

## 富士山の大学合同稠密地震観測（2002年9月-2005年4月）

渡辺秀文<sup>1)</sup>\*・中道治久<sup>1)</sup>・大湊隆雄<sup>1)</sup>・鍵山恒臣<sup>1)</sup>・及川 純<sup>1)</sup>・青木陽介<sup>1)</sup>・辻 浩<sup>1)</sup>・小山悦郎<sup>1)</sup>・長田 昇<sup>1)</sup>・萩原道徳<sup>1)</sup>・竹田豊太郎<sup>1)</sup>・小林知勝<sup>1)</sup>・大島弘光<sup>2)</sup>・青山 裕<sup>2)</sup>・前川徳光<sup>2)</sup>・鈴木敦生<sup>2)</sup>・田中 聡<sup>3)</sup>・西村太志<sup>3)</sup>・仁田交市<sup>3)</sup>・山崎 純<sup>3)</sup>・奥田 隆<sup>4)</sup>・山田 守<sup>4)</sup>・大倉敬宏<sup>5)</sup>・須藤靖明<sup>5)</sup>・吉川 慎<sup>5)</sup>・井口正人<sup>6)</sup>・清水 洋<sup>7)</sup>・植平賢司<sup>7)</sup>・松島 健<sup>7)</sup>・八木原寛<sup>8)</sup>・平野舟一郎<sup>8)</sup>

<sup>1)</sup> 東京大学地震研究所・<sup>2)</sup> 北海道大学大学院理学研究科・<sup>3)</sup> 東北大学大学院理学研究科・<sup>4)</sup> 名古屋大学大学院理学研究科・<sup>5)</sup> 京都大学大学院理学研究科・<sup>6)</sup> 京都大学防災研究所・<sup>7)</sup> 九州大学大学院理学研究院・<sup>8)</sup> 鹿児島大学理学部

## Japanese University Joint Dense Seismic Observation on and around Fuji Volcano (September 2002–April 2005)

Hidefumi Watanabe<sup>1)</sup>\*, Haruhisa Nakamichi<sup>1)</sup>, Takao Ohminato<sup>1)</sup>, Tsuneomi Kagiya<sup>1)</sup>, Jun Oikawa<sup>1)</sup>, Yosuke Aoki<sup>1)</sup>, Hiroshi Tsuji<sup>1)</sup>, Etsuro Koyama<sup>1)</sup>, Noboru Osada<sup>1)</sup>, Michinori Hagiwara<sup>1)</sup>, Toyotarou Takeda<sup>1)</sup>, Masakatsu Kobayashi<sup>1)</sup>, Hiromitsu Oshima<sup>2)</sup>, Hiroshi Aoyama<sup>2)</sup>, Tokumitsu Maekawa<sup>2)</sup>, Atsuo Suzuki<sup>2)</sup>, Satoshi Tanaka<sup>3)</sup>, Takeshi Nishimura<sup>3)</sup>, Kouichi Nita<sup>3)</sup>, Jun Yamazaki<sup>3)</sup>, Takashi Okuda<sup>4)</sup>, Mamoru Yamada<sup>4)</sup>, Takahiro Okura<sup>5)</sup>, Yasuaki Sudo<sup>5)</sup>, Shin Yoshikawa<sup>5)</sup>, Masato Iguchi<sup>6)</sup>, Hiroshi Shimizu<sup>7)</sup>, Kenji Uehira<sup>7)</sup>, Ken Matsushima<sup>7)</sup>, Hiroshi Yakiwara<sup>8)</sup> and Shuichiro Hirano<sup>8)</sup>

<sup>1)</sup> Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>2)</sup> Graduate School of Science, Hokkaido University, <sup>3)</sup> Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>4)</sup> Graduate School of Science, Nagoya University, <sup>5)</sup> Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>6)</sup> Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, <sup>7)</sup> Graduate School of Science, Kyushu University, <sup>8)</sup> Faculty of Science, Kagoshima University

### Abstract

A joint dense seismic observation experiment was conducted during the period of September 2002~April 2005 in cooperation of researchers of national universities under the national project for prediction of volcanic eruption. Major objectives include seismic exploration of the subsurface structure of Fuji volcano and surrounding area as well as array observation of deep low frequency earthquakes, the activity of which increased in 2000-2001 beneath the volcano. We installed 28 seismographs temporarily on and around Fuji volcano and the data was transmitted to the Volcano Research Center (VRC), Earthquake Research Institute by satellite, radio and cable telemetry systems. We further collected seismic data of permanent stations around Fuji volcano operated by related research institutions. All the data was collected and picked at VRC. In this initial report we describe the brief outline of the joint experiment, and summarize the preliminary results of analyses on the seismic velocity structure of Fuji volcano and wave characteristics of a low frequency earthquake, which occurred on 11 September 2003.

**Key words:** Mt. Fuji, array observation, velocity structure, low frequency earthquake, eruption prediction

\* e-mail: watanabe@eri.u-tokyo.ac.jp (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

## 1. はじめに

富士山周辺の地震観測網が整備され始めた1980年代から、富士山直下で発生する深部低周波地震がしばしば観測されている (Kanjo *et al.*, 1984; 鶴川・大竹, 1984; 下鶴・他, 1986; 鶴川, 1993, 2000). 2000年秋と2001年春に、これまでの観測史上最大規模の深部低周波地震群発活動が発生した (鶴川, 2001a, b; Ukawa, 2003). 深部低周波地震は火山活動との関連が指摘されており、例えば、1991年のピナツポ大噴火の前や1998年岩手山の火山活動活発化の際に顕著な深部低周波地震活動が認められた (Nakamichi *et al.*, 2003). そのため、富士山においても火山活動が活発化する可能性が懸念されたが、幸いその後現在に至るまで、富士山の地下でのマグマの蓄積や移動を示すような地殻変動等は検出されず、表面活動の異常も観測されていない。

富士山が巨大な山体を形成しているのは、マグマ噴出率が他の島弧火山に比べて数倍から一桁高いためであると考えられている。富士山が高いマグマ噴出率を示す原因についての定説はないが、富士山が位置する特殊なテクトニクス場に関係があるものと考えられている。富士山はフィリピン海プレート、ユーラシアプレート、北米プレートが会合する境界に位置している。フィリピン海プレートがユーラシアプレートに沈み込む駿河トラフ側や北米プレートに沈み込む相模トラフ側のフィリピン海プレートでは、沈み込むプレートに沿って地震が面状に発生している。しかし、富士山直下ではフィリピン海プレートの沈み込みに対応する地震は見られない。このことから、フィリピン海プレートが富士山直下で裂けており、このことが高いマグマ噴出率をもたらしているという見方がある (高橋, 2000). 一般に島弧火山の深部低周波地震は深さ30 km付近で発生する。しかし、富士山の深部低周波地震は深さ10-20 kmで発生しており、この点も他の島弧火山と異なる。富士山直下の地殻・マントル最上部の様子は他の島弧火山のものとは大きく異なり、複雑な状況にあると予想されるが、詳細は明らかになっていない。

2000年～2001年の深部低周波地震活発化を受けて、将来の富士山の火山活動に対処するためには、富士山の噴火履歴、マグマ供給系および深部低周波地震の発生原因などを解明することが重要であり、そのための総合的な基礎調査を実施する必要性が強く認識され、測地学分科会火山部会で、「当面の富士山の観測研究の強化について (報告)平成13年6月」として報告がまとめられ、今後の観測研究の強化について提言された。また、富士山の今後の観測調査研究をいかに進めるか検討するた

