

## 2019年桜島火山人工地震探査の概要と過去の探査との比較

### Active Seismic Source Experiment in Sakurajima Volcano in 2019 and Comparison with the Previous Experiments

中道治久・山本圭吾・山田大志・為栗健・高橋幸祐<sup>(1)</sup>・青山裕<sup>(2)</sup>・山本希<sup>(3)</sup>・  
野上健治<sup>(4)</sup>・及川純<sup>(5)</sup>・前田裕太<sup>(6)</sup>・大倉敬宏<sup>(7)</sup>・松島健<sup>(8)</sup>・八木原寛<sup>(9)</sup>・  
菅原道智<sup>(1)</sup>・塚本果織<sup>(1)</sup>・岸本博志<sup>(1)</sup>・工藤直樹<sup>(1)</sup>・山村卓也<sup>(1)</sup>・平原聡<sup>(3)</sup>・  
八木健夫<sup>(5)</sup>・堀川信一郎<sup>(6)</sup>・吉川慎<sup>(7)</sup>・園田忠臣・仲谷幸浩<sup>(9)</sup>・平野舟一郎<sup>(9)</sup>・  
宮町宏樹<sup>(9)</sup>・田中佑樹<sup>(2)</sup>・吉田英臣<sup>(2)</sup>・西川空良<sup>(2)</sup>・甲斐建<sup>(5)</sup>・高橋龍平<sup>(6)</sup>・  
田ノ上和志<sup>(6)</sup>・川辺智士<sup>(7)</sup>・若林環<sup>(7)</sup>・村松弾<sup>(8)</sup>・橋本匡<sup>(8)</sup>・大須賀啓士<sup>(8)</sup>

Haruhisa NAKAMICHI, Keigo YAMAMOTO, Taishi YAMADA, Takeshi TAMEGURI, Kousuke TAKAHASHI<sup>(1)</sup>, Hiroshi AOYAMA<sup>(2)</sup>, Mare YAMAMOTO<sup>(3)</sup>, Kenji NOGAMI<sup>(4)</sup>, Jun OIKAWA<sup>(5)</sup>, Yuta MAEDA<sup>(6)</sup>, Takahiro OHKURA<sup>(7)</sup>, Takeshi MATSUSHIMA<sup>(8)</sup>, Hiroshi YAKIWARA<sup>(9)</sup>, Michitomo SUGAHARA<sup>(1)</sup>, Kaori TSUKAMOTO<sup>(1)</sup>, Hiroshi KISHIMOTO<sup>(1)</sup>, Naoki KUDO<sup>(1)</sup>, Takuya YAMAMURA<sup>(1)</sup>, Satoshi HIRAHARA<sup>(3)</sup>, Takeo YAGI<sup>(5)</sup>, Shinichiro HORIKAWA<sup>(6)</sup>, Shin YOSHIKAWA<sup>(7)</sup>, Tadaomi SONODA, Yukihiko NAKATANI<sup>(9)</sup>, Shuichiro HIRANO<sup>(9)</sup>, Hiroki MIYAMACHI<sup>(9)</sup>, Yuki TANAKA<sup>(2)</sup>, Hideomi YOSHIDA<sup>(2)</sup>, Sora NISHIKAWA<sup>(2)</sup>, Takeru KAI<sup>(5)</sup>, Ryuhei TAKAHASHI<sup>(6)</sup>, Kazushi TANOUE<sup>(6)</sup>, Satoshi KAWABE<sup>(7)</sup>, Tamaki WAKABAYASHI<sup>(7)</sup>, Dan MURAMATSU<sup>(8)</sup>, Tasuku HASHIMOTO<sup>(8)</sup> and Keishi OSUGA<sup>(8)</sup>

(1) 気象庁, (2) 北海道大学, (3) 東北大学, (4) 東京工業大学, (5) 東京大学,  
(6) 名古屋大学, (7) 京都大学, (8) 九州大学, (9) 鹿児島大学

(1) Japan Metrological Agency, (2) Hokkaido University, (3) Tohoku University,  
(4) Tokyo Institute of Technology, (5) the University of Tokyo, (6) Nagoya University,  
(7) Kyoto University, (8) Kyushu University, (9) Kagoshima University

#### Synopsis

We conducted an active seismic experiment in Sakurajima volcano in December 2019, three years after the similar experiment that was conducted in 2016. We deployed 185 temporary seismic stations, most of which were installed at the same place as in 2013 and 2016. Eight and two explosive shots with 20 and 100 kg charges, respectively, were detonated in December 5, 2019. The 2019 shot locations differ from 0.4 to 12 m from the corresponding previous shot locations. We successively observed the all explosions during nighttime nine hours continuous recording. We examine reflection phases on the seismic records that obtained by the previous and 2019 experiment to detect temporal change of subsurface seismic structure beneath Sakurajima volcano.

