

鹿児島湾奥部海域の繰り返し海底地震観測による 桜島火山周辺の地震活動と上部地殻3次元地震波速度モデルとの比較

八木原 寛*・平野舟一郎*・宮町宏樹*
高山鐵朗・市川信夫・為栗 健・井口正人

* 鹿児島大学大学院理工学研究科

要 旨

桜島火山の周辺海域で発生する火山構造性地震（VT地震）を観測するために、鹿児島湾奥部海域に3台の海底地震計（OBS）を投入した。機器にトラブルは発生せず、3台全てでデータ回収と時刻較正に成功した。観測期間中で最も明瞭な活動は、若尊カルデラ南東端付近のVT地震12個（M-0.9~0.3）で、深さ0.4~0.7kmと4.0~4.8kmに決定された。また、若尊カルデラの西方の深さ6.6kmと7.7kmに2個のVT地震（M-0.3）の震源を決定した。これまでの繰り返し観測で得られた、桜島火山の周辺海域のVT地震の震源分布と比較するために、桜島火山周辺の上部地殻3次元速度モデルを求めた。VT地震は、高速度領域と低速度領域の間の平均的な速度をもつ場で発生している傾向が認められる他、低速度領域のピークの近傍でも発生したことが分かった。

キーワード: 桜島火山, 海底地震計, VT地震, 上部地殻3次元地震波速度モデル

1. はじめに

火山構造性地震（Volcano-Tectonic Earthquake, 以下 VT地震と記す）は、火山体内部へのマグマの蓄積に起因した静的な応力変化に伴う歪の蓄積やマグマの移動によるクラックの伸展、さらに広域のプレート運動に伴う地殻変動による非火山性の歪の蓄積に応じて発生すると考えられる。桜島火山とその周辺領域下では、始良カルデラの地盤が膨張に転じた1993年以降、2002年から地殻浅部のVT地震の活動が増加した（Hidayati et al., 2007）。Hidayati et al. (2007) は、これらのVT地震の起震応力と地盤変動現象を統一的に説明するマグマ供給系の力学モデルを示した。このモデルによれば、始良カルデラ北東海域下のVT地震活動は、始良カルデラ付近下の応力場の変化によって生じると考えられる。Iguchi et al. (2013) が示した桜島火山周辺領域の地震活動の時空間分布によれば、鹿児島湾奥部海域のほぼ東半分の領域下でもVT地震が時折発生していると考えられる。この領域の地震活動は定常的に継続するのではなくepisodicに発生する特徴があると考えられる。始良カルデラ北東領域下のVT地震については、桜島北東~東部の陸上地震観測点への伝搬経路上や観測点直下の表層で顕著な減衰が生じると考えられ、Hidayati et

al.(2007)がこの領域に震源決定した地震の規模は概ねM1.5以上である。一方で、深さ10 km前後に推定される地盤変動圧力源（例えば、Iguchi et al., 2013 ; Yamamoto et al., 2013）は、桜島火山の北方の海域下に位置する。特に圧力源の北側の海域下におけるVT地震の発生の有無については、鹿児島湾の西岸付近の陸上地震観測点が少なく、よく分かっていない。これら桜島火山の周辺海域下の微小なVT地震を検出し、地震活動の詳細を把握するためには、既設の陸上観測点での地震観測に加えて、海底地震計を用いた観測が有効と考えられる（八木原ら, 2012）。著者らは、桜島火山の周辺海域で海底地震計（Ocean Bottom Seismograph, 以下OBSと記す）を用いた自然地震観測を2007年（八木原ら, 2008）に初めて実施し、2009年から年次的に実施してきた。観測に用いるOBSは短期自己浮上型で、1回の観測期間は概ね3ヶ月程度と見積もられるため（八木原ら, 2011）、OBSを同一位置に繰り返し投入する計画である。当初、機器トラブルの発生にみまわれ、2010年度に実施した観測でようやく、OBS観測データを用いた若尊カルデラ下や桜島北東海域に偏在する微小なVT地震を検出し、震源決定ができるに至った（八木原ら, 2011）。本報告では、2012年度に引き続き実施したOBS観測と解析結果について報告する。

これまでのOBS観測期間の観測データからは、鹿児島湾奥部の西側半分の領域下に震源が決定されたVT地震は無い。また期間中の連続波形データでも、鹿児島湾奥部の西側半分の領域下で、M0以上の微小なVT地震が発生しているようには見えない。八木原ら(2011)や八木原ら(2012)の結果も合わせて考察すると、鹿児島湾奥部海域下のVT地震の発生場は、偏っている可能性が示唆される。VT地震がどのような場で発生しているかについての知見を得るために、本研究では桜島火山の周辺領域の上部地殻3次元地震波速度モデルを解析し、OBS観測で得られたVT地震の震源分布と比較した。

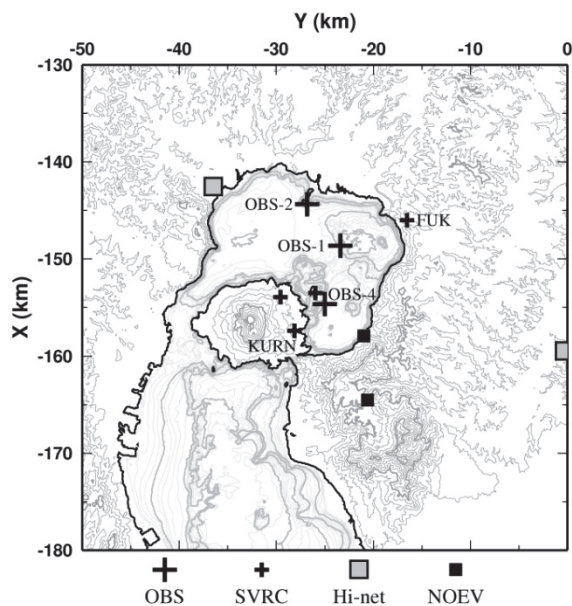


Fig. 1 Seismic stations for hypocenter location of VT earthquakes in and around Sakurajima Volcano. In Kagoshima Bay, the depth intervals of thin and thick gray isobaths are 10 and 50 meters, respectively. Additionally, the altitude intervals of contours on land are 100 and 500 meters, respectively.

