

諏訪之瀬島火山における人工地震探査

井口正人・八木原寛*****・為栗 健・清水 洋*****・平林順一***
宮町宏樹*****・鈴木敦生*・筒井智樹**・及川 純****・森 健彦*****
相沢広記***・河野裕希*****・馬場龍太*****・大倉敬宏****・吉川 慎*****
齋藤武士*****・福嶋麻沙代・平野舟一郎*****

* 北海道大学大学院理学研究科, ** 秋田大学資源工学部
*** 東京工業大学火山流体研究センター, **** 東京大学地震研究所
***** 京都大学大学院理学研究科, ***** 九州大学大学院理学研究院
***** 鹿児島大学理学部, ***** 産業技術総合研究所

要 旨

諏訪之瀬島火山の浅部構造を明らかにすることを目的として人工地震探査を2005年10月に行った。97点の地震観測点（内3成分9点）を設置し、9点において爆破を行った。初動の読み取りを行った結果、786個の検測値が得られ、そのうち468個はAランク、250個がBランクの精度のよい読み取りであった。初動の着震時を震央距離に対してプロットすると水平距離4kmまでは見かけ速度2.8km/sで伝播し、4km以遠では特に山頂の観測点において見かけ速度が5~6km/sに増加する。山頂の爆破では、0.5kmまでは見かけ速度1.9km/sと低速であるが、0.5km以遠の見かけ速度は約3~4km/sに増加する。御岳山頂火口の直下を通過する地震波の初動に弱い減衰が見られた。

キーワード: 諏訪之瀬島火山, 人工地震探査, 地震波速度構造, 爆発機構

1. はじめに

諏訪之瀬島は鹿児島市の南南西240kmの海上にある安山岩質の火山島である。わが国で最も活動的な火山の1つである。諏訪之瀬島の火山は富立岳、須崎、御岳、ナベダオなどの火山からなる（平沢・松本, 1983）。最高峰である御岳山頂には馬蹄形カルデラが北東に開いている。1813年と1883年には島の西側と東側の海岸まで溶岩流が達する規模の大きい噴火が発生した。1883年噴火についてはその噴火過程の詳細が嶋野・小屋口(2001)により明らかにされている。20世紀においても馬蹄形カルデラの中に形成された火口において噴火が繰り返され、特に1950年代からは頻繁にストロンボリ式あるいはブルカノ式噴火を繰り返している。

京都大学防災研究所では1989年5月から、火口から南南西に3.3kmの地点において火山性地震と空気振動の連続観測を開始した（Iguchi, 1991）。1994年ご

ろまで頻繁に繰り返された噴火活動は1995年以降やや静穏化した。2000年12月にこれまで爆発が繰り返された火口の北東側に新たな火口を形成し、噴火活動を再開し現在に至っている。

諏訪之瀬島において最も多数観測される地震は爆発地震である。井口(2000)は、10 μ m/s以上の振幅をもつ地震動のうち、10Pa以上の空気振動を伴うものを特に爆発地震と呼んでいるが、最近の広帯域地震計を用いた火口近傍の観測（井口・他, 2004）によれば、爆発地震の初動は緩やかな引きで始まり、0.2~0.3秒後に鋭い押し波が観測される。P波速度2km/sの半無限均質構造を仮定すると、引きの震源は火口直下の深さ300m付近、押しの震源は500m付近に求まり相対的に深いことが知られている（為栗・他, 2004）。また、爆発的噴火活動にしばしば先行して発生するA型地震の震源について、八木原・他（2005）は、上述の観測点の走時残差を検討することによりP波速度構造を推定し、その震源位置を爆発地震の震源域

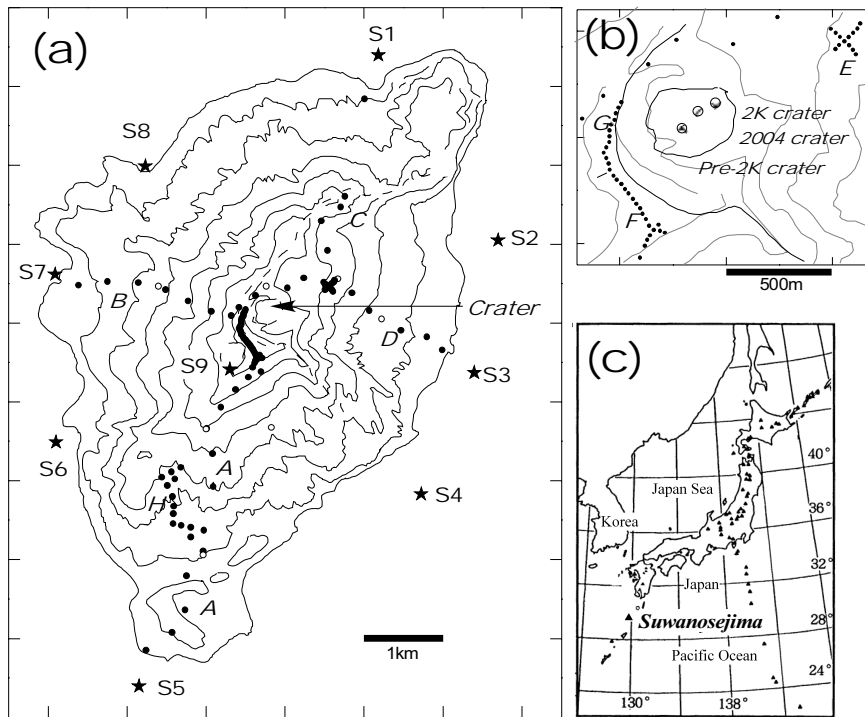


Fig. 1 Shot points and seismic stations. (a) Location of shot points and seismic stations at the flanks. Stars and dots represent shot points and seismic stations, respectively. Alphabets denote lines of seismic stations. Open circles show permanent stations with 3-component seismometers. Shot S9 is located in a crater formed by the eruption in 1813. Contour interval is 100 m. (b) Arrays of seismometers near the summit crater. Arrays F and G are installed along the caldera rim, and a cross array E is on the 1883 lava flow in the caldera. (c) Index map to show the location of Suwanosejima.

より更に深く火口の南西側の深さ2~4kmと見積もった。しかし、諏訪之瀬島については地震波速度に関する知見は皆無であり、これらの震源の絶対精度については保証の限りではない。一方、広帯域地震観測からは、爆発の発生の50~100秒前から火口周辺の地盤が隆起し、噴火の発生とともに沈降に転じることがわかってきた(井口・他, 2004)。このことは、火口内の噴火現象の観測(井口・他, 2005)、火山ガス放出量の変化(平林・他, 2005)をあわせて考えると火道内浅部のガス溜りにおけるガスの蓄積過程と放出過程と解釈される(井口, 2005; 西村・井口, 2006)。火道の大きさを推定し、爆発が発生する場所での圧力を推定するためには、爆発地震の震源位置の絶対精度の情報が必要である。そのためには、地震波速度構造を明らかにする必要があり、そのための人工地震探査を実施したので報告する。

2. 観測

Fig.1に人工地震探査のために設置した地震観測点の位置を示す。諏訪之瀬島は東西5.6km, 南北8km程度と大きくはないが、集落や道路は島の南部に限ら

れるため、島全体に渡って観測点を分布させることは不可能であるため、主に屈折法を念頭におき、島の北部のフカウラから御岳山頂付近を通して南端の長瀬に至る距離7.5kmの南北測線(測線C, A)と、西海岸の赤積から火口の北側を經由して東海岸の作地に至る距離6kmの南北測線(測線B, D)を設置した(地震計間隔約300m)。ただし、地形が険しい北部や噴火が発生している火口周辺は観測点の間隔を広くせざるを得なかった。屈折法による探査深度は海面下深さ1km程度と推定される。御岳山頂から北西に延びる馬蹄形カルデラ縁は比較的アクセスがよいので、地震計を30m間隔で稠密に配置するとともに(アレイF, G)、馬蹄形カルデラ内の1883年(明治)噴火の溶岩流の上には十字型で30m間隔のアレイEを設置した。各観測点にはMark Product社製L-22D型(固有周波数2Hz, コイル抵抗2kΩ)上下動地震計を設置し、ダンピング定数は0.7とした。地震波形はGPS刻時装置付火山体構造探査用データロガー(白山工業株式会社製DATAMARK LS-8000SH; 森田・浜口, 1996)に倍率300倍と、30倍の2チャンネルに分配し、それぞれ分解能16bitで収録した。サンプリング間隔は5msとした。また、南南西山麓の測

