

2008年桜島人工地震探査の目的と実施

井口正人・為栗健・山本圭吾・大島弘光*・前川徳光*・森済*・鈴木敦生*
筒井智樹**・今井幹浩**・對馬和希**・八木直史**・植木貞人***・中山貴史***
山本芳裕***・高木涼太***・猪井志織***・古賀祥子***・西村太志***
Titi ANGGONO***・山本希***・及川純***・長田昇***・市原美恵****・辻浩****
青木陽介****・森田裕一****・渡邊篤志****・野上健治****・山脇輝夫****・渡辺俊樹*****
中道治久*****・奥田隆*****・立花健二*****・Enrique HERNANDEZ*****・橋田悠*****
平井敬*****・吉本昌弘*****・山崎賢志*****・毛利拓治*****・清水洋*****・中元真美*****
山下裕亮*****・三ヶ田均*****・尾西恭亮*****・田中暁*****・岡野豊*****
川林徹也*****・藤谷淳司*****・坂口弘訓*****・今泉光智哲*****・大倉敬宏*****
吉川慎*****・安部祐希*****・安藤隆志*****・横尾亮彦*****・相澤広記*****・高山鐵朗*****
山崎友也*****・多田光弘*****・市川信夫*****・加茂正人*****・富阪和秀*****・宮町宏樹*****
小林励司*****・八木原寛*****・平野舟一郎*****・泊知里*****
西山信吾*****・吉田沙由美*****・畠山謙吾*****
西田誠*****・加藤幸司*****・宮村淳一*****・小枝智幸*****
増田与志郎*****・平松秀行*****・河野太亮*****・松末伸一*****
大薄富士男*****・五藤大仁*****・宮下誠*****・伊藤弘志*****
音成陽二郎*****

* 北海道大学大学院理学研究院
** 秋田大学工学資源学部
*** 東北大学大学院理学研究科
**** 東京大学地震研究所
***** 東京工業大学火山流体研究センター
***** 名古屋大学大学院環境学研究科
***** 九州大学大学院理学研究院
***** 京都大学大学院工学研究科
***** 島根大学総合理工学部
***** 京都大学大学院理学研究科
***** 鹿児島大学理学部
***** 気象庁
***** 海上保安庁海洋情報部

要 旨

桜島火山北方の始良カルデラ下10kmにおいてマグマの蓄積が進行している。2008年11月にこれらの地域において人工地震探査を行った。本調査の目的は(1)始良カルデラの基盤構造、(2)南岳直下のマグマ供給系の構造、(3)始良カルデラ下のマグマ溜りから南岳へ至るマグマ供給路を明らかにすることである。15点の爆破点から放射された地震波を646台の陸上に設置した地震計と32台の海底地震計により観測した。

キーワード：桜島火山，始良カルデラ，人工地震探査，マグマ蓄積

1. はじめに

桜島火山は鹿児島県の中央部、始良カルデラの南端に位置する安山岩質の後カルデラ火山である (Fig. 5参照)。鹿児島市内で採取されたボーリング資料では鹿児島市側から桜島に向かって四万十層の落ち込みが認められ (早坂・大木, 1971), 桜島小池地区での深度800mのボーリングや西部および北部での深度1000mの温泉ボーリングでは四万十層に達しておらず, 桜島火山の基盤となる四万十層はかなり深いことが推定される (Aramaki, 1984; 石原, 1997)。

Yokoyama and Ohkawa(1986)は桜島周辺における重力値のBouguer異常から, 桜島直下の基盤最深部の深さを2.5kmと推定している。

桜島の南岳火口では1955年から爆発的な噴火が繰り返されており, その回数は2008年までに7900回に及ぶ。これまでの地盤変動観測により, 桜島火山にマグマを供給する主マグマ溜りは桜島北方, 始良カルデラの中心部の地下10kmにあると推定されている (江頭, 1988など)。一方, 火山性地震の震源分布や地震波の減衰域, 地盤変動観測により南岳の深さ5km付近にもマグマ溜りが推定されている (石原, 1988)。また, ガスの膨張・収縮によって発生するB型地震・爆発地震の震源が火口直下において鉛直方向に分布することは南岳直下のマグマ溜りと火口をつなぐ火道の存在を示唆する (Iguchi, 1994)。

年間1000万トン以上の火山灰が放出された1992年以前は桜島の主マグマ溜りがある始良カルデラの周辺域の地盤は沈降・収縮していたが, 噴火活動が低下した1993年以降は隆起・膨張に転じた (江頭・他, 1997)。1995年から2007年までの13年間の始良カルデラ下10kmにあると推定される圧力源における体積膨張量は約9000万 m^3 であり (井口・他, 2008b; 山本・他, 2008), 桜島はマグマの蓄積期にあるといえる。始良カルデラ下のマグマ溜りの膨張に対応して2003年から桜島の南西部および始良カルデラ北東部の若尊火山周辺でも地震活動が活発化している (井口・他, 2008a)。これは, 始良カルデラ下のマグマ溜りの膨張に伴うその周辺での歪の開放あるいは, 桜島直下および南南西へのダイク状のマグマの貫入過程で地震が発生したと考えられている (Hidayati et al., 2007)。南岳の東山麓の昭和火口では2006年6月から58年ぶりに噴火活動が再開するなど (横尾・他, 2007), 桜島火山では噴火活動が再度活発化する兆候がみられる。

火山における人工地震探査はこれまでに, 火山噴火予知計画において霧島 (鍵山・他, 1995; 三ヶ田, 1996), 雲仙岳 (松島・他, 1997), 磐梯山 (Yamawaki

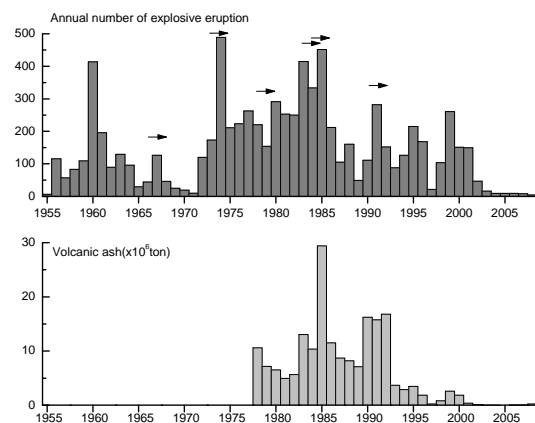


Fig. 1 Eruptive activity of Sakurajima volcano during the period from 1955 to 2008. Top: annual numbers of explosive eruption. Bottom: annual amounts of volcanic ash ejected from the summit crater.

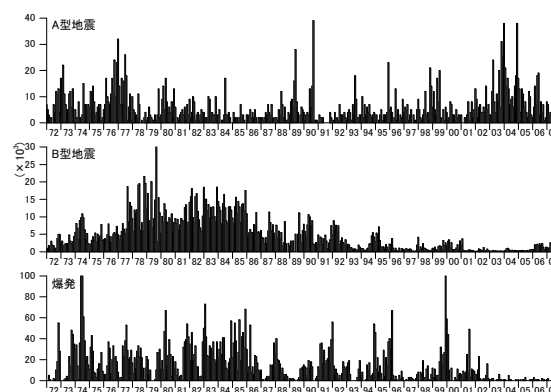


Fig. 2 Monthly numbers of A-type, B-type and explosion earthquakes during the period from 1972 to 2007

et al., 2004), 阿蘇山 (須藤・他, 2003), 伊豆大島 (渡辺・他, 2000), 岩手山 (田中・他, 2002), 有珠山 (鬼澤・他, 2003), 北海道駒ヶ岳 (大島・他, 2003), 富士山 (富士山人工地震探査グループ, 2004), 口永良部島 (井口・他, 2005), 浅間山 (青木・他, 2008) で行われてきた。火山噴火予知計画以外でも草津白根山 (鬼澤・他, 2005; 筒井・他, 2008) や諏訪之瀬島 (井口・他, 2006) で調査が行われた。これまでの調査ではマグマが蓄積されていると考えられる深度まで調査が及んでいないが, 火山体を中心とするP波伝播速度の高速度域の盛り上がり認められ, 顕著な反射面も検出されている (筒井, 2005)。