2. OBS観測

Fig. 1に、3台のOBSの着底位置、VT地震の震源決定に用いた京都大学防災研究所附属火山活動研究センター(SVRC)の地震観測点、及び鹿児島大学大学院理工学研究科附属南西島弧地震火山観測所(NOEV)の地震観測点、並びに防災科学技術研究所のHi-net観測点の位置を合わせて示す。鹿児島湾奥部海域における、これら3台の短期型OBSの投入は、養殖漁業用の揚貨装置を装備する小型兼用船(第十三代丸、総トン数15トン)を使用して実施された(Fig.1のOBS-1, 2, 4, Table 1)。またOBSの揚収は、

小型兼用船まゆみ(総トン数4.3トン)によって実施された。同一位置での繰り返し観測を実現するために、OBSの投入予定位置は、2011年度観測における着底位置(OBS-1, 4)もしくは投入位置(OBS-2)とした。これらの観測点の位置は、小型底曳網漁業との競合を避けるために漁場(鹿児島湾奥部海域の水深100m以深の全領域。ただし若尊カルデラ付近を除く。)の範囲外としなければならない。この制約により、鹿児島湾奥部海域におけるOBS投入位置の自由度はほとんど無い(八木原ら, 2011)。さらに、投入及び揚収作業は、海上自衛隊鹿児島試験所の水中試験との競合も避けなければならない。実施日や時間帯が限定される。この結果、2012年度のOBS観測期間は2012年12月7日~2013年3月12日の94日間であった。2011年度と同様に、3台のOBSを用いた1期間のみの実施とした(八木原ら, 2012)。観測機器のトラブルは3台のいずれにも発生せず、かつ時刻較正が成功し、欠測は無かった。また、トランスポンダの不具合による音響通信不能と予期しない浮上(2011年度のOBS-2: 八木原ら, 2012)や、レコーダーのハングアップによる揚収前の収録停止(八木原ら, 2010)も、今回の観測では発生しなかった。

OBSの地震計とレコーダーは、2009~2011年度の観測で用いたものと同一である。センサーは固有周波数4.5Hzの3成分速度計(Mark Products, L28-BL)で、ジンバル機構にマウントされ、OBSが緩傾斜面に着底しても観測可能である。センサー出力は30倍のプリアンプで増幅された後、レコーダー(勝島製作所, HDDR3C/KG)によって24bitのA/D分解能で200Hzサンプリングされる。ノイズレベル及びデータサイズ並びに省電力の観点から、本観測ではA/D変換された24bitデータのうちの上位20bitが40GBのハードディスクに収録される設定とした。レコーダーの記録媒体としてハードディスクを2個接続し、1個に障害が発生した場合は、もう1個のハードディスクにデータが収録されるように設計されており、冗長性がある。ただし、ミラーリングの機能は無い。レコーダーの電源には、リチウム組電池(勝島製作所, 3B76-3A)を用い、3個の組電池を並列に接続した。

OBSが投入から揚収までの水中にある間は、GPS電波がOBSに到達しないためにレコーダーの内部時計を較正できない。一般的にOBS観測では、投入直前と揚収直後の船上においてGPS時刻とOBS内部時計の時刻差を測定し、時刻較正のためのデータを取得する。本観測では、作業スペースが極めて制約される小型船舶においても設置や取り扱いが容易なIRIG時刻ロガー(シモレックス, SC-EDGELOG)で時刻差を測定した。また、データ収録の開始時刻は、タイマー設定で行った。投入直前の準備作業において、

Table 1. Observation periods, positions, and station corrections at each OBS station

Station	Observation period	Position (WGS-84)			Station correction *	
		Latitude (N)	Longitude (E)	Depth (m)	P (s)	S (s)
OBS-1	2012/12/07 10:59 ~ 2013/03/12 10:33	31° 39.5471'	130° 45.1880'	154	-0.50	-1.75
OBS-2	2012/12/07 12:14 ~ 2013/03/12 11:30	31° 41.8525'	130° 43.0117'	95	-0.53	-0.88
OBS-4	2012/12/07 10:29 ~ 2013/03/12 09:22	31° 36.3343'	130° 44.2367'	98	-0.33	-1.01

*Yakiwara et al. (2011)

着底の時刻を見積もった上で、15分単位でデータ収録開始時刻を設定した(八木原ら, 2012)。一方、データ収録の停止は、揚収直後の船上で、パソコンを用いたレコーダーとのシリアル通信により手動で行った。

AC電源(OBSのトランスポンダと音響通信するためのトランスデューサー船上支援装置の精密電源)、使用船舶を投入計画位置や測量ポイントへ精密に誘導するとともにDGPSによる船位のログ(1秒サンプリング)を取得するためのGPSコンパスやナビゲーションソフト(電子海図ビューワーソフト)、OBS投入直前の海底面起伏の確認やOBS投入直後の沈下及び揚収時のOBS浮上のモニタリングに用いる魚群探知機、使用船舶の運航上の安全対策としての船舶共通通信システムや船舶自動識別システムの無線通信機器等、必要不可欠な周辺機器については、いずれも八木原ら(2012)と同一である。

投入計画位置と着底位置との間には、投入時の風潮流や、投入の瞬間に作業船舶に残っている対地速度により差異が生じる。そのため、着底位置の測量が必要で、GPSコンパスから出力された船位データ、及び測距の時刻並びに距離データ(使用船舶と着底したOBSとの間の距離測定データ)を用いて最小二乗法により決定した(八木原ら, 2008)。なお着底位置の水深は、船上装置に表示される距離値の算出において音速一定が仮定されており、実際の水温分布による音速との差異に影響されやすいため、等深線データから読み取った値とした(Table 1)。

