

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

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的な地震（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。1台で機器にトラブルが生じ、2台のみデータを回収に成功した。観測期間中で最も顕著な活動は、若尊カルデラ付近のVT地震14個（M-0.8~0.8）で、深さ0~12kmに分布した。また、若尊カルデラ外の桜島北東海域に5個のVT地震の震源を決定した。桜島火山周辺の広域における、より長期の地震活動変化を見るために、陸上地震観測網のデータを用いて2001年以降の地震発生レートの時間的・空間的变化を調べた。桜島下のマグマ供給率が顕著に増大した期間に地震活動が活発化し、その供給率の増大が終息すると地震活動が静穏化した領域が複数存在する可能性があることが分かった。

キーワード: 桜島火山、海底地震計、VT地震、広域地震活動

1. はじめに

GPS観測（例えば井口ら，2011）や水準測量（例えば山本ら，2011）で得られた地盤変動の時間変化から、始良カルデラの地盤は長期的に膨張が卓越し、桜島火山は顕著な噴火活動の準備過程にあると推定される。始良カルデラ下のマグマ溜まりへのマグマ蓄積の進行により、その周辺領域において歪が蓄積することに伴い、火山構造的な地震（Volcano-Tectonic Earthquake, 以下 VT地震と記す）の発生が考えられる。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地震の活動が高まった（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、地盤変動観測結果を含め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。ただし、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や観測点直下の表層のいずれかで顕著な減

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。震央の近傍において、より微小なVT地震の検出し、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。

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。観測に用いるOBSは短期自己浮上型で、1回の観測期間は最長で約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して2009（平成21）年度から年次的に観測することを計画した。2010（平成22）年度に、ようやく全OBS観測点で観測が成功し、陸上地震観測網のみでは検出が困難な、若尊カルデラ下や桜島北東海域に偏在する微小なVT地震の震源分布の特徴を明らかにした（八木原ら，2011）。本報告では、2011（平成23）年度に引き続き実施した繰り返し観測と解析結果について報告する。

この一方で、本観測に用いるOBSは、特定の時期に他の海域における地震観測にも使用するため、桜島火山周辺の海域に年間を通じて投入することができない。従って本観測は、桜島火山周辺で発生する微小VT地震活動の長期的な時間変化を把握できる

状況には到達していない。そこで著者らは、大学、JMA、Hi-net で構成される陸上地震観測網の検知能力が2000年半ば以降、ほとんど変化していないことに着目し、2001年以降の2012年までの約12年間における、桜島火山周辺の広域における地殻内浅部地震活動の時間変化についても調べた。クラスター活動による見かけの地震数増加を除去したバックグラウンド活動の時間変化を示すとともに、始良カルデラ下のマグマ溜まりにおけるマグマ蓄積速度が増大した期間（井口ら、2011）において、バックグラウンドの地震活動が増大し、期間後に活動が減少した領域のマッピングを行ったので、合わせて報告する。

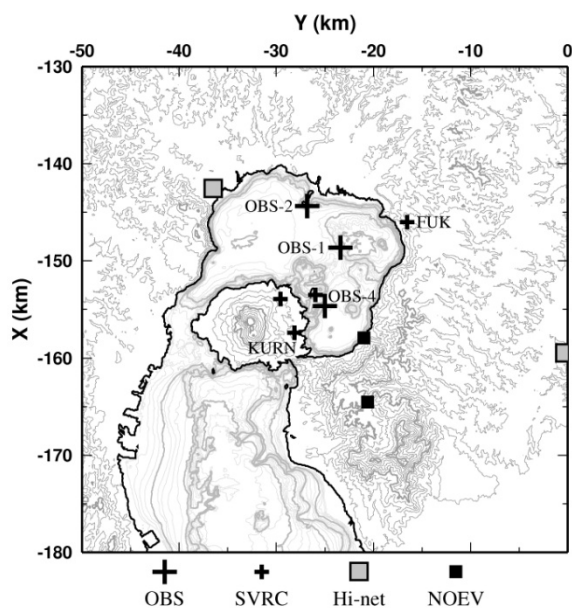


Fig. 1 Seismic stations for hypocenter location of VT earthquakes in and around Sakurajima Volcano. In Kagoshima Bay, the depth intervals of thin and thick gray isobaths are 10 and 50 meters, respectively. Additionally, the altitude intervals of contours on land are 100 and 500 meters, respectively.

2. OBS観測

Fig. 1に、OBSの着底位置（OBS-2は投入位置）、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弧地震火山観測所（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、3台の短小型OBSを桜島火山の周辺海域に投入した（Fig.1

のOBS-1, 2, 4, Table 1）。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た位置に計画された。これらの制約により、鹿児島湾奥部におけるOBS投入位置の自由度はほとんど無い（八木原ら、2011）。OBS観測期間は、2011年10月18日～2012年1月25日（約99日間）であった。2010年度は4台のOBSを用いて2期間において観測を実施できた（八木原ら、2011）が、OBSの錘部の仕様変更に伴い、経費が大幅に増加したために3台のOBSを用いた1期間のみの実施にとどまった。

一方でOBS-2 (Fig.1) は、投入直後にトランスポンダにトラブルが生じたとみられ、音響通信不能に陥った。投入の約2ヶ月後の2011年12月20日に小型兼用船、まゆみ（総トン数4.3トン）でOBS-2の状況調査に向いたところ、海面に既に浮上した状態のOBSを視認したため揚収作業を行い、辛うじて観測機器の紛失は免れた。収録データから、OBS-2は投入・着底の約6時間後に自己浮上したことが分かった。ただし、トラブルの原因は本稿執筆時点においても不明のままである。OBS-1およびOBS-4の揚収は、2012年1月25日に鹿児島大学水産学部附属練習船南星丸（総トン数280トン）で実施した。

