

白山火山直下の地震の精密震源決定と震源メカニズム

平松良浩・酒井主計・高橋直季・石原吉明・
本多 亮・臼井佑介・古本宗充 金沢大学大学院自然科学研究科
東野 外志男 石川県白山自然保護センター

PRECIOUS HYPOCENTER DETERMINATION AND SOURCE MECHANISM OF EARTHQUAKES BENEATH THE HAKUSAN VOLCANO

Yoshihiro HIRAMATSU, Kazuei SAKAI, Naoki TAKAHASHI, Yoshiaki ISHIHARA, Ryo HONDA, Yusuke USUI,
Muneyoshi FURUMOTO, *Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University*
Toshio HIGASHINO, *Hakusan Nature Conservation Center, Ishikawa*

はじめに

日本列島は地震大国と称され、同時に火山大国とも称されている。気象庁は2003年に活火山の定義を「概ね過去一万年間に噴火した火山及び現在活発な噴気活動のある火山」と改訂し、その結果日本に存在する活火山の数は108となった。最近噴火した有珠山や三宅島などでは、地震活動を詳細に把握することで噴火の発生時期を予測し、被害を軽減した。このように火山の地震活動の詳細を把握することは火山活動の監視に不可欠である。本研究の対象地域である白山も活火山の一つであるが、常時地震観測は行われておらず、防災対策は十分とは言えない。

白山は石川 - 岐阜の県境に位置しており、御前峰(2,702m)、大汝峰(2,684m)、剣ヶ峰(2,677m)の三主峰から形成されている。白山火山は飛騨変成岩類、手取層群、濃飛流紋岩類を基盤としており、火山噴出物は安山岩質で山頂部やその稜線部を中心に広く分布しており、その厚さは平均200~300m程度である。白山の火山活動の開始は30~40万年前である。現在の山頂部から活動を開始したのはおよそ3~4万年前で(粕野, 2001)、火山活動は歴史時代まで継続している。白山火山の活動に関連あると思われる歴史資料は8, 9世紀までさかのぼれるが、活動したことが確かなものは11世紀以降のもので、16世紀中頃から17世紀中頃のほぼ100年間に活動が頻繁に起きている(東野, 1989)。白山は1659年の

噴火を最後に表面的な火山活動が起きていないが、過去の活動履歴から近い将来活動を再開する可能性が指摘されている(守屋, 2000)。したがって、白山直下の詳細な地震活動を把握することは白山の火山活動監視に不可欠な要素である。

白山付近の地震活動に焦点を当てた東田ほか(1990)の結果によれば、白山付近で発生する地震は山体直下の浅い領域(海面下0~2km)に集中し、その発震機構は広域的な応力場と調和的である。しかし、当時利用可能なデータは白山から20km以上離れた観測点のデータのみであるため、鉛直方向の震源決定の誤差が約2kmもあり、震源の深さについて議論することは困難である。現在は京都大学防災研究所地震予知研究センターと名古屋大学大学院環境学研究科付属地震火山・防災研究センターの地震観測点の他に気象庁や防災科学技術研究所の高感度地震観測網(Hi-net)による定常観測点(図1)が増加し、さらに全ての機関の地震波形データが一元化処理されることにより、白山付近の地震の検知能力・震源決定精度は向上しているが、白山付近がその急峻な地形のために観測網の空白域であることに変わりはない。この空白域を埋めるべく2000年秋に白山山麓に4点の臨時地震観測点を設け、試験的に約1か月間微小地震連続観測を行い、白山直下の地震の深さは2~4kmであるという結果を得た(三宅ほか, 2001)。

