

# 桜島火山の周辺海域における繰り返し海底地震観測

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

桜島火山のマグマ供給系へのマグマ蓄積に伴う応力変化によって発生する火山構造性地震（VT地震）を観測するために、周辺海域に4台の海底地震計（OBS）を繰り返し投入した。全てのOBSからデータを回収することに成功した。観測期間中で最も顕著な活動は、若尊カルデラ直下のVT地震47個（ $M=0.9\sim 1.7$ ）で、極微小地震または微小地震であった。そのほとんどは、深さ3~5kmで発生した。また、若尊カルデラ外の桜島北東海域に6個のVT地震の震源を決定した。その他に、九州南部の広域なテクトニック地震や大隅半島の砕石発破が観測された。決定された砕石発破の震源の深さ範囲が0~4kmとばらついた。従って、震源精度を向上させるためには、観測点補正や桜島周辺領域の地殻の地震波速度モデルの精度を向上させる必要があると考えられる。

キーワード：桜島火山、海底地震計、VT地震

## 1. はじめに

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年から地殻浅部の火山構造性地震（Volcano-Tectonic Earthquake, 以下 VT地震と記す）の活動が高まった（Hidayati et al., 2007）。桜島火山の周辺領域下のVT地震活動は、桜島南西沖だけでなく、従来ほとんど認められなかった始良カルデラ北東海域下でも発生した。これら桜島火山の周辺領域で発生するVT地震は、桜島火山直下のVT地震活動と比較すると、episodic に活動する特徴を呈する。（Hidayati et al., 2007）。Hidayati et al. (2007) は、陸上地震観測点の波形データを用いて桜島火山直下、及び周辺領域のVT地震の震源分布と震源メカニズムを求め、地盤変動観測結果とも合わせて考察することにより、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。

顕著な噴火の準備過程にあると推測される桜島火山では、深部におけるマグマ蓄積が進むにつれて生じる地殻内応力の変化に伴い、VT地震の発生が期待される。GPS観測による基線長変化から、始良カルデラの地盤は長期的に伸びの傾向（国土地理院, 2011,

第120回火山噴火予知連絡会資料）にある。その一方で、始良カルデラ北東部下のVT地震については、桜島北東部や東部の陸上地震観測点への伝搬経路上における顕著な減衰のため、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。震央の近傍において、より微小なVT地震の検出し、震源を決定するためには、既設の陸上観測点での地震観測に加えて、海底地震観測が必要である。

以上のことから、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）を用いた地震観測を計画した。観測に用いたOBSは短期自己浮上型で、トランスポンダ用の電池容量やOBSが浅海堆積物に埋積されることを回避する観点から、1回の観測期間は最長で約3ヶ月程度が限界と考えられる。従って、観測データを蓄積させるために、OBSを同一位置に繰り返し投入して観測することを計画した。繰り返し観測は、将来的には、桜島火山周辺領域の地震波速度構造の解析のための海域におけるデータの取得の目的も兼ねる。初年度の平成21年度には1回（約2ヶ月間）の観測を実施したが、OBSのレコーダーに不具合が発生し、観測期間を通してデータを収録できたのは1観測点のみ（八木原ら, 2010）で、ノイズレベルと収録波形の報告にとどまった。平成22年度には2回の観測を行い、ともに全OBS観測点で観測が成功した。本報告では、

観測の実施内容と、得られたVT地震等の震源分布を中心を示す。

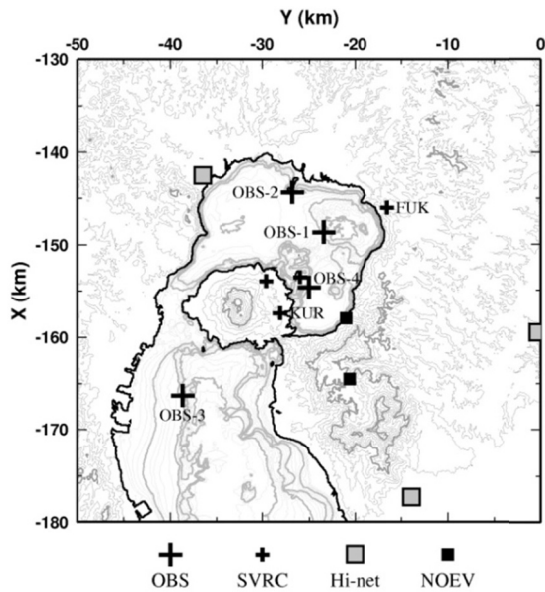


Fig. 1 Seismic stations for hypocenter location of VT earthquakes in and around Sakurajima Volcano. Isobaths in Kagoshima Bay and contours are shown by thin and thick gray lines (see the caption of Fig.3).