3. OBSデータの処理

3.1 OBSデータの時刻較正とデータ結合

OBSで収録されたデータは、個々のOBS毎にWINフォーマットの連続波形データに変換された。このデータに対して、投入直前と揚収直後に計測したOBS内部時計のGPS刻時とのずれ量が時間経過に対して線形であると仮定して、OBSで収録されたデータそれぞれを個別に時刻較正した。その後、SVRCと

NOEVでテレメーターにより各々収録されている既設の陸上地震観測点データのうち、震源決定等の解析に用いる観測点のデータのみを抽出した連続波形データと結合させ、解析に用いる1分長のWINフォーマット連続波形データを生成した(八木原ら, 2011)。

3.2 イベントの抽出

鹿児島湾奥部海域は浅いために、OBSで収録されたデータは風浪や潮流のノイズの影響をより強く受ける。さらに、桜島火山の噴火地震や爆発地震を含む浅部低周波地震だけでなく火山性微動の発生時には、湾奥部全体が震動する(八木原ら, 2011)。このため、火山性地震・微動の活動や噴火活動が顕著な時間帯は、当該領域のVT地震をOBSの波形データから検出することは不可能である。また、桜島火山の周辺海域では養殖漁業や小型底曳網漁業等の漁業生産事業が発達しており、船舶の航過や操業等による人工的なノイズも加わる。従って、OBSで取得された波形データは全般的にS/Nが低く、S/Nが高い時間帯は限定される。以上のことから、OBSで収録された波形データは、トリガー判定に基づくイベント抽出の自動処理にそぐわない。著者らは、WINシステムで出力した連続波形モニター記録を用いて、VT地震、砕石発破、及び広域(九州南部とその周辺)のテクニクな地震、さらに不明なイベントを対象とし、目視でイベント抽出を行った。連続モニターで出力したデータは、各OBSの3成分波形、KURNとFUKの2成分(上下動成分と水平動1成分)波形である。このうち、KURNとOBS-4との初動到達時刻差とFUKのS/Nは、イベント抽出に極めて有効である(八木原ら, 2012)。また八木原ら(2012)と同様に、これらの観測点相互の到達時刻とその差や振幅比の違いの特徴に基づき、桜島火山の浅部で多発する火山性震動をイベント抽出対象から除外した。

