

草津白根山における常設地震観測と 1989年1月6日の小噴火

地震研究所

井	田	喜	明
長	田	昇	
沢	田	宗	久
小	山	悦	郎
鍵	山	恒	臣

(平成元年5月9日受理)

要 旨

火山噴火予知計画の一環として、地震研究所では、草津白根山の湯釜、涸釜、水釜火口の周囲に、6観測点からなる常設的な火山観測網を展開した。観測の中心は地震動であるが、地中温度、噴気温度、電気伝導度についても、連続観測を試行している。観測データは、無線テレメータにより、東京の地震研究所まで常時伝送される。地震研究所で受信したデータは、富士山や伊豆大島のデータと一緒に、ミニコンピュータにより、リアル・タイムで処理される。地震動のデータは、先ず振巾のレベルにより、次にノイズレベルや着震時刻も考慮して、地震かどうかの判定がなされる。更に、周辺の広域微小地震観測網のデータと比較して、火山内部の地震かどうか判断される。震源はオフラインで計算され、データに最もフィットするP波速度として2.5 km/s が得られた。

草津白根山では、1988年9月末から10月にかけて、火山性地震がやや群発的に発生した。その震源は、水釜火口南東部に集中した。その後、地震の震源は浅くなり、ほぼ同じ地点で間欠的な火山性微動が活発化した。1989年1月6日になると、連続的な微動が湯釜火口付近で起こり、24時間近くも継続した。それに伴って、湯釜火口の北西火口壁の付近の湖面下で、熱水か水蒸気（又は水蒸気を主体とする火山ガス）の急激な噴出があり、若干の火山灰が火口湖面およびその近傍に散布された。この小噴火の後には、震源が水釜火口南東部に集中する傾向は弱まった。水釜火口の南東部における火山性地震と火山性微動の活動は、マグマや水蒸気の移動と対応し、1月6日の小噴火の準備過程であったと推定される。

1. はじめに

草津白根山は、群馬と長野の県境近くに位置する活火山で、その約25 km 南には浅間山がある (Fig. 1)。火山体は、安山岩質の溶岩や火山砕屑物からできており、約1万年前に始まった新期火山活動で、白根山、逢ノ峰、本白根山の火砕丘が形成された (宇都他, 1983)。その後の噴火活動は、白根山とその付近に局在し、水蒸気爆発によって多数の爆裂火口がつけられた。

この火山には、1805年より古い噴火活動の歴史記録が残されていない。記録のある十数回の噴火は、全て水蒸気爆発で、1902年弓池で起きたものを除くと、白根山山頂の湯釜、

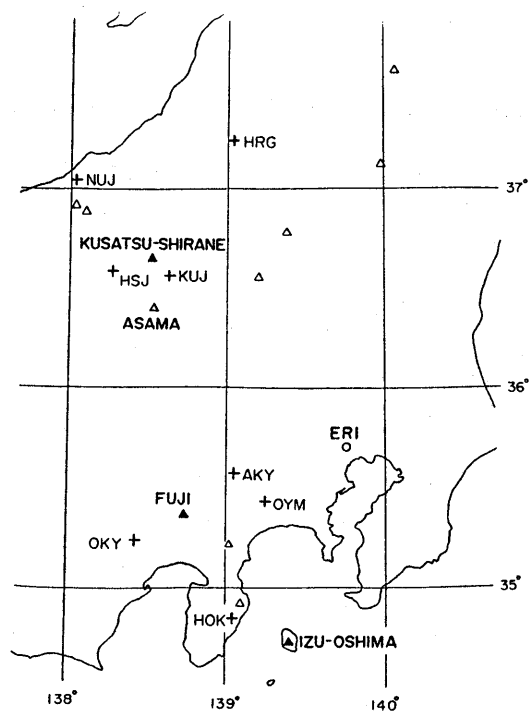


Fig. 1. Location of Kusatsu-Shirane volcano. Solid triangles show volcanoes at which the Earthquake Research Institute has permanent stations for volcanological studies. Some ambient stations (+) belonging to the Kanto-Koshinetsu seismic network of Earthquake Research Institute supply subsidiary data for analysis of volcanic earthquakes.

酒釜, 水釜の3爆裂火口とその近傍で発生している(水上, 1984; 気象庁, 1984). 噴火は, これらの火口の内部か縁で起こることが多いが, 1942年の噴火では, 火口の南東側および北側で, 割れ目に沿って小爆裂火口群が形成された. 最も新しい噴火は, 1982年10月から1983年12月にかけて, 湯釜と酒釜で起きたものである.

湯釜の火口湖は, 強酸性で硫酸イオン等に富み, 湖面や周辺の噴気孔からは, 硫化水素や二酸化イオウを含む火山ガスが放出されている. このため, 草津白根山は, 火山化学的な研究にとって絶好なテスト・フィールドと考えられており, 湖水や噴気の化学成分の変化を用いて, 化学的な手法による噴火予知が試みられてきた(平林・日下部, 1989; TAKANO, 1987). 1986年には, 火山化学を中心とする研究の基地として, 東京工業大学の草津白根火山観測所が設立された.

草津白根山における地震観測は, MINAKAMI (1939) が1937~39年に実施したものが最初で, この観測に基づいて, 彼は火山性地震の分類を提案した. この分類は, 浅間山の地震にも適用され, 後に火山学で広く使われるようになった. 多点観測により草津白根山で震源が決められたのは, 噴火予知特定研究班による1967年の観測が最初で, この観測によ

り、湯釜、酒釜、水釜の近傍と、白根山の南東斜面の地下に、微小地震がとらえられた (MINAKAMI, *et al.*, 1969). その後、1974年、1976年 (下鶴他, 1978) と1984年 (渡部他, 1985) に、火山噴火予知計画の集中総合観測により、また、1983年と1987年に気象庁の火山機動観測により (気象庁地震火山部, 1985, 1989), 臨時に多点観測が実施された。

このような臨時観測に加えて、1973年から、白根山北東山腹で、気象庁が地震動の常時観測をはじめた。しかし、活動的な火山に対して一点だけの常時観測では不十分だという認識にたつて、第3次火山噴火予知計画で、複数の観測点からなる観測網を地震研究所が展開することになった。常設観測の内容には、試行的に地中温度、噴気温度、電気伝導度も加えたが、本論文では、主に地震観測について、観測網、データの収録と処理の方法、観測結果をのべる。

草津白根山では、1988年9月末～10月にかけて、火山性地震がやや群発的に発生した。また1989年1月6日には湯釜火口で、小規模な噴火が表面活動があった。観測結果は、これらの出来事と関連させて議論する。

2. 観測網とデータ

地震研究所により設置された常設観測点の分布を、Fig. 2 に示す。観測点 (十印) は、白根山の湯釜、酒釜、水釜の3火口をとり囲むように分布する。

各観測点の観測内容を Table 1 に要約する。6観測点 YGW (湯釜西), YNE (湯釜北東), YNW (湯釜北西), JIE (神社東), JIW (神社西), AIM (逢ノ峰) の他に、中継と気象観測のために、RHS (レストハウス) 観測中継局がおかれた。テレメーター設備をも

Table 1. Permanent stations at Kusatsu-Shirane volcano with seismometer locations.

Station	Observations*	Latitude deg. N	Longitude deg. E	Altitude m
YGW	SV, SH, TG, EV	36.64122	138.53228	2,135
YNE	SV, SH, TG, TF, TA	36.64436	138.54817	1,940
YNW	SV, TG', TF	36.64661	138.53989	1,985
JIE	SV, SH	36.63658	138.54911	1,990
JIW	SV, TG'	36.63650	138.54056	2,003
AIM	SV, SH	36.63092	138.53869	2,110
RHS	TA, PA, RA			

*SV: Seismometric vertical component.

SH: Seismometric horizontal (NS and NW) components.

TG: Underground temperatures at depths of 1, 2, 3, 4 and 5 m.

TG': Underground temperature at depth of 1 m.

TF: Fumarolic temperatures.

EV: Electric conductivity in the VLF-MT method.

TA: Atmospheric temperature.

PA: Atmospheric pressure.

RA: Rainfall.

