

2. 令和3年度に発生した重要な地震・火山噴火と本研究計画の活動について

2-1. 2020年末から続く能登半島群発地震活動と地殻変動

能登半島（石川県）の北東端部では、過去1年以上に亘り群発地震*活動が続き、顕著な地殻変動も観測されている（図1）。地震活動を遡ると、2018年頃から地震数が増加し始めていた。2020年12月頃からは地震活動が急激に活発になった。地震は北側・西側領域でも起こるようになり、2020年7月頃からは東側へも範囲を広げた。地震活動も一段と高まり、有感地震も数多く観測されるようになった。地震活動の範囲は、地下10-20 km程度にあり、水平には15 km四方ほどにまで広がった（図1上）。また、地震活動の活発化とともに地殻変動が観測され、2020年12月頃から珠洲を中心に隆起が開始した。この様な活動の中、2021年9月16日にはM5.1の地震が発生し、最大震度5弱を記録した。この後も地震活動は高い状態で推移し、2022年3月末の時点で、2020年12月から数えて累計4,000個を超える地震が能登地方で発生し、104回もの有感地震が観測された。珠洲における地殻*の隆起量は約4 cmにも達した（図1下）。

地震活動は、大きく分けて東西南北の4領域で固まりを作って発生している。しかし、それらの発生に対応付けられる断層面は不明瞭で、活断層*との関係も明らかでない。能登半島の北西部では2007年能登半島地震(M6.9)が発生しており、今回の活動はその北東延長部に位置しているが、関連性は不明である。地殻変動においては、地震が発生している領域を中心に放射状に広がる変動が観測されており、地下に変動源が存在することを示唆している。このように地震活動や地殻活動について暫定的な状況把握ができているものの、調査すべき課題が残されている。

過去に日本で発生した有名な群発地震現象として、1965年から年単位で活動の続いた松代群発地震がある。この時とは異なり、現在では様々な観測が高精度かつ高密度に行われている。能登半島の群発地震発生域では、基盤観測網*に加え臨時地震観測が続けられているほか、GEONET*や大学の臨時観測点を利用したGNSS*連続観測をはじめとした測地学的観測、電磁気探査*等が進められている。一般的に、この様な群発地震は活動の推移予測が極めて困難である。しかし、今なお活動が続いている現象である事にも留意しつつ、それらの記録の解析や、新たな調査を通じて、群発地震活動や地殻隆起の原因解明が進むことが期待される。

能登半島北東部の群発地震活動と地殻変動

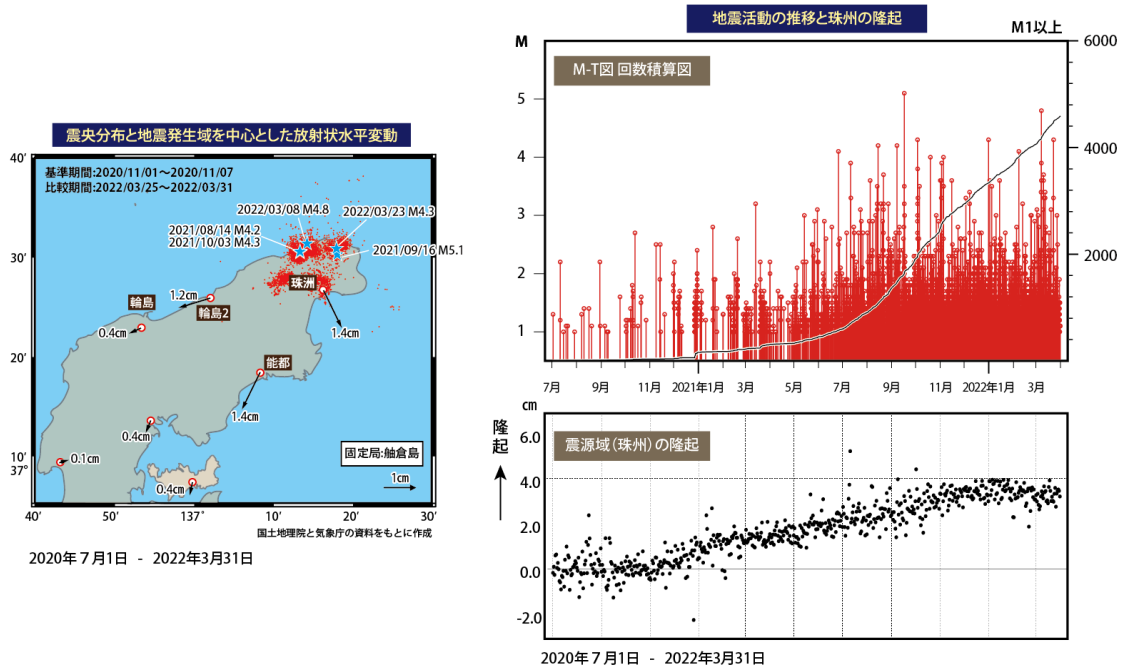


図1. 能登半島北東部の群発地震活動と地殻変動

能登半島（石川県）の北東部端では、2020年12月頃から地震活動が急激に活発化し（右上）、震源域周辺を中心とする放射状の水平変動（左）と、隆起（右下）が見られた。この活動の変動源の解明は、今後の課題である。

