

桜島火山における反復地震探査（一回目）

筒井智樹^{*}・井口正人・為栗 健・上田義浩^{**}・大島弘光^{***}・植木貞人^{****}・
大湊隆雄^{*****}・及川 純^{*****}・市原美恵^{*****}・野上健治^{*****}・中道治久^{*****}・
大倉敬宏^{*****}・清水 洋^{*****}・宮町宏樹^{*****}・八木原 寛^{*****}・
前川徳光^{***}・堀川信一郎^{*****}・吉川 慎^{*****}・園田忠臣・平野舟一郎^{*****}・
末峯宏一^{**}・林 幹太^{**}・加藤幸司^{**}・長尾 潤^{**}・池亀孝光^{**}・
松末伸一^{**}・五藤大仁^{**}・河野太亮^{**}・築田高広^{****}・田中窓香^{****}・
渡辺竜一^{*}・長岡優^{*****}・前原祐樹^{*****}(現在^{*****})・吉田沙由美^{*****}・
小林由実^{*****}・栢橋志郎^{*****}

^{*} 秋田大学工学資源学部

^{**} 気象庁

^{***} 北海道大学大学院理学研究科，

^{****} 東北大学大学院理学研究科，

^{*****} 東京大学地震研究所，

^{*****} 東京工業大学火山流体研究センター，

^{*****} 名古屋大学大学院環境学研究科，

^{*****} 京都大学大学院理学研究科，

^{*****} 九州大学大学院理学府，

^{*****} 鹿児島大学理学部，

要 旨

鹿児島県桜島火山において火山活動にともなう構造変化の検出を目的とした反復地震探査を行った。桜島火山は 2009 年 10 月以降、噴火活動が昭和火口において活発化している。このような火山活動の推移を背景に 2008 年探査測線の一部を再現して人工地震探査を行った。地震探査測線は 15 点の発破点と 263 点の臨時観測点で構成された。このうち再現された測線は 7 点の再現発破点と 219 点の再現臨時観測点で構成された。測線の再現にあたり、火山地帯特有の困難に直面したが 202 点が同一点への再設置に成功した。同じ薬量の以前の観測と比較すると、今回の発破では 0.6 から 2.9 倍の最大振幅の記録が得られた。今回得られた記録では目立った初動走時の変化は認められないが、北東部における観測記録の一部の後続相の出現様式に系統的な変化が認められる。したがって桜島火山の活動にともなう構造変化の検出につながるデータであることが期待される。

キーワード： 桜島火山，人工地震探査，構造変化

1. はじめに

火山とその周辺の地下における物質の移動を知ること、火山活動を定量的に理解するために重要な事である。1994 年に火山噴火予知計画の一環として始められた火山体構造探査計画によって人工地震探査が推進され、これまでに日本国内の主要な活火山の内部構

造が明らかにされてきた。これまでのとりくみでは地震波速度構造などの静的な構造の解明に焦点があてられていた。火山噴火予知の精度を高めるためには、火山内部の物質の移動に伴う構造変化をとらえることによって火山活動に関与する物質の総量や移動速度を直接把握することが鍵である。今後、火山内部における物質の移動を直接監視する方法の確立に向けた取り組

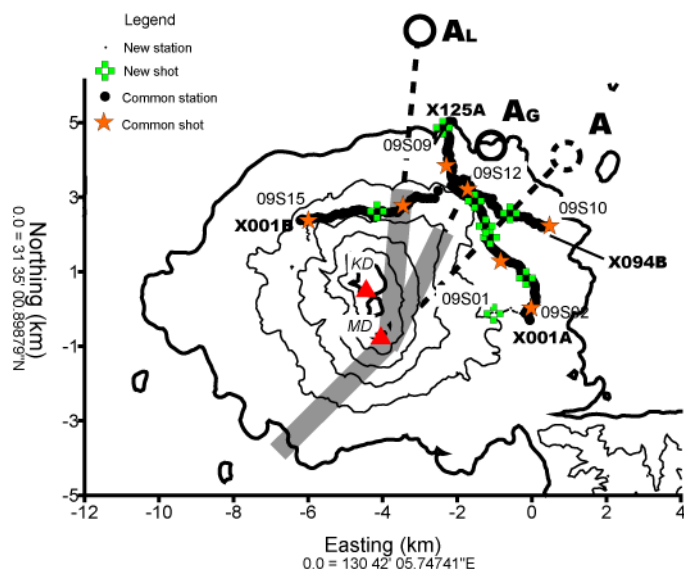


Fig. 1 The 2009 seismic lines. Topography is described by the contour of a 200-m interstice. Asterisks and the block marks show shot points, and black dots show temporal stations. The symbols AL, AG, and A show the pressure sources after Hidayati et al. (2007). The dashed lines and the thick gray lines which were drawn from these sources show the magma supply way expected. KD: Kita-dake and MD: Minami-dake.

みが必要であると考えられる。

地球内部の活動による構造変化の検出の試みは古くからなされてきた（例えば、地質調査所, 1971; 地質調査所, 1975; 地質調査所, 1988 など）。最近では内田ら (2002) や Nishimura et al. (2005) が岩手火山周辺におけるくりかえし人工地震実験によって火山活動にともなう地震波速度変化を議論したほか、また Duputel et al. (2009) が地震波干渉法を雑微動に適用して Piton de la Fournaise 火山の活動にともなう地震波速度変化を議論している。

本研究の最大の特徴は、後続相の変化に注目し反射法地震探査をベースとして構造変化の議論を行うことである。一般に地下におけるマグマの移動に関与する領域はごく狭いものであると考えられる。したがって、地下において物質の置き換えにともなう地震波速度や弾性インピーダンスなどの地震学的特性の変化も小さな領域であることが予想される。このような小さな領域のインピーダンス変化をとらえるためには、反射波を用いることが最適であると考えた。反射法地震探査をベースとした手法を用いて地熱流体の移動にともなう地下構造の時間変化を議論したものに、Matsushima et al. (2004) がある。

桜島火山は後続相に注目した構造変化の研究を行う目的に最適であると考えられる。桜島火山では 1950 年代以降 1990 年代まで山頂火口における爆発活動が

継続していたが、2006 年 6 月 4 日に東山腹の昭和火口が活動を再開して以降、山腹火口からの噴火が徐々に活発化している（井口ら, 2008）。さらに、より長い時間スケールで見ると、1993 年以降桜島の北方にある始良カルデラの中央部に推定される圧力源の増圧が継続中であることから、今後桜島の火山活動がより高いレベルに移行する可能性が指摘されている（井口ら, 2008）。また、2008 年には井口ら (2009) による人工地震探査（以下、これを 2008 年観測と称する）が行われ、桜島火山およびその周辺における地下構造の解明への取り組みが行われており、比較の対象となるデータも充実してきている。このように桜島は地下におけるマグマの移動が確実であり、マグマの移動に伴う地下構造変化の検出を行うフィールドとして最適なのである。

本稿で述べる 2009 年探査が行われた時期は 2009 年 10 月に始まる爆発回数増加の途上の時期であり、桜島北東部を横断する基線の伸張が加速するとともに毎月おおむね 14 万 t ずつ火山灰噴出量が増加していた時期であった（気象庁, 2010）。2009 年地震探査は上で述べた火山活動の流れの中の一瞬の地下構造を切り取るものである。この観測記録は井口ら (2009) の観測記録とともに、今後実施される予定の探査記録と併せて、桜島火山内部の微速度撮影映像を構成することになるであろう。

Table 1. Shot-point location and the shot times. Altitude denotes the height of a charge head.

2009 shot point	Latitude (WGS84)			Longitude (WGS84)			Altitude (m)	Shot time	2008 shot	Difference from 2008's shot	
	Deg	Min	Sec	Deg	Min	Sec				Northin g	Easting (m)
09S01	31	34	56.66225	130	41	26.955	133.4	2009/12/10 02:27:00.888	-	-	-
09S02	31	35	1.63357	130	42	5.0941	58.8	2009/12/10 01:07:00.768	08S09	5	1.1
09S03	31	35	27.79292	130	41	59.8032	81.33	2009/12/10 02:17:00.423	-	-	-
09S04	31	35	42.4545	130	41	34.0548	94.65	2009/12/10 01:17:00.605	08S10	-0.7	-1.4
09S05	31	36	3.35389	130	41	23.0585	115.7	2009/12/10 00:17:00.539	-	-	-
09S06	31	36	13.05444	130	41	18.6362	128.51	2009/12/10 02:12:00.503	-	-	-
09S07	31	36	34.72538	130	41	7.6828	141.6	2009/12/10 01:12:00.561	-	-	-
09S08	31	37	5.59099	130	40	38.693	83.85	2009/12/10 00:07:00.434	08S12	-2.1	-0.4
09S09	31	37	38.66055	130	40	35.1723	25.9	2009/12/10 01:27:00.612	-	-	-
09S10	31	36	13.09329	130	42	23.7744	28.97	2009/12/10 00:27:00.675	08S06	-3.9	2.2
09S11	31	36	24.25932	130	41	43.5835	83.18	2009/12/10 02:07:00.745	-	-	-
09S12	31	36	44.89158	130	41	0.3721	136.65	2009/12/10 00:12:00.553	08S11	2.2	-1.3
09S13	31	36	30.82384	130	39	54.5606	307.32	2009/12/10 00:22:01.522	08S13	-4.5	7.1
09S14	31	36	25.82365	130	39	28.079	320.05	2009/12/10 01:22:01.717	-	-	-
09S15	31	36	17.80699	130	38	18.1595	360.55	2009/12/10 02:22:01.574	08S15	-2	-1.4

2. 観測

2009 年人工地震探査（以下、2009 年観測と称する）は 2009 年 12 月 7 日～12 月 12 日の 6 日間に 35 名の参加を得て実施された。測線は 15 点の発破点を含み、265 点の観測点が展開された。これを 2009 年測線と称する。

2009 年測線のうち 219 点は 2008 年観測測線（井口ら、2009）の一部である 2 本の反射法測線を再現するように展開された。以下ではこれを再現測線と呼ぶことにする。再現測線は Hidayati et al. (2007) のマグマ供給系モデルの検証を目的として、桜島北東部で交差する Line NS と Line EW の 2 本が設定された。さらに 46 点は新設観測点として 2008 年観測記録（井口ら、2009）の特徴を考慮して設けられた。

2009 年観測でも 2008 年観測と同様に白山工業製小型データロガー LS8200SD（蔵下ら、2006）と 4.5Hz 上下動地震計で構成された 1 成分観測臨時観測点を測線全体に展開した。データ収録は分解能 24bit、サンプリング周期 2ms で、2009 年 12 月 9 日 21:00～翌 10 日 06:00 頃までの期間の連続記録を行った。臨時観測点の測位は GPS 受信器（ライカ社製 SR530）を用いて島内の常設 GPS 観測点を基準点としたクイック・スタティック法を行った。すべての観測点位置を Fig. 1 に図示し、座標を Appendix 1 に表として示す。

再現測線は X001A～X125A および X192A からなる Line NS と、X001B～X094B および X101B からなる Line EW から構成された。このほかに黒神アレイ KAR1 および KAR3～KAR8 も再現された。

再現観測では観測点の正確な再現が必要である。浸食や土石流の流下による地形変化に加えて、土地利用

状況の変化や、砂防・治山工事などが完全な観測点再現を妨げる。再現観測点設置作業では 2008 年観測の際に得られた観測点座標（井口ら、2009）を用いた市販のハンディ GPS によるナビゲーションに加えて、2008 年観測の際に得られた写真をもとに最終的な位置決めを行った。再現測線では再現選点ランクを定義し、個々の観測点に対して設置時に 2008 年測線の再現状況の記載を行い Appendix 1 のように表示した。

再現選点ランクは作業効率を考慮して以下のように定義された。ナビゲーションに用いた座標および写真を用いてまったく同一点に設置できた場合にはランクを◎、ナビゲーションに用いた座標から 5m 以内（自動車道路脇設置）もしくは 20m 以内（徒歩設置）の場合はランクを○とし、これらに当てはまらない場合は再現設置が不可能な新設点としてランクを N で表記した。再現測線を構成する 219 点のうち、202 点（◎137 点、○65 点）が再現に成功し、17 点は砂防または治山工事などにより再現できない点であった。

