

2013年桜島人工地震探査の概要と2008年探査との比較

Active Seismic Source Experiment in and around Sakurajima Volcano in 2013 and Comparison with the Experiment in 2008

中道治久・筒井智樹⁽¹⁾・為栗 健・井口正人・八木原寛⁽²⁾・大湊隆雄⁽³⁾
菅井 明⁽⁴⁾・大島弘光⁽⁵⁾・三浦 哲⁽⁶⁾・山本 希⁽⁶⁾・市来雅啓⁽⁶⁾・野上健治⁽⁷⁾
武尾 実⁽³⁾・市原美恵⁽³⁾・及川 純⁽³⁾・山中佳子⁽⁸⁾・大倉敬宏⁽⁹⁾・安部祐希⁽⁹⁾
清水 洋⁽¹⁰⁾・山下裕亮⁽¹⁰⁾・宮町宏樹⁽²⁾・小林励司⁽²⁾・味喜大介・山本圭吾
前川徳光⁽⁵⁾・平原 聡⁽⁶⁾・渡邊篤志⁽³⁾・奥田 隆⁽⁸⁾・堀川信一郎⁽⁸⁾・松廣健二郎⁽⁸⁾
園田忠臣・関 健二郎・吉川 慎⁽⁹⁾・平野舟一郎⁽²⁾・渡邊幸弘⁽⁴⁾・碓井勇二⁽⁴⁾
小林 宰⁽⁴⁾・池田啓二⁽⁴⁾・長門信也⁽⁴⁾・小枝智幸⁽⁴⁾・宮町凜太郎⁽¹⁾・佐藤 礼⁽¹⁾
佐藤 泉⁽¹¹⁾・和田さやか⁽¹²⁾・福原絃太⁽¹³⁾・蘭 幸太郎⁽¹⁴⁾・水野尚人⁽¹⁵⁾
小林雅実⁽¹⁶⁾・神菌めぐみ⁽¹⁷⁾

Haruhisa NAKAMICHI, Tomoki TSUTSUI⁽¹⁾, Takeshi TAMEGURI, Masato IGUCHI,
Hiroshi YAKIWARA⁽²⁾, Takao OHMINATO⁽³⁾, Akira SUGAI⁽⁴⁾, Hiromitsu OHSHIMA⁽⁵⁾,
Satoshi MIURA⁽⁶⁾, Mare YAMAMOTO⁽⁶⁾, Masahiro ICHIKI⁽⁶⁾, Kenji NOGAMI⁽⁷⁾, Minoru TAKEO⁽³⁾,
Mie ICHIHARA⁽³⁾, Jun OIKAWA⁽³⁾, Yoshiko YAMANAKA⁽⁸⁾, Takahiro OHKURA⁽⁹⁾, Yuki ABE⁽⁹⁾,
Hiroshi SHIMIZU⁽¹⁰⁾, Yusuke YAMASHITA⁽¹⁰⁾, Hiroki MIYAMACHI⁽²⁾, Reiji KOBAYASHI⁽²⁾,
Daisuke MIKI, Keigo YAMAMOTO, Tokumitsu MAEKAWA⁽⁵⁾, Satoshi HIRAHARA⁽⁶⁾,
Atsushi WATANABE⁽³⁾, Takashi OKUDA⁽⁸⁾, Shinichiro HORIKAWA⁽⁸⁾, Kenjiro MATSUHIRO⁽⁸⁾,
Tadaomi SONODA, Kenjiro SEKI, Shin YOSHIKAWA⁽⁹⁾, Shuichiro HIRANO⁽²⁾,
Yukihiro WATANABE⁽⁴⁾, Yuji USUI⁽⁴⁾, Tsukasa KOBAYASHI⁽⁴⁾, Keiji IKEDA⁽⁴⁾, Shinya NAGATO⁽⁴⁾,
Tomoyuki KOEDA⁽⁴⁾, Rintaro MIYAMACHI⁽¹⁾, Rei SATO⁽¹⁾, Izumi SATO⁽¹¹⁾, Sayaka WADA⁽¹²⁾,
Genta FUKUHARA⁽¹³⁾, Kohtaro ARARAGI⁽¹⁴⁾, Naoto MIZUNO⁽¹⁵⁾, Masami KOBAYASHI⁽¹⁶⁾,
and Megumi KAMIZONO⁽¹⁷⁾

- (1) 秋田大学大学院工学資源学研究科
- (2) 鹿児島大学大学院理工学研究科
- (3) 東京大学地震研究所
- (4) 気象庁
- (5) 北海道大学大学院理学院
- (6) 東北大学大学院理学院
- (7) 東京工業大学火山流体研究センター
- (8) 名古屋大学大学院環境学研究科
- (9) 京都大学大学院理学院
- (10) 九州大学大学院理学院
- (11) 東京工業大学大学院理工学研究科
- (12) 北海道大学大学院理学院
- (13) 北海道大学理学部
- (14) 東京大学大学院理学系研究科
- (15) 東京大学理学部
- (16) 名古屋大学理学部

- (1) Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University
- (2) Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University
- (3) Earthquake Research Institute, the University of Tokyo
- (4) Japan Meteorological Agency
- (5) Faculty of Science, Hokkaido University
- (6) Graduate School of Science, Tohoku University
- (7) Volcano Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology
- (8) Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University
- (9) Graduate School of Science, Kyoto University
- (10) Graduate School of Science, Kyushu University
- (11) Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology
- (12) Graduate School of Science, Hokkaido University
- (13) School of Science, Hokkaido University
- (14) Graduate School of Science, the University of Tokyo
- (15) School of Science, the University of Tokyo
- (16) Faculty of Sciences, Kyushu University
- (17) School of Science, Nagoya University

Synopsis

We conducted an active seismic experiment in and around Aira caldera in December 2013, five years after a similar experiment conducted in 2008 in order to detect temporal changes of seismic structure beneath Sakurajima volcano and Aira caldera. We deployed 280 temporary seismic stations, 90% of which were at the same locations used in 2008. Six explosions (S1 to S6) of 200 kg or 300 kg of dynamite were sequentially detonated during the night of 5 December 2013. All of the shot locations except S3 are less than 60 m from the 2008 locations. We undertook continuous seismic recording for 9 h during the night: the obtained records contain both the waveforms excited by the six shots and those from an explosive eruption and volcanic tremor. To evaluate the changes of subsurface structure beneath Sakurajima volcano since 2008, we calculated cross-correlations of waveforms recorded at all of the recording stations that duplicated those of 2008. The most cross-correlations are equal to or greater than 0.7.

