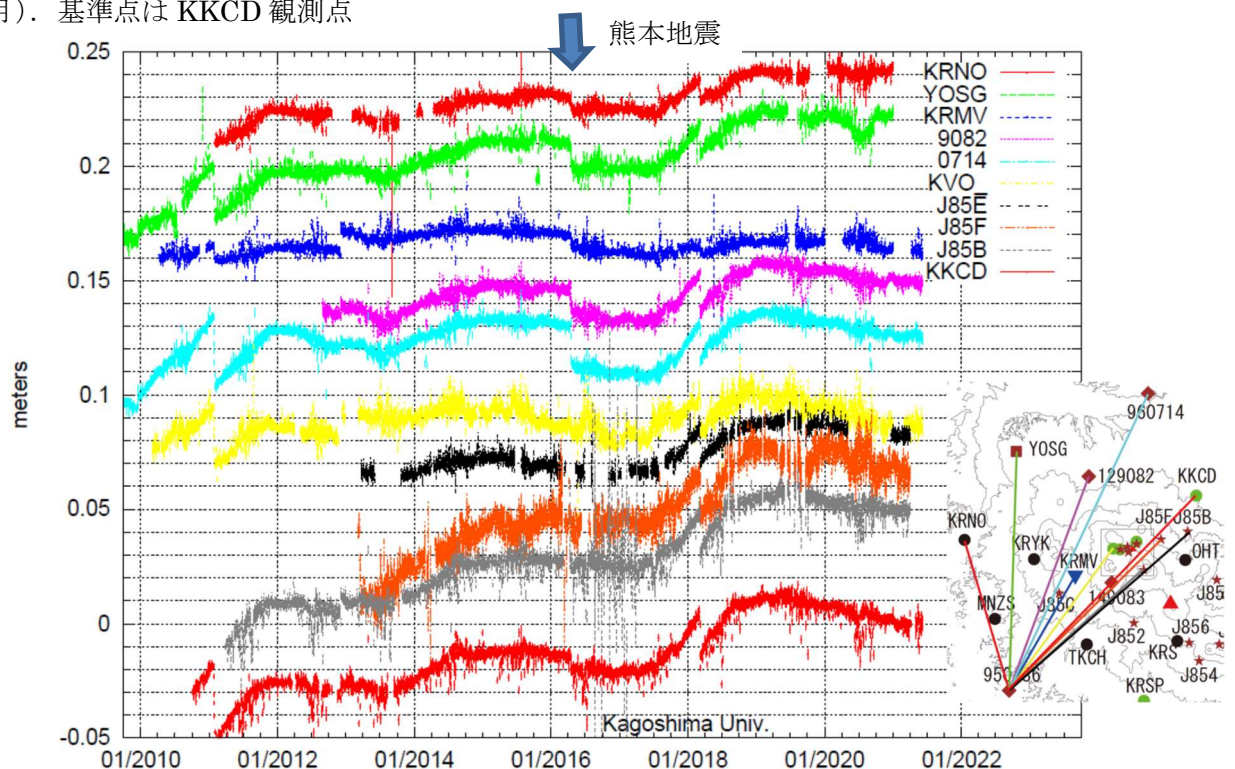


図 3. 霧島山（新燃岳）をはさむ基線の基線長の時間変化（2009 年 10 月～2021 年 5 月）. 基準点は 950486（GEONET）観測点

霧島火山

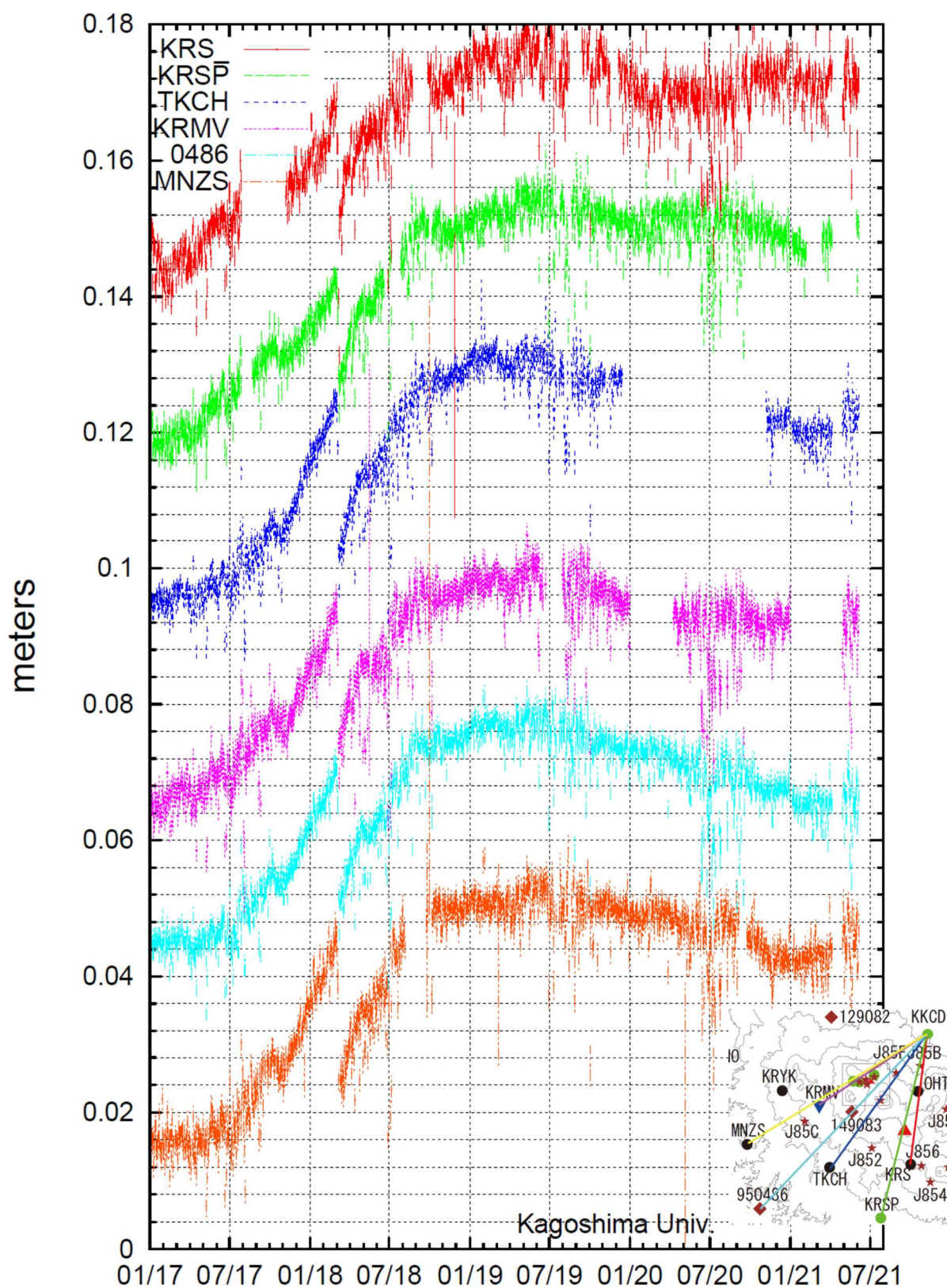


図4. 2011年新燃岳噴火時のマグマソースをはさむ基線の基線長変化(2017年1月～2021年5月). 基準点はKKCD観測点.