新設観測点は以下の 3 つの場所に設けられた。1) NS 測線南端付近から鍋山に向けた測線、2) 進行中の砂防工事と重複する区間における再現設置放棄区間、3) Line EW 西端付近における群列配置。1) は観測点 C001～C017 が相当し、2) は B099 および B102、B201～B207 が相当する。3) には D001～D010 が相当する。1)、3) は 2008 年観測記録を補い、人工地震波のより詳細な議論を可能とする目的で設けられ、2) は砂防工事区間によって分断される Line EW 中央部における測線の接続および 09S08 への接続を目的として設けられた。

2009 年観測の 15 カ所の発破作業は 12 月 10 日未明に行われた。2009 年に行われた発破はすべて孔長 10m の単一孔による薬量 20kg の発破であった。以

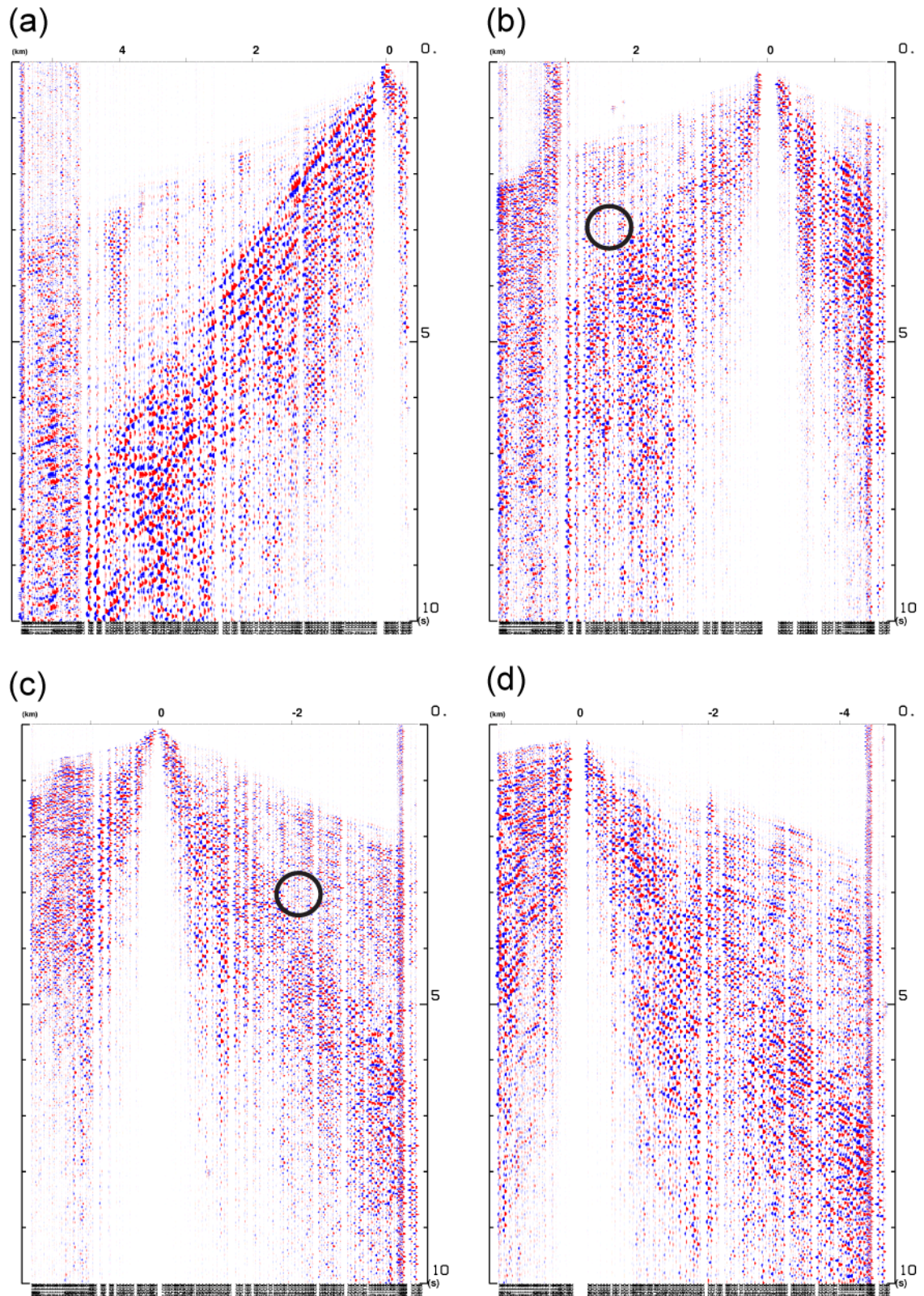


Fig. 2 The 2009 shot records along the line NS. (a) 09S02, (b) 09S04, (c) 09S12, and (d) 09S08. The left end of each plot is for the north end. The location of a shot point is shown 0 km. Each waveform has been normalized at each maximum value. Black circle shows the part which a change can be seen as compared with the last observation in 2008 (Fig. 3).

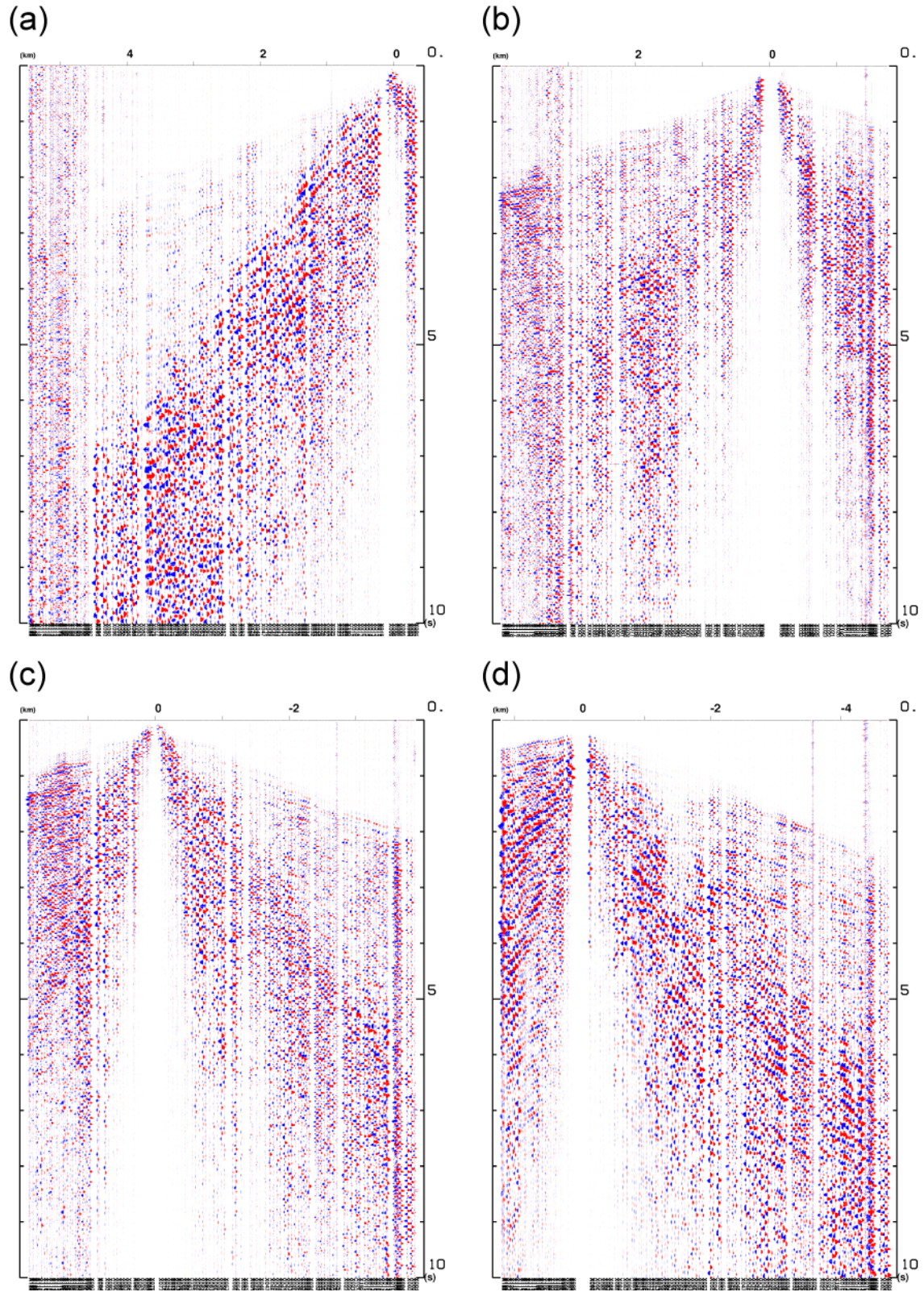


Fig. 3 The 2008 shot records along the line NS. (a)08S09, (b)08S10, (c)08S11, (d) 08S12. Plot style is the same as that of Fig. 2. After Iguchi et al. (2009).

下、本稿では区別のために通称発破点名 (Sxx) の前に西暦年号の下二桁をつけた名前と呼ぶことにする。09Sxx は 2009 年の発破を示し、08Sxx は井口ら (2009) による 2008 年の発破を示す。全 15 カ所の発破点 09S01 ~ 09S15 のうち、再現された発破点は 7 点 (09S02, 09S04, 09S08, 09S10, 09S12, 09S13, 09S15) であった。これらと井口ら (2009) の発破点はそれぞれ以下のように対応される。09S02:08S09, 09S04:08S10, 09S08:08S12, 09S10:08S06, 09S12:08S11, 09S13:08S13, 09S15:08S15 である。それぞれの再現された発破点は 2008 年のそれから 8.5m 以内の場所に設けられた。これら以外の新設発破点は 2008 年観測のデータを補い、より詳細な反射断面を得ることを目的として設置されたものである。すべての発破点位置および発破時刻を Table 1 に示す。

3. データ

再現測線 Line NS の再現発破に対応する記録を Fig. 2 に、対応する 2008 年観測のショットレコードを Fig. 3 に示す。Fig. 2(a) ~ (d) および Fig. 3(a) ~ (d) は図左端が測線北端、右端が測線南端に相当する。Fig. 2(a) は測線南端付近の発破 09S02 に対する記録を示す。09S02 南側では初動の見かけ速度が次のように分布する。震源から 0.041km 地点まで 0.59km/s, 0.041km 地点から測線南端まで 1.95km/s を示す。これに対して 09S02 北側では 0.29km まで 0.91km/s, 0.29km ~ 4.42km 地点までは 1.89km/s の見かけ速度分布を示す。09S02 の記録には初動の他に見かけ速度が遅い顕著な相が現れている。この相は 09S02 の北側 0.77km 以遠で顕著に表れており、その見かけ速度は 0.62km/s を示す。

発破点 09S02 は西を大正溶岩、北を昭和溶岩に囲まれた軽石質砂層の上に位置する (福山・小野, 1981)。この軽石質砂層は昭和溶岩および大正溶岩の下にも分布すると考えられる。したがって、09S02 の周辺で現れる 0.59-0.62km/s の速度は軽石質砂層の速度と考えられる。

Fig. 2(b) は発破 09S04 に対する記録を示す。09S04 南側では震源より 0.29km 地点まで 1.44km/s の見かけ速度を示し、0.29km から 1.7km 地点までは 1.74km/s の見かけ速度を示す。これに対して 09S04 北側では 0.22km 地点まで 0.85km/s, 1.76km 地点までは 2.14km/s の見かけ速度を示す。1.76km 地点では約 0.1 秒走時が遅れる初動走時のギャップが見受けられ、これ以遠では 2.12km まで 3.4km/s, 3.0km 地点までは 2.70km/s の見かけ速度を示す。

福山・小野 (1981) によると 09S04 は文明溶岩南縁に隣接する昭和溶岩上に堆積した砂礫層上で発破作業が行われていた。このことから、南側で観測される

1.44km/s は昭和溶岩最上部の速度に対応し、北側で観測される 2.14km/s は文明溶岩最上部の速度に対応すると考えられる。また、0.85km/s の速度は昭和溶岩上の砂礫層に対応すると考えられる。

