



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	臨時稠密地震観測で見えてきた有珠山の微小地震活動
Author(s)	青山, 裕; 鬼澤, 真也; 為栗, 健; 鈴木, 敦生; 前川, 徳光; 大島, 弘光; 森, 濟; 橋本, 武志; 志賀, 透; 小山, 寛; 中橋, 正樹; 吉川, 章文; 福山, 由朗
Citation	北海道大学地球物理学研究報告 = Geophysical bulletin of Hokkaido University, 70: 107-121
Issue Date	2007-03-15
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/20427
Right	
Type	bulletin
Additional Information	



Instructions for use

臨時稠密地震観測で見えてきた有珠山の微小地震活動

青山 裕

北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

鬼澤 真也

産業技術総合研究所地質調査総合センター

為栗 健

京都大学防災研究所附属火山活動研究センター

鈴木 敦生・前川 徳光・大島 弘光・森 濟・橋本 武志

北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

志賀 透・小山 寛・中橋 正樹・吉川 章文・福山 由朗

札幌管区気象台火山監視・情報センター

(2007年1月11日受理)

Micro-earthquake activity at Usu volcano revealed by temporary dense observation

Hiroshi AOYAMA

Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University

Shin'ya ONIZAWA

Geological Survey of Japan, AIST

Takeshi TAMEGURI

Sakurajima Volcano Research Center, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Atsuo SUZUKI, Tokumitsu MAEKAWA, Hiromitsu OSHIMA, Hitoshi MORI,

Takeshi HASHIMOTO

Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University

Toru SHIGA, Hiroshi KOYAMA, Masaki NAKAHASHI, Akifumi YOSHIKAWA

and

Yoshiro FUKUYAMA

Sapporo District Meteorological Observatory, Japan Meteorological Agency

(Received January 11, 2007)

We performed temporary dense observation at Usu volcano in summer 2006, aiming to reveal micro-earthquake activity under the summit crater during dormant period of the volcanic activity. During about 80 days of temporary observation, more than 330 volcanic earthquakes were observed. Of these earthquakes, well-recorded 142 events are selected for relocation analysis assuming the 3D-velocity structure model which is a result of the explosion seismic experiment at Usu volcano in 2001. Following the result of relocation, we estimated focal mechanism of 7 earthquakes whose magnitudes are more than 1.0. The temporal observation and analyses gave us three new insights about seismic activity; 1) Continuous activity of volcanic earthquake is seen at the shallow part under the southern crater floor, 2) Hypocentral regions are distributed along the SW end of the U-shaped fault which was built in the 1977-1982 eruption associated with the uplift of Usu-Shinzan crypt dome, 3) Strike direction of the 7 major earthquakes are almost parallel to the U-shaped fault, and dominant mechanism is dip-slip type which suggests subsidence of summit domes relative to the southern crater floor.

I. は じ め に

洞爺カルデラ南縁に位置する有珠山は、約 30 年の周期でマグマ性噴火を繰り返してきた北海道を代表する活動的火山で、噴火直前には明瞭な前兆地震活動が認められることで広く知られている。有珠山の噴火活動の特徴とも言える火山性地震の発生は、これまで多くの研究者によって取り上げられ火山地震学の進歩に大きく貢献してきた。1910年に始まった明治の噴火では、大森博士による臨時地震観測が壮瞥町で行われ、噴火活動に伴う火山性地震が地震計によって初めてとらえられた (Omori, 1911)。続く 1943年に始まった昭和山生成の噴火では、水上博士による多点地震観測により有珠山周辺で発生する火山性地震の震源位置が推定されるとともに、波形の特徴に基づいた地震の分類が行われた (Minakami et al., 1951)。山頂に有珠新山 (潜在ドーム) を生成した 1977年からの噴火では、実用化されて間もないテレメータ装置が有珠山の観測網に導入されたことで、ドームの成長に伴って発生する地震群の詳細な時空間分布が推定され、ドームの成長による地殻変動が火山性地震の発生と密接に関係していることが明らかにされた (原田ほか, 1978; Okada et al., 1981; Takeo, 1983)。直近の活動である 2000年の噴火では、噴火前兆地震の震源移動を検出するとともにその震源位置が基盤構造に強く規制されていたことが明らかになった (Oshima and Ui, 2003; Onizawa et al., 2007)。さらに噴火開始後には地下での火山性流体の移動を示唆すると考えられている超長周期地震の発生が確認された (Yamamoto et al., 2002)。これらの成果は地下におけるマグマの挙動と地震活動や地殻変動との密接な関連を示唆しており、有珠山が噴火に至るまでと噴火中のマグマ活動について、今後一層理解を深める上で不可欠ともいえる新たな知見を与えるものであった。

激しい前兆地震活動が見られる一方で、噴火休止期間中の有珠山における地震活動は非常に静

穏であり、これまでは研究対象として取り上げられることはなかった。有珠山の休止期における活動の推移は主として地殻変動観測によって追跡されている。山頂の溶岩ドーム群周辺や昭和祈山周辺では沈降変動が続いており、1983年から1997年までの山頂部の沈降率は5-6cm/yearにも達する(森・鈴木, 1998)。また火口原をはさんだ外輪山基点間の線ひずみも 4×10^{-5} /year程度の短縮を示し、山体の収縮を示すような変動が続いている。しかしながらドームの沈降率や山体の収縮率を説明するような変動のメカニズムを提唱するまでには至っていない。

