

令和7年2月17日
火山調査研究推進本部
火山調査委員会

焼岳の現状の評価及び調査研究方策 (案)

焼岳の現状の評価

活動履歴

- ▶ 焼岳は安山岩・デイサイトの成層火山で、山頂部の溶岩ドームは約2,300年前の最新のマグマ噴火で生じた。歴史記録に残る1907年以降の噴火は、いずれも水蒸気噴火で、山頂周辺には、その際に形成された火口も含め複数の火口地形が存在する。1907年から1939年の間は、1915年の大正池を形成した噴火も含めて、毎年のように噴火が発生し、その後20年程の期間を挟んで、1962年から1963年に泥流を伴う水蒸気噴火が発生した。新たな火口形成を伴った1907年の噴火前と1923年の黒谷火口の形成前は、1年以上前から新たな噴気孔の形成や噴気域の拡大があった。その一方、1962年の噴火も山腹に新たに火口が形成されたが、噴火の前に顕著な噴気活動の活発化は認められなかった。1962年から1963年の噴火以降、噴火は発生していないが、北峰（ほっぼう）付近や岩坪谷（いわつぼだに）上部など山頂周辺の広い範囲に、噴気や地熱域が認められている。

調査観測結果

- ▶ 山頂付近における地震や地殻変動等の連続観測が開始されたのは2015年から2016年にかけてである。以降、山頂付近浅部の現象が捉えられるようになった。
- ▶ GNSS連続観測では、2016年の観測開始以降、山頂付近の観測点で基線のわずかな伸びが継続しており、2022年頃から伸びの速度がやや大きくなっている。また、陸域観測技術衛星2号「だいち2号」による干渉SAR時系列解析でも、山頂付近で衛星に近づく変動が観測されている。これらの地殻変動は、山頂付近浅部での球状圧力源の膨張で概ね説明できる。2022年8月から2024年6月のGNSS連続観測、GNSS繰り返し観測及び光波観測結果から、山頂付近の標高1,830m（地表面からの深さ約500m）に圧力源（体積変化量約 $1 \times 10^5 \text{m}^3$ ）が推定される。また、2021年8月から2024年10月の干渉SAR時系列解析結果から、北峰付近の標高1,759m（地表面からの深さ約700m）に圧力源が推定される。
- ▶ 山頂付近浅部の微小な地震活動は、山頂付近浅部の膨張を示すGNSS基線の伸びの速度に応じた消長が認められ、2024年5月下旬から7月にかけてGNSS基線の伸びに加速が認められた際には、地震活動もやや活発になった。
- ▶ 2023年10月から11月に山頂周辺で実施した全磁力観測では、2020年の観測結果と比較して、山頂の南側で全磁力が減少、北側で増加した。磁力変化量は

北峰北と黒谷（くろたに）火口の浅部に消磁源を仮定すると概ね説明でき、地下での温度上昇が示唆される。ただし、山頂の北側で観測できていない領域があるほか、仮定した消磁源では説明できない変化を示す観測点がある。

- 山頂付近の噴気の温度は、1907年から1939年の水蒸気噴火が頻繁に発生した期間に最高で約400℃と高い温度が観測され、1962年から1963年の噴火後の1965年には約170℃を観測したが、その後は低下傾向にある。なお、観測が限られており噴火前に噴気の温度が上昇したかは定かでない。北峰付近の噴気孔の噴気の高さは、監視カメラによる観測を開始した2012年以降有意味な変化は認められないが、ここ数年、噴気のSO₂/H₂S比の上昇傾向が認められている。また、2017年8月上旬に空振を伴う地震が発生し、同時間帯に黒谷火口から白色の噴気が火口縁上100m程度上がった。以降、監視カメラで黒谷火口の噴気が時々観測されるようになり、2019年夏頃からは噴気を観測する頻度が高くなっている。
- 焼岳を含む飛騨山脈南部地域では、数年おきに震度1以上を観測する地震を含む活発な地震活動が認められ、1990年代後半以降では、1998年、2011年、2014年、2018年、2020年などにその記録がある（大見，2021）。このうち、2011年、2014年、2018年などの活動は、飛騨山脈の岐阜県側または長野県側のみで地震活動が認められたが、1998年及び2020年の活動はこれらとは異なり、震源域が飛騨山脈の主稜線を超えて南北10km以上に拡大するという活発な群発地震活動となった。特に、2020年の地震活動活発化の際には、GNSS観測網により上高地の谷底から飛騨山脈の主稜線にかけての位置に、北西～南東方向のほぼ鉛直な開口割れ目で説明できる地殻変動が観測された。なお、直近の2018年の群発地震活動では地殻変動は観測されていない。また、2020年の開口割れ目の可能性がある事象のほかにも、1990年代から2010年代前半までの地震記録の調査によれば、焼岳周辺の浅い群発地震の後に深部低周波地震活動が活発化する事象等、火山活動との関連は不明ながらも深部の流体活動を示唆する現象も報告されている（大見・他，2001；大見・他，2018）。

現象の解釈及びメカニズムの推定

- 山頂付近で観測されている膨張性の地殻変動、微小な地震活動、熱消磁を示唆する全磁力変化などの山体浅部における諸現象の高まりは、北峰付近の噴気のSO₂/H₂S比の上昇傾向も含めて、水蒸気噴火を特徴とする火山で活動活発時に認められる変化に類似する。一方、現在観測されている浅部の活動の高まりが、いつ頃から始まったのかはわかっていない。山頂直下には地震波の減衰域の存在が示唆されている（Yamazaki, 1996）が、地下の高解像度な構造に関する知見に乏しい。また、焼岳を含む飛騨山脈南部地域では、数年お

きに活発な地震活動が認められているが、1990年代以降の群発地震と深部低周波地震活動の活発化の時間的關係や2020年に観測された開口割れ目で説明できる地殻変動等、深部の流体の活動の可能性を示唆する現象が認められてはいるが、焼岳の浅部に認められる諸現象の高まりとの直接の関連はわかっていない。

想定される火山活動の推移等

- ▶ 2016年に山頂付近での観測を開始して以降、火山活動の高まりを示す変化が観測されているが、現時点でその変化は浅部に限られており、深部起源と考えられる現象との関係は現時点では不明である。そのため、記録に残る噴火の様式も踏まえると、当面考えられる噴火は山頂周辺での水蒸気噴火の可能性が高い。水蒸気噴火によるハザードは、噴石の飛散、火山灰の降下及び火口噴出型泥流を想定する。また、1915年の噴火の際には、爆風による火口から約1 km付近での倒木の記録がある。一方、噴火が発生していない1980年代頃にも、山頂付近の隆起を示す地殻変動が観測されたとの報告（木股・他、1993）もあり、現在観測されている浅部での膨張は、過去にも繰り返し発生していた可能性もある。火山活動は高まる傾向にあるが、現時点で水蒸気噴火がどの程度切迫しているかの評価は難しい。
- ▶ なお、過去3,000年間では、ほとんどの水蒸気噴火はマグマ噴火に移行せずに終わっている。唯一マグマ噴火に移行した約2,300年前の噴火では、水蒸気噴火から溶岩ドームの形成、その崩落による火砕流の発生、溶岩ドームの一部を破壊する水蒸気噴火という推移を辿った（及川・他、2002）。

引用文献

- 及川輝樹（2002）北アルプス南部、焼岳火山の最近3000年間の噴火史. **108**, 88-102, <https://doi.org/10.5575/geosoc.108.88>
- 大見士朗（2018）飛騨山脈とその周辺の地震活動. 自然災害科学, **37**, 15-25, https://www.jsnds.org/ssk/ssk_37_1.html
- 大見士朗（2021）飛騨山脈2020年群発地震. 京都大学防災研究所年報, **64B**, 40-47, <http://hdl.handle.net/2433/268142>
- 大見士朗・和田博夫・伊藤 潔（2001）1998年飛騨山脈群発地震後の深部低周波地震群発活動. 地震第2輯, **54**, 415-420, https://doi.org/10.4294/zisin1948.54.3_415
- 木股文昭・中村 勝・宮島力雄・奥田 隆・藤井 巖・青木治三（1993）焼岳における地殻変動（1977～1992）. 火山, **38**, 53-55, https://doi.org/10.18940/kazan.38.2_53

Yamazaki, F. (1996) A Wall-Like Low-Q Zone beneath the Yakedake Volcano, Central Japan. *Journal of Physics of the Earth*, **44**, 23-38, <https://doi.org/10.4294/jpe1952.44.23>

焼岳の調査研究方策

焼岳の評価のために機動的な調査観測を含めた以下の調査研究が必要である。

- 浅部の熱の状態を評価するために、山頂付近浅部の熱消磁源の位置、深さや山頂周辺の面的な地熱分布を詳細に把握するための観測。
- 2016年に山頂付近での観測を開始して以降認められている浅部の膨張がいつ始まったのか、1962年、1963年の最新の噴火以降の噴火が発生していない時期にも山体膨張が起きていたことがあるのかについての分析。

焼 岳

(2023年8月～2024年11月)

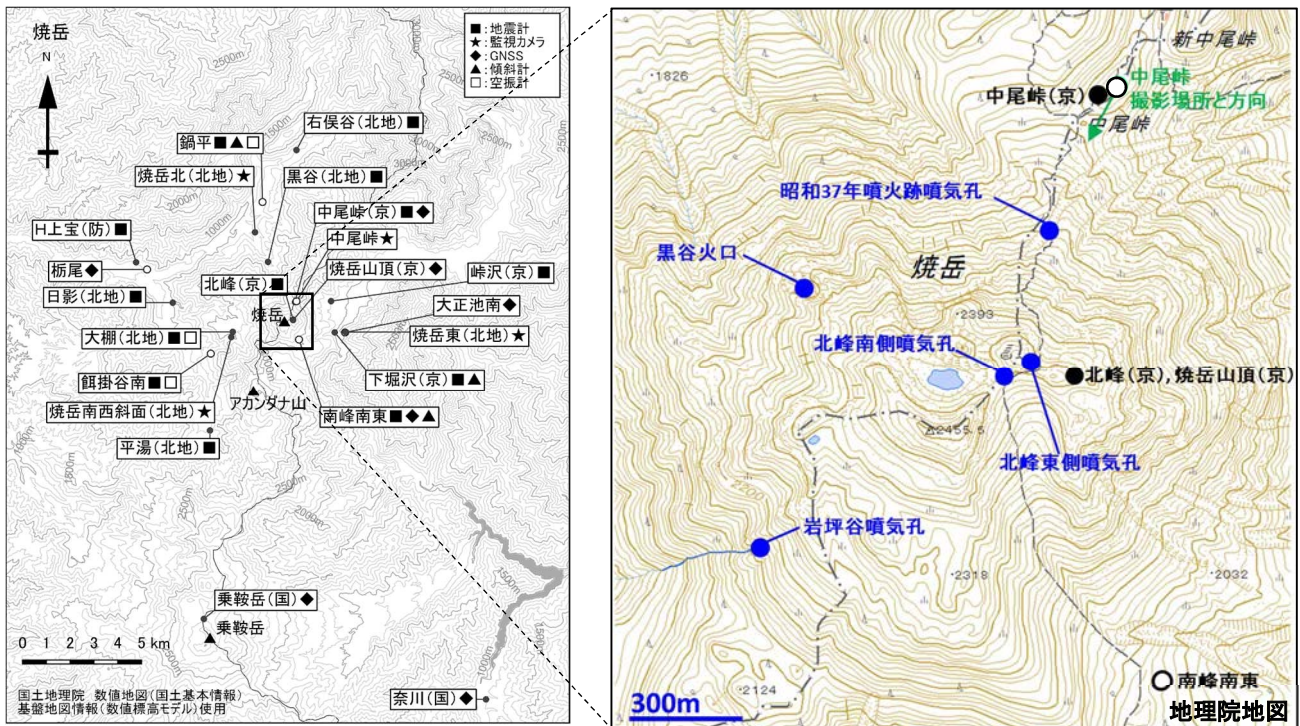
中長期的に山頂付近の微小な地震活動や山頂付近浅部での緩やかな膨張が継続している。

今期間、山頂付近の微小な地震活動が、2024年5月下旬から7月にかけてやや活発になった。

GNSS連続観測では、山頂付近の観測点で基線のわずかな伸びが継続しており、山頂付近浅部での緩やかな膨張によると考えられる。また、2024年5月下旬からの地震活動の高まりに伴い、この膨張を示す基線の伸びに加速がみられた。

北峰付近の噴気孔及び岩坪谷上部の噴気孔からの噴気の高さは100m以下で経過した。また、2017年8月上旬以降噴気を観測している黒谷火口では、噴気の高さは200m以下で経過した。5月下旬からの地震活動の高まりに伴って、これらの噴気活動や噴気温度に特段の変化は認められなかった。

焼岳周辺では、上記のような山頂付近の地震活動や地殻変動に加え、数年おきに震度1以上を観測する地震を含む活発な地震活動がみられる。



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。
 (国): 国土地理院、(防): 防災科学技術研究所、(北地): 北陸地方整備局、(京): 京都大学

図1 焼岳 観測点配置及び噴気孔位置
 右図中の緑矢印は、図9の撮影位置と方向を示す。

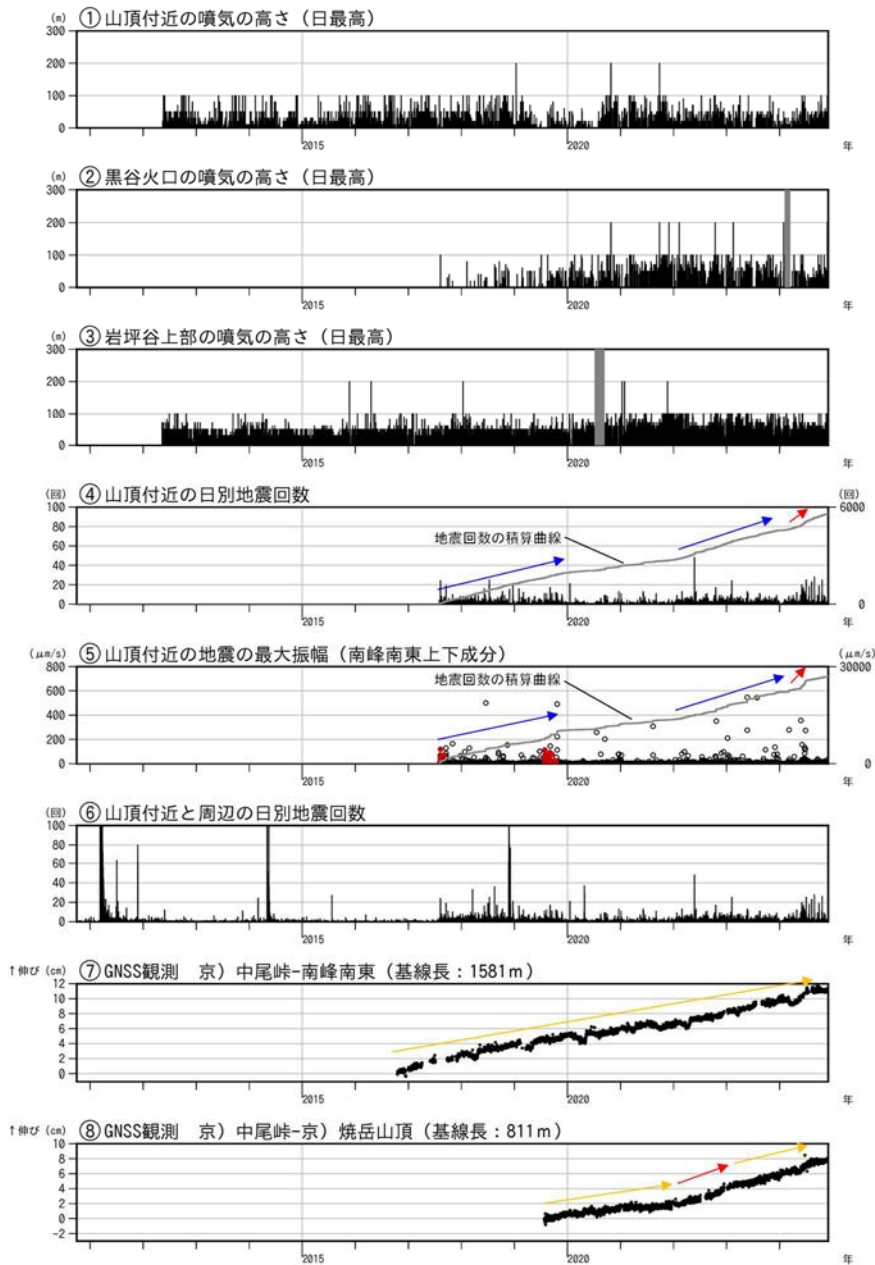


図2 焼岳 火山活動経過図 (2010年10月1日～2024年11月30日)

④南峰南東観測点の上下動振幅 $1.0\mu\text{m/s}$ 以上、S-P 時間 1.0 秒以内の地震のうち、焼岳山頂付近の概ね海拔 0 km 以浅が震源と推定される地震を山頂付近の地震として計数している。

●：空振を伴う火山性地震

⑦⑧の空白部分は欠測を示す。京)：京都大学。⑦⑧は図4の基線番号⑥⑧に対応。

- ・2017年8月上旬以降噴気を観測している黒谷火口では、2019年夏ころから噴気を観測する頻度が高くなっており、2021年10月頃からは概ね日最高100mの高さで経過している。
- ・2017年、2019年には空振を伴う火山性地震が発生した。
- ・2022年1月頃からは、地震回数に増加傾向がみられるが、2017年8月から2019年末の期間にみられた地震活動(積算曲線の勾配)とほぼ同程度である(④⑤青矢印)。また、2024年3月下旬以降増加がみられていた山頂付近の微小な地震は、5月下旬からさらに地震回数が増加し7月中旬まで続いた(④⑤赤矢印)。
- ・山頂付近の緩やかな膨張を示すと考えられる変化が継続している(⑦⑧橙矢印、赤矢印)。

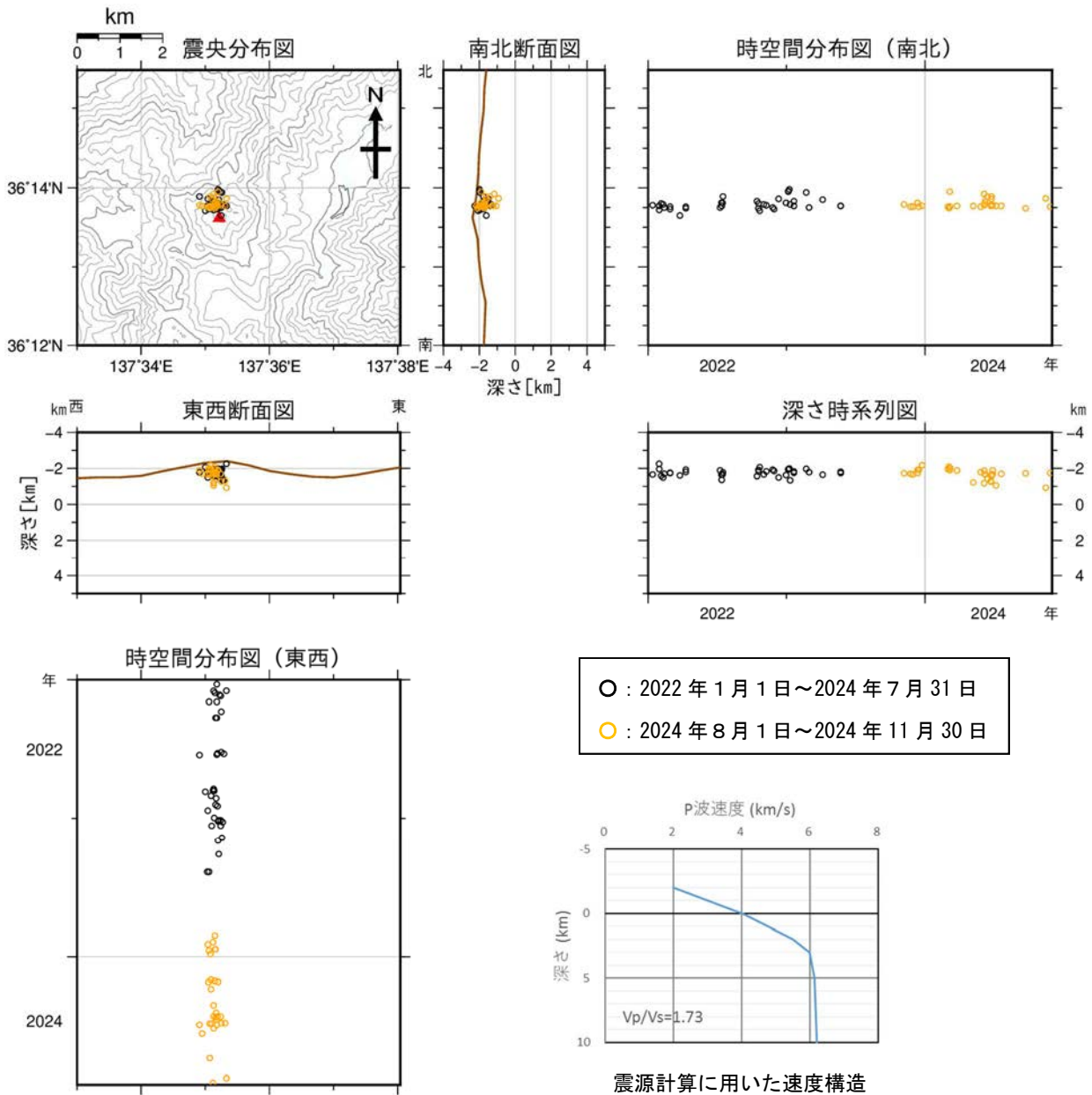


図3 焼岳 山頂付近の震源分布図 (2022年1月1日~2024年11月30日)

山頂付近の地震のみを表示している。(周辺の地震は、図7を参照)

山頂付近(山頂から概ね1km以内)の観測点に加え、北及び西にやや離れた観測点のP相が読める地震について震源決定している。(観測点配置図(図1)参照)

