

## 浅間山で発生する火山性地震の精密震源決定

及川 純\*・井田喜明\*\*・辻 浩\*\*\*

(2005年7月22日受付, 2006年2月28日受理)

Precise Hypocenter Determination for Volcanic Earthquakes  
Observed at Asama Volcano, Japan

Jun OIKAWA\*, Yoshiaki IDA\*\* and Hiroshi TSUJI\*\*\*

Hypocenters of volcanic earthquakes in Asama volcano were reexamined and precisely determined using additional four seismic stations that had been installed close to the summit crater from 1996 to 1999. The most significant result obtained in the present study is that the groups of shallow earthquakes beneath the summit crater (B-type and N-type earthquakes), which show broad distribution within the depth of 2.5 km according to the old calculation without the four summit stations, are compactly concentrated into a shallower range within the depth of 600 m underneath the west side of the crater. In addition to the conventional method of the hypocenter determination, the double difference method was applied but its application turned out not to have a significant influence on the result. The summit stations were also quite effective in constraining the seismic velocity structure and the P-wave velocity of Asama volcano was determined to be 3.5 km/s so as to minimize the variance between the observed and calculated travel times. Most volcano-tectonic earthquakes (A-type earthquakes) are distributed near the sea level under the west flank of the volcano. The precise hypocenter determination has revealed that there is a seismic gap between the shallow and flank earthquake groups. It is inferred that this seismic gap may represent a magma reservoir because the gap agrees with the location of the pressure source that was estimated from a previous study of the ground deformation.

**Key words:** Asama volcano, volcanic earthquake, hypocenter distribution, double difference method, P-wave velocity

## 1. はじめに

浅間山は長野県と群馬県の境に位置する日本でも代表的な活火山の一つで、主に安山岩質の溶岩やテフラを噴出する。有史以来のほとんどの噴火は、直径約400mの山頂火口で起きたとされる。1108年(天仁元年)や1783年(天明3年)の大噴火は、多量の降下火砕物に加えて、火砕流、溶岩流を出した。20世紀に入って、1960年頃までは、爆発的噴火を頻繁にくり返してきたが、それ以後はあまり活動度の高くない状態が続いた。1973年、1982

～83年に中規模噴火があり、1990年7月20日には微量の火山灰を噴出した。2003年2月から4月にかけて4回の微噴火があった後、2004年9月には、23年ぶりの中規模噴火が起こり、12月まで数回の噴火活動を行った。マグマが直接噴出したことや数回にわたる噴火が起こることなど、噴火活動の規模や推移の仕方を比較すると、2004年の噴火は1973年の噴火活動ときわめて似ている(中田・他, 2005)。Fig. 1は、1970年から2005年半ばまでの浅間山で発生した火山性地震の月別頻度で、山腹に

\* 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1  
東京大学地震研究所  
Earthquake Research Institute, University of Tokyo,  
Yayoi 1-1-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan.

\*\* 〒671-2201 兵庫県姫路市書写 2167  
兵庫県立大学生命理学研究科  
Graduate School of Life Science, University of Hyogo,  
2167 Shosha, Himeji, Hyogo 671-2201, Japan.

\*\*\* 〒384-0061 長野県小諸市大字加増字坂保町 630  
東京大学地震研究所小諸火山化学研究施設  
Komoro Observatory of Volcano-Chemistry, Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Kamasu-aza-Sakahomachi 630, Komoro, Nagano 384-0061, Japan.

Corresponding author: Jun Oikawa  
e-mail: oikawa@eri.u-tokyo.ac.jp

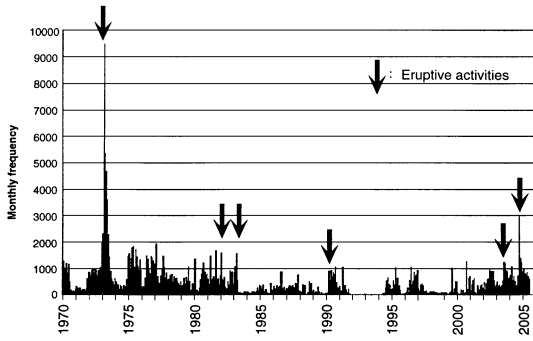


Fig. 1. Monthly frequency of the volcanic earthquakes observed at Asama volcano from 1970 to 2005. Arrows represent the time of eruptive activities.

