

# 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

鹿児島大学理学部

八木原 寛・平野舟一郎

宮町 宏樹

京都大学防災研究所

井口 正人・為栗 健

高山 鐵朗・山崎 友也

## 1. はじめに

桜島火山は鹿児島湾北部に位置し、その周囲は南東端を除いて海域で囲まれる(図 1)。桜島火山の活動に伴って発生する火山性地震のうち A 型地震の一部は、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桜島の南南西方向の海域下で発生する<sup>1)</sup>。桜島火山の周辺海域の海底地震計を設置して地震観測を行なうことは、これらの A 型地震の震源位置(特に深さ)や震源メカニズムの精度を向上させて決定すること、および桜島火山とその周辺領域の地震波速度構造の推定に寄与するものと考えられる。

桜島火山の周囲の海域は、最深部でも水深約 200~220m 程度の浅海である。海底地震計の浅海底への設置は、河川からの土砂の流入による海底地震計の埋積、動力船の航行ノイズ、風浪や潮流によるノイズ、および底引き網と海底地震計の接触による網の損傷や地震計の転倒の恐れがあるため、あまり実施されない。九州では、2005 年の福岡県西方沖地震の余震観測で海底地震観測が実施された<sup>2)</sup>程度であり、鹿児島湾ではこれまで海底地震観測が実施されたことがない。平成 20 年度秋季に実施される予定の桜島火山体構造探査において、桜島周辺海域にも海底地震計を展開することが計画されているため、著者らは鹿児島湾の浅海底における海底地震観測の可否を検証すること、および常時微動の振幅レベルを調べることを目的として、桜島南方海域と桜島北方海域の若尊カルデラ底の平坦な海底に海底地震計を投入し、地震観測を実施した。

本観測で使用した海底地震計は、電源と記録メディアの容量の制約により、1 回の投入で観測可能な期間は概ね 2 ヶ月である。著者らは、海底地震計 2 台を用いた海底地震観測を 2 回にわたり実施し、延べ 90 日間の観測を実施した。

設置した延べ 4 台の海底地震計の回収は全て成功し、鹿児島湾の浅海底への海底地震計設置が可能であることや、これらの観測点における常時微動の振幅レベルが分かった。さらに、若尊カルデラ底の海底噴気孔付近に着底した海底地震計では、特徴的な震動が収録されたことが分かった。本稿では、観測で明らかになった各海底地震観測点の常時微動の振幅レベルと

若尊カルデラ底の海底噴気孔付近で観測された特徴的な震動について述べる。

## 2. 観測

図 1 に海底地震観測点と観測期間中に発生した火山性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)の陸上地震観測点の配置を示す。著者らは、養殖漁業用のユニックを装備した小型船舶[第6とも丸(15総トン), 所属:(有)桜島水産]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「たぎり」を目視で確認したため, OBSは海底噴気孔<sup>3)</sup>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「たぎり」が無いことを確認した後にOBSを投入した。

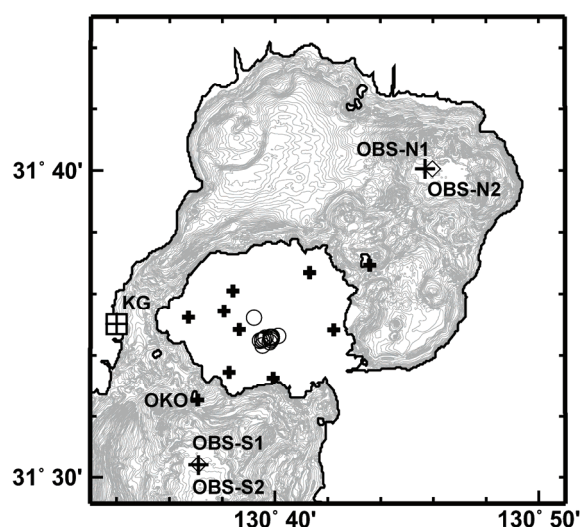


図 1. 観測点位置図。大きく細い十字とひし型はそれぞれ, 1回目と2回目の海底地震観測点の位置を示す。小さく太い十字は, 海底地震観測期間中に発生した火山性地震(○)の震源決定に用いた陸上観測点。このうち OKO の観測波形を海底地震観測点の観測波形との比較に用いた。KG は気象庁の潮汐観測地点(鹿児島)である。海域には等深線を示した。

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。なお、OBS-N1, N2 に設置した OBS については、時刻較正は成功したものの、内部時計が秒オーダーでステップ的にずれる不具合が発生した可能性が高いことが分かった。

