

桜島火山における反復地震探査 (2012 年観測)

The Repeated Seismic Survey 2012 in Sakurajima Volcano, South Kyushu, Japan

The Fourth Round

筒井智樹⁽¹⁾・井口正人・為栗 健・渡邊幸弘⁽²⁾・大島弘光⁽³⁾・植木貞人⁽⁴⁾・
山本 希⁽⁴⁾・豊国源知⁽⁴⁾・野上健治⁽⁵⁾・大湊隆雄⁽⁶⁾・及川 純⁽⁶⁾・市原
美恵⁽⁶⁾・中道治久⁽⁷⁾(現在 京大防災研)・大倉敬宏⁽⁸⁾・清水 洋⁽⁹⁾・宮町宏
樹⁽¹⁰⁾・八木原 寛⁽¹⁰⁾・園田忠臣・高山鐵朗・渡邊篤志⁽⁶⁾・堀川信一郎⁽⁷⁾・
吉川 慎⁽⁸⁾・平野舟一郎⁽¹⁰⁾・加藤幸司⁽²⁾・池田啓二⁽²⁾・松末伸一⁽²⁾・芥
川真由美⁽²⁾・小窪則夫⁽²⁾・宇都宮真吾⁽²⁾・中橋正樹⁽²⁾・北川弘樹⁽⁴⁾・角
田 理⁽⁴⁾・雨宮 裕⁽¹⁾・増田孔明⁽⁶⁾・松山諒太郎⁽⁶⁾・山下裕亮⁽⁹⁾・福井
海世⁽⁹⁾・米良諒麻⁽¹⁰⁾

Tomoki TSUTSUI⁽¹⁾, Masato IGUCHI, Takeshi TAMEGURI, Yukihiro WATANABE⁽²⁾, Hiromitsu
OSHIMA⁽³⁾, Sadato UEKI⁽⁴⁾, Mare YAMAMOTO⁽⁴⁾, Genchi TOYOKUNI⁽⁴⁾, Kenji NOGAMI⁽⁵⁾,
Takao OHOMINATO⁽⁶⁾, Jun OIKAWA⁽⁶⁾, Mie ICHIHARA⁽⁶⁾, Harushisa NAKAMICHI⁽⁷⁾(Present:
DPRI, Kyoto University), Takahiro OHKURA⁽⁸⁾, Hiroshi SHIMIZU⁽⁹⁾, Hiroki MIYAMACHI⁽¹⁰⁾, Hiroshi
YAKIWARA⁽¹⁰⁾, Tadaomi SONODA, Tetsuro TAKAYAMA, Atsushi WATANABE⁽⁶⁾, Shinichiro
HORIKAWA⁽⁷⁾, Shin YOSHIKAWA⁽⁸⁾, Shuichiro HIRANO⁽¹⁰⁾, Koji KATO⁽²⁾, Keiji IKEDA⁽²⁾,
Shinichi MATSUSUE⁽²⁾, Mayumi AKUTAGAWA⁽²⁾, Norio KOKUBO⁽²⁾, Shingo UTSUNOMIYA⁽²⁾,
Masaki NAKAHASHI⁽²⁾, Hiroki KITAGAWA⁽⁴⁾, Tadashi SUMIDA⁽⁴⁾, Yutaka AMEMIYA⁽¹⁾, Komei
MASUDA⁽⁶⁾, Ryotaro MATSUYAMA⁽⁶⁾, Yusuke YAMASHITA⁽⁹⁾, Miyo FUKUI⁽⁹⁾, and Ryoma
MERA⁽¹⁰⁾

- (1) 秋田大学大学院
- (2) 気象庁
- (3) 北海道大学大学院
- (4) 東北大学大学院
- (5) 東京工業大学
- (6) 東京大学地震研究所
- (7) 名古屋大学大学院
- (8) 京都大学大学院
- (9) 九州大学大学院
- (10) 鹿児島大学大学院

- (1) Graduate school, Akita University
- (2) Japan Meteorological Agency
- (3) Graduate school, Hokkaido University
- (4) Graduate school, Tohoku University
- (5) VFRC, Tokyo Institute of Technology
- (6) ERI, University of Tokyo
- (7) Graduate school, Nagoya University
- (8) Graduate school, Kyoto University
- (9) Graduate school, Kyushu University
- (10) Graduate school, Kagoshima University

Synopsis

The fourth round of repetitive seismic experiment in Sakurajima Volcano on 2012 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 273 temporary stations, those are the same specification as those of the previous observations. More than 90% of stations are placed at the same points with the previous observations. Data retrieval was successful and 98.5% 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. Differential sections are derived from the differential seismograms. Some systematic changes in reflectivity are found in the sections and deeper changes below 3km in the depth are consistent with development of the edifice inflation. Changes in the shallow part can be correlated with explosions at the crater and can alternate in short cycle.

キーワード : 桜島火山, 構造探査, 構造変化, マグマ供給系

Keywords: Sakurajima, Geophysical survey, Structure evolution, Magma system

1. はじめに

本研究の対象とする桜島火山は九州南部に位置する日本でもっとも活動的な火山のひとつである。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, 2012)。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もし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。桜島火山では Eto et al. (1997); 山本ら (2010; 2011; 2012) が水準測量を精力的に行い、桜島に供給されるマグマの動向を詳細に論じている。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、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井口ら (2011) は指摘している。同様の状況はインドネシアのムラピ火山の 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。

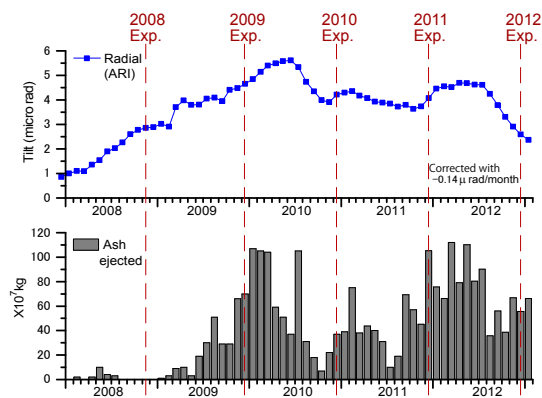


Fig. 1 Radial tilt at the station ARI is the top panel (by courtesy of Osumi office, Road, Water and Disaster Management Bureau, MLIT). Ash ejection is the bottom panel (After Iguchi, 2012). The broken lines indicate the rounds of the seismic experiments.