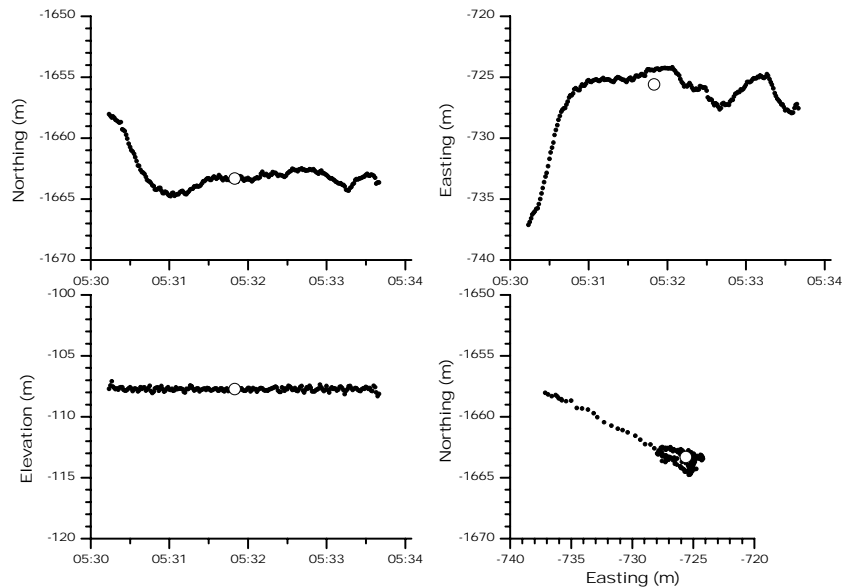


Fig. 2 Range of location of a buoy at Shot S5, (a) northing, (b) easting, (c) elevation and (d) horizontal movement. Open circles represent median values.

線Hにはデータロガー（白山工業株式会社製 DATAMARK LS-8200）を設置した。これらの臨時観測点に加え、火山性地震を観測することを目的とした広帯域地震計8台と短周期地震計1台（井口・他，2004）の記録も利用した。常設観測点を含めた観測点の総数は97である。

観測点の座標の決定にはGPSを使用した。測線A～Dの観測点の座標は高度計付簡易GPS装置により測定した。高度計は測定前に海岸において検定した。測定精度は水平位置については7～10m程度、標高は10m程度である。また、アレイE～Gの観測点の位置決定には簡易GPSでは不十分であるため、2周波GPS（Leica SR520）受信機により測定を行い、RTD（Real time Dynamics: Bock et al., 2004）により解析し、そのメディアン値を地震計位置とした。Table 1に観測点の座標と特記事項をまとめた。

爆破点は諏訪之瀬島を取り囲む海域における8点と山頂南西側にある1813年噴火の火口内の1点である。爆破点S1およびS5は南北測線の両端、S3およびS7は東西測線の両端に位置する。S2、S4、S6およびS8はそれぞれ中間に位置し、特に、S2は山頂のカルデラ西縁から南縁に配置したアレイF、Gからみて火口付近を波線が通過する位置とした。海域の発破点では深度30mの海底にアンカーを下ろし、アンカーに固定されたブイの位置から錘をつけたダイナマイトを投入し、海底において爆破を行った。山頂部の爆破点S9は、人力による掘削であり、掘削深度は1mと浅い。ダイナマイトの量は海域発破点で24kg、山頂発破点で21kgである。

海域発破点の座標は、アンカー設置時のブイの位置とした。ブイの位置は、波浪により常時変動するため、1秒サンプリングでGPS観測を行い、RTDにより1秒ごとに位置を決定し、そのメディアン値をブイの位置とした。Fig.2にアンカーを下ろし始めてから5分間のブイの位置の変化とRTDで計算した結果を示す。爆破点S5の例では、アンカーの下ろしはじめから1分間に南へ7m、東へ12m移動したが、その後は±2m程度の変動でとどまった。上下の位置は波浪による海面の変動程度で決定できている。海底の深度は魚群探知機で測定し、海底の標高を求めた。アンカー設置時と爆破時では海面の高さが異なるので、ブイの位置は偏移する可能性があるがその場合でも最大5mの誤差を見込めばよいであろう。また、爆破点S9の位置は高度計付簡易GPS装置により測定した。各爆破点の位置座標、爆破時刻、薬量をTable 2にまとめて示した。

3. 初動の走時

Fig.3に南北測線上において観測された爆破S1、S5に対する地震波形および東西測線上において観測された爆破S3、S7に対する地震波形を示す。波形の振幅は、それぞれ最大振幅で規格化されている。これらの波形記録の時刻は見かけ速度5km/sでreduceしてあるが、爆破点から3km程度離れると初動が見かけ速度約5km/sの速度で伝播していることが読み取れる。初動付近は5-14Hzの帯域の高周波の波が卓越するが、後続波では2Hz程度の長周期の波動が顕著にな