一般に、OBS の着底位置の経緯度は、潮流のために投入位置の経緯度とは一致しない。OBS の着底位置を決定するために、2 周波 GPS 受信機を船舶に設置し、1 秒サンプリングの測量を実施するとともに、船舶から OBS までの斜め距離の音響測距を実施した。斜め距離測定位置は、投入位置、およびそれを取り囲んでなるべく正三角形になるような 3 点の、合わせて 4 点で行なった。それぞれの斜め距離測定位置において、音響信号を 5 回程度発信し、その時刻における船位と観測された斜め距離の組み合わせをデータとして、最小 2 乗法により OBS の着底位置を決定し、観測点座標とした。各海底地震観測点の座標値を表 1 に示す。

使用した小型船舶には航海用計器 (GPS プロッターやコンパス) が装備されていないため、DGPS (SOKKIA, R80D) を設置した。DGPS から出力されるテキストデータを RS-232C でパソコンに取り込み、船位を航海用電子海図 (ENC) 上に表示させた。パソコンでの航海用電子海図の表示には電子海図ビューワー (ピーシースタジオアルファ, Alphamap Lite 版) を用いた。航海前に OBS の投入予定位置または着底位置と斜め距離測定予定位置を電子海図ビューワーに入力した。また、ハンディー GPS (Germin, eTrex Vista) の出力データを RS-232C でパソコンに取り込んでフィルタリングすることによって方位データをパソコン上に表示させ、斜め距離の測定位置や浮上した OBS へのアプローチの際に使用した。電子海図とそのビューワー、DGPS、方位の情報を組み合わせて使用することにより、OBS の投入位置や斜め距離測定位置へのアプローチの精度と作業効率が大幅に向上した。その結果、同じ位置に設置することを計画した OBS-S1 と OBS-S2 の水平距離は 13.8m で、OBS-S2 を OBS-S1 に十分に近接させることができた。

表 1. 海底地震観測点の座標と常時微動の振幅レベル

観測点名	座標 (WGS-84)			振幅レベル ( $\mu\text{m/s}$ ) *		観測期間 (2007年)
	緯度 (N)	経度 (E)	水深 (m)	上下動	水平動	
OBS-N1	31° 40.0525'	130° 45.6938'	201	1.0	4.0	08/30 20:33~10/11 10:08
OBS-N2	31° 40.0515'	130° 45.9668'	203	0.2	0.8	10/26 15:00~12/14 10:07
OBS-S1	31° 30.4045'	130° 37.0945'	210	0.5	0.9	08/30 20:33~10/11 11:57
OBS-S2	31° 30.4062'	130° 37.1030'	213	0.5	0.9	10/26 15:00~12/14 11:58

\* 常時微動の振幅レベル

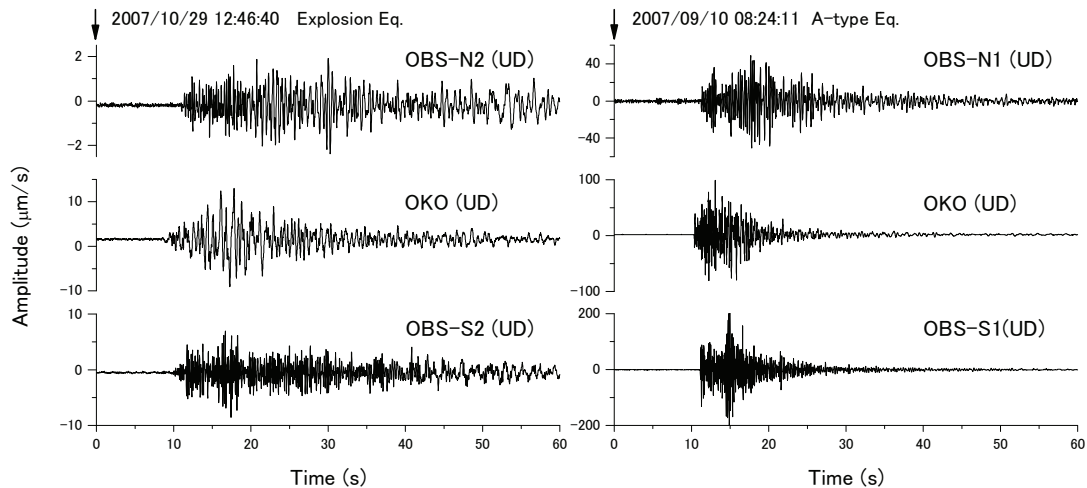


図2. 海底地震観測点で観測された波形の例。比較のために、ボアホール観測点 OKO の観測波形を合わせて示す。左は爆発地震、右は観測期間中最大の A 型地震の波形である。

