

桜島火山における反復地震探査 (2011 年観測)

筒井智樹¹⁾, 井口正人²⁾, 菅井 明³⁾, 大島弘光⁴⁾, 前川徳光⁴⁾, 植木貞人⁵⁾, 山本 希⁵⁾, 野上健治⁶⁾, 武尾 実⁷⁾, 大湊隆雄⁷⁾, 及川 純⁷⁾, 渡邊篤志⁷⁾, 中道治久⁸⁾, 堀川信一郎⁸⁾, 大倉敬宏⁹⁾, 吉川 慎⁹⁾, 高山鐵朗²⁾, 園田忠臣²⁾, 清水洋¹⁰⁾, 松島 健¹⁰⁾, 宮町宏樹¹¹⁾, 八木原 寛¹¹⁾, 平野舟一郎¹¹⁾, 岡本和喜³⁾, 片岡義久³⁾, 松末伸一³⁾, 小窪則夫³⁾, 河野太亮³⁾, 真崎潤一郎³⁾, 中橋正樹³⁾, 宇都宮真吾³⁾, 生駒良友³⁾, 芥川真由美³⁾, 森 貴章⁴⁾, 内田 東⁵⁾, パチェコ・カリム⁵⁾, 田中利昌¹⁾, 佐藤 泉⁶⁾, 鎌田林太郎⁷⁾, 山下裕亮¹⁰⁾, 弓取なつみ¹⁰⁾, 岩本健吾¹¹⁾, 下搾 駿¹¹⁾

- 1) 秋田大学大学院工学資源学研究科
- 2) 京都大学防災研究所
- 3) 気象庁
- 4) 北海道大学大学院理学研究科
- 5) 東北大学大学院理学研究科
- 6) 東京工業大学火山流体研究センター
- 7) 東京大学地震研究所
- 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研究科
- 10) 九州大学大学院理学研究院
- 11) 鹿児島大学大学院理工学研究科

要旨

平成 23 年に桜島火山北東部で行われた第 3 回目の繰り返し地震探査の概要とデータ整理結果, さらにこれまでのデータを用いた解析結果を報告する。始良カルデラからのマグマ移動にともなう地下構造変化の検出をねらい, 桜島東麓と北山腹のそれぞれ 1 本ずつの測線上に合計 14 ケ所のショットポイントと 252 点の臨時観測点を測線上に設置した。観測機器および発破薬量はこれまで行われた 2 回の観測と同一仕様のものを用いた。展開した臨時観測点 252 点中, データが回収できた観測点は 251 点でデータ回収率は 99.6% であった。これまでに得られた各年の単年記録の垂直重合から参照基準記録を, 振幅補正を行った単年記録から参照基準記録を差し引いた差分記録をそれぞれ作成して波形変化の評価を行った。反射波の特徴を持つ後続相は桜島北東部を通過する波線に変化が現れる傾向が認められた。さらに桜島の北部に位置する東西測線において差分記録から差分記録反射断面を作成した。4km 以深の地震波反射の変化は数ヶ月程度の時間スケールで見た地盤変動のトレンドと対応する一方, その上位の地震波反射の変化は火口で発生する個々の爆発と対応している可能性がある。

キーワード：桜島火山, 構造探査, 構造変化, マグマ供給系

1. はじめに

九州南部に位置する桜島火山は日本でもっとも活動的な火山である。桜島火山では1955年以降1990年代半ばまで南岳山頂火口からの爆発が卓越する活動形態であった。2006年6月に東山腹の昭和火口が活動を再開し、最近では桜島火山で発生する爆発は昭和火口で発生するものが卓越するようになった。さらに時間の経過とともに、放出物の堆積範囲が徐々に拡大しつつある。

一方、桜島へのマグマ供給は消長を繰り返しながらも継続している (Fig. 1) (井口ら, 2011)。また井口ら (2010) は鹿児島湾地域の隆起量が1914年の大正噴火直前のレベルに近づきつつあることから、桜島のマグマ供給源とされる始良カルデラ中央部の地下では着々とマグマ蓄積が進行しており近い将来に1914年噴火のような溶岩流をとまなう噴火活動が起こりうる可能性を指摘している。

地下からのマグマ供給は火山活動の本質であり、火山活動の規模や様式そのものを支配する。地盤変動観測や重力観測、地震観測など、地表における受動的地球物理学的手法によって火山の地下におけるマグマの動静を把握することが行われている。地盤変動観測を精力的に行った Eto et al. (2007); 山本ら (2010), 山本ら (2011), 山本ら (2012) は桜島に供給されるマグマの動向を年スケールで論じている。一方、地震観測から得られる火山性地震の活動度の推移や位置の移動は火山活動に伴うマグマの移動をほぼリアルタイムに把握する良い指標になることが多いが、井口ら (2011) は桜島火山では火口直下の地震活動は活発である一方でマグマ供給経路とされる地域の地震活動が低いレベルにあることから、桜島に関しては必ずしも良い指標にならない可能性があることを指摘している。同様の状況はインドネシア

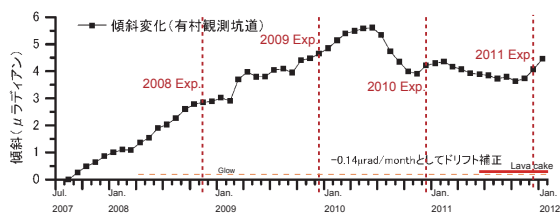


Fig. 1 Radial tilt at the station ARI (After Iguchi et al., 2011). The broken lines are the seismic experiments.

のムラピ火山の2010年11月の爆発の直前にも報告されている (Iguchi et al. 2011)。このことは今後の桜島の活動を把握し予測する際に留意されなければならない事である。地下からの自発的な信号 (たとえば火山性地震など) が得られない状況で地下の状況を把握するためには、人工的に与えた地震波などの信号に対する地下構造の応答を計測する手段をとる必要がある。

繰り返し人工地震を用いた構造変化検出の試みはこれまでも多くなされてきている。1970年代には当時の地質調査所のグループが屈折法をベースとした手法でこの問題にとりくみ、首都圏で実験を行っている (地質調査所, 1975; 地質調査所, 1971)。最近では Nishimura et al. (2005) が Poupinet et al. (1984) の局所相関法を用い活火山地域における構造変化を検出しているほか、同じ手法で Anggono et al. (2012) が三宅島におけるカルデラ形成に伴う地震波速度変化について論じている。岩手山に隣接する葛根田地熱地域では Matsushima et al. (2004) が3回の繰り返し反射法地震探査を行い、地熱流体生産に伴う地下構造変化を評価している。本研究は4回の繰り返し反射法地震探査を実施し、活動度が上昇しつつある桜島火山において火山活動に関連した地下構造変化を検出する試みである。

2. 2011年観測の概要

桜島火山では2008年の構造探査実験 (井口ら, 2009) に引き続き、2009年から同一測線および同

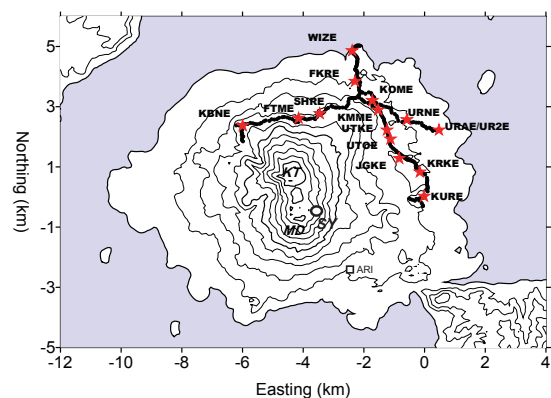


Fig. 2 The temporary seismic network of this project. The solid circles are the stations and the stars are the shot points. The contours are every 100 meter in altitude. KT; Kita-dake, MD; Minami-dake, SY; Showa crater. ARI; Arimura station

Table 1 Locations and shot times.