ある観測点 (Fig. 2 の SAN) で観測される震動記録から波形を基に火山性地震の数を数えた頻度分布である。火山性地震の活動は、1983 年の噴火以降極端に低調になっていた。1990 年、1994 年から 1995 年にかけて、1996 年とやや地震活動が多い時期はあるものの、低調な時期は 2000 年まで続いた。2000 年末頃から地震発生数が増え、2004 年の噴火活動に至った。

浅間山で発生する火山性地震は、その震源位置や波形の特徴から幾つかに分類されてきた (たとえば Minakami *et al.*, 1970)。最近の観測、研究から浅間山の火山性地震は、火口直下に分布する B 型地震、B 型地震の震源分布域からやや西側の深部に分布する A 型地震、これらの地震とは別に火口から離れた山腹で発生する F 型地震、そして B 型地震の震源域で発生するが減衰振動的な波形をもつ N 型地震にそれぞれ分類されている (鎌山・他, 1982; 井田, 1995; 及川, 2003)。

その中で、火口直下で起こる B 型地震は最も発生頻度が高く、時折群発する傾向がある。過去の噴火には、その直前に B 型地震が群発した例も少なくない。従って、浅間山の地震活動や噴火活動を把握する上で、B 型地震の震源を精度良く決めることはきわめて重要である。この目的のため、東京大学地震研究所では 1996 年 10 月に山頂火口近傍に 4 点の地震観測点を新設した (辻・他, 1998)。これは、山頂火口直下で発生する B 型地震の震源分布を精度よく決定し、また、震源域に近い点で観測することにより良質の波形データを得るためである。震源域の直上の観測点には、地震波がほぼ鉛直方向に通ることになり、特に深さの決定精度が良くなることが期待される。

本研究の目的は、この 4 観測点が存在した期間の地震データをを用いることによって、浅間山で発生する火山性

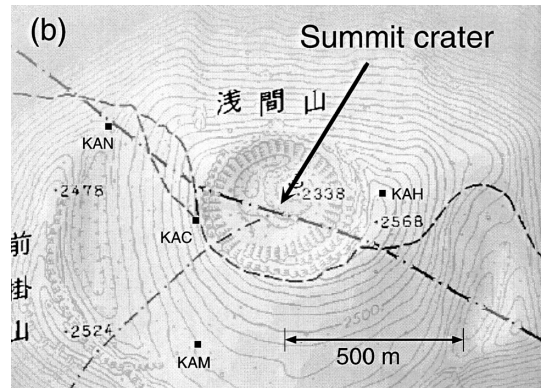
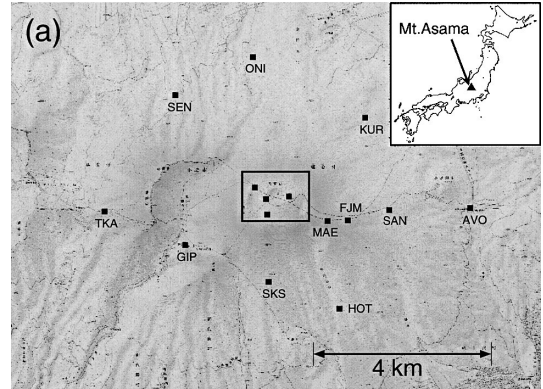


Fig. 2. Network of seismic stations in Asama volcano. (a) The whole network. (b) The network near the summit crater.

地震の震源を出来るだけ精密に決定し、その意味を明らかにすることにある。山頂観測点のデータを加えること、地震波速度を同時に決定することにより、特に B 型地震の震源決定精度が向上することが期待される。さらに、Double Difference 法も用いた震源決定の結果を述べ、精密な震源分布に基づいて、浅間山のマグマ供給系の実態や 2004 年噴火との関係についても議論する。

## 2. 観測点密度と震源分布

1996 年 10 月から 1999 年 6 月まで東京大学地震研究所が浅間山に展開していた地震観測網を Fig. 2 に示す。Fig. 2 (a) はこの期間中の全地震観測点分布で、1996 年 10 月に新設した 4 観測点がある山頂火口付近の拡大図を Fig. 2 (b) に示す。全地震観測点に固有周期 1 秒、減衰定数 0.7 の速度型地震計が設置された。GIP, SKS, HOT, SEN の 4 観測点は上下動 1 成分、その他の観測点はすべて 3 成分である。TKA を除いた 14 観測点の地震データは、金属ケーブル、光ケーブル、無線、NTT 回線により

一旦浅間火山観測所 (Fig. 2a の AVO) に集められる。データ収録装置では通常アンプゲインが 30 dB ないし 36 dB、分解能が 16 ビットで、サンプリング周波数は 120 Hz である。そして衛星地震観測システムによって、浅間山山頂火口より南西 12 km にある小諸火山化学研究施設に転送される。TKA の地震データは直接、無線テレメータによって小諸火山化学研究施設に伝送される。

小諸火山化学研究施設で収集された全地震観測点のデータは、WIN システム (卜部・東田, 1992; 卜部, 1994) によって収録および検測処理がなされている。浅間山の火山性地震は、殆どが S 波の初動が不明瞭であるため、震源決定は P 波の初動のみを用いて行ってきた。ルーチンワークとして震源決定に用いている P 波の速度構造は、最上層 (山体および海面下 4 km まで) が 2.5 km/s、それ以下が 6.1 km/s の水平成層構造である (沢田・他, 1983; 辻・他, 1990)。