北海道大学大学院理学研究科附属地震火山研究観測センター(有珠火山観測所)では、2000年の噴火が鎮静化してから有珠山周辺における多項目火山観測点の整備を進めてきた。その一部として、山頂火口原を取り囲む5箇所に地震観測点を設け連続観測を行っている。これにより、火口原内の浅部では継続的に微小地震が発生していることが明らかになってきた。この微小地震活動は従来の観測網では明瞭にとらえることが難しく、それゆえ休止期における有珠山の地震活動は静穏であるとされてきたのであろう。当然のことながら震源位置や発震メカニズムなどについては解明されておらず、ここ5年ほどのデータの蓄積によって小有珠溶岩ドームの南側火口原内に震源が分布することが分かってきたところである。

2006年6月7日から8月27日まで、有珠山集中観測の一環として臨時の地震観測を行った。本観測では山頂火口原内における微小地震活動の詳細な震源分布と発震メカニズムの推定を目的とし、震源域を取り囲むような18箇所に高密度で地震観測点を設置した。本論文では臨時地震観測によって見えてきた活動休止期における有珠山の微小地震活動についてまとめる。

II. 2000年噴火以降の地震活動

2000年の噴火活動が終息したことを受け、有珠火山観測所では有珠山周辺における多項目連続観測点の整備を進めてきた。その結果、山体から15km圏内に17箇所の恒久観測施設と3箇所の臨時観測施設を設けることができ、2006年5月現在ではFig.1に示したような観測点で連続地震観測を行っている。観測施設で稼働中の地震計は、Streckeisen製STS-2地震計(0.0083-50Hz)が1台、東京測振製VSE-355ボアホール地震計(0.018-100Hz)が2台、Guralp製CMG-40T地震計(0.033-50Hz)が3台、Mark Products製L4C-3D地震計(1-100Hz)が8台、Mark Products製L4C地震計(1-100Hz)が1台、勝島製作所製PK-110地震計(1-50Hz)が1台である。これらの地震計の出力は白山工業製のデータ変換装置LT8500(有効分解能22bit)、LS7000(有効分解能16bit)、LS7000XT(有効分解能24bit)、LS8000(有効分解能14bit)によってWIN形式(卜部, 1994)に変換され、電話回線や無線回線を利用したネットワークを経由して有珠火山観測所および札幌キャンパスへ伝送されている。

Fig.2には、2002年4月1日から2006年10月20日までの連続地震観測によって推定された震源分布を示す。これまで地震活動度が極めて低いと考えられていた山頂火口原内浅部で、微小地震活動が定常的に発生していることがわかる。有珠山近傍における微小地震活動は、噴火活動の終息から時間が経つにつれて鎮静化する方向に向かっている。2003年までは火口原直下の浅部

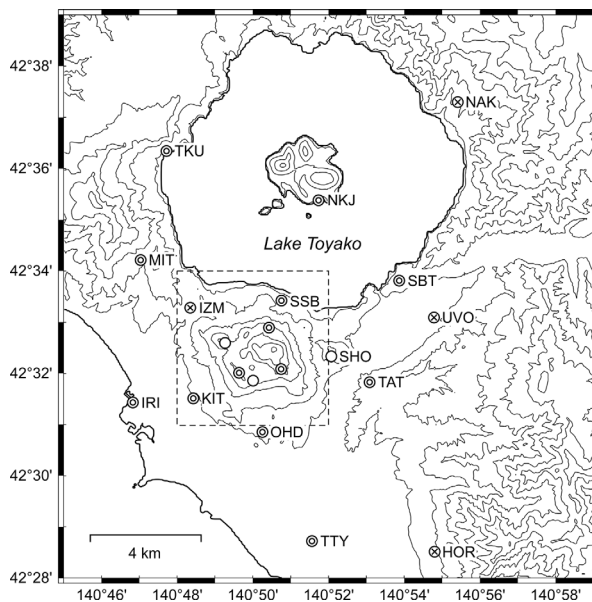


Fig. 1. Map view of continuous seismic station around Usu volcano. Double circle and single circle express 3-component station and single component station, respectively. Circle with cross shows non-operated station during the temporal observation in summer 2006. Rectangle with broken line expresses the area of Fig.3.

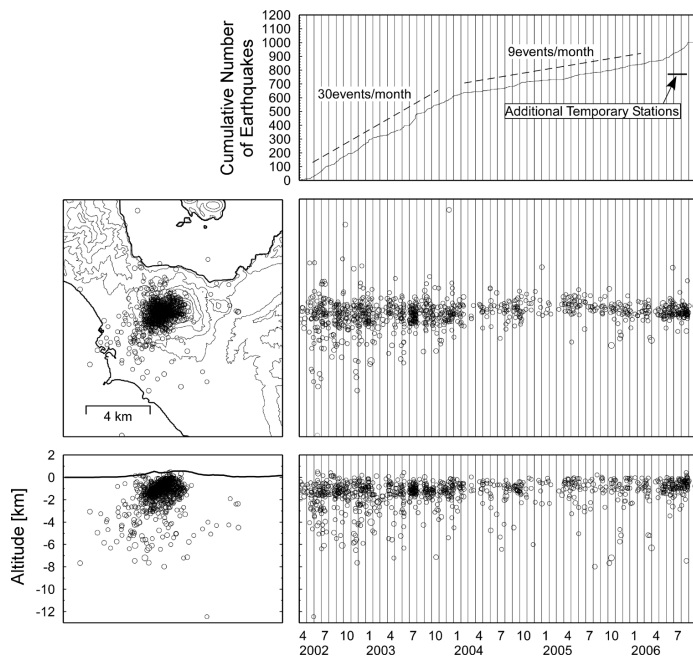


Fig. 2. Space-time distribution of volcanic earthquake of Usu volcano after April 2002. Top graph shows cumulative number of earthquakes around Usu volcano. Hypocenter list by routinely analysis is used here.

