

気象庁観測データによる吾妻山の火山活動のレビュー (1965 年~2019 年)

Review of Volcanic Activity at Azumayama Volcano Based on Observation Data of Japan Meteorological Agency (1965-2019)

丹原裕¹, 若生勝¹, 堀内慎太郎², 関晋³, 大石雅之¹,

宮川祐司⁴, 近澤心⁵, 岡田純⁶, 碓井勇二³

NIHARA Yu¹, WAKO Masaru¹, HORIUCHI Shintaro², SEKI Susumu³, OISHI Masayuki¹,

MIYAGAWA Yuji⁴, CHIKASAWA Shin⁵, OKADA Jun⁶, and USUI Yuji³

(Received September 30, 2021; Accepted March 15, 2022)

1 はじめに

第 144 回火山噴火予知連絡会(以下, 予知連という.) において, 全国の火山活動に関する情報交換及び議論の活性化を図ることとなり, 第 145 回予知連から「火山活動に関する懇談」の場を設け, 中長期的視点も含めた各火山の活動状況なども検討することとなった. その後, 第 146 回予知連では, 今後 10 年程度で顕著な噴火が予想される火山の抽出を意識して, 気象庁がこれまでに蓄積してきた観測データを改めて整理報告し, 中長期的活動予測の視点での議論を行うとの方針が示され, 第 147 回予知連で吾妻山について懇談を行うこととなった.

上記の経緯を踏まえ, 仙台管区気象台では, 気象庁が吾妻山で 1965 年 7 月から行っている遠望観測, 地震観測, 現地観測の観測データや過去文献等を再点検し, 1966 年の泥水噴出及び 1977 年の小噴火活動を再評価した. また, 2014~2015 年や 2018~2019 年の活動期の経験から近年得られている新しい知見を基に, 2002 年以降の地震と地殻変動データについて再点検を行い, 中長期的な視点で吾妻山の火山活動を整理し

直した. これらの整理に基づいて, 本稿では, 将来の火山活動に対する監視上の着目点の抽出を試みた. また, 予知連での懇談における委員からのコメント等についても報告する.

2 吾妻山の噴火履歴 (過去約 7000 年)

吾妻山の地質学的視点に基づく噴火履歴について, 山元 (2005), Yamamoto et al. (2018), 松本・他 (2018) を基に概要をまとめると以下のとおりである.

吾妻山は数万年間の長い休止期間を経て, 約 7000 年前から噴火活動を再開し, その際に新たなマグマ供給系が形成された. 約 7000 年間の噴火の発生場所は, 五色沼火口~桶沼火口にかけての北西-南東方向に延びた長さ 3km, 幅 1km の範囲に集中している (図 1). 噴出物にみられる本質マグマの化学組成は, 最近 7000 年間でほとんど変化がないことから, これらの火口群のマグマ供給系は同一であったと考えられている. 4800~6000 年前には 4 億 m³ のマグマが噴出し, 吾妻小富士を形成した. 直近 7000 年間の噴火で, マグマの 99% 以上はこの噴火で噴出したと考えられている.

¹ 仙台管区気象台地域火山監視・警報センター, Regional Volcanic Observation and Warning Center, Sendai Regional Headquarters

² 地震火山部地震津波監視課, Earthquake and Tsunami Observations Division, Seismology and Volcanology Department

³ 地震火山部火山監視課, Volcanic Observation Division, Seismology and Volcanology Department

⁴ 仙台管区気象台地震火山課, Seismology and Volcanology Division, Sendai Regional Headquarters

⁵ 地震火山部地震火山技術・調査課, Earthquake and Volcanic Engineering Affairs Division, Seismology and Volcanology Department

⁶ 気象研究所火山研究部 (仙台分室), Volcanology Research Department (Sendai Office), Meteorological Research Institute

マグマが直接関与した直近の噴火は、1331 年に発生し、その後は大穴火口及び^{つばくろきわ}燕沢火口列、硫黄平周辺での水蒸気噴火を繰り返している。1711 年の水蒸気噴火はマグマ貫入を伴ったと考えられ、これ以降、活発な火山ガスの放出が続き周辺が裸地化した。1893～1895 年の明治噴火から現在に続く活動も、この時に形成された熱水系で起きていると考えられている。最新の 1977 年噴火は、大穴火口付近における水蒸気噴火である。これらのことから、今後起こり得る噴火については、現在噴気や熱活動がみられる大穴火口や燕沢火口列、及び硫黄平南火口列周辺での水蒸気噴火の可能性が高いと考えられるが、マグマ貫入の発生間隔からマグマ噴火にも留意が必要である。

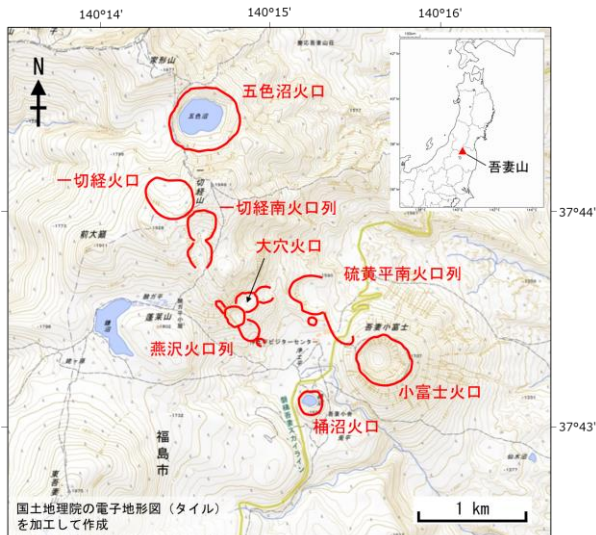
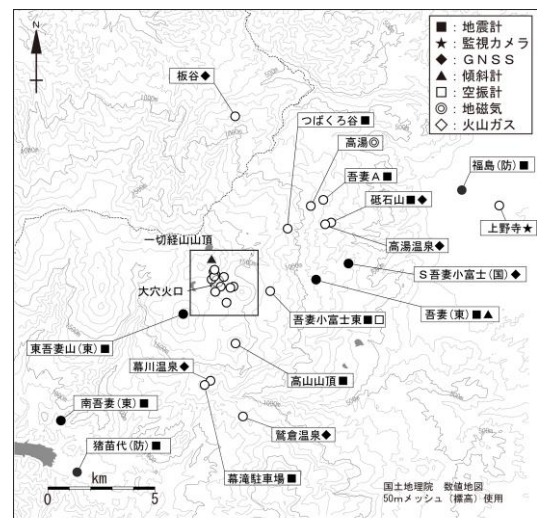


図 1 吾妻山の火口の分布 (上図) と上空からの写真 (下図)。
赤実線は山元 (2005) による火口群を示す。

3 観測データの再点検による吾妻山の火山活動評価 (1965 年～)

3.1 1965 年以降の観測データと火山活動の推移

気象庁では、吾妻山において 1965 年 7 月から遠望観測、地震観測、現地観測を開始した。図 2 に観測点配置を示す。遠望観測は、1965 年 7 月から福島地方气象台 (大穴火口の東北東約 20km) からの目視観測で開始した後、1998 年 11 月からは上野寺監視カメラ (大穴火口の東北東約 14km) による観測に変更している。また、地震観測は、1965 年 7 月から吾妻 A 点 (大穴火口の北東約 6km) で観測し、地震の計数基準は S-P 時



○：気象庁の観測点 ●：気象庁以外の機関の観測点
(東)：東北地方整備局 (国)：国土地理院 (東)：東北大学 (防)：防災科学技術研究所

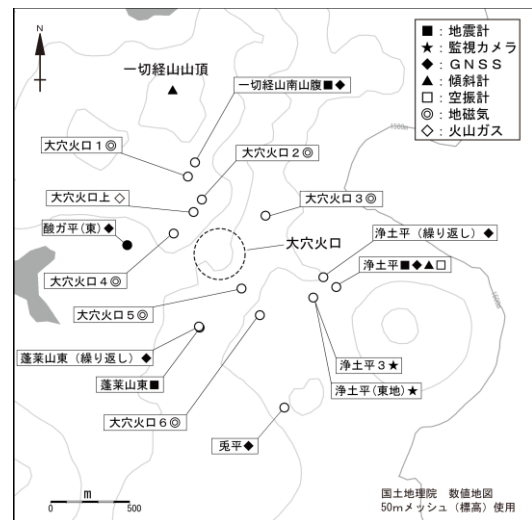


図 2 観測点配置図。

気象庁が現在監視に使用している観測点に加え、廃止した吾妻 A、つばくろ谷、高山山頂、高湯温泉、鷲倉温泉観測点を追記している。上図内の矩形領域は下図の表示範囲を示す。

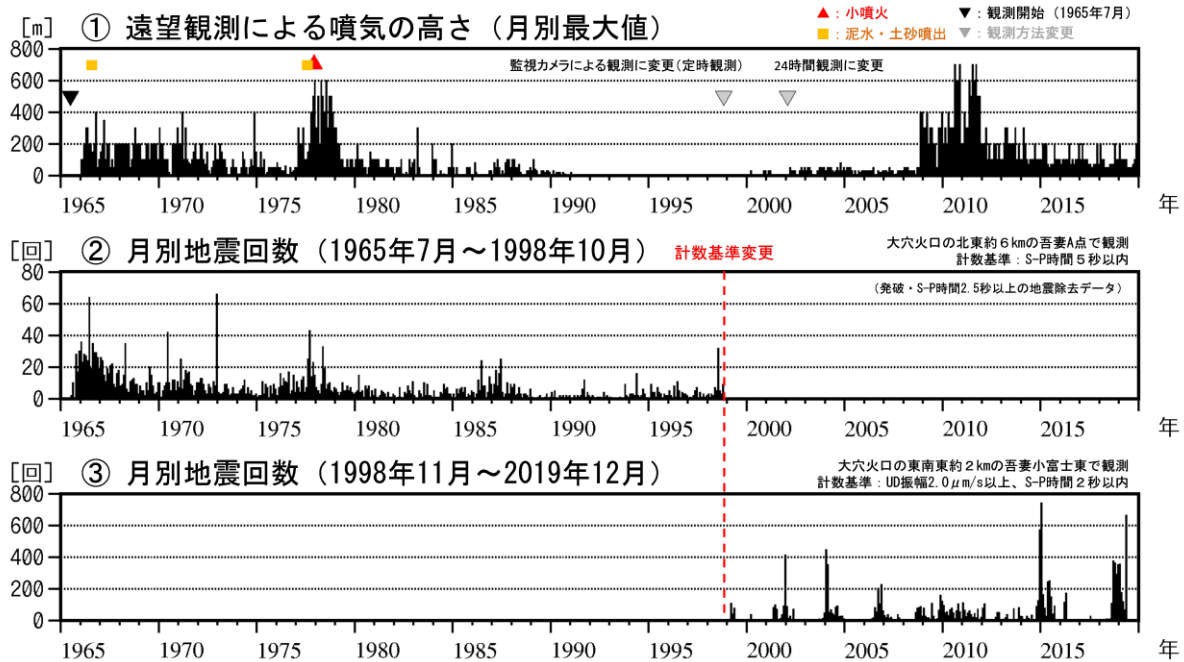


図3 遠望観測による噴気の高さ及び月別地震回数（1965年7月～2019年12月）．
中段の1998年10月までの月別地震回数は、計数基準を満たすもののうち、S-P時間が2.5秒以上の地震及び発破と推定されるものを除外した回数である（本文参照）．