Fig. 2(c) は発破 09S12 に対する再現測線 Line NS 上の記録を示す。09S12 南側では 0.33km 地点まで 1.12km/s を、1.36km 地点までは 4.46km/s を示す。1.36km 地点には走時のギャップが存在し、約 0.2 秒の走時遅れが現れる。この地点から 3.0km 地点までは 1.94km/s の見かけ速度が現れている。これに対して 09S12 北側では 0.47km 地点まで 1.37km/s の見かけ速度を、さらに 8km まで 4.43km/s の見かけ速度を示す。

09S12 は福山・小野 (1981) によると安永溶岩上に位置する。1.12-1.37km/s は安永溶岩最上部の速度を示し、4.43-4.46km/s は安永溶岩中央部の緻密な部分あるいは地下水で飽和した部分の速度を示していると考えられる。

Fig. 2(d) は測線北端部の発破 09S08 の記録を示す。09S08 南側では 1.9km 地点と 3.02km 地点と 2ヶ所の走時ギャップがあらわれる。初動走時は震源から 0.13km 地点までは 0.61km/s の見かけ速度があらわれ、0.13km ~ 1.81km 地点まででは 3.01km/s の見かけ速度を示す。1.9km までの間は初動が不明瞭になるギャップであるが、1.92km ~ 3.02km までの区間では 2.24km/s の見かけ速度を示す。3.02km 地点では約 0.2 秒走時が遅くなり、これ以遠では 4.34km まで 1.90km/s の見かけ速度を、4.72km までは ∞ の見かけ速度を示す。これに対して 09S08 北側では比較的単純な初動走時を示し、初動は 0.14km 地点まで 0.62km/s, 0.42km までは 5.78km/s, 1.19km までは 2.54km/s の見かけ速度を示す。

09S08 は福山・小野 (1981) によると割石崎溶岩と安永溶岩とにはさまれた遊砂池で発破作業が行われた。09S08 周辺で観測される 0.61-0.62km/s は遊砂池およびその周辺の軽石質砂層の速度と考えられる。09S08 南側で観測される 3.01km/s は安永溶岩の速度を、それ以遠で観測される 2.24km/s は北岳噴出物 (K7) の速度に相当すると考えられる。09S08 北側で観測される 2.54, 5.58km/s は割石崎溶岩の速度と考えられ、とくに後者は地下水で飽和した部分の可能性が高いと考えられる。

以上が 2009 年観測で得られた Line NS 観測記録の特徴である。2009 年観測の初動走時には Fig. 3 に示される 2008 年観測のそれとの顕著な相違は見られない。

さらに Line EW の再現発破に対応する記録を Fig. 4 に、対応する 2008 年観測のショットレコードを Fig. 5 に示す。Fig. 4 および Fig. 5 はともに図の左端が西側、右端が東側に対応する。Fig. 4(a) は東端の発破 09S10 に対する記録を示す。発破 09S10 に対する走時は複雑

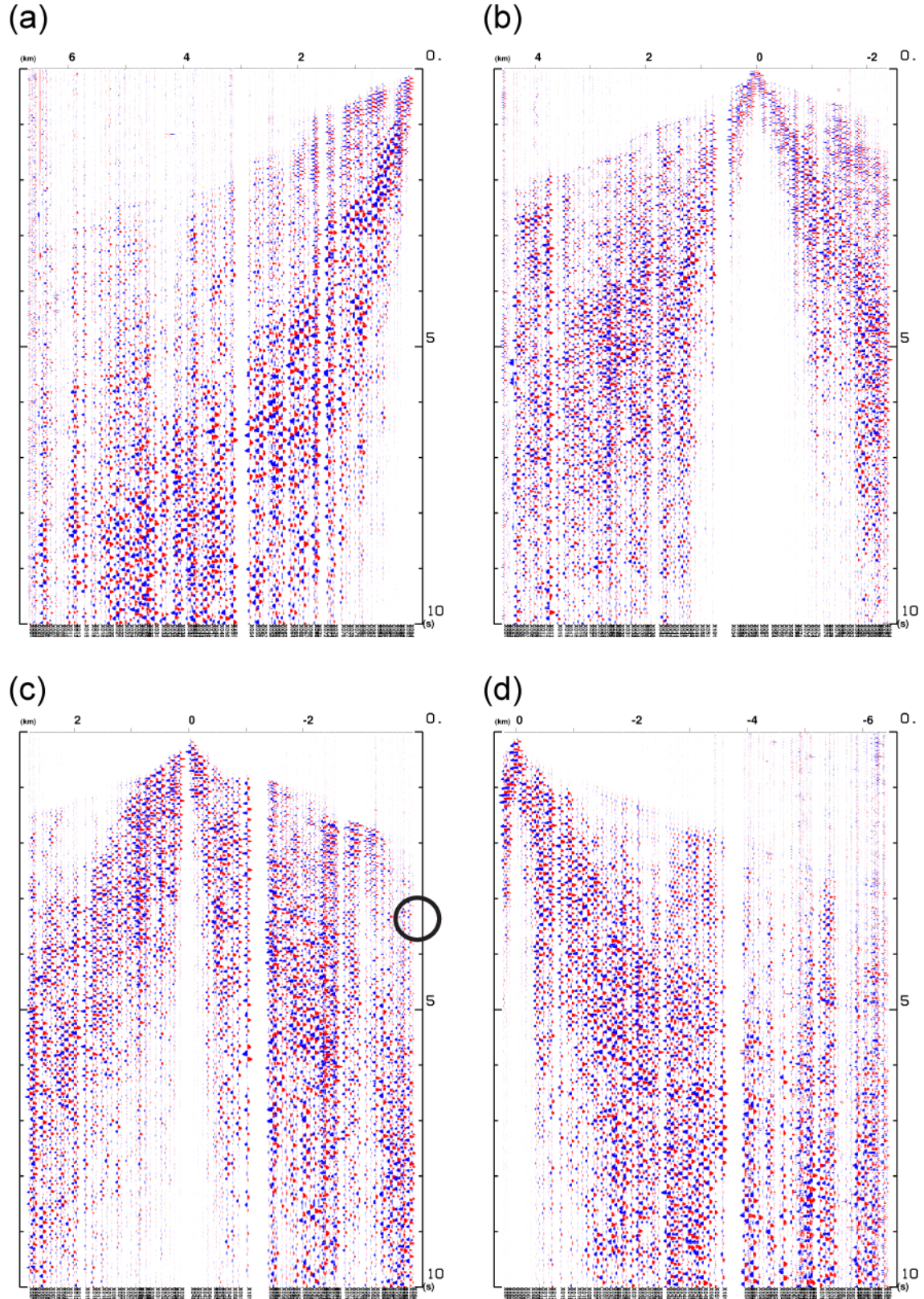


Fig. 4 The 2009 shot records along the line EW. (a) 09S10, (b) 09S12, (c) 09S13, (d) 09S15. The left end of each plot is the west end. The location of a shot point is shown 0 km. Each trace has been normalized at each maximum value. The black circle shows the part which a change can be seen as compared with the last observation.

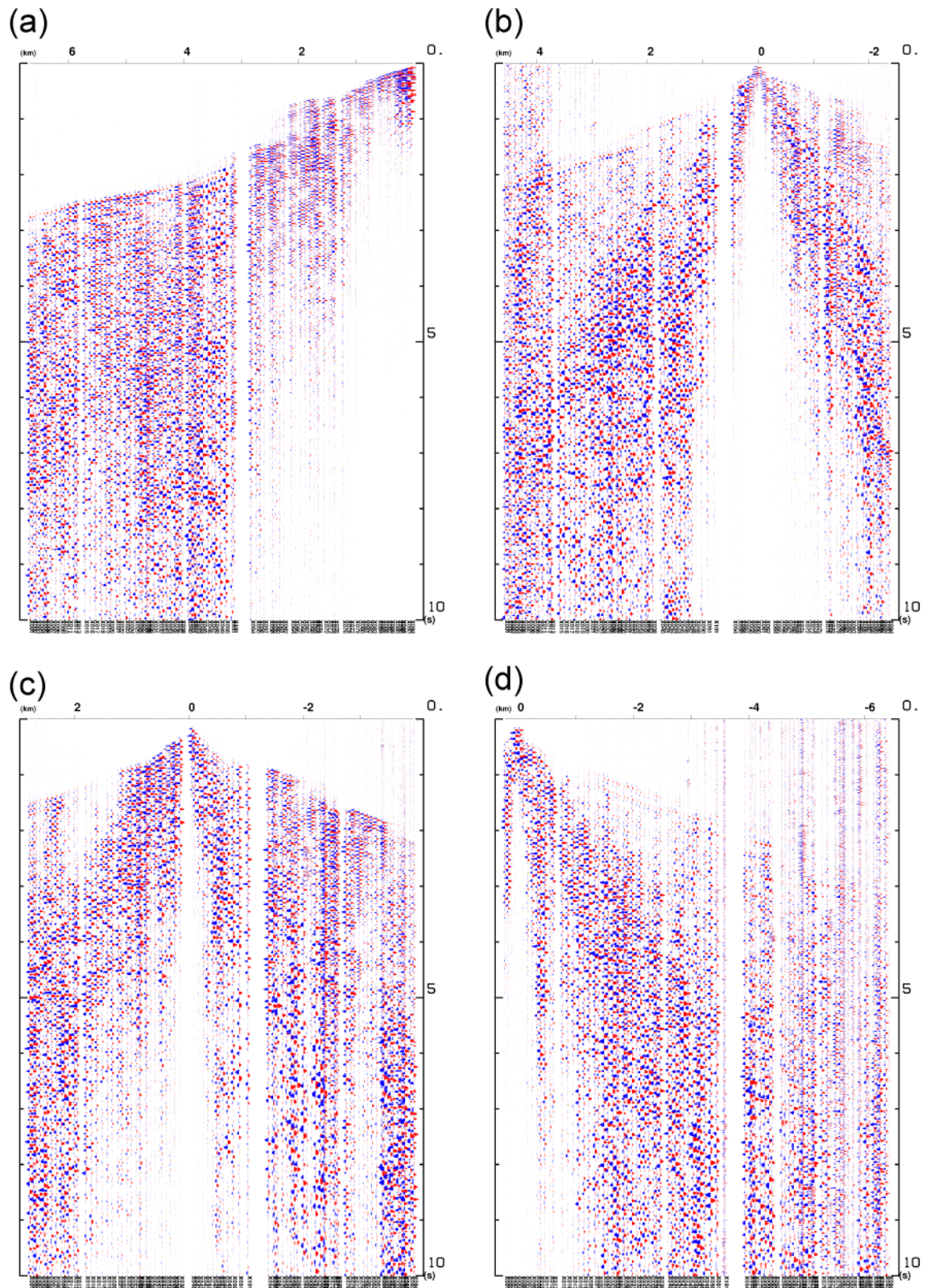


Fig. 5 The 2008 shot record of the linr EW. (a) 08S06, (b)08S11, (c)08S13, (d)08S15. The display style of the panels is the same as that of Fig. 4. After Iguchi et al.(2009).