### 3. 観測波形と常時微動の振幅レベル

海底地震観測期間中に発生した火山性地震の震央は、全て桜島島内(南岳付近)に決定された(図1の白丸)。これらの震源の深さはいずれも海水準下 2.1km 以浅である。本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 型地震が観測期間中には発生しなかったこと、OBS-N1 および OBS-N2 に設置した OBS の内部時計に不具合が発生したとみられることから、ここでは火山性地震の観測波形例を示すにとどめる(図2)。図2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、SVRC のボアホール観測点 OKO の観測波形を合わせて示した。爆発地震の波形(図2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。図2(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。

各海底地震観測点の常時微動の振幅レベル(以下では、単に「振幅レベル」と記す)を求めるために、各海底地震観測点の各成分それぞれについて、1 分間の波形データを用いて振幅の RMS を 1 分毎に計算した。このようにして得られた 1 分値データを、以下では RMS 振幅値と記すこととする。図3は、各海底地震観測点の各成分における 30 日間の RMS 振幅値の時間変化を示す。これらの RMS 振幅の時間変化のベースラインの値を図3から読み取り、各観測点の上

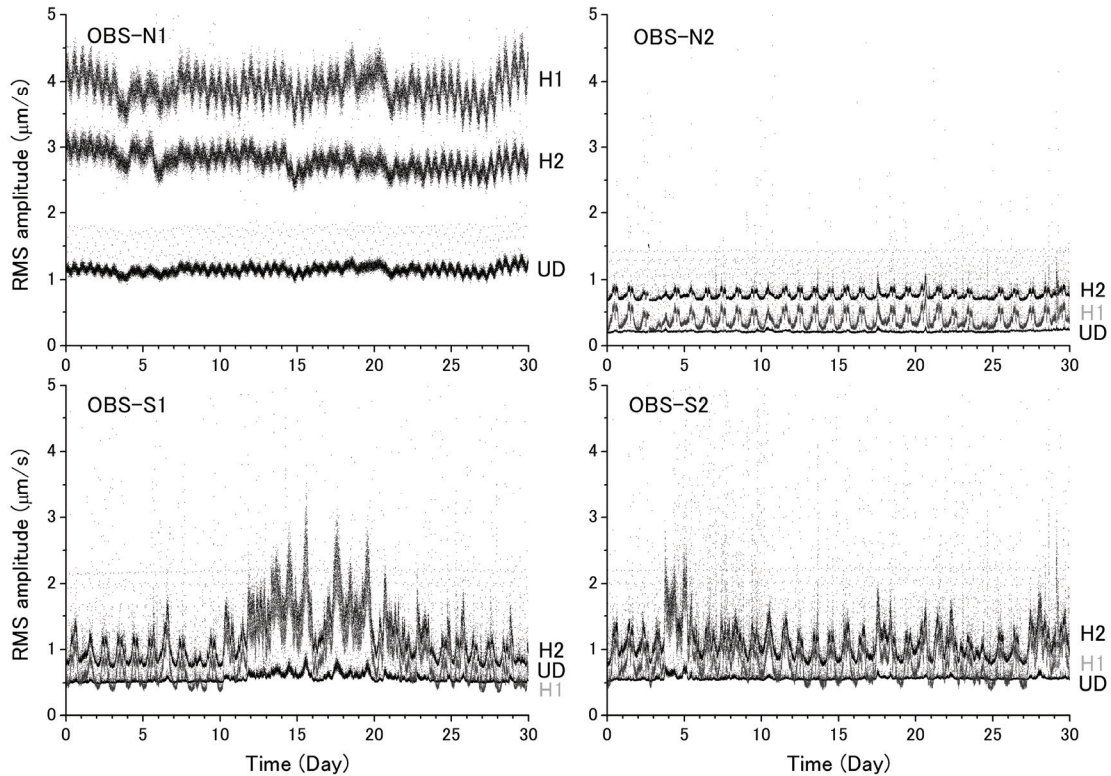


図 3. 各海底地震観測点の上下動成分(UD)および水平動 2 成分(H1, H2)の RMS 振幅値の時間変化(30 日間)

