

## V 白山周辺の地震活動

河野芳輝・東田進也\* (金沢大学理学部地学教室)

### 1 はじめに

白山は、日本の火山の中では活火山としてはあまり知られていない。それは活火山の特長である噴煙や蒸気活動など外見から知ることができる活動が顕著ではないからである。それでも岩間噴泉塔の噴気活動はあるし、山頂部にはかつての火口の跡が見られるから、誰もが火山であることを疑わないであろう。

火山が活着していることを示すもう一つの重要な証拠は、その地震活動にある。白山の下ではそれほど顕著ではないけれども明らかに地震活動が見られる。しかしながら、白山では、いったいどのあたりで、どのくらいの頻度で地震が起こっているか、ということが詳しく調べられていないのが現状である。そこで次の3点を明らかにすることを目的に白山周辺地域の地震活動解析を行なった。

- (1) 白山付近ではどのような地震活動があるのか、
- (2) その地震は周辺で起こっている地震と比較してどのような特徴が見られるのか、
- (3) その地震は白山火山と関係しているのか。

現在、白山周辺には京都大学防災研究所附属北陸微小地震観測所、同上宝地殻変動観測所、及び名古屋大学理学部附属高山地震観測所の地震観測網が存在している(図V-1)。以後、これらの観測所をそれぞれ単に北陸観測所、上宝観測所、高山観測所と呼ぶことにする。図V-2(1976年1月から1987年6月までの期間)、図V-3(1986年1月から1988年12月までの期間)にそれぞれ北陸観測所、上宝観測所のルーチン処理で得られた震央分布図を示す。いずれの図も、白山周辺にまとまった地震活動があることを示している。しかしながら、図V-1からもわかるように、白山周辺地域はちょうどこれらの観測網の中間に存在する。そのため、白山周辺の地震は、それぞれの観測所から見るとその観測網の外側に位置する地震となり、これまでに決定されてきた震源位置にはかなりの誤差が含まれていると考えられる。

今回の研究では、上記課題を明らかにするため、白山付近から金沢付近までの東西40km、南北80kmの範囲について、震源の再決定、地震の発生機構(発震機構)、地震発生の時間経過(時系列)などの解析を行なった。震源決定については、上記の観測網の中から解析地域に近い6つの観測点を選び出し、それらのデータ形式を統一して解析に用いた。また、震源決定の精度をさらに向上させるために、白山の近くで臨時的な地震観測も行なった。以下に、その解析により得られた結果について述べる。

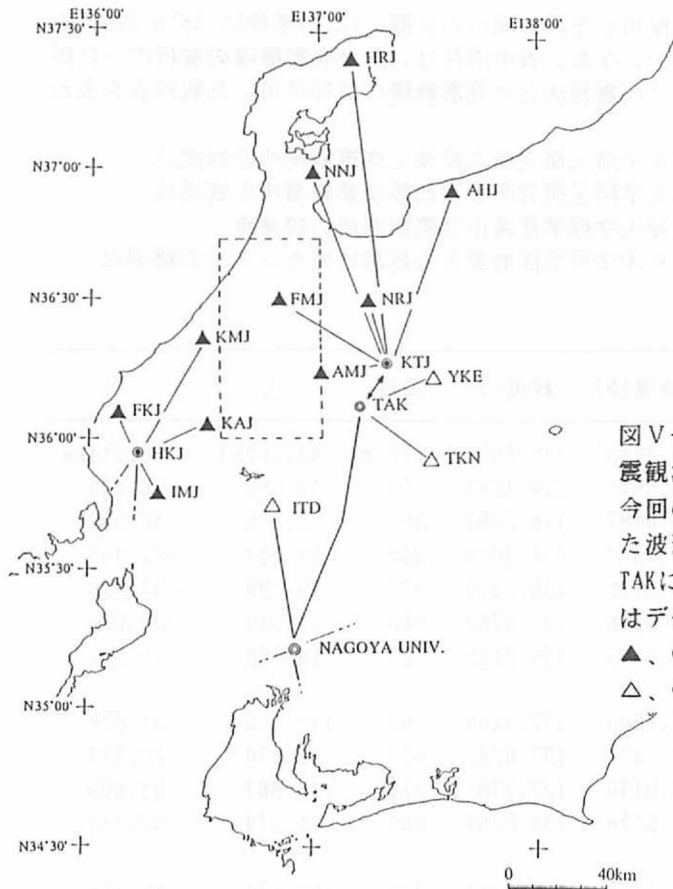
### 2 解析方法

#### (1) データ

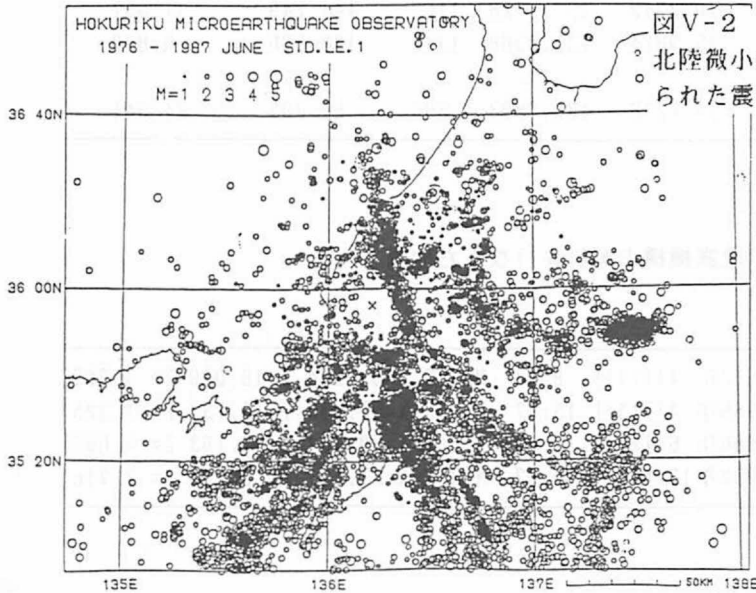
震源決定に用いたデータは、北陸観測所、および上宝観測所で得られたP波・S波初動読み取り値

---

\* 現所属：東京大学地震研究所



図V-1 中部地方北部における地震観測点の分布。点線の範囲内が今回の解析範囲。観測点で得られた波形データは、それぞれHKJ,KTJ,TAKに集められる。また、KTJとTAKはデータ交換を行っている。  
 ▲、◎：京都大学防災研究所観測点  
 △、◎：名古屋大学理学部観測点



図V-2 京都大学防災研究所附属北陸微小地震観測所によって決められた震源分布図(1976~1987.6)

表V-1 今回の解析に使用した各観測点の位置。(X,Y)座標は 36°N 136°Eを原点としたもの。なお、表中のNは、1が発震機構の解析のみに用いた観測点、2が震源決定と発震機構の解析に用いた観測点を表わす。

- \*1 … 京都大学防災研究所北陸微小地震観測所の観測点
- \*2 … 京都大学防災研究所上宝地殻変動観測所の観測点
- \*3 … 名古屋大学理学部高山地震観測所の観測点
- \*4 … 名古屋大学理学部地震火山観測地域センターの観測点

観測点(コード)	N	緯度(N)	経度(E)	高度	X	Y
小松 (KMJ)*1	2	36.3645°	136.5057	70 m	45.362km	40.544km
福井 (FKJ)*1	1	36.0941	136.1233	90	11.098	10.443
勝山 (KAJ)*1	2	36.0487	136.5281	300	5.530	47.562
今庄 (IMJ)*1	1	35.7982	136.3028	240	27.357	-22.338
浅井 (AZJ)*1	1	35.4772	136.3239	370	29.380	-57.929
美浜 (MHJ)*1	1	35.5306	135.9789	260	-1.913	-52.056
北陸 (HKJ)*1	1	35.9375	136.2125	20	19.165	-6.911
上宝 (KTJ)*2	2	36.2800	137.3269	760	119.155	31.870
天生 (AMJ)*2	2	36.1491	137.0283	620	92.376	28.117
楡原 (NRJ)*2	1	36.5130	137.2383	220	110.867	57.609
福光 (FMJ)*2	2	36.5178	136.8297	290	74.279	57.748
高山 (TAK)*3	2	36.1328	137.1841	700	106.531	15.377
焼岳 (YKE)*3	1	36.2742	137.5728	1160	141.249	31.557
高根 (TKN)*3	1	35.9824	137.5368	1310	138.528	-0.860
板取 (ITD)*4	1	35.7236	136.7803	390	67.303	-24.941

表V-2 発震機構の解析を行なった地震

◇ 白山付近	1982年 4月14日 9:03	M 3.2	X=69.964	Y=16.029	Z= 1.767
	1988年 4月13日 15:37	M 3.3	X=69.750	Y=16.737	Z= 1.325
◇ 赤兎山付近	1980年 6月20日 17:10	M 3.7	X=59.354	Y= 7.193	Z= 4.096
	1982年12月26日 5:02	M 3.2	X=57.433	Y= 6.737	Z= 7.716

(Pタイム, Sタイム)である。震源を精度よく決定するためには時刻精度のよいデータが必要である。この点に関しては、それぞれの観測所のデータは時刻精度に関してほぼ0.05秒以内の精度があるものと考えられる。

両観測所とも、各衛星観測点からの波形データは、NTTの専用電話回線を用いて観測所に集められている。また、上宝観測所では、高山観測所とデータ交換を行なっている。各観測所に送られてきた波形データは、長期間レコーダによる連続記録、地震が観測された時のみ作動するペンレコーダ、およびテープレコーダによるトリガー記録、という3つの方法で記録、保存されている〔岸本ほか(1978), 和田ほか(1979)〕。Pタイム・Sタイムは、ペンレコーダの可視記録をディジタイザーで読み取ることによって得られている。なお、ペンレコーダの紙送りは北陸観測所では8mm/s, 上宝観測所では10mm/sである。

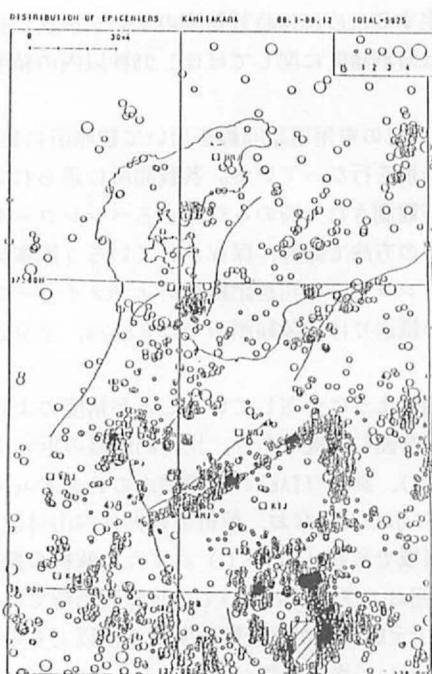
震源決定を行なう際には、観測点が震源域を取り囲むように分布していることが精度のよい結果を得る上で重要である。今回の解析には、白山周辺地域を囲む位置にあり、比較的距離の近い小松(KTJ), 勝山(KAJ), 福光(FKJ), 天生(AMJ), 上宝(KTJ), 高山(TAK)の6観測点のPタイム・Sタイムを用いた。これら観測点の位置については表V-1に示した。なお、解析の範囲は白山付近から金沢付近までを含む東西40km, 南北80kmの長方形をした領域である(図V-1)。また、解析の期間は1980年4月1日から1989年6月30日までである。この範囲および期間において、北陸観測所では402個, 上宝観測所では940個の地震が震源決定されている。上宝観測所が北陸観測所の2倍以上もの地震が観測されているのは、上宝観測所において、跡津川断層沿いの微小地震が多く捉えられていることと、上宝観測所の観測点がいずれも海岸や都市部から離れているため、観測条件が非常に良好で、マグニチュードが1前後の非常に小さい地震まで捉えられることができるからであると思われる。

これらの地震の読み取りデータは、それぞれの観測所で異なるフォーマットによって記録されている。また、提供されたデータの媒体も北陸観測所ではフロッピーディスク, 上宝観測所では紙テープと異なるものであった。今回の解析にはパーソナルコンピューター(NEC PC-9801シリーズ)を使用することから、これらのデータはMS-DOS上のシーケンシャルファイルとしてフォーマットを統一した。その上で、それぞれの観測所で既に決定された震源時(Origin Time)の差が±1.5秒以内のものを同一の地震と考えてそのPタイム・Sタイムを取り出し、震源決定を行なった。この±1.5秒という値は、同一地震の判定が適切にいくことを条件にして決めた。この時点での総地震数は169個である。地震数が減っていることからわかるように、一方の観測点でしか得られていないような小さな地震(ほぼ $M < 1$ )は、今回の解析の対象にはなっていない。

一方、発震機構の解析は、震源が再決定された後の地震の中から、白山山体直下で発生しているものなど数個の地震について行なった。発震機構の解析に用いた観測点は北陸観測所, 上宝観測所, 名古屋大学の地震観測網から選んだ観測点である。それらの座標も表V-1に示した。

## (2) 震源決定法

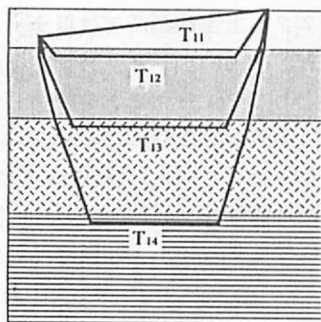
震源決定の原理を簡潔に述べれば、『震源の空間位置( $x_0, y_0, z_0$ )と地震の発生時刻 $t_0$ (震源時)を未知数とする連立方程式を解く』ということになる。今回の解析では、地下構造を単純な半無限構造と仮定した場合と、水平成層構造と仮定した場合の2通りの方法で震源決定を行なった。半無限構造と水平成層構造の計算手順は基本的には同じなので、以下では水平成層構造を用いる震源決定方法について述べる。また、白山付近などの限られた地域について震源位置の相対的精度を高めるために、マスターイベント法という手法も用いた。これについて以下に述べる。



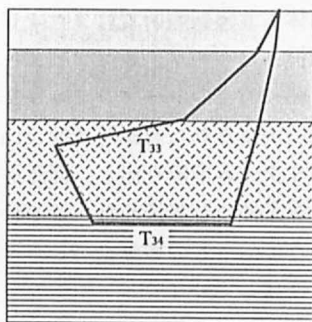
図V-3 京都大学防災研究所附属  
上宝地殻変動観測所によって決め  
られた震源分布図(1986~1988.12)