間が5秒以内であった．その後、1998年11月からは吾妻小富士東（大穴火口の東南東約2.5km）で計数し、計数基準は上下動振幅 $2.0\mu\text{m/s}$ 以上、S-P時間2秒以内である．なお、2001年8月以降は、地震観測点を増設し、1点観測から多点観測となっている．現地観測については、1965～2001年頃にかけては概ね春、夏、秋の年3回、噴気の高さや噴気温度、地中温度、地熱域の分布、火山ガス成分などについて観測を行っていた．その後2002年頃からは、GNSSや全磁力観測など、新たな観測種目を追加するとともに観測頻度を年に1～2回に改めたほか、検知管による火山ガス濃度の観測や湧水等の測定を取りやめるなど観測種目を見直した．なお、地殻変動観測については、2001年8月からGNSS連続観測点を設置し、連続観測を実施しており、2011年4月には浄土平観測点に傾斜計を設置している．また、2015年11月からは全磁力連続観測点及び多成分火山ガス観測装置を設置し、連続観測を行っている．

図3に噴気の高さ及び月別地震回数を示す．1998年10月以前に検出された地震には、吾妻山周辺の一般地震や、発破による人工的な震動と思われるものも含まれている．そのため、この月別地震回数は、計数基準を満たすもののうち、P相、S相が検出されておりS-

P時間が2.5秒以上の地震及び発現時刻・S-P時間等から発破と推定されるものを除外した．これらから見た1965年7月以降の活動の概観は以下のとおりである．

吾妻山では火口外に大きな噴石を多数飛ばすような噴火は発生していないが、小規模な噴出現象としては、1966年頃の泥水噴出と、1977年の小噴火があり（図3-①）、どちらも噴出現象に関連して地震活動と噴気活動の活発化がみられている．1977年の噴火後は、

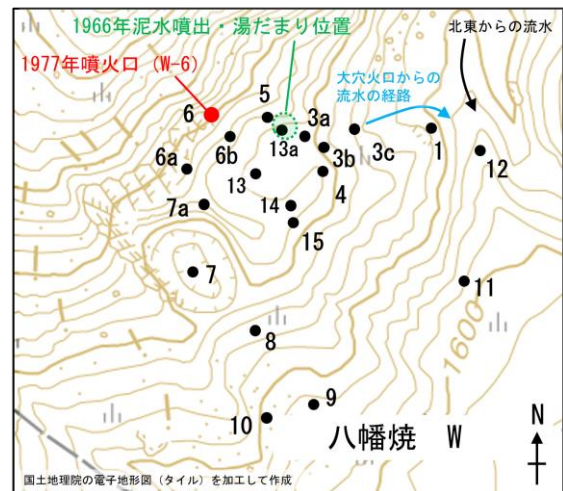


図4 大穴火口周辺の現地観測定點．
W-1～15の位置を示す．

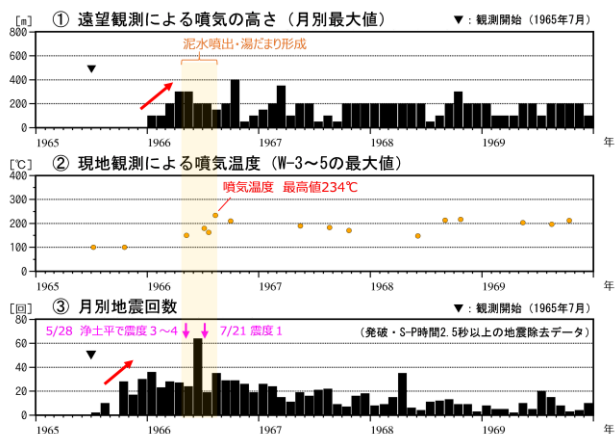


図 5 1966 年泥水噴出前後の火山活動経過図(1965～1969 年)。

1990 年頃までに噴気活動や地震活動は静穏化した。その後、1990 年代後半から再び地震活動の活発化がみられ、数年おきに地震回数の増加が観測されている。また、噴気活動も 2000 年代前半から徐々に上向きとなり、2008～2012 年には活動が活発化した。その後、噴気の高さは低下したものの、2000～2007 年頃よりも高い状態で推移している。1966 年の泥水噴出事例や 1977 年の小噴火事例での注目すべき観測データの変化と火山活動の推移は、高木(1978)や植木・高木(1981)で詳しくまとめられている。次節以降では、各事例の活動推移の概要を述べるとともに、時間軸を延長して現在の新たな知見を踏まえた中長期的な視点から当時の観測データの再評価を行う。

3.2 1966 年の火山活動

1966 年 4～8 月に大穴火口内で泥水の噴出や湯だまりが認められ、現地観測では、噴出場所付近で 234°C の噴気温度が観測されている(図 4, 図 5)。この泥水の噴出開始に先行して、遠望観測による噴気の高さの増大や地震回数の増加が観測されている。地震活動については、浄土平で震度 1 以上の揺れを感じる地震が複数回(最大で震度 3～4 程度)観測されており、近年の地震活動と比較して、当時の地震活動がより活発だったことがうかがえる。佐々木(1980)によれば、それらの地震は吾妻山周辺で発生したと推定されている。気象庁が 1966 年 7～8 月に実施した臨時地震観測では、浄土平で記録された地震の S-P 時間が 2 秒以下の地震のうち、80%は S-P 時間が 0.2～0.5 秒に集中していたことが分かっている(気象庁, 1966)。気象庁では現在、当時の浄土平臨時地震計とほぼ同じ位置に浄

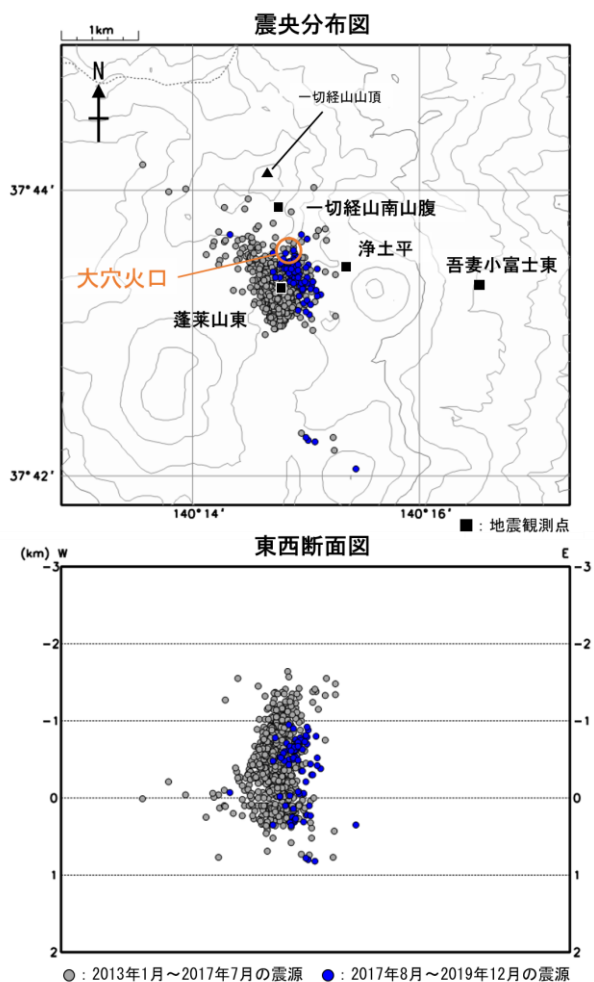


図 6 震源分布図(2013 年 1 月～2019 年 12 月)。2017 年 8 月以降は蓬萊山東観測点を震源計算に用いているためばらつきが小さくなっている(青丸)。震源計算には東北大学のデータも使用している。

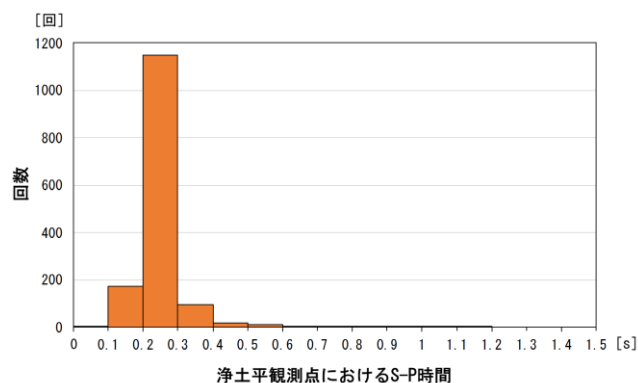


図 7 現在の浄土平観測点における火山性地震の S-P 時間のヒストグラム(2010 年 9 月～2021 年 3 月)。

土平観測点を設置しているが、そこで観測された、近年の吾妻山の火山性地震の S-P 時間のほとんどは 0.2～0.3 秒であり、少なくとも 1966 年の臨時観測時の地震の震源は、これらの S-P 時間から現在の吾妻山の地震活動の震源域と大きく変わらないと考えられる（図 6, 図 7）。

3.3 1977 年の火山活動

1977 年 12 月 7 日の小噴火でも、先行して噴気活動や地震活動の活発化がみられている（図 8）。そのような活動の高まりの中で、1977 年 9 月には、浄土平で震度 1 程度の揺れを感じる地震の発生、10 月に大穴火口において土砂噴出、湯だまりの形成、強酸性泥水の噴出などの噴出現象が確認されている（気象庁、1978）。東北大学の臨時観測によると、1977 年 11 月の地震活動は、1966 年の活動期と同様に大穴火口から一切経山火口近くで、震源は浅かったと報告されている（高木、1978）。12 月 7 日の小噴火は、火口周辺にごく少量の降灰をもたらす程度であった。その後、噴気活動は消長を繰り返しながら、1979 年後半には概ね 77 年噴火前の状態に戻った。小沢・他（1981）の報告によれば、