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、Anggono et al. (2012) が三宅島 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結果の検討を行い、地熱流体生産に伴う地下構造変化を評価している。

このような背景のもとで、本研究では日本国内でもっとも活動度の高い桜島火山をテストフィールドとし、マグマの移動に伴う地震波反射構造の変化の検出とその推移の追跡を目的として、先行観測 1 回に加えて 4 回の繰り返し反射法地震探査を実施した。

2. 2012 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一発

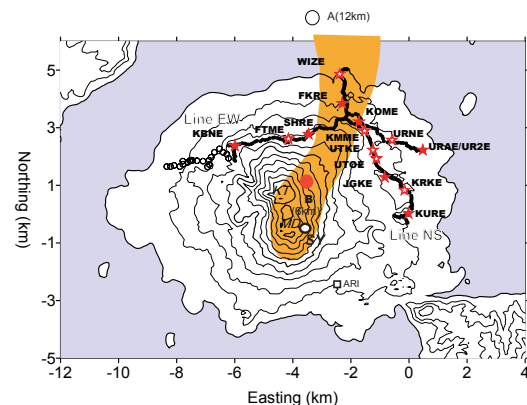


Fig. 2 The temporary seismic network of this project. The solid circles are the regular stations, the open circles are the expanded line in this round, and the stars are the shot points. The contours are every 100 meter in altitude. The open circle A and the red circle B are estimated pressure sources after Iguchi et al. (2011). KT; Kita-dake, MD; Minami-dake, SY; Showa crater. ARI; Arimura station

Table 1 Shot points.

Shot point	Shot time		Latitude(WGS84)			Longitude(WGS84)			Surface altitude (m)	Note
	Day	Time	Deg	Min	Sec	Deg	Min	Sec		
KURE	2012/12/13	02:17:00.942	31	35	01.57920	130	42	05.26680	66.2	Current: S1
KRKE	2012/12/13	00:12:00.192	31	35	27.42360	130	42	00.06840	89.1	Current: S2
JGKE	2012/12/13	01:13:10.368	31	35	42.46080	130	41	33.79560	102.7	Current: S3
UTOE	2012/12/13	02:07:00.396	31	36	03.23640	130	41	23.09640	123.9	Current: S4
UTKE	2012/12/13	02:12:00.671	31	36	13.05360	130	41	18.70440	136.3	Current: S5
KMME	2012/12/13	01:17:30.120	31	36	34.66440	130	41	07.59480	149.8	Current: S6
KOME	2012/12/13	00:17:00.782	31	36	44.83080	130	41	00.46320	144.7	Current: S7
FKRE	2012/12/13	00:07:00.122	31	37	05.95920	130	40	38.93160	93.3	Current: S8
WIZE	2012/12/13	01:33:39.103	31	37	38.08560	130	40	34.74840	33.3	Current: S9
UR2E	2012/12/13	01:22:01.056	31	36	13.42080	130	42	26.12520	35.6	Current: S10
URNE	2012/12/13	00:23:47.936	31	36	24.09480	130	41	43.63800	91.3	Current: S11
SHRE	2012/12/13	00:26:58.510	31	36	30.89160	130	39	54.48600	314.9	Current: S12
FTME	2012/12/13	01:26:58.576	31	36	25.83360	130	39	28.23480	328.0	Current: S13
KBNE	2012/12/13	02:21:58.408	31	36	17.86680	130	38	18.24000	368.4	Current: S14

Shot points (2008-2012)

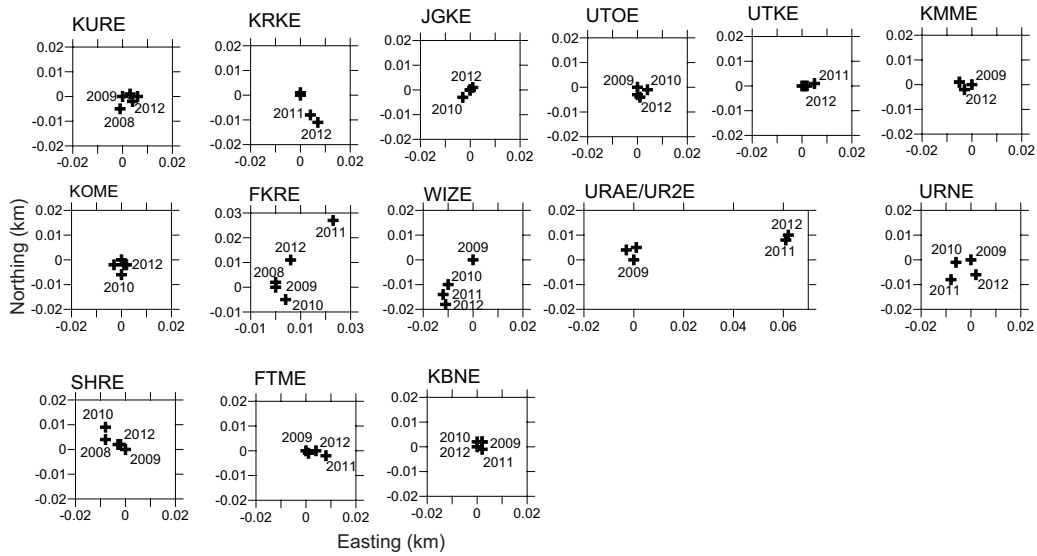


Fig. 3 Relative distribution of the shot points respective to 2009's in each site. The origin of the each panel is the 2009's shot point.