図V-4 水平成層構造における走  
時計算の場合分け

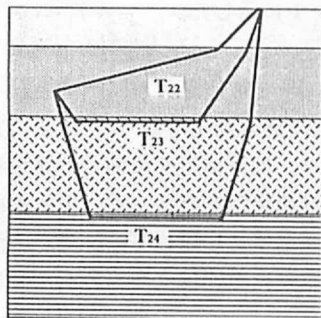
(1) 表層内に震源がある場合



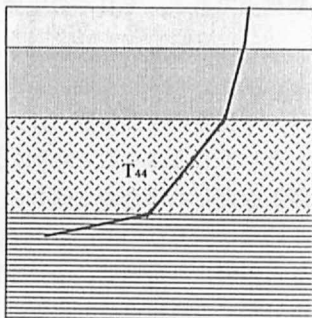
(3) 第3層内に震源がある場合



(2) 第2層内に震源がある場合



(4) 第4層内に震源がある場合



**水平成層構造を用いた震源決定法**

この震源決定法では、異なった弾性波速度を持ついくつかの水平な層を地下構造として仮定する。このような構造は、半無限構造に比べると、より実的な地下の速度構造を反映していると考えられる。一般に速度構造は、人工地震観測の結果などに基づいて仮定されることが多い。今回は、北陸観測所で用いられている速度構造 [竹内(1983)] とほぼ同じ4層構造を採用した。これは渥美-能登沖測線 [Aoki et al. (1972)] , 倉吉-花房測線 [Hashizume et al. (1972)] などの人工地震観測の結果を参考にして決められたものである。この速度構造モデルの妥当性については、後ほど改めて考察する。

地震波が震源から観測点まで伝わるのに要した時間を走時という。観測されたP波（またはS波）の走時に対して、計算される理論走時がそれとほぼ等しくなるような震源位置および震源時を探すことが震源決定の計算手順である。まず、水平成層構造における理論走時の計算方法について述べる。

**(a) 理論走時の計算**

地下構造を半無限構造と仮定した場合には、震源で発生した地震波が観測点まで直線的に伝播するものとして簡単に走時を計算することができる。しかし、水平成層構造の場合には、層境界での地震波の屈折の影響も考慮しなければならない。また、震源と観測点の位置関係によっては屈折波が初動になることもありうる。したがって、考えられるあらゆる経路の中から、観測点に最も早く到着する波の走時を用いて震源決定を行なわなければならない。そのため、理論走時の計算には、以下に示すようないくつかの場合わけが必要である。地震波経路の場合わけについては図V-4に示した。

**(a-1) 表層内に震源がある場合**

$$T_{11} = \frac{\Delta_2 + Z_{02}}{V_{P1}} \text{-----(1)}$$

$$T_{12} = \frac{\Delta}{V_{P2}} + \frac{(2h_1 - Z_0) \cdot \cos i_{12}}{V_{P1}} \text{-----(2)}$$

$$T_{13} = \frac{\Delta}{V_{P3}} + \frac{(2h_1 - Z_0) \cdot \cos i_{13}}{V_{P1}} + \frac{2h_2 \cdot \cos i_{23}}{V_{P2}} \text{-----(3)}$$

$$T_{14} = \frac{\Delta}{V_{P4}} + \frac{(2h_1 - Z_0) \cdot \cos i_{14}}{V_{P1}} + \frac{2h_2 \cdot \cos i_{24}}{V_{P2}} + \frac{2h_3 \cdot \cos i_{34}}{V_{P3}} \text{-----(4)}$$

ただし、 $T_{jk}$  : 第j層内の震源から出た地震波線が第k層を最深として伝播する時の走時  
 $h_n$  : 第n層の厚さ

$V_{Pn}$  : 第  $n$  層の P 波速度

$Z_0$  : 震源の深さ

$\Delta$  : 震央距離

$i_{mn}$  : 第  $m$  層から第  $n$  層への臨界の入射角

であり,

$$\cos i_{mn} = 1 - \frac{V_{Pn2}}{V_{Pn2}} \quad \text{-----(5)}$$

のように表わされる。

(a-2) 第 2 層内に震源がある場合

$$T_{22} = \frac{Z_0 - h_1}{V_{P2} \cdot \cos i_2} + \frac{h_1}{V_{P1} \cdot \cos i_1} \quad \text{-----(6)}$$

$$T_{23} = \frac{\Delta}{V_{P3}} + \frac{h_1 \cdot \cos i_{13}}{V_{P1}} + \frac{(h_1 + 2h_2 - Z_0) \cdot \cos i_{23}}{V_{P2}} \quad \text{-----(7)}$$

$$T_{24} = \frac{\Delta}{V_{P4}} + \frac{h_1 \cdot \cos i_{14}}{V_{P1}} + \frac{(h_1 + 2h_2 - Z_0) \cdot \cos i_{24}}{V_{P2}} + \frac{2h_3 \cdot \cos i_{34}}{V_{P3}} \quad \text{---(8)}$$

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{V_{P1}}{V_{P2}} \quad \text{(Snell の法則)}$$

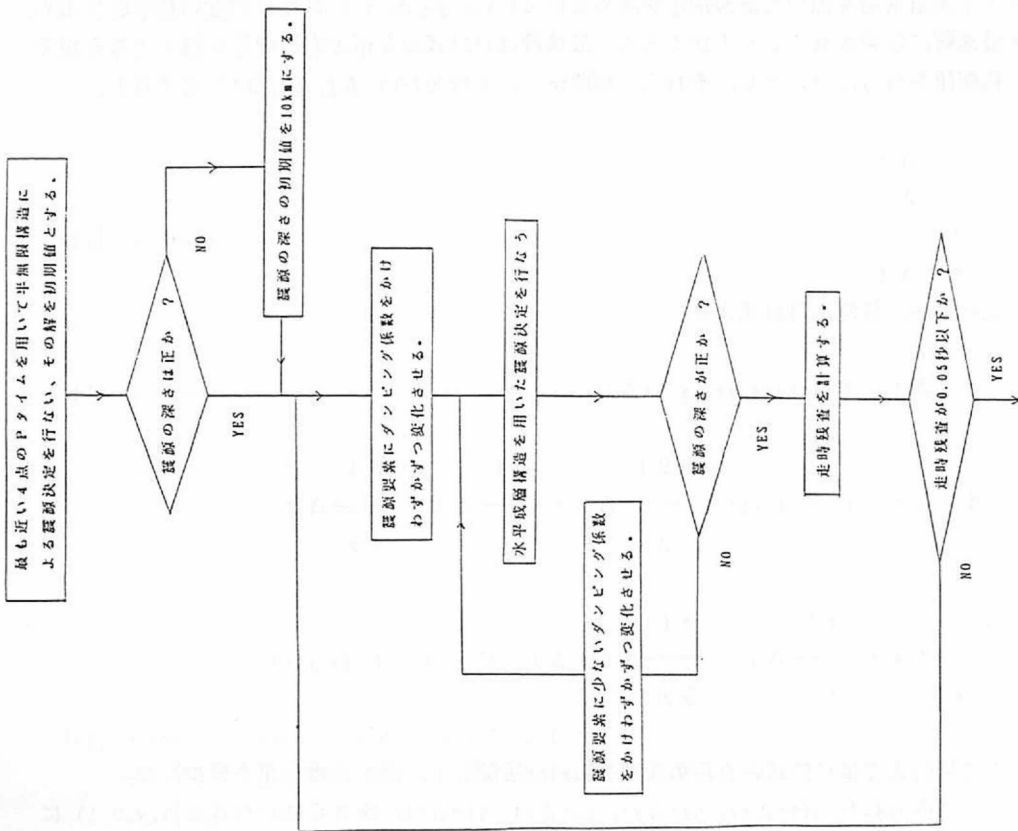
$i_1, i_2$  は解析的には求めることはできない。まず,  $i_2$  を震央距離  $\Delta$  と地震波の到達する位置を比較しながら反復計算により求め (図 V-7), 次に  $i_1$  を上の Snell の法則から導く。

(a-3) 第 3 層内に震源がある場合

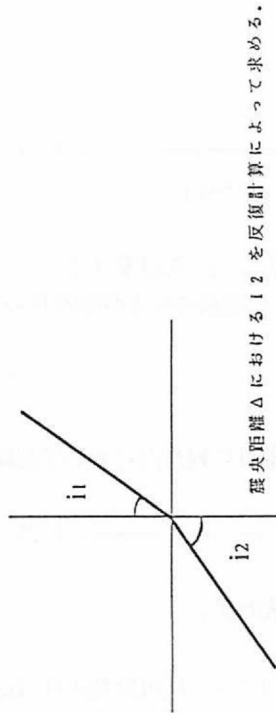
$$T_{33} = \frac{Z_0 - h_1 - h_2}{V_{P3} \cdot \cos i_3} + \frac{h_2}{V_{P2} \cdot \cos i_2} + \frac{h_1}{V_{P1} \cdot \cos i_1} \quad \text{-----(9)}$$

$$T_{34} = \frac{\Delta}{V_{P4}} + \frac{h_1 \cdot \cos i_{14}}{V_{P1}} + \frac{h_2 \cdot \cos i_{24}}{V_{P2}} + \frac{h_1 + h_2 + 2h_3 - Z_0 \cdot \cos i_{34}}{V_{P3}} \quad \text{---(10)}$$

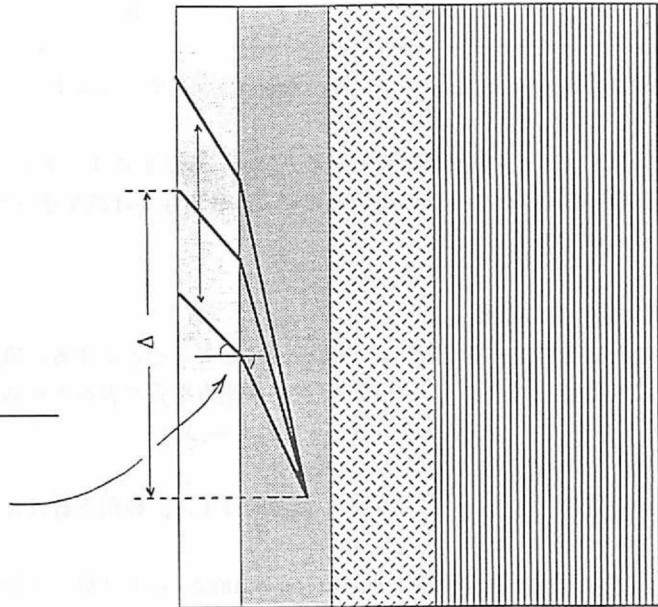
(a-2) と同様に, まず,  $i_3$  を反復計算で求め, Snell の法則によって  $i_1, i_2$  を計算する。



図V-6 震源決定プログラムの流れ図。



震央距離  $\Delta$  における  $i_2$  を反復計算によって求める。



図V-5 第2層内に震源がある場合、(1)式中の  $i_1$  および  $i_2$  の計算方法。



(a-4) 第4層内に震源がある場合

$$T_{44} = \frac{Z_0 - h_1 - h_2 - h_3}{V_{P4} \cdot \cos i_4} + \frac{h_3}{V_{P3} \cdot \cos i_3} + \frac{h_2}{V_{P2} \cdot \cos i_2} + \frac{h_1}{V_{P1} \cdot \cos i_1} \quad \text{-----(11)}$$

(a-2)と同様、まず  $i_4$  を反復計算で求め、Snellの法則によって  $i_1, i_2, i_3$  を計算する。

以上の (a-1)~(a-4) それぞれの場合において、最も速い経路を通ってきた地震波の走時を初動の理論走時とするわけである。

(b) 震源決定計算の手順

今、P波の理論走時を一般的に  $f_i(x_0, y_0, z_0)$  と書くことにする。第  $i$  番目の観測点において記録されたP波の到着時刻 (Pタイム)  $P_i$  は次の観測方程式で表わされる。

$$P_i = t_0 + f_i(x_0, y_0, z_0) \quad (i=1, 2, 3, \dots, N) \quad \text{-----(12)}$$

震源の位置は  $(x_0, y_0, z_0)$ 、震源時は  $t_0$ 、観測点数は  $N$  で表わす。

(13)式を以下に示す反復計算法 (Iteration method) により解く (図V-6)。反復計算法は  $(x_0, y_0, z_0, t_0)$  について、まず、なんらかの方法で (今回は、震源に近い順に4つの観測点を選び、そのPタイムから半無限構造を用いた震源決定を求めている)  $(x_0, y_0, z_0, t_0)$  に比較的近い初期値を求め、それを順次最適解に収束させていく方法である。最適解は(13)式の左辺と右辺の差が最小となる値である。今、初期値を  $(x, y, z, t)$  とし、それらと初期値とのずれを  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t)$  とすると、

$$\begin{aligned} x_0 &= x + \Delta x \\ y_0 &= y + \Delta y \\ z_0 &= z + \Delta z \\ t_0 &= t + \Delta t \end{aligned} \quad \text{-----(13)}$$

という式が成り立つ。(13)、(14)式より

$$P_i = t + \Delta t + f_i(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z) \quad \text{-----(14)}$$

$$\begin{aligned} &= t + \Delta t + f_i(x, y, z) + \frac{\partial f_i}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f_i}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial f_i}{\partial z} \Delta z \\ \therefore \frac{\partial f_i}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f_i}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial f_i}{\partial z} \Delta z + \Delta t &= P_i - t - f_i(x, y, z) \\ & \quad (i=1, 2, 3, \dots, N) \quad \text{-----(15)} \end{aligned}$$

となる。ここで(16)式では(15)式の右辺第3項をTaylor展開して、高次の微小量を無視した。

このようにして得られた  $\{(x + \Delta x), (y + \Delta y), (z + \Delta z), (t + \Delta t)\}$  をさらに(14)式の  $(x, y, z, t)$  に

置き換えて以上の計算を繰り返すことにより、次第に最適解に近い解を得ることができる。この解がどの程度最適解に近づいたか、すなわち解がどの程度収束したかは、次のようにして判断した。(16)式の右辺を  $d_i$  と置くと、

$$d_i = P_i - \{t + f_i(x, y, z)\} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, N) \quad \text{-----}(17)$$

と表わすことができる。これは観測走時  $P_i$  と理論走時  $\{t + f_i(x, y, z)\}$  の差であり、 $d_i$  は走時残差と呼ばれる。 $\sum d_i^2$  が観測条件から決まるある設定値より小さくなったところで解が十分収束したものと判断した。今回の決定された震源の走時残差の標準偏差は、ほぼ0.08秒程度である。

今、この震源決定法では未知数は4つであるから(13)式において  $N \geq 4$  であれば解くことができる。一般に、観測点数  $N$  が増えると解の信頼性が増す。ただし  $N \geq 5$  の時には、(16)式は最小二乗法で解かなければならない。