め、火山噴火予知研究委員会「富士山検討会」が2001年3月10日に開催され、1) 富士山の噴火履歴と地質構造、2) 観測の現状とこれまでの結果、3) 今後の課題と観測研究計画を主要議題としてこれまでの知見のレビューと議論が行われた。その結果、富士山の活動機構を理解し今後の活動活発化に備えるためには、富士山のマグマ供給系や深部低周波地震の発生領域の性質を解明する必要があること、そのためには富士山周辺の広い領域において高密度地震観測を1年以上の長期間実施することによって、少なくとも深さ20 km程度までの構造を明らかにすることが必要であることが確認された。これを受けて、火山噴火予知計画にもとづく2002年富士山集中総合観測の一環として、富士山周辺で2年程度の長期稠密地震観測を実施することになり、2002年3月5日に開催された「富士山観測検討会」で具体的な観測計画とその進め方 (目標、観測方法、設置と保守の分担、データ収集処理と流通、データ解析と取り扱い) を検討した (Table 1). また、2002年7月8日-9日に開催された、地震研究所共同利用研究集会「富士火山の活動・テクトニクス・構造解明をめざして」においても、関連する課題の検討を行った。

今回の観測のような稠密な地震観測網を展開できるようになったこと背景として、2001年～2002年にかけて基盤高感度地震観測網 (Hi-net) の整備が進み、富士山周辺での観測点密度が上がってきた事が挙げられる。速度構造解析を精度よく行うためには、観測対象の周囲をある程度の広さでカバーする観測網と、観測対象近傍に密に配置された観測網の両者が必要であるが、Hi-netに前者の役割を担わせることにより、後者の観測網を構築することに集中することが可能となった。本観測では、富士山から100 km圏内にあるHi-netを含む定常観測網のなかで、富士山付近の観測点の希薄な地域を埋めるように臨時観測点を集中的に配置することにより、稠密観測網を効率的に構築している。

本観測の目的は、(1) 高精度で震源決定を行う、(2) 高分解能かつ高精度で地震波速度構造の不均質をイメージングする、(3) 富士山周辺で発生する地震 (特に深部低周波地震) の発震機構を精度よく求めることである。それにより、富士山直下のフィリピン海プレートの形状や、富士山直下に想定されるマグマ供給系の分布、深部低周波地震の発生機構が解明されると期待される。今回のような2年程度の稠密地震観測を火山噴火予知研究の事業として行うのは初めてであり、今後他の火山において同様の稠密地震観測を行う際のノウハウを得ることも目的の一つであった。

Table 1. General outline and agreement on the joint dense seismic observation experiment on and around Fuji volcano.

○目標

- ・富士山周辺の深さ 20km 程度までの構造探査
- ・低周波地震のメカニズム解析

○観測方法と器材

- ・観測期間は原則 2 年
- ・衛星・有線・無線テレメータ (15, 7, 5 点)
- ・地震計: 3 成分約 30 点 (1 秒/20~30 秒; 約半数は中周期)

○設置と保守

- ・VSAT は各機関が分担して設置・保守
- ・有線・無線テレメータは, 主として震研が担当

○データ収集処理と流通

- ・臨時観測約 30 点, 既設観測約 37 点 (地震研, 気象庁, 防災科技研, 温泉地学研究所) のデータを地震研火山センターへ集約し, 収録処理する.
- ・VSAT データは, 希望参加機関にリアルタイムで配信 (要確認).
- ・地震波初動の読み取りは, 地震研火山センターで行う.
- ・自動処理によるトリガー波形・初動読み取り値ファイルは, 定期的に参加機関に配付し, 地震研火山センターによる再観測値ファイルは観測終了後 1 年以内に参加機関に配付.
- ・観測情報 (稼動状況, 震源分布, 観測波形など) を web 上でリアルタイム公開 (検討課題).

○データ解析と取り扱い

- ・観測の概要については, 全参加機関 (者) 名で公表.
- ・基礎解析 (P・S 波走時トモグラフィー, 低周波地震の発震機構解析) は地震研火山センターが責任をもって行い, 論文発表は主要メンバー+解析参加者で行う. その他の解析は観測参加者が自由に行える.
- ・観測終了後 2 年経過または上記基礎解析の原著論文投稿の後, 波形・読み取りデータを観測参加者以外も使用できる.

○その他

- ・観測計画や観測内容などを国内外に積極的に公開する.

## 2. 観測の概要

### 2.1 臨時稠密地震観測

2001 年秋から 2002 年春にかけて観測点配置のための事前調査を行った. 観測点配置を決めるにあたっては, 低周波地震の発震機構を高精度で推定するために震源球上に観測点が一様に分布すること, 近地地震を用いた速度トモグラフィーで富士山直下深さ 20 km まで分解能 5 km の精度で速度構造が推定できることの 2 点を考慮した. なお, 後者の目的が達成できるかどうかについては, 後に記すように, 1998 年~1999 年に富士山周辺で発生した地震の震源による仮想走時データを用いたシミュレーションにより確かめた. また, 各観測点の選定に際しては, 短時間の地動ノイズ調査を実施し, ノイズ振幅が深部低周波地震の振幅以下となるよう努めた. 観測点の予備調査と選定, 借地許可申請等の手続きおよび各観

測点の地震計コンクリート台, テレメータ装置取り付け用ポール, 電源装置等の設置工事は一括して地震研究所が行った. 各大学が分担する衛星テレメータ 10 観測点および有線テレメータ 6 観測点は 2002 年 9 月~10 月に設置したが, それ以外の地震研究所が担当する富士山中腹の無線 4 観測点および衛星テレメータ 10 観測点は, 冬期の積雪期もあり, 2003 年 6 月までに設置完了した (Table 2).

臨時観測点に加えて, 2002 年と 2003 年には富士山の北東斜面に掘削されたボーリング孔 3 カ所に広帯域地震計を設置し, 定常観測点として運用した (渡辺, 2004). 2002 年より, 大学・防災科学技術研究所・気象庁間で連続波形データのリアルタイム交換流通が開始されており, これら 3 機関の定常地震観測データが利用可能となった. また, 気象庁気象研究所が富士山頂付近に設置

Table 2. A list of temporal seismic stations on and around Fuji volcano.

Stn. code	Lat. (deg)	Lon. (deg)	Alt. (m)	Seismometer	Period (s)	Telemeter	Digitizer	分担	設置期日
AHOZ	35.57838	138.97806	550	L-4C-3D	1	LNx 142		名大	2002年9月11日
HRGR	35.55120	138.88900	495	L-4C-3D	1	LNx 143		名大	2002年9月12日
TONK	35.57294	138.77219	938	L-4C-3D	1	LNx 139		東北大	2002年9月10日
OTCY	35.58773	138.69276	870	L-4C-3D	1	LNx 139		東北大	2002年9月11日
SMKB	35.44086	138.91939	1106	L-4C-3D	1	LNx 147		京大	2002年9月11日
ASGR	35.40158	138.56778	815	L-4C-3D	1	LNx 148		京大	2002年9月10日
FTUG	35.22019	138.72536	447	L-4C-3D	1	LNx 145		九大	2002年9月12日
KING	35.27783	138.52972	352	L-4C-3D	1	LNx 146		九大	2002年9月11日
HFSD	35.32740	138.82000	1136	CMG-3T	120	LNx 144		震研	2003年1月10日
KFSD	35.43320	138.82500	1042	CMG-3T	100	LNx 149		震研	2003年5月2日
TOKS	35.65777	138.81994	1040	Trillium	40	CYG 295	Trident	震研	2003年3月10日
HTFJ	35.52550	138.73369	930	L-4C-3D	1	Line modem	LS 7000XT	震研	2002年10月1日
KYDW	35.46842	138.68639	1025	L-4C-3D	1	Line modem	LS 7000XT	震研	2002年9月30日
OUSK	35.54669	138.64650	745	L-4C-3D	1	Line modem	LS 7000XT	震研	2002年10月1日
SKSY	35.47708	138.85002	959	Trillium	40	Line modem	LS 7000XT	震研	2002年9月30日
TJRO	35.44161	138.54014	679	L-4C-3D	1	Line modem	LS 7000XT	震研	2002年10月1日
TBKR	35.37378	138.48212	390	Trillium	40	Line modem	LS 7000XT	震研	2002年10月2日
TOKN	35.41892	138.72006	1500	CMG-3T	100	RM 300	LS 7000XT	震研	2002年12月12日
KOSK	35.39794	138.68419	1663	CMG-3T	100	RM 300	LS 7000XT	震研	2002年12月11日
SBSR	35.36256	138.78131	1980	CMG-3T	360	RM 300	LS 7000XT	震研	2003年6月14日
OSWA	35.35469	138.68153	1489	CMG-3T	360	RM 300	LS 7000XT	震研	2003年6月13日
KNTP	35.37783	138.98867	370	Trillium	40	CYG 287	Trident	震研	2003年3月11日
HKGE	35.53458	138.58806	482	Trillium	40	CYG 293	Trident	震研	2003年3月11日
NHOW	35.29175	138.77289	1392	Trillium	40	CYG 298	Trident	震研	2003年4月22日
ANMY	35.27544	138.63572	489	Trillium	40	CYG 316	Trident	震研	2003年4月22日
UMEG	35.27904	138.33283	770	L-4C-3D	1	CYG 309	Trident	北大	2003年3月27日
IKAW	35.20167	138.26019	1060	L-4C-3D	1	CYG 314	Trident	北大	2003年3月27日
FJNO	35.55783	139.16789	360	L-4C-3D	1	CYG 317	Trident	震研	2003年6月3日