Table 2 Station list. New and relocated stations are listed.

Station	Latitude(WGS84)			Longitude(WGS84)			Altitude (m)	Note
	Deg.	Min.	Sec.	Deg.	Min.	Sec.		
M001	31	36	08.4960	130	38	07.5840	255	New station
M002	31	36	10.4040	130	38	02.9040	215	New station
M003	31	36	14.5080	130	37	58.0080	192	New station
M004	31	36	10.5840	130	37	51.3840	190	New station
M005	31	36	05.0040	130	37	47.2080	192	New station
M006	31	36	01.5840	130	37	44.5080	189	New station
M007	31	36	00.6120	130	37	36.5160	157	New station
M008	31	36	01.1160	130	37	28.4160	129	New station
M009	31	36	01.4040	130	37	22.5120	110	New station
M010	31	36	01.8000	130	37	20.6040	105	New station
M011	31	36	01.0080	130	37	19.0920	110	New station
M012	31	35	59.3880	130	37	16.7160	87	New station
M013	31	36	00.6120	130	37	09.9840	75	New station
M014	31	35	57.0840	130	37	10.2000	69	New station
M015	31	35	54.4920	130	37	06.0960	58	New station
M016	31	35	55.7880	130	36	58.6080	45	New station
M017	31	35	54.4920	130	36	54.0000	36	New station
M018	31	35	54.4920	130	36	49.1040	28	New station
M019	31	35	56.7960	130	37	44.6880	180	New station
M020	31	35	54.2040	130	37	42.3120	181	New station
M021	31	36	03.8880	130	38	09.8160	305	New station
X100A	31	37	15.7235	130	40	41.3047	85	2m northward shift from the previous year's
X122A	31	37	43.2339	130	40	39.7044	19	The same location as 2009's
X120A	31	37	40.3950	130	40	36.9847	25	The same location as 2010's
X094A	31	37	08.0716	130	40	43.9027	95	Elevated c.a. 1m from 2009's by accumulation
X095A	31	37	08.1762	130	40	42.2727	94	Elevated c.a. 2m from 2009's by accumulation

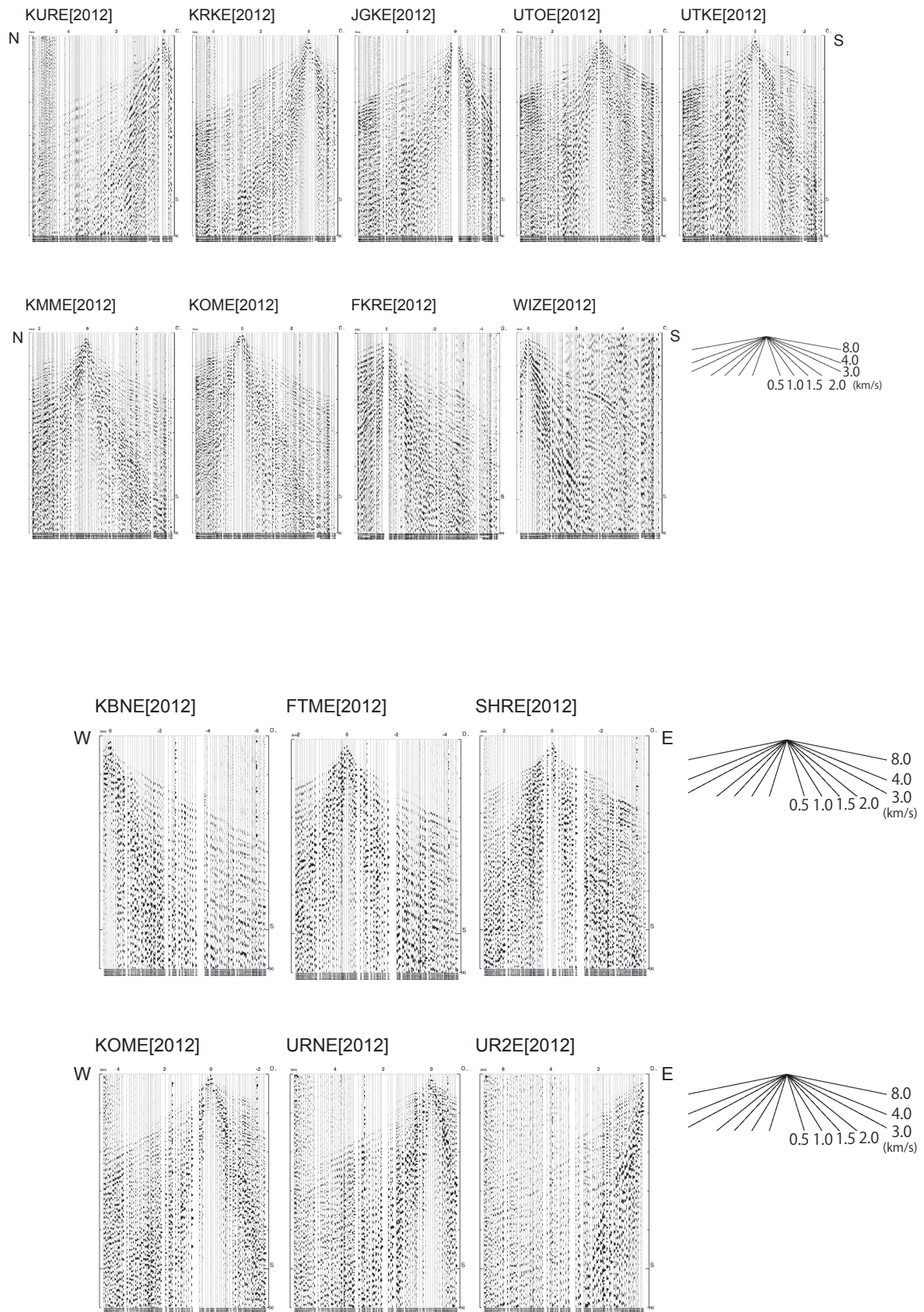


Fig. 4 The shot records of the 2012 experiment along the lines NS (KURE-WIZE) and EW (KBNE-UR2E). 2-8Hz band-pass filtered. Fans at the right of sections indicate apparent velocities, 8, 4, 3, 2, 1.5, 1, and 0.5 km/s.