OBSの地動速度センサーやレコーダーは2010年度の観測で用いたものと同一である。センサーの固有周波数は4.5Hzで、その出力は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、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。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の船上において、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。投入直前の準備作業において、確実に着底した後と見積もられる時刻を15分単位でデータ収録開始に設定した。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。2010年度の1回目の観測で生じた揚収前の予期しない収録停止（八木原ほか、2010）は発生しなかった。また、OBS-1とOBS-4は観測期間中のデータ収録に欠測は無かった。なお、2009年度から繰り返し実施してきたOBS観測の期間長は、堆積物による錘部の埋積の恐れから概ね2ヶ月を基準に計画してきたが、今回の観測により、陸域に囲まれた浅海である鹿児島湾奥部においても、3ヶ月超の観測が可能であることが実証された。

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

| Station | Observation period | Position (WGS-84) | | | Station correction * | |
|---------|--|-------------------|---------------|-----------|----------------------|-------|
| | | Latitude (N) | Longitude (E) | Depth (m) | P (s) | S (s) |
| OBS-1 | 2011/10/18 12:00 ~ 2012/01/25 09:57 | 31° 39.5561° | 130° 45.2130' | 155 | -0.50 | -1.75 |
| OBS-2 | 2011/10/18 10:00 ~ 2011/10/18 16:08 ** (| 31° 41.8573° | 130° 43.0277' | 98) *** | -0.53 | -0.88 |
| OBS-4 | 2011/10/18 11:00 ~ 2012/01/25 10:53 | 31° 36.3111° | 130° 44.1871' | 92 | -0.33 | -1.01 |

*Yakiwara et al. (2011)

** Contrary to our expectation, this OBS floated up to the sea surface at the day of deployment. We retrieved the OBS on December 20, 2011.

*** Position of the release point at the deployment operation. The depth was read from isodepth line data.

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（八木原ら，2011）。さらに、揚収航海においては、安全強化と省力化を計るため、AC電源をバッテリーとインバーターが一体化されたポータブルな電源装置（Enax, PowerBattery AC）に更新した。

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へ精密に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（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で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ソフト（ピーシースタジオアルファ、AlphaMap Pro, Ver. 2.17）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）。なお着底位置の水深は、測距で仮定された音速と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。また、投入直前の海底面の傾斜や凹凸の状況、投入直後のOBSの沈下、揚収作業におけるOBSの浮上の確認のため、魚群探知機（Honden, HE-61GPII）を用いた。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（八木原ら，2011）。

使用船舶の運航上の安全対策として、投入作業と

着底位置のための測量作業で複雑な航跡をとる第十三代丸には、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）の設置（八木原ら，2011）に加えて、クラスB AIS送受信機（SAMYUNG ENC, AIS-50N）を新規に導入し、周囲の船舶に向けて使用船舶の静的・動的情報を発信する体制とした。

3. OBSデータの処理

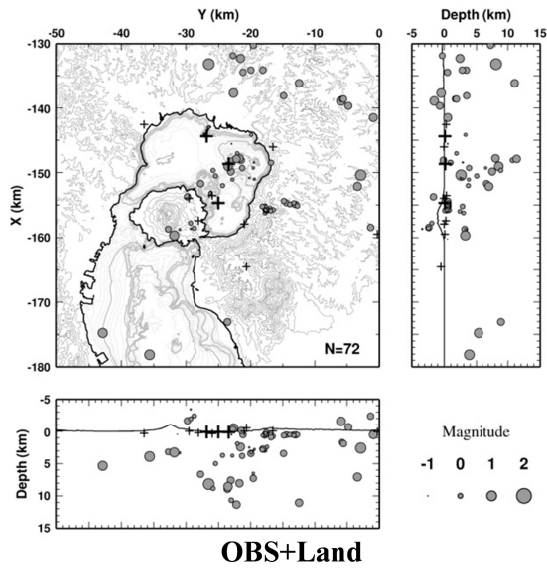
3.1 OBSデータの時刻較正とデータ結合

OBSで収録されたデータは、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、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（八木原ら，2011）。

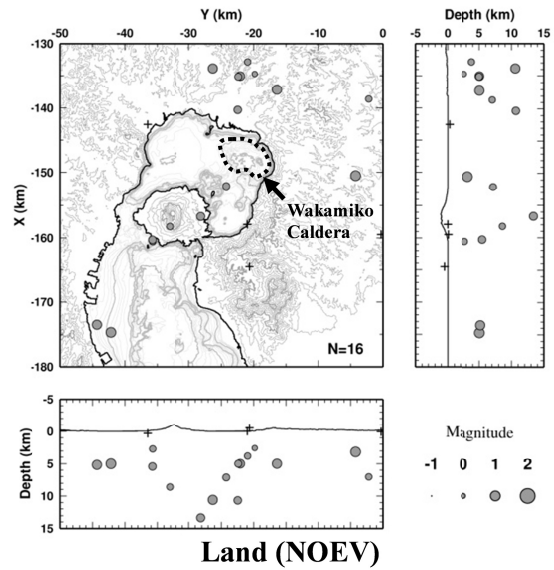
3.2 イベントの抽出

鹿児島湾奥部は浅海で、かつ養殖事業や底引網漁業等の漁業生産活動が活発である。従って、OBSで取得された波形データは、風浪や潮流による自然のノイズだけでなく、船舶の航過や操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発生時には、湾奥部全体が震動し（八木原ら，2011）、ターゲットとするVT地震の検出や検測は極めて困難である。以上のことから、本観測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はそぐわない。そこで著者らは、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）のテクトニックな地震、さらに不明なイベントを対象とし、