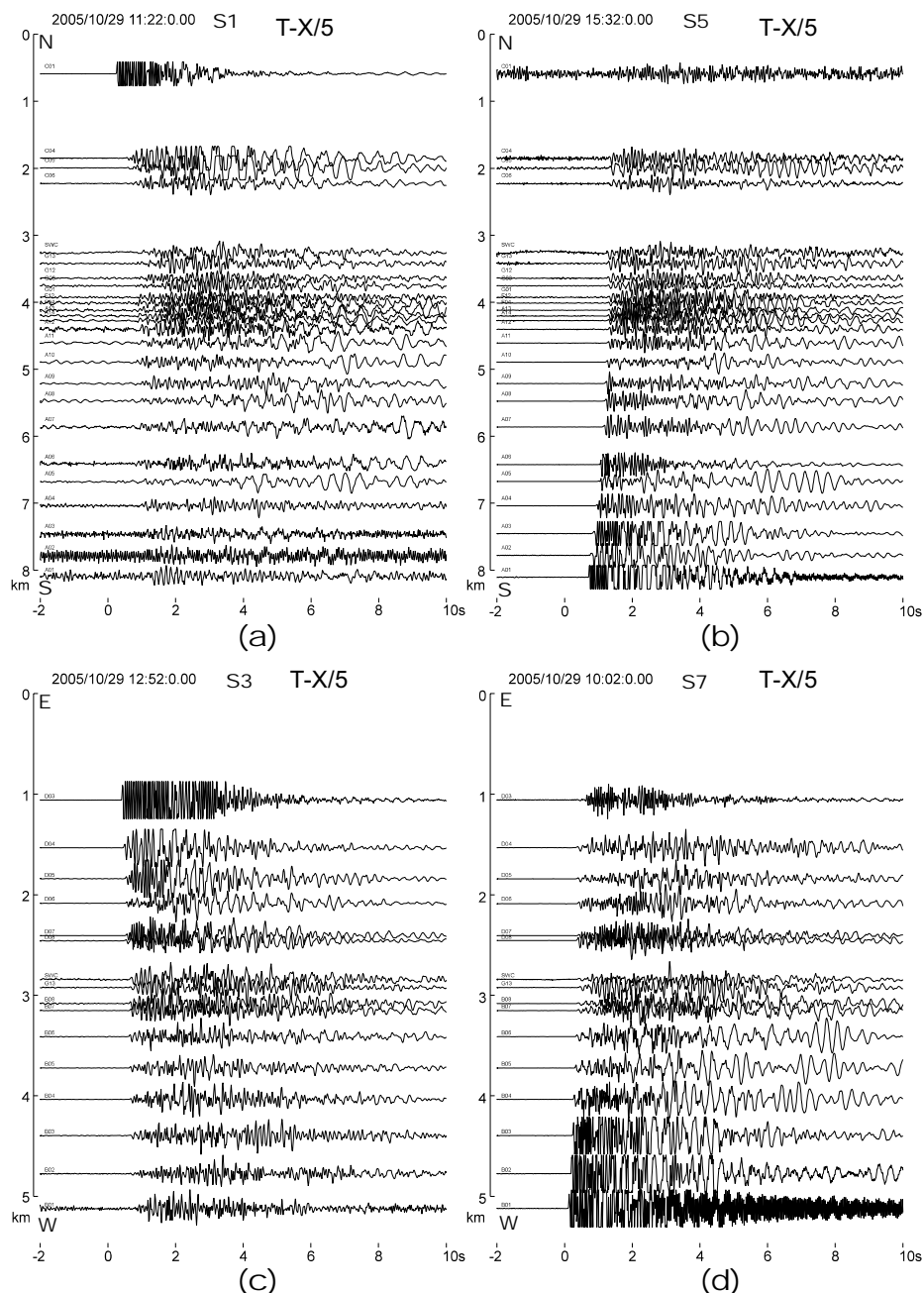


Fig. 3 Record sections of seismograms on NS line for (a) Shot S1, and (b) Shot S5, and EW line for (c) Shot S3 and (d) Shot S7. Amplitude of each trace is normalized by the maximum value. The reduction velocity is 5.0 km/s.

ってくる。Fig.4に爆破S9に対する地震波形を示す。このショットは深さ1.5m程度の浅い地中で行ったため、水平距離3km以内の観測点でしか初動を読み取ることができなかった。爆破点の南側および西側の観測点では伝播速度が遅い後続相がみられるが、見かけ速度から地表付近の爆破に伴い生じた音波と思われる。

浅部P波速度構造を推定するために、これらの記録から初動到達時刻を読み取りデータリストを作成した。観測点総数は97点であるが、動作不良や土石流で流出したものもあるため、最終的には89点の観測

点のデータを用いた。この作業は実験参加者中の有志による解析委員が行った。まず各委員が個別に全波形の初動到達時刻を読み取り、これらの値を持ち寄って八木原・為栗が最終値を決定した。読み取りには到達時刻とその読み取り精度に応じたランク・極性の情報を付加している。読み取り精度のランクは±10ms以内で初動を確定できたものをAランク、以下、±10ms～±30ms、±30ms～±100msで確定できたものをそれぞれB、Cランクとし、極性が判定できないものをLランクとした(鍵山・他, 1995, 筒井・他, 1996)。初動と極性は判定できるものの読み取

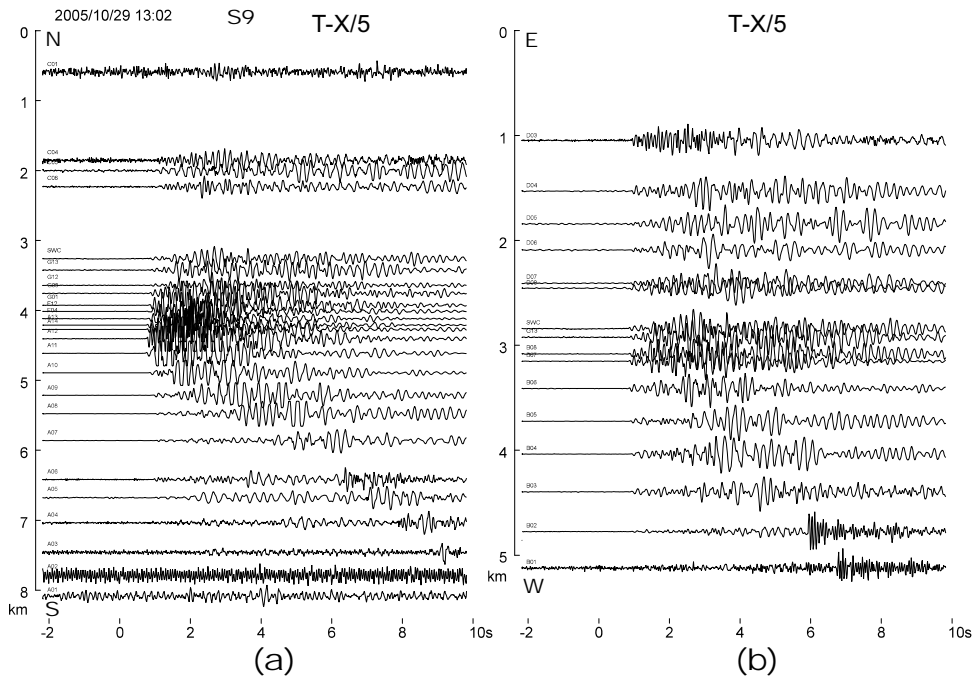


Fig. 4 Record sections of seismograms for Shot S9 near the summit. Amplitude of each trace is normalized by the maximum value. The reduction velocity is 5.0 km/s.

り精度が±100ms以上になるものもLランクとした。

初動を確認できないものに関してはXランクとした。A, B, C, Lランクで決定された初動到達時刻の数はそれぞれ468個, 250個, 45個, 23個であり, 総数786個の読み取り値が得られた。全読み取り値に対するAおよびBランクの割合は90%であった。これらをまとめたものをTable 3と4に示す。

すべての発破による人工地震の走時をFig.5にプロットした。水平距離6.5kmを超えるものはLランクであり, これを無視すると平均的には3.7km/sの見かけ速度が得られる。観測点の標高差は最大でも700m程度なので, 0.5秒に達する走時のほらつきは, 地下構造の違いを反映している可能性が高い。各発破に対する走時をFig.6に示す。Fig.5と同様に見掛け速度5km/sでreduceしてある。爆破S5についてみると距離4kmまではみかけ速度2.8km/sであるが, それを超えると5~6km/sと高速になる。爆破S7についても距離2.5km付近まではみかけ速度2.8km/sで伝播するが, それを超えると見かけ速度5km/s以上に増加することがわかる。標高の異なる測線によって2列に分かれているが爆破S1やS3についても同様のことが読み取れる。見かけ速度が高速となっているのは山頂付近の観測点であり, 山頂付近に近づくにしたがい地下のP波速度が高速となっている, あるいは高速度層が厚くなっていることが示唆される。一方, 山頂に近い爆破S9では爆破点近傍の走時が密に把握することができるが, 水平距離0.5kmまでは, 見かけ速度

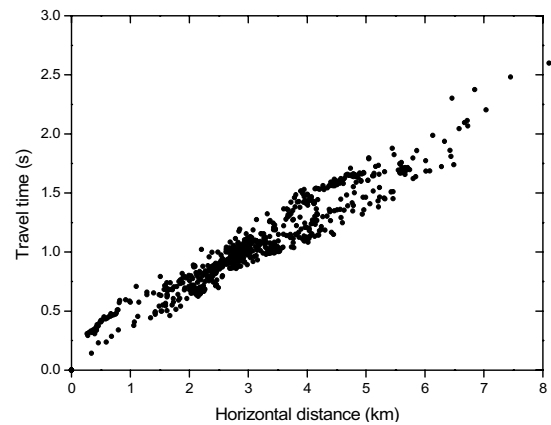


Fig. 5 Travel times for all the shots

1.9km/s以下と低速で, それを超えると見かけ速度4km/sに増加することがわかる。山頂付近は1813年噴火の火砕物によって厚く覆われており(嶋野・小屋口, 2001), 爆破点周辺では低速の火砕物を伝播するP波速度が観測されているものと思われる。

4. 初動の振幅

山頂のカルデラ縁に設置したアレイF・Gは, 爆破S2に対して火口付近のファン・シューティングができるように配置したので, その波形をFig.7に示す。爆破S2からみた方位角の順に波形を並べた。観測点F15, 16で振幅が小さい。これに5Hzのハイパ

