

桜島火山における火山性地震観測の強化 -- 陸域観測と海底地震計観測 --

為栗 健・井口正人・八木原 寛*・宮町宏樹*
山崎友也・高山鉄朗・平野舟一郎*

* 鹿児島大学理学部

要 旨

桜島火山では2006年6月に山頂火口の東側斜面にある昭和火口において、58年ぶりに噴火が発生した。山頂火口直下の火山性地震の震源決定精度の向上、特に昭和火口周辺部における地震の発生を調べるために、山頂火口近傍において臨時地震観測を行った。また、始良カルデラ下および若尊火山で発生する地震の震源決定精度向上のために、鹿児島湾において海底地震計を用いた地震観測を行った。2008年の昭和火口噴火の前後に発生した火山性地震の震源は、山頂火口噴火に伴う地震と同じ領域で発生していた。若尊火山の海底噴気孔近傍においては、観測された地動振幅レベルが潮位と同期する現象が観測された。

キーワード：桜島火山，火山性地震，海底地震計，若尊火山

1. はじめに

桜島火山で発生する火山性地震については多くの研究がなされており、震源分布や波動特性などの報告がある（例えば、清水ら，1982；加茂ら，1988；加茂ら，1989）。最近では、A型地震（Volcano-tectonic earthquake）の震源分布や震源メカニズムについて Hidayati et al.（2007）によって報告されている。A型地震の多くは山頂直下の深さ0～4km付近と桜島南西部の沖小島付近の深さ6～10kmで発生している。また、始良カルデラ下やカルデラ北東部に位置する若尊火山周辺でも地震が発生している（Hidayati et al., 2007；加茂，1978）。BL型地震や爆発地震など噴火を伴う火山性地震は山頂直下の浅部（0～2km）で発生している（Iguchi, 1994；Tameguri et al., 2002）。

南岳山頂火口は1955年の爆発的噴火の開始後、現在まで噴火活動を続けているが、2000年以降は山頂噴火活動が低減傾向にあった。そのような活動の中、2006年6月に山頂火口の東側斜面にある昭和火口において58年ぶりに噴火が発生し、2007年5～6月、2008年2月、4月にも再び噴火が発生した。京都大学防災研究所附属火山活動研究センターによって桜島島内に設置されている定常地震観測網では、昭和火口噴火の前後にA型地震の地震活動、発生領域に大きな変

化は見られず、山頂直下浅部でのみ発生していた。山頂付近、特に昭和火口下における地震の発生状況を明らかにするため、定常地震観測網より火口近傍に臨時地震観測点を設置し、火山性地震観測を行った。臨時観測の概要および2008年2月に発生した昭和火口における爆発的噴火に伴う爆発地震について報告する。また、桜島島内の地震観測網の外側にあたる始良カルデラ下や若尊火山、桜島の南南西海域の下で発生するA型地震の震源決定精度向上のため、桜島火山の周辺海域に海底地震計を設置して地震観測を行ったので報告する。

2. 観測

2.1 陸域地震観測

Fig. 1に火山活動研究センターによって設置されている桜島島内の定常地震観測点と今回設置した臨時地震観測点を示す。定常観測点は南岳山頂火口を囲むように10点設置されているが、火口の東側の観測点が少なく、山頂からの距離も遠い。昭和火口は南岳山頂火口の東約0.5kmに位置しており、南岳直下と昭和火口直下の地震を分離するためには東西の観測点の到達時間差が重要になる。そのため、臨時観測点は火口を東西から挟むように、火口の北東側

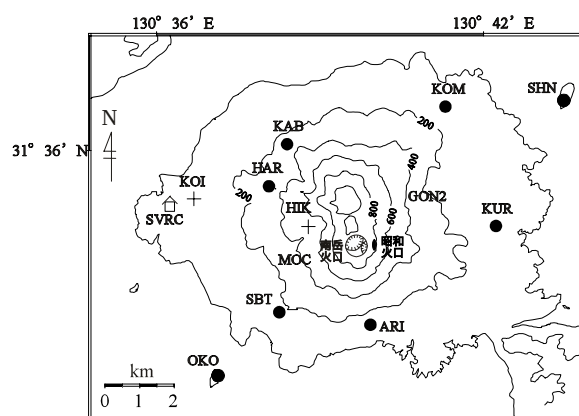


Fig. 1 Seismic stations in Sakurajima. , • and + indicate temporary stations, permanent stations installed seismometers in borehole and ground surface, respectively.