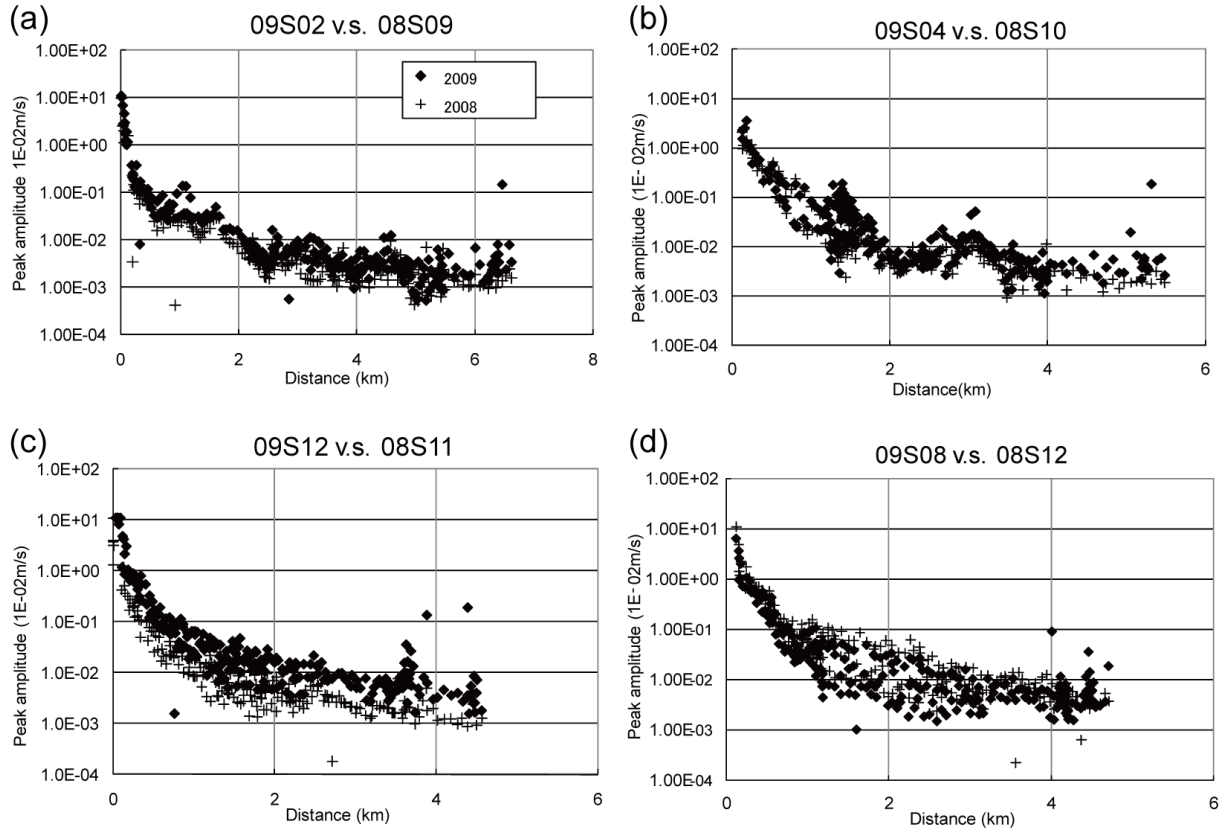


Fig. 6 Peak-amplitude distributions in the line NS. (a) 09S02 and 08S09, (b) 09S04 and 08S10, (c) 09S12 and 08S11, (d) 09S08 and 08S12. A vertical axis shows the logarithm of a peak amplitude and a transverse shows hypocentral distance. Cross symbols are 2008's amplitudes and solid diamonds are 2009's amplitudes.

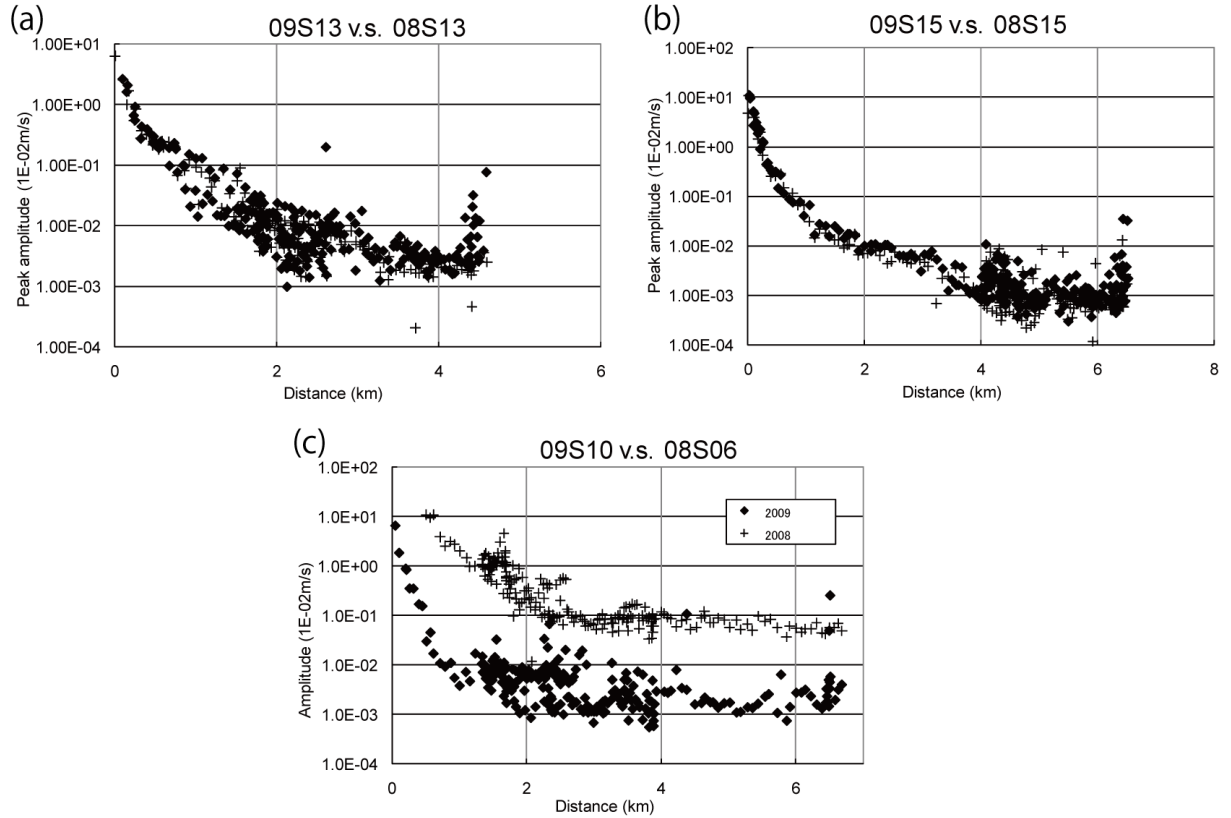


Fig. 7 Peak-amplitude distribution in the line EW. (a) 09S13 and 08S13, (b) 09S15 and 08S15, (c) 09S10 and 08S06. The style is the same as Fig. 6.

な様相を呈しており、震源から 0.94km までは 3.0km/s の見かけ速度を示した後、1.31km 地点まで 1.49km/s を示す。さらに 2.0km まで 9.93km/s という大きな見かけ速度を示した後、2.92km 地点までは 2.61km/s、4.57km 地点までは 1.4km/s、測線西端まで 4.95km/s の見かけ速度を示す。

09S10 は福山・小野 (1981) によると文明溶岩上に位置している。09S10 近傍の 3.0km/s、それより遠方の 1.49km/s は文明溶岩に対応すると考えられる。また、09S12 周辺で観測された 2.64km/s は安永溶岩の速度と考えられる。

Fig. 4(b) は発破 09S12 に対して Line EW 上で得られた記録を示す。09S12 東側の初動は 0.19km まで 1.12km/s を示し、測線東端まで 2.89km/s の見かけ速度を示す。これに対して初動は 09S12 西側では 1.51km 地点まで 1.81km/s を示し、3.07km 地点まで 2.35km/s を、測線西端の 3.94km 地点までは 4.41km/s の見かけ速度を示す。

南北測線における記述と同様に福山・小野 (1981) によれば 09S12 東側の 1.12km/s は安永溶岩最表層部の速度を示していると考えられ、それ以东の 2.89km/s は安永溶岩に対応した速度と考えられる。また、09S12 西側では 1.81km/s は安永溶岩上部に、2.35km/s

はその下位の北岳 K6 溶岩に相当する速度であると考えられる。

Fig. 4(c) は発破 09S13 に対する記録を示す。09S13 東側の初動は 0.88km ~ 2.3km 地点まで 4.07km/s の見かけ速度を示した後、2.3km ~ 2.6km で不明瞭になる。2.65km ~ 測線東端までは 2.02km/s の見かけ速度を示す。これに対して 09S13 西側の初動は 0.06 ~ 0.23km 地点までは 1.26km/s の、0.44km 地点までは 1.14km/s、1.55km 地点までは 2.27km/s、これ以降測線西端まで 3.39km/s の見かけ速度を示す。

発破 09S13 は福山・小野 (1981) によれば北岳 K6 溶岩上の西寄りに位置する。09S13 東側で観測される 4.07km/s は北岳 K6 溶岩に対応する速度と考えられるのに対して、09S13 西側には軽石質砂層が地表に分布しており 1.26-1.14km/s はこの軽石質砂層の下部に対応すると考えられる。

Fig. 4(d) は測線最西端の発破 09S15 に対する記録を示す。09S15 東側の初動は比較的単純な様相を呈している。0.34km 地点までの初動は 0.74km/s の見かけ速度を示し、4.43km 地点までの初動は 2.54km/s の見かけ速度を示す。これに対して 09S15 西側では 0.03km 地点まで 0.29km/s の見かけ速度を、0.22km までは 1.06km/s の見かけ速度を示す。発破点 09S15 は桜島火

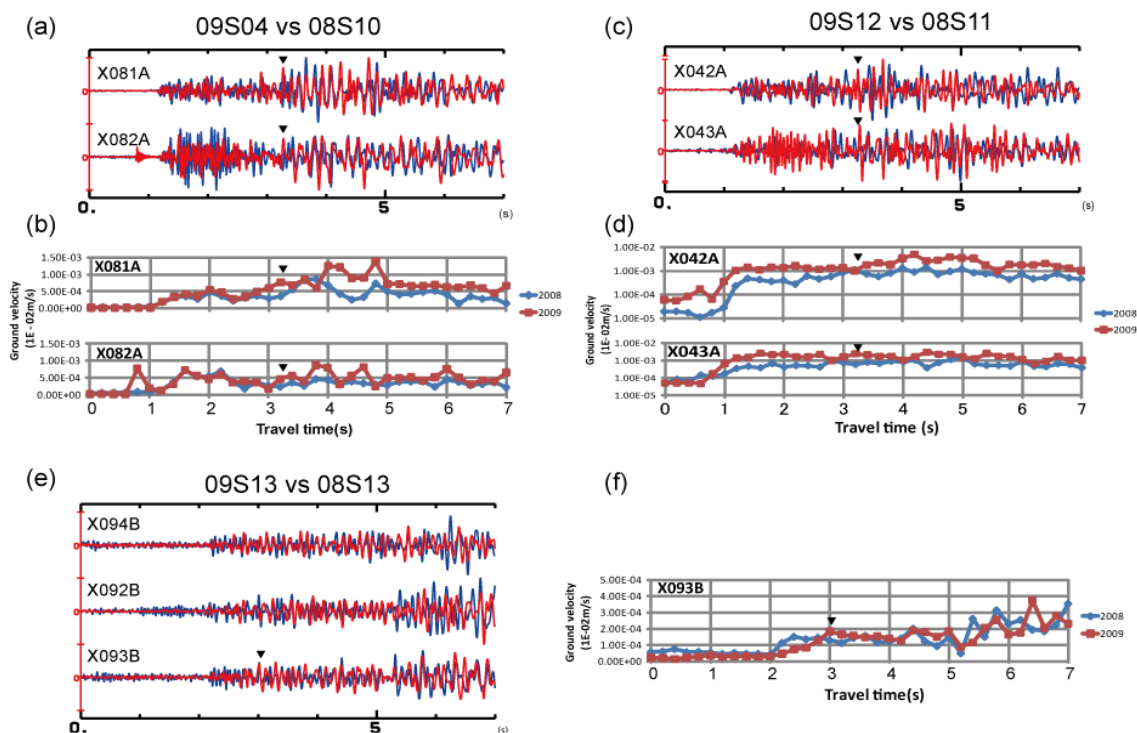


Fig. 8 Examples of traces and their instantaneous rms amplitude (gate width: 0.2 s). The markers point remarkable waveform changes are observed against the previous observation. Amplitude of the waveforms have been normalized for its maximum amplitude. (a) Records at the stations X081A, X082A for the shots 09S04 and 08S10. (b) Instantaneous rms amplitude distribution of (a). (c) Records at the stations X042A, and X043A for the shots 09S12 and 08S11. (d) Instantaneous rms amplitude. A logarithmic vertical axis is applied only in this plot. (e) Records at the stations X092B, X093B, and X094B for the shots 09S13 and 08S13. (f) Instantaneous rms amplitude of X093B.