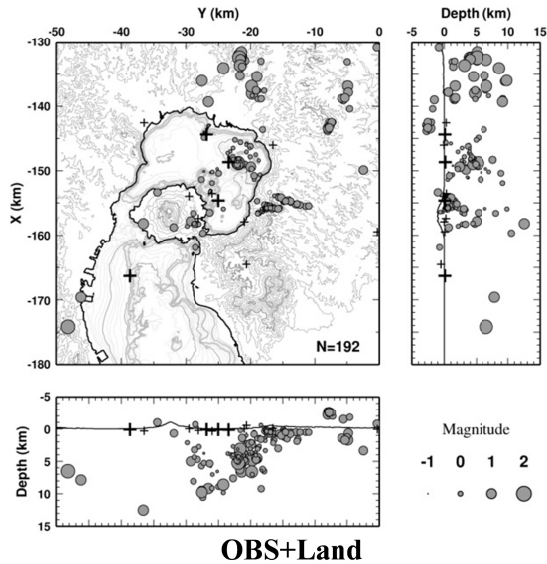
(a) 2011/10/18 ~ 2012/01/25



(b) 2011/10/18 ~ 2012/01/25



(c) 2010/08/18 ~ 2010/11/07
+ 2011/01/23 ~ 2011/03/19



(d) 2010/08/18 ~ 2010/11/07
+ 2011/01/23 ~ 2011/03/19

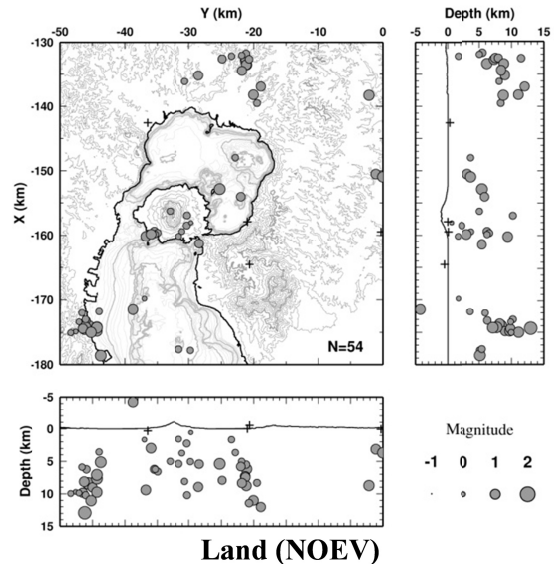


Fig. 2 Epicenter distributions and the vertical cross sections of earthquakes and artificial shots in around Sakurajima Volcano every periods of the repeated sea bottom observations. The hypocenters of (a) and (c) were located by using of data recorded by OBS and land seismic stations. Distributions of (b) and (d) were drafted using earthquake catalog listed by NOEV (only land stations). A dotted line in the epicenter map of (b) shows outline of Wakamiko Caldera, which almost corresponds with 150m isobaths.

目視でイベント抽出を行った。連続波形モニターで出力したデータは、OBS-1 と OBS-4 の3成分、KURN と FUK の2成分(上下動成分と水平動1成分)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。すなわち、桜島火山浅部の火山性微動、低周波地震といった浅部火山性震動は、KURNとOBS-4

との初動到達時刻差が大きく (~5s)、VT地震や広域のテクトニックな地震等は、時刻差が小さい(みかけ速度が大きい)。このことから、VT地震と桜島浅部の低周波地震との区別は容易である。一方、FUKのS/Nについては、桜島の浅部火山性震動ではシグナルが見えない、もしくはS/Nは著しく小さいが、VT地震や広域のテクトニックな地震等はS/Nが大

きい。これらの観測点相互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。

4. 桜島火山周辺領域の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検出した。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）。また、震源計算の際には、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 微小地震活動の特徴

OBS観測と陸上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.2a に示す。Fig.2a に示された震源は、震源要素の計算の結果、解が収束したもののみで、合計72個であった。Fig.2b 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。OBS観測期間中、Fig.2bの領域内にNOEVが決定した地震数は16でまた桜島の東岸～北東海域に決定した地震数は2個であった（Fig.2b）。2010年度に2回実施したOBS観測期間中の震源分布をFig.2c（OBS観測と陸域観測のデータを結合した結果）とFig.2d（陸上観測データのみ）の結果）に示す。2010年度観測の延べ日数を考慮すると、2011年度観測で決定された桜島北東海域の地震数に、有意な変化は認められない。

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最も多いのは、若尊カルデラ付近のVT地震が14個で、深さは0～12kmに分布する。これらのうち、最大と最小の地震の規模はそれぞれ、M0.8とM-0.8であった。また、M0.0未満の地震数は7個であった。ただし、これらは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、ノイズや桜島浅部の火山性震動の発生状況に依存する。

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（輪郭が概ね150m等深線に対応する；Fig.2b）の南西部からカルデラ壁にかけての領域で発生する。2010年度観測（Fig.2c）と比較すると、震央の集中が若尊カルデラの中心から南西側にオフセッ