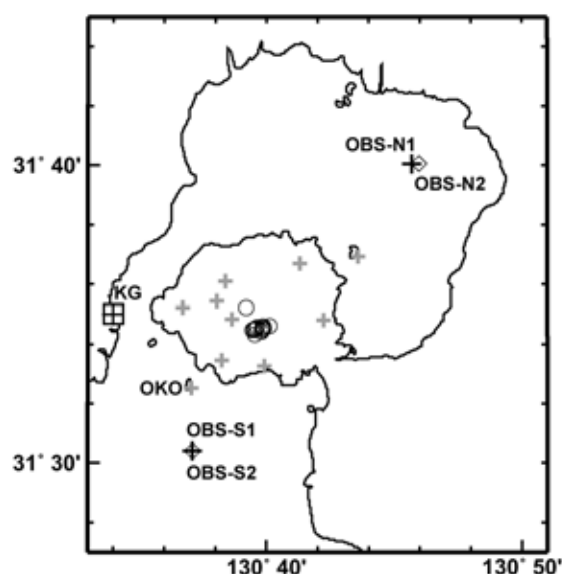


Fig. 2 Stations using ocean bottom seismographs. Symbols of black cross and rhombus indicate stations. KG is tide station operated by Japan Meteorological Agency.

2.5kmと南西側2.0kmの位置に2点設置した。地震計は約50cm埋設した。観測にはMark Products製L4C地震計（固有周期1秒）を使用し、地震計の出力は白山工業社製データ変換装置LS7000-XTに有効分解能24bit、200Hzサンプリングで収録した。観測機器の電源は太陽電池とカーバッテリーで供給し、データはCFカードに収録する現地記録方式で観測を行った。データ回収の関係でGON2観測点は上下動1成分のみ、MOC観測点は3成分の記録を行った。MOC観測点は2007年6月5日から、GON2観測点は2007年9月19日から観測を開始し、2008年6月現在も観測中である。

2.2 海底地震計観測

Fig. 2に海底地震観測点の配置を示す。養殖漁業用のユニックを装備した小型船舶により、2台の海底地震計（Ocean Bottom Seismograph、以下、OBSと記す）をOBS-N1とOBS-S1（2007年8月30日～2007年10月11日）、およびOBS-N2とOBS-S2（2007年10月26日～2007年12月14日）に設置した。OBS-N1では、OBSの投入直後に「たざり」を目視で確認したため、OBSは海底噴気孔（小坂、1991）の直上で投入されたと推定される。OBS-N1の震動の振幅レベルが大きいと予想されたため、OBS-N2はOBS-N1よりも約430m東に設置した。OBS-N2の投入位置では「たざり」が無いことを確認した後にOBSを投入した。

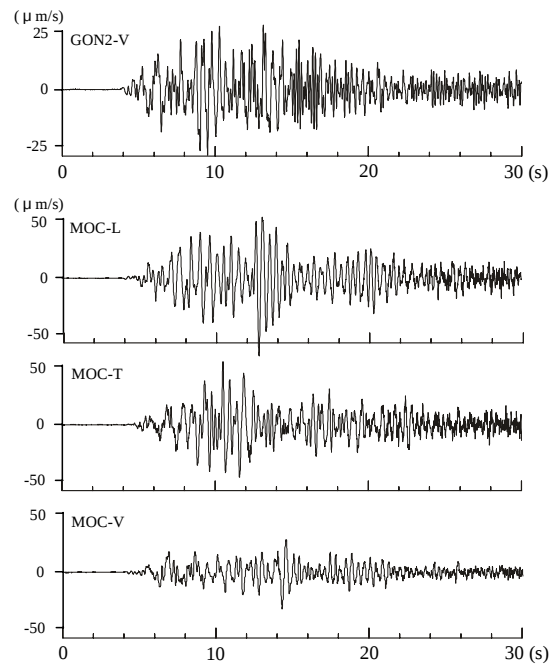
使用したOBSは、本体に取り付けられた錘を音響信号による指令を受けて切り離し、自己の浮力で海面に浮上する。OBSの本体は、耐圧ガラス球、レコーダー、地震計、および電源から構成される。また耐圧ガラス球を保護するハードハットには、錘の切り離し機構を備えたトランスポンダ、浮上時の探索を容易にするためのフラッシャーとビーコンが取り付けられている。レコーダー（勝島製作所、KDR-224K）は高精度の水晶発振型時計を内蔵し、16bitの分解能でA/D変換されたデータをDATオーディオテープに収録する。アンプゲインは浅海底での観測であることを考慮して40dBを選択した。サンプリング周波数は64Hzとした。電源はアルカリ単一電池で、6本直列を6並列まで封入可能である。このサンプリング周波数と電池の並列数の組み合わせの場合、約2ヶ月間の連続観測が可能である。内部時計はOBSの投入直前と回収直後にGPS時計との差が計測され、その間は時計が線形にずれると仮定して補正が施された。地動センサーは固有周期4.5Hzの短周期3成分地震計（Mark Products、L-28BL）で、OBSが傾斜面に着底してもジンバル機構によって上下動センサーが鉛直方向を、水平動センサーが水平方向を向くように製作されている。ただし、着底時の水平動2成分（H1、H2）の方位を知ることはできない。レコーダーとセンサーの組み合わせはOBS-N1とOBS-N2、OBS-S1とOBS-S2で同じとした。DATテープに収録されたデータはWinフォーマットに変換された後、解析に用いられた。