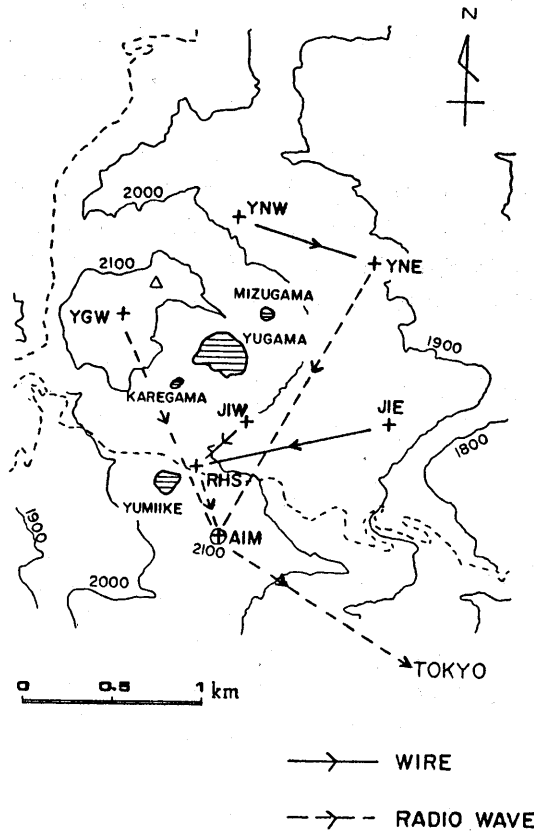


Fig. 2. Network of permanent stations (+) for observations of volcanic activity at Kusatsu-Shirane volcano with routes of data transmission. Seismic observations are made at all the stations but RHS.

つ AIM, RHS 観測中継局には、局舎が設けられている。YGW 観測点では、テレメータ設備は地中に埋設され、アンテナと太陽電池のみが地上に設置されている。YNE 観測中継局では、テレメータ設備も地表に設置されている。観測計器およびデータ伝送に必要な電源は、AIM と RHS では商用電源が、また YNE と YGW では蓄電器と接続された太陽電池が用いられている。

地震計は、YGW, YNE, JIE, AIM の 4 観測点には、上下、南北、東西の 3 成分が、また YNW, JIW には、上下成分がおかれている。Table 1 の緯度、高度は、地震計が設置されている位置を示す。テレメータ設備やその他の観測センサーは、この位置とは多少ずれた点におかれている。地震動以外の観測項目に、地中温度 (TG, TG'), 噴気温度 (TF), 電気伝導度 (EV) があるが、これらについては、別に詳しく述べる予定である。データは、地震動については 1/120 秒毎に、また地中温度、噴気温度、電気伝導度については 15 分毎に採取される。

各観測点におかれた地震計は、固有周期が1秒で減衰係数が0.7の速度型である。地震計の出力感度の検定値は約2.4 V/Kineであった (Kine=cm/s)。出力信号は54 dBで増巾されたあと、AD変換をうけて、-5Vと5Vの間が12ビットの正負の整数で表現される。地震動の伝送および処理には、この整数による表現が用いられる。この表現で整数値1,000は、約0.02 mm/sに対応する。

観測データは、地中に埋設されたケーブル (Fig. 2の実線矢印) を通り、また無線の電波 (点線矢印) で送られて、一旦逢ノ峰山頂のAIM観測中継局に集められる。そこから更に東京の地震研究所に、無線により連続的に伝送される。無線搬送に使われている電波は、409 MHz 台の3波 (YGW-AIM, YNE-AIM, RHS-AIM) と363.1 MHzの一波 (AIM-東京) で、全て地震予知と火山噴火予知に割り当てられた電波である。テレメータのデータ伝送速度は、AIMまでの伝送は9600 bps, AIM-東京間は28800 bpsである。データ伝送では、地震動の各成分に1チャンネルが割りふられ、地中温度、噴気温度、電気伝導度のデータは、適当な順番をつけて、まとめて他の1チャンネルで送られる。

なお、草津白根山では、上記の観測の他に、いくつかの機関が常設的な観測を行っている。既にのべたように、気象庁が、A点で変位型地震計を用いた地震観測を続けている。気象庁のA点は、地震研究所のYNE観測点のごく近傍にある。一方、東京工業大学の草津白根火山観測所は、湯釜で湖水の水位、水温、電気伝導度、音波の連続観測を、また殺生河原で噴気ガスの温度と化学成分の連続観測を行い、データを同観測所にテレメータで集めている。また、テレビカメラによる可視画像が、草津町により湯釜火口内で、気象庁により逢ノ峰山頂から、それぞれ連続的にとられている。

3. データ処理

逢ノ峰山頂のAIM観測中継局から無線で伝送されてきたデータは、地震研究所屋上のアンテナで受信され、火山物理学部門のデータ処理室に送られる。データは、メール・ボックスとよばれるテレメータ受量機 (明星電気製) に、常時連続的に入ってくる (Fig. 3)。メール・ボックスには、草津白根山のデータの他、富士山、伊豆大島のデータもとりこまれている。また、地震予知観測室の関東甲信越広域微小地震観測網から、これらの火山の周辺に位置する8観測点 (Fig. 1の+印) のデータを分けてもらっている。

メール・ボックスでは、地震動の各成分が1つのチャンネルをしめ、地中温度、噴気温度、電気伝導度等の低速搬送データは、まとめて別のチャンネルにおさめられる。地震動のデータは、各チャンネル毎に1秒間に120個あり、その各々が12ビットの整数で表現されている。低速搬送データの各々には、16ビットがわりふられる。メール・ボックスのデータは、地震予知観測室の時計信号により制御され、1秒単位で所定のフォーマットに配列される。

データは、メール・ボックスからFIFO方式により、ミニコンピュータ HARRIS H-300 に転送される。すなわち、インターフェイス上のバッファに、メール・ボックスから連続的にデータが送られ、それとは独立に、バッファの内容をコンピュータが読みこむ。読みこみが間に合わずに、バッファがあふれた場合には、インターフェイスからそ

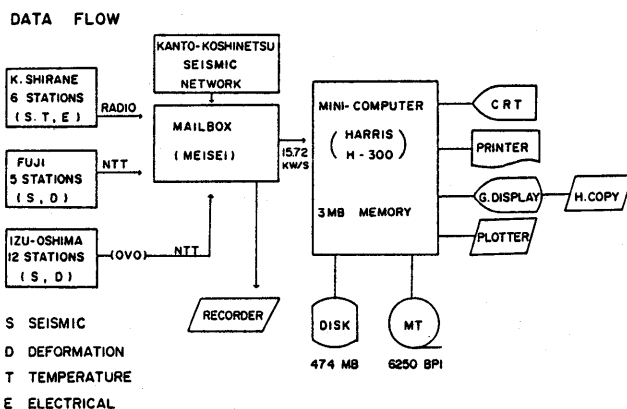


Fig. 3. Data processing system for the permanent stations at Kusatsu-Shirane, Fuji and Izu-Oshima volcanoes. All the data are first accumulated in the "mailbox" and then transmitted to the mini-computer.