本研究では、山頂観測点が存在した期間の内、1996 年 11 月から 1998 年 12 月までに発生した火山性地震を対象とする。この中で、震源決定された地震の震源分布を Fig. 3 に示す。震源決定には WIN システムに組み入れられているプログラム hypomh (Hirata and Matsu'ura, 1987) を用い、P 波初動のみを使って行なった。内訳は、A 型地震、B 型地震、N 型地震、F 型地震がそれぞれ 23 個、213 個、5 個および 4 個である。発生時期は、A 型地震、N 型地震に関しては特異な傾向は見られない。B 型地震は、1996 年 11 月および 12 月に群発活動が起こっており、本研究で用いた B 型地震のうち約半数がこの時期に起こっている。それ以外に特徴的な傾向は見られない。F 型地震はすべて 1997 年に発生したものであるが、特に群発活動などは起こっていない。

山頂の 4 観測点による震源決定に対する影響を明らかにするため、Fig. 3 (a) に山頂の 4 観測点の読み取りを使用しないで震源決定した震源分布、Fig. 3 (b) に使用して震源決定した震源分布を示した。震源決定の平均誤差は、山頂観測点を用いない場合は水平方向に約 30 m、鉛直方向に約 115 m であり、山頂観測点を用いた場合は水平方向に約 25 m、鉛直方向に約 35 m であった。比較して明らかなように、特に深さ方向の震源決定精度が上がって、A 型地震、B 型地震の発生領域の区別が鮮明になり、空白域の存在が明らかになった。

### 3. 地震波速度の推定と震源分布

東京大学地震研究所浅間火山観測所で用いている最上層の P 波速度が 2.5 km/s の速度構造は、1980 年代に設置していた地震観測網でとったデータを用いて、震源決定の残差を最も小さくする P 波速度を推定したもので

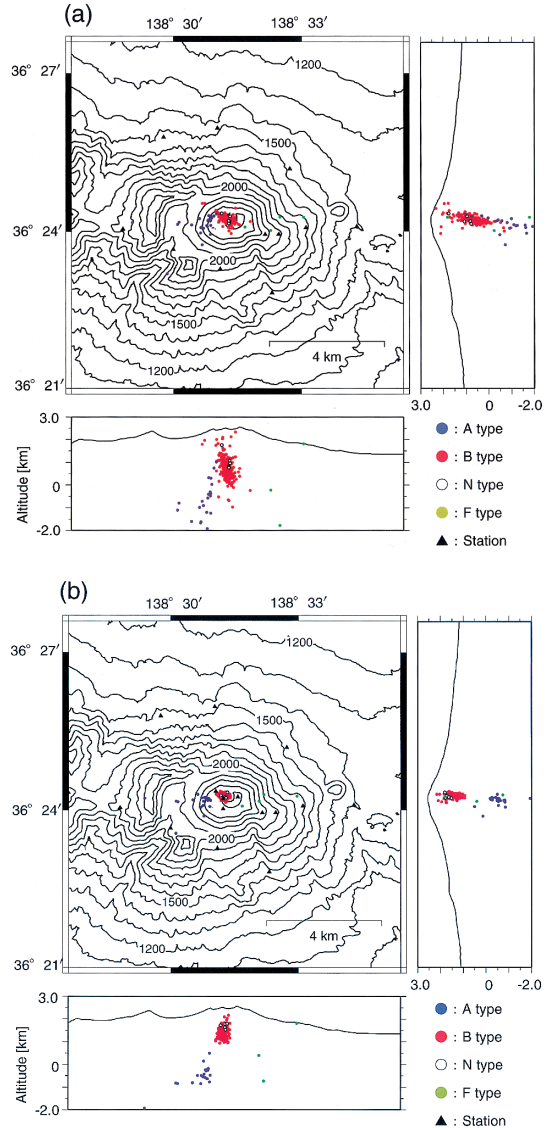


Fig. 3. Hypocenter distributions of volcanic earthquakes at Asama volcano using the network (a) without and (b) with four stations near the summit crater.

ある (辻・他, 1990)。本研究で用いたデータは山頂の 4 観測点を含む地震観測網で得られているため、ここでは、山頂観測点のデータも用いて P 波速度の推定を行う。

観測された地震データのうち比較的初動の立ち上がりが見え、振幅の大きな地震を選ぶ。次に P 波速度を仮定して震源決定を行った結果の走時残差 (観測走時-理論走時) の 2 乗平均を求め、選んだ地震全体にわたるその

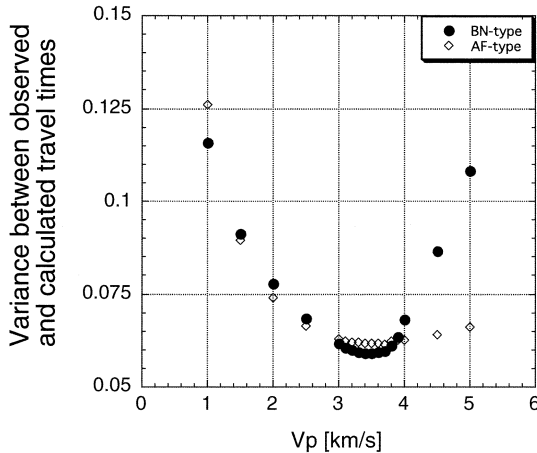


Fig. 4. Variance between observed and calculated travel times as a function of shallow seismic velocity for B and N type earthquakes (●) and for A and F type earthquakes (◇).