- ・震源は、山頂のやや北、深さ-2から-1kmに分布している。

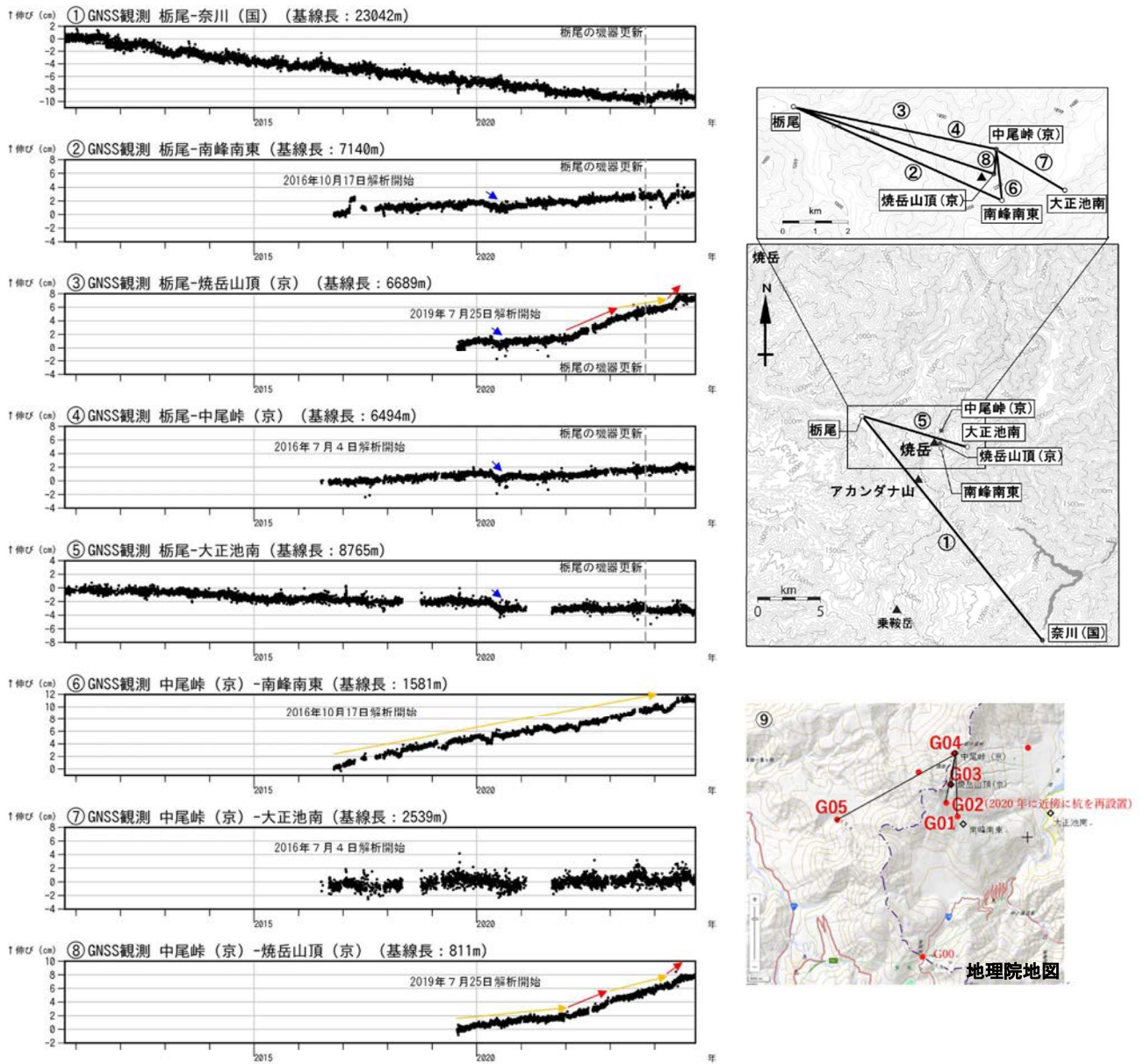


図4 焼岳 GNSS 観測による基線長変化 (2010年10月1日~2024年11月30日) 及び GNSS 観測点配置図

左: GNSS 観測結果 GNSS 連続観測の基線は右図 GNSS 基線①~⑧に対応。グラフの空白部分は欠測を示す。(国): 国土地理院、(京): 京都大学。
 右上: GNSS 連続観測の基線図、 右下: GNSS 繰返し観測の基線図

- ・②~⑤の基線では、2020年5月下旬頃から7月頃にかけて、2020年4月22日以降活発化した山頂の東~北東側の地震活動に関連すると考えられる変化がみられた(青矢印)。
- ・⑥と⑧の基線では、山頂付近の緩やかな膨張を示すと考えられる変化が継続している(橙矢印、赤矢印)。
- ・③と⑧の基線では、2022年1月頃から焼岳山頂(京)観測点の南東進と隆起による伸びの変化がみられていたが(赤矢印)、地震回数の増加に対応して2024年5月末頃からその変化率が増加した(赤矢印)。

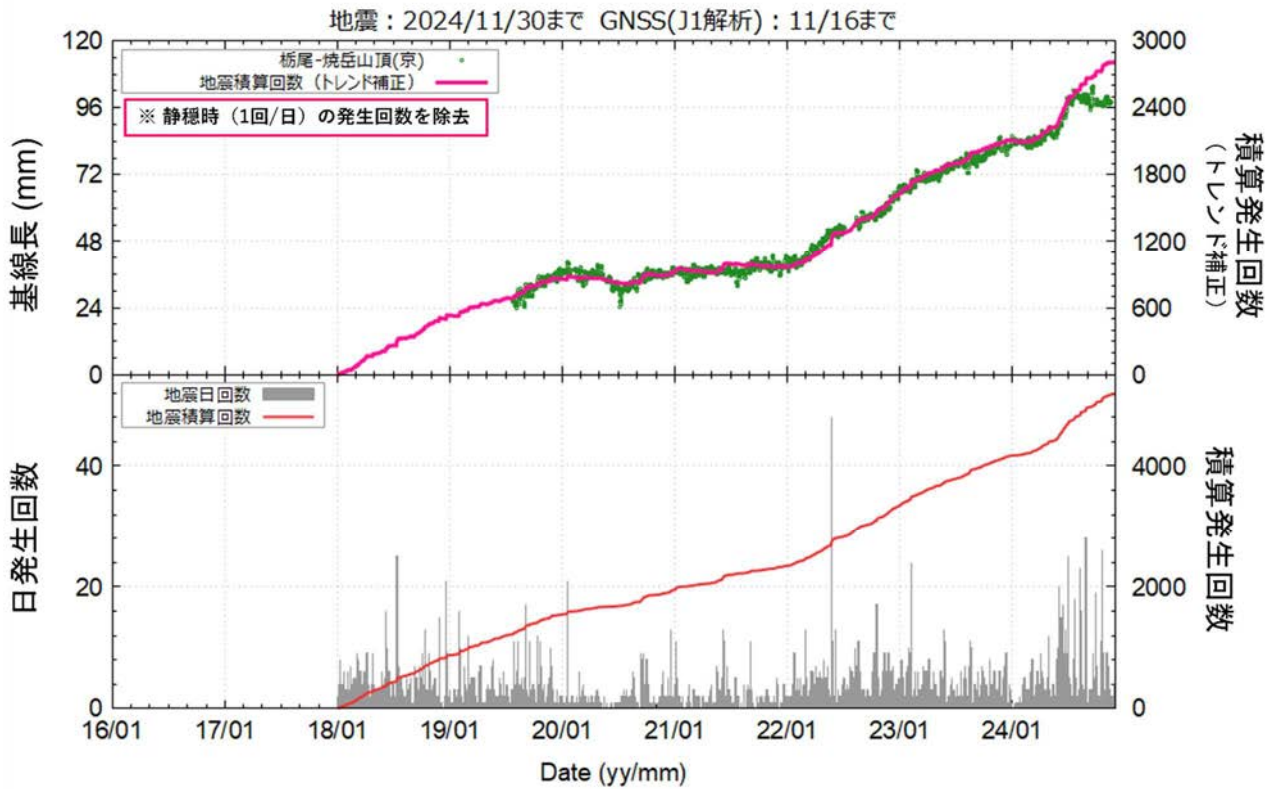


図5 焼岳 GNSS 観測による基線長変化と山頂付近の地震回数積算 (2018年1月1日～2024年11月30日)

上：栃尾-焼岳山頂(京)の基線長変化と山頂付近の地震回数積算。山頂付近の積算グラフは、静穏時の回数(1回/日)をトレンドとして除去している。

下：山頂付近の日地震回数と積算。

- ・ 山頂付近の膨張を示すと考えられる基線長の変化と山頂付近の地震回数の変化には一定の相関が認められる。
- ・ 2024年5月下旬からの山頂付近の地震の増加に伴って基線長の伸びが加速した。

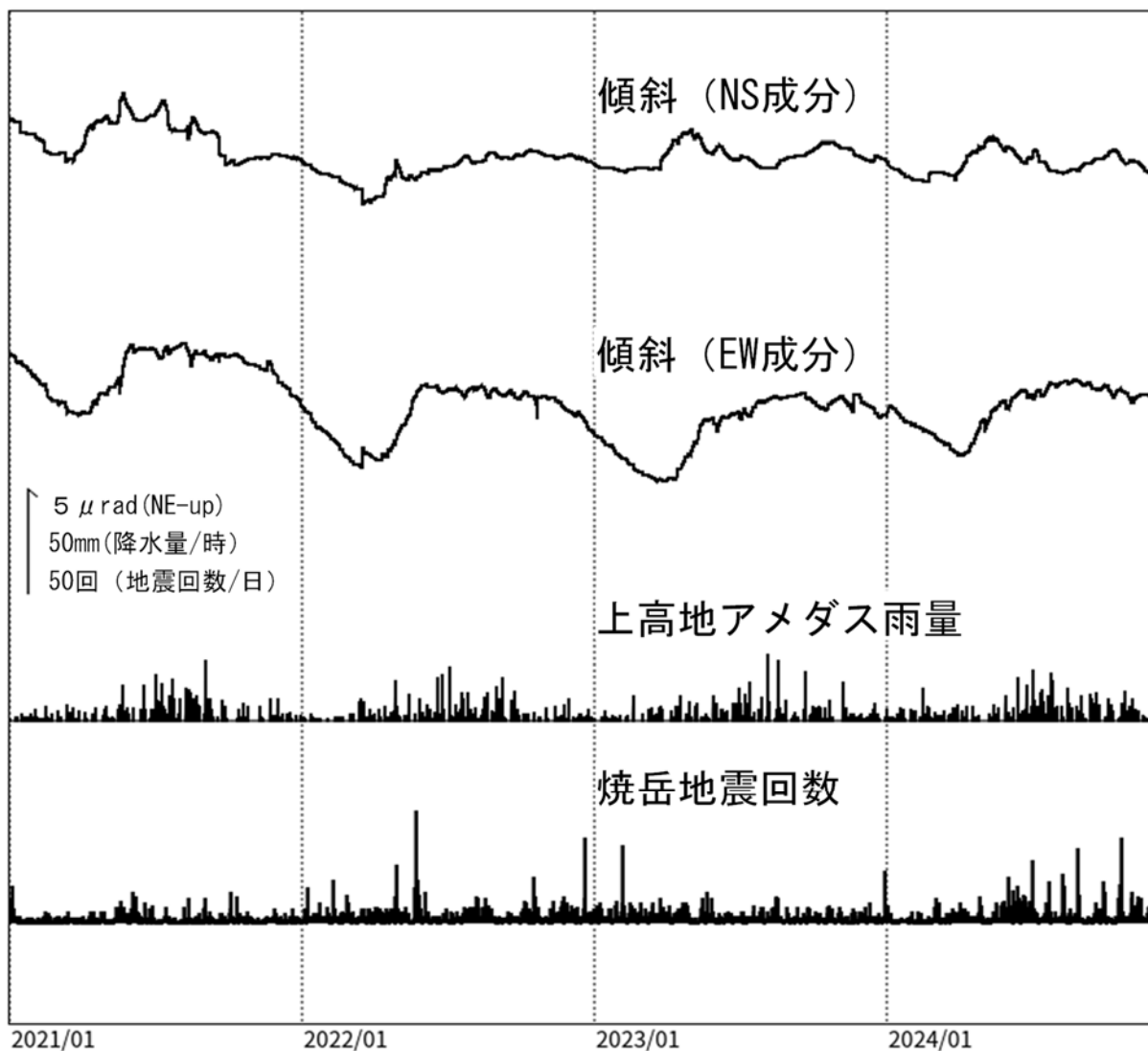


図6 焼岳 南峰南東観測点における傾斜データ
(2021年1月1日~2024年11月30日)

- ・南峰南東観測点の傾斜計（山頂から南東約1km）による観測では、降水の影響や季節変動を超えるような変動は認められない。他の観測点も同様である。

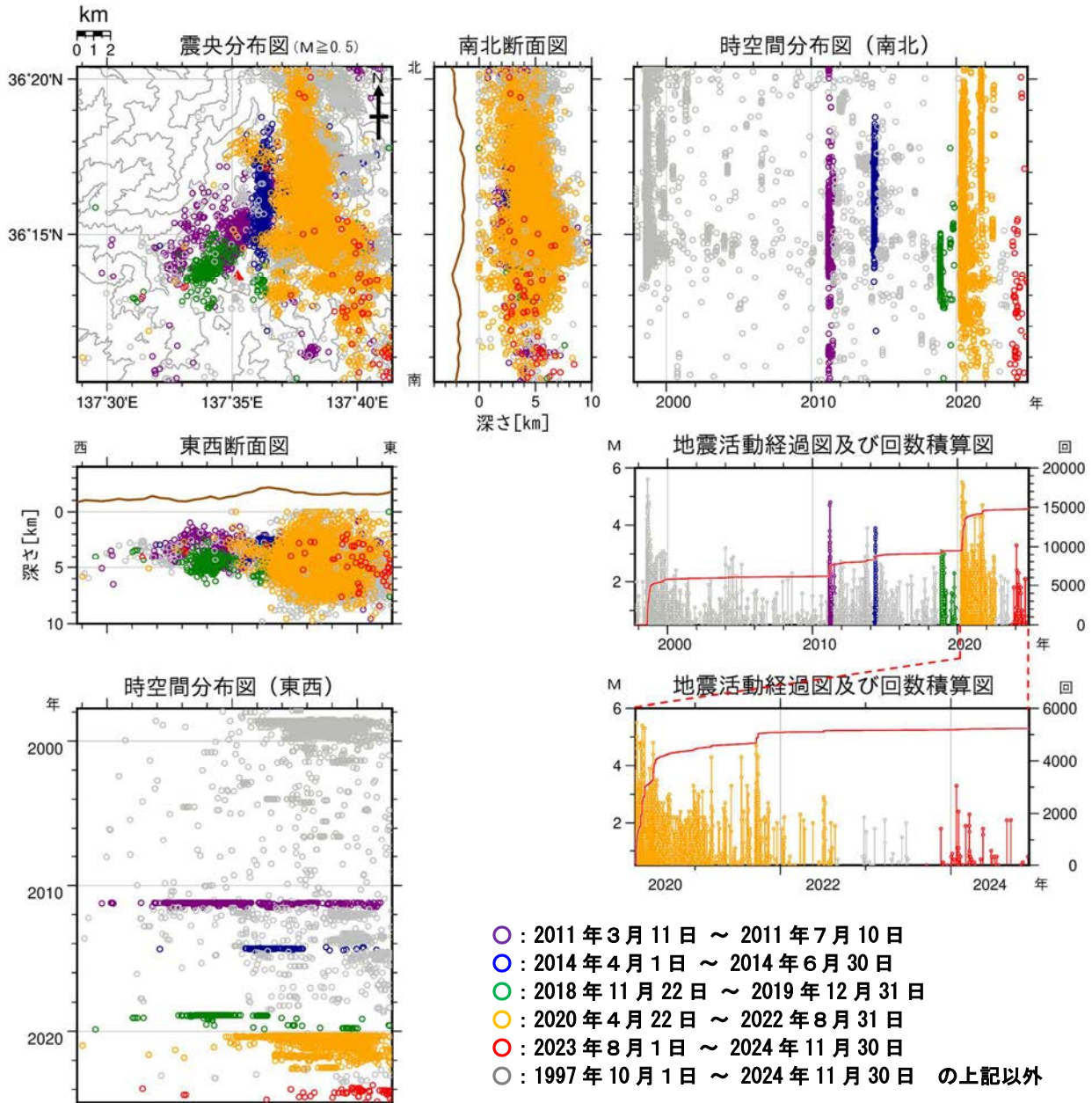


図7 焼岳 広域地震観測網による山体及び周辺の地震活動

(1997年10月1日~2024年11月30日)

広域地震観測網(一元化震源)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る。なお、2020年9月以降については、地震観測点の標高を考慮する等、震源決定の手法を変更している。

M(マグニチュード)は地震の規模を表す。

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る。

地震活動経過図及び回数積算図の赤線は積算回数を示し、右軸で表す。

- ・2020年4月22日以降、山頂の東~北東側のやや深いところを震源とする地震活動が活発化し、2021年にかけて続いた。2022年以降は低調に経過した。
- ・焼岳周辺では、1998年~99年の活動をはじめ、2011年(紫丸)、2014年(青丸)、2018年から2019年にかけて(緑丸)、2020年から2021年にかけて(橙丸)など、数年おきに地震活動の活発化がみられる。

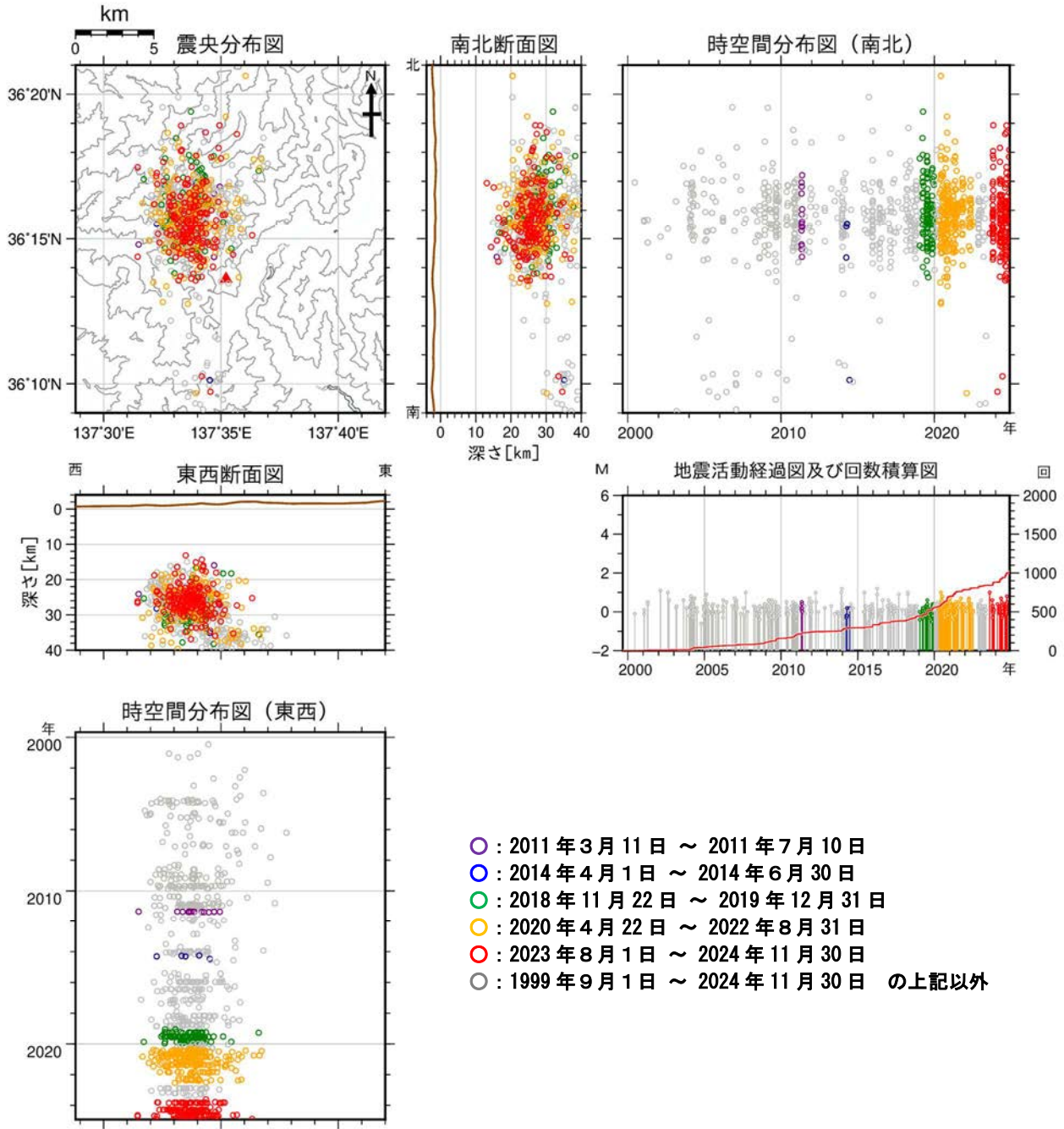


図8 焼岳 広域地震観測網による深部低周波地震の震源分布図

(1999年9月1日～2024年11月30日)

広域地震観測網（一元化震源）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る。なお、2020年9月以降については、地震観測点の標高を考慮する等、震源決定の手法を変更している。

M（マグニチュード）は地震の規模を表す。

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る。

地震活動経過図及び回数積算図の赤線は積算回数を示し、右軸で表す。

- ・ 期間内は、焼岳の北西側の深い所を震源とする低周波地震の発生状況に特段の変化は見られなかった。
- ・ 過去には、図7に示したような焼岳周辺の地震活動の活発化がみられた期間付近で、深部低周波地震が増加したことがある。