3. 観測波形

3.1 陸域地震観測の波形記録

2007年9月にGON2観測点の設置を行ってから2008年2月までに27個のA型地震、3個の南岳山頂での爆発的噴火に伴う爆発地震が発生した。また、2008年2月の昭和火口の噴火活動の際、2月3日、2月6日に昭

a) Explosion earthquake (Feb.03,2008 15:54)



b) A-type earthquake (Sep.27,2007 01:27)

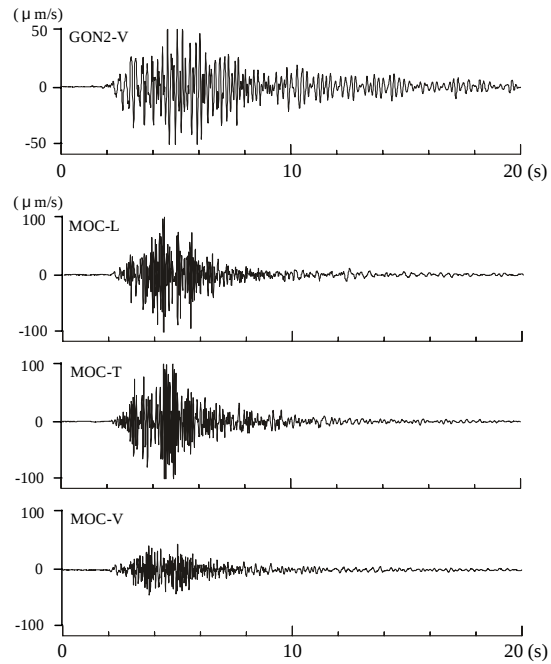


Fig. 3 Examples of observed waveform in Sakurajima. a) Explosion earthquake. b) A-type earthquake.

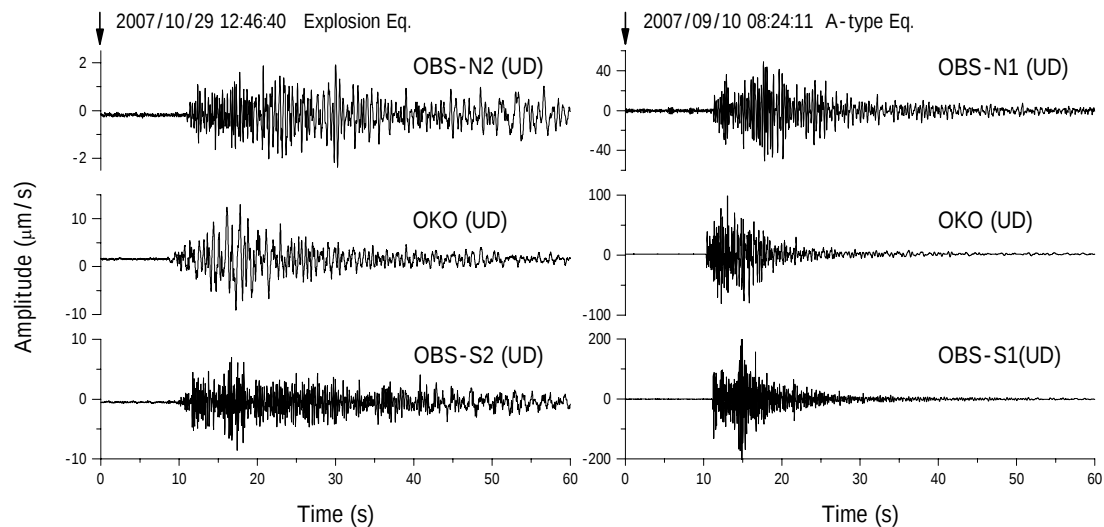


Fig. 4 Examples of waveforms recorded by ocean bottom seismograph. Explosion and A-type earthquakes are plotted at left and right sides, respectively.