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; 2012). 2008年の構造探査における高密度測線は本繰り返し探査実験の先行観測と位置づけられる.

2009年以降の繰り返し地震探査実験では合計14ヶ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本の測線で反復観測を行っている(Fig. 2). 2012年観測に用いられた機器および発破薬量はこれまで行われた3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.

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2012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の代わりに2011年から実施している発震点である. 発破作業の詳細仕様は筒井ら(2010; 2011; 2012)と同一である.

反復測線を構成する大部分の観測点座標は筒井ら(2011)と同一である. 2012年観測ではLine EWの西方に21点からなる延長測線を追加した. 筒井ら(2011)

のそれから変更された観測点および新たに展開した観測点の名称と座標とをTable 2に示す.

展開した臨時観測点273点中, データが回収できた観測点は269点でデータ回収率は98.5%であった.

3. 観測記録

2012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, 2012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. 特に発破点WIZEの観測記録では発破作業が火山性微動の発生と重複し, Line NS南部におけるS/Nが悪化している.

2009年観測に対する振幅比をTable 3最左列に示す. 振幅比の計算には震源距離1.5~3kmの観測点記録の走時2~3秒の区間のrms振幅比の中央値を用いた. 振幅比計算に用いた領域は初動に引き続く反射波等の到来が卓越するので, 筒井ら(2012)まで用いていた走時10秒以降のコーダを用いる方法に比べて火山性微動等の混入の影響を受けにくいと考えられる.

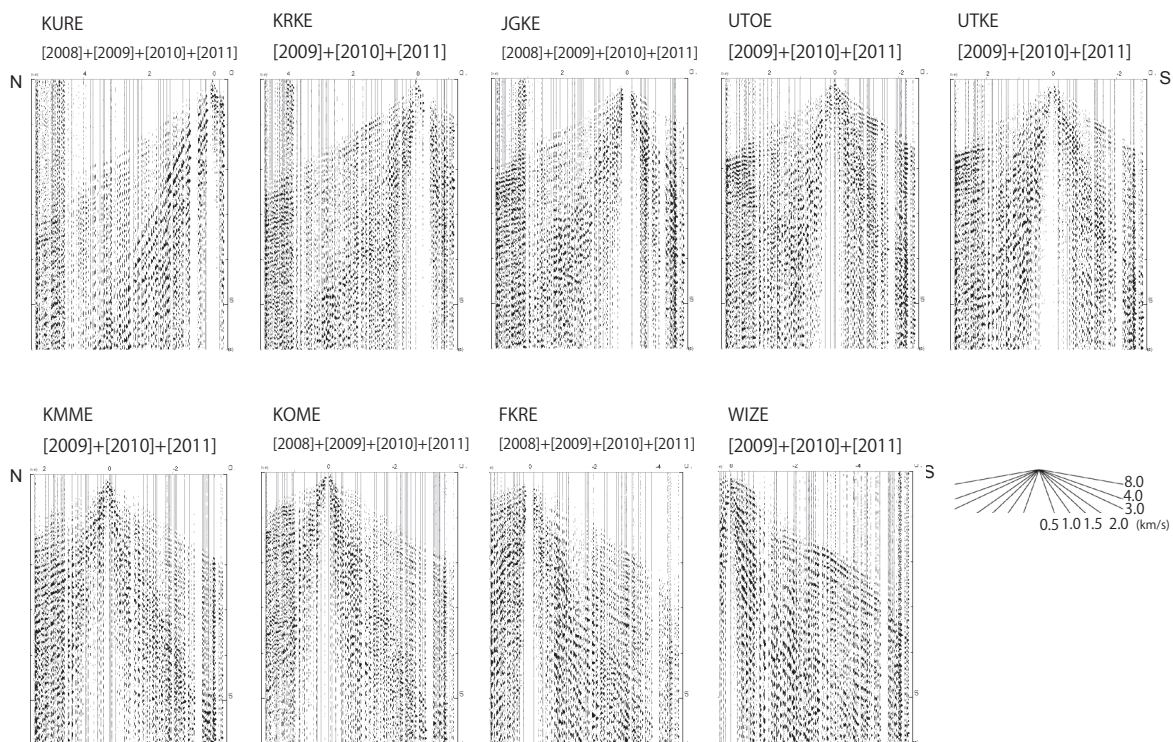


Fig. 5 The reference seismograms along the line NS. 2-8Hz band-pass filtered.

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. Amplitude ratios at UR2E are calculated with respect to 2011's amplitude and are enclosed with brackets.