本稿では第7次火山噴火予知計画に基づいて実施される桜島火山における人工地震探査の意義と目的について考察するとともに, 2008年11月に実施した人工地震探査の概要について述べる。

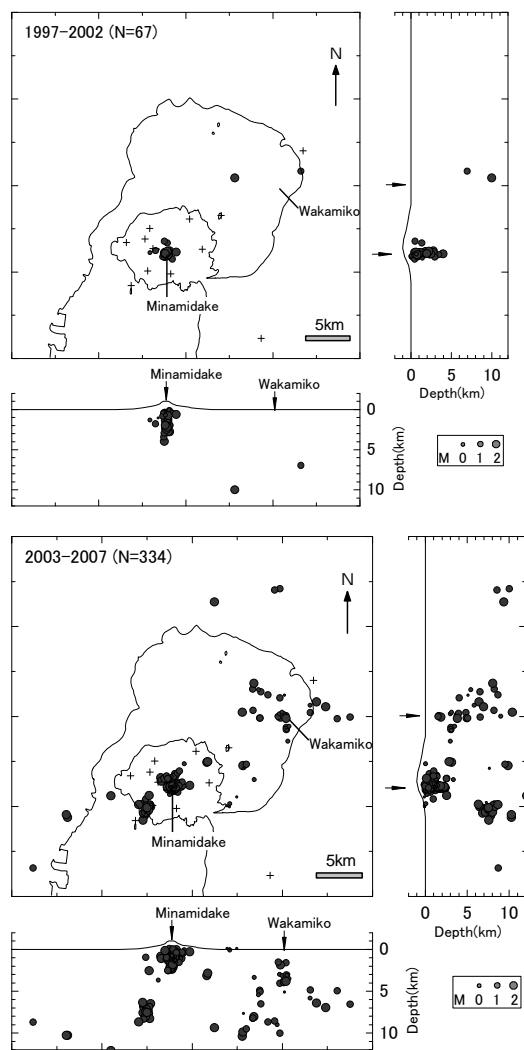


Fig. 3 Hypocenter distribution of A-type earthquakes during the periods 1997-2002 (top) and 2002-2007 (bottom)

2. 最近の桜島火山の活動

Fig. 1に南岳における爆発活動が始まった1955年以降の年間爆発回数と1978年以降の年間火山灰放出量を示す。1972年9月から激化した桜島南岳の山頂噴火活動は、1974年に489回のピークに達した後、1992年まで高い活動レベルを保ち、近年低下した。特に2003年以降において低下が著しく、2008年はわずか4回であった。火山灰の放出量も1985年に2940万トンのピークに達した後、徐々に減少し、2003年から2007年までは10万トン以下で推移した。これに対応して、二酸化硫黄の放出量も2002年から2007年5月までは1000ton/日以下と低下した（森・他，2008）。

Fig. 2に1972年以降の火山性地震の月別発生頻度を示す。南岳直下の火道浅部において発生し、火道中のマグマの発泡、上昇と関連していると考えられ

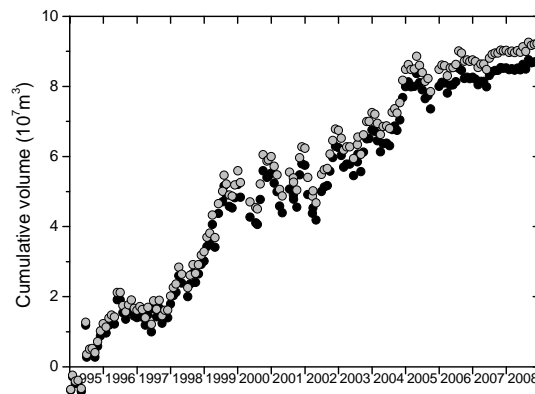


Fig. 4 Temporal change of cumulative volume of magma reservoir beneath the Aira caldera since 1995. Solid and grey circles indicate volume change of pressure source and cumulative supply volume to the reservoir.

るB型地震の発生頻度も、爆発的噴火回数の減少に対応して1992年以降急速に減少している（石原・西，1998）。2001年以降、その傾向が更に顕著となった。

一方、A型地震の発生頻度は2003年以降増加している。Fig. 3にA型地震の震源分布を1997年から2002年までと2003年から2007年までに分けて示した。1997年から2002年まででは震源位置は南岳の直下に集中していたのに対し、2003年から2007年まででは南岳直下の浅部だけでなく、桜島南西部、北岳周辺、北東部海域の若尊火山周辺にも拡大していることがわかる。

爆発回数が400回を超えた1974年ごろから桜島の地盤は緩やかな沈降を始めたが、1992年ごろから隆起に転じた（江頭・他，1997）。桜島と始良カルデラ周辺の地盤の隆起傾向はその後も続き、1996年から2007年の間に桜島の北部では約10cm隆起した（山本・他，2008）。GPS観測から検出される水平変動も同様に西部の桜島火山観測所と東部の黒神を結ぶ基線は同じ期間に約9cm伸びた。これらの上下変動、水平変動から求められる膨張圧力源の位置は、これまでと同様に桜島の北方、始良カルデラの中心付近の地下10km前後であり、体積の増加量は7500万～9000万 m^3 と見積もられている（山本・他，2008；井口・他，2008b）。Fig. 4に1995年～2008年における始良カルデラ下の圧力源における体積増加量と火山灰放出量を加えたマグマの供給量を示す。マグマの供給率は平均的に $1 \times 10^7 \text{m}^3/\text{年}$ と見積もられており（Ishihara, 1981），1997年11月から1999年10月までの期間および2004年10月から2005年2月までの期間ではマグマの供給率はそれぞれ、 $2.6 \times 10^7 \text{m}^3/\text{年}$ と $1.8 \times 10^7 \text{m}^3/\text{年}$ となり、平均的なマグマ供給率に比べ2倍程度大きい。一方、1996年2月から1997年10月ま

では地盤変動は検出限界以下であり、火山灰放出もほとんどみられず、始良カルデラへのマグマの供給は一時的に停止していたと考えられる。2006年以降は $0.45 \times 10^7 \text{m}^3$ /年の割合で緩やかなマグマの供給が続いている。マグマの供給率はこれまで見積もられている $1 \times 10^7 \text{m}^3$ /年の割合よりも多少低めであるが、始良カルデラ直下のマグマ溜りにおいてマグマの蓄積が着実に進行しているとみるべきである。

3. 目的の検討

このようなマグマ蓄積の進行状況をふまえ、2008年に予定されている桜島火山における構造探査で対象とすべき課題について考察する。

3.1 始良カルデラの基盤構造

Aramaki(1984)は桜島および始良カルデラ周辺の噴出物を検討し、始良カルデラの地下構造を推定しているが、桜島において掘削された温泉ボーリングや地震観測用観測井では始良カルデラの基盤に達したと考えられるコアは採取されていないことから(石原, 1997), その基盤は1kmよりも深い。Yokoyama and Ohkawa (1986)は桜島周辺の重力異常から始良カルデラの基盤構造を求め、桜島直下では基盤の深さを2.5kmと見積もっており、2~3kmの深度であれば、これまで火山体構造探査で行われている屈折法(例えば、筒井・他, 1996)により、桜島の基盤までの構造を十分探査できると思われる。これまでの火山体人工地震探査では多くの火山においてその直下では基盤もしくは過去の貫入岩体と考えられるP波の高速部分の盛り上がりが見出されている(例えば岩手山における人工地震探査; Tanaka et al., 2002)が、桜島の表面は溶岩が分布しているためにP波速度3km/s程度と高速であるが、海面より深い部分は始良カルデラの過去の噴火により放出された火砕物で満たされており、観測井におけるPS検層でも1.8km/s程度の速度しか得られていないことから、低速度の噴出物で満たされたカルデラ火山特有の構造が見出されることが期待できる。

3.2 マグマ溜りと火道の構造

これまで地球物理学的観測によりマグマ溜りや火道の存在が推定されてきた。桜島の北方海域、始良カルデラ下の10kmに圧力源が推定される桜島の主マグマ溜りについては、場所が海域であるので、従来の陸上に地震計を展開する手法では探査が困難であり、海域での調査が望まれる。また、仮に圧力源の位置が陸上であったとしても、これまで以上に深い探査深度が必要となる。