和火口における爆発的噴火に伴う爆発地震が発生した。Fig. 3に臨時観測点で記録されたA型地震と昭和火口の爆発的噴火に伴う爆発地震を示す。A型地震については、地表設置のため波形が複雑になっており、MOC観測点の水平動記録でもS波の判別は難しい。ただ、震源（南岳山頂火口直下）に近いので、P波初動は明瞭であり、震源決定の際の初動到達時の読み取りは問題ない。爆発地震に関してもA型地震と同様に波形は複雑であるが、P波初動は明瞭である。

3.2 海底地震計による波形記録

OBS観測の効果が大きいと考えられる桜島の南南西海域下や始良カルデラ下のA型地震は観測期間中に発生しなかった。そのため、火山性地震の観測波形例を示すにとどめる（Fig. 4）。Fig. 4の左が桜島火山の爆発地震、右がA型地震（海底地震観測期間中では最大規模）の観測波形（上下動成分、UD）である。比較のために、ボアホール観測点OKOの観測波形を合わせて示した。爆発地震の波形（Fig. 4の左）を相

互に比較すると、OBSのセンサーは固有周期よりも低周波側の感度が著しく低下するので、爆発地震で卓越する低周波成分が観測されていない。OBS-N2の振幅はOBS-S2の振幅の約1/5で震央距離の違いを考慮しても振幅が有意に小さいこと、振幅の減衰がよりゆるやかであることから、OBS-N2直下の未固結の堆積物の層厚はOBS-S2のそれよりも有意に厚いと考えられる。Fig. 4の右は山体直下のA型地震であるが、OBS-S2はOKOよりも震央距離が長いにもかかわらず、P波初動が同程度に明瞭である。OBS-S2直下の未固結の堆積物は厚くはないと考えられる。

4. 震源決定

震源決定の精度を落とさないため、A型地震については定常観測網でP波初動の到達時刻読み取り数が8個以上、S波の読み取り数が4個以上のもの、爆発地震についてはP波初動の到達時刻読み取り数が8個以上のものについて解析対象とした。その結果、臨時観測中に発生したイベントのうち、18個のA型地震、5個の爆発地震（南岳の爆発3回、昭和火口の爆発2回）の震源決定を行った。震源決定にはHirata and Matsu'ura (1987) の決定方法を使用した。速度構造はP波速度2.5 km/sの半無限均質構造、 V_p/V_s 比を1.73と仮定した。

定常地震観測網の中でHIK、KOI観測点は地震計が地表設置されており、その他の観測点は85～355 m深のborehole内に設置されている（Fig. 1）。震源決定を行った23例のイベントにおける各観測点の理論到達時と観測値の残差は、HIK、KOI観測点では全て正、山頂南側のARI、OKO観測点では全て負となった。定常観測網の中で、山頂火口に最も近いHIK観測点では相対的に遅く地震波が到達し、2番目に近いARI観測点では早く地震波が到達している可能性があり、震源決定結果に影響を及ぼしている可能性がある。この残差が伝播経路の速度異常か観測点直下の影響か分からないが、本解析では各観測点の残差を観測点補正值とみなし、初動読み取りの際に23例のイベントの平均残差を差し引いた時刻を読み取り値として震源決定を行った。

Fig. 5とFig. 6にA型地震の震源決定結果を示す。定常観測網で決定された震源を●で、臨時観測点を含めて決定された震源を○でプロットしている。臨時観測中に発生したA型地震の多くは南岳山頂直下の海面下0-3kmで発生している。また、中岳と北岳付近で3個の地震が発生している。桜島南西部のやや深部の地震は、今期間は発生していない。山頂直下の震源分布については、深部の地震は山頂火口南東端の下で発生しており、浅部になるほど西側に寄って

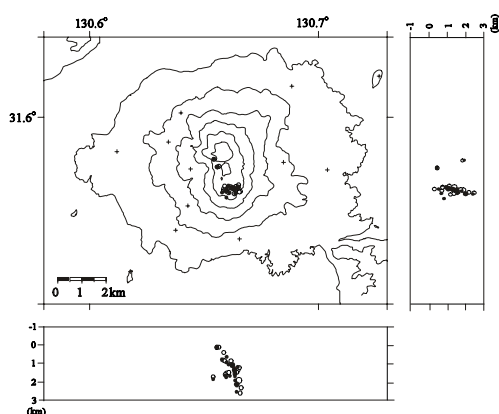


Fig. 5 Hypocenter distribution of A-type earthquakes. Solid and open circles indicate hypocenter determined by permanent seismic network and including temporary stations, respectively.