キーワード: 桜島火山, 始良カルデラ, 人工地震探査, 時間変化

Keywords: Sakurajima volcano, Aira caldera, artificial explosion survey, temporal change

1. はじめに

桜島火山は始良カルデラの南縁付近に位置する安山岩質火山で、始良カルデラ形成（約2.9万年前）後の約2.6万年前に誕生した。桜島火山は約2.6～0.56万年前にあった北岳の噴火活動と、約4.5千年前から現在も継続している南岳の噴火活動により成長してきた（例えば、小林ら, 2013）。桜島小池におけるボーリング調査では、800 m深を超えても桜島火山の基盤である四万十層には達しなかった（Aramaki, 1984）。

Yokoyama and Ohkawa (1986)は重力異常の解析から、桜島直下の基盤の深さは周囲よりも深く約2.5 kmと推定し、分厚い堆積層の上に桜島火山にあると推測した。

今からちょうど100年前の1914年に起こった桜島の大正噴火は、日本における20世紀以降の最大規模の噴火である。この噴火による地盤変動の解析から、始良カルデラ中心部直下の約7～10 kmにマグマ溜まりの存在が指摘された（Mogi, 1958; Yokoyama, 1971）。その後の繰り返し水準測量（Yamamoto et al., 2013;

山本ら, 2013) や1995年以降のGPS観測 (Iguchi, 2013) によって, 始良カルデラのマグマ溜まりに蓄積されてきており, 現在は大正噴火で消費したマグマの約9割分が再蓄積されていると推測されている。

桜島火山のマグマ溜まりについては地盤変動観測と地震観測にて推定されてきた。火山性地震の震源分布や地震波減衰領域により南岳の深さ5 kmにマグマ溜まりが推定されている (石原, 1988)。また, 1999~2005年の始良カルデラと桜島周辺の地震活動から始良カルデラ中心部下から桜島南岳直下を抜け桜島南西沖に至るマグマ貫入路が指摘されている (Hidayati et al., 2007)。さらに, 最近の繰り返し水準測量 (Yamamoto et al., 2013) やGPS観測 (Iguchi et al., 2013) から北岳周辺の深さ4-5 kmにマグマ溜まりが推定されている。これらのように, 始良カルデラから桜島北岳・南岳へと連なるマグマ供給路が推定されている。しかし, これらのマグマ溜まりやマグマ貫入路の大きさについては分かっていない。

2006年の桜島昭和火口の噴火再開後, 2008年に爆発的噴火が発生し, 2009年には年間578回発生した。その後2010~2011年は年間1000回, 2012年は900回, 2013年は800回を超えた。ここ2年で回数は減少しているものの, 昨年8月18日の噴煙高5 kmの噴火など規模の大きい噴火があった。このように, 噴火活動は活発化が継続している一方, 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る。

マグマがどのようにして地表まで上昇し, 噴火に至るかという問題は, 火山学における最も基本的な問題の一つである。マグマは周囲の岩石との密度差によりマグマ溜まりとして蓄積されるが, 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の必要性を指摘し, 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年にかけて人工地震による火山体構造探査が国内14火山においてのべ15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)。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。

火山活動の変化に伴って地震学的構造変化が検出された事例がここ10年で多く報告されるようになってきた。例えば, イタリア・エトナ火山では, 火口直下の地盤変動源付近において噴火時の V_p/V_s 値の低下を見いだし, 発泡度の高いマグマの貫入が示唆された (Patanè et al., 2006)。レユニオン島ピトン・デ・ラ・フルネーズ火山では, Ambient Noiseの干渉法解析から噴火3日前において割れ目火口直下の地震波速度の0.1%低下が明らかになり, マグマ貫入が指摘された (Brenquiere et al., 2008)。干渉法は広く用いられるようになり, 例えば, Anggono et al. (2012) は三宅島2000年噴火におけるカルデラ形成に伴う地震波速度変化を検出した。自然地震観測だけでなく, 人工地震探査の反復実施によって構造変化の検出が行われており, 例えばNishimura et al. (2005) は岩手山の火山活動に伴う地震波速度変化を検出した。

昭和火口の噴火が活発化する前の2008年11月に人工地震探査 (以下, 2008年探査と称する) が実施された (井口ら, 2009)。2008年探査は始良カルデラの基盤構造, 南岳直下のマグマ供給系の構造, 始良カルデラ下のマグマ溜まりから南岳に至るマグマ供給路を明らかにする目的で実施された。そして, 走時によるP波速度構造解析により始良カルデラ中央部の深さ1.5~3 kmと桜島直下の1~2 kmに低速度域の存在が指摘された (Miyamachi et al., 2013)。その後, 2009年より桜島にて反射法探査が毎年繰り返し実施されてきており (以下, 反復反射法探査と称する)

(筒井ら, 2010; 2011; 2012; 2013; Tsutsui et al., 2013), 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 (筒井ら, 2014)。

そこで, 桜島および始良カルデラの地下構造の時間変化検出を目的として人工地震探査を2013年12月に実施した。この人工地震探査 (以下, 2013年探査と称する) は2008年探査 (井口ら, 2009) をなるべく再現するように実施されたが, 諸般の事情により規模は縮小した形で実施された。なお, これまでの火山構造探査の実施報告で行われている読み取り値と走時の特徴については別報で報告する予定である。

2. 2013年探査の概要

2013年探査は2013年12月1日~7日の7日間にて反復反射法探査 (筒井ら, 2014) を含めて, 9つの国立大学と気象庁から50名の参加者にて実施された。Fig. 1に人工地震探査のために配置した地震観測点と爆破点の位置を示す。ここでは2008年探査と対比させ

ながら屈折法とトモグラフィー解析を目的とした観測点と爆破点について述べる。反復反射法探査の測線についての詳細は筒井ら（2014）に譲る。

まず観測測線について述べる。2013年探査で屈折法とトモグラフィー解析を目的とした観測点数は288で、その内、陸上設置点数は286（Fig.1+印と白丸印）で、海底設置点数は2（Fig.1黄丸印）である。陸上設置のうち6点（Fig.1白丸印）では無人ヘリコプター（Photo 1）による設置が行われた。屈折法により始良カルデラおよび桜島の構造をあきらかにし、2008年探査からの構造の時間変化検出を目的として、始良カルデラ北西（13S01：始良市蒲生町）から桜島の南岳を通り、大隅半島の垂水市新城（13S04）にかけての北西～南東方向の約38 kmの測線について2008年探査の再現をした。屈折法による探査深度は桜島直下において海面下深さ3-4 kmと推定される。3次元トモグラフィー解析を目的として桜島島内においては2008年探査と同じく面的に稠密に観測点を配置した。観測測線は、桜島を1周するルートと山麓から山頂部に向かって延びるルートにより構成されている。2008年探査では南岳から半径2 kmの範囲では観測点を設置しなかったが、今回は無人ヘリコプターにて観測点を設置した。陸上観測点における設置間隔は、桜島島内は約200 mで、島外は400-500 mである。地下構造の時間変化を検出するには観測点と爆破点の位置の再現性が高いのが望ましい。無人ヘリコプター設置点を除く280の陸上観測点（以下、本測線観測点と称する）で2008年探査の観測点位置の再現を行った。本測線の観測点の座標は簡易GPSにて測定した。測定精度は水平位置については7-10 m、標高は10 m程度である。2008年探査と2013年探査での構造の変化を検出することが目的であるため、2008年探査における観測点位置を再現することが重要である。そこで、2008年探査の観測点写真による位置同定を優先して、再現状況を以下の基準でランク付けして再現状況を示す。ランク●（163点）：写真を基にして同一場所に設置したケース。ランク○（90点）：ハンディGPSによる測位精度内にて同一場所に設置したケース。ランクN（27点）：ランク●・○以外のケースで、2008年探査時から大幅な土地の改変などがあり同一場所に設置出来なかった場合が多い。まとめると、2013年探査の本測線観測点の90%（253点）にて2008年探査と同一場所に設置することができた。海底地震観測は2008年探査とは異なる位置で行った。その位置座標は、投入位置付近及びそれを取り囲む3点における船上からの音響測距データと、DGPSによる船位データ（1Hzサンプリング）を用いて決定した。さらに、火山活動研究センター（桜島火山観測所）の定常地震観測点8点のデータも