一方、Yoshikawa (1961) および江頭 (1988) は、始良カルデラの周辺だけではなく桜島における地盤の上下変動の空間分布を詳細に調査することにより、始良カルデラの中心に位置する圧力源だけでは説明できない変動を見出し、現在噴火活動中の南岳の直下にも圧力源が必要なことを明らかにし、2圧力源モデルを提唱した。このうち桜島直下の圧力源の深さは約5kmと推定されている。桜島直下の圧力源が存在すると見積もられる深さは地震波が著しく減衰する深さでもある。加茂・他 (1980) は桜島南岳の直下の深さ3-6kmの領域は地震波が著しく減衰する領域であることを指摘し、さらに、鈴木 (1999) は、高密度アレイ地震観測を行うことによりその減衰域の広がりを2~3km程度としている。

この南岳直下の圧力源および地震波減衰域が明確に噴火活動にかかわっていることは、南岳火口から2.7km北西に設置された水管傾斜計と伸縮計により示されている。爆発発生の数分から数時間前に桜島の地盤が隆起・膨張し、爆発の発生とともに沈降・収縮に転じる現象が水管傾斜計と伸縮計により捉えられているが、傾斜ベクトルは南岳の火口方向を向く。さらに、傾斜量と面積歪量の比からは、圧力源の深さは2~6kmとなり (Ishihara, 1990), 水準測量から見出された圧力源の位置および地震波の減衰領域に一致する。このことは南岳の直下にもマグマ溜りが存在することを示す。

火山性地震の震源分布は、南岳直下のマグマ溜りと火口をつなぐと推定される火道の構造について示唆を与える。桜島において発生する火山性地震は、岩石のせん断破壊によって発生するA型地震と火山ガスの膨張あるいは収縮によって発生するB型地震・爆発地震などに大別される。B型地震・爆発地震などの震央は火口直下の半径200m程度の狭い領域に分布する。一方、A型地震は、B型地震・爆発地震などの震源域を取り囲むように発生し、両者は重なることはない。A型地震はそのメカニズムからせん断破壊により発生すると考えられるので、その震源域は岩石の領域である。B型地震・爆発地震のメカニズムは体積変化成分に富むこと、BL型地震群発と爆発地震はそれぞれ、ストロンボリ式噴火、ブルカノ式噴火を伴うので、流体に満たされている領域で発生すると考えられる。したがって、このような震源分布の棲み分けは、岩石の領域と流体のマグマに満たされている領域がはっきり分かれていることを意味する (Iguchi, 1994)。深さ2-3kmでは震源域の半径は200m程度と推定されるが、火口底では火孔の直径は30m程度と推定されているので (Ishihara, 1985), 火道の大きさは地表に近づくにつれ徐々に小さくなっている可能性が高い。

桜島南岳直下に推定される深さ2~6km付近のマグマ溜りについては深度6kmまでの探査は困難であるにしても、これまでの人工震源を用いたトモグラフィ的手法で十分捉えられる可能性がある。ただし、これまでの桜島島外に発生した構造性地震を用いた走時解析では、マグマ溜りを通過したと考えられる地震波の走時異常は顕著ではない。むしろ、マグマ溜りを通過したと考えられる地震波の振幅は1/10から1/100に減衰することがわかっている（鈴木，1999）減衰の構造を求める方がより効果的かもしれない。マグマ溜りと火口をつなぐ火道については、火山性地震の震源分布から半径が200m程度と予測されているため、分解能からみてトモグラフィ的手法で捕捉することは難しいかもしれない。

3.3 マグマの移動経路

桜島では2006年6月4日から約2週間にわたって、南岳火口東側の昭和火口周辺において噴火が断続的に発生した（横尾・他，2007）。1955年から南岳山頂火口において噴火が繰り返されたが、約60年ぶりに南岳火口縁の外側において噴火が発生したことになる。昭和火口における噴火活動は2007年5月~6月、2008年4月~7月、2009年2月以降も繰り返され、2008年2月3日、6日および2009年4月9日の噴火では流走距離約1kmの火砕流も発生した。これまでのところマグマが多量に移動した観測事実はないものの、始良カルデラを中心とする地盤の隆起・膨張は1992年頃から続いており、昭和火口は1946年に0.18km³の溶岩を流出した火口であることから、今後の活動の推移が注目される。将来山腹噴火が発生する前には、多量のマグマが始良カルデラから桜島に向かって移動することが予想され、噴火予測の観点からはその移動経路を知っておくことが最も重要と考えられる。しかし、現在のような急激な火山活動の活発化の見られない状況では、始良カルデラの中央部から桜島の北部にかけての地域の地震はほとんど発生しておらず、地震の震源分布からだけではマグマの移動経路を把握することはできない。そのためには人工地震探査を行い、地震波速度、反射面、減衰、散乱の状態から始良カルデラ下のマグマ溜りと南岳直下のマグマ溜りをつなぐマグマの通路を調べる必要がある。

3.4 高精度震源決定の必要性

人工地震探査によって詳細な速度構造が3次元的に求めることができれば、桜島における震源決定精度の向上が期待できる。桜島において発生している爆発地震の深さは1~3km程度（西，1976；山里，1987；井口，1989など）とされており、諏訪之瀬島

の爆発地震の深さ0.3km~0.5km（為栗・他，2004）と比較するとかなり深い。桜島では噴火活動が活発であるため、震央とされる火口周辺に観測点を設置できないため、深さが見かけ上、深く求まっている可能性がある。桜島と諏訪之瀬島では噴火様式も規模もちがうので爆発地震の発生深度は異なっているもよいが、爆発地震は高圧化のマグマがガスのリークにより減圧されることにより急激に発泡することにより始まると考えられているので（Iguchi et al., 2008）、深さ2km前後で急激な膨張が発生してよいのかどうかなど、噴火機構の物質科学的な側面からの議論にも耐えうるだけの絶対深度の精度に達していないという懸念がある。このことはB型地震の震源分布（Iguchi, 1994）についても同様にいえることである。詳細な速度構造を明らかにして火山性地震の震源、特に、絶対深度を精度よく求めることは、噴火機構の研究からも要請される課題である。

4. 人工地震探査

Fig.5に人工地震探査のために配置した地震観測点のおよび爆破点の位置を示す。屈折法とトモグラフィ解析を目的とした観測網と反射法解析を目的とした稠密測線に分けて述べる。

屈折法とトモグラフィ解析を目的とした地震観測点は桜島島内および始良カルデラ周辺に設置した。始良カルデラの大半は海域なので、陸上に設置した測線同志をつなぐために海域には海底地震計を設置した。桜島の南岳から半径2kmの範囲は立入規制区域となっているために地震計を設置できなかった。また、桜島の西方の鹿児島市街地は地震動のノイズレベルが大きいので地震計を設置しなかった。最長の測線は始良カルデラの北西（S1：蒲生町）から桜島の南岳を通り、大隅半島の垂水市新城（S4）におよぶ北西~南東方向の約38kmの測線であり、屈折法による探査深度は海面下深さ3~4km程度と推定される。この主測線に直交して始良カルデラの北東側（S5）から1779年の安永噴火で形成された新島と南岳を通過し桜島南西部（S7）に至る測線、始良カルデラの北西側（S1）から始良カルデラの中心部を通過し、大隅湖畔（S8）に至る測線を設定した。また、ファンシューティングを目的とした測線を始良カルデラの東部から北部にかけて展開した。桜島島内では3次元トモグラフィ解析を目的として地震計を稠密に配置した。測線は、桜島を1周するルートと山麓から南岳に向かって延びるルートにより構成される。地震計の間隔は始良カルデラ周辺および大隅半島側では400~500mと広いが、桜島島内では約200mと密に地震計を設置した。海底地震計の間隔は約