平均値を求める。P波速度を1 km/sから6 km/sまで変化させて求めた平均値をグラフにしたものがFig. 4である。図中で●はB型地震とN型地震に対応するもの、◇はA型地震とF型地震のうち地下深部で発生している地震に対応するものである。これらは、山頂直下の浅部で発生している地震と、これ以外の深部で発生している地震で独立にP波速度を推定して比較するために分けた。残差の2乗平均の平均を最も小さくするP波速度が浅間山周辺の最上層のP波速度と考えられる。B型地震、N型地震を用いて推定されるP波速度は3.5 km/sとなる。また、A型地震、F型地震の場合は、残差平均の最小値をとるのは3.7 km/sであり、3.5 km/sより若干速めに求められる。しかしながら、残差平均はP波速度が3.4 km/sから3.7 km/s付近まではほぼ同じ値となっており、3.5 km/sとしても良いであろう。したがって、本研究では、浅間山周辺の最上層のP波速度は3.5 km/sと結論する。

P波速度を3.5 km/sとした場合の震源分布はFig. 5となる。P波速度を2.5 km/sとして求めた震源分布(Fig. 3 (b))と比較すると、震央分布はほとんど変化なく、震源の深さが全体的に浅くなっているのが判る。B型地震およびN型地震の発生領域は、震央が山頂火口内のやや西よりで東西方向に500 m程度、南北方向に300 m程度の広がりを持ち、山頂火口直下から深さ700 m程度の部分になる。この発生領域直下は空白域となっている。A型地震は空白域の西に分布し、大部分は海水準付近に分布している。F型地震については、浅間山の

東側山腹直下にまばらに発生している。ほとんどすべての地震は、山頂を通り東西に伸びる面の付近に分布しているが、これは、浅間山周辺の東西圧縮である広域応力場(塚原・池田, 1991)の圧縮軸方向に分布していることになる。

#### 4. 高精度震源決定法 (Double difference method) の適用

地震の発生領域が限定されている場合に、地震間の相対震源を精度よく求める方法にDouble Difference法(以下、DD法と記す)(Waldhauser and Ellsworth, 2000)がある。これは、震源から観測点までの波線がほぼ共通になる地震の対がある場合、すなわち、震源から観測点までの距離にくらべて地震の対の距離が無視しうる程度である場合に、観測走時残差と理論走時残差の差を最小にするように相対震源を求める方法である。特に、観測網にくらべて狭い領域に震源が分布している群発地震などの詳細な相対震源を決める場合に有効とされている。本研究で対象にしている浅間山の火山性地震は、特にB型、N型地震が山頂火口直下に集中しており、DD法の適用が有効と考えられる。なお、本研究では、Waldhauser作成のプログラムhypoDD(Waldhauser, 2001)を観測点の高度を組み込むように改良して用いている。

本研究で対象にしている1996年11月から1998年12月までに浅間山で発生して従来の方で震源決定されていた火山性地震(Fig. 5)に対してDD法により震源再決定された結果をFig. 6に示す。また、それぞれの火口周辺の拡大図をFig. 7 (a)および(b)に示す。DD法では、パラメータにおいて相対位置を計算する対の地震の最大距離を設定するが、本研究では500 mとしている。

B型地震、N型地震に関しては、218個の地震のうち210個が再決定されたが、震央分布がより集中するようになり、分布域は火口のやや西より直下で、東西方向に400 m程度、南北方向に200 m程度の広がりとなった。深さ方向では、山頂火口底付近の地震がやや深く決まるようになり、山頂火口直下から深さ600 m程度の広がりになった。またA型地震23個のうち3個、F型地震は全部が、対が見つからない地震となり再決定の対象とならず削除された。A型地震の発生領域は、見かけ海水準付近の2つのグループに分かれたが、これは、数が減った結果である。