本稿では2001年と2002年に行った白山周辺の臨時

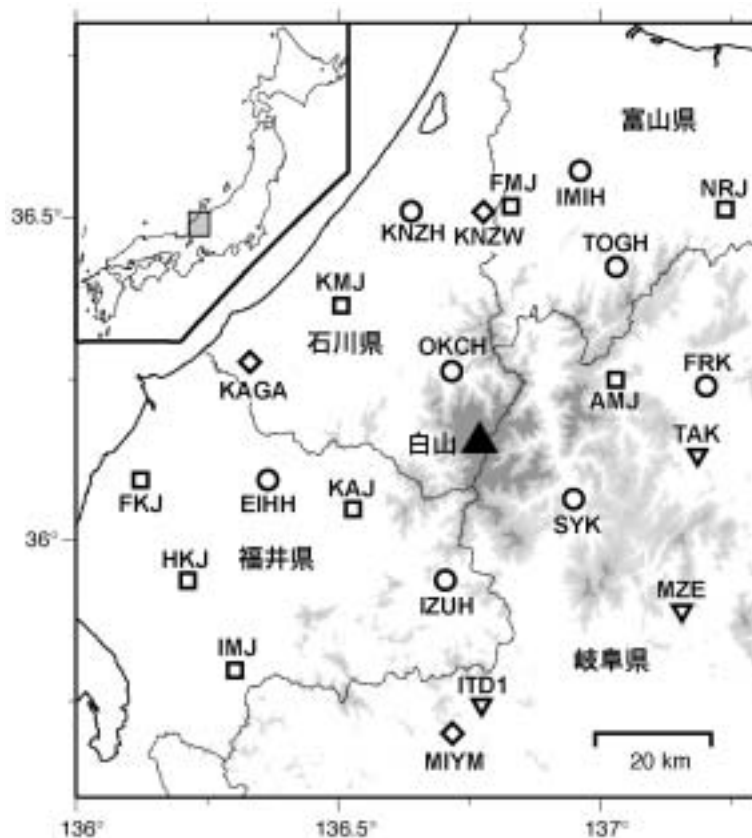


図1 本研究で用いた定常地震観測点の分布

四角 () は京都大学防災研究所地震予知研究センターの観測点，菱形 () は気象庁の観測点，逆三角 () は名古屋大学大学院環境学研究科付属地震火山・防災研究センターの観測点，丸 () は防災科学技術研究所の観測点を表す。黒三角 () は白山山頂の位置を表す。薄い灰色の領域は標高1,300m以上，濃い灰色の領域は標高2,000m以上の地域を表す。

地震観測と震源決定結果および観測点補正値を用いた精密震源再決定，Double Difference法を用いた精密震源再決定の結果について報告する。また比較的マグニチュードの大きな地震の震源メカニズムについても報告する。

臨時地震観測

臨時地震観測に用いた主要な機材（地震計，レコーダー，GPSアンテナ）(写真1)は東京大学地震研究所より借用した。地震計は感度400V/m/s，固有周波数1 Hzの三成分一体型のLE-3D（Lennartz electronic社製）を使用した。この地震計は電源として12Vの充電式リチウム電池を使用している。GPS（Global Positioning System）アンテナは，GPS衛星からGPS信号を受信し，時間の情報を高精度（ 10^{-6} s）に補正するために用いる。レコーダーに入

力された信号はアナログアンプによって増幅され16-bitの分解能でA/D変換される。入力チャンネル数は3チャンネル（上下，南北，東西の3成分），



写真1 臨時地震観測点で用いたDATテープ式レコーダー(右)，地震計(左下)，GPSアンテナ(左上)

サンプリング周波数は100Hzとした。レコーダーにはハードディスク式とDATテープ式がある。ハードディスク式は容量 9 GBのハードディスクに 3 か月間の長期間連続記録が可能であり、リチウム電池を電源として用いる。DATテープ式は乾電池40個を用い 1 か月間の連続記録が可能で、容量 2 GBのDATテープにデータを保存する。DATテープ式については 1 か月毎にDATテープと乾電池の交換を行う。GPSは 6 時間ごとに受信し、高精度の刻時を行う。地震計は露岩や堰堤の上に石膏で固定し、ケースを被せ、さらに石を載せて固定した。GPSは天頂が開けた場所に設置する。DATレコーダーは湿気を防ぐためにシリカゲルを入れ、FKP製のケースに入れビニールで覆う。震源決定精度を高めるために臨時地震観測点を白山山頂部に 1 点、山麓部に 4 点設置した。以下にそれぞれの年における臨時地震観測点について述べる。

