

第 148 回 火山噴火予知連絡会資料

(その1の1)

草津白根山

令和 3 年 6 月 30 日

火山噴火予知連絡会資料(その1の1)

目次

草津白根山

第6回草津白根山部会会議資料

気象庁	3-14
気象研	15
地磁気	16-18
東工大	19-24
京大阿蘇	25-28
防災科研	29-33
地理院	34-45
上智大	46-52
東海大	53-55

草津白根山 (2020年12月～2021年6月12日)

白根山 (湯釜付近)

湯釜付近の浅部の地震活動や膨張を示す傾斜変動に低下傾向がみられており、2018年以降高まった火山活動は、引き続き低下傾向にあると考えられる。ただし、地震活動は2018年4月の活発化以前よりも高い発生頻度を維持しており、湯釜付近の浅部の熱水活動は現在も継続していると考えられる。引き続き、火山活動の推移に注意する必要がある。

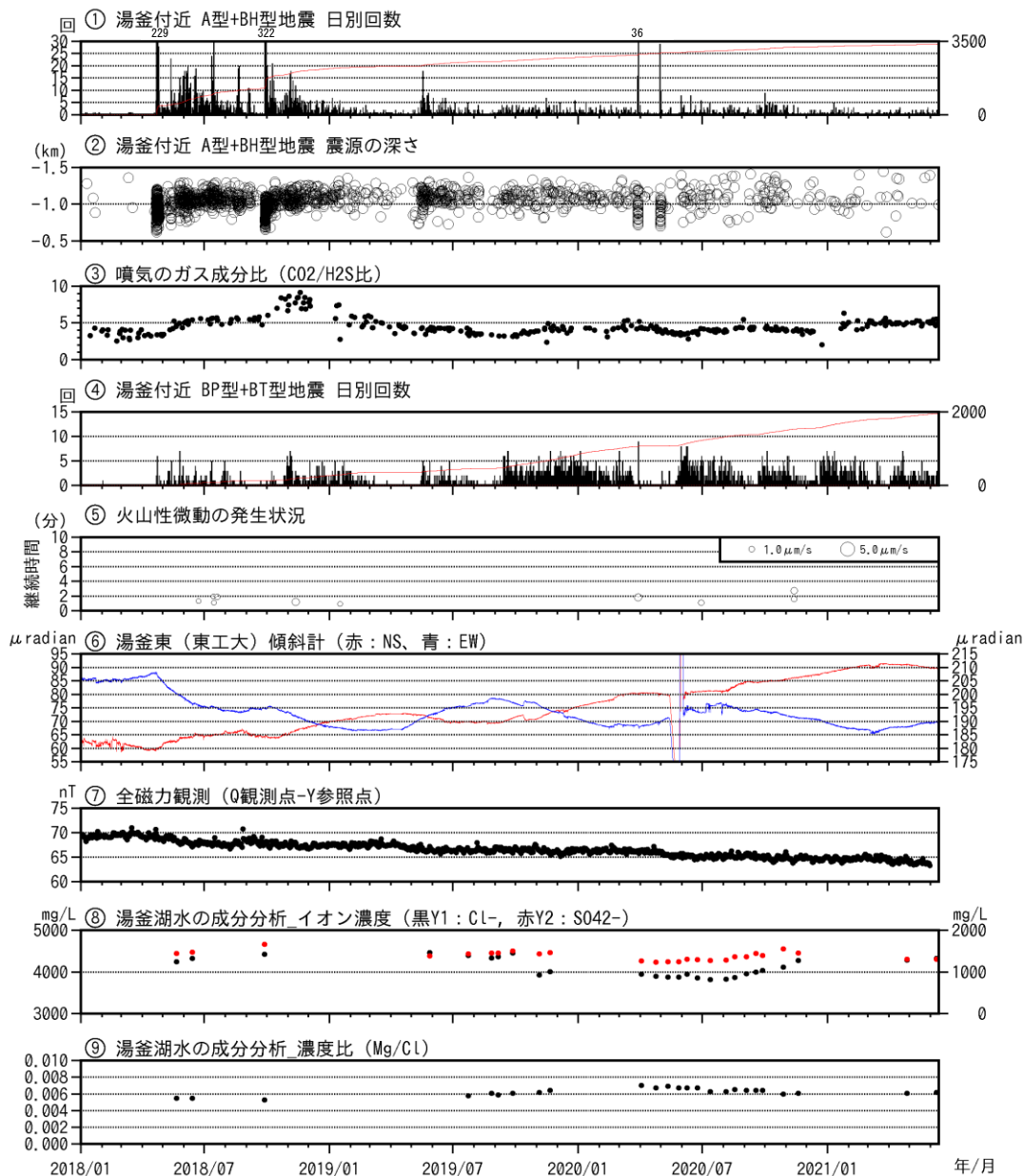


図1 草津白根山 (白根山 (湯釜付近)) 火山活動経過図 (2018年1月1日～2021年6月12日)

・湯釜付近の浅部の火山性地震は、概ね少ない状態で経過しているが、2018年4月の活発化前と比較すると、その頻度は高い。発生する地震は、BP型とBT型地震の割合が多いが、A型・BH型地震も継続して発生。・2018年4月、9月、2020年3月、4月に観測されたような海拔1km以深の地震の発生を伴う火山性地震の急増は、今期間みられなかった。・2020年12月以降、火山性微動は観測なし。・2020年12月下旬頃から1月にかけて、湯釜付近の浅部の膨張を示すわずかな傾斜変動が認められたが、その後は明瞭な変動なし。・マルチガス分析では、CO₂/H₂S比が1月頃にやや上昇したが、それ以降、目立った変動はない。・湯釜湖水の化学分析では、Cl、SO₄濃度、およびMg/Cl比は、昨年11月の値から大きな変化はない。

この資料は気象庁のほか、関東地方整備局、国土地理院、東京工業大学、東北大学、東京大学、京都大学及び国立研究開発法人防災科学技術研究所のデータを利用した。

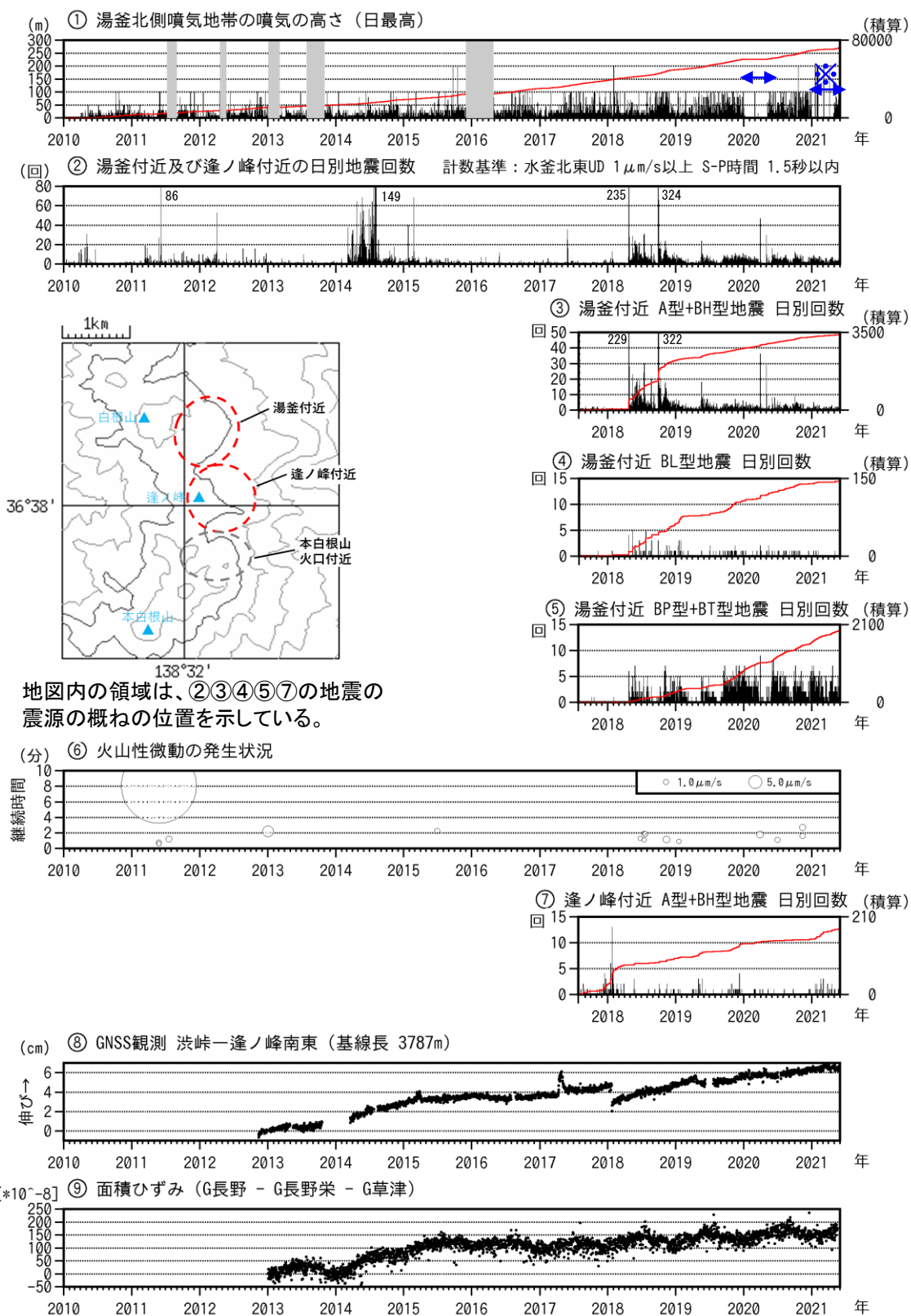


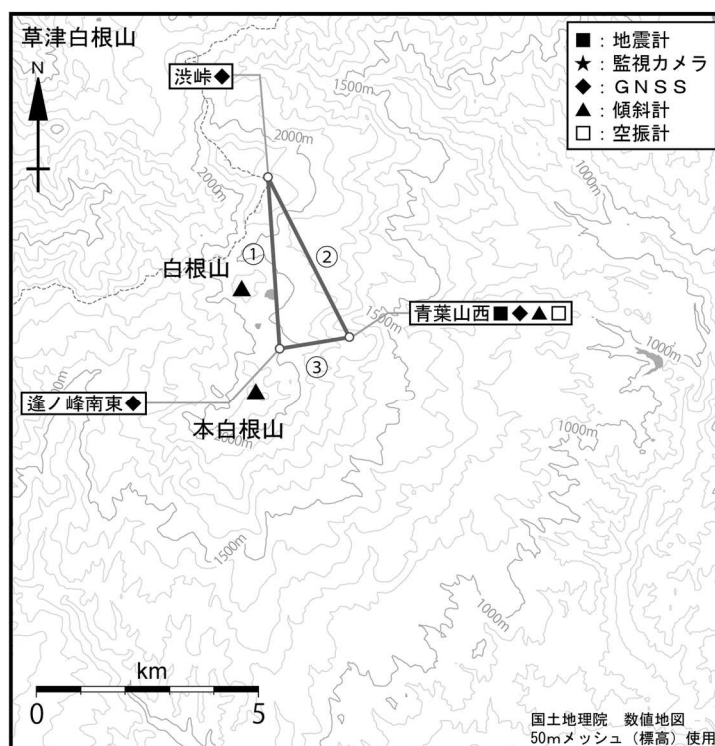
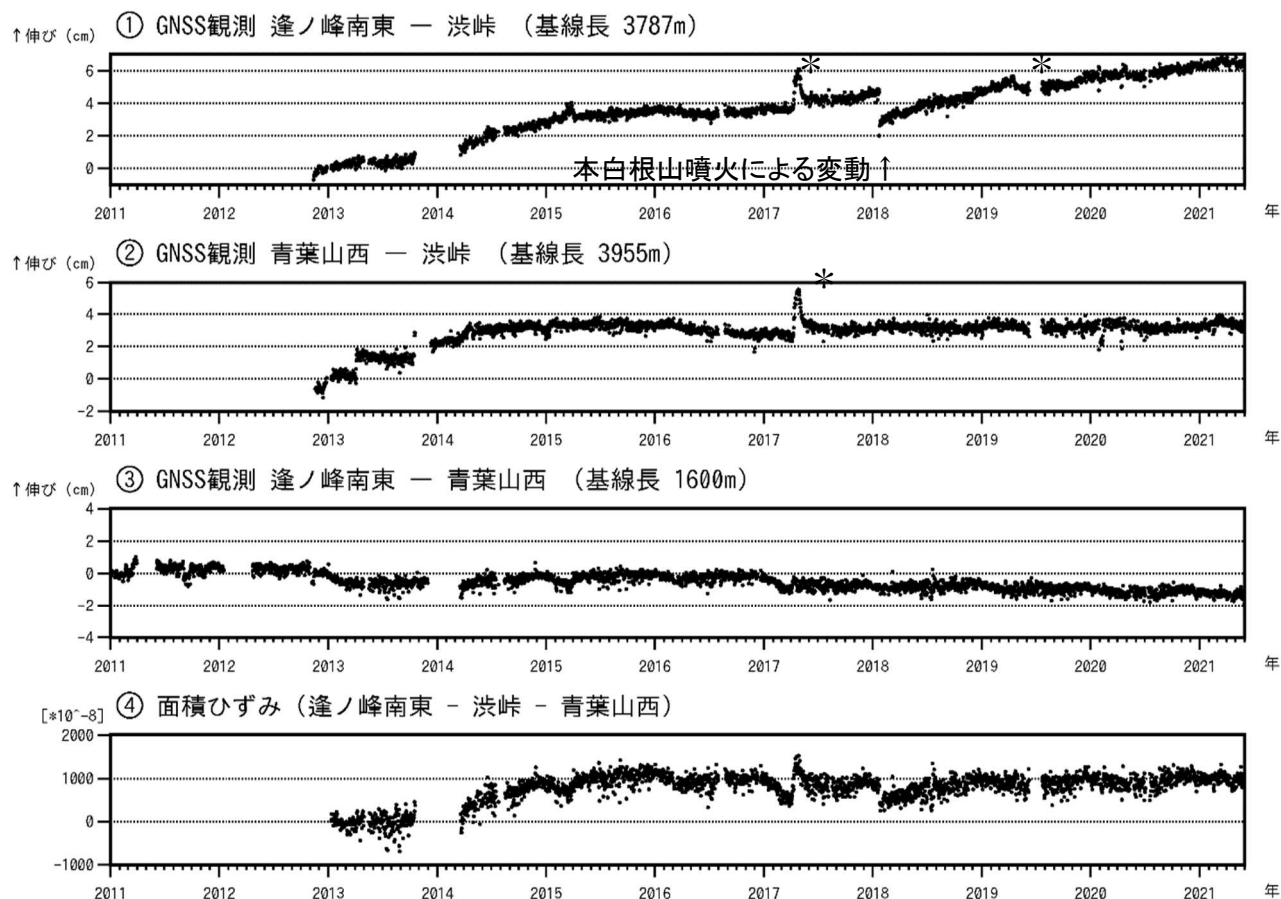
図2 草津白根山（白根山（湯釜付近））火山活動経過図（2010年1月1日～2021年5月31日）

① ※の青矢印期間（2020年1月から4月にかけて）、一部の観測機器で障害が発生しているため、100m未満の噴気については観測できていない期間がある。灰色部分は欠測を示す。赤線は積算であり、右軸で示す。

⑧ 空白部分は欠測を示す。

- ・湯釜付近の浅部の火山性地震は、概ね少ない状態で経過しているが、2018年4月の活発化前と比較すると、その頻度は高い。
- ・逢ノ峰付近を震源とする火山性地震は時々発生し1月下旬から3月上旬にかけて、発生頻度は高まったが、過去にも見られる数か月ごとの高まりから、大きく逸脱したものではない。
- ・2018年1月以降、⑧の基線では本白根山噴火後の余効変動が見られていた。2020年1月以降、基線長の伸びは停滞している。
- ・GNSS連続観測では、火山活動によるとみられる変動は認められない。

草津白根山



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。
(国) : 国土地理院、(防) : 防災科学技術研究所、(工) : 東京工業大学、(関地) : 関東地方整備局

図3 草津白根山 GNSS連続観測による基線長変化 (2011年1月1日～2021年5月31日)

2016年1月以降のデータについては、解析方法を改良している。

- ・GNSS連続観測によると、火山活動によるとみられる変動は認められない。
- ・①の基線で2018年1月以降にみられている変化は、本白根山の噴火後の収縮によるものと考えられる。
2020年1月以降、基線長の伸びは停滞している。
- ・*の変動は、火山活動に起因するものではないと考えられる。

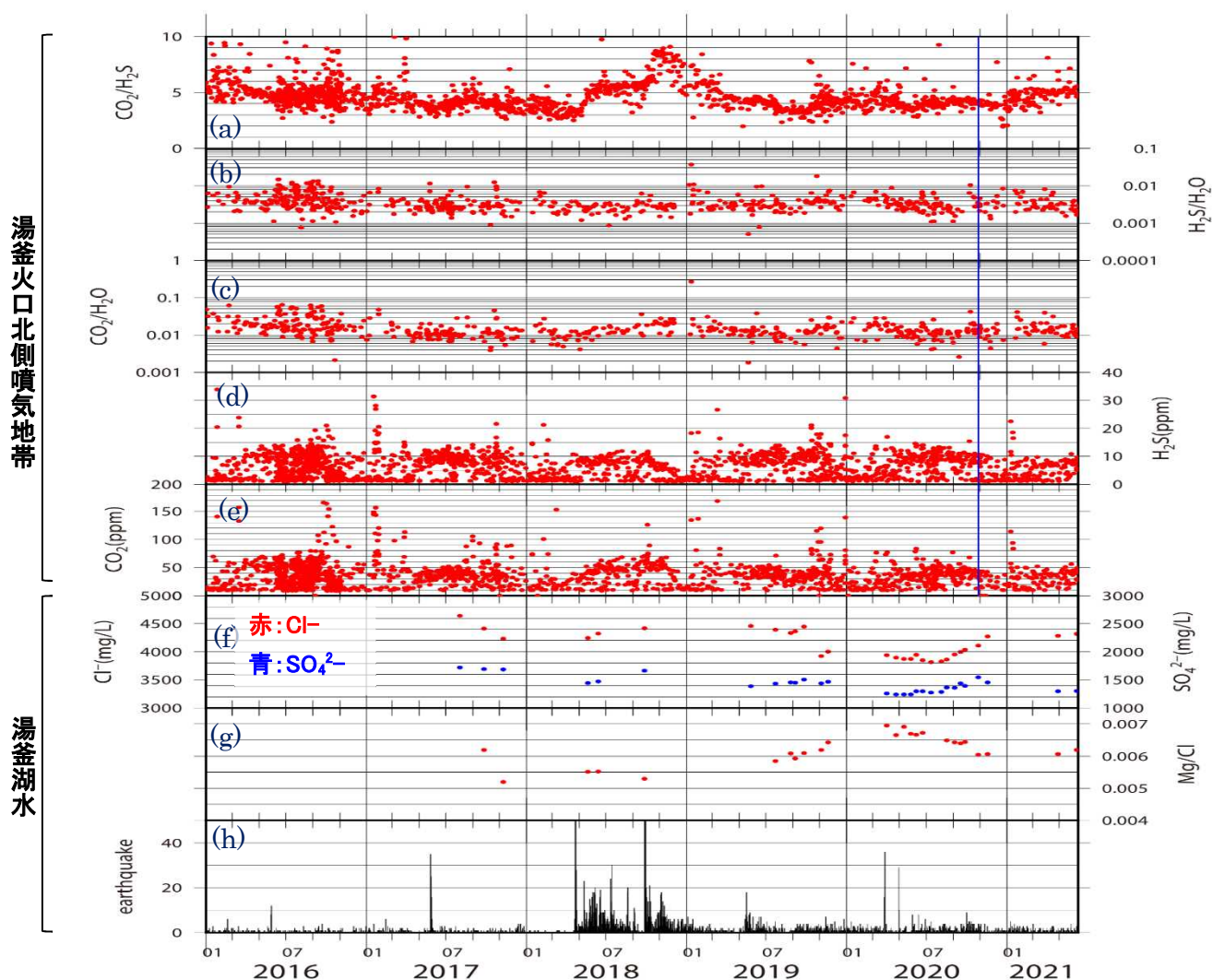


図4 草津白根山（白根山（湯釜付近）） 湯釜火口北側噴気地帯のマルチガス観測結果および湯釜湖水分析結果（2016年1月～2021年6月12日）

(a) $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比 (b) $\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2\text{O}$ 比 (c) $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 比 (d) H_2S 濃度 (e) CO_2 濃度 (f) 湯釜湖水の Cl^- 濃度および SO_4^{2-} 濃度 (g) 湯釜湖水の Mg/Cl 比 (h) 白根山（湯釜付近）日別地震回数（A型、BH型）

- ・ (a)～(e)の各濃度比は Multi-GAS による観測結果で、噴気孔 E の濃度比を反映しているものと考えられる。大気中の湿度変化等による変動が大きいため、 H_2O を含む組成比データは $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比より少ない。
- ・ 湯釜湖水の分析は、 $0.45\mu\text{m}$ シリンジフィルターで湖水をろ過後、 Cl^- は 500 倍、 Mg^{2+} は 50 倍に超純水で希釈したのちイオンクロマトグラフィーで分析を行った。
- ・ 青縦線センサー交換を示し、それ以降のデータは感度補正を行っていない。青縦線以前のデータは感度補正済。

【湯釜火口北側噴気地帯のマルチガス観測結果】

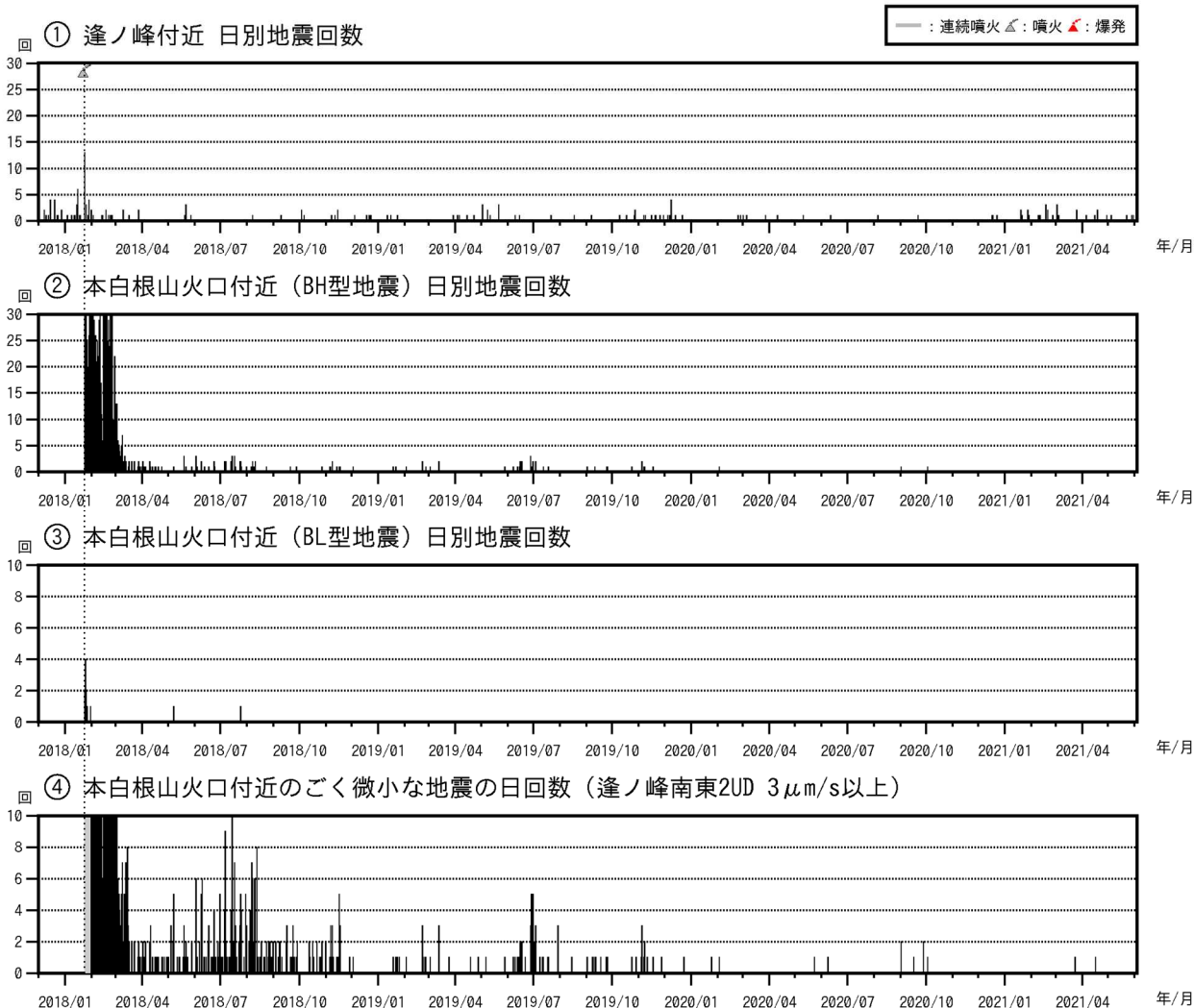
- ・ 2018 年 4 月および 9 月に、地震活動や地殻変動に連動した $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の増加が認められた。
- ・ 2018 年 12 月頃から減少傾向が継続していた $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比は、地震がやや増加した 2019 年 5 月に停滞傾向に変化し、その後ほぼ一定で推移した。
- ・ 2018 年 4 月および 9 月に比べ明瞭な変化ではないが、2019 年 10 月頃、2020 年 6 月頃にわずかながら $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の高まりが認められた。
- ・ 2021 年 1 月頃から、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比にバラつきながらもわずかな増加が認められ、その後、ほぼ一定で推移している。

【湯釜湖水分析結果】

- ・ Mg/Cl 比、 Cl^- 濃度および SO_4^{2-} 濃度は、2020 年 4 月以降概ね横ばいで推移し、高温の火山ガスに由来する成分濃度の減少を示す明瞭な変化は認められていない。
- ・ 火山活動の高まった 2018 年 9 月前後と比較すると SO_4^{2-} 濃度に低下傾向が認められる。
- ・ Mg/Cl 比は、過去に噴火・噴出現象があった際にみられたような急激な変化は認められない。

本白根山

鏡池北火口付近の地震は2018年12月以降少ない状態で、噴気も認められておらず、火山活動は静穏な状態で経過している。なお、逢ノ峰付近では時々地震が発生しており、引き続き今後の火山活動の推移に注意する必要がある。



↑ 逢ノ峰南東2
観測点設置

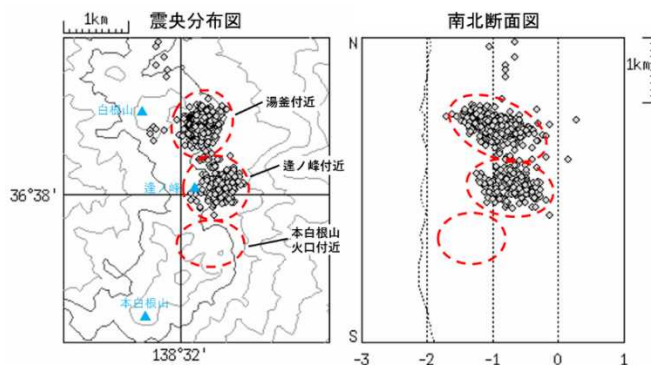


図5 草津白根山（本白根山） 火山性地震の活動経過（2017年12月1日～2021年6月3日）

④灰色期間は、地震が多発した期間を示す。

- ・ 逢ノ峰付近を震源とする火山性地震は時々発生し、1月下旬から3月上旬にかけて、発生頻度は高まったが、過去にも見られる数か月ごとの高まりから、大きく逸脱したものではない。
- ・ 本白根山火口付近を震源とする火山性地震は、少ない状態で経過した。

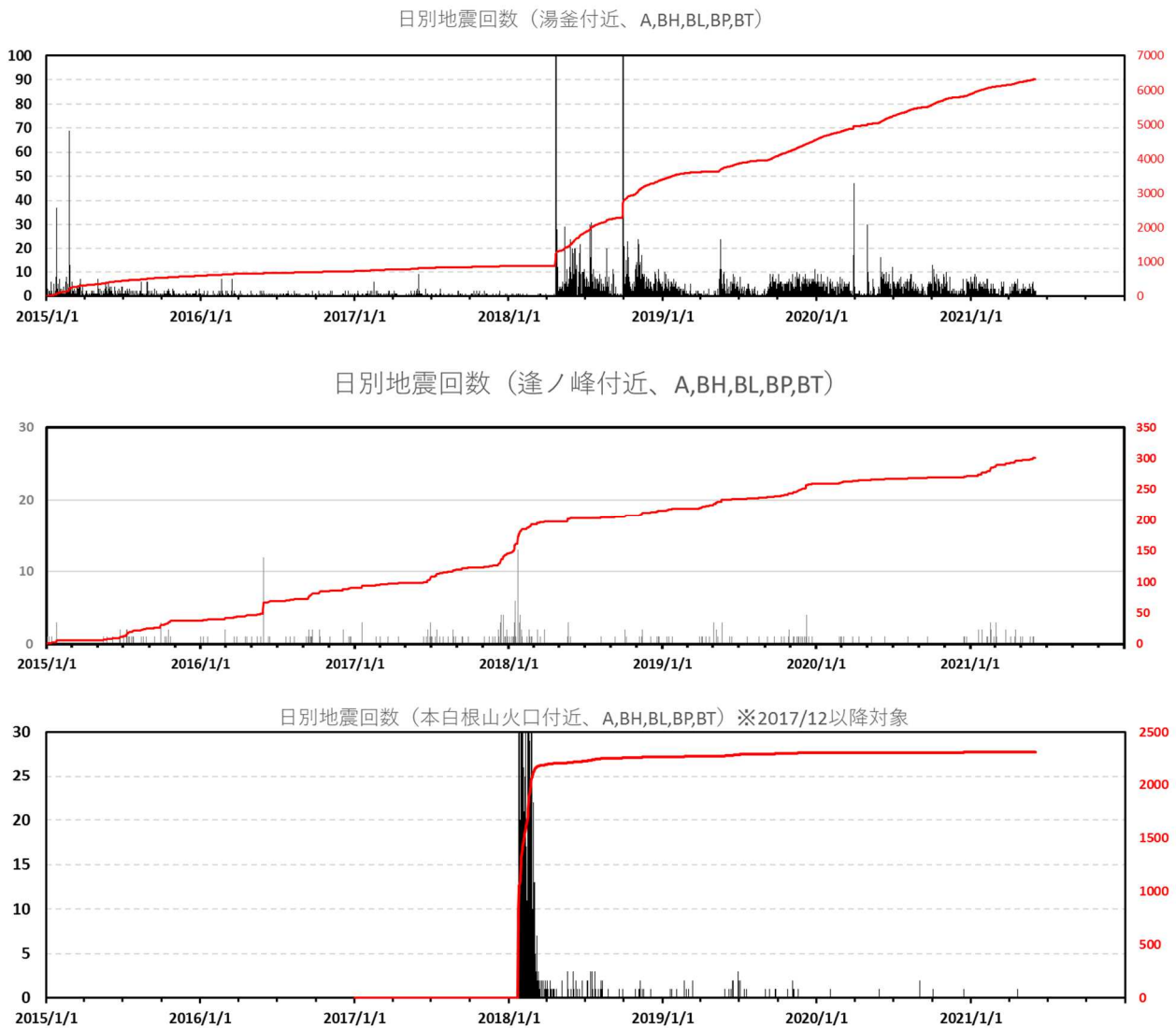


図6 領域別の日別地震回数の推移（2015年1月1日～2021年6月3日）

逢ノ峰付近を震源とする火山性地震は時々発生し、1月下旬から3月上旬にかけて、発生頻度は高まったが、過去にも見られる数か月ごとの高まりから、大きく逸脱したものではない。