## 5. 議 論

### 5-1 地震波速度と観測点分布について

本研究で見積もった浅間山最上層のP波速度は3.5 km/sであり、同様に走時残差を用いて推定した辻・他



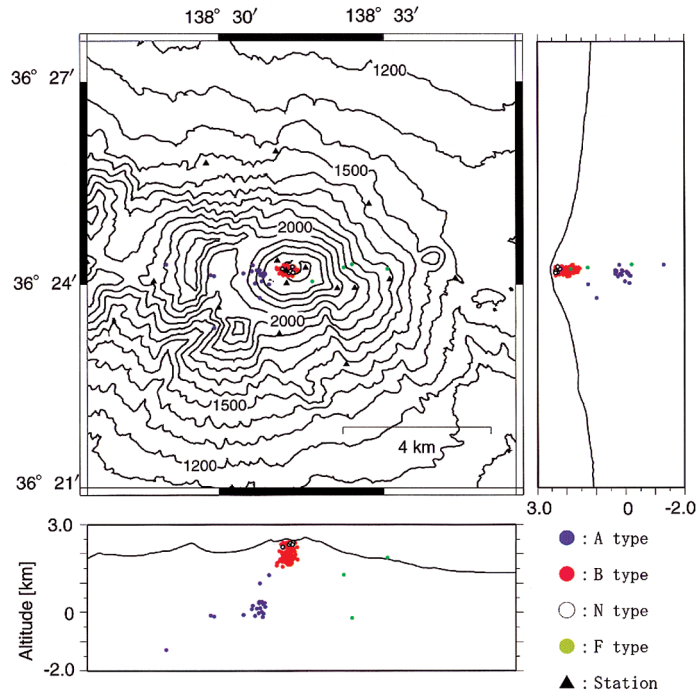


Fig. 5. Hypocenters determined using the P-wave velocity of 3.5 km/s that is considered to be of the best estimate.

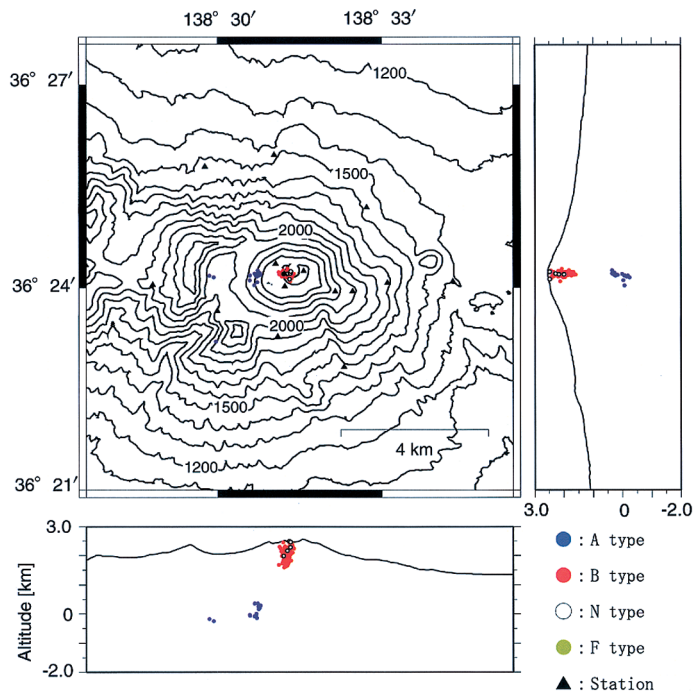


Fig. 6. Hypocenter distributions of volcanic earthquakes at Asama volcano determined by the double difference (DD) method.

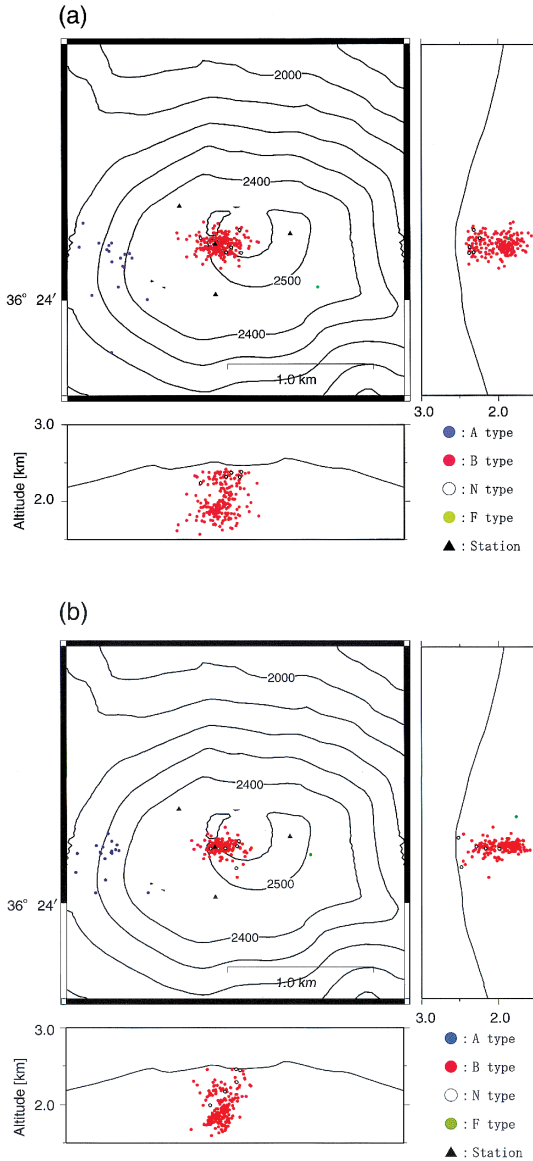


Fig. 7. Hypocenter distributions near the summit crater determined (a) by an ordinary method and (b) by the double difference (DD) method.