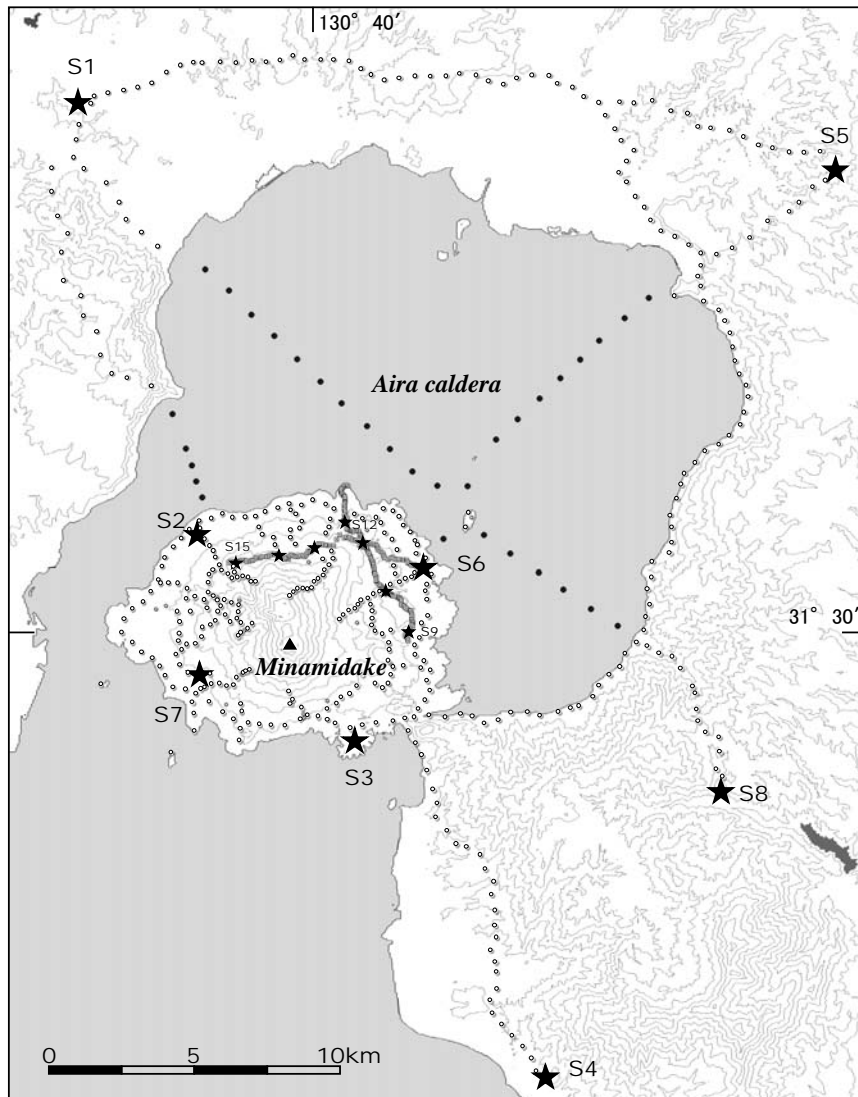


Fig. 5. Location of seismometers and shot points. Stars show shot points. Open and solid circles indicate short-period (2 Hz) and ocean bottom seismometers, respectively. Squares aligned from S9 to S12 and from S6 to S15 are seismic arrays for reflection method.

1kmとした。屈折法とトモグラフィー解析を目的とした地震観測点数は458点である。陸上に設置した地震計426台はすべて上下動のみである。使用した地震計はMark Product社製L-22D型（固有周波数2Hz，コイル抵抗2k Ω ）であり，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）に分解能16bitで収録した。サンプリング間隔は4msである。上下動地震計からの信号は，高倍率，低倍率の2チャンネルに分配して収録した。アンプ倍率は爆破点からの距離に応じた設定をした。海底地震計32台は東京測深株式会社製の3成分地震計であり，固有周波数は4.5Hzである。地震計からの信号をサンプリング間隔5msでハード

ディスクに連続収録した。アンプ倍率は40dBとした。

反射法測線を構成する地震観測点は桜島の東部から北部にかけて設置した。測線は東部の黒神（S9）から北部の割石崎に至る3kmの南北測線と浦ノ前（S6）から鹿馬野（S15）に至る東西測線からなる。地震計の台数は221台であり，その間隔は南北測線において40～50m，東西測線で60～70mである。固有周波数4.5Hzの上下動地震計を使用し，データロガー（DATAMARK LS-8200）に2ms間隔，24bit分解能で連続収録した。反射法測線に加え，桜島東部の黒神（S9近傍）に十字型アレイを設置した。アレイは30m間隔の上下動地震計（L-22D）9台で構成される。地震計からの信号はデータロガー（近計システム株式会社製X7000）に1msの間隔で連続収録した。

Table 1 Shot locations, times and charge sizes for 15 explosions in the experiment

Shot	Latitude			Longitude			Altitude	Depth	Date	Time	Charge
	°	'	"	°	'	"	m	m		JST	
S1	31	44	52.35	130	34	53.92	21.68	72.33	Nov. 6, 2008	01h12m01.106s	300
S2	31	36	49.04	130	37	29.77	10.48	15.57	Nov. 6, 2008	00h12m01.867s	200
S3	31	32	57.49	130	40	53.86	-5.21	21.18	Nov. 6, 2008	01h37m00.870s	200
S4	31	26	39.98	130	45	5.53	6.45	72.10	Nov. 6, 2008	01h22m01.048s	300
S5	31	43	36.79	130	51	26.45	253.77	24.20	Nov. 6, 2008	01h27m01.006s	200
S6	31	36	13.22	130	42	23.69	-2.67	18.15	Nov. 6, 2008	00h17m00.567s	200
S7	31	34	10.26	130	37	30.79	14.22	20.73	Nov. 6, 2008	01h32m01.717s	200
S8	31	32	1.11	130	48	48.65	204.92	13.10	Nov. 6, 2008	01h17m01.046s	200
S9	31	35	1.47	130	42	5.05	66	13.13	Nov. 5, 2008	22h22m01.850s	20
S10	31	35	42.48	130	41	34.11	102	13.23	Nov. 5, 2008	22h17m00.376s	20
S11	31	36	44.82	130	41	0.42	144	13.34	Nov. 5, 2008	23h17m00.300s	20
S12	31	37	5.66	130	40	38.71	91	13.23	Nov. 5, 2008	23h22m02.320s	20
S13	31	36	30.97	130	39	54.29	314	13.16	Nov. 5, 2008	22h12m01.304s	20
S14	31	36	27.38	130	39	13.13	325	13.17	Nov. 5, 2008	23h12m00.793s	20
S15	31	36	17.87	130	38	18.21	369	2.9	Nov. 6, 2008	00h22m01.163s	20

The coordinates are based on WGS84. The altitudes are head level of the dynamites.

屈折法とトモグラフィ解析を目的とした陸上に設置観測点の座標は簡易GPS装置により測定した。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。海底地震計の位置座標は、GPSディファレンシャル測定（1Hzサンプリング）により求められる海上測量点3点からの音響測定により決定した。反射法測線では地震計の間隔が短いため、桜島島内のGPS常設観測点を基準点とし、1Hzサンプリングで測量されたデータをRTD（Real-Time Dynamics）またはラピッドスタティック解析により決定した。

爆破点は北西～南東方向の主測線の両端（S1およびS4）とその測線上の桜島の北西部（S2）および南東部（S3）、それに直交する北東～南西測線の上の（S5, S6, S7）、始良カルデラの北西側（S1）からカルデラ中心部を通り大隅湖畔（S8）に至る測線の両端に設置した。また、反射法南北測線に沿って4つの爆破点（S9～S12）、S6を起点とする東西測線上にS13～S15の爆破点を設置した。S1～S8までの発破孔の孔径は146mm、掘削深度は30～72mである。掘削後には発破孔保護のために外径114mm、肉厚4.5mmの鋼管を孔底まで挿入した。また、反射法測線上の爆破点S9～S15ではそれぞれ約3m掘削した8本の縦孔で分割爆破を行った。主測線の両端のS1およびS4では300kg、S2, S3, S5, S6, S7, S8では200kgのダイナマイトを装填した。反射法測線上の爆破点S9～S15では20kgのダイナマイトを爆破した。発破は2008年11月5日22時02分から翌日11月6日1時37分まで、最短5分間隔で爆破を行った。爆破点ではショットマーク信号を1msのサンプリング間隔でデータロガーに収録した。S1～S8の爆破点の位置はGPSラピッドス