霧島火山

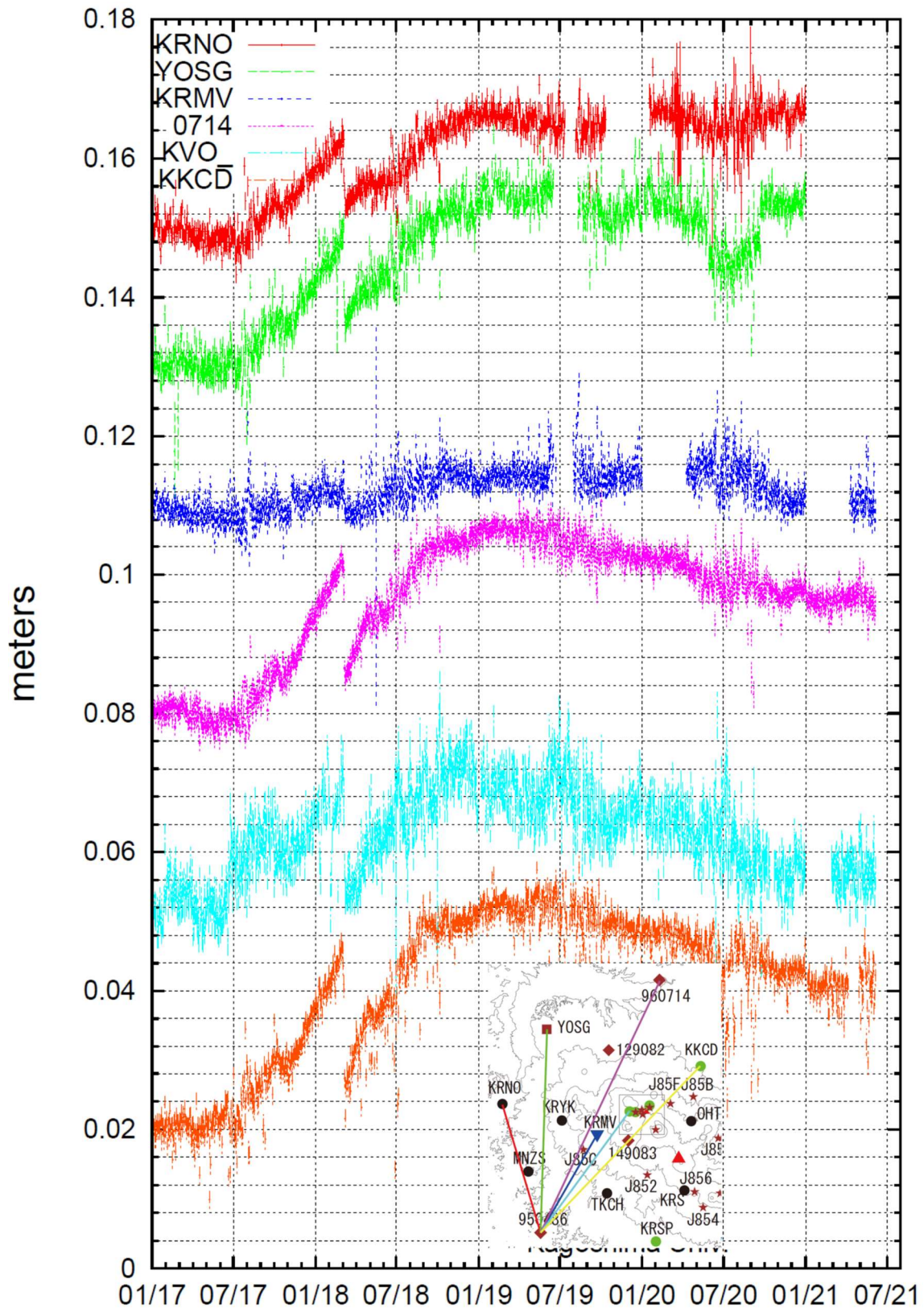


図5．2011年新燃岳噴火時のマグマソースをはさむ基線の基線長変化（2017年1月～2021年5月）．基準点は950486（GEONET）観測点．

霧島えびの高原硫黄山噴気の化学組成(2015年12月～2021年6月) Chemical composition of the fumarolic gases at Ebinokogen Iwoyama volcano, Kirishima, Japan (From Dec. 2015 to Jun. 2021)

1. 概要

えびの高原硫黄山では2018年4月の水蒸気噴火以降、火山活動は穏やかになり、全体的には噴気に含まれるマグマ起源成分である SO_2 の濃度は最盛期より低下した。しかし一部の噴気の SO_2/CO_2 比や $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比は、2020年11月から2021年6月にかけて上昇しており、火山活動が活発化する可能性は否定できない。

2. 噴気の採取・分析

2015年12月から2021年6月にかけて、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。ただし、h 噴気は、2020年7月、11月、2021年6月の3回の採取に限られる。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。V2 噴気孔は、2021年6月の調査時には、噴気の放出は認められず、間欠的に温泉水の湧出が観察された。

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、ヨウ素を含む溶液を噴気で洗気し、 SO_2 と H_2S の分別定量のための採取を行った。

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。これらの比は、噴気 c では、2020年7月から2021年6月にかけて低い値が維持された。噴気 h では、2020年7月から11月にかけて低下したが、2020年11月から2021年6月にかけて上昇した。噴気に含まれる H_2O の酸素同位体比の変化を図4に示す。噴気 c の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) は、2020年7月から2021年6月にかけて、 -13‰ 以下の低い値を示した。噴気 h では2020年7月は -14.2‰ と低く、その後上昇し、2021年6月は -5.8‰ と、高い値を示している。えびの高原硫黄山の噴気では、酸素同位体比が -13‰ を下回る火山ガスは、地上に放出される以前に水蒸気が部分的に凝縮を受け、失われていると考えられる (Ohba et al., 2021)。噴気 h の同位体比が2021年6月に上昇したことは、放出の勢いが増したことを示唆している。