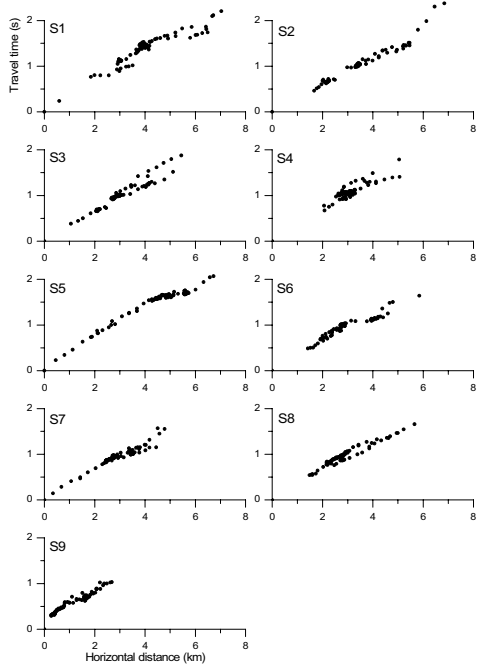


Fig. 6 Plots of travel times for Shots S1 to S9.

フィルターを施してみたところこれらの観測点における減衰は高周波成分において顕著であることがわかる (Fig.7b)。この減衰は観測点近傍の影響を受けている可能性があるため、アレイF・Gからみて爆破S2の反対方向に位置する爆破S6からの振幅を調べてみた。初動の振幅を爆破点からの方位角に対してプロットしたものをFig.8に示す。爆破S2でもS6でもF4から左に行くにつれて振幅が徐々に増加する傾向が共通に見られるので、この傾向は観測点付近の地質構造の違いを反映しているものと考えられる。観測点F15およびF16について見てみると爆破S6からの地震波では、左上がりのトレンドに乗っているが、爆破S2では30%程度減衰している。このことから爆破S2の地震波のF15およびF16における減衰は波動の伝播経路の影響を受けていると思われる。地理学的な位置関係では、爆破S2とF15およびF16を結ぶ直線上には現在噴火活動を繰り返している火口のある中心があり、火道の構造の影響を受けている可能性がある。

5. まとめ

2005年10月に諏訪之瀬島火山において人工地震による構造探査を行った。89点の地震計によって、9箇所の爆破点において励起された地震波を約90%の割合で良好に観測することができた。この波形記録からP波初動着震時の読み取りを行った。波形記録や走時からは諏訪之瀬島火山体内部構造や火口周辺の

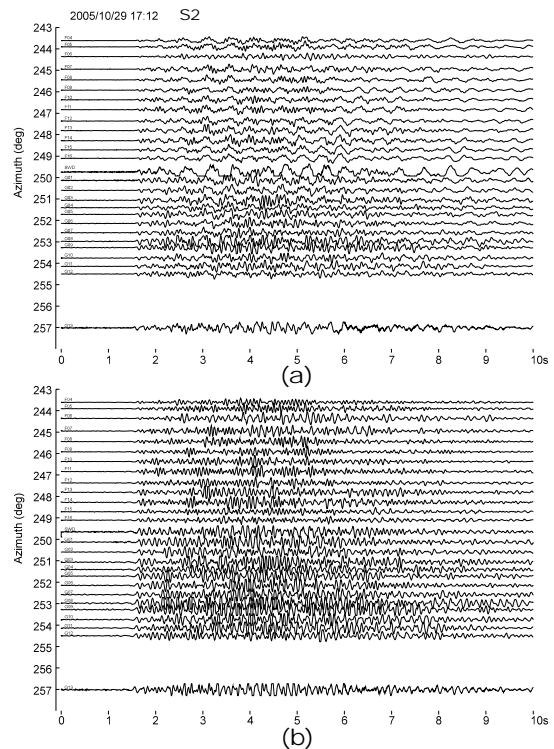


Fig. 7 Record sections of seismograms on Array F and G along the caldera for Shot S2, aligned along the azimuths from the shot. (a) Raw seismograms. No correction was made. (b) High-pass filtered seismograms. Cut-off frequency is 5 Hz.

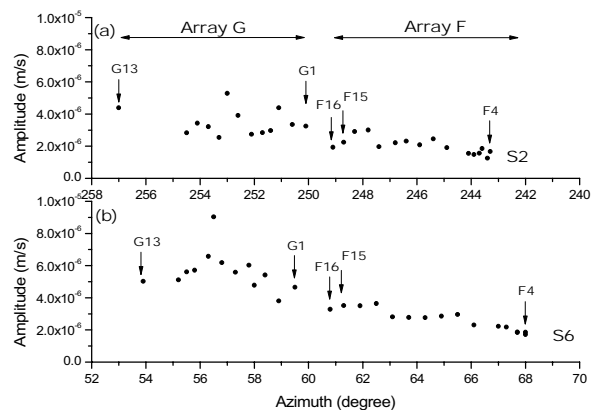


Fig. 8 Amplitude of initial motions at Array F and G for the Shots S2 and S6

構造を示唆するような特徴が認められた。P波3次元速度構造については諏訪之瀬島人工地震探査グループ(2006)を参照されたい。

謝辞

今回の探査実験は諏訪之瀬島島民の方々の絶大な

るご理解・御協力によって達成することができました。十島村役場諏訪之瀬島出張員の伊東隆幸さんには観測の全般に渡り、お世話になりました。海上発破につきましては爆破コントロール船を操舵していただいたトカラ南風丸船長の伊東典親さんを始め、監視業務を行っていただいた園山登啓さん、伊東すみ子さん、観測点設置の際の渡船をしていただいた山木保さん、金森泰二さんにはお世話になりました。また、宿泊に関しましては、浜原荘、民宿山木、民宿御岳の皆様には大変お世話になりました。

十島村役場総務課、十島村漁業協同組合、鹿児島県危機管理局、鹿児島県環境保護課、第十管区鹿児島海上保安本部など関係機関には実験実施にあたり土地の使用、認可関係の便宜を図っていただきました。応用地質株式会社および南九地質株式会社には爆破孔の掘削・爆破作業を請け負っていただき、計画の立案の段階からお世話になりました。

本調査は火山噴火予知計画経費「火山体構造探査」および科学研究費特定領域研究(2)「火山爆発のダイナミックス」(研究代表者井田喜明)の「火山爆発の発生場と発生過程」(No. 14080205)および財団法人東京海上各務記念財団の地震予知研究助成金(計画課題「南西諸島の活火山における活動度評価のための基礎研究」)を用いて実施されました。以上、諏訪之瀬島の探査が成功裏に終わらせることができましたのは皆様のご協力とご理解のおかげであり、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

なお、初動解析にあたった探査参加者は、筒井智樹、及川純、大倉敬宏、八木原寛、宮町宏樹、為栗健、井口正人の7名である。

参考文献

井口正人(2000): 諏訪之瀬島火山活動の経過, 第3回 諏訪之瀬島集中総合観測, pp.1-10.
井口正人(2005): 地球物理学的観測から見た火山爆発のダイナミックス—桜島を例として—, 火山, 50周年特集号, pp.S139-S149.
井口正人・為栗健・森健彦・高山鉄朗・八木原寛・平野舟一郎・大倉敬宏・吉川慎(2004): 火口近接観測による噴火機構の研究: 諏訪之瀬島火山の小規模噴火地震に伴う長周期パルス, 火山爆発のダイナミックス, 科学研究費補助金・特定領域研究平成15年度研究成果報告書, 2, pp. 61-66.
井口正人・平林順一・八木原寛・森健彦・及川光弘(2005): 諏訪之瀬島火山噴火に伴う表面現象と地震動の関係, 火山爆発のダイナミックス, 科学研究費補助金・特定領域研究平成16年度研究成果報告

書, 3, pp. 62-65.