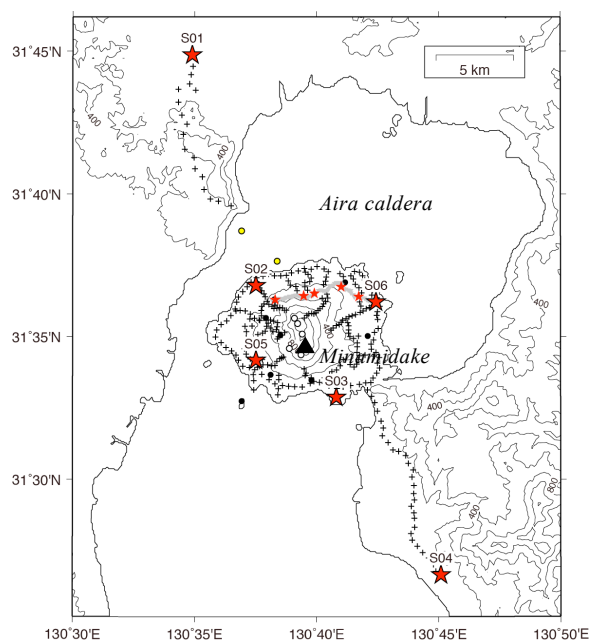


Fig. 1 Locations of seismic stations and shot points. Stars show shot points. Black and gray pluses indicate 2Hz and 4.5Hz seismometers, respectively. Yellow and open circles indicate ocean bottom seismometer and accelerometers deployed by an unmanned helicopter, respectively. Solid dots show the permanent seismic stations of Kyoto University.



Photo 1 An unmanned autonomous helicopter and a seismic instrument with a solar power unit.

用いる。

次ぎに爆破点について述べる。2013年探査では爆破は桜島内9箇所、島外2箇所で行われた（Fig.1赤星印; Table 1）。島内の爆破点のうち4箇所が2008年探査の再現箇所、5箇所が2012年反射法探査の再現箇所である。爆破点の位置はGPSラピッドスタティック測量により決定し、薬頭までの深度は検尺により決定した。爆破点について2008年探査と位置再現性を評価したところ、水平位置の差が小さい順に2.4 m（13S01）、5 m（13S05）、15 m（13S04）、50 m（13S02）、62 m（13S06）、そして204 m（13S03）であった（Table

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

2013 shot	Shot location				Shot time		Charge (kg)	2008 or 2012 shot	Offsets from previous shots	
	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Dep. (m)	Hour Min	Sec			North (m)	East (m)
13S01	31.747860	130.581663	15.4	60.0	2:17	0.4215	300	08S01	-1.6	1.8
13S02	31.613220	130.625215	8.7	60.9	2:22	0.2910	200	08S02	-43.4	26.1
13S03	31.547918	130.680141	-9.9	40.0	2:27	0.8920	200	08S03	-149.6	-139.1
13S04	31.444291	130.751529	0.7	60.0	2:32	0.8355	300	08S04	-16.0	-0.6
13S05	31.569560	130.625200	3.2	70.0	2:07	0.4515	200	08S07	4.7	-1.8
13S06	31.603699	130.707241	-8.8	60.1	2:12	0.2270	200	08S06	3.0	61.8
13S07	31.606723	130.695537	79.6	10.1	1:07	0.3740	20	12S11	3.3	7.7
13S08	31.612469	130.683443	132.7	10.3	1:17	0.2000	20	12S07	1.7	-1.8
13S09	31.608577	130.665146	303.2	10.1	1:22	0.6225	20	12S12	-0.5	1.1
13S10	31.607161	130.657897	317.0	9.9	1:27	0.1535	20	12S11	-1.6	5.0
13S11	31.604963	130.638407	356.0	10.2	1:12	0.1750	20	12S14	0.1	0.7

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. The shots were conducted on December 5, 2013 JST.

1) . 反射法測線の爆破点13S07-13S11についての位置再現性についての詳細は筒井ら (2014) に譲る.

そして観測機器とデータ収録について述べる. 本測線観測点においては, 反復反射法探査と同様に白山工業社製小型データロガーLS-8200SD (蔵下ら, 2006) を用いた. このデータロガーは専用の4.5Hz上下動地震計を接続して使用するものであるが, 2013年探査では2008年探査と同じ上下動地震計Mark Product社 (現Sercel社) 製L-22D型 (固有周波数2Hz, コイル抵抗2k Ω) を用い, アダプターコネクター経由にてデータロガーに接続した (Photo 2) . なお, アダプターコネクターにはシャント抵抗 (9k Ω) が搭載されており, 地震計のダンピング定数0.7となった. データ収録は分解能24bit, サンプル間隔2 msにて行った. GPSによる時刻校正は1時間毎に行った. データロガーは2008年探査で使用した白山工業社製LS-8000SH (森田・浜口, 1996) と異なるが, 事前に同時並行観測を行い同じ波形が収録されることを確認した. 海底地震計2台は勝島製作所製の3成分地震計であり, 固有周波数は4.5Hzである. 地震計からの信号をサンプル間隔5 msでハードディスクに収録した. 無人ヘリにて設置した地震計は3成分加速度計である. 無人ヘリは自律型であり, 運用および機器設置の方法については金子ら (2011) とKaneko et al. (2011) に述べられている (Photo 1) .

2013年探査の11箇所の爆破作業は12月5日未明に行われ, 爆破時刻はTable 1にある通りである. 爆破時刻を含めて12月4日21時から12月5日6時の9時間連続観測が行われ, 爆発的噴火に伴う地震動と火山性微動も記録した.

本測線観測点280点のうち, データロガーから2点を除いて波形データを回収出来た. 無人ヘリコプタ

ー設置観測点6点のうち1点を除いて波形データを回収出来た. 海底地震観測点のデータは全2点とも波形データを回収出来た. 本測線観測点のうち, 10箇所にて地震計不具合があり, 2箇所にてGPS時刻校正の全失敗があった. 以上から, 本測線観測点のうち266 (95%) 点にてSN比を別として問題なく波形データが得られたといえる.