タティック測量により決定し、薬頭までの深度は検尺により決定した。各爆破点の位置座標、掘削深度、爆破時刻、薬量をTable 1にまとめて示した。

5. 初動の読み取りと走時

ここでは屈折法とトモグラフィ解析を目的とした地震観測点458点において得られた記録について述べる。Fig.6に北西（S1）～南東（S4）方向の主測線において観測された爆破S1, S2, S3およびS4に対する地震波形を示す。これらの波形記録の時刻は見掛け速度5km/sでreduceしている。また、波形の振幅は、それぞれ最大振幅で規格化されている。爆破S1では震央距離17～24km付近において初動到達の遅れが認められる。この部分は桜島の西部に対応する。24kmを超える大隅半島側では見掛け速度は5km/sよりも速い。大隅半島側に対して桜島の走時の遅れは爆破S3, S4でも同様に認められる。爆破S2の震央距離12～15kmについては他の爆破点付近の見掛け速度よりも小さい。桜島島内の爆破S2表層付近の速度が小さいことを意味する。S2については震央距離11～14kmの海底地震計区間について高周波の位相が認められるが、見掛け速度から考えて海中を伝搬する音波と考えられる。

Fig.7に北東（S5）～南西（S7）方向の測線において観測された爆破S5, S6およびS7に対する地震波形を示す。同様に速度5km/sでreduceし、最大振幅で規格化してある。爆破S5において震央距離3～6kmまでは見掛け速度は5km/s程度であるが、それよりも遠方の始良カルデラ内においては見掛け速度が小さい。

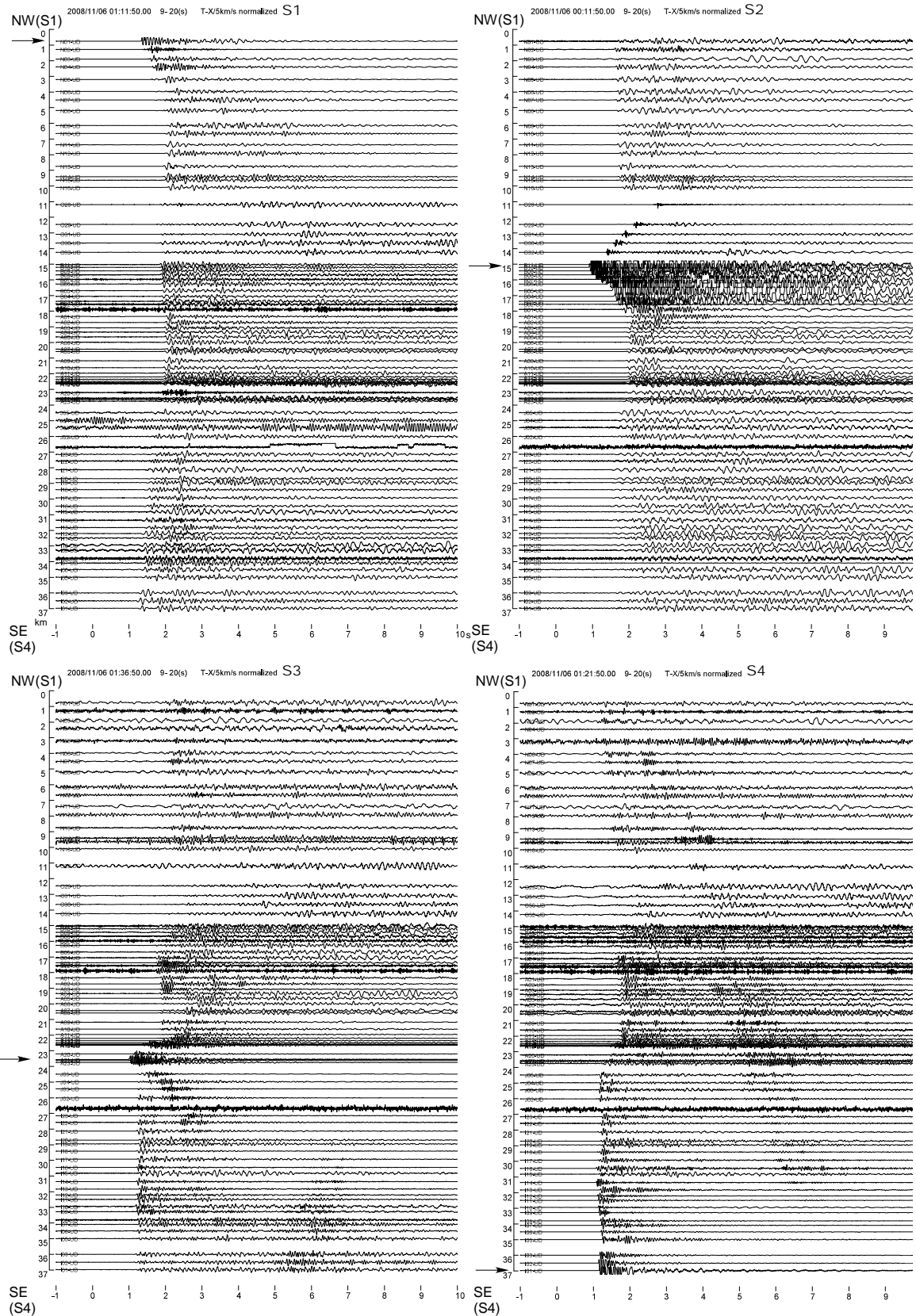


Fig. 6 Record sections of seismograms on NW-SE line for (a) Shot S1, (b) Shot S2, (c) Shot S3 and (d) Shot S4. Amplitude of each trace is normalized by the maximum value. The reduction velocity is 5.0 km/s. Arrow indicates seismic station the closest to shot in each record section.