噴気孔 W-6 の噴気温度は、1978 年 7 月に推定 400°C 程度、11 月に実測 280°C と高温であったことが報告されている。1979 年 10 月には、吾妻火山集中総合観測が行われたが、そのときには既に活動が終息しており、地震活動は低調であることが確認された（清水・他、1981）。また、パンニング法による SO₂ 放出量観測では、噴気量が少なく定量できなかったが、測定装置の

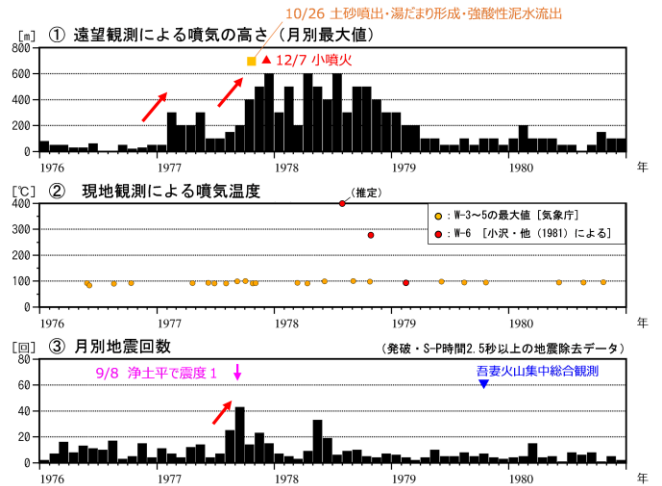


図 8 1977 年噴火前後の火山活動経過図(1976～1980 年)。

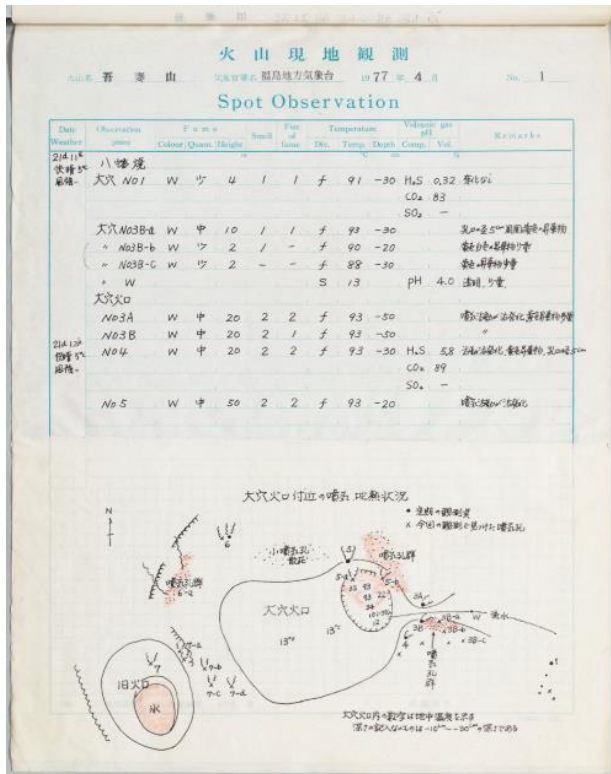


図 9 気象庁による現地観測報告の例（1977 年 4 月の現地観測報告から抜粋）。



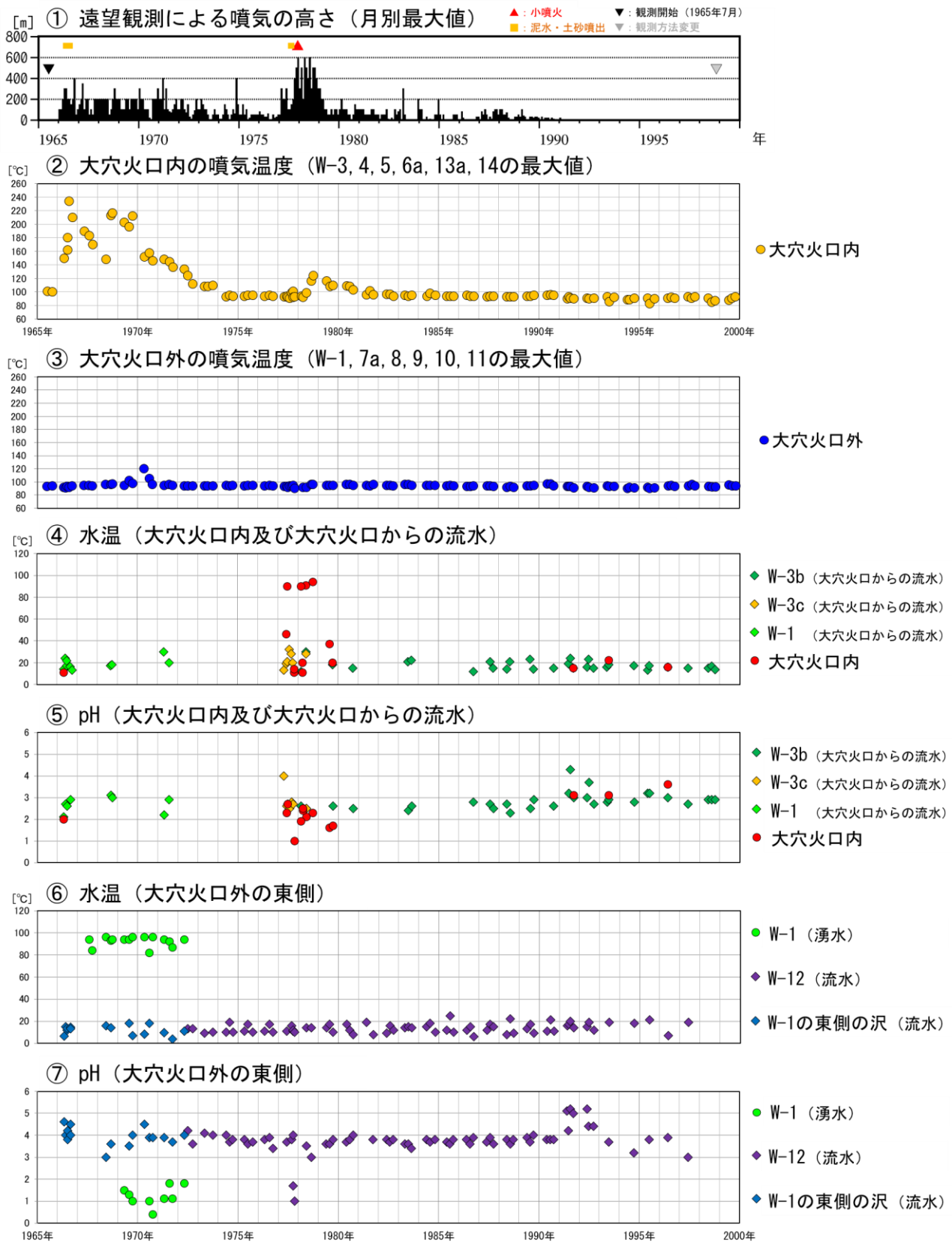


図 10 現地観測による噴気温度と採水測定結果 (1965~1999年) .

能力を考慮すると、1ton/day 以下であったと推定されるとの報告がなされている（太田・松尾，1981）。

3.4 現地観測データの整理

気象庁が1965年以降実施した現地観測データについて、当時の報告書（図9）をもとに再点検を行い、改めてデータを振り返った。まず噴気温度に着目すると、泥水噴出がみられた1966～1974年頃と、小噴火直後の1978～1980年頃に、大穴火口内の噴気温度が100°Cを超えて高い状態であったことが分かる（図10）。この温度は、1990年代の噴気活動が静穏な時期と比較すると、明らかに高い値を示している。一方、大穴火口外の噴気孔では、1970年頃の一部の期間を除き概ねこの標高における水の沸点程度の温度で推移している。次に大穴火口周辺の湧水・流水の水温及びpHについて着目する。1966年や1977年に大穴火口内では湯だまりの形成が確認されているが、噴気活動が活発な時期には、大穴火口内外の他の地点でも少量ながら温泉水の湧出が確認されており、気象庁ではその水温やpHを観測している。大穴火口内の湧水は、火口の北東壁から流れ下り、W-1噴気地熱地帯の北を通って東側の沢に流れ込む（図4）。図10に大穴火口内の湧水及び大穴火口から流れ出る流水の水温及びpHを示す。1965年以降、概ね2～3の値で推移していたpHの値は、1977年10月の強酸性泥水の流出時は2未満の値であり、その後のデータを含めて比較してもやはり異常な値であったことが確認できる。小沢・他（1981）は、噴気孔ガスや湧出温泉水等の成分分析の結果から、この強酸性の泥水は、山体内部の温水だまりに高温の火山ガスが突入し、HCl、SO₂、H₂Sなどの成分が水相に移行したことにより生じたと総括している。また、高木・他（2019）は、気象庁が実施した検知管法による火山ガス観測データから、吾妻山の1977年の小噴火の直前に複数の観測点でCO₂/H₂S比が増大し、噴火後に低下したことを報告しており、マグマからのCO₂の脱ガスの可能性について述べている。CO₂/H₂S比と噴気・地震活動を比較すると、噴火前のCO₂/H₂S比は遅くとも1976年頃から増大しているように見えるが、それに同期するように地震回数の増加、噴気の高さが高まる傾向も見えており、これらの関連性が示唆される（図11）。また、地震回数や噴気の高さのピークよりも、わずかながら先にCO₂/H₂S比のピークがみられていることは興味深く、火山ガス濃度比を監視するこ

とで地震観測よりも先に火山活動の異常を検知できる可能性を示唆する。以上のように1977年の強酸性の泥水の噴出は地下からの火山ガスの供給量の増加を示唆すると考えられるが、1966年からの噴気活動の活発化でも大穴火口の東側の観測地点W-1噴気地熱地帯で1967年頃から温泉水の湧出がみられ、1969～1973年にかけて観測されたpHは2未満と強酸性であり、この期間についても地下からの火山ガスの供給量が増えていた可能性がある（図10）。

3.5 地震活動の長期的推移

3.2節や3.3節で述べたように、1966年や1977年の地震活動の震源域は近年の地震活動と同様大穴火口周辺の浅い領域で発生していたと考えられる。一方、1998年10月以前の地震観測は、前述のとおり広範囲の地震を捕捉する計数基準であった。発破やS-P時間2.5秒以上の地震を除去しても、それらの領域以外の