2001年

2001年の臨時地震観測点の設置場所および観測点名はそれぞれ石川県石川郡尾口村一里野の尾口 (OGCH), 石川県石川郡白峰村大杉谷の白峰 (SIRA), 石川県石川郡白峰村市ノ瀬の市ノ瀬 (ICHI), 石川県石川郡白峰村白山室堂の室堂 (MURO), 岐阜県大野郡白川村白水湖の白水湖 (HAKU), 福井県大

野市中村の大野 (OONO) である (図 2 (a))。市ノ瀬 (ICHI) は室堂 (MURO) の地震計を撤去後に再設置したものである。ハードディスク式のレコーダーを大野 (OONO), 室堂 (MURO), 白峰 (SIRA) に設置し、残りの 2 観測点はDATテープ式のレコーダーを設置した。ダイナミックレンジは比較的ノイズレベルの低い白水湖 (HAKU) については60dB, その他の 4 観測点については40dBとした。それぞれの観測点の位置および観測期間を表 1 に示す。

2002年

2002年の臨時地震観測点の設置場所および観測点名はそれぞれ石川県石川郡尾口村岩間の岩間 (IWAM), 石川県石川郡白峰村大杉谷の白峰 (SIRA), 石川県石川郡白峰村白山室堂の室堂 (MURO), 岐阜県大野郡白川村白水湖の白水湖 (HAKU), 岐阜県大野郡白川村荒谷の荒谷 (ARAT) である (図 2 (b))。ハードディスク式のレコーダーを室堂 (MURO) に設置し、残りの 4 観測点はDATテープ式のレコーダーを設置した。写真 2 に臨時観測点の設置の様子を示す。ダイナミックレンジは比較的ノイズレベルの低い白水湖 (HAKU) については60dB, その他の 4 観測点については40dBとした。それぞれの観測点の位置および観測期間を表 2 に示す。