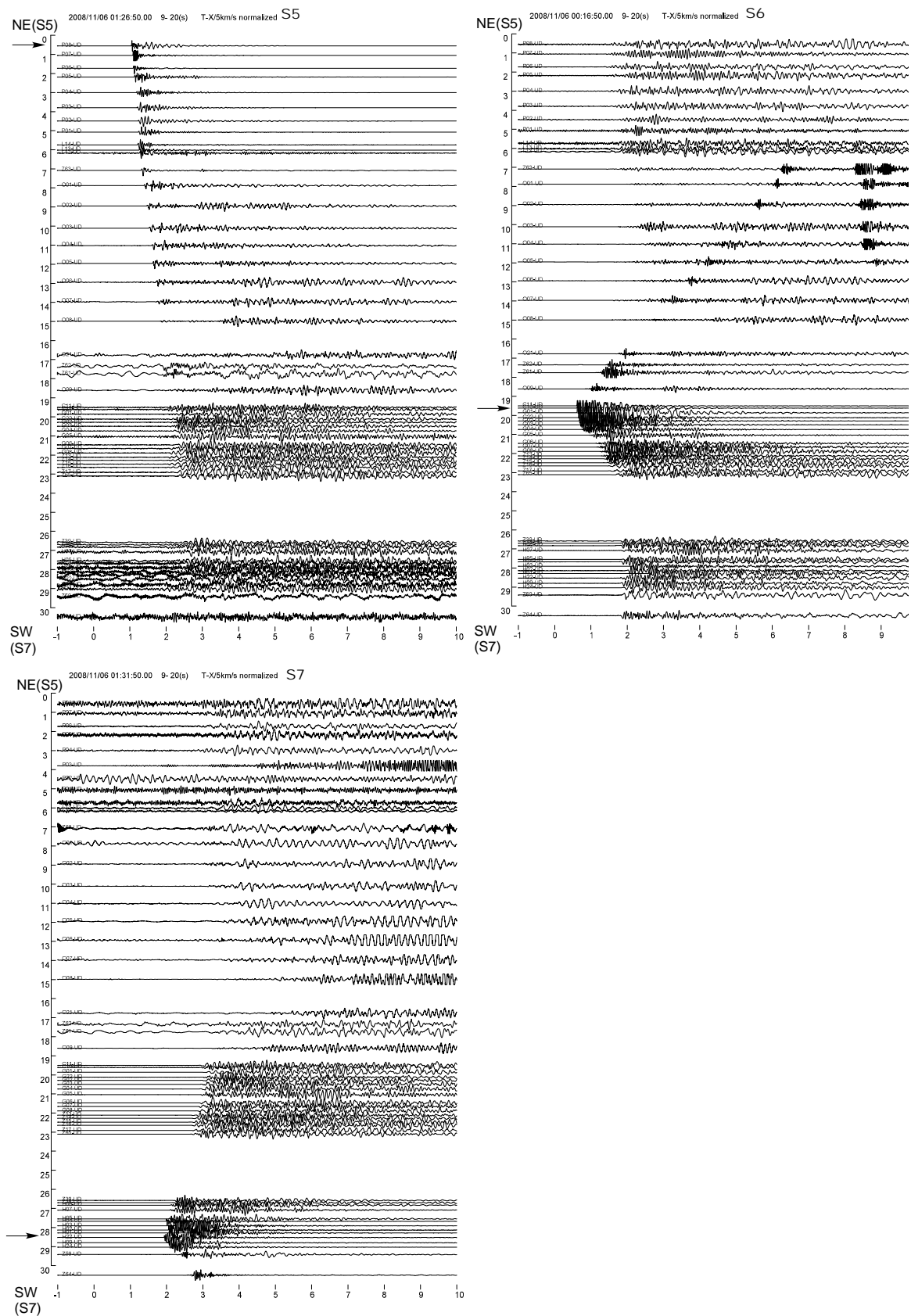


Fig. 7 Record sections of seismograms on NE-SW line for (a) Shot S5, (b) Shot S6 and (c) Shot S7. Amplitude of each trace is normalized by the maximum value. The reduction velocity is 5.0 km/s. Arrow indicates seismic station the closest to shot in each record section.

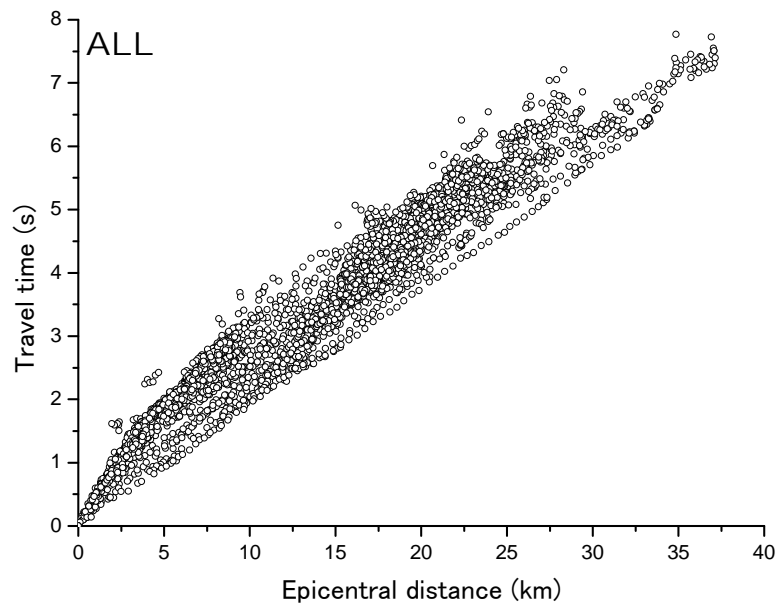


Fig. 8 Travel times for all the shots

爆破S6では、S6から南岳に向かう部分（震央距離20～23km）について見掛け速度が小さい。南岳を超えた部分（震央距離26～30km）では見掛け速度は5km/s付近にあると読み取れる。桜島島内の表層部分のP波伝搬速度が小さいが、S7付近のやや深部は高速となっていることが示唆される。なお、爆破S6の新島を含む海底地震計設置区間（震央距離7～18km）についてはS2と同様に海中音波と思われる高周波の位相が認められる。

そこで、P波速度構造を推定する基礎データを作成するために、ダイナマイト量の大きいS1～S8の8爆破点から放射された地震波を屈折法とトモグラフィ解析を目的とした地震観測点458点について初動到達時刻を読み取った。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解析対象とする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全委員の検討により最終値を決定した。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）。ま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1004個、1141個、760個、451個であり、総数3356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58.5%であった。

すべての発破による人工地震の走時をFig. 8にプ

ロットした。最も走時の速いものは爆破点から震央距離27km付近までほぼ直線的であり、見掛け速度は5.4km/sとなる。最も遅い走時では見掛け速度は2km/s程度であり、震央距離3.4kmまで認められる。同じ震央距離における走時の違いが大きく、1.5～1.7sに達する。

S1～S8のそれぞれの爆破に対する走時をFig. 9に示す。読み取りランク別にシンボルを変えてある。震央距離約2km未満の走時から発破点近傍における表層付近の速度の地域性がみてとれる。S1、S2、S3、S6、S7などでは見かけ速度が2.3km/s前後と低速である。これらは桜島島内および薩摩半島側の爆破点である。一方、大隅半島側の爆破点S4、S8では、爆破点近傍から見掛け速度が5.4km/sに達している。爆破点S5でも5kmまでは見掛け速度が3.7km/sであり、5km以遠は5.4km/sに達している。大隅半島側の爆破点および観測点は、四万十層が露出している部分またはその近傍に設置されているが、桜島では厚く火山噴出物が堆積していることを反映しているものと考えられる。

S1～S8のいずれの爆破についても走時曲線が2つに大別できることがわかる。速い走時はいずれも大隅半島側の観測点においてみられるものである。見掛け速度は5km/sから5.4km/sである。大隅半島側の爆破点S4、S8では爆破点近傍から見掛け速度が5.4km/sに達している。それ以外の爆破点でも5km以遠で見掛け速度5.4km/sが現れる。桜島島内の爆破点であっても大隅半島に近い爆破点S3では震央距離1.5km付近から見掛け速度5.4km/sに達する。遅い走時は桜島および始良カルデラ内の観測点に対応する。この走