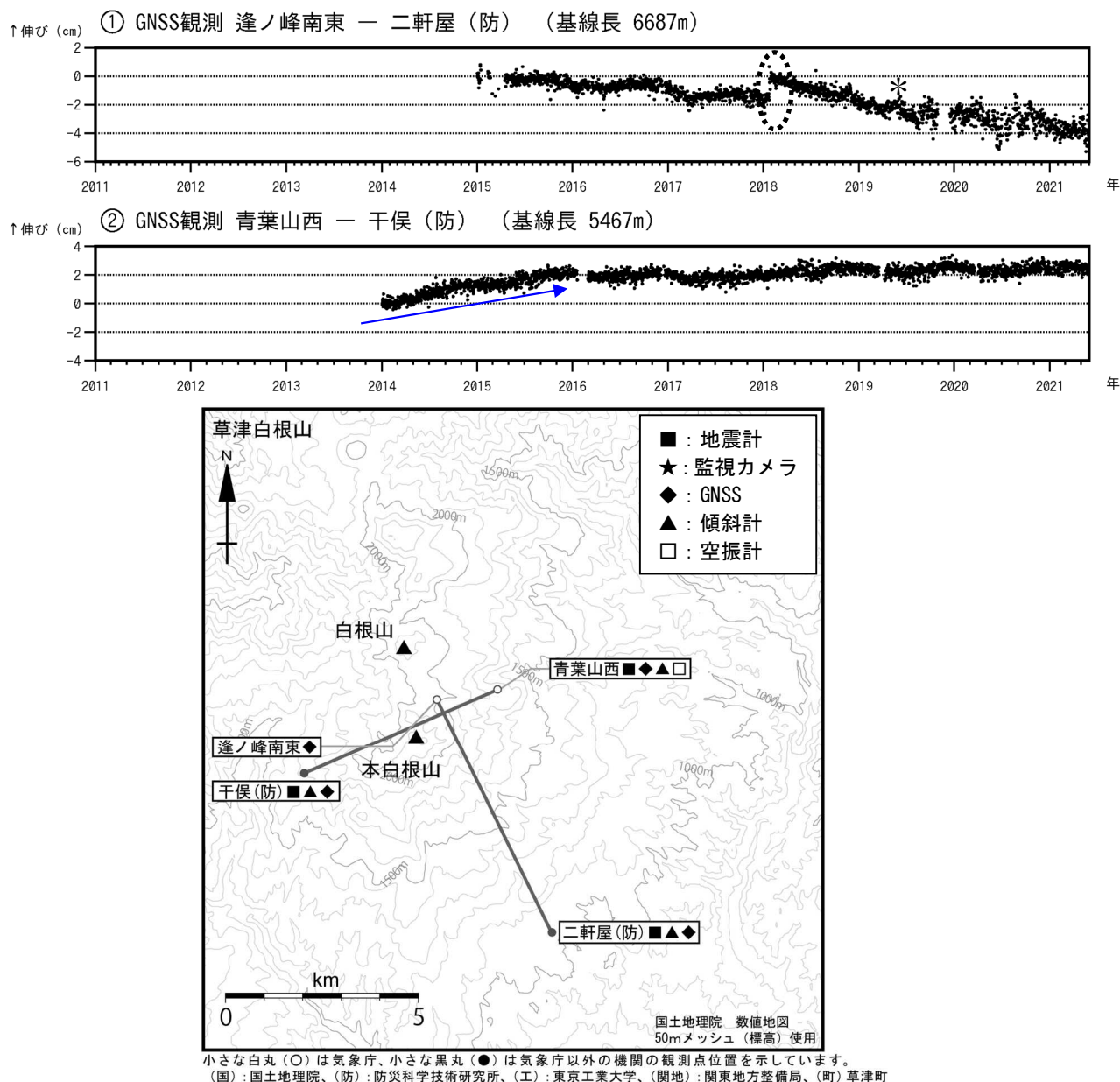


図7 草津白根山 (本白根山) GNSS 連続観測による基線長変化

(2011年1月1日～2021年5月31日)

- ・①逢ノ峰南東-二軒屋 (防) の基線で2018年1月の噴火に伴う変化 (黒破線) が認められる。2018年1月以降にみられている変化は、本白根山の噴火後の収縮によるものと考えられる。2020年1月以降、基線長の縮みは停滞している。また、2019年4月頃よりみられている変化 (※印) は、二軒屋 (防) 観測点の挙動によるもので、火山活動による変動ではないと考えられる。
- ・②青葉山西-干俣 (防) の基線では、2014年に深部の膨張によると考えられる変動 (青矢印) がみられていたが、今期間は停滞している。

草津白根山

白根山（湯釜付近）では、2011年に火山性微動と傾斜変動が観測され、2014年からは湯釜付近の浅部に火山性流体の著しい供給の増加によると考えられる火山性地震の増加や浅部の膨張などが観測され、2018年にも同様の変動が一時的にみられた。

また、2014年以降、草津白根山の北西から西側では深部の膨張を示唆する変化や地震の増加が観測されたほか、2018年には本白根山で水蒸気噴火が発生した。

このように草津白根山の火山活動は、中長期的には活発な状態と考えられ、火山活動の推移に注意が必要である。

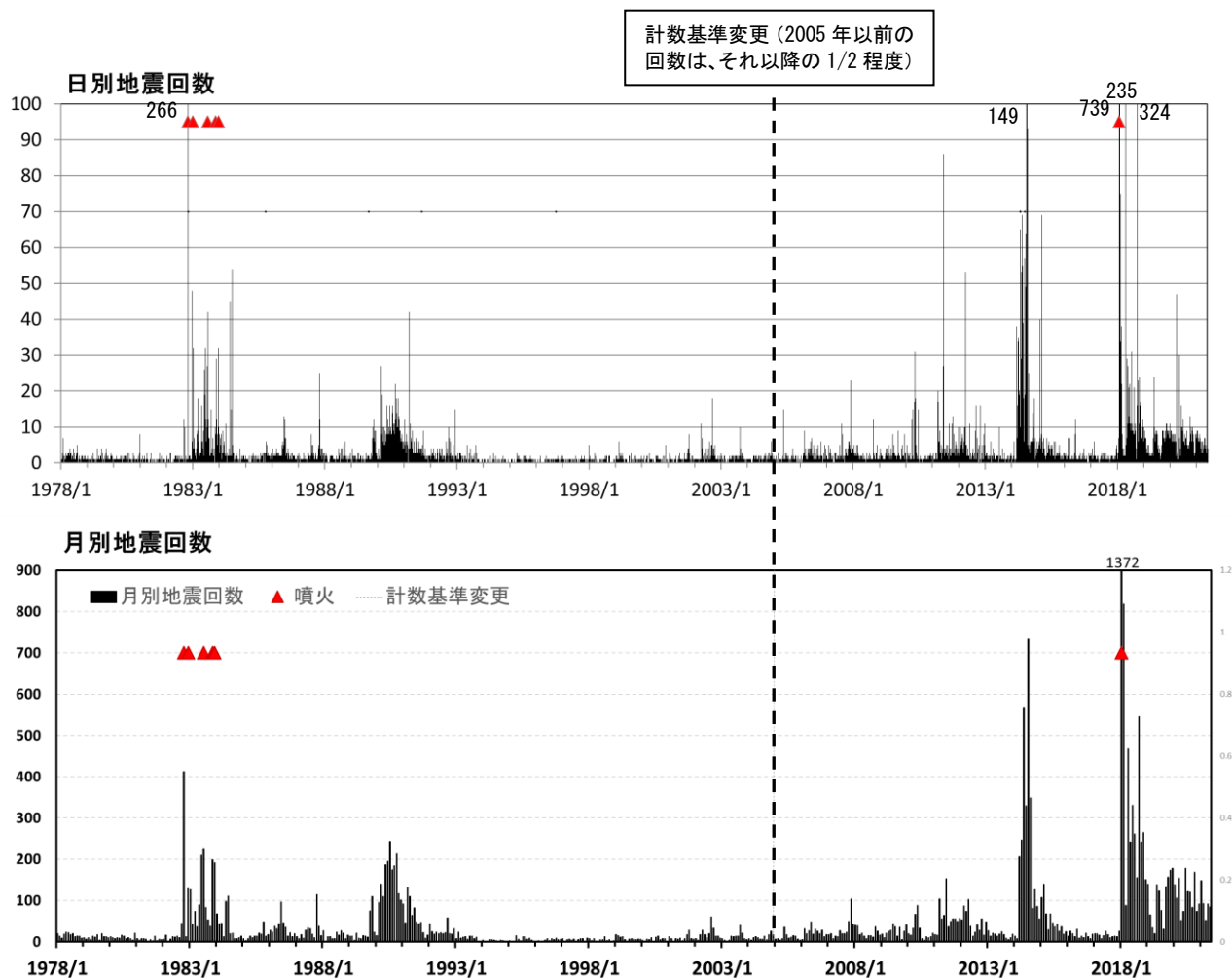


図8 草津白根山 地震回数（1978年1月1日～2021年5月31日）

- ・ 小規模な水蒸気噴火が発生した1982年から1983年にかけての期間、および火山活動に高まりがみられた1989年から1991年にかけての期間に、地震活動に高まりがみられた。
- ・ 地震活動は、2002年頃から徐々に高まっており、2011年以降は増減を繰り返している。

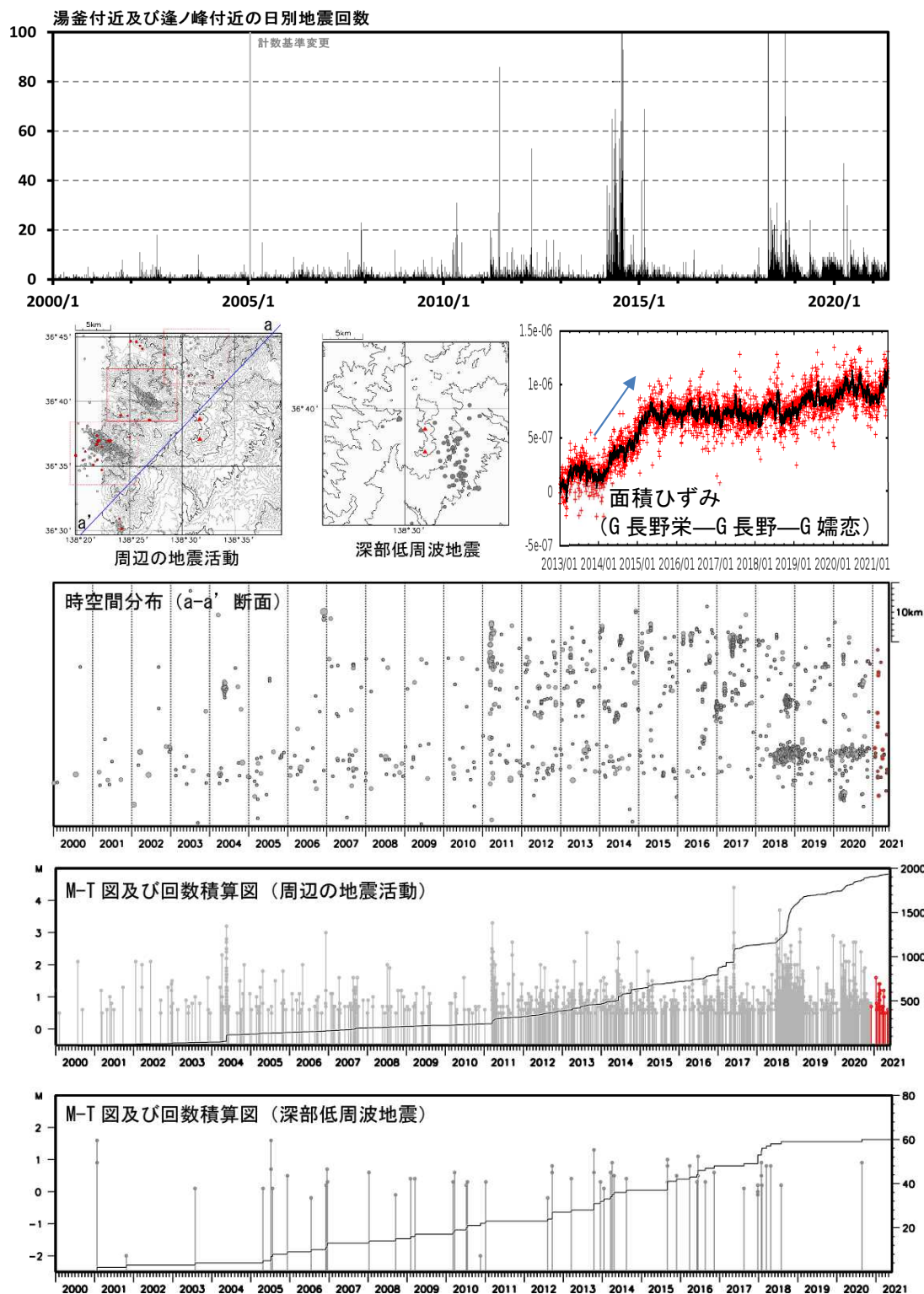
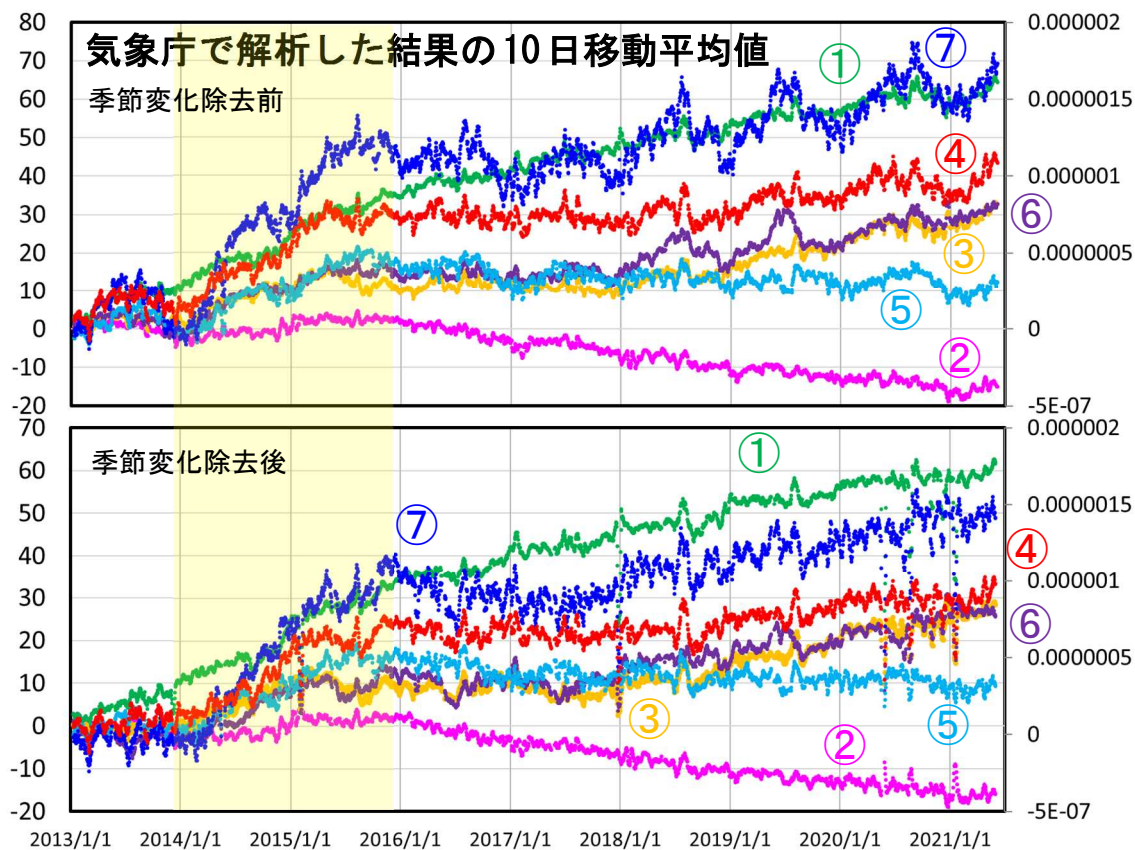


図9 草津白根山 一元化震源による周辺の地震活動（2000年1月1日～2021年5月26日）

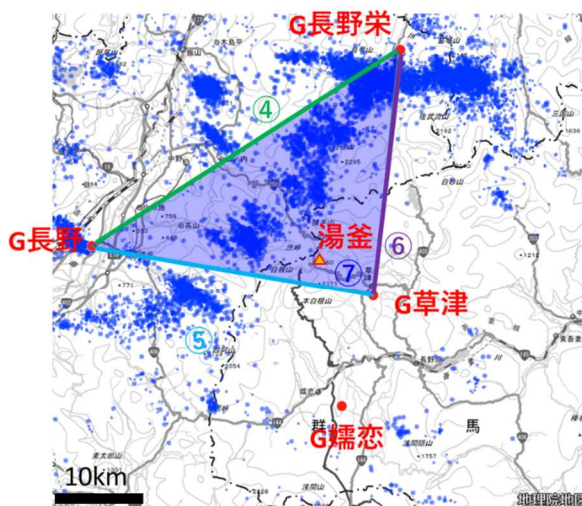
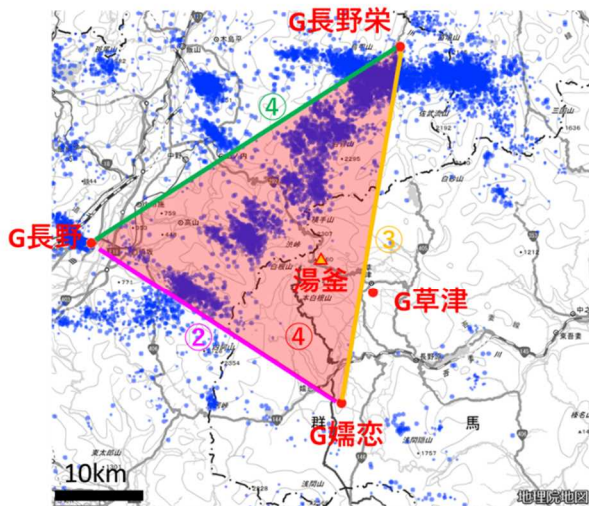
広域地震観測網により震源決定したもので、深さは全て海面以下として決定しています。図中の震源要素は一部暫定値が含まれており、後日変更することがあります。この図では、関係機関の地震波形を一元的に処理し、地震観測点の標高を考慮する等した新手法で得られた震源を用いています（ただし、2020年8月以前の地震については火山活動評価のための参考震源です）。2021年5月13日現在、次の期間の地震について、暫定的に震源精査の基準を変更しているため、その前後の期間と比較して微小な地震での震源決定数の変化（増減）が見られます。（1）2020年4月18日から10月23日まで、（2）2021年1月9日から3月7日まで、（3）2021年4月19日以降。

- ・平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震後、草津白根山の北西～北側にかけての地震活動が活発化した。
- ・2014年、2017年、2018年に北西側の地震活動の活発化がみられている。
- ・2014～2015年に草津白根山の北西～西側の深部の膨張を示唆する地殻変動（気象庁、2018、第141回火山噴火予知連絡会資料）が観測された（図中青矢印）。その後、2014～2015年の変動と類似した明瞭な変動は、認められない。



- ①基線長 G 長野ーG 長野栄
②基線長 G 長野ーG 嬬恋
③基線長 G 長野栄ーG 嬬恋
④面積歪 G 長野ーG 長野栄ーG 嬬恋

- ⑤基線長 G 長野ーG 草津
⑥基線長 G 長野栄ーG 草津
⑦面積歪 G 長野ーG 長野栄ーG 草津



青プロットは、気象庁一元化震源（2000年1月1日～2021年5月31日）

図10 草津白根山 GNSS 連続観測の結果(2013年1月1日～2021年5月31日)

上段:GNSS 連測観測の季節変化除去前の結果(気象庁で解析した結果)

中段:GNSS 連測観測の季節変化除去後の結果(気象庁で解析した結果)

下段:基線・面積ひずみのペアの説明(暖色系:G 嬬恋観測点を含むペア、寒色系:G 草津観測点を含むペア)

・2014-2015 年は、南北走行、東西走行の基線でともに伸びの傾向が見られ、面積ひずみもプラス方向に変化した(上段図中の網かけ領域)。

・2018 年以降、いずれの面積ひずみのペアにおいても、わずかながらプラス方向への変化が見える。南北走行の基線③⑥では伸びの傾向がみられるが、東西走行の基線②⑤は停滞か縮みの傾向がみられる。

ALOS-2/PALSAR-2 データを用いた 草津白根山における SAR 干渉解析結果

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 で撮像された草津白根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.
125-720 (SM1_U2-6)	北行	右	32.4°	2020.05.17	2021.05.16	第 1 図 - A
126-720 (SM1_U2-9)	北行	右	42.9°	2020.03.13	2021.03.12	第 1 図 - B

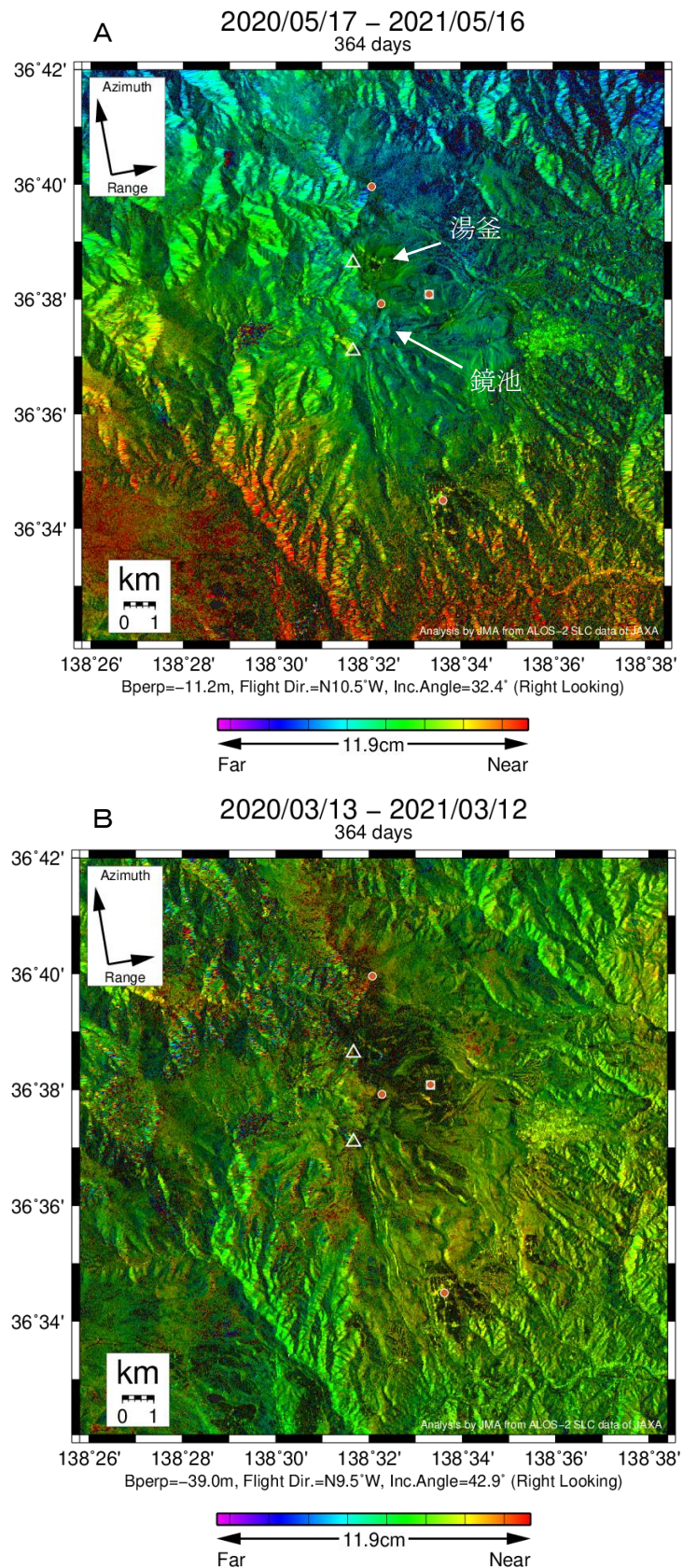
3. 解析結果

北行軌道の長期ペアについて解析を行った。ノイズレベルを超えるような位相変化は認められない。

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 草津白根山の干渉解析結果

パス 125 (SM1_U2-6) (A) 及び 126 (SM1_U2-9) (B) による草津白根山及び周辺の干渉解析結果

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。

ノイズレベルを超えるような位相変化は認められない。

湯釜湖水の化学組成 (2021年5月31日観測まで)

2021年5月31日に草津白根山の湯釜火口湖の南西岸のU1地点(図1)で採取した湖水の化学組成を分析した(表1).

湖水のMg/Cl比は湯釜火口で複数回の噴火が発生した1982-83年, および湯釜火口内での突出が発生した1996年の前後などで顕著に上昇したことが知られている[1](図2). 2021年5月31日に採取した湖水のMg/Cl比は約0.0083であった.



図1. 湖水の採取位置(U1)

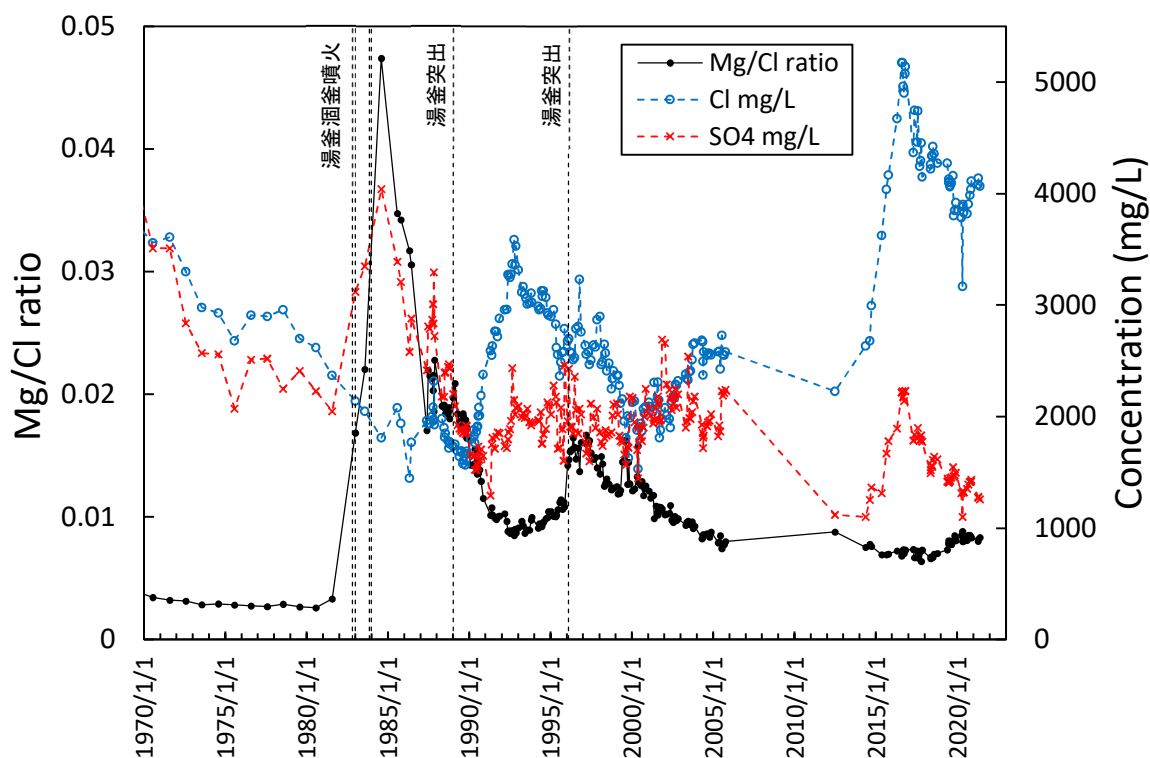
(背景地図に地理院地図を使用した)

表1. 湯釜火口湖水の化学組成 (抜粋)

Date	WT °C	pH	EC S/m	Cl mg/L	SO ₄ mg/L	Mg mg/L	Mg/Cl
2020/11/5*	16.6	1.13	3.90	4040	1420	33.9	0.0084
2020/11/14**	N.D.	1.09	3.89	4110	1430	34.2	0.0083
2021/4/20	13.1	1.11	3.90	4080	1270	32.8	0.0080
2021/4/26	13.5	1.11	3.85	4140	1280	34.0	0.0082
2021/5/31	20.3	1.12	3.92	4070	1260	33.9	0.0083

分析値は今後変更する場合があります.

*U1地点で採水. **U1地点の近傍でdroneを使用して採水. pH, ECの測定にはガラス電極および白金-白金黒電極(HORIBA, D-74), Cl, SO₄の分析にはイオンクロマトグラフ法(Thermo, Integration), Mg, の分析にはマイクロ波プラズマ原子発光分析装置(Agilent, 4210 MP-AES)を使用した.



参考資料 [1] T. Ohba et al (2008) JVGR, 178, 131-144.

* 本研究の一部には東京大学地震研究所共同利用(2020-KOBO11)の研究費を使用しました.