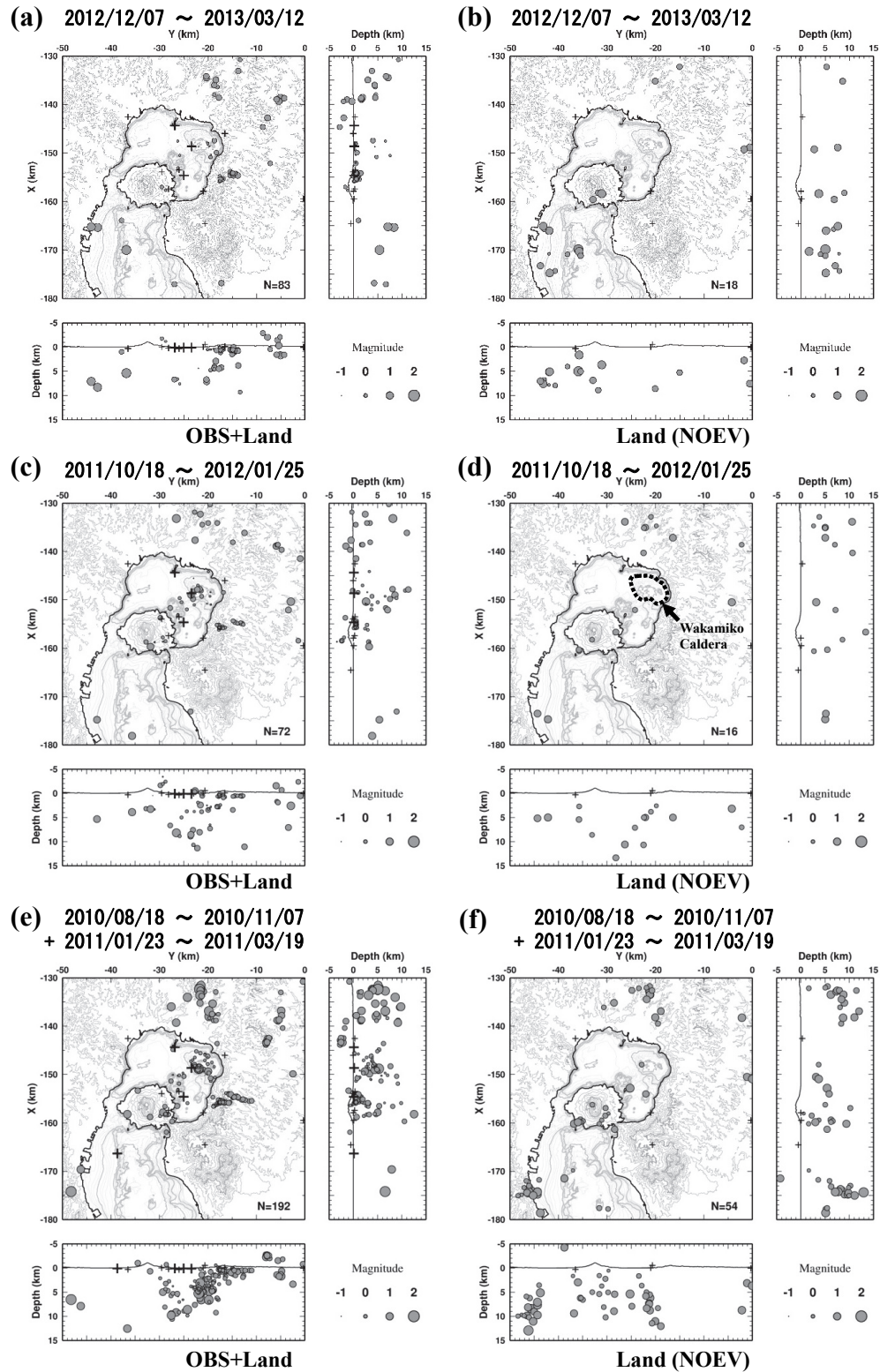


Fig. 2 Epicenter distributions and the vertical cross sections of earthquakes and artificial shots in around Sakurajima Volcano every periods of the repeated sea bottom observations. The hypocenters of (a), (c), and (e) were located by using of data recorded by OBS and land seismic stations. Distributions of (b), (d), and (f) were drawn using an earthquake catalog by NOEV (only land stations). A dotted line in the epicenter map of (d) shows outline of Wakamiko Caldera.

4. 桜島火山の周辺領域のVT地震活動

4.1 震源要素の決定

モニター波形から目視で抽出・切り出されたイベント波形データを用い、桜島火山の周辺領域の地震であるか否かを判定した上で、P波、S波の到達時と最大振幅値を験測した。震源計算には、NOEVが九州南部の微小地震の震源決定に適用している角田ら(1991)の1次元地震波速度モデルを用いた(八木原ら, 2011)。 V_p/V_s は1.73で一定である。また、震源計算の際には、OBS観測点直下の、顕著に低速度な未固結堆積物による走時の遅れを考慮するためのstation correctionを施した。これには2010年の観測で得られた値(八木原ら, 2011; Table 1)を用いた。震源要素の計算には、WINシステムのプログラムhypomh(Hirata and Matsu'ura, 1987)を用いた。

4.2 鹿児島湾奥部海域周辺のVT地震活動

OBS観測と陸上観測のデータを結合して震源計算した結果、得られたVT地震の震央分布、及び震源分布の南北、東西断面図をFig.2aに示す。Fig.2aの地震は、震源座標の解が収束した地震のみで、合計83個である。Fig.2bは、NOEVにより陸上地震観測データのみで決定された当該OBS観測期間中の震源分布を示す。OBS観測期間中に、Fig.2に示された領域内にNOEVが決定した地震数は18であったが、桜島火山北東岸から鹿児島湾奥部海域にかけての領域に決定された地震は無かった。2010年度、2011年度のOBS観測期間について、同様の比較をFig.2c~2fに示す。これまでに延べ4期間のOBS観測で震源分布が得られているが、いずれのOBS観測期間においても概して桜島火山の周辺海域下のVT地震活動は低調で、有意な活動の変化は認められない。なお、2010年度OBS観測による震源分布がFig.2e、同期間におけるNOEVの震源分布がFig.2fであるが、地震数が多く見えるのは、2010年度にOBS観測を2回実施したことによる見かけのものである。延べ日数を考慮すると、桜島北東部から鹿児島湾奥部にかけての領域の地震数に、有意な変化は認められない。

2012年度のOBS観測期間中、桜島火山の周辺海域で発生した地震活動の中で最も地震数が多い活動は、若尊カルデラ付近のVT地震12個で、うち3個は深さ4.0~4.8 kmに決定された一方で、残り9個は深さ0.4~0.7 kmと極めて浅く決定された。これらの12個のうち、最大と最小の地震の規模はそれぞれ、M0.3とM-0.9であった(M0.0未満の地震数は8個)。後者はVT地震検出の下限を示すものではなく、イベントの検出の有無は、ノイズや桜島火山の火山性微動や噴火・爆発地震発生等の活動状況に依存する(八木原

ら, 2012)。地震数やマグニチュードは、2011年度の観測と有意な差は無いが、震央が若尊カルデラの東~南東端付近に分布した点が異なる。

若尊カルデラ付近のVT地震のうち、若尊カルデラの領域(Fig.2d)よりも若干、西側で発生した地震が2個のみ決定された。いずれもM-0.3で、深さは6.6~7.6 kmである。桜島火山東方の陸域の大隅半島西岸付近に地震の集中域が2か所に認められる。これら合わせて42個のイベントは、発生時刻と波形から砕石発破と推定される。震源の深さ範囲は、39個の地震が0.9km以浅、3個の地震が1.1~1.5kmに決定された。

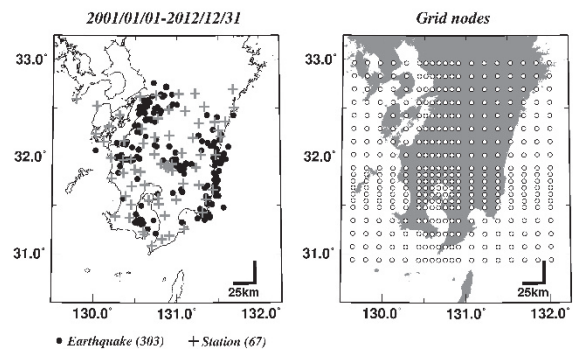


Fig. 3 Epicenters, seismic stations, and a horizontal configuration of grid nodes for analysis of three-dimensional seismic velocity models.