### マスターイベント法による震源決定法

水平成層構造を用いた震源決定法で述べたように、地震の震源要素は理論的には、未知数の数以上の観測データ数がある場合に決定可能である。しかし、実際には、計算された震源位置(連立方程式の解)は局地的な地殻構造の違いや観測点配置の関係などによって、ある系統的な誤差を持つ数値として与えられる。今回の解析では、空間的に集中したいくつかの地震について、このような系統的な誤差をより少なくし、震源決定の相対精度を向上させる目的でマスターイベント法という震源決定法を用いた。

このマスターイベント法 [Evernden(1967)] は、比較的精度よく決まっていると考えられる地震の震源と、そうでない地震の震源との相対的な位置関係を精度よく決めるという方法である。伊藤・黒磯(1979)はこの方法を若干改良し、微小地震の震源決定に応用した。今回はこの伊藤・黒磯(1979)、あるいは前田(1984)と同様の手法を用いて解析を行なった。具体的な計算の手順は次に示すとおりである。

(1)なるべく多くの観測点で記録が得られており、震源決定時の走時残差のできるだけ小さい地震をマスターイベント(基準とする地震)とする。つまり、このマスターイベントは、解析地域における比較的マグニチュードの大きな地震であると同時に、震源の決定精度もよいと思われるものである。

(2)決定しようとする地震と同じ観測点組み合わせで(同じ条件のもとで)、マスターイベントの震源決定をし直す。なお、この地震は、例えば観測点数が少ない、あるいは走時残差が大きい、などの理由によって震源決定精度があまりよくないと考えられるものである。

(3)このマスターイベントの震源を決め直す時に求められたそれぞれの観測点における走時残差を Station Correction(観測点補正)として、決めたい地震のPタイムから引く。

(4)決めたい地震の震源決定を行なう。

(5)(2)と(4)の震源位置の差をマスターイベントの震源に対する相対的な位置とする。

以上の計算により、ある観測点に固有の走時の進み・遅れや観測点の組み合わせによる系統的な誤差を取り除くことができる。

マスターイベント法では、マスターイベントから離れた地震になるほど相対的な震源精度が悪くなる。なぜなら、地震波がマスターイベントとは異なった経路を通ってくる場合には、Station Correctionが意味をなさなくなるからである。伊藤・黒磯(1988)は近畿地方北部における微小地震の解析に際して、マスターイベントから約25kmの範囲までは精度の向上に有効であると報告している。

今回の解析においてマスターイベント法を適用した範囲は最大でも10km四方程度の領域であった。

その適用した場所は、白山付近、赤兎山付近、湯涌付近、の3ヶ所である。それぞれ領域での地震数はそれぞれ37, 16, 27である。用いたマスターイベントは表V-4に示した。

### 震源誤差の見積もり

震源決定の誤差には、観測点の組み合わせによるものなどのほかにも、P・Sタイムの読み取り誤差や仮定した水平成層構造と現実の地下構造との違いによる誤差などが考えられる。

#### (a) 読み取り誤差による震源のバラツキ

初動の読み取りは、前述のようにペンレコーダの可視記録を用いて行なわれている。そのため、読み取りの際には必然的に誤差が生じる。これにより震源位置は、正しく計算されるべき位置に対してある誤差分布を持つ。各観測点のPタイムに、 $\pm 0.03$ 秒（北陸観測所では記録紙上で $\pm 0.24$ mm、上宝観測所では $\pm 0.3$ mmに相当する。）の誤差をランダムに与えて震源決定を行なった例を図V-7に示す。この図は、決定された震源の決定位置に、最も大きい向きで1.5km～3km程度のばらつきが含まれていることを示している。今回の震源決定位置も、この程度の誤差を含む可能性があるとして理解しておく必要がある。

#### (b) 仮定した地下構造の違いによる震源位置の移動

震源決定に用いた地下構造（速度構造）は、人工地震の観測結果から推定された水平成層構造である（図V-8（1））。しかし、それが実際の構造と完全に一致するものではないことは容易に考えられる。例えば、今回用いた速度構造においても、速度の遅い表層の厚さが、広域にわたって一様に4kmとは考えにくい。ただ、実際の構造と大きくかけ離れた速度構造を仮定すれば、震源を求める時になんらかの不都合なことが起こる可能性（例えば、震源が負に決まってしまうなどの矛盾）はある。

今回は実際に解析に用いた構造とは別に、図V-8の(2)(3)に示すような構造でも震源決定を行なってみた。実際に用いた構造をa構造、それ以外をb構造、c構造として計算結果を図V-9に示す。この図からは、a構造を用いたとき、最も震源のばらつきが少ないことがわかる。また、a構造に比べると、b、c構造ともその走時残差はa構造に比べて大きいことから、少なくともa構造がより適切な構造であろうと考えられる。

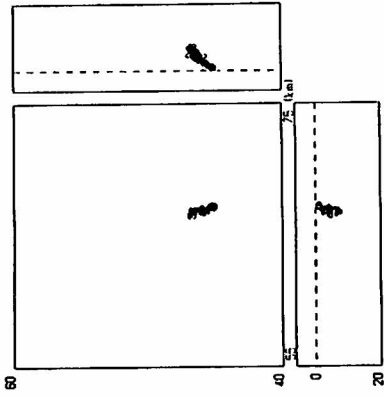
### (3) 発震機構解析

地震は岩石の破壊によって起こるとされるが、地震が発生した時、実際に震源域で起こっていることを明らかにする手段として、発震機構の解析がある。以下にP波初動を用いた発震機構の解析の方法について述べる。

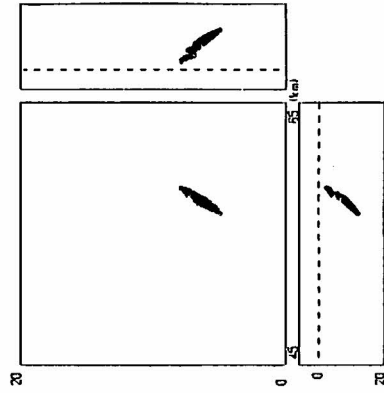
P波は縦波であるため、媒質は波の進行方向と平行に振動する。したがって、観測点に到達するP波の初動の方向は、震源から遠ざかる方向か、震源に近づく方向か、のいずれかである。前者を押し（Push）の波、後者を引き（Pull）の波と呼んでいる。今、各観測点の地震波形記録から読み取ったP波初動を、地震波の通ってきた経路にそって逆方向へたどっていくと震源でどのような波が発生したかがわかる。

今、震源を中心とする仮想的な球面（震源球）を考え、この球面上に押し引きの分布を描くと、ほとんどの場合、球の中心、つまり震源を通る2つの直交する平面で分けられる4つの領域にわかれる。この平面を節面と呼ぶが、2つのうちどちらか一方が震源域で生じた断層面をあらわすものと考えら

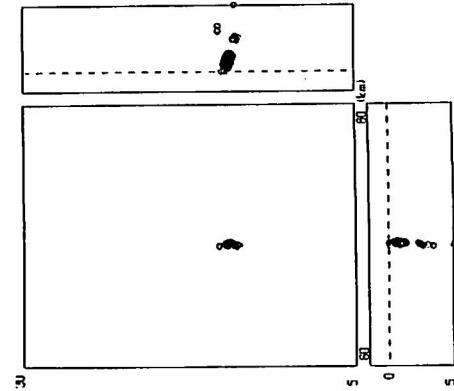
(3) 金沢市湯涌付近の誤差分布の図(深さは20ka)



(2) 赤兎山付近の誤差分布の図(深さは20ka)



(1) 白山付近の誤差分布の図(深さは5 km)



0 5km  
  
 (水平スケール)

図V-7 各観測点のPタイムに±0.03秒の誤差を与えた時に生じる震源決定位置の変化  
 震央分布図に示されている距離は北陸観測所座標原点(36°N, 136°E)からのもの。  
 今回の解折ではこれと同じ座標を用いている。また、下は東西断面図、右は南北断面図。  
 以下の図の範囲については図V-13を参照のこと。

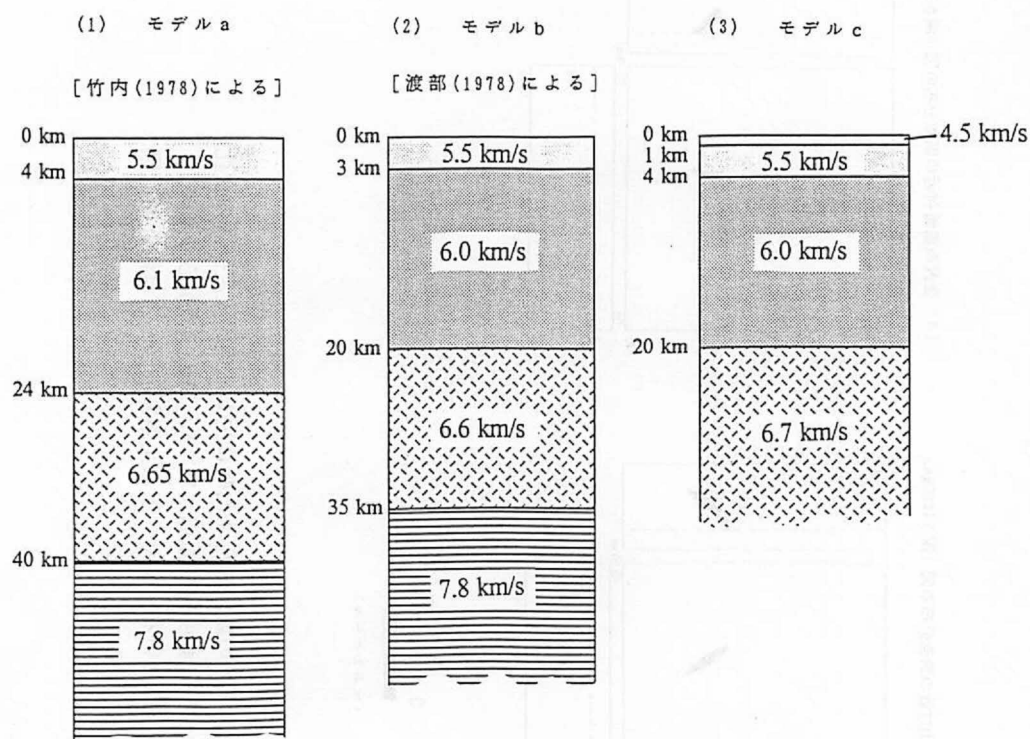
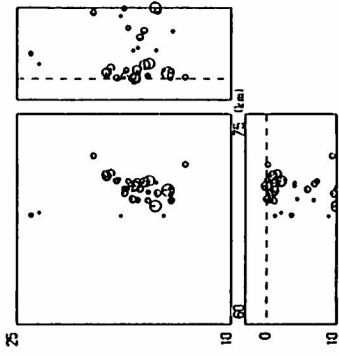
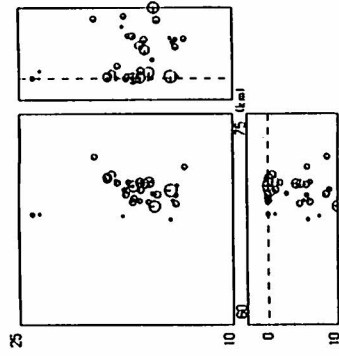


図 V-8 震源決定に用いた地下構造モデルの図. 速度は P波速度.

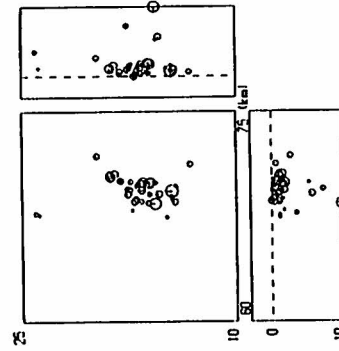
(3) モデルcを用いて震源決定を行なった場合。



(2) モデルbを用いて震源決定を行なった場合。



(1) モデルaを用いて震源決定を行なった場合。



NUM = 37

0 5km M 1.500  
1.1.1.1

(水平スケール)

図 V-9 地下構造モデルの違いによる震源決定位置の変化

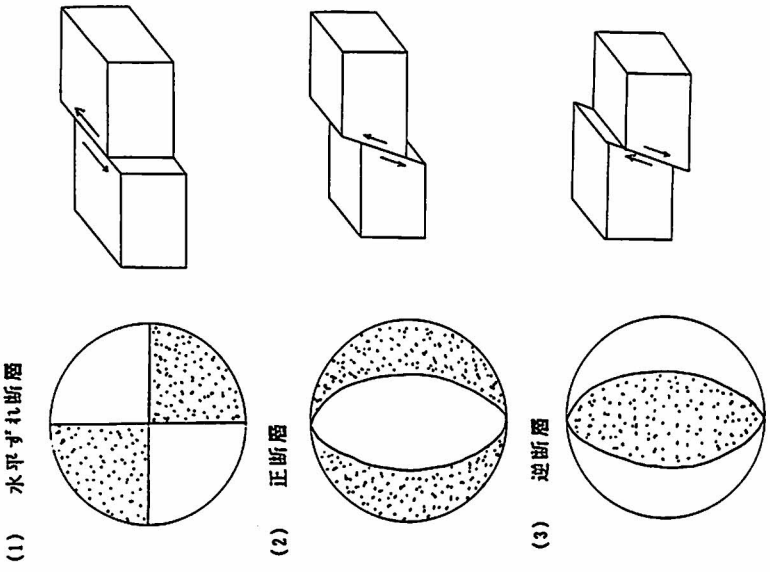
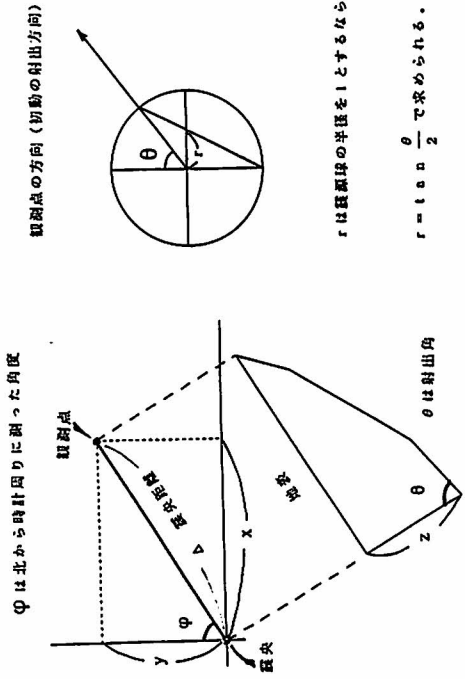