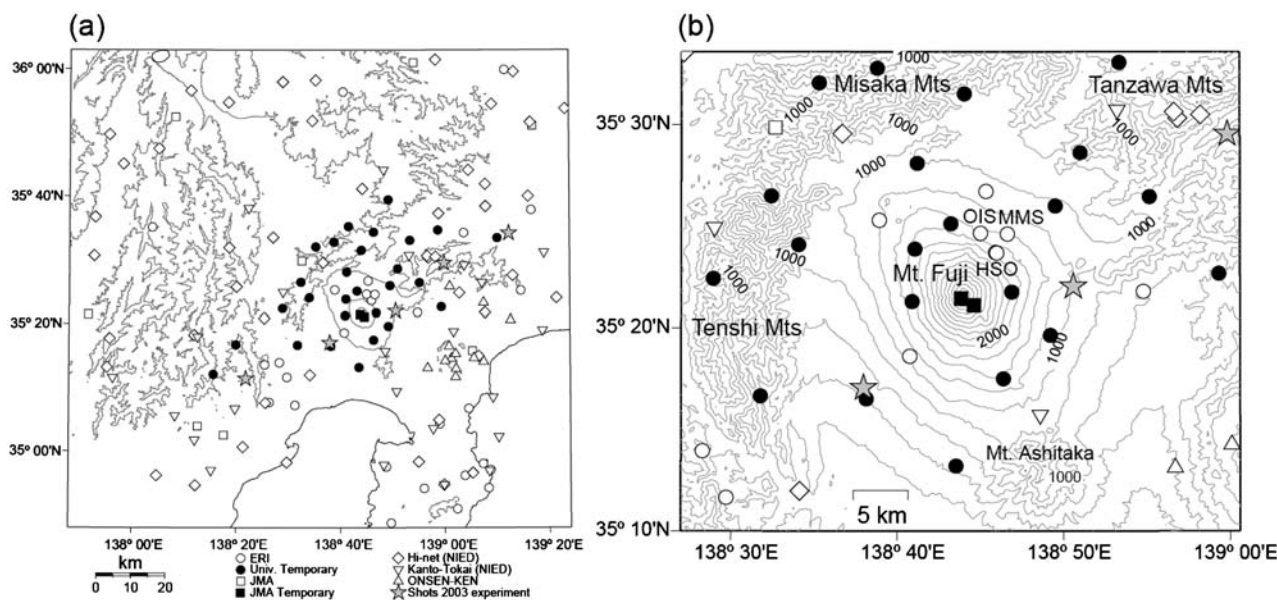


Fig. 1. Location map of the dense seismic observation network around Fuji volcano. The various symbols in the figure denote seismic stations operated by several institutions as indicated in legend. Solid symbols indicate the temporal seismic stations operated during the present dense observation experiment. Gray stars are shot points of the seismic exploration experiment in 2003.

した臨時地震観測点データ，箱根山付近にある神奈川県温泉地学研究所の定常観測データの提供も受けた。

臨時稠密地震観測網は，臨時観測点 28 ケ所，定常観測

点 138 ケ所の合計 166 ケ所の観測点で構成された。観測点配置を Fig. 1 に示す。富士山周辺では，ほぼ 5-10 km 間隔で観測点を展開している。参考のために，2003 年 9

月に実施された富士山人工地震構造探査（及川・他，2004）の発破点配置も示してある。

臨時地震観測点において使用した地震計は，CMG-3T（Güralp 社，固有周期 100 秒）6 台，Trillium（Nanometrics 社，固有周期 40 秒）7 台，L4-3D（Mark Products 社（現 Sercel 社），固有周期 1 秒）15 台で，すべて 3 成分地震計である。近年多くの活動的な火山で観測されてきている超長周期地震の存在を確かめるために，富士山山体の近くには CMG-3T を配置し，その他の観測点に Trillium と L4-3D を配置した。各大学が分担設置する作業日程を短縮するため，ほとんどの観測点において地震計格納用枓を事前に埋設した。地震計を設置する基台は，L4-3D や Trillium を設置する観測点では深さ 45 cm，CMG-3T を設置する観測点では深さ 60 cm とした。人が出入りする可能性のある場所では観測装置全体をフェンスで囲った。特に，衛星テレメータを使用する観測点においては，パラボラアンテナの前方に人が近づかないよう配慮した。

## 2.2 データ伝送・収録システム

データ伝送方法は，観測点の環境に応じて，衛星/無線/有線の 3 種類の中から選択した。衛星テレメータには Nanometrics 社（カナダ）の Lynx タイプと Cyguns・Trident 併用タイプを利用した。共に 24 ビットの  $\Delta\Sigma$  型の AD 変換器が搭載されており，ダイナミックレンジは 132 dB（Lynx），142 dB（Trident）である。衛星テレメータは DC11-16V で駆動するが，消費電力は 30W 未満である。ほとんどの観測点においては 100 V の商用電源を AC-DC コンバータで 12V に変換してテレメータに電源を供給した。陸上自衛隊の北富士演習場と東富士演習場内の観測点（Fig. 2（a））では，太陽電池（560 W）とバッテリー（640 Ah）にて電源を供給した。無線テレメータは富士山中腹の 4 観測点で使用し，太陽電池（80 W）とバッテリー（80 Ah），デジタイザー LS-7000XT（白山工業）と無線モデム RM300（白山工業）を利用し，山麓にある地震研究所の定常観測点にデータ転送した。有線テレメータ観測点においては，LS-7000XT で AD



(a) 太陽電池電源・衛星テレメータ観測点。



(c) AC 電源有線テレメータ観測点。



(b) 太陽電池電源・無線テレメータ観測点。

Fig. 2. Photos of different types of temporal seismic stations using VSAT telemetry with solar battery (a), radio telemetry with solar battery (b) and wire telemetry with AC power (c).