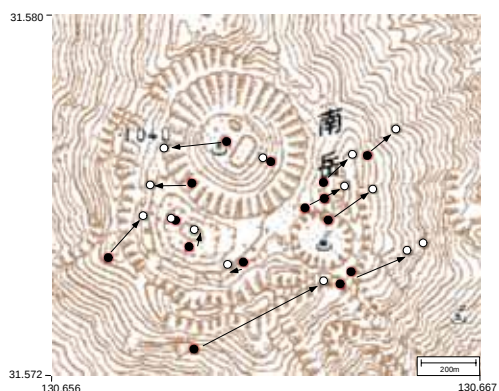


Fig. 6 Epicenter of A-type earthquakes at summit area. Symbols are same as Fig. 5.

いく分布になっている。臨時観測点を加えて決定された震源は、山頂直下1kmより深い地震は全体的に200mほど東側に移動し、深さについてはあまり変化がない。浅部の地震については、一定方向への震源位置の変化は見られないが、南岳山頂火口内に求まっていた震源は西に移動し、火口の西端付近に決定された。

Fig. 7に臨時観測期間中に発生した5例の爆発地震（○）と観測期間中以外の2007年に発生した爆発地震（●）の震源を示す。全ての爆発地震が南岳山頂火口内の深さ0.5～1.5kmで発生しており、山頂爆発と昭和火口における爆発も爆発地震の初動の震源は同じ領域で発生している。また、この期間の爆発地震の震源はIguchi (1994)、Tameguri et al. (2002) で報告されている位置と同じ領域であった。

5. 考察

5.1 桜島山頂下の地震活動

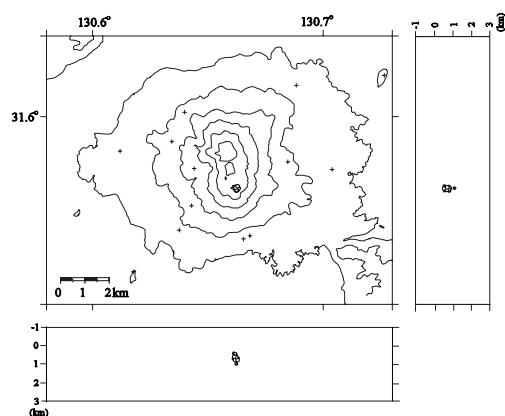


Fig. 7 Hypocenter distribution of explosion earthquakes. Open and solid circles indicate hypocenters during temporary observation and explosive eruption at summit crater in 2007, respectively.

Fig. 8に今回決定された地震の震源分布（●）と Hidayati et al. (2007) の南岳山頂直下の震源分布を示す。震源決定を行った地震のうち、山頂火口の東端付近の1kmより深部の地震が2008年2月の昭和火口の活動と関連して発生したかどうかという点に注目する。Hidayati et al. (2007) では1998年から2005年に発生したA型地震について震源決定を行っている。本報告の震源付近でもその期間にA型地震は発生しており、特に2008年2月の噴火に関連して山頂火口の東端下でA型地震が発生していたとは明言できない。

また、昭和火口で発生した爆発的噴火に伴う爆発地震については、南岳の山頂火口における爆発的噴火に伴う爆発地震と同じ領域で発生していた。つまり、爆発地震としては従来の山頂爆発と同じ南岳の直下で発生し、表面での爆発現象が昭和火口で発生したと言える。初動が不明瞭なため震源決定ができない小規模なA型地震やB型地震が南岳直下から昭和火口への火道形成やマグマの移動によって発生している可能性があるが、それを明らかにするためにはより火口近傍での地震観測が必要であろう。

地表設置の観測点とborehole内に地震計を設置している観測点では震源決定の際の残差に違いが見られた。地表設置の観測点では残差が正であるため、地震波が相対的に遅く到達し、boreholeの観測点（特にARI, OKO観測点）では残差が負であるので、地震波が早く到達していると考えられる。本報告では、残差を観測点補正值として読み取り値から差し引いた。恐らく、地表面付近の地震波速度は火砕物の堆積等の影響で仮定している速度（ $V_p=2.5$ km/s）より遅いと考えられる。また、ARI, OKO観測点などの桜島南西部は始良カルデラの南端に近く（Matumoto, 1943）、カルデラの外側の伝播速度が高速であると考えられる領域を地震波が通っている可能性がある。