**キーワード:** 桜島火山, 人工地震探査, 地震波形, 反射波, 時間変化

**Keywords:** Sakurajima Volcano, artificial explosion survey, seismic records, reflection phase, temporal change

## 1. はじめに

マントルにて生成されたマグマが上昇し、地殻に停留して、そして再上昇して地表から出ることによって噴火に至る。このプロセスを明らかにすることは火山学における主要課題の一つである。マグマは周囲の岩石との密度差により停留して蓄積されるが、周囲の岩石よりも密度が小さい場合は浮力を得て上昇する。そのため、マグマの蓄積と上昇を理解するには火山直下の密度構造の理解が必要である。一方、岩石の密度は地震波速度から計算することが可能である(例えば、Onizawa et al., 2002; Brocher, 2005)。そこで、植木(1990)は人工地震による火山体構造探査を提案し、実現のための手段として小型軽量・低消費電力の観測システムの必要性を指摘した。そして、GPSによる時刻校正を世界で初めて導入した小型軽量・低消費電力データロガー(森田・浜口, 1996)が開発され、以降1994年から2008年にかけて及び2015年に人工地震による火山体構造探査が国内15火山においてのべ16回実施されてきた(鍵山ら, 1995; 松島ら, 1997; 田中ら, 2002; 須藤ら, 2002; 鬼澤ら, 2003; Yamawaki et al., 2004; 井口ら, 2005a; 2005b; 鬼澤ら, 2005; 井口ら, 2006; 及川ら, 2007; 青木ら, 2008; 筒井ら, 2008; 井口ら, 2009; 山本ら, 2016)。これらの成果の大半は筒井(2005)によりレビューされており、人工地震探査により火山体を中心としたP波速度の高速度域の盛り上がり構造が速度構造に見られことが共通的な特徴で、顕著な反射面の検出された事例を挙げている。

その後、反射法地震探査に代表されるような一度に多数の地震観測点を展開する必要がある場合に効率よく地震計を設置してデータ収録を可能とするためのデータロガーが開発された(蔵下ら, 2006)。そして、このデータロガーの火山体構造探査への応用として浅間山における人工地震探査時に高密度観測が行われた(筒井ら, 2008)。以降、国内における人工地震による火山体構造探査は桜島火山を対象として反復的に行われるようになった。2009年から2014年には桜島火山の北部から北東部そして東部にかけて反射法地震探査が毎年実施された(以下、反復反射法探査と称する)(筒井ら, 2010; 2011; 2012; 2013; 2014; Tsutsui et al., 2013; Tsutsui et al., 2016)。そして、反射位相の変化が検出され、マグマ供給路における流体存在量の変化として解釈された(Tsutsui et al., 2016)。火山体を取り囲むように多数の地震計と人工震源を配置した大規模な探査は桜島火山において2008年(井口ら, 2009)と2013年(中道ら, 2014)にて実施された。

過去15年の桜島火山の噴火活動を振り返る。2006年に昭和火口で噴火が再開し、2009年から2015年前半までは昭和火口で1日当たり複数回という高頻度で噴火していた。その後、2016年は153回、2017年は406回と噴火回数が低下した。2017年の終わり頃には昭和火口の噴火活動は終わり、南岳の噴火活動に移行した。そして、南岳は2018年に479回、2019年に393回噴火した。このように、依然として桜島では活発な噴火活動が継続している。一方で、始良カルデラ直下のマグマ溜まりのマグマ蓄積が進行していることから、近い将来のより規模の大きな噴火発生が懸念されている(Hickey et al., 2016)。

そこで、桜島火山の地下構造の時間変化の検出を目的として、2016年に実施された人工地震探査(筒井ら, 2017)に引き続き、2019年に人工地震探査を実施した。ここでは、2019年人工地震探査の実施概要と得られた地震波形の特徴について過去の人工地震探査の地震波形と比較して述べる。

## 2. 2019年人工地震探査の概要

2019年12月2日から7日の6日間にて人工地震探査が実施された。Fig. 1に人工地震探査のために配置した観測点と爆破点の位置を示す。また、Table 1に爆破点の座標、爆破時刻、薬量を示す。Fig. 2に爆破孔位置の変遷を示す。爆破点および観測点は原則として既に行われた人工地震探査と同じ場所に再現しており、爆破点は0.4~12 mの差で、観測点は平均1 m以内差で再現された。桜島北側にある東西の測線は反復反射法探査の測線であり、116箇所に地震計が設置され、6箇所に薬量20 kgの爆破が行われた。反復反射法探査では東西測線に爆破点KOME近傍で交差

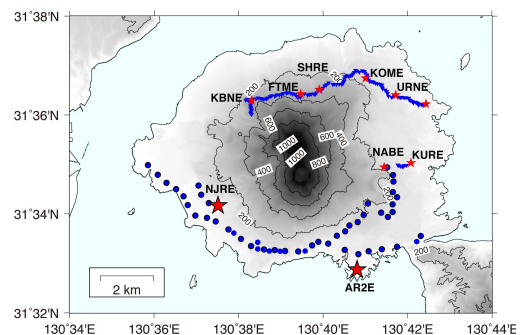


Fig. 1 Locations of seismic stations and shot points. Red stars show shot points. Large and small ones have charges of 100 and 20 kg, respectively. Blue circles and invert triangles indicate the locations of 2Hz and 4.5Hz seismometers, respectively.

Table 1 Shot locations, the shot times and charge sizes.