噴気の $\text{SO}_2\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{S}$ 三成分組成を図5に示す。噴気 h の組成は、2020年7月と11月では、 SO_2 をある程度含み、比較的 CO_2 に富む組成を示したが、2021年6月には、 CO_2 に対し、 SO_2 と H_2S が増加した。2021年6月の組成は、2017年5月と2018年3月の噴気 a の組成に接近している。2015年5月は放出圧力の強い噴気 h が出現した時期で、2018年3月は水蒸気噴火の約一カ月前に当たる。

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B3）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

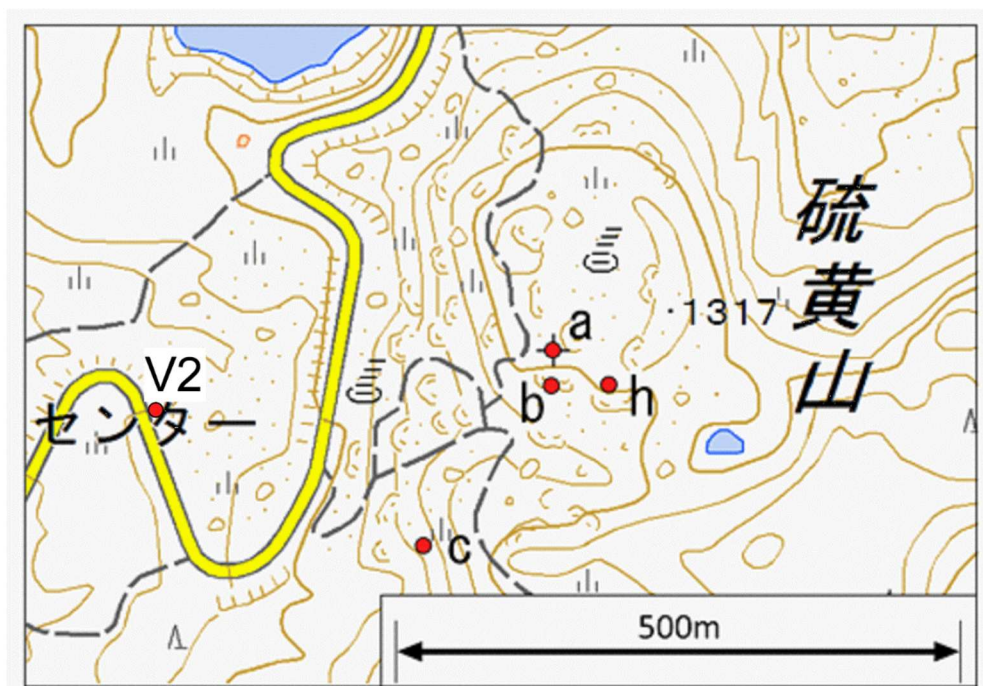


図1. 硫黄山噴気 a, b, c, h, V2 の位置（背景の地図として、国土地理院 1/25000 地形図を使用した）

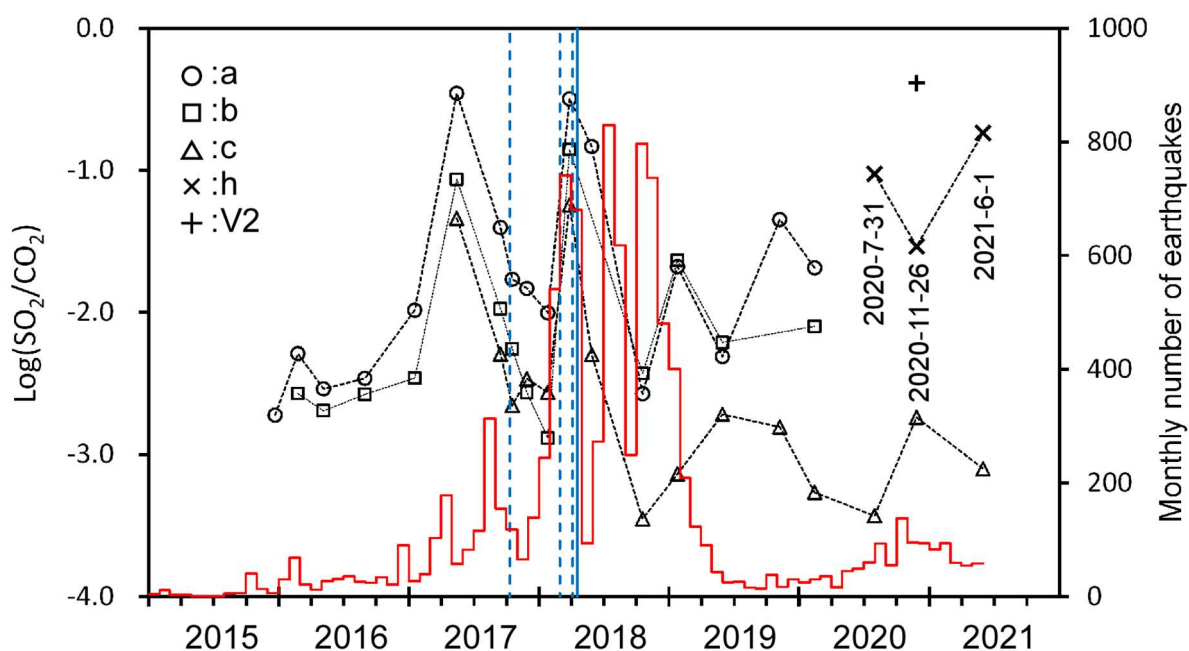


図2. SO_2/CO_2 比の時間変化（赤線は気象庁による月別地震回数，青の実線は硫黄山における噴火，青破線は新燃岳における噴火を示す）

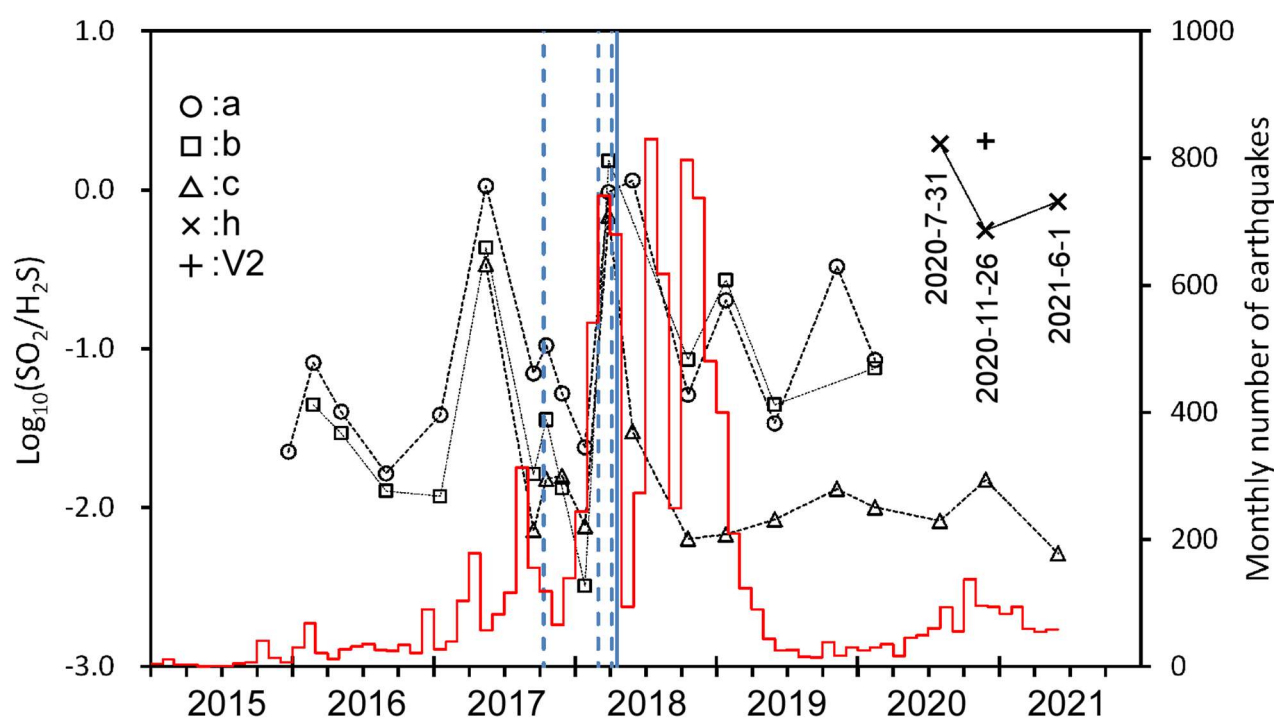


図3. $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の時間変化（赤線は気象庁による月別地震回数，青の実線は硫黄山における噴火，青破線は新燃岳における噴火を示す）