2-2 . 2021年3月20日（M6.9）と5月1日（M6.8）の宮城県沖の地震

2011年東北地方太平洋沖地震（M9.0，以下東北沖地震）からおよそ10年経った2021年3月と5月に、宮城県沖でM7クラスの地震が発生し、それぞれ最大震度5強を観測した。両地震ともプレート境界（深さ50-60 km）で発生した地震であり、震源*は東北沖地震の滑り域の西縁付近（深部延長側）に位置する。プレート境界の深さ50-60 kmの領域では、繰り返し地震*とGNSSデータの解析から活発な余効滑り*が発生していたと考えられており、東北沖地震以降活発な地震活動も継続している。一方、精密な震源決定によると、3月の地震の破壊開始点*はプレート境界型地震*の発生する深さの下限付近に位置し、ここでは東北沖地震後に比較的規模の大きなM5クラスの繰り返し地震が発生していた。この繰り返し地震は東北沖地震前には発生しておらず、それまで非地震的に滑っていた領域が、東北沖地震後地震的に滑るようになったと考えられる[1]。この繰り返し地震と3月の地震のP波*初動部分はとてもよく似ており、3月の地震はM5の繰り返し地震から始まり、さらに広い範囲へと破壊が発展したのと考えられる[1]。

その後、5月の地震は3月の地震の南東で発生した。5月の地震の破壊開始点は3月の地

震によるクーロン応力変化* (ΔCFS) が正である場所があり、東北沖地震以前から地震活動が比較的活発であった場所に対応していた。このことは、先行する地震の引き起こした応力*変化とプレート境界固有の性質の両方が地震の発生に影響を及ぼしていることを示唆する [1]。

さらに地震波形インバージョン* [1][2]によると、これら2つの地震の滑り域は、1978年のプレート境界型地震である宮城県沖地震 (M7.4) の滑り域の概ね西半分 (深部側) に重なることがわかった。このことは、東北沖地震の余効滑りにより、東北沖地震震源域の深部延長側で地震が発生しやすくなっていることを示唆する。このプレート境界深部領域は、震源が人口の多い陸域に近く、被害が出やすいこと、1978年の宮城県沖地震の滑り域の東半分がまだ破壊されずに残っていると考えられることから、今後も地震活動の推移を見守っていく必要がある。

[1] Yoshida et al. (2022) JGR

[2] 久保・他 (2021)

https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/MiyagikenOki_20210320/inversion/inv_index.html

2-3. 2021年8月13日に発生した福徳岡ノ場噴火

2021年8月13日に、小笠原諸島に属する海底火山である福徳岡ノ場において大規模な噴火が発生した (図2)。噴煙高度は16 km以上に達し、大量の噴出物により一時的に新島が出現した。福徳岡ノ場では1904年、1914年、および1986年の活動でも新島が形成されたがいずれも浸食により海没している。今回の噴火で生じた新島も浸食により数ヶ月で消滅した。

福徳岡ノ場は最も近い有人島である硫黄島からでも約50 km離れており、当初はこの噴火に伴う大きな被害は無いと考えられていた。しかし、8月15日に撮影された衛星画像では300 km²に及ぶ漂流軽石 (軽石いかだ) が観測され、約2ヶ月後の10月上旬以降、沖縄県や鹿児島県の奄美地方の沿岸に軽石の漂着が始まった。港湾に大量の軽石が漂着することで漁業や海運に大きな被害を及ぼした。1986年噴火でも沖縄などへの軽石漂着が報告されているが、今回の噴火による漂着軽石は規模が遥かに大きい。

この噴火に関しては様々な機関が観測を実施しており、噴火の詳細が徐々に明らかになりつつある。噴火の推移は気象衛星ひまわり等の衛星データ、海上保安庁による空撮、父島における地震・空振*観測等により捉えられている。産業技術総合研究所は噴煙高度に基づく噴火規模の推定を行い、海洋研究開発機構はハイドロフォン観測により噴火を早期に検知するとともに、軽石の採取・分析や、海流に伴う軽石移動のシミュレーション*を実施した。国土地理院は衛星画像*による新島の消長を追跡し、大学は観測データと数値シミュレ