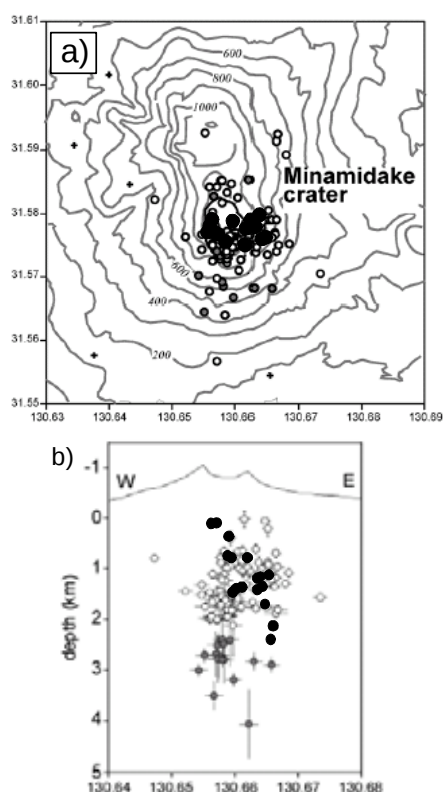


Fig. 8 Hypocenter distributions of Hydayati et al. (2007) and this report (solid circles).

山頂直下のA型地震の震源分布は1kmより深部では火口の東側、浅部では火口の西側に寄る傾向が見られる。また、Hidayati et al. (2007) の結果では1.5km付近にA型地震が多く発生し、その上部（1.3km付近）ではA型地震が少ない領域が見られる。爆発地震はA型地震が少ない領域で発生している。爆発地震の発生領域の議論をする上で、このA型地震の震源分布は非常に興味深い結果である。今後も火口近傍の臨時観測を継続し、データ蓄積を行う予定である。ただ、このような狭い領域での震源に対して細かい議論をする上では、震源決定に使用する速度構造が大きく影響する。今回の地震観測網では、震源決定の際に仮定するP波速度を ± 0.1 km/s 変化させた場合、震源位置は全体的に深さ方向で ± 150 mほど移動する。震源の深さはその深度での火道内のマグマ物性や圧力等を議論する上で重要である。そのためには、先に述べた各観測点における観測点補正值や山体周辺の速度構造を詳細に調べることが不可欠であり、2008年11月に行われる予定の桜島火山体構造探査が待たれる。その後、近年行われている三次元速度構造を用いた火山性地震の震源決定によって（例えば、Onizawa et al., 2007）、より精度の高い震源位置や爆発機構の議論が行えるようになると思われる。

5.2 若尊火山近傍の振動と潮位の関係

Fig. 9にOBS-N1で観測されたRMS振幅値を示す。記録には半日周期の振幅の変化が見られる。OBS-N1は若尊火山の海底噴気孔近傍に設置されているため、噴気活動による振幅の変化が潮汐に関係することを想定させる。そこでOBS-N1のRMS振幅と潮位の観測値とを比較した。2007年9月21日～9月30日の10日間におけるOBS-N1の各成分のRMS振幅値と気象庁の潮汐観測地点KG (Fig. 2) の潮位観測値 (1時間値) を合わせて示す。Fig. 9から、潮位のピークとRMS振幅の半日周期変化のピークが同期していることが分かった。上下動、水平動の全ての成分において、高潮 (High Water) とRMS振幅値の極小、低潮 (Low Water) とRMS振幅値の極大、の関係である。すなわち、若尊カルデラの海底噴気孔の震動の振幅は、高潮時に小さくなり、低潮時に大きくなる。小潮であった9月21日～22日にかけては、RMS振幅の半日周期が不明瞭になる、または消滅しているといった対応も認められる。一方、半日より長周期の変化にのみ注目すると、潮位変化との間に明瞭な相関があるようには見えない。海底噴気孔のRMS振幅値の時間変化は潮汐と第一近似では関係するが、単純ではないと考えられる。

Fig. 9のピークの細部に注目すると、RMS振幅値の極小あるいは極大の時刻が、高潮あるいは低潮の時刻よりもわずかに先行しているようにみえる。そこで、潮位差が大きい9月26日～28日の3日間におけるOBS-N1の上下動1成分と潮位の時間変化を比較した (Fig. 10)。その結果、海底噴気孔の震動の振幅レベルの極小(LA)は高潮 (LW) より約1時間、振幅レベルの極大 (HA) は低潮より1～2時間程度先行することが分かった。KGのデータは時間値であるので、より時間分解能を上げた比較ができないが、RMS振幅値のピークが先行するのは確かである。