5. 桜島火山周辺の地震活動と上部地殻3次元速度分布との比較

5.1 桜島火山周辺の3次元地震波速度モデルの解析

桜島火山の周辺海域で発生するVT地震の発生場に関する知見を得るために、九州中南部の広域地震観測網のデータを用いて、桜島火山周辺の暫定的な上部地殻3次元地震波速度モデルの解析を行った。解析方法の詳細や解の信頼性の評価については、稿を改めることとし、ここでは用いたデータや解析方法の概略、及び速度モデルの特徴を記すにとどめる。

Fig.3aは、速度モデルの解析に用いた九州南部の地震303個の震源分布と67地震観測点の分布を示す。桜島火山の周辺海域下で発生するVT地震は、深さ10 km前後で発生するものも存在する(例えば、八木原ら, 2011)ため、これを含む深さ範囲の速度分布を求めるためには、より広域の地震観測データを用いる必要がある。本解析では、霧島火山の上部地殻3次元速度構造の研究(米良ら, 2013; 八木原ら, 2013)と同一のデータを用いた。データ数はP波が15,130、S波が13,590である。なお、この解析においては、OBS観測データは含まれていない。

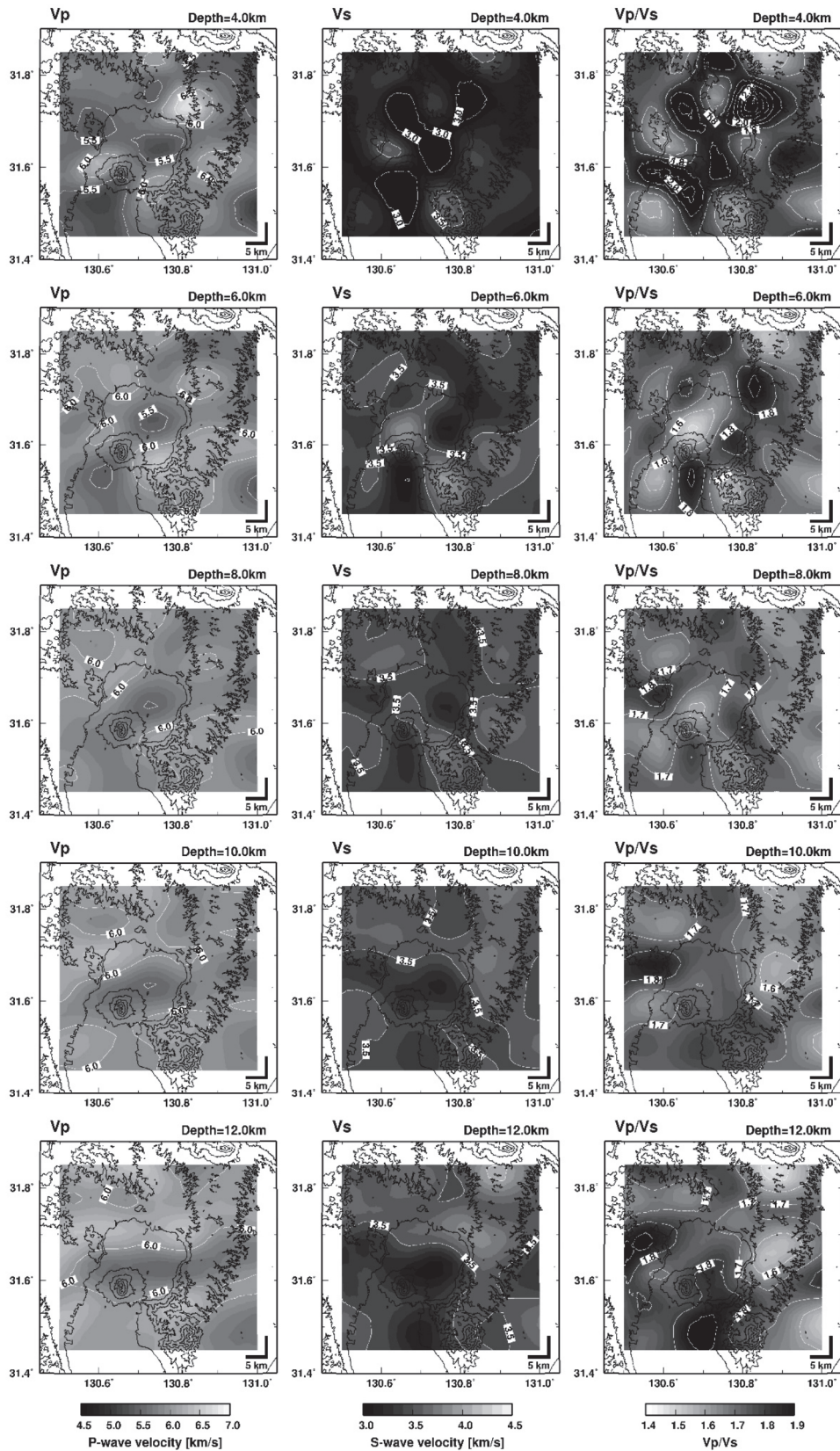


Fig. 4. Three-dimensional seismic velocity model in the upper crust beneath Sakurajima Volcano and Aira Caldera. Distributions of P-wave velocity (V_p), S-wave velocity (V_s), and the ratios of the both (V_p/V_s) are shown on each depth. Thin white curves are contours of V_p , V_s , and V_p/V_s . Contour intervals of the velocities (V_p , V_s) and V_p/V_s are 0.5 km/s and 0.1, respectively.

解析の方法は八木原ら（2013）と同様である。まず、1次元グリッドモデルを適用して1次元速度モデルとstation correctionを求めた。得られた1次元速度モデルを3次元解析の初期モデルとし、station correctionは固定した。Fig.3bは、基準とするグリッドモデルの水平方向のノード配置を示す。この基準グリッド全体を東西、南北方向に平行移動させる他、深さ方向のグリッドノードの位置や間隔を変化させることで、合計108モデルを生成し、全モデルを用いて3次元解析を行った。任意の位置におけるVp, Vsは、収束解が得られた94モデルそれぞれから算出された値を単純平均した値とした。桜島火山周辺領域のグリッドノード間隔は東西及び南北方向ともに7.5 kmである。これを5 kmにすると、解が安定して求められないため、本解析のデータとモデルを適用した場合の水平方向の空間分解能は7 km程度と見積もられる。また深さ方向のノード間隔が4 kmの場合に解が最も安定し、3 kmの場合は非収束解の割合が明瞭に増加するため、深さ方向の空間分解能は4 km程度と推定される。