下動成分と水平動成分の振幅レベルとした(表 1)。水平動成分の振幅レベルは、水平動 2 成分それぞれの振幅レベル値の二乗和の平方根をとることで求められるとした。

OBS-S1 と OBS-S2 は近接するので、振幅レベルは上下動成分が  $0.5 \mu\text{m/s}$ 、水平動成分が  $0.9 \mu\text{m/s}$  で一致する。水平動成分の振幅レベルは上下動成分の振幅レベルの 1.8 倍大きい。一方、OBS-N1 と OBS-N2 の水平距離は 431.5m で大きくは離れていないが、OBS-N1 と OBS-N2 の振幅レベルは上下動成分がそれぞれ  $0.2 \mu\text{m/s}$  と  $1.0 \mu\text{m/s}$ 、水平動成分がそれぞれ  $0.8 \mu\text{m/s}$  と  $4.0 \mu\text{m/s}$  で、OBS-N1 の振幅レベルが OBS-N2 の振幅レベルに比べて 5.0 倍大きい。また OBS-N1, OBS-N2 の水平動成分の振幅レベルは上下動成分のそれより 4.0 倍大きい。従って、OBS-N2(N1)の水平動成分と上下動成分との振幅レベル比は OBS-S2(S1)の 2.2 倍大きい。このことは、観測波形(図 1)から示唆される観測点直下の未固結の堆積物の層厚の大小と定性的に合うと考えられる。

30 日間の RMS 振幅値の時間変化を見ると、OBS-N1 のみ半日周期の RMS 振幅の変化が 3 成分のいずれにおいても明瞭に認められる。この変化は 30 日のうちのほとんどの期間で識別できる。従って半日周期の RMS 振幅値の増減は定常的に発現している可能性が高い。より長周期の変化も含まれるように見える。一方、OBS-N1 以外の 3 観測点においては、水平動 2 成分にのみ 1 日毎に山形に振幅が増加する時間変化が認められる。図 4 でははっきりしないが、時間軸を

拡大すると、水平動成分は06時前後からRMS振幅が増加し、12時前後に約1時間減少し、その後再び増加して18時前後に減少するという規則的な変化を呈する。従って、1日毎の山型の振幅変化は陸域の人間活動によるノイズが原因と考えられる。これが上下動成分のRMS振幅の時間変化では識別できない点は、OBSからみて陸域が水平に近い方向に位置するからであろう。

OBS-N1の振幅レベルがOBS-N2の5.0倍大きいこと、また半日周期の増減が定常的に発現している可能性が高いことは興味深い。OBS-N1のOBS投入直後に「たぎり」を確認したこと、OBS-N2では「たぎり」が無いこと、1977年に実施された調査において潜水艇が「たぎり」の気泡をつたって潜水したところ容易に海底噴気孔に到達した<sup>3)</sup>ことを合わせて考慮すると、OBS-N1は海底噴気孔の直上または極々近傍に位置し、OBS-N1で観測された連続的、かつ振幅の大きな震動は、海底噴気孔の活動に伴う震動であると考えられる。さらに海底噴気孔の活動レベルが半日周期で増減している可能性が示唆される。

なお図3の中で、各成分のトレンドに比較して有意に離れたプロットが多数認められる。その大部分は波形データ上で時折認められる電気的なノイズ(ステップ的なオフセットとそれに続く高周波ノイズ)によるもので、その他、広域的な地震の発生や動力船の航行に伴う振幅の一時的な増加が含まれると考えられる。

#### 4. RMS 振幅値と潮位の時間変化

OBS-N1で観測されたRMS振幅値の半日周期の明瞭な変化は、OBS-N1付近の海底噴気孔の活動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。図4は、2007年9月21日～9月30日の10日間(図3、OBS-N1の横軸の20日～30日に対応)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(図1)の潮位観測値(1時間値)を合わせて示す。図4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振幅値の極大が、それぞれ一致している。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。