Photo 2 Seismic instruments deployed the 2013 active seismic source experiment.

3. 観測記録

ここでは2013年探査の屈折法とトモグラフィー解析を目的とした爆破点6箇所による本測線観測点280点と海底地震観測点2点と定常観測点8点において得られた記録について述べる. 無人ヘリコプター観測点データについてはセンサーが加速度計であるのでここでは割愛する.

Fig. 2に北西（13S01）～南東（13S04）方向における爆破点130S01と13S04に対する地震波形を示す。これらの波形記録の時刻は見かけ速度5 km/sでreduceしている。また、波形の振幅は、それぞれ最大振幅で規格化されている。なお、表示は単純に爆破点からの観測点までの距離順に記録が得られている全ての観測点について表示している。そのため、桜島島内に該当する距離の波形（例えば、爆破点13S01の震央距離15–24 kmの波形）は間隔が非常に狭く表示されている。まず、13S01に対する地震波形について説

明する。震央距離37 kmまで初動が明瞭に見られる。震央距離4–6 kmにて初動到達の遅れが認められる。この部分は始良カルデラ西縁付近に対応しており、Miyamachi et al. (2013)による2008年探査の屈折法解析において深さ0–1 kmにある速度2.6–2.8 km/sの層の屈折波に対応する。震央距離16–24 kmは桜島島内にあたり、若干の初動到達の遅れが見られる。震央距離24–31 kmは大隅半島側であり、見かけ速度は5 km/sよりも早く6–7 km/sの範囲にある。基盤層である四万十層群の速度5 km/s層（Miyamachi et al., 2013）に対

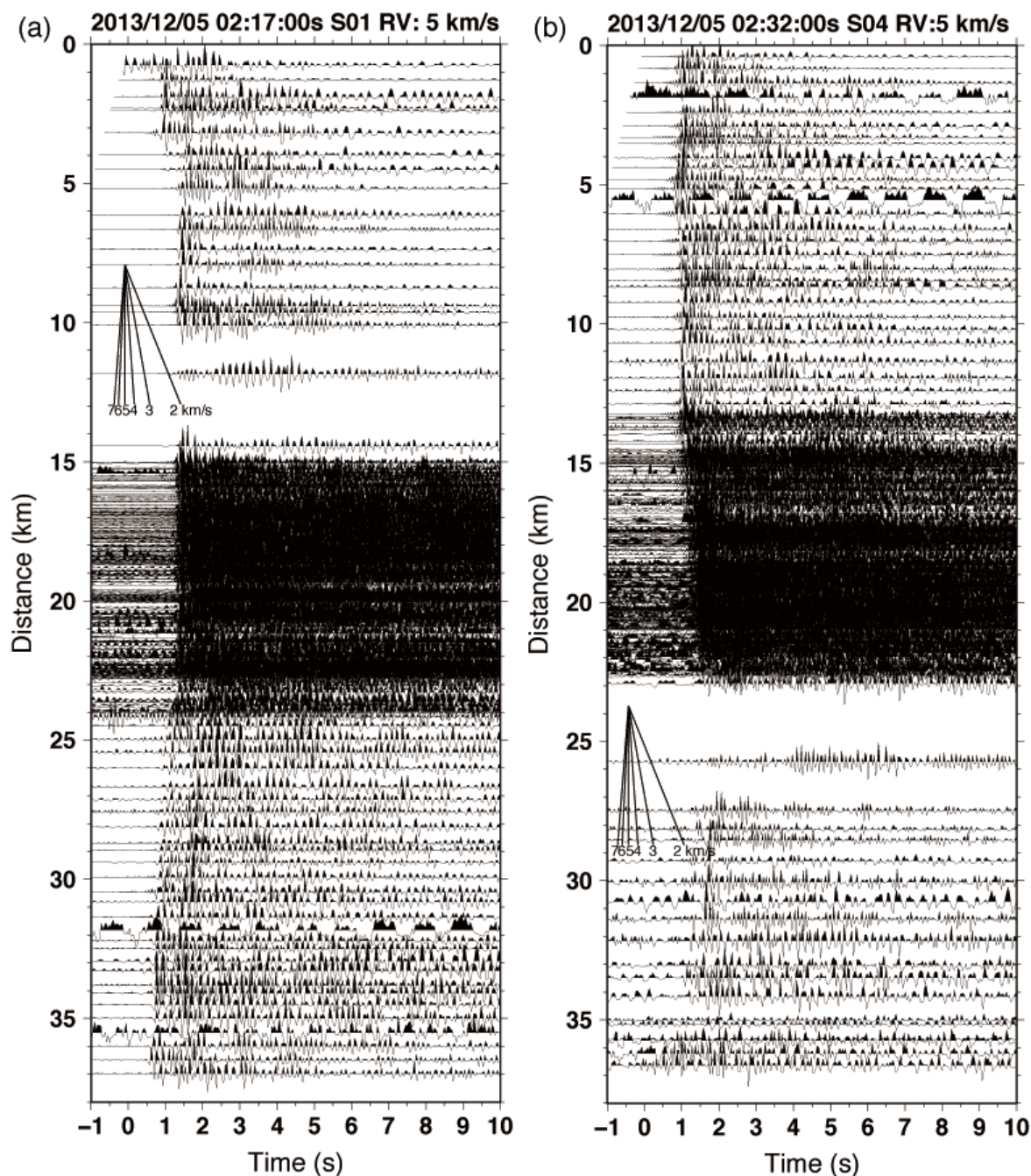


Fig. 2 The shot records of the 2013 experiment for the shots 13S01 (a) and 13S04(b). Amplitude of each trace is normalized by the maximum value. The reduction velocity is 5 km/s. Fans in the record sections show apparent velocities, 2, 3, 4, 5, 6 and 7 km/s.