鍵山恒臣・筒井智樹・三ヶ田均・森田裕一・松島健・井口正人・及川純・山岡耕春・熊谷博之・西村祐一・宮町宏樹・渡辺了・西村太志・高木朗充・山本圭吾・浜口博之・岡田弘・前川徳光・大島弘光・植木貞人・橋本恵一・仁田交一・茂原諭・中道治久・汐見勝彦・中原恒・青木重樹・青地秀雄・井田喜明・渡辺秀文・鬼澤真也・長田昇・行田紀也・辻浩・山口勝・増谷文雄・西谷一平・井上智弘・伊藤渉・奥田隆・宮島力雄・柴田元衛・鬼頭直・鶴我佳代子・前田実利・清水洋・松尾のり道・馬越孝道・内田和也・奥村貴史・柴田学・須藤靖明・吉川慎・山田年広・森健彦・松本良浩・高山鉄朗・ムハマッドヘンドラスト・平野舟一郎・八木原寛・上野寛・石原和彦・森博一・平林順一・大場武・野上健治・森俊哉・左党雅規・富永貞男(1995): 霧島火山群における人工地震探査, 地震研究所彙報, 第70巻, pp. 32-59.
嶋野岳人・小屋口剛博(2001): 諏訪之瀬島火山1813年噴火(文化噴火)の噴火様式とマグマの脱水過程, 火山, 第46巻, pp.53-70.
諏訪之瀬島人工地震探査グループ(2006): 諏訪之瀬島における人工地震探査, 火山爆発のダイナミックス, 科学研究費補助金・特定領域研究(領域代表: 井田喜明)平成17年度研究成果報告書, 4, pp. 49-54.
為栗健・井口正人・八木原寛(2004): 諏訪之瀬島火山において2003年11月に発生した噴火地震の初動解析, 京都大学防災研究所年報, 第47号 B, pp.773-777.
筒井智樹・他(1996): 人工地震探査による霧島火山群の地震波速度構造—はぎとり法による解析—, 火山, 第41巻, pp. 227-241.
西村太志・井口正人(2006): 日本の火山性地震と微動, 京都大学学術出版会, pp.209-214.
平沢晃一・松本幡郎(1983): 鹿児島県トカラ列島諏訪之瀬島の火山地質, 火山, 第28巻, pp.101-115.
平林順一・及川光弘・井口正人・八木原寛・森健彦・篠原宏志(2005): 諏訪之瀬島における爆発と火山ガスの蓄積, 火山爆発のダイナミックス, 科学研究費補助金・特定領域研究平成16年度研究成果報告書, 3, pp. 45-48.
森田裕一・浜口博之(1996): 火山体構造探査のための高精度小型データロガーの開発, 火山, 第41巻, pp. 127-139.
八木原寛・平野舟一郎・井口正人・為栗健・高山鉄朗・森健彦・大倉敬宏・吉川慎(2005): 諏訪之瀬島火山の活動領域について推定した3次元地震波速度モデル, および火山性地震の発生位置, 火山爆発のダイナミックス, 科学研究費補助金・特定領

域研究平成16年度研究成果報告書, 3, pp. 66-70.

Bock, Y., Macdonald, T., Merts, J., Bock, L., Fayman, J. (2004): Epoch-by-EpochTM real-time GPS positioning in high dynamics and at extended ranges, The ITEA Journal of Test and Evaluation, 25:3, pp. 37-45.

Iguchi, M. (1991): Geophysical data collection using an interactive personal computer system (part 1) -Experimental monitoring at Suwanosejima volcano-, Bull. Volcanol. Soc. Japan, Vol. 36, pp. 335-343.

Table 1. Locations of seismic stations. The coordinates are based on WGS84.

Stn. code	Logger number	Latitude			Longitude			Altitude m	Remarks
		°	'	"	°	'	"		
A01	L056	29	36	16.8	129	41	52.8	62	
A02	L057	29	36	24.2	129	42	05.1	108	
A03	L058	29	36	33.5	129	42	11.3	83	
A04	L059	29	36	47.7	129	42	11.8	86	
A05	L060	29	36	57.8	129	42	19.8	102	
A06	L061	29	37	06.4	129	42	20.0	132	
A07	L062	29	37	24.5	129	42	24.5	323	
A08	L063	29	37	38.1	129	42	24.1	450	
A09	L064	29	37	48.5	129	42	21.5	530	
A10	L065	29	37	57.3	129	42	28.2	627	
A11	L066	29	38	04.6	129	42	35.1	676	
A12	L067	29	38	9.83	129	42	41.06	730	
A13	L068	29	38	15.63	129	42	43.99	740	
A14	L070	29	38	13.81	129	42	43.08	721	
B01	N101	29	38	47.8	129	41	21.0	31	
B02	N102	29	38	49.2	129	41	34.6	139	
B03	N103	29	38	48.9	129	41	49.1	193	
B04	N104	29	38	46.0	129	42	02.1	268	
B05	N105	29	38	41.2	129	42	12.7	364	
B06	N106	29	38	37.0	129	42	23.5	495	
B07	N107	29	38	35.2	129	42	33.0	606	
B08	N108	29	38	38.7	129	42	36.7	649	
C01	L041	29	40	04.7	129	43	36.0	17	
C04	L044	29	39	24.4	129	43	26.6	516	
C05	L045	29	39	20.0	129	43	24.5	567	
C06	L042	29	39	14.4	129	43	15.5	503	
D01	L220	29	38	16.0	129	44	17.1	14	Lost
D02	L221	29	38	26.3	129	44	05.2	91	Lost
D03	L222	29	38	29.1	129	43	53.2	143	
D04	L223	29	38	37.2	129	43	38.1	222	
D05	L224	29	38	44.6	129	43	29.9	344	
D06	L225	29	38	50.3	129	43	23.4	399	
D07	L226	29	39	02.1	129	43	18.5	369	
D08	L227	29	38	50.8	129	43	07.2	429	
E01	L106	29	38	49.03	129	43	21.24	402	
E02	L106	29	38	48.38	129	43	20.46	402	
E03	L107	29	38	47.72	129	43	19.65	400	Time calibration failure
E04	L110	29	38	47.08	129	43	18.96	406	
E05	L108	29	38	46.48	129	43	18.03	412	
E06	L108	29	38	45.89	129	43	17.37	406	
E07	L109	29	38	45.07	129	43	20.96	390	

Stn. Code	Logger number	Latitude			Longitude			Altitude m	Remarks
		°	'	"	°	'	"		
E08	L109	29	38	45.76	129	43	20.41	396	
E09	L107	29	38	46.44	129	43	19.74	402	Time calibration failure
E10	L110	29	38	47.76	129	43	18.16	397	
E11	L111	29	38	48.35	129	43	17.39	410	
E12	L111	29	38	49.00	129	43	16.58	415	Illegal motion
F01	N110	29	38	16.59	129	42	44.41	747	
F02	N110	29	38	17.27	129	42	44.88	754	
F03	N111	29	38	17.65	129	42	47.47	769	
F04	N111	29	38	17.94	129	42	46.66	769	
F05	N112	29	38	18.08	129	42	45.52	766	
F06	N112	29	38	18.73	129	42	44.75	764	Illegal motion
F07	N113	29	38	19.76	129	42	44.20	766	
F08	N113	29	38	20.56	129	42	43.58	762	
F09	N114	29	38	21.39	129	42	43.13	755	
F10	N114	29	38	22.09	129	42	42.46	750	
F11	N115	29	38	22.86	129	42	41.92	745	
F12	N115	29	38	23.68	129	42	41.11	742	
F13	N116	29	38	24.38	129	42	40.49	743	
F14	N116	29	38	25.14	129	42	39.85	745	
F15	N117	29	38	25.78	129	42	39.06	738	
F16	N117	29	38	26.43	129	42	38.51	734	
F17	N118	29	38	18.90	129	42	46.36	774	
G01	L047	29	38	28.29	129	42	37.64	741	
G02	L047	29	38	29.12	129	42	37.21	734	
G03	L048	29	38	29.96	129	42	36.75	726	
G04	L048	29	38	30.81	129	42	37.20	717	
G05	L049	29	38	31.59	129	42	37.73	708	
G06	L049	29	38	32.48	129	42	37.76	696	
G07	L050	29	38	33.36	129	42	37.76	685	
G08	L050	29	38	34.25	129	42	38.05	682	
G09	L051	29	38	35.01	129	42	38.69	686	
G10	L051	29	38	35.99	129	42	38.89	684	
G11	L052	29	38	36.89	129	42	39.34	686	
G12	L052	29	38	37.71	129	42	39.85	691	
G13	L053	29	38	43.53	129	42	44.60	675	
H01	L07F8	29	37	28.4	129	42	00.2	304	
H02		29	37	30.6	129	42	04.8	307	No records
H03	L07F7	29	37	32.4	129	42	09.2	298	
H04		29	37	27.6	129	42	06.3	276	No records
H05	L07F5	29	37	24.9	129	42	02.8	261	
H06		29	37	20.3	129	42	05.3	245	No records
H07	L07F0	29	37	16.4	129	42	05.9	219	
H08		29	37	13.3	129	42	05.7	196	No records
H09	L07F2	29	37	09.1	129	42	05.5	166	
H10		29	37	08.5	129	42	09.3	151	No records
H11	L0476	29	37	07.7	129	42	14.0	143	
H12		29	37	03.7	129	42	13.9	125	No records