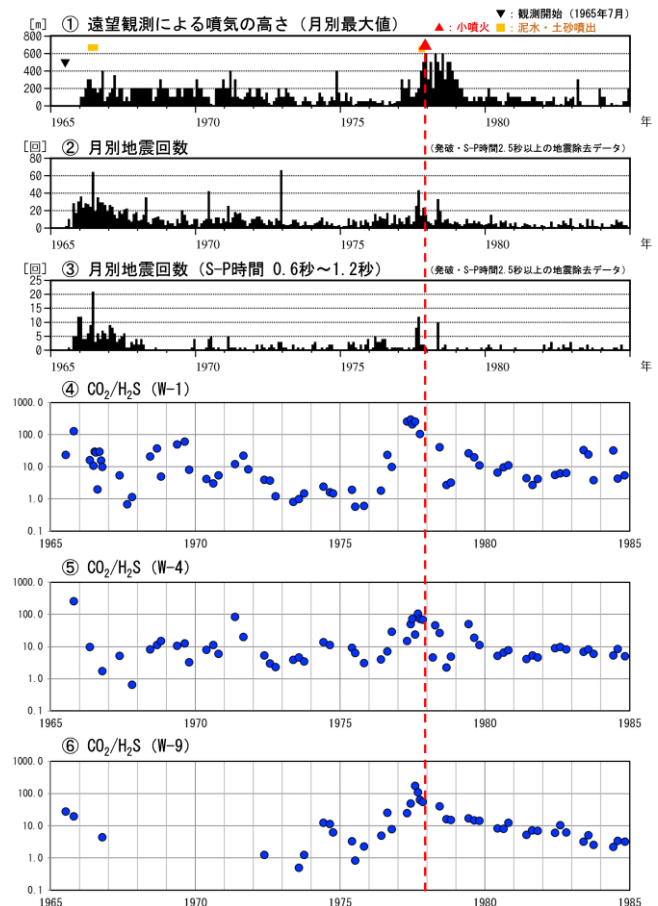


図11 活動経過図（1965～1984年）。

火山ガス濃度比は、高木・他（2019）による精査データを使用した。

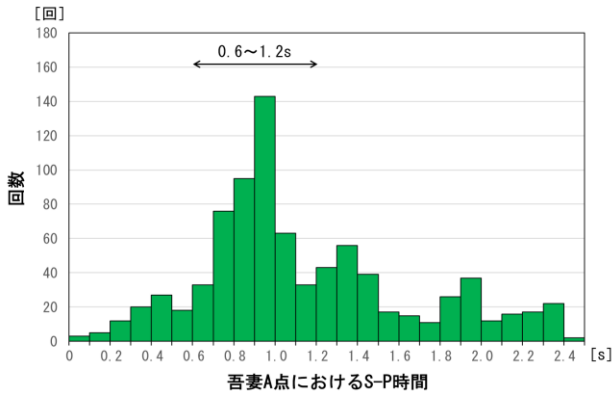


図 12 吾妻 A 点における S-P 時間のヒストグラム (1965 年 7 月～1998 年 10 月)。

地震が多く含まれる可能性がある。佐々木 (1980) は 1966～1979 年の火山性地震について、吾妻 A 点、安達太良 A 点、磐梯 A 点の 3 観測点を用いて震源を計算した。そのうち吾妻山浅部と思われる地震の吾妻 A 点の S-P 時間は、0.6～1.2 秒であった。吾妻 A 点で観測された S-P 時間のヒストグラムを図 12 に示す。0.9～1.0 秒を中心としたピークがみられるが、佐々木 (1980) の震源計算結果を考慮すれば、これが吾妻山浅部の地震に対応すると考えられる。そこで、S-P 時間 0.6～1.2 秒の地震を抽出し、大穴火口周辺浅部で発生したと思われる地震の推移を調べた。その月別地震回数を図 11-③に示す。これを見ると、1966 年の泥水噴出や、1977 年の小噴火事例で地震回数の増加がみられており、噴出現象に先立って吾妻山浅部の地震活動が活発化していたことがわかる。また、1966 年からの地震活動では、1968 年にかけて比較的ゆっくりと地震回数が減少していく様子がみられており、地震回数が急速に減少した 1977 年噴火の推移とは対照的である。

1998 年 11 月に地震計数に用いる観測点を吾妻小富士東に移設したが、その際に並行観測をしていなかった。内田 (2008) は、基準点変更前後の地震活動を比

較するために、東北大学の地震回数と気象庁の地震回数の比から、基準点変更前後の気象庁の地震回数の比を算出した。その結果、変更後/変更前の回数比が 15 倍という結果を得たが、算出する期間によってその比は 10 倍から 50 倍程度の値をとり得るとしており、結論として 1999 年以降に 2～3 年おきに発生した吾妻山の地震活動は、1960 年代、1970 年代の規模と同程度かそれ未満であることが推定されるとしている。1960 年代、1970 年代は浄土平で震度 1 以上の地震が発生しており、地震規模の点からみても同様のことが推察できる。内田 (2008) による報告以降も吾妻山の地震活動は数年おきに活発化を繰り返しており、2014～2015 年や 2018～2019 年に地震回数の増加がみられている。それらの活動についても、変更後/変更前の回数比の不確定性を踏まえ、最大規模の地震が一元化震源でマグニチュード 1.2 程度の活動であることも考慮すれば、1960 年代、1970 年代と同程度かそれ未満であると考えられる (図 13)。

4 近年の多項目観測データの再点検による吾妻山の火山活動評価 (2002 年～)

4.1 近年の火山活動

2002 年以降、気象庁では GNSS 観測や全磁力観測などの観測種目を追加し、多項目の観測データが得られるようになった。図 14 に示すように吾妻山では 2～3 年おきに地震の増加がみられており、2003～2004 年、2006～2007 年、2008～2012 年、2014～2015 年、2018～2019 年に地震回数が増加している。また、GNSS 繰り返し観測では、その地震増加と同時期に火口付近浅部の膨張を示す変化が観測されている。吉田・他 (2012) は 2002～2009 年の GNSS 繰り返し観測及び連続観測データの解析から大穴火口付近の地表面下 200～600m の深さに変動源を推定しており、それらを浅部熱水だまりの膨張・収縮と解釈している。この大穴火口付近浅部の膨張は、そ

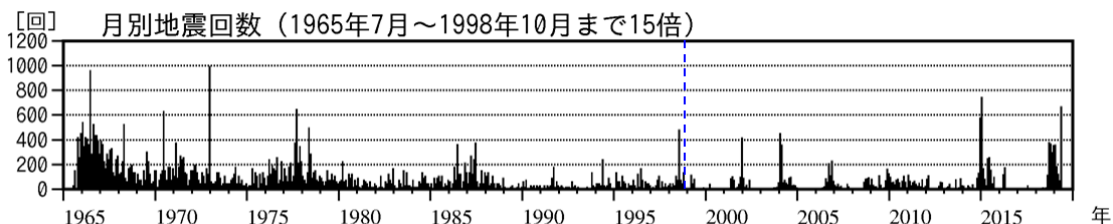


図 13 統計接続した月別地震回数 (1965～2019 年)。

内田 (2008) による基準変更前後の回数比から 1965 年 7 月～1998 年 10 月の地震回数を 15 倍している。

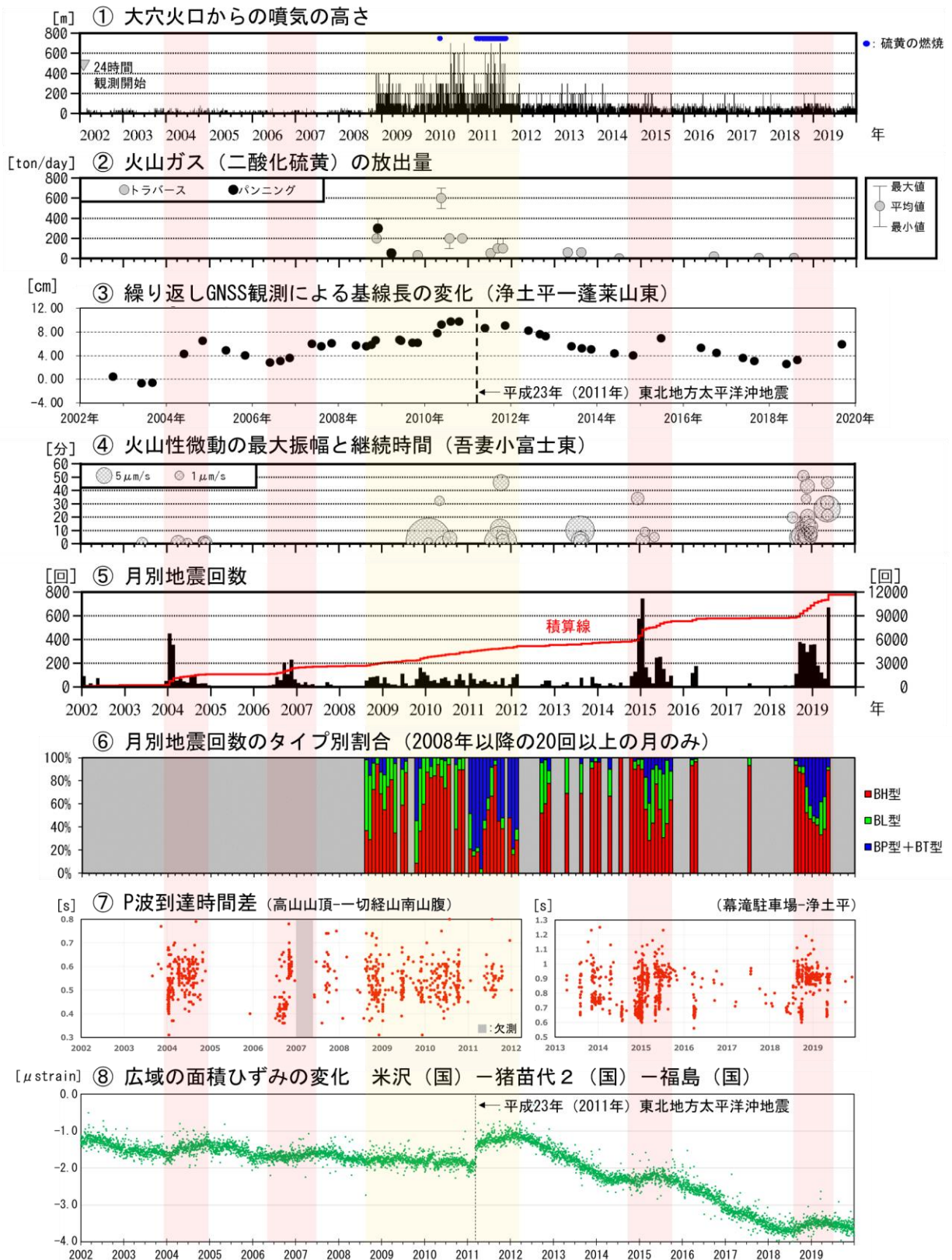


図 14 活動経過図（2002～2019年）。

⑦のP波到達時間差はBH型地震のみを示している。⑧の面積ひずみは国土地理院のF3解を使用した。黄色で示す期間は、噴気活動が顕著に活発化した活動期、赤色で示す期間は、地震の急増と同期して山体浅部と深部の膨張が観測された活動期を示す（本文参照）。