草津白根山における地磁気全磁力変化

全磁力観測では、2018年4月から7月にかけて湯釜付近地下の熱消磁を示唆する全磁力変化が観測された。それ以降、湯釜南東の観測点で全磁力の減少が認められる。

白根山（湯釜付近）における2018年から2021年5月までの全磁力観測結果について報告する。

全磁力連続観測では、2018年4月から7月にかけて、湯釜付近地下の熱消磁を示唆する全磁力変化（新P点およびQ点で減少、R点で増加）が観測された。それ以降は湯釜南東のQ点については全磁力の減少が認められる（図2、図3）。

2020年10月に実施した全磁力繰り返し観測では、前回（2019年10月）の観測結果と比較して、湯釜の東から南東側の領域で全磁力の減少が観測された（第147回火山噴火予知連絡会資料；図4）。

今後の熱活動の推移を把握するため、引き続き全磁力変化を注視する必要がある。

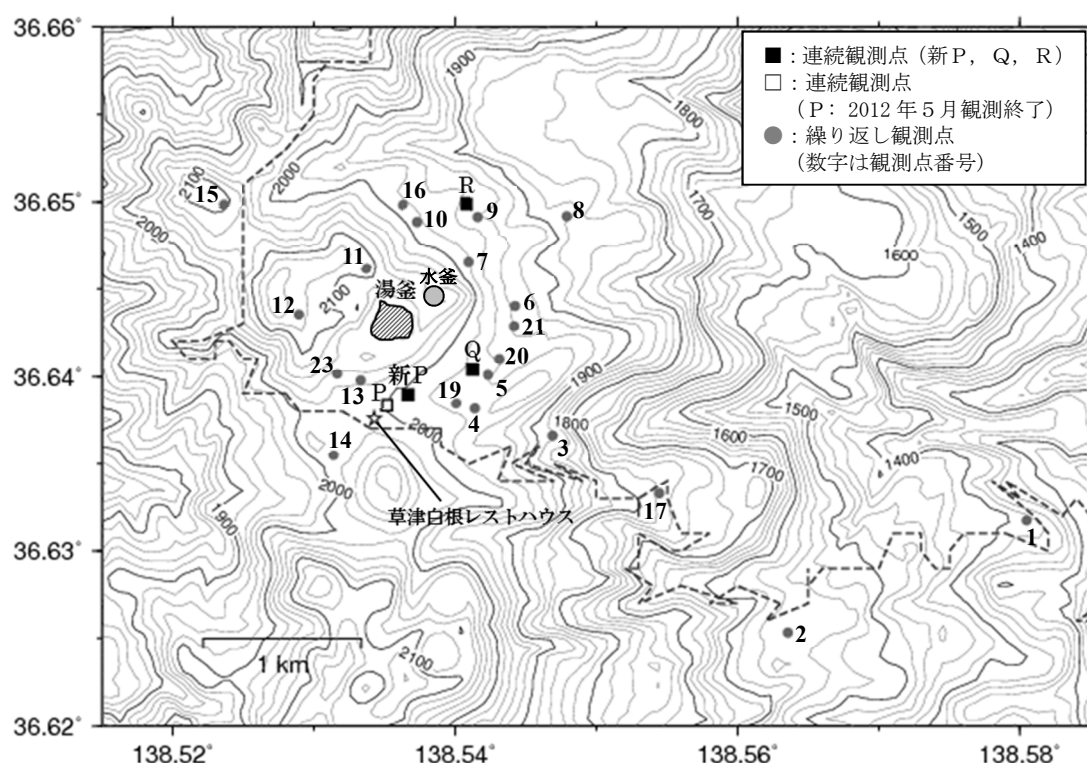


図1 白根山（湯釜付近）における全磁力観測点配置

この地図の作成に当たっては、国土地理院長の承認を得て、同院発行の「数値地図 50m メッシュ（標高）」を使用した。また、道路（破線）の記載には「国土数値情報（道路データ）国土交通省」を使用した。

【謝辞】本資料の作成に当たっては、東京大学地震研究所共同利用(2021-D-14)における八ヶ岳地球電磁気観測所の全磁力データの提供を受けた。

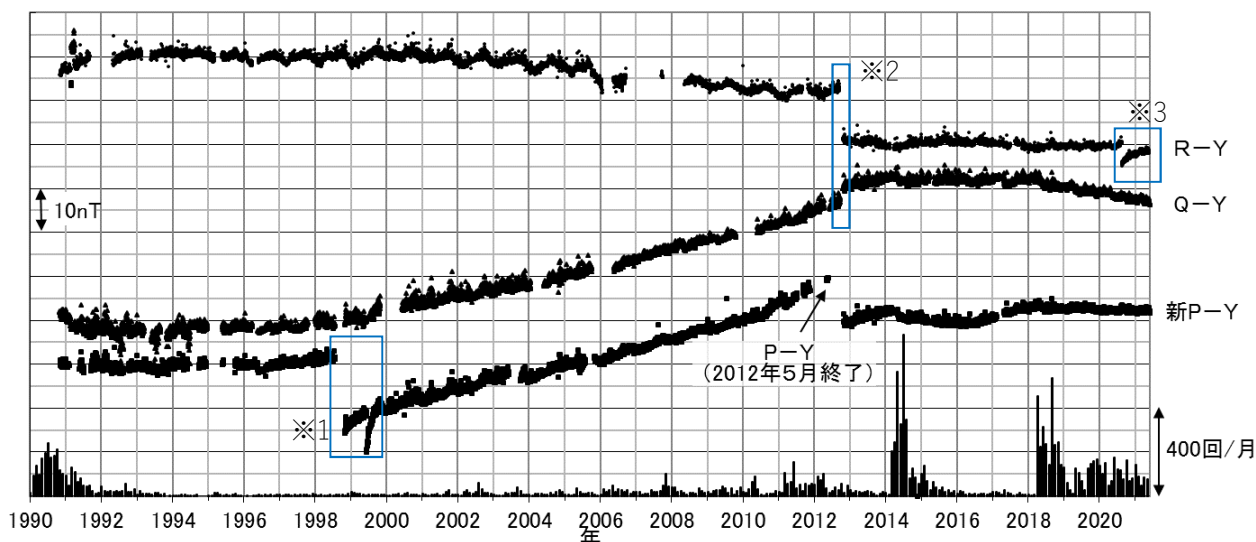


図2 白根山（湯釜付近）における全磁力連続観測結果（1990年～2021年5月31日）

連続観測点（P、Q、Rおよび新P）における東京大学地震研究所八ヶ岳地球電磁気観測所（Y）との全磁力の夜間（00:00～02:59）日平均値差。最下段は草津白根山の月別地震回数（2015年以降は湯釜付近の地震のみ）。

（※1）、（※3）落雷によるステップ状の変化とその後の余効変動を含む、（※2）更新工事に伴う変化

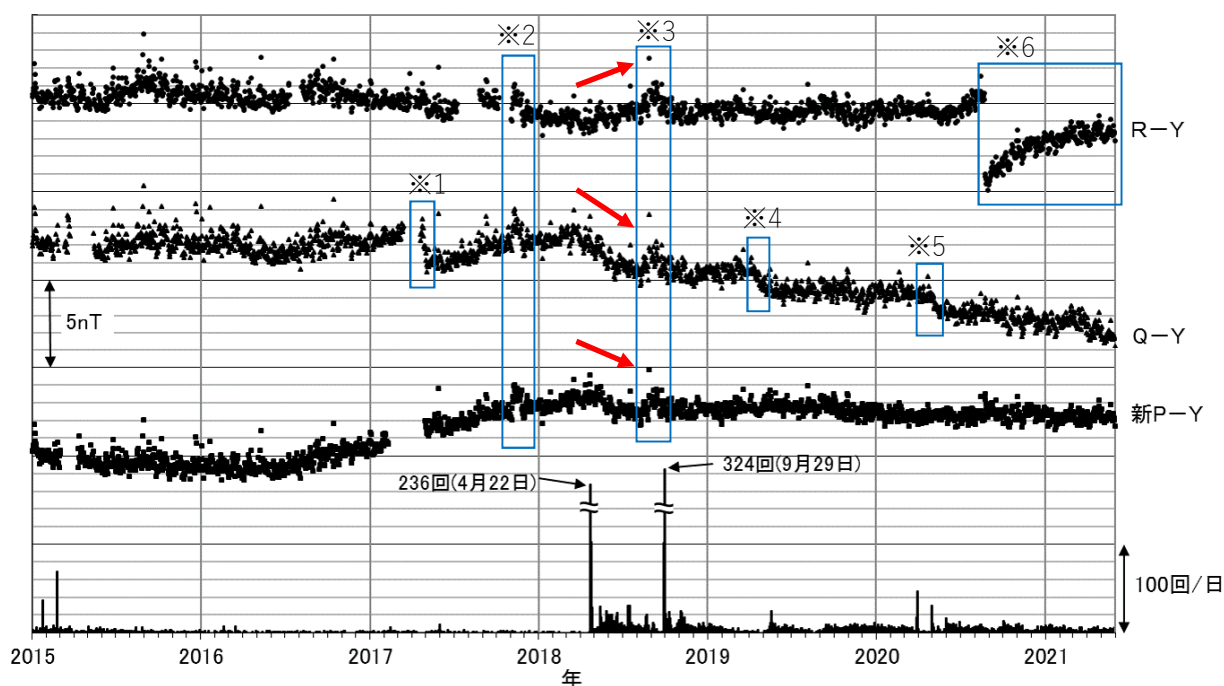


図3 白根山（湯釜付近）における全磁力連続観測結果（2015年1月～2021年5月31日）

連続観測点（Q、Rおよび新P）における東京大学地震研究所八ヶ岳地球電磁気観測所（Y）との全磁力の夜間（00:00～02:59）日平均値差。最下段は湯釜付近の日別地震回数。赤矢印は2018年4月～7月に観測された全磁力変化。

（※1）原因不明の急変、（※2）Yのみで観測された人工擾乱、（※3）2018年8月～9月に発生した磁気嵐によると考えられる変化、（※4）2019年4月中旬～5月上旬のQでの原因不明の変化、（※5）2020年5月3日のQでの原因不明の変化、（※6）落雷によるステップ状の変化とその後の余効変動を含む

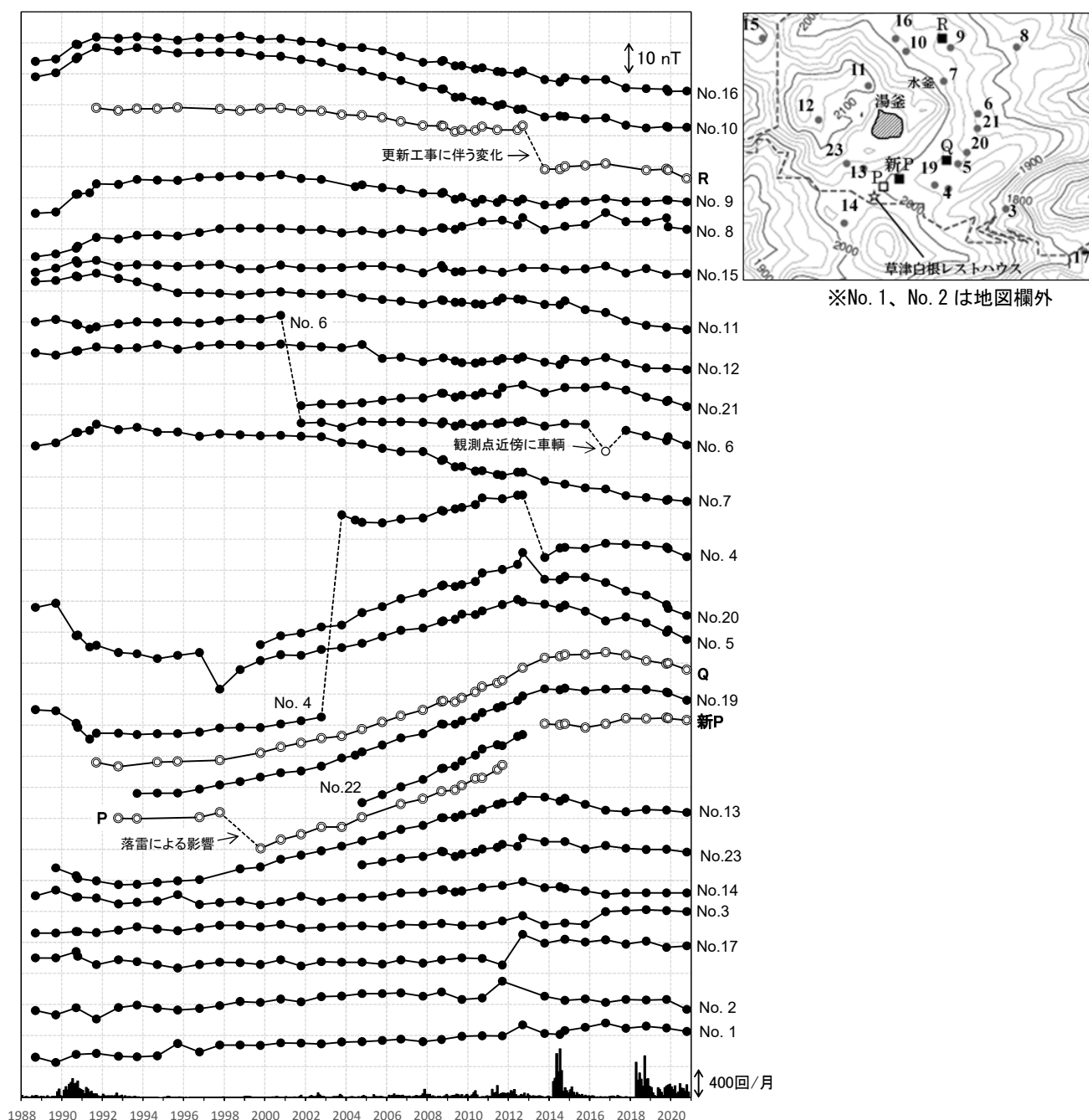


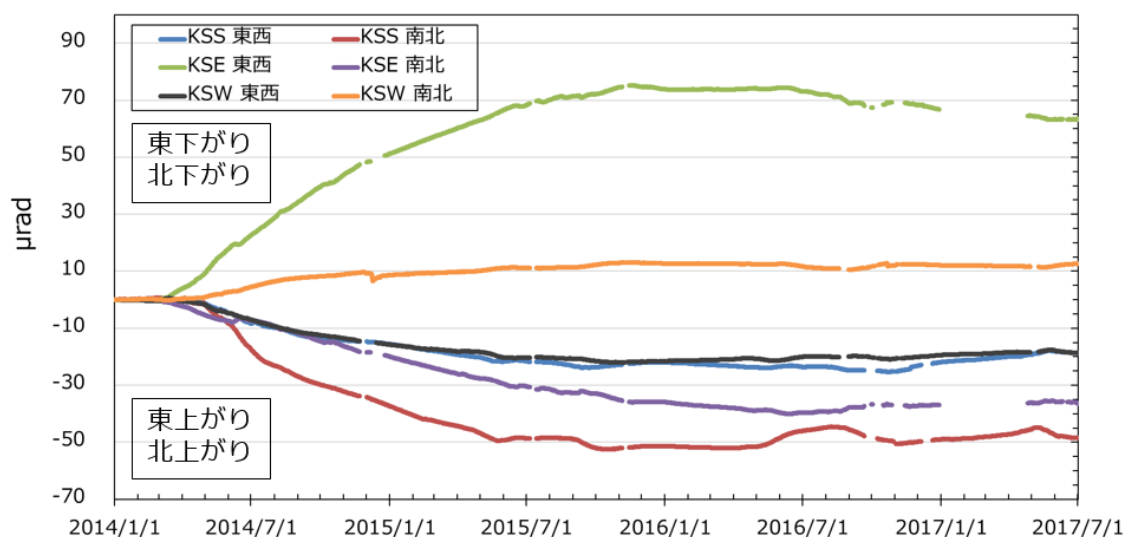
図4 白根山（湯釜付近）における全磁力繰り返し観測結果（1988年9月～2020年10月）

- ・ 東京大学地震研究所八ヶ岳地球電磁気観測所（Y）で観測された全磁力値を基準とし、各繰り返し観測点とYの地域的短周期変動の差は連続観測点Qを介して除去した。
- ・ 連続観測点P、Q、Rおよび新Pのデータは全磁力繰り返し観測実施日の値をプロット。
- ・ 破線は周辺環境の変化によると思われるギャップ。
- ・ 連続観測点Rの変化（2019年11月～2020年10月）は落雷による影響を含む。
- ・ 最下段は草津白根山の月別地震回数（2015年以降は湯釜付近の地震のみ）。

草津白根火山・湯釜周辺の地殻変動¹

傾斜変動を 2014-2016 年の第 1 期, 2018-2020 年の第 2 期に分けて考えると, どちらも大局的には水釜直下の海拔 1000 m 前後における緩やかな圧力増加の進行と理解できる. 2021 年に入っても, これまでと同様の緩やかな膨張はゆっくりと進行しているように見える. ただし, 各観測点の変動量は, 季節要因の変動スケールまたはそれ以下である.

2014-2017年



2018-2021年

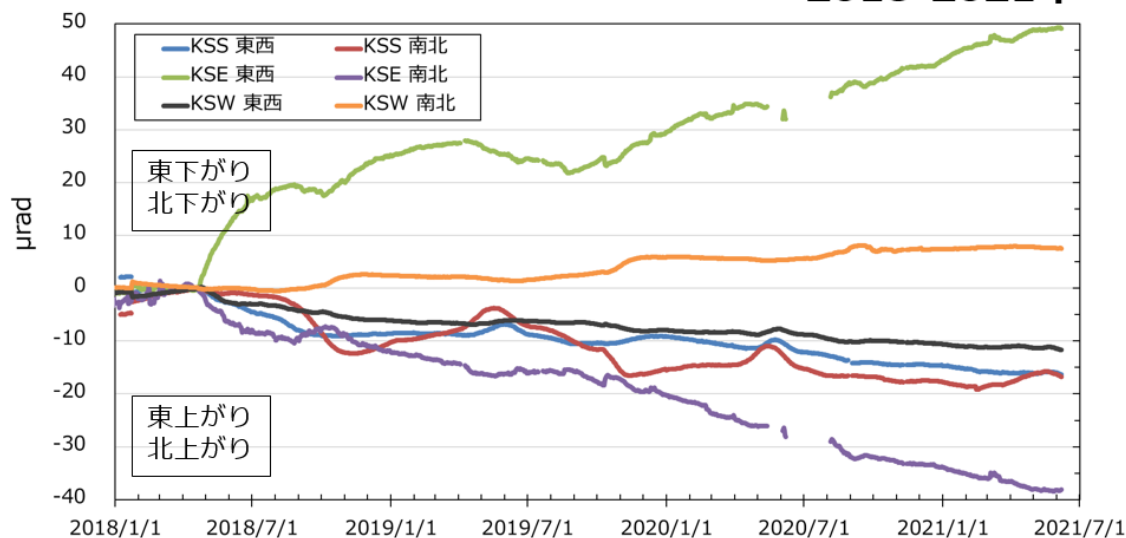


図 1. (上) 2014 年 1 月 1 日~2017 年 7 月 1 日, (下) 2018 年 1 月 1 日~2021 年 6 月 7 日の, それぞれ 3 年 7 カ月の変動. ここに示したのは, 東工大ボアホール型傾斜計 3 点のデータである (季節変動・気圧応答・地震や機器障害によるステップ・潮汐を補正したもの). 縦軸の幅が異なることに注意.

¹ 湯釜水温観測装置は機器障害により 2021 年 1 月以降は欠測している. 採水時に実測した水温は, 例年の同時期に観測される水温にほぼ一致しており, 熱活動の活発化は認められない.

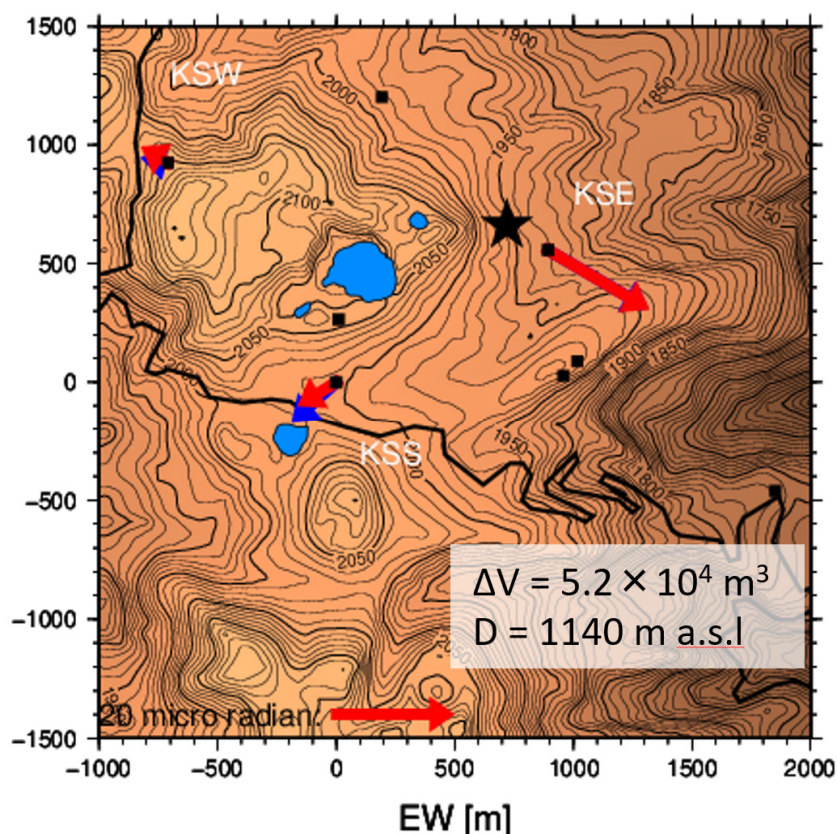


図2. 過去1年間（2020/6/7-2021/6/7）の変動に対する力源モデル．等方力源を仮定し，その位置および膨張体積をグリッドサーチで求めた． ΔV は膨張体積， D の力源も海拔深度．

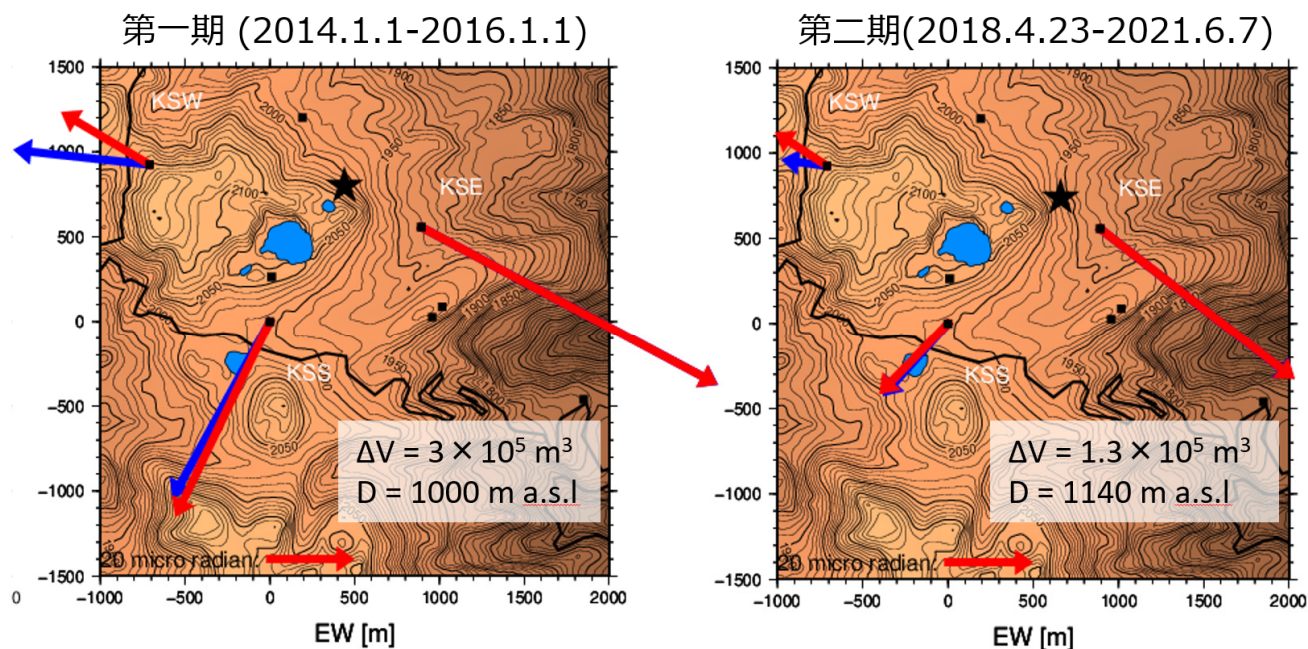


図3. 長期間に対する力源モデル．等方力源を仮定し，その位置および膨張体積をグリッドサーチで求めた．（左）図1の第1期 2014/1/1-2016/1/1，（右）第2期 2018/4/23-2021/6/7．ここで ΔV は膨張体積， D は力源も海拔深度．

湖水 Cl 濃度の時間変動予測モデル

湖水体積が多く変化しない条件において、湖底噴気 Cl 濃度に対する湖水 Cl 濃度の応答は指数関数で記述できた。その時定数は湖水漏水率に関係し、それは Hirayama et al.(2020)に基づき約 1000 日と見積もられた。すなわち、湖水が湖底噴気に対して 63%応答するまでに 1000 日（2 年 9 カ月）、90%応答には 2300 日（6 年 4 カ月）を要し、濃度に基づく活動評価には数年以上が必要となる。

そこで、濃度時系列データから平衡濃度（十分な時間が経過して定常状態に達したときの湖水濃度、≡湖底噴気濃度）を逐次逆解析する手法を構築した（図 1）。2014-16 年の湖水濃度は、平衡濃度 7200 ppm へ向かって上昇していたことが示唆された（図 2）。すなわち、この時期の濃度上昇は過渡応答であり、時間とともに更に活発化していたものではない。その後、2018-19 年（約 4000 ppm）および 2020 年後半（約 6000 ppm）と 2 回の湖底噴気濃度上昇が起きる一方で、2017 年と 2020 年の湖底噴気は静穏期（約 2300 ppm、2014 年活発化の前）の値に低下していたことが分かった（図 3）。

直近 2-3 個のデータ（2020 年 10・11 月、2021 年 4 月の移動平均）を逆解析して得た予測曲線（図 4 の赤線）は、湖水濃度が引き続き緩やかに上昇することを示す。しかし、2021 年 5・6 月に実測された Cl 濃度は予測曲線よりも下に位置する。このことは、現在の湖底噴気濃度が 2020 年よりも低下したことを意味する。もし、現在の湖底噴気濃度が静穏期（2014 年直前の値）であれば、今年 11 月頃までに Cl 濃度は 3800 ppm 程度へ低下する（図 4）。そして、2400 ppm（2014 年活動期開始前後）を下回るのは 2027 年 7 月と予測された。

以上のように、得られた湖水分析値と予測曲線（すなわち推定湖底噴気濃度）とを比較することで、湖底噴気濃度の現状を評価できる。どの予測曲線に乗るかは、120 日程度の時間スケールで判断できる。予測曲線は、直近の実測湖水濃度データを用いて逐次修正される。ただし、過去の湯釜での噴火は Cl 濃度が低い時期に発生しており、活動評価は Mg/Cl も併せて検討すべきである。

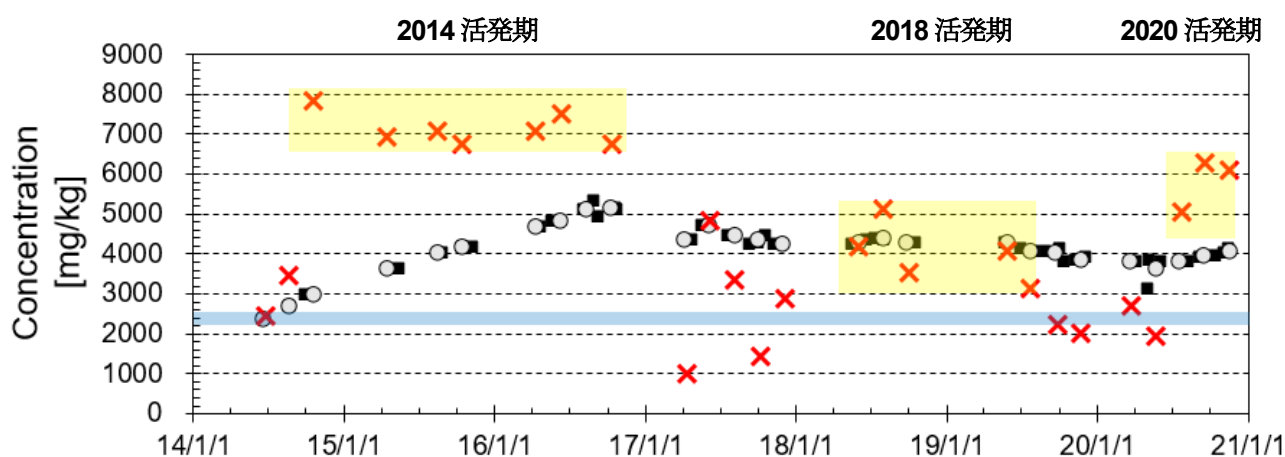


図 1. 2014～2020 年の湖水 Cl 濃度(気象研・他、予知連資料)から 2 次精度（過去 3 つのデータを使用）で逐次計算した平衡 Cl 濃度(≡湖底噴気濃度)。黄色ハッチで示す 3 つの極大期が存在し、それは北側噴気 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ の変動と整合的である。青色ハッチは 2014 年活発化直前の湖水濃度（静穏期における平衡濃度）である。

- ×：逆解析で求めた平衡濃度（≡湖底噴気濃度）
- ：湖水濃度
- ：移動平均(±60 日)

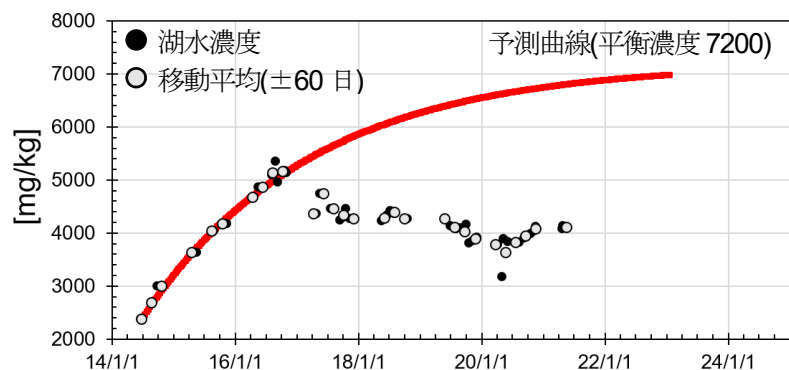


図 2. 2014 活発期の逆解析と予測曲線(赤). 実測された濃度は、図 1 から示唆される平衡濃度(7200 ppm)を使って描いた予測曲線によく乗り、湖底噴気活動は静穏期(2014 年活発化直前)の約 3 倍で安定していたと思われる。2017 年以降、実測濃度は予測より下で推移した。その逆解析結果から、2017 年の湖底噴気は静穏期(2014 年活発化直前)に戻っていたことが分かる(図 1)。