## 2. 観測

Fig. 1に、OBSを投入した位置、及び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、鹿児島大学大学院理工学研究科附属南西島孤地地震火山観測所 (NOEV) の地震観測点、国立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。著者らは、養殖漁業用の揚貨装置を装備した小型兼用船、第十三代丸 (総トン数15トン) を使用して、4台の短期型OBSを桜島火山の周辺海域に2回にわたって投入した (Fig.1 のOBS-1~4, Table 1)。観測期間は、2010年8月18日~11月7日 (81日間)、2011年1月23日~3月19日 (55日間) である。用いたOBSと観測点の組み合わせは2

回とも同一とした。OBSの揚収作業には、小型兼用船まゆみ (総トン数4.3トン) を用いた。OBSの投入予定位置は、小型底曳網の漁場と海上自衛隊鹿児島試験所の水中試験水域を避ける形で計画された。小型底曳網漁業は、桜島火山の周辺海域を含む鹿児島湾の水深100m以上の海底で広範囲に行われており、禁漁期の6月以外に観測機器を水深100m以深の海底に設置できない。一方、海上自衛隊鹿児島試験所の試験水域に近接した位置では底曳網漁業は行われておらず、水深100m以上の海底でも機器の設置は可能である。これらの条件や海底地形図、Hidayati et al. (2007)のVT地震発生域、及び既設の陸上地震観測点の配置を考慮してOBSの投入予定位置を決定した。結果として、OBS投入位置の自由度はほとんど無い。

OBSの地動センサーの固有周波数は4.5Hzで、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、そのうちの上位20bitが40GBのハードディスクに収録された。レコーダーには2個のハードディスクが接続されており、1個のハードディスクに障害が発生し、データを書き出せなくなった場合は、もう1個のハードディスクに書き出すように冗長性を持たせてある。レコーダーには電源としてリチウム電池 (勝島製作所, 3B76-3A) を3個並列に接続した。この個数で約3ヶ月間の連続観測が可能である。OBSが海中にある期間は、GPS電波が届かないためにレコーダーの内部時計を較正できない。そこで、OBS投入直前と揚収直後に船上において、GPS刻時とOBS内部時計の時刻差をIRIG時刻ロガー (シモレックス, SC-EDGELOG) で測定し、時刻較正のためのデータを取得した。データ収録開始日時はタイマー設定で行った。一方、データ収録の停止は、揚収後に船上でパソコン通信により手動で直ちに停止させた。OBS-3のみ1回目の観測において、揚収の約5日前に収録が停止していた (Table 1)。この障害により欠測が生じたが、この原因は分かっていない。

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

Station	Observation period	Position (WGS-84)			Horizontal distance (m) *	Station correction	
		Latitude (N)	Longitude (E)	Depth (m)		P (s)	S (s)
OBS-1	2010/08/18 14:00 ~ 2010/11/07 09:44	31° 39.5633'	130° 45.1996'	156	24.7	-0.50	-1.75
	2011/01/23 12:15 ~ 2011/03/19 09:47	31° 39.5520'	130° 45.1912'	155			
OBS-2	2010/08/19 11:00 ~ 2010/11/07 10:38	31° 41.8717'	130° 43.0490'	96	33.7	-0.53	-0.88
	2011/01/23 10:30 ~ 2011/03/19 10:31	31° 41.8574'	130° 43.0358'	99			
OBS-3	2010/08/19 15:00 ~ 2010/11/02 01:23	31° 29.9359'	130° 35.5735'	97	33.2	-0.52	-0.88
	2011/01/23 14:00 ~ 2011/03/19 11:40	31° 29.9519'	130° 35.5640'	97			
OBS-4	2010/08/19 12:00 ~ 2010/11/07 08:59	31° 36.3149'	130° 44.2018'	93	16.2	-0.33	-1.01
	2011/01/23 12:00 ~ 2011/03/19 08:59	31° 36.3223'	130° 44.1989'	93			

\*Horizontal distance between the OBSs deployed at the same station.