Shot point	Shot location				Shot time		Charge (kg)	Shot number
	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Depth (m)	Day	Time hh:mm:ss.sss		
NJRE	31.569546	130.625226	65.6	21.0	2019/12/5	01:02:00.558	100	S1
AR2E	31.547911	130.680143	14.8	21.0	2019/12/5	00:02:00.373	100	S2
NABE	31.582408	130.690849	140.6	6.38	2019/12/5	02:11:59.778	20	S3
KURE	31.583881	130.701447	67.1	6.37	2019/12/5	00:07:00.031	20	S4
KBNE	31.604964	130.638396	369.1	6.50	2019/12/5	00:22:00.323	20	S5
FTME	31.607176	130.657837	329.1	7.00	2019/12/5	01:17:00.346	20	S6
SHRE	31.608616	130.665173	315.8	6.50	2019/12/5	00:12:00.903	20	S7
KOME	31.612449	130.683448	145.9	7.00	2019/12/5	01:12:00.878	20	S8
URNE	31.606763	130.695453	92.3	6.33	2019/12/5	01:36:59.734	20	S9
UR2E	31.603719	130.707298	37.0	6.41	2019/12/5	01:07:00.101	20	S10

The coordinates are based on WGS84. The altitudes are head levels of the dynamites. The depths are lengths from ground surface to bottoms of the holes.

する南北測線においても爆破および観測点配置（筒井ら，2017）が行われていたが，今回は行わなかった．一方，桜島の東側の爆破点KUREからNABEにかけて（地震計数6）と，爆破点NABEから南の爆破点AR2E方向へ延長する測線（地震計数14）と，桜島南岸に東西方向の測線（地震計数30）と爆破点NJREとAR2Eを設けた．なお，爆破点KUREからNABEと，NABEからAR2Eへ伸びる測線は2016年探査において

も設けられた（筒井ら，2017）．また，爆破点NJREと桜島南岸の東西測線の地震計配置は2013年探査（中道ら，2014）と同じ場所に設けられたが，今回新たに13箇所にて重複して地震観測装置を設置し，7箇所には地震観測点を増設した．NABEとKUREにおいて薬量20 kgの爆破が行われ，NJREとAR2Eにて薬量100 kgの爆破が行われた．東西の反復反射法探査の測線と爆破点NABEとKURE間の測線における地震

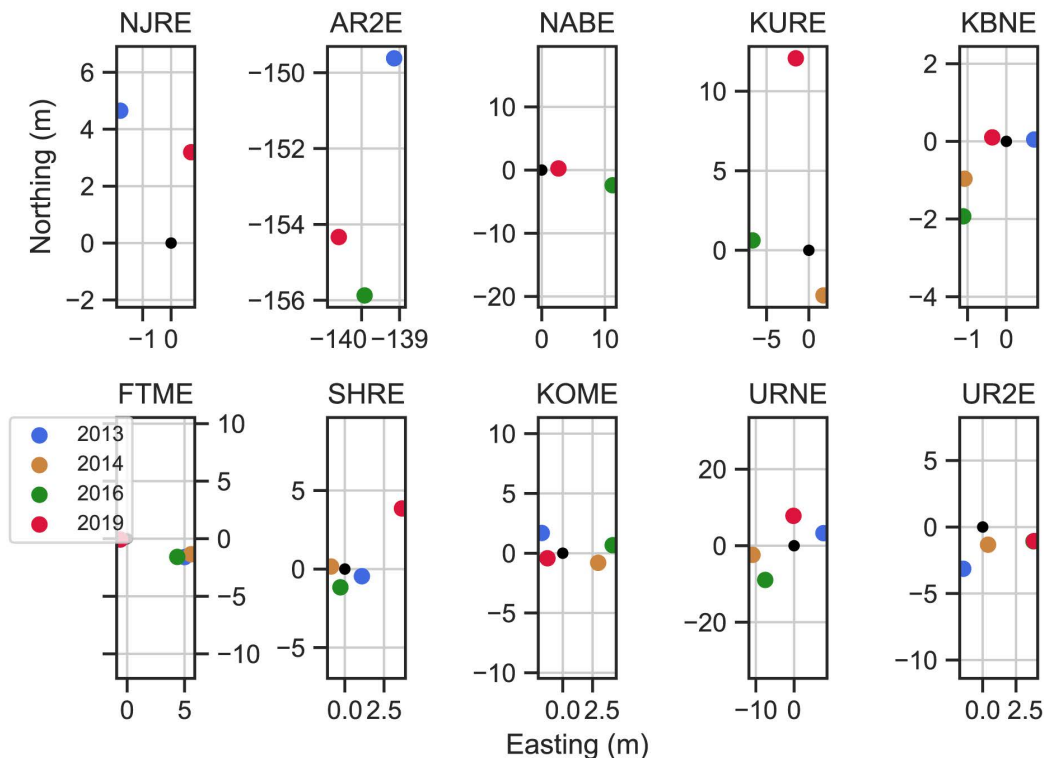


Fig. 2 The relative locations of the shot holes. The reference locations of shots NJRE and AR2E are the 2008's locations (Iguchi et al., 2009). The reference location of shot NABE is the 2009's location (Tsutsui et al., 2010). The reference locations of shots KURE, KBNE, FTME, SHRE, KOME, URNE and UR2E are the 2012's locations (Tsutsui et al., 2013).