のメッセージがコンピュータに伝えられる。伝送されるデータの量は、全体で1秒間に15.72 KW (k WORD) になる。

コンピュータによるデータの処理の概要を、Fig. 4 に要約する。処理プログラムは、著者の1人(井田)が作成したもので、全て FORTRAN 言語で書かれている。Fig. 4 に太字で表示するのは、プログラム名である。

コンピュータの中では、4つのリアルタイム・プログラム MAIR, MAIM, MAIT, MAIF が稼働している (Fig. 4)。メール・ボックスから送られてきたデータは、プログラム MAIR によって常時読みこまれ、メモリの中のバッファ領域に移される。このバッファ領域は、複数のプログラムから参照できる共通領域になっており、30秒分のデータを入れる容量が与えられている。時刻は、データ中に含まれる正時と正分の情報に基づいて、MAIR が設定する。バッファ領域にとりこまれたデータの内、地中温度、噴気温度、電気伝導度などの低速搬送データは、プログラム MAIM によって15分毎にとり出され、ディスク上のファイルに収められる。

バッファ領域に入ってきた地震動データは、3つの火山の各々について、プログラム MAIT が常時監視する。MAIT は、地震動の平均振幅を所定のチャンネルにわたって1秒毎に計算し、それが複数の観測点で同時に基準のレベルをこえたとき、前後の時間帯も含めて、データをひとまずディスク上にとりこむ。監視の対象となるチャンネルや、その基準のレベルなど、関連するパラメータは、リアルタイム・プログラムが稼働している状態でも、任意に変更できる。標準的なパラメータの状態では、各火山の上下動成分が監視の対象になっており、3観測点以上で地震動が整数表示の20をこえたとき、25秒前までさか上ぼってデータの採取を開始する。また、振動が十分小さくなってから10秒を経ると、データの採取が打ち切られる。

採取されるデータには、その火山の周辺に分布する関東甲信越広域微小地震観測網のも

SCHEME OF DATA PROCESSING

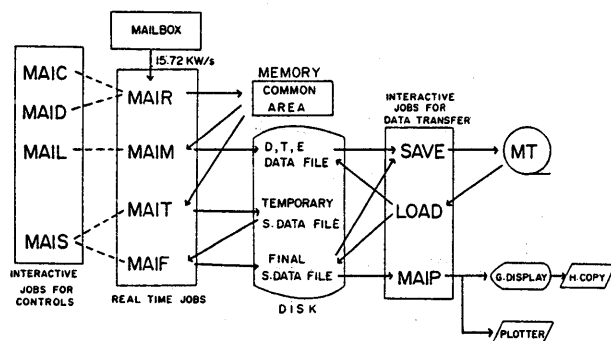


Fig. 4. Data processing in the mini-computer system. The real time job MAIR continuously reads the "mail box" and transmits the data to the common memory area of the computer. Deformation, temperature and electrical conductivity data are extracted from the memory area by the job MAIM. The job MAIT monitors the seismic ground motions, and creates strips of seismic data with sufficiently high amplitude ground vibrations. From the strips, the job MAIF selects seismic events to be identified with volcanic earthquakes or tremors. The interactive jobs MAIC, MAID, MAIL, and MAIS are available for finding the states of the real time jobs and controlling them.

のも含まれる。草津白根山の場合は、火山の6観測点のものに、HSJ, HRG, NUJ, KUJ (Fig. 1) のデータがつけ加わる。このようにして得られた地震記録の例を、Fig. 5, Fig. 6 に示す。ここでは、上下成分のみが表示されている。横軸は採取を開始してからの時間(秒)で、採取開始の年月日と時刻は、図の最上部に示されている。縦軸は整数表示で表現した地震動である。

プログラム MAIT により地震とみなされたデータが、ディスク上に採取されると、待機していたプログラム MAIF が稼働を始める。MAIF によって、データは再度詳細な検討をうけ、最終的にファイルに残すかどうか判定される。

MAIF は、それ以前の事象も用いて、地震動に先だつ部分から、振動のゼロ・レベルとノイズ・レベルを先ず決める。次に、各秒の平均的な振巾が、ノイズ・レベルと比較して有意かどうか(標準的なパラメータでは3倍以上になっているかどうか)を検討する。最初に有意な振巾が見出された時刻(秒)を波動の到着時刻とみなす。有意な振巾が見出されなかった観測点では、信号がこなかったものとする。信号が、基準の個数(標準では3箇)に満たない観測点でしか得られないときは、その事象をすてる。基準の個数以上の観測点で信号が得られた場合には、波動の到達時刻が、火山の各観測点の間で予想される範囲に入っているかどうかを調べる。

このような手続きを経て、地震として選出された事象については、到着時刻と振巾を、火山の観測点と周辺の観測点の間で比較して、その事象が火山で起きた地震かどうかを判定する。Fig. 5 の例は、この判定により火山の外の地震とみなされ、クラス3と分

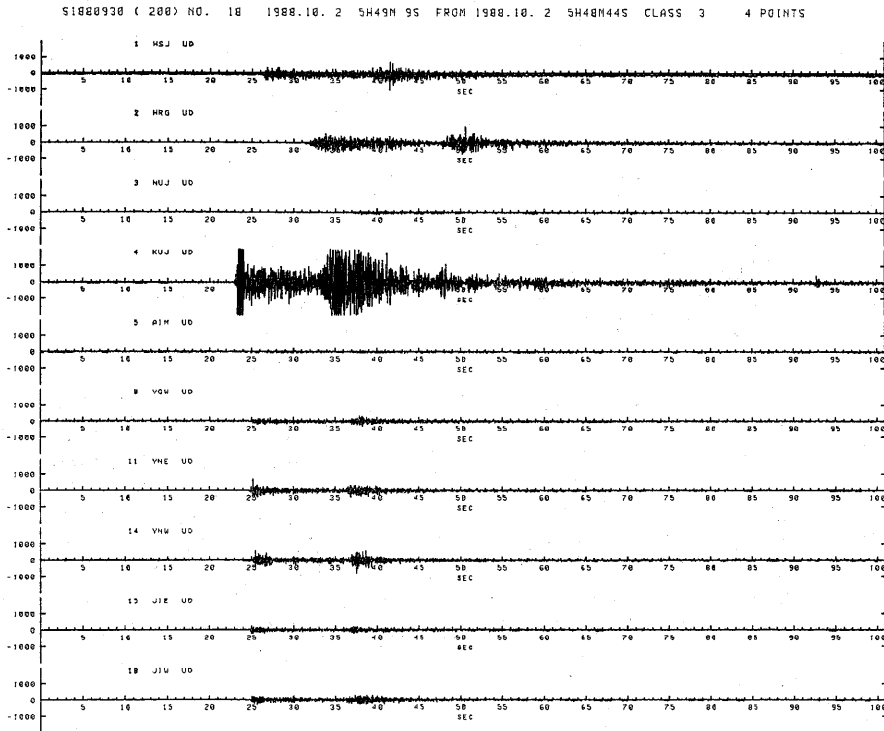


Fig. 5. A seismic event picked up by the data processing system. This event is classified as class 3, which means an event outside the volcanic area of Kusatsu-Shirane volcano. Here the vertical components are shown as a function of time for all the stations in the volcanic and ambient areas. The title on the top has the file name, the event number, trigger date and time, the starting date and time of the acquisition, the class of the event, and the number of data points skipped on the display.

類された。また Fig. 6 の例は、火山の地震とみなされ、クラス1と分類された。このような大まかな処理では、火山の中とも外ともはっきり判定できない地震が出てくるが、それは、とりあえずクラス2と分類される。最終的にファイルに残すクラスも任意に指定できるが、標準的な状態では、クラス1と2の地震のみが選ばれる。

地震として採取される事象の数は、火山活動やノイズの状態により当然変化する。処理状況の概要をみるために、草津白根山の1988年12月の状況をのべると、プログラム MAIT により採取された事象の総数は466個、その内プログラム MAIF が地震とみなしたものは73個で、内訳はクラス1, 2, 3がそれぞれ31個, 8個, 34個であった。

リアルタイム・プログラム MAIR, MAIM, MAIT, MAIF は、会話型プログラム MAIC, MAID, MAIL, MAIS を端末から随意に呼び出して、制御したり、状態を表示したりすることができる (Fig. 4)。メール・ボックスからデータを読みこむために MAIR を稼働させ、そのパラメータを設定するのは MAIC の役目である。また、読みこみの状