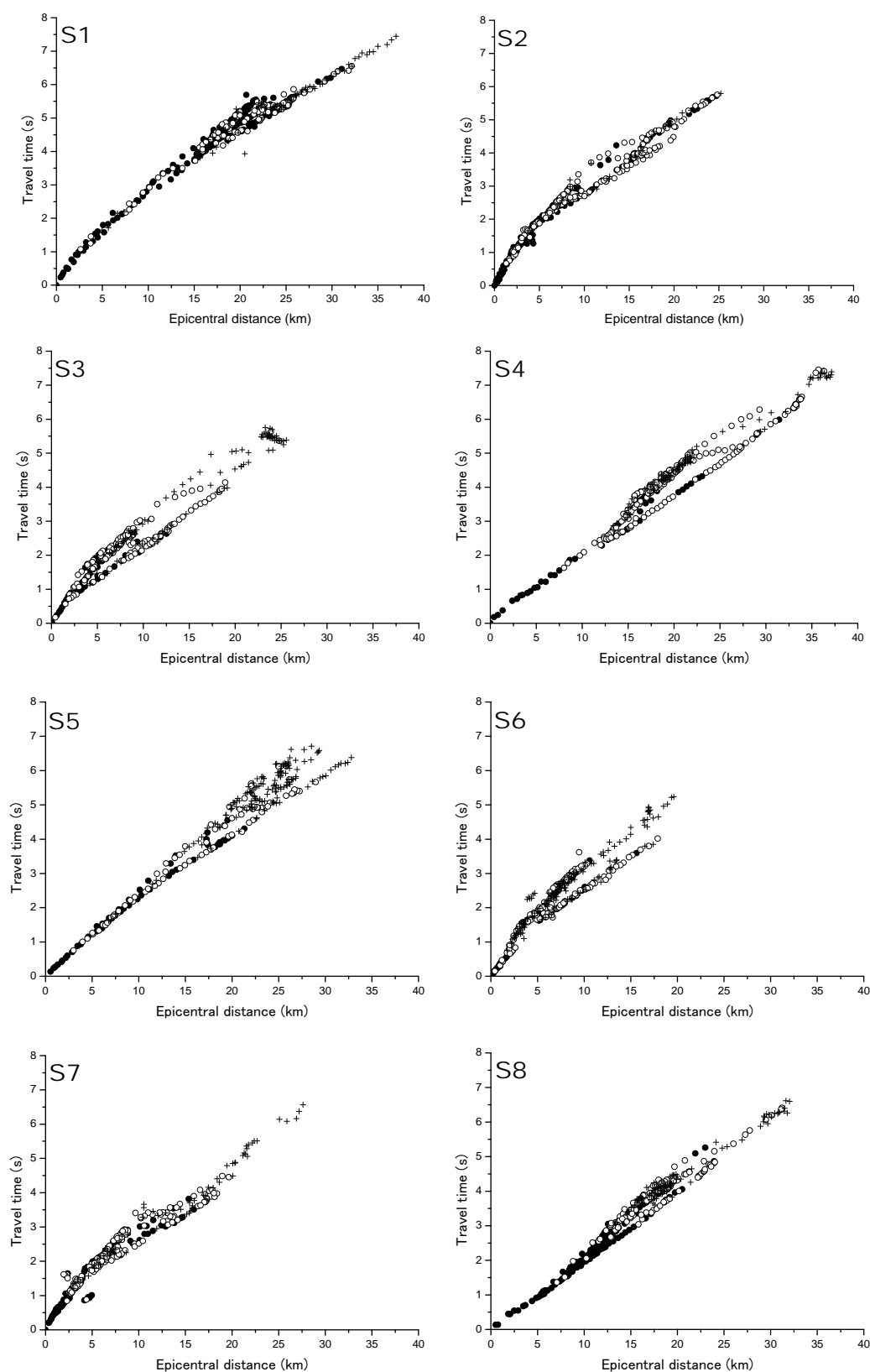


Fig. 9 Plots of travel times for Shots S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7 and S8. Solid and open circles indicate rank A and B, respectively. Rank C is shown by cross.

時は、速い走時に対して約1.0s前後遅い。南九州に発生する構造性地震の震源決定において桜島島内の観

測点は標準的な走時に対して最大で1秒程度遅れることはすでに知られていることであるが、そのこと

が人工地震探査によって確認できた。

なお、爆破S7についてAランクおよびBランクで読み取りができていながらもかわらず、走時曲線から速い観測点群と遅い観測点群が認められた。これらの観測点群は南岳西中腹の引之平および北岳の北東稜に位置する。データロガーでは正常な時刻校正が行われたが、観測機器および速度構造からの詳細な検討が必要である。

6. まとめ

2008年11月に桜島火山において人工地震による構造探査を行った。桜島および始良カルデラ周辺の陸域に426台の地震計、始良カルデラ内の海域に32台の海底地震計を設置した。また、桜島東部から北部に221台の地震計から構成される反射法測線を展開した。桜島島内及び始良カルデラ外縁の8箇所において200～300kg級のダイナマイトの爆破を行い、励起された地震波を約58%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桜島・始良カルデラ周辺および大隅半島側の地質構造を反映した特徴が認められた。本稿に述べたことは人工地震探査の概要にすぎず、今後、詳細な解析が必要である。

謝 辞

今回の探査実験は桜島住民の方々および周辺地域の皆様の絶大なるご理解・御協力によって達成することができました。

鹿児島県庁、鹿児島市役所、垂水市役所、鹿屋市役所、霧島市役所、蒲生町役場、加治木町役場、鹿児島海上保安本部、海上自衛隊福山実験所、大隅河川国道事務所、鹿児島県漁業協同組合連合会など関係機関には実験の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。応用地質株式会社鹿児島支店には爆破孔の掘削・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。また、鹿児島市船舶部（桜島フェリー）、第六とも丸船長、第十三代丸船長、まゆみ丸船長には船舶の運航を快諾いただきました。故市川賢治氏には海底地震計の輸送に加え、観測の補助をお願いしました。平林順一東京工業大学名誉教授には海底地震計の設置について支援いただきました。白山工業株式会社にはロガーの使用に関する助言だけでなく、観測についても御協力いただきました。近計システム株式会社からはデータロガーを借用いたしました。以上、桜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。

本調査は第7次火山噴火予知計画に基づいて実施されたものであり、文部科学省当局には厚く御礼申し上げます。また、気象庁地震火山部火山課には実験経費の一部を負担していただきました。海底地震観測には京都大学防災研究所特別事業経費を使用しました。また、本研究は、東京大学地震研究所共同研究プログラムの援助を受け、同研究所客員研究費を観測の一部に充当しました。

最後に、火山体構造探査の基幹となるデータロガーの開発に予算面・技術面で奔走された加茂幸介京都大学名誉教授と浜口博之東北大学名誉教授が本観測に参加されたことを記させていただきます。

参考文献

- 青木陽介・他58名（2008）：浅間山における人工地震探査—探査の概要と初動の走時について—，東京大学地震研究所彙報，第83巻，pp.1-26.
- 井口正人(1989)：火山性地震B L・B Hの初動の押し引き分布，京都大学防災研究所年報，第32号B-1，pp.13-22.
- 井口正人・他39名（2005）：口永良部島火山における人工地震探査—探査の概要と初動の走時について—，京都大学防災研究所年報，第48号B，pp.297-322.
- 井口正人・他17名（2006）：諏訪之瀬島火山における人工地震探査，京都大学防災研究所年報，第49号B，pp.339-353.
- 井口正人・為栗健・横尾亮彦（2008a）：火山活動の経過—1997～2007年—，第10回桜島火山の集中総合観測，pp.1-18.
- 井口正人・高山鐵朗・山崎友也・多田光弘・鈴木敦生・植木貞人・太田雄策・中尾 茂（2008b）：GPS観測から明らかになった桜島のマグマ活動，京都大学防災研究所年報，第51号B，pp.241-246.
- 石原和弘（1988）：地球物理学的観測による桜島火山のマグマ溜りおよび火道の推定，京都大学防災研究所年報，第31号B，pp.59-73.
- 石原和弘（1997）：火山観測から見た火山の構造—桜島火山の今後の研究課題—，マグマ探査—現状と展望—，京都大学防災研究所共同研究集会（一般）8K-6論文集，pp.1-7.
- 石原和弘・西潔（1998）：桜島火山の地震活動，第9回桜島火山の集中総合観測（平成8年10月～平成9年4月），pp.1-10.
- 江頭庸夫（1988）：桜島火山周辺における地盤変動—1982年～1985年—，第6回桜島火山の集中総合観測，pp.15-19.