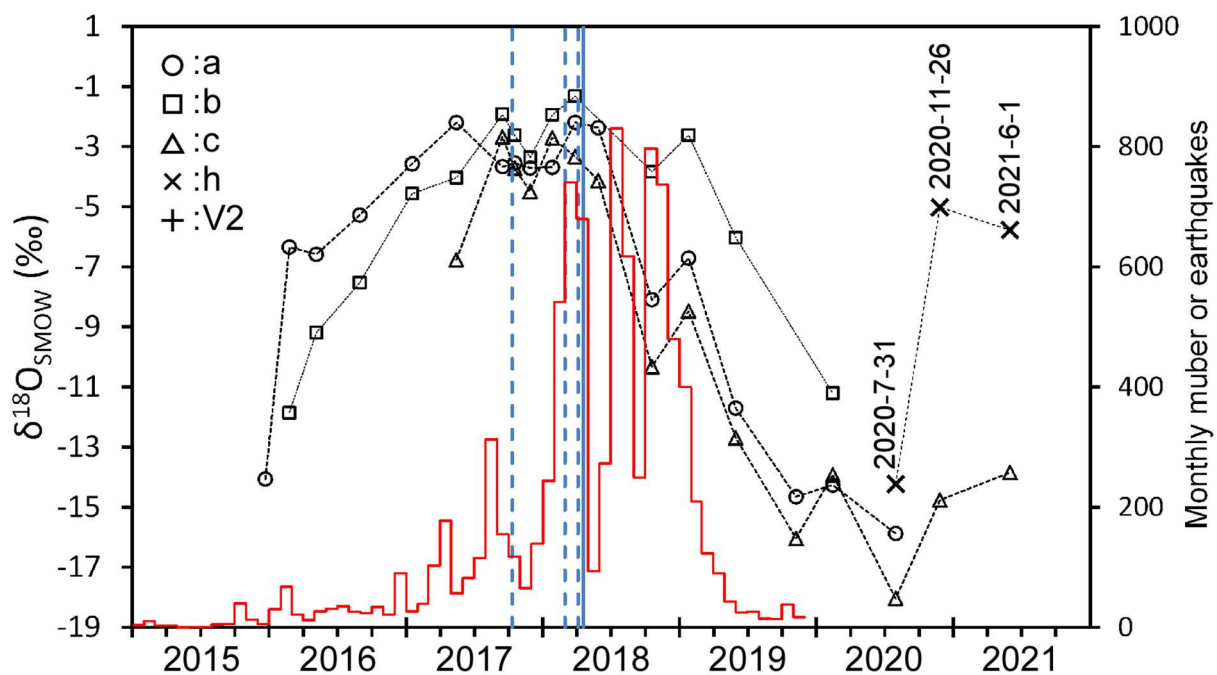


図4. H_2O 酸素同位体比の時間変化（赤線は気象庁による月別地震回数，青の実線は硫黄山における噴火，青破線は新燃岳における噴火を示す）

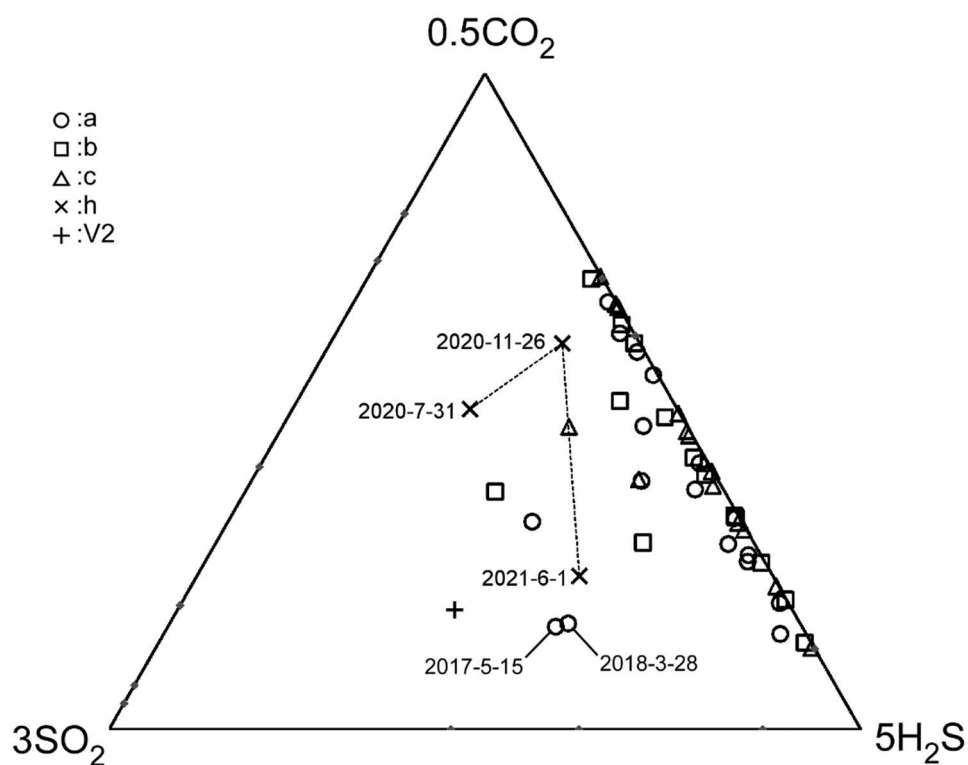


図5. 噴気の SO_2 - CO_2 - H_2S 三成分図

えびの高原（硫黄山）周辺の 2018 年噴火・2017 年土砂噴出前に生じた地熱活動変化

えびの高原（硫黄山）周辺では、2018 年 4 月 19 日の水蒸気噴火前の同年 2 月頃から地表での地熱活動が活発化していた。同様な前兆的な地表活動の活発化は、2017 年 5 月に確認された土砂噴出の前にも見られた。

地熱域の拡がり、噴気温、湧水温の観測及び湧水化学組成の定期的な測定は、噴火現象に関連する前兆現象を把握するうえで有力な観測項目である。また、噴気 S、Y1 及び火口位置など火口形成に関連した地形変化を正確に把握することも重要な観測項目となる。

1. 2018 年 4 月 19 日噴火前の地熱活動の変化

- えびの高原（硫黄山）南火口周辺では、2015 年 12 月から再活発化し徐々に拡大した硫黄山噴気帯から南へ約 30 m 離れた地点に、噴火の約 2 月前に新たな噴気 S（2018 年 2 月 3 日確認）が出現した（図 1, 参考図 1, 2a）。4 月 19 日噴火は噴気 S 付近から始まり、噴火開始地点はその後、硫黄山南火口（Y2a）となった（田島・他, 2019; Tajima et al., 2020）。
- 2018 年 4 月 19 日噴火の 12 日前から（気象庁, 2018）、噴火地点の東約 50 m の場所に湯だまり Y1（径 9×5 m）が形成され、熱泥水の湧出が始まった（図 1, 参考図 1）。4 月 16 日の観測では、Y1 の水温は 93 °C であり、天水起源の地下水とマグマ水が混合した熱泥水であった（参考図 2b）（Tajima et al., 2020）。
- 4 月 19 日の火口列（Y2a, Y3）は、湯だまり Y1 と噴気 S の延長線上に位置し、噴火後陥没によって拡大した（図 1, 参考図 1; 硫黄山南火口）（Tajima et al., 2020）。