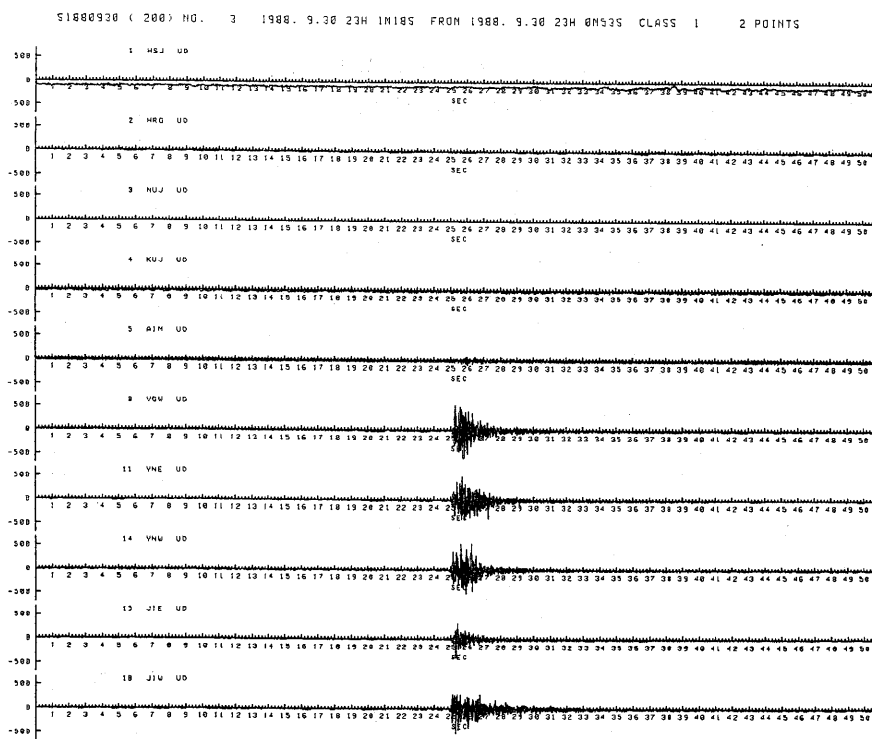


Fig. 6. A seismic event picked up by the data processing system. This event is classified as class 1, which means an event in the volcanic area of Kusatsu-Shirane volcano. Here the vertical components are shown for all the stations in the volcanic and ambient areas.

態や、読みこまれたデータの内容を調べるには、MAID を呼び出す。低速搬送データの状態を表示したり、それを集約したりするのは、MAIL である。地震データ採取の状態をみたり、処理のためのパラメータを変えたりする目的には、MAIS が使われる。

ディスク・ファイルに採取された種々のデータは、会話型プログラム SAVE によって、MT (マグネティック・テープ) に保存される。逆に、LOAD によって、MT からディスク上に移される。地震動のデータは、会話型プログラム MAIP によって、グラフィック・ディスプレイやプロッタ上に図示される。Fig. 5 や Fig. 6 は、MAIP によってグラフィック・ディスプレイ上に表示されたデータのハード・コピーである。震源決定プログラムなど、他の様々なプログラムも、リアルタイム・プログラムと平行して走らせることができる。

ミニコンピュータの処理とは独立に、YGW 観測点の上下動のデータが、メール・ボックスから直接とり出され、DA 変換をうけて、長時間レコーダで記録紙上に常時記録されている。このモニタ記録は、主として地震活動度を全体的に把握するために使われる。

4. 震 源 計 算

リアルタイム・プログラムによって採取された地震は、現在のところ、オフライン処理で震源を計算している。先ず、時間軸の必要な部分を拡大して、記録を表示する。例えば、Fig. 6 でとりあげた事象に対応して、その22秒から32秒までの10秒間をとり出したのが、Fig. 7 である。この図には、火山の6観測点の全データが、水平成分も含めて表示されている。このような図から、各観測点についてP波とS波の到着時刻を読みとり、計算機にそれを入力して、震源を計算させる。S波の到着時刻は、3成分のデータをもつ観測点のみで読みとりが試みられる。P波とS波の時刻が条件を満たす全ての観測点で読みとれるのは、むしろ幸運な場合である。S波の時刻が全く読みとれなくても、P波の時刻が大部分の観測点で求まると、震央は大体決まる。しかし、震源の深さは、余りよく決まらない。

震源決定に使われる地震波速度の分布については、情報が少ない。しかし、観測点が山頂に近接しており、震源も余り深くないことから、表層の速度だけが震源決定に意味をもつ。爆破によるデータも参照して、MINAKAMI *et al.* (1969) は、P波速度として3 km/s の一様構造を仮定した。その後の研究でも、この値が使われることが多いが、それが草津

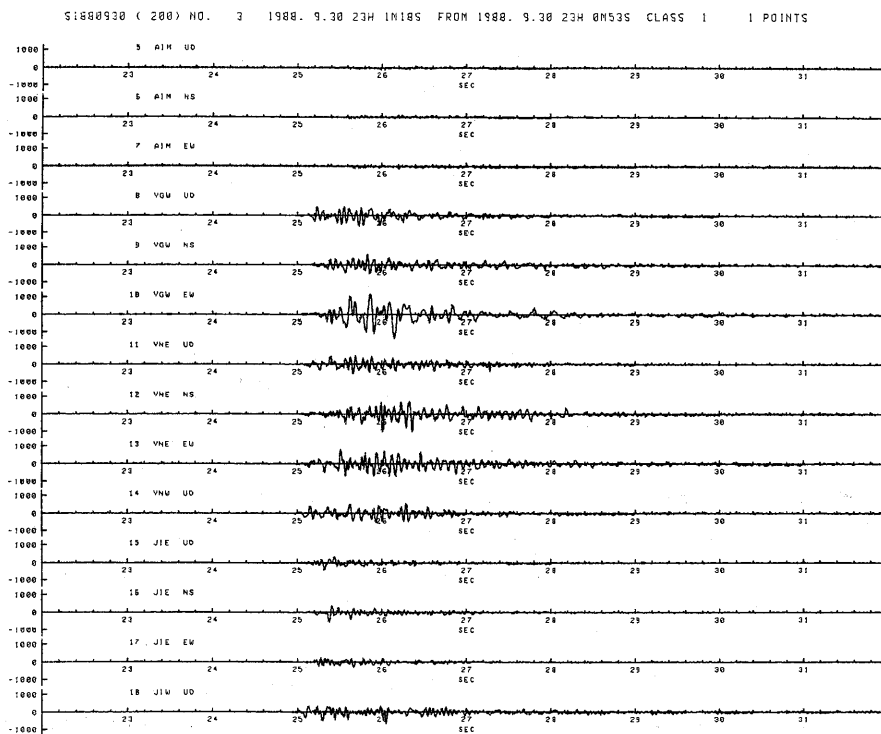


Fig. 7. Seismic signals enlarged on time. The event is the same as in Fig. 6. All the vertical and horizontal components are shown for stations in the volcanic area.

白根山の数値として適切な値であるかどうかは、必ずしも明らかでない。

比較的波形のきれいな2つの地震について、仮定されたP波速度に震源がどの程度依存するかを、Fig. 8に示す。ここで、S波速度はP波速度の1/1.73倍と仮定した。2つの地震は、ともに1988年9月30日の深夜に発生したもので、AIM観測点では波形が明瞭でないが、3成分の記録をもつYGW、YNE、JIE観測点では、P波とS波の到着時刻が、また上下成分のみをもつYNW、JIE観測点では、P波の到着時刻が、比較的明瞭に決められた。地震波速度の値が大きくなるにつれて、震央は観測網の中心から外側にはずれ、震源は深くなる傾向が見られる。

P波の到着時刻の平均残差（観測された時刻と、波の伝播から予測される時刻の差を、5観測点にわたって平均した値）を、仮定したP波速度の関数として、Fig. 9に示す。平均残差は、P波速度が2.5 km/sの付近にゆるやかな最小値をもつ。そこで、必ずしも分解能がよいとはいえないが、約2.5 km/sがP波の速度の最適値と考えられる。