の後の地震増加時でも、GNSS 観測のほか、傾斜計や SAR 干渉解析、光波測距観測でも捉えられている（例えば、気象庁（2015）、国土地理院（2015）、気象研究所（2019））。一方、噴気の高さに着目すると、2008～2012 年は噴気活動が活発なのに対し、それ以外の地震増加時には顕著な噴気の変化はみられず、特徴が異なる点もみられる。東北大学（2015-b）は、2014～2015 年の活動では浅部の膨張だけでなく、吾妻山の地下数 km の深部の膨張も伴っていた可能性があることを報告している。また、2018～2019 年の活動では、深部膨張に加え、活動初期に震源域（海拔下 1km 以浅）の中でもやや深いところで発生する高周波（BH 型）地震が多発していたことが分かった（関・他，2021）。このような近年明らかになった知見をもとに、活動期の深部膨張の有無や震源の移動に着目して 2002 年から 2012 年頃の観測データを再点検し、その特徴を整理した。

4.2 近年の活動期における深部膨張に伴う地殻変動

吾妻山の火山活動の活発化に伴う、地殻変動から推定される地下深部（海拔下 2km 以深）の圧力源による膨張は、2014～2015 年、2018～2019 年の活動期に報告されており、その圧力源の位置は近年明らかになりつつある。2018～2019 年の地殻変動について、関・他（2021）は、傾斜計及び GNSS 連続観測データの解析から、大穴火口付近ごく浅部（標高 1.3km）と山体深部（海拔下 2.7km）の

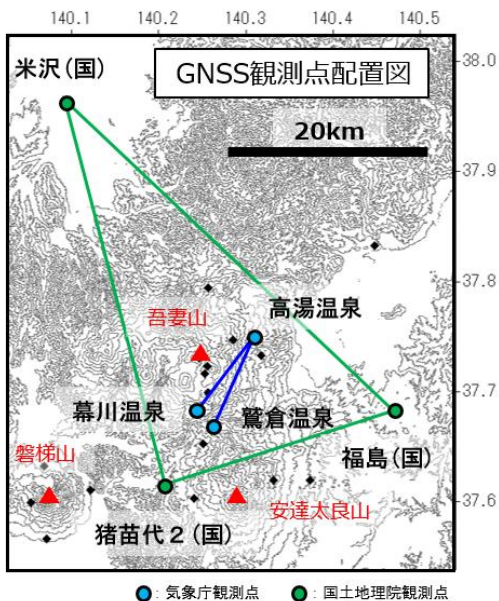


図 15 GNSS 観測基線図。

計 2 つの等方圧力源 (Mogi, 1958) を仮定したモデルと、大穴火口付近ごく浅部（標高 1.3km）と山体深部（海拔下 2.7km, 9km）に計 3 つの等方圧力源を仮定したモデルの 2 通りのモデルを提案している。その後の GNSS 観測データに着目すると、深部膨張を示唆する変化は 2020～2021 年にも観測されており、仙台管区气象台（2021）は、吾妻山から 10km 以上離れた広域の観測点を結ぶ基線と、それよりも短い中距離の基線とで、伸びの変化期間が異なることを報告している。この事は、地下深部の膨張が単一の等方圧力源では説明できない事を示しており、関・他（2021）の 3 つの圧力源を仮定したモデルを支持する。Ichiki et al. (2021) は、MT 法による観測から吾妻山地下の 3 次元比抵抗構造探査を実施し、大穴火口直下の海拔下 3～15km にマグマだまりを示唆する高電気伝導体を推定した。その高伝導体の浅部は、熱水とデイサイト質のメルトと岩石の複合体で、且つ体積分率として熱水が

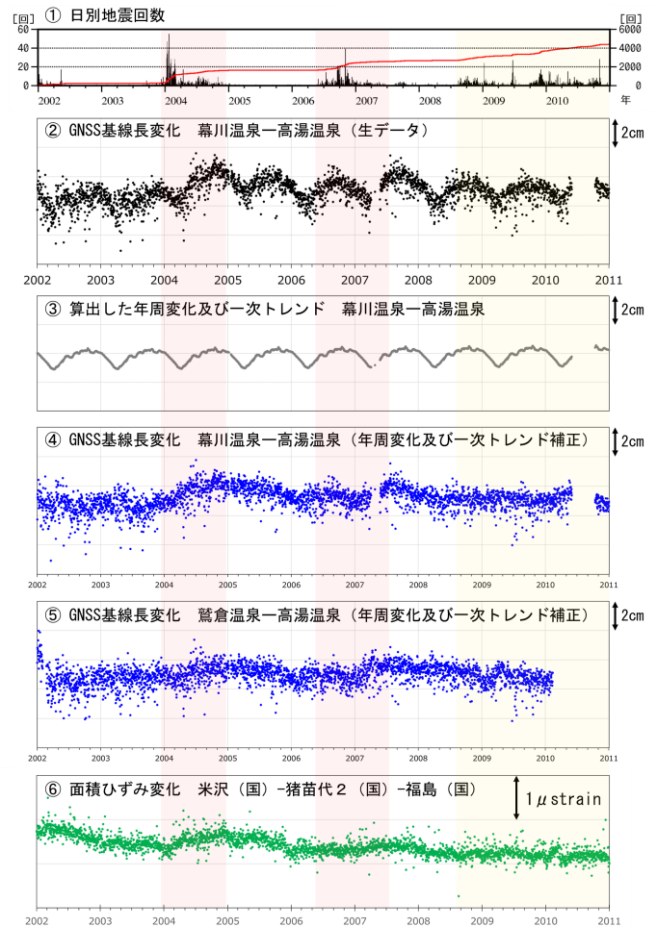


図 16 GNSS 基線長及び面積ひずみの変化。

面積ひずみは国土地理院の F3 解を使用した。赤色及び黄色の期間は図 14 と同様に活動期を示す。

卓越していると解釈した。また、関・他（2021）の海拔下2.7kmの膨張源はマグマだまりの上部境界付近に位置していることから、マグマだまり上部から火道に至る付近に固化したマグマ等が集積することによって空隙率が低下し、熱水の上昇が遮られ海拔下2.7km付近の膨張が起こったと Ichiki et al.（2021）は解釈している。このように、地下のマグマだまり周辺の構造や、そこで起きる膨張現象の解釈についても明らかになってきた。しかしながら、過去事例に目を向けると、2002～2012年頃の活動期に、その深部膨張が起こっていたかは分かっていない。そこで本稿ではその有無を調べる。

気象庁では吾妻山周辺において2001年からGNSS連続観測点を順次設置し観測している。2014～2015年や2018～2019年に深部膨張を捉えている、福島（国）、猪苗代2（国）、米沢（国）の3観測点の面積ひずみの変化（図14、図15）を見ると、2003～2004年や2006～2007年の活動でも深部膨張を示唆する変化がみられている。この変化が2018～2019年と同じように海拔下2km以深における膨張によると仮定すると、当時吾妻山周辺に設置していた気象庁のGNSS連続観測点にも変化が現れるはずである。そこで、廃止点を含む過去のGNSS観測データを再点検した。なお、各活動期では浅部の膨張が観測されているため、火口近傍の観測点ではその影響が大きく、火口から離れた観測点に着目する必要がある。そのことから、幕川温泉観測点などの火口から4km以上離れた観測点を結ぶ基線の基線長変化から、深部膨張による変化の抽出を試みた。当時のGNSS観測点は1周波の受信機を使用しており、解析上の大きな年周ノイズが重畳しているため、まずその算出を行った。2002年から2009年の基線長変化を30日移動平均し、各年の1年分の変化を取り出す。1月1日の値が0になるようにオフセットを除去し、12月31日の値が0になるように一次トレンドを除去することで、その年の年周変化成分を抽出した。8年分の年周変化成分を平均したものを、年周ノイズとして算出した。この年周ノイズに加えて、2002～2003年の火山活動が静穏な時期のデータから非火山性と思われる一次トレンドを算出し、それらを元データから差し引くことで非火山性と考えられるノイズの除去を行った（図16-②③④）。その結果、2基線について火山活動に対応した変化を抽出することができた（図16-④⑤）。どちらの基線も2003～2004年及び2006～2007年の地震活動の活発化に対応して伸びの変化がみられており、吾妻山周辺の深部膨張を示唆している。一方、2008～2009

年にかけては、深部膨張を示唆する明瞭な伸びの変化はみられなかった。なお、国土地理院（2010）では、S吾妻小富士観測点と米沢、北塩原、猪苗代2の3観測点を結ぶ3基線で2010年1～7月頃に伸びの変化が観測されたと報告しているが、気象庁の観測点では、当該期間は観測点の移設等による欠測で対応する変化は不明であった。

4.3 活動活発化初期における深いBH型地震の増加

2003年以降の活動期について、震源域の中でもやや深い所で発生するBH型地震の多発の有無を調べた。まず、2014～2015年の活動期に着目する。図17に、2014年10月～2015年9月のBH型地震の震源分布及び観測点間のP波到達時間差の時系列を示す。なお、吾妻山における火山性地震の震源決定精度は、地震観測点の多点化により、2012年頃から向上している。2014～2015年の震源分布を見ると、震源域は大きく2つに分かれており、北側の浅いグループと南側の深いグループがある。また、それらのグループの地震は発生時期も異なっており、2014年12月25日～2015年1月13日や2015年5月5～8日に限って見ると、深いグループの地震が多く発生していた事が分かる。なお、深さ0km付近に震源が求まっていないのは、震源計算に使用した速度構造が0km付近で速度勾配を変化させていることによると考えられる。2つのグループの震源の違いは、観測点間のP波到達時間差にもよく現れており、大穴火口に近い観測点（浄土平、一切経山南山腹）と火口から離れた観測点（吾妻小富士東、幕滝駐車場）との時間差の違いは、0.1秒前後ある。また、ばらつきは大きいものの最大振幅比でも同様の震源の時間変化を概観することができる。2018～2019年の活動期では、一切経山南山腹観測点の欠測により求まった震源が少なかったが、上述のP波到達時間差や最大振幅比に着目することで、2018年9月下旬～10月上旬や2019年5月上旬に深いBH型地震が増加したことが分かる（図17-⑥⑧）。図18に2003年1月～2012年11月のBH型地震のP波到達時間差を示す。2003～2004年と2006～2007年の活動期の初期に、複数の観測点の組み合わせでP波到達時間差の小さい地震が多くみられる。その時間差は、吾妻小富士東と一切経山南山腹の観測点間で0.2～0.3秒程度であり、2014～2015年の活動期の深いBH型地震の値と同様である。これらの事から、2003～2004年と2006～2007