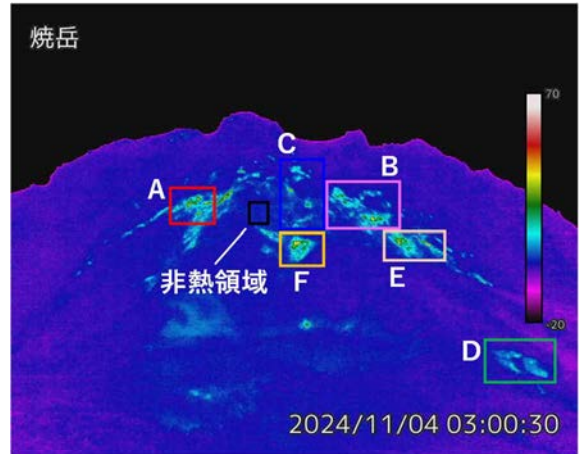
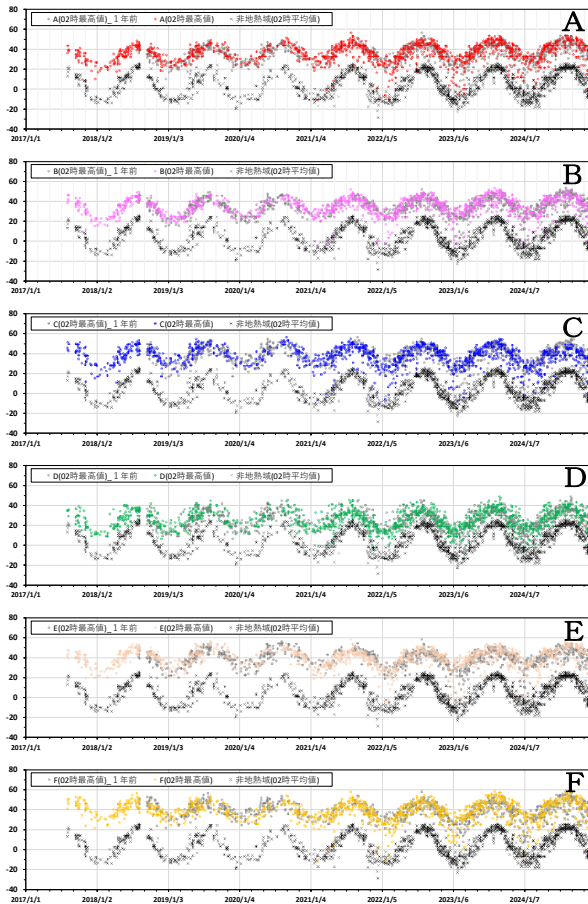


図9 焼岳 中尾峠赤外熱映像カメラによる焼岳北側斜面の地熱域の最高温度の推移（2017年7月1日～2024年11月30日）と地表面温度分布、解析範囲、及び実画像各色プロット：領域内最高温度、灰色：領域内最高温度（前年）、黒色：非地熱域内平均温度
 ・焼岳北側斜面の地熱域では、地熱域の広がりやその温度上昇は認められなかった。

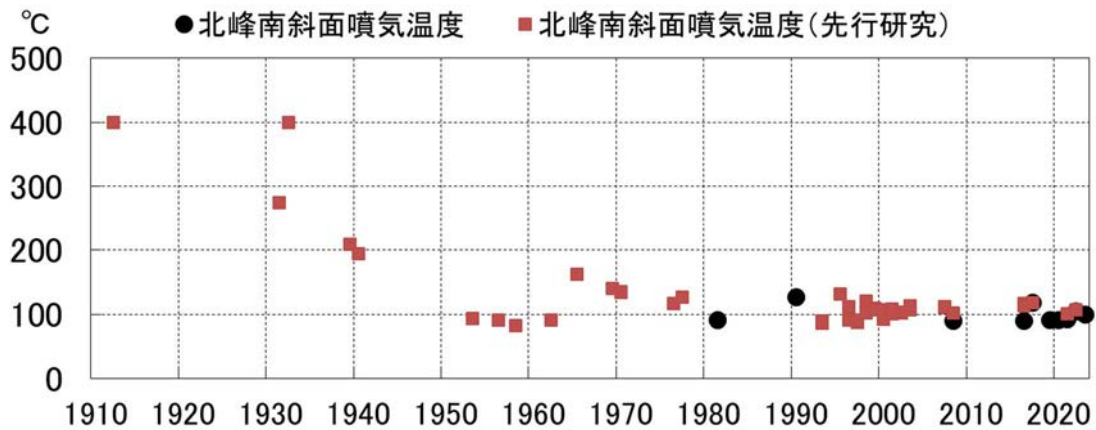


図10 焼岳 現地観測による焼岳北峰南斜面の噴気温度の推移（1910年7月1日以降）赤四角印は加藤（1912）、小平（1932、1940、1942）、小坂（1961、1966）、小坂・小沢（1966）、杉浦・水谷（1978）、三宅・小坂（1998）、Sumino et al. (2010) 及び齋藤（2019）によって得られたデータを示す。
 ・2024年6月12日に実施した現地観測では、焼岳北峰南斜面の噴気温度は101°Cであった。

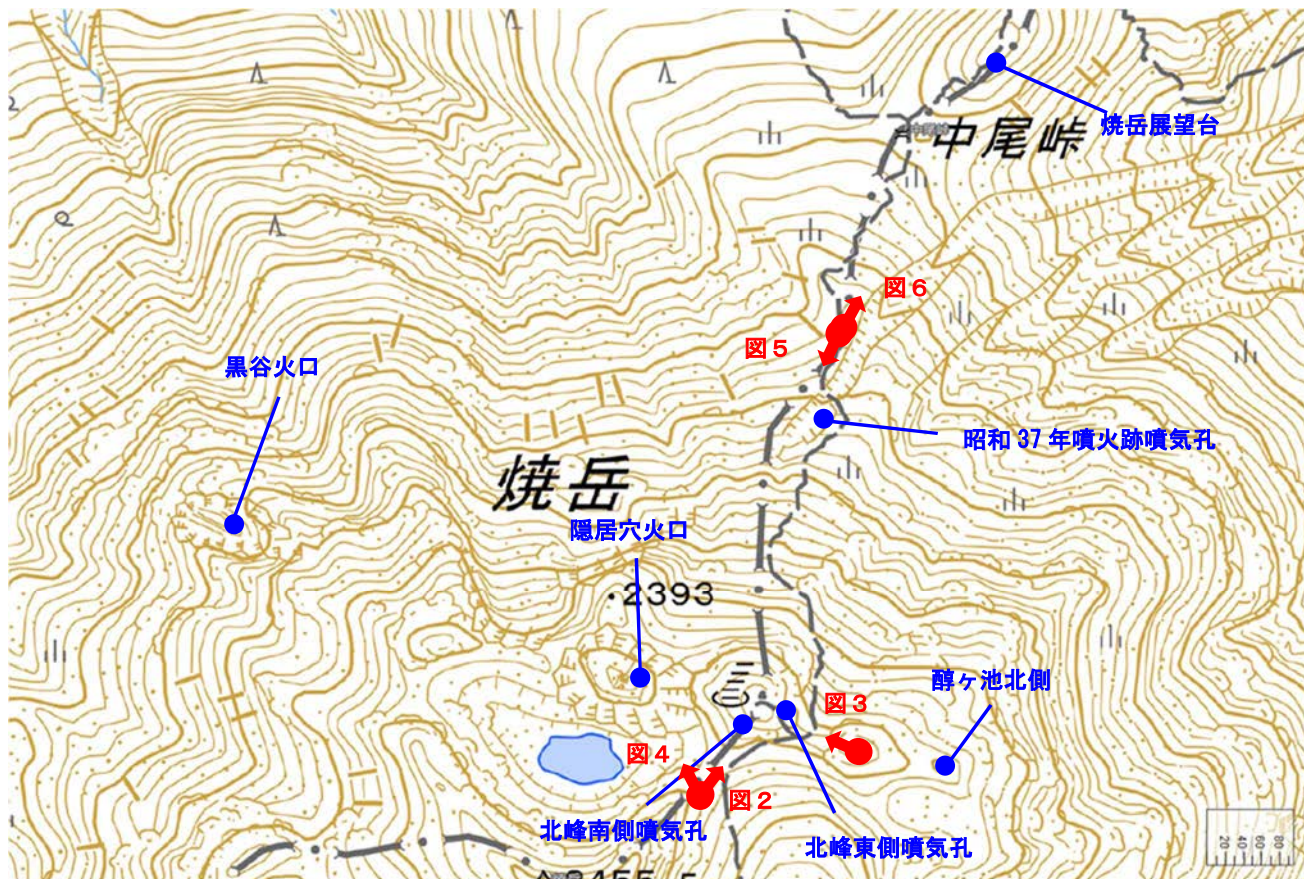
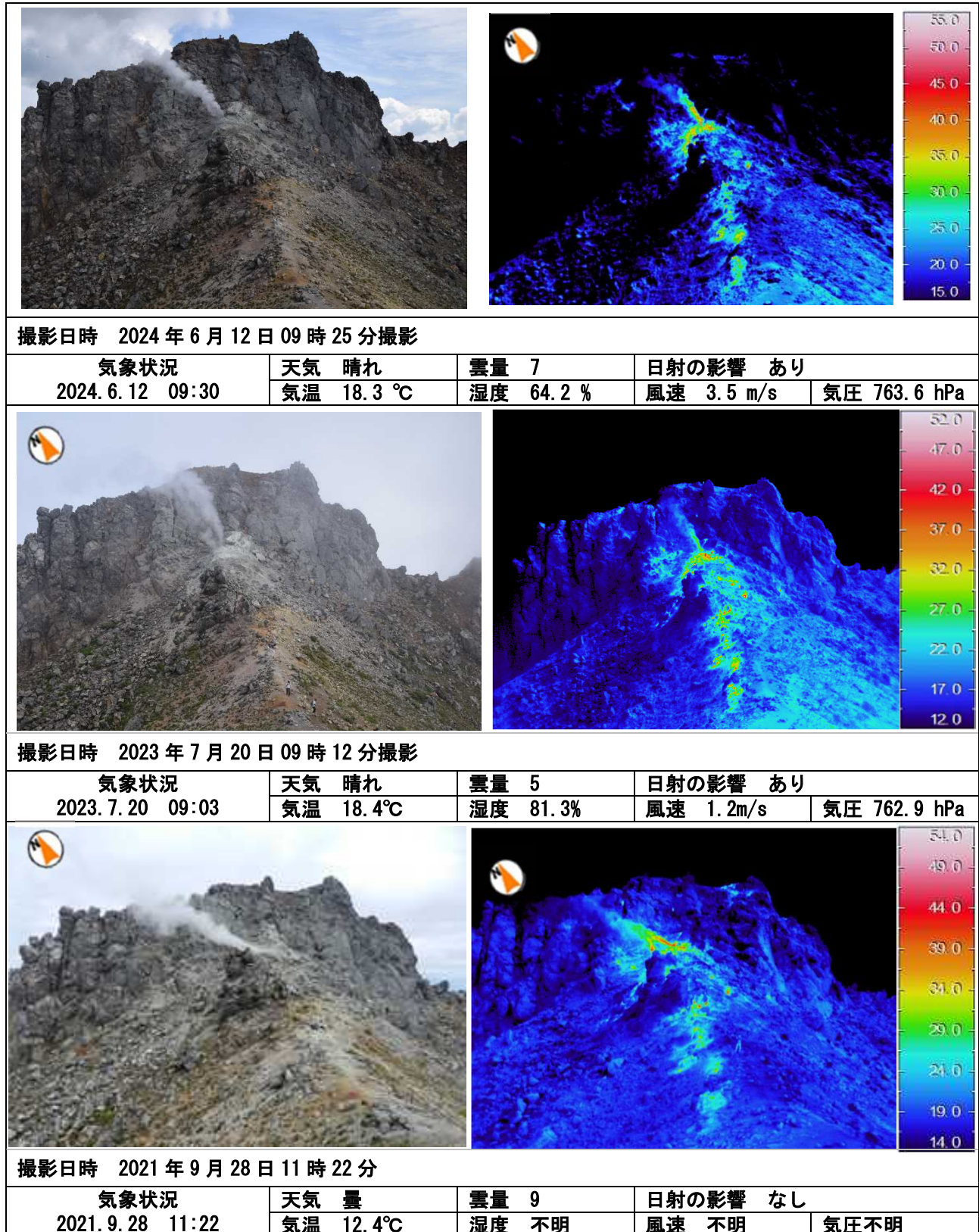


図11-1 焼岳 現地観測位置図（焼岳山頂付近）
赤矢印は熱映像と可視撮影のポイントと方向

焼岳 現地観測結果（目視、赤外熱観測）

●北峰南斜面（2022年8月10日の観測では定点外）

白色の噴気が30m程度上がっており、100m程離れた場所からゴーという噴気音を確認した。もっとも強い噴気孔の周辺は引き続き黄色い析出物が認められた。



焼岳 図11-2 北峰南斜面の状況

●北峰東斜面

2020年の観測時に新たに確認された噴気を引き続き確認した。また、噴気孔周辺には黄色い硫黄昇華物が付着しているのを確認した。噴気音は無かった。地熱域は、日射の影響を超える目立った変化はなかった。

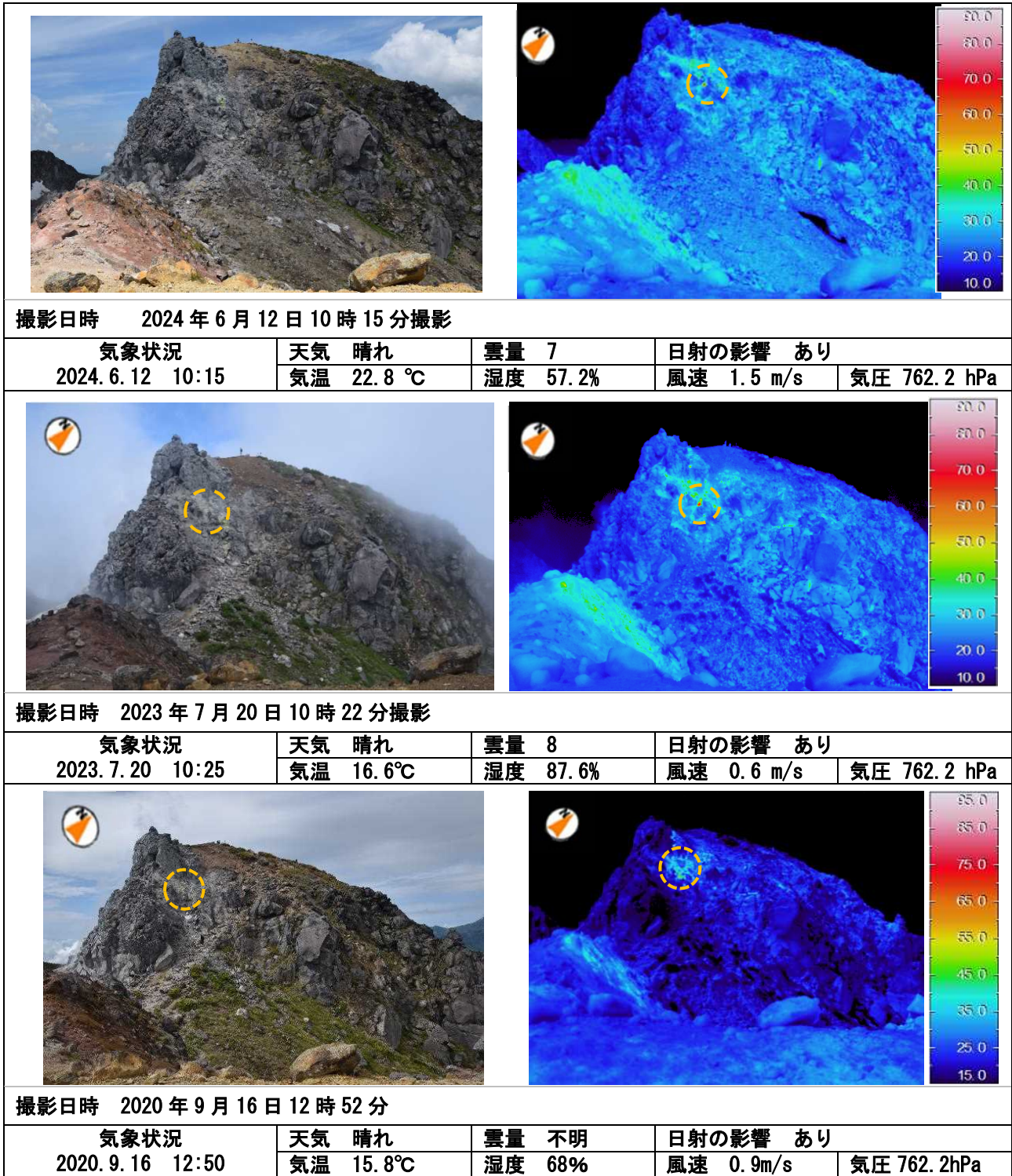


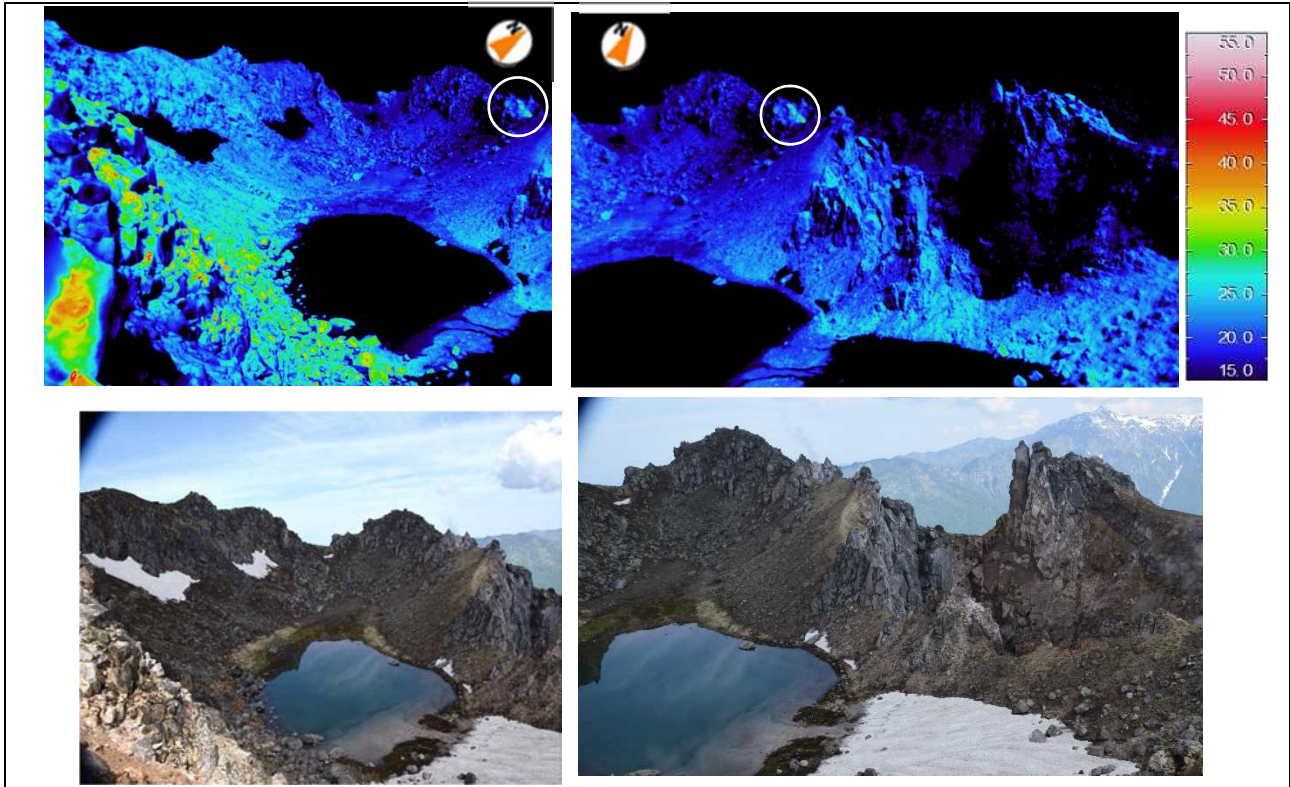
図11-3 焼岳 北峰東斜面の状況

●隠居穴、正賀池

隠居穴周辺に地熱域なし

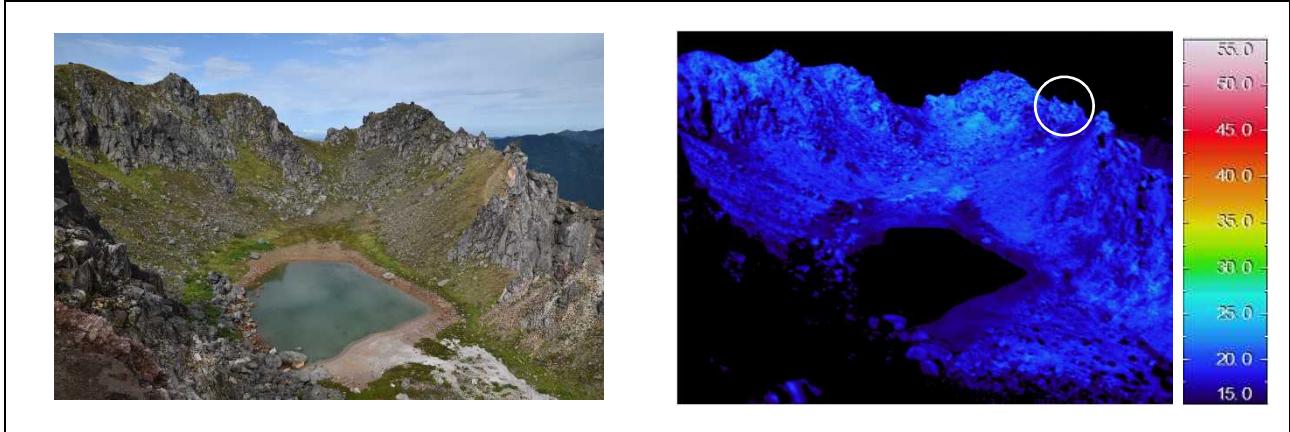
正賀池の南斜面は日射の影響によると考えられる

正賀池の北側（白丸）は地熱域が確認でき（白色噴気あり）、2020年の観測では地熱域がみられず、2022年5月の機上観測で温度が上がっているように見える



撮影日時 2024年6月12日09時25分

気象状況 2024.6.12 09:30	天気 晴れ	曇量 7	日射の影響 あり	
	気温 18.3℃	湿度 64.2%	風速 3.5m/s	気圧 736.6 hPa



撮影日時 2020年9月16日09時07分

気象状況 2023.7.20 10:25	天気 晴れ	曇量 不明	日射の影響 あり	
	気温 15.5℃	湿度 51.0%	風速 1.5 m/s	気圧 764.9hPa