図 V-11 代表的な発震機構、点をつけた部分は初動が押し領域であり、無地の部分は初動が引き領域である。

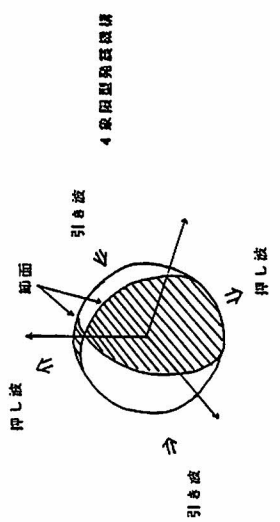
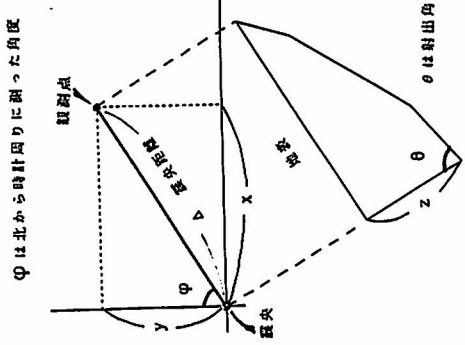


図 V-10 発震機構解析

れている。発震機構を解析するという事は、この節面を求めることにほかならない。なお、もう一方の節面は補助面と呼ばれている。この2つの節面のうち、どちらが実際の断層面をあらわしているかということ判断するには、震源分布や現地での断層の出現などほかの情報が必要となる。

実際の手順ではまず、震源から各観測点へ向かう地震波線の方位角 $\phi$ と射出角 $\theta$ を求める必要がある(図V-10)。地下構造に水平成層構造を仮定するならば、2-(2)で述べた方法と同様な方法で射出角を計算することができる。これらの角度を求めた後、ステレオ投影法、あるいは等積投影法により押し(●)、引き(○)のプロットを行なう。なお、この時注意しなければならないのは、ある震央距離を超えると初動が屈折波になる場合が生じる点である。このときには、投影半球を逆にしなければならない。

次に、プロットされた点が直交する2つの大円によって分割されるようウルフネットを用いて大円を描く。これらの大円は節線と呼ばれ、節線に沿って震源球を切った平面が節面となる。節面と節面の交線方向は地震波の振幅がゼロとなるところからヌル・ベクトルという。ヌル・ベクトルと直交し、2つの節面と45度の角をなす方向は、それぞれ主圧力軸(P軸)、主張力軸(T軸)と呼ぶ。P軸は引きの領域、T軸は押しの領域にある。

一般に発震機構は、押し引きの分布によって図V-11に示すような3つのタイプに分けられる。実際の地震では、(1)と(2)、(1)と(3)の組合わさったものがほとんどである。発震機構を解析する上で大切なのは、はっきりと方向が判断できるP波初動のデータができるだけ多くの観測点で得られていることである。ステレオ投影図上にたくさんの点がプロットされていれば、それだけ大円を引く時の任意性が少なくなるからである。大きな地震の発震機構は求めやすく小さな地震は求めにくい、とされるのはこのためである。

今回、発震機構を解析した地震は表V-4の●で示す。射出角の計算には震源決定に用いたものと同じ速度構造(図V-8のモデルa)を使用した。また投影法は、ステレオ投影法(上半球投影)を使用した。

#### (4) 臨時観測について

震源決定の精度、特に深さの精度を向上させるためには、観測点を地震発生地域のできるだけ近くに設けることが有効である。

今回の研究においても、震源精度の向上、観測網では得られないほどの小さな地震の有無の調査、あるいは発震機構の解析を容易にするなどの目的で、白山付近で臨時観測を行った。1988年は白山室堂まで小型地震計を運び上げ約6日間観測を行った。しかし、その期間中には白山周辺を震源とする地震は観測されなかった。さらに1989年には、より長期にわたって岐阜県郡上郡白河村白河中学と石川県白峯村中飯場においてOM型イベントレコーダ[尾池・松村(1985)]を用いた独自の観測を実施した。観測点位置、及び観測期間は図V-12、表V-3に示す。両地点とも昼間はノイズがあるものの、夕方から朝にかけては非常に観測条件がよかった。またラジオの受信状態も良好で、時刻精度は少なくとも0.05秒の信頼性があると思われる。今回の観測期間中には、いくつかの地震は観測されたものの、目的とする白山山体直下の地震は捕らえることができなかった。したがってこれらの臨時観測についての詳細な報告は省略する。

白山の地震活動を詳細に調べるためには、今回のような近距離からの臨時観測は非常に重要である。この経験をいかしてさらに長期間の観測を行なうことが望まれる。



表V-3 臨時観測点の位置

\* 期間が1ヶ月程度であるのは、電源や冬季間の積雪などの事情に制約されたためである。

観測点	緯度(N)	経度(E)	高度	状 況
白山室堂	36° 8' 44.45"	136° 46' 17"	2450 m	白山室堂白山比咩神社の北約100mの野外。露岩上に設置。 観測期間(1988/8/3~/8/7)
中飯場	36° 7' 31.62"	136° 45' 21"	1545 m	建設省気象観測用の小屋にレコーダ、近くの道路沿いのコンクリート壁に地震計を設置。 *5観測期間(1989/10/9~11/17)
白川中学校	36° 16' 13.80"	136° 53' 13"	480 m	校舎内の電源室床にレコーダ、地震計を設置。 観測期間(1989/10/4~ 1990/4)

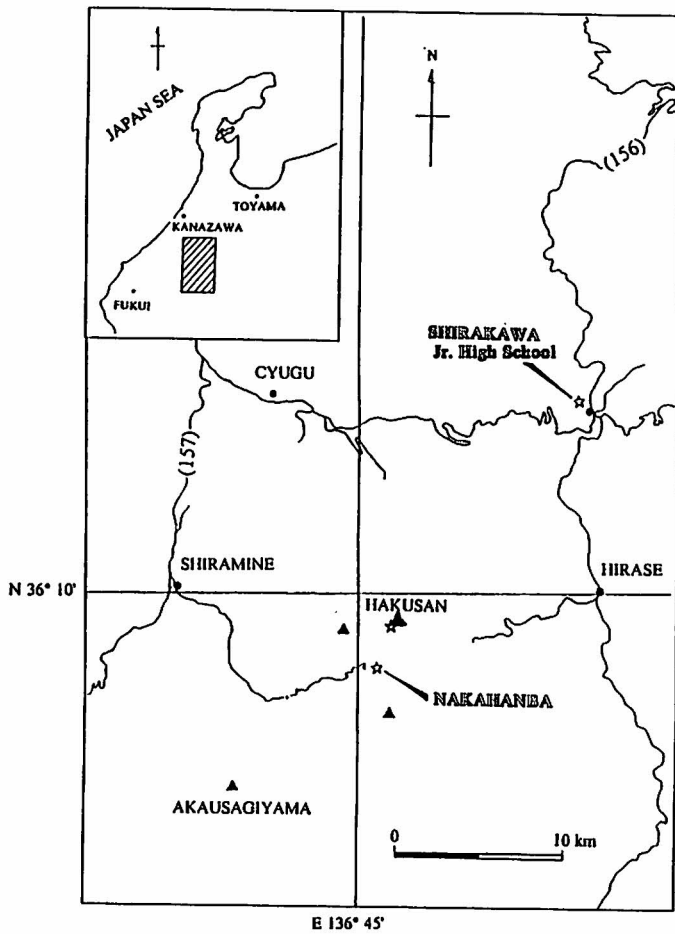


図 V-12 臨時観測点の位置(☆)。(156)，(157)は国道を示す。

### 3 結 果

#### (1) 震源分布

はじめに、全解析範囲〔図V-1において枠で囲んだ40km×80kmの領域。図V-13(1)〕について、2-(2)で述べた方法により震源決定を行なった結果を図V-13(2)に示す。全体的に見ると、北陸のほかの地域に比べてそれほどサイズシフトは高くはないが、地震が集中的に発生しているところがいくつか見られる。また、この地域には、御母衣断層ほか北西-南東方向に伸びるいくつかの活断層の存在が指摘されている。図V-13(2)には、これらと平行に震源が並んでいるように見える地域(例えば白山の北西など)もある。しかし、地震数が少ないため、断層に沿うものであるかどうかは判断できない。

図V-13(2)において枠で囲んだ3つの地域は、地震が集中して発生しているところであり、今回の解析でマスターイベント法を適用した地域である。Aは白山を中心とする地域、Bは赤兎山付近、Cは金沢市湯涌付近である。なお、赤兎山は第四紀に活動した火山の一つである。まず、研究の主目的である白山付近を例に、震源決定法の違いによってどのように震源位置が変化していくのかを示す。つづいて比較の意味からB・C地域の解析結果にも触れる。

#### 白山付近

図V-14(1)、(2)は北陸観測所、上宝観測所において、既に震源決定されている地震の震源分布図である。白山で発生している地震が、それぞれの観測網からみて外側に位置することから、震源決定の精度はあまりよいものではない。確かに白山付近で、なんらかの地震活動があるようには見えるが、この図からは、地震が白山付近で散在的に発生しているという印象を受ける。なお以下に掲げる図V-14において十字線の交点は、白山の主峰御前峰の位置を示している。

図V-14(3)は、今回、地下構造を半無限構造として震源決定を行なった結果である。P波速度は5.9km/sを仮定した。図V-14(1)、(2)で散在的に発生しているように見えた地震は、すべて白山の山頂付近に集中して発生していることがわかる。このような震源分布が得られた最も大きな原因は、白山周辺を中心に観測点を選び出し、震源を再決定したことによるものである。そのため、この地域が観測網の真ん中に位置することになり、震源決定の精度の向上をもたらしたと考えられる。震源の集中という現象が、ただちに精度の向上という判断に直接結び付くかどうかは一般的には問題である。しかし、震源決定の際、生じるランダムな誤差は、すべて震源分布を散在的にさせる傾向があることから、この震源分布図は、少なくとも従来の分布図よりは確からしいとすることができる。

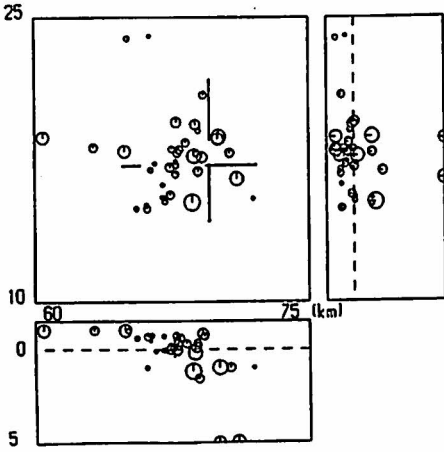
図V-14(4)は、水平成層構造〔図V-9(1)〕を用いて震源決定を行なった震源分布図である。震央分布は、半無限構造の結果と比べてほとんど変化が見られないが、この方法では震源の深さはほぼ3km以浅に集中することがわかる。これは水平成層構造を用いることによって、表層にあるP波速度の遅い層が考慮されたためであろう。

これにさらにマスターイベント法を適用したものが図V-14(5)である。図V-14(4)に比べると、さらに震源が白山山頂直下に集中している様子がわかる。なお、図V-7(1)でも示したように、Pタイムにランダムな誤差を与えた場合、震源はある誤差分布を持つ。今回再決定した震源分布は、この誤差の分布に大きさや形が類似しているため、実際には、地震はもっと限られた狭い場所で発生している可能性が大きい。また、この図では地震が3ヶ所に分かれて発生している様子が見られる。この地震の震源全体の広がり、誤差分布よりも大きいことから、この震源位置の分離は意味があることと

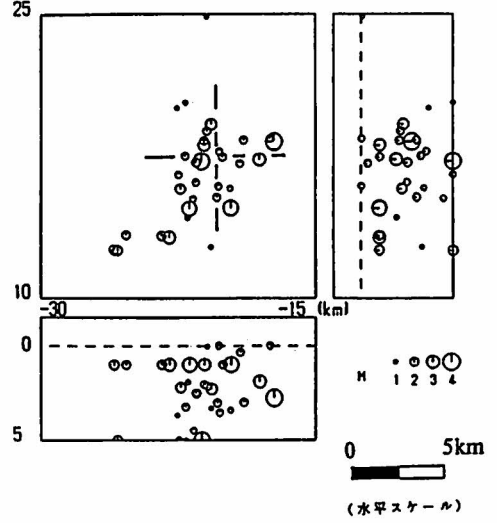


(1)  
 図 V-13 (1)全解析範囲内の主要都市、山頂、活断層・活断層は活断層研究会(1980)による。 --- --- --- などは活断層の確実度の違いを表わす。  
 (2)全解析範囲の震源を再決定した震央分布図。

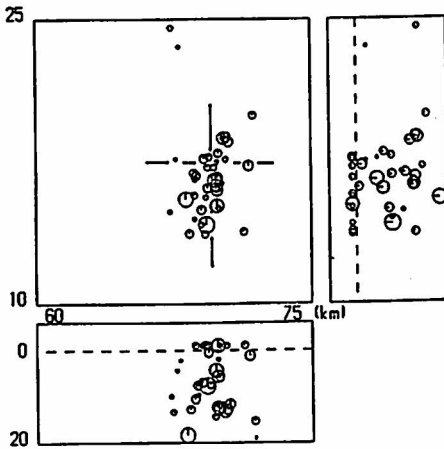
(1) 北陸観測所で決定されている震源分布



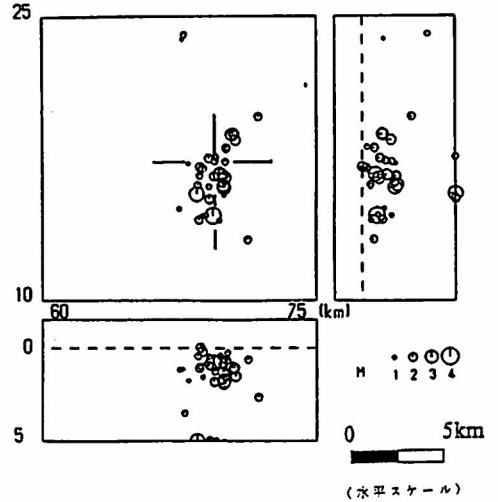
(2) 上宝観測所で決定されている震源分布  
なお、上宝観測所の座標原点は ( $36^{\circ}$   
N  $137^{\circ}$  E) である。



(3) 今回決定した震源分布 (半無限構造を用いて決定したもの)  
なお、深さは20kmである。

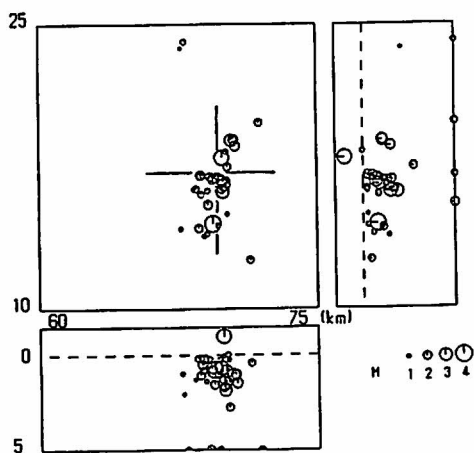


(4) 今回決定した震源分布 (水平成層構造を用いて決定したもの)