トすることと、深さ約12kmの相対的に深く決定された地震がある点である。一方、数が少ないながらも、若尊カルデラの外の南西領域から南南西方向の海域下にもVT地震が5個決定された。桜島火山東方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23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0.1～0.8km(20個)と2.4～3.0km (3個) に決定された。

5. 桜島火山周辺の広域地震活動の変化

5.1 デクラスタ処理によるバックグラウンドの地震発生レート

年間を通じてOBS観測ができないため、陸上の連続地震観測点のデータを用いて桜島火山周辺の地震回数変化を調べた（Fig.3）。2000年秋期のHi-net観測点稼働開始以後現時点まで、観測点の数や密度に有意な変化は無いため、2000年秋期以降の約12年間において、均質な条件の下で九州南部の地震活動を比較することができる。後藤ら（2002）によれば、桜島周辺領域において、ノイズに左右されずに震源が決定される地震の規模の下限はM1.0である。本報告では、Fig.3の右上の地図に示された対象領域内で、2001年1月から2012年11月までの期間に発生したM1.0以上で、かつ深さ15km以浅の地殻内地震を対象とした。なお、対象領域の設定には明確な根拠は無く、桜島火山を含む十分に広い領域で、かつ北側は霧島火山を含まない領域とした。

Fig.3の左上図は、月別発生回数を1日あたりの回数に換算した地震発生レートを示す。地殻内でクラスター活動が発生すると見かけ上、発生レートが顕著に増加する。そこで、リンク法（野口、2007）を用いてデクラスタ処理を行い、見かけ上の発生レートの増加を除去した、対象領域内のバックグラウンドの地震活動の発生レート時間変化を求めた。Fig.3の2段目以降は、デクラスタ処理のパラメータをそれぞれ変化させた場合の結果を示す。相互の比較から、バックグラウンド活動回数の時間変化は相似であり、パラメータにほとんど依存しないことが分かる。以下では、内陸地震のデクラスタ処理のパラメータ依存を検討した野口（2007）の結果に従い、2日以内に震源距離3.0km以内で発生した地震をクラスター活動に属すると判定して除去し、発生レートを計算した。以下では、バックグラウンド地震活動の発生レートの時間変化を、単に“バックグラウンド活動のレート”と記す。