Shot point	Shot time		Latitude(WGS84)			Longitude(WGS84)			Surface altitude (m)	Note
	Day	Time	Deg	Min	Sec	Deg	Min	Sec		
KURE	2011/12/15	02:27:00.667	31	35	01.63165	130	42	05.34450	66.2	Current: S1
KRKE	2011/12/15	00:12:00.765	31	35	27.53429	130	41	59.94380	89.0	Current: S2
JGKE	2011/12/15	01:12:00.738	31	35	42.44195	130	41	33.68980	102.8	Current: S3
UTOE	2011/12/15	02:07:00.827	31	36	03.26826	130	41	23.06140	123.8	Current: S4
UTKE	2011/12/15	02:12:00.696	31	36	13.07629	130	41	18.81340	136.2	Current: S5
KMME	2011/12/15	01:17:00.718	31	36	34.75781	130	41	07.51750	149.8	Current: S6
KOME	2011/12/15	00:17:00.675	31	36	44.83371	130	41	00.26640	143.0	Current: S7. Estimated shot time because shot mark failed.
FKRE	2011/12/15	00:07:00.918	31	37	06.47852	130	40	39.57080	91.9	Current: S8
WIZE	2011/12/15	01:07:00.488	31	37	38.20450	130	40	34.70600	32.9	Current: S9
UR2E	2011/12/15	01:22:00.773	31	36	13.35456	130	42	26.09970	36.4	Current: S10. The alternative of the shot URAE
URNE	2011/12/15	00:22:00.573	31	36	24.00011	130	41	43.28160	91.2	Current: S11
SHRE	2011/12/15	00:27:00.065	31	36	30.90127	130	39	54.46260	315.6	Current: S12
FTME	2011/12/15	01:27:00.274	31	36	25.77971	130	39	28.38960	328.6	Current: S13
KBNE	2011/12/15	02:22:00.246	31	36	17.76951	130	38	18.21280	368.3	Current: S14

Shot points 2009 -2011

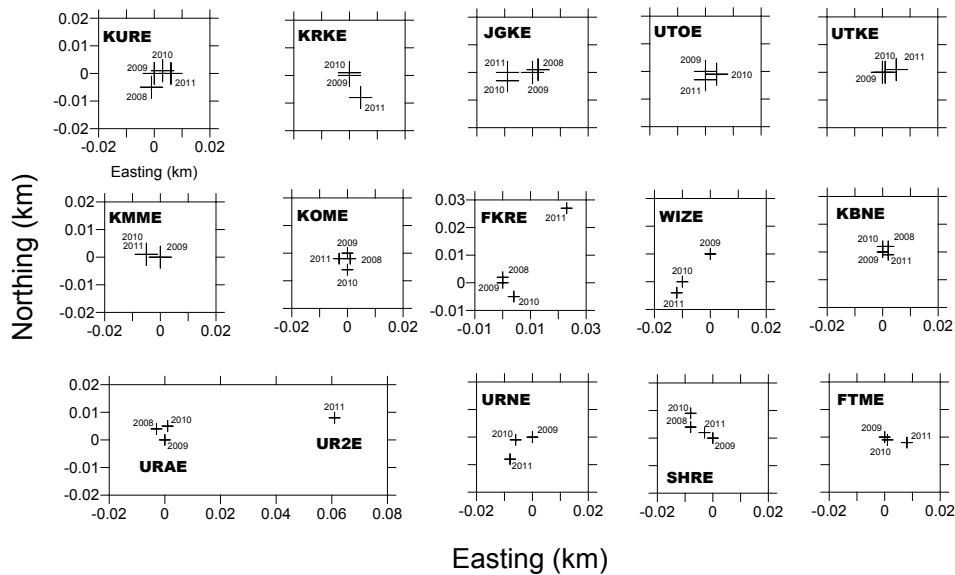


Fig. 3 Relative distribution of the shot points to 2009's in each site.

Table 2 Relocated stations.

Station	Latitude (WGS84)			Longitude (WGS84)			Altitude (m)	Note
	Deg	Min	Sec	Deg	Min	Sec		
A 017	31	35	18.12316	130	42	09.03814	85	Same location as 2009's station
A 018	31	35	19.75844	130	42	09.04624	82	Same location as 2009's station
A 019	31	35	21.49372	130	42	08.77523	85	Same location as 2009's station
X 106 A	31	37	24.13791	130	40	41.11230	65	
X 035 B	31	36	25.50695	130	39	43.42174	330	Same location as 2009's station
X 036 B	31	36	25.82079	130	39	47.14808	324	Same location as 2009's station
X 037 B	31	36	24.89048	130	39	48.82866	325	Same location as 2009's station
X 038 B	31	36	27.03211	130	39	50.99754	331	Same location as 2009's station
X 043 B	31	36	35.61367	130	40	02.43460	313	
X 044 B	31	36	37.00491	130	40	05.04017	315	
X 046 B	31	36	38.19427	130	40	10.72731	318	Same location as 2009's station
X 055 B	31	36	46.21210	130	40	47.04244	177	
X 056 B	31	36	44.67751	130	40	48.92997	177	
X 057 B	31	36	43.31768	130	40	50.85856	171	
X 058 B	31	36	42.31210	130	40	55.03959	155	
X 059 B	31	36	43.13110	130	40	57.74111	156	
X 060 B	31	36	44.10452	130	41	00.50577	144	
X 078 B	31	36	24.04448	130	41	44.06899	91	Reference: GEONET benchmark (960720)
X 095 B	31	36	12.72029	130	42	25.48129	41	Reference: GEONET benchmark (960720)



Fig. 4 The shot records of the 2011 experiment along the lines NS (KURE-WIZE) and EW (KBNE-UR2E). 2-8Hz band-pass filtered. A fan below the first sections indicates apparent velocity, 8, 4, 2, 1, 0.5, and 0.3 km/s, towards the vertical.

一発破点を用いた繰り返し地震探査実験を実施している(筒井ら, 2010; 2011)。繰り返し地震探査実験では合計 14 ケ所のショットポイントと 252 点の臨時観測点で構成された 2 本の測線で観測を行っている (Fig. 2)。観測機器および発破薬量はこれまで行われた 2 回の観測と同一仕様のものを用いた。すべての震源にはダイナマイト (20kg) を使用した。臨時観測点には固有周波数 4.5Hz の上下動地震計とデータロガー LS-8200SD とを用いた。

展開した臨時観測点 252 点中、データが回収できた観測点は 251 点でデータ回収率は 99.6% であった。

各ショットポイントの座標と発震時刻を Table 1 に整理して示す。各発震サイトにおける 2008 年以降 2011 年観測までの発震点位置を Fig. 3 に示す。URAE/UR2E 以外は 20m 以内の近傍で発震を行った。UR2E は URAE の代わりの発震点である。発破作業の詳細仕様は筒井ら (2011) と同一である。

9 割以上の観測点は昨年と同一の場所に復元された。一部を除き観測点座標は筒井ら (2011) と同一である。筒井ら (2011) のそれから変更された観測点の名称と座標とを Table. 2 に示す。