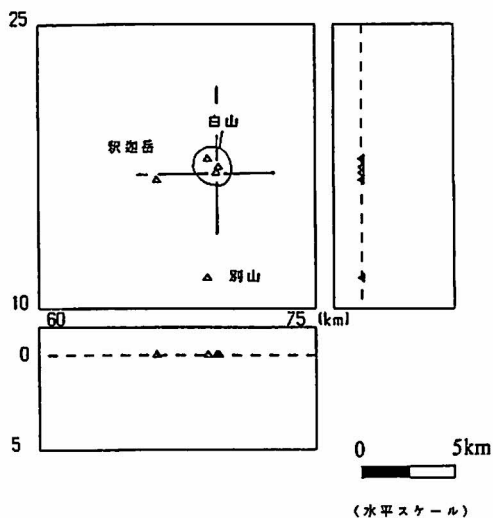


図V-14 白山付近の震源分布図 (1980.4~1989.6)

(5) 今回決定した震源分布 (マスターイベント法を使用したもの)

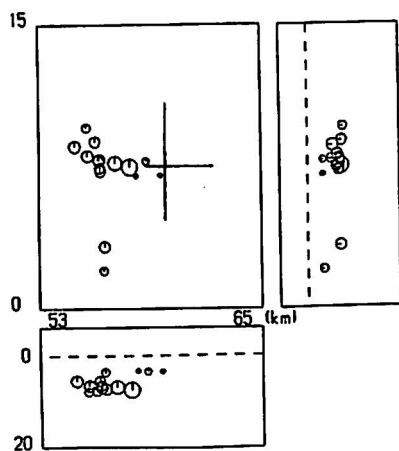


(6) この地域の主な山頂の図

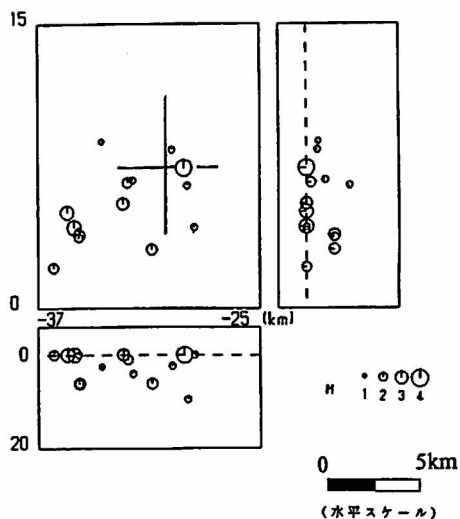


図V-14 白山付近の震源分布図 (1980.4~1989.6) (続き)

(1) 北陸観測所で決定されている震源分布

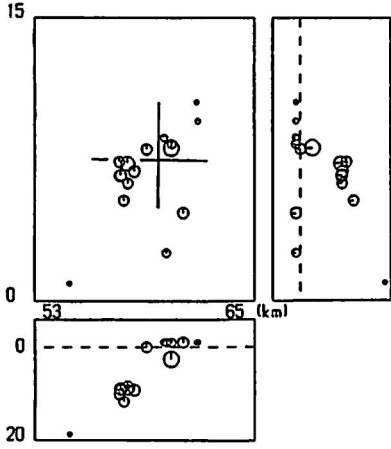


(2) 上宝観測所で決定されている震源分布  
なお、上宝観測所の座標原点は (36°  
N 137° E) である。

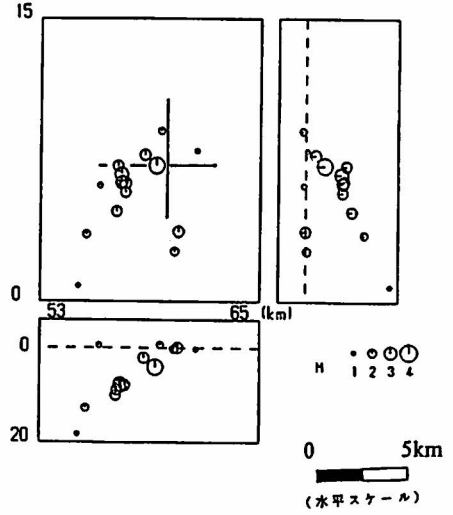


図V-15 赤兎山付近の震源分布 (1980.4~1984.4)

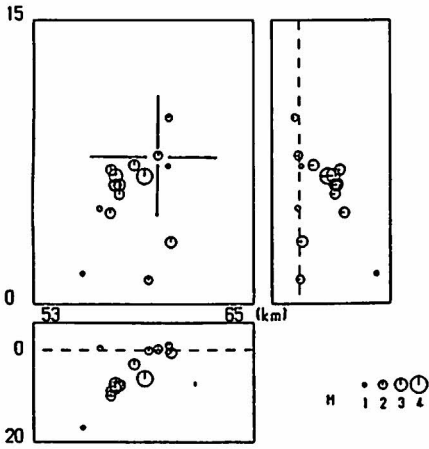
(3) 今回決定した震源分布（半無限構造を用いて決定したもの）  
 なお、深さは20kmである。



(4) 今回決定した震源分布（水平成層構造を用いて決定したもの）



(5) 今回決定した震源分布（マスターイベント法を使用したもの）



(6) 赤兎山の山頂の図

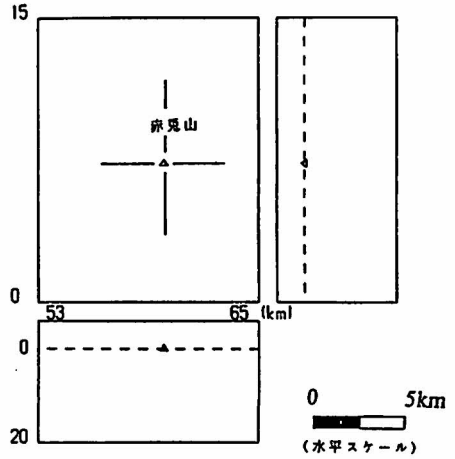


図 V-15 赤兎山付近の震源分布（1980.4～1984.4）（続き）

考えられる。なお、図V-14(6)にはこの付近の主な山頂の位置を示した。

### 赤兎山付近、および湯涌付近地域

両地域においても、地震は集中して発生している。B地域は、赤兎山南西部で発生している地震であり、C地域は、御母衣断層北端で発生している地震である。A地域と比較する意味もあり、同様に震源の再決定を行なった。それが図V-15(1)～(6)、16(1)～(5)である。震源決定の過程については、先程から述べているので触れないが、これらの図からは、この地域も、今回の解析によって震源決定の精度が向上していることがわかる。なお、A地域に比べてB・C地域ともやや震源は深いようである。

### (2) 発震機構

今回解析に用いた地震は最大のものでマグニチュードが4.0であり、P波初動の極性が得られた観測点数はただだか15点程度であった。そのため、発震機構を決定できた地震の数はそれほど多くはなかった。結果的に、今回新たに解析を行なった地震は白山付近で2つ、赤兎山付近で2つの合計4つの地震についてである。

図V-17(1)～(4)はP波の初動方向をステレオ投影法(上半球投影)でプロットした図である。図V-17(1)から、白山付近で発生したこの地震は、水平ずれ断層型(Strike-Slip型)に近い地震であることがわかる。つまり、白山付近では主圧力軸はほぼ北西-南東方向の向きを持っていることになる。

図V-18は今回の解析地域、及びその周辺の主な地震について、これまでに求められた発震機構の代表的なものをまとめものである[三雲・ほか(1985)、三雲・ほか(1987)など]。当然のことながら、図V-17(1)に示した地震1つから、この地域の応力場を決定することは不可能である。だが、この主圧力軸の方向は、これまでに決定されているいくつかの地震のものと調和的である。また、白山周辺地域に分布する断層も北西-南東方向を持つものが多いことから、少なくともこの地震はこれらの断層と関係があるものと考えられる。

図V-17(2)、(3)、(4)については、観測点数が少なかったり、決定的な位置にデータがなかったりしたため、節線を引くことはできなかった。

### (3) その他の解析

#### 時系列

地震の発生する時間間隔に特徴が見られないかどうか、前述のA・B・C地域において時系列解析を行なった。図V-19(1)～(3)はその結果である。なお、注意しなければならないことは、今回の解析では、2つの観測所とともに観測された地震(169個)しか取り扱っていないため実際に比べて地震数がかなり少ないことである。

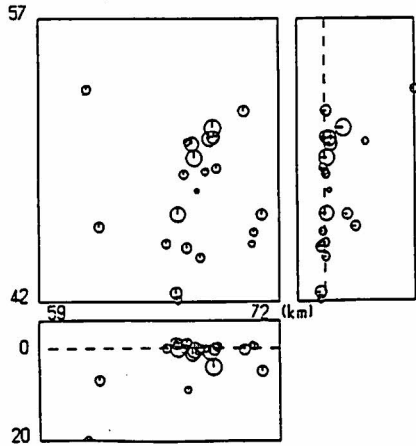
この3つの地域を比較すると、最近10年間において、白山付近では地震がほぼ定常的に発生していることがわかる。つまり、地震活動が活発な時とそうでない時の差があまり見られず、むしろ、いつも一定の地震活動があると言える。それに対して、赤兎山付近ではかなり規則的に地震が発生している。また、活動も群発的である。

#### 地震波形の特徴

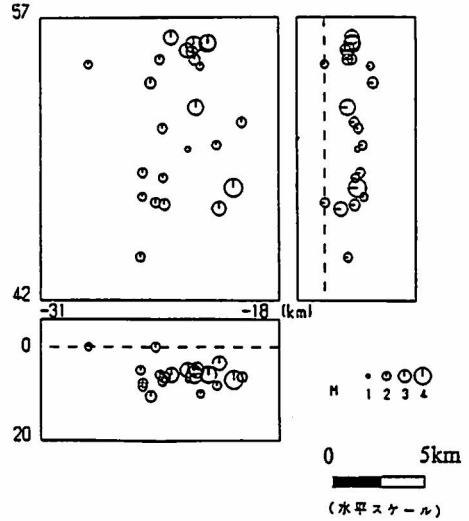
今回の解析では、波形について定量的な解析は行っていない。しかし、白山山体直下で発生する



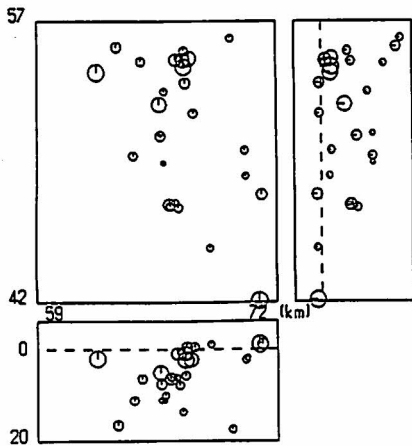
(1) 北陸観測所で決定されている震源分布



(2) 上宝観測所で決定されている震源分布  
なお、上宝観測所の座標原点は ( $36^{\circ}$   
N  $137^{\circ}$  E) である。



(3) 今回決定した震源分布 (半無限構造を用いて決定したもの)  
なお、深さは20kmである。



(4) 今回決定した震源分布 (水平成層構造を用いて決定したもの)

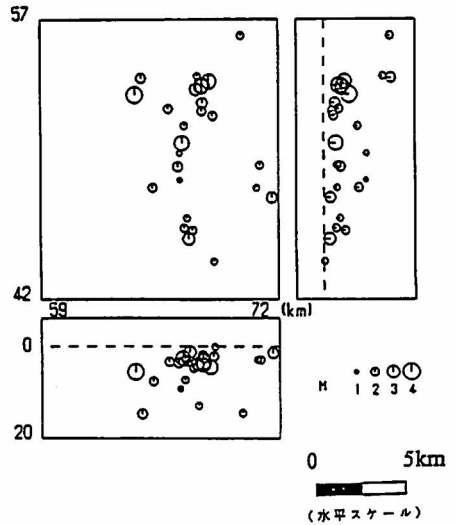


図 V-16 金沢市郊外の湯涌付近の震源分布 (1980.4~1989.6)

(5) 今回決定した震源分布 (マスターイベント法を使用したもの)

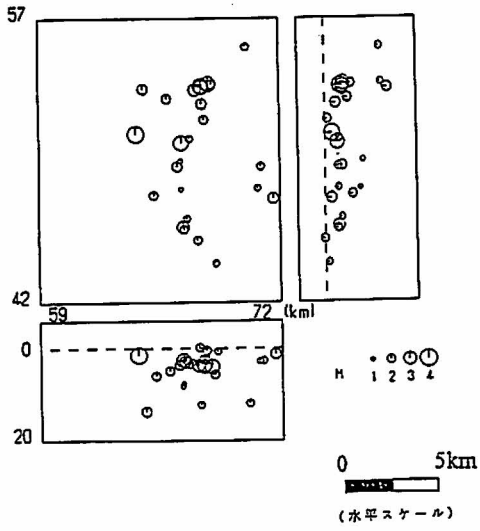
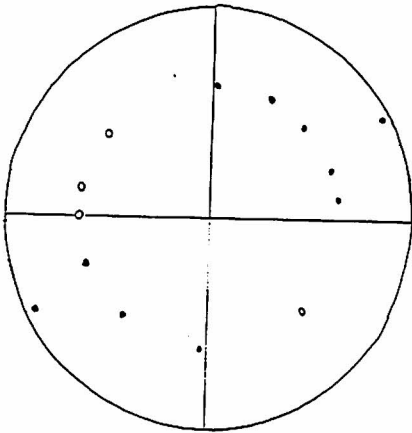


図 V-16 金沢市郊外の湯涌付近の震源分布 (1980.4~1989.6) (続き)

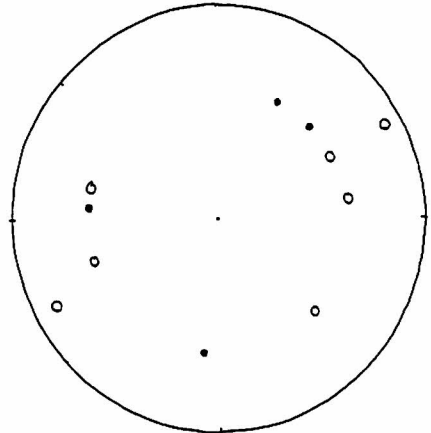
(1) 白山における地震の発震機構

(1982 4/14 9:03 M3.2 X=69.964 Y=16.029 Z=1.767)



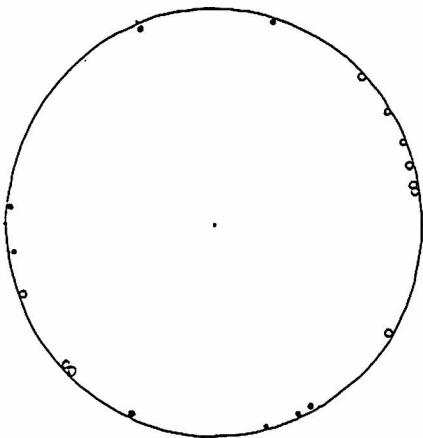
(2) 白山における地震の発震機構

(1988 4/13 15:37 M=3.3 X=69.750 Y=16.737 Z=1.325)



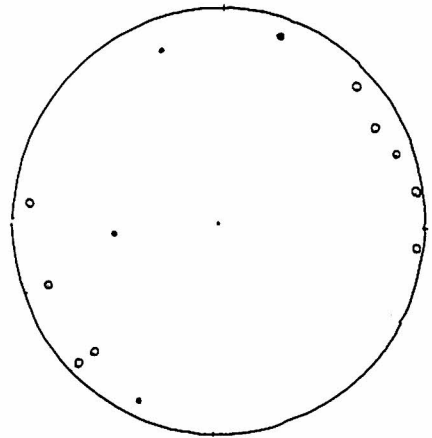
(3) 赤兎山における地震の発震機構

(1980 6/20 17:10 M=3.7 X=59.354 Y=7.193 Z=4.096)



(4) 赤兎山における地震の発震機構

(1982 12/26 5:02 M=3.2 X=57.433 Y=6.737 Z=7.716)



図V-17 発震機構

●は初動の押しを, ○は初動の引きを示す.