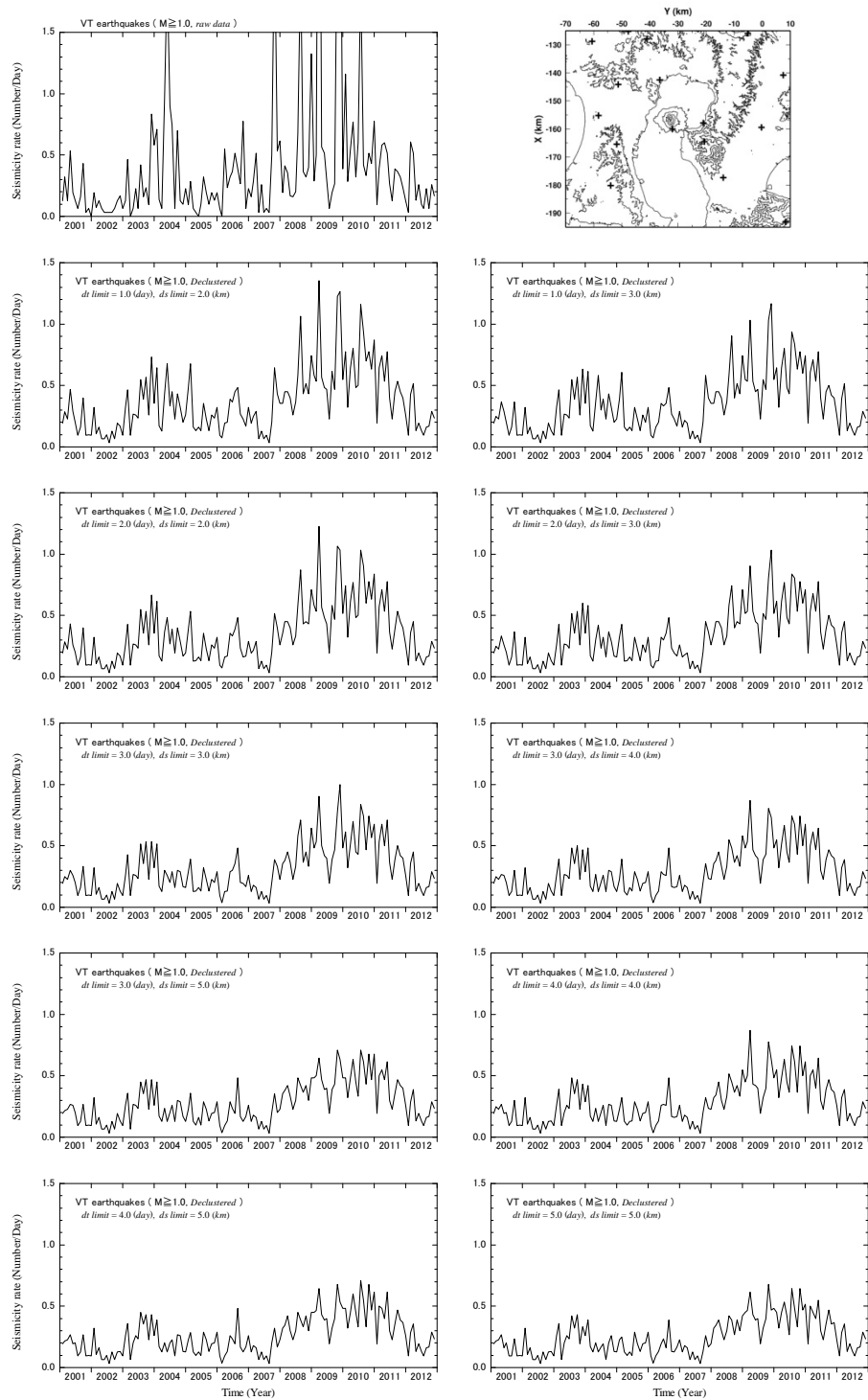


Fig. 3 Seismicity rate change in and around Sakurajima Volcano from 2001 through 2012. Top left: Numbers of crustal earthquakes which occurred in an area map (top right). Only earthquakes shallower than or equal to 15km depth with magnitude larger than or equal to 1.0 were counted. The other graphs: Results of declustering using link method (Noguchi, 2007) was applied to the earthquake list. The parameters, “dt limit” and “dr limit”, are the thresholds of judge whether the individual earthquake is removed from the count or not. The earthquakes within “dt limit (days)” and “dr limit (km)” were excluded as “linked earthquakes” to obtain background seismicity.

5. 2 バックグラウンドの地震発生レートと地盤変動との比較

Fig.4 は、バックグラウンド活動のレート、デクラスタ処理後の地震回数積算、及び桜島島内外の2測線

(GEONET)の基線長変化の比較を示す。この結果、バックグラウンド活動のレートは、基線長変化とは相関しないように見える。すなわち、2007年末以降、バックグラウンド活動のレートが有意に増加したが、

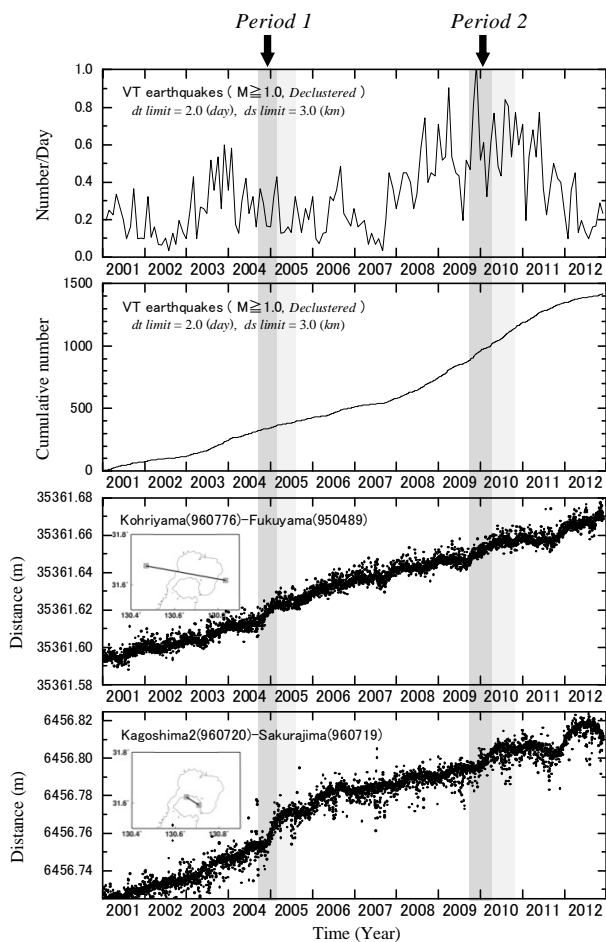


Fig.4 Comparison between the background seismicity rate and distance change of two GPS base lines in and around Sakurajima Volcano. Dark and light gray-bands indicated by arrows (Period 1, 2) show the periods when extensive input rates of magma (Iguchi et al., 2011) were estimated at a pressure source beneath the volcano. Two maps in the graphs show positions of the GPS lines.

対応づけられる基線長変化のトレンド変化は無い。ただし、2003年頃に生じたバックグラウンド活動のレートの一時的な増加は、2基線長のトレンドのわずかな変化に同期しているかもしれない。以上のことから、当該領域のバックグラウンド活動のレートは、大局的には広域のテクトニックな活動に支配されていると考えられる。

井口ら (2011) は、桜島火山の地盤変動圧力源の体積変化量と火山灰放出量から求めたマグマ供給量を示した。推定されたマグマ供給率 (平均供給率に対する割合) は、2004年10月から2005年2月に $1.8 \times 10^7 \text{m}^3/\text{年}$ (約2倍) , 2009年10月から2010年3月に $3.8 \times 10^7 \text{m}^3/\text{年}$ (約4倍)である。また圧力源の体積変化量は、マグマ供給量とほぼ同じトレンドを呈するので、マグマ供給率が増加する時期は、圧力源の体積変化

量も増加すると言える。これらの時期におけるバックグラウンド活動は、前者の期間 (Fig.4 で Period 1 と印された濃灰色の期間) には有意な変化が認められないものの、後者の期間 (Fig.4 の Period 2でPeriod 2と印された濃灰色の期間) は、バックグラウンド活動のレートのピーク時期に相当する。いずれにしても、対象領域全体のバックグラウンド活動のレートと基線長のトレンドとの間に明瞭な関係が存在するとは言い難い。