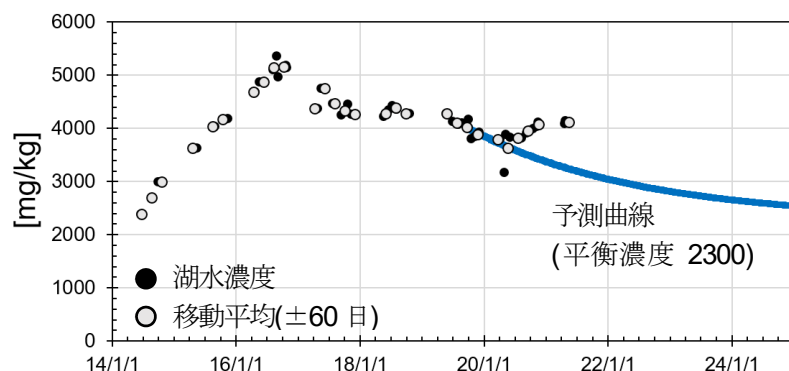


図 3. 2019 年静穏期の逆解析と予測曲線(青). 2019 年 7 月前後の実測濃度から逆解析すると、当時の湖底噴気濃度は静穏期の値(2300 ppm)であった(図 1). 2020 年も同様に低下していたが、同年 8 月以降、湖水濃度は予測曲線よりも上に位置した。すなわち、同年 8 月以降は湖底噴気濃度が上昇した。

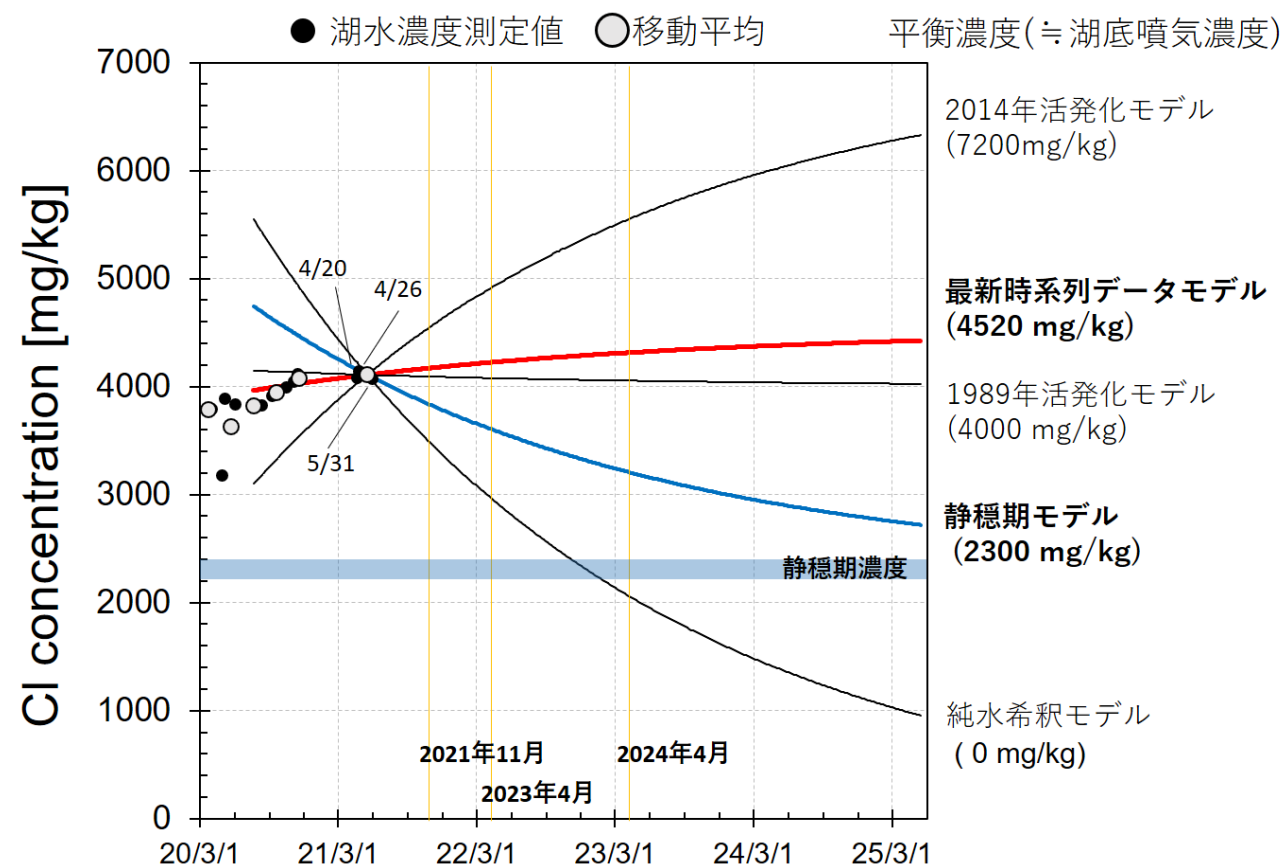
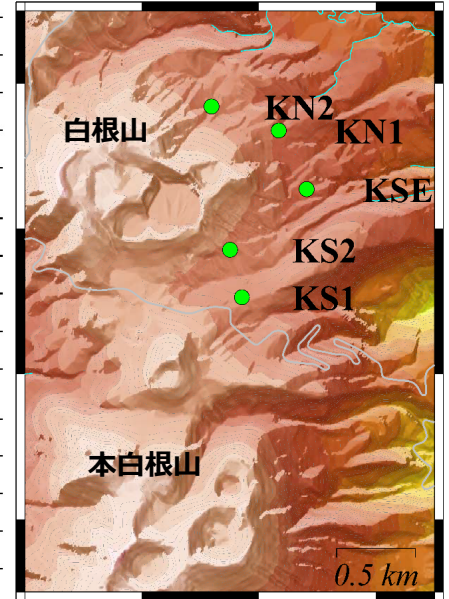
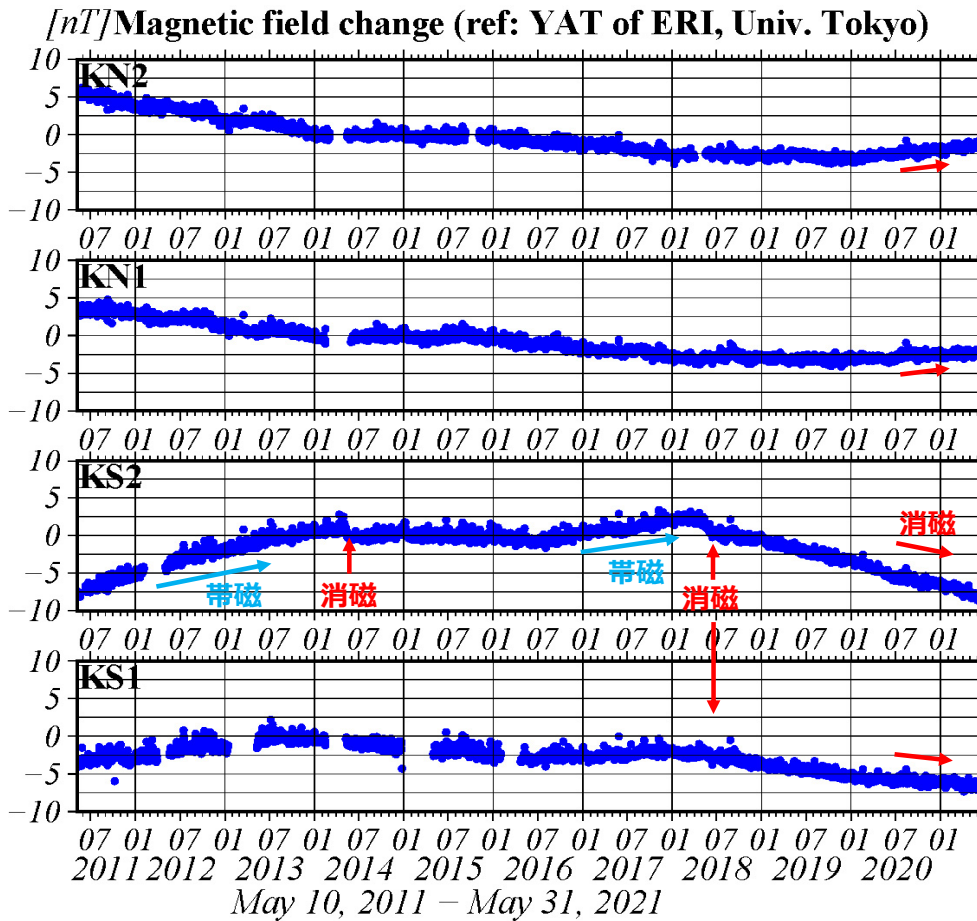


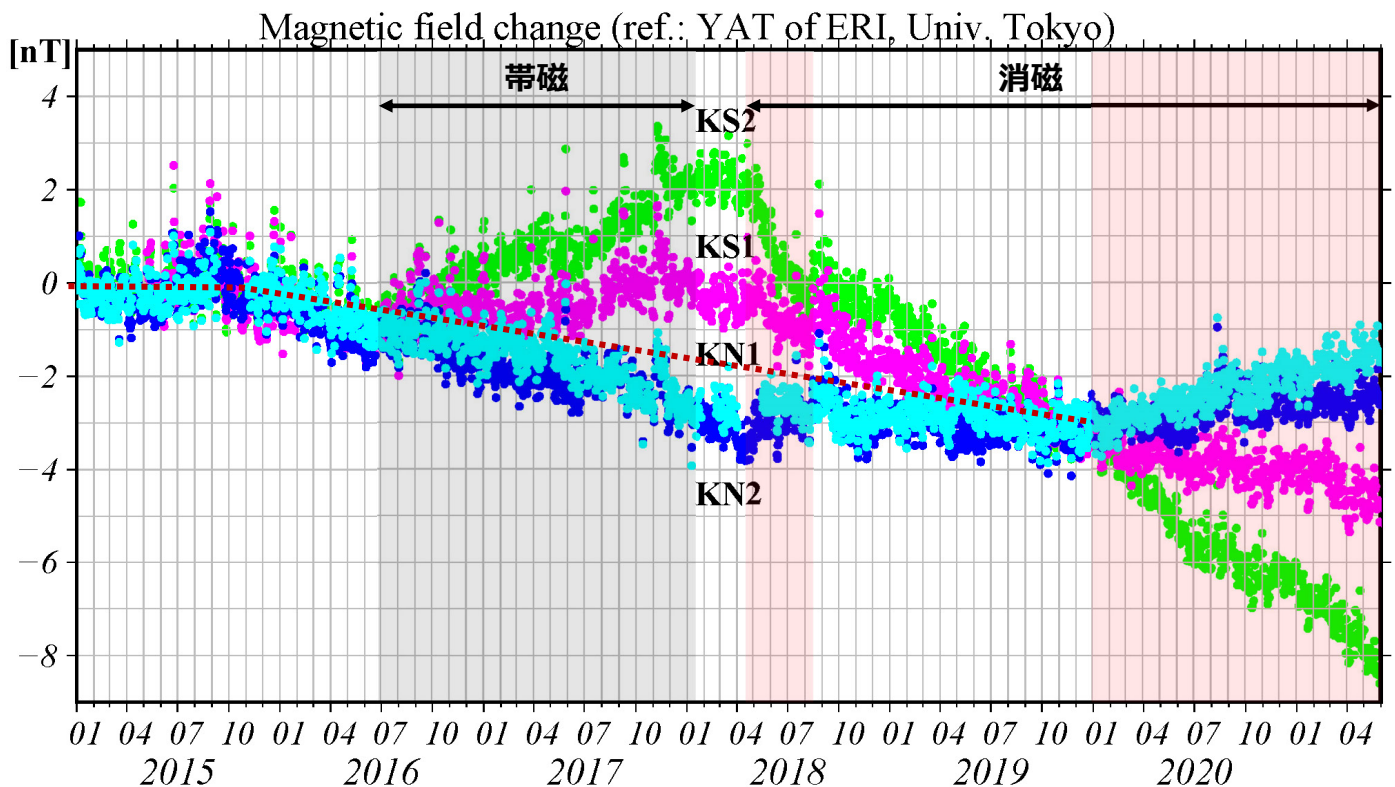
図 4. 直近の 3 つのデータから逆解析して求めた平衡濃度（湖底噴気濃度に比例）に基づく予測曲線（赤）と、その他の平衡濃度に基づく予測曲線。曲線からのズレで湖底噴気濃度の増減を評価するもの。

八ヶ岳に対する草津白根山周辺の地磁気変化（2011年5月～2021年5月）



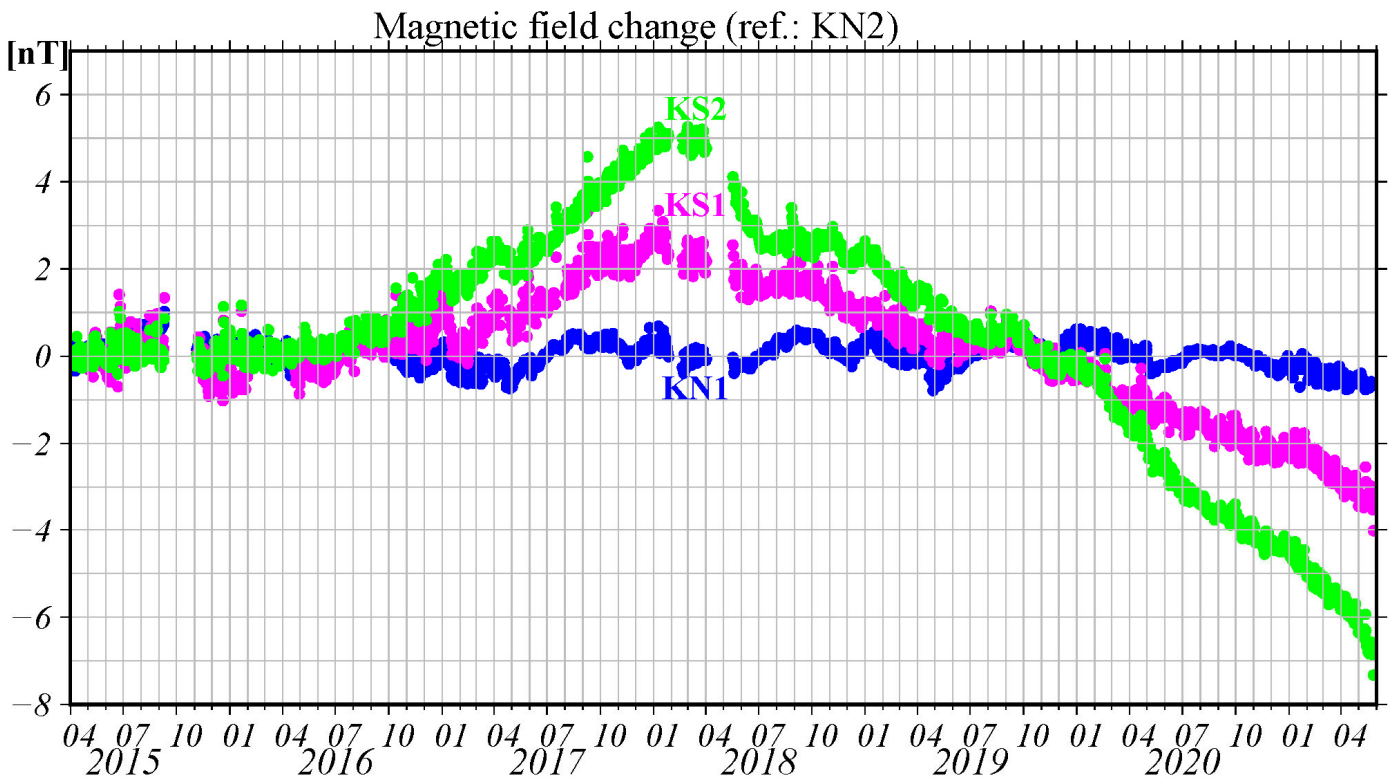
2019年1月前後から南側の観測点で減少傾向が続いている。2020年からは北側観測点で増加傾向が見られる。

八ヶ岳に対する草津白根山周辺の地磁気変化（2015年1月～2021年5月31日）



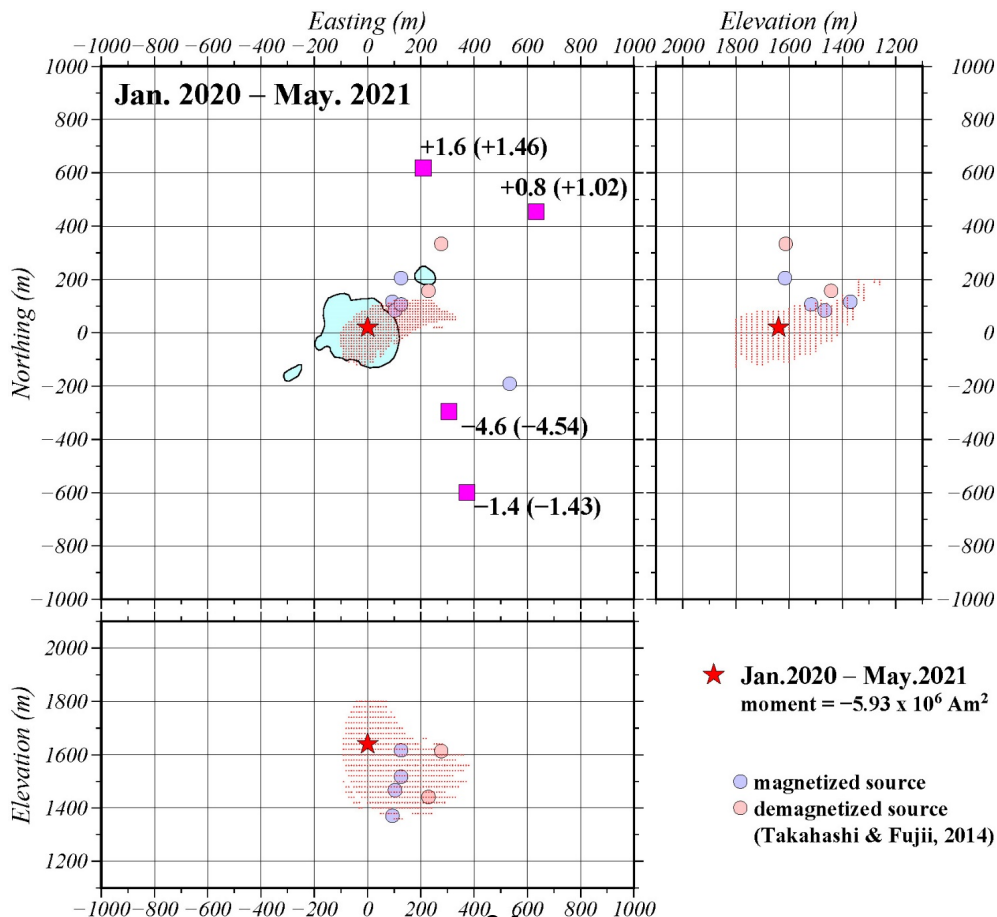
2015年秋頃から全観測点で八ヶ岳との全磁力差は減少トレンドにあり、火山起源の変動が重なっているように見える。このトレンドは、2020年1月頃までに解消された可能性があり、それ以降は、北側の2観測点で増加傾向（消磁傾向）が見られるようになった

KN2に対する他3観測点の地磁気変化（2015年4月～2021年5月）



一番北にあるKN2を基準にした変動を見ると、南側の2点の変動は帯磁から消磁への明瞭な変化が見て取れるが、北側のKN1では、1nT以下の年周変動以外は見られない。しかし、2020年秋頃からはKN1も年周変動ではない減少傾向が見られる。

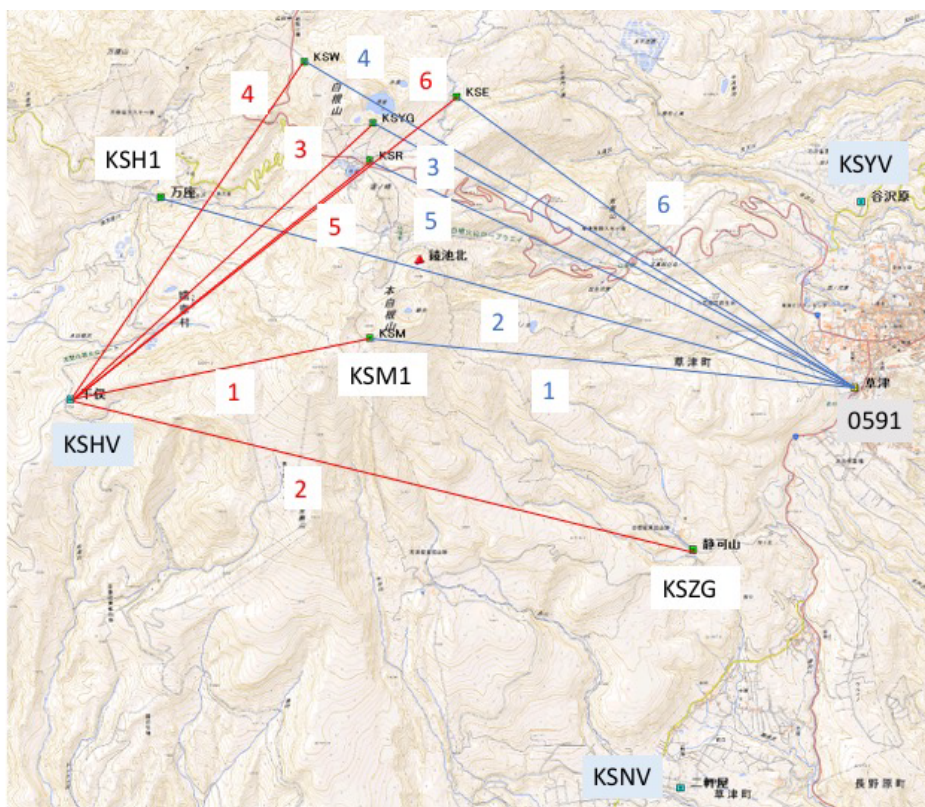
(参考)2020年1月以降の地磁気変化を説明する消磁源



湯釜直下の深さ400m付近（星印）に推定される。赤いドットはパラメータの許容範囲。

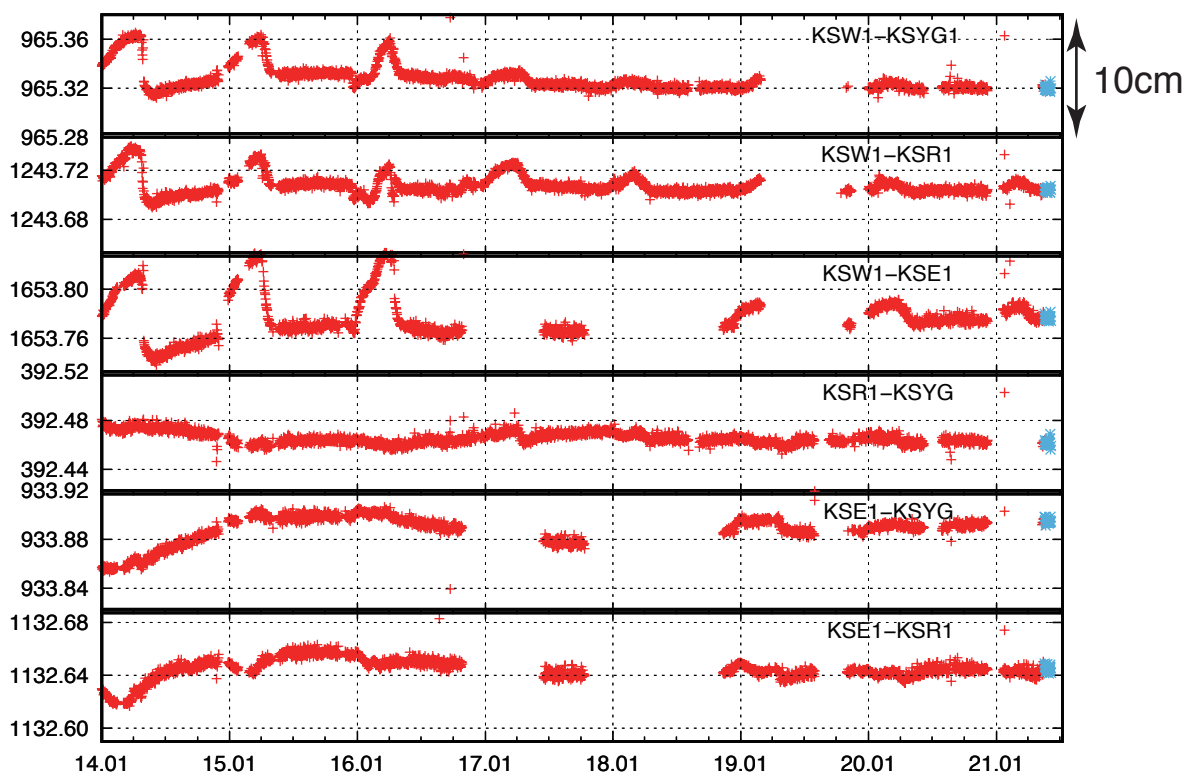
草津白根山および周辺域におけるGNSS観測

本期間、火山活動にともなう地殻変動は検出されていない

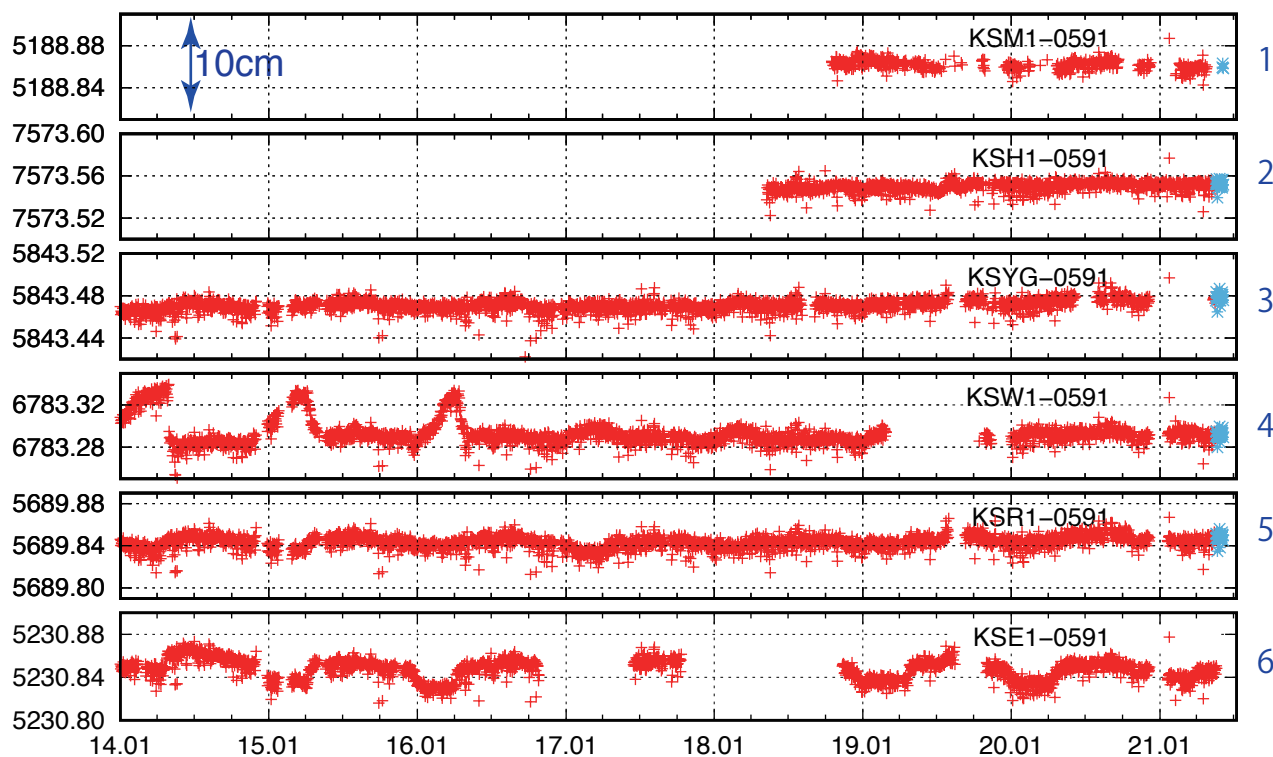


GNSS 連続観測点、基線の分布

国土地理院地形図およびカシミール3Dを用いて作図

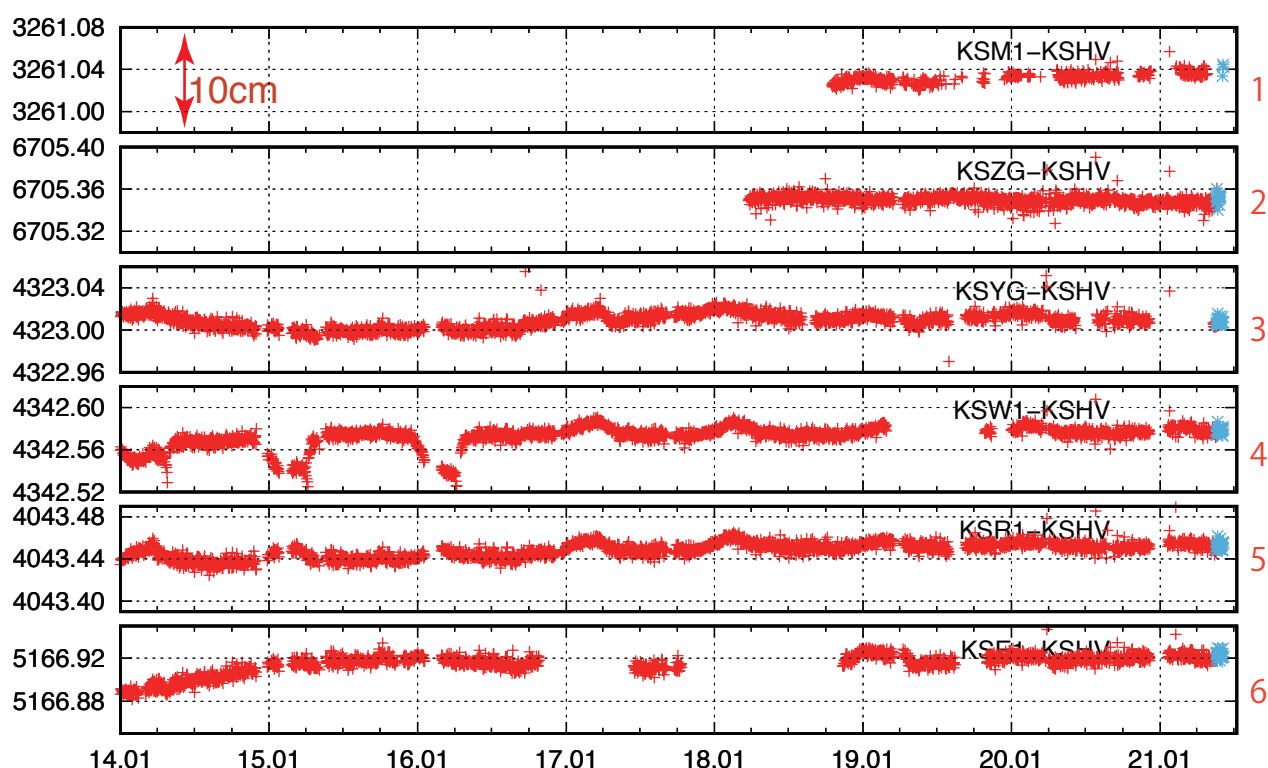


湯釜近傍観測点間の基線長変化 (2014.1.1~2021.6.8)