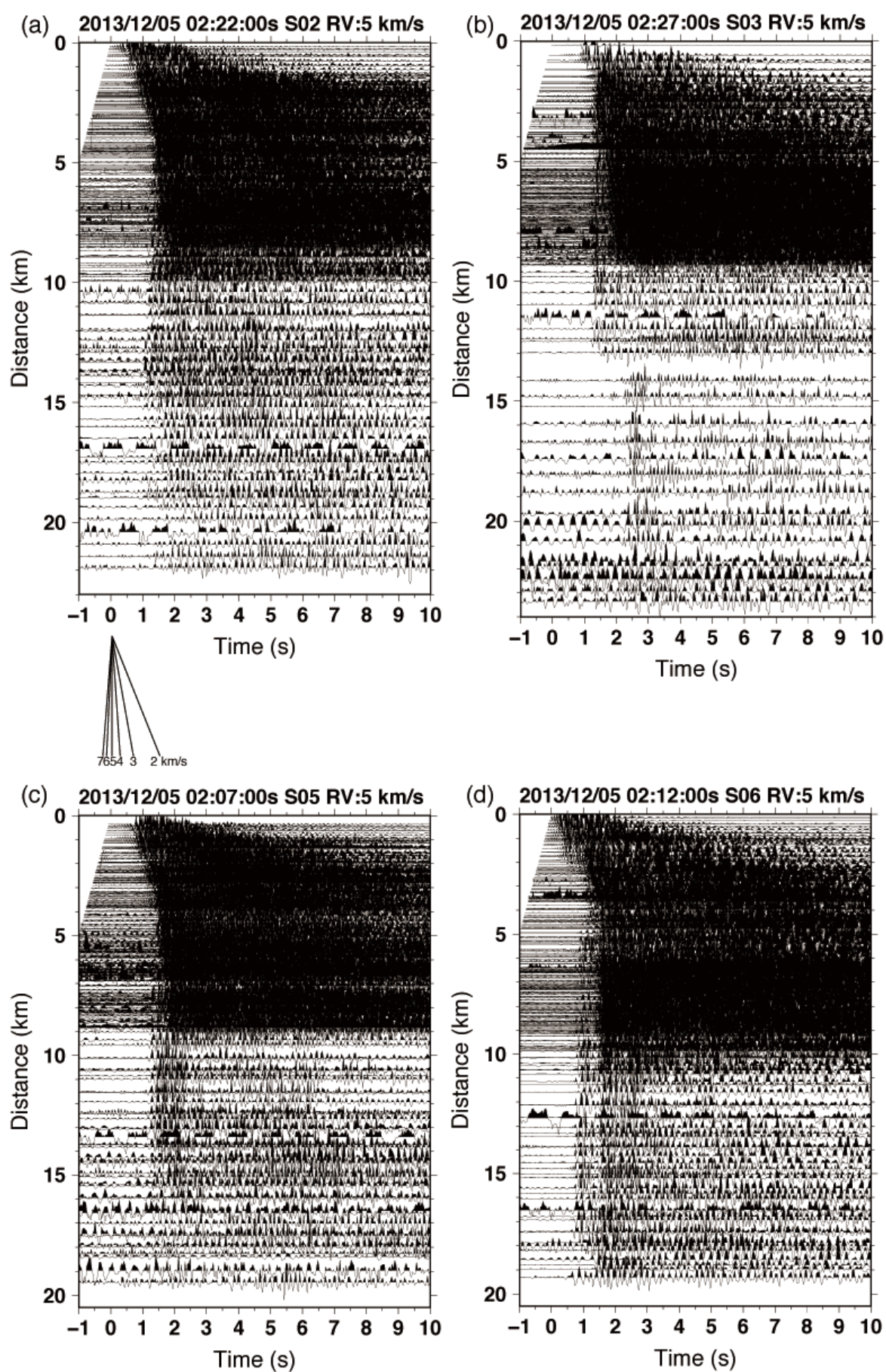


Fig. 3 The shot records of the 2013 experiment for the shots 13S02 (a), 13S03 (b), 13S05 (c) and 13S06 (d). Other explanations are the same as in Fig. 2.

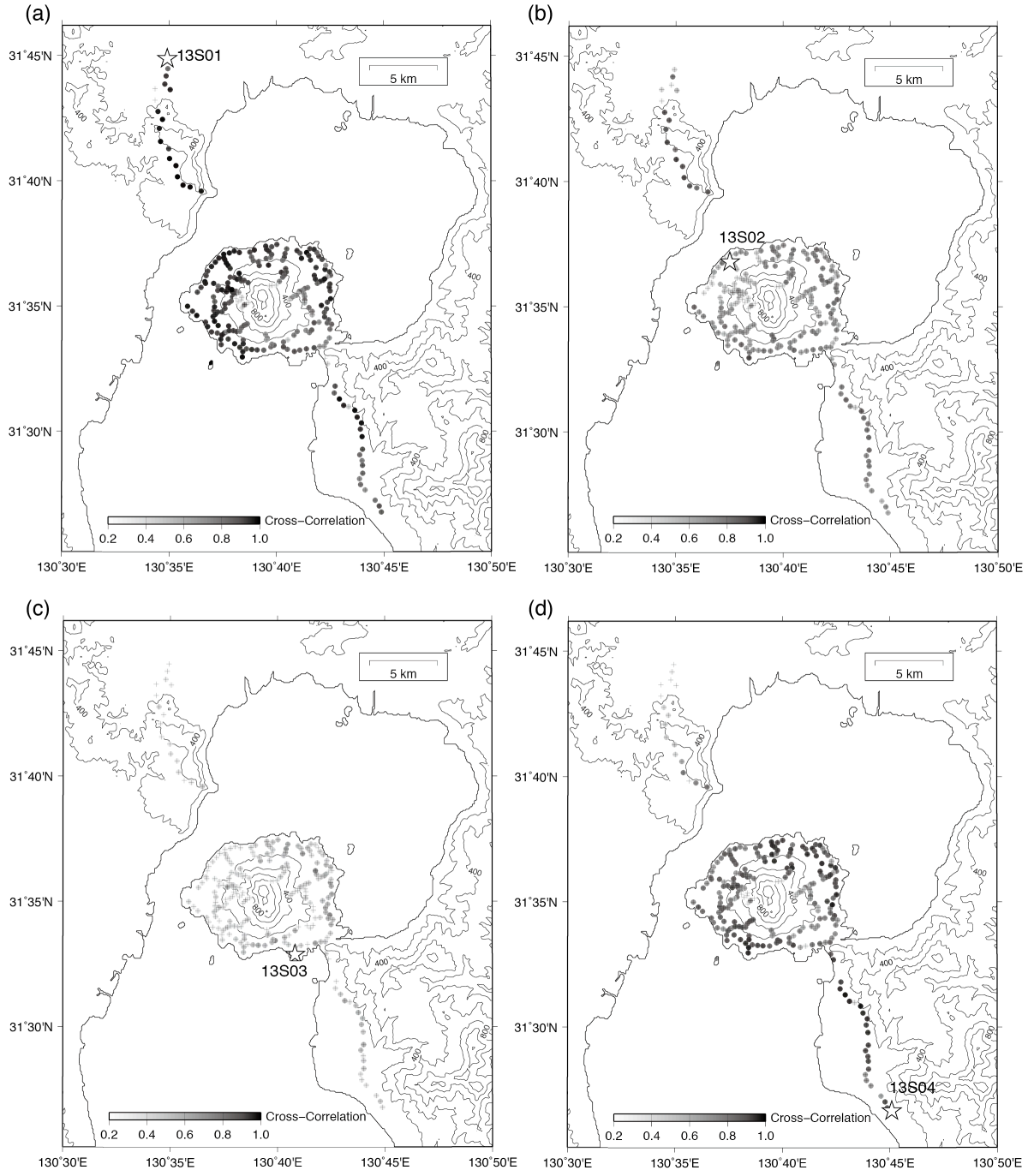


Fig. 4 Distribution of cross-correlation coefficients of the seismic waveforms between the shots in the 2008 and 2013 experiments. (a) Shots 13S01 and 08S01. (b) Shots 13S02 and 08S02. (c) Shots 13S03 and 08S03. (d) Shots 13S04 and 08S04. (e) Shots 13S05 and 08S07. (f) Shots 13S06 and 08S06. Open stars indicate the locations of shots in the 2013 experiment. Crosses indicate the locations of the seismic stations used for the cross-correlation analysis. Circles with gray indicate the cross-correlation coefficients.