計は固有周波数4.5Hzのものであり、爆破点NABEから南に延びてAR2Eにかけてと桜島南岸の測線における地震計は固有周波数2Hzのものである。なお、桜島南岸の測線における重複地震観測と増設観測点はいずれも固有周期4.5Hzの地震計を用いた。固有周波数4.5Hzおよび2Hzの地震計ともにデータ収録には反復反射法探査および2013年実施の人工地震探査と同様にデータロガーLS-8200SD（蔵下ら，2006）を用いた。このロガーは元々4.5Hzの地震計を接続して使用するものであるが，中道ら（2014）で述べた2013年人工地震探査と同様に，2Hz地震計との接続にはアダプターコネクタを用いた。地震観測点についてまとめると，固有周波数4.5Hzの地震計観測点が142箇所，固有周波数2Hzの地震計が43箇所に展開されたことになる。

今回の人工地震探査の10箇所の爆破は2019年12月5日未明に行われ，爆破時刻はTable 1に示す通り，0:02から2:12に実施された。爆破実施時刻を含むように，2019年12月4日21:00から12月5日6:00の9時間の連

続データ収録を行った。データ取得状況は固有数波数4.5Hz地震計観測点のうち2箇所にてデータロガーの不具合によりデータの完全欠落があり，固有周波数2Hz地震計観測点のうち5箇所にて地震計入力断線が見つかった。後の検証により地震計入力断線の原因はアダプターコネクタの不良であることが分かった。

### 3. 観測記録

Fig. 3に反復反射法探査の東西測線の爆破地震動の波形記録（ショットレコード）を示す。Fig.3の上段の左から右へ爆破点KBNE, FTME, SHREの順序にて示し，下段の左から右へ爆破点KOME, URNE, UR2Eの順で示す。KBNE, FTME, SHREについては東西測線の西端および東端の地震観測点まで明瞭に地震動が見て取れる。一方，爆破点KOMEとURNEについては西端の観測点において地震動が不明瞭になっている。爆破点UR2Eは東西測線の西端から中部の

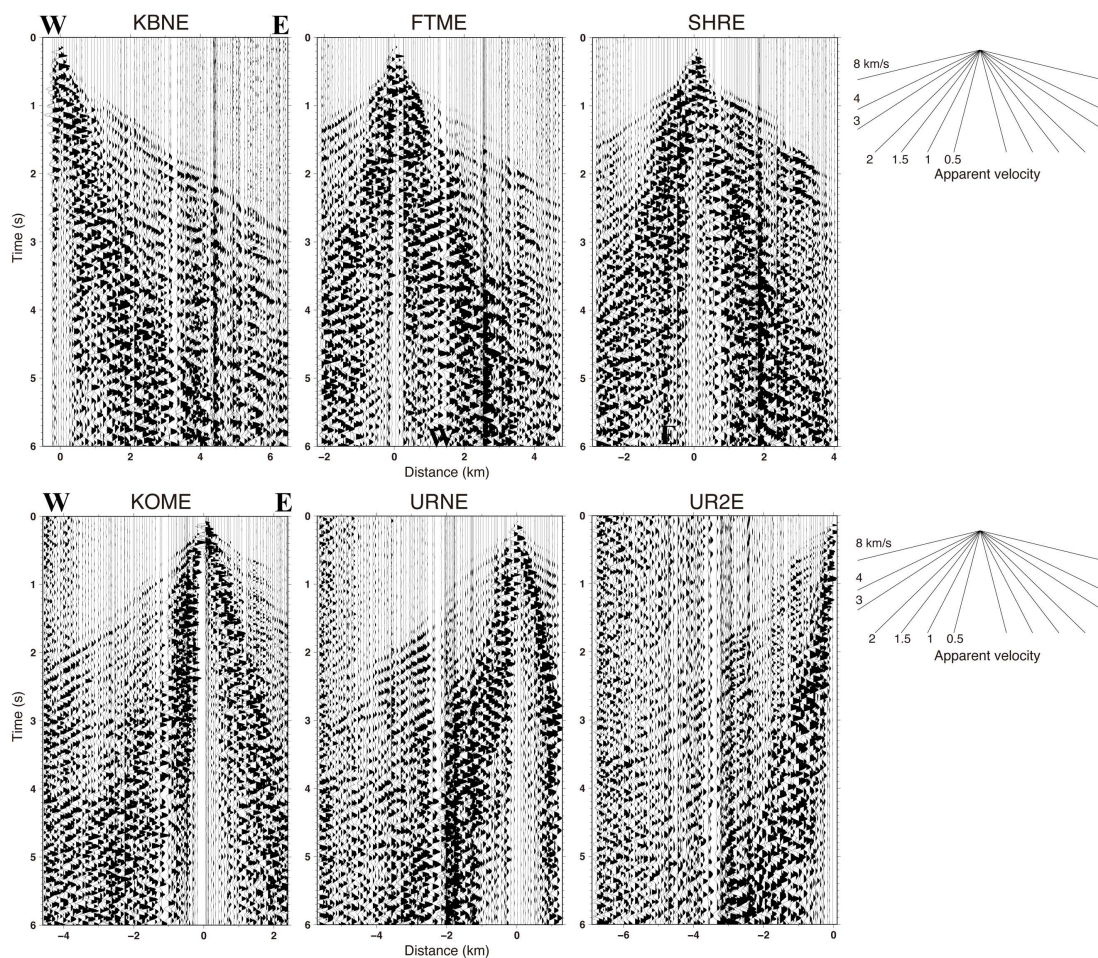


Fig. 3 The shot records of the EW reflection line of the 2019 experiment. Amplitude of each trace is normalized by the maximum value. Positive polarities are painted. Each trace is filtered with a band-pass of 2 to 8 Hz. Two fans show apparent velocities.