だけでなく、山体の周辺を含めた深さ 5-6km のやや深部でも地震活動が見られたが、2004 年以降はやや深部での地震活動が低調になり浅部での活動度も低下した。2002 年と 2006 年の臨時地震観測直前の地震活動度を比べると、地震発生頻度についてはおおよそ 1/3 程度に減少している。

III. 2006 年稠密地震観測

山頂火口原内で定常的な微小地震活動が認められることから、2006 年夏に有珠山集中観測の一環としてこの微小地震活動を対象とした臨時の地震観測を行った。臨時観測点は 2006 年 6 月 1 日から 7 日にかけて順に設置され、8 月 27 日までの約 80 日間運用された。Fig.3 には Fig.1 中に破線で示した有珠山頂周辺部を拡大して、臨時観測期間中の地震観測点分布を示した。主な地

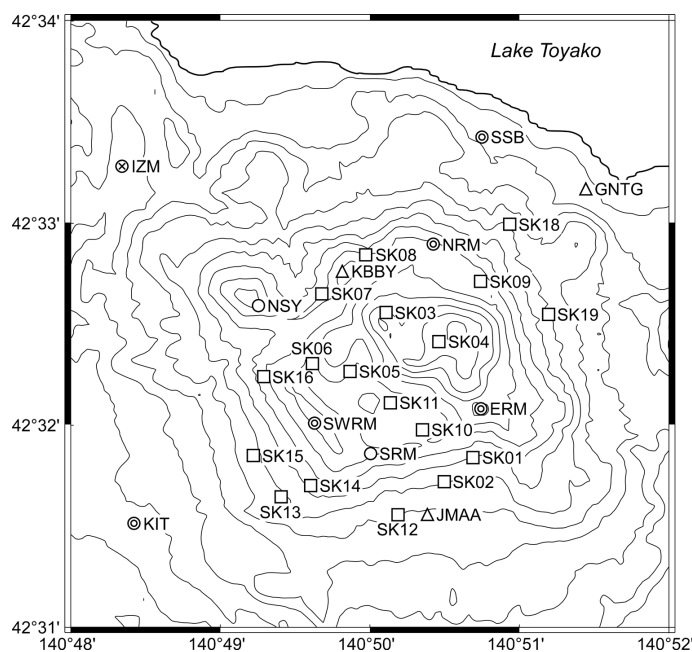


Fig. 3. Station map of temporary seismic observation in 2006. Double circle, single circle and circle with cross are same to Fig.1. Open square expresses temporary station installed by Hokkaido University. Open triangle shows continuous station of Sapporo Meteorological Observatory. Three component stations are SK01, SK03, SK05, SK07, SK10, SK12, SK13, SK16, SK18, SK19, USUA and GNTG. Single component stations are SK02, SK04, SK06, SK08, SK09, SK11, SK14, SK15 and KBBY.

震活動域が山頂火口原内と推定されることからその直上に観測点を展開するとともに、発震メカニズムを明らかにするために有珠火山体を被うように全 18 箇所に設置した。このうち 10 箇所は Mark Products 製 L4C-3D 地震計を用いた 3 成分観測点とし、白山工業製 LS7000XT によりデータ収録を行った。残りの 8 箇所には上下動成分のみの Mark Products 製 L22D 地震計

(2-100Hz)を設置した。L22D地震計の出力は、メタルケーブルを用いて近接する3成分観測点まで伝送し、3成分観測点に設置したLS7000XTへ取り込んだ。山頂火口原内に位置する観測点SK01-SK09については、長期間のデータ欠落を防ぐために無線伝送装置(白山工業製RM300)を用い、既設連続観測点でデータ伝送ネットワークに接続されるオンライン観測点とした。オフライン観測点のSK10-SK19での取得データは変換装置内のCFカードへ収録し、2週間に1度の頻度でバッテリーおよびカードの交換作業を繰り返し行った。これらの臨時観測点に加えて、2006年の集中観測では札幌管区気象台から一時的に臨時観測期間中のデータをリアルタイムで北海道大学へ分岐した。有珠山で発生している地震の規模が小さいことから、気象台が運用する観測点のうち有珠山体に近い3箇所を選び、3成分観測点のUSUA、GNTGおよび上下動観測点のKBBYの連続データを北海道大学のデータと統合した。

IV. 3次元速度構造を導入した震源再決定

1. トリガー処理とリスト作成

臨時観測で得られたデータについては、オンラインとオフラインの観測点で得られたデータを統合した後、オンライン収録された山頂近傍の8観測点(連続観測点:SWRM, NRM, ERM, SRM, NSY; 臨時観測点:SK03, SK05, SK07)の上下動成分のSTA/LTA比に基づいてトリガー処理を行った。STA/LTA比は観測点の環境にあわせて2.0から3.0の範囲とし、トリガー検知の最小観測点数は2点とした。この条件で切り出されたトリガーデータ数は6000個を超えた。

「既設連続観測点のうち最低1箇所でもP波の到着時刻が判別でき、P相とS相をあわせて5相以上の読み取り値がある」という条件で地震波データの手動検測を行った結果、臨時観測期間中に発生した330個余りの火山性地震の震源を推定することができた。この予備的な震源決定処理では地震の判別やミストリガーの除去を目的とし、地震波速度構造には連続観測のルーチン解析で通常用いているのと同じ水平成層構造を仮定した。震源域のごく近傍に設置した臨時観測点のデータでしか判別できないほど小規模の地震までを含めると、有珠山の火口原内の浅部ではさらに高い頻度で火山性地震が発生していると言える。