5. 2 桜島火山周辺の上部地殻3次元地震波速度分布

Fig.4は、深さ4~12 kmにおける2 kmごとのP波速度 (Vp) 及びS波速度 (Vs) 並びにVp/Vsの分布を示

す。深さ4 kmは、求められたVs, 特にVp/Vsのゆらぎが大きいことから、安定解が得られなかったと推測される。また深さ14 km以上においても同様にVs, Vp/Vsのゆらぎが大きいため、本解析の解が信頼できる深さ範囲は5~12 kmと考えられる。

桜島火山周辺領域の3次元速度分布は、大局的には深さ6 km以浅の領域で鹿児島湾奥部の若尊カルデラ (Fig.2)の南端~南西端付近がLow-Vp, Low-Vsである。深さ6 kmにおいて、P波速度の低速のピークは若尊カルデラの南西端付近でVp=5.3~5.4 km/s, S波速度の低速のピークは若尊カルデラの南端付近でVs=3.0~3.1 km/sである。これより深くなるにつれて、低速のピークがより南西側 (桜島火山側) に位置する傾向が認められ、深さ10 kmにおいては、ほぼ新島付近下に位置する。深さ10 kmにおける低速のピークは、Vp=5.4~5.5 km/s, Vs=3.1~3.2 km/sである。このピークの位置は、Hidayati et al. (2007) の力源ソース”A”付近に位置することは興味深い。一方、深さ6 kmと10 kmの低速のピーク付近におけるVp/Vs値はそれぞれ、1.70~1.76と1.72~1.74であり、それほど大きい値を示さない。これらの特徴の他、深さ6 km以浅及び深さ12 km以深の桜島南岸から桜島南方海域にかけてLow-Vs領域が際立つ。また、浅部から深部に共通して、桜島東方の大隅半島下はHigh-Vp, High-Vs, Low-Vp/Vsの領域である。

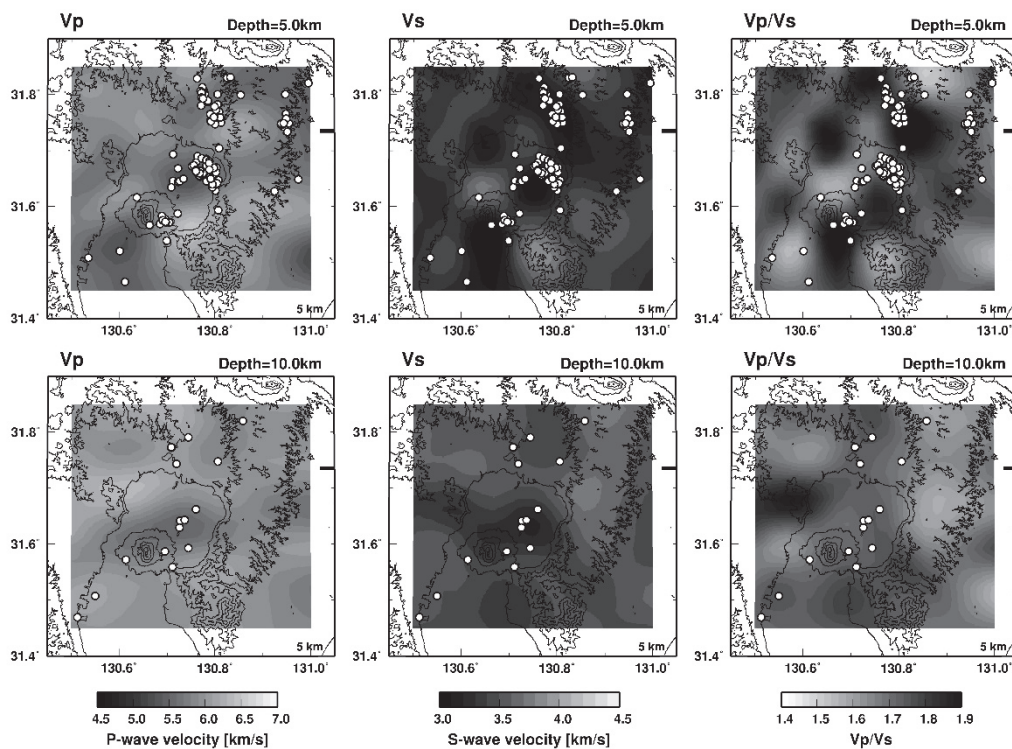


Fig. 5. Comparison between epicenters of VT earthquakes and the velocity model in and around Sakurajima Volcano. Shallow earthquakes (shallower than 7.5 km depth) are plotted on velocity maps of 5 km depth. The relative deep earthquakes (deeper than or equal to 7.5 km depth) are shown in the velocity distributions of 10 km depth.

5.3 3次元地震波速度モデルと桜島火山周辺のVT地震の震源分布との比較

Fig.5 は、VT地震の震源分布と、 V_p , V_s , V_p/V_s 分布との比較を示す。VT地震の分布については、今回のOBS観測及び2010年度の2回のOBS観測で求められた震源（解が収束した地震のみ）を用いた。なお、砕石発破と推定される震源を除外した。深さ7.5 km未満のVT地震を深さ5 kmの V_p , V_s , V_p/V_s 分布に、深さ7.5 km以上のVT地震を深さ10 kmの V_p , V_s , V_p/V_s 分布に重ね合わせた (Fig.5)。2011年度のOBS観測についての震源計算結果は、OBS-2でデータがほとんど取得できなかったため、精度が相対的に劣ると考え、2011年度のOBS観測で得られた震源を除外した。

両者を比較した結果、VT地震の震源は、高速度でも低速度でもない中間的な速度をもつ領域、もしくは高速度から低速度への遷移領域に発生する傾向が認められる。加えて、低速度のピークの近傍でも発生しているように見える。高速度領域や低速度領域が相対的に歪の集中しにくい領域であることを示唆するのかもしれない。また低速度のピーク近傍でのVT地震の発生は、火山性流体の存在による間隙流体圧の増加や、マグマ溜まりもしくは火道といった圧力源に近接していることにより、大きな応力変化を受ける場があり、VT地震が発生しやすいことを反映しているのかもしれない。