3. 観測記録

2011 年観測によって得られた記録を Fig. 4 に示す。Fig. 4 では正極性を黒く塗りつぶしている。これまでの観測に比べて、2011 年観測では背景の火山性微動レベルが上昇しており、遠方における S/N 比が若干悪くなっている傾向がある。発震後 10 ~ 13 秒の区間のコーダ部分を用いて決定した 2009 年観測に対する振幅比を Table 3 最左列に示す。

4. 参照基準記録

構造の時間変化を議論するための準備として、背景構造の応答にあたる参照基準記録を得る必要がある。参照基準記録として 2 つの方法が考えられる。一つは複数年の観測記録の平均を用いる方法、もう一つは 2008 年観測の観測記録単体を用いる方法である。前者の方法は毎年の観測記録のうち再現性のあるイベントが強調されるという利点があるが、重合の対象とする期間のとり方によってはバイアスが含まれる可能性もある。一方、後者の方法は基準と

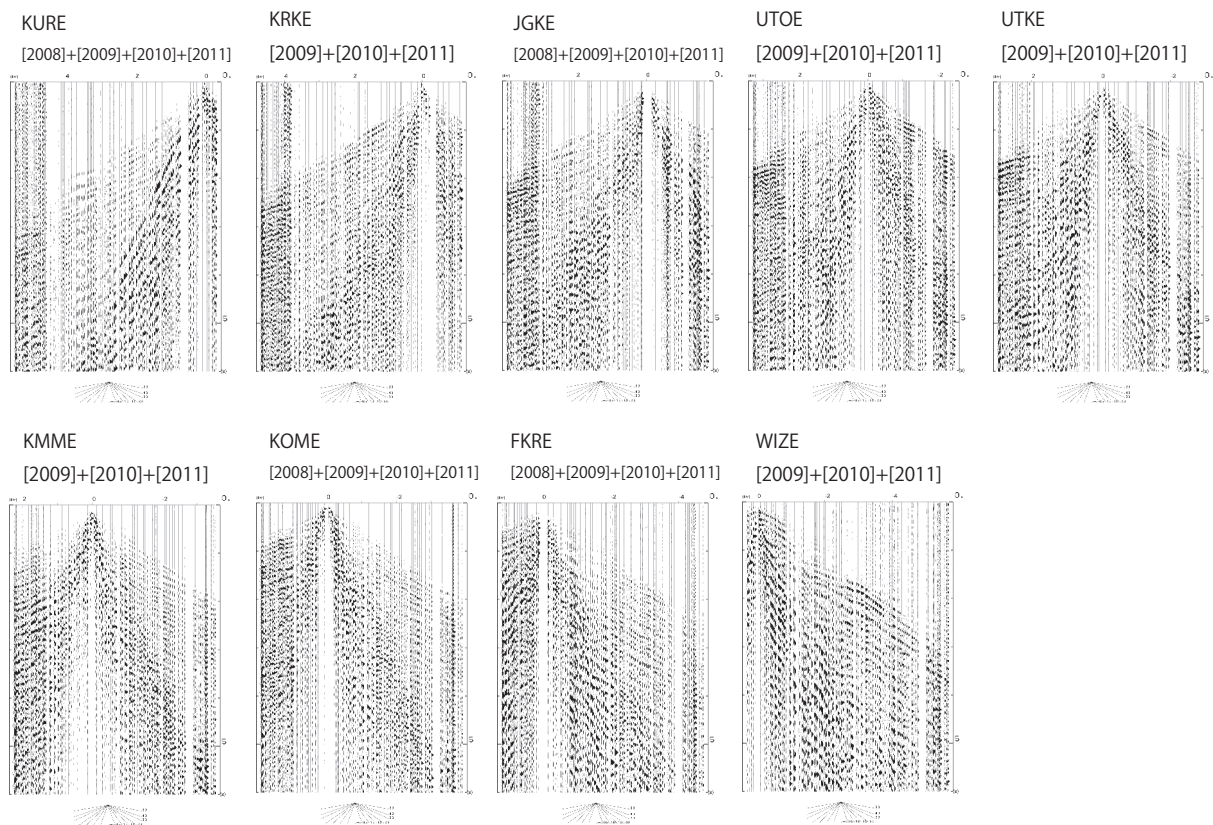


Fig. 5 The reference seismograms along the line NS. 2-8Hz band-pass filtered.

Table 3 The statistics. The amplitude ratio to the 2009's shot records, the annual variations of correlation to the 2009's seismograms, and the annual variation of correlation to the reference seismograms.

Shot	Amp. ratio to 2009			Correlation to 2009			Correlation to the reference.			
	2008	2010	2011	2008	2010	2011	2008	2009	2010	2011
KURE	0.71	0.88	0.82	0.63	0.79	0.49	0.69	0.91	0.92	0.74
KRKE	-	1.01	1.17	-	0.88	0.70	-	0.83	0.85	0.72
JGKE	0.79	1.13	1.21	0.34	0.74	0.61	0.55	0.81	0.84	0.82
UTOE	-	1.11	1.03	-	0.79	0.69	-	0.88	0.90	0.84
UTKE	-	1.07	1.01	-	0.86	0.74	-	0.89	0.93	0.82
KMME	-	1.00	1.06	-	0.84	0.83	-	0.94	0.93	0.93
KOME	0.51	1.49	1.36	0.45	0.81	0.80	0.37	0.89	0.95	0.94
FKRE	1.76	0.93	1.68	0.52	0.75	0.25	0.49	0.32	0.36	0.69
WIZE	-	0.80	0.58	-	0.54	0.33	-	0.83	0.89	0.71
URAE	18.58	1.19	-	0.20	0.89	-	0.46	0.87	0.90	-
UR2E	-	-	1.09	-	-	0.26	-	-	-	0.29
URNE	-	1.07	1.02	-	0.86	0.76	-	0.93	0.93	0.90
SHRE	0.94	1.10	1.20	0.40	0.71	0.73	0.76	0.80	0.82	0.73
FTME	-	0.82	0.54	-	0.90	0.63	-	0.96	0.96	0.63
KBNE	0.71	1.33	1.11	0.51	0.67	0.58	0.71	0.75	0.90	0.81

なる記録の取得時点が明確であるのに対して、発震時に回避できなかった火山性震動現象が記録に紛れ込んでいる場合には発破記録の後続波形との区別が難しいという問題点がある。さらに Table 3 中央列に示すように、経年とともに 2009 年記録に対する相関が低下する傾向が見られる。この理由により複数年観測の記録を重合した結果を参照基準記録として用いる事にする。

観測記録から導かれた参照基準波形を Fig. 5 に示す。Fig. 5 では正極性を黒く塗りつぶしている。Fig.