国土地理院・草津 (960591) に対する基線長変化 (2014.1.1~2021.6.8)

GEONET データを利用した

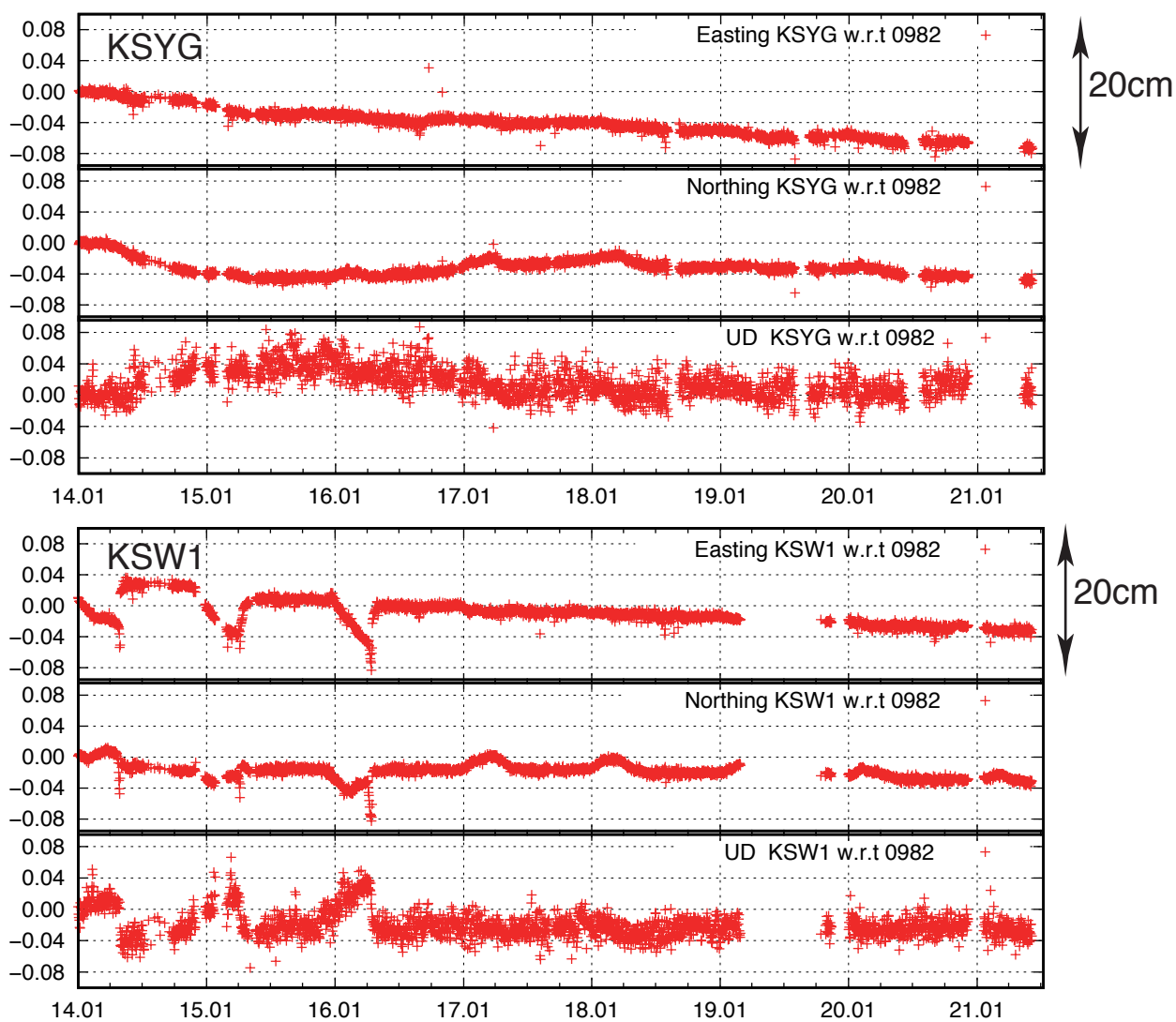


防災科技研・干俣 (KSHV) に対する基線長変化 (2014.1.1~2020.6.7)

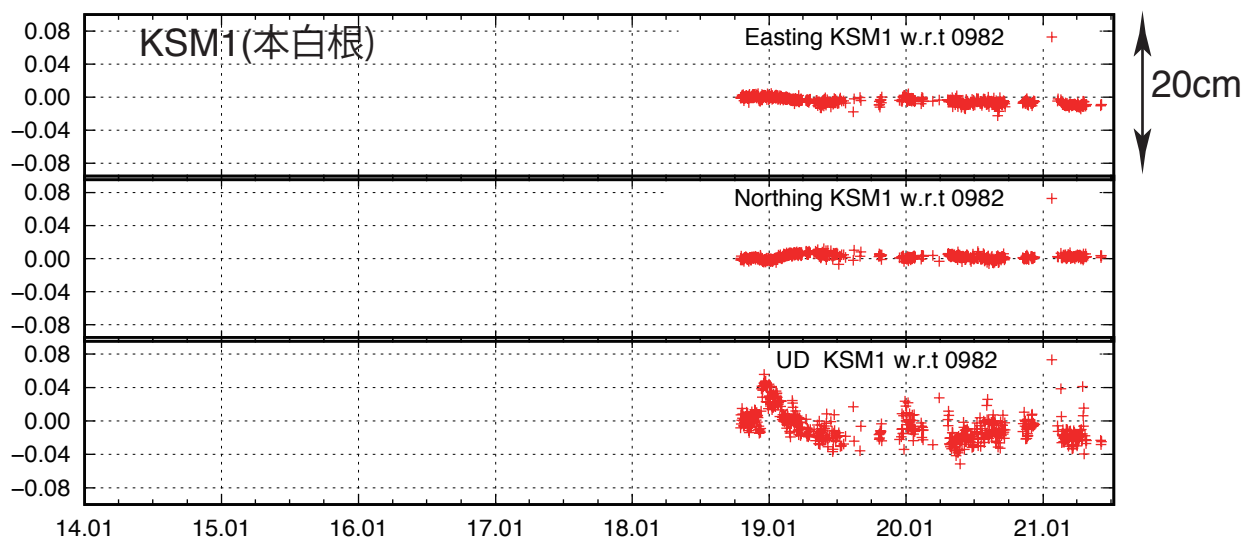
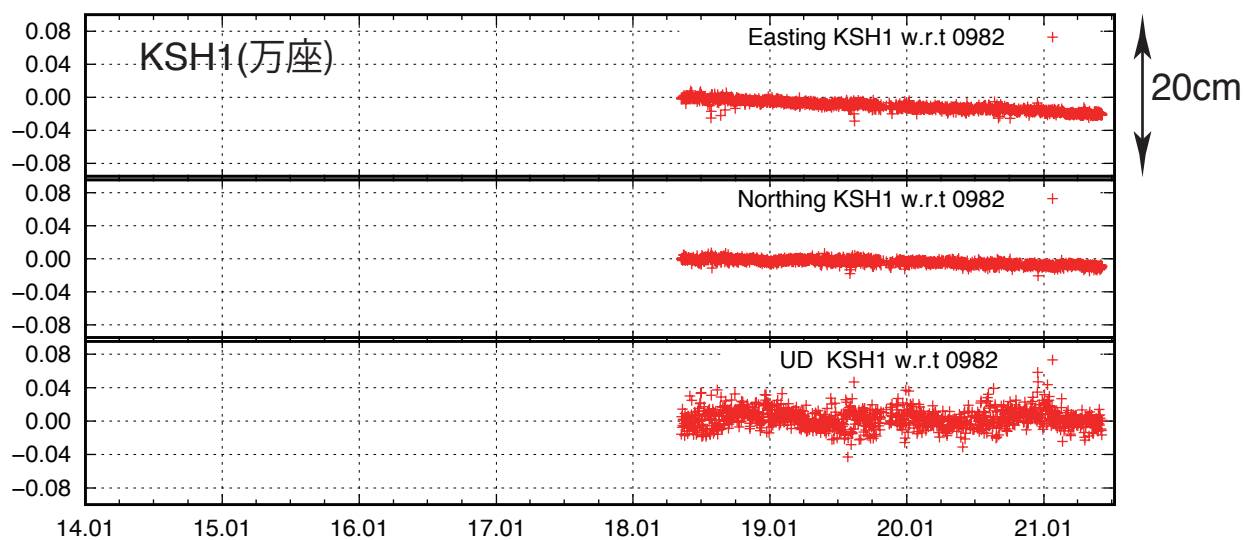
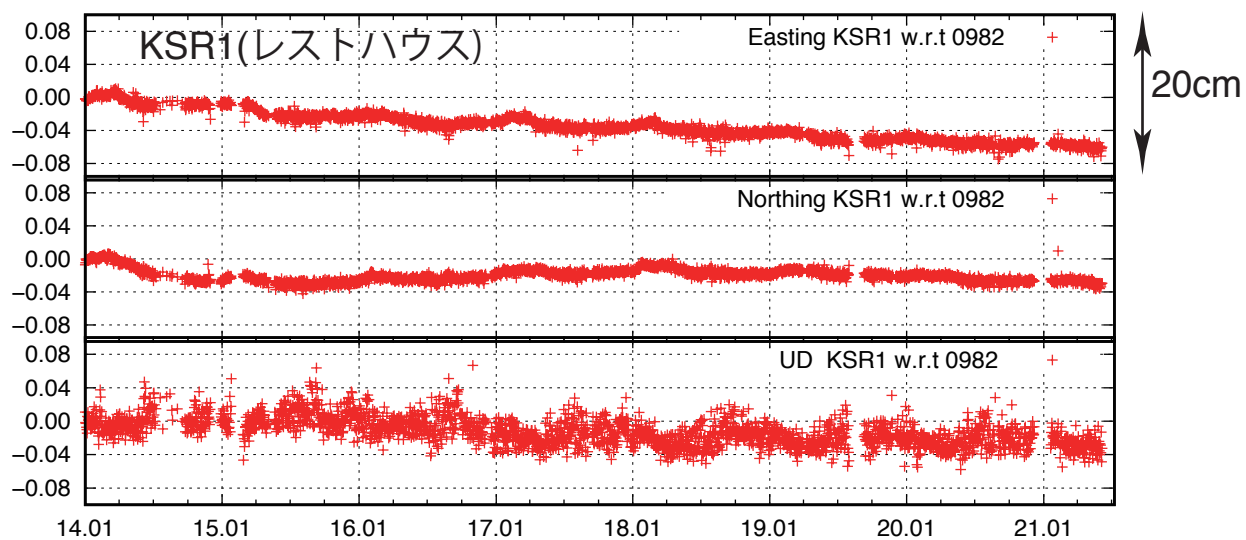
V-NET データを利用した



国土地理院地形図およびカシミール3Dを用いて作図



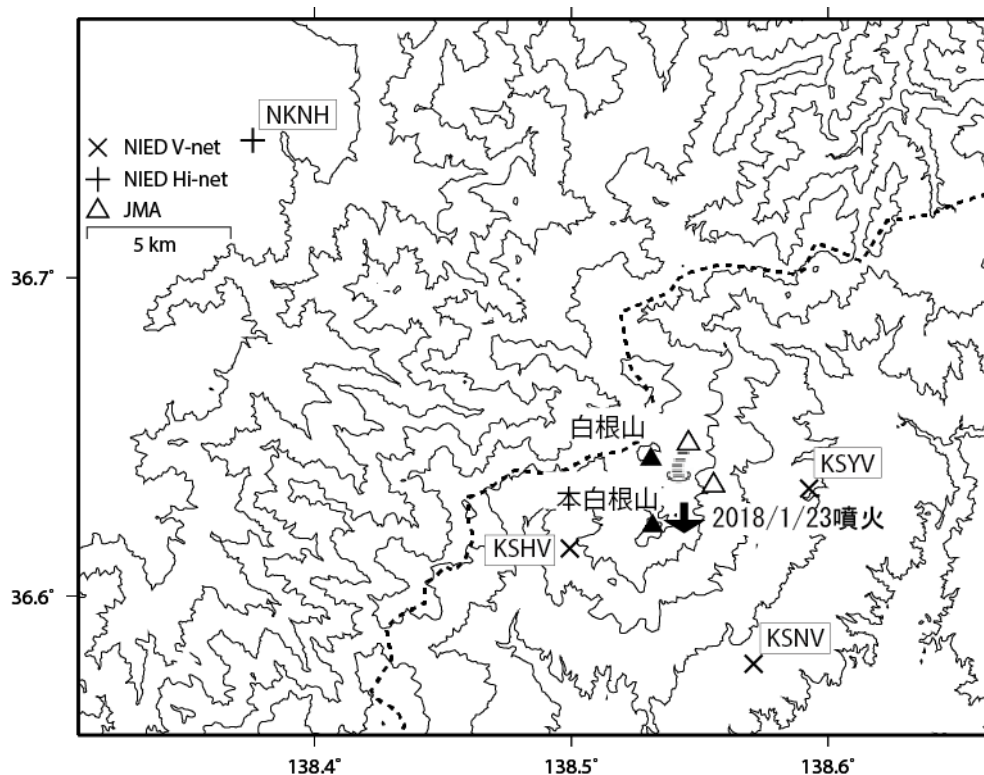
草津白根山



国土地理院・長野栄 (020982) を基準とした相対変位
(2014.1.1~2021.6.8) GEONET データを利用した

草津白根山

草津白根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。

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

○ 地殻変動

図 1 は傾斜計設置以降の変動記録、図 2 は GNSS の解析結果である。KSHV と KSNV に西下がりの傾斜変動がみられるが、火山活動との関連は不明である。

草津白根山の傾斜変動 (2012/4/1~2021/5/31)

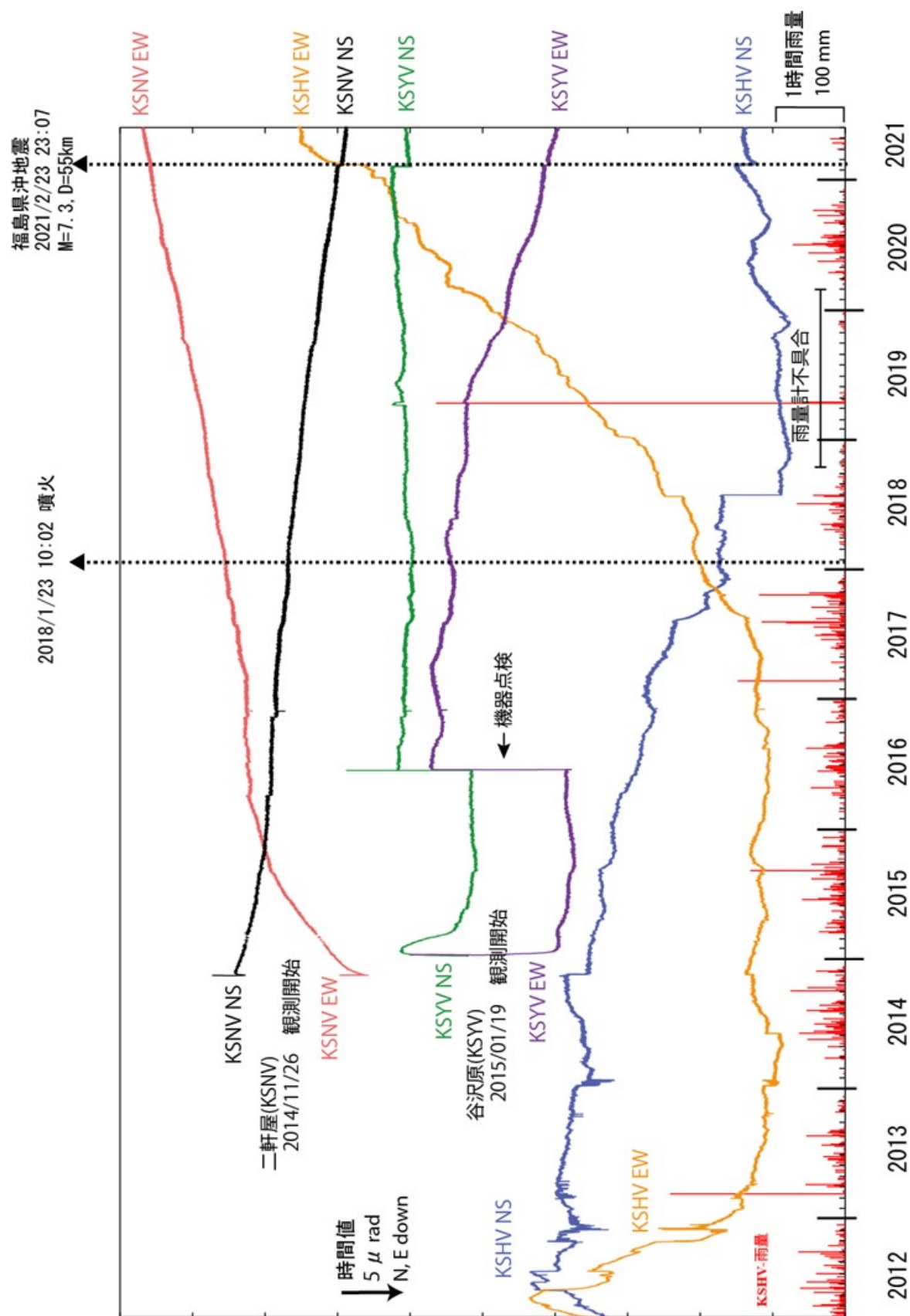


図1 草津白根山の傾斜変動

草津白根山

防災科学技術研究所 GNSS 観測点及び国土地理院 GEONET で得られた、
2020 年 5 月 1 日－2021 年 4 月 30 日の地殻変動【長野栄 (0982) 固定】

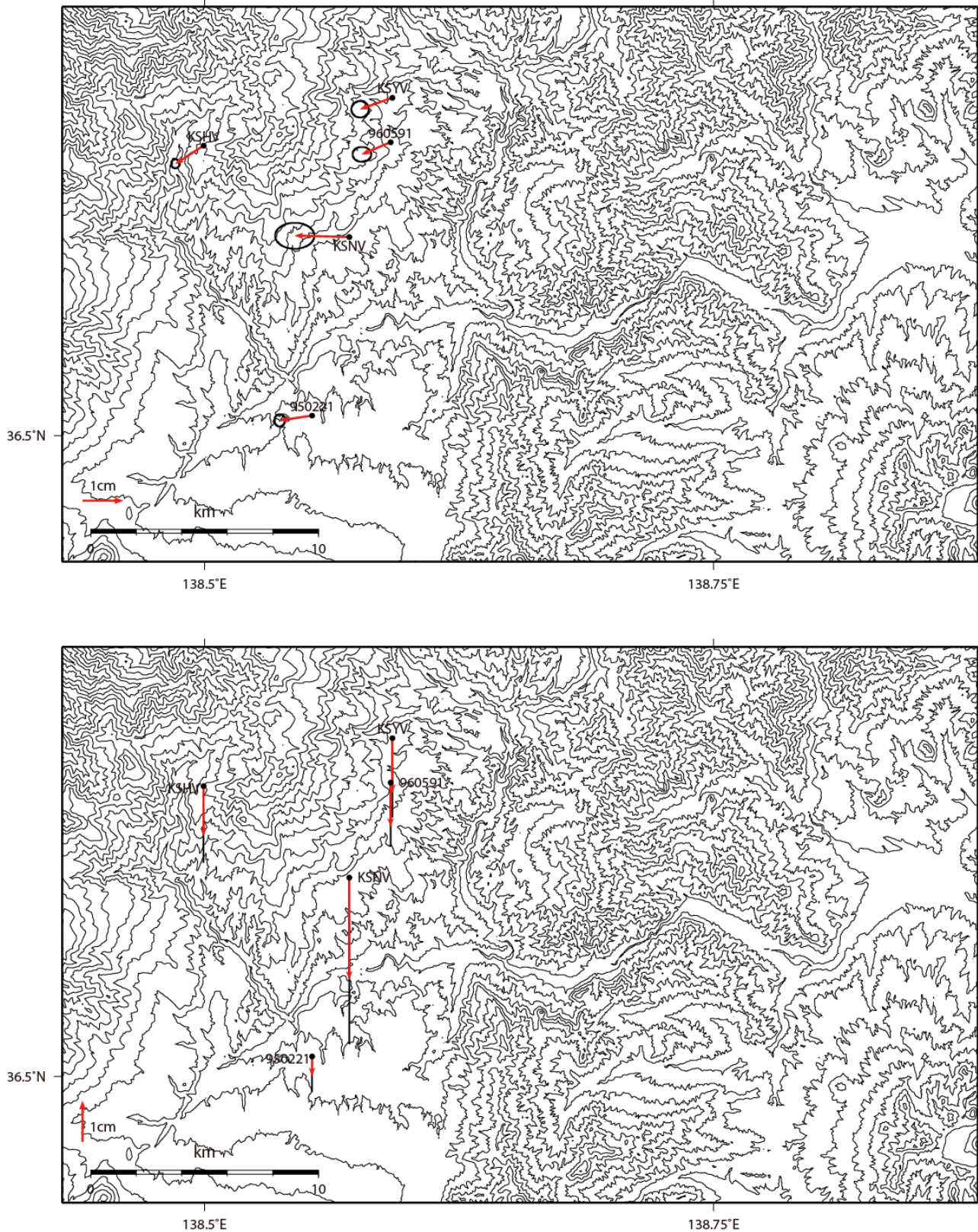


図 2 草津白根山周辺 V-net 及び国土地理院 GEONET 観測点における GNSS 解析結果
(上段：水平成分、下段：上下成分)

草津白根山

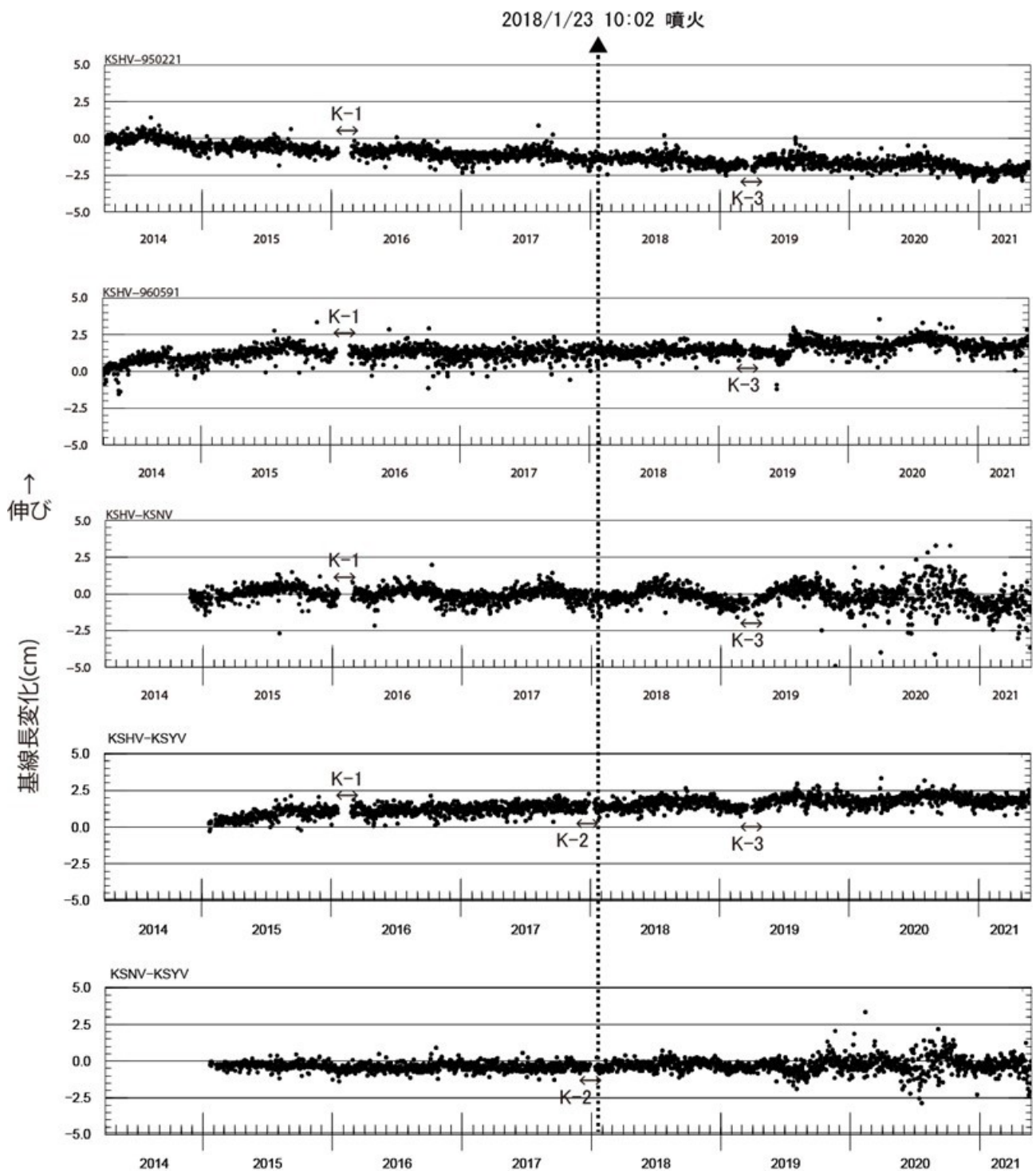


図3 防災科研3観測点と、KSHV-GEONET草津観測点(0591)、KSHV-GEONET孺恋観測点(0221)の基線長変化(2014/1/1~2021/5/31)

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
	草津白根山干俣 (KSHV)		2012/3/26	2周波観測開始
		K-1	2016/1/20~2/13	機器異常による欠測
		K-3	2019/3/20-4/7	機器異常による欠測
		K-4	2020/03/20-3/25	サーバ更新に伴う欠測
	草津白根山二軒屋 (KSNV)		2014/11/25	2周波観測開始
			2015/1/15~ 2015/4/17	通信回線不調
	草津白根山谷沢原 (KSYV)		2015/1/19	2周波観測開始
		K-2	2017/12/29~ 2018/1/12	機器異常による欠測

草津白根山周辺の地殻変動

Crustal Deformations around Kusatsu-Shiranesan Volcano

第1図から第5図は、草津白根山周辺のGNSS観測結果である。

第1図上段に基線の配置を、下段に各観測点の保守履歴を示した。

第2図は、第1図に示した基線の基線長変化グラフであり、左列は最近約8年間（2013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図は、第2図と同じ基線、期間の比高変化グラフである。

第4図は、第1図に示した基線の1997年以降（1997年1月～2021年5月）の基線長変化グラフである。第5図は、第4図と同じ基線、期間の比高変化グラフである。

第6図は、草津白根山周辺の電子基準点、気象庁の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、「中之条」を固定局としている。第4図上段に最近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）を示した。

GNSS観測結果では、顕著な地殻変動は観測されていない。

第7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8図および9図は「だいち2号」の干渉SAR時系列解析結果である。

第8図上段は2014年10月～2020年11月の変位速度である。第8図下段は、各地点における変動の時系列データである。本白根山の地点（A）では、長期的には衛星から遠ざかる変動が見られるが、2019年以降は鈍化している。第9図上段は2015年4月～2020年6月の変位速度である。第9図下段は、各地点における変動の時系列データである。本白根山の地点（A）では、衛星から遠ざかる変動が見られる。

第10図および11図はGNSS観測から推定した草津白根山の地殻変動力源の位置と体積変化である。解析に使用するGNSS観測点の一部は、浅間山の活動の影響を受けるため、今回の解析では浅間山地域との同時解析を行った。

第10図に地殻変動力源の位置と体積変化を示す。湯釜の北西約2kmの深さ約4.8kmに力源が推定されている（力源1）。力源1の体積変化は2021年初頭から鈍化している。

第11図に、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を示す。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。

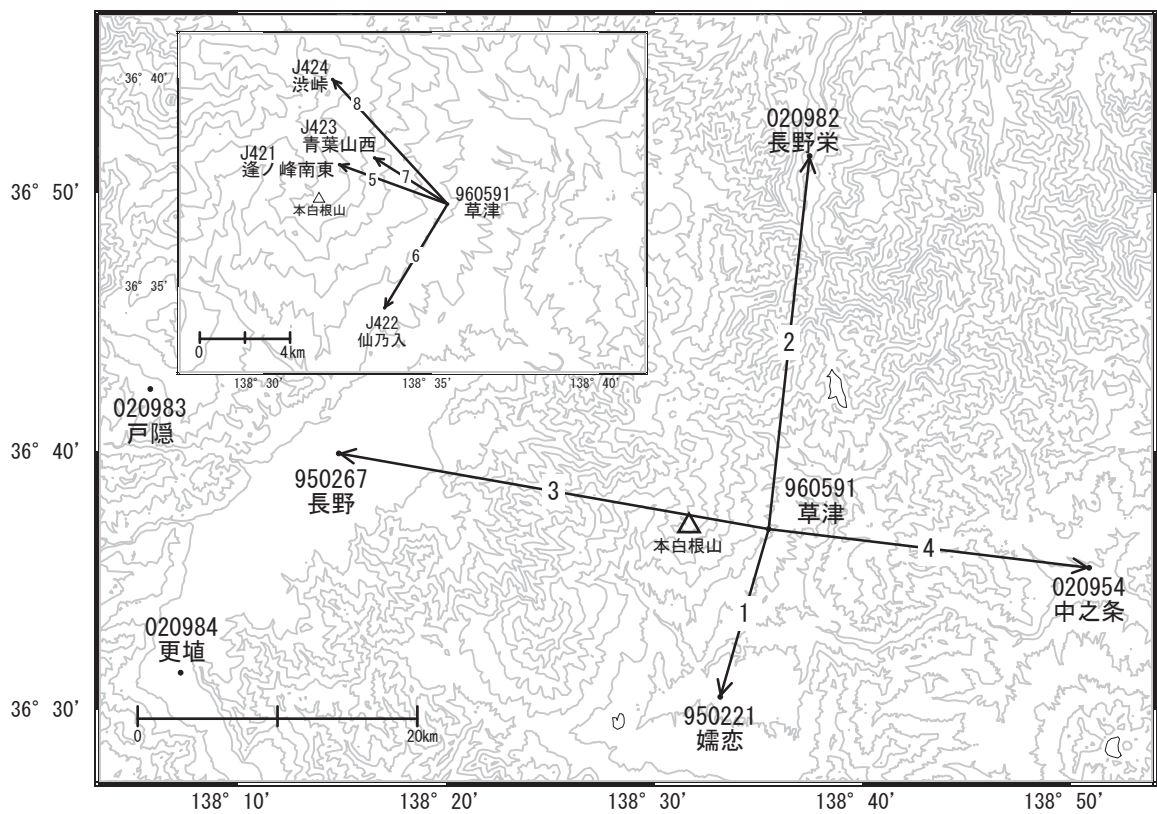
謝辞

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。

草津白根山

G N S S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。

草津白根山周辺GEONET(電子基準点等)による連続観測基線図



草津白根山周辺の各観測局情報

点番号	点名	日付	保守内容	点番号	点名	日付	保守内容
960591	草津	20030112	アンテナ交換	950221	嬬恋	20030112	アンテナ交換
		20100215	レドーム取り外し・再取り付け			20050803	アンテナ交換
		20100107	受信機交換			20081029	受信機交換
		20120921	アンテナ交換			20081029	レドーム取り外し・再取り付け
		20150617	受信機交換			20120921	アンテナ交換・受信機交換
		20190725	伐採			20130610	受信機交換
020982	長野栄	20040311	ピラー改造	950267	長野	20191025	受信機交換
		20121115	アンテナ交換・受信機交換			20030217	アンテナ交換
		20131207	受信機交換			20060228	アンテナ交換
		20150201	アンテナ交換			20101222	レドーム取り外し・再取り付け
		20191018	受信機交換			20101222	受信機交換
						20121122	アンテナ交換
						20201125	二重管化
						20201126	アンテナ交換・レドーム交換
				020954	中之条	20040130	ピラー改造
						20121116	アンテナ交換・受信機交換