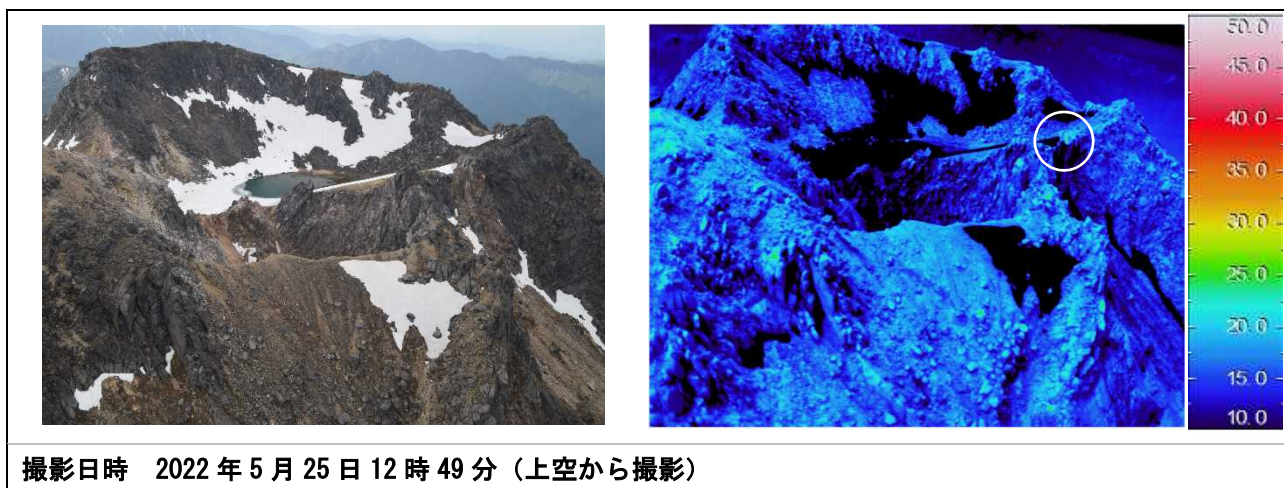


図11-4 焼岳 隠居穴、正賀池の状況

●北峰北斜面

昭和 37 年噴火跡噴気孔において白色の噴気を確認した。近づくとシューという噴気音が聞こえた。その他、西側の白く変質している領域や東側の谷筋でも噴気が見られた。地熱域の分布に日射の影響を超えるような目立った変化は見られなかった。

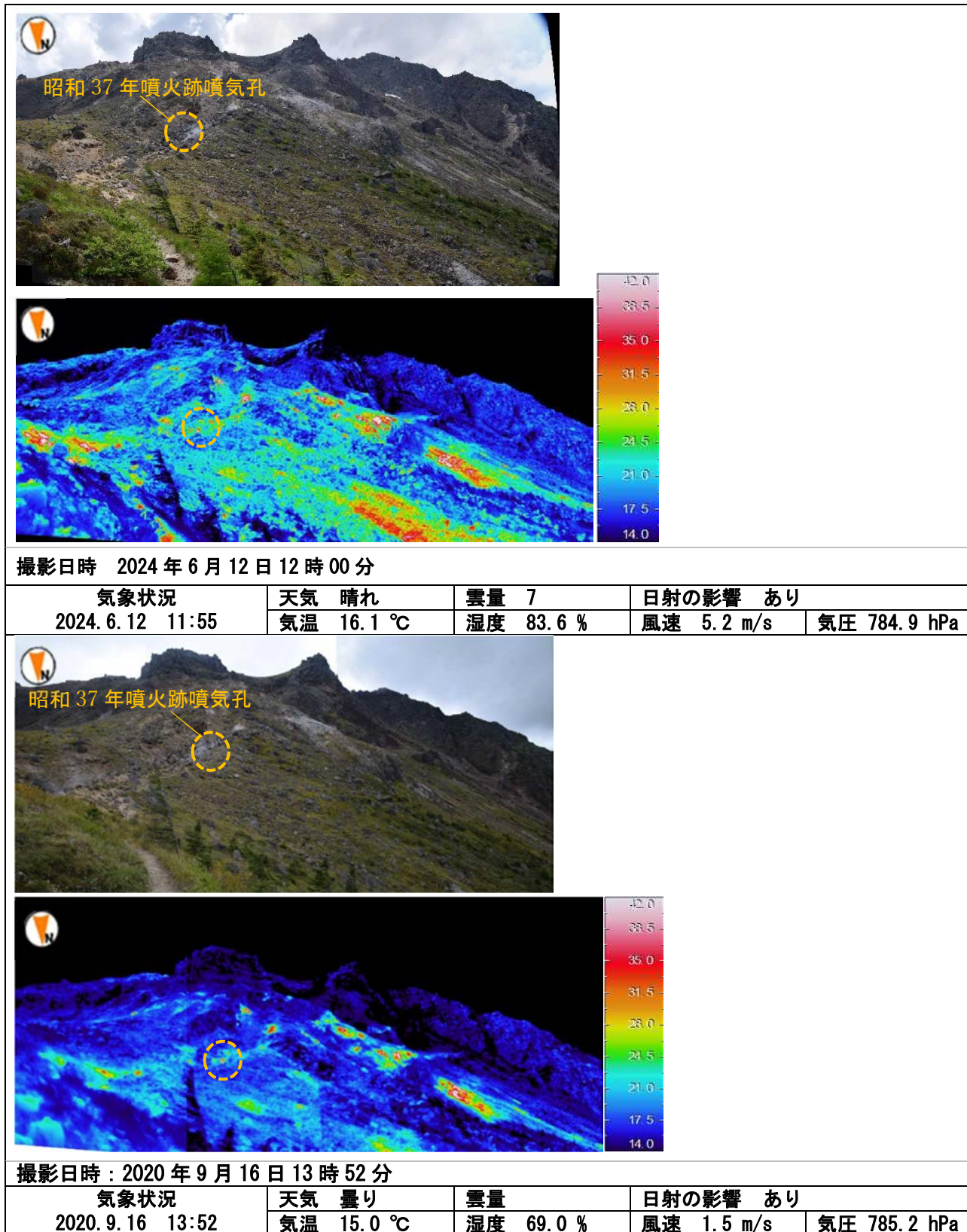


図 11-5 焼岳 北峰北斜面の状況

●焼岳展望台南斜面

ごく弱い噴気を上げる噴気孔を数か所で確認した。噴気音、硫黄臭はなかった。展望台南東斜面に地熱域が認められ、過去の観測と比較して大きな変化は見られなかった。

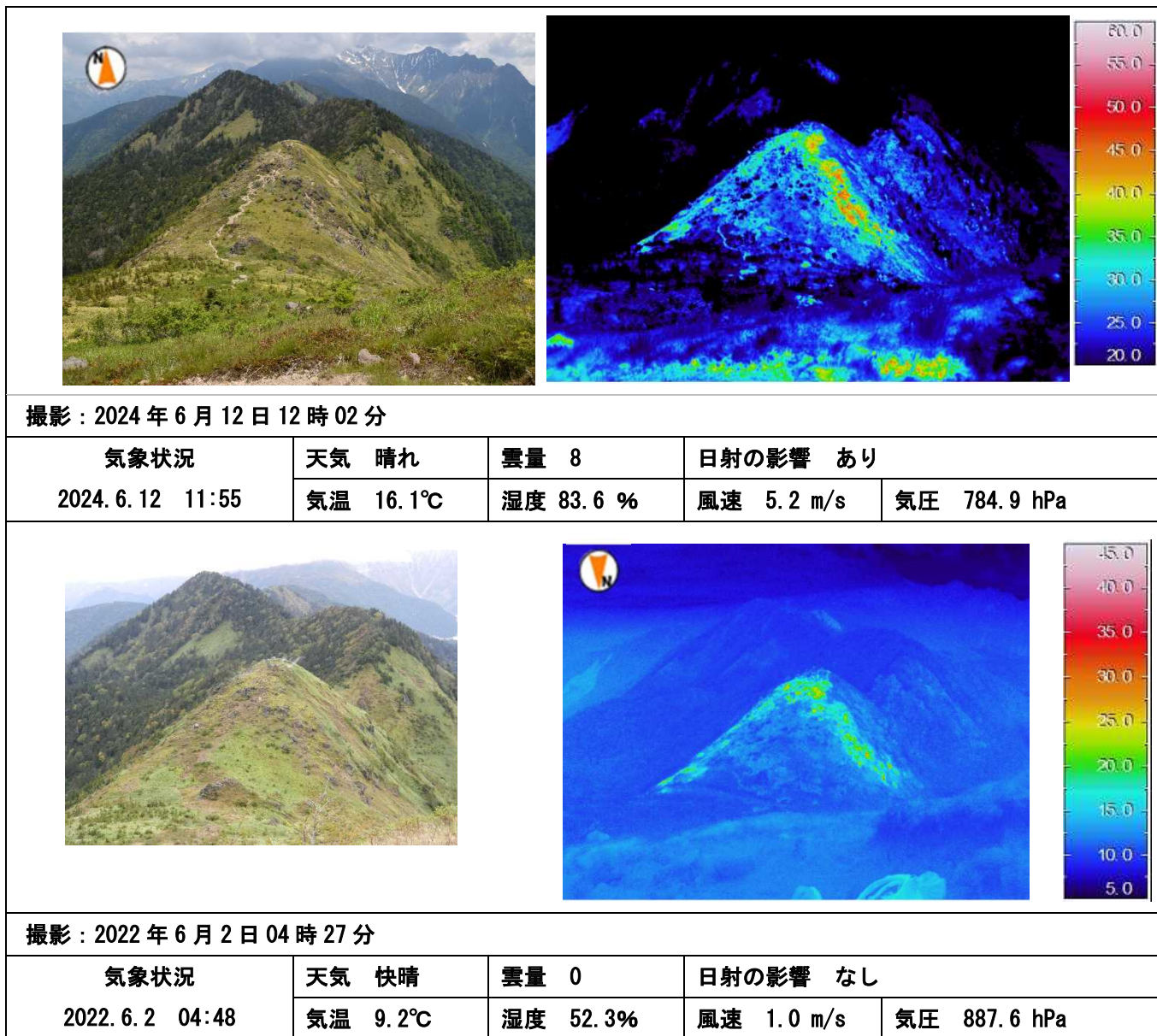


図11-6 焼岳 中尾峠周辺の状況

焼岳 現地観測結果（噴気温度観測）

北峰南斜面では、約 100.9℃の温度を観測した。前回（2023年7月）の観測時とほぼ同じ値であり、過去の観測結果と大きな変化はなかった。最も勢いのある噴気孔では、ジェット状に噴気が出ていた。北峰東斜面では、86.0℃を観測した。噴気孔は横に空洞が伸びる形状となっており奥ほど温度が高かったが、サーミスタを入れられる一番深い場所の噴気温度を計測した。噴気孔周辺は引き続き黄色い硫黄析出物が見られた。醇ヶ池北側噴気孔の温度は前回までの観測と同程度であり、最も高い場所で 91.0℃を観測した。

またガス検知器による火山ガス濃度は、H₂S が北峰南で 30ppm（風下ではない）、東斜面にて 30ppm 程度、醇ヶ池では 15ppm が検出された一方で、SO₂ はいずれの観測点においても検出されなかった。

表 焼岳 サーミスタによる噴気温度測定結果

観測場所	日時	天気	噴気温度 (°C)	差込深 (cm)
北峰南斜面	2024年6月12日	晴れ	100.9	30
北峰東斜面	2024年6月12日	晴れ	86.0	130
醇ヶ池北側	2024年6月12日	晴れ	91.0	10

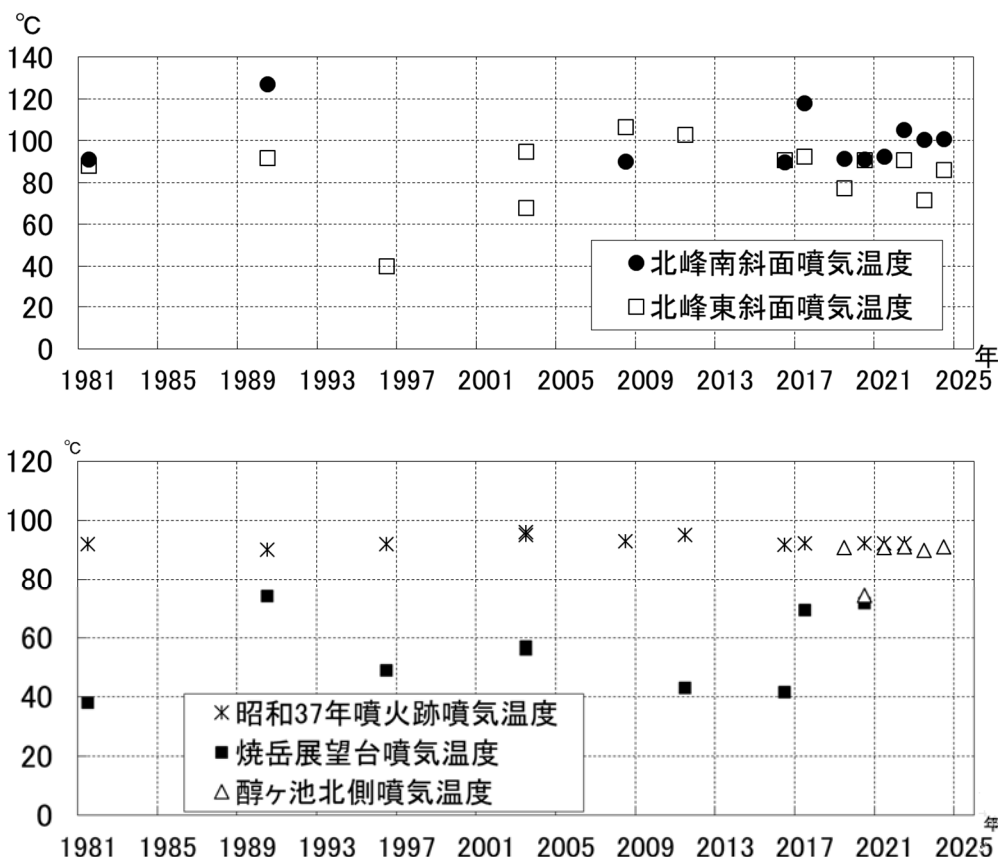


図 12-7 焼岳 噴気温度の推移



図 11-8 焼岳 北峰南斜面噴気孔の状況（左：2024年6月、右：2023年7月）



図 11-9 焼岳 北峰東斜面噴気孔の状況（左：2024年6月、右：2023年7月）

気象庁資料に関する補足事項

1. データ利用について

- ・資料は気象庁のほか、以下の機関のデータも利用して作成している。

北陸地方整備局、国土地理院、京都大学、名古屋大学、東京大学及び国立研究開発法人防災科学技術研究所

2. 一元化震源の利用について

- ・2001年10月以降、Hi-netの追加に伴い検知能力が向上している。
- ・2010年10月以降、火山観測点の追加に伴い検知能力が向上している。
- ・2016年4月1日以降の震源では、Mの小さな地震は、自動処理による震源を表示している場合がある。自動処理による震源は、震源誤差の大きなものが表示されることがある。
- ・2020年9月以降の震源は、地震観測点の標高を考慮する等した手法で求められている。
- ・速度構造や算出方法については地震月報（カタログ編）[気象庁ホームページ：<https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/bulletin/index.html>]を参照。

3. 地図の作成について

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

焼岳の山頂付近の地震の震源と振幅比を用いた発生頻度の推移調査

1. はじめに

焼岳では、2017年8月、黒谷火口付近で噴気や低周波地震、空振が観測される活動があった。この時、8月9日の低周波地震発生前の9日21頃から、山頂付近の地震計だけで観測される微小な地震が増加した。以降^{*}、山頂付近の地震は増減を繰り返しながら、継続的に発生しており、2024年5～7月のように一時的に増加することが時々ある。

今般、山頂付近の火山性地震のデータ蓄積も進み、それらの中にバリエーションがあることがわかってきた(図1)。そこで、主に火山性地震の振幅を用いた調査を行ったので、(1)その震源、(2)震源別発生頻度の推移について、報告する。

^{*}気象庁が山頂付近に設置した観測点(南峰南東)の運用開始は2016/12/01であり、それまでは山頂から北側に約3.5km離れた山麓の観測点(中尾、2023/12/01に移設)で地震活動を監視していたため、それ以前の山頂付近の地震活動については詳細はよくわかっていない。

2. 対象と期間

対象とする火山性地震：気象庁のルーチンで計数した火山性地震。

計数基準：南峰南東観測点の上下動振幅 $1.0 \mu\text{m/s}$ 以上、S-P時間 1.0秒以内の地震のうち、南峰南東、京)北峰、京)中尾峠のいずれかの初動到着時刻が他の観測点より早い地震(以降、この基準を満たす火山性地震を「山頂付近」の地震と呼ぶ)。

期間：2017/09/01 から 2024/12/31。

期間内の対象イベント数：5529 イベント

3. 結果

3-1. 火山性地震の特徴(相違点)の整理

焼岳の山頂付近の地震は規模が極めて小さいものが多く、震源が求まる地震はごく一部に過ぎない(上述の対象イベント数のうち94イベント、2%弱)。そのため、その震源のバリエーションを調べるため、山頂付近の観測点相互の振幅比を用いた解析を行った。

イベントは大きく分けて、上下動成分の振幅が、①南峰南東<北峰となるイベントと、②南峰南東>北峰となるイベントに分かれる(図1-1)。両イベントともP相は比較的明瞭で、S相は不明瞭な特徴は共通する。一方で、振幅の特徴①をもつイベントは、②のイベントに比較して、北峰と南峰南東のP波の到達時間差(以降、P着差と呼ぶ)が大きいという特徴がみられた(図1-2)。

地震の震源を推定する際には、走時を用いた方が振幅を用いた方法よりも一般的に精度は高く推定される。しかし、前述のように震源が求まる地震はごく一部であるのに対して、ほとんどのイベントにおいて振幅は検測されていることから、分類条件を簡単にすると同時に、震源が求まらないイベント含めて活動を整理することを目的に、走時と振幅比の関係を整理した。さらに、先に述べたように、対象イベントはS波の走時が不明瞭なことからS-P時間での整理を諦め、明瞭であるP着差での整理を試みた。

結果は、図2に示すとおりで、大きく分けて、振幅比(北峰/南峰南東)が1以上のグループ(以降、Group1)と、1未満のグループ(以降、Group2)に分類できた。分類に従うと、P着差については、Group1と比較して、Group2はバラつきが大きかった。特徴を整理したものを表1に示す。

表1 「山頂付近」の地震の特徴整理

グループ	振幅比(北峰/南峰南東)	走時(南峰南東と北峰のP着差)
Group1	大きい(1以上)	大きい (主に0.3-0.4秒)
Group2	小さい(1未満)	小さい (0.3秒以下が主だが、バラつきが大きい)

3-2. 発生場所

表1で整理した通り、Group2については、P着差のバラつきが大きく、発生場所に拡がりをもつ可能性がある。振幅比を使いつつ、発生場所に関する情報をより効果的に得るために、中尾峠も含めた3点での振幅比を調査することにした。

3点での振幅比を考えるため、イベントにおける3観測点の上下動成分の最大振幅の合計値に対するそれぞれ観測点の上下動成分の最大振幅の割合を計算し、三角ダイアグラム上にプロットし、ルーチンで求めた「山頂付近」の震源との対応を確認した。その際に、三角ダイアグラムにおいて、Group1は幅広く分布していたため、中尾峠の振幅割合の大きいものをGroup1-2とした。なお、期間内対象の5529イベントに対して、三角ダイアグラムにプロットできたものが4289イベント、震源が求まっているイベントは94イベント、両方の情報があるものは86イベントである。震源が求まっている地震^{*}は計数している地震のごく一部であることに注意されたい。

結果は、図3に示すとおりである。Group1のイベントは、相対的に浅め(標高1500m以浅)に求まるイベントであり、Group2のイベントは相対的に深めに求まるイベントであった。

この結果と図1や表1で整理したイベントの特徴は、一般的に震央の差異は小さく震源深さが異なるイベントの振幅比やP着差を考えた場合と矛盾しない。

※震源決定方法については、巻末参考資料を参照。

3-3. グループごとの発生頻度の整理

振幅比(北峰/南峰南東)で分類したGroup1、Group2のイベントの発生頻度(日別回数)の推移を図4に示す。

回数積算に着目し発生頻度の推移を確認すると、Group1は2022年1月頃から傾きが急になり、2024年4月頃からさらに傾きが急になった。その後、7月には傾きが緩やかになり、2024年4月以前と同程度の傾きとなった。

同様にGroup2の推移を確認すると、2020年1月頃に傾きは緩やかになり(2019年4月~5月の停滞は、北峰(京)観測点の欠測のため分類が不可能になったことによる見かけ上の変化である。ただし、詳細に見れば、欠測になる前にGroup2の傾きがやや緩やかになっているようにも見える)。その後、2022年頃から再び傾きが急になり、2024年4月頃から、さらに傾きが急になっている。2024年4月以降の回数積算の傾きは、2017年9月

以降で最大であったが、11月頃から傾きは緩やかになっている。なお、震源位置の考慮はできないが、地震活動を回数ではなく振幅を指標とした場合、図4の五段目に示すように2017年9月頃、2019年7月頃、及び2024年5月頃に地震回数を指標とした場合ではみられない活動の高まりが確認できる。

3-4. タイプ別

ルーチンでは、火山性地震を波形の概観及び周波数の特徴から、タイプを分類している。主な特徴は次のとおりである。高周波でP相、S相が明瞭なイベントをA型、A型よりも低周波ではあるが高周波で相が不明瞭なイベントをBH型、低周波で相が不明瞭なイベントをBL型、単色やハーモニックな周波数特性を持つイベントをBP・BT型としている。

図2を火山性地震のタイプ分類ごとに分けて整理したものを図5に示す。A型、BH型はどちらのグループも含まれるが、BL型、BP・BT型は、ほとんどがGroup2に属することが分かる。

4. 考察

4. 1. 発生場所ごとの発生頻度の推移

3-2で得られた発生場所についての情報は震源が求まるものごく一部のイベントに対してであったが、振幅比で分類したGroup1,2の全イベントに対して、同じ特徴があると仮定し、発生場所ごとの発生頻度などについて考察した。発生場所ごとの発生頻度の推移は、図4にすでに示したとおりとなる。なお、今回の調査では、地震発生メカニズムの差異による放射特性の違い、およびそれらの時間的な変化から生じる振幅比への影響は考慮していない。

4. 1. 1. 地震増加時の詳細推移

ここではさらに、地震回数の一時的な増加が観測されて、気象庁が「噴火警報」や「火山の状況に関する解説情報」を発表した期間付近について、詳細に見る。期間を限定した結果を図6に示す。また、各期間の特徴は次のとおりである。

(1) 2022/05/23～05/24: 令和4年5月24日09時30分 火口周辺警報(噴火警戒レベル2, 火口周辺規制)