5 と Fig. 4 の対応する発震点の記録を比較すると、期待通り Fig. 5 のほうが S/N 比の改善が見られる。参照基準記録に対する各年観測記録のコヒーレンスを Table 3 最右列に示す。参照基準記録を用いる事で比較的良好なコヒーレンス値を得られることを示しており、単年記録を用いる場合より良好な結果が期待できる。

なお、参照基準波形の作成にあたり、2008 年以降の 4 年分を重合したのは 6 発破点 (KURE, JGKE, KOME, FKRE, SHRE, KBNE) に対する全記録

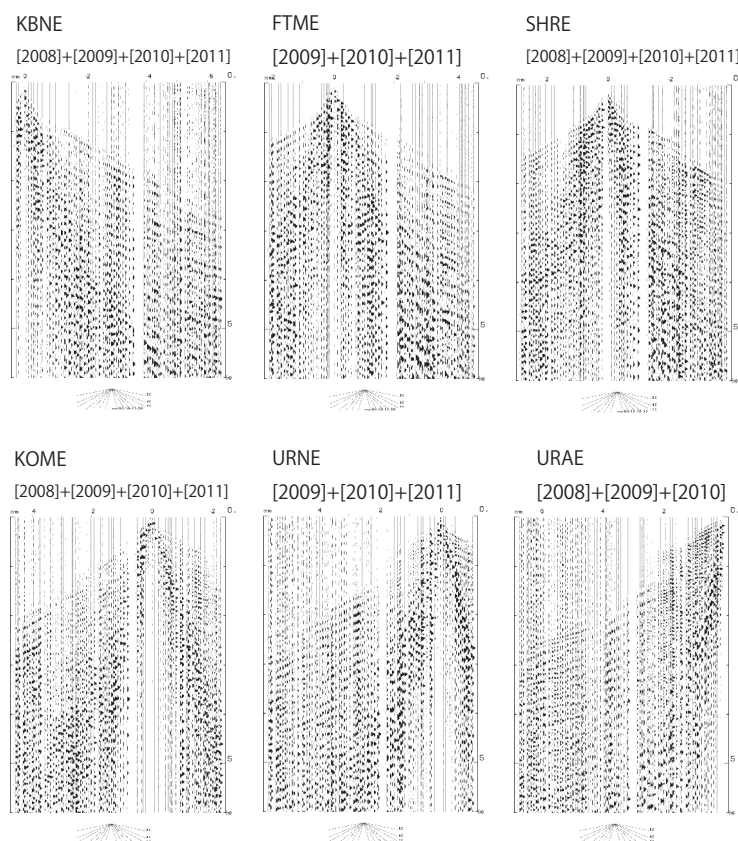


Fig. 5 Continued. Line EW.

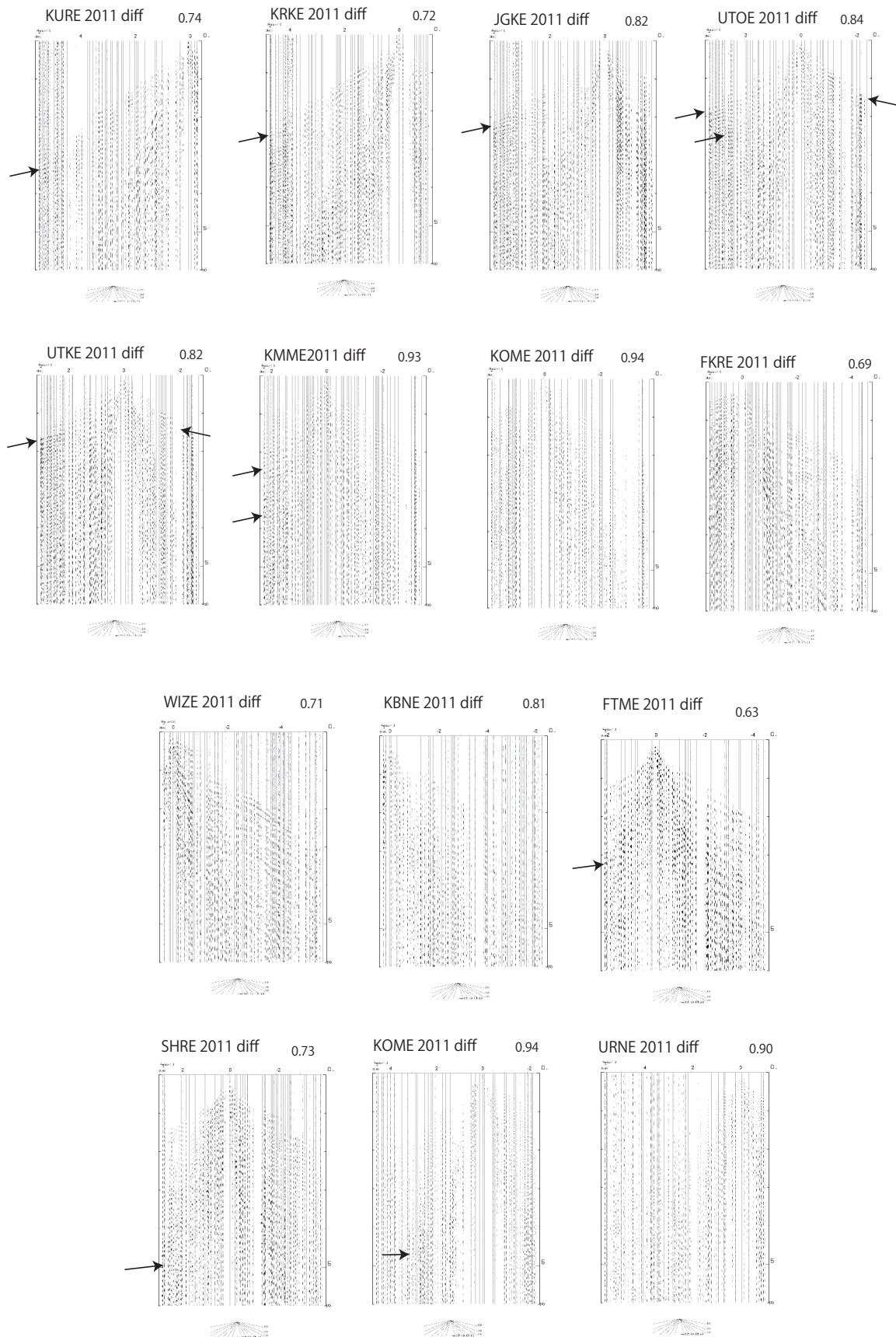


Fig. 6 The differential seismograms for 2011's seismograms along the lines NS (KURE-WIZE) and EW (KBNE-URNE). The arrows mark clear later phase changes with large apparent velocity. The values at the shoulder of each panel are the correlation coefficient of the rightmost column in Table 3.

で、2009年以降の3年分を重合したのは7発破点(KRKE, UTOE, UTKE, KMME, WIZE, URNE, FTME), 2008年から2010年までの3年分を重合したのはURAEの1発破点であった。

5. 差分記録

2011年観測のそれぞれの測線上発破に対する差分記録を Fig. 6 に示す。また、もう一方の測線上で実施された発破(ファンシューティング)に対する差分記録の代表例を Fig. 7 に示す。Fig. 6 および 7 はこれ以前の図とは異なり負極性を黒く塗りつぶして表示している。Table 3 最右列で参照基準記録に対して0.9以上の相関係数を示す場合は良好な差分記録の得られていることが示されている。Fig. 6 および 7 では差分記録で認められる明瞭なイベントのうち、反射波に相当する見かけ速度を示しているものを矢印で示す。

Fig. 7 の発破 KBNE を南北測線でとらえた記録では震源距離 5.3-6km の区間の後続相が年とともに変化していることがわかる。2009年の差分記録では

走時4秒付近の差分振幅が大きくなっており、この部分の見かけ速度はその周囲のノイズに比べて大きいように見える。2010年の差分記録では差分振幅が大きくなる場所は見つけれない。

差分振幅に表れた変化が、たまたまその記録に含まれている過渡的な振動(たとえば、火山性地震あるいは火山性微動等)の寄与でないことを確かめるために、ほぼ同じ経路を逆にたどる発破 JGKE に対して測線 EW の西端部で得られた差分波形の対応する年のもの(Fig. 7 下段)を調べてみると、やや不明瞭であるが見かけ速度の高い差分振幅の並びを同じ走時に見いだすことができる。このことからこれらの差分振幅の変化は実際の地下構造の変化を反映している可能性が高い。この大きな差分振幅が反射であるとすると、このような特徴を示す記録は北岳北東山腹の下にある反射点を通してくる波線によるものであると推定される。