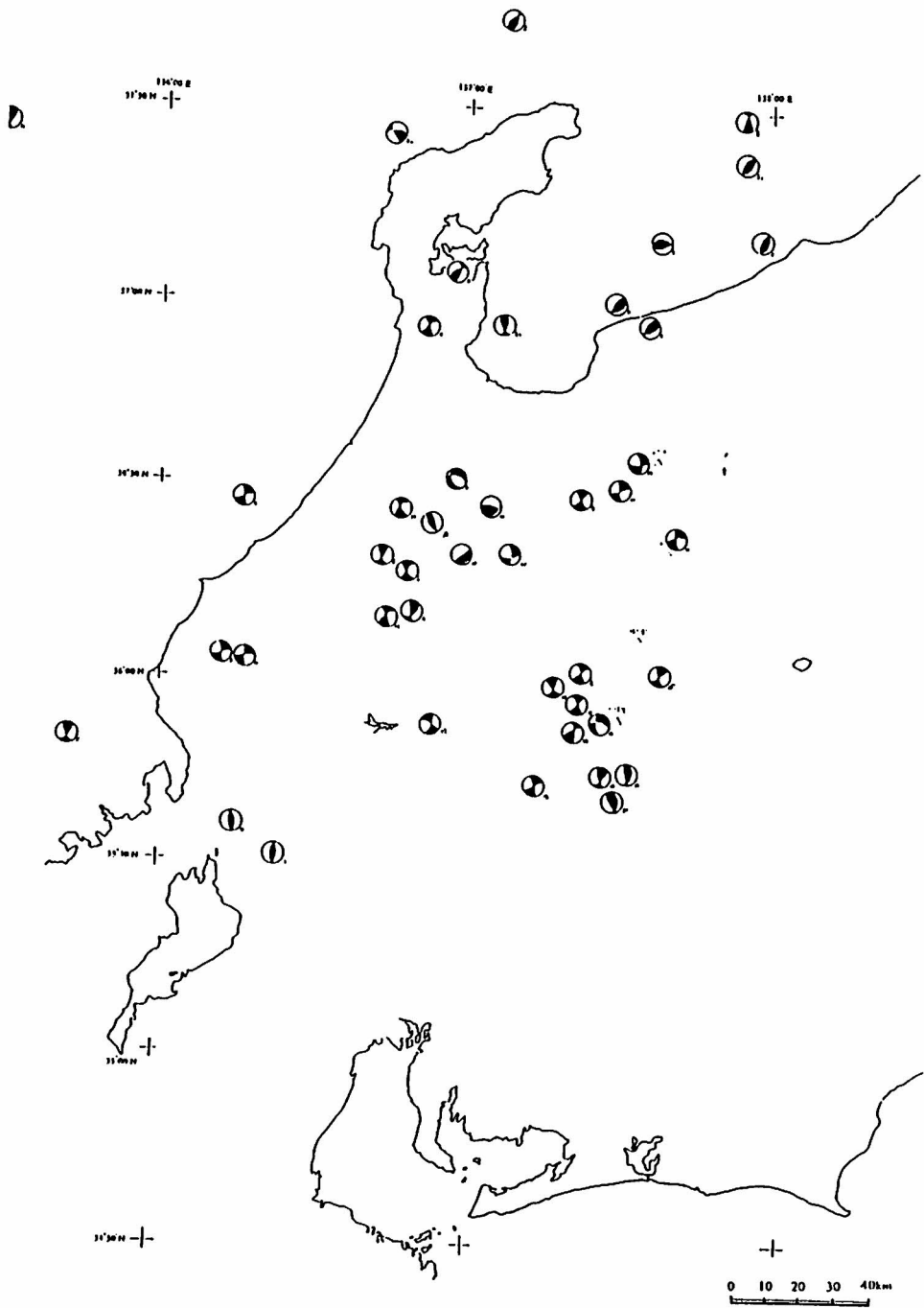


図 V-18 中部地方北部で過去に求められた発震機構の中から主なものをプロットした図

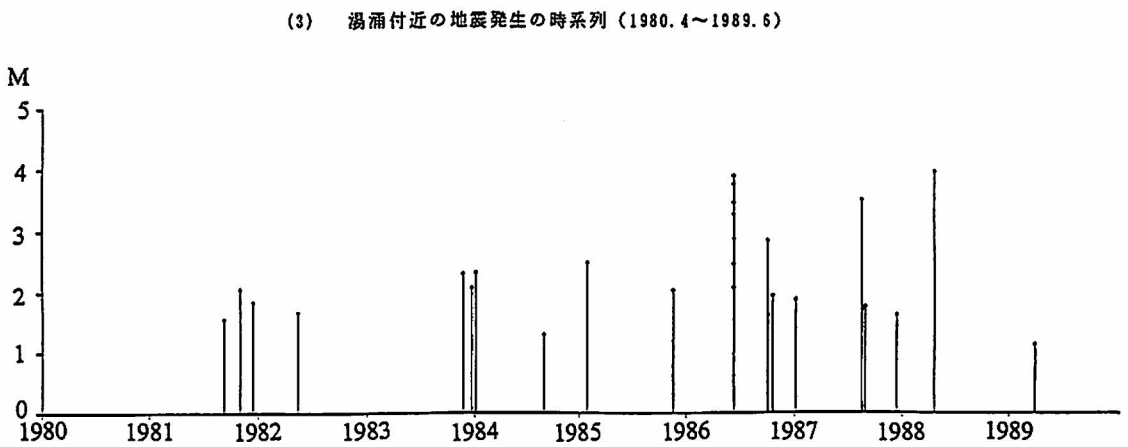
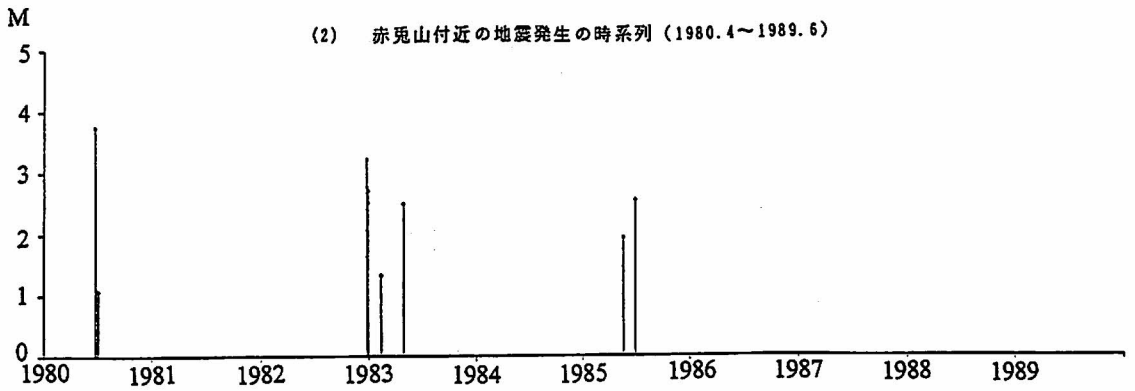
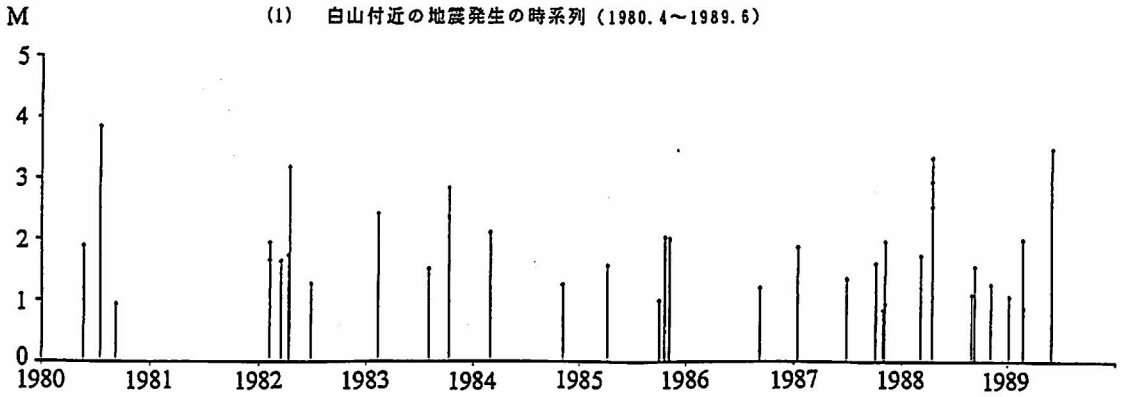


図 V-19 地震発生の時系列

一部の地震の波形には特徴的な波形を示すものがある。白山直下で発生する地震の波形はほかの地域で発生する同じような規模の地震に比べて、長周期成分が卓越しているように見える。この原因としては例えば震源域の破壊強度があまり高くなく、従って破壊時の断層運動がゆるやかになっている可能性などが考えられる。白山直下では固結度の高くない場所、あるいは岩石の破碎度が高い場所で地震が起こっているのではないだろうか。これは、白山で発生する地震の震源がほかの地域に比べて浅いことという結果とも調和的である。今後さらに、地震波形のスペクトル解析など定量的な解析が必要であろう。また、上述した波形の特性が、地震波の伝播経路の影響によるものとの解釈も可能であり、いくつかの震源と観測点の位置関係にも注意した解析も必要であろう。

#### 4 考 察

これまで述べてきたように、様々な方法を用いて震源決定を行なった結果、白山では、山体直下の非常に狭い領域で地震が集中して発生していることが明らかになった。位置的には、この震源の集中が見られる領域のほぼ上部に白山の火口群があることから、これらの地震は、白山の火山活動と関係があるものと考えるのが自然であろう。

一般に、火山で発生する地震を火山性地震と総称する。Minakami(1960)は、火山性地震をA型地震、B型地震と分類した。A型、B型地震は主に波形や震源の深さなどの違いによって分類されているが、その定義はそれほど厳密ではない。Minakami(1960)の定義に従えば、白山直下で発生している地震は、地震波形にP波、S波の相が明瞭に現われること、震源の深さが数km前後であることから、A型地震に分類されるものと考えられる。A型地震の発生の要因としては、火山内部のマグマの状態に対応した応力分布の変化によるもの〔西(1978)〕や、地下の熱水活動によるもの〔平賀(1980)〕などが考えられている。今回の解析は、発生の要因を考察するほど、データの量、質ともに十分でない。これは今後明らかにしていく必要がある。

一方、三雲・ほか(1988)は、飛騨地方の3次元速度構造について考察している。その中では、白山周辺地域について、白山の火成活動によるとみられるP波速度の遅い領域(高温の領域)がかなり深いところまで続いていることが指摘されている。このことは、白山直下の深い場所では脆性的な破壊が起こらない、つまり、震源が浅い領域に分布することと一致する。ほかの火山地域でも、高温であるマグマだまりの部分で地震が発生せずに、その周囲で地震が発生している例は多い〔石原(1988)〕。

飛騨山脈の下を通る地震波が大きく減衰するという現象は、現在多くの地震学者に認められている事実である。すなわち、長野県側で発生した地震波は、飛騨山脈の西側の観測点では減衰していて観測されにくいし、またその逆の現象も観測されている。このような現象の解釈として、飛騨山脈の地下10kmほどの所にマグマ溜まりのような高温の領域があってそこを通過する地震波を減衰させるのであろうと解釈されている。同様な現象は白山付近の下を通る地震波についても以前から気付かれている。このようなことから、白山は現在も活火山としての条件を十分備えた山であると考えられることができる。

火山地域に発生する地震の発震機構は、その地域の広域的な応力場と一致することが多い〔Zobin(1972)〕。今回の解析では、白山直下で起こる地震の発震機構には、この地域の応力場と一致するものが見られた。これは、過去に白山の地震について発震機構を調べた三雲・ほか(1985)の結果とも一致する。しかし、火山地域の地震についてより詳細に調べると、発震機構が時間的に刻々と変化する

例〔西(1978)〕,あるいは空間的に発震機構が異なる例〔井田・ほか(1986)〕も報告されている。白山の火山活動を明らかにするためにも、今後、より近距離での観測が望まれる。なお、今回得られた震央分布は、図V-19(5)に見られるようにほぼ南北に延びる方向性をもつ。火山地域では、震源が広域的な最大圧縮力方向に並ぶ傾向がある〔例えば、井田・ほか(1986)〕。白山周辺地域の広域的な最大圧縮力は、北西-南東方向であり、この震央分布の方向性とは一致しなかった。

初めにも述べたように、白山は活動の休止期に入ってから300年あまりたつ。長い活動の休止期にあった火山が噴火を再開した例は1888年の磐梯山、1979年の御岳、1990年の雲仙岳など多数ある。御岳では噴火の直前までほとんど地震活動は見られなかった〔青木・ほか(1980)〕。しかし、三原山では、噴火前から、その地震活動に変化が見られた〔山岡・ほか(1988)〕。現在のところ、少なくとも白山直下では地震活動が見られるのだから、火山としての白山は” 活きている ” のであり、今後、その活動様式に変化が現われないかを見守っていかなければならない。