5. 地震活動と震源分布

草津白根山における最近の地震と火山性微動の活動状況を、Fig. 10に要約する。地震

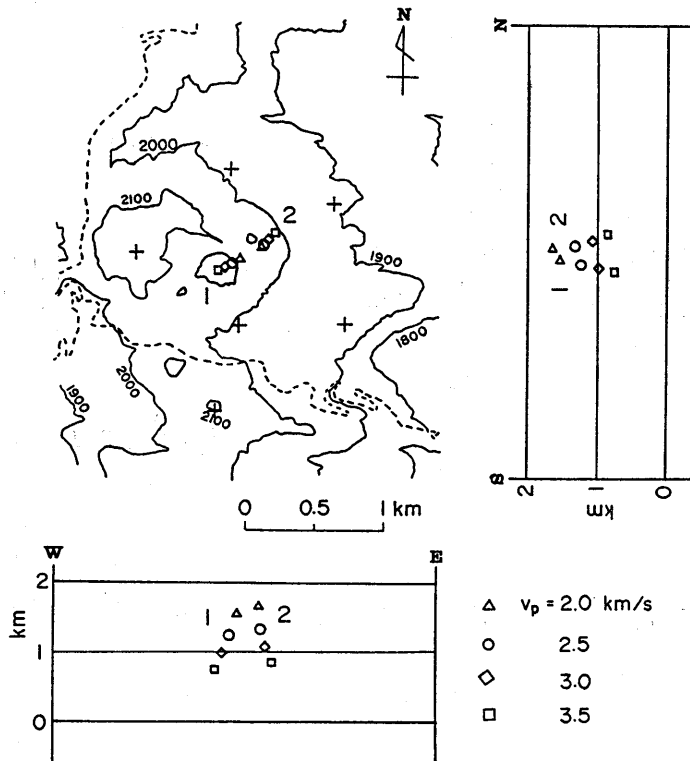


Fig. 8. Hypocenters of two well-determined events that are shifted with variable values of the assumed P-wave velocity. The ratio of P-wave to S-wave velocities is assumed to be 1.73.

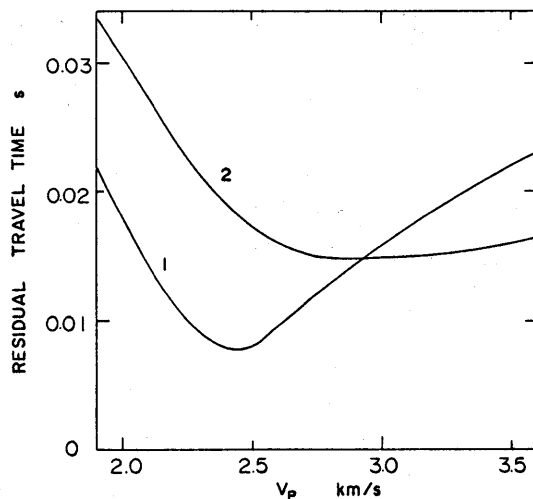


Fig. 9. Mean residual times of the P-wave arrival over YGW, YNE, YNW, JIE and JIW stations for the same two events as in Fig. 8. The arrival time data are best fit to the P-wave velocity of about 2.5 km/s.

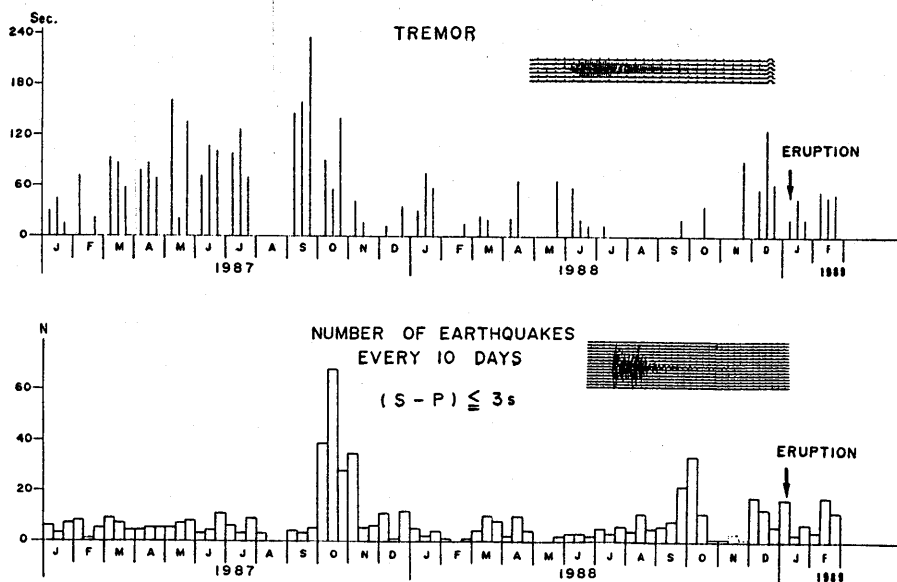


Fig. 10. Total duration of volcanic tremors (top) and frequency of volcanic earthquakes every 10 days (bottom) at Kusatsu-Shirane volcano.

の頻度図 (Fig. 10 の下段) は, YGW 観測点で捉えられる事象の内, P 波と S 波の両方が読みとれるものを地震とみなし, その到着時刻の差が3秒以内のものを, 10日毎に積算した結果である. 3秒という時間差は, MINAKAMI *et al.* (1969) により使われたのと同じ値である. 現実には, 震源が火山内部に決定される地震のほとんどは, P 波と S 波の時間差が1秒前後かそれ以下である.

他の多くの火山と同様に, 草津白根山でも, 通常の地震と異なる波形をもつ事象がしばしば観測される. この事象は間欠的で, 継続時間は30秒前後かそれ以下であることが多い. 振動には7~10 Hz 間の特定な周波数が卓越し, 典型的なものは単色波的な波形を示す. 一例を Fig. 11 に示す. この波形のように S 波が読みとれないものを, ここでは便宜的に火山性微動と分類して, その継続時間の累積値を10日毎に Fig. 10 の上段に示す. 現実には, 地震と火山性微動の中間的な波形も見られ, その分類は必ずしも一義的ではない.

草津白根山の火山性微動には, 各観測点における初動の立ち上がりが明瞭で, その開始時刻を読みとれるものが多い. 従って, 震源計算の方法を用いて, その発生源の位置が決められる. 以下の震源分布には, 火山性微動の発生源も混在している. この計算結果では, 地震と火山性微動の間に, 位置の系統的な差は認められなかった.

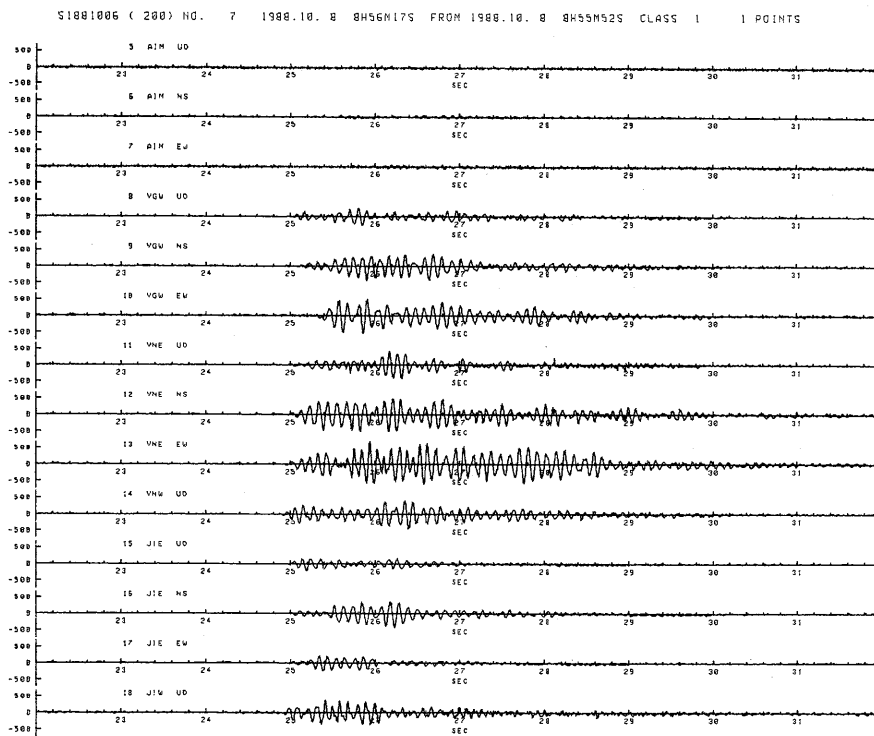


Fig. 11. A typical example of the episodic volcanic tremor at Kusatsu-Shirane volcano.