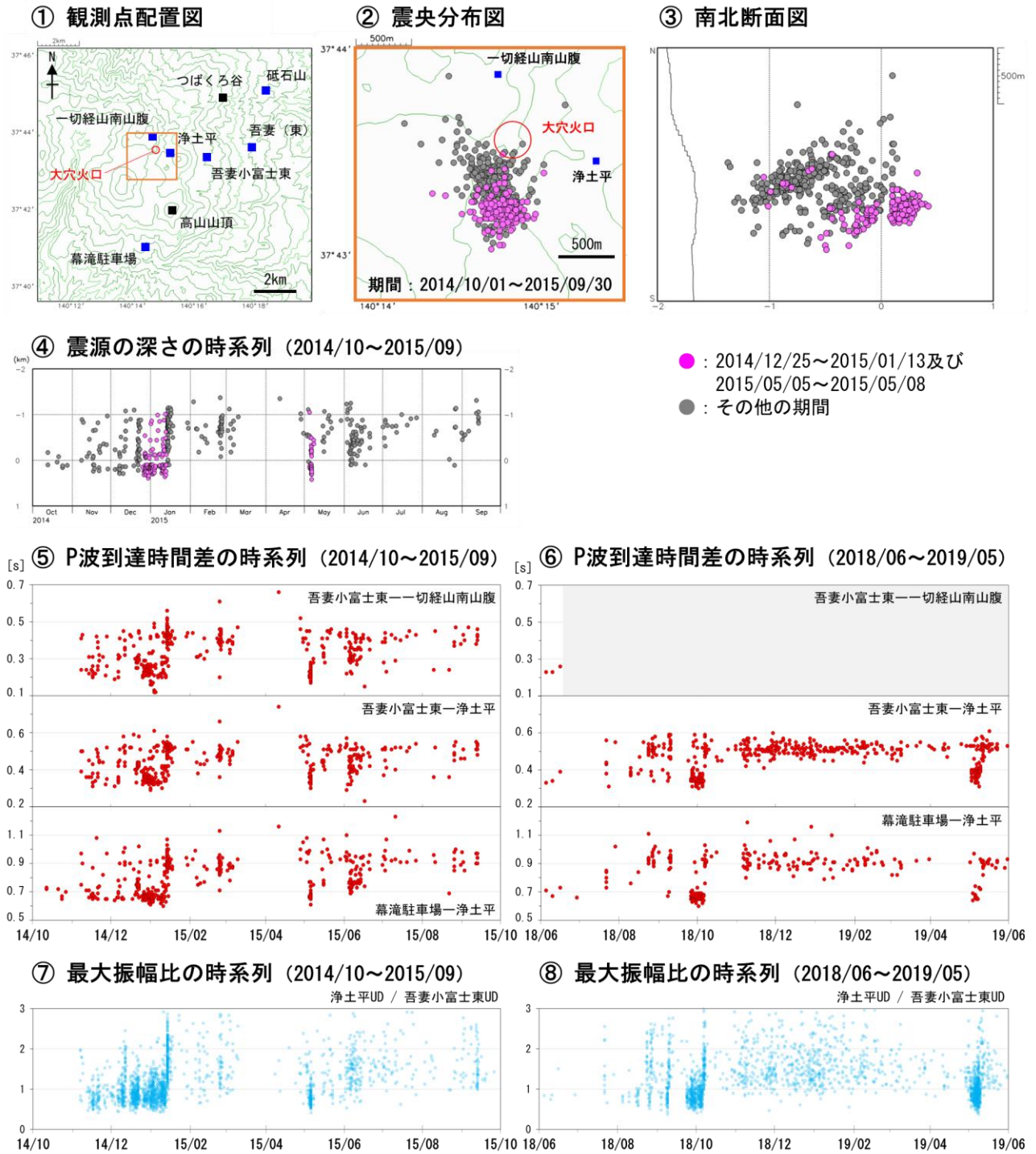


図 17 BH 型地震の震源分布図と観測点間の P 波到達時間差及び最大振幅比の時系列図。

①の青四角は②～④の震源計算に使用した観測点を示す。①の橙矩形領域は②の表示範囲を示す。黒四角は 2014 年以前に廃止した観測点を示す。(東)は東北大学の観測点を示し、②～④の震源計算には東北大学の吾妻観測点のデータも使用した。⑤は④の震源が求まっている BH 型地震の P 波到達時間差を示す。⑥は吾妻小富士東、浄土平、幕滝駐車場の 3 観測点全てで P 相が検出されている BH 型地震の P 波到達時間差を示す。灰色の期間は欠測を示す。⑦と⑧は震源や相検測の有無に関わらず全ての BH 型地震の最大振幅比を示す。

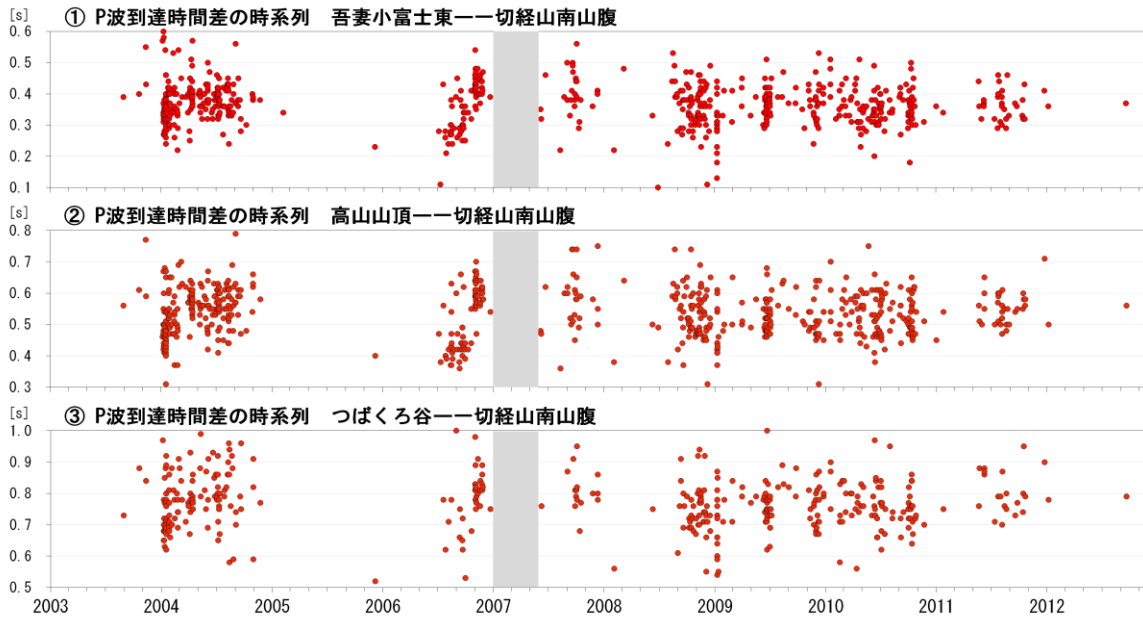


図 18 観測点間の P 波到達時間差の時系列図（2003 年 1 月～2012 年 11 月）。
吾妻小富士東，一切経山南山腹，高山山頂の 3 観測点全てで P 相が検出されている BH 型地震の P 波到達時間差を示す。灰色の期間は欠測を示す。観測点の位置は図 17-①に示している。

年の活動期にも，初期に深い BH 型地震が多発していたと考えられる。一方，2008 年には顕著な P 波到達時間差の変化はみられず，少なくとも活動初期に深い BH 型地震の増加はなかったと考えられる。

4.4 2003 年以降の活動期の分類

2003 年以降繰り返しみられている火山活動の活発化で観測された現象やその推移は，大きく 2 つのタイプに分けられる。1 つは，2008～2012 年にかけての熱活動が活発化したタイプである。このタイプでは噴気活動の活発化や SO₂ 放出量の増加，地震の緩やかな増加，大穴火口付近浅部の膨張などが観測されている。2 つ目は，2018～2019 年の活動など，顕著な噴気活動の活発化はみられないが，吾妻山深部及び大穴火口浅部の膨張や地震の急増，火山性微動の発生などが観測されるタイプである。このタイプにおける地震活動は，活動初期にやや深い BH 型地震の増加がみられ，その後より浅い場所での地震活動に推移する。その時の震動波形は BH 型地震の他，低周波地震（BL 型），調和型地震（BP 型），尾長地震（BT 型）も多く含まれる。この傾向は，2014～2015 年，2018～2019 年の活動で顕著にみられた（図 14-⑥）。一方，2008～2012 年の活動では，活動初期から BL 型地震，BP 型地震，あるいは BT 型地震が増加しており，両タイプは熱活動だけではなく，地震活動の推移でも違いがみられる。

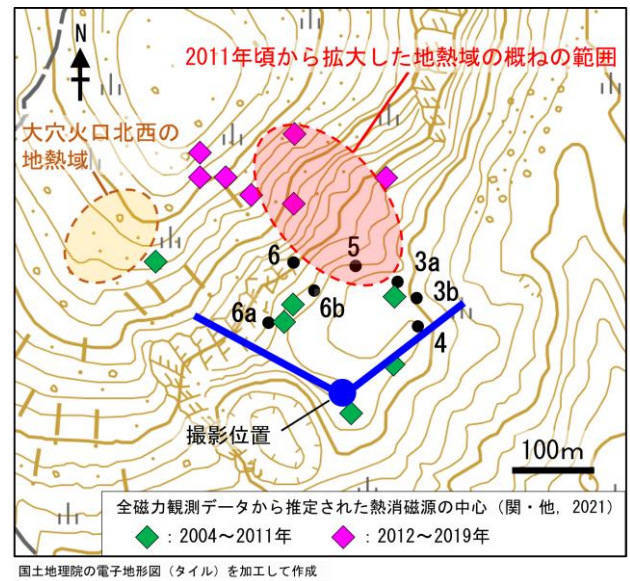


図 19 赤外熱映像装置の撮影位置。
青丸が図 20 の撮影位置を示す。赤破線領域は 2011 年頃から拡大した地熱域の概ねの範囲を示す。菱形は関・他（2021）により推定された熱消磁源の中心の水平位置を示す。黒丸は主な噴気孔の位置を示す。