Shot	Amp. ratio to 2009 (2-3s, 1.5-3km, rms)				Correlation to 2009				Correlation to the reference.				
	2008	2010	2011	2012	2008	2010	2011	2012	2008	2009	2010	2011	2012
KURE	0.54	0.8	0.67	0.67	0.63	0.79	0.49	0.57	0.69	0.91	0.92	0.74	0.71
KRKE	-	1.03	1.35	1.42	-	0.88	0.70	0.56	-	0.83	0.85	0.72	0.54
JGKE	0.68	1.18	1.33	1.20	0.34	0.74	0.61	0.67	0.55	0.81	0.84	0.82	0.76
UTOE	-	1.07	1.02	0.92	-	0.79	0.69	0.70	-	0.88	0.90	0.84	0.81
UTKE	-	1.09	1.94	1.10	-	0.86	0.74	0.80	-	0.89	0.93	0.82	0.82
KMME	-	0.99	1.02	1.14	-	0.84	0.83	0.81	-	0.94	0.93	0.93	0.83
KOME	0.37	1.64	1.37	1.37	0.45	0.81	0.80	0.80	0.37	0.89	0.95	0.94	0.83
FKRE	1.49	0.88	1.68	0.99	0.52	0.75	0.25	0.33	0.49	0.32	0.36	0.69	0.31
WIZE	-	0.79	0.49	1.39	-	0.54	0.33	0.33	-	0.83	0.89	0.71	0.43
URAE	33.2	1.17	-	-	0.20	0.89	-	-	0.46	0.87	0.90	-	-
UR2E	-	-	[1.00]	[1.021]	-	-	0.26	0.23	-	-	-	0.29	0.29
URNE	-	1.06	1.02	1.23	-	0.86	0.76	0.73	-	0.93	0.93	0.90	0.78
SHRE	0.89	0.98	1.23	1.33	0.40	0.71	0.73	0.67	0.76	0.80	0.82	0.73	0.65
FTME	-	0.82	0.47	0.84	-	0.90	0.63	0.83	-	0.96	0.96	0.63	0.82
KBNE	0.74	1.22	1.12	1.56	0.51	0.67	0.58	0.59	0.71	0.75	0.90	0.81	0.86

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、背景構造の応答に相当する参照基準記録を定義する必要がある。参照基準記録を定義するためには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。一方、後者の方法は基準となる記録の取得時点が明確である利点がある。しかしながら後者の方法は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発破記録の後続波形との区別が難しいうえ、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という問題がある。これに対して

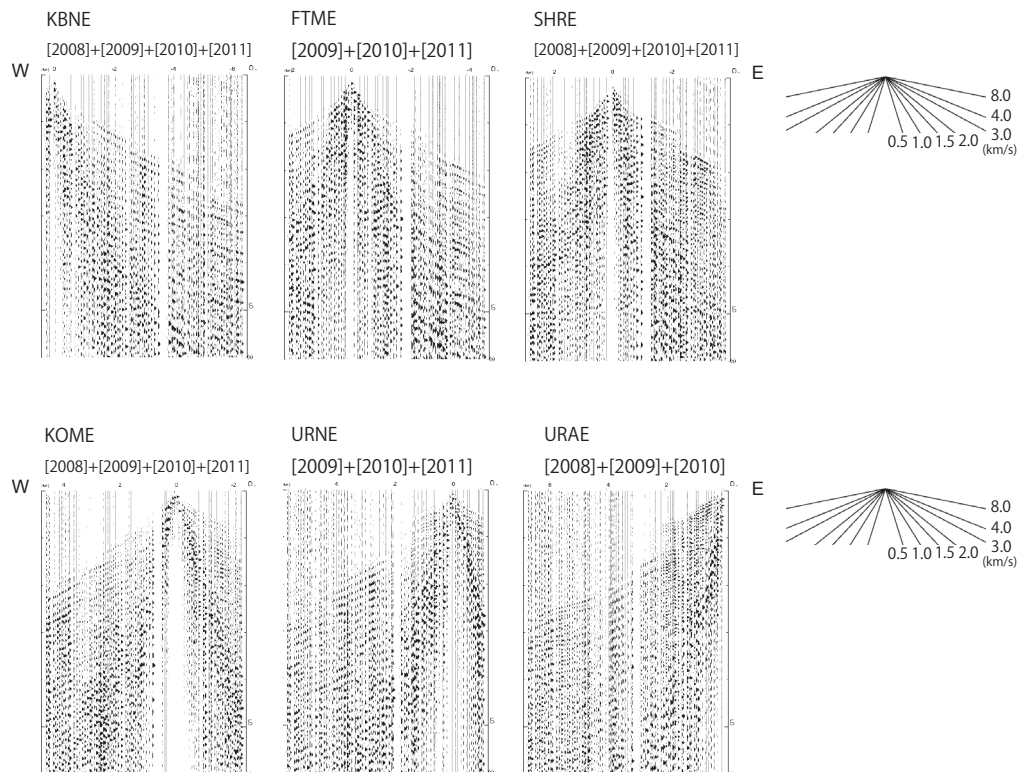


Fig. 5 Continued. Line EW.