Group2の数が多し。P着差のグラフでも、最も小さい部類にプロットされる。

(2) 2023/08/03～08/25: 2023/8/19 火山解説情報(無印)情報発表

情報発表(8月19日)の直前にはGroup2の急増がみられるが、それ以前はGroup1とGroup2が同程度発生している。

(3) 2024/05/23～07/24: 2024/6/2～7/17 火山解説情報(無印・臨時)情報発表

Group1, Group2も同程度みられる。時間的なGroup遷移はみられない

4. 1. 2. 発生場所ごとの発生頻度の推移と地殻変動との対応

焼岳では、GNSS連続観測で、山頂付近での緩やかな膨張を示すと考えられる変化が捉えられている。山頂付近のGNSS基線長と、発生頻度の推移を比較した結果を図7に示す。

GNSS基線長の変化は、Group1(比較的浅いイベント)の推移と対応が良い。また、Group2の2024年4月以降の推移とは、対応が良くない。

4. 2. 特徴的な波形の発生場所の推定

4. 2. 1. 「連発型」地震

山頂付近の地震のなかには、次のような特徴の地震が含まれ、気象庁では、「連発型」と呼んでいる。その波形例を図8に示す。なお、ルーチンでは、図8-1に示すようなイベントは、1回の地震として計数している(個々の振幅増大をそれぞれ計数はしない)。

- ・同程度の振幅を持つ地震が数秒間隔で複数個連発
- ・継続時間が数十秒程度以内で、地震記象がいわゆる“魚の骨”のように見える
- ・一連の連発イベント中の観測点間の振幅比がほぼ一定で、おおむね同じ場所で発生したと考えられる
- ・振幅の大きなものは少ない(図8-2に示すように、これまでの最大のものは南峰南東上下動成分で $14.393 \mu\text{m/s}$ 、90%のイベントは $4 \mu\text{m/s}$ 以下)

この地震は、2017年8月以降で見ると、恒常的に発生するのではなく、特定の期間において、集中的に発生する傾向がみられる。

図2の内、連発型に分けて整理したもの図9に示す。「連発型」の多くは Group2 に属しているの、比較的深めで発生していると推定される。また、図9に3-2で整理した三角ダイアグラムを用いて、「連発型」を分けてプロットしたものを示す。こちらの場合においても、おおむね Group2 に属していることが分かる。

また、その発生頻度の推移を図10(a)に示す。2024年4月から10月頃に発生頻度が高くなっている。また、その期間、多少のバラつきはあるが、3日ほど集中して発生して、20日ほど休止するサイクルを繰り返していたように見える。

図10(b)は、Group2 から「連発型」の回数を差し引いたものである。Group2 の回数積算において、2024年5月から11月頃の傾きはこれまでで最大であったが、これは「連発型」の寄与が大きく、「連発型」を抜いた Group2 は Group1 と同様に、2024年9月には傾きが緩やかになり、2024年4月以前と同程度の傾きとなった。

4. 2. 2. 空振を伴う地震

2017年8月、9月、2019年8月、9月に、空振を伴う火山性地震が観測された。気象庁(2019)によれば、図11に示すように、火山性地震の振幅と空振の発生状況から、2017年と2019年のイベントは同様の現象と推定される。また、図12に示すように、震央および空振源は黒谷火口で説明できる。

図13に3-2で整理した三角ダイアグラムを用いて、空振を伴う火山性地震を分けてプロットしたものを示す。おおむね Group2 に属しており、その中でも Group1 に近い位置に分布していることが分かる。そのため、空振を伴う火山性地震の多くは比較的深めで発生していると推定される。

5. 課題

現在の計数基準(南峰南東上下動成分 $1 \mu\text{m/s}$ 以上)では、Group1のイベント(振幅比が大きく、北峰・中尾峠の振幅が最大となるイベント)の取りこぼしの可能性がある。例えば、図14に示すイベントである。検知力も考慮しなければならないが、このようなイベントが多数ある場合、4.1.2で考察した地殻変動観測結果との対応を考える際に影響が出る。

6. まとめ

1. 山頂付近の観測点の振幅比(北峰/南峰南東)では, Group1:振幅比1以上, Group2:振幅比1未満で分類でき, 震源登録されている地震との対応は, Group1:深さ1500m以浅, Group2:1500m以深であった.
2. Group1の発生頻度は2022年1月頃から増加し, 2024年4月頃からさらに増加した. その後, 7月には増加が緩やかになり, 2024年4月以前と同程度の発生頻度となった. Group2の発生頻度は, 2022年頃から頻度が増加し, 2024年4月頃から, さらに増加した. 2024年4月以降の発生頻度は, 2017年8月以降で最大であったが, 11月頃から増加は緩やかになっている.
3. 山頂付近のGNSSの基線長の変化は, Group1の推移と対応が良く, Group2の推移との対応2024年4月以降は良くなかった.
4. 連発型はおおむねGroup2に分布し, P着差0.2~0.3秒付近に集中している.
5. 空振を伴うイベントはGroup2に分布し, その中でもGroup1に近い位置に分布している.

参考文献

気象庁(2018) 焼岳の火山活動(2017年6月~2017年9月27日), 火山噴火予知連絡会報128, 79-107.

https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/ccpve/Report/128/kaiho_128_12.pdf

気象庁(2019) 第145回火山噴火予知連絡会資料その4(西之島, 浅間山, 焼岳), 97-117.

https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/ccpve/shiryo/145/145_4.pdf

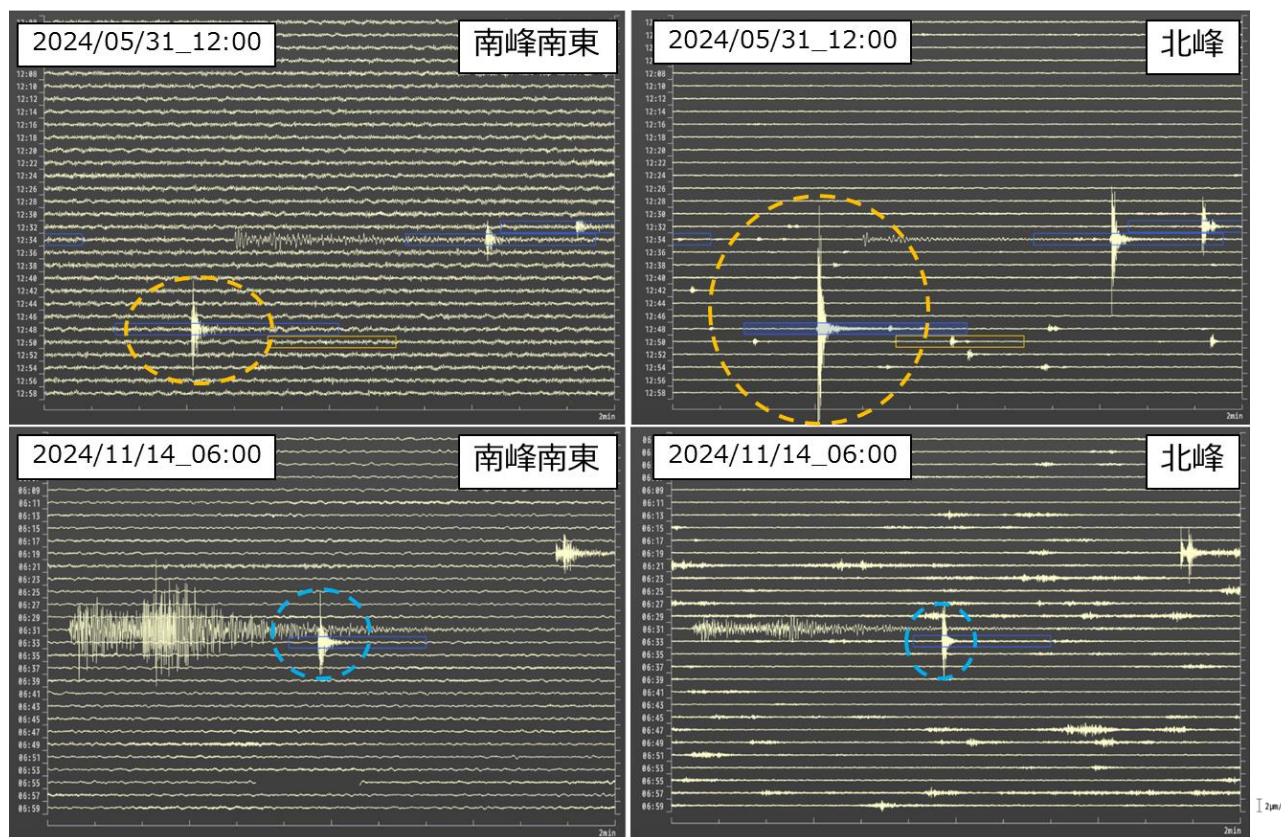


図1-1 焼岳 山頂付近に設置する観測点間の振幅比が異なるイベントの例

・山頂付近に設置する観測点間の振幅比が異なるイベントがあり、振幅が南峰南東<北峰となるイベント(上段), 南峰南東>北峰(下段)となるイベントが存在する。

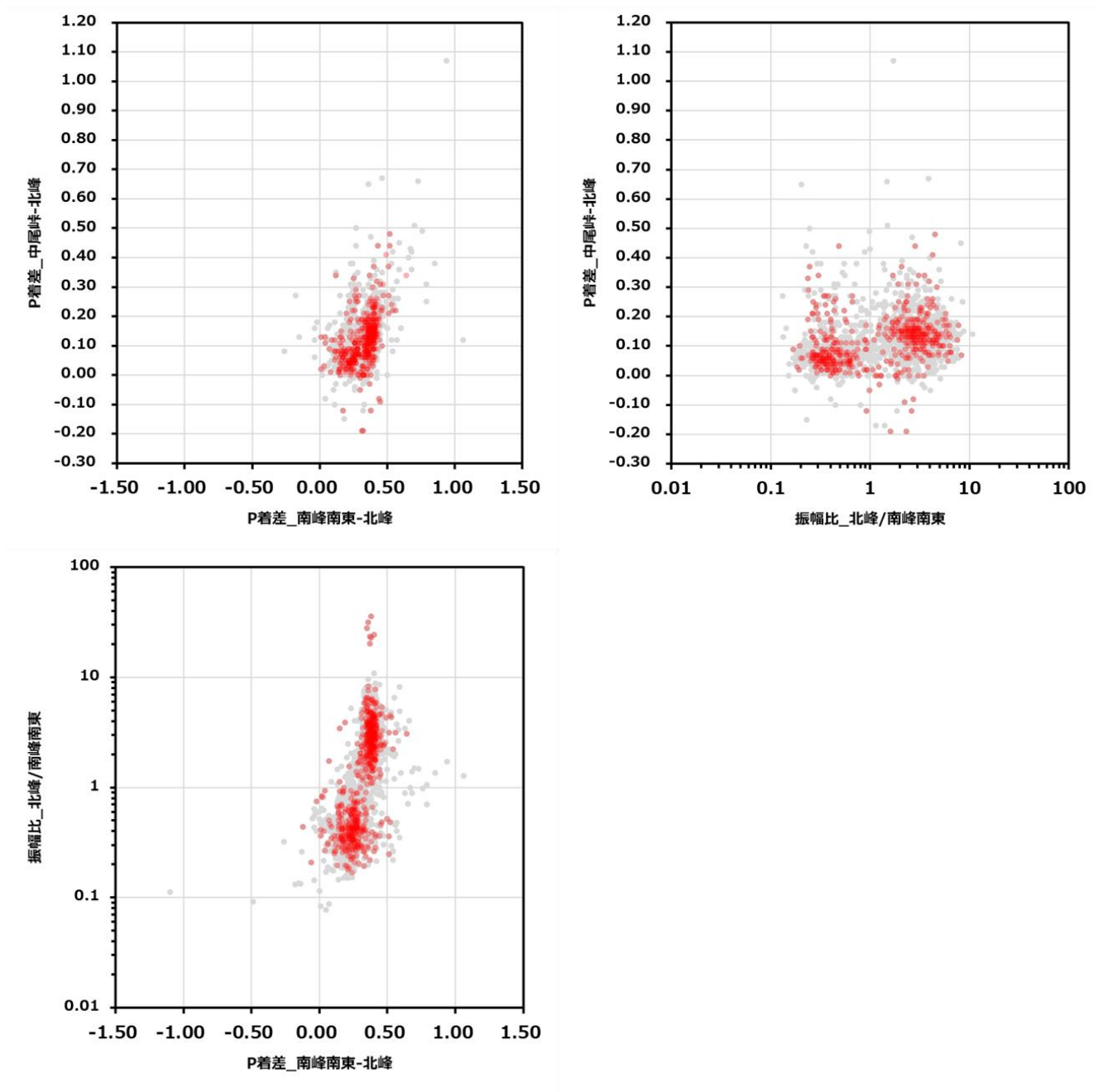


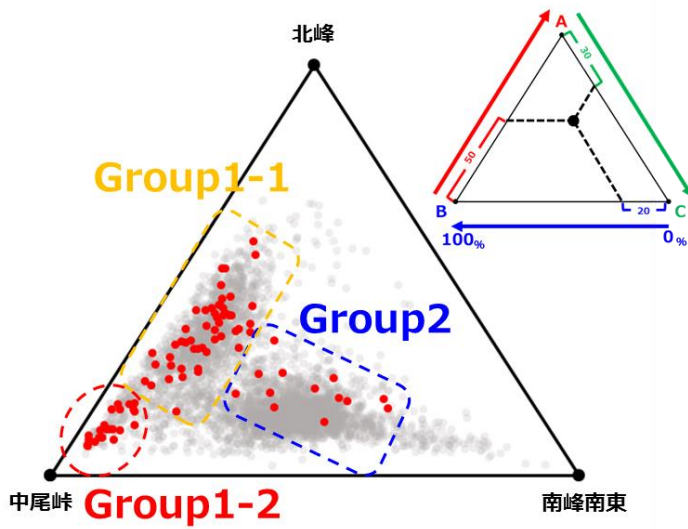
図2 焼岳 P着差と振幅比

灰色：2017/9/1～2023/12/31，赤色：2024/1/1～2024/12/31

・振幅比(北峰/南峰南東)が1以上のグループ(以降, Group1)と, 1未満のグループ(以降, Group2)に分けることができる。

・Group1 はP着差が大きく, Group2はP着差が小さい。

(a)



(b)

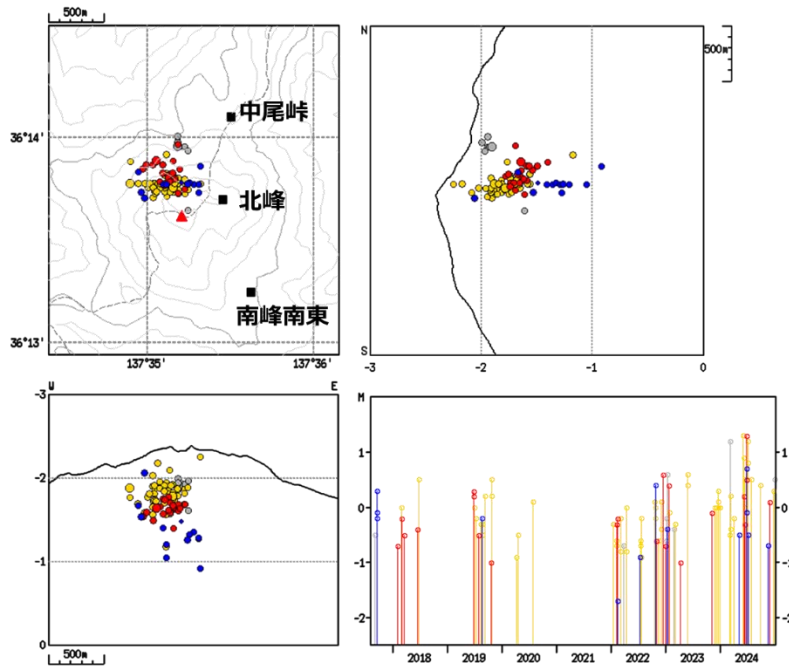


図3 焼岳 三角ダイアグラムと震源

(a) 北峰, 南峰南東, 中尾峠の上下動成分の振幅を用いて整理した三角ダイアグラム. 灰色プロットは全データ. 赤色プロットは, ルーチンで震源が求めたイベント.

(b) ルーチンで求めた山頂付近の火山性地震の震源分布図. 三角ダイアグラム中のグループを示す点線の色と震源分布図のプロット色が対応. 三角ダイアグラムにプロットされないもの(振幅値がないイベント)は, 灰色でプロット.

- Group1-1[n=52]は, 浅め(標高 1,500m 以浅)の南側に分布する.
- Group1-2[n=21]は, 浅め(標高 1,500m 以浅)の北側に分布する.
- Group2[n=13]は, 深めに分布する.

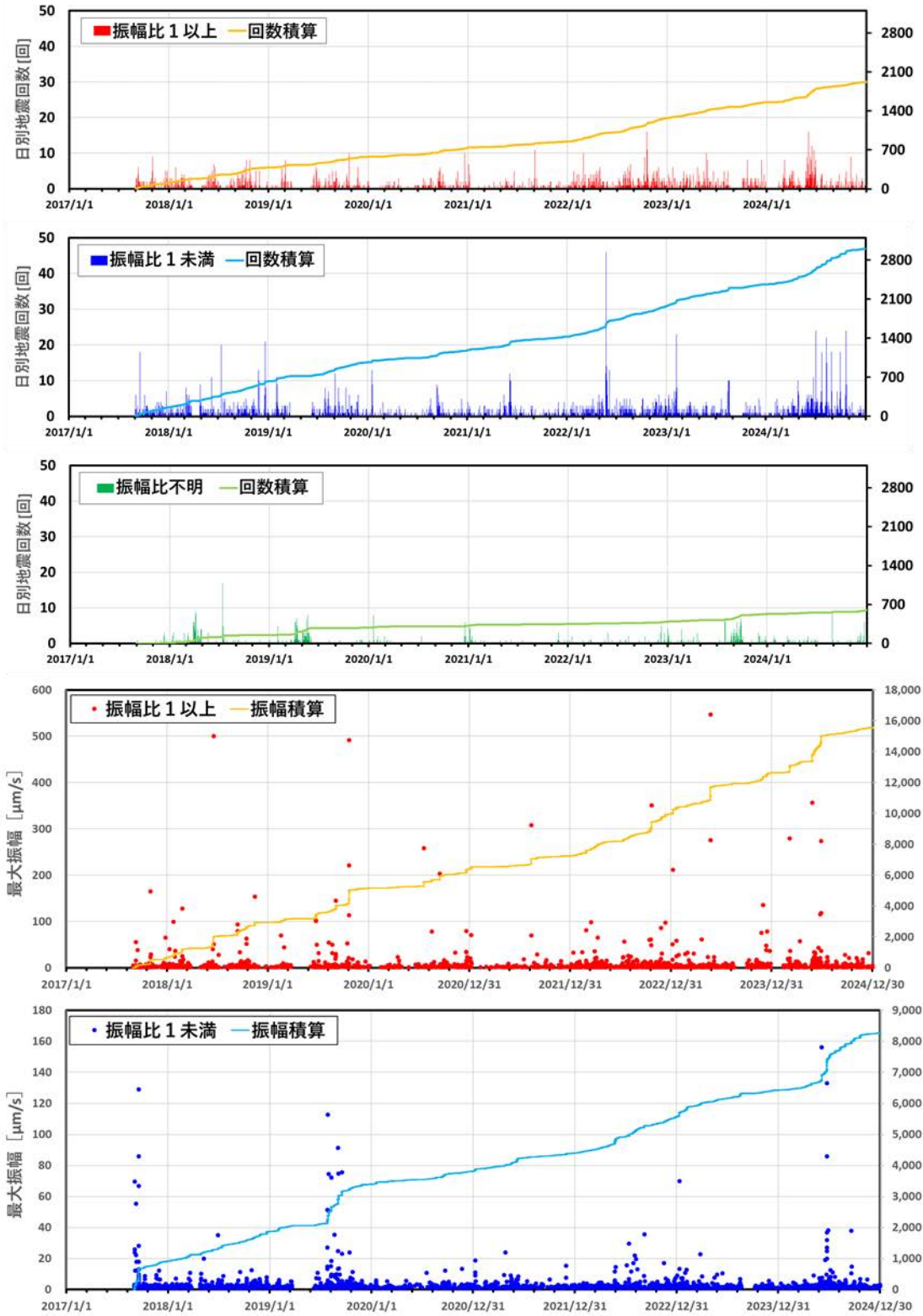


図4 焼岳 振幅比で分類した地震の発生頻度の推移

- 1 段目 : Group 1 の日別地震回数とその積算
- 2 段目 : Group 2 の日別地震回数とその積算
- 3 段目 : 分類できないイベントの日別地震回数とその積算
- 4 段目 : Group 1 のイベントの南峰南東の上下動振幅とその積算
- 5 段目 : Group 2 のイベントの南峰南東の上下動振幅とその積算