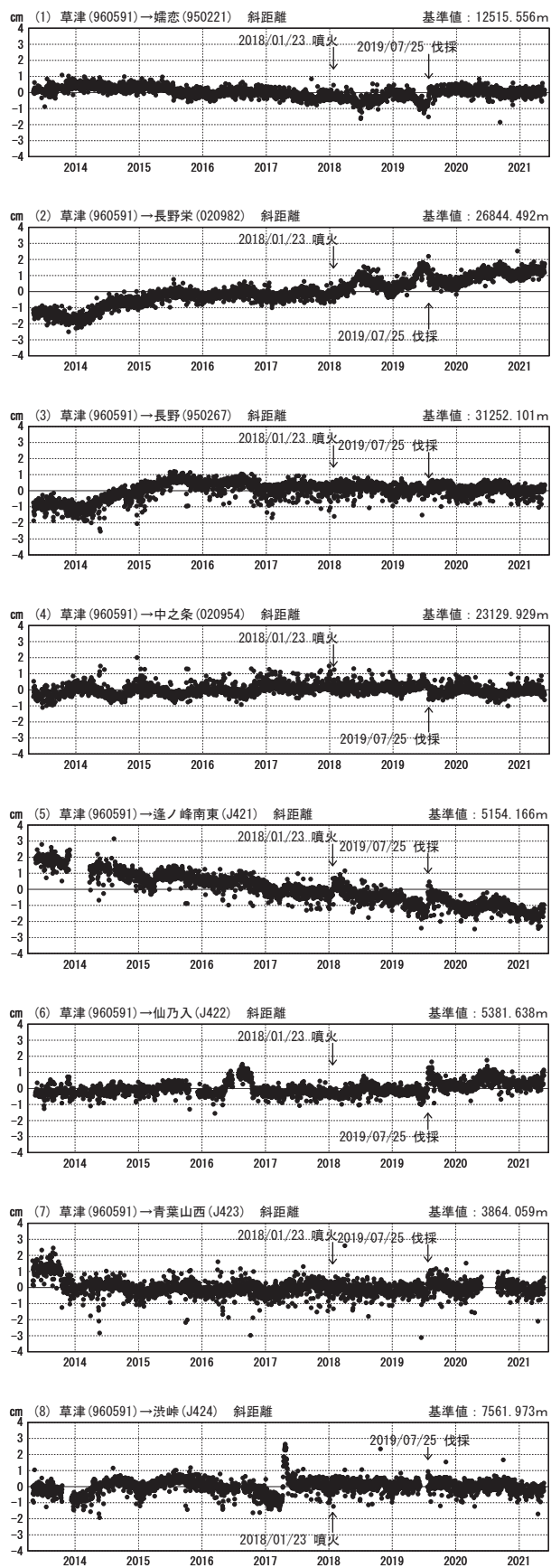
第 1 図 草津白根山周辺のGNSS連続観測基線図（上段）と観測局の保守履歴（下段）

第148回火山噴火予知連絡会

国土地理院・気象庁

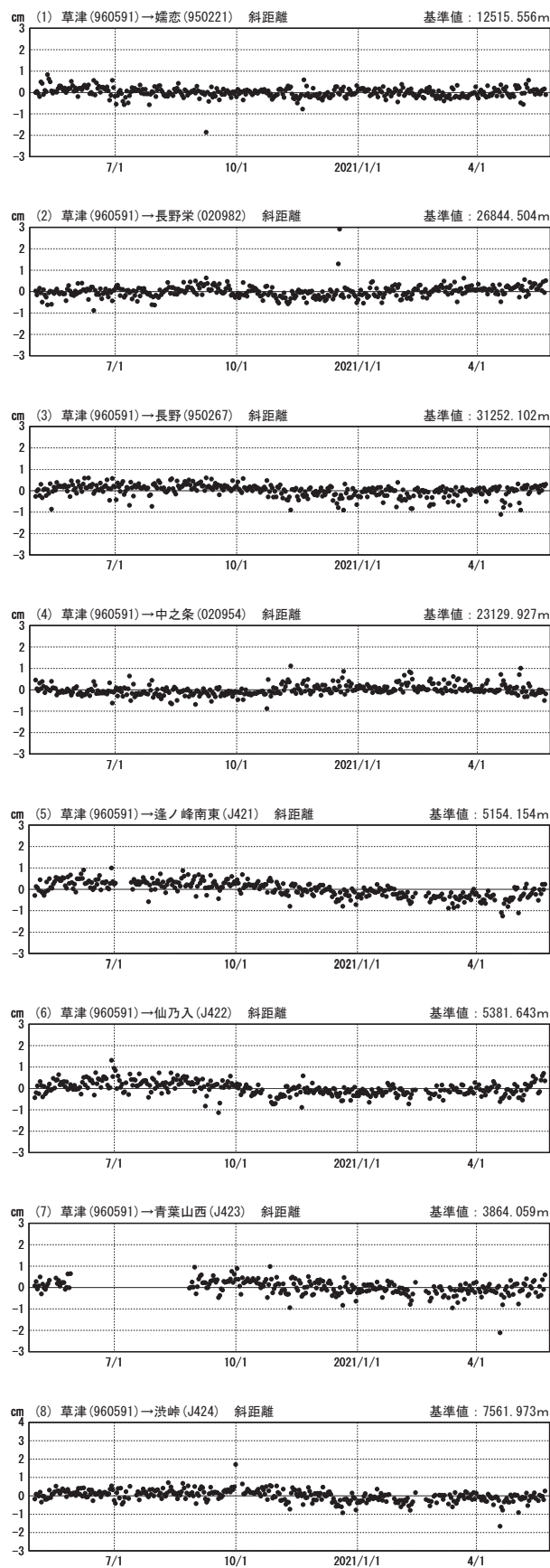
基線変化グラフ（長期）

期間：2013/05/01～2021/05/22 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]

※[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

国土地理院・気象庁

第2図 草津白根山周辺のGNSS連続観測による基線長変化グラフ

草津白根山

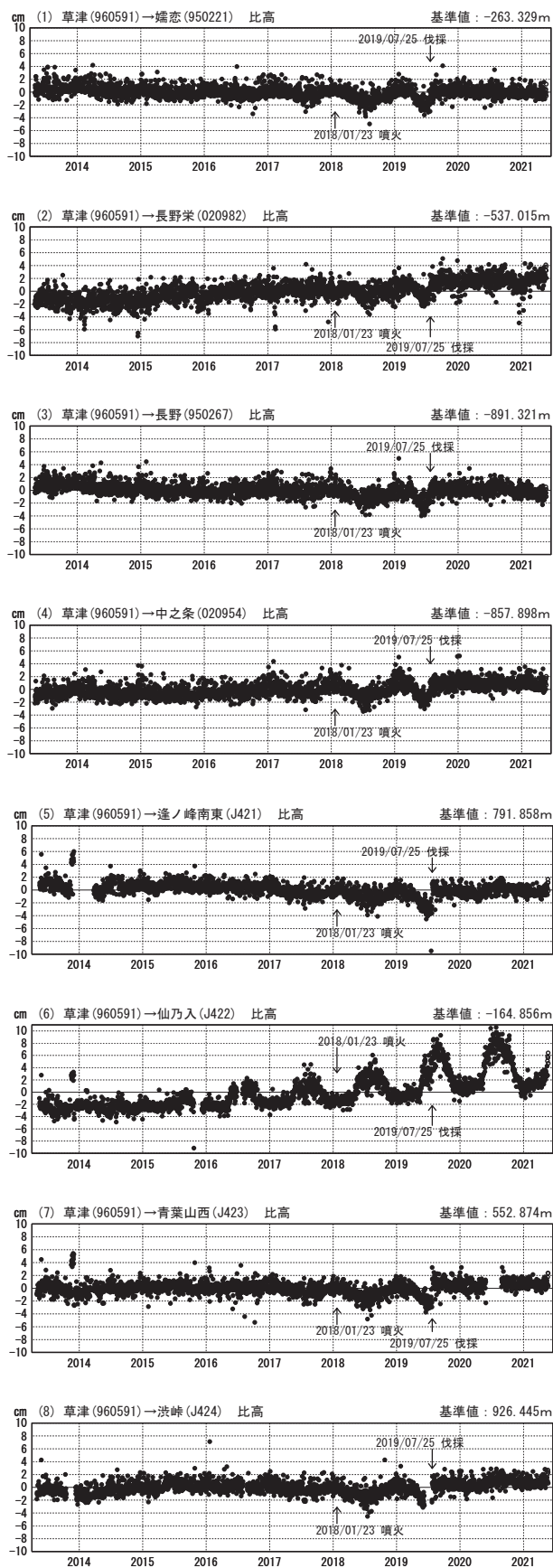
(左列：2013年5月～2021年5月、右列：2020年5月～2021年5月)

第148回火山噴火予知連絡会

国土地理院・気象庁

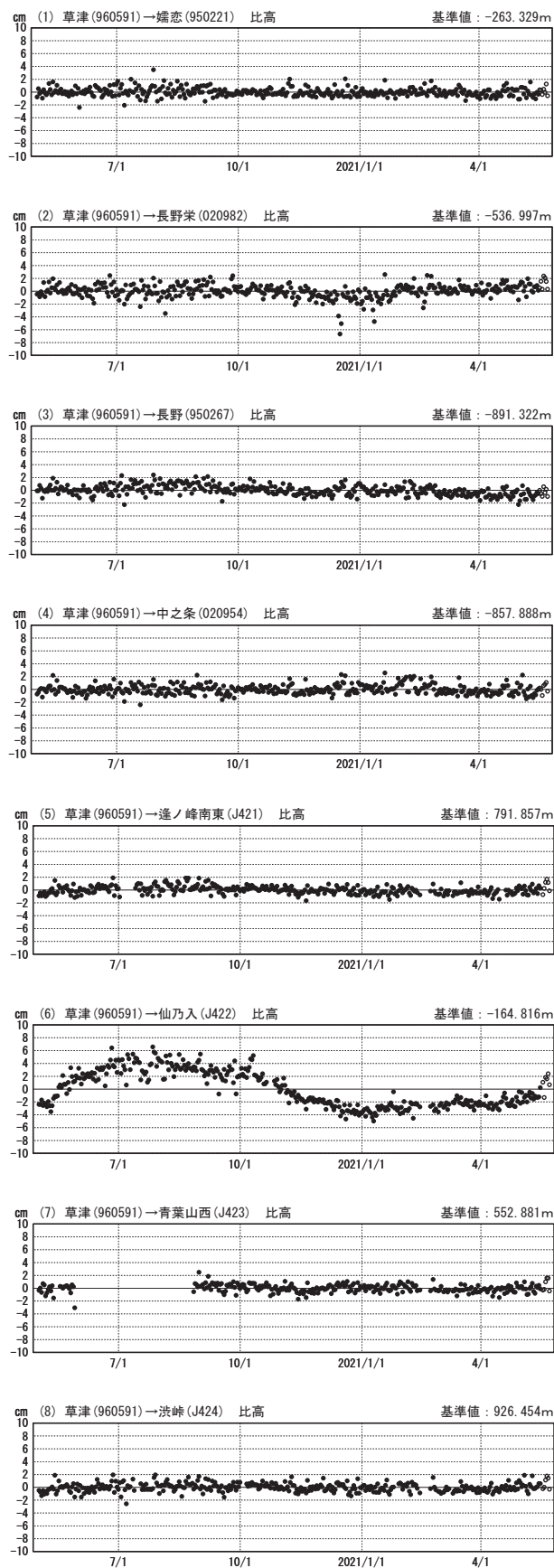
比高変化グラフ（長期）

期間：2013/05/01～2021/05/22 JST



比高変化グラフ（短期）

期間：2020/05/01～2021/05/22 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

国土地理院・気象庁

第3図 草津白根山周辺のGNSS連続観測による比高変化グラフ

草津白根山

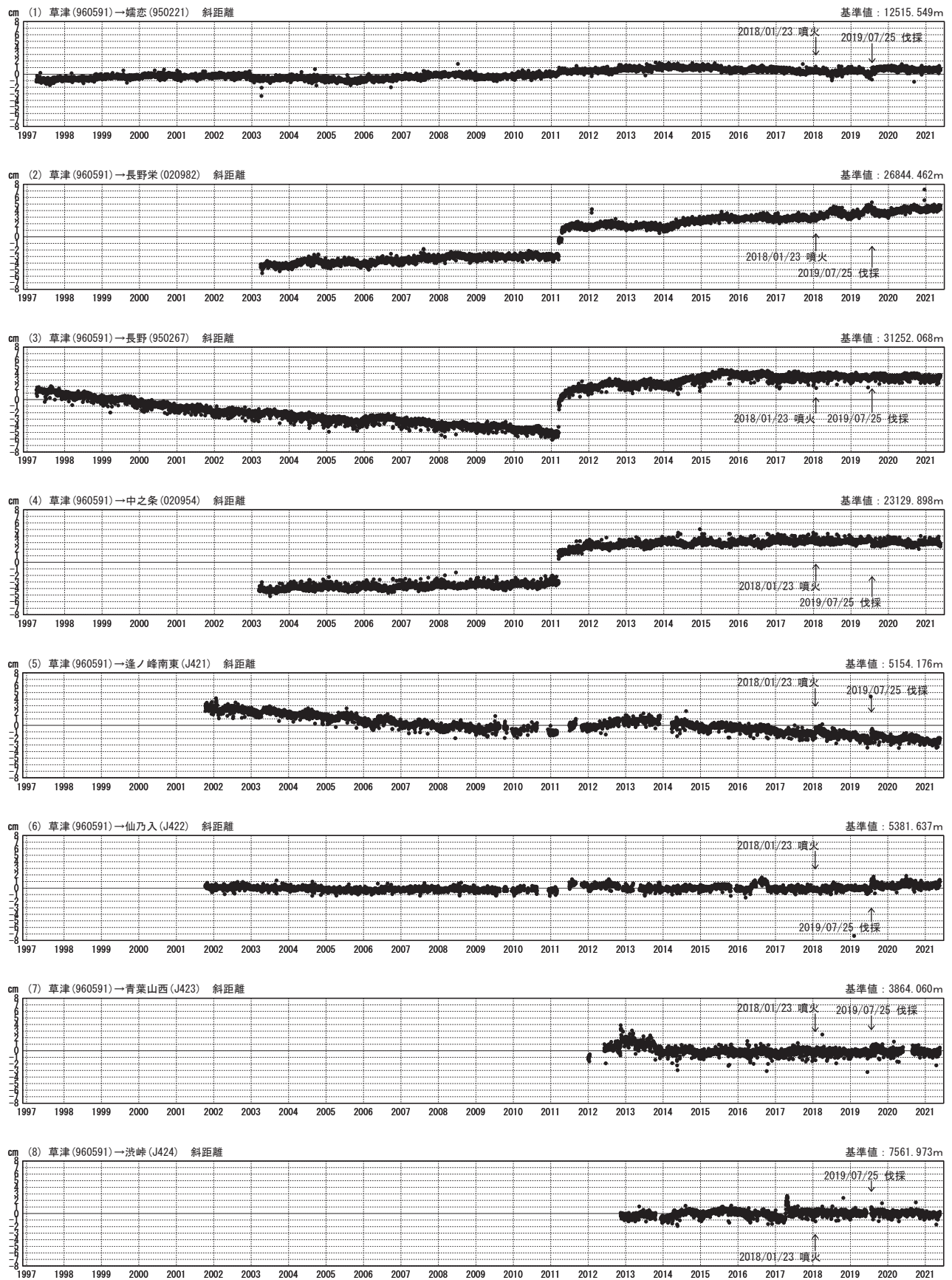
（左列：2013年5月～2021年5月、右列：2020年5月～2021年5月）

第148回火山噴火予知連絡会

国土地理院・気象庁

基線変化グラフ

期間：1997/01/01～2021/05/22 JST



国土地理院・気象庁

第4図 草津白根山周辺のGNSS連続観測による基線長変化グラフ（1997年1月～2021年5月）

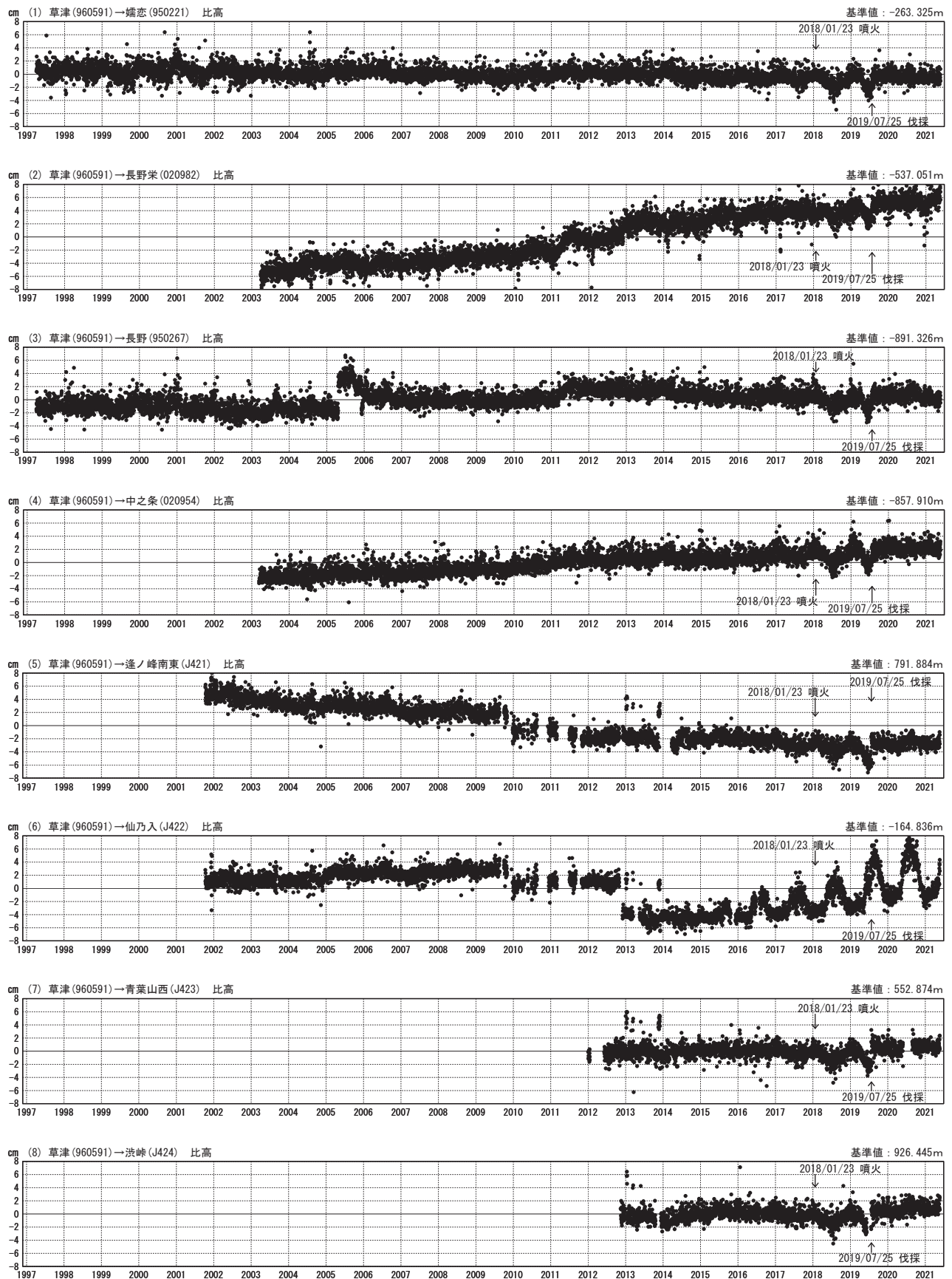
草津白根山

第148回火山噴火予知連絡会

国土地理院・気象庁

比高変化グラフ

期間：1997/01/01～2021/05/22 JST



●—[F3:最終解]

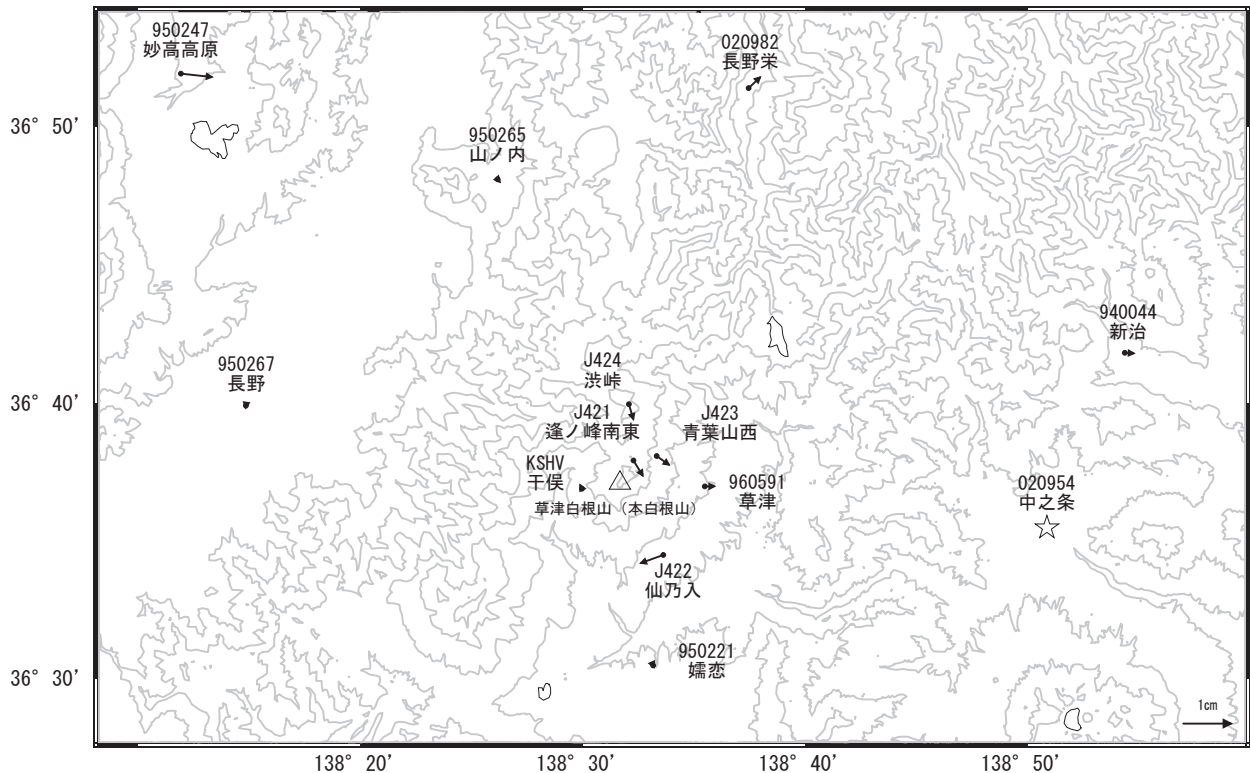
国土地理院・気象庁

第5図 草津白根山周辺のGNSS連続観測による比高変化グラフ（1997年1月～2021年5月）

草津白根山

草津白根山周辺の地殻変動(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]

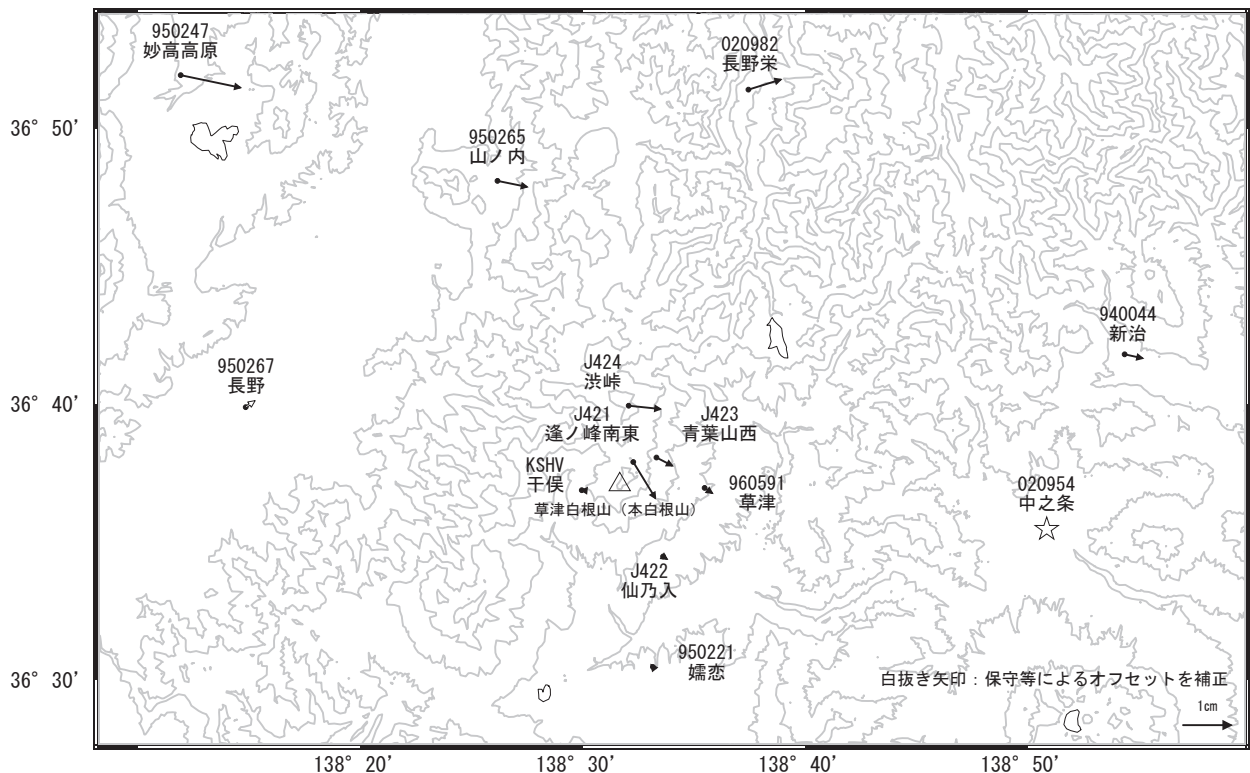


☆ 固定局: 中之条 (020954)

国土地理院・気象庁・防災科学技術研究所

草津白根山周辺の地殻変動(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: 中之条 (020954)

国土地理院・気象庁・防災科学技術研究所

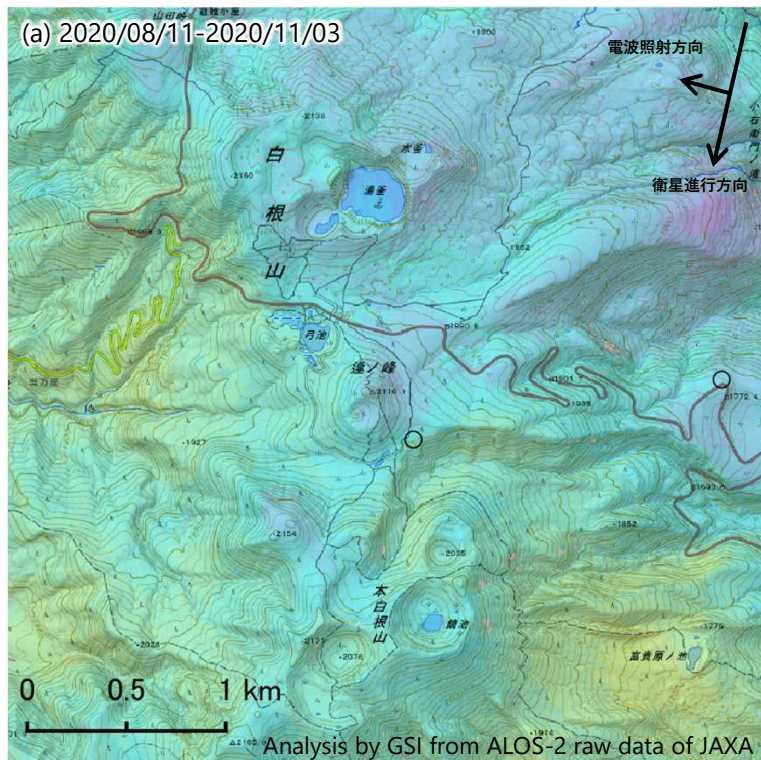
第6図 草津白根山周辺の電子基準点・気象庁GNSS観測点の統合解析による水平変動ベクトル図

(上段: 2021年2月~2021年5月、下段: 2020年5月~2021年5月)

草津白根山

草津白根山のSAR干渉解析結果について

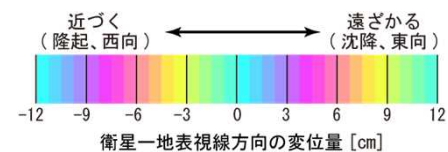
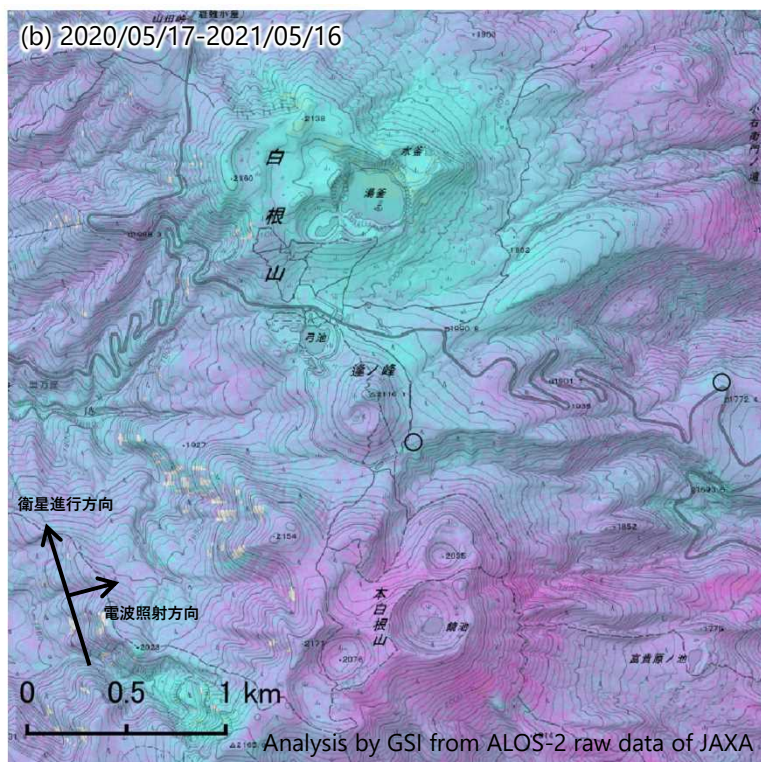
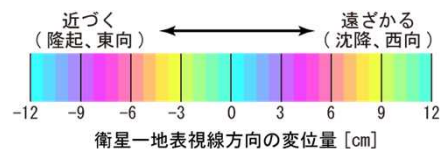
ノイズレベルを超える変動は見られません。