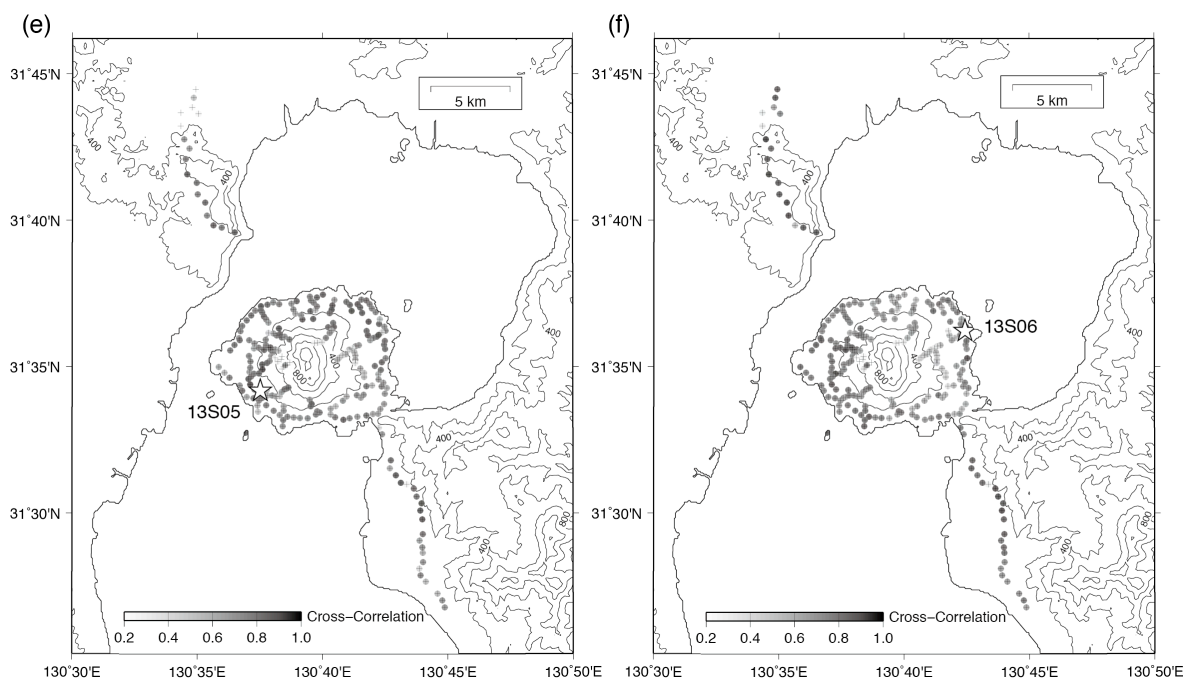


Fig. 4 Continued.

応する．13S04に対する地震波形について説明する．桜島島内に対応する震央距離23 kmまでは初動が見られるが，震央距離が25 kmを超える始良カルデラ西側では初動が不明瞭である．桜島島内にあたる震央距離13–23 kmにて初動到達時刻の遅れが見られ，見かけ速度4 km/s程度である．これは桜島直下の深さ1–2 kmの速度3.6–3.7 km/s層（Miyamachi et al., 2013）に対応する．

Fig. 3に桜島島内の爆破点13S02, 13S03, 13S05, 13S06に対する地震波形を示す．同様に，速度5 km/sでreduceし，最大振幅で規格化してある．爆破点13S02, 13S05, 13S06について震央距離が4 kmまで見かけ速度が遅く2–3 km/sであり，桜島島内の深さ1 kmまでの地震波速度1.5–2.8 km/s（Miyamachi et al., 2013）を反映している．一方，爆破点13S03の震央距離2–9 kmにおいては見かけ速度の遅れがないトレースと，遅れが見えるトレースがある．前者は大隅半島側の観測点に対応し，後者は桜島島内の観測点に対応している．このような分離は爆破点13S06の震央距離5–10 kmの波形にも見られ，同様に大隅半島側と島内の観測点に対応している．爆破点13S02, 13S03, 13S05, 13S06の震央距離10 km以上は桜島島外であり，初動の到達時刻の遅れは見られない．

4. 相互相関解析

2008年探査と2013年探査の間の5年間に於いて，構造の変化があるならば地震波形の変化に現れるはずである．そこで，2013年探査と2008年探査の爆破地震波形の比較を行った．そのために，初動を含む15

秒間の時間窓にて2008年探査と2013年探査の薬量の大きい6爆破点地震波形の相互相関係数を計算した．本測線観測点の設置ランク●と○の253点のうち，2008年探査か2013年探査において地震計の不具合があったもしくはノイズレベルが高い16点を除く237点と，定常観測点8点の波形データを用い，2–8 Hzのバンドパスフィルターを施したのちに相互相関係数を計算した．なお，2013年探査の本測線観測点のデータのサンプリング間隔を4 msにリサンプリングした．Fig. 4に6爆破点による地震波形の相互相関係数を観測点毎に示した．2008年探査と2013年探査において爆破点位置が水平距離204 m差がある13S03 (08S03)を除けば，過半数の観測点において相関係数は0.7以上と高く，島外の爆破である13S01と13S04では0.9以上と非常に高い観測点が多い．例えば，Fig. 5aに示す爆破点13S01の大隅半島側の観測点の波形の比較から，初動から後続相まで波形が合っていることが分かる．ただし，13S04について始良市側（始良カルデラ西縁周辺）では地震波形のSNが悪い（Fig. 2b），相関係数は0.5以下と小さい．各爆破点について共通なのは，桜島山頂から半径3 km内と桜島南東部にある観測点について相関係数が0.3–0.6と低いことである．これら領域において比較的浅部の構造が時間変化していることが示唆されるが，昭和火口から近い観測点においては火山性微動の影響について評価する必要がある．例えば，Fig. 5bに示す爆破点13S01に対する桜島南西部の観測点の波形を見ると，爆破地震の初動より前に震動が見られる．該当の観測点は昭和火口から2 km程度のところにあり，火山性微動の震動を拾っている可能性が高い．