草津白根山では、1988年の9月末から10月にかけて、火山性地震がやや群発的に発生した (Fig. 10). その時期の地震をとり出して、震源を計算した結果を Fig. 12 と Fig. 13に示す. 2枚の図は、同じ地震についてのものである. P波速度として、Fig. 12 では前節で最適と考えられた 2.5 km/s が、また Fig. 13 では MINAKAMI *et al.* (1969) 以来使われてきた 3 km/s が、仮定されている. この2つの震源分布の間に、基本的な差は認められない. いずれの場合も、震源のかなりの部分が、水釜火口 (Fig. 2 参照) 南東部に集中している. ただし、速度を 2.5 km/s と仮定した計算結果の方が、震源の集中度は著しい.

Fig. 14 は、1988年11月以後に発生した地震の震源分布である. ここでは、P波速度が 2.5 km/s に対応する計算結果のみを示す. 震源分布は、前の時期 (Fig. 12) からやや変化しており、その意味は後に議論する. Fig. 12-14 でとりあげた地震において、地震波の継続時間からマグニチュードを決めてみると、その値は最大で1.3、大部分は1以下になる.

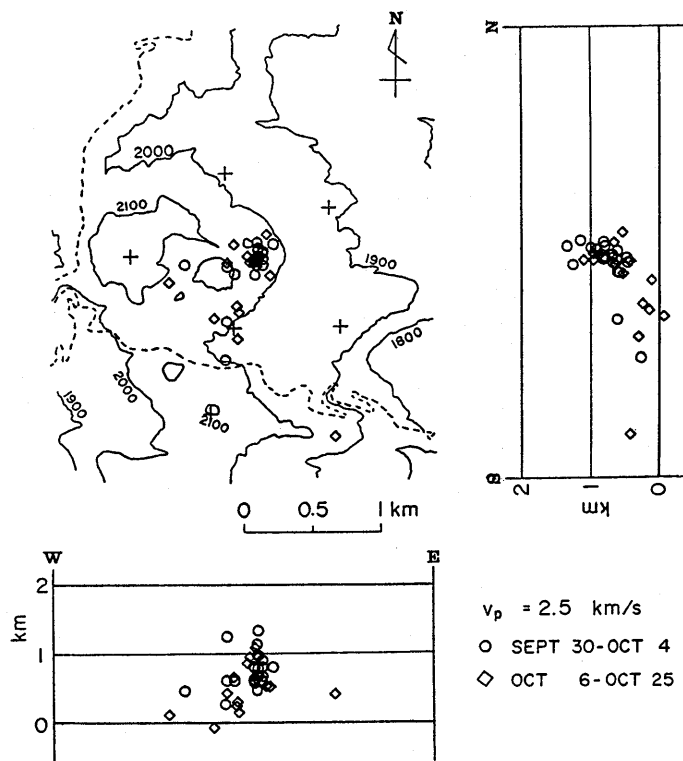


Fig. 12. Hypocenter distribution of the swarm-like earthquakes that occurred at the end of September through October, 1988. A uniform P-wave velocity of 2.5 km/s was assumed in calculating the hypocenters.

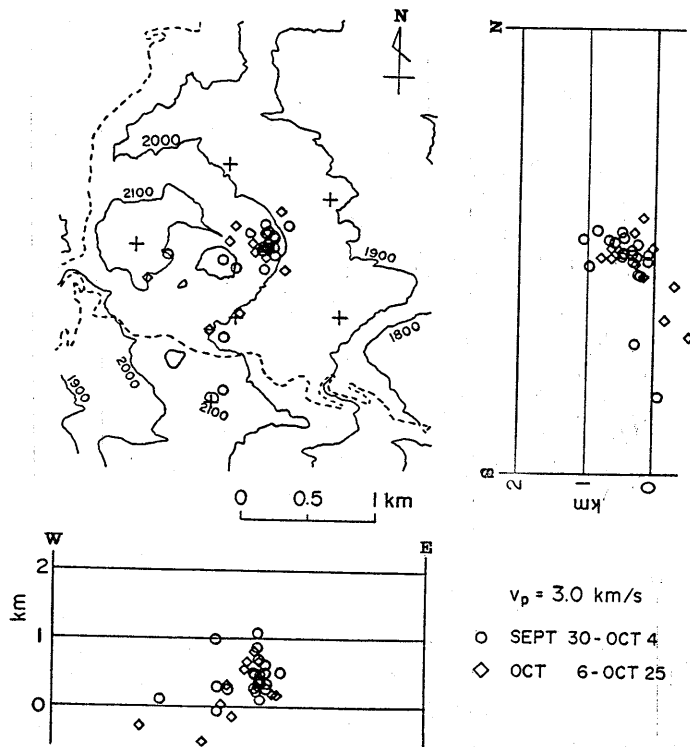


Fig. 13. Hypocenter distribution for the same events as in Fig. 12 but with an assumed P-wave velocity of 3.0 km/s.

6. 1989年1月6日の小噴火

草津白根山では、1989年1月6日早朝から、奇妙な地震動が観測され始めた。YGW 観測点でとれた長時間レコーダの記録の一部を、Fig. 15 に示す。

この事象は、連続的な火山性微動の一種である。それは、日常的に観測される間欠的な火山性微動 (Fig. 11) とは、継続時間や波形が異なる。1月6日の事象は、午前3時54分30秒頃から始まり、振巾は4時台に最大になった。その後、この微動は振巾を減じながらも活動を続け、それが完全に終結したのは、1月7日午前3時すぎであった。従って、微動の継続時間は24時間近くにもなる。この微動の波動には様々な周波数が含まれるが、卓越するのは3~5 Hz であろう。

この微動は、波動の立ち上がりがゆるやかなため、リアルタイム処理システムでは波形が採取されず、従って、デジタル記録がとれていない。しかし、開始後数時間たつてから、複数の観測点の地震動をアナログでレコーダ上に記録した。微動の振巾は、上下成分でみると、JIW 観測点で1番大きく、YGW 観測点ではその約80%、YNW 観測点では約30%、YNE と JIE 観測点では約20%であった。このような振巾分布は、水釜南東部を中心とする地震のものとは明確に異なっている。この振巾分布からみて、微動の発生源

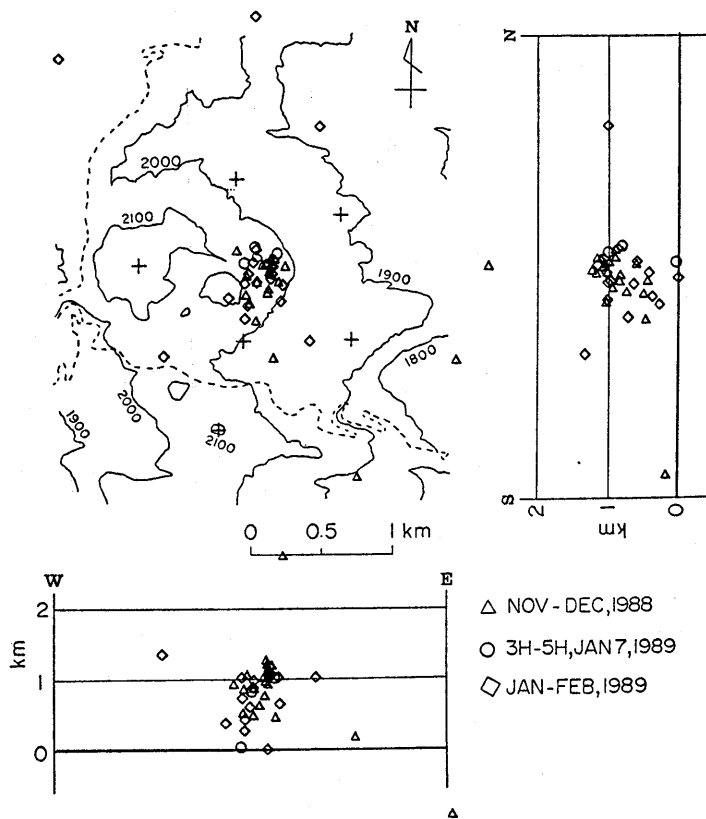


Fig. 14. Hypocenter distribution of earthquakes in and after November, 1988. The P-wave velocity is assumed to be 2.5 km/s.