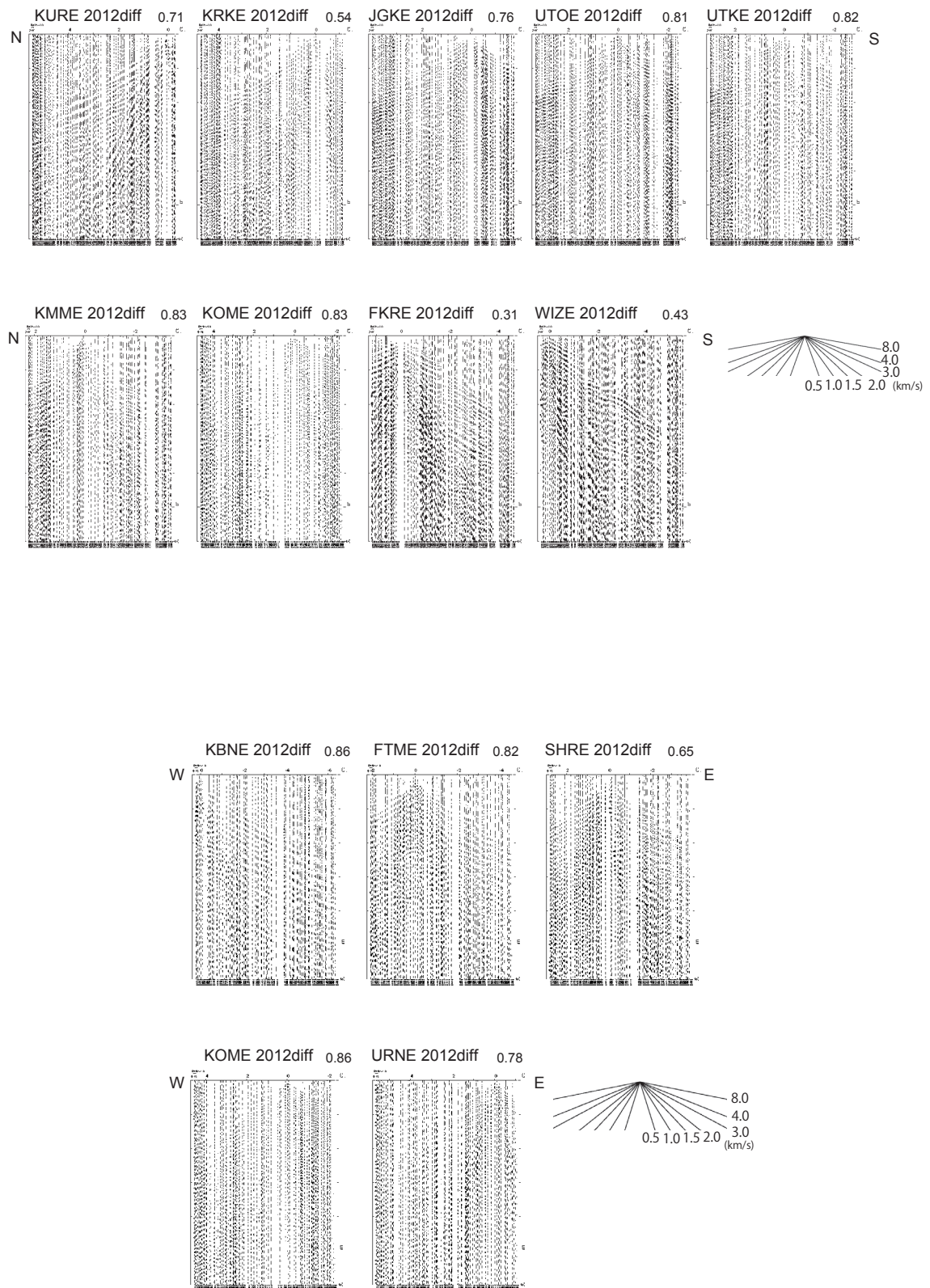


Fig. 6 The differential seismograms for 2012's seismograms along the lines NS (KURE-WIZE) and EW (KBNE-URNE). The values at the shoulder of each panel are the correlation coefficient of the rightmost column in Table 3.

複数年観測記録を重合したものに対しては、Table 3 最右列に示されるように相関の経年変化が小さい傾向が認められる。したがって、複数年の観測記録を重合した記録を参照の基準に用いると、単年記録を用いた場合より良好な結果が期待できる。以上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。

Tsutsui et al. (2013) ではこの参照基準記録を用いて

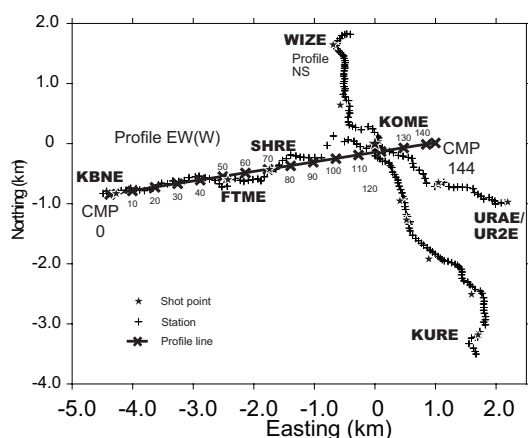


Fig. 7 The profile EW(W). The shot KOME is the origin.

地震反射断面を得た。本稿ではこれ以降 Tsutsui et al. (2013) の断面を参照基準断面と呼ぶことにする。

5. 差分記録と差分記録反射断面

2012 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。Fig. 6 は負極性を黒く塗りつぶして表示している。震源距離 1.5 ~ 3km の走時 2 ~ 3 秒の反射波が卓越する領域に注目すると、筒井ら (2012) に比べて、変化を示す位相はあまり多くない印象を受ける。差分記録では地下からの反射波が卓越する領域よりも、浅部を走る波の卓越する領域の差分振幅が大きい傾向が認められる。これは遅い速度の浅部を走る波の振幅がもともと大きいことに加えて走時が発破孔の水平位置の差に敏感であることを反映している。

Fig. 6 下段に示されるすべての年次の東西測線差分記録に反射法解析を施した。差分記録の反射法解析では異なる発破に対する差分記録を重合す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確認を同時に実現できる。反射断面の水平位置を示す CMP 番号と測線上の位置との対応関係を Fig. 7 に示す。CMP 番号は西から東に増加する。

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. (2013) と同じものを用いたが、先述のように差分記録では浅部を伝播する波の走時変化の影響が大きい傾向があるので、本報告では発破点周辺における低速度到来相のミュートを強化して解析を行った。東西測線西部 (Line EW(W)) の時間断面を Fig. 8 に示す。