5. 噴火に伴う地震動

前述の通り2013年探査では爆破実施時間を含む夜間9時間（12月4日21時～5日6時）の連続収録を行った。この時間内の12月4日21時33分頃から爆発的噴火に伴う地震動を観測した。Fig. 6に噴火に伴う地震動の波形記録を示す。波形は昭和火口からの水平距離順に表示してある。昭和火口から6 kmの範囲内にてSN良く観測されていることが分かる。

6. おわりに

2013年12月1日～7日に桜島と始良カルデラにおいて人工地震探査を実施した。この人工地震探査は、2008年探査との構造の時間変化検出を目的の一つとして行われた。12月5日未明に桜島島内外の11箇所にて爆破が行われ、本測線観測点266点と無人ヘリコプター設置点5点、海底地震観測点2点の合計273点の観測点にて爆破地震動が観測されデータ収録に成功した。2008年探査との波形の比較のため、爆破点と観測点の組み合わせにて相互相関係数を計算したところ、多くの観測点において0.7以上と高い値を示したが、山頂付近と桜島南西部の観測点においては

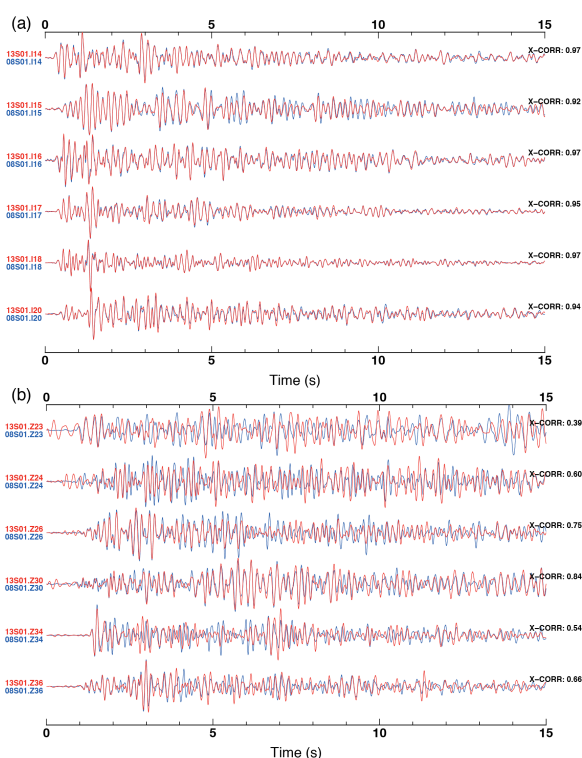


Fig. 5 Comparison with the waveforms of the shots in the 2008 and 2013 experiments. Red and blue lines show the waveforms of the shots in 2013 and 2008 experiments, respectively. The numerical value that is shown in the right side of each trace indicates the cross-correlation coefficient.

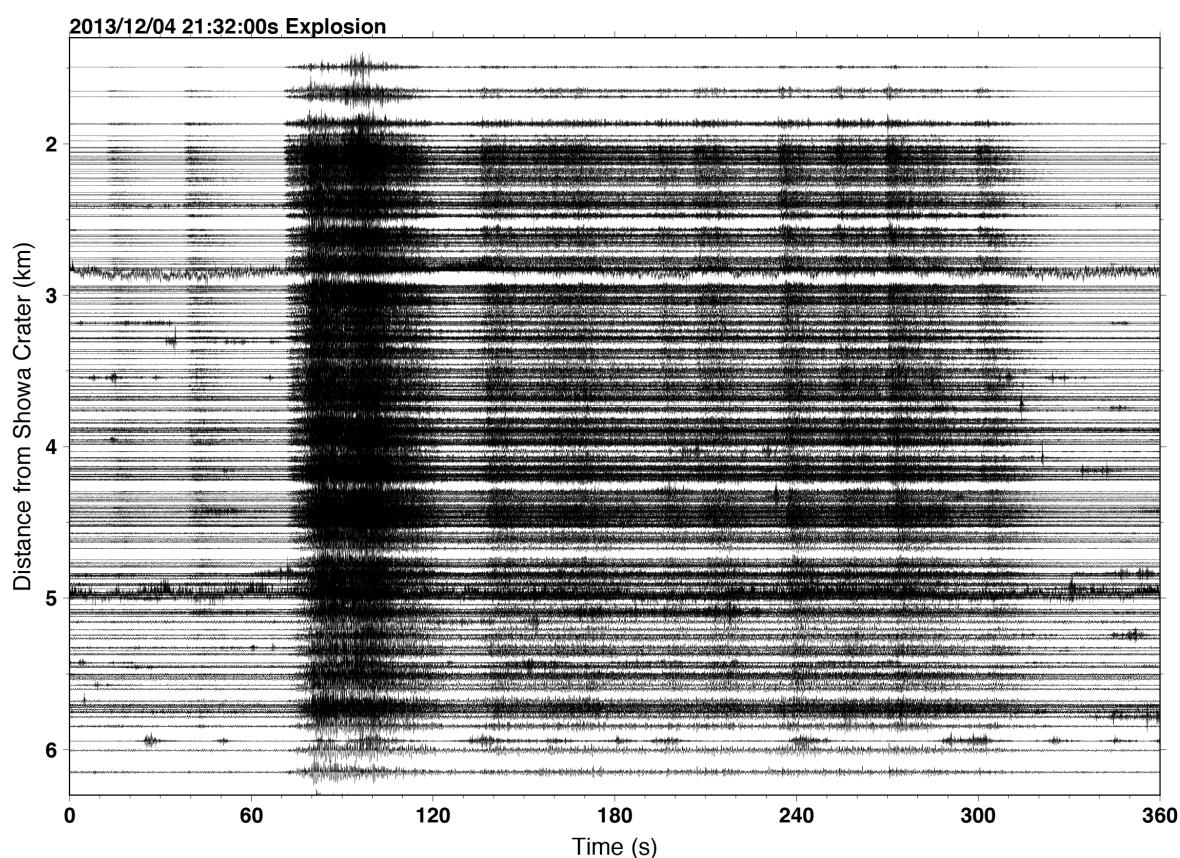


Fig. 6 Records of an explosion eruption. The traces are aligned with distance from the Showa crater. Amplitude of each trace is normalized by the maximum value.