図4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見える。そこで、潮位差が大きい9月26日～28

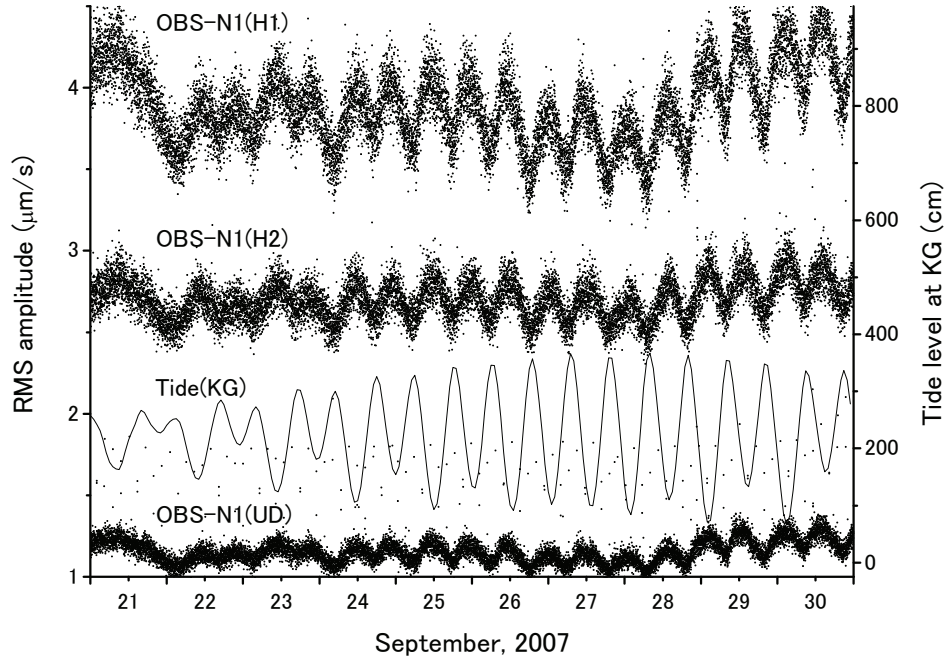


図 4. OBS-N1 における RMS 振幅値と KG における潮位の時間変化(10 日間)

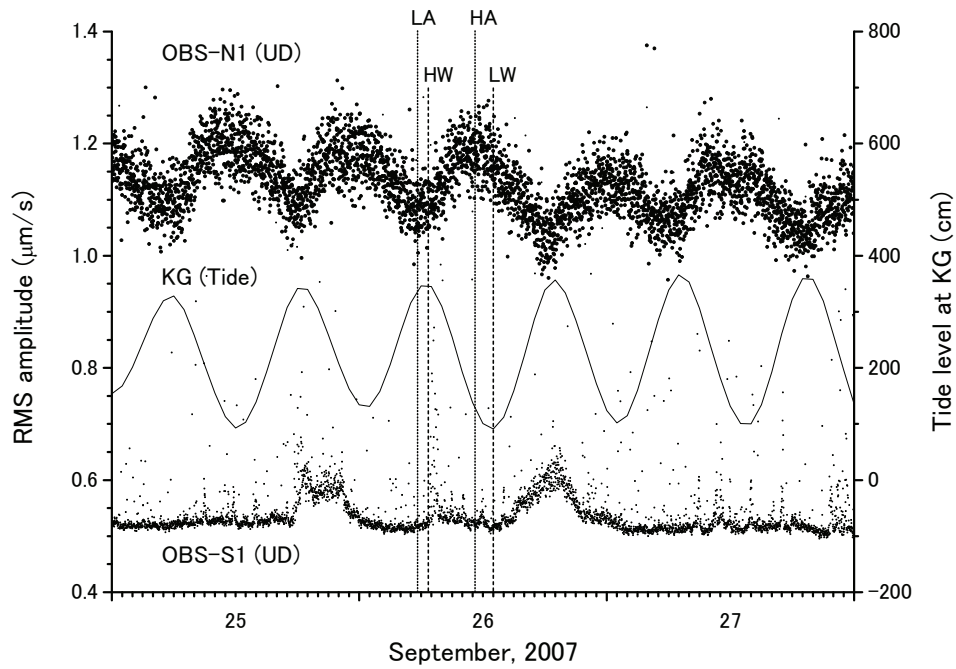


図 5. OBS-N1 と OBS-S1 の上下動成分(UD)の RMS 振幅値と KG の潮位の時間変化(3 日間)。点線は RMS 振幅値の極小(LA)と極大(HA), および低潮(LW)と高潮(HW)を示す。

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(図 5)。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。