2. 震源再決定の方法

観測期間中に有珠山近傍で発生したと考えられる330個を超える地震のうち、震源決定の精度を低下させないという観点から、「P波、S波の到達時刻読み取り数が共に5個以上で、かつ、P波とS波をあわせた読み取り数が15個以上」の地震だけを選別し、3次元速度構造を仮定した震源再決定解析の対象とした。この条件を満たす量の読み取り数を持つ地震数は142個であった。到着時刻の読み取り誤差はP波、S波についてそれぞれ0.03秒、0.05秒とし、震源計算の際にはそれらの逆数(P波の読み取りデータはS波の読み取りデータに対し1.67倍)でデータに重み付けをした。

有珠山では第6次火山噴火予知計画に基づき、2001年に人工地震を用いた地下構造探査が行われた。本研究の解析では、人工地震探査によって推定された3次元P波速度構造モデルと、P

波構造から変換して作成した S 波速度構造モデル (Onizawa et al., 2007) を利用した。S 波速度構造への変換は、2000 年噴火に伴う自然地震の震源再決定で採用された関係 $V_p = 1.45 V_s + 0.9$ を用いた。この V_p と V_s の関係は、有珠山近傍では深さが小さくなるにつれて (P 波速度が遅くなるにつれて) V_p/V_s が大きくなる傾向が大局的に認められるためである (鬼澤ほか, 2002)。この関係を用いると、 $V_p = 2.0$ km/s の領域では $V_s = 0.76$ km/s, $V_p/V_s = 2.64$, $V_p = 6.0$ km/s の領域では $V_s = 3.51$ km/s, $V_p/V_s = 1.71$ となる。ただし、この関係を導くにあたって用いられたのは、2000 年の噴火活動に伴って多数発生した深めの自然地震の走時データであり、本研究での解析対象となる山頂火口原下浅部における地震活動に対しては、 V_p/V_s の深さ依存性に関する制約はさほど強くない。人工地震探査データから直接推定された P 波速度構造モデルに比べ S 波の速度構造モデルは不確実性が高いことから、比較の対象として $V_p/V_s=1.73$ とした 3 次元速度構造モデルについても震源再決定解析を行った。

本解析で推定される震源位置は初期値に依存する可能性があるため、初期値選択のためにグリッドサーチを行った。有珠山の山頂を中心とした $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$ 、深さ 10 km までの範囲に初期震源を設定して計算を行い、初期値に依存しない結果が得られていることを確認した。

3. 再決定された震源の時空間分布

Fig. 4 には Onizawa et al. (2007) のモデルを用いて再決定された全 142 個の地震の震源分布を示した。1) 有珠火山北西麓の深さ 1.2 km 、2) 山頂北西部の深さ 1.7 km 、3) 南西麓の深さ

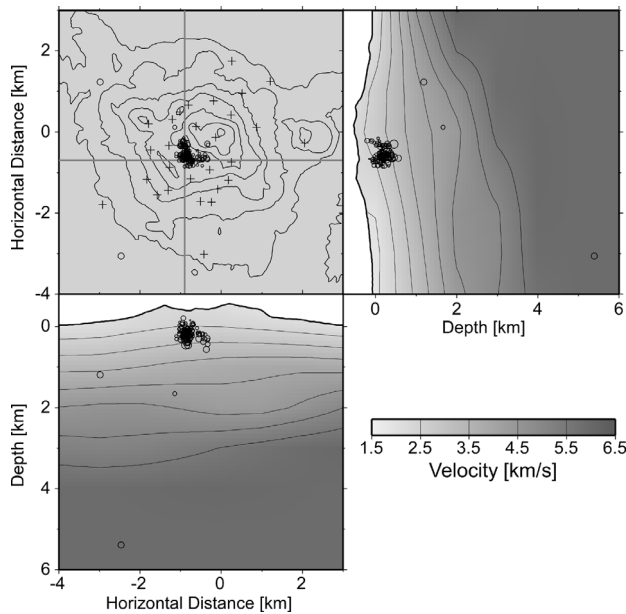


Fig. 4. Hypocentral map for the selected events. Topographic contour interval is 100 m. Cross indicates location of seismic station. The three-dimensional P-wave velocity model is underlain in the E-W and N-S cross sections.

5.4 km に決定された 3 つの地震を除き、すべて山頂火口原下の深さ 1 km 未満に集中して分布している。ここでは山頂火口原内の地震活動に注目するため上記の 3 つを除いた 139 個の地震について、初期震源位置の設定間隔を細かくし再度震源決定を行った。解析対象となった地震のマグニチュードの最小・最大はそれぞれ 1.4 および 1.9 である。山頂火口原内浅部で発生した 139 個の地震について推定された震源分布を Fig.5 に示した。到達時刻の読み取り誤差に起因する震源

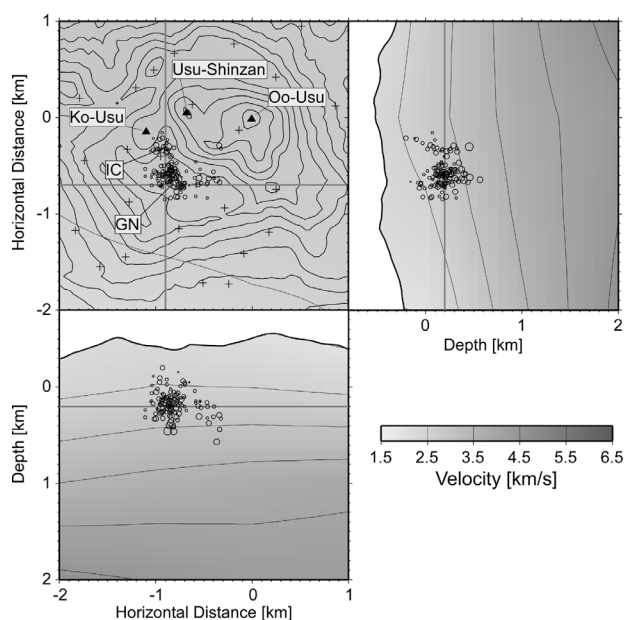


Fig. 5. Hypocentral map for the events occurred beneath the summit crater. Topographic contour interval is 50 m. Cross indicates location of seismic station. Solid triangles express three peaks of the summit domes. IC and GN indicate the location of I-crater and Ginnuma crater, respectively.