Stn. code	Logger number	Latitude			Longitude			Altitude m	Remarks
		°	'	"	°	'	"		
SUWG	LS7000	29	36	56.27	129	42	19.77	105	
SWA	LS7XT	29	38	12.0	129	42	47.0	707	No records (Shots 1, 3, 9)
SWB	LS7XT	29	38	49.8	129	43	21.7	438	
SWC	LS7XT	29	38	47.3	129	42	49.5	635	
SWD	LS7XT	29	38	27.34	129	42	37.81	738	
SWE	LS8SH	29	37	48.95	129	42	52.01	411	
SWF	LS8SH	29	38	33.80	129	43	43.98	189	
SWG	LS8SH	29	38	46.00	129	42	2.10	268	
SWH	LS8SH	29	37	48.27	129	42	21.23	512	

Data loggers LS8200 were installed at the stations of line H.

Prefix of logger number "N" : National Institute for Polar Research

Stations SWA-SWH are permanent stations equipped with broadband seismometer.

SUWG has a short-period seismometer.

Table 2. Shot locations, times and charge sizes for 9 explosions in the experiment.

Shot	Latitude			Longitude			Altitude m	Time JST	Charge kg
	°	'	"	°	'	"			
S1	29	40	23.17	129	43	42.11	-28	11:21:50.123	24.00
S2	29	39	6.51	129	44	38.52	-26	17:11:50.542	24.00
S3	29	38	12.85	129	44	28.92	-30	12:51:50.226	24.00
S4	29	37	21.70	129	44	2.23	-33	16:21:50.429	24.00
S5	29	36	2.25	129	41	52.81	-32	15:31:50.565	24.00
S6	29	37	43.19	129	41	10.02	-30	12:51:49.923	24.00
S7	29	38	51.42	129	41	11.05	-29	10:01:50.029	24.00
S8	29	39	37.35	129	41	52.09	-27	14:31:50.055	24.00
S9	29	38	13.3	129	42	32.0	612	13:01:50.665	20.25

The coordinates are based on WGS84.

Table 3. Arrival times and polarities of the first motions for shots S1 to S5.

Stn.	S1			S2			S3			S4			S5		
	T(s)	P	R	T(s)	P	R	T(s)	P	R	T(s)	P	R	T(s)	P	R
	11:02			17:12			12:52			16:22			15:32		
A01	2.723	X	L	2.917	X	L	2.103	U	B	1.918	U	B	0.794	U	A
A02		X	X	2.845	X	L	2.023	U	C	1.794	U	C	0.905	U	A
A03	2.605	U	C	2.529	X	L	1.934	U	A	1.752	U	A	1.019	U	B
A04	2.326	U	B	2.337	X	L	1.842	U	C	1.702	U	B	1.197	U	A
A05	2.218	U	C	2.051	U	A	1.647	U	A	1.606	U	B	1.305	U	C
A06	1.983	U	C	2.007	U	B	1.434	U	A	1.543	U	B	1.380	U	B
A07	1.981	U	B	1.958	U	B	1.447	U	B	1.429	U	A	1.649	U	A
A08	1.947	U	C	1.899	U	B	1.421	U	B	1.459	U	A	1.752	U	B
A09	1.857	U	C	1.882	U	A	1.454	U	A	1.500	U	B	1.831	U	B
A10	1.791	U	A	1.812	U	A	1.378	U	A	1.448	U	B	1.923	U	B
A11	1.736	U	B	1.688	U	B	1.320	U	A	1.455	U	A	2.033	U	A
A12	1.715	U	A	1.692	U	A	1.280	U	C	1.470	U	A	2.105	U	B
A13	1.654	U	B	1.576	U	A	1.174	U	B	1.437	U	A	2.108	U	B
A14	1.670	U	C	1.590	U	B	1.191	U	A	1.450	U	A	2.092	U	B
B01	1.784	U	A		X	X	1.742	U	L	1.837	U	C	2.212	U	B
B02	1.729	U	A	1.900	U	A	1.573	U	B	1.823	U	B	2.231	U	A
B03	1.659	U	A	1.833	U	A	1.491	U	B	1.778	U	A	2.210	U	B
B04	1.604	U	A	1.732	U	A	1.420	U	A	1.697	U	B	2.171	U	A
B05	1.544	U	B	1.665	U	A	1.361	U	A	1.653	U	A	2.165	U	B
B06	1.502	U	B	1.585	U	B	1.258	U	B	1.578	U	A	2.156	U	B
B07	1.504	U	B	1.580	U	A	1.240	U	A	1.555	U	A	2.204	U	A
B08	1.487	U	B	1.532	U	A	1.235	U	A	1.545	U	B	2.234	U	A
C01	0.359	U	A	1.255	U	A	1.647	U	A	2.217	U	A		X	X
C04	0.887	U	A	1.223	U	B	1.147	U	A	1.724	U	A	2.633	U	A
C05	0.925	U	A	1.246	U	A	1.175	U	A	1.705	U	A	2.610	U	B
C06	0.921	U	A	1.257	U	A	1.137	U	B	1.744	U	A	2.502	U	B
D03	1.138	U	B	1.004	U	B	0.604	U	A	1.100	U	A	2.323	U	B
D04	1.113	U	B	1.084	U	A	0.726	U	B	1.226	U	A	2.308	U	A
D05	1.074	U	B	1.147	U	B	0.834	U	B	1.339	U	A	2.279	U	B
D06	1.047	U	A	1.197	U	A	0.918	U	A	1.365	U	B	2.262	U	B
D07	0.922	U	B	1.166	U	A	0.971	U	A	1.470	U	B	2.339	U	B
D08	1.015	U	A	1.240	U	B	0.950	U	C	1.392	U	A	2.233	U	B
E01	1.226	U	A	1.201	U	A	0.912	U	A	1.388	U	A	2.254	U	A
E02	1.224	U	A	1.195	U	A	0.908	U	A	1.368	U	B	2.257	U	B
E03	1.237	U	A	1.196	U	A	0.906	U	B	1.381	U	B	2.237	U	B
E04	1.244	U	B	1.220	U	A	0.903	U	B	1.370	U	B	2.245	U	A
E05	1.252	U	A	1.232	U	A	0.915	U	A	1.382	U	A	2.245	U	B
E06	1.239	U	B	1.227	U	A	0.903	U	A	1.358	U	A	2.258	U	A
E07	1.245	U	C	1.187	U	A	0.881	U	A	1.350	U	B	2.254	U	A
E08	1.229	U	A	1.188	U	A	0.892	U	A	1.353	U	A	2.254	U	A
E09	1.240	U	A	1.199	U	A	0.906	U	A	1.373	U	A	2.234	U	B
E10	1.233	U	B	1.215	U	A	0.919	U	A	1.362	U	B	2.278	U	A
E11	1.237	U	A	1.209	U	A	0.929	U	A	1.379	U	C	2.270	U	B
E12	1.276	U	A	1.222	U	B	0.924	U	A	1.344	U	L	2.278	U	A
F01	1.565	U	B	1.583	U	A	1.158	U	A	1.453	U	A	2.128	U	A
F02	1.487	U	C	1.573	U	B	1.162	U	A	1.436	U	A	2.128	U	A
F03	1.536	U	C	1.554	U	A	1.172	U	A	1.445	U	A	2.155	U	A