山北岳北西斜面に位置する北岳 K4 溶岩上に位置しているが、北岳 K4 溶岩は厚く軽石質の砂に覆われており、09S15 周辺の $0.29 \sim 0.74 \text{ km/s}$ は K4 溶岩表面を覆う軽石質砂層の速度を反映していると考えられる。

以上が 2009 年の観測で得られた記録の特徴である。南北測線の例と同様に、Line EW における初動走時には Fig. 5 に示される 2008 年観測記録との顕著な差は見られない。

本観測によって反復測線上で得られた観測波形の最大振幅の分布を、2008 年観測のそれとともに Fig. 6, 7 に示す。すべてが同方式、同薬量で実施された 2009 年発破だけを取り出してみると、発震の強さは互いにほぼ同じであったと考えられる。2008 年観測で行われた同薬量の発破 (08S09, 08S10, 08S11, 08S12, 08S13, 08S15) に対して、2009 年の発破では 0.6 倍～2.9 倍の振幅が得られた (Fig. 6(a)～(d), Fig. 7(a)～(b))。もともと爆薬震源は波形の再現性が高くないことに加えて、先述のように発破方式および薬頭深度が異なるなどの条件の差異も重なって、2009 年の観測記録と 2008 年のそれとの間にこのような振幅差が発生したと考えられる。観測される人工地震波の振幅が発破薬量におおむね依存するのは自明であるが、発破 09S10 で観測された最大振幅は、その 10 倍の薬量で実施された 08S06 の 0.17 倍であった (Fig. 7(c))。

4. 人工地震波形の変化

Fig. 2 および Fig. 3 の各図の対応するものを比較すると、後続相部分に若干の変化が見いだせるものが 2 つある。Fig. 2(b) と Fig. 2(c) でマーカーがつけられている箇所である。Fig. 2(b) は、2008 年に同じ地点から発震した記録 Fig. 3(b) と比較して、往復走時 3 秒付近にある見かけ速度の高い位相の振幅が大きくなっている。Fig. 2(c) のマーカーがつけられている場所も、2008 年に同一地点で発震した記録 Fig. 3(c) に比べて見かけ速度の高い位相の振幅が大きくなっている。Line EW における記録 Fig. 4(c) も、それに対応する Fig. 5(c) の同部分で見かけ速度の高い位相が大きくなる傾向にある。マーカーがつけられている箇所の観測点のうち、再現選点ランクが◎であるものを優先的に選び出して波形を拡大した図が Fig. 8 である。2009 年記録では往復走時 3 秒付近で、対応する 2008 年記録に見いだせない位相が現れている。

なお、単孔発破であった 2009 年の記録では見かけ速度の遅い波（表層の直達波や S 波、表面波）に相当する位相の振幅が、2008 年の記録よりも大きくなる傾向にある。これは 2008 年では分割発破点が震源アレイを構成していたために、単孔発破の場合よりも下方への地震波放射が相対的に大きかったことがその理

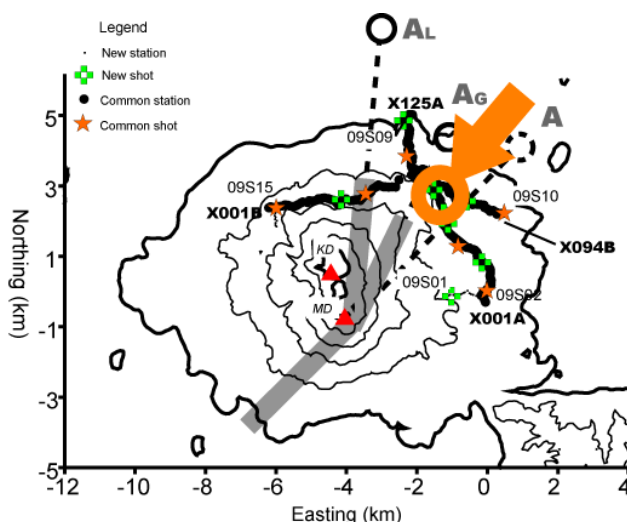


Fig. 9 Estimated position of the reflecting points that remarkable changes appeared. The plot style is the same as that in Fig.1. An orange arrow points to the occurrence zone of the remarkable enhancement in later phases around 3s.

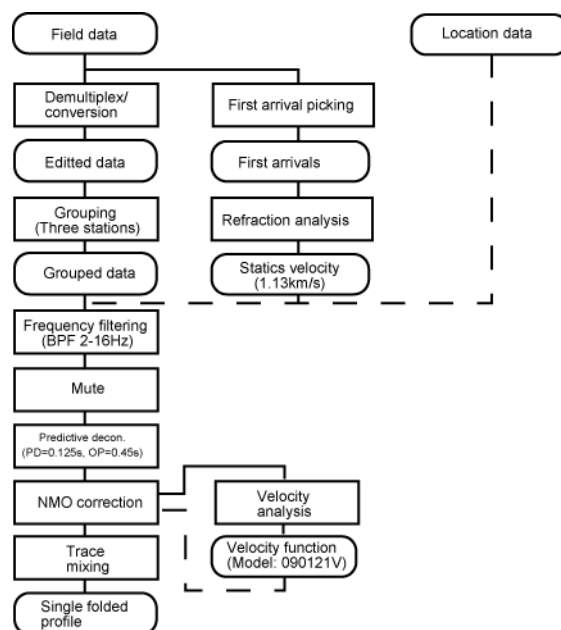


Fig. 10 Processing flow and parameter of the single-folded profiling.

由のひとつとして考えられる。

往復走時 3 秒付近の見かけ速度の高い位相を反射波であると仮定すると、その反射点は Fig. 9 中の矢印で示される一帯であると考えられる。すなわち振幅の増大が認められる記録は Line NS と Line EW の交差点付近に反射点をもつ波線によるものと考えることができる。もし反射点における反射係数の変化が原因であるとするれば、この一帯を反射点とする他の波線による記録にも後続相振幅の異常が観測されるはずである。このような条件に沿った再現測線記録を探すと、Line

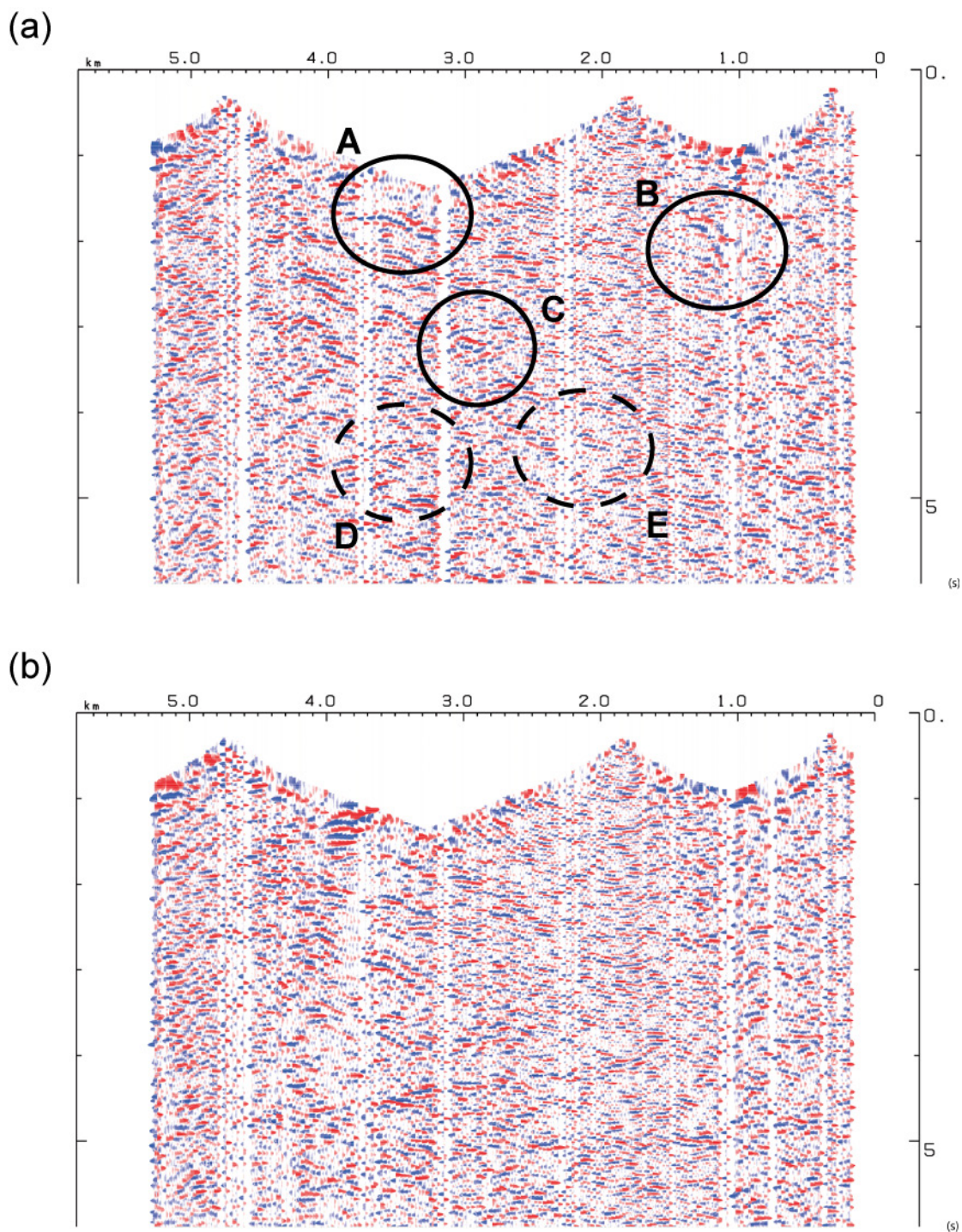


Fig. 11 The single-folded profiles (SFP) of the line NS. (a) SFP by the 2009 data. The circles A-E show the part where the remarkable change is observed. (b) SFP based on 2008 data. The cross section projected along the line which connects the stations X125A to X001A. The origin of a distance is the station X001A. A vertical axis is the normal two-way travel time from the datum. The datum is defined at 162 m in height.

NS では 09S12 に対する観測点 X042A, X043A の組み合わせ (Fig. 8(c)) と, Line EW では 09S13 に対する X092B, X093B, X094B の組み合わせ (Fig. 8(e)) を見いだすことができる。Fig. 8(c) ~ (f) では, Fig. 8(a) ほど明瞭ではないが 2009 年の記録でやはり往復走時 3 秒

付近の後続相振幅が大きくなっていることが示されている。

以上のことから, 2009 年に取得された地震探査の波形記録には, 何らかの地下における変化が記録されている可能性が高いと考えられる。

5. シングルフォールド反射断面解析

上述の波形変化によって地震反射断面に現れる変化を明示的に表示するために、2009 年観測データと 2008 年観測データの両方に Fig. 10 の手順にしたがってシングルフォールド反射法解析を施す。2009 年と 2008 年の両方のデータに対する処理パラメータは Fig. 10 中に示される同一のものを使用した。

得られたシングルフォールド断面 (SFP) を Fig. 11 に示す。Fig. 11 の横軸は観測点 X001A からの距離 (km) を示し、縦軸は基準面 (標高 162m) からの往復走時を示している。Fig. 11(a) は 2009 年データを使用し、Fig. 11(b) は 2008 年データを使用したものである。Fig. 11(a) と (b) とを比較すると、いくつかの点で様相の変化が認められる。Fig. 11 (a) では明瞭な反射波の振幅増加が、3.2 ~ 3.7km 地点の 1.8 秒付近 (A)、1.2km 地点の 1.7 秒付近 (B)、3.0km 地点の 3 秒付近 (C) に認められる。一方、Fig. 11(a) の D および E で示される区間 2 ~ 4km では、Fig. 11(b) で見えていた 4 ~ 5 秒の部分の反射が目立たなくなっている。特に注目されるのは先述の Fig. 11(a) の C である。C は Fig. 8(a) で指摘された走時 3 秒付近の位相に相当し、NMO 補正に用いた速度を考慮すると基準面から約 3km の深さに相当する走時に現れている。また、B、C に関しては A より浅部の変化を反映していると考えられる。さらに Fig. 11(a) における D、E は Fig. 2 の生記録で表面波などの速度が遅い波の到来と重なる走時に相当することから、今後の多フォールド断面解析を待つ議論を進めたい。