マイグレーションを施した最終的な差分記録反射

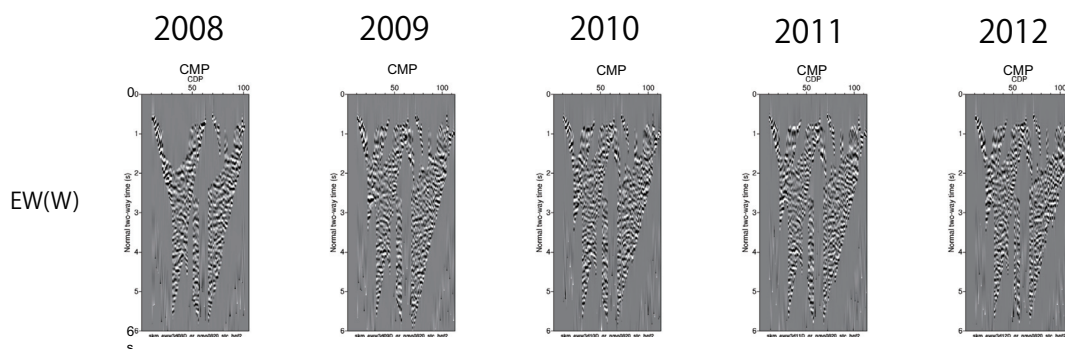


Fig. 8 Annual time sections.

断面を Fig. 9 に示す。Fig. 9 上段は参照基準記録断面に対する反射強度の偏差を色濃度で示している。参照基準記録の到来位相振幅に対して、正方向の増大を橙赤色で、負方向の増大を緑で表現している。Fig. 9 上段における変化の大きな領域（濃色で表現）を、参照基準記録断面における反射位相の振幅増大／減少と対応させたものを同図下段に示す。振幅増大を橙赤色、振幅減少を紫色の領域で示す。この対応の概念を Fig. 10 に模式的に示す。

差分記録反射断面における変化領域の空間分布と参照基準反射断面との対応を Fig. 11 に示す。Fig. 11 の数字はその枠の変化が現れた年を示し、色は反射強度変化の方向を表している。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、領域 A(2km 付近)、B(3km 付近)、C(5km 付近)、D(8km 付近) の 4ヶ所に集中して現れる傾向がある。

6. 議論

6.1 深さ 3 ~ 5km における地震波反射の消長

以下に Fig. 9 に注目して観測年次ごとの変化を記述する。領域 B, C の位置する深さ 3 ~ 5km の変化は

Fig. 1 の地盤変動観測結果と整合的である。Fig. 1 に示されるように、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 年観測は引き続き停滞期間に対応している。さらに 2012 年観測は収縮期間に対応しているように見える。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では 2008 年は領域 C にやや波長の長い反射強度の発達が見られるのに対して、2009 年はそれより浅い領域 B でやや波長の長い明瞭な反射が発達する傾向が見られる。一方、2010 年 ~ 2011 年の停滞期ではこの領域で反射の発達する領域は少なく、むしろ反射強度の衰退が卓越するよう見える。

やや波長の長い反射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、差分反射断面においてやや波長の長い反射が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てもよいであろう。

さらに深部の領域 D では反射強度の発達が見られた 2011 年をのぞき、反射強度の衰退が常にみられる

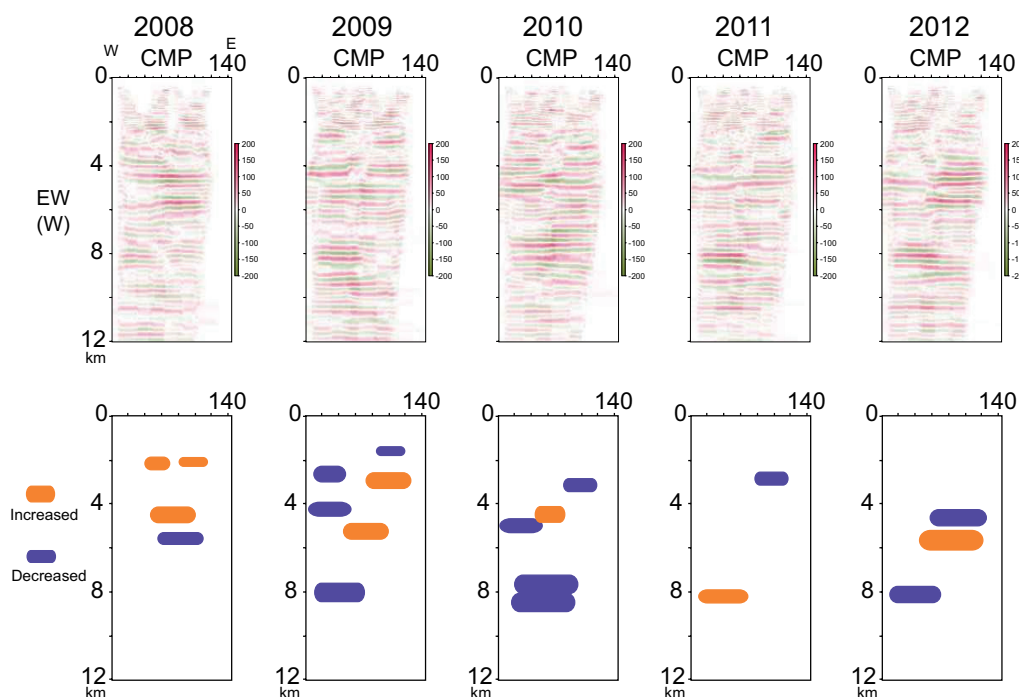


Fig. 9 The differential seismic sections along the profile EW(W) on the top row and their interpretation on the basis in Fig. 10 are the bottom. The orange boxes represent enhanced reflections and the purples are decayed events in the bottom panels. CDP spacing is 37.8m.