ーションに基づく噴火メカニズムの推定を進めている。

噴火に伴って生じた新島や漂流軽石の体積は衛星画像や航空機の画像から見積もられており、少なくとも 0.1 km^3 に達すると考えられている。この体積は衛星から観測された SO_2 量とも調和的である。この噴出物体積に基づく噴火の規模は $\text{VEI}^*=4$ 以上と推定されるが、噴煙中に含まれる噴出物の量によっては、規模が更に上振れする可能性もある。衛星からの可視・赤外画像や火山ガス*の観測値、噴煙高度に関する数値シミュレーション結果等を総合した結果、軽石は噴煙柱からの降下軽石ではなく、噴火の最盛期に火口から直接生じたものと推定されている。

福岡ノ場の火山活動と軽石の生成

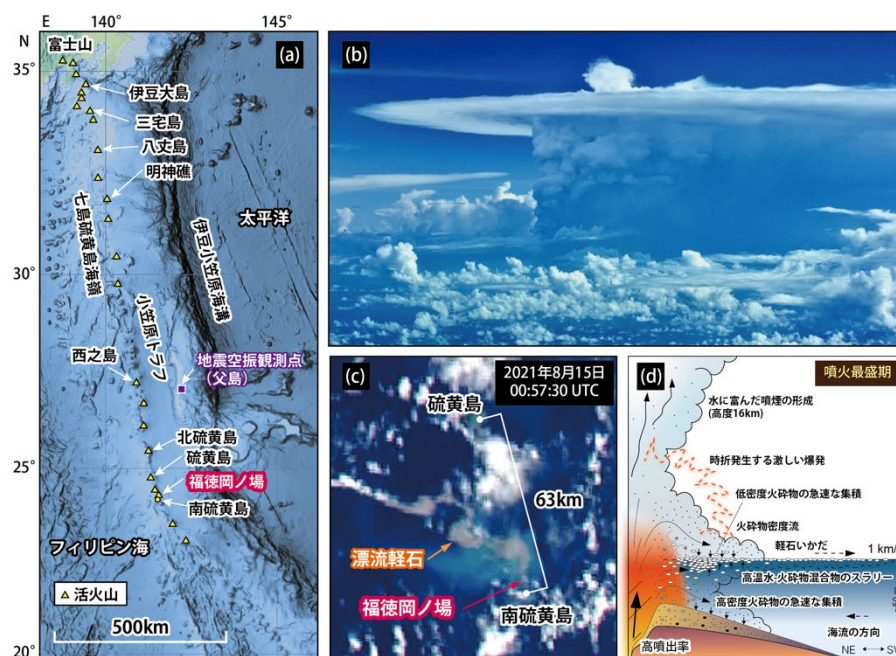


図2. 福岡ノ場の火山活動と軽石の生成

a) 福岡ノ場の位置 b) 海上保安庁により 2021 年 8 月 13 日 15 時に撮影された噴煙柱*の様子。c) 気象衛星ひまわりの画像による、漂流軽石の分布。d) 噴火最盛期の模式図。水に富んだ噴煙柱の崩壊により火口近傍で火砕物密度流*が発生するとともに、低密度火砕物の集積が急速に進み、漂流軽石が大量に生じた (Maeno et al., under revision に加筆・修正)。

2-4. 2021年10月20日の阿蘇山噴火

2021年10月20日11時43分に阿蘇山の中岳第一火口において小規模な噴火が発生した。この噴火により、多数の噴石が放出され、噴煙は火口縁上3,500mの高度に達し、火砕流*も発生し最大で火口の北側1.6kmまで流下した。この噴火をうけ、気象庁は11時44分に噴火速報*を公表し、11時48分に噴火警戒レベル*を2（火口周辺規制）から3（入山規制）に引き上げた。

中岳第一火口では、2019年7月から2020年6月にかけての小規模なマグマ活動（191火孔*からの灰放出）以降、火山性微動*振幅は概ね小さい状態で経過するとともに、火山ガス放出量も200～1,100トン/日程度であるなど、火山活動は比較的穏やかな状況となっていた。しかし、活動静穏期に見られる湯だまりは復活していなかった。このような状況のもと、2021年6月18日には191火孔の北東側に直径50m、深さ50mの円柱状の陥没孔が形成された。その後、8月下旬には同陥没孔内と191火孔内に湯だまりが認められ、その水位は10月4日までに20m程度上昇していた。

阿蘇火山周辺での多項目観測によれば、2021年9月頃から、マグマ溜まりをはさむ基線長が伸びに転じ、同時期に、火口浅部の温度上昇を示す地磁気変化が観測された。また10月初旬から、長周期の火山性地震（LPT）の発生回数が急増するとともに火山ガス放出量が増大したことが捉えられている。そして、10月13日に火山性微動の振幅増大が観測され、噴火警戒レベルが2に引き上げられたのち、10月14日の4時43分頃にごく小規模な水蒸気噴火*が発生した。その後、10月18日に微動振幅増大が観測され、気象庁は火山の状況に関する解説情報*（臨時）を公表した。解説情報（臨時）は19日にも発表されたが、20日の噴火前に噴火警戒レベルが3に上げられることはなかった。このことは、噴火規模の予測がいまだ困難であることを示している。