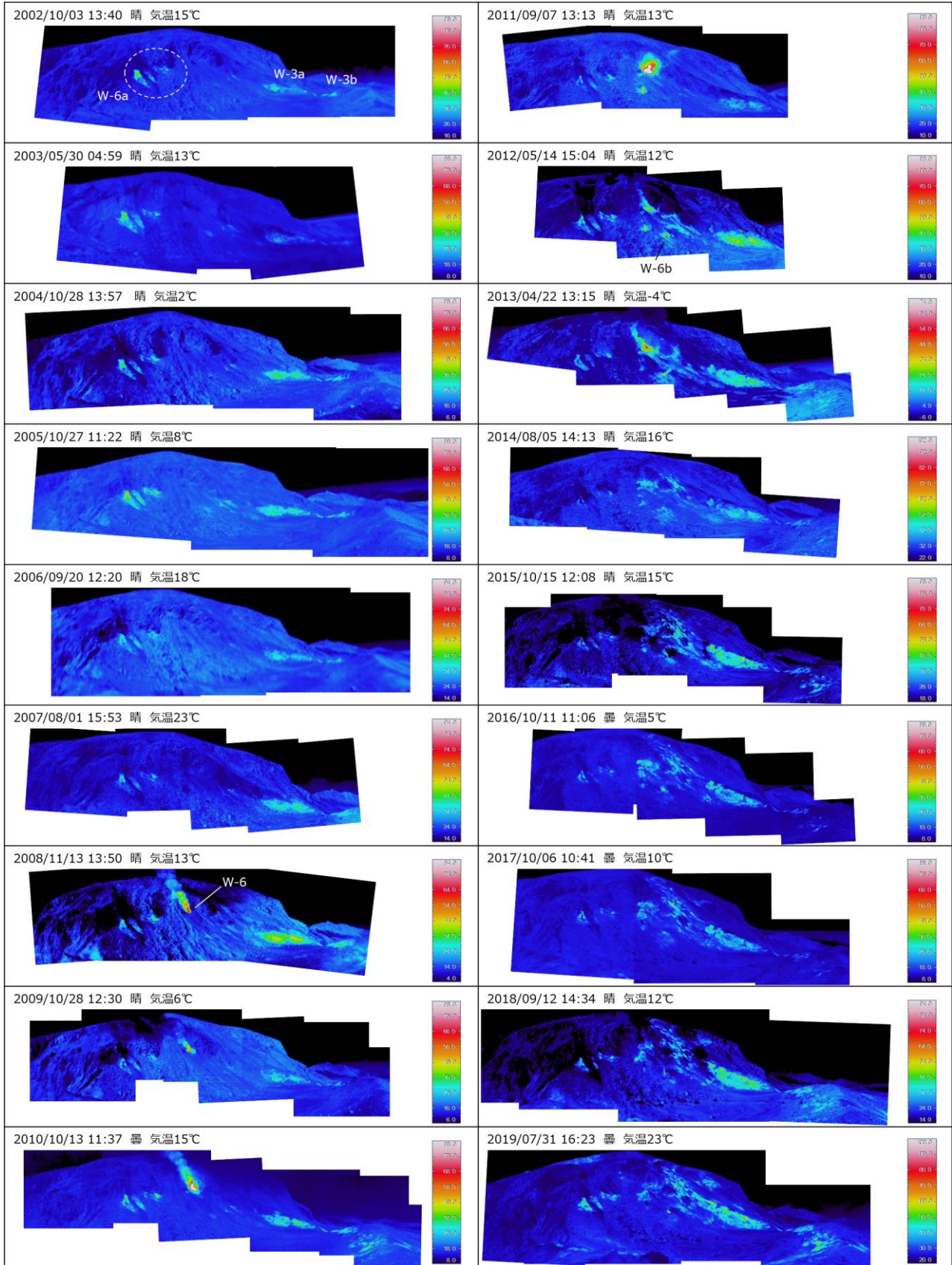


図 20 赤外熱映像装置による大穴火口付近の地熱域の推移（2002 年 10 月～2019 年 7 月）。

4.5 2008～2012年の熱活動の高まり

2008～2012年に活発化した噴気活動の主噴気孔は、小噴火の後、閉塞して噴気がほとんど出ていなかった1977年噴火口（W-6）である。SO₂放出量は、多いときには1日当たり600トンが観測されている。また、産業技術総合研究所（2016）によれば、噴気活動が活発な2011年頃のW-6噴気の噴気温度及び見かけの平衡温度は最大500℃程度であり、また、水の同位体組成から、その噴気はマグマから放出された火山ガスが起源であると推定されている。全磁力繰り返し観測では、観測を開始した2002年以降、2019年にかけて長期的に大穴火口付近浅部の熱消磁を示す変化が観測されている。関・他（2021）は、2004～2011年の全磁力観測データを使って求めた消磁源が概ね大穴火口付近に求まるのに対し、2011年9月以降に推定された消磁源は、大穴火口よりも北北西側のより浅いところに求まることを報告しており、2011年頃を境に浅部の熱活動が変化したことが示唆される。また、この事は地表の地熱域の分布とも整合的であり、図19及び図20に示すように、気象庁の現地観測では2011年頃から大穴火口の北から北西側の火口壁において地熱域の拡大が観測されている。この拡大した地熱域は、関・他（2021）により推定された2011年以降の熱消磁源の概ね直上付近に位置する。なお、2011～2012年頃に顕在化した噴気地熱域W-6bは、鍵山・他（1981）で赤外熱映像装置によって観測された1979年の大穴火口内の熱異常域の一部に対応している。

以上のように2008～2012年にかけての熱活動の高まりでは、深部起源の高温の火山ガスの供給量増加や噴気温度の上昇、地表付近の地熱域の変化などが観測されており、山体浅部の高温化という点では、1966年泥水噴出や1977年小噴火に類する活動であったと考えられる。また、地震活動について比較すると、2008年のW-6噴気の活発化に先行して2ヶ月程前から地震回数が増加する傾向がみられており、地震活動が先行する点でも類似する。しかし、その活動度を比較すると、1966年や1977年の地震活動の方が活発であり、異なる点もみられる。

5 1965年以降の火山活動の整理と今後の着目点

過去の吾妻山の火山活動の活発化では、地震活動や噴気活動、火山ガス濃度比、湧水のpH等、様々な観測項目で変化が観測されている。それらの活動の主な特徴を表1に整理した。噴火や泥水噴出、顕著な噴気活動など、噴出活動がみられたタイプと、近年繰り返している地震活動や地殻変動を伴い短期的に活発化するタイプの2通りがある。吾妻山の火山活動は、1977年の噴火後、1990年代にかけて低下したが、2000年以降は、2008～2012年のような大穴火口付近への熱供給と、地震活動や地殻変動を伴う短期的な活動の繰り返しに特徴づけられる。

過去の事例では、地下からの火山ガスの供給量増加やそれによる山体浅部の高温化が、噴気の高さや噴気温度の上昇、CO₂/H₂S比の上昇、湧水のpHの低下、SO₂放出量の増加として直接的に観測されており、今後も引き続

表1 各事例の特徴。

| | 顕著な噴出現象がみられた活動 | | | 地震活動や地殻変動を伴い短期的に活発化する活動 |
|--------------------------|-------------------|---|---|--|
| | 1966年 泥水噴出 | 1977年 小噴火 | 2008～2012年 顕著な噴気活動 | 2018～2019年 2014～2015年など |
| 噴気 高さ 温度 | 400m 234℃に上昇 | 600m 280℃に上昇 (最大推定400℃) | 700m 500℃程度 | 200m (変化なし) |
| 地震活動 活動度 推移 タイプ | 活発 終息が遅い 不明 | 活発 すぐに終息 不明 | 緩やかに増加 終息が遅い 初期に低周波・単色地震増加 | 活発 すぐに終息 初期に深いBH型地震増加 |
| 火山ガス等 | 低pHの湧水 | pH低下 (噴火前) CO ₂ /H ₂ S比上昇 (噴火前) 硫黄の燃焼 | SO ₂ 放出量増加 見かけ平衡温度500℃程度 硫黄の燃焼 | SO ₂ /H ₂ S比の上昇 (2018-19) 見かけ平衡温度に大きな変化なし |
| 全磁力 | 不明 | 不明 | ごく浅部の熱消磁源の変化 (地表の地熱拡大域と対応) | ごく浅部の熱消磁の加速 (2018-19) |
| 地殻変動 浅部 深部 | 不明 不明 | 不明 不明 | 膨張あり 少なくとも初期に顕著な変化はない | 膨張あり 膨張あり |

き重要な監視項目である。一方、近年では物理観測の拡充により、詳細な地震活動の推移や地殻変動、全磁力観測による熱活動の推移なども把握できるようになってきた。これらは 1966 年や 1977 年の観測データとは直接比較することはできないが、浅部の高温化に至るまでのプロセスを明らかにできる可能性がある。本稿では深部膨張と深い BH 型地震の増加に着目したが、これは地下深部のマグマだまり周辺の挙動や、そこからの浅部熱水系への火山性流体の供給に関連している可能性がある。東北大学 (2015-a) は、2015 年 1 月の火山性地震の前駆振動部分に

震源域の膨張を示す相がみられたことを報告し、地震活動と火山性流体活動との相互作用を示唆するとしている。また、東北大学 (2019) は、火山性微動を伴う短期的な傾斜変動が、大穴火口直下浅部における膨張現象とともに深部 (海拔下約 8km) における収縮変動が連動した可能性を報告している。以上のように物理観測データの解析から火山性流体の移動やその供給系をイメージしていくことも今後火山活動を監視する上で重要である。これまでの先行研究をもとに、活動期における監視上注目すべき現象の発生源を整理すると、図 21 に示す概念図にまとめられる。

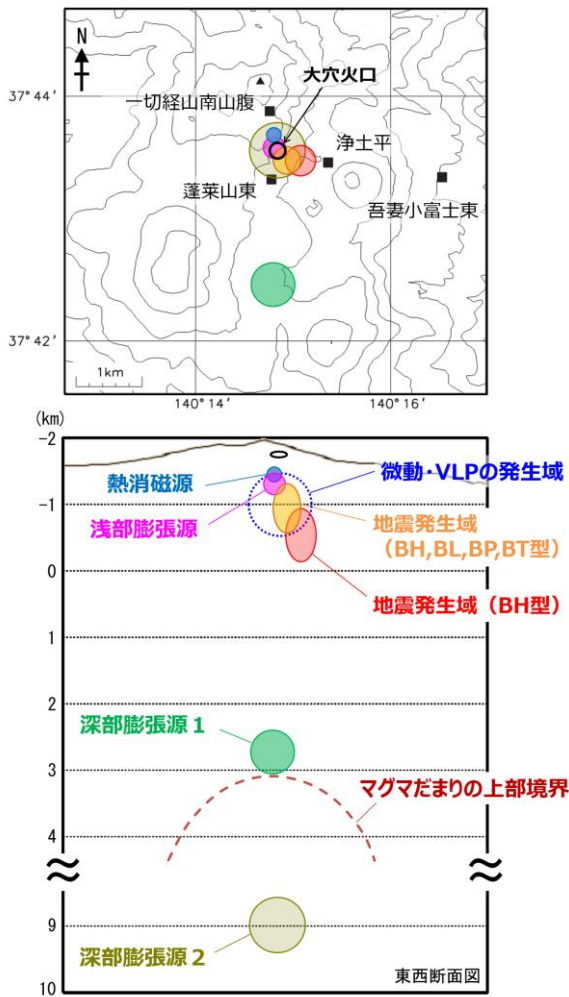


図 21 各現象の発生源を重ね合わせた概念図。実線丸は関・他 (2021) による震源及び膨張源、熱消磁源を示す。青点線は吉開・他 (2019) 及び東北大学 (2018) により推定された微動や VLP (超長周期地震) の発生源を参考に、それらの深さの範囲を示している。赤破線は Ichiki et al. (2021) により推定されたマグマだまりの上部境界の概ねの深さを示す。