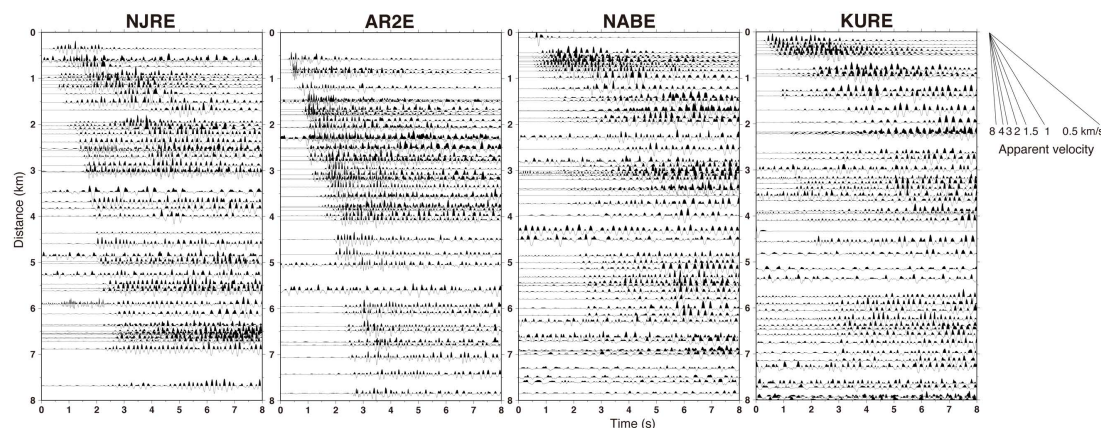


Fig. 4 The shot records of the 2019 experiment for the shots NJRE, AR2E, NABE and KURE. Amplitude of each trace is normalized by the maximum value. Positive polarities are painted. Each trace is filtered with a band-pass of 2 to 8 Hz. A fan shows apparent velocities.

観測点において地震動が不明瞭である。爆破点KBNE, FTME, SHREのショットレコードについては爆破点から距離0.5~0.7 kmにおいて1 km/sを下回る非常に遅い見かけ速度の初動到達がある。その距離を超えると見かけ速度は一気に大きくなり3 km/s程度になる。一方、爆破点KOME, URNE, UR2Eのショットレコードについては、初動の見かけ速度の急激な変化はなく、2 km/s程度である。すべてのショットレコードで見られる後続相で顕著なのは0.5 km/sの見かけ速度の波であるが、これは表面波である。反射法解析においては見かけ速度の速い波の到達に着目する。例えば、爆破点から3~4 km離れたところにおける後続相で位相が比較的揃っている位相の到達が複数見られるが、それらの見かけ速度は4 km/s程度かそれ以上であり、これらは地下からの反射波である。

Fig. 4に爆破点NJRE, AR2E, NABE, KUREのショットレコードを示す。NJREとAR2Eは薬量が100 kgの爆破であったため、震央距離8km近くの地震計であっても明瞭に地震動が確認された。NJREとAR2Eともに初動の見かけ速度は3 km/s程度である。一方、NABEとKUREは薬量が20 kgであるため、震央距離4 kmを超えると地震動の初動を確認するのは困難である。NABEの初動の見かけ速度は3 km/s程度であるのに対して、KUREは震央距離が0.5 km以下の場合見かけ速度が非常に小さく1 km/s未満であるが、震央距離が1kmを超えると3 km/s程度である。

次に過去の人工地震探査で得られた地震波形と比較をする。Tsutsui et al. (2016)は2009年から2014年の反復反射法探査の東西測線の解析により、桜島北東部の深さ6.2 kmの反射面による反射波の振幅の時間変化を指摘した。そこで、2016年および2019年における反射波の時間変化を見るために2009年から2019年の爆破地震動波形を比較する (Fig. 5)。波形の比

較は爆破点SHREから震央距離3.5 kmだけ東方向にある観測点X087Bについて爆破時刻からの経過時間

(Lapse time) を0から5秒にて波形を並べた (Fig. 5 左)。また、年毎の爆破震源で励起された地震動を比較するために、SHREに最も近接した観測点X040Bの波形を合わせて示す (Fig. 5右)。振幅スケールは示していないが、振幅そのものの年ごとの変化を見るために2009年の波形の振幅を基準にして各年の波形を示す。Fig. 5の右図における年毎の波形を比較すると振幅はほぼ同程度であることがわかる。これはすべての年で爆破薬量が20 kgであることとからもっともではあるが、爆破孔の状態があまり変わっていない