Stn.	S1			S2			S3			S4			S5		
	T(s)	P	R	T(s)	P	R	T(s)	P	R	T(s)	P	R	T(s)	P	R
	11:02			17:12			12:52			16:22			15:32		
F04	1.533	U	B	1.555	U	A	1.173	U	A	1.437	U	A	2.158	U	A
F05	1.545	U	B	1.555	U	B	1.184	U	A	1.444	U	A	2.149	U	A
F06	1.536	U	L	1.592	U	A	1.166	U	A	1.460	U	A	2.126	U	B
F07	1.557	U	A	1.577	U	B	1.172	U	A	1.486	U	A	2.126	U	B
F08	1.590	U	A	1.562	U	A	1.187	U	B	1.468	U	A	2.150	U	A
F09	1.578	U	B	1.558	U	A	1.175	U	A	1.454	U	B	2.139	U	C
F10	1.568	U	A	1.546	U	B	1.204	U	A	1.499	U	A	2.160	U	B
F11	1.555	U	A	1.555	U	B	1.216	U	A	1.485	U	B	2.168	U	B
F12	1.519	U	C	1.539	U	B	1.228	U	A	1.483	U	B	2.147	U	C
F13	1.533	U	C	1.564	U	C	1.232	U	A	1.501	U	A	2.186	U	B
F14	1.534	U	C	1.562	U	B	1.219	U	A	1.501	U	A	2.178	U	A
F15	1.539	U	B	1.566	U	B	1.212	U	A	1.491	U	A	2.171	U	B
F16	1.561	U	L	1.562	U	A	1.220	U	A	1.490	U	B	2.145	U	B
F17	1.552	U	B	1.555	U	A	1.163	U	A	1.449	U	A	2.137	U	B
G01	1.617	U	C	1.607	U	B	1.242	U	A	1.512	U	A	2.218	U	B
G02	1.639	U	L	1.589	U	A	1.247	U	A	1.521	U	A	2.223	U	B
G03	1.639	U	L	1.590	U	A	1.242	U	A	1.523	U	A	2.213	U	A
G04	1.550	U	L	1.555	U	A	1.228	U	B	1.528	U	A	2.216	U	A
G05	1.547	U	L	1.554	U	A	1.223	U	A	1.524	U	A	2.208	U	A
G06	1.607	U	B	1.544	U	A	1.231	U	A	1.526	U	A	2.202	U	B
G07	1.583	U	B	1.553	U	B	1.227	U	A	1.511	U	A	2.220	U	B
G08	1.474	U	B	1.561	U	A	1.229	U	A	1.506	U	A	2.210	U	B
G09	1.447	U	C	1.530	U	B	1.224	U	B	1.479	U	B	2.194	U	A
G10	1.434	U	B	1.530	U	A	1.221	U	B	1.487	U	A	2.229	U	A
G11	1.420	U	C	1.534	U	A	1.221	U	A	1.519	U	A	2.225	U	A
G12	1.400	U	C	1.522	U	B	1.226	U	A	1.505	U	C	2.237	U	B
G13	1.368	U	B	1.511	U	B	1.204	U	A	1.515	U	C	2.290	U	A
H01	1.807	U	A	1.975	U	B	1.493	U	A	1.494	U	A	1.563	U	B
H03	1.744	U	B	1.862	U	B	1.419	U	A	1.433	U	A	1.581	U	A
H05	1.810	U	C	1.923	U	C	1.459	U	A	1.441	U	B	1.512	U	B
H07	1.846	U	C	1.998	U	A	1.494	U	B	1.474	U	A	1.449	U	B
H09	1.861	U	C	1.994	U	L	1.525	U	A	1.458	U	A	1.441	U	B
H11	1.932	U	C	1.992	U	L	1.468	U	A	1.447	U	A	1.389	U	B
SWA		X	X	1.611	U	A		X	X	1.403	U	A	2.127	U	A
SWB	1.175	U	A	1.178	U	A	0.879	U	B	1.379	U	A	2.279	U	A
SWC	1.276	U	A	1.517	U	B	1.204	U	A	1.547	U	B	2.245	U	C
SWD	1.653	U	A	1.596	U	A	1.244	U	A	1.488	U	A	2.191	U	A
SWE	1.728	U	A	1.664	U	A	1.157	U	A	1.203	U	A	1.868	U	C
SWF	1.118	U	B	1.055	U	A	0.668	U	A	1.178	U	A	2.313	U	A
SWG	1.607	U	A	1.756	U	A	1.407	U	A	1.731	U	A	2.171	U	B
SWH	1.781	U	A	1.888	U	A	1.413	U	C	1.510	U	A	1.821	U	B
SUWG	2.236	U	L	2.052	U	B	1.760	U	A	1.623	U	A	1.297	U	A

T: arrival time, P: polarity (U: upward motion, X: no identification of polarity), R: picking quality rank indicating accuracy of the arrival time, Rank A:<10ms, B:<30ms, C:<100ms and D:>=100ms. Ranks L means that polarity is not identified. Rank X: no first motion identified.

Table 4. Arrival times and polarities of the first motions for shots S6 to S9.