は、湯釜かその周辺にあると推定される。なお、YGW 観測点で3成分の記録を比較すると、振巾は東西動成分が最大で、上下、南北動成分の1.5~2倍であった。

東京工業大学草津白根火山観測所では、1月6日の微動と対応して、湯釜付近の現地調査と、ヘリコプターによる観察および写真撮影を実施した(小坂丈予, 平林順一, 1989, 私信)。その内1月6日昼頃の観察によると、湯釜火口の北西部の火口壁近傍で、湖水に黒色浮遊物が、また氷結した湖面全体で、火山灰によると思われる汚染が見出された。これらの特徴は、その4日前(1月2日)の調査では認められなかった。その間に、湖水の融氷部は拡大しており、水温の上昇も観測された。これらの事実から判断して、1月6日には、湯釜火口北西部の水面下で、水蒸気等の火山ガスか熱水が急激に噴出し、それが白色噴煙状に火山灰を若干放出したと考えられる。地震観測で得られた微動(Fig. 15)は、この過程で発生した何らかの振動を捉えたものであろう。なお、レストハウス(RHS 観測中継局の近傍)など、白根山の周辺で爆発音は聞かれておらず、爆発は、存在したとし

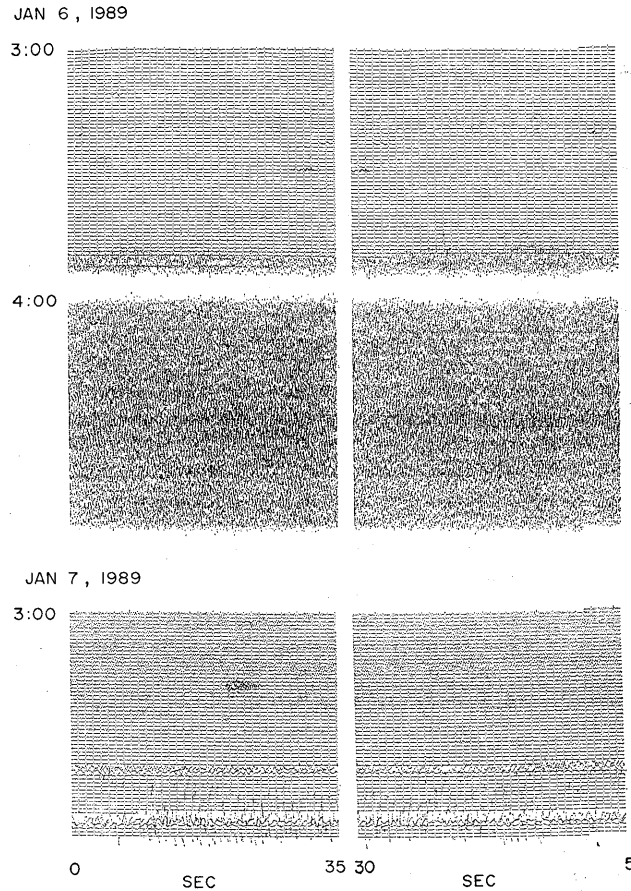


Fig. 15. Continuous volcanic tremor corresponding to a small eruptive event on January 6, 1989 at Yugama crater. The vertical ground motion obtained at the YGW station is shown.

ても極めて小規模なものであったろう。

1月7日に微動が終結した直後に、3つの地震が発生した。その時刻は、3時19分19.5秒、4時41分20.0秒、4時41分42.5秒であった。その内、2番目のものは、草津白根火山の最近の火山性地震には珍しく、火山の全観測点で振巾がふり切れた (Fig. 16)。これらの地震は、通常地震と比べて、振動が極めて短周期であった。その震源は、Fig. 14の中に○で示す通り、いずれも水釜の周辺であった。

7. 微小地震と火山活動の関係

1989年1月6日の小噴火が湯釜火口で発生したのに対して、地震活動の中心は水釜の南東部にあった。しかし、小噴火と地震活動には、次のような相関が見出される。

小噴火直後に発生した地震が、短周期で特異な波形をもつことは既にのべた (Fig. 16)。

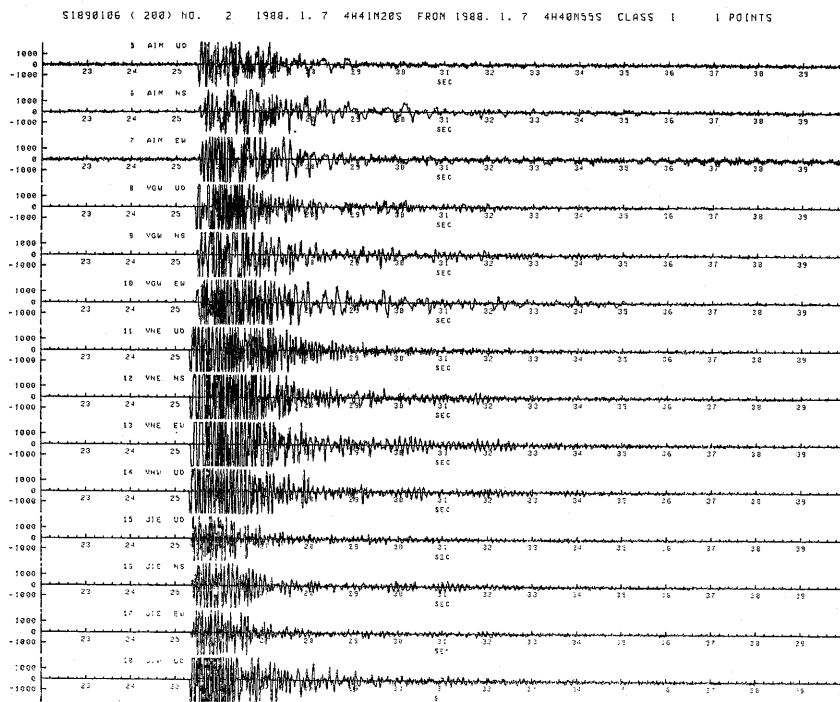


Fig. 16. A seismic event that occurred in the early morning of January 7, 1989 just after the continuous volcanic tremor associated with the small eruptive event ceased.

地震や火山性微動の活動度 (Fig. 10) にも、小噴火との関連を示すものがある。すなわち、火山性微動は、小噴火の1箇月程前に明らかに活発化した。地震活動も、同じ時期にやはり発生頻度が高めだった。その少し前、1988年9月から10月に起きた群発的な地震活動も、時期からみて、小噴火と関連があったとしておかしくない。もっと印象的なのは、震源分布の推移である。9月末から10月にかけての群発的な地震活動は、水釜南東部の深さ1.5 km 前後に集中した (Fig. 12)。噴火が近づくと、震源の主要部分は、深さ1 km 付近の更に浅い部分に移動した (Fig. 14)。ところが、1989年1月6日に小噴火が発生したあとは、震源のこのような集中は顕著でなくなり、周辺に分散する傾向がでてきた。

草津白根山で、過去に震源分布が求まったのは、何度か実施された臨時観測の時である。その観測結果は、ここで得られたものと、基本的には類似している。すなわち、観測された時期を通して、水釜南東部は比較的地震活動の高い場所であり、そこを中心にして、いくつかの方向に震央がのびる傾向にあった (MINAKAMI, *et al.*, 1969; 気象庁地震火山部, 1985)。特に、震央は水釜南東部から、火口列とほぼ平行に、南西にむかって分布することが多い。その傾向は、Fig. 12 でも深い地震の分布に認められる。この地震の多発領域にそって、1942年の割れ目噴火で、爆裂火口群が形成された (水上, 1984)。その更に延長上には、1902年に噴火した弓池の火口がある。その他の噴火口も、全体として

みると、いくつかの線の上に配列する傾向があり、その多くは水釜南東部から放射状にのびている (水上, 1984).