これまでに活火山周辺や海底熱水活動領域で行われた海底地震観測で、潮汐に同期した活動が指摘されたことがある。例えば笠原 (1983) は、三宅島1983年噴火活動に際して海底地震観測を行い、地震回数のピークが潮汐の満・干潮時と良く対応するとした。西澤ら (1995) は大西洋中央海嶺上の熱水マウンドにハイドロフォン付きOBSを設置し、ハイドロフォンの記録にのみ潮汐に同期した低周波圧力変動を観測したことを示した。笠原 (1983) の現象にはパターンが2つあり、噴火活動中にパターンが入れかわる複雑さが見られた点、西澤ら (1995) が述べた現象は圧力変動であり、地震計では潮汐と同期する現象は捉えられていない点で、本観測で捉えられた現象とは異なると言える。若尊カルデラの海底噴気孔の震動で見られたRMS振幅値の半日周期の変化は、潮

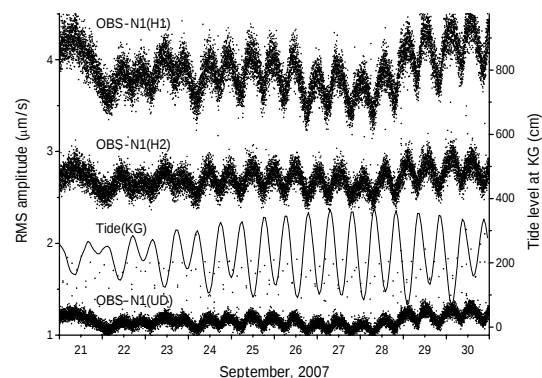


Fig. 9 RMS amplitudes at OBS-N1 and tide at KG (10 days).

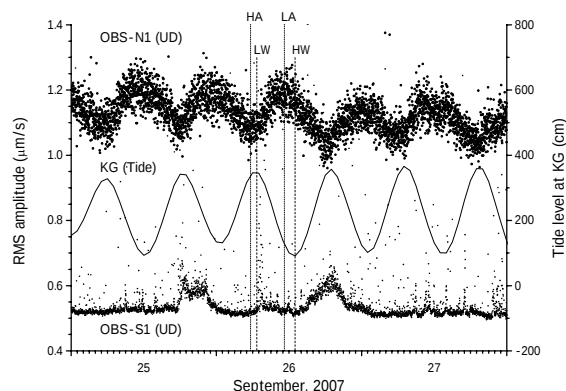


Fig. 10 RMS amplitudes at OBS-N1 and tide at KG (3 days).

汐との同期パターンが代わることなく、定常的に繰り返されるという特徴をもつ。

解析の結果、若尊カルデラの海底噴気孔のRMS振幅値の極大が低潮に、RMS振幅値の極小が高潮に同期すること、さらにRMS振幅値の時間変化がKGの潮位変化に1～2時間程度先行することが明らかになった。これらはRMS振幅値の時間変化の発生原因を考察する際の手がかりを与える可能性がある。例えばRMS振幅値の時間変化は、海洋潮汐よりも、むしろ地球潮汐によって励起されることを示唆するかもしれない。KGは鹿児島港に位置し、若尊カルデラは鹿児島港と桜島間の狭い水路よりもさらに湾奥部に位置する。この領域の潮位変化は、KGよりも遅れると考えられる。もしRMS振幅値の時間変化が海洋潮汐で励起されると仮定すれば、RMS振幅のピークはKGの低潮、高潮の時刻以降でなければならない。従って、海洋潮汐の効果は大きくないのであろう。

6. まとめ

桜島火山の山頂付近で発生する地震、特に山頂火口と昭和火口付近の震源分布を詳細にするため臨時

地震観測を行った。その結果，2008年2月の昭和火口噴火の前後に発生したA型地震の震源は従来の震源位置と同じ領域で発生していた。昭和火口の爆発的噴火に伴う爆発地震についても，これまでの南岳山頂火口の活動に伴って発生する爆発地震と同じ領域で発生していた。

若尊カルデラの海底噴気孔付近の観測点では，RMS振幅値が潮位と同期する現象が観測された。RMS振幅値の極大が低潮に，RMS振幅の極小が高潮に対応する。この同期パターンが代わることなく定期的に繰り返されている可能性が高い。RMS振幅値のピークは，潮位のピークより1～2時間先行する。