0.3-0.6と低い値を示した。該当領域の浅部における構造の変化が示唆されるが、解釈には火山性微動の影響など考慮が必要である。夜間の9時間の連続観測時間内において噴火に伴う地震動の観測にも成功した。今後は、2008年探査との構造の時間変化検出のための各種解析が実施される予定である。また、噴火に伴う地震動の解析により、現在の昭和火口噴火プロセスの解明が進むと期待される。

謝 辞

今回の構造探査においても前回と同じく桜島住民の方々および周辺地域の皆様のご理解・ご協力によって達成することが出来ました。

鹿児島県庁、鹿児島市役所、垂水市役所、始良市役所、大隅河川国道事務所、鹿児島海上保安部、海上自衛隊鹿児島試験所、鹿児島県漁業協同組合連合会、鹿児島市漁業協同組合、西桜島漁業協同組合などの関係機関には構造探査実施にあたり土地の利用、許可関係の便宜を図っていただきました。

今回の構造探査は地震・火山噴火予知事業「地震及び火山噴火予知のための観測研究」にて防災研究所が代表となっている研究課題「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、代表：井口正人）の一環として実施されました。経費の一部は京都大学防災研究所一般共同研究「始良カルデラからのマグマ移動量の能動的検出のための基礎研究」（課題番号：24G-09、代表：筒井智樹）によりました。また、気象庁地震火山部火山課には構造探査経費の一部を負担していただきました。

構造探査において使用したデータロガーは東京大学地震研究所と防災研究所地震予知研究センターより借用して使用しました。借用にあたり片尾浩准教授にお世話になりました。

以上、ここに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.
石原和弘（1988）：地球物理学的観測による桜島火山のマグマ溜まりおよび火道の推定, 京都大学防災研究所年報, 第31号B-1, pp. 59-73.
植木真人（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.
金子隆之・大湊隆雄・小山崇夫・武尾 実・渡邊篤志・嶋野岳人・柳澤孝寿・青木陽介・安田 敦・本多嘉明（2011）：自律型無人ヘリにより撮影した新燃岳の火口およびその周辺域, 火山, 第56巻, pp. 171-173.
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.
小林哲夫・味喜大介・佐々木寿・井口正人・山元孝広・宇都浩三（2013）：桜島火山地質図（第2版）, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
須藤靖明・他89名（2002）：阿蘇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・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.
- 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.
- 山本圭吾・園田忠臣・高山鐵朗・市川信夫・大倉敬宏・横尾亮彦・吉川 慎・井上寛之・諏訪博之・松島 健・藤田詩織・神薗めぐみ (2013) : 水準測量によって測定された桜島火山周辺域の地盤上下変動-2012年11月および12月測定の結果-, 京都大学防災研究所年報, 第56号B, pp.187 -195.
- Anggono, T., Nishimura, T., Sato, H., Ueda, H. and Ukawa, M. (2012): Spatio-temporal changes in seismic velocity associated with the 2000 activity of Miyakejima volcano as inferred from cross-correlation analyses of ambient noise, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 247-248, pp. 91-107, doi:10.1016/j.volgeores.2012.08.001.
- Aramaki, S. (1984): Formation of the Aira caldera, southern Kyushu, ~22,000 years ago, *J. Geophys. Res.*, Vol. 89, pp. 8485-8501.
- Brenguier, F., Shapiro, N.M., Campillo, M., Ferrazzini, V., Duputel, Z., Countant, O., Nercessian, A. (2008): Towards forecasting volcanic eruptions using seismic noise, *Nature Geosci.*, Vol. 1, pp. 126-130, doi:10.1038/ngeo104.
- 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.
- Hidayati, S., Ishihara, K. and Iguchi, M. (2007): Volcano-tectonic earthquakes during the stage of magma accumulation at the Aira caldera, southern Kyushu, Japan, *Bull. Volcano. Soc. Japan*, Vol. 52, No. 6, pp. 289-309.
- Iguchi, M. (2013): Magma movement from the deep to shallow Sakurajima volcano as revealed by geophysical observations, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, Vol. 58, No. 1, pp. 1-18.
- Iguchi, M., Tameguri, T., Ohta, Y., Ueki, S. and Nakano, S. (2013): Characteristics of volcanic activity at Sakurajima volcano's Showa crater during the period 2006 to 2011, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, Vol. 58, No. 1, pp. 115-135.
- Kaneko, T., Koyama, T., Yasuda, A., Takeo, M., Yanagisawa, T., Kajiwar, K. and Honda, Y. (2011): Low-altitude remote sensing of volcanoes using an unmanned autonomous helicopter: an example of aeromagnetic observation at Izu-Oshima volcano, Japan, *Int. J. Remote. Sensing*, Vol. 32, pp. 1491-1504.
- Miyamachi, H., Tomari, C., Yakiwara, H., Iguchi, M., Tameguri, T., Yamamoto, K., Ohkura, T., Ando, T., Onishi, K., Shimizu, H., Yamashita, Y., Nakamichi, H., Yamawaki, T., Oikawa, J., Ueki, S., Tsutsui, T., Mori, H., Nishida, M., Hiramatsu, H., Koeda, T., Masuda, Y., Katou, K., Hatakeyama, K. and Kobayashi, T. (2013): Shallow velocity structure beneath the Aira caldera and Sakurajima volcano as inferred from refraction analysis of the seismic experiment in 2008, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, Vol. 58, No. 1, pp. 227-237.
- Mogi, K. (1958): Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformation of the ground surface around them, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Vol. 36, pp. 99-134.
- Nishimura, T., Tanaka, S., Yamawaki, T., Yamamoto, H., Sano, T., Sato, M., Nakahara, H., Uchida, N., Hori, S. and Sato, H. (2005): Temporal changes in seismic velocity of the crust around Iwate volcano, Japan, as inferred from analyses of repeated active seismic experiment data from 1988 to 2003, *Earth Planets Space*, Vol. 57, pp. 491-505.
- 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.
- Patanè, D., Barberi, G., Cocina, O., De Gori, P. and Chiarabba, C. (2006): Time-resolved seismic

- tomography detects magma intrusions at Mount Etna, Science, Vol. 313, pp. 821-823, doi:10.1126/science.1127724.
- 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. Volcano. Soc. Japan, Vol. 58, No. 1, pp. 239-250.
- Yamamoto, K., Sonoda, T., Takayama, T., Ichikawa, N., Ohkura, T., Yoshikawa, S., Inoue, H., Matsushima, T., Uchida, K. and Nakamoto, M. (2013): Vertical ground deformation associated with the volcanic activity of Sakurajima volcano, Japan during 1996-2010 as revealed by repeated precise leveling surveys, Bull. Volcanol. Soc. Japan, Vol. 58, No. 1, pp. 137-151.
- Yamawaki, T., Tanaka, S., Ueki, S., Hamaguchi, H., Nakamichi, H., Nishimura, T., Oikawa, J., Tsutsui, T., Nishi, K., Shimizu, H., Yamaguchi, S., Miyamachi, H., Yamasato, H. and Hayashi, Y. (2004): Three-dimensional P-wave velocity structure of Bandai volcano in northeastern Japan inferred from active seismic survey, J. Volcanol. Geotherm. Res., Vol. 138, pp. 267-282.
- Yokoyama, I. (1971): A model for the crustal deformations around volcanoes, J. Phys. Earth, Vol. 19, pp. 199-207.
- Yokoyama, I. and Ohkawa, S. (1986): The subsurface structure of the Aira caldera and its vicinity in southern Kyushu, Japan, J. Volcanol. Geotherm. Res., Vol. 30, pp. 253-282.

(論文受理日 : 2014年6月11日)