変換し、アナログ回線で山麓にある地震研究所の定常観測点に転送した。定常観測点で中継集約されたデータは、デジタル専用回線を用いて地震研究所に伝送した。各大学が分担設置する作業日程を短縮するため、各観測点のテレメータ装置取り付け用ポールや電源装置は事前に設置工事した。また、長期臨時観測の保守作業をできるだけ軽減するために、地震計ケーブル等は保護管に通し、各観測点のデジタイザ-信号入力部、有線/無線テレメータ、電源装置には全て避雷器を設置し1点で接地した。このような配慮の結果、衛星テレメータ装置の初期故障、雷によるAC電源ブレーカー断、中腹の無線観測点における冬の充電不足等のトラブル発生はごく一部の観測点に留まり、予想以上に順調な稼働状況であった。観測点の設置状況を Fig. 2 (a), (b), (c) に示す。

臨時観測および定常観測による連続波形データは地震研究所火山噴火予知研究推進センターに集約され、データ蓄積ならびに自動および手動再検測処理を行った。連続波形データはDATに、トリガー波形データはCD-ROMに保存し、トリガー波形記録CD-ROMを定期的

に観測参加機関に配布した。また、各大学が分担設置した衛星観測点の稼働状況をモニターできるようにするため、一部の衛星テレメータ観測点データはリアルタイムで衛星配信するとともに、公開用サーバーを設置して、トリガー収録された全波形データに各参加大学からアクセスできるようにした (Fig. 3)。

### 2.3 験測・解析

収録処理されたトリガー波形データは、東京大学地震研究所火山噴火予知研究推進センターにおいてルーチ的に再験測作業を行った。P波、S波到達時刻の験測は、P波を上下動成分で、S波を水平動成分で行った。臨時稠密観測期間 (2002年10月~2005年3月) のトリガー波形データの1次再験測は、2006年4月までに完了した。トモグラフィー解析のためのP波、S波走時データには、1次再験測結果を少数の研究者が再度確認して作成した2次再験測結果を使用している。

### 3. 震源分布

稠密観測期間の一部、2003年4月~10月に発生した

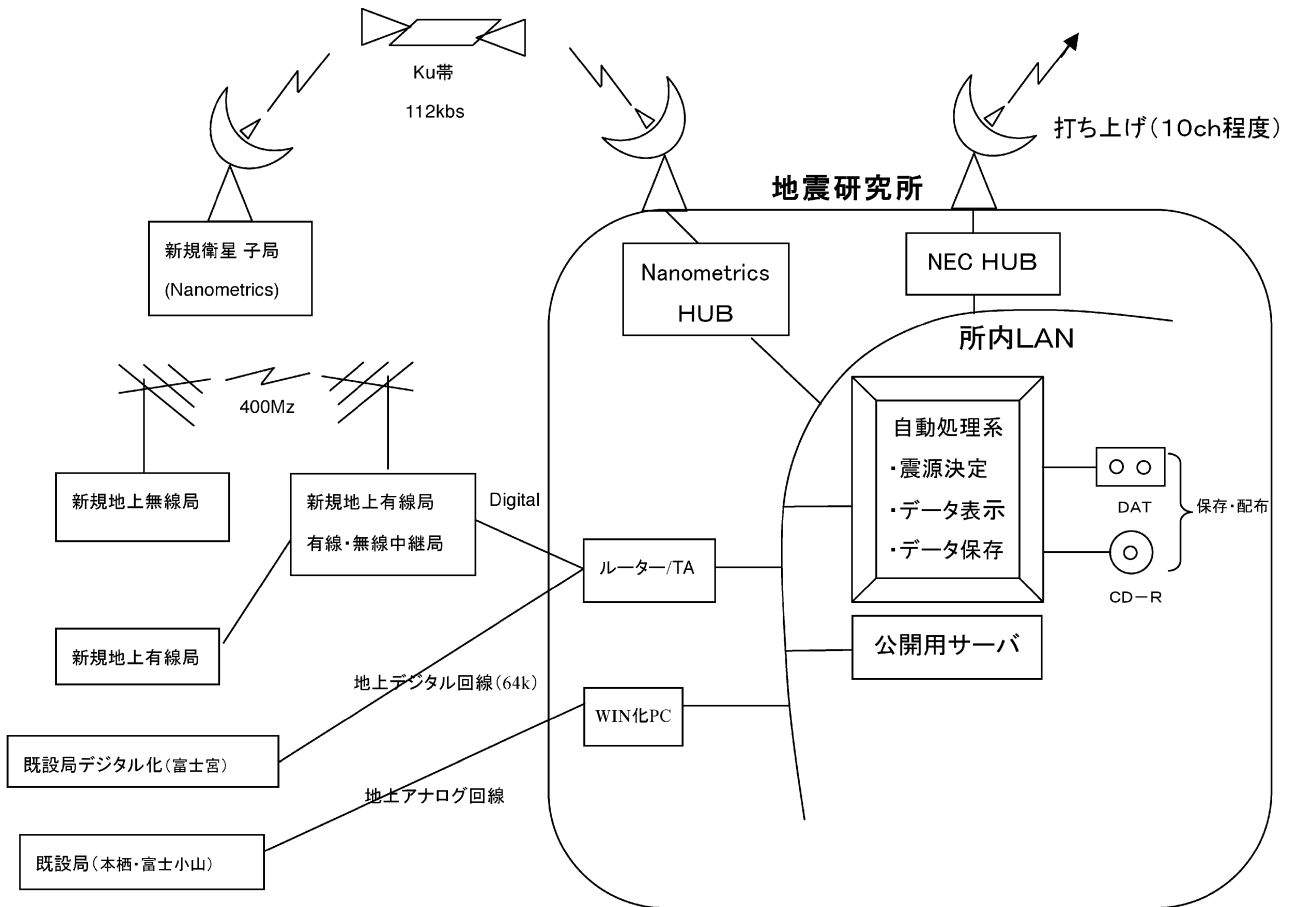


Fig. 3. Schematic diagram showing data telemetry and processing system for the present seismic observation.

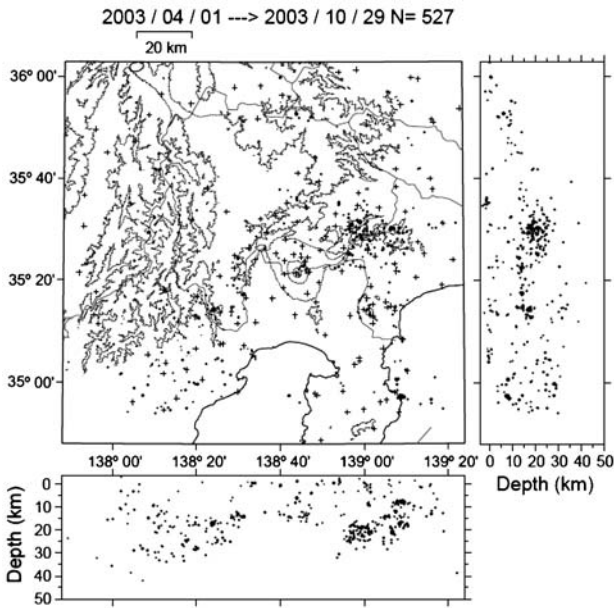


Fig. 4. Hypocenter distribution of earthquakes that occurred around Fuji volcano during the period, April to October 2003.

地震の震源の一部を Fig. 4 に示す. 発生する地震の大半は山梨県東部・神奈川県西部にある丹沢山地に集中している. この地域は, フィリピン海プレートがユーラシアプレートの下に沈み込めず, プレート衝突域となっていると考えられている (Huchon and Kitazato, 1984; 石橋, 1986). 富士川周辺とさらに西側には, それぞれ富士川断層と東海スラブに起因する地震活動が見られる. 秩父山地や白根三山 (北岳, 間ノ岳, 農鳥岳) 周辺, 富士山の北にあり本観測にて観測点を展開した御坂山地にも地震活動がある. また, 箱根の火山活動に伴う極浅い地震や伊東沖の地震活動もある. ここで示した地震の震源は上記の期間に自動検測処理された地震の 1 割程度であるが, 図で示した地域の地震活動の概要をほぼ表していると思われる.