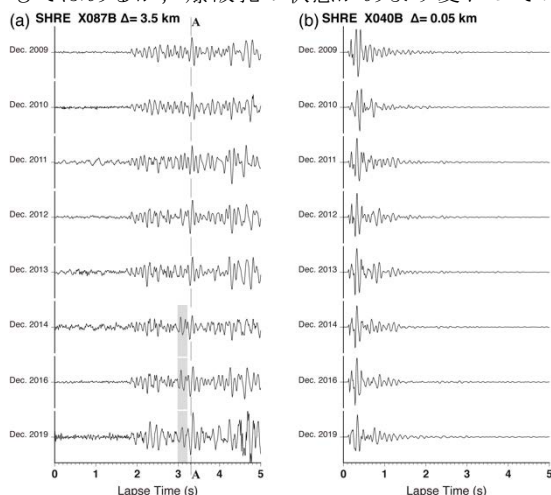


Fig. 5 Detailed annual seismic records. (a) seismic records obtained at station X087B, which is located 3.5 km east from shot SHRE. “A” indicates clear arrivals that correspond to reflection from a depth of 6.2 km (Tsutsui et al., 2016). Large-amplitude arrivals after 4 s indicate arrivals with a low apparent velocity (see Fig. 3). (b) Near-field seismic records were obtained at station X040B, located 0.05 km from shot SHRE.

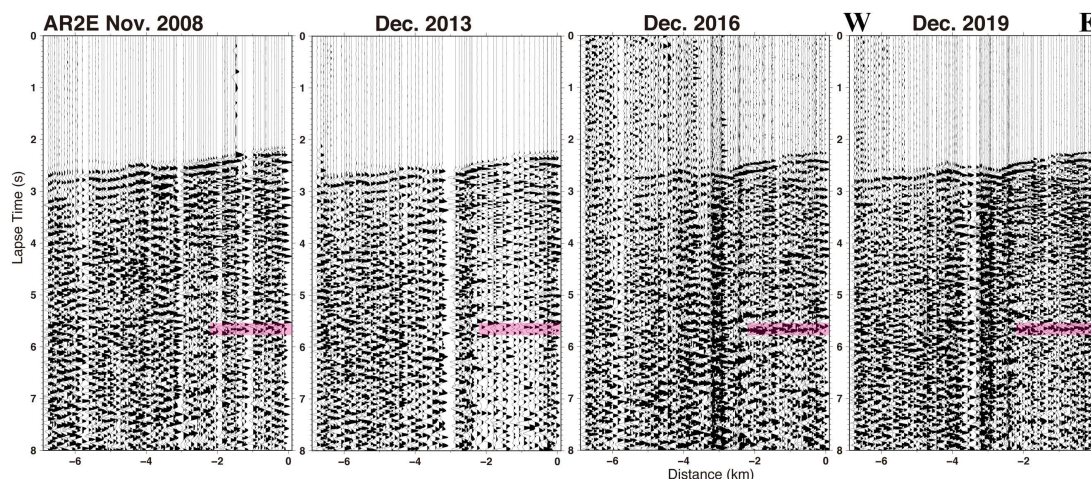


Fig. 6 The shot AR2E records of the EW reflection line in 2008, 2013, 2016 and 2019. Amplitude of each trace is normalized by the maximum value. Positive polarities are painted. Each trace is filtered with a band-pass of 2 to 8 Hz. Magenta hatch shows the location distance and lapse time where clear arrivals are seen in the records of 2016 and 2019. No clear arrival is seen on the hatch window in 2008 and 2013.

いことを反映している。Fig. 5の左図のAと記載されている時間に反射波が見られこれはTsutsui et al. (2016)により反射波Aと定義されている。反射波Aの後ろの経過時間4秒より後の波の到来は浅部層を伝わってくる見かけ速度の小さい波 (Fig. 3) である。反射波Aはすべての年において認識されるが、その振幅は変化している。各年の初動の振幅と各年の反射波Aの振幅を比較すると、2009年は反射波Aの振幅は比較的大きいが、2014年は小さく、2016年は比較的大きく、2019年は2016年よりさらに大きい。Tsutsui et al. (2016)は反射波Aは2009年は比較的大きかったが、2010年に振幅は小さくなり、2011年以降はほぼ一定値としている。2009年に対する振幅の低下率は30%程度とされる。反射波Aの振幅は2016年と2019年で2009年程度に回復したと言える。反射波Aの振幅をより議論するために、Tsutsui et al. (2016)と同様に複数観測点および複数時間窓におけるRMS振幅測定を今後行う予定である。

2008年、2013年、2016年、2019年の人工地震探査では反復反射法探査の測線とは別の場所においても爆破が行われた。そのため、これらの年データからは反復反射法探査の測線から外れた場所における構造の議論が可能である。そこで、これらの4か年の爆破点AR2Eについて、反復反射法探査の東西測線のショットレコードをFig. 6に示す。Fig. 2に示した通り、2008年の爆破点と2013年以降の爆破点では座標が150 m程度異なるが、2013年、2016年、2019年では数mの違いでしかない。一方、爆破の火薬量が異なり、2008年と2013年は200 kgであるのに対して、2016年は20 kgで2019年は100 kgである。2016年と2019年の東西測線の東端から西へ2 kmの間にて爆破時刻から5.