北岳北東山腹は井口ら(2011)のGPS観測によって最近の地盤変動源が推定されている場所であることから、このような場所を通過する地震波形の

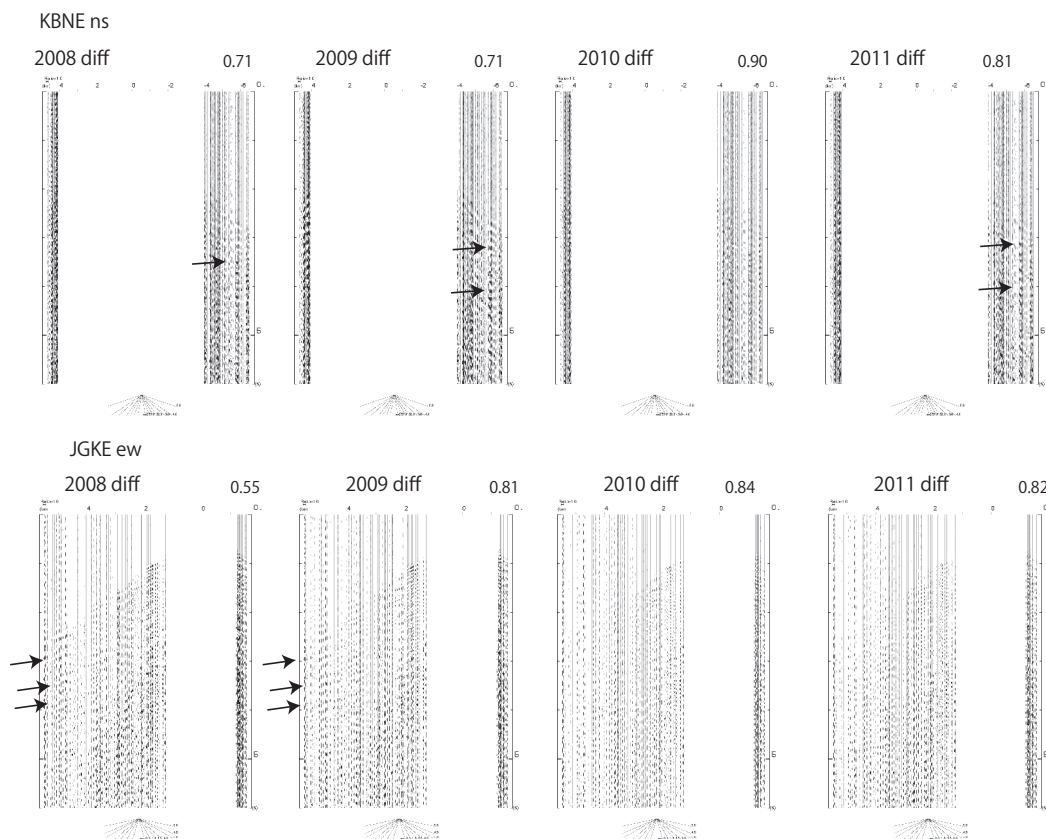


Fig. 7 Examples of differential seismograms along another line in fan-shooting. The arrows mark clear later phase changes with large apparent velocity.

変化は火山活動に伴う何らかの地下構造変化を反映している可能性が大きいと考えられる。

Fig. 7 に加えすべての差分記録で検出された見かけ速度の高い後続相部分の変化を、対応する波線の転向点として地図上にプロットしたものを Fig. 8 に示す。後続相変化に対応する転向点は桜島北部から北東部に集中する傾向がある。

6. 差分記録反射断面

Fig. 6 に加えてすべての年次の測線上発破による東西測線差分記録に反射法解析を施し、差分反射断面を得た。差分反射断面は複数の差分記録を重ねる処理を行うことで、火山性微動および火山性地震の混入の影響の軽減と逆測線観測による再現性の向上を同時に実現できる。東西測線西部 (Line EW(W)) の差分記録反射断面を、その参照基準記録反射断面 (Tsutsui et al., in press) とともに Fig. 9 に示す。差分記録の処理手順および処理パラメータ、重合速度関数は Tsutsui et al. (in press) と同じものを用いた。

差分記録断面の色濃度で表示されている強度は、参照基準記録断面に対する反射強度の偏差を示している。参照基準記録断面の負極性の反射イベントの消長を記述する場合、差分記録断面上の正極性 (赤) は負極性イベントの相対的衰退を表す一方、青は負極性イベントの相対的発達を表している。差分記録断面における反射強度の消長は 2km 以深に現れており、特に 2~6km と 7~9km との2つの集中する領域が見受けられる。後者は煙突状構造を含む領域であることが注目される。

次に差分記録反射断面の特徴と解釈を Fig. 10 に示す。以下に負極性反射の消長に注目して観測年次ごとの変化を記述する。

2008 年は領域 4, 5a の負極性が発達していた。2009 年は領域 5b の負極性が発達し、領域 2 および 3, 5c の負極性が衰退した。2010 年は領域 3 および 4, 5b, 6 が発達した。衰退した領域は見当たらない。2010 年は全体的に負極性の発達が卓越しているうえに深さ 10km 付近の負極性の発達が注目される。2011 年は領域 5b は発達した状態を維持していたのに対して、領域 1, 3, 5b は衰退した。