#### 4. 地震波速度構造解析

##### 4.1 トモグラフィー解析の分解能テスト

臨時稠密地震観測を開始するにあたり, 2 年程度の稠密地震観測によって富士山周辺の速度構造についてどの程度の解像度が得られるかを確かめた. 富士山周辺の Fig. 5 (a) に示した範囲で 2 年間 (1998 年~1999 年) に発生した地震の震源 (Fig. 5 (a)) を用い, チェッカーボード状の速度構造を仮定して得られた計算走時にランダムノイズを加えたものをデータとし, 既存観測点 37 点と臨時観測点 28 点からなる稠密観測網による走時ト

(a)

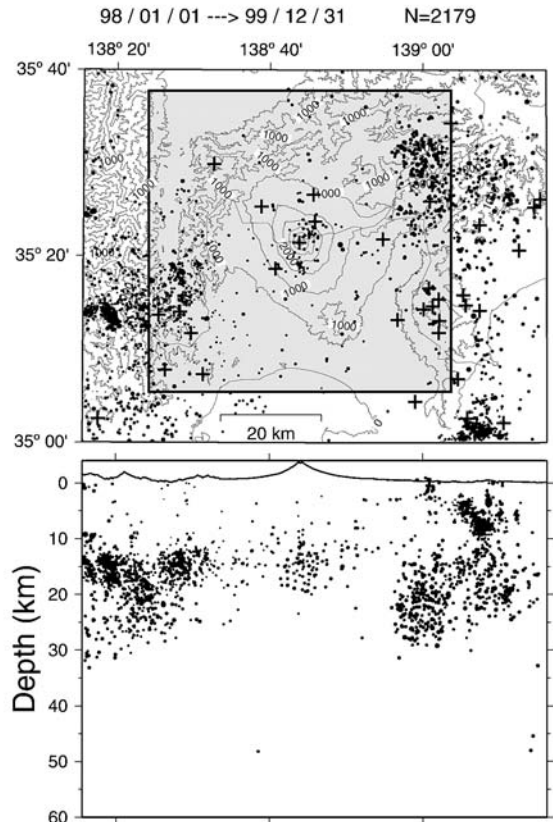


Fig. 5. The results of checkerboard tests for the seismic velocity tomography around Fuji volcano. Hypocenter distribution of earthquakes during the period of 1998-1999 used for the checkerboard tests (a), and the results for grid spacing of 5 km (b) and 4 km (c).

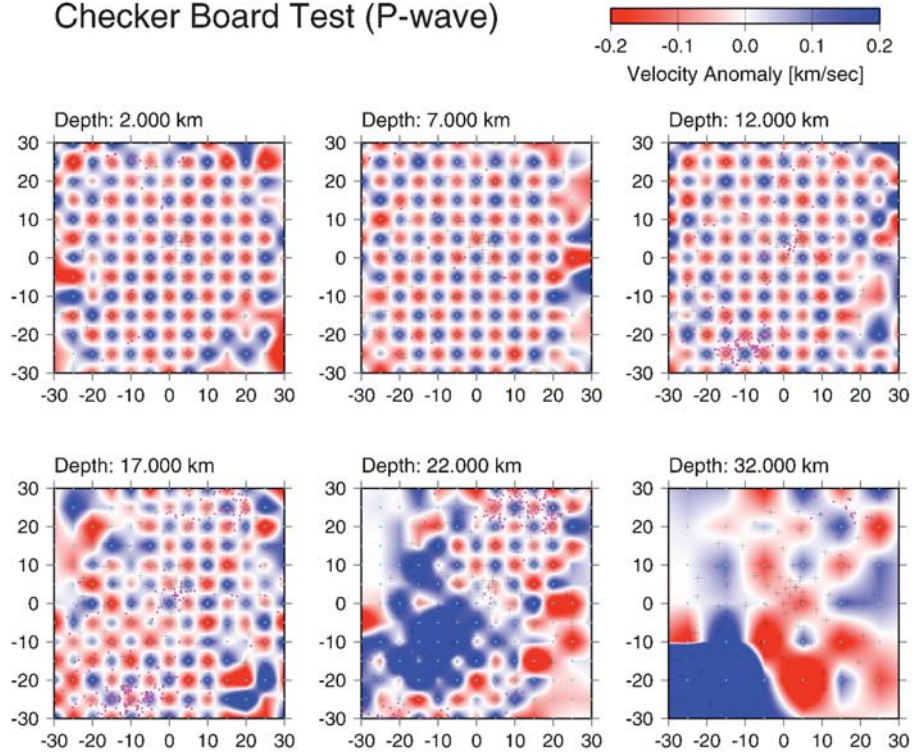
モグラフィーによって与えた速度構造がどの程度回復されるかを評価した. Fig. 5 (b) および (c) は, それぞれ, 水平・鉛直方向 5 km, および水平・鉛直方向 4 km のグリッド間隔を用いた場合の結果である. これらの結果から, 2 年程度の稠密地震観測によって, 富士山周辺の深さ 20 km 未満までは, 水平・鉛直共に 4 km 程度の分解能で速度構造を探索することが可能であることが分かった.

##### 4.2 富士山周辺の地震波速度構造 (予備解析結果)

速度構造の解析に用いた観測点の総数は 166 点である. 予備解析に使用したイベントは, 2002 年 10 月から 2004 年 1 月までに発生した地震のうち再検測の済んだイベントの中から, 以下の基準で 633 個の地震を選び解析に用いた. (1) P 波については 10 個以上の読み取り値があること, (2) P 波, S 波あわせて 15 個以上の読み取り値があること, (3) P と S の残差の RMS が 0.2 秒以下であること. 後述するように解析に用いた地震数は

(b)

Checker Board Test (P-wave)



(c)

Checker Board Test (P-wave)

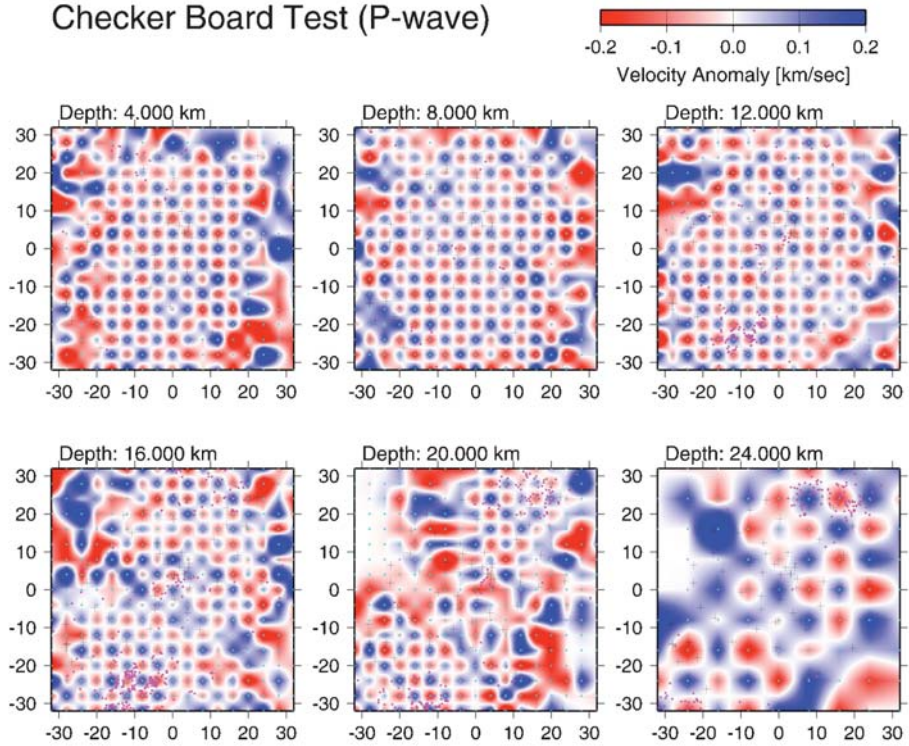


Fig. 5. (continued)