位置誤差の標準偏差は、Fig.5 に示された全ての地震に対して水平方向で 50 m 以下、鉛直方向で 100 m 以下である。一方、 $V_p/V_s=1.73$ としたモデルから推定された震源分布は、震央位置は大きく変わらないものの震源深さは平均して 174m ほど深い位置に推定された。これら 2 つのモデルの S 波走時残差を比較すると、Onizawa et al. (2007) の速度構造モデルを用いた場合には S 波走時残差が平均して -0.121 秒であるのに対し、 $V_p/V_s=1.73$ としたモデルでは 0.085 秒と逆に正の値に偏った。この結果は、Onizawa et al. (2007) のモデルでは全体として S 波の理論走時が観測走時よりも遅く、P 波速度に対して S 波速度が遅すぎることを示している。また $V_p/V_s = 1.73$ としたモデルでは、反対に S 波速度が速すぎる。従って、山頂火口原内浅部の地震と今回の観測点配置の組み合わせに対しては、これらの中間にくる V_p/V_s が適切であろうと考えられる。上述のように 2 つのモデルに対する震源位置の違いは基本的には深さ方向への系統的なものであるため、適切な V_p/V_s 値が得られた場合の震源位置は大局的には両モデルに対する震源位置の間に決まると考えてよいであろう。

Fig.5に示したように山頂火口原内で発生している微小地震の震源は、火口原南西部の深さ-200 m から 600 m に集中し、I 火口や銀沼火口の周辺に多く決まる。また銀沼火口の東方や大有珠方面にも分布しており、全体的に北東側に口を開いたおわん型を呈している。震源の集中する領域は、I 火口近傍、銀沼火口近傍、銀沼火口の東方の 3 箇所に大きく分けることができる。

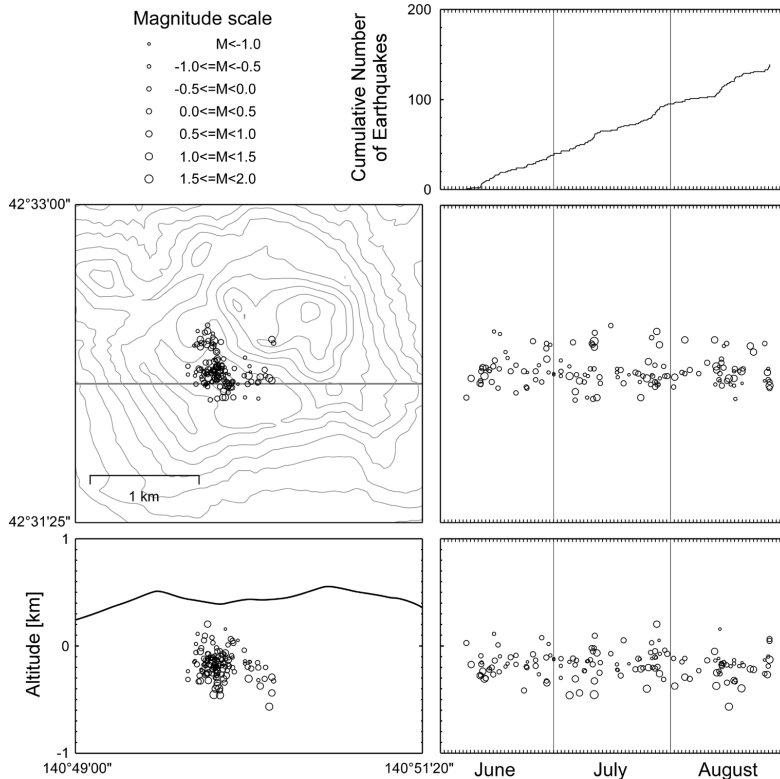


Fig. 6. Space-time distribution of volcanic earthquakes during the temporal observation. Top graph shows cumulative number of earthquakes under the summit crater. Hypocenter list obtained by three-dimensional relocation analysis is used here.

これらの震源域での地震活動を見るため、震源の時空間分布を Fig.6 に示した。最も地震活動度が高いのは銀沼火口近傍で、頻繁に地震が発生していることが分かる（観測期間中に 99 個）。数ヶ月という期間で見れば定常的に地震が発生していると言えるが、地震回数の積算グラフからも分かるように日単位の期間で区切ると地震活動度の高い時期（6月10日頃、7月下旬、8月中旬など）と低い時期（7月中旬や8月上旬など）が認められる。I 火口近傍（同 22 個）と銀沼火口の東方（同 16 個）での地震発生数は銀沼火口近傍に比べると 1/5 程度と少ない。これらの震源域に対する観測点配置の偏りが無いことから、地震発生数の違いは地震活動度の違いを直接表しているものと考えられる。

V. 発震メカニズムの推定

ここでは Onizawa et al. (2007) のモデルを用いた震源再決定で得られた震源位置, 射出角, P 波初動の極性の情報から, 主軸の方向を 5 度ずつ回転させるグリッドサーチにより P 波初動の極性を最も満足するダブルカップル型の発震メカニズムを推定した. Fig.7a にはマグニチュードが