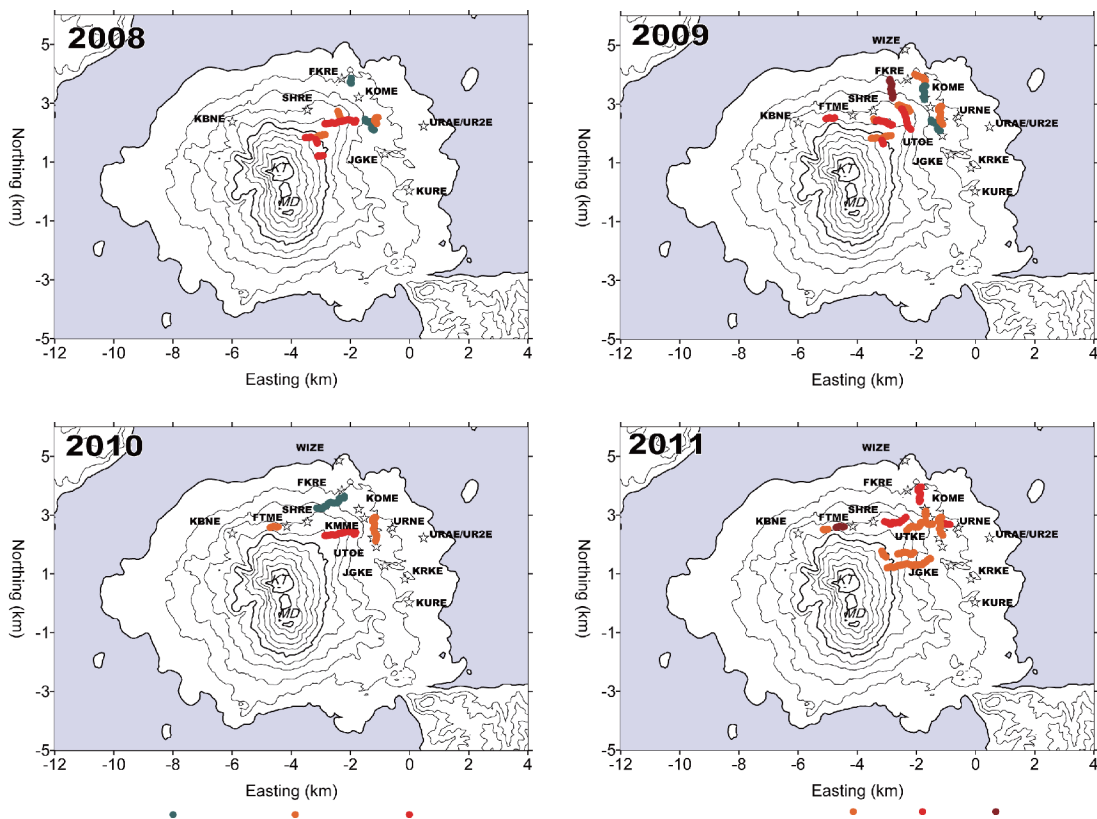


Fig. 8 Distribution of later phase changes. The solid circles are the depth points for the corresponding later phase changes. Solid green circles denote the range of 1 to 2.4km, Solid orange circles are the range of 2.4 to 5.8 km, red ones are the range 5.8 to 10.3 km, and brown ones ranges below 10.3 km.

7. 議論

7.1 差分反射断面の年次による発破点構成の差異の影響

反復観測では諸般の事情により発破点構成に差異が生じている。発破点構成の差異が差分断面に与え

る影響を以下で検討する。

東西測線西部の反射断面を構成する観測記録は6つの発破 KBNE, FTME, SHRE, KOMI, KMME, URAE で得られたもので、これを基本構成と呼ぶことにする。Fig. 9には差分記録断面を構成する観測記録の組み合わせが異なる年次(2008年, 2009年)が含まれる。2008年は先行観測であったので、差

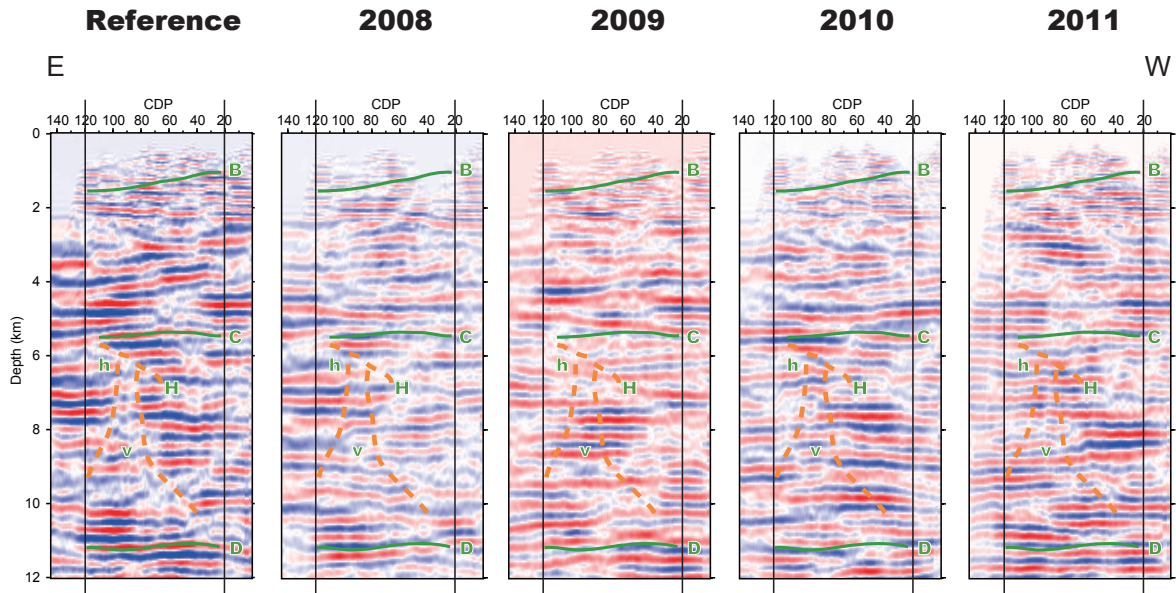


Fig. 9 The reference section (the leftmost, after Tsutsui et al., in press) and the differential seismic sections along the profile EW(W). CDP spacing is 37.8m and the migration is processed.

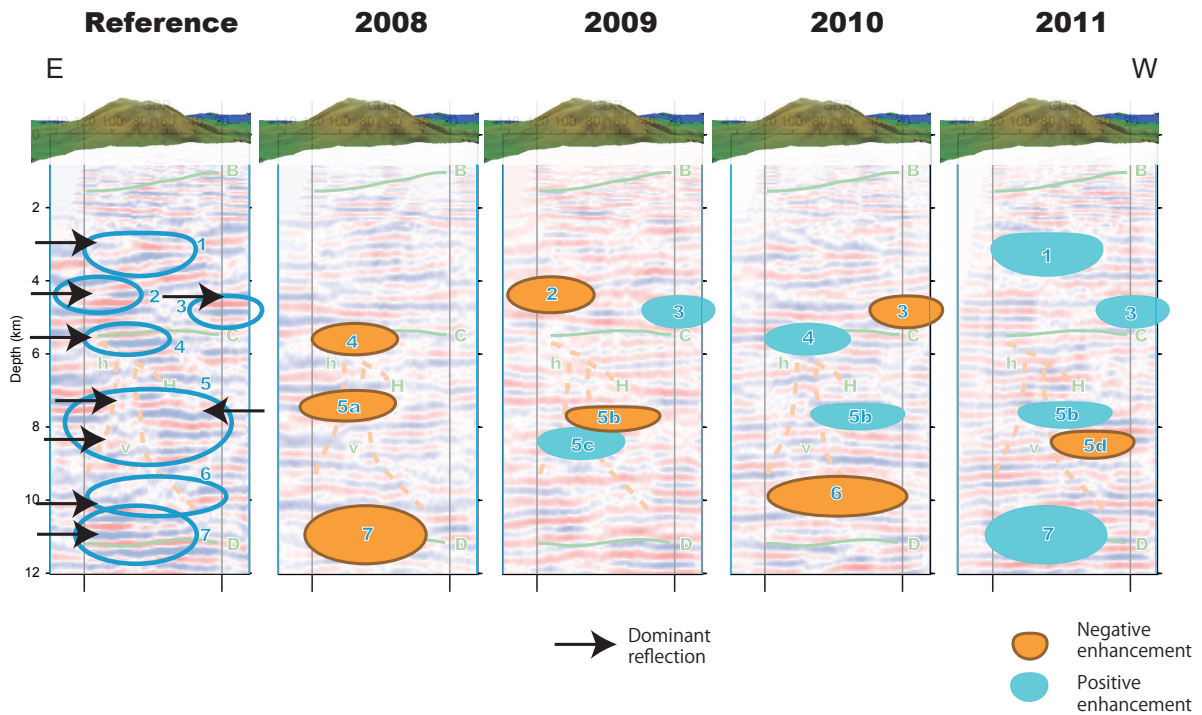


Fig. 10 An interpretation of the differential seismic sections. Orange ellipses indicate negative enhancement, and light blue ellipses indicate positive enhancement of seismic reflectivity.