- 定期観測をしていた 50 °C 以上の硫黄山噴気帯の地熱域は、2018 年 2 月から 4 月 19 日の間では顕著ではないが、わずかに拡大していた（参考図 5f）。また、噴気孔 A の噴気温度は、2017 年 12 月 17 日（95.5°C）、2018 年 2 月 3 日（97.2°C）、4 月 16 日（98.0°C）とわずかに上昇傾向であった（参考図 5b）。噴火直前 4 月 16 日の噴気孔 H は、勢いが強く近づけなかった（図 1）。
- 川湯 3（K3）の水温は、2017 年 11～12 月（12 月 17 日：43.5°C）の間に下降していたが、2018 年 2 月の観測から上昇（2 月 3 日：47.2°C）に転じ、2018 年 4 月には上昇を続けた（4 月 10 日：58.8°C、4 月 16 日：61.4°C）（参考図 5d）。

2. 2017 年 4 月イベント前の地熱活動の変化

- えびの高原（硫黄山）周辺では、2017 年 5 月 5～8 日に噴気孔 A 周辺に噴出した土砂を確認し、その広がりには 200 m を超えていた（参考図 3b）。これは 4 月末頃に噴気孔 A で発生した暴噴に起因する物と推測される。暴噴前の 3 月 19 日頃に熱泥水孔 A、3 月 19～21 日の間に熱泥水孔 F が出現している（参考図 3, 4a, 4c）。熱泥水孔 A から約 10 m 北西地点にはジェット噴気孔 A（推定 2017 年 4 月 26 日）、熱泥水孔 F から約 30 m 東地点にはジェット噴気孔 H（推定 2017 年 4 月 15～18 日）が形成された（参考図 3, 4b, 4d）。
- 暴噴前の 2017 年 1 月頃より、50 °C 以上の地熱域が急速に拡大していた（参考図 5f）。また、川湯 3（K3）の水温は 2017 年 3 月頃から上昇し始めていた。（参考図 5d）。

*田島靖久・中田節也・前野 深・長井雅史・松島 健

以上のことより、顕著な火山活動現象の前には、地表域に地熱域の拡がり、噴気温、湧水温度の観測及び湧水化学組成の変化が確認されることが多く、これらの観測項目の定期的な測定は、噴火現象に関連する前兆現象を把握するうえで有力な観測項目となり得る。また、火口形成位置は、その後続いた泥水流出方向等の災害把握に重要であり、迅速に把握する必要がある。