OBSにはトランスポンダが装備され、使用船舶に設置されたトランスデューサーとの測距やコマンドの受信が可能である。トランスデューサーの船上支援装置の電源にはAC100Vが必要であるが、使用した小型兼用船からは供給できない。そこで、正弦波インバーター（未来舎、FI-S603）を用い、ディープサイクルバッテリーから電源を供給した。矩形波や疑似正弦波インバーターによって船上支援装置にACを供給した場合、OBSと正常に通信できない。

使用した小型兼用船にはGPSプロッター等の航海計器が装備されていないため、船舶をOBSの投入予定位置や着底位置の測量ポイントまで誘導するための機材が必要である。本観測では、SBASの補正情報によるDGPSの機能をもつGPSコンパス（Hemisphere, V110, またはアイティエス21企画, V-100/21）を設置し、その出力をシリアル接続したノートパソコンに入力した。GPSコンパスから1Hz出力される船位と船首方位の情報は、ノートパソコン上の電子海図ビューワーソフト（ピーシースタジオアルファ, AlphaMap Pro, Ver. 2.15）により電子海図上の船位と船首方位の表示に用いられるとともに、NMEA0183フォーマットでノートパソコンに保存された。着底位置の測量は、このGPSデータと測距データ（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2乗法により決定した（八木原ら, 2008）。なお深さについては、海底地形図の等深線から読み取った値とした。決定された各OBSの着底位置、及び1回目と2回目の水平距離差をTable 1に示す。風潮流の影響や他船舶の動静により、OBSの同一位置（数m以内）への再着底は極めて難しいが、GPSコンパスと電子海図ビューワーソフトを用いることにより、

着底位置の差は16~34mの間に収まった。また、魚群探知機（Honden, HE-61GPII）を取り付け、投入直前において海底面の傾斜や凹凸の状況と揚収時のOBSの浮上状況の視認に用いた。使用船舶がOBSの上方に位置する場合は、沈下中や浮上中のOBSを魚群探知機の測深モード画面で確認することが可能である。海底面の傾斜の確認には、AlphaMap Proの海底地形図重畳表示機能も合わせて活用した。

使用船舶の運航上の安全対策として、AIS受信機（横浜システムマリン, AIS-R70）を使用船舶に設置した。AISトランスポンダを搭載する船舶から発信される静的、及び動的情報を電子海図ビューワー上に重畳表示させることにより他の当該船舶の動静を早期に把握した。さらに第十三代丸には、船舶共通通信システム対応の国際VHFトランシーバー（ICOM, IC-M72J）を設置し、船舶間、陸船間の海上無線通信が可能となる体制をとった。

### 3. データ処理

#### 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、OBS毎にそれぞれ、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、投入直前と揚収直後に計測したGPS時刻とOBS内部時計との時刻差のデータを用い、OBSの内部時計の差が線形にずれることを仮定して時刻較正を施した。その後、SVRCとNOEVで各々収録されている既設の陸上地震観測点のうち、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。