- 江頭庸夫・他12名（1997）：始良カルデラ地盤の再隆起—1991年12月～1996年10月—, 京都大学防災研究年報, 第40号B-1, pp.49-60.
- 大島弘光・鬼澤真也・青山裕・北海道駒ヶ岳構造探査グループ（2003）：北海道駒ヶ岳における人工地震探査—探査の概要—, 地球惑星関連学会2003年合同大会予稿集, V055-009.
- 鬼澤真也・他（2003）：有珠山における人工地震探査—観測および初動の読み取り—, 東京大学地震研究所彙報, 第78巻, pp.121-143.
- 鬼澤真也・森健彦・筒井智樹・平林順一・野上健治・小川康雄・松島健・鈴木敦生（2005）：人工地震探査より推定した草津白根火山白根火砕丘表層のP波速度構造, 火山, 第50巻, pp.9-16.
- 鍵山恒臣・他68名（1995）：霧島火山群における人工地震探査—観測および初動の読み取り, 東京大学地震研究所彙報, 第70巻, pp.33-60.
- 加茂幸介・西潔・高山鉄朗・植木貞人（1980）：桜島南方の地震活動と地震波異常伝播域, 第3回桜島火山の集中総合観測, pp.11-15.
- 須藤靖明・他89名（2003）：阿蘇火山における人工地震探査—観測及び初動の読み取り—, 東京大学地震研究所彙報, 第77巻, pp.303-336.
- 鈴木 拓（1999）：1997年鹿児島県北西部地震の余震波を用いた桜島火山浅部におけるP波伝播異常の検出, 京都大学大学院理学研究科修士論文.
- 田中聡・他69名（2002）：岩手山における人工地震探査観測および初動の読み取り, 東京大学地震研究所彙報, 第77巻, 1-25.
- 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68名（1996）：人工地震探査による霧島火山群の地震波速度構造—はざとり法による解析—, 火山, 第41巻, pp.227-241.
- 筒井智樹（2005）：地震学的手法を用いた活火山構造探査の現状と課題, 火山, 第50号, 特別号, pp.S101-S114.
- 筒井智樹・他11名（2008）：草津白根火山白根火砕丘の地震反射断面—擬似反射記録法による反射断面の推定—, 火山, 第53巻, pp.1-14.
- 西 潔（1976）：桜島火山の爆発地震について, 京都大学防災研究所年報, 第19号B-2, pp.69-73.
- 早坂祥三・大木公彦（1971）：鹿児島地域のボーリング資料にもとづく地質学的考察, 鹿児島大学理学部紀要（地学生物学）, 第4号, pp.15-29.
- 富士山人工地震探査グループ（2004）：富士山における2003年人工地震探査：探査実験の概要, 地球惑星関連学会2004年合同大会予稿集, V055-P017.
- 松島健・他82名（1997）：雲仙火山における人工地震探査—観測および初動の読み取り—, 東京大学地震研究所彙報, 第72巻, pp.167-183.
- 三ヶ田均（1996）：霧島火山群構造探査データの反射法処理, 火山, 第41号, pp.159-170.
- 森 俊哉・他11名（2008）：最近10年間の二酸化イオウ放出率の推移, 第10回桜島火山の集中総合観測, pp.137-142.
- 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.
- 山里 平（1987）：桜島爆発地震の初動分布, 火山, 第32巻, pp.289-300.
- 山本圭吾・他11名（2008）：水準測量による桜島火山および始良カルデラ周辺の地盤上下変動—1996年10月から2007年10月—12月まで—, 京都大学防災研究所年報, 第51号B, pp.247-252.
- 横尾亮彦・井口正人・石原和弘（2007）：熱赤外映像観測からみた桜島南岳山体斜面の熱活動, 火山, 第52巻, pp.121-126.
- 渡辺秀文・伊豆大島火山火山構造探査グループ（2000）：人工地震による1999年伊豆大島火山の構造探査：探査実験の概要, 地球惑星関連学会2000年合同大会予稿集, Vb-015.
- Aramaki, S. (1984): Formation of the Aira caldera, southern Kyushu, ~22,000years ago, Jour. Geophys. Res., Vol.89, pp.8485-8501.
- Hidayati, 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, pp.289-309.
- 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, Vol.39, pp.49-67.
- Iguchi, M., Yakiwara, H., Tameguri, T., Hendrasto, M. and Hirabayashi, J. (2008): Mechanism of explosive eruption revealed by geophysical observations at the Sakurajima, Suwanosejima and Semeru volcanoes, Jour. Volcanol. Geotherm. Res., Vol.178, pp.1-9.
- Ishihara, K. (1981): A quantitative relation between the ground deformation and the volcanic materials ejected, Abstract 1981 IAVCEI Symposium - Arc Volcanism, p.143.
- Ishihara, K. (1985): Dynamical analysis of volcanic explosion. Jour. Geodyn., Vol.3, pp.327-349.
- Ishihara, K. (1990): Pressure sources and induced ground

- deformation associated with explosive eruptions at an andesitic volcano: Sakurajima volcano, Japan. In *Magma Transport and Storage* (Ryan, M. P. ed), John Wiley & Sons, pp.335-356.
- Tanaka, S., Hamaguchi, H., Ueki, S., Sato, M. and Nakamichi, H. (2002): Migration of seismic activity during the 1998 volcanic unrest at Iwate volcano, northeastern Japan, with reference to P and S wave velocity anomaly and crustal deformation, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol.113, pp.399-414.
- Yamawaki, T. et al. (2004): Three-dimensional P-wave velocity structure of Bandai volcano in northeast Japan inferred from active seismic survey, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol.138, pp.267-282.
- Yokoyama, I. and Ohkawa, S. (1986): The subsurface structure of the Aira caldera and its vicinity in southern Kyushu, Japan, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol.30, pp.283-302.
- Yoshikawa, K. (1961): On the crustal movement accompanying with the recent activity of the volcano Sakurajima (Part 1), *Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, No.48, pp.1-15.

The 2008 Project of Artificial Explosion Experiment at Sakurajima Volcano

Masato IGUCHI, Takeshi TAMEGURI, Keigo YAMAMOTO, Hiromitsu OSHIMA*, Tokumitsu MAEKAWA*, Hitoshi MORI*, Atsuo SUZUKI*, Tomoki TSUTSUI**, Mikihiro IMAI**, Kazuki TSUSHIMA**, Naofumi, YAGI**, Sadato UEKI***, Takashi NAKAYAMA***, Yoshihiro YAMAMOTO***, Ryota TAKAGI***, Shiori II***, Shoko KOGA***, Takeshi NISHIMURA***, Titi ANGGONO***, Mare YAMAMOTO***, Jun OIKAWA****, Noboru OSADA****, Mie ICHIHARA****, Hiroshi TSUJI****, Yosuke AOKI****, Yuichi MORITA****, Atsushi WATANABE****, Kenji NOGAMI****, Teruo YAMAWAKI****, Toshiki WATANABE****, Haruhisa NAKAMICHI****, Takashi OKUDA****, Kenji TACHIBANA****, Enrique HERNANDEZ****, Yu HASHIDA****, Takashi HIRAI****, Masahiro YOSHIMOTO****, Kenshi YAMAZAKI****, Takuji MOURI****, Hiroshi SHIMIZU****, Manami NAKAMOTO****, Yusuke YAMASHITA****, Hitoshi MIKADA****, Kyosuke ONISHI****, Satoru TANAKA****, Yutaka OKANO****, Tetsuya KAWABAYASHI****, Junji FUJITANI****, Hironori SAKAGUCHI****, Michiaki IMAIZUMI****, Takahiro Ohkura****, Shin YOSHIKAWA****, Yuuki ABE****, Takashi ANDO, Akihiko YOKOO, Hiroki AIZAWA, Tetsuro TAKAYAMA, Tomoya YAMAZAKI, Mitsuhiro TADA, Nobuo ICHIKAWA, Masato KAMO, Kazuhide TOMISAKA, Hiroki MIYAMACHI****, Reiji KOBAYASHI****, Hiroshi YAKIWARA****, Shuichiro HIRANO****, Chisato TOMARI****, Shingo NISHIYAMA****, Sayumi YOSHIDA****, Kengo HATAKEYAMA****, Makoto NISHIDA****, Kouji KATOU****, Jun-ichi MIYAMURA****, Tomoyuki KOEDA****, Yoshirou MASUDA****, Hideyuki HIRAMATSU****, Taisuke KOUNO****, Shin-ichi MATSUSUE****, Fujio OOSUKI****, Hirohito GOTO****, Makoto MIYASHITA****, Hiroshi ITOH**** and Yojiro OTONARI****

* Graduate School of Science, Hokkaido University

** Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University

*** Graduate School of Science, Tohoku University

**** Earthquake Research Institute, University of Tokyo

***** Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

***** Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

***** Graduate School of Science, Kyushu University

***** Graduate School of Engineering, Kyoto University
***** Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University
***** Graduate School of Science, Kyoto University
***** Faculty of Science, Kagoshima University
***** Japan Meteorological Agency
***** Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard

Synopsis

In order to make clear (1) basement structure of Aira caldera, (2) magma supply system of magma reservoirs beneath Aira caldera and Minamidake crater and volcanic conduit and (3) magma path from the magma reservoir beneath the Aira caldera to that beneath the Minamidake, seismic exploration using artificial sources was conducted at Sakurajima volcano and Aira caldera, southwest Japan in November 2008. A total of 646 temporal stations equipped with a 2 Hz or 4.5 Hz vertical component seismometer and a portable data logger were deployed at land area. Sea area was covered by 32 Ocean Bottom Seismometers. Dynamite shots with charges of 20-300 kg were detonated at 15 locations.

Keywords: Sakurajima Volcano, Aira Caldera, artificial explosion experiment, magma accumulation