分記録断面を構成する観測記録は4つの発破記録 KBNE, SHRE, KOME, URAE で、基本構成と比べて FTME および KMME が欠けた構成であった。これを2008年構成と呼ぶことにする。また2011年は基本構成に比べて URAE が欠けた構成であった。これを2011年構成と呼ぶことにする。発破点構成の差が差分記録反射断面に与える影響を検討するために、2009年断面を2008年構成で処理したものを Fig. 11(a) に、2010年断面を2011年構成で処理したものを Fig. 11(b) に示す。Fig. 11 に示された差分記録断面を、Fig. 9 の対応する断面と比較すると反射位相の強弱の位置は変わらないことがわかる。したがって観測記録構成の差による断面への影響は無いと考えてよい。したがって Fig. 9 の反射強度の消長は反射断面の発破点構成の差異によるものではない。

7.2 地震波反射の消長

次に時間変化歴という視点から差分記録断面を観察すると、深さ4km以深の変化は Fig. 1 の地盤変動観測結果と相関がある。Fig. 1 に示される地盤変動観測結果からは、2008年観測および2009年観測は単調な膨張期間に相当すること、2010年観測は引き続いて発生した収縮の後の停滞期間の初期に、2011年観測は引き続く停滞期間に対応している。井口ら(2011)によれば2008年から翌年にかけて

の単調な膨張傾向は南岳直下に向けたマグマ供給を示すとされるが、この時期に対応する差分反射断面の煙突状構造の周辺では2008年のそれより2009年のほうが浅いところで負極性が発達する傾向が見られる。一方、2010年末以降の停滞期では煙突状構造周辺における負極性の発達は見られない。負極性の発達した場所を上昇する低密度のマグマ頭部と解釈できるならば、差分反射断面の負極性の発達した場所の移動はマグマの移動を反映していると考えられる。

7.3 浅部の地震波反射の消長

Fig. 10 において2011年の差分記録断面の浅い領域1に明瞭な負極性の衰退が認められるが、Fig. 1 に示される数ヶ月スケールの地盤変動の推移とは整合性が無いように見受けられる。むしろこの傾向は山本ら(2012)が報告した北岳水準路線における沈降変化とよく対応しているようにみえる。該当する年の連続観測記録(井口ら, 2009; 筒井ら, 2010; 筒井ら, 2011)を調べると、2009年と2011年の記録では発破作業時間帯の直前2時間のうちに昭和火口からの爆発地震が観測されていた(Fig. 12)。

Iguchi (1994), および Tameguri et al.(2004) によれば山頂火口の爆発ではその瞬間に火口底から深さ2kmまでの領域で減圧が起きていると推定している。さらに井口ら(2010)では火口における爆発に

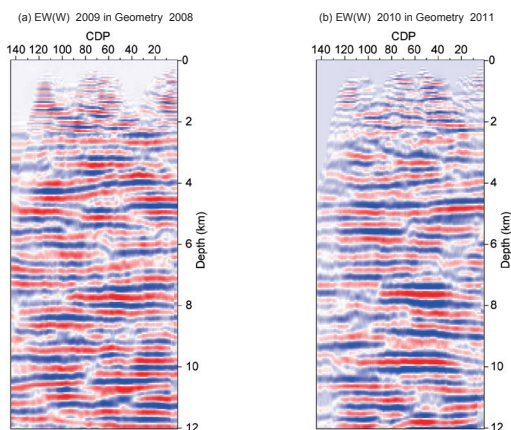


Fig. 11 Geometry effect test. a) 2009 diff. profile in the geometry 2008. b) 2010 diff. profile in the geometry 2011.

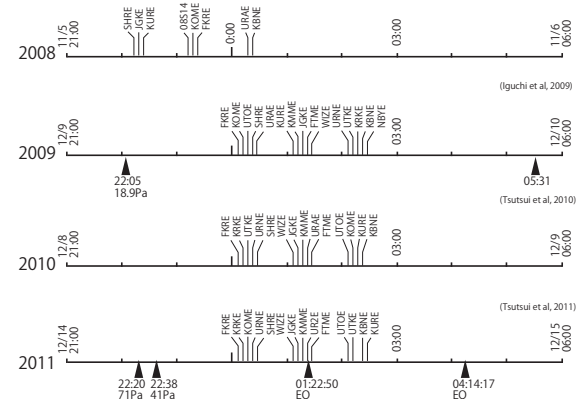


Fig. 12 Sequences of volcanic events and the shooting. The labeled thin lines are the shot times at the sites. The wedges are volcanic events, such as explosion or earthquakes. The label of the wedge denotes maximum amplitude of infrasonic wave.

伴ってより深い場所の圧力源も変動していることを指摘している。井口らの研究では球状圧力源を仮定しているが、等価な扁平楕円圧力源を考えることが可能であるならば、圧力変化に寄与する部分が測線下にまで広がっている可能性は否定できない。したがって領域1における負極性の衰退は、発破時間帯直前に昭和火口で発生した爆発にともなう減圧を反映している可能性がある。この推論が正しいとすれば、領域1を含む深さ3km付近の反射変化は数時間から数日の比較的短いサイクルで消長を繰り返す可能性がある。

7.4 今後の課題

今回の報告は桜島北部の東西測線および北東斜面に限定して検討を行った結果について述べた。今後、南北測線における反射断面の経年変化も同じ手法で検討を行う必要がある。

また、変化する反射の地震学的特性（周波数成分、振幅、変換波の発生強度）についても今後詳細な検討を行い、個々の変化の特徴とその変化を引き起こす要因について議論をすすめる必要がある。

さらに構造変化のサイクル時間が深さによって異なる可能性が指摘された。4km以深の領域に関しては数ヶ月スケールの地盤変動との関連が指摘された。桜島の現在の活動に関与するマグマの量的なスケールを把握するという観点から、変化を示す反射領域の広がりに関して今後調査検討する必要がある。

変化のサイクルが短い可能性がある深さ3km付近の構造変化と個々の爆発イベントの対応関係について興味を持たれる。活発な爆発活動を行う桜島において短期的な爆発予測に対する基礎研究という視点から今後も事例の蓄積が必要である。この深度は加茂ら(1980)が指摘した桜島直下の地震波異常減衰領域と一致することから、地震波異常減衰特性との関連も注目される。

8. まとめ

桜島火山において反復地震探査を行った。先行観測を含めて4回の反復観測を約1年間隔で実施したが、桜島北東部地下の地震反射応答が年とともに変化する事が明らかになった。地震反射応答の変化の

検出をするにあたり、年ごとの相関の劣化が波形比較の際の障害となっていたが、各年次の観測波形を重合することによって得られる参照基準波形を導入することで波形の相関を改良することができた。振幅を等化した単年度記録から参照基準記録を引き算することによって得られる差分波形を用いて、後続相の変化を評価した。その結果、後続相変化に対応する波線の転向点は桜島北東部に集中することが明らかになった。さらに桜島北部の測線で差分記録の反射法処理を行い、差分反射記録断面を得た。桜島北東部の反射応答の変化は、背景構造の顕著な反射イベントの変化である。反射の変化は深さ2～6kmに散在するほか、深さ7～10kmには密集する領域がある。

また4km以深の反射の変化は数ヶ月スケールの地盤変動との相関が認められるが、深さ3km付近の変化は火口で発生する爆発との関連が指摘され、深さによって地震波反射の変化の速さが異なる可能性がある。