硫黄山西火口については、周辺で噴火以前に顕著な前兆現象は確認されず、その形成メカニズムの解明は今後の課題として残される。

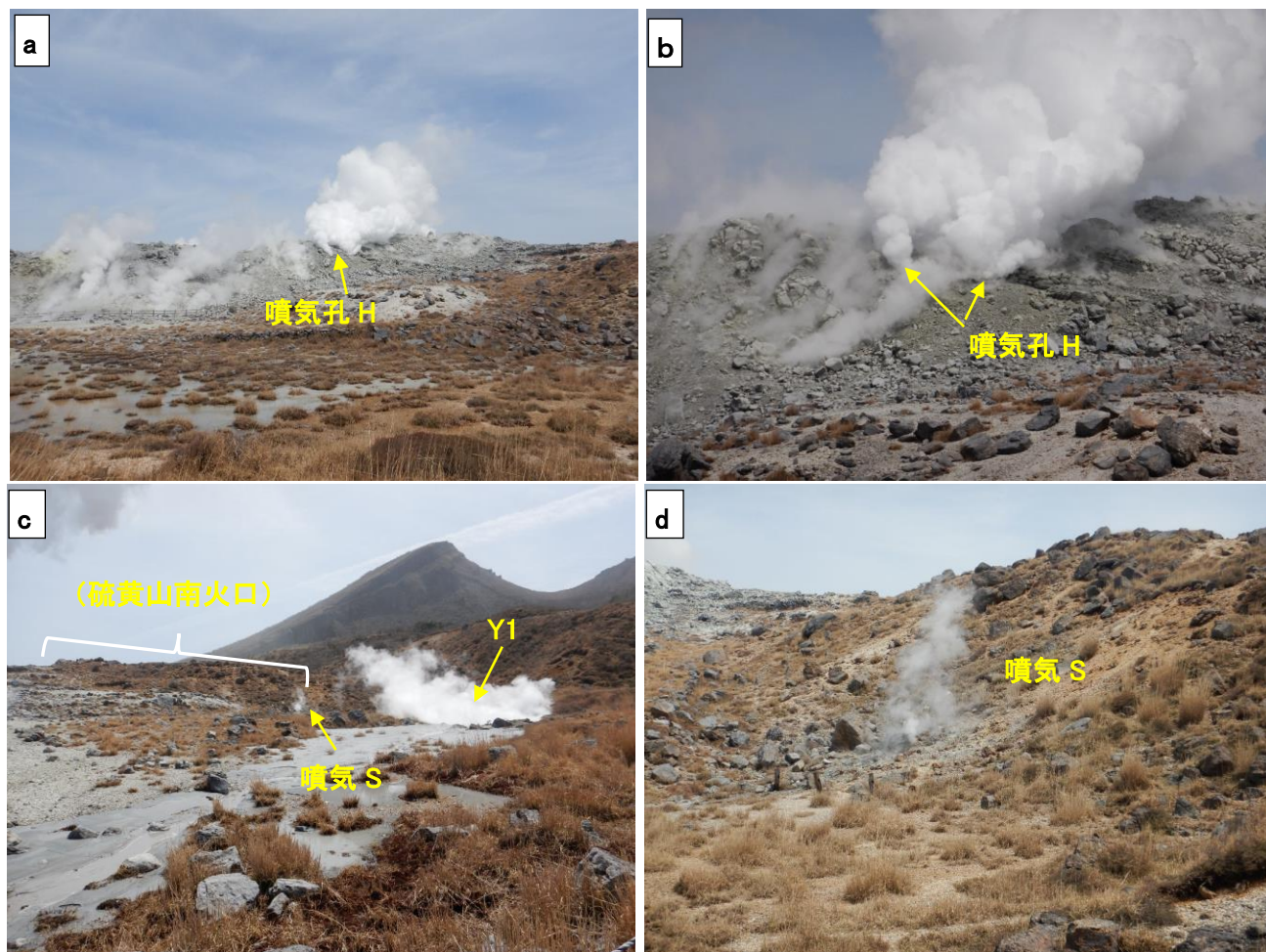
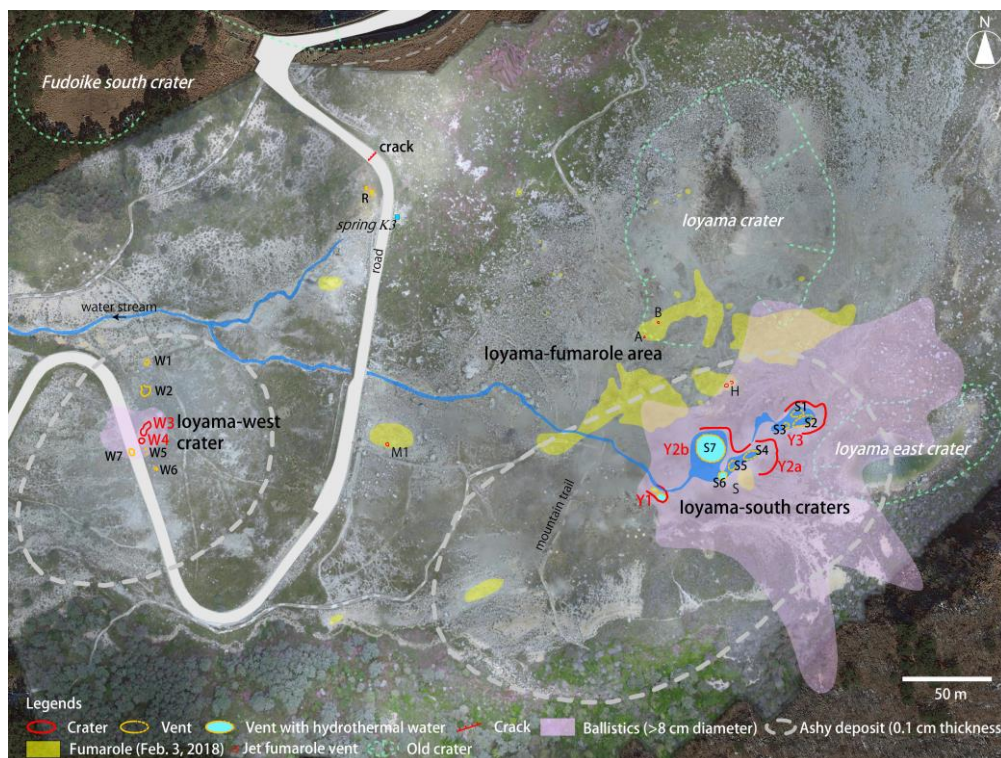


図1 2018年4月噴火直前の噴気活動（2018年4月16日）

a：硫黄山西斜面の噴気活動。b：ジェット噴気孔 H 及び周辺の噴気活動。ジェット噴気孔は 2 か所から噴出していた。c：噴気 S 及び Y1 及び 4 月 19 日噴火位置。d：噴気 S 及びその周辺。