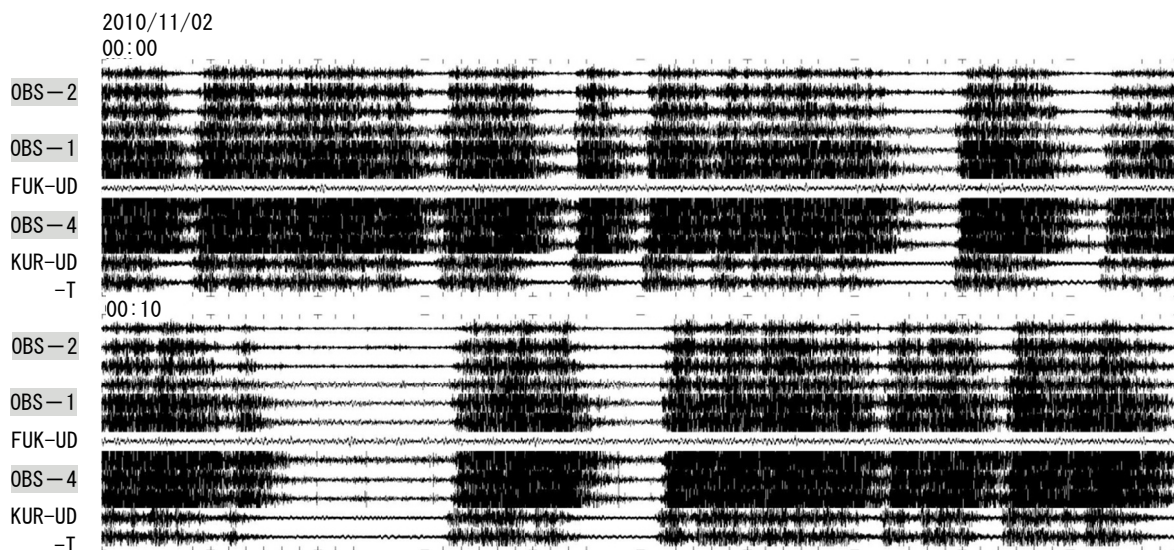


Fig. 2 An example of continuous ground motions recorded by OBSs and land stations for 20 minutes. We presume that volcanic tremor occurred at Sakurajima Volcano in this time zone. The positions of these stations are shown in Fig. 1.

### 3.2 イベントの抽出と連続波形の例

OBS観測点はいずれも浅海底、かつ陸岸に近い位置であるため、OBS観測データは、風浪や潮流によるノイズ、あるいは船舶の航過や漁業等による人工的なノイズのレベルが高い。加えて、桜島火山の火山性微動、噴火・爆発地震を含む浅部低周波地震の震動波形も頻繁に収録された。人工的なノイズは不規則である一方で、火山性震動により多様な波形が収録されるため、桜島周辺海域下のVT地震について、トリガー判定を効率良く行える判定パラメータを決めることは難しい。そこで、著者らは、WINシステムから出力され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）のテクトニックな地震を対象とし、験測可能かについて目視で判定しながら抽出した。

連続波形モニターの一例として、桜島火山の火口直下で火山性微動の活動が卓越したと推定される時間帯の20分間の連続波形をFig.2に示す。Fig.2はOBS-1, 2, 4の3成分波形とSVRCの常設陸上観測点FUKとKUR（Fig.1）の1または2成分波形を合わせて描画したものである。この例のように火口直下極浅部で火山性震動が発生した場合、波群が震央距離の最も短いKURに最初に到達する。OBS-4よりも約5s早い。一方で、桜島北東～東方下に存在が示唆される顕著な減衰領域のためにFUKでは波群の到来が不明瞭である（Fig.2）。一方、OBS観測点では、最も北方のOBS-2でも明瞭に識別可能である（Fig.2）。震動エネルギーの水中伝搬の効率が良いのであろう。これらの特徴から、桜島火山の火口直下極浅部で多発する火山性震動は、連続波形モニターを用いることにより、験測対象から容易に除外される。

## 4. 桜島火山周辺領域の微小地震活動

### 4.1 震源計算と観測点補正

モニター波形を用いて、目視でVT地震や周辺の砕石発破の波形を抽出し、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・他(1991)の1次元地震波速度モデルを用いた。また、震源計算の際に、OBS観測点直下の存在する顕著に低速度な未固結堆積物による走時の遅れが無視できない程大きい場合があるため、観測点補正を施した。観測点補正值の評価は、近地地震波形の中でP波、S波の初動が明瞭、かつ読み取り精度の良いものを抽出し、その走時残差の平均値を観測点補正值とした（Table 1）。1回目と2回目の観測間でOBSの着底位置が水平距離で16～34m程度異なるが、その影響は十分に小さいと仮定し、観測点補正值は共通とした。

### 4.2 微小地震活動の特徴

OBS観測と陸域観測のデータを結合して得られた震央分布、及び南北、東西断面図をFig.3a, cに示す。Fig.3b, dには、同期間におけるNOEVによる陸上地震観測データのみで得られた震源分布を合わせて示す。観測期間中にNOEVが桜島北東の海域に決定した地震数は合計3個であった（Fig.3b, d）。高ノイズレベルの浅海域におけるOBS観測も微小地震活動の検知や震源決定に有用であることが示された。