6秒経過後に複数観測点で位相が揃っている波群がみられ反射波と思われる。ところが、該当観測点の該当経過時間において2008年と2013年の記録には位相が揃った波群の到達は見られない。Fig. 7に2008年、2013年、2016年、2019年の爆破AR2Eによる観測点X075Bにおける地震波形を示す。X075BはAR2Eから北北東に水平距離6.6 kmの位置にあり、反復反射法の東西測線の東端から西へ1.4 kmの位置にある。爆破時刻から5.2秒から5.6秒後にFig. 6にて示した反射波が2019年の波形においてははっきりと確認できるが、2008年と2013年の波形の場合は前後の震動に埋もれてしまっている。爆破点AR2Eと観測点X075Bの中間地点の地下に水平な反射面があるとして、地表から反射面までのP波速度を3 km/sとしPP反射を仮定す

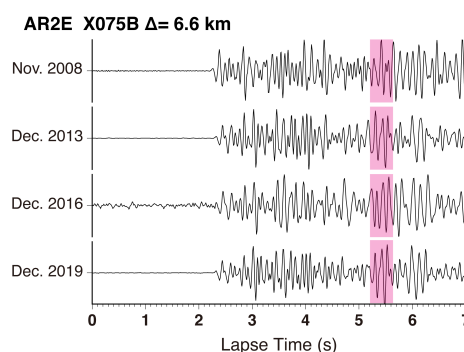


Fig. 7 Detailed annual seismic records obtained at station X075B, which is located 6.6 km NNE from shot AR2E and 1.4 km west from the edge of the EW reflection line. Magenta hatch shows the time window contains clear arrivals as seen in 2016 and 2019 seismic records (Fig. 6).

れば、地震波形の初動の到達時刻と反射波の到達時刻差を説明する反射面の深さは7.5 kmになる。AR2EのX075Bの中間地点には爆破点NABEあり、ここは天平宝字噴火(764~766年)で出現した鍋山のすぐそばにある。したがって、鍋山の直下の深さ7.5 kmに反射面が2016年と2019年に出現したことになり、非常に興味深い、このことについては今後の研究にて多方面からの検討が必要である。

#### 4. おわりに

2019年12月5日未明に桜島火山の10箇所にて爆破を無事行い、2019年桜島火山人工地震探査は無事終了した。反復反射法の東西測線の波形からTsutsui et al. (2016)が発見した桜島北東部の深さ6.2 kmの反射面による反射波Aについて、2016年および2019年の探査で得られた波形を加えて比較したところ、2014年にかけて振幅が減少していた反射波Aが2016年そして2019年と経年増加したことが分かった。今後、Tsutsui et al. (2016)と同様に反射法解析を行うことにより、反射波Aについてより詳細な検討を行っていく予定である。また、2016年および2019年の探査にて初めて明らかになった桜島東部の地下に存在する反射波についてもさらなる検討をしていく予定である。

桜島火山においてはこれまでに10年を超える年数にて反復的に人工地震探査を行ってきた。観測に使用してきた機材は同じであるため、老朽化が進行している。そのため、将来にわたって火山の人工地震探査を実施していくには、新しい観測装置および新しい実施手法の開発と導入が欠かせない。

#### 謝 辞

本研究は文部科学省「災害の軽減貢献するための地震火山観測研究計画(第2次)」における課題番号DPRI07の経費および気象庁の経費にて実施された。観測にあたり東京大学地震研究所から機材を借用させていただいた。また、島内住民および関係各機関には多大な協力を頂いた。筒井智樹博士には観測の下見および実施に協力をいただき、データ解析についてご教示いただいた。また、味喜大介博士には爆破点の測量に協力いただいた。記して感謝いたします。

#### 参考文献

青木陽介・他58名(2008): 浅間山における人工地震探査-探査の概要と初動の走時について-, 東京大学地震研究所彙報, 第83巻, pp. 1-26.  
井口正人・他39名(2005a): 口永良部島火山におけ