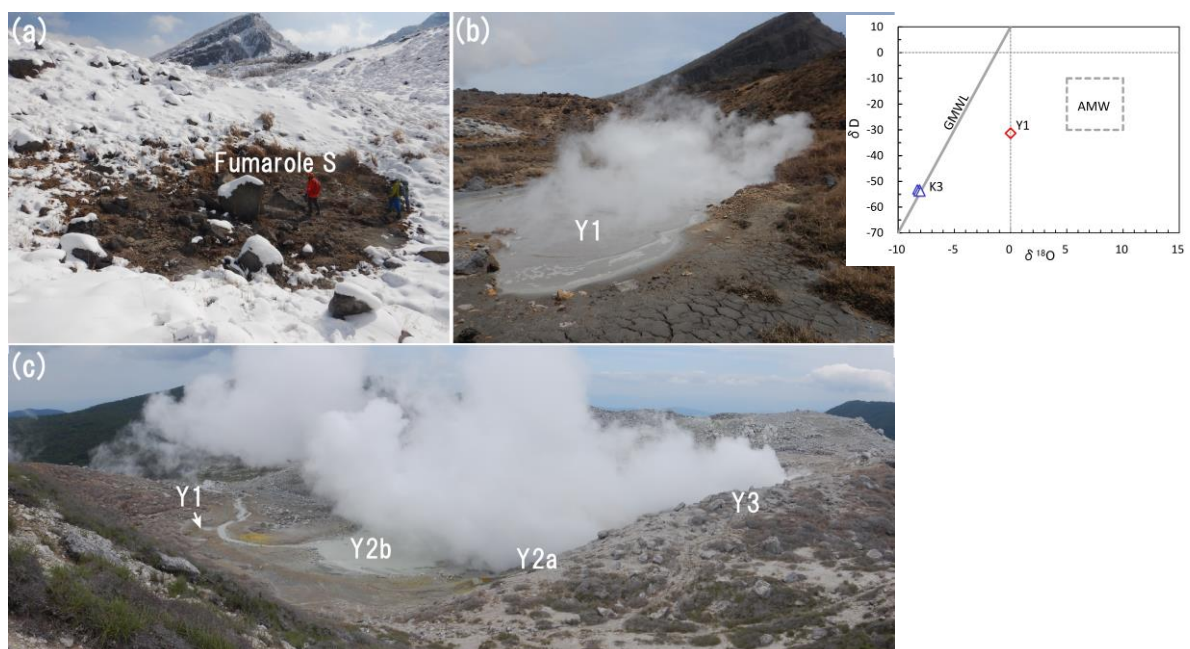
【文献】

- 田島靖久・中田節也・長井雅史・前野深・渡邊篤志（2019）霧島火山群，えびの高原硫黄山の 2018 年 4 月の小噴火．火山, 64, 147-151.
- 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.
- 気象庁（2018）霧島山の火山活動－2018 年 2 月～2018 年 5 月 31 日－．火山噴火予知連絡会会報, 130, 213-254.



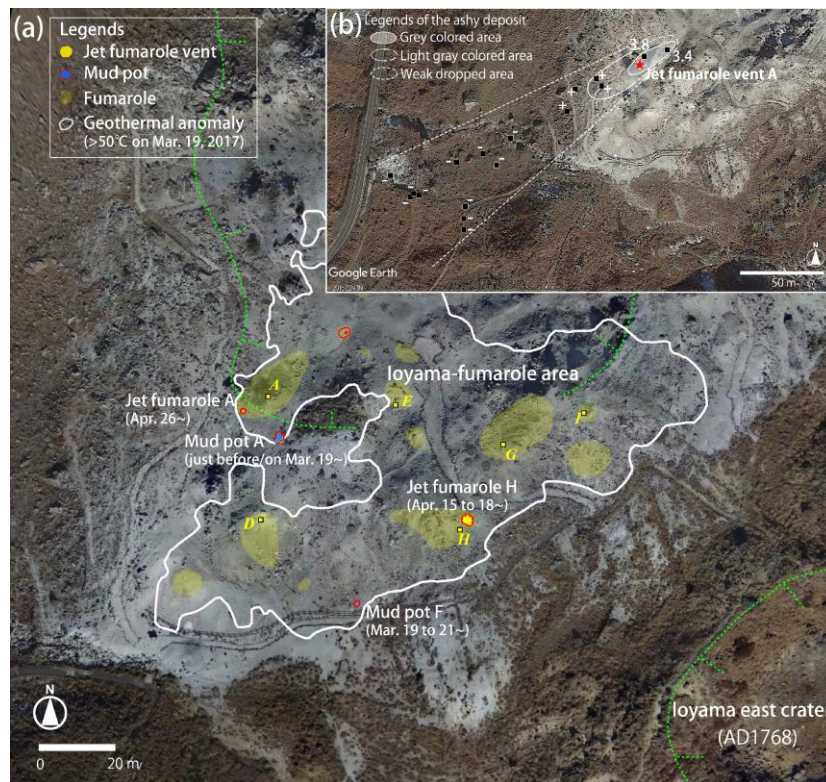
参考図1 2018年4月19日噴火に関する地熱活動 (Tajima et al., 2020)

黄色：2018年2月3日の50℃以上の地熱域。赤細線：2018年4月噴火より前のジェット噴気孔，赤太線：2018年4月噴火に関連した火口，オレンジ破線：2018年4月噴火（南火口）の噴出孔，オレンジ破線青塗：熱泥水孔；オレンジ線：2018年4月噴火に関連した噴気孔，灰色太破線：0.1cm以上の泥質灰堆積域，ピンク塗：直径8cm以上の礫確認域。



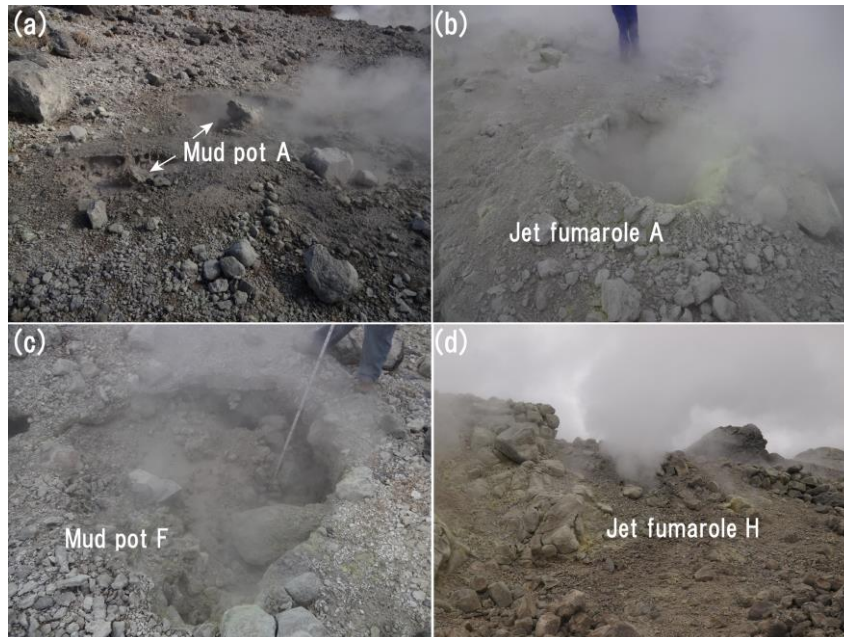
参考図2 2018年4月19日噴火に関する地熱活動 (Tajima et al., 2020)