OBS観測期間中、桜島火山周辺領域で発生した地震活動の中では、始良カルデラ北東部（若尊カルデラ付近）のVT地震が最も数が多い。両観測期間で合計47個の震源が決定された。これらの中での最大と最小の地震の規模はそれぞれ、M1.7とM-0.9であった。また、M1.0未満とM0.0未満の地震数はそれぞれ、44個と30個で、極微小地震または微小地震であった。ただし、OBS観測点ではノイズレベルの変動が大きく、M0未満の極微小地震については、ノイズレベルが十分に低い時にのみ震源決定が可能であると推定される。

若尊カルデラ付近のVT地震の震央は、ほとんどが若尊カルデラの輪郭（概ね150m等深線に対応する、Fig.3b）の内側に位置する。深さが3～5kmに決定されたものがほとんどである。深さ5km以深に決定された地震が4個、深さ3km以浅に決定された地震が4個あった。数が少ないながらも、若尊カルデラの外側の南西～南南西方向の海域下にもVT地震が6個決定された。

一方、桜島火山東方の大隅半島西岸付近に地震の集中域が認められる。これらのイベントは、発生時刻と波形から砕石発破と推定される。これらの震源の深さ範囲が0～4kmに決定される他、震央分布にもばらつきが認められ、OBS観測点直下の未固結堆積物による顕著な走時遅れが十分に補正されていないことが示唆される。データを蓄積しながら、観測点補正と地殻の地震波速度モデルの精度を向上させる必要があると考えられる。

## 5. まとめ

桜島火山の周辺海域の4点において海底地震観測を繰り返し実施した。観測期間中の最も顕著な活動は、若尊カルデラ直下で発生した47個のVT地震（M-0.9～1.7）であった。そのほとんどが深さ3～5kmに位置する。この他、桜島北東海域（若尊カルデラ外）にも6個のVT地震の震源を決定した。一方、砕石発破が観測され、震源決定で推定された深さや震央のばらつきが大きいことが分かった。観測点補正や地震波速度モデルの精度を向上させる必要がある。