十分とは言えないが、観測途中の暫定的な解析として速度構造推定を行った。

解析には Bayesian approach による非線形最小二乗法を用いた 3次元速度インバージョンプログラム（鬼澤・他, 2002; Onizawa *et al.*, 2002）を用いた。グリッド間隔は深さ 5 km, 10 km, 15 km, 20 km においては水平方向に 5 km で、深さ 25 km と 35 km では 10 km とした。Fig. 6 に示す解析結果は、山頂直下で深さ 0-5 km において高速度域が盛り上がるように存在することを示している。これは過去のマグマの貫入を表している可能性がある。このような山頂直下での高速度域の盛り上がりは、岩手山 (Tanaka *et al.*, 2002) や磐梯山 (Yamawaki *et al.*, 2004) でも報告されている。山頂直下の深さ 10-20 km において P 波速度が 5.8-6 km/s の低速度領域が見られる。この領域は深部低周波地震の震源域に近接している。また、Fig. 6 の東西断面図では、深さ 10-15 km の水平位置 -5 km と 5 km 付近に、P 波速度が 7

km/s に達するような高速度域が低速度域を挟んで存在する様子が見られる。しかし、この高速度の値は異常に大きく、それに挟まれている低速度域との地震波速度のトレードオフによってこのような速度構造となって現れている可能性もある。また、低周波地震の走時データを除いたインバージョンを行ったところ、山頂直下にある低速度域が見られなくなったことから、速度構造解析の結果には再検討の余地がある。今後さらに走時データを増やし、グリッド配置や間隔を検討するとともに、近接するグリッドにおいて速度の極端な変化が出ないようにスムージングをかけた 3次元インバージョンや Double-difference tomography method (Zhang and Thurber, 2003) 等の速度構造トモグラフィ解析を行う必要がある。富士山周辺の地震波速度構造の詳細なトモグラフィ解析結果とその解釈については、別途報告する (Nakamichi *et al.*, 2007)。

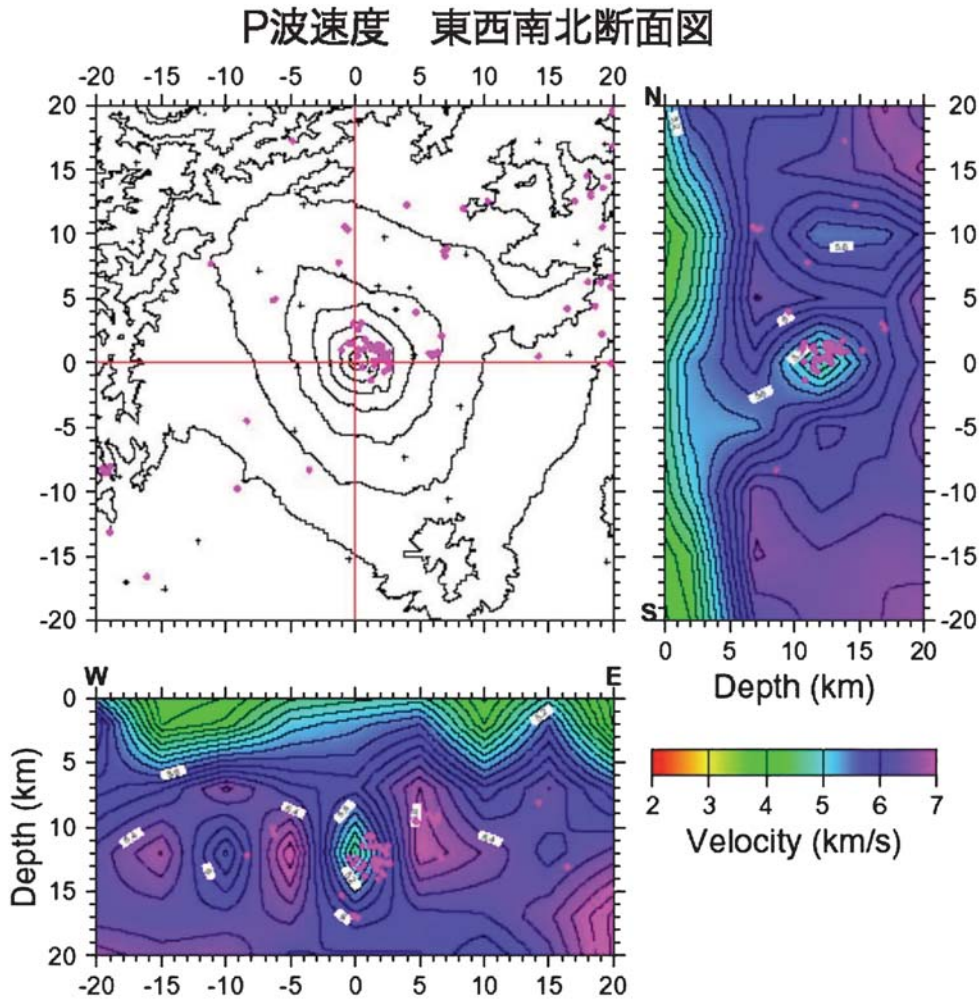


Fig. 6. The preliminary results of seismic velocity tomography around Fuji volcano.

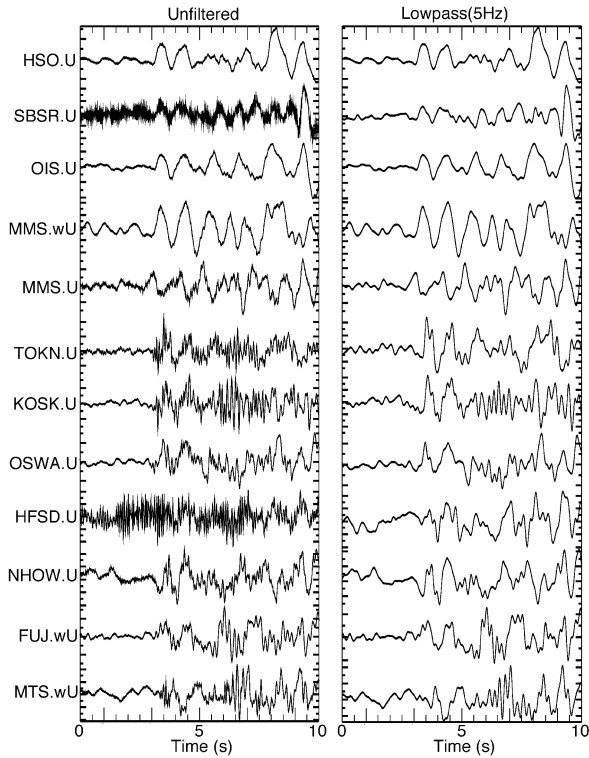


Fig. 7. Vertical component velocity seismograms of the low frequency earthquake, which occurred beneath Fuji volcano at 20:34JST on 11 September 2003. The left side shows unfiltered seismograms and the right side those obtained after 5 Hz low-pass filtering. Each trace is normalized by its maximum amplitude. Location of seismic stations is shown in the Figure 11.