傾向がある。

6.2 浅部の地震波反射の消長

Fig. 11 の領域 A における反射強度の衰退は Fig. 9 の 2009 年と 2011 年の断面に認められる。Fig. 9 において 2011 年の差分記録断面の深さ 2km の領域に明瞭な反射強度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見える。該当する年の連続観測記録 (井口ら, 2009; 筒井ら, 2010; 2011; 2012) 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 A における反射強度の衰退は、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

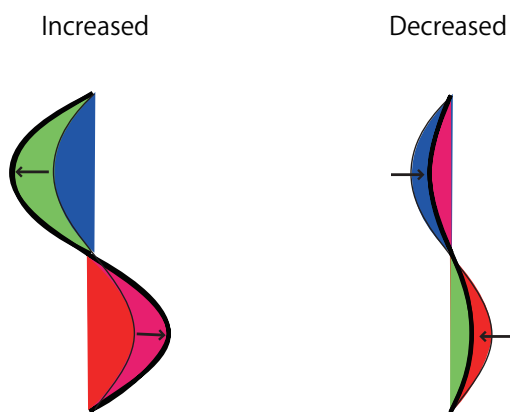


Fig. 10 Definition of the color code and interpretation in Fig. 9. The case of enhancement is the left. The case of decay is the right. The thin lines and red and blue colors are the reference wavelets. The thick lines are the differential wavelets.

いる可能性がある。この推論が正しいとすれば、領域 A を含む深さ 2km 付近の反射強度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。

6.3 反射強度変化と背景構造

反射変化が集中して起きる領域 A ~ D と背景となる地震波反射構造との関係は背景構造の反射イベントの有無で次の二つのパターンに分類される。一つ目は背景構造の対応する位置で明瞭な反射イベントが認められるパターンで、領域 A および D がこれに相当する。もう一つはそれとは逆の対応する深度の背景構造に反射イベントが認められないパターンで、領域 B および C がこれに相当する。前者のパターンは反射強度の強い状態、つまりインピーダンスコントラストの高い状態が常に存在する場所であり、マグマの存在を示唆しているとも考えられる。一方、後者はインピーダンスコントラストもともと小さいが、時間とともに大きく変化する場所であることを示している。

前者のグループに属する領域 D は参照基準断面において明瞭な反射が見られる深度であり、この場所における反射強度の変化は注目される。もし領域 D が桜島にマグマを供給しているとされる始良カルデラ直下のマグマだまりの一部であるならば、その変化は数十年スケールの桜島の活動と関係するはずで

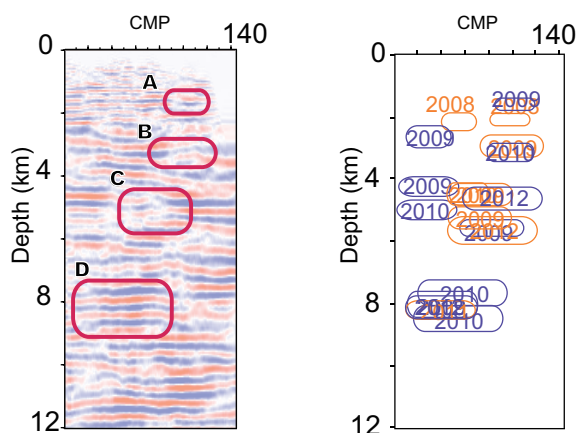


Fig. 11 The reference seismic section at the left and spatial distribution of the active region at the right. Active regions A to D are marked in the left. The same color scheme as that in the bottom of Fig. 9 is used for the markers in the right. Numerals represent the occurrence year.

あり、今後の変化の推移が注目される。

また、後者のグループで見られる間欠的な反射強度の増大は、ふだんはマグマが存在しないが間欠的にマグマが出現することを示唆しているとも考えられ、領域 B および C はいわゆるマグマの通り道の一部を表しているのかもしれない。

6.4 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。3km 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 2km 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。

7. まとめ

桜島火山で先行観測を含めて 5 回の反復地震探査観測を約 1 年間隔で実施した。その結果桜島北東部地下の地震反射応答が年とともに変化することが明らかになった。

地震反射応答の変化の検出をするにあたり、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、経年にとまなう波形相関の劣化を低減することができた。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記録を用いて、後続相の変化を抽出した。

さらに桜島北部の測線で差分波形記録の反射法処理を行い、差分反射記録断面を得た。その結果、桜島北東部における地震波反射応答の変化は 4 つの異なる深さ (2km 付近, 3km 付近, 5km 付近, 8km 付近) で発生していることが明らかになった。

3km 以深の反射の変化は数ヶ月スケールの地盤変動との関連性が認められるが、深さ 2km 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京都大学防災研究所共同研究「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) および地震・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」による。ここに記して感謝の意を表します。

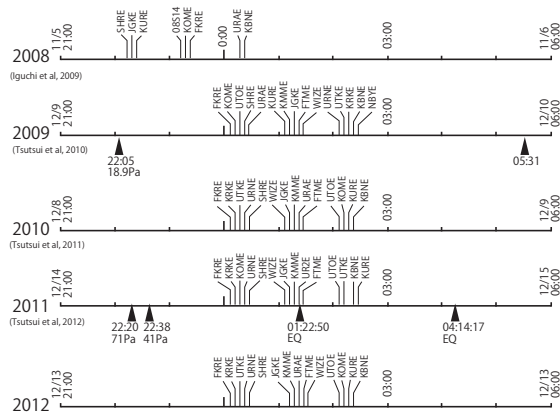


Fig. 12 Sequences of volcanic events and the shooting. The labeled thin lines are the shot times at the sites. The wedges are volcanic events, such as explosion or earthquakes. The label of the wedge denotes maximum amplitude of infrasonic wave.

参考文献

- 井口正人 (2012): 桜島火山の噴火活動 — 2011年7月～2012年6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 2011年 平成24年12月, 1-6.
- 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・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.
- 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.
- 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), 地震予知連絡会会報, 第16巻, 60-65.
- 筒井智樹・井口正人・他41名 (2012): 桜島火山における反復地震探査 (2011年観測), 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 平成24年12月, 25-38.
- 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, 239-250.

(論文受理日 : 2013 年 6 月 11 日)