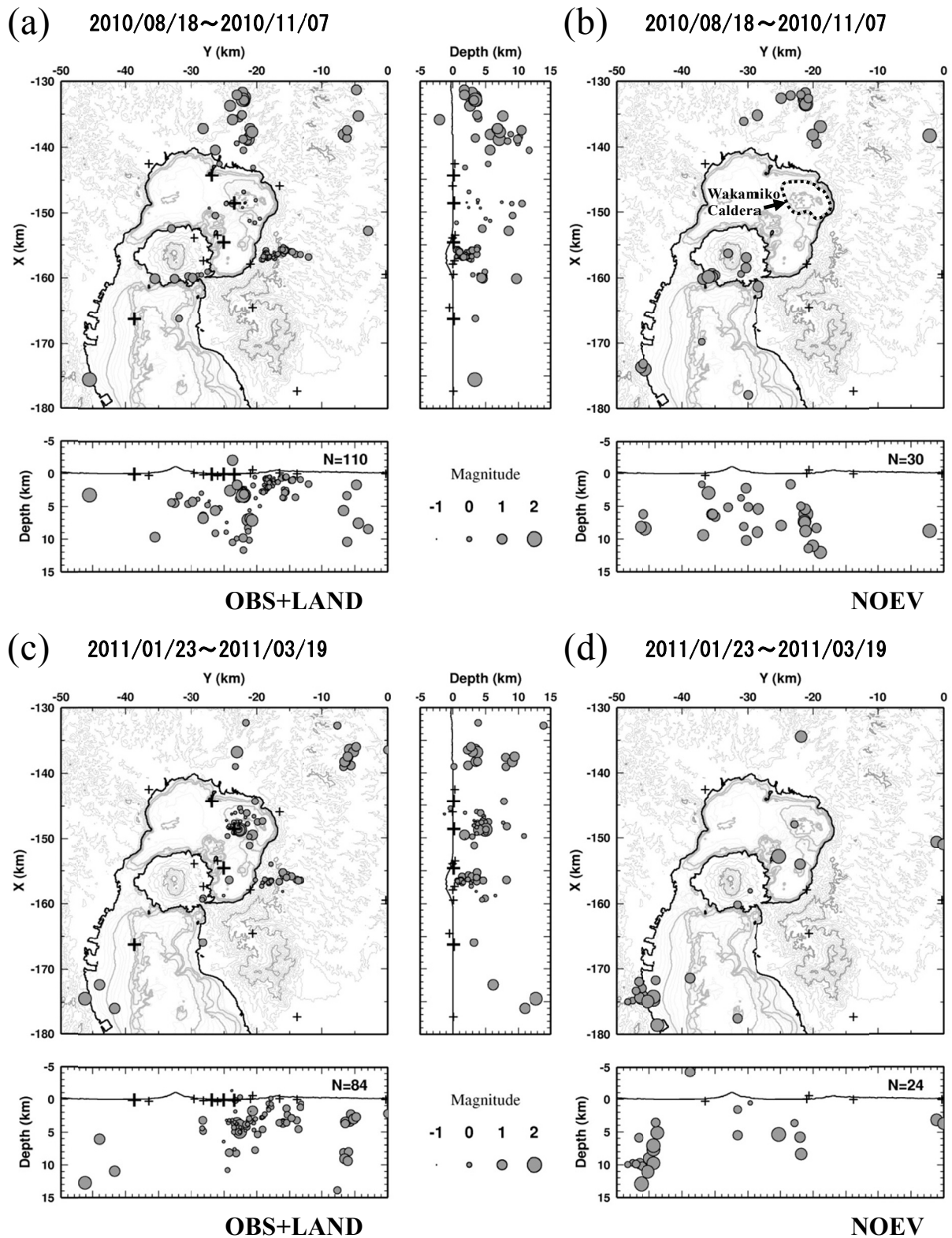


Fig. 3 Epicenter distributions and the vertical cross sections of earthquakes and artificial shots in around Sakurajima Volcano every periods of the repeated sea bottom observations. The hypocenters of (a) and (c) were located by using of data recorded by OBS and land seismic stations. Distributions of (b) and (d) were drafted using earthquake catalog listed by NOEV (only land stations). 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. A dotted line in the epicenter map of (b) shows outline of Wakamiko Caldera, which almost corresponds with 150m isobaths.

## 謝 辞

汽船第十三三代丸の篠原重人船長，汽船まゆみの坂元忠実船長，坂元孝次船長には終始協力いただきました。鹿児島大学大学院水産学研究科附属南星丸の内山正樹船長，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。海上自衛隊鹿児島試験所，鹿児島県漁業共同組合連合会，錦江漁業共同組合をはじめとする鹿児島湾内の小型底曳網漁業者，まき網漁業者の皆様には，観測の実施内容等について御理解を賜りました。鹿児島海上保安部交通課には使用船舶の航行に関する事項を，日本小型船舶検査機構鹿児島支部には使用船舶の検査に関する事項を，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。以上の皆様に記して感謝申し上げます。

## 参考文献

- 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・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.
- Hidayati, S., Ishihara, K. and Iguchi, M. (2007): Volcano-tectonic Earthquakes during the Stage of Maguma Accumulation at the Aira Caldera, Southern Kyushu, Japan, Bull. Volcanol. Soc. Japan, Vol. 52, pp. 289-309.

## Repeated Seismic Observation at Sea Bottom around Sakurajima Volcano

Hiroshi YAKIWARA\*, Shu'ichiro HIRANO\*, Hiroki MIYAMACHI\*,  
Tetsuro TAKAYAMA, Nobuo ICHIKAWA, Takeshi TAMEGURI, Masato IGUCHI

\* Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University

### Synopsis

We deployed repeatedly 4 Ocean Bottom Seismographs (OBSs) around Sakurajima Volcano to observe the volcano-tectonic earthquakes (VT earthquakes) excited by the stress change in relation to the magma accumulation to the supply system. We successfully retrieved data of all OBSs. In the observation periods, the most remarkable activity was the 47 events of the ultra-micro and/or micro VT earthquakes (M-0.9~1.7) beneath Wakamiko Caldera. The most of the events occurred from 3km to 5km depths. 6 VT earthquakes were also located northeast sea area of the volcano. The other events were regional tectonic earthquakes of South Kyushu and artificial shots generated at Osumi peninsula. Hypocenters of the shots widely distributed in depth range (0~4km depth). Therefore, it is necessarily to improve the accuracy of the corrections and the seismic velocity model of the crust around the volcano.

**Keywords:** Sakurajima volcano, Ocean bottom seismograph, Volcano-tectonic earthquake