	(a)	(b)
衛星名	ALOS-2	ALOS-2
観測日時	2020/08/11 2020/11/03 11:50頃 (84日間)	2020/05/17 2021/05/16 23:38頃 (364日間)
衛星進行方向	南行	北行
電波照射方向	右(西)	右(東)
観測モード*	U-U	U-U
入射角	37.5°	32.3°
偏波	HH	HH
垂直基線長	- 42m	- 11m

* U：高分解能(3m)モード

○ 国土地理院以外のGNSS観測点



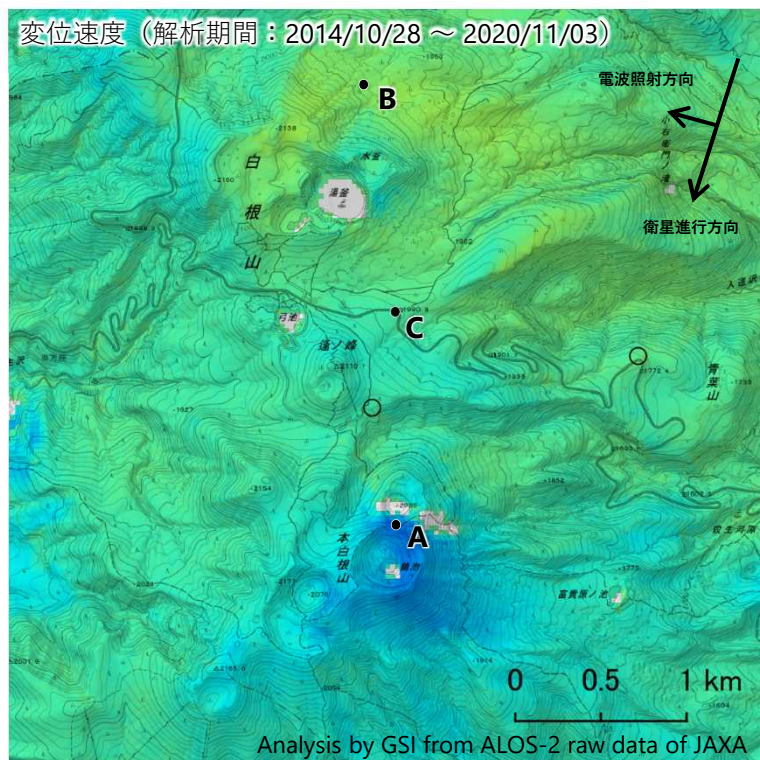
背景：地理院地図 標準地図・陰影起伏図・傾斜量図

第7図 「だいち2号」 PALSAR-2による草津白根山周辺地域の解析結果

草津白根山

草津白根山の干渉SAR時系列解析結果（南行）

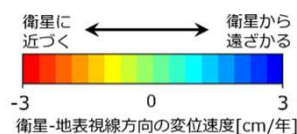
本白根山の地点Aでは、長期的には衛星から遠ざかる変動が見られますが、2019年以降は鈍化しています。



衛星名	ALOS-2
観測期間	2014/10/28 ～ 2020/11/03 (2198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	37.5°
偏波	HH
データ数	21
干渉ペア数	56

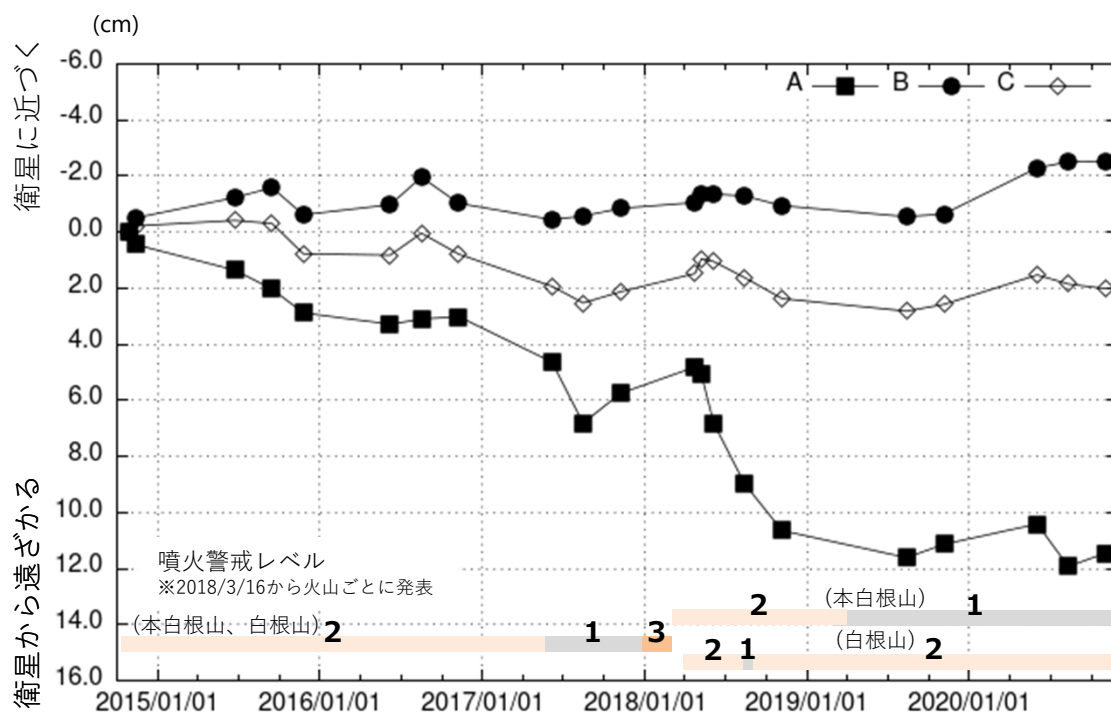
* U：高分解能(3m)モード

○ 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 ※参照点は電子基準点「草津」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

草津白根山

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。

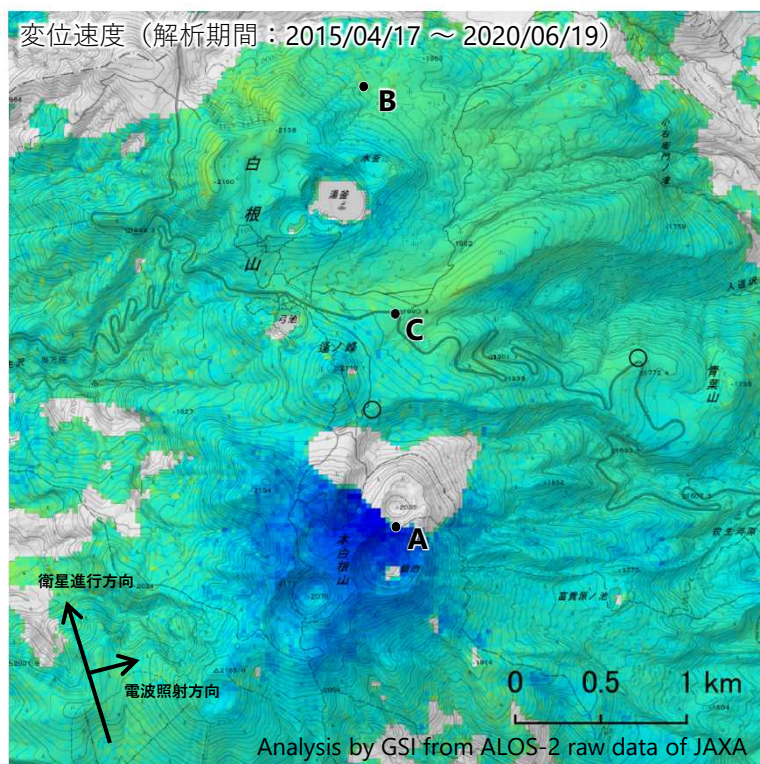
第8図 草津白根山の干渉SAR時系列解析結果

(上段) 変位速度の分布 (2014年10月～2020年11月)

(下段) 変動の時系列データ (2014年10月～2020年11月)

草津白根山の干渉SAR時系列解析結果（北行）

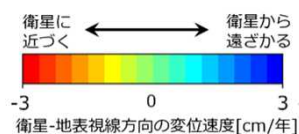
本白根山の地点Aでは、衛星から遠ざかる変動が見られます。



衛星名	ALOS-2
観測期間	2015/04/17 ～ 2020/06/19 (1890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	42.6°
偏波	HH
データ数	10
干渉ペア数	14

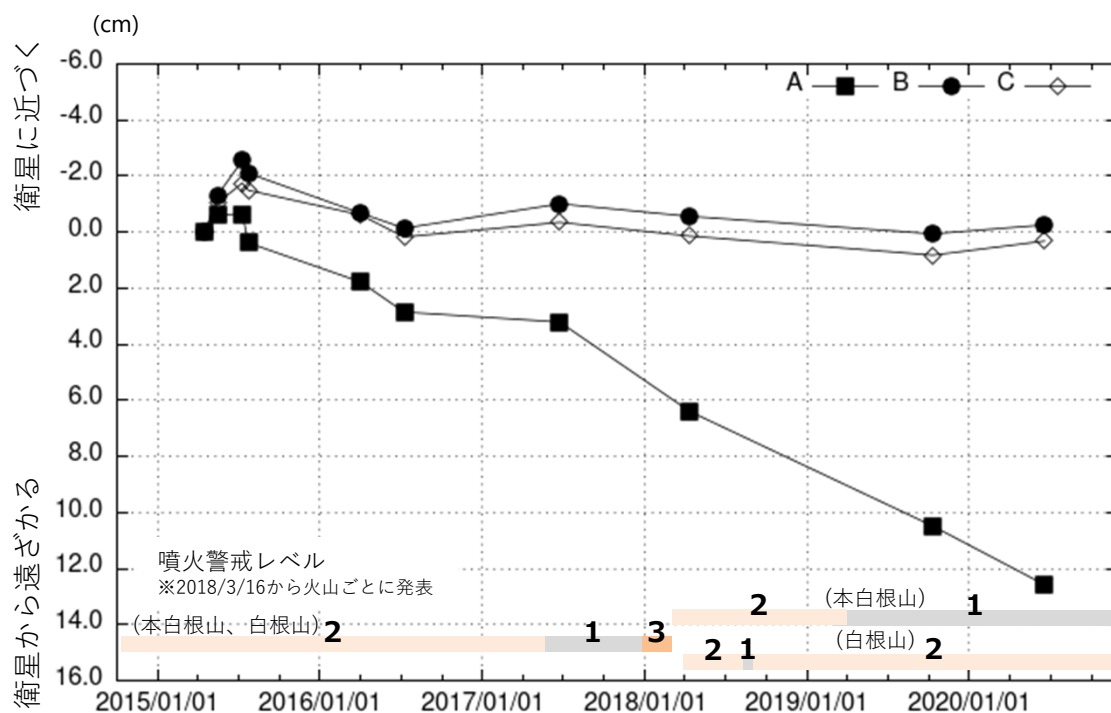
* U：高分解能(3m)モード

○ 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 ※参照点は電子基準点「草津」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

草津白根山

本解析で使用了データの一部分は、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。

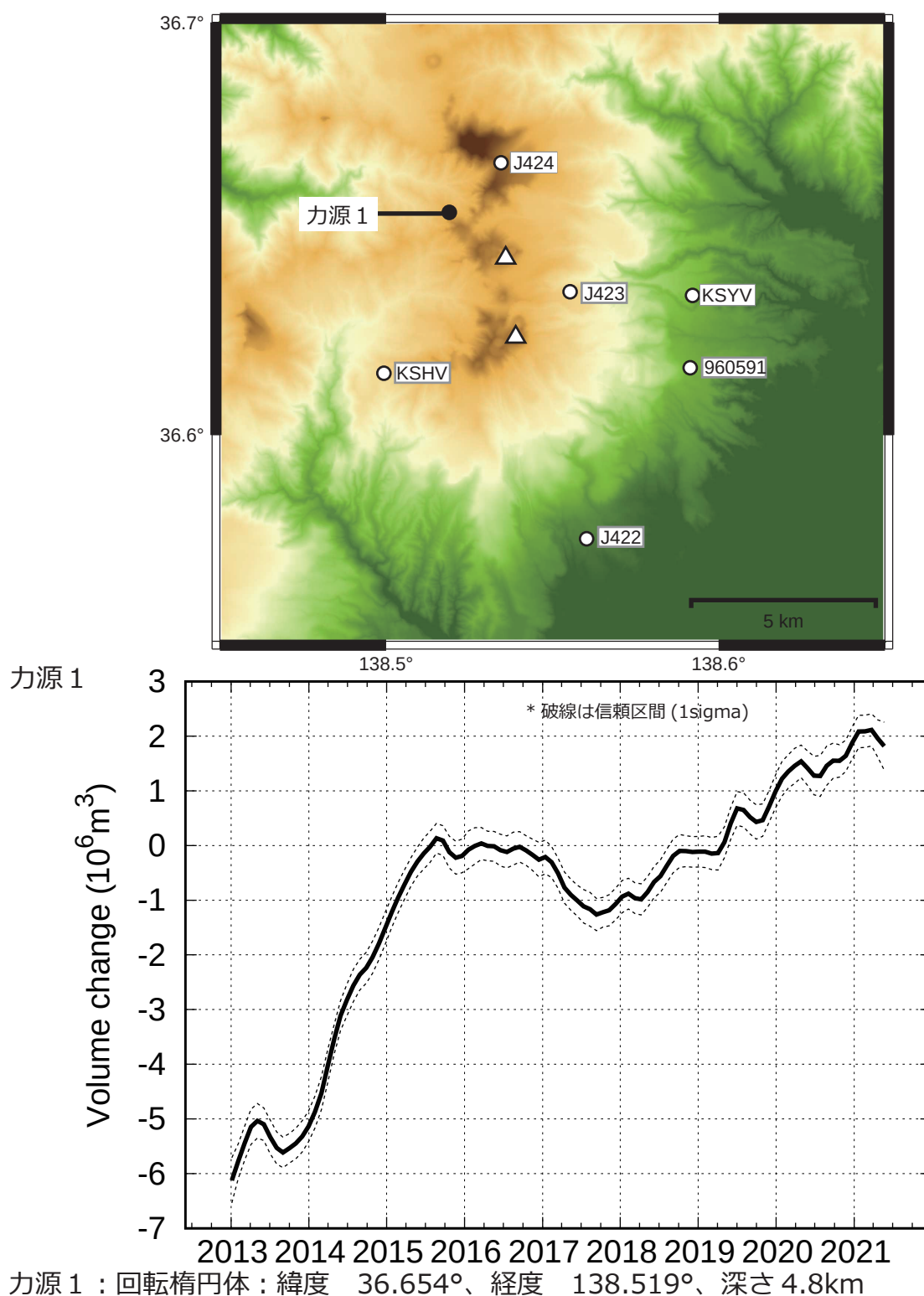
第9図 草津白根山の干渉SAR時系列解析結果

(上段) 変位速度の分布 (2015年4月～2020年6月)

(下段) 変動の時系列データ (2015年4月～2020年6月)

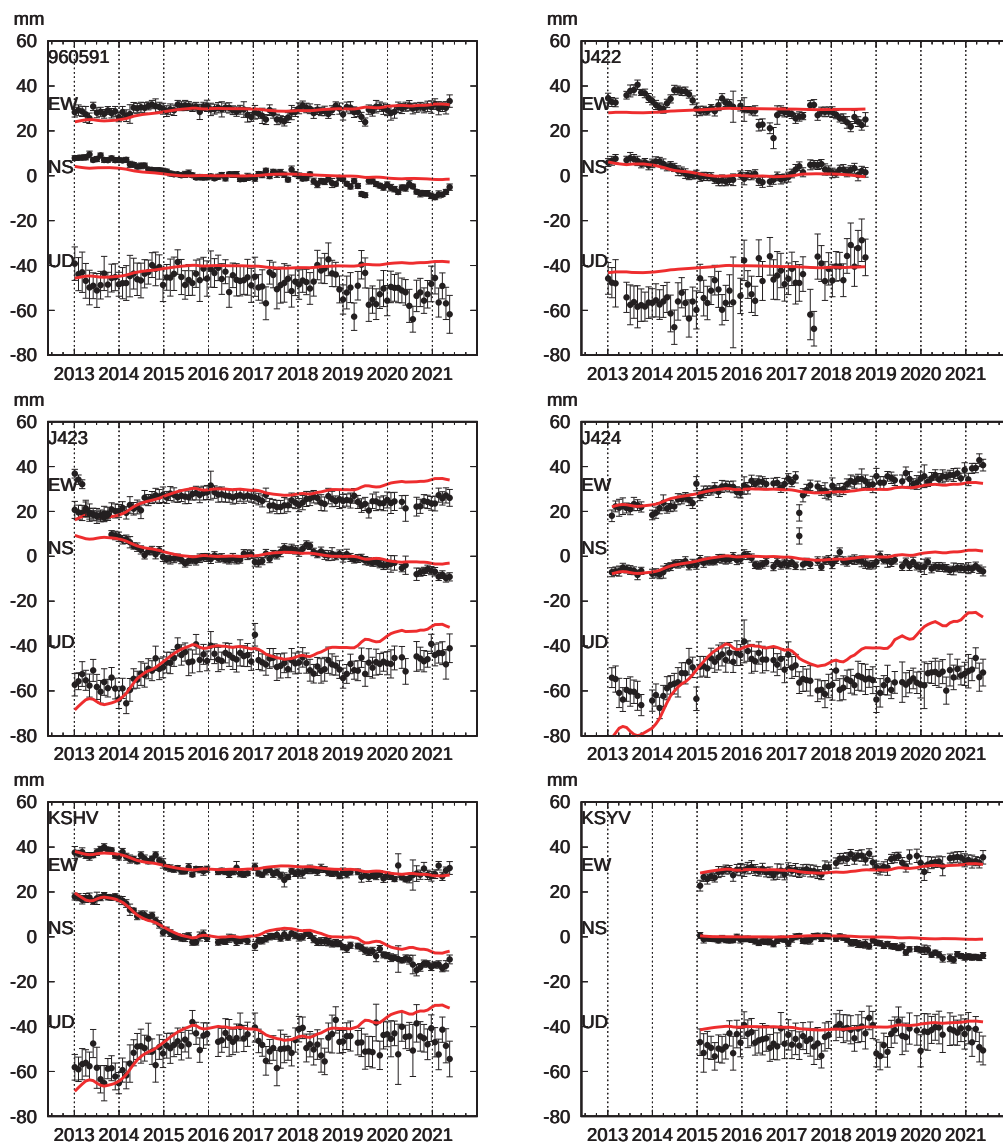
草津白根山の地殻変動力源の位置と体積変化

力源 1 の体積変化は 2021 年初頭から鈍化している



第10図 線形インバージョンによる草津白根山の地殻変動力源の体積変化推定
 上段：推定に用いた観測点（白丸）と地殻変動力源の位置（黒丸）
 下段：推定された地殻変動力源の体積の時間変化

草津白根山周辺の観測点の座標時系列（黒丸）と計算値（赤線）



- * 固定局 020954（中之条）
- * EW, NS, UD は東西、南北、上下成分を表す
- * 電子基準点の保守等による変動、周期成分、テクトニックな成分は補正済
- * 時系列は 30 日平均、誤差は 1sigma
- * 使用データ：2013/01/01-2021/5/29 (MADOC PPP 解)

第11図 推定された力源による地殻変動計算値（赤実線）と観測値（黒点）の比較

湯釜および草津温泉・万座温泉の水質変化について

湯釜湖水の近年の組成変化

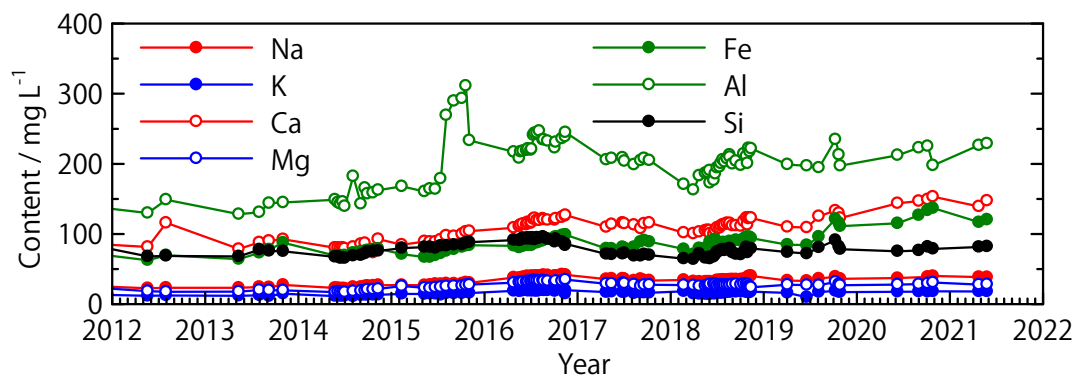


図1 湯釜湖水の溶存陽イオンおよびケイ素濃度の変化（2012 年以降）

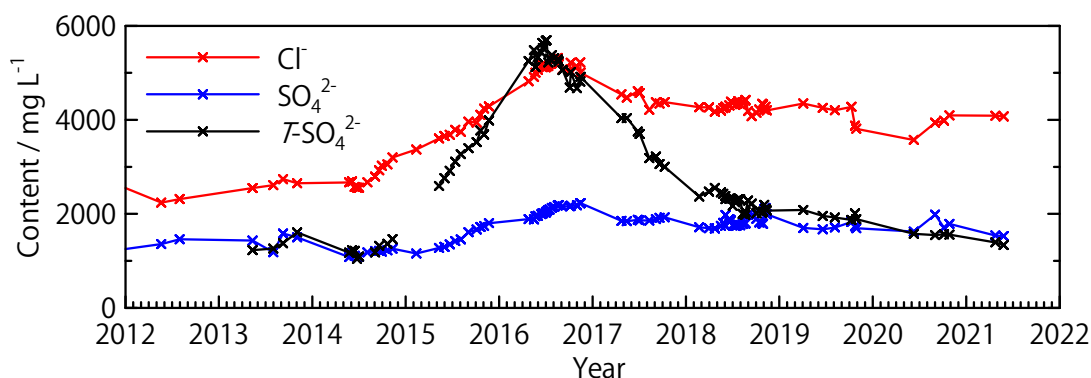


図2 湯釜湖水の溶存陰イオン濃度の変化（2012 年以降）

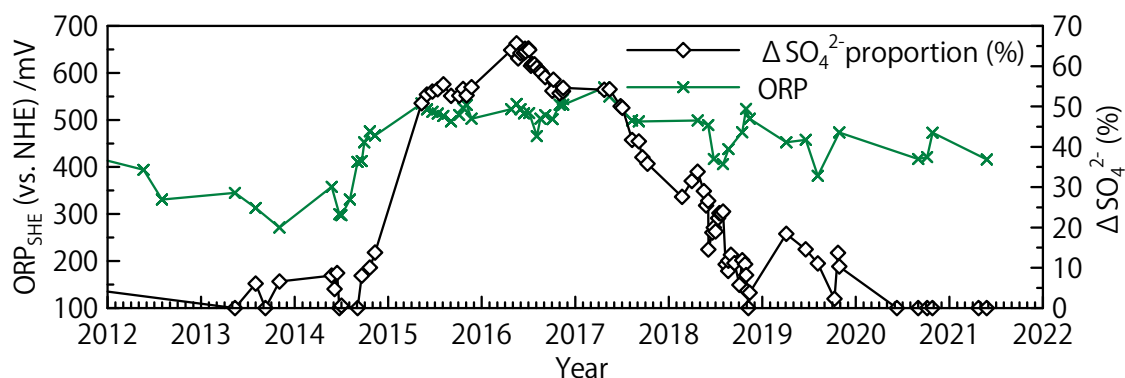


図3 湯釜湖水の ORP と ΔSO_4^{2-} 割合の変化（2012 年以降）

草津白根山（白根山(湯釜付近)）

- 湯釜湖水では、Cl 濃度、 $T\text{-SO}_4$ 濃度（全溶存硫黄化学種濃度）、 ΔSO_4 割合（全溶存硫黄化学種濃度に占めるポリチオン酸の割合）が火山活動評価の指標として有用と考えられる。
- 湯釜湖水の ORP（酸化還元電位）の変化は、湖底噴気の $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の変化を反映し、ポリチオン酸イオンの生成/分解を支配していると想定される。
- ORP は 2018 年頃から低下傾向にあり、2020 年以降はポリチオン酸の存在が認められない（ ΔSO_4 が 0 %）ことから、湖底噴気の $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比が低下し、ポリチオン酸の生成しえない状態にあると思われる。
- 一方で 2018 年ごろから陽イオン成分濃度が穏やかに上昇しており、湖底から塩濃度の高い湧水の供給が考えられる。

湯釜湖水の長期的組成変化

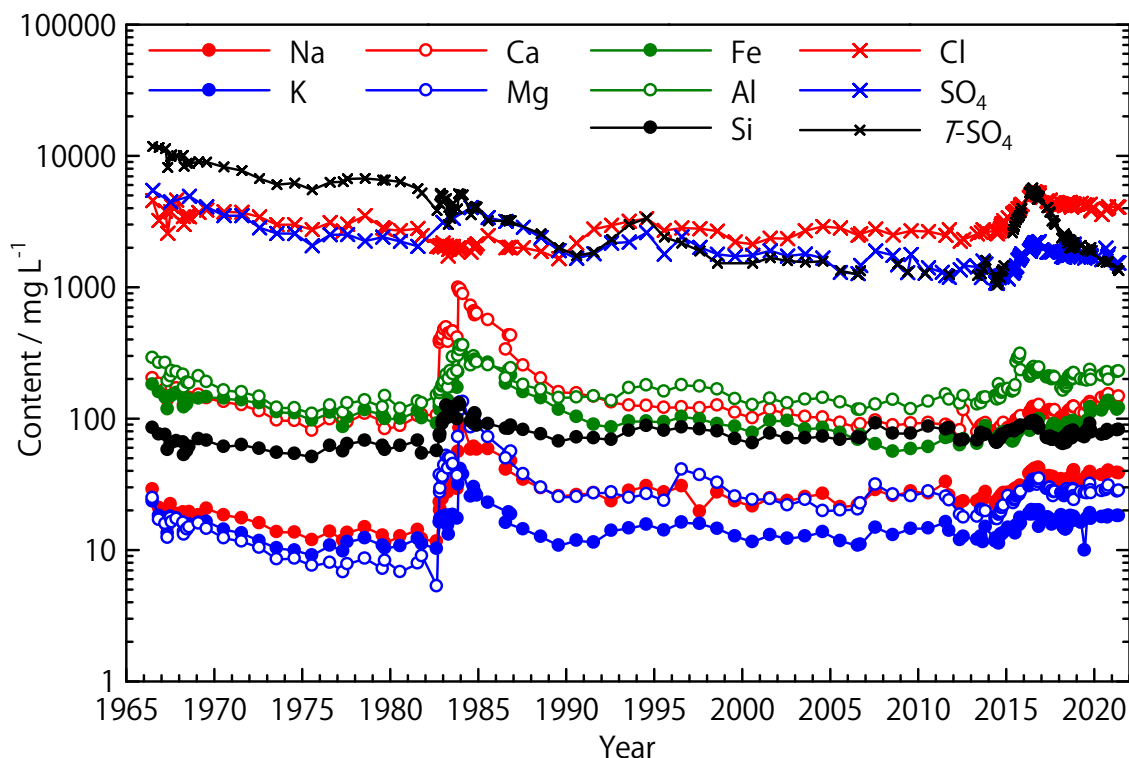


図 4 湯釜湖水の 1965 年以降の化学組成変化（濃度軸は対数プロット）

- 1982 年から 1983 年の噴火において大きな陽イオン成分濃度の上昇が見られたが、陰イオン濃度の変化は小さかった。一方、2014 年からの活動期においては、陰イオン成分の顕著な濃度上昇に付随して陽イオン成分濃度の上昇が見られた。

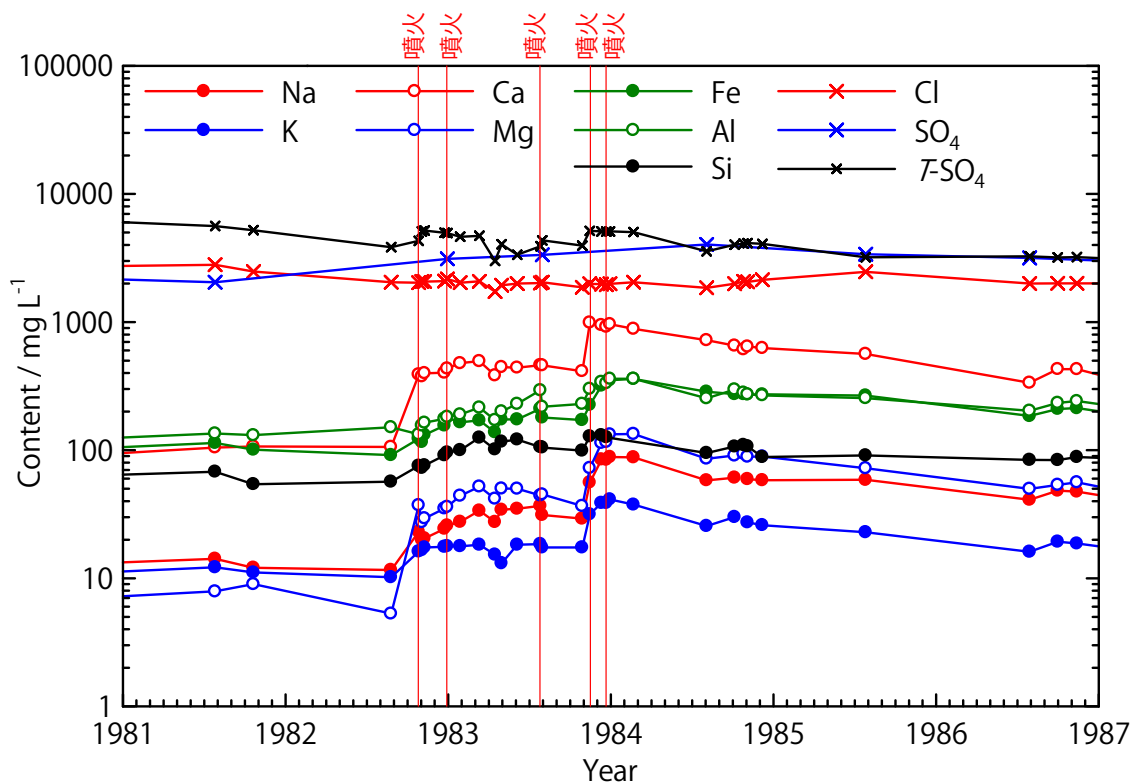


図5 湯釜湖水の1981年から1986年の化学組成変化（濃度軸は対数プロット）

- 1982～1983年の湯釜での噴火活動時には、噴火に先立つ明瞭な湖水組成の変化は認められない。
- 何れも噴火イベントの直後に陽イオン濃度が上昇し、陰イオンでは塩化物イオン濃度は変化せず、硫酸成分のみ上昇が見られる。このことから、噴火イベントによって湖底から塩濃度の高い、酸性変質鉱物を含む泥漿水が湖水に供給されたために成分濃度の上昇が生じたと考えられる。