5. 3 マグマ供給率の増加に対応して seismicity が変化した領域のマッピング

バックグラウンド活動のレートと地盤変動の時間変化との間には明瞭な相関は認められないが、特定の領域で、マグマ供給率が平均の数倍に増加した期間に seismicity が活発化し、その直後にマグマ供給率が低下した期間に seismicity が静穏化するかもしれない。すなわち、マグマ供給率の増加と seismicity の活発化に続いて、マグマ供給率の減少 (停止や負の供給率も含む) と seismicity の静穏化が組み合わせて現れる領域において、桜島火山下のマグマ供給率 (蓄積率) を反映して seismicity が変化する可能性がある。そこで、著者らは、デクラスタ処理後のデータ (震源リスト) を用いて、Period 1と2の期間 (Fig.4の濃い灰色) に seismicity が活発化した領域と、それに隣接する同じ時間長の期間 (Fig.4の薄い灰色) に seismicity が静穏化した領域をマッピングした (Fig.5, 及び Fig.6)。

Fig.5a,5bは、Period 1の期間に seismicity が活発化した領域を示す。発生レートの増加が大きいほど色が濃い。Fig.5c, 5dは、それに隣接する期間に seismicity が静穏化した領域を示す。色の濃さは静穏化の強さに対応する。発生レートの変化が大きい程、色が濃い。Fig.6a~d は、Fig.5a~d と同じ処理を Period 2 とそれに隣接する期間に対して行った結果である。対象領域を $5\text{km} \times 5\text{km}$ のブロックに分け、 seismicity 変化の指標として発生レートの変化量と z 値 (Haberman,1983) の両方を求めて示した。z 値は、含まれる地震数が多い程、また発生レートの分散が小さい程、絶対値が大きな値をとる。絶対値が1.96の場合、有意水準5%で seismicity が増加、または低下したとされる (Habermann, 1983)。発生レートの変化量と z 値の算出は、同じ時間長で隣り合う2期間の震源リストを用いて行った。例えば、Fig.5bの震源分布はPeriod 1 (2004年10月から2005年2月の5ヶ月間) のものであり、Fig.5aの震源分布は直前で同じ時間長の5ヶ月間 (2004年5月から2004年9月) のものである。両震源分布から求めた発生レートをFig.5aに、z 値をFig.5bに示した。同様に、Fig.5c, 5dは、Period 1とそ

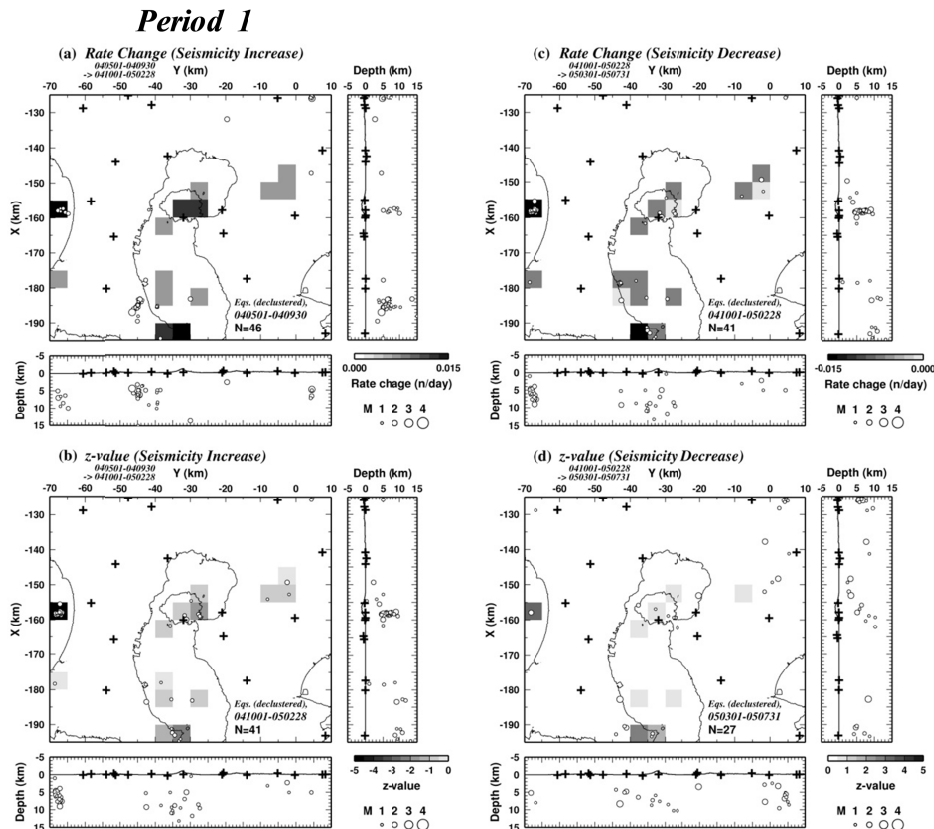


Fig. 5 Distribution of seismicity rate change at Period 1 (Fig.4, Oct. 2004 - Feb. 2005) and the next period (Mar. 2005 - Jul. 2005): (a) rate changes at Period 1, (b) z-values (Habermann, 1983) at Period 1, (c) rate changes at the next period, (d) z-values at the next period. Only areas where seismicity increased are drawn in (a) and (b). On the contrary, only seismicity decrease areas are depicted in (c) and (d). The periods of hypocenter distribution and the numbers of earthquakes (after declustering) are written in the lower right of each map.