## 5 結 論

本研究では、白山付近に発生する地震について震源を従来より高精度で再決定し、また、発震機構などの解析も行ない、その地震活動の基本的な特性について考察を行なった。その結果として以下のことが明らかになった。

- (1) 白山で発生する地震の震源は、山体直下の深さ数km付近に集中している。
- (2) これらの地震は、少なくとも最近の約10年間にわたって、ほぼ定常的に発生している。
- (3) これらの地震の発震機構は、この地域の広域的な応力場と調和的である。
- (4) したがって、白山は現在も活火山としての条件をそなえている。

現在の白山は表面上静かだが、以上のように、火山体内部において地震活動を継続している。したがって、白山は今後再び噴火活動を行なうようになる可能性が考えられる。

## 6 おわりに

今後白山の地震活動に関してさらに考察を深めるためには、観測点を白山山頂から近距離の地点に展開して地震を観測すること、それによって地震活動度と震源を正確に知るだけでなくマグマ溜まりからの反射波をとらえること、地震波形の定量的解析、Q値構造の解析、及び減衰構造の解明をすること、広域応力場と周辺の構造運動との関連を考察すること、など多くのアプローチが必要である。さらに、これらの地震学的データだけでなく重力や地磁気などのほかの地球物理学的・地質学的データを補強し、それらを関連づけて解析することが必要である。また、ほかの火山と比較することも白山を理解する上で重要である。

## 7 謝 辞

この研究を行なうにあたって、多くの方々から御指導ならびに御協力をいただいた。まず、京都大

学防災研究所北陸微小地震観測所（西上欽也，平野憲雄），同上宝地殻変動観測所（和田博夫），名古屋大学理学部付属高山地震観測所（藤井 巖），同地震火山地域センター（大井田 徹）（敬称略）の方々からは，貴重なデータを提供していただいた。今回の解析は西上欽也博士に多くの御指導をいただいた。長尾年恭氏（金沢大学理学部）は臨時観測において御協力をいただいた。臨時観測では，白山比洋神社，建設省北陸地方建設局金沢工事事務所および岐阜県白川村白川中学校の関係者に，観測場所の提供をはじめとして様々な御協力をいただいた。これらの方々にお礼申し上げます。

## 8 文 献

- Aoki, H., T. Tada, Y. Sasaki, T. Ooida, I. Muramatsu, H. Shimamura and I. Furuya (1972) Crustal Structure in the Profile across Central Japan as Derived from explosion Seismic Observations. *J. Phys. Earth*, vol. 20, p. 197-223.
- 青木治三・大井田徹・藤井巖・山崎文人（1980）御岳山1979年火山活動の地震学的調査・研究。御岳山1979年火山活動および災害の調査研究報告，p. 55-74
- Hashizume, M., O. Kawamoto, S. Asano, I. Muramatsu, T. Asada, I. Tamaki and S. Murauchi (1966) Crustal Structure in the Western Part of Japan Derived from the Observation of First and Second Kurayosi and Hanabusa Explosions. Part 2, Crustal Structure in the Western Part of Japan. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, vol. 44, p. 109-120.
- 平賀士郎（1980）地下熱水活動と群発地震との相関。自然災害資料解析，vol. 7, p. 126-138.
- 平野憲雄・岡本拓夫（1988）パソコンによるOM型レコーダーの再生と読み取りシステム。地震学会講演予稿集，No. 1, p. 338.
- 井田喜明・山口勝・増谷文雄（1986）霧島火山における最近の地震活動と応力場。地震，vol. 39, p. 111-121.
- 井田喜明・山口勝・増谷文雄（1986）霧島火山と加久藤カルデラのに最近の地震活動。地震，vol. 39, p. 595-605.
- 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，vol. 31, p. 59-73.
- 伊藤潔・黒磯章夫（1979）小地震の前震余震分布。地震，vol. 32, p. 317-327.
- 伊藤潔・黒磯章夫（1988）マスターイベント法による近畿地方北部における微小地震の震源の精密決定と深さ分布。地震，vol. 41, p. 179-188.
- 金森博雄編（1978）地震の物理。岩波書店
- 岸本北方・尾池和夫・渡辺邦彦・佃為成・平野憲雄・中尾節郎（1978）鳥取及び北陸微小地震観測所のテレメータシステムについて。地震，vol. 31, p. 265-274.
- 久保寺章（1984）火山活動に関連する地震活動。月刊地球，vol. 6, p. 710-715.
- 前田直樹・渡部晃（1984）微小地震の活動様式。地震，vol. 37, p. 579-598.
- 松山和也（1988）大山付近の地震について。鳥取大学卒業論文。
- 三雲健・小泉誠・和田博夫（1985）飛騨地方北部の地震活動，地震メカニズム及びテクトニクス。地震，vol. 38, p. 25-40.
- 三雲健・石川有三（1987）日本海沿岸の地震と広域テクトニクス。地震予知シンポジウム，p. 259-



- 三雲健・平原和朗・竹内文朗・和田博夫・佃為成・藤井巖・西上欽也（1988）飛騨地方の3次元上部地殻構造と活断層及び地震活動。月刊地球, vol. 11, p. 90-96.
- Minakami, T. (1960) Fundamental research for predicting volcanic eruptions. Bull. Earthq. Res. Inst., vol. 38, p. 497-544.
- 西 深（1978）桜島火山に発生するやや深い地震の発震機構。京都大学防災研究所年報, vol. 21, p. 145-152.
- 尾池和夫・松村一男（1985）音響用テープレコーダを用いた地震波形記録装置（OM型イベントレコーダ）。地震, vol. 38, p. 359-364.
- 大倉敬宏（1988）山陰, 近畿, 北陸に発生する浅発地震の発震機構。地震, vol. 41, p. 89-96.
- 竹内文朗（1978）北陸地方の微小地震活動の特徴について（その2）。京都大学防災研究所年報, vol. 26, p. 145-151.
- 宇津徳治（1984）地震学 第2版。共立出版。
- 山岡耕春・渡辺秀文・坂下至功（1988）1986年伊豆大島噴火前後の地震活動。火山, vol. 33, 伊豆大島噴火特別号, p. 91-101.
- 山崎謙介・田村尚志・川崎一郎（1985）日本海に発生する浅発小地震の発震機構。地震, vol. 41, p. 89-96.
- 山崎正男・中西信弘・松原幹夫（1968）白山火山の形成史。火山, vol. 13, p. 32-43.
- 山崎正男（1980）歴史に記された白山火山の噴火。「はくさん」, vol. 8, p. 8-10.
- 横山泉・荒牧重雄・中村一明編（1979）火山。岩波書店。
- 和田博夫・三雲健・小泉誠（1979）飛騨地方北部特に跡津川断層付近の地震活動と発震機構。地震, vol. 32, p. 281-296.
- 渡辺邦彦・平野憲雄・岸本兆方（1978）北陸地方の微小地震活動（第1報）。京都大学防災研究所年報, vol. 21, p. 57-67.
- Zobin, V.M. (1972) Focal mechanism of volcanic earthquakes. Bull. Volcanol., vol. 36, p. 561-571.

表 V-4 (1) 全解析範囲 (図 V-1) 内の再決定された震源リスト  
 水平成層構造を仮定し震源決定を行ったもの。

NUM	YE	MO	DY	HIO	MI	SEC	X	Y	Z	MAG	NUM	YE	MO	DY	HIO	MI	SEC	X	Y	Z	MAG
5514	80	5	18	13	23	11.522	68.617	14.305	1.100	1.877	7477	82	6	16	5	15	30.363	51.796	1.674	999.999	0.991
5611	80	6	20	17	10	43.266	59.354	7.193	4.096	3.749	7506	82	6	25	7	7	2.908	70.159	18.161	0.229	1.265
5621	80	6	22	6	49	37.562	61.542	7.957	0.300	1.104	7530	82	7	5	23	11	25.462	73.342	38.441	11.177	1.519
5651	80	6	30	4	47	35.298	55.104	0.819	18.233	1.060	7531	82	7	5	23	12	30.924	73.576	38.436	11.909	2.380
5714	80	7	15	11	37	25.068	69.378	14.528	0.795	3.827	7879	82	11	29	2	15	53.504	61.471	38.331	13.105	2.017
5717	80	7	15	20	4	42.012	68.409	7.568	0.334	2.177	7941	82	12	26	4	13	0.151	57.659	5.793	7.954	2.409
5853	80	9	5	4	0	56.562	68.877	17.020	-0.001	0.927	7942	82	12	26	4	16	1.469	99.831	45.563	0.108	2.069
5911	80	9	27	8	24	20.179	66.710	26.512	8.027	1.207	7945	82	12	26	4	57	29.063	59.611	9.002	-0.631	1.627
5916	80	9	27	21	30	37.616	60.571	36.066	12.449	3.858	7946	82	12	26	5	2	7.149	57.433	6.737	7.716	3.220
5928	80	10	3	2	12	29.689	60.504	35.890	12.308	2.364	7949	82	12	26	5	52	41.736	57.411	6.286	8.023	2.767
6076	80	11	30	18	13	34.628	89.720	37.560	4.296	2.079	7952	82	12	26	10	30	36.650	57.489	6.359	8.181	2.675
6113	80	12	20	5	23	46.761	60.575	35.437	11.324	2.017	7955	82	12	26	14	29	18.389	57.198	4.796	9.954	2.411
6333	81	3	25	18	1	29.556	65.008	-0.605	1.989	1.949	7974	82	12	29	20	27	18.479	58.724	7.756	2.137	2.510
6367	81	4	7	12	4	30.591	87.292	26.090	6.131	2.419	7977	82	12	30	16	36	40.457	57.657	6.265	7.876	2.713
6501	81	6	4	16	16	10.767	66.729	5.259	7.556	1.483	8008	83	1	13	5	39	15.938	82.081	-9.768	10.772	2.866
6624	81	7	18	4	7	39.960	54.166	27.218	4.971	1.125	8091	83	2	11	16	39	16.874	56.261	6.148	-0.498	1.320
6944	81	11	19	18	30	47.092	73.687	39.371	10.128	1.367	8218	83	3	20	17	38	28.316	60.136	36.941	1.716	0.968
7092	82	1	21	20	30	7.065	88.602	29.334	9.425	2.750	8306	83	4	27	17	8	50.565	57.258	7.170	8.779	2.498
7125	82	2	5	1	26	38.972	69.878	16.301	1.735	1.944	8307	83	4	27	18	4	19.439	60.506	36.849	1.497	1.193
7127	82	2	5	6	29	40.683	69.452	17.458	1.259	1.656	8445	83	6	16	16	25	27.443	60.612	36.973	1.789	1.498
7286	82	4	8	18	42	36.326	71.841	19.750	2.669	1.737	8575	83	8	1	14	54	11.660	70.041	17.404	1.599	1.508
7296	82	4	14	9	3	15.791	69.964	16.029	1.767	3.178	8811	83	10	10	10	22	26.773	70.518	18.867	1.088	2.340
7298	82	4	15	12	9	28.144	59.506	37.547	6.656	1.167	8814	83	10	10	16	1	17.760	70.587	18.534	1.545	2.370
7388	82	5	19	20	46	55.512	53.050	27.526	-0.047	1.584	8815	83	10	10	16	13	41.453	70.384	18.821	1.085	2.844
7448	82	6	9	11	37	8.867	77.271	33.936	11.630	2.667	9231	84	2	27	9	3	9.455	68.707	17.076	0.283	2.102

表V-4 (1)全解析範囲(図V-1)内の再決定された震源リスト(続き)  
水平成層構造を仮定し震源決定を行ったもの。

NUM	YE	MO	DY	HM	MI	SEC	X	Y	Z	MAG	NUM	YE	MO	DY	HM	MI	SEC	X	Y	Z	MAG
9289	84	3	17	17	3	14.149	60.554	37.015	1.652	1.167	12786	86	7	6	13	29	8.835	76.714	34.475	11.119	1.367
9336	84	4	3	12	2	36.875	60.355	39.182	17.284	1.187	12970	86	9	7	18	27	12.436	69.730	14.269	0.487	1.187
9369	84	4	15	22	8	23.644	65.669	6.381	0.202	2.043	12972	86	9	8	23	13	36.645	68.678	7.032	-0.002	1.167
9510	84	5	26	16	50	9.941	59.827	37.669	5.740	1.146	13134	86	11	6	18	59	-0.278	66.866	6.309	0.933	1.207
9569	84	6	3	23	6	23.433	66.801	-5.929	5.494	1.728	13333	87	1	12	1	46	29.947	70.086	18.114	0.658	1.862
9626	84	6	22	13	0	36.325	67.316	4.313	0.275	2.175	13404	87	2	11	2	11	22.095	54.474	32.758	1.052	1.246
9650	84	6	30	16	35	14.260	60.508	37.198	1.796	1.125	13669	87	5	16	10	29	55.191	56.001	34.179	14.432	1.207
9792	84	8	16	4	38	11.257	89.786	-1.694	4.374	2.595	13857	87	6	26	23	17	21.226	67.803	24.037	3.522	1.338
10811	84	11	2	0	25	18.479	68.980	14.552	0.848	1.246	34	87	7	10	10	53	36.630	68.931	6.423	-0.021	1.891
11402	85	4	6	3	31	39.738	69.519	17.632	7.287	1.555	310	87	10	1	12	41	30.463	68.537	16.179	0.433	1.586
11448	85	4	17	6	52	16.457	59.353	-0.675	23.350	2.166	355	87	10	22	8	18	0.945	67.636	6.892	-0.007	1.355
11458	85	4	18	21	25	10.674	67.758	2.977	3.335	2.750	364	87	10	27	8	6	21.231	67.675	23.556	1.942	0.823
11558	85	5	20	8	58	44.552	60.368	2.698	0.237	1.944	381	87	11	3	3	59	1.879	68.974	15.619	5.292	0.927
11559	85	5	20	9	9	31.407	55.546	3.573	12.657	1.752	382	87	11	3	5	38	28.956	69.137	17.582	0.957	1.944
11701	85	7	1	8	50	23.057	60.569	3.746	-0.055	2.562	447	87	11	27	4	23	40.984	46.711	33.310	19.408	1.187
11959	85	9	30	15	19	-1.067	69.724	17.033	0.357	0.991	715	88	3	5	4	47	4.880	70.996	13.719	10.000	1.719
12051	85	10	20	22	50	21.598	69.175	15.417	5.726	2.030	796	88	4	13	15	29	39.834	70.017	16.548	0.889	2.913
12103	85	11	5	5	7	9.998	68.802	17.054	0.262	2.004	797	88	4	13	15	30	0.879	69.939	16.154	1.896	2.921
12152	85	11	22	0	9	53.017	52.820	31.639	8.413	1.265	798	88	4	13	15	37	14.409	69.912	16.699	1.325	2.504
12423	86	2	22	5	14	5.929	87.046	5.131	1.994	2.106	799	88	4	13	15	37	31.325	69.750	16.737	0.713	3.308
12424	86	2	24	3	22	36.560	86.919	4.574	0.971	1.848	896	88	5	29	14	47	53.567	67.124	25.283	0.992	2.924
12448	86	3	3	23	47	13.082	52.518	32.872	0.160	1.742	1090	88	8	28	20	19	46.232	68.801	14.513	1.586	1.082
12503	86	4	1	11	39	27.480	79.053	25.564	8.731	3.065	1119	88	9	7	14	29	53.807	68.639	16.678	1.003	1.539
12674	86	5	29	6	56	45.678	71.826	-1.616	12.955	2.094	1197	88	10	9	12	10	-1.833	67.469	9.924	4.793	1.504
12675	86	5	29	7	1	36.525	70.047	-2.808	18.744	2.834	1264	88	11	2	18	45	21.257	69.159	16.084	0.453	1.246