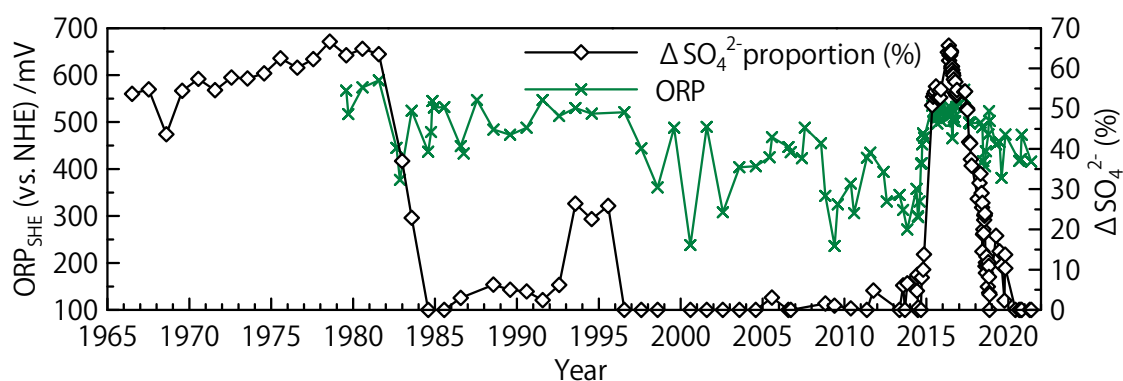


図6 湯釜湖水の1965年以降のORPと ΔSO_4^{2-} 割合の変化

- 湯釜周辺での活動レベルが高まったと考えられる1982年の噴火前、1990年代、2014年からの数年は、高いORP、 ΔSO_4^{2-} 割合を示し、湖底噴気の組成・fluxの変化を反映したものと考えられる。

草津白根山（白根山(湯釜付近)）

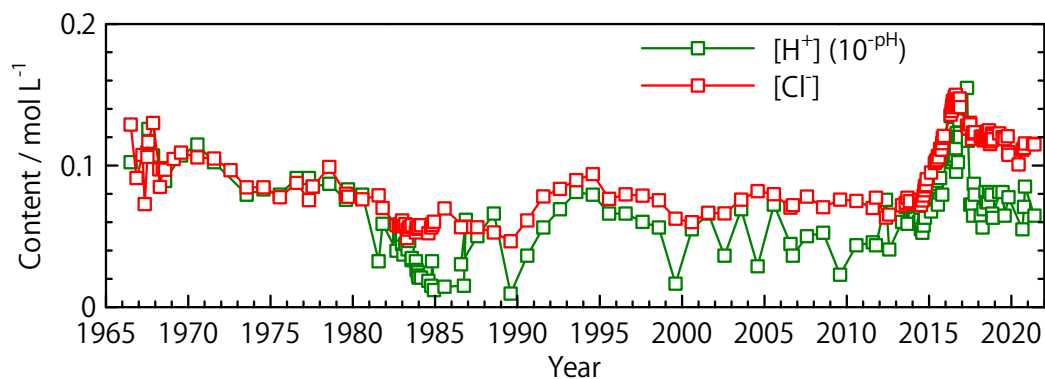


図7 湯釜湖水の1965年以降のpHと塩化物イオン濃度との関係

- 湯釜湖水の pH と塩化物イオン濃度の変化は連動していることから、pH の変化は湖底噴気からの HCl の flux に支配されているように見える。
- 活動期には水素イオン濃度 ($[H^+]=10^{-pH}$) が塩化物イオン濃度 $[Cl^-]$ とほぼ等モル関係にあるが、非活動期においては $[Cl^-] > [H^+]$ となる。

草津温泉（万代鉱源泉）の水質変化

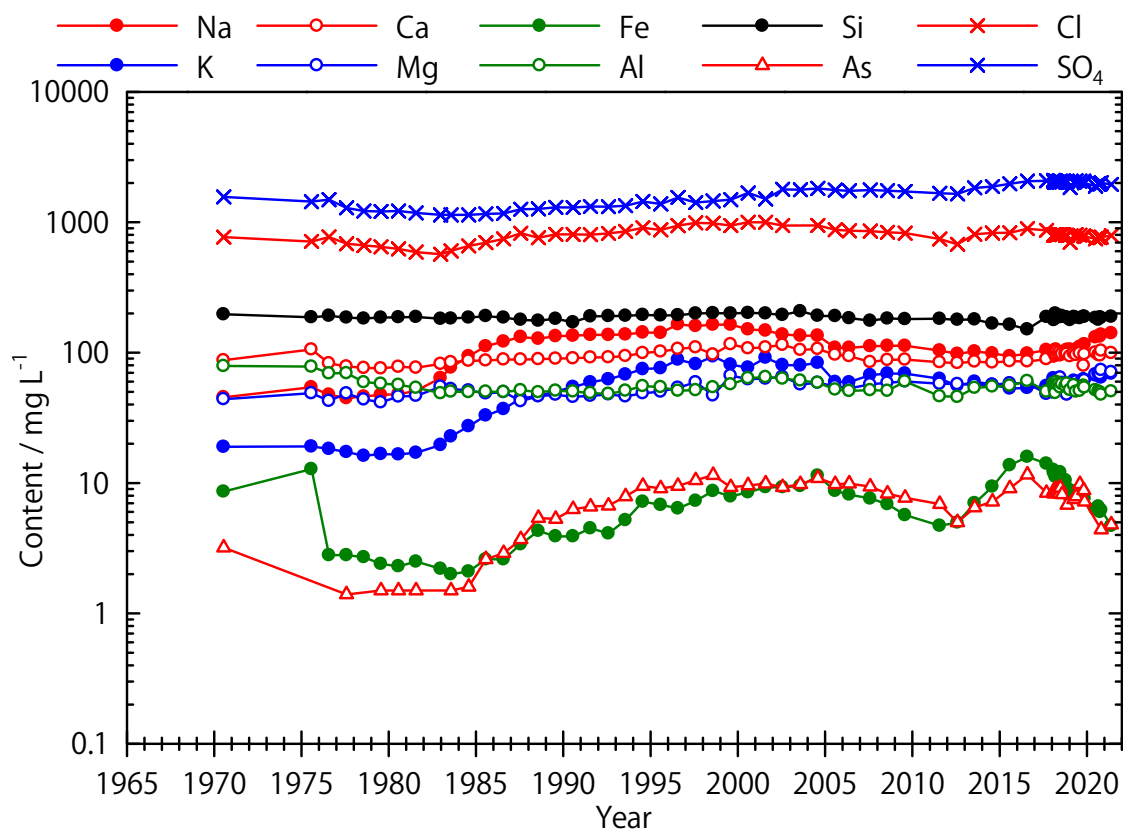


図8 万代鉱源泉の化学組成変化（濃度軸は対数プロット）

草津白根山（白根山(湯釜付近)）

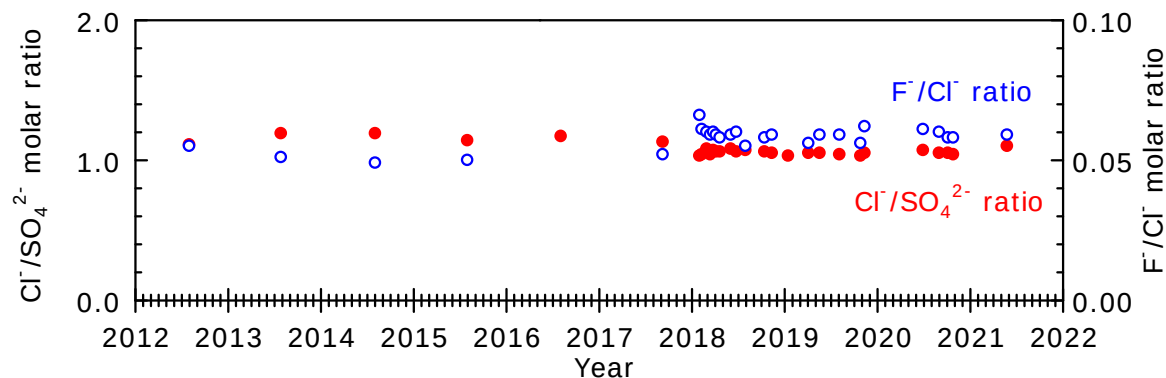


図9 万代鉱源泉の陰イオン濃度比の変化（2012 年以降）

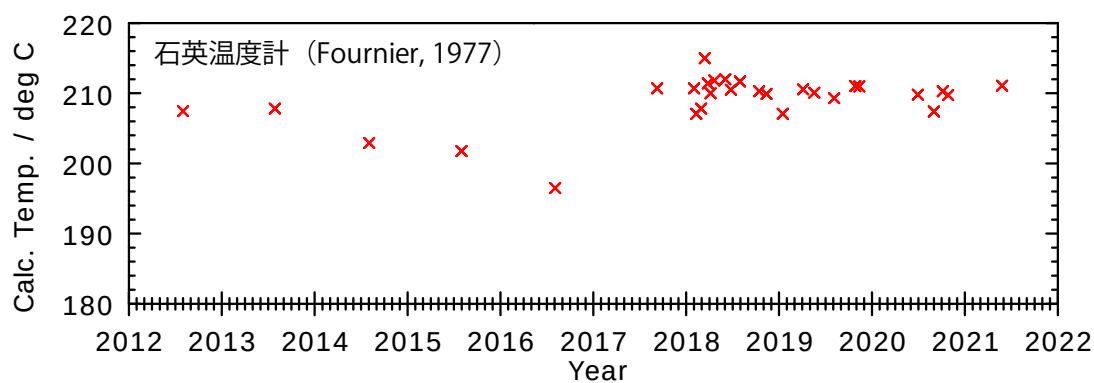


図10 万代鉱源泉の石英温度計*による推定リザーバー温度（2012 年以降）

* Fournier (1977) Geothermics, 5, pp.41-55.

- 万代鉱源泉では、2012 年頃から塩化物イオン、硫酸イオン、鉄、砒素の濃度上昇が見られた。
- 2018 年の本白根山の噴火後、アルカリ金属成分濃度が上昇傾向にある。
- 2018 年本白根山噴火後に F/Cl 比の上昇が見られ、現在も噴火前より高い比を示している。
- 万代鉱源泉に地化学温度計（石英温度計）を適用すると、2013 年頃から熱水系の温度低下が見られ、その後、噴火前年の 2017 年大きな温度上昇が認められた。2017 年以降、計算された熱水系の温度は約 210 °C で安定している。

【参考】草津温泉（草津湯畑源泉）の水質変化

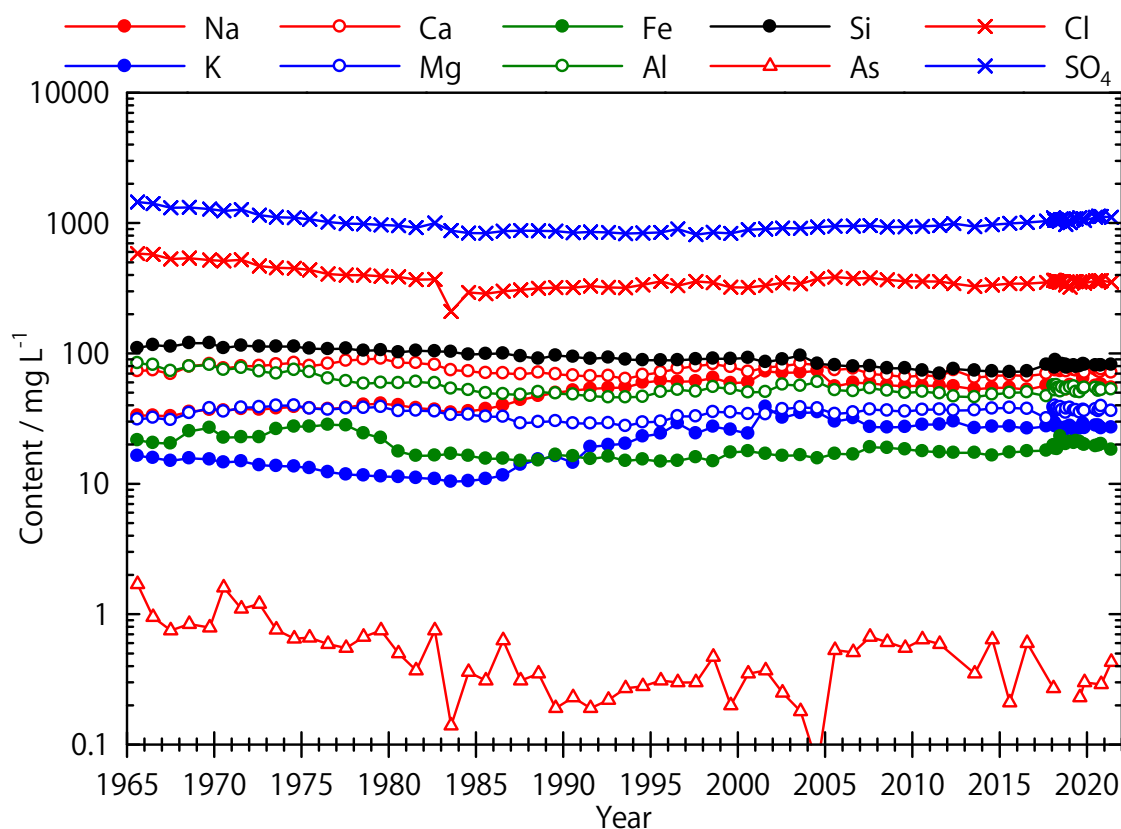


図 11 草津湯畑源泉の化学組成変化（濃度軸は対数プロット）

【参考】万座温泉（万座湯畑源泉）の水質変化

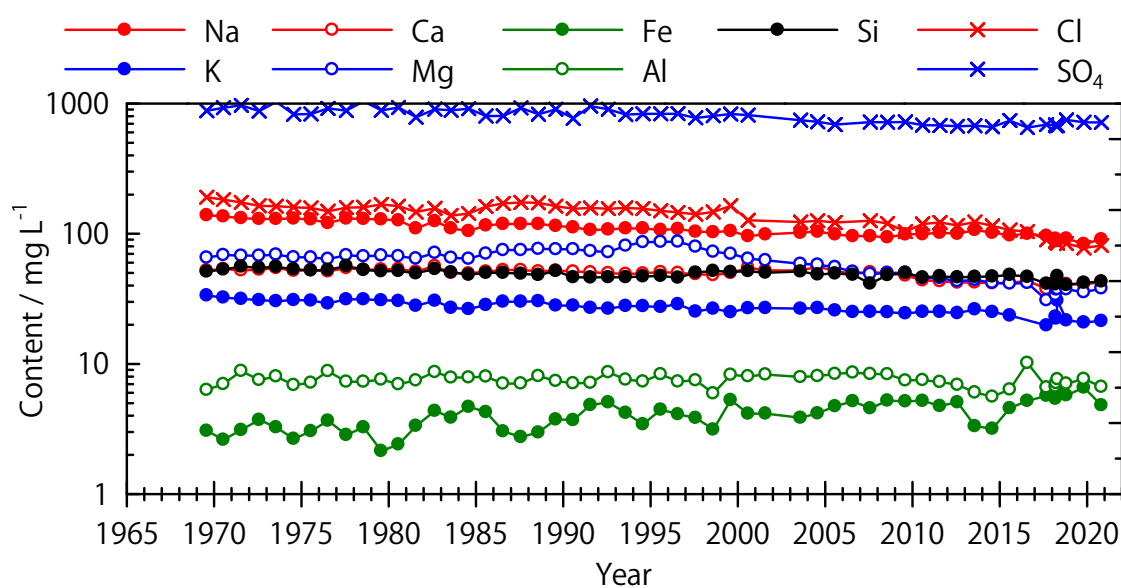


図 12 万座湯畑源泉の化学組成変化（濃度軸は対数プロット）

草津白根山（白根山（湯釜付近））

【参考】草津温泉・万座温泉の水温変化

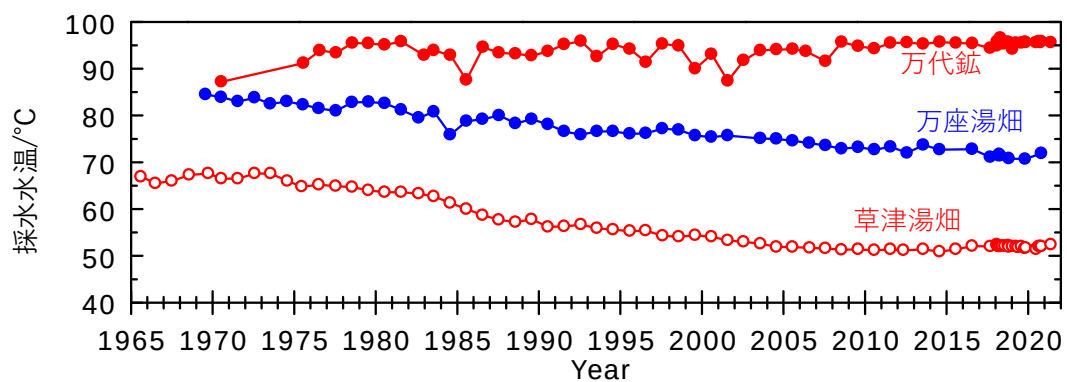


図 13 草津温泉・万座温泉の湧出温度の変化

以上

草津白根山噴気の化学組成（2014 年 7 月～2021 年 4 月）

Chemical composition of the fumarolic gases sampled at Kusatsu-Shirane volcano, Japan (July 2014 to April 2020)

1. 概要

2014 年 7 月から 2021 年 4 月にかけて、草津白根山で繰り返し噴気を採取・分析した。白根山山頂北側の地熱地帯で採取された 3 つの噴気で、2020 年 6 月から 8 月にかけてドライガス中の H_2S 濃度の急激な低下、 $\text{He}/\text{H}_2\text{S}$ 比および $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の急激な上昇が見られたが、この傾向は 2020 年 8 月から 10 月にかけて反転した。2020 年 10 月から 2021 年 4 月にかけて $\text{He}/\text{H}_2\text{S}$ 比および $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比は緩やかに低下した。これらの観測結果から、湯釜直下に存在する熱水溜りに対し供給されるマグマ成分の流量は、低下もしくは停滞の傾向にあると推定される。

2. 噴気の採取・分析

草津白根山の湯釜火口の北山麓に広がる地熱地帯において、図 1 に示す 3 つの噴気孔 W, C, E で噴気を採取した。また東山麓の殺生河原 (S) と西山麓の万座干保 (M) でも噴気を採取分析した。これらの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 を封入しておいた。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。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。噴気の化学分析は主に、小沢の方法[1]に従った。

3. 結果・考察

図 2 に示されるように、噴気 W, C, E について、 H_2O を除いた噴気成分 (=ドライガス) 中の H_2S 濃度は、2017 年 11 月に 22% を超える値に達した後、2018 年 5 月には全ての噴気で H_2S 濃度は 18~19% 以下に低下し 10 月まで低い値を維持したが 2020 年 6 月に向けて再び上昇した。2020 年 6 月から 8 月にかけて急激な低下が起きたが、その傾向は維持されず、2020 年 8 月から 2021 年 4 月にかけて上昇する傾向を示している。既存の研究[2]によると、草津白根山では、ドライガスの H_2S 濃度が 10% 程度に低下すると火山活動が活発化し、噴火の可能性が高まる。図 2 に示される変化は、現時点で火山活動が活発化する傾向にないことを示唆する。

図 3 に示されるように、 $\text{He}/\text{H}_2\text{S}$ 比は 2019 年 5 月から 10 月にかけて上昇し、これは 2019 年 9 月から始まった地震活動の活発化に対応していると考えられる。 $\text{He}/\text{H}_2\text{S}$ 比は 2020 年 6 月には、2019 年 5 月のレベルまで低下したが、2020 年 6 月から 8 月にかけて急激に上昇した。しかし、その傾向は維持されず、2020 年 8 月から 10 月にかけて低下し、2020 年 10 月から 2021 年 4 月にかけては、緩やかな低下あるいは停滞の傾向にある。図 4 に示される $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の時間変化は、 $\text{He}/\text{H}_2\text{S}$ 比の時間変化に相似しており、2020 年 8 月から 2021 年 4 月にかけて低下傾向が継続している。 He や CO_2 はマグマに由来する成分、

H_2S は熱水系に由来する成分であり、図3 および図4 に示される変化は、2020 年 8 月から 2021 年 4 月にかけて、湯釜直下に存在する熱水溜りに供給されるマグマ成分の流量は、低下傾向にあることを示唆している。

5. 文献

- [1] 小沢竹二郎（1968）地球化学におけるガス分析法（I）. 分析化学, 17, 395-405.
- [2]. J. Ohsaka et al. (1980) Variation of chemical compositions in volcanic gases and waters at Kusatsu-Shirane volcano and its activity in 1976. Bull. Volcanol., 43, 207-216.

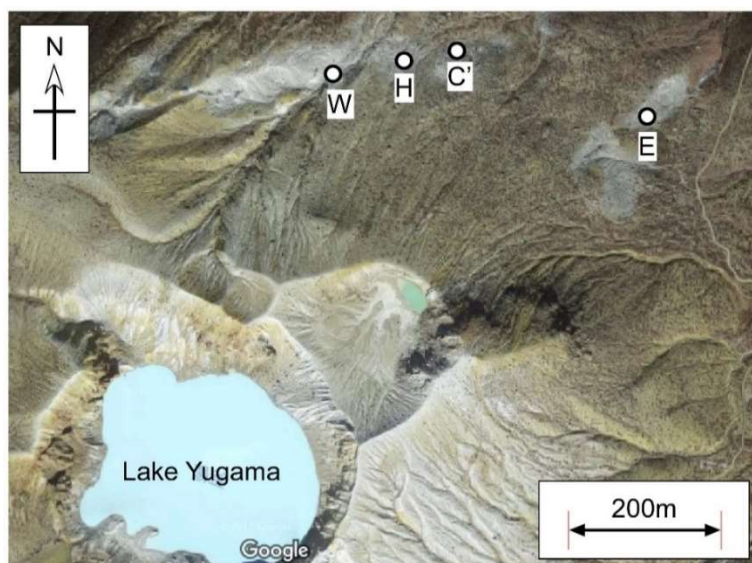


図1. 草津白根山山頂北側山麓噴気 W, C', E の位置. H は新たに生じた陥没孔（背景図として, GoogleMap を使用した）

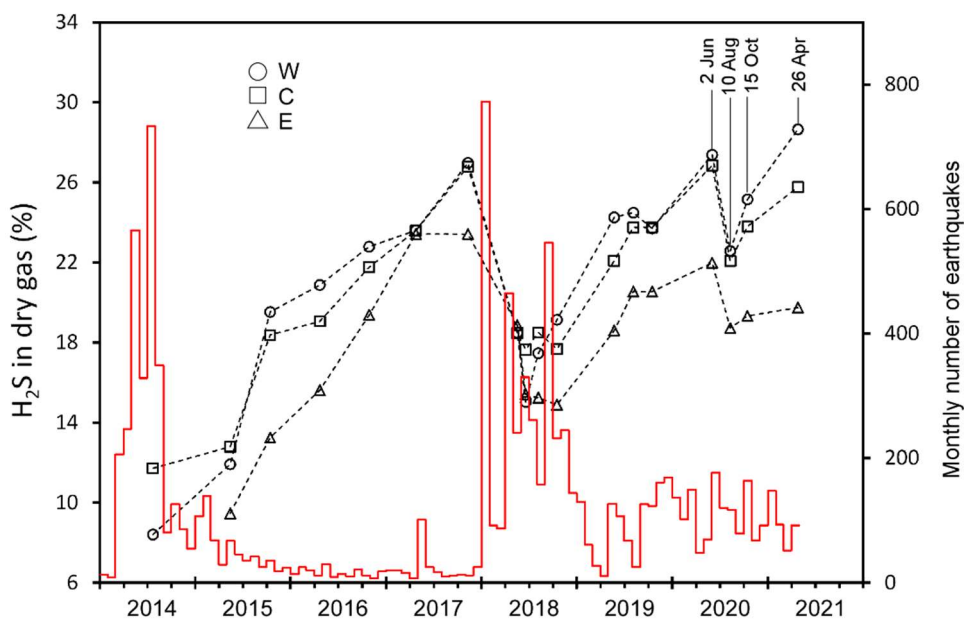


図2. H_2O を除いた成分（＝ドライガス）における H_2S 濃度の変化. 月別地震回数（白根山近傍）は気象庁の観測に基づく. 2018 年 1 月の地震は主に本白根山で発生した.

草津白根山

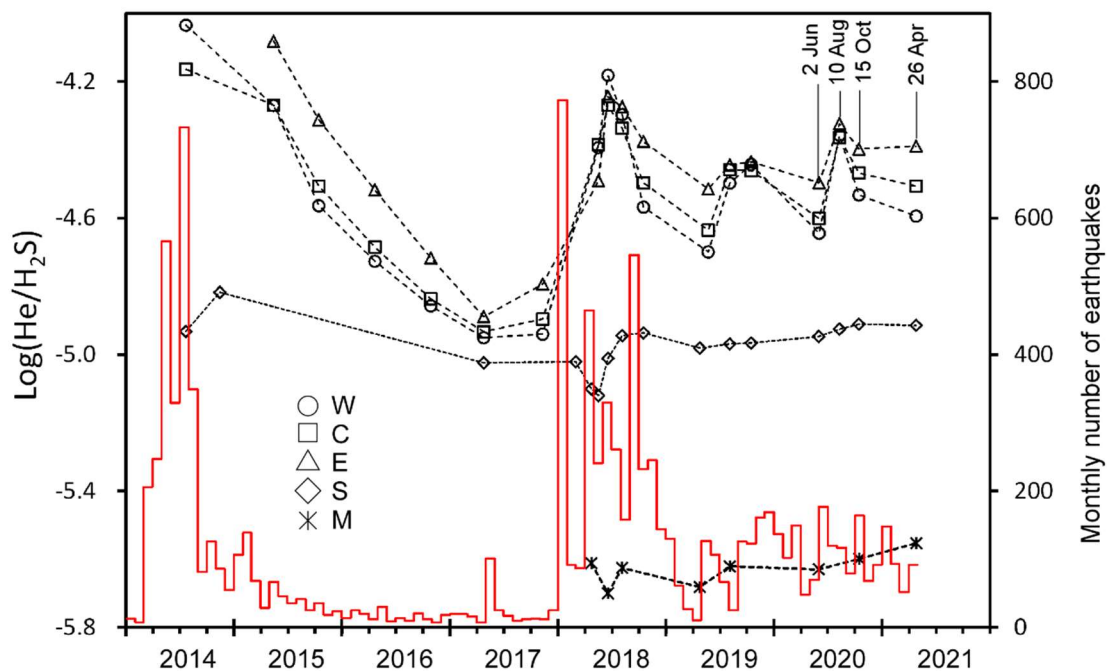


図 3. $\text{He}/\text{H}_2\text{S}$ 比の時間変化. 月別地震回数は気象庁の観測に基づく.

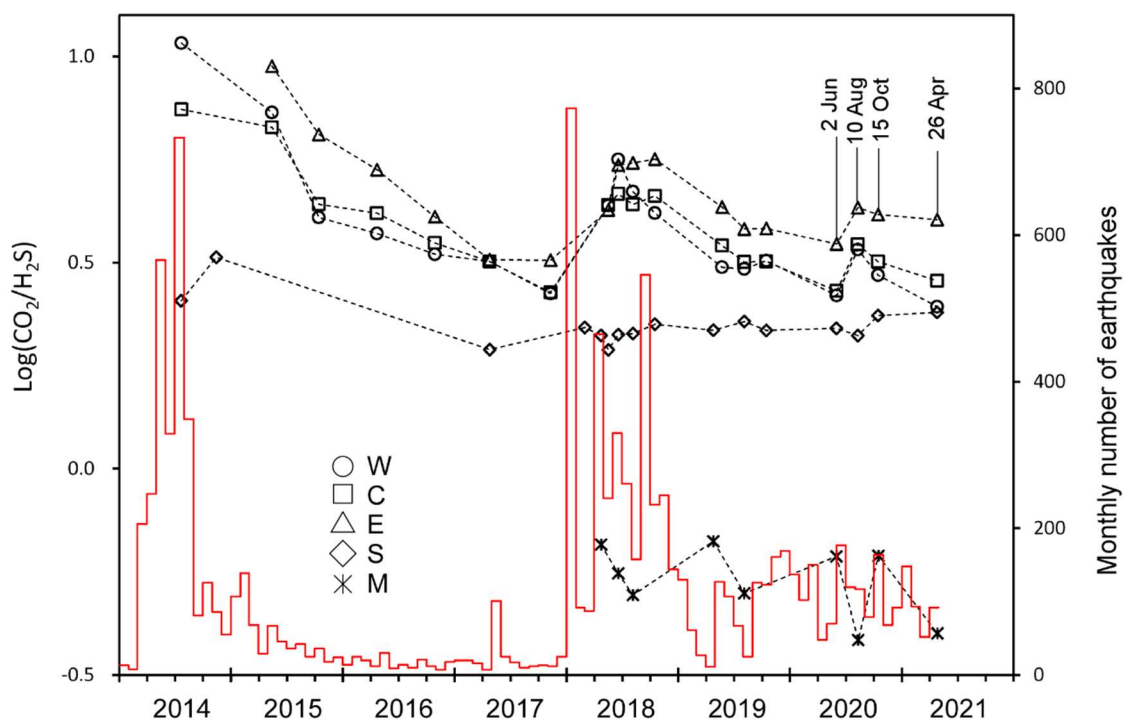


図 4. $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の時間変化. 月別地震回数は気象庁の観測に基づく.