の直後の5ヶ月間（2005年3月から2005年7月）の2期間の震源分布から求められた。

よりマグマ供給率が大きい時期に相当する Fig.6a, 6bを見ると、桜島島外の複数の領域で seismicityの活発化が認められる。特に鹿児島湾中央部から薩摩半島南東岸にかけての領域、薩摩半島西岸、大隅半島中部、鹿児島湾北岸付近で有意に seismicityが活発化した。その他、薩摩半島の内陸部の5ブロックで seismicityがやや活発化したと見られる。桜島の南方の、鹿児島湾の中央付近から薩摩半島東岸付近にかけての領域は seismicityが活発化したと示されるブロックが複数隣り合っており、相対的に広範囲に活動変化が生じたと推測される。直後にマグマ供給率が減少した期間の Fig.6c, 6dを Fig.6a, 6bと比較すると、 seismicityの静穏化が認められた領域が Fig.6a, 6bの seismicityが活発化した領域とほぼ一致する。なお、計算した2期間の震源分布 (Fig.6c, 6d)を見ると、対象領域の地震数が119と118でほとんど変わらないため、領域全体で地震発生数が低下したのではない。

マグマ供給率が次に大きい時期に相当する Fig.5a, 5bを見ると、鹿児島湾中央部から薩摩半島南東岸にかけての領域、薩摩半島西岸、大隅半島中部で seismicityが活発化している。興味深いことに、これらの領域は、 Fig.6a, 6bで seismicityが活発化した領域とほぼ同じである。一方、 Fig.6a, 6bで seismicityが活発化した鹿児島湾北岸付近や薩摩半島の内陸部において seismicityは活発化していない。マグマ供給率が大きい期間の方がより多くのブロックで活発化するのかもしれない。さらに、発生レートやz値の大きさを比較すると Fig.6a, 6bが Fig.5a, 5bよりも大きい。解析対象が2期間 (Period 1, 2) に限定されるが、これらの領域は桜島火山下のマグマ供給 (蓄積) 率の増減に応答する可能性がある。

6. 議論

2011年度のOBS観測では、OBS-2の機器トラブルにより、特に若尊カルデラ付近のVT地震活動の検知能

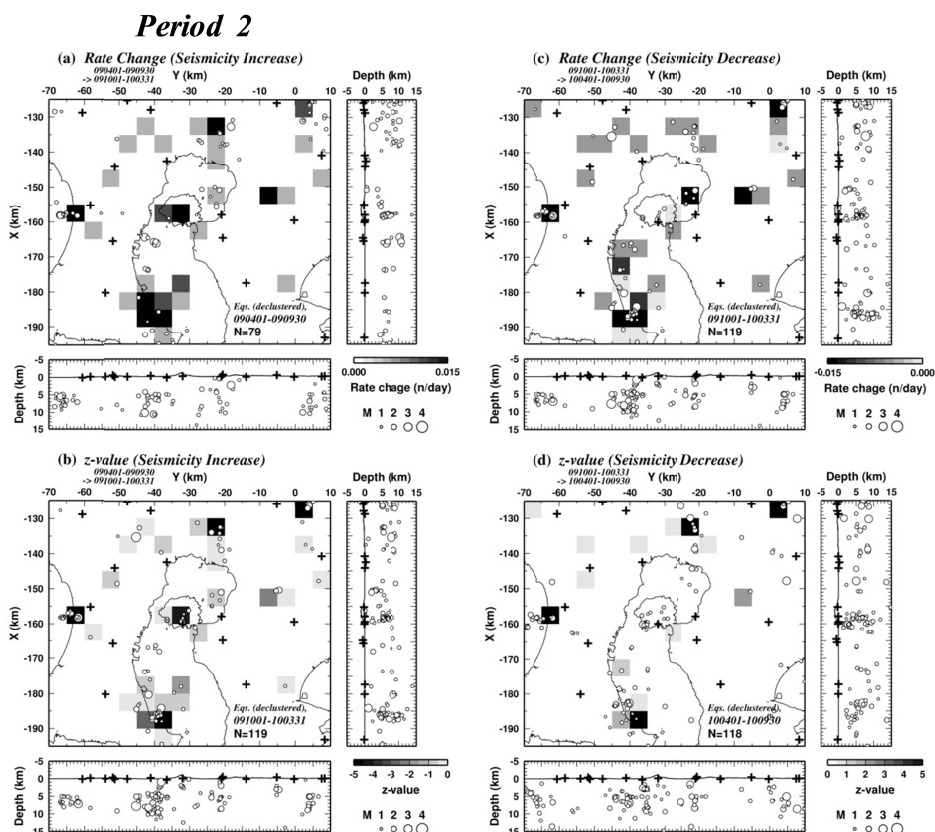


Fig. 6 Distribution of seismicity rate change at Period 2 (Fig.4, Oct. 2009 - Mar. 2010) and the next period (Apr. 2010 - Sep. 2010): (a) rate changes at Period 2, (b) z-values (Habermann, 1983) at Period 2, (c) rate changes at the next period, (d) z-values at the next period. The others are same as Fig.5.