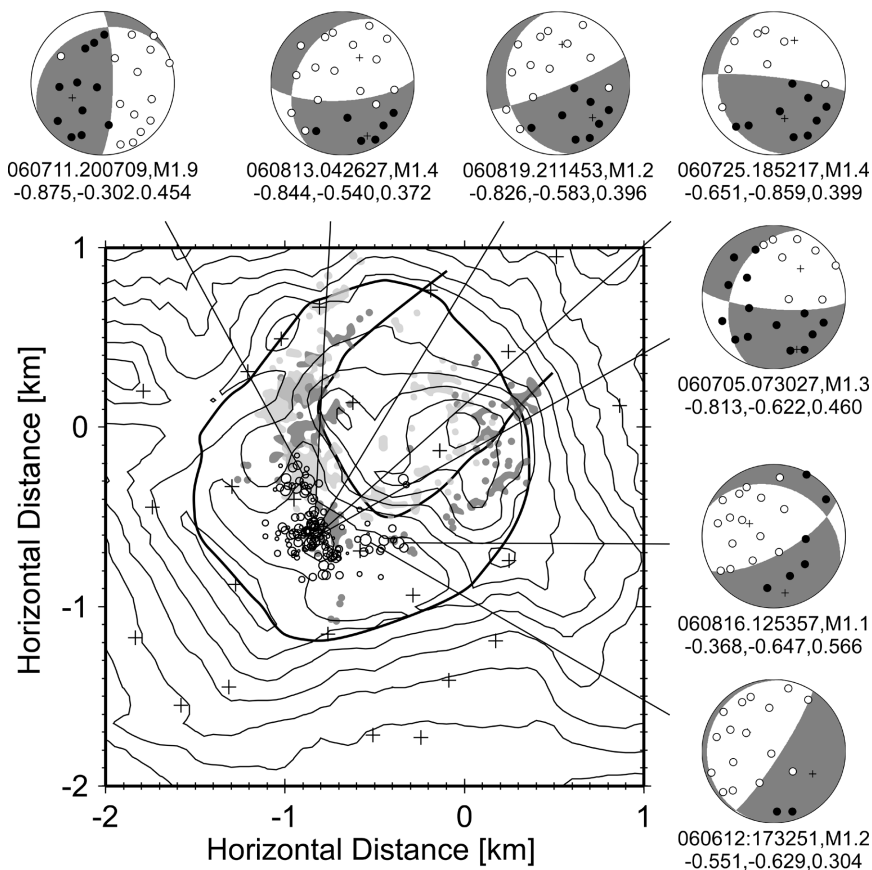


Fig. 7a. Hypocenter location map of relocated earthquakes and focal mechanisms of 7 major earthquakes larger than M1.0. Focal mechanisms are shown by upper-hemisphere projection. Light and dark gray dots overlaid on the map express the hypocenters in October 1977 and April 1978, respectively (Original plot is given by Nishimura and Okada, 1987). Thick lines express crater rim and U-shaped fault shown in Nishimura and Okada (1987).

1 を超えた 7 つの地震を選び, 上半球投影で描いたメカニズム解を震央分布と共に示した. 最も地震発生数の多い銀沼火口近傍の震源域では, 4 つの地震についてメカニズムを推定した. 発震メカニズムは少しずつ異なっているものの, 伸張軸や圧縮軸の方向には共通して認められる傾向

がある．ほぼ東西方向に走向を持つ高角の節面を断層面とすると，いずれも南側のブロックに対して北側のブロックが沈降する **dip-slip** 型メカニズムとなる．I 火口近傍の震源域から選ばれた 1 つの地震については，西側のブロックに対して東側のブロックが沈降する **dip-slip** 型のメカニズムが推定された．銀沼火口の東方の震源域からは 2 つの地震についてメカニズムを示した．高角の節面の走向は東北東－西南西から北東－南西方向を向き，南東側のブロックに対し北西側のブロックが沈降する **dip-slip** 型メカニズムが推定された．

VI. 議 論

山頂噴火となった 1977 年からの活動時には，有珠新山潜在溶岩ドームの成長に関係すると考えられる活発な地震活動が山頂火口原の内部で認められ，研究対象として多くの研究者に取り上げられた．当時は外輪山上に 2 点 (NRM, SRM)，山腹に 4 点 (UVO, GEN, OHD, KON)，山麓に 5 点 (IZU, KIT, SHO, MAT, TAT)，5km 以上の遠方に 3 点 (MIT, HOR, NAK) の地震観測点があった (Okada et al., 1981)．1977 年からの噴火活動に伴う山頂部の地震群について特筆すべきことは，地殻変動との対応関係 (例えば，原田ほか，1978 ; Takeo, 1983) と相似地震群の存在 (例えば，Okada et al., 1981 ; 西村・岡田，1987) である．規模の大きな地震の発生と地殻変動のステップ的な進行は非常に良く対応し，地殻変動データから求められた潜在溶岩ドームの隆起量と地震波データから推定された断層すべり量の間で定量的な関係が示された．ドーム成長に伴う地震群は北東側に口を開いた U 字型断層沿いで発生し，多数の相似地震群の集まりからなることが明らかにされた．特に規模の大きな地震を起こした地震群は，U 字型断層東縁に沿った大有珠溶岩ドーム南東側のグループと断層西縁にそった有珠新山北側のグループで，マグニチュード 4 クラスの地震が発生した．震源の深さ分布は，U 字の底の部分 (南西端) での震源が浅く，西縁と東縁の断層に沿って北東方向へ向かうにつれ深くなる傾向が見られた．

Fig.7a には本研究で得られた震央分布に重ねて，1977 年 10 月の震央位置 (相似なイベントを 1 つ以上持つ地震に限る．N=432) を淡灰色で，1978 年 4 月の震央位置 (N=268) を濃灰色で示した．ここでは西村・岡田 (1987) の Fig.2 にある原図を改変して使用した．当時の解析では $V_p=3.0\text{km/s}$ の一様無限媒質が仮定されているため，3次元速度構造を用いて推定された本研究での震央分布と直接比較することは適切ではないかもしれないが，おおよその位置関係を知る上では良いであろう．I 火口近傍の震源域は 1977 年 10 月の噴火活動の初期に現れた地震活動域に対応するよう見え，銀沼火口近傍の震源域は 1978 年 4 月に現れた地震活動域に対応しているように見える．