このような事実も頭において、草津白根山の火山活動を、Fig. 17 のようにモデル化する試みをしてみた。水釜南東部から1942年の噴火割れ目を通り、弓池にむかう線の下に、垂直な面を考えると、観測される地震の多くは、この面の近くで発生する。水釜南東部に集中した地震活動の震源も、その中に含まれる。過去の噴火口と震源分布からみると、他にもいくつかの面が、水釜南東部から放射状にのびている可能性がある。これらの面は、割れ目噴火などの火口列をもつことから、地殻内部の断裂と対応し、マグマや水蒸気 (又は水蒸気を主体とする火山ガス) や熱水の通路になっていると推測される。

一方、間欠的な火山性微動が、地震とほぼ同じ場所で発生することから、地震の多くは、マグマや水蒸気などの流れと関係すること考えられる。水釜の南東部の地下で、微小地震活動が高いということは、この付近で、マグマや水蒸気の移動が最も活発であることを意味する。実際、全磁力の観測によって、水釜の南東部の地下に、高温の領域があることが見出された (気象庁地磁気観測所, 1989)。地中温度の測定結果 (鍵山他, 1978) か

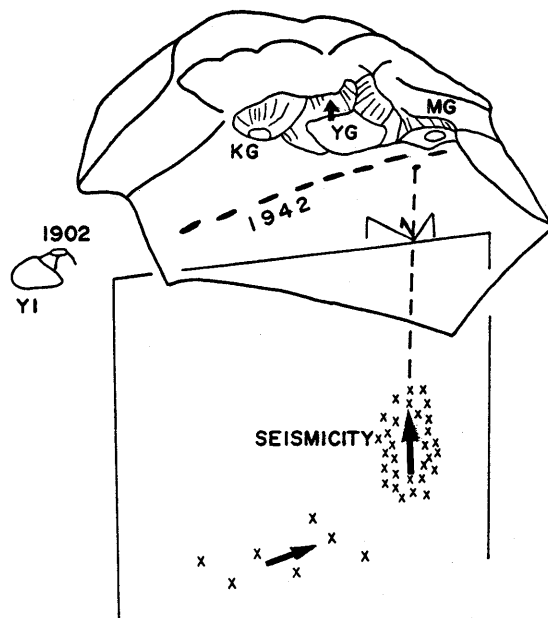


Fig. 17. A model to relate the volcanic and seismic activities at Kusatsu-Shirane volcano. The craters are marked as MG=Mizugama, YG=Yugama, KG=Karegama and YI=Yumiike (See Fig. 2) with the locations of the 1942 fissure eruption and the 1902 eruption. Vertical planes show hypothetical fracture zones. It is inferred that the small eruptive event at the Yugama crater on January 6, 1989 followed the underground migration of magma or steam that was accompanied by volcanic earthquakes and tremors below a specific point southeast of Mizugama crater.

らみても、このあたりは熱輸送の高い領域である。

このような構造を仮定すれば、1989年1月6日の小噴火と、その前後の地震活動の関係は、次のように理解できる。1988年9月末から10月にかけて発生した群発的な地震活動は、マグマか水蒸気が上昇しながら、その通路を開く過程であったろう。それが完了すると、高温の流体は更に上昇し、それに伴い震源も移動した。ところが、流体は、その真上にではなく、そこを通る断裂面にそって、湯釜の方向に移動した。そのために、水蒸気の圧力が高まって、それが湖面に噴出し、1月6日の小噴火となった。この噴火で、地下の圧力が解放されると、地震活動の集中もやわらいだ。

草津白根山の火山活動の解明は、火山における水蒸気爆発の発生機構の理解に、新たな道を開く可能性がある。このようなモデルを作業仮説として頭におきながら、今後の観測を進めていきたい。

謝 辞

1989年1月6日の小噴火に関しては、小坂丈子教授、平林順一助教授と情報交換を行った。両氏からは、関連したデータとその評価、および本論文に関するコメントをいただいた。常設観測網の計画にあたっては、平林順一助教授、渡部暉彦博士、岡田弘助教授から、計画内容について御教示をいただいた。観測網およびデータ処理システムの設置は、明星電気株式会社、兼松エレクトロニクス株式会社に依頼し、環境庁自然保護局上信越高原国立公園万座管理官事務所、群馬県草津営林署、群馬県草津町等の御理解と御協力を得た。本文でものべた通り、地震予知観測室の関東甲信越広域微小地震観測網からは、データ交換により、火山周辺の観測点のデータを、リアルタイムで提供されている。論文や図の作成には、松本時子さんの御助力があった。以上ここに記して、感謝の意を表したい。

本研究は、第3次火山噴火予知計画の一環として、その1985年度と1986年度の予算を用いて実施したものである。

参 考 文 献

- 平林順一・日下部実, 1985, 噴火の化学的前兆現象, 火山, 30, 171-183.
 鍵山恒臣・小山悦郎・行田紀也・下鶴大輔, 1978, 草津白根山火山の地熱調査, 震研彙報, 53, 581-605.
 気象庁, 1984, 草津白根山, 日本活火山総覧, p. 183-193.
 気象庁地磁気観測所, 1989, 草津白根山における全磁力観測(VIII), 噴火予知連会報, 42号, 48-50.
 気象庁地震火山部, 1985, 草津白根山, 火山機動観測実施報告, 20号, p. 5-27.
 気象庁地震火山部, 1989, 富士山・草津白根山, 火山機動観測実施報告, 24号, p. 15-24.
 MINAKAMI, T., 1939, Explosive activities of volcano Kusatsu-Shirane during 1937 and 1938 (Part 1), *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 17, 590-623.
 MINAKAMI, T., HIRAGA, S., MIYAZAKI, T. and UTIBORI, S., 1969, Fundamental research for predicting volcanic eruptions (Part 2), *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 47, 893-949.
 水上 武, 1984, 草津白根山, 草津温泉誌一自然・科学編, 1, p. 37-95.
 下鶴大輔・行田紀也・小山悦郎・宮崎 務・沢田宗久・長田 昇・萩原道徳・竹田豊太郎, 1978, 草津白根山の1976年の水蒸気爆発とそれに関連した集中火山観測, 震研彙報, 53, 569-580.
 TAKANO, B., 1987, Correlation of volcanic activity with sulfur oxyanion speciation in a crater lake, *Science*, 235, 1633-1635.

宇都浩三・早川由紀夫・荒牧重雄・小坂文子, 1983, 草津白根火山地質図, 地質調査所.
渡部暉彦・増谷文雄・行田紀也・辻 浩・植木貞人・清水 洋・三品正明, 1985, 草津白根山の地震観測 (1984年9月25日~10月10日), 第2回草津白根山集中総合観測報告, p. 19-30.

*Seismological Study Based on Recently Installed Permanent
Stations and a Small Eruptive Event on January 6,
1989 at Kusatsu-Shirane Volcano*

Y. IDA, N. OSADA, M. SAWADA, E. KOYAMA
and T. KAGIYAMA

Earthquake Research Institute

A permanent network system for observations of volcanic activities have been installed in the vicinity of the Yugama, Karegama and Mizugama craters of Kusatsu-Shirane volcano. The system provides seismological data as well as preliminary results of continuous observations of underground temperatures, fumarolic temperatures and underground electric conductivities. All the data are continuously transmitted to the Earthquake Research Institute by a radio-wave telemetering system. The data are subject to real time processing in a mini-computer along with data of Fuji and Izu-Oshima volcanoes. Seismic events are first picked up, based on the amplitude level of the ground motions, and then examined in more detail, taking into account the noise levels, the arrival times and whether it occurred inside or outside the volcanic area. In the calculation of hypocenters, a P-wave seismic velocity of 2.5 km/s, which is best fit to the arrival times of the seismic waves, is assumed.

Swarm-like seismic activity was observed from the end of September through October, 1988 at Kusatsu-Shirane volcano. Most of the determined hypocenters during this activity were concentrated below a specific point southeast of the Mizugama crater. In the following period, hypocenters were shifted to the shallower part of the same area, and the episodic volcanic tremors were more frequent. On January 6, 1989, a continuous volcanic tremor suddenly occurred and lasted for almost 24 hours. This tremor was accompanied by a silent extrusion of hot steam or water at the northwest part of Yugama crater with a small amount of volcanic ash distributed over the Yugama crater lake. After this small eruptive event, the hypocenters of volcanic earthquakes became more scattered. It is inferred that the volcanic earthquakes and tremors centered southeast of the Mizugama crater reflect the underground migration of magma or hot steam, and were precursors of the eruptive event on January 6.