(1990) の  $2.5 \text{ km/s}$  とは異なっている。辻・他 (1990) は、1980 年台に観測された火山性地震のデータを用いているが、当時は、本研究で用いている山頂火口近傍の観測点は存在していない。そこで、比較のため、本研究に用いたデータで、山頂観測点の読み取り値をのぞいたデータセットを作り、残差の 2 乗平均を調べてみた。Fig. 8 の●は B 型地震、N 型地震の残差平均を示しているが、残差を最も小さくする P 波速度は  $2.5 \text{ km/s} \sim 3.3 \text{ km/s}$  と

なり、山頂観測点を含めた推定値 ( $3.5 \text{ km/s}$ ) より小さく推定された。従って、P 波速度の推定値の違いは、山頂観測点の有無に因るものと考えられる。山頂観測点を用いた場合に P 波速度が速く推定されるのは、火口近傍を含む領域の P 波速度が周囲よりも速く、波線が通る山頂観測点を用いた推定値が速くなった可能性がある。震源決定における残差平均を用いて地震波速度を推定する方法は、その観測網周辺の平均的な地震波速度を推定することになるが、精度良く決めるためには震源決定そのものの精度を上げる必要がある。従って、山頂観測点を用いた本研究で推定した値がより現実的であると考えられる。

なお、Fig. 8 の◇は A 型地震、F 型地震の残差平均を示しているが、これは山頂観測点を含めて調べた場合 (Fig. 4 の◇) とほぼ同じで、 $3.8 \text{ km/s} \sim 4 \text{ km/s}$  程度に推定できる。これは、A 型地震、F 型地震の震央が火口から大きくずれており、また、深い地震であることから、その震源決定に関しては、山頂観測点のデータに大きく依存することがないためであろう。

## 5-2 圧力変動源との関係について

宮崎 (1990) は、浅間山の水準測量データを解析して、1939~1950-53 年、1954~1958 年、1976-77~1981 年の各期間の観測された上下変動は、いずれも山頂火口直下、深さ  $2 \text{ km}$  における圧力源の増減圧 (Fig. 9) によって説明できることを示した。この圧力源の位置は、今回示された震源分布で見ると、B 型地震発生領域の直下、A 型地震発生領域の東側の空白域にある。これは、火山活動が活発化している時期にはマグマが溜まる場所であり、構造的に地震が発生しにくい領域になっていると考えられる。更に宮崎 (1990) は、1934~1939 年の間に生じた浅間山西側の変動を、山頂火口西方  $2 \text{ km}$ 、深さ  $7 \text{ km}$  における圧力源の増圧 (Fig. 9) で説明できるとした。これは A 型地震の震源領域から更にやや西側の深部に位置する。この圧力変動源に関しては、1990 年~2004 年の水準データの解析によりダイク状マグマの貫入であった可能性も指摘されているが (小野・他, 2005)、2004 年の噴火直前には GPS 観測によってダイク状マグマの貫入 (青木・他, 2005) (Fig. 9) が推定されており、浅間山においては、山の西側からマグマが供給されるのが示唆される。A 型地震は、その発生域がこのマグマの供給路またはその周辺の地震学的に破壊されやすい領域と考えられ、マグマの移動や応力変化などによって発生すると考えられる。また、B 型地震、N 型地震は、火口直下の空白域と火口を結ぶ火道の周辺で発生しているようにみえる。浅間山では、目立った表面現象が無い場合でも火山性地震の発生と噴気活動は恒常的に続いており、火口か

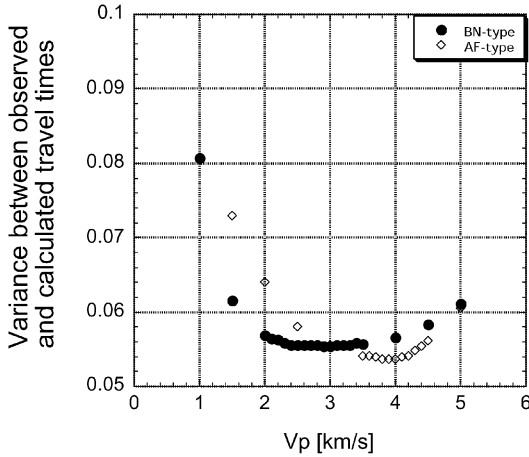


Fig. 8. Variance between observed and calculated travel times as a function of shallow seismic velocity for B and N type earthquakes (●) and for A and F type earthquakes (◇) using the network without four stations near the summit crater.