謝 辞

GON2観測点の地震計設置の際，東京工業大学の摺上勇介氏，日本学術振興会特別研究員の横尾亮彦氏にご助力いただいた。定常観測点の保守およびデータ蓄積は火山活動研究センター全スタッフの協力の元に行われている。記して感謝申し上げます。

（有）桜島水産，第6とも丸の川畑健一郎船長，および東桜島漁業協同組合の小柳澄男参事には，海底地震計の投入と回収作業全般において全面的にご協力をいただきました。海底地震計の設置にあたり，鹿児島県漁業共同組合連合会には便宜を計っていただきました。気象庁の鹿児島島潮汐観測地点のデータは，気象庁ホームページのダウンロードサービスを利用しました。記して感謝申し上げます。

参考文献

- 笠原順三（1984）：1983年噴火と海底地震観測 地震活動と潮位変化及び特異な地震波形-，月刊地球，No.6，pp. 749-754.
- 加茂幸介（1978）：桜島火山における噴火の前駆現象と予知，火山，23，pp. 53-64.
- 加茂幸介・西 潔・井口正人・高山鉄朗・清水邦夫・山里 平（1988）：桜島火山の地震活動，第6回桜島火山の集中総合観測，pp. 7-13.
- 加茂幸介・西 潔・井口正人・高山鉄朗・池田安彦・

宇平幸一（1989）：桜島火山の地震活動，第7回桜島火山の集中総合観測，pp. 7-11.

小坂丈予（1991）：日本近海における海底火山の噴火，東海大学出版会，280pp.

清水 洋・植木貞人・高木章雄（1982）：桜島で観測される火山性地震波動の性質，第4回桜島火山の集中総合観測，pp. 11-17.

西澤あずさ，佐藤利典，笠原順三，藤岡換太郎(1995)：TAG熱水マウンドの潮汐に同期した活動 OBSHによる観測結果-，JAMSTEC深海研究，11，pp. 125-135.

Hidayati, S., Ishihara, K. and Iguchi, M. (2007): Volcano-tectonic earthquakes during the stage of magma accumulation at the Aira calder, southern Kyushu, Japan, Bull. Volcanol. Soc. Japan, 52, pp. 289-309.

Hirata, N. and Matsu'ura, M. (1987): Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique, Phys. Earth Planet. Inter., 47, pp. 50-61.

Iguchi, M. (1994): A vertical expansion source model for the mechanisms of earthquakes originated in the magma conduit of an andesitic volcano: Sakurajima, Japan, Bull. Volcanol. Soc. Japan, 39, pp. 49-67.

Matumoto, T. (1943): The four gigantic caldera volcanoes of Kyushu, Japan, J. Geol. Geogr., 19, pp. 1-57.

Onizawa, S., Oshima, H., Aoyama, H., Mori, H., Maekawa, T., Suzuki, A., Tsutsui, T., Matsuwo, N., Oikawa, J., Ohminato, T., Yamamoto, K., Mori, T., Taira, T., Miyamachi, H. and Okada, H. (2007): P-wave velocity structure of Usu volcano: Implication of structural controls on magma movements and eruption locations, J. Volcanol. Geotherm. Res., 160, pp. 175-194.

Tameguri, T., Iguchi, M. and Ishihara, K. (2002): Mechanism of explosive eruptions from moment tensor analyses of explosion earthquakes at Sakurajima volcano, Japan, Bull. Volcanol. Soc. Japan, 47, pp. 197-215.

Reinforcement of Volcanic Earthquake Observations at Sakurajima Volcano - Observations in Sakurajima and Using Ocean Bottom Seismograph -

Takeshi TAMEGURI, Masato IGUCHI, Hiroshi YAKIWARA*, Hiroki MIYAMACHI*,
Tomoya YAMAZAKI, Tetsuro TAKAYAMA and Syuichirou HIRANO*

* Faculty of Science, Kagoshima University

Synopsis

We installed two temporary seismic stations in Sakurajima and two ocean bottom seismographs in Kagoshima bay for reinforcement of volcanic earthquake observations at Sakurajima volcano. In observation period, 28 A-type earthquakes occurred and we determined hypocenters of 18 events. The hypocenters of the events were located beneath active summit crater. The hypocenters are concentrated around the crater and the depths are ranging from 0 to 3 km beneath the crater. RMS amplitudes near Wakamiko volcano recorded by OBS were related to tide level.

Keywords: Sakurajima volcano, volcanic earthquake, ocean bottom seismograph, Wakamiko volcano