謝辞

本稿で述べた観測を実施するにあたり、京都大学防災研究所附属火山活動研究センターの職員の皆様には様々な面でお世話をいただいた。また、測線およびその周辺の地元住民および関係各機関には格別のご高配をいただいた。本研究の経費の一部は地震・火山噴火予知研究経費「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」によった。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 井口正人・太田雄策・植木貞人・為栗 健・園田忠臣・高山鐵朗・市川信夫(2011): 2010年桜島火山活動を考える, 京都大学防災研究所年報, 第54号B, 171-183.
- 井口正人・横尾亮彦・為栗 健(2010): 桜島昭和火口噴火の規模について, 京都大学防災研究所年報, 第53号B, 233-240.
- 井口正人・為栗健・他82名(2009): 2008年桜島人工地震探査の目的と実施, 防災研究所年報, 第52号B, 293-307.
- 加茂幸介・西 潔・高山鐵朗・植木貞人(1980): 桜

- 島南方の地震活動と地震波異常伝搬域, 第3回桜島火山の集中総合観測 昭和55年5月 京都大学防災研究所附属桜島火山観測所発行, 11-15.
- 地質調査所 (1971): 爆破地震による地震波速度変化の観測 (第4回観測結果速報), 地震予知連絡学会会報 第6巻, 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), 地震予知連絡学会会報, 第16巻, 60-65.
- 筒井智樹・井口正人・為栗 健・他33名, (2011): 桜島火山における反復地震探査 (二回目), 京都大学防災研究所年報, 第54号B, 195-208.
- 筒井智樹・井口正人・為栗 健・他33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, 241-259.
- 山本圭吾・園田忠臣・高山鐵朗・市川信夫・大倉敬宏・吉川 慎・井上寛之・松島 健・内田和也 (2010): 桜島火山周辺における水準測量 (2009年11月および2010年4月), 京都大学防災研究所年報, 第53号B, 227-232.
- 山本圭吾・園田忠臣・高山鐵朗・市川信夫・大倉敬宏・吉川 慎・井上寛之・横尾亮彦・松島 健・内田和也・中本真美 (2011): 桜島火山周辺における水準測量 (2010年11月), 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 2010年, 29-34.
- 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・堀田耕平・松島健・内田和也・中本真美 (2012): 水準測量による桜島火山の地盤上下変動 (2010年11月~2011年11月), 京都大学防災研究所年報, 第55号B, 155-161.
- Anggono, T., Nishimura, T., Sato, H., Ueda, H., 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, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 247-248, 93-107.
- Eto, T., Takayama, T., Yamamoto, K., Hendrasto, M., Miki, D., Sonoda, T., Matsushima, T., Uchida, K., Yakiwara, H., Wan, Y., Kimata, F., Miyazima, R., and Kobayashi, K. (1997): Re-upheaval of the ground surface at the Aira caldera, - December 1991 - October 1996 (in Japanese with English abstract), Bulletin Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, No. 40 B-1, 49-60.
- Iguchi, M., Ishihara, K., Surono, Hendrasto, M., (2011): Learn from 2010 Eruption s at Merapi and Sinabung Volcanoes in Indonesia, Anns. Disas. Prev. Res. Inst. Kyoto University, No. 54B, 185-194.
- Iguchi, M., (1994): A vertical expansion source model for the mechanisms of earthquakes originated in the magma conduit of an andesitic volcano: Sakurajima, Japan. KAZAN, Vol. 39, 49-67.
- 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, 343-356.
- Nishimura, T., Tanaka, S., Yamawaki, T., Yamamoto, H., Sano, T., Sato, M., Nakahara, H., Uchida, N., Hori, S., 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, 57, 491-505.
- Poupinet, G., Elisworth, W. L., Frechet, J. (1984): Monitoring Velocity Variations in the Crust Using Earthquake Doublets: An Application to the Calaveras Fault, California, Journal of Geophysical Research, Vol. 89, 5719-5731.
- Tameguri, T., Iguchi, M., Ishihara, K., (2002): Mechanism of Explosive Eruptions from Moment Tensor Analyses of Explosion Earthquakes at Sakurajima Volcano, Japan, KAZAN, Vol. 47, 197-216.
- Tsutsui, T., Yagi, N., Iguchi, M., Tameguri, T., Mikada, H., Onishi, K., Miyamachi, H., Nishimura, T., Morita, Y., Watanabe, A. (2013): Structure of northeastern Sakurajima, south Kyushu, Japan, revealed by seismic reflection survey, KAZAN, Vol. 58, in press.

The Repeated Seismic Survey 2011 in Sakurajima Volcano, South Kyushu, Japan. The third round.

Tomoki TSUTSUI¹⁾, Masato IGUCHI²⁾, Akira SUGAI³⁾, Hiromitsu OHSHIMA⁴⁾, Tokumitsu MAEKAWA⁴⁾, Sadato UEKI⁵⁾, Mare YAMAMOTO⁵⁾, Kenji NOGAMI⁶⁾, Minoru TAKEO⁷⁾, Takao OHMINATO⁷⁾, Jun OIKAWA⁷⁾, Atsushi WATANABE⁷⁾, Haruhisa NAKAMICHI⁸⁾, Shinichiro HORIKAWA⁸⁾, Takahiro OHKURA⁹⁾, Shin YOSHIKAWA⁹⁾, Tetsuro TAKAYAMA²⁾, Tadaomi SONODA²⁾, Hiroshi SHIMIZU¹⁰⁾, Takeshi MATSUSHIMA¹⁰⁾, Hiroki MIYAMACHI¹¹⁾, Hiroshi YAKIWARA¹¹⁾, Shuichiro HIRANO¹¹⁾, Kazuki OKAMOTO³⁾, Yoshihisa KATAOKA³⁾, Shinichi MATSUSUE³⁾, Norio KOKUBO³⁾, Taisuke KOHNO³⁾, Junichiro MASAKI³⁾, Masaki NAKAHASHI³⁾, Shingo UTSUNOMIYA³⁾, Yoshitomo IKOMA³⁾, Mayumi AKUTAGAWA³⁾, Takaaki MORI⁴⁾, Higashi UCHIDA⁵⁾, Karim PACHECO⁵⁾, Toshiaki TANAKA¹⁾, Izumi SATO⁶⁾, Rintaro KAMATA⁷⁾, Yusuke YAMASHITA¹⁰⁾, Natsumi YUMITORI¹⁰⁾, Kengo IWAMOTO¹¹⁾, Shun SHIMOSAKO¹¹⁾

- 1) Graduate School of Technology and Resource Science, Akita University
- 2) Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University
- 3) Japan Meteorological Agency
- 4) Graduate School of Science, Hokkaido University
- 5) Graduate School of Science, Tohoku University
- 6) Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology
- 7) Earthquake Research Institute, University of Tokyo
- 8) Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University
- 9) Graduate School of Science, Kyoto University
- 10) Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University
- 11) Graduate School of Science, Kagoshima University"

Synopsis

The third round of repetitive seismic experiment in Sakurajima Volcano on 2011 and the analysis of compiled data set are presented. The repetitive surveys have been carried out since 2009 after the pilot survey on 2008. Two lines, NS and EW were deployed in the eastern foot and the northern flank of the volcano, respectively. The survey lines include 14 shot points and 252 temporary stations, those are the same specification as those of the previous observations. More than 90% stations are placed at the same place with the previous observations. Data retrieval was successful and 99.6% of stations were retrieved. Reference seismograms are derived through stacking the single-year seismograms and the differential seismograms are also calculated with the subtraction of those single-year seismograms. Obvious changes in the later phases are found in these differential seismograms and the corresponding turning points concentrates in the northern to northeastern Sakurajima. Differential sections are derived from the differential seismograms. Changes in negative reflections are found in the sections and deeper changes below 4km in the depth are consistent with development of the edifice inflation.

Keywords: Sakurajima, Geophysical survey, Seismic survey, Magma