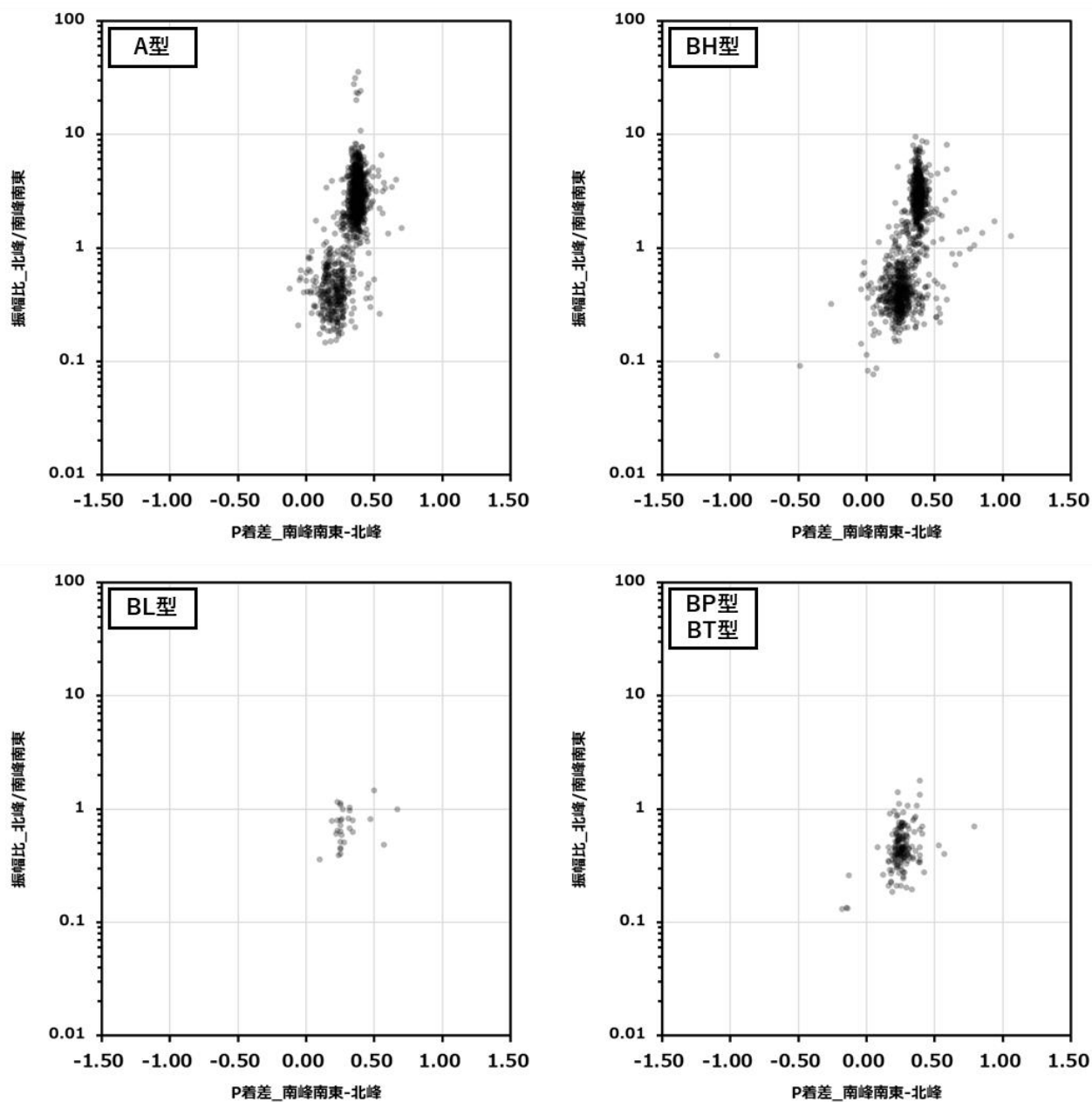


図5 焼岳 地震タイプ別のP着差と振幅比

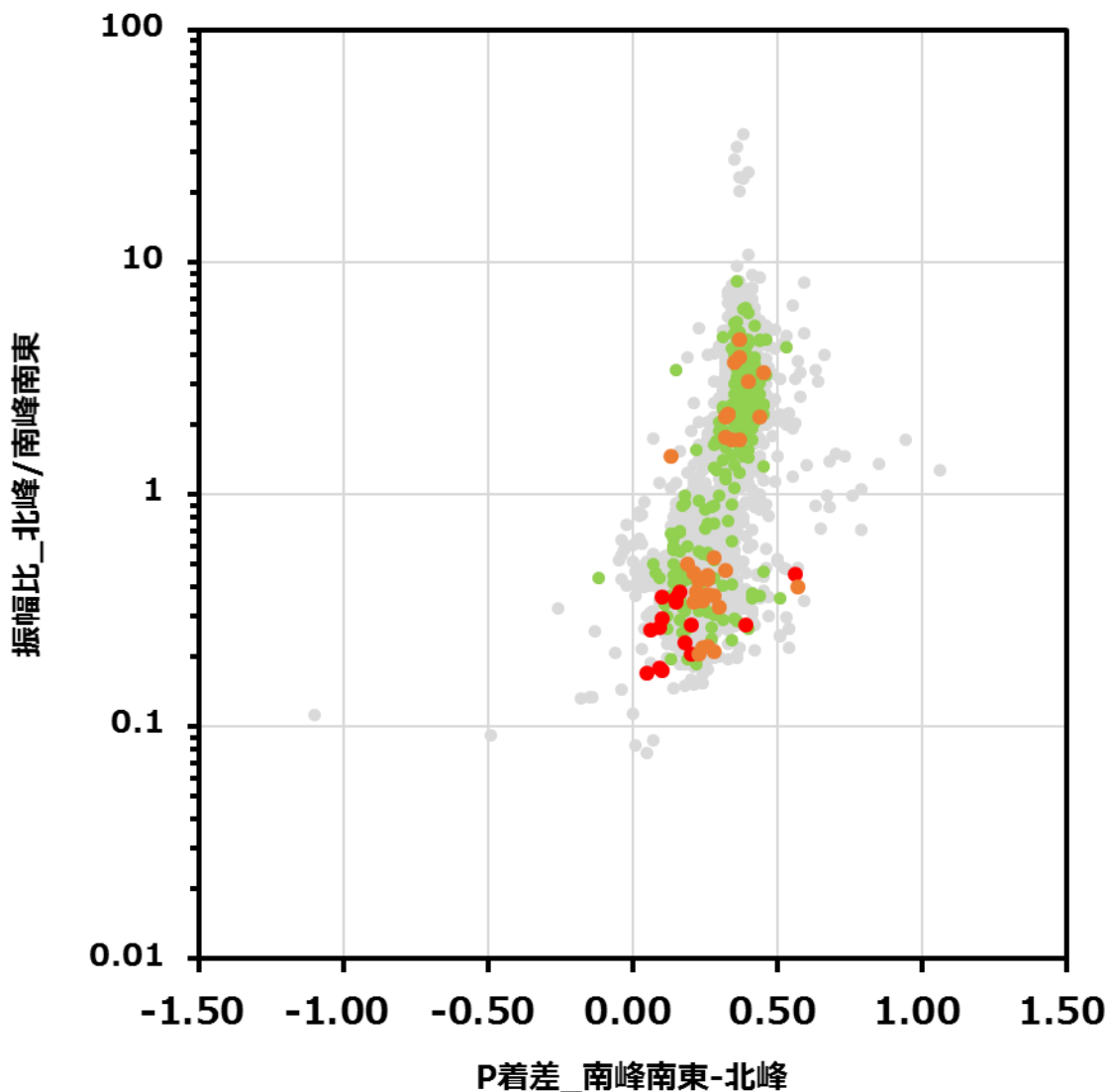


図6-1 焼岳 地震増加時の振幅比

赤：(a) 噴火警戒レベル2への引上げ(2022年5月23日から24日)

橙：(b) 火山解説情報(無印)の発表(2023年8月3日から8月25日)

緑：(c) 火山解説情報(無印・臨時)の発表(2024年5月23日から7月24日)

(a)

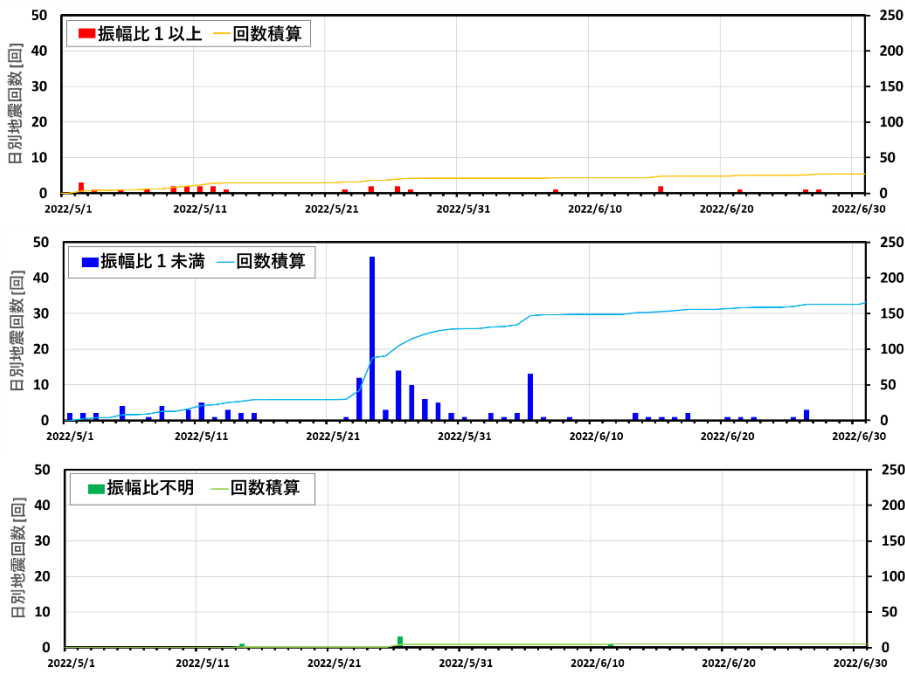


図6-2 焼岳 振幅比で分類した地震の発生場所と発生頻度の推移 (地震増加時)

図6-1の(a)を含む期間を表示. Group2 のイベントが急増した.

(b)

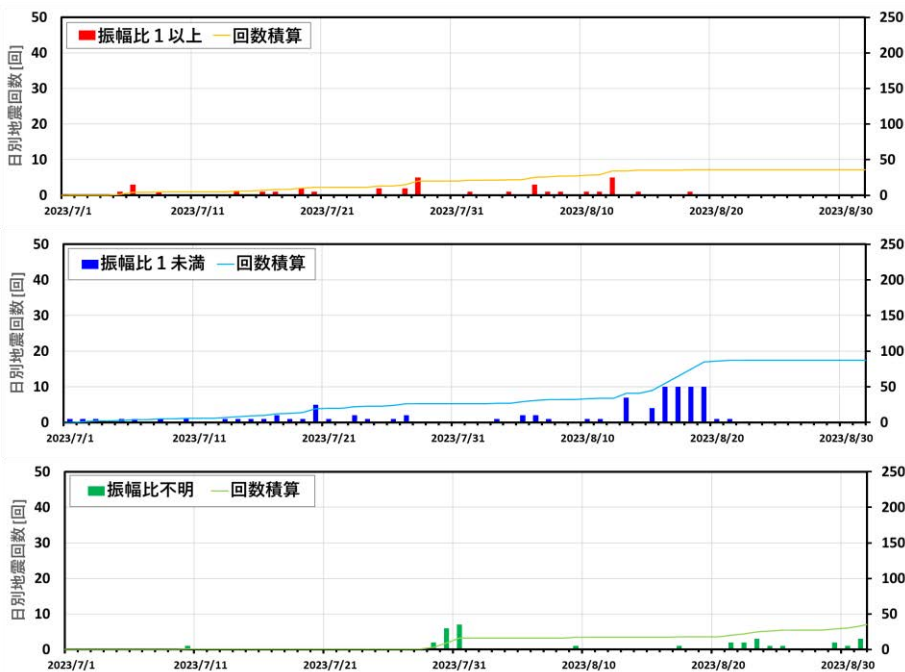


図6-3 焼岳 振幅比で分類した地震の発生場所と発生頻度の推移 (地震増加時)

・図6-1の(b)を含む期間を表示.情報発表(8月19日)の直前に Group2の急増がみられるが、それ以前は Group1と Group2が同程度発生している.

(c)

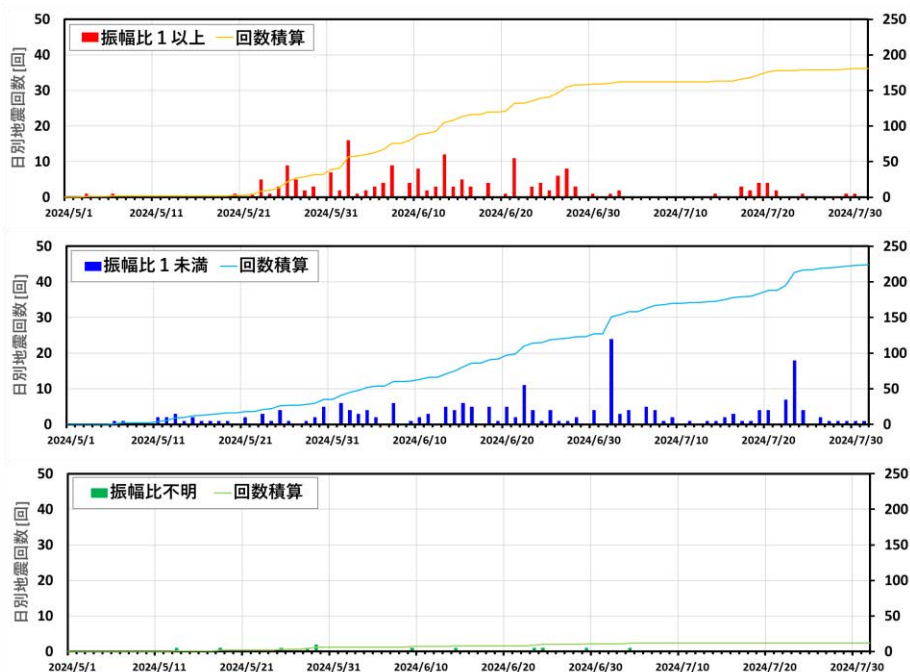


図6-4 焼岳 振幅比で分類した地震の発生場所と発生頻度の推移（地震増加時）

・図6-1の(c)を含む期間を表示.Group1, Group2も同程度みられる. また, 時間的な Group の遷移はみられない.

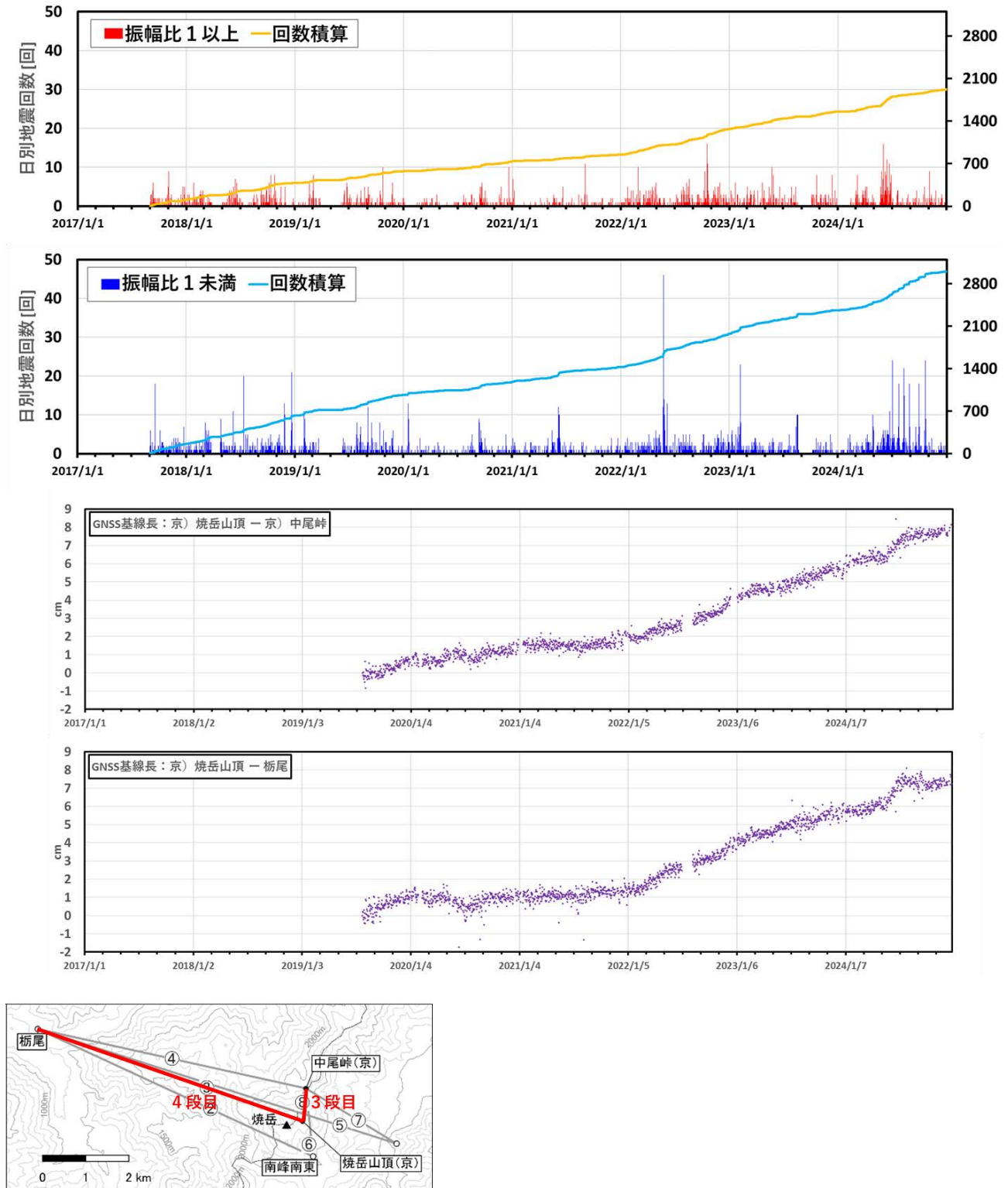


図7 焼岳 発生場所別のイベントの発生頻度の推移と地殻変動

- 1 段目 : Group 1 の日別地震回数とその積算
- 2 段目 : Group 2 の日別地震回数とその積算
- 3 段目 : GNSS 基線長 ((京) 焼岳山頂と (京) 中尾峠)
- 4 段目 : GNSS 基線長 ((京) 焼岳山頂と 栢尾)
- 5 段目 : GNSS 連続観測点配置図

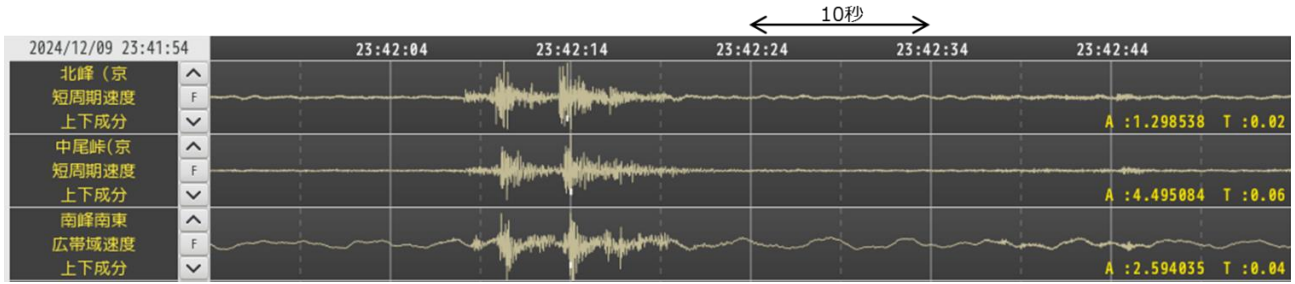


図8-1 焼岳 「連発型」地震の波形例

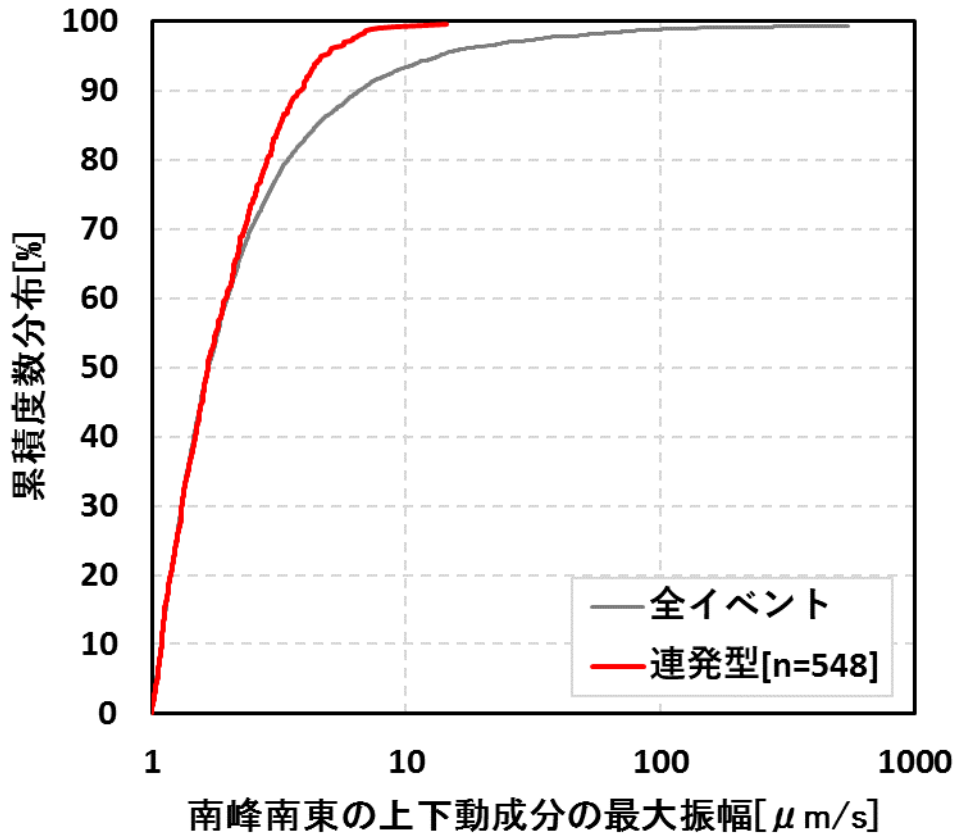


図8-2 焼岳 「連発型」地震の南峰南東の振幅の累積度数分布

データ期間：2017/09/1～2024/12/31

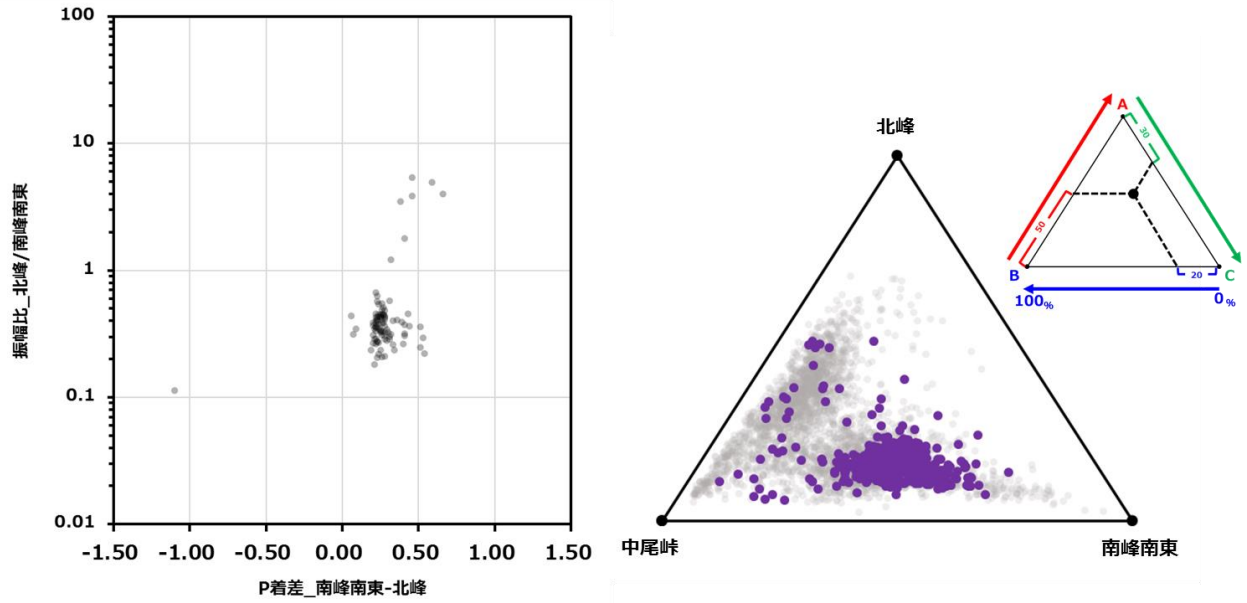


図9 焼岳 「連発型」地震と三角ダイアグラム
 左図：図2の内、連発型に分けて整理したもの
 右図：三角ダイアグラムに連発型に分けて整理したもの
 ・おおむね Group2に属している