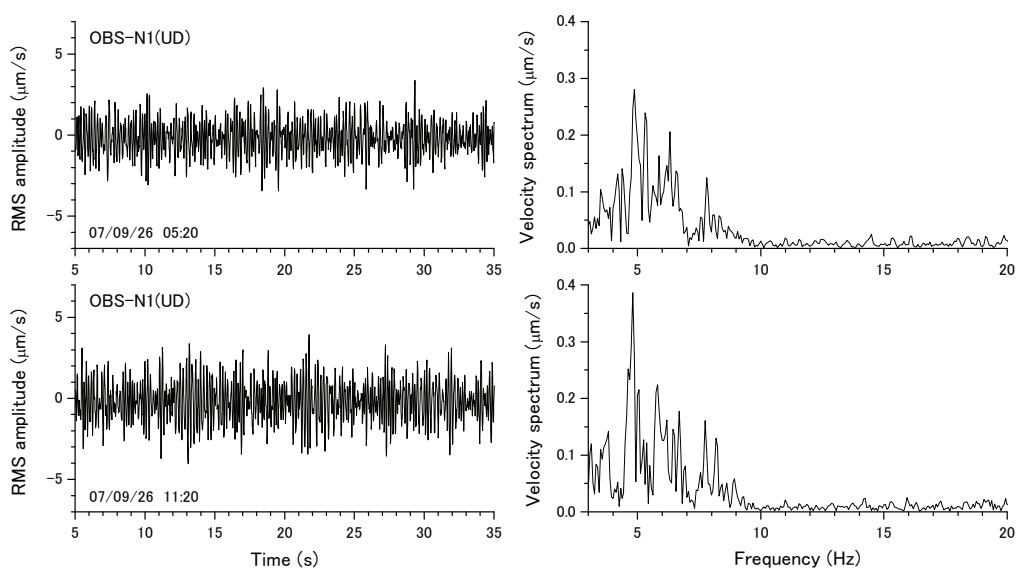


図 6. RMS 振幅値の極小(上)と極大(下)における観測波形例とスペクトル(右)。  
極小と極大はそれぞれ図 5 の LA と HA に対応する。

次に RMS 振幅値の極小と極大との間で、波形やスペクトルに違いがないかを比較した(図 6)。図 6 の上段が RMS 振幅値の極小、下段が極大における OBS-N1 の上下動成分(UD)の観測波形とスペクトルである。観測波形の振幅は、RMS 値の極小よりも極大における振幅が幾分大きいですが、波形には明瞭な違いは見られない。また、時間軸で 12 秒から 28 秒までの 16 秒間(1,024 データ)のスペクトルを図 6 に合わせて示した。スペクトルの比較においても、RMS 値の極小と極大の間で明瞭な違いは認められない。いずれも 10Hz 以上の高周波成分は含まれず、10Hz 以下の周波数の波で構成されることが分かった。4~6Hz の成分が大勢を占め 5Hz 付近にピークがある。また、8Hz 前後にももう一つのピークがあるように見える。海底地震計センサーは固有周期 4.5Hz 以下の周波数領域で感度が顕著に低下するが、3~4Hz にかけても一つのピークが現われており、4Hz よりも低周波側に延びている可能性がある。

## 5. 考察

若尊カルデラの海底噴気孔の直上または極々近傍に設置された OBS では海底噴気孔の活動に伴うと考えられる震動を観測することができた。その震動の RMS 値変化は潮位変化と明瞭に同期することが分かった。

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<sup>4)</sup>。西澤・他(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<sup>5)</sup>。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・他(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

若尊カルデラおよび桜島南方海域において延べ90日間の海底地震観測を実施した結果、以下の結果が得られた。

- 1) 海底地震観測点における常時微動の振幅レベルが明らかになった。若尊カルデラ底で上下動が  $0.2 \mu\text{m/s}$ 、水平動が  $0.8 \mu\text{m/s}$ 、桜島南方海域で上下動が  $0.5 \mu\text{m/s}$ 、水平動が  $0.9 \mu\text{m/s}$  である。若尊カルデラの海底噴気孔付近の観測点では、上記の5倍の振幅レベルが観測された。
- 2) 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常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。半日より長周期の変化については、RMS 振幅値と潮位との間に明瞭な相関は認められない。
- 3) 若尊カルデラの海底噴気孔付近の観測点で観測された震動は10Hz以下の周波数の波で構成される。

## 謝 辞

(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

- 1) Hidayachi, 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, 289-309.
- 2) Uehira, K., Yamada, T., Shinohara, M., Nakahigashi, K., Miyamachi, H., Iio, Y., Okada, T., Takahashi, H., Matsuwo, N., Uchida, K., Kanazawa, T. and Shimizu, H. (2006): Precise aftershock distribution of the 2005 West Off Fukuoka Prefecture Earthquake (Mj=7.0) using a dense onshore and offshore seismic network, Earth Planets Space, Vol. 58, 1605-1610.
- 3) 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, 280p.
- 4) 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, 749-754.
- 5) 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, 125-135.

(Received on March 11, 2008)