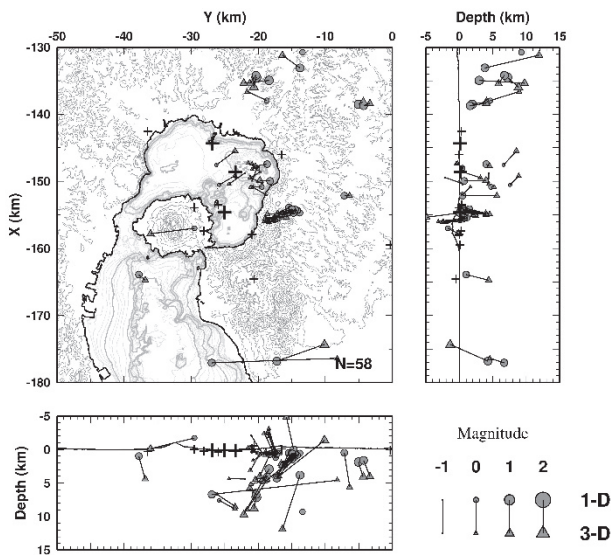


Fig. 6. Comparison of hypocenters with different velocity models. Circles and triangles were located using one-dimensional (1-D) and three-dimensional (3-D) models, respectively. Lines show the differences.

6. 議論

桜島火山周辺海域において、OBS観測を2009年以降、年次的に実施してきた。その結果、浅海のためにS/Nが低い観測環境ではあるが、OBS観測が、若尊カルデラから桜島火山北東部にかけての領域で発生する極微小地震や微小地震の検出に有効であることが示された。次の段階として、OBS観測により、海域やその周辺領域で発生するVT地震の震源精度が向上することについての検証が不可欠である。その一方で、本解析により3次元地震波速度モデルの暫定的な解が得られたため、より現実的な速度モデルを適用した震源計算も可能になりつつある。またOBS観測データの解析では、観測点直下の厚い未固結堆積層の存在による顕著な走時の遅れの他、火山体周辺の表層付近における空間スケールの大きな不均質構造による影響も無視できないと推測されることから、3次元速度モデルを適用した震源計算の結果の検討は重要と考えられる。以上のことから著者らは、本解析で求められた3次元速度モデルを用いて震源計算を試行し、従来の1次元速度モデルの結果と比較した。

Fig.6 は、今回のOBS観測で得られたイベントに対して、1次元と3次元の速度モデルをそれぞれ適用して震源計算を行った結果、両方のモデルで収束解がえられた地震のみの震源座標の相違を示す。なお、両者において、震源計算の際のstation correctionはFig.2と同一、すなわち角田ら(1991)のP波速度分布と V_p/V_s が1.73で一定のモデルに対するstation correction (Table.1)で固定した。3次元モデルを適用する場合、非線形の度合いが強くなる上に観測点数が少ないため、ダンピングを大きめにかけなければ安定解が得られない。比較の結果、OBS観測点やFUK（若尊カルデラの東方; Fig.1)に囲まれた領域内であっても、震央が2~5 km異なることが分かった。若尊カルデラ付近の地震のほとんどは、3次元モデルを適用した場合の震央が、若尊カルデラの中央に寄った位置に決定されている。桜島島内の震央の10 kmを超える大きな差異は、適用した3次元モデルの空間分解能と解析に用いたデータセットから、桜島の火山体浅部の強い不均質構造が、3次元速度モデルに反映されていないためと考えられる。南東方向の大隅半島内の震央の10 kmを超える差異は、地震が震源決定に用いた観測点網 (Fig.1)の外に位置する影響も加わっている。一方、深さ方向では、一般的には3次元計算の結果が、深く決定される傾向にある。OBS観測点やFUKに囲まれた領域内でも5 kmに及ぶ深さの違いを呈する地震もある。

いずれの計算結果がより妥当かについては、砕石発破の震源計算の結果が参考になる。桜島東方の大

隅半島西岸付近の震央の集中域を見ると、1次元計算の結果では震源が地表付近(0~1 km)に集中する結果が得られた。これに対して、3次元計算の結果は、深さ5 kmや-5~-3 kmに決定された震源もあり、ばらつきが明らかに大きい。従って、現時点では1次元モデルの結果の方がより妥当と推測されるため、Fig.5の3次元速度モデルとVT地震の比較においては、1次元計算で求められた震源分布を用いた。3次元計算の結果の妥当性が相対的に劣る原因の1つには、与えたstation correctionが角田ら(1991)の1次元速度モデルに対して推定された値であり、3次元速度モデルに対する補正值でないことがあげられる。このstation correctionの再評価を端緒として、3次元速度モデルを用いた震源計算の考察を進めたい。

7. まとめ

桜島火山の周辺海域で発生する火山構造性地震(VT地震)を観測するために、鹿児島湾奥部海域の3点における海底地震繰り返し観測を実施した。2012年度の観測では、2010年度、2011年度に発生したトラブルは再現しなかった。3点全てで、投入期間中の全てのデータ回収と時刻較正が成功し、欠測も発生しなかった。

OBS観測期間中、鹿児島湾奥部海域のVT地震活動は低調であった。最も明瞭な活動は、若尊カルデラ南東端付近で発生した12個のVT地震(M-0.9~0.3)であった。うち9個は極めて浅い地震で、深さ0.4~0.7 kmに決定された。残りの3個の深さは4.0~4.8 kmであった。この他、若尊カルデラ縁の西方の深さ6.6 kmと7.6 kmのVT地震2個の震源を決定した。