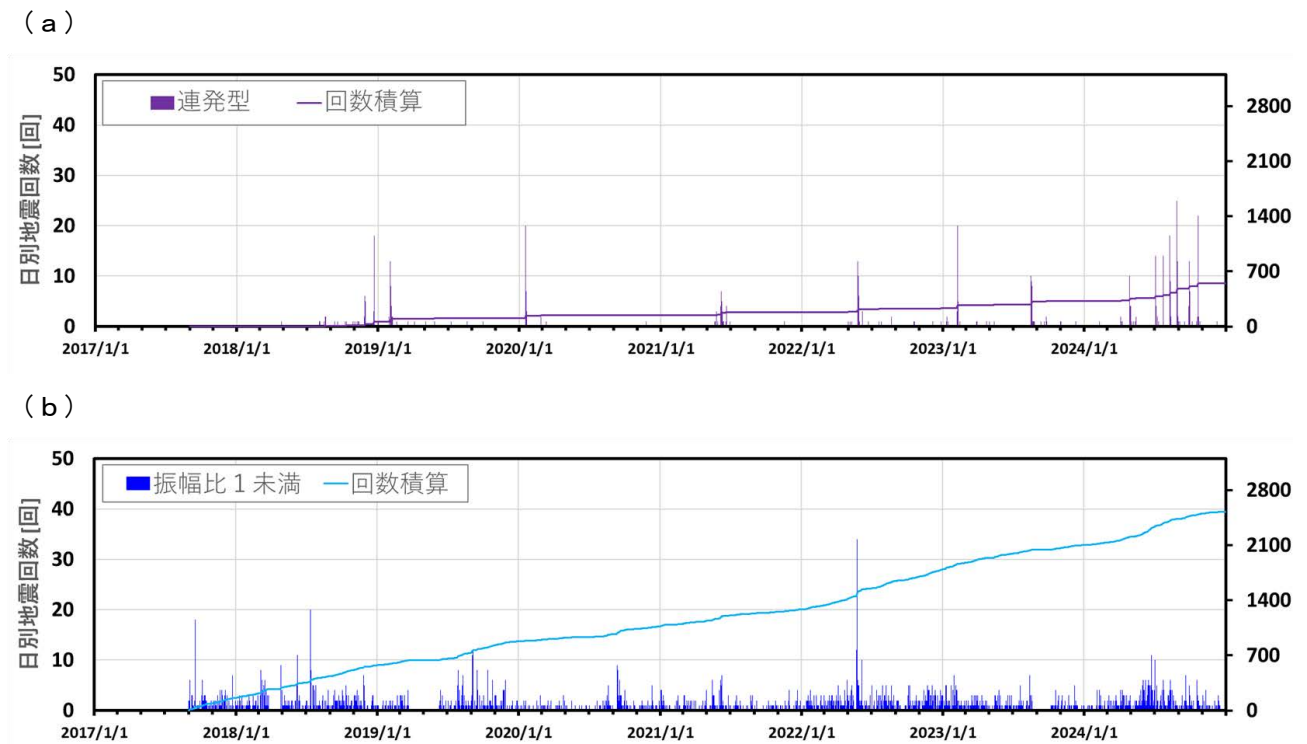


図10 焼岳 「連発型」の発生頻度の推移
 (a) 「連発型」の日別地震回数とその積算
 (b) 「連発型」を除いた Group 2 の日別地震回数とその積算

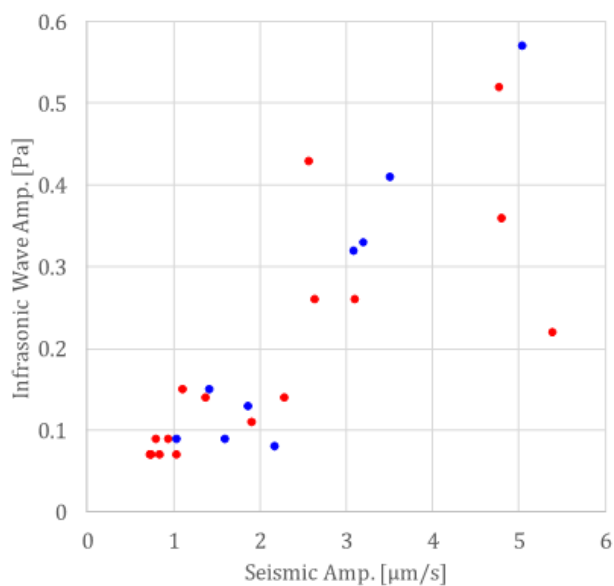


図2 焼岳 空振を伴う火山性地震の中尾観測点における地震動振幅と空振の相関図

● : 2017年 ● : 2019年

・2019年の空振を伴う火山性地震の地震振幅と空振振幅の相関は比較的良好、2017年と同様の相関となることが分かる。

図11 焼岳 空振を伴う火山性地震の中尾観測点における地震振幅と空振の相関

気象庁（2019，第145回火山噴火予知連絡会資料）より引用転載

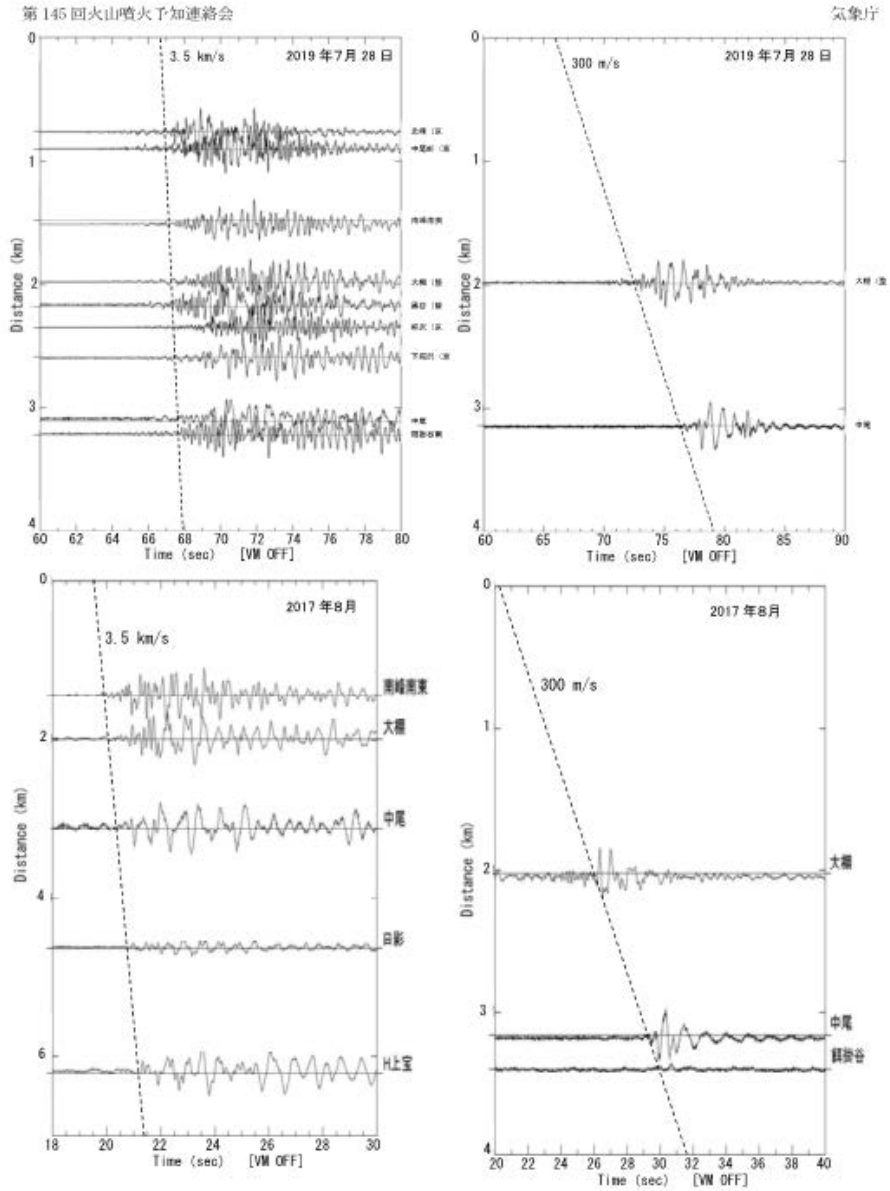


図3 焼岳 黒谷火口を震央および空振源と仮定し、
震央距離順に並べた各観測点の振動波形
・2017年のイベントと同様に、震央および空振源は黒谷火口で説明できる。
・みかけ速度を3.5 km/sと仮定すると、震源の深さは約1.5kmとなる。

図12 焼岳 黒谷火口を震央及び空振源と仮定し、震央距離順に並べた各観測点の震動波形
気象庁（2019，第145回火山噴火予知連絡会資料）より引用転載

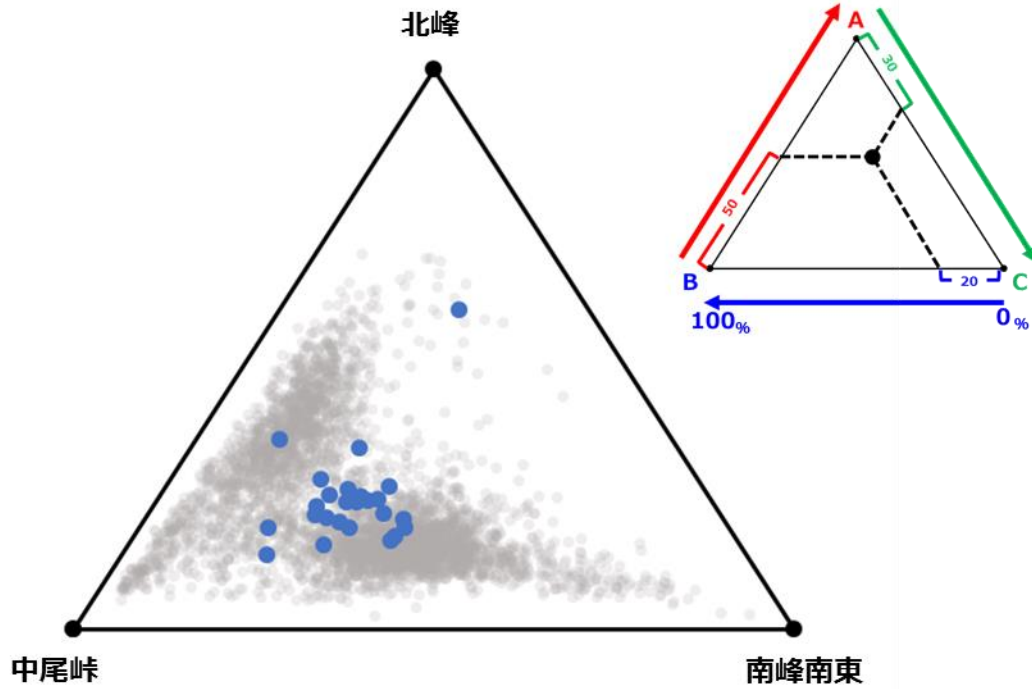


図13 焼岳 「空振を伴う」地震と三角ダイアグラム

三角ダイアグラムに連発型に分けて整理したもの

- ・おおむね Group2に属しており, その中でも Group1に近い位置に分布している.

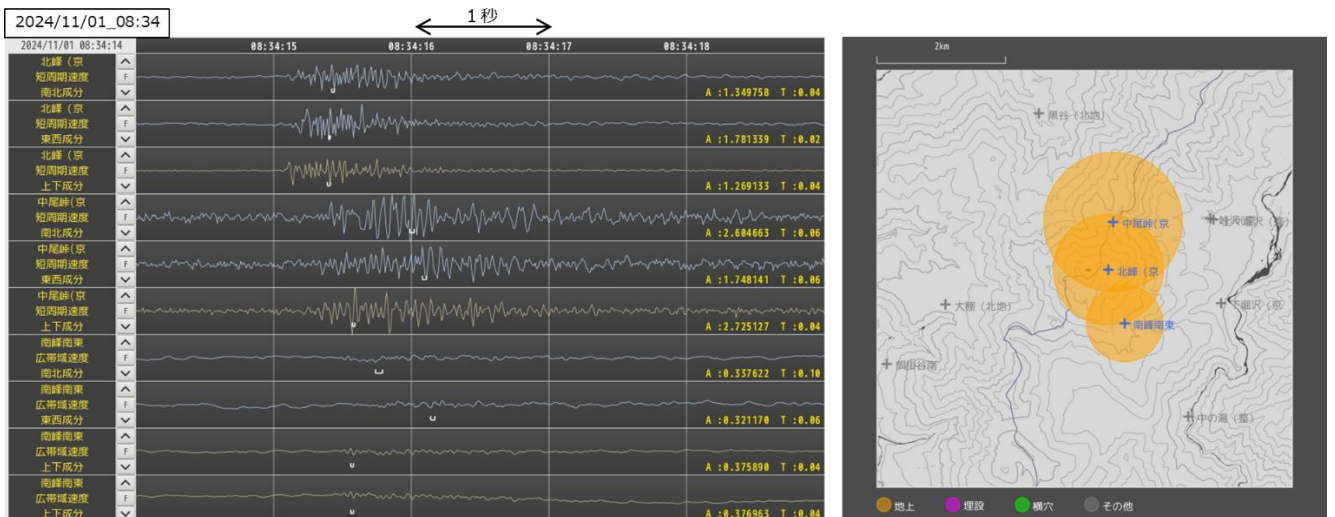


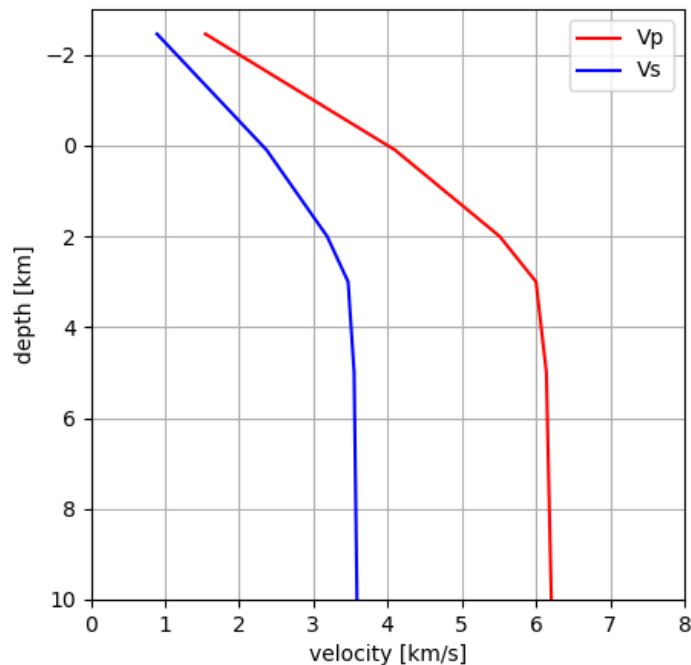
図14 焼岳 南峰南東の検測基準未満で北峰の振幅が大きい波形例

参考. 気象庁における焼岳山頂付近の地震の震源決定について

山頂付近の地震の震源決定には、図S1に示す速度構造を設定し、Hirata and Matsu'ura (1987)によるhypomhを用いて計算する。この速度構造は、山頂付近浅部の地震の震源を精度よく求めることができる速度構造を試行錯誤的に検討したものを採用している。

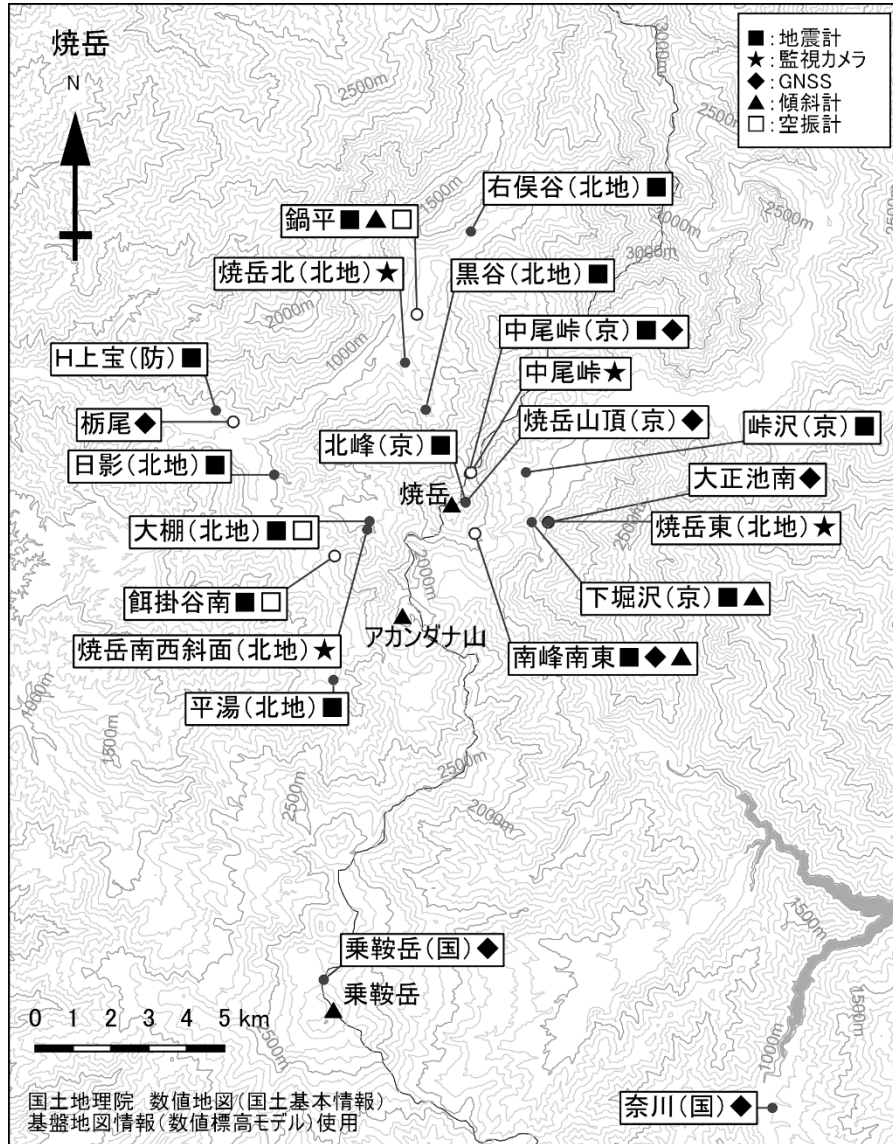
山頂付近の地震のうち、次の3つの条件を全て満たすイベントに対して、推定された震源が採用される。また、どの観測点においても、補正値は設定していない。

- ・北峰(京のP相の検測がある。
- ・大棚(整または餌掛谷南のP相の検測がある。
- ・黒谷(整または中尾のP相の検測がある。



図S1 焼岳 山頂付近（浅部）の地震の震源決定に用いる速度構造

hypomhではP波速度のみ与えるが（S速度Vsは、 $V_s = V_p / 1.73$ で固定）、S波速度についても図示した。



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、(北地):北陸地方整備局、(京):京都大学

図S2 焼岳 震源決定に用いる観測点

H上宝, 三本滝, 黒谷(北地), 右俣谷(北地), 平湯(北地), 日影(北地), 大棚(北地), 南峰南東, 餌掛谷南, 峠沢(京, 中尾峠(京, 下堀沢(京, 北峰(京, 中尾**

※2023年12月1日に中尾観測点の地震計は鍋平観測点に移設した。それまでは震源決定に用いていた。移設後の鍋平観測点は震源決定に用いていない。

焼岳の GNSS・光波観測から推定した膨張圧力源

1. はじめに

焼岳では 2016 年頃から山頂付近の緩やかな膨張を示すと考えられる GNSS 基線長の変化がみられている (図 1)。この資料では繰り返し GNSS・光波観測及び GNSS 連続観測 (京大・国土地理院・気象庁) を用いて膨張源推定を実施した。推定を試みた期間は 2016 年以降の比較的観測点数が確保されている 4 期間で、図 1 に赤矢印で示す。

2. 圧力源の推定方法

膨張源は等方圧力源であると仮定し、その中心は気象庁で求めた震源域とした (図 3)。グリッドサーチにより圧力源の位置と体積変化量を求めた。

3. 結果

期間 1 及び期間 2 では、各観測点の変動方向が多様な方向にばらつく結果となった (図 4)。膨張源の推定を試みたが、グリッドサーチの範囲を変更した場合でも位置と体積変化量は求められなかった。

期間 3 と期間 4 では、各観測点の変動方向は概ね山頂を中心とするパターンが確認できた (図 5)。期間 3 で膨張源を計算すると山頂から約 1 km 西に推定されるが、標高は地表より高い値が求められてしまい膨張源推定はできなかった (図 6)。期間④では震源域に膨張源が推定され、震源域付近の標高 1830 m に求まった (図 7)。