ここでは本研究で推定された震源メカニズムと比較する対象として，Fig.7b に原田 (1981) によって求められた 1977 年から 1979 年に発生した地震の平均的なメカニズムの分布を示した．ドーム成長に伴う地震群では，**dip-slip** 型の震源メカニズムが卓越する．U 字型断層の東縁に沿う 4 番から 6 番の地震群，西縁に沿う 12 番から 14 番の地震群では，高角の節面を断層面として考えるとドームの成長を矛盾なく説明することができる (Okada et al., 1981)．U 字の底にあたる

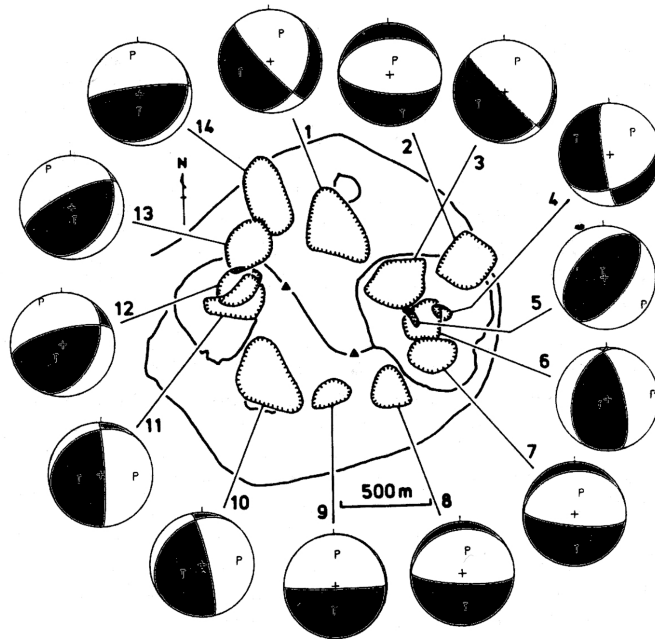


Fig. 7b. Averaged fault mechanisms of volcanic earthquakes during 1977-1982 eruption obtained by Harada (1981). Closed areas with inward ticks express focal zones of earthquake families.

南西部での地震活動についても dip-slip 型のメカニズムが推定されているが、これらは東縁や西縁の地震群とは逆に、火口原に対して U 字型断層の内側が沈降するメカニズムとなっている。Fig.7b の 7 番から 11 番の地震群がこれに相当する。Okada et al. (1981) では地表に現れた非対称の地溝地形や小有珠ドームの沈降現象をよりどころに、新山の隆起に伴って現れた共役断層系の活動で解釈できるとしている。

本研究でメカニズムを推定した 7 個の地震のうち、I 火口近傍の地震は、原田 (1981) の 11 番の地震群と発生位置も近く、東下がりの dip-slip 型を示す震源メカニズムも非常に良く似ていることが分かる。銀沼火口近傍の地震群は、原田 (1981) の 10 番の地震群に対応するものと思われるが、1977 年の噴火活動時は東下がりの dip-slip 型であったのに対し、2006 年には北下がりの dip-slip 型であり原田ほか (1981) の 9 番地震群のメカニズムに近い。銀沼火口の東方の地震群については、位置的には原田ほか (1981) の 9 番地震群に近いが、断層の走向が異なっている。原田 (1981) ではほぼ東西である走向が 2006 年には北東-南西を向き、1977 年からの活動で現れた U 字型断層の東縁に沿うような方向となっている。このように 1977 年からの地震活動とメカニズムに若干の相違点はあるものの、本研究の解析でも U 字型断層の内側が沈降するようなメカニズムが推定されたことは注目に値する。Okada et al. (1981) で述べられている小有珠ドームの沈降をもたらした断層系が既存の弱面となり、現在の微小地震活動に影響を与えているこ

とも考えられる。

Takeo (1983) は 1977 年からの噴火に伴う相似地震についてコーナー周波数から応力降下量を推定し、規模の小さな地震についての断層面積や食い違い量を見積もっている。Takeo (1983) の結果やその他の地震のスケーリング則に関する研究（例えば, Haar et al., 1984）を参考にすると、マグニチュード 1 クラスの微小地震の断層半径は 100m から 300m 程度で、断層面上のすべり量は数 mm から 1cm 程度と考えられる。もし小有珠ドームの沈降に関係した断層やその派生断層が活動していると仮定すれば、測地観測から明らかになっている山頂溶岩ドームの沈降変化や外輪山横断基線の短縮変化と何らかの関係があるのかもしれない。しかし、震源における変動量自体が非常に小さいことから、地殻変動との関係を検討するには焦点を絞った多項目の連続観測を試みる必要があるだろう。