10月20日の噴火後、熊本大学や防災科学技術研究所などにより降灰調査が行われた。この調査は、火山観測データ一元化共有システム（JVDNシステム*）を活用した複数機関の連携調査としては初となるものであった。この調査の結果得られた降灰量は約15,000トンであった。ただし、この量には火口周辺域の降灰や火砕流堆積物は含まれていない。また、火山灰には本質物質*がほとんど含まれていなかったことから、この噴火は水蒸気噴火であると判断された。一方、火山機動観測実証研究事業*により、ドローンによる噴石の飛散状況調査が実施され、噴出主軸は南～南東側と北西側の二方向であること、噴石の最大飛距離は火口中心から南へ900mであることが明らかになった。

この噴火に先立つ2021年2月に、阿蘇山における観光客の火山認知度、噴火警戒レベルの理解度に関するWebアンケート調査が実施されていた。その結果によると、阿蘇山が活火山であることをはっきりと認識していたのは約7割であり、観光や登山前に噴火警戒レベルを確認していた人は約4割にすぎなかった。そして、噴火速報に対応したスマートフォンの防災アプリの利用者は3割に満たなかった。

この噴火による死者・負傷者は報告されていないが、火山活動の状況や噴火発生時の情報を正確かつ迅速に登山客や観光客に伝達するうえでの多くの課題が明らかになった。気象庁は火山の状況に関する解説情報（臨時）を発表したが、噴火警戒レベルの理解度（約6割）から判断すると、解説情報（臨時）のもつ意味が正しく理解されていたとは言い難い。また、阿蘇火山防災会議協議会*は、10月19日に解説情報（臨時）が発表されたことを受け20日8時30分から中岳に通じる登山道を閉鎖したが、早朝から活動する登山客を止めることは出来ず、噴火時には16名が中岳周辺にいた。そして、噴火直後に発表された噴火速報は、それらの登山客の多くには届かなかった。

これらの課題を受け、気象庁は噴火警戒レベルの判定基準の見直しに着手し、阿蘇火山防災会議協議会は、分かりやすい看板の設置、登山道封鎖手順の見直しを実施している。今後は、噴火速報をエリアメールの様な形で一斉配信する方策も検討されるべきである。

2-5. 2022年1月15日のトンガの火山噴火と津波

2022年1月15日4時14分（世界時）にトンガの海底火山フンガトンガ・フンガハアパイで大規模な爆発的噴火が発生した。一連の噴火は2021年12月20日に始まり、約4週間後に巨大な噴煙柱を伴うプリニー式噴火*のクライマックスに至った。この噴火では、近隣の島々に大量の火山灰が降り、津波によって海岸付近の建物が押し流されて壊滅的な被害をもたらされた地域も多い。また、海底通信ケーブルが断絶したり、トンガ国外からの救援が滞って島民が一時孤立状態になったりするなど、深刻な状況が生じたと報じられている。

1月15日の噴火の爆発性を表すVEI*は少なくとも5に達し、20世紀最大級の噴火とされる1991年のピナツボ噴火に匹敵する規模の噴火だった可能性がある。人工衛星の画像解析によれば、噴火開始からわずか30分程度で噴煙の最高高度は約58kmの中間圏にまで到達し[1]、噴煙の傘の半径は200kmを超えたとの報告がある[1][2]。このような急速な噴煙の発達、マグマの噴出率が高かったことや、マグマが多量の海水と接触することで噴煙柱への水蒸気の取り込みが促進されたことが原因ではないかと考えられている[2]。

この爆発的噴火に伴って大きな気圧変動（空振）が発生した。この気圧変動が海面を揺さぶることで波が励起され、それが何千kmも離れた太平洋沿岸まで伝播しながら発達したと考えられている[3]（図3）。気圧変動に伴う海面変動は従来から「気象津波」として知られていたが、噴火に伴う空振による海面変動の励起・伝播の過程が詳細に観測された例はこれまでなく、気象庁の津波警報*発出にもこうしたメカニズムはこれまで考慮されていなかった。しかし、実際にはこの噴火に伴って日本でも最大1m程度の潮位のゆらぎが観測された。今回のような大規模噴火による海面変動は、低頻度ではあるものの、火山がもたらすハザードの一つとして備えるべき事象であり、そのための研究の必要性も認識された。

日本海溝沿いの海底に設置されている圧力計の観測網（S-net*）によって、空振および海面変動に起因する水圧変動が克明に記録された（図3）。この水圧計記録は、南東方向から北