6 火山噴火予知連絡会での火山活動に関する懇談

第 147 回予知連では、以上の調査内容について仙台管区気象台から報告し、それについて懇談が行われた。委員から様々な意見や質問が出されたが、そのうち主な意見は以下のとおりである。

・地球化学的観測の継続

過去の現地観測で火山活動に関連した火山ガス濃度比の上昇や湧水の pH の低下がみられていることから、同様の現地観測を再開すべきとの意見を頂いた。気象庁の吾妻山の現地観測では、2019 年から一部の定点で湧水の観測を再開しているものの、1977 年当時のような観測点数や観測頻度では実施できていない。また、火山ガスについては SO₂ の放出量測定と多成分火山ガス連続観測装置による観測を行っているが、ガス検知管による火山ガス濃度の観測は近年行っていない。多成分火山ガス連続観測装置における観測では、2018~2019 年の活発化の際に SO₂/H₂S 濃度比の上昇が観測されており、新たな観測技術による成果も得られ始めているところである。限られた人員の中で現在の観測を継続しつつ、加えて有効な観測をどの程度の頻度・観測点数で再開していくかについては、今後検討が必要である。

・観測体制の検討

今後のマグマ噴火の可能性やそれを見据えた観測体制について意見があった。優先して想定すべきは大穴火口周辺の水蒸気噴火からマグマ噴火に発展する活動シナリオだが、次の優先順位として、五色沼から吾妻小富士までの広範囲を想定したマグマ噴火のシナリオがあり、それらの範囲を囲うような広域の観測網が必要との意見を頂いた。現在の GNSS 連測観測点の配置は、地形的な制約もあり特に山体の西側に観測点が少ない。すぐに連続観測点の設置は難しいかもしれないが、気象庁としてもマグ

マ噴火のシナリオを考慮した GNSS 観測網の強化を今後検討していく必要がある。

・防災上注目すべき現象への注視

噴出現象といっても、泥水やごく少量の火山灰噴出と、噴石を飛ばすような噴火では、防災上は大きな違いがある。両者を見分けることを意識して各現象の発生源の整理や知見の蓄積をしていくことが重要である。

・類似火山との比較

吾妻山のような活動期の繰り返しは、口永良部島など他の火山でもみられているため、類似した他火山の活動推移との比較も重要である。

7 まとめ

中長期的視点で吾妻山のこれまでの観測データを再点検し、火山活動の整理を行った。2008～2012年の熱活動の活発化は、噴気の高さや噴気温度、見かけの平衡温度などから、浅部の高温化という点では、1966年の泥水噴出や1977年の小噴火に類する活動であったと考えられる。それを踏まえて整理すると、1965年以降の火山活動の活発化は、小噴火などの顕著な噴出活動がみられたタイプと、近年繰り返している地震活動や地殻変動を伴い短期的に活発化するタイプの大きく2通りに分けられる。前者の活動期の観測データの変化から、今後の火山活動の監視上の着目点を整理すると、噴気の高さや噴気温度の異常、地震活動の活発化、地下からの火山ガスの供給量増加を示す火山ガスや湧水の組成変化が挙げられる。このうち、地球化学的観測については、近年の連続観測の成果も踏まえつつ、効率的かつ効果的な観測体制を今後検討していく必要がある。一方、近年繰り返しみられる短期的な活発化については、多項目多点観測の成果により、深部の膨張や震源の移動なども捉えられており、このような深部から浅部の活動に至るプロセスに着目した監視や解析も今後重要である。

以上のように、最新の知見に基づき長年蓄積した観測データを再点検することによって、中長期的視点での火山活動の整理を行うことができた。一方、気象庁が常時観測を開始した1965年以降、吾妻山では火口外に大きな噴石を多数飛ばすような噴火は発生していない。そのような噴火発生に向けては、これまでにみられなかった現象が起こることも十分に考えられるため、その点も踏まえ監視を行っていく必要がある。また、他の火山で得られた最新の知見を監視の現場に取り入れていく努力や多項目

の観測を長期的に継続していくための工夫や仕組みづくりも必要であり、引き続き検討していきたい。

謝辞

産業技術総合研究所の山元孝広氏、茨城大学の藤縄明彦氏から貴重なコメントをいただき、過去の噴火履歴や火山活動を整理する上で大変有益でした。東北大学の三浦哲氏、山本希氏、市來雅啓氏から火山活動の解析やその解釈に関して有益な助言をいただきました。匿名の査読者の丁寧な助言により本稿は大きく改善されました。ここに記して感謝の意を表します。

本稿では気象庁のデータの他、東北大学の地震波形データ及び国土地理院の電子基準点データも使用しました。また、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）」及び「電子地形図（タイル）」を使用しました。

文献

- 植木貞人・高木章雄 (1981): 火山活動の経過, 吾妻火山集中総合観測報告-1979年10月-, 1-14.
- 内田東 (2008): 吾妻山地震回数統計接続について, 平成19年度仙台管区調査研究会資料, 115-116.
- 太田一也・松尾綱道 (1981): 吾妻火山一切経山におけるSO₂放出量の遠隔測定, 吾妻火山集中総合観測報告-1979年10月-, 105-107.
- 小沢竹二郎・君島克憲・当麻善明・小坂丈予・平林順一 (1981): 吾妻火山一切経山1977～1979年活動にともなう噴気ガス, 温泉水の成分変化, 吾妻火山集中総合観測報告-1979年10月-, 93-104.
- 鍵山恒臣・渡部暉彦・萩原道徳 (1981): 吾妻火山大穴火口周辺の熱的調査, 吾妻火山集中総合観測報告, 55-67.
- 気象研究所 (2019): 吾妻山の土壌ガスと地殻変動観測, 第144回火山噴火予知連絡会資料(その5)追加資料, 6-8.
- 気象庁 (1966): 吾妻火山機動観測実施報告(昭和41年7～8月実施), 1-21.
- 気象庁 (1978): 火山機動観測実施報告, **14**, 41-61.
- 気象庁 (2015): 吾妻山の火山活動について(2015年6月～2015年9月), 火山噴火予知連絡会会報, **122**, 66-82.
- 国土地理院 (2010): 吾妻山周辺の地殻変動, 火山噴火予知連絡会会報, **107**, 22-26.
- 国土地理院 (2015): 吾妻山周辺の地殻変動, 火山噴火予知連絡会会報, **122**, 83-89.
- 佐々木利夫 (1980): 吾妻山・安達太良山・磐梯山付近に発

- 生した火山性地震の震源推定について, 験震時報, **44**, 87-91.
- 産業技術総合研究所 (2016): 吾妻山噴気ガス組成変化, 第136回火山噴火予知連絡会資料 (その2の1) 新潟焼山, 吾妻山, 草津白根山, 47.
- 清水洋・三品正明・植木貞人・堀修一郎・山本清彦・高木章雄 (1981): 吾妻火山における地震観測, 吾妻火山集中総合観測報告-1979年10月-, 19-40.
- 関晋・丹原裕・山村卓也・佐々木康気・松浦茂郎・越谷英樹・近江克也・近澤心・若生勝・岡田純・碓井勇二 (2021): 2018年から2019年にかけての吾妻山の火山活動, 験震時報, **85**, 4.
- 仙台管区気象台 (2021): 吾妻山の火山活動解説資料 (令和3年7月), https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/sendai/21m07/213_21m07.pdf, (参照2022-01-20).
- 高木章雄 (1978): 吾妻山, 火山活動の調査報告, 福島県防災会議, 1-44.
- 高木朗充・谷口正実・太田健治・上田義浩・松末伸一・小窪則夫 (2019): 1950年代から2001年までの気象庁の検知管法による火山ガス成分観測データの調査と解析, 験震時報, **83**, 2.
- 東北大学 (2015-a): 吾妻山の地震活動, 第131回火山噴火予知連絡会資料 (その8) 東北地方, 102-103.
- 東北大学 (2015-b): 吾妻山周辺の地殻変動, 第131回火山噴火予知連絡会資料 (その8) 東北地方, 104-106.
- 東北大学 (2018): 吾妻山の地震活動, 第142回火山噴火予知連絡会資料 (その5) 東北地方, 42-44.
- 東北大学 (2019): 吾妻山で2019年5月9日に発生した傾斜変動, 第144回火山噴火予知連絡会資料 (その5) 追加資料, 11-12.
- 松本哲一・中野俊・古川竜太・山元孝広 (2018): K-Ar年代に基づく吾妻火山の形成史, 地質調査研究報告, **69**, 153-163.
- 山元孝広 (2005): 福島県, 吾妻火山の最近7千年間の噴火史: 吾妻-浄土平火山噴出物の層序とマグマ供給系, 地質学雑誌, **111**, 94-111.
- 吉開裕亮・近江克也・丹原裕・小林宰・山本希・森田裕一 (2019): 吾妻山における傾斜変動を伴う火山性微動について, 日本火山学会秋季大会講演予稿集, 182.
- 吉田友香・舟越実・西田誠・近江克也・高木朗充・安藤忍 (2012): GPS 観測で捉えられた吾妻山の地殻変動, 験震時報, **76**, 1-8.
- Ichiki, M., T. Kaida, T. Nakayama, S. Miura, M. Yamamoto, Y. Morita, M. Uyeshima (2021): Magma reservoir beneath Azumayama Volcano, NE Japan, as inferred from a three-dimensional electrical resistivity model explored by means of magnetotelluric method, *Earth Planets Space*, 73:150, doi:10.1186/s40623-021-01451-y.
- Mogi, K. (1958): Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 36, 99-134.
- Yamamoto, T., T. Kudo, O. Isizuka (2018) : Temporal variations in volumetric magma eruption rates of Quaternary volcanoes in Japan, *Earth Planets Space*, 70:65, doi:10.1186/s40623-018-0849-x.

(編集担当 大塚仁大)