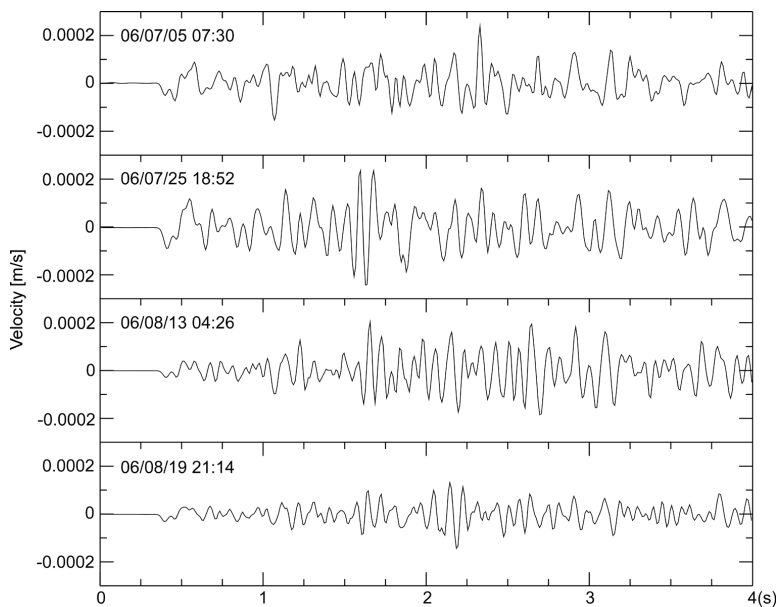


Fig. 8. Waveform examples of 4 major earthquakes belonging to the hypocentral area under the Ginnuma crater. These data were obtained by UD component sensor installed at the station ERM.

現在までの解析では、本研究で得られたデータの中に明瞭な相似地震群は確認できていない。銀沼火口近傍の狭い領域では多くの地震が発生し、マグニチュードが 1 を超える地震が 4 個認められたが、Fig.7a に示したように P 波初動の押し引き分布は 4 個の地震で少しずつ異なっている。これらの地震の波形例を Fig.8 に示したが、波形の相似性は高くないことがわかる。規模の小さな地震を含めた再検討は今後の課題である。

Ⅶ. ま と め

有珠山集中観測の一環として、2006年6月上旬より約80日にわたって有珠山の山頂火口原を取り囲む稠密地震観測点を設置し、山頂火口原内の浅部で発生する微小地震活動についていくつかの興味深い知見を得ることができた。第1には、極めて静穏であるとされてきた噴火休止期における有珠山の地震活動について、臨時観測期間中に330個以上の微小地震の発生を確認し、継続的な地震活動の存在を示したことが挙げられる。ほとんどの地震はマグニチュード0程度もしくはそれ以下で、最大地震のマグニチュードは1.9であった。第2には、微小地震活動の震源域が1977年からの噴火活動で現れたU字型断層に沿う位置に並んでいることが挙げられる。2001年に実施された人工地震探査の成果を活用したことで、震源域が大きく3つに分けられることも本研究で明らかになった。第3には、南火口原に対し溶岩ドーム側が沈降するようなメカニズムが求められたことが挙げられる。測地観測で指摘されている溶岩ドームの沈降や火口原の収縮といった地殻変動との関係を詳しく議論するには、さらに精度を上げたデータの再解析やねらいを絞った観測を行う必要があるだろう。

謝辞 京都大学防災研究所火山活動研究センター、東京大学地震研究所火山噴火予知研究推進センター、白山工業(株)には、2006年の臨時地震観測を行う上で観測機材の調達やデータ収集方法の検討で多大なる支援をいただいた。また岡田弘教授には、本研究の暫定解析結果について、お忙しい中時間を割いて話を聞いていただいた。深く感謝いたします。

文 献

- Haar, L. C., J. B. Fletcher and C. S. Mueller, 1984. The 1982 Enola, Arkansas, swarm and scaling of ground motion in the eastern United States, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **74**, 2463-2482.
- 原田 徹, 1981. 発震機構から見た有珠火山応力場, 火山, **26**, 93-110.
- 原田 徹・山下 済・渡辺秀文, 1978. 1977-78年有珠山噴火に伴う辺長変化の準連続観測, 北海道大学地球物理学研究報告, **38**, 31-40.
- Minakami, T., T. Ishikawa and K. Yagi, 1951. The 1944 eruption of Volcano Usu in Hokkaido, Japan, *Bull. Volcanol.*, Ser.2, **11**, 45-157.
- 森 済・鈴木敦生, 1998. 有珠山の火山性地殻変動: 最近20年間の活動の概要, 北海道大学地球物理学研究報告, **61**, 275-285.
- 西村裕一・岡田 弘, 1987. 1977-78年有珠山の群発地震に見られる震源集中域, 北海道大学地球物理学研究報告, **49**, 23-30.
- Okada, Hm., H. Watanabe, H. Yamashita and I. Yokoyama, 1981. Seismological significance of the 1977-1978 eruptions and the magma intrusion process of Usu volcano, Hokkaido, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **9**, 311-334.
- Omori, F., 1911. The Usu-san eruption and earthquakes and elevation phenomena, *Bull. Imp. Earthq. Invest. Comm.*, **5**, 1-38.
- Onizawa, S., H. Oshima, H. Aoyama, H. Y. Mori, T. Maekawa, A. Suzuki, T. Tsutsui, N. Matsuwo, J. Oikawa, T. Ohminato, K. Yamamoto, T. Mori, T. Taira, H. Miyamachi and H. Okada, 2007. P-wave

- velocity structure of Usu volcano: Implication of structural controls on magma movements and eruption locations, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **160**, 175-194.
- 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.
- Oshima, H. and T. Ui, 2003. The 2000 eruption of Usu volcano, Reports on volcanic activities and volcanological studies in Japan for the period from 1999 to 2002, pp22-31.
- Takeo, M., 1983. Source mechanisms of Usu volcano, Japan, earthquakes and their tectonic implications, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **2**, 241-264.
- ト部 卓, 1994. 多チャンネル地震波形データのための共通フォーマットの提案, 日本地震学会講演予稿集, NO.2, A25.
- Yamamoto, M., H. Kawakatsu, K. Yomogida and J. Koyama, 2002, Long-period (12 sec) volcanic tremor observed at Usu 2000 eruption: Seismological detection of a deep magma plumbing system, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 10.1029/2001GL013996.