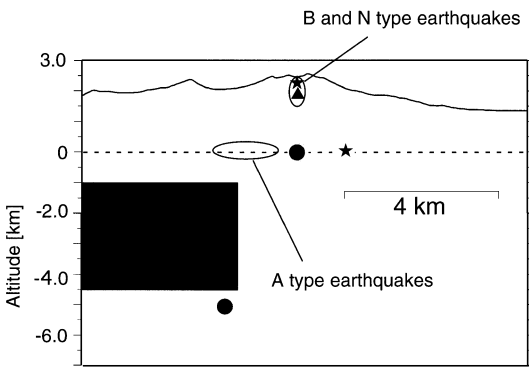


Fig. 9. A vertical view illustrating the relation between pressure sources revealed by analysis of crustal deformation data and earthquake locations. Solid circles, a solid triangle and solid stars are isotropic pressure sources determined by Miyazaki (1990), Oikawa *et al.* (2004) and Takagi *et al.* (2005), respectively. A solid rectangle is an intruded dike determined by Aoki *et al.* (2005).

らの噴気をもたらす火山性流体の流れが、B型地震、N型地震の発生に関与している可能性がある。また、及川・他(2004)や高木・他(2005)は、山頂におけるGPS繰り返し測量によって、山頂火口直下の深さ1 km程度以浅に圧力変動源になる領域があることを推定している(Fig. 9)。これは、B型地震、N型地震の発生領域周辺が

圧力変動源となりうる構造をしていることを意味しており、これが、B型地震が群発するメカニズムに関与しているであろう。

5-3 2004年噴火活動との関係

山本・他(2005)、東京大学地震研究所(2005)は、2004年9月の浅間山噴火の前後の火山性地震に関して、8月31日から9月1日の噴火までの群発地震の精密震源決定をおこない、震源が火口直下300 mから700 mに集中していることを示した。これは、本研究で示したB型地震、N型地震の発生領域とおおむね一致している。9月1日の噴火前後の解析において、山本・他(2005)、東京大学地震研究所(2005)は、山頂火口の観測点KAH、KACのデータを用いることに加え、噴火直前に火口周辺に設置していた地震計アレイの観測データも用いており、本研究で用いたデータと同等の精度をもって震源決定されていると考えられる。また、山本・他(2005)、東京大学地震研究所(2005)は、2004年1月から2005年1月まで観測された火山性地震のDD法による震源決定をおこない、山頂火口直下から海面下1 km程度までおよび海面下1 kmのまま西に伸びる震源分布を示している。これは、本研究で明らかにした空白域を突き抜けた震源分布となっている。2004年9月以降の噴火活動は、山体西方からマグマが貫入し(青木・他, 2005)(Fig. 9)、山体直下から上昇して山頂火口直下の圧力変動源に溜まった後、噴火したと考えられている(高木・他, 2005)(Fig. 9)。このマグマの貫入によってA型地震が発生し、マグマ上昇に伴ってB型地震、N型地震発生領域で群発地震が起こったと推定される。また、マグマの上昇によって空白域でも火山性地震が発生するようになった、とも考えられるが、噴火以後には山頂観測点が無いなどの観測網の違いもあり、现阶段ではその差異を議論することは難しい。

6. 結 論

本研究は、浅間山において山頂火口周辺観測点を含めて、もっとも精度よく震源決定が出来ると考えられる1996年11月~1998年12月のデータを用いて、浅間山で発生する火山性地震の震源決定をおこない、以下の事項を明らかにした。

1. 浅間山の地下浅部のP波速度は3.5 km/sである。
2. B型地震、N型地震は、火口のやや西より直下で、東西方向に400 m程度、南北方向に200 m程度の広がりを持ち、深さは、山頂火口直下から600 m程度までに集中している。
3. B型地震、N型地震の発生領域の直下は、地震空白域となっており、地殻変動の圧力変動源の位置にもあ

たので、マグマが溜まる場所とも考えられる

4. A型地震は、地震空白域の西側に分布しており、浅間山西方からのマグマ供給路周辺で発生している。

## 謝 辞

東京大学地震研究所浅間火山観測所の小山悦郎氏には、浅間山で発生する火山性地震の頻度分布データをいただいた。本論文の作図には国土交通省国土地理院発行の数値地図25000長野、カシミール(杉本, 2002), GMT (Wessel and Smith, 1998)を用いた。Double Difference法による解析には、USGSのWaldhauser氏による解析プログラムhypoDD (Waldhauser, 2001)を用いた。名古屋大学の中道治久氏、東京大学地震研究所の永井 悟氏には、hypoDDを観測点標高を組み込めるように改良するためにご協力いただいた。編集担当の西村太志氏および匿名の査読者2名には多くの建設的なご意見をいただき、本論文の内容が大きく改善された。ここに感謝いたします。