### 5. 深部低周波地震の発生メカニズム (予備解析結果)

富士山直下の深部低周波地震活動は2000年～2001年に活発化したが、その後の活動は低調であった。臨時稠密地震観測期間(2002年10月～2004年3月)に十分な観測データは得られていないが、以下に、2003年9月11日20時34分に発生した深部低周波地震の予備的な解析結果を報告する。富士山周辺の11観測点で観測された低周波地震の上下動速度記録をFig. 7に示す。図の左側は原記録、右側は5 Hzのローパスフィルターをかけたものである。各観測点の位置はFig. 11に示してある。このうち、細尾野(HSO)、大石(OIS)および塚下(MMS)は北東山腹の観測井を用いた定常観測点、富士宮(FUJ)および本栖(MTS)は山麓の定常観測点であり、その他は臨時観測点である。震源が14.2 kmと深いため、各観測点での初動到達時刻の差は小さい。

震源のほぼ直上にある細尾野観測点(HSO)の速度上下動記録とランニングスペクトルをFig. 8に示す。0.4

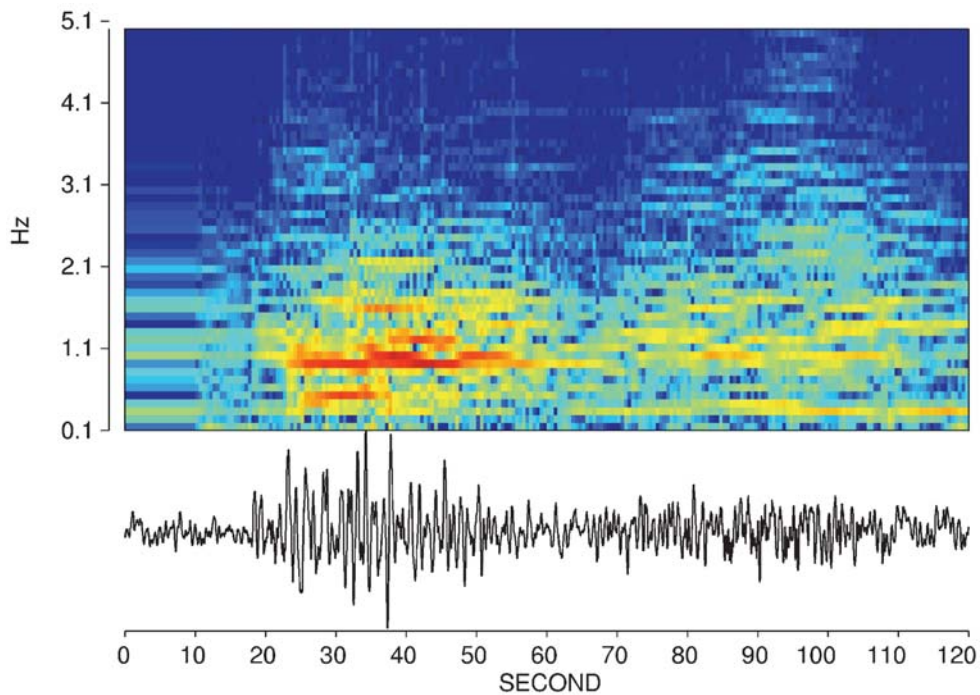


Fig. 8. Vertical component velocity seismogram and its running spectra observed at the station HSO for the low frequency earthquake, which occurred at 20:34JST on 11 September 2003.

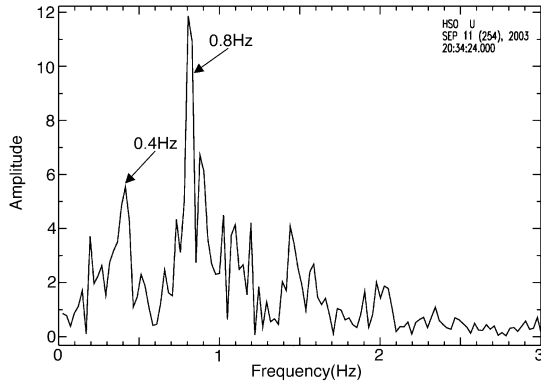


Fig. 9. Spectral amplitude of the vertical component seismogram observed at HSO (Fig. 8).

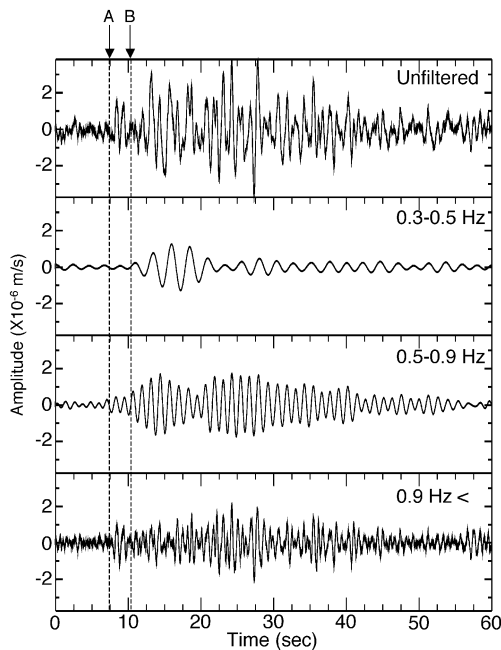


Fig. 10. Band passed seismograms of the vertical component seismogram observed at HSO (Fig. 8). Note that the 0.4 Hz component started a few seconds later (arrow B) after the initial arrival of P phase (arrow A).

Hz と 0.8 Hz 付近のスペクトル強度が大きく、それらが卓越する時間帯に違いも見られる。スペクトル振幅分布を Fig. 9 に示す。0.4 Hz と 0.8 Hz 付近に明瞭なピークがあり、他の観測点でも見られることから、構造の影響ではなく震源で励起されたものと考えられる。バンドパスフィルターにより抽出した卓越周波数成分 (0.4 Hz, 0.8 Hz) および 0.9 Hz 以上の成分の振動時系列を Fig. 10 に示す。0.8 Hz 成分は低周波地震の開始から終了まで、40 秒以上継続するが、0.4 Hz 成分の継続時間は 15-20 秒程度と短い。また、0.4 Hz 成分は P 波初動 (矢印 A) から

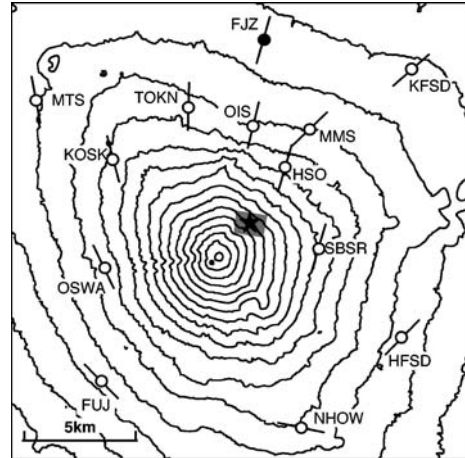


Fig. 11. Predominant directions of particle motion observed around Mt. Fuji for the 0.4 Hz component of the low frequency earthquake at 20 : 34 JST on 11 September 2003.

数秒遅れて始まっている (矢印 B) ことが注目される。山体近傍における 0.4 Hz 成分の卓越振動方向を Fig. 11 に示す。黒丸は 1 秒地震計、他は全て広帯域地震計であり、星印は初動到達時刻から決定した震源位置である。0.4 Hz 成分の震源を星印の位置に固定して行った暫定的な波形解析によると、南南西に 20-30 度傾く水平に近いクラック (図中のグレー四角) の開閉と上下方向のシングルフォースの組み合わせが波形を良く説明する。これらことから、初動 P 波は流体流路の開通時に発生し、その後生じた流体移動によって励起されたクラック振動と鉛直通路内の粘性流体の上下移動により 0.4 Hz 成分が発生したと解釈することができる。

## 6. 今後の課題

1990 年代前半に、山梨県東部から神奈川県北西部にかけて発生する地震の変換波からフィリピン海プレートの上面の推定が行われている (Iidaka *et al.*, 1990; 津村・他, 1993) が、富士山直下においてフィリピン海プレートが連続してつながっているかどうかまでは分かっていない。当時に比べ圧倒的に観測点数が多い本富士山稠密地震観測網のデータを用いれば、変換波からフィリピン海プレートの形状を明らかにできる可能性がある。富士山稠密地震観測網においては、観測点が富士山を中心に南西-北東方向に密に配置されているため、フィリピン海プレートの存在の是非が議論されている領域を通過する遠地地震波が数多く観測されることが期待できることから、変換波の解析のみならず遠地地震波を用いたレーンバー関数解析を行うことにより、フィリピン海プ