a：2018年2月3日に確認した噴気S。b：2018年4月16日に確認したY1及びY1の酸素同位体，水素同位体組成。AMWは安山岩質マグマ水の同位体組成範囲（測定：産業技術総合研究所）。c：2018年4月噴火の火口位置。



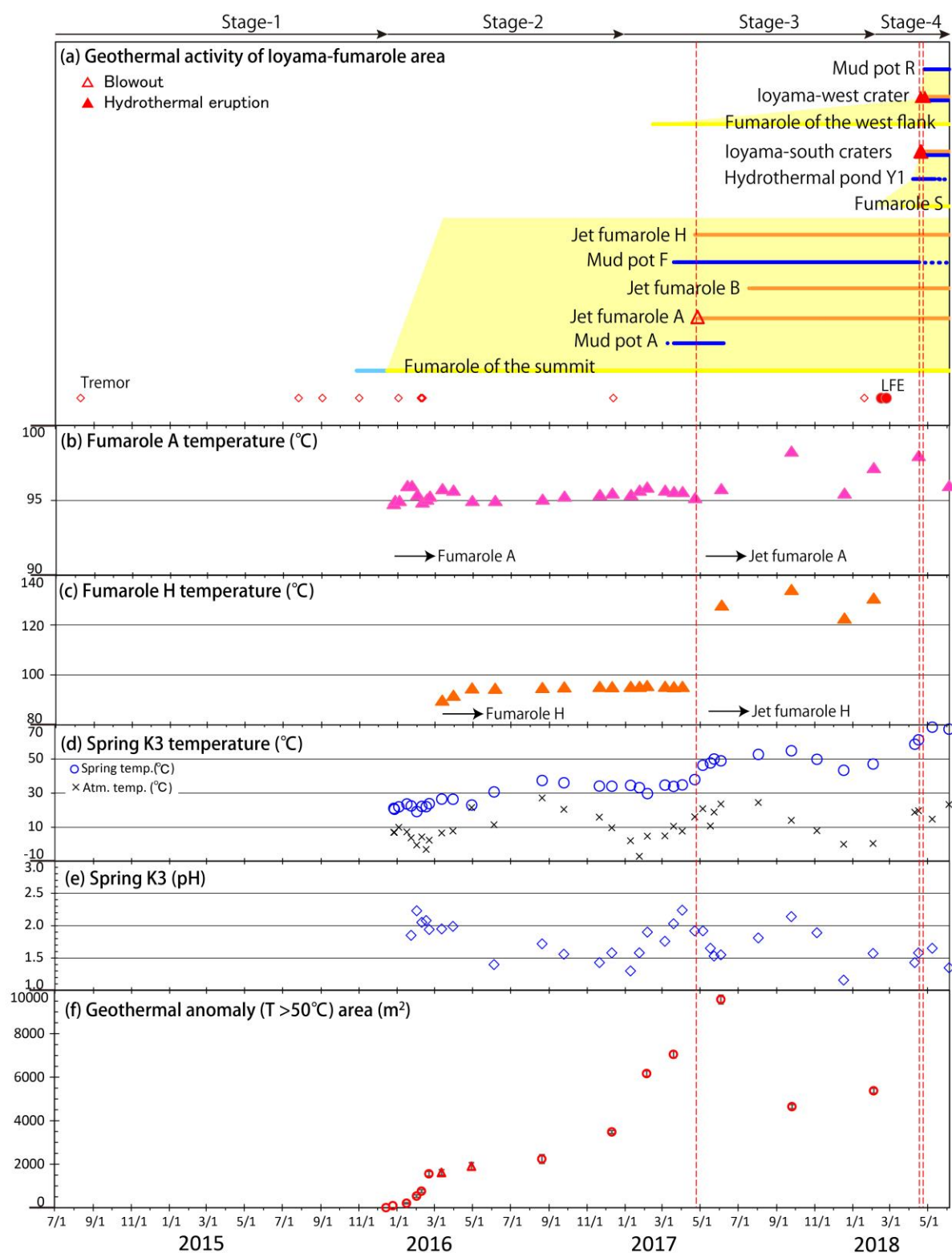
参考図3 2017年4月イベントに関する地熱活動 (Tajima et al., 2020)

a: 白線: 2017年3月19日の50°C以上の地熱域. 黄色: 2017年3月19日の噴気域. 青塗赤細線: 熱泥水孔, 黄塗赤細線: ジェット噴気孔, 赤細線: 陥没孔. b: 2017年4月26日泥質灰の分布域. 白破線: 泥質灰堆積域, 白線: 泥質灰による明灰変色域, 白塗: 泥質灰による暗灰変色域, +: 多い, -: わずか.



参考図4 2017年4月イベントに関する地熱活動 (Tajima et al., 2020)

a: 3月19日頃に出現した熱泥水孔A. b: ジェット噴気孔A, 推定形成日は2017年4月26日. c: 3月19~21日に出現した熱泥水孔F. d: ジェット噴気孔H, 推定形成日は2017年4月15~18日の間.



参考図 5 えびの高原(硫黄山)周辺の地熱活動の推移 (Tajima et al., 2020)

a: 黄塗と黄線は硫黄山周辺噴気帯の地熱・噴気活動。水色は臭気。オレンジ線はジェット噴気孔。青線は熱泥水孔及び湯だまり。微動及び LFE は気象庁資料より。b: A 域における噴気及びジェット噴気孔 A の温度。c: H 域における噴気及びジェット噴気孔 H の温度。d: 川湯 3 (K3) の湧水温。e: 川湯 3 (K3) の pH。f: 50°C 以上の地熱域の変化。○は全域を観測したもの、△はそれ以前の噴気域に増加分を加えたもの。