## 引用文献

- 青木陽介・渡辺秀文・小山悦郎・及川 純・森田裕一 (2005) 2004-2005年浅間山火山活動に伴う地殻変動。火山, **50**, 575-584.
- Hirata, N. and Matsu'ura, M. (1987) Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using non-linear inversion technique. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **47**, 50-61.
- 井田喜明 (1995) 浅間山. 火山噴火予知連絡会20年のあゆみ(気象庁火山業務資料), 134-149.
- 鍵山恒臣・行田紀也・小山悦郎・辻 浩 (1982) 浅間火山山腹に発生した地震の震源とメカニズム。火山, **27**, 311-313.
- Minakami, T., Utibori, S., Hiraga, S., Miyazaki, T., Gyoda, N. and Utsunomiya, T. (1970) Seismometrical studies of volcano Asama part 1. Seismic and volcanic activities of Asama during 1934-1969. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **48**, 235-301.
- 宮崎 務 (1990) 水準測量から明らかにされた日本の活動的火山の地殻変動。地震研究所彙報, **65**, 665-807.
- 中田節也・吉本充宏・小山悦郎・辻 浩・卜部 卓 (2005) 浅間山2004年噴火と過去の噴火との比較による活動評価。火山, **50**, 303-313.
- 及川 純 (2003) 火山性地震・火山性微動の観測と発生機構。マグマダイナミクスと火山噴火(鍵山恒臣編), 79-101.
- 及川 純・松島 健・河野裕希・小山悦郎・辻 浩 (2004) GPS測量から推定した火口直下の圧力変動源。

- 日本火山学会講演予稿集2004年度秋季大会, 206.
- 小野幸治・村瀬雅之・木俣文昭・宮島力雄・太田雄策・仮屋新一・西前健一・柏木雅生・森 濟・青山裕・寺田暁彦・小山悦郎・竹田豊太郎・長田 昇・渡辺秀文 (2005) 浅間火山における2004年水準測量の結果と(1935年-1939年-1953年に観測された)上下変動にもとづく圧力源の推定。「2004年浅間火山の噴火に関する総合的調査」(平成16年度化学研究費補助金研究成果報告書), 37-39.
- 沢田宗久・行田紀也・長田 昇・小山悦郎・辻 浩・鍵山恒臣・宮崎 務 (1983) 浅間山のP波速度構造。火山, **28**, 301-304.
- 杉本智彦 (2002) カシミール3D入門。実業之日本社, 148 p.
- 高木郎充・福井敬一・藤原健治・上田義浩・飯島 聖・山本哲也・坂井孝行・菅野智之・湯山弘明 (2005) 地殻変動から推定される2004年浅間山噴火前後の浅部マグマ供給系。火山, **50**, 363-375.
- 塚原弘明・池田隆司 (1991) 本州中央部の地殻応力方位分布—応力区とその成因。地質学雑, **97**, 461-474.
- 辻 浩・行田紀也・小山悦郎・井田喜明・鍵山恒臣・萩原道徳 (1990) 浅間山の地震波速度と火山性地震の分布。日本火山学会1990年秋季大会講演予稿集, 70.
- 辻 浩・行田紀也・小山悦郎・及川 純・井田喜明 (1998) 浅間火山の山頂地震観測。東京大学地震研究所技術報告, **No. 2**, 135-140.
- 東京大学地震研究所 (2005) 噴火直前の群発地震と火山性地震の震源分布(9/29/2004~1/31/2005)。第100回火山噴火予知連絡会資料, 気象庁.
- 卜部 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。地震学会1994年度秋季大会講演予稿集, **No. 2**, 384.
- 卜部 卓・束田進也 (1992) WIN-微小地震観測網波形検測支援のためのワークステーション・プログラム(強化版)。地震学会1992年度秋季大会講演予稿集, **No. 2**, 331.
- Waldhauser, F. and Ellsworth, W.L. (2000) A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the Northern Hayward Fault. *California, Bull. Seis. Soc. Amer.*, **90**, 6, 1353-1368.
- Waldhauser, F. (2001) hypoDD — A program to compute double-difference hypocenter locations. U.S.G.S. open-file report 01-113.
- Wessel, P. and Smith, W.H.F. (1998) New, improved version of the Generic Mapping Tools released. *EOS, Trans. Amer. Geophys. Union*, **79**, 579.
- 山本真紀・武尾 実・大湊隆雄・及川 純・青木陽介・植田寛子・中村 祥・辻 浩・小山悦郎・長田昇・卜部 卓 (2005) 2004年浅間山噴火に先行する特異な長周期地震活動。火山, **50**, 393-400.

(編集担当 西村太志)