レートの形状を明らかにすることも有望と考えられる。

過去の3次元速度構造インバージョン (Lees and Ukawa, 1992) や富士山を南西-北東に横断する測線で行われたMT観測による2次元比抵抗構造 (Aizawa *et al.*, 2004) からは、富士山直下の深さ20 km以深にそれぞれ低速度域と低比抵抗域が見つかった。これらの研究結果に加えて、富士山稠密地震観測網で観測された遠地地震のデータを用いて富士山深部の構造を推定し、富士山の20 km以深の地震学的構造をより精密に明らかにすることにより、富士火山のマグマ供給系の解明が大きく進展するであろう。

今後、高精度な低周波地震波形データを蓄積して定量的な震源解析を行うとともに、発生場の構造を定量的に探査することにより、富士山の深部低周波地震発生メカニズムの解明が大きく進展するものと期待される。

## 謝 辞

本観測は、火山噴火予知計画による2002年度特定火山集中総合観測および科学技術振興調整費先導的研究(2001-2003年度)「富士火山の活動の総合的研究と情報の高度化」の連携のもと、それらの一環として実施された。また、本観測で使用した地震計、衛星・無線・有線テレメータ装置および電源装置等は、平成14年度特別設備費「富士火山総合観測設備」で調達したものである。文部科学省および財務当局のご理解に感謝する。観測点設置には、山梨県、静岡県、神奈川県の関係自治体、企業、個人の方々、また陸上自衛隊に協力を頂いた。また、気象庁気象研究所の臨時地震観測点、防災科学技術研究所の基盤高感度地震観測網(Hi-net)と東海地域定常地震観測点、および神奈川県温泉地学研究所の定常地震観測点の波形データの提供を受けた。地震波速度構造トモグラフィ解析の分解能テストと予備解析には、東京工業大学(当時)の鬼澤真也氏のプログラムを利用させていただいた。記して感謝致します。

## 参考文献

- Aizawa, K., R. Yoshimura and N. Oshiman, 2004, Splitting of the Philippine Sea Plate and a magma chamber beneath Mt. Fuji, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L09603, doi: 10.1029/2004GL019477.
- Huchon, P. and H. Kitazato, 1984, Collision of the Izu block with central Japan during the quaternary and geological evolution of the Ashigara area, *Tectonophysics*, **110**, 201-210.
- Iidaka, T. M. Mizoue, I. Nakamura, T. Tsukuda, K. Sakai, M. Kobayashi, T. Haneda and S. Hashimoto, 1990, The upper boundary of the Philippine Sea plate beneath the western Kanto region estimated from S-P-converted wave,

*Tectonophysics*, **179**, 321-326.

- 石橋克彦, 1986, 南部フォッサ・マグナのプレート運動史(試論), 月刊地球, **8**, 591-597.
- Kanjo, K., I. Karakama and R.S. Matsuura, 1984, Seismic activities of Mt. Fuji region detected by continuous observation of micro-earthquakes, *J. Phys. Earth*, **32**, 463-468.
- Lees, J.M. and M. Ukawa, 1992, The South Fossa Magna, Japan, revealed by high-resolution P- and S-wave travel time tomography, *Tectonophysics*, **208**, 377-396.
- 文部科学省科学技術・学術審議会測地学分科会, 2001, 「当面の富士山の観測研究の強化について(報告)平成13年6月」.
- Nakamichi, H., S. Tanaka and H. Hamaguchi, 2002, Fine S wave velocity structure beneath Iwate volcano, north-eastern Japan, as derived from receiver functions and travel times, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **116**, 235-255.
- Nakamichi, H., H. Hamaguchi, S. Tanaka, S. Ueki, T. Nishimura and A. Hasegawa, 2003, Source mechanisms of deep and intermediate-depth low-frequency earthquakes beneath Iwate volcano, northeastern Japan, *Geophys. J. Int.*, **154**, 811-828.
- Nakamichi, H., H. Watanabe and T. Ohminato, 2007, Three-dimensional velocity structures of Mount Fuji and the South Fossa Magna, central Japan, *J. Geophys. Res.*, **112**, B03310, doi: 10.1029/2005JB004161.
- 及川 純・鍵山恒臣・田中 聡・宮町宏樹・筒井智樹・池田靖・湯山弘明・松尾のり道・西村裕一・山本圭吾・渡辺俊樹・大島弘光・山崎文人, 2004, 人工地震を用いた富士山における構造探査, 月刊地球, 号外 **48**, 23-26.
- 鬼澤真也・大島弘光・森 濟・前川徳光・鈴木敦生・一柳昌義・岡田 弘, 2002, 有珠火山地域の3次元地震波速度構造, 火山, **47**, 495-506.
- Onizawa, S., H. Mikada, H. Watanabe and S. Sakashita, 2002, A method for simultaneous velocity and density inversion and its application to exploration of subsurface structure beneath Izu-Oshima volcano, Japan, *Earth Planets Space*, **54**, 803-817.
- 下鶴大輔・長田 昇・宮崎 務, 1986, 富士山の地震・傾斜観測システムと1982年10月-1984年12月の観測結果, 地震研究所彙報, **61**, 587-613.
- 高橋正樹, 2000, 富士火山のマグマ供給システムとテクトニクス場—ミニ拡大海嶺モデル—, 月刊地球, **22**, 516-523.
- Tanaka, S., H. Hamaguchi, T. Nishimura, T. Yamawaki, S. Ueki, H. Nakamichi, T. Tsutsui, H. Miyamachi, N. Matsuwo, J. Oikawa, T. Ohminato, K. Miyaoka, S. Onizawa, T. Mori and K. Aizawa, 2002, Three-dimensional P-wave velocity structure of Iwate volcano, Japan from active seismic survey, *Geophys. Res. Lett.*, **29** (10), doi: 10.1029/2002GL014983.
- 津村紀子・堀内茂木・長谷川昭・笠原敬司, 1993, 山梨県東部におけるフィリピン海プレート上部境界面の位置—SP変換による推定—, 地震, **46**, 109-118.
- 鶴川元雄・大竹政和, 1984, 富士山直下の特異な微小地震活動について, 地震, **37**, 129-133.
- 鶴川元雄, 1993, 富士山の噴火予知に挑む, 月刊地球, 号外 **7**, 59-64.
- 鶴川元雄, 2000, 富士山の地震活動・傾斜変動観測, 月刊地球, **22**, 535-539.
- 鶴川元雄, 2001a, 富士山の低周波地震と噴火予知・火山災害軽減, 月刊地球, **23**, 784-790.
- 鶴川元雄, 2001b, 富士山の低周波地震(続報), 地震ジャーナ

- ル, **31**, 37-46.
- Ukawa, M., 2003, Activity of Fuji volcano, Reports on volcanic activities and volcanological studies in Japan for the period from 1999 to 2002, 18-22.
- 渡辺秀文, 2004, 観測井を用いた 3次元アレイ広帯域地殻活動観測システムの構築, 月刊地球, 号外 **48**, 76-81.
- Yamawaki, T., S. Tanaka, S. Ueki, H. Hamaguchi, H. Nakamichi, T. Nishimura and et al., 2004, Three-dimensional P-wave velocity structure of Bandai volcano in north-eastern Japan inferred from active seismic survey, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **138**, 267-282.
- Zhang, H. and C. H. Thurber, 2003, Double-difference tomography: the method and its application to the Hayward fault, California, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **93**, 1875-1889.  
(Received April 9, 2007)  
(Accepted August 3, 2007)