九州中南部の広域地震観測網データを用い、桜島火山周辺の上部地殻3次元地震波速度モデルの暫定解を求めた。この3次元速度モデルと、鹿児島湾奥部海域の3台のOBS観測データを用いて決定されたVT地震の震源分布を比較した。VT地震は、高速度領域と低速度領域の間の中間的な速度を呈する位置で発生する傾向が認められた他、顕著な低速度領域に近接した位置での発生も認められた。

謝辞

汽船第十三代丸の篠原重人船長、汽船まゆみの坂元孝次船長には終始協力いただきました。同研究科の大富潤教授、及び中村啓彦准教授には、鹿児島湾内の底曳網漁業について御教示いただきました。鹿児島海上保安部交通課、海上自衛隊鹿児島試験所、

鹿児島県漁業共同組合連合会、錦江漁業共同組合には、観測の実施内容等について御理解を賜りました。九州総合通信局無線通信部航空海上課には海上無線に関する事項を御教示いただきました。また本研究では、九州大学、気象庁、及び防災科学技術研究所(Hi-net)のデータを使用させていただきました。陸上観測点の一部で、東京大学地震研究所共同研究プログラムの援助を受けました。以上の皆様に記して感謝申し上げます。

本研究の実施には地震及び火山噴火予知のための観測研究計画における「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)」を使用した。

参考文献

- 角田寿喜・宮町宏樹・高木章雄(1991):九州・琉球弧北部域の稍深発地震,地震第2輯,第44巻,pp.63-74.
- 米良諒麻・八木原 寛・平野舟一郎・中尾 茂・後藤和彦・宮町宏樹(2013):霧島火山周辺の上部地殻内3次元地震波速度構造,日本地球惑星科学連合2013年大会講演予稿, SVC48-P18.
- 八木原 寛・平野舟一郎・宮町宏樹・高山鐵朗・市川信夫・為栗 健・井口正人(2012):鹿児島湾奥部海域における繰り返し海底地震観測,および陸上地震観測網による桜島火山周辺の広域地震活動,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, 11 pp.
- 八木原 寛・平野舟一郎・宮町宏樹・高山鐵朗・市川信夫・為栗 健・井口正人(2011):桜島火山の周辺海域における繰り返し海底地震観測,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 2010年, pp.23-28.
- 八木原 寛・平野舟一郎・宮町宏樹・高山鐵朗・市川信夫・為栗 健・井口正人(2010):鹿児島湾の桜島火山周辺海域における海底地震観測,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 2009年, pp.35-39.
- 八木原 寛・平野舟一郎・宮町宏樹・井口正人・為栗健・高山鐵朗・山崎友也(2008):若尊カルデラおよび桜島南方海域における海底地震観測,第10桜島火山の集中総合観測—2007年6月~2008年3月—, pp.27-36.
- 八木原 寛・米良諒麻・平野舟一郎・後藤和彦・中尾 茂・宮町宏樹(2013):霧島火山周辺の上部地殻内3次元地震波速度構造(2),日本火山学会2013年秋季大会講演予稿集, pp. 31.

- 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. Volcanol. Soc. Japan, Vol. 52, pp. 289-309.
- Hirata, N. and Matsu'ura, M. (1987): Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using non-linear inversion technique, Phy. Earth Planet Inter., Vol. 47, pp.50-61.
- Iguchi, M., Tameguri, T., Ohta, Y., Ueki, S., Nakao, S. (2013): Characteristics of volcanic activity at Sakurajima Volcano's Showa Crater during the period 2006 to 2011, Bull. Volcanol. Soc. Japan, Vol. 58, pp. 115-135.
- Yamamoto, K., Sonoda, T., Takayama, T., Ichikawa, N., Ohkura, T., Yoshikawa, S., Inoue, H., Matushima, T., Uchida, K., Nakamoto, M. (2013): Vertical ground deformation associated with the volcanic activity of Sakurajima Volcano, Japan during 1996-2010 as revealed by repeated precise levelling surveys, Bull. Volcanol. Soc. Japan, Vol. 58, pp.137-151.

Repeated Seismic Observations using Ocean Bottom Seismographs at northern part of Kagoshima Bay, and the Comparison between Hypocenters of Volcano-Tectonic Earthquakes with a Three-Dimensional Seismic Velocity Model of the Upper Crust in and around Sakurajima Volcano

Hiroshi YAKIWARA*, Syuichiro HIRANO*, Hiroki MIYAMACHI*,
Tetsuro TAKAYAMA, Nobuo ICHIKAWA, Takeshi TAMEGURI, Masato IGUCHI

* Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University

Synopsis

We have performed seismic observations using Ocean Bottom Seismographs (OBSs) at northeast of Sakurajima Volcano to detect micro volcano-tectonic earthquakes (VT earthquakes) which relate to magma accumulations and/or movements in the plumbing system of volcanic activity. In 2012 observation, we successfully retrieved data from the three OBSs. Combining the OBS data and the data recorded on land permanent stations, micro VT earthquakes were located in and around Sakurajima Volcano and Wakamiko Caldera. The most remarkable activity was the occurrence of 12 ultra-micro VT earthquakes (M-0.9 to 0.3) around the southeastern border of Wakamiko Caldera. Depth range of the events was from 0 to 5 km. Two VT earthquakes (M-0.3) were also located around 7 km depth, western side of the boarder of the caldera.

Using regional earthquake data in and around southern Kyushu, we also analyzed three-dimensional seismic velocity models in the upper crust beneath Sakurajima Volcano in order to compare the hypocenters of the VT earthquakes with the velocity model. The hypocenters of VT earthquakes locate the immediate velocity area. Some VT earthquakes occurred near the peaks of extensive low velocity areas. Accumulations of strain or existing of volcanic volatiles may control the locations of VT earthquakes.

Keywords: Sakurajima volcano, Ocean bottom seismograph, Volcano-tectonic earthquake, Three-dimensional seismic velocity model