る人工地震探査-探査の概要と初動の走時について-, 東京大学地震研究所彙報, 第80巻, pp. 11-40.  
井口正人・他39名(2005b): 口永良部島火山における人工地震探査-探査の概要と初動の走時について-, 京都大学防災研究所年報, 第48号B, pp. 297-322.  
井口正人・八木原寛・為栗 健・清水 洋・平林順一・宮町宏樹・鈴木敦生・筒井智樹・及川 純・森健彦・相沢広記・河野裕希・馬場龍太・大倉敬宏・吉川 慎・齋藤武士・福嶋麻沙代・平野舟一郎(2006): 諏訪之瀬島火山における人工地震探査, 京都大学防災研究所年報, 第49号B, pp. 339-353.  
井口正人・他82名(2009): 2008年桜島人工地震探査の目的と実施, 京都大学防災研究所年報, 第52号B, pp.293-307.  
植木貞人(1990): 地震探査による活火山直下の浅部地殻構造調査, 火山, 第34巻火山学の基礎研究特集号, pp. S67-S81.  
及川 純・他70名(2007): 富士山における人工地震探査-観測および走時の読み取り-, 東京大学地震研究所彙報, 第81巻, pp. 71-94.  
鬼澤真也・他57名(2003): 有珠山における人工地震探査-観測および初動の読み取り-, 東京大学地震研究所彙報, 第78巻, pp. 121-143.  
鬼澤真也・森 健彦・筒井智樹・平林順一・野上健治・小川康雄・松島 健・鈴木敦生(2005): 人工地震探査より推定した草津白根火山白根火砕丘表層のP波速度構造, 火山, 第50巻, pp. 9-16.  
鍵山恒臣・他68名(1995): 霧島火山群における人工地震探査-観測および初動の読み取り, 東京大学地震研究所彙報, 第70巻, pp. 33-60.  
蔵下英司・平田 直・森田裕一・結城 昇(2006): 高機能小型オフラインデータロガーを用いた高密度地震観測システム, 地震, 第59巻, pp. 107-116.  
須藤靖明・他89名(2002): 阿蘇山における人工地震探査-観測および初動の読み取り-, 東京大学地震研究所彙報, 第77巻, pp. 303-336.  
田中 聡・他69名(2002): 岩手山における人工地震探査-観測および初動の読み取り-, 東京大学地震研究所彙報, 第77巻, pp. 1-25.  
筒井智樹(2005): 地震学的手法を用いた活火山構造探査の現状と課題, 火山, 第50巻特別号, pp. S101-S114.  
筒井智樹・鬼澤真也・森 健彦・野上健治・平林順一・小川康雄・高木憲朗・鈴木敦生・及川 純・中道治久・吉川 慎・松島 健(2008): 草津白根火山白根火砕丘の地震反射断面-疑似反射記録法による反射断面の推定-, 火山, 第53巻, pp. 1-14.  
筒井智樹・森田裕一・中田節也・長田 昇・小山悦郎・佐藤正良(2008): 浅間山における人工地震探

- 査：車坂峠周辺における高密度観測の概要，東京大学地震研究所彙報，第83巻，pp. 27-41.
- 筒井智樹・他35名（2010）：桜島火山における反復地震探査（一回目），京都大学防災研究所年報，第53号B，pp. 241-259.
- 筒井智樹・他35名（2011）：桜島火山における反復地震探査（2010年観測），京都大学防災研究所年報，第54号B，pp. 195-208.
- 筒井智樹・他42名（2012）：桜島火山における反復地震探査（2011年観測），地震及び火山噴火予知研究計画，「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究 課題番号1809 2011年」報告書，pp. 25-38.
- 筒井智樹・他37名（2013）：桜島火山における反復地震探査（2012年観測），京都大学防災研究所年報，第56号B，pp. 207-220.
- 筒井智樹・他48名（2014）：桜島火山における反復地震探査（2013年観測），京都大学防災研究所年報，第57号B，pp. 138-149.
- 筒井智樹・他32名（2017）：桜島火山における反復地震探査（最終回），日本惑星科学連合2017年大会，SVC47-23.
- 中道治久・他48名（2014）：2013年桜島人工地震探査の概要と2008年探査との比較京都大学防災研究所年報，第57号B，pp. 125-137.
- 松島 健・他82名（1997）：雲仙火山における人工地震探査-観測および初動の読み取り-，東京大学地震研究所彙報，第72巻，pp. 167-183.
- 森田裕一・浜口博之（1996）：火山体構造探査のための高精度小型データロガーの開発，火山，第41巻，pp. 127-139.
- 山本希・他20名（2016）：蔵王山における人工地震構造探査，日本惑星科学連合2016年大会，SVC47-21.
- Brocher, T.A. (2005): Empirical relations between elastic wavespeeds and density in the earth's crust, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 95, No. 6, pp. 2081-2092.
- Hickey, J., Gottsmann, J., Nakamichi, H. and Iguchi, M. (2016): Thermomechanical controls on magma supply and volcanic deformation: application to Aira caldera, Japan, *Sci Rep.*, Vol. 6, 32691, doi:10.1038/srep32691.
- Onizawa, S., Mikada, H., Watanabe, H. and Sakashita, S. (2002): A method for simultaneous velocity and density inversion and its application to exploration of subsurface structure beneath Izu-Oshima volcano, Japan, *Earth Planets Space*, Vol. 54, pp. 803-817.
- Tsutsui, T., Yagi, N., Iguchi, M., Tameguri, T., Mikada, H., Onishi, K., Miyamachi, H., Nishimura, T., Morita, Y. and Watanabe, A. (2013): Structure of northeastern Sakurajima, south Kyushu, Japan, revealed by seismic reflection survey, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, Vol. 58, No. 1, pp. 239-250.
- Tsutsui, T., Iguchi, M., Tameguri, T. and Nakamichi, H. (2016): Structural evolution beneath Sakurajima Volcano, Japan, revealed through rounds of controlled seismic experiments, *Jour. of Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 315, pp. 1-14, doi:10.1016/j.jvolgeores.2016.02.008.

（論文受理日：2020年8月31日）