また Hidayati et al. (2007) のモデルからは往復走時 5 秒以上 (6km 以上の深さに相当) における構造変化が桜島北東部で期待される。しかしこの議論の基準となる 2008 年観測の測線北端における記録 (Fig. 3(a)) において相当する走時の S/N 比が高くないことから、現時点では反射波強度の変化の評価は難しいと考える。2009 年観測を新たな基準として今後得られるデータを待つ深部の議論を展開したい。

6. まとめ

鹿児島県桜島火山で火山活動に伴う地下構造変化の検出を目的とした反復地震探査を行った。本報告の地震探査は反復地震探査の第 1 回目として位置づけられる。反復地震探査では 2008 年に実施された地震探査測線の一部を 219 点からなる再現測線として再構築し、7 発破点および 202 観測点の再現が実現した。再現観測による記録では、初動走時に目立った変化が認められなかったが、後続相に変化が認められるものがあった。走時 3 秒付近で後続相の変化が認められる観

測記録は、桜島北東部を通る波線で得られたものである。したがって 2009 年観測では地下構造変化の検出につながるデータが得られたと考える。また、5 秒より遅い走時の後続相についての議論は今後のデータの蓄積を待ちたい。

謝 辞

本探査実験は測線に関連する地区の区長諸兄をはじめとする桜島住民の皆様の絶大なるご協力によって無事に実施することができました。国土交通省大隅河川国道事務所には本観測にあたり格別のご配慮をいただき、効率的な測線展開・撤収作業を可能にいただいた。観測に使用した機材の提供では森田裕一氏 (東京大学地震研究所) と片尾 浩氏 (京都大学防災研究所) に便宜を図っていただいた。気象庁地震火山部火山課には実施経費の一部を負担していただきました。観測作業の実施ならびに解析にあたって発生した費用は京都大学防災研究所一般共同研究 (課題番号 20G-08, 代表者: 筒井智樹) および文部科学省による「地震および火山噴火予知のための観測研究計画」の支援を受けました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 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.
- 井口正人・為栗 健・横尾亮彦 (2008): 火山活動の経過, 第 10 回桜島火山集中総合観測報告書, pp. 1-18
- 内田直希・西村太志・吉本和生・中原 恒・佐藤春夫・大竹政和・田中 聡・浜口博之 (2002): 1998 年岩手県内陸北部地震前後の地震波速度変化, 地震 第 2 輯, 第 55 巻, pp. 192-206.
- 気象庁 (2010): 桜島の火山活動解説資料 (平成 22 年 3 月), 11pp.
- 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 2 輯, 第 59 巻, pp. 107-106.
- 地質調査所 (1971): 爆破地震による地震波速度の変化 (第 4 回観測結果報告), 地震予知連絡会会報, Vol. 6, pp. 15-24.
- 地質調査所 (1975): 川崎付近における地震波速度変化の観測 (第 1 回, 第 2 回扇島爆破実験), 地震予知連絡会会報, Vol. 16, pp. 60-65.
- 地質調査所 (1988): 爆破地震による地震波速度変化の観測 一第 5 回東海爆破実験結果概報一, 地震予知連絡会会報, Vol. 40, pp. 322-325.

福山博之・小野晃司 (1981): 桜島火山地質図, 地質調査所発行, 8pp.

Duputel, Z., Ferrazzini, V., Brengier, F., Shapiro, N., Campillo, M., and Nercessian, A. (2009): Real time monitoring of relative velocity changes using ambient seismic noise at the Piton de la Fournaise volcano (La Reunion) from January 2006 to June 2007, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 184, pp. 164-173.

Matsushima, J., Yokota, T., Okubo, Y., Rokugawa, S., Tanaka, K., Tsuchiya, T., Narita, N., Tani, K. (2004): Repeated seismic reflection measurements in the Kakkonda geothermal field, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 129, pp. 343-356.

Nishimura, T., Tanaka, S., Yamamoto, S., 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 1998 to 2003, *Earth Planets Space*, Vol. 57, pp. 491-505.

Appendix 1. Station location. Rank shows a reinstallation rank. Refer to the text for the definition of a reinstallation rank.

Station	Logger	Latitude (WGS84)			Longitude (WGS84)			Altitude (m)	Offset to 2008's station		Rank	Note	
		Deg	Min	Sec	Deg	Min	Sec		Northing (m)	Easting (m)			
C 001		1113	31	34	59.05628	130	41	58.69197	74.3	-	-	N	
C 002		1114	31	34	58.8353	130	41	55.47276	75.0	-	-	N	
C 003		1115	31	34	56.92016	130	41	53.71909	77.6	-	-	N	
C 004		1122	31	34	57.90035	130	41	50.45757	86.9	-	-	N	Noisy
C 005		1118	31	34	58.54615	130	41	47.96354	92.6	-	-	N	
C 006		1121	31	34	59.3605	130	41	46.46872	99.2	-	-	N	Bag broken and drowned logger
C 007		1172	31	35	1.73573	130	41	44.37209	118.3	-	-	N	Bag broken and drowned logger
C 008		1120	31	35	0.19139	130	41	41.57452	118.8	-	-	N	Bag broken and drowned logger
C 009		2029	31	34	59.62526	130	41	40.1157	120.4	-	-	N	Bag broken and drowned logger
C 010		1117	31	34	58.89916	130	41	38.26396	122.6	-	-	N	
C 011		3007	31	34	58.12887	130	41	36.24537	125.0	-	-	N	Broken bag, TCAL error
C 012		1119	31	34	57.2576	130	41	33.99981	127.6	-	-	N	
C 013		3003	31	34	57.58099	130	41	31.63115	129.0	-	-	N	
C 014		3006	31	34	57.64137	130	41	29.21169	132.8	-	-	N	Noisy
C 015		3005	31	34	57.77044	130	41	25.52915	138.9	-	-	N	
C 016		1174	31	34	57.16078	130	41	23.39493	141.5	-	-	N	
C 017		1173	31	34	56.38522	130	41	20.61691	145.7	-	-	N	
K AR1		1009	31	34	59.859545	130	42	3.97488	68.8	-	-	○	
K AR3		1007	31	35	0.20667	130	42	6.10868	65.7	-	-	⊙	
K AR4		3002	31	35	0.42783	130	42	7.38715	64.0	-	-	○	Noisy
K AR5		1015	31	35	0.64824	130	42	8.90179	59.9	-	-	⊙	
K AR6		1003	31	34	58.54062	130	42	6.74149	66.1	-	-	⊙	
K AR7		1051	31	34	59.28017	130	42	6.38348	65.3	-	-	⊙	
K AR8		1021	31	35	1.23106	130	42	5.62385	66.5	-	-	⊙	
X 001 A		1005	31	34	51.13354	130	42	3.69581	80.2	0.9	-2.3	○	Turned logger and sensor, noisy
X 002 A		1008	31	34	52.24549	130	42	3.07997	80.5	-7.4	-4.3	⊙	Noisy
X 003 A		1116	31	34	54.30654	130	42	2.14686	80.0	-0.2	0.4	⊙	Noisy
X 004 A		1001	31	34	57.29693	130	41	59.03	78.0	15.8	-7.5	○	
X 005 A		3004	31	34	59.86761	130	42	0.96613	72.1	2.9	0.7	⊙	Noisy
X 006 A		3008	31	34	59.97571	130	42	3.0396	70.2	-6.6	-4.0	⊙	
X 007 A		3001	31	35	0.28926	130	42	4.87717	67.9	0.6	2.2	⊙	Noisy
X 008 A		3009	31	35	1.96799	130	42	5.33499	65.7	3.9	-1.8	⊙	
X 009 A		1004	31	35	2.83459	130	42	5.21182	64.8	-12.8	-25.2	N	
X 010 A		1084	31	35	6.92496	130	42	9.55121	65.8	0.4	-1.4	⊙	
X 011 A		1091	31	35	8.30359	130	42	8.62808	73.5	-1.7	-0.4	⊙	
X 012 A		1092	31	35	9.63006	130	42	9.61006	72.8	-1.7	-1.2	⊙	Delayed start for 9 s.
X 013 A		5002	31	35	11.38574	130	42	9.82318	89.1	0.2	-0.2	○	TCAL error, noisy.
X 014 A		5003	31	35	13.1693	130	42	9.01374	99.3	0.4	-0.3	⊙	
X 015 A		1090	31	35	14.76189	130	42	8.63295	99.2	-0.6	0.5	⊙	Broken bag
X 016 A		1083	31	35	16.28122	130	42	8.66279	90.9	0.0	-1.7	⊙	
X 017 A		1088	31	35	18.12316	130	42	9.03814	85.2	-47.7	4.5	N	
X 018 A		5005	31	35	19.75844	130	42	9.04624	81.7	2.2	4.7	○	Noisy
X 019 A		1085	31	35	21.49372	130	42	8.77523	85.2	-1.8	7.4	○	
X 020 A		1086	31	35	23.83501	130	42	7.33815	85.4	-3.1	-3.5	○	
X 192 A		6008	31	35	25.11468	130	42	6.45737	88.7	-0.4	-0.7	⊙	
X 021 A		1089	31	35	26.01142	130	42	3.25116	91.1	0.1	2.9	⊙	Broken bag
X 022 A		6009	31	35	27.38408	130	42	1.47847	92.6	0.6	4.1	⊙	
X 023 A		1042	31	35	28.48979	130	42	0.12197	93.7	0.2	3.3	⊙	
X 024 A		1087	31	35	30.04524	130	41	58.75881	94.5	0.6	4.0	⊙	Failed and no data. Quadruplet flashing indicator ramp.
X 025 A		5001	31	35	30.67985	130	41	56.15912	95.2	0.2	0.3	⊙	
X 026 A		6011	31	35	32.01629	130	41	55.01408	95.9	0.9	-0.3	⊙	
X 027 A		5004	31	35	33.96655	130	41	54.65407	96.6	0.6	-0.2	⊙	Broken bag
X 028 A		6010	31	35	35.53099	130	41	55.05539	97.0	1.1	0.1	⊙	
X 029 A		1043	31	35	36.96295	130	41	54.43724	97.8	0.3	-0.4	⊙	Delayed start for 33 s.
X 030 A		1096	31	35	38.16848	130	41	53.16768	99.1	0.7	-0.3	⊙	
X 031 A		1159	31	35	39.10826	130	41	52.1418	100.1	0.3	-0.2	⊙	Delayed start for 9 s.
X 032 A		1165	31	35	39.62289	130	41	50.64947	98.9	-0.6	0.1	⊙	
X 033 A		1157	31	35	40.48749	130	41	48.50671	104.5	0.3	-0.6	⊙	Failed and no data.
X 034 A		1161	31	35	41.18569	130	41	46.18146	105.3	0.1	-0.3	⊙	
X 035 A		1169	31	35	41.4681	130	41	43.8817	106.1	-0.2	0.1	⊙	
X 036 A		1160	31	35	42.13022	130	41	42.51067	106.5	0.2	-0.3	⊙	
X 037 A		1093	31	35	42.94615	130	41	41.3247	107.0	0.6	-0.6	⊙	
X 038 A		1074	31	35	43.88459	130	41	39.95907	107.7	0.2	0.1	⊙	
X 039 A		1156	31	35	45.10418	130	41	38.18996	109.0	0.0	0.3	⊙	
X 040 A		1164	31	35	46.27136	130	41	36.4897	110.2	0.2	-0.2	⊙	
X 041 A		1163	31	35	47.28981	130	41	35.00272	111.3	0.0	0.3	⊙	Delayed start for 6s.
X 042 A		1080	31	35	48.50016	130	41	33.23738	112.6	-0.5	0.6	⊙	