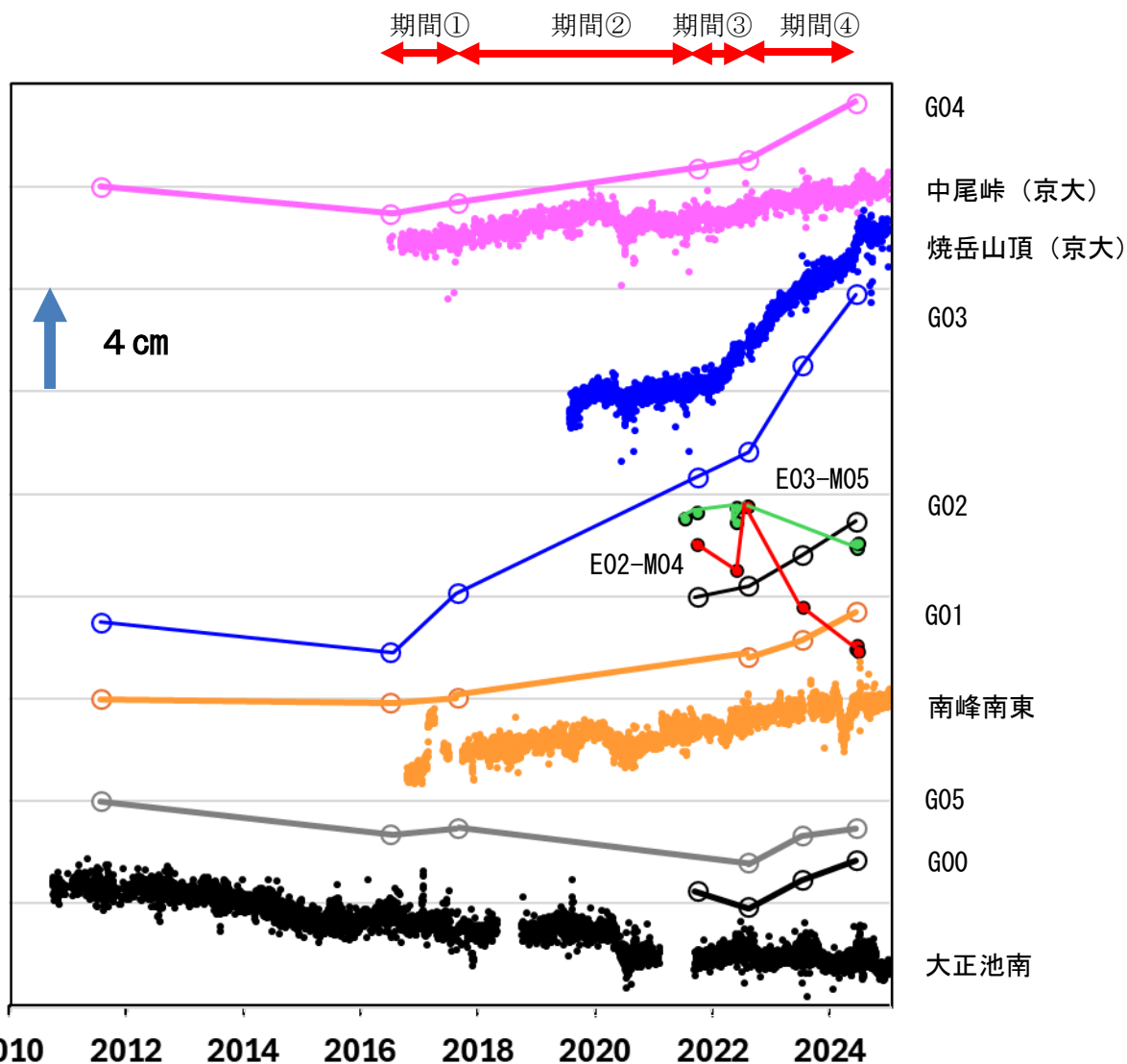


図1 栃尾とのGNSS基線長変化及び光波測距(MA補正)基線長変化(2010年4月~2024年12月)

・山頂付近を中心とする基線の伸びが続いている。

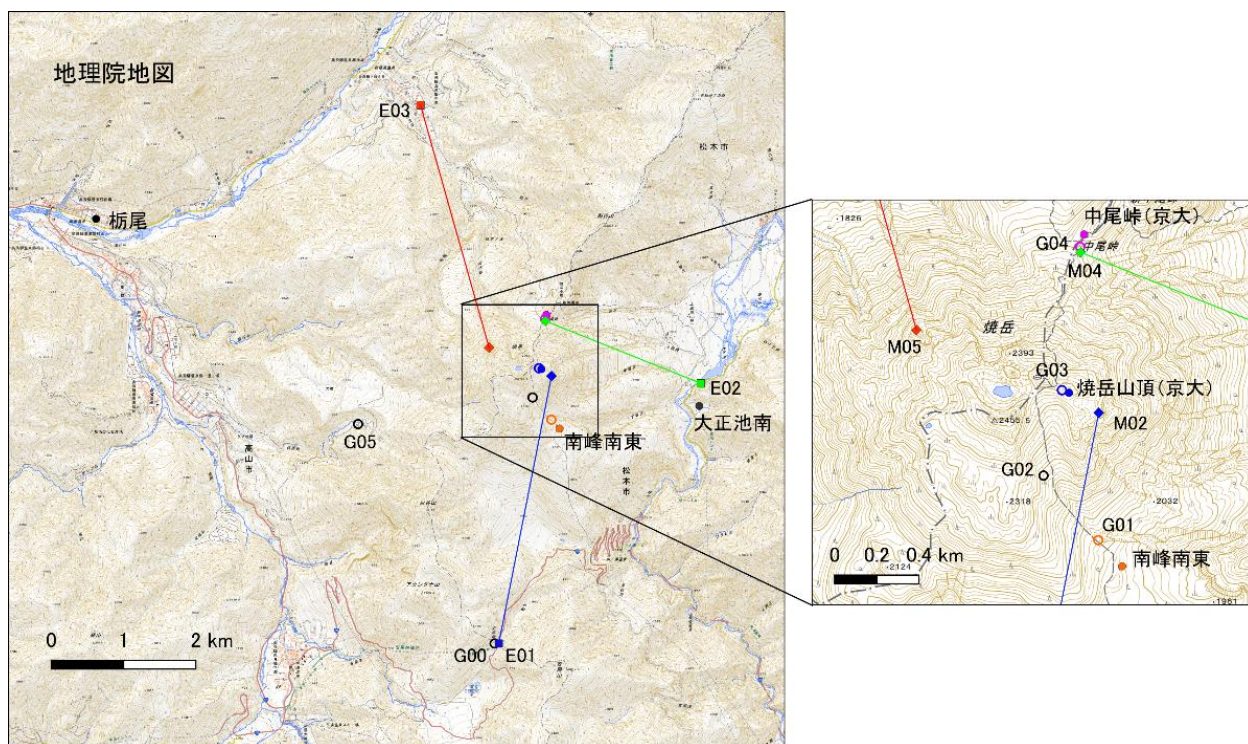


図2 観測点配置図

緯度[度]	36.2292498
経度[度]	137.586036
標高[m]	1500.0
体積[m ³]	1.1310e+5
圧力[Pa]	4.0e+0
地山剛性[Pa]	3.0e+0

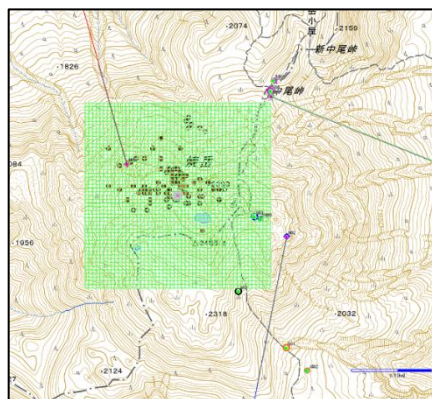


図3 焼岳 地殻変動源の推定に用いた解析範囲

- ・ 等方圧力源の位置を震源域内と仮定し、グリッドサーチによりその位置と膨張量を求めた。
- 右図は水平の刻み値を20m、半区間個数を25とした事例。

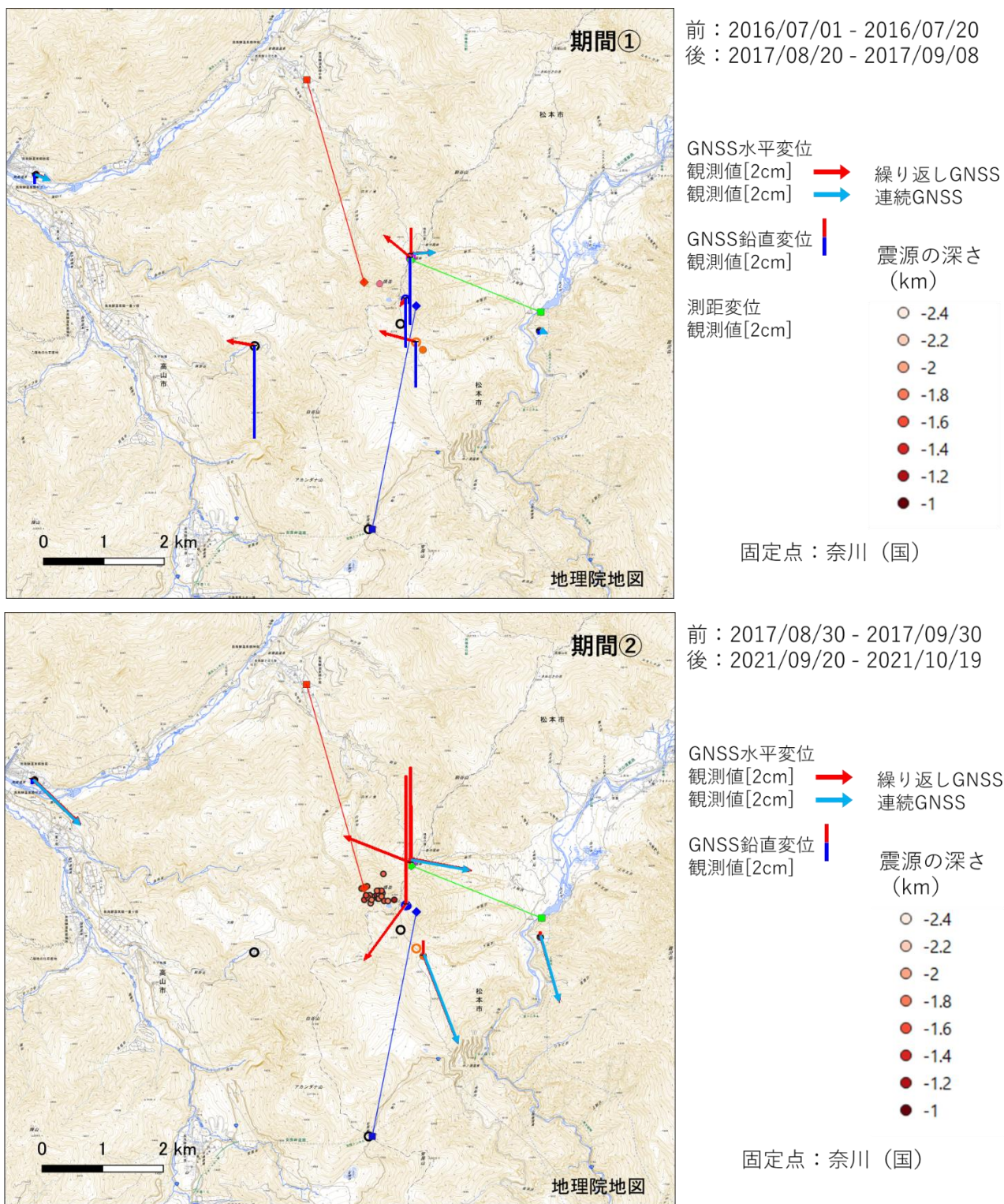


図4 焼岳 期間①②のGNSS・光波測距水平変化
・変動方向が多様な方向にばらつく結果となった。

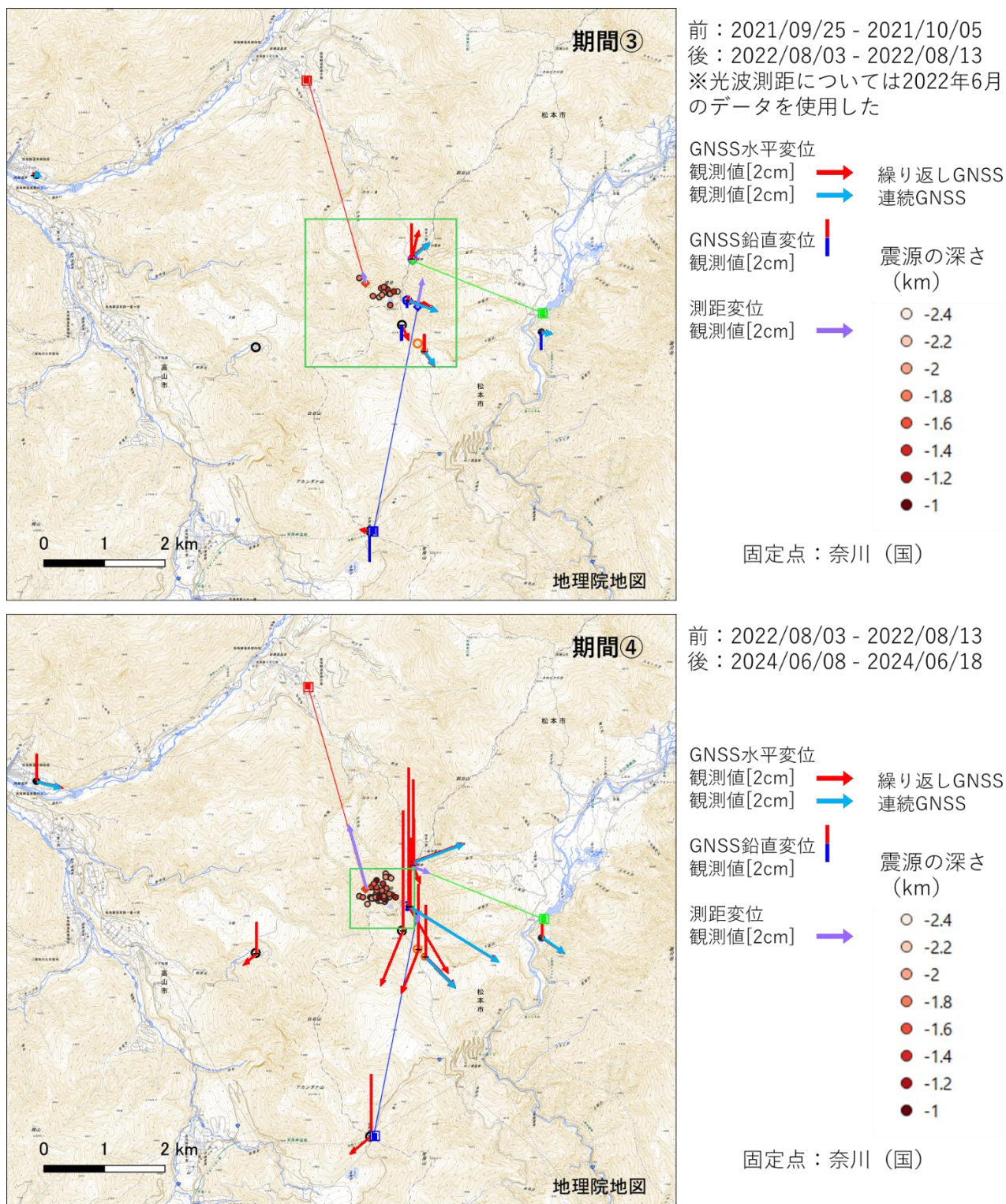


図5 焼岳 期間③④のGNSS・光波測距水平変化
 ・期間③及び④では山頂を中心とする変動パターンが認められた。

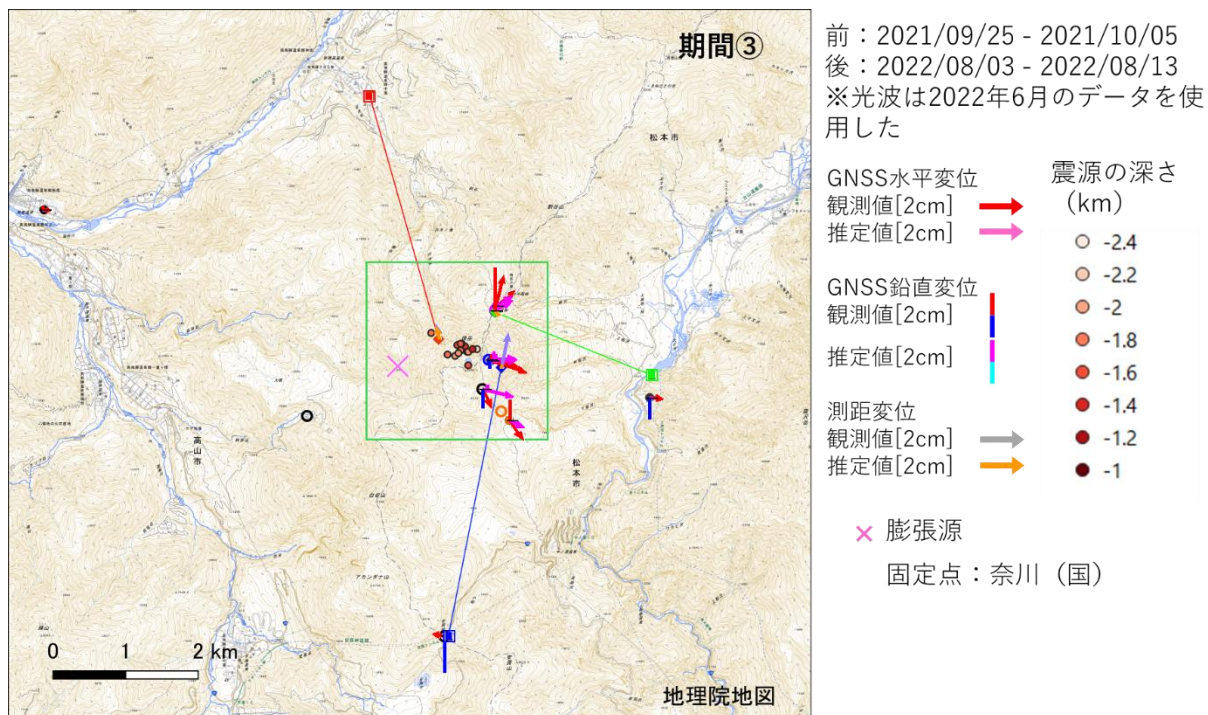
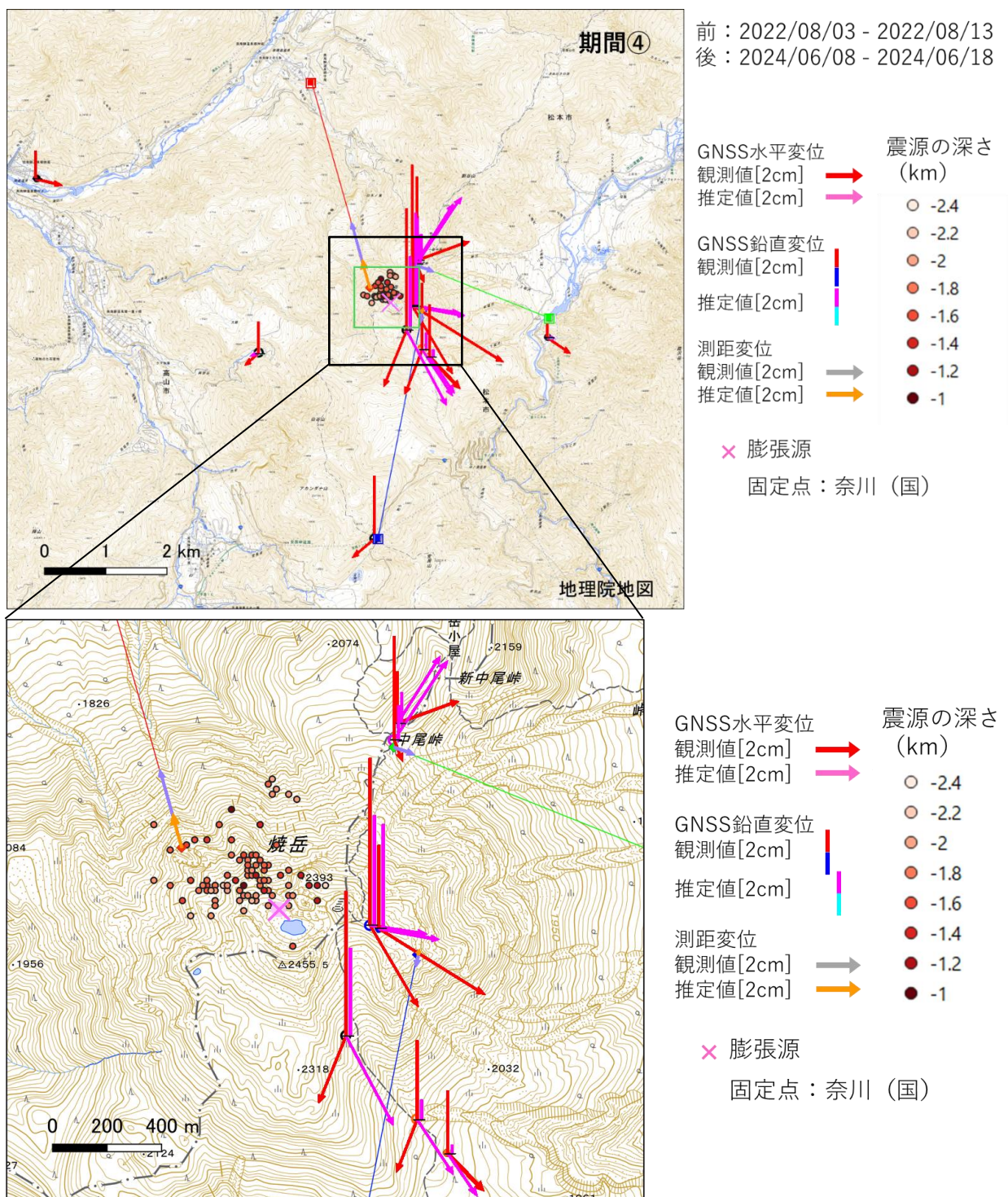


図6 焼岳 地殻変動源の推定結果

・期間③で変動源を計算すると山頂の西1kmに水平位置は求められるが、標高は地表面より高い位置に求められてしまい、膨張源推定はできなかった。



	期間④ 2022年8月 - 2024年6月
体積変化量	1.23×10^5 [m ³]
標高	1830 [m]

図7 焼岳 地殻変動源の推定結果

・ 期間④では震源域に膨張源は推定された。