Stn.	S6			S7			S8			S9		
	T(s)	P	R	T(s)	P	R	T(s)	P	R	T(s)	P	R
	12:52			10:02			14:32			13:02		
A01	0.897	U	B		X	X		X	X		X	X
A02	0.921	U	B	1.581	X	L		X	X		X	X
A03	0.787	U	A	1.476	X	L	1.711	U	L		X	X
A04	0.695	U	A	1.347	U	A	1.600	U	L	1.698	U	L
A05	0.679	U	A	1.236	U	B	1.518	U	C	1.623	U	B
A06	0.621	U	A	1.142	U	B	1.446	U	A	1.539	U	B
A07	0.642	U	A	1.160	U	A	1.381	U	A	1.457	U	B
A08	0.632	U	A	1.062	U	A	1.325	U	A	1.374	U	A
A09	0.618	U	B	1.008	U	A	1.244	U	A	1.236	U	A
A10	0.666	U	C	1.000	U	A	1.211	U	A	1.086	U	A
A11	0.797	U	B	0.977	U	B	1.128	U	A	0.957	U	A
A12	0.850	U	B	0.995	U	B	1.120	U	B	0.973	U	A
A13	0.863	U	B	0.950	U	A	1.036	U	A	0.996	U	A
A14	0.842	U	C	0.971	U	B	1.058	U	A	0.983	U	A
B01	0.681	U	A	0.172	U	A	0.631	U	A		X	X
B02	0.724	U	A	0.314	U	A	0.605	U	B	1.447	U	A
B03	0.762	U	A	0.436	U	A	0.597	U	B	1.381	U	B
B04	0.776	U	A	0.524	U	A	0.620	U	A	1.324	U	B
B05	0.828	U	A	0.634	U	A	0.695	U	A	1.239	U	A
B06	0.813	U	A	0.723	U	B	0.776	U	A	1.147	U	A
B07	0.900	U	A	0.810	U	A	0.820	U	A	1.141	U	A
B08	0.900	U	A	0.831	U	A	0.831	U	A	1.174	U	A
C01	1.560	U	B	1.598	U	A	1.100	U	A		X	X
C04	1.424	U	B	1.179	U	B	0.963	U	A	1.686	U	L
C05	1.405	U	A	1.178	U	B	0.979	U	B	1.663	U	B
C06	1.283	U	B	1.111	U	B	0.849	U	A	1.687	U	B
D03	1.171	U	A	1.177	U	C	1.179	U	C	1.544	U	B
D04	1.108	U	A	1.111	U	A	1.055	U	A	1.457	U	A
D05	1.066	U	B	1.066	U	B	0.973	U	B	1.415	U	B
D06	1.055	U	B	1.070	U	A	0.941	U	B	1.371	U	C
D07	1.102	U	A	1.060	U	A	0.845	U	A	1.445	U	A
D08	1.002	U	A	0.962	U	A	0.817	U	A	1.303	U	B
E01	1.063	U	A	1.047	U	A	0.932	U	A	1.345	U	B
E02	1.039	U	A	1.036	U	A	0.924	U	B	1.347	U	B
E03	1.534	U	A	1.054	U	A	1.391	U	A	1.347	U	B
E04	1.039	U	B	1.047	U	B	0.915	U	A	1.298	U	A
E05	1.057	U	A	1.023	U	B	0.951	U	A	1.371	U	A
E06	1.034	U	A	1.023	U	A	0.929	U	B	1.348	U	B
E07	1.049	U	A	1.036	U	A	0.936	U	B	1.347	U	A
E08	1.037	U	A	1.031	U	B	0.936	U	A	1.339	U	A
E09	1.520	U	A	1.037	U	A	1.391	U	B	1.352	U	A
E10	1.028	U	A	1.034	U	A	0.938	U	A	1.339	U	B
E11	1.018	U	B	1.023	U	A	0.919	U	A	1.305	U	B
E12	1.016	U	C	1.044	U	A	0.918	U	C	1.284	U	L
F01	0.900	U	A	0.956	U	B	1.042	U	A	0.984	U	A
F02	0.900	U	A	0.976	U	A	1.044	U	B	1.005	U	A
F03	0.931	U	A	0.986	U	A	1.052	U	A	1.050	U	A

Stn.	S6			S7			S8			S9		
	T(s)	P	R	T(s)	P	R	T(s)	P	R	T(s)	P	R
	12:52			10:02			14:32			13:02		
F04	0.918	U	A	0.971	U	B	1.045	U	B	1.023	U	A
F05	0.906	U	A	0.977	U	A	1.050	U	A	1.010	U	A
F06	0.892	U	A	0.936	U	B	1.007	U	B	0.999	U	B
F07	0.908	U	B	0.948	U	B	1.029	U	B	0.995	U	B
F08	0.892	U	B	0.951	U	A	1.029	U	A	1.002	U	A
F09	0.889	U	B	0.938	U	A	1.005	U	A	0.989	U	A
F10	0.913	U	A	0.948	U	A	0.995	U	B	0.987	U	B
F11	0.904	U	B	0.926	U	B	0.992	U	A	0.973	U	A
F12	0.876	U	B	0.927	U	A	0.981	U	A	0.997	U	A
F13	0.905	U	A	0.928	U	A	0.987	U	A	1.016	U	A
F14	0.912	U	B	0.918	U	A	0.977	U	A	1.011	U	A
F15	0.900	U	A	0.899	U	A	0.963	U	A	1.003	U	B
F16	0.913	U	A	0.886	U	B	0.960	U	A	1.037	U	A
F17	0.929	U	A	0.962	U	B	1.042	U	B	1.029	U	A
G01	0.919	U	B	0.902	U	A	0.942	U	B	1.070	U	A
G02	0.921	U	A	0.889	U	A	0.942	U	A	1.074	U	B
G03	0.935	U	A	0.884	U	B	0.933	U	B	1.090	U	B
G04	0.934	U	A	0.876	U	A	0.913	U	A	1.115	U	A
G05	0.926	U	B	0.887	U	A	0.908	U	A	1.098	U	A
G06	0.934	U	B	0.863	U	A	0.902	U	A	1.105	U	A
G07	0.929	U	A	0.865	U	A	0.894	U	A	1.116	U	B
G08	0.936	U	A	0.850	U	B	0.887	U	A	1.121	U	A
G09	0.935	U	B	0.849	U	B	0.867	U	A	1.129	U	A
G10	0.958	U	A	0.868	U	A	0.878	U	A	1.133	U	B
G11	0.947	U	B	0.857	U	A	0.872	U	A	1.139	U	B
G12	0.960	U	A	0.870	U	A	0.870	U	A	1.173	U	A
G13	1.017	U	A	0.902	U	A	0.875	U	B	1.249	U	B
H01	0.408	U	A	0.977	U	A	1.299	U	A	1.405	U	A
H03	0.426	U	A	0.945	U	A	1.221	U	A	1.318	U	A
H05	0.422	U	A	0.989	U	A	1.292	U	A	1.405	U	A
H07	0.473	U	A	1.061	U	B	1.358	U	B	1.483	U	B
H09	0.515	U	B	1.121	U	B	1.416	U	B	1.549	U	A
H11	0.574	U	A	1.168	U	A	1.408	U	B	1.554	U	A
SWA	0.873	U	A	1.020	U	A	1.086	U	A		X	X
SWB	1.076	U	A	1.057	U	A	0.936	U	A	1.369	U	B
SWC	1.004	U	B	0.890	U	A	0.890	U	A	1.239	U	A
SWD	0.921	U	A	0.897	U	A	0.944	U	A	1.039	U	B
SWE	0.797	U	B	1.105	U	A		X	X	1.260	U	A
SWF	1.089	U	B	1.173	U	A	1.092	U	A	1.462	U	A
SWG	0.753	U	B	0.500	U	A	0.600	U	A	1.303	U	A
SWH	0.602	U	B	1.003	U	A	1.263	U	A	1.255	U	A
SUWG	0.692	U	A	1.229	U	B	1.518	U	B	1.662	U	A

T: arrival time, P: polarity (U: upward motion, X: no identification of polarity), R: picking quality rank indicating accuracy of the arrival time, Rank A:<10ms, B:<30ms, C:<100ms and D:>=100ms. Ranks L means that polarity is not identified. Rank X: no first motion identified.

Seismic Exploration by Using Active Sources at Suwanosejima Volcano, Southwest Japan

Masato IGUCHI, Hiroshi YAKIWARA*****, Takeshi TAMEGURI, Hiroshi SHIMIZU*****
Jun-ichi HIRABAYASHI***, Hiroki MIYAMACHI*****, Atsuo SUZUKI*
Tomoki TSUTSUI**, Jun OIKAWA****, Takehiko MORI*****, Hiroki AIZAWA***
Yuki KONO*****, Ryuta BABA*****, Takahiro OHKURA*****, Shin YOSHIKAWA*****
Takeshi SAITO*****, Masayo FUKUSHIMA and Shuichiro HIRANO*****

*Graduate School of Science, Hokkaido University
** Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University
*** Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology
**** Earthquake Research Institute, University of Tokyo
***** Graduate School of Science, Kyoto University
***** Graduate School of Science, Kyushu University
***** Faculty of Science, Kagoshima University
***** National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Synopsis

In October 2005, seismic exploration using artificial sources was conducted at Suwanosejima volcano where Strombolian or Vulcanian eruptions have been frequently repeated. In addition to 9 permanent stations, 88 temporal stations equipped with a 2 Hz vertical component seismometer and portable data loggers were deployed on Suwanosejima Island. Dynamite shots with charges of 24 kg were detonated at 8 locations in the sea around the island and one in the crater formed by the 1813 eruption. Seismic signals were successfully recorded. To reveal the P-wave velocity structure, 786 arrival times of the first motion were picked from the seismograms, and 486 and 250 were classified into ranks A and B.

Keywords: Suwanosejima volcano, seismic exploration, seismic velocity structure, eruption mechanism