Station	Logger	Latitude (WGS84)			Longitude (WGS84)			Alti- tude (m)	Offset to 2008's station		Rank	Note	
		Deg	Min	Sec	Deg	Min	Sec		North ing (m)	Eastin g (m)			
X 043 A		1162	31	35	49.973	130	41	30.76383	114.2	2.0	-2.3	⊙	
X 044 A		1026	31	35	50.99754	130	41	29.61591	115.2	-0.3	0.1	⊙	
X 045 A		1028	31	35	52.39046	130	41	27.59273	117.3	0.8	-2.7	○	
X 046 A		1022	31	35	53.57833	130	41	25.99643	120.0	0.6	0.0	○	
X 047 A		1177	31	35	55.37303	130	41	24.00829	123.4	1.5	-1.0	○	
X 048 A		1031	31	35	57.58874	130	41	22.51307	125.1	-3.1	2.2	○	
X 049 A		1070	31	35	59.12075	130	41	21.90479	125.4	0.7	-0.3	○	
X 050 A		1183	31	36	1.34859	130	41	21.90709	124.7	1.5	3.0	○	
X 051 A		1181	31	36	2.69653	130	41	22.52458	124.1	3.0	1.4	○	
X 052 A		1002	31	36	5.46186	130	41	20.78266	124.5	0.2	-1.4	○	
X 053 A		1069	31	36	6.4139	130	41	20.1474	124.5	-4.3	1.5	⊙	
X 054 A		1066	31	36	9.32533	130	41	19.73372	130.8	2.6	3.3	○	
X 055 A		1176	31	36	10.88493	130	41	19.22286	134.1	2.2	0.0	○	Delayed start for 9s.
X 056 A		1065	31	36	12.96897	130	41	19.03673	135.0	1.9	-0.4	○	Failed and no data
X 057 A		1030	31	36	15.10551	130	41	18.48706	140.7	3.8	-3.9	○	Delayed start for 15 s.
X 058 A		1067	31	36	16.37309	130	41	17.90923	144.6	1.7	-0.6	⊙	Noisy
X 059 A		1182	31	36	18.27941	130	41	17.53816	150.4	1.5	3.1	○	Noisy
X 060 A		1023	31	36	20.01881	130	41	16.73895	154.1	2.2	4.7	○	
X 061 A		1029	31	36	21.80295	130	41	15.59016	159.1	-1.4	-0.1	○	
X 062 A		1180	31	36	23.63964	130	41	14.90651	153.7	-0.2	-0.1	○	Noisy
X 063 A		4031	31	36	25.23417	130	41	15.0547	151.0	3.6	6.1	○	Delayed start for 24 s.
X 064 A		4027	31	36	26.8287	130	41	13.76135	149.4	4.4	5.8	○	
X 065 A		1178	31	36	28.12667	130	41	12.6148	148.0	-0.4	-0.2	○	
X 066 A		1179	31	36	29.47449	130	41	11.53114	149.7	0.9	1.0	○	
X 067 A		1064	31	36	32.01152	130	41	10.95263	147.5	1.5	-1.6	○	
X 068 A		4028	31	36	32.87815	130	41	10.05731	148.4	-0.2	0.0	○	
X 069 A		4030	31	36	34.3897	130	41	9.2485	148.1	1.9	-0.9	○	
X 070 A		4024	31	36	35.29775	130	41	6.86066	148.3	0.3	0.5	⊙	TCAL error
X 071 A		4025	31	36	35.16904	130	41	5.10502	149.2	-2.1	-0.1	○	
X 072 A		1063	31	36	36.68765	130	41	3.07431	147.3	4.0	-12.3	○	
X 073 A		1072	31	36	37.23625	130	41	2.09853	146.5	1.5	1.7	○	
X 074 A		1071	31	36	38.18918	130	41	0.58519	145.2	-1.0	1.4	⊙	
X 075 A		4029	31	36	40.29393	130	41	0.42186	143.2	7.4	0.0	○	
X 076 A		1025	31	36	41.35806	130	41	0.56942	143.5	-0.3	-0.2	⊙	
X 077 A		1024	31	36	43.23628	130	41	1.3063	140.7	-0.2	-0.1	○	noisy
X 078 A		4032	31	36	45.11911	130	41	2.10331	139.1	-1.1	-2.5	○	
X 079 A		4026	31	36	46.31218	130	41	2.43992	138.9	-0.5	0.1	○	
X 080 A		4023	31	36	47.86822	130	41	2.98523	140.6	-2.9	6.9	○	
X 081 A		3012	31	36	48.83178	130	41	2.05239	140.5	-0.7	-0.1	⊙	
X 082 A		3015	31	36	50.82098	130	41	0.05371	142.8	-1.1	-1.3	⊙	noisy
X 083 A		3014	31	36	52.87607	130	40	58.95487	145.3	1.3	-1.2	○	
X 084 A		1185	31	36	53.79346	130	40	55.94311	153.7	-5.8	-3.8	⊙	
X 085 A		3013	31	36	52.28308	130	40	51.79982	163.9	-2.3	-0.8	⊙	
X 086 A		1184	31	36	53.49991	130	40	48.23384	162.6	-1.0	-0.1	⊙	
X 087 A		1131	31	36	54.32523	130	40	46.28417	162.1	0.1	-0.4	⊙	
X 088 A		1130	31	36	55.01802	130	40	44.37649	160.4	2.0	0.3	⊙	
X 089 A		1036	31	36	56.58288	130	40	43.80242	158.5	1.7	1.2	⊙	
X 090 A		1133	31	36	59.11757	130	40	43.52422	157.2	0.8	-1.8	⊙	
X 091 A		1132	31	37	1.2435	130	40	44.59937	156.0	-1.7	-0.4	⊙	
X 092 A		1034	31	37	3.67887	130	40	44.41561	152.7	31.1	7.9	○	
X 093 A		1127	31	37	4.81931	130	40	45.16101	145.3	-4.9	14.8	○	Delayed start for 12 s.
X 094 A		1061	31	37	8.07157	130	40	43.90267	93.7	-0.2	0.7	⊙	Delayed start for 6 s.
X 095 A		1054	31	37	8.17624	130	40	42.27265	92.2	-0.3	-5.3	⊙	
X 096 A		1108	31	37	10.09803	130	40	41.80565	93.3	-0.4	1.8	⊙	
X 097 A		1153	31	37	11.33476	130	40	40.12811	84.2	-3.4	-9.6	N	Noisy
X 098 A		1151	31	37	13.42047	130	40	41.4545	86.4	0.6	-1.4	N	noisy
X 099 A		1147	31	37	14.73964	130	40	42.05556	87.9	8.3	8.9	N	
X 100 A		1150	31	37	15.57829	130	40	41.27902	85.2	-1.4	4.8	○	F: broken bag and noisy
X 101 A		1050	31	37	17.3115	130	40	40.73016	81.5	-1.3	0.2	⊙	
X 102 A		1107	31	37	17.8443	130	40	39.12031	80.0	-17.3	-52.9	N	F: moved about 10cm away.
X 103 A		1052	31	37	18.968701	130	40	39.01376	79.0	-27.3	-65.2	N	
X 104 A		2027	31	37	21.44062	130	40	40.01875	73.4	5.1	-21.0	⊙	TCAL error
X 105 A		1155	31	37	22.48158	130	40	40.71697	68.5	0.9	-2.3	⊙	Noisy
X 106 A		1154	31	37	24.15335	130	40	41.09123	64.6	0.4	-2.1	⊙	periodic burst noise
X 107 A		1111	31	37	25.37163	130	40	41.39318	57.9	-2.6	-1.5	⊙	5 minutes interval noise burst
X 108 A		1146	31	37	26.57406	130	40	41.66526	53.3	7.2	2.5	⊙	
X 109 A		1175	31	37	27.3984	130	40	41.41663	53.0	1.5	1.0	⊙	Noisy
X 110 A		1103	31	37	28.57939	130	40	41.77059	47.4	1.2	0.6	⊙	
X 111 A		1056	31	37	29.95277	130	40	41.97757	43.0	7.4	7.6	⊙	
X 112 A		1046	31	37	31.336556	130	40	41.20088	42.6	13.4	5.3	N	

Station	Logger	Latitude (WGS84)			Longitude (WGS84)			Altitude (m)	Offset to 2008's station		Rank	Note
		Deg	Min	Sec	Deg	Min	Sec		North ing (m)	East ing (m)		
X 113 A		1149	31	37	32.26763	130	40	40.56904	39.6	1.9	-5.8	⊙ Noisy
X 114 A		1110	31	37	32.97822	130	40	39.87483	41.7	0.5	-0.9	⊙ Noisy
X 115 A		1105	31	37	34.04971	130	40	38.70223	42.9	3.0	0.4	⊙
X 116 A		1106	31	37	35.02225	130	40	37.59026	45.0	1.3	0.3	⊙ TCAL error
X 117 A		1148	31	37	35.96487	130	40	36.28421	43.9	-4.9	-6.2	N
X 118 A		1062	31	37	37.81917	130	40	36.09117	37.6	1.4	1.3	⊙
X 119 A		1057	31	37	38.89231	130	40	36.70422	31.7	0.3	-0.4	⊙
X 120 A		1059	31	37	40.38888	130	40	36.9724	24.9	-0.6	0.3	⊙ Noisy
X 121 A		1152	31	37	41.54559	130	40	38.44712	22.3	-1.7	0.1	⊙
X 122 A		1060	31	37	43.23394	130	40	39.70435	19.4	-0.5	-1.0	⊙
X 123 A		1171	31	37	44.0452	130	40	41.40178	23.3	-25.6	-21.8	⊙ Noisy and doubtful location of 2008's station
X 124 A		1058	31	37	44.05366	130	40	43.09564	23.1	-0.1	9.4	⊙ Opened bag
X 125 A		1104	31	37	43.94443	130	40	44.90981	22.9	1.2	-0.6	⊙
D 001		1044	31	36	16.57707	130	38	18.43694	366.6	-	-	N Noisy
D 002		1049	31	36	14.64841	130	38	17.6839	366.6	-	-	N Noisy
D 003		1140	31	36	13.17312	130	38	17.29204	366.6	-	-	N
D 004		1144	31	36	11	130	38	16.5	364.2	-	-	N Noisy
D 005		1167	31	36	9.39402	130	38	17.47745	366.9	-	-	N
D 006		1195	31	36	7.50691	130	38	16.9675	362.1	-	-	N
D 007		7003	31	36	6.20435	130	38	18.85979	358.5	-	-	N Noisy
D 008		1135	31	36	4.10394	130	38	17.36872	355.8	-	-	N
D 009		1166	31	36	2.10682	130	38	17.23455	353	-	-	N Noisy
D 010		1190	31	36	0.87665	130	38	18.43465	349.6	-	-	N Noisy
X 001 B		1048	31	36	18.11603	130	38	10.14141	353.7	6.8	4.2	○ Noisy
X 002 B		4006	31	36	19.07632	130	38	12.16383	363.9	-0.2	-0.6	○
X 003 B		4013	31	36	18.031759	130	38	13.85247	372.7	2	-9.7	○
X 004 B		4012	31	36	18.386165	130	38	16.73705	380.8	-2.1	-1.3	⊙ Drifting base level
X 005 B		4005	31	36	18.4028	130	38	19.04846	367.7	-5.1	-8.7	○
X 006 B		1047	31	36	19.416042	130	38	21.30705	366.4	0.4	-0.3	⊙ Noisy
X 007 B		1045	31	36	19.72982	130	38	24.28804	368.8	2.6	-2.2	⊙ Delayed start for 6 s, and noisy.
X 008 B		1192	31	36	20.81651	130	38	27.67293	361.9	1.8	9.3	⊙
X 009 B		4011	31	36	20.41565	130	38	30.85663	361.7	-2.1	4.8	⊙ Bag broken and short receptacle lost
X 010 B		1188	31	36	19.72951	130	38	33.00829	356.1	-0.7	2.5	⊙ Broken bag
X 011 B		1189	31	36	19.39421	130	38	35.9285	354.8	0.1	0.4	⊙ Noisy
X 012 B		1193	31	36	19.93231	130	38	39.42978	351.7	0	-0.2	⊙ Noisy
X 013 B		4007	31	36	20.82907	130	38	41.32499	346.1	0.8	-0.5	⊙
X 014 B		1187	31	36	22.54543	130	38	44.63439	348.2	-0.5	0.5	⊙ Noisy
X 015 B		4008	31	36	23.47348	130	38	46.72434	342.9	1.3	1.1	⊙ Absolutely noisy
X 016 B		4010	31	36	23.045613	130	38	51.573	346	-1.9	31.3	⊙ Noisy, doubtful location of 2008's description
X 017 B		4009	31	36	24.68655	130	38	53.77004	341.2	-0.4	0.3	⊙ Noisy
X 018 B		1143	31	36	24.44309	130	38	57.70517	341.4	1.6	6.3	⊙ Noisy
X 019 B		1145	31	36	24.88298	130	39	0.86358	343.9	-0.1	-0.5	⊙ Noisy
X 020 B		1141	31	36	26.50876	130	39	3.76454	335.3	2.1	-1.3	⊙
X 021 B		4004	31	36	26.97029	130	39	7.83214	329.5	0.9	0.2	⊙ TCAL error and noisy
X 022 B		1139	31	36	27.27246	130	39	10.12508	326.9	0.2	0.4	⊙
X 023 B		1138	31	36	26.73189	130	39	13.83431	328.3	9.4	-1.2	N
X 024 B		2016	31	36	25.7099	130	39	16.911	324	0.7	5.3	⊙
X 025 B		2017	31	36	24.910187	130	39	20.30326	328.4	-0.7	1.7	○
X 026 B		3025	31	36	22.897775	130	39	23.05417	344.3	-7.2	5.2	○
X 027 B		2005	31	36	21.40201	130	39	24.43803	352.9	-0.9	-0.1	⊙
X 028 B		3029	31	36	21.822303	130	39	27.85597	354.2	0	0.5	⊙
X 029 B		3023	31	36	23.81771	130	39	27.74407	341.6	-4.9	4.5	N
X 030 B		3031	31	36	25.359435	130	39	29.80778	325.4	-0.6	1.7	⊙
X 031 B		2012	31	36	26.203506	130	39	33.5765	331.1	4.2	22.9	○
X 032 B		2004	31	36	24.47104	130	39	38.05074	345.5	-16.8	55	○ Noisy
X 033 B		2002	31	36	24.52499	130	39	38.08006	341.8	4.6	-5.1	○
X 034 B		2010	31	36	24.922719	130	39	40.8494	340.2	-3.4	-6.3	○
X 035 B		2014	31	36	25.385567	130	39	44.01296	330.3	-1.2	3.8	⊙ Noisy
X 036 B		3028	31	36	25.634676	130	39	47.11829	323.9	-3	3.4	N
X 037 B		3027	31	36	24.89836	130	39	48.78581	325.2	6.1	-4.2	N TCAL error
X 038 B		3021	31	36	27.047052	130	39	51.01002	330.5	5.1	-1.4	○
X 039 B		3022	31	36	29.35194	130	39	53.04261	327.7	1.6	5.4	○ Failed and no data
X 040 B		3024	31	36	29.90272	130	39	55.91369	319.8	-1.2	-4.4	○
X 041 B		3034	31	36	31.355087	130	39	58.31786	325.7	7.4	2.2	○
X 042 B		2018	31	36	32.80839	130	40	0.31378	320.3	-12.3	-0.8	○
X 043 B		2020	31	36	35.64817	130	40	2.41337	313.1	-1.7	-1.2	○
X 044 B		2019	31	36	37.0122	130	40	5.03679	315.2	9.2	3.7	○ Noisy