表V-4 (1)全解析範囲(図V-1)内の再決定された震源リスト(続き)  
水平成層構造を仮定し震源決定を行ったもの。

NUM	YE	MO	DY	HIO	MI	SEC	X	Y	Z	MAG	NUM	YE	MO	DY	HIO	MI	SEC	X	Y	Z	MAG
12	89	1	4	8	21	56.063	67.533	14.882	1.191	1.049	7377	82	5	15	23	35	48.615	67.511	53.979	12.958	1.669
48	89	2	20	19	1	55.837	69.427	16.633	1.837	1.975	7861	82	11	21	14	46	10.578	58.724	40.875	16.595	2.390
59	89	2	23	18	44	54.340	68.019	17.306	1.795	0.860	8089	83	2	10	12	53	24.204	99.999	99.999	10.000	2.419
11	89	3	5	4	6	52.288	56.155	30.836	2.061	1.388	8097	83	2	12	21	51	15.336	75.757	64.953	12.018	2.212
39	89	4	14	12	58	28.176	55.220	31.359	0.364	0.895	8716	83	9	12	6	42	51.109	72.426	56.388	11.304	1.892
71	89	4	24	2	47	29.934	83.851	26.237	7.649	1.934	8749	83	9	23	1	57	38.514	54.427	61.494	18.017	2.684
72	89	4	24	2	49	18.977	83.583	26.460	7.957	2.084	8938	83	11	21	22	45	14.633	64.465	53.872	14.709	2.319
67	89	5	27	16	27	42.258	84.366	34.753	10.120	2.114	9031	83	12	21	23	29	44.664	65.927	52.221	3.346	2.094
72	89	5	30	13	18	42.444	68.481	15.684	15.821	3.458	9066	84	1	3	10	1	15.265	65.984	73.254	22.070	2.360
75	89	5	31	11	11	47.382	53.882	18.657	12.560	1.760	9069	84	1	4	12	51	12.669	66.437	49.129	3.566	2.340
27	89	6	13	0	24	20.592	66.811	25.057	1.079	1.089	9088	84	1	13	12	57	33.259	73.052	52.092	3.338	2.118
5427	80	4	12	1	18	30.822	56.919	66.317	15.164	1.801	9092	84	1	15	12	28	16.820	69.807	57.854	13.079	2.094
5473	80	4	30	6	46	21.243	51.814	39.259	2.730	1.672	9380	84	4	19	4	13	45.700	74.848	46.772	7.226	2.189
5540	80	5	29	9	58	40.282	87.792	66.760	7.545	2.553	9600	84	6	14	12	1	9.968	80.206	79.111	18.012	2.390
5541	80	5	29	10	7	23.564	88.012	65.105	6.497	1.736	9842	84	8	30	20	6	15.408	66.522	49.853	9.346	1.296
5544	80	5	29	20	35	43.777	87.542	67.734	8.191	1.669	11196	85	1	28	1	22	10.854	71.610	47.467	1.385	2.501
5665	80	7	4	14	35	46.914	48.409	84.462	21.854	1.434	11952	85	9	28	1	42	43.451	65.708	73.862	22.410	3.105
6350	81	3	31	16	1	18.548	99.999	99.999	10.000	2.569	12145	85	11	17	12	5	11.439	68.355	51.854	2.134	2.043
6495	81	6	3	0	56	6.257	50.844	38.789	2.481	1.773	12280	85	12	21	4	10	5.794	56.912	51.057	9.003	3.009
6628	81	7	19	6	58	26.814	84.917	57.888	2.218	1.789	12549	86	4	20	20	44	26.727	88.545	42.347	6.935	2.004
6689	81	8	12	23	22	352	99.999	99.999	10.000	1.769	12700	86	6	6	10	0	6.717	88.586	42.969	3.486	1.553
6775	81	9	7	14	19	32.430	70.756	47.995	2.864	1.553	12712	86	6	9	10	58	18.335	67.746	52.097	1.872	2.061
6902	81	10	31	15	47	22.313	65.079	48.002	7.669	2.069	12713	86	6	9	11	23	52.476	67.752	53.440	4.054	3.262
6998	81	12	14	22	5	32.639	70.942	48.204	2.893	1.847	12714	86	6	9	11	33	21.309	67.786	52.534	2.417	2.465
7237	82	3	14	11	33	23.779	99.999	99.999	10.000	1.641	12716	86	6	9	20	41	29.664	64.111	52.993	5.583	3.890

表V-4 (1)全解析範囲(図V-1)内の再決定された震源リスト(続き)  
 水平成層構造を仮定し震源決定を行ったもの。

NUM	YE	MO	DY	HIO	MI	SEC	X	Y	Z	MAG
12717	86	6	9	21	14	1.331	67.752	53.466	3.399	3.757
12718	86	6	9	21	27	18.831	68.156	53.687	4.516	3.457
12720	86	6	10	0	12	24.336	67.433	53.250	3.805	2.874
13038	86	10	1	7	21	6.161	67.040	45.234	1.241	2.837
13044	86	10	3	13	52	46.139	66.941	46.340	3.522	1.619
13078	86	10	18	23	1	30.362	67.253	45.686	4.698	1.949
13299	87	1	3	8	45	47.695	66.781	45.819	2.687	1.877
13336	87	1	12	23	39	32.024	77.374	45.125	4.326	3.126
121	87	8	2	4	19	8.561	57.938	65.938	48.725	1.674
157	87	8	16	12	51	23.506	66.660	50.402	2.607	3.498
160	87	8	17	11	11	12.127	66.788	51.322	7.389	1.719
202	87	8	27	18	6	9.569	69.919	56.126	14.516	1.769
491	87	12	12	4	3	6.670	68.424	44.034	0.138	1.623
550	88	1	1	12	11	16.093	71.984	61.585	9.235	1.488
818	88	4	20	8	50	36.754	72.129	45.408	1.493	3.953
1349	88	12	6	2	17	54.287	66.411	57.778	10.062	2.212
4	89	2	2	2	21	19.373	52.067	48.217	12.118	1.624
51	89	3	25	1	39	27.577	66.543	48.407	9.186	1.134

表V-4 (2)白山付近の再決定された震源リスト  
 マスターイベント法によって震源決定を行ったもの。  
 ◎：マスターイベント。

NUM	YE	MO	DY	HIO	MI	SEC	X	Y	Z	MAG	NUM	YE	MO	DY	HIO	MI	SEC	X	Y	Z	MAG	
◎ 5514	80	5	18	13	23	11.522	58.618	14.299	1.102	1.877	715	88	3	5	4	47	4.798	71.387	12.618	0.431	1.719	
◎ 5714	80	7	15	11	37	25.073	69.378	14.528	0.799	3.827	796	88	4	13	15	29	39.834	70.019	16.566	0.876	2.913	
5853	80	9	5	4	0	56.570	68.825	16.981	0.492	0.927	797	88	4	13	15	30	0.879	68.942	16.169	1.884	2.921	
7125	82	2	5	1	26	38.973	69.880	16.317	1.723	1.944	798	88	4	13	15	37	14.409	69.915	16.717	1.311	2.504	
7127	82	2	5	6	29	40.678	69.566	16.825	1.088	1.655	799	88	4	13	15	37	31.325	68.753	16.753	0.700	3.308	
7286	82	4	8	18	42	36.393	71.891	19.793	7.173	1.737	1090	88	6	28	20	19	46.227	68.915	13.882	1.414	1.082	
7296	82	4	14	9	3	15.796	69.903	16.209	1.516	3.178	1119	88	9	7	14	29	53.802	68.753	16.046	0.832	1.539	
7506	82	6	25	7	7	2.912	70.104	18.295	-0.021	1.265	1254	88	11	2	18	45	21.262	68.102	16.249	0.218	1.246	
8575	83	8	1	14	54	11.655	70.155	16.771	1.427	1.508	12	89	1	4	8	21	56.058	67.647	14.252	1.019	1.049	
8811	83	10	10	10	22	26.773	70.523	18.907	1.057	2.340	48	89	2	20	19	1	55.846	68.369	16.811	1.587	1.975	
8814	83	10	10	16	1	17.761	70.592	18.572	1.517	2.370	59	89	2	23	18	44	54.334	68.331	16.294	1.338	0.860	
8815	83	10	10	16	13	41.453	70.399	18.860	1.054	2.844	72	89	5	30	13	18	42.952	68.885	17.968	-1.900	3.458	
9231	84	2	27	9	3	9.457	68.702	17.023	0.538	2.102	7237	82	3	14	11	33	23.667	99.999	999.999	10.000	1.641	
10811	84	11	2	0	25	18.476	69.063	14.005	0.562	1.246	8089	83	2	10	12	53	24.082	99.999	999.999	10.000	2.419	
11402	85	4	6	3	31	39.739	69.644	17.010	6.929	1.555												
11959	85	9	30	15	19	-1.065	69.876	16.374	0.055	0.991												
12051	85	10	20	22	50	21.591	69.129	15.518	6.572	2.030												
12103	85	11	5	5	7	10.001	68.798	17.039	0.252	2.004												
12970	86	9	7	18	27	12.440	69.668	14.427	0.260	1.187												
13333	87	1	12	1	46	29.914	70.171	17.482	2.777	1.862												
13857	87	6	26	23	17	21.393	67.900	24.080	8.342	1.338												
310	87	10	1	12	41	30.467	68.483	16.333	0.209	1.586												
364	87	10	27	8	6	21.260	67.718	23.733	2.106	0.823												
381	87	11	3	3	59	1.525	70.159	15.014	0.251	0.927												
382	87	11	3	5	58	28.949	69.251	16.952	0.789	1.944												

表V-4 (3)赤兎山付近の再決定された震源リスト

マスターイベント法によって震源決定を行ったもの。

◎：マスターイベント。

NUM	YE	MO	DY	HO	MI	SEC	X	Y	Z	MAG
5611	80	6	20	17	10	43.201	59.055	6.775	6.268	3.749
5621	80	6	22	6	49	37.685	60.338	7.304	0.398	1.104
5651	80	6	30	4	47	35.487	55.665	1.574	16.890	1.060
7941	82	12	26	4	13	0.156	57.686	5.817	7.872	2.409
7942	82	12	26	4	16	54.817	59.783	7.874	-0.225	2.069
7945	82	12	26	4	57	29.514	60.368	9.873	-1.493	1.627
7946	82	12	26	5	2	7.164	57.484	6.806	7.469	3.220
7949	82	12	26	5	52	41.730	57.416	6.280	8.095	2.767
7952	82	12	26	10	30	36.636	57.470	6.315	8.370	2.675
7955	82	12	26	14	29	18.392	57.207	4.813	9.907	2.411
7974	82	12	29	20	27	18.494	58.485	7.363	3.096	2.510
7977	82	12	30	16	36	40.468	57.691	6.313	7.706	2.713
8091	83	2	11	16	39	16.657	56.604	5.043	-0.396	1.320
8306	83	4	27	17	8	50.555	57.225	7.118	8.952	2.498
11558	85	5	20	8	58	44.376	59.263	1.260	0.159	1.944
11701	85	7	1	8	50	22.604	60.491	3.267	0.578	2.562

NUM	YE	MO	DY	HO	MI	SEC	X	Y	Z	MAG
5998	81	12	14	22	5	32.637	70.954	49.157	2.823	1.847
7377	82	5	15	23	35	48.683	67.589	53.586	12.359	1.669
8938	83	11	21	22	45	14.748	64.646	53.276	13.728	2.319
9031	83	12	21	23	29	44.653	65.913	52.769	5.015	2.094
9069	84	1	4	12	51	12.674	66.446	49.174	3.681	2.340
9842	84	8	30	20	6	15.477	66.612	49.467	8.270	1.296
11196	85	1	28	1	22	10.866	71.613	47.450	1.370	2.501
12145	85	11	17	12	5	11.385	68.332	53.509	5.771	2.043
12712	86	6	9	10	58	18.294	67.905	51.644	0.508	2.081
12713	86	6	9	11	23	52.480	67.763	53.389	4.026	3.262
12714	86	6	9	11	33	21.311	67.798	52.497	2.404	2.465
12716	86	6	9	20	41	29.723	64.252	50.905	1.539	3.890
12717	86	6	9	21	14	1.330	67.766	53.405	3.412	3.757
12718	86	6	9	21	27	18.849	68.176	53.627	4.038	3.457
12720	86	6	10	0	12	24.338	67.446	53.212	3.803	2.874
◎ 13038	86	10	1	7	21	6.194	66.745	45.969	2.983	2.837
13044	86	10	3	13	52	46.146	66.954	46.421	3.712	1.619
13078	86	10	18	23	1	30.241	67.521	45.284	-0.185	1.949
13299	87	1	3	8	45	47.691	66.794	45.854	2.745	1.877
157	87	8	16	12	51	23.509	66.669	50.422	2.686	3.498
160	87	8	17	11	11	12.005	67.100	50.646	3.158	1.719
202	87	8	27	18	6	9.420	70.202	55.465	12.042	1.769
491	87	12	12	4	3	6.666	68.497	44.059	0.737	1.623
818	88	4	20	8	50	36.743	72.146	45.303	1.529	3.953
51	89	3	25	1	39	27.658	66.648	47.973	7.734	1.134

表V-4 (4)湯涌付近の再決定された震源リスト

マスターイベント法によって震源決定を行ったもの。

◎：マスターイベント。

NUM	YE	MO	DY	HO	MI	SEC	X	Y	Z	MAG
6775	81	9	7	14	19	32.433	70.771	48.005	2.922	1.553
6902	81	10	31	15	47	22.377	65.186	47.653	6.058	2.069