力や震源精度を2010年度観測と2011年度観測との間で比較することは難しいが、震源分布には概ね同様の特徴が認められる。2010年度と2011年度の3回の観測で得られたVT地震の震源分布を3次元P波速度モデル（為栗ら、私信）と比較すると、深さ2~6kmの桜島北東海域におけるVT地震活動は、相対的に低速度な領域に分布する。一方で、深さ6~10kmでは、VT地震活動が高速度領域に分布する。浅部では破碎が進み、相対的に低速度な領域で歪の蓄積の進行に伴うVT地震の発生、もしくは若尊カルデラの活発な海底熱水活動を長期に安定して継続させる熱水供給に伴う間隙水圧の増加が関係しているかもしれない。一方、深さ6~10kmの相対的に深部では、高速度領域にVT地震が分布することから、桜島の北東に推定されるマグマ供給系の活動と関連することが示唆される。すなわち、圧力増加したマグマ供給系近傍の高速度領域で歪が蓄積し、VT地震が発生するのかもしれない。それよりも西側の非地震領域は、3次元P波速度モデル（為栗ら、私信）における明瞭な低速度領域と対応する。

Fig.2aと2cの砕石発破の震源を比較すると、大隅

半島西岸付近の発破が震央分布、震源分布ともに、2011年観測の方のまとまりが良い。これは、OBS-2の観測値の有無が影響した可能性がある。さらに、3観測期間を通じて桜島南岸付近に決定された地震は、桜島の南南西の地震活動域で発生したVT地震と推測される（為栗、私信）。以上のことは、震源決定に用いた1次元構造、または1次元構造に基づいた観測点補正に限界があり、地震波速度が深さ方向だけでなく、横方向にも有意に変化しているために3次元的速度モデルを適用する必要があるのかもしれない。データのさらなる蓄積と3次元地震波速度モデルを導入しての観測点補正の評価と震源計算を行う必要がある。ただし、3次元地震波速度モデルの震源計算への導入は、解が振動して収束しにくくなる恐れもあるため、1次元速度構造を用いた計算結果や解の収束過程と比較しながら、慎重に検討しなければならない。

桜島火山下のマグマ供給（蓄積）率と広域の地殻内浅発地震活動について発生レートとz値の分布を求めて比較した結果、共通した複数の領域において、マグマの供給率が顕著に増加するとseismicityの活発

化し、マグマ供給率の顕著な増加が終息すると seismicity が静穏化したことが分かった。さらに、マグマ供給率の強度によって seismicity の変化が現れる領域の拡大や発生レートの増加が左右される可能性が示唆された。これらを検証するために、始良カルデラ下の地盤変動圧力源のパラメータを用いて、静的応力変化やクーロン応力変化といった定量的な解析を行う必要がある。

7. まとめ

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成地震 (VT地震) を観測するために、鹿児島湾奥部海域の3点において海底地震観測を繰り返し実施した。うち、1点で機器にトラブルが発生してデータは取得できなかったが、機器は揚収された。残りの2点については、投入期間中全てのデータ回収と時刻校正に成功した。

観測期間中の最も顕著な活動は、若尊カルデラ南西付近で発生した14個のVT地震(M-0.8~0.8)で、深さ0~12kmに決定された。この他、桜島北東海域(若尊カルデラ外)にも5個のVT地震の震源を決定した。

年間を通じてOBSを投入できないため、OBS観測のみでは時間変化を捉えるのが困難である。そこで、桜島火山周辺の広域における、より長期の地震活動変化を見るために、陸上地震観測網のデータを用いて2001年以降の地震発生レートの時間的空間的变化を調べた。桜島下のマグマ供給率が顕著に増大した期間(2004年10月から2005年2月、2009年10月から2010年3月)において、鹿児島湾中央付近から薩摩半島南東岸、薩摩半島西岸、大隅半島中部で seismicity の活発化が認められた。さらに、これらのマグマ供給の増大が終息した期間において、ほぼ同じ領域の seismicity が静穏化したことが分かった。

謝 辞

汽船第十三三代丸の篠原重人船長、汽船まゆみの坂元孝次船長、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、気象庁、防災科学技術研究所(Hi-net)、国土地理院(GEONET)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

- 井口正人・太田雄策・中尾 茂・園田忠臣・高山鐵朗・市川信夫(2011): 桜島昭和火口噴火開始以降のGPS観測 2010年~2011年, 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.35-41.
- 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(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, pp.29-34.
- 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.
- 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.
- 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.

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.

後藤和彦・大屋 恵・森 直子・八木原 寛・角田 寿喜 (2002) :九州南部・南西諸島北部域に発生する地震の検知能力について, 鹿児島大学理学部紀要, 第35号, pp.49-59.

野口伸一 (2007) : リンク法による本州中央部の地震クラスターの抽出とデクラスタリング, 防災科学技術研究所研究報告, 第71号, pp.41-54.

Habermann, R. E. (1983): Teleseismic Detection in the Aleutian Island Arc, *J. Geophys. Res.*, Vol.88, pp.5056-5064.

Repeated Seismic Observation at Sea Bottom at Deep in Kagoshima Bay, and Seismicity of Regional Earthquakes in and Around Sakurajima Volcano Observed at Seismic Land Stations

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 three Ocean Bottom Seismographs (OBSs) northeast of Sakurajima Volcano to detect and locate 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 the only two OBSs. Using the seismic data recorded on land permanent stations, micro VT earthquakes were located in the observation period. The most remarkable activity was the 14 events of the ultra-micro and/or micro VT earthquakes (M-0.8 to 0.8) in and around Wakamiko Caldera. Depth range of the events was from 0 to 12km. Five VT earthquakes were also located northeast sea area of the volcano.

In order to investigate spatiotemporal changes of crustal earthquakes in and around the volcano, we calculated seismicity rate using seismic data observed by land station from 2001 to 2012. In the two periods of the extensive magma supply, we extracted increases of seismicity rates in the some areas. After ends of the extensive supply, the decreases of seismicity rates in the same areas were observed.

Keywords: Sakurajima volcano, Ocean bottom seismograph, Volcano-tectonic earthquake, Activity of regional crustal earthquake