Station	Logger	Latitude (WGS84)			Longitude (WGS84)			Altitude (m)	Offset to 2008's station		Rank	Note
		Deg	Min	Sec	Deg	Min	Sec		North ing (m)	East ing (m)		
X 045 B	3033	31	36	39.16868	130	40	8.21703	317.6	14.9	16.6	○	Noisy
X 046 B	2008	31	36	38.19713	130	40	10.78392	318.4	0.6	-1.3	○	
X 047 B	1134	31	36	37.45507	130	40	13.8898	318.4	-1.3	10	⊙	
X 048 B	1035	31	36	37.42874	130	40	15.78225	316.1	0.4	0.2	⊙	noisy
X 049 B	1128	31	36	37.19175	130	40	19.17712	311.4	0.1	4.5	⊙	
X 050 B	1125	31	36	37.38841	130	40	23.02546	300.6	3.2	9.8	⊙	
X 051 B	1123	31	36	37.23567	130	40	26.8142	295.6	1	-0.3	⊙	Noisy
B 102	1038	31	36	46.87165	130	40	31.2976	231.5	-	-	N	
X 101 B	1041	31	36	43.86756	130	40	30.45348	257.4	1.5	-0.1	⊙	
B 100	1040	31	36	41.2902	130	40	30.45592	262.6	-	-	N	
B 099	1124	31	36	39.09285	130	40	28.69899	272.5	-	-	N	
B 207	2007	31	36	48.06218	130	40	33.16639	217.5	-	-	N	Early retrieval
B 206	2013	31	36	48.029	130	40	35.83838	200.2	-	-	N	Early retrieval, periodic burst noise
B 205	3042	31	36	47.19881	130	40	38.55208	189.5	-	-	N	Early retrieval, and 4 minutes interval burst noise
B 204	3043	31	36	46.70172	130	40	40.76206	177.6	-	-	N	Early retrieval, TCAL error, 4 minutes interval burst noise
B 203	3044	31	36	49.03053	130	40	41.43633	176.5	-	-	N	Early retrieval
B 202	3035	31	36	50.34128	130	40	42.35098	172.8	-	-	N	Early retrieval, 1 minutes interval burst noise
B 201	2015	31	36	52.14685	130	40	44.88906	165.3	-	-	N	Early retrieval
X 054 B	3020	31	36	48.34517	130	40	43.94891	160.4	45.8	7.7	N	Delayed start for 6 s, noisy
X 055 B	3018	31	36	46.16529	130	40	47.24699	177.2	0.3	-0.3	○	
X 056 B	1033	31	36	44.69869	130	40	48.91851	174.6	2.9	0	○	Delayed start for 6 s
X 057 B	1037	31	36	43.2541	130	40	51.17904	171.5	0.6	-0.2	⊙	
X 058 B	1039	31	36	42.33403	130	40	55.04976	156.8	0.1	0.3	⊙	
X 059 B	3019	31	36	43.14387	130	40	57.78741	155.6	-8.3	4.6	○	
X 060 B	1032	31	36	43.9179	130	41	0.34142	144.1	-6.2	-0.5	○	
X 061 B	3037	31	36	43.61897	130	41	2.41541	138.2	0.5	-4.6	⊙	
X 062 B	3046	31	36	42.59274	130	41	5.0038	118.6	0.8	0.1	⊙	
X 063 B	2009	31	36	40.599	130	41	6.55339	115	2.9	-1.3	⊙	Failed and no data
X 064 B	2001	31	36	40.62628	130	41	9.47548	109.7	1.5	-0.5	⊙	
X 065 B	4002	31	36	39.92198	130	41	11.90724	106.4	0	-1.9	⊙	
X 066 B	3039	31	36	38.48877	130	41	14.76134	104.6	1.1	-8.8	⊙	
X 067 B	3036	31	36	38.10195	130	41	17.88228	102.3	2	-3.6	⊙	
X 068 B	3049	31	36	37.4046	130	41	20.94556	101.4	1	-8.9	⊙	
X 069 B	3050	31	36	36.93444	130	41	25.42401	100.6	3.5	46.8	N	Noisy
X 070 B	2003	31	36	34.13613	130	41	23.64751	103.5	0.7	-13.5	⊙	
X 071 B	3040	31	36	32.04122	130	41	24.64749	104.8	-0.7	-0.9	⊙	
X 072 B	4001	31	36	30.36313	130	41	28.39478	104.6	-2.7	5.2	⊙	Noisy
X 073 B	3041	31	36	28.45477	130	41	30.6472	105.2	0.2	-1	⊙	
X 074 B	3045	31	36	26.023733	130	41	31.5593	106	0.3	-7	⊙	
X 075 B	3038	31	36	23.34904	130	41	32.76385	108.1	-4.5	0.9	⊙	
X 076 B	1170	31	36	21.78826	130	41	37.79661	91.8	5.1	-3.8	○	
X 077 B	6012	31	36	22.96977	130	41	41.23814	91.2	-28.6	-60.9	N	TCAL error
X 078 B	1082	31	36	24.03668	130	41	44.02125	91.5	36.8	71.6	N	
X 079 B	1081	31	36	21.76967	130	41	46.85368	84.4	4.2	2.7	⊙	Noisy
X 080 B	1097	31	36	21.04358	130	41	49.7515	83.7	-0.9	-0.5	⊙	Noisy
X 081 B	1078	31	36	21.644605	130	41	52.00003	75.8	5.8	-4.6	⊙	
X 082 B	1077	31	36	21.206458	130	41	55.22509	75.7	-2.4	0.5	⊙	Noisy
X 083 B	1095	31	36	21.116214	130	41	58.21487	74.8	0.1	-0.3	⊙	Noisy
X 084 B	1098	31	36	20.574886	130	42	1.96923	66.9	1.8	0.4	⊙	noisy
X 085 B	1099	31	36	18.304015	130	42	2.79103	52.9	-1.9	-1.2	⊙	
X 086 B	1076	31	36	17.5049	130	42	4.90932	42.4	2	-1.4	⊙	Noisy
X 087 B	6014	31	36	16.42653	130	42	6.9927	42.2	0.3	0.8	⊙	TCAL error and noisy
X 088 B	1079	31	36	14.86746	130	42	8.64761	39.7	0.2	2	⊙	Broken bag
X 089 B	1094	31	36	15.62873	130	42	11.96142	33.6	-2.3	-0.2	⊙	Dewed bag inside
X 090 B	1075	31	36	14.45689	130	42	13.84707	34.1	-0.5	-0.8	⊙	
X 091 B	1168	31	36	13.85804	130	42	15.57627	40.5	0.8	0.4	⊙	
X 092 B	2028	31	36	12.20498	130	42	15.95159	43.1	0	-0.2	⊙	
X 093 B	1101	31	36	12.85488	130	42	19.6455	42.5	0.8	2.8	⊙	Broken bag and drawn away.
X 094 B	1100	31	36	12.80249	130	42	21.80052	39.6	-0.5	-1.5	⊙	

The First Round of the Repeated Seismic Survey in Sakurajima Volcano, South Kyushu, Japan

Tomoki TSUTSUI*, Masata IGUCHI, Takeshi TAMEGURI, Yoshihiro UEDA**, Hiromitsu Oshima***, Sadato UEKI****, Takao Ohminato****, Jun OIKAWA****, Mie ICHIHARA****, Kenji NOGAMI****, Haruhisa NAKAMICHI*****, Takahiro Ohkura*****, Hiroshi SHIMIZU*****, Hiroki MIYAMACHI*****, Hiroshi YAKIWARA*****, Tokumitsu MAEKAWA**, Shinichiro HORIKAWA*****, Shin YOSHIKAWA*****, Tadaomi SONODA, Shuichiro HIRANO*****, Koichi SUEMINE**, Mikita HAYASHI**, Koji KATO**, Jun NAGAO**, Takamitsu Ikegame**, Shinichi MATSUSUE**, Hirohito GOTO**, Taisuke KOHNO**, Takahiro YANADA***, Madoka TANAKA****, Ryuichi WATANABE*, Yutaka NAGAOKA****, Yuki MAEHARA*****(currently*****), Sayumi YOSHIDA*****, Yumi KOBAYASHI*****, and Shiro KAYAHASHI*****

*Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University,

** Japan Meteorological Agency

***Graduate School of Science, Hokkaido University,

**** Graduate School of Science, Tohoku University,

***** Earthquake Research Institute, University of Tokyo,

***** Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology,

***** Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University,

***** Graduate School of Science, Kyoto University,

***** Faculty of Science, Kyushu University,

***** Faculty of Science, Kagoshima University,

Synopsis

The repetitive seismic prospecting was performed in Sakurajima Volcano on December 2009, aiming at a detection of the structural change accompanying volcanic activity. A part of the seismic lines of 2008's survey was reconstructed. The seismic lines consisted of 15 shot points, and 263 temporal seismic stations. Among these, the reconstructed line consisted of seven reappearance shot-points, and 219 reappearance temporal stations. In reconstruction of a line, 202 points succeeded in the re-installation to the original point. As compared with the previous observation with the same charge size, 0.6 to 2.9 times of the peak amplitude was obtained by the shots. Although no change in the first-arrival time was observed in the obtained record, a systematic change was observed in later phases of the observation record in a northeast part. It is expected that obtained data may leads to a detection of the structural change accompanying activity of the Sakurajima volcano.

Keywords: Sakurajima Volcano, Artificial explosion experiment, Structure transition monitoring