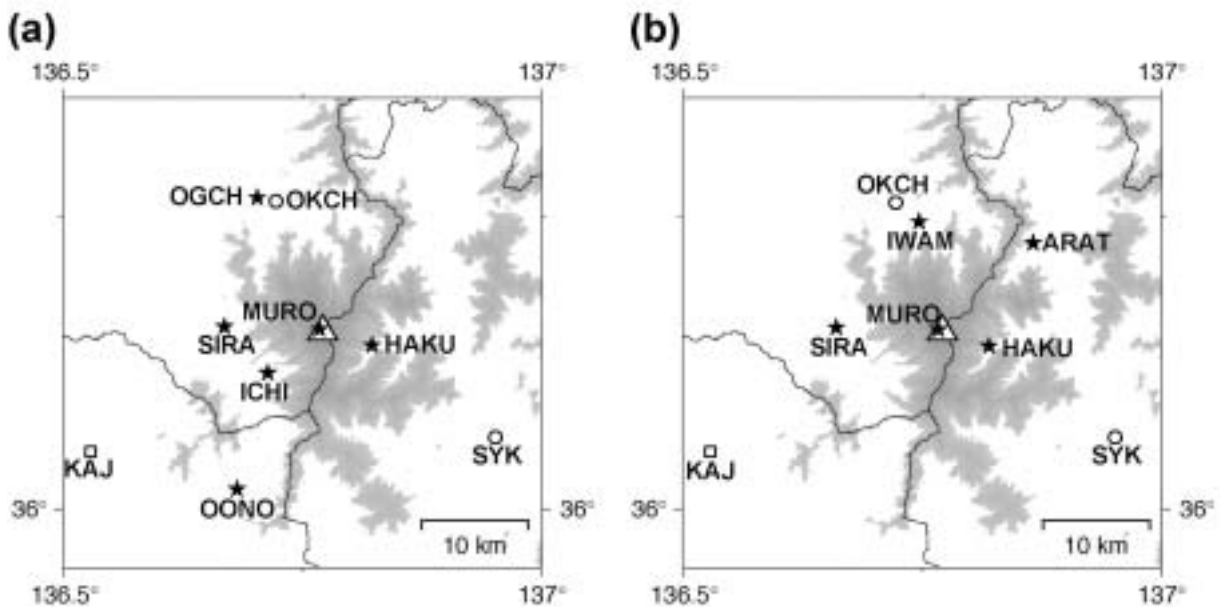


図 2 臨時地震観測での臨時地震観測点分布 ()

灰色の領域は標高1,300m以上の地域を表す。三角 () は白山山頂の位置を表す。定常地震観測点の記号は図 1 と同じである。(a) は2001年,(b) は2002年。

なお、地震計の設置および1か月に1回の乾電池の交換・回収はDAT-2GC地震観測セットアップマ

ニュアル設置編・回収編(羽田ほか, 1999)に従って行った。

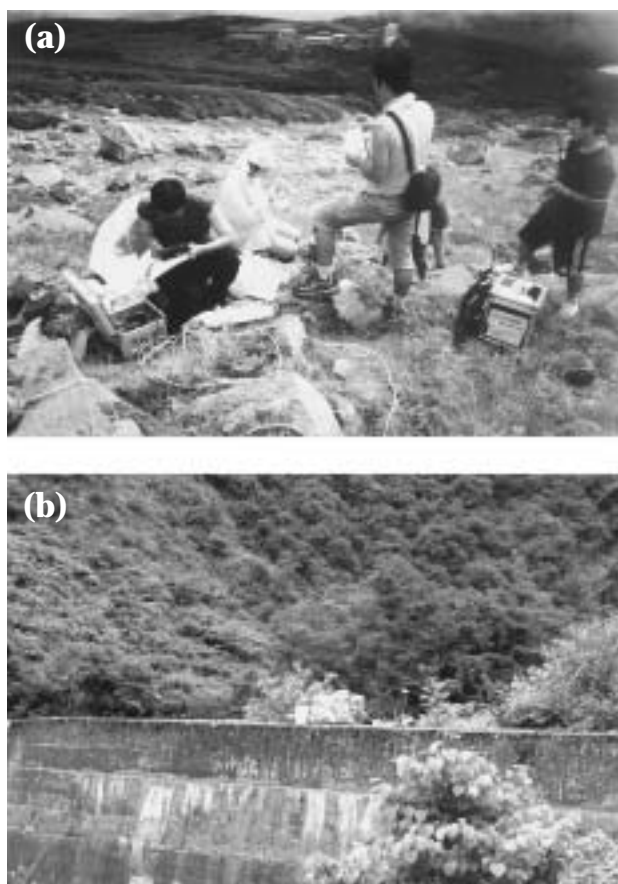


写真2 2002年臨時地震観測での臨時地震観測点の設置の様子

(a) 室堂(MURO), (b) 岩間(IWAM)。

データ処理と解析方法

震源決定精度を向上させるためには震源域直上の観測点である室堂(MURO)が欠かせないため、解析には臨時観測期間中のうち室堂(MURO)の観測データが取得されている期間を選んだ。2001年は7月30日~9月27日, 2002年は7月22日~9月30日である。上記期間において臨時地震観測点と白山周辺にある定常観測点22点(図1)の地震波形データを使用する。定常観測点のデータは東京大学地震研究所から借用している衛星通信地震観測テレメータシステムから取得した。回収したDATテープ, ハードディスク中のデータは東京大学地震研究所にて前処理を行い, その後金沢大学にて解析作業を行った。まず圧縮されている入力データの解凍作業を行い, GPSアンテナから受信した時間情報を用いて時刻補正を行う。このとき得られる位置情報を観測点の緯度・経度に用いた。次に1分ファイルにデータを切り出しWIN(地震波検測支援システム; ト部・東田, 1992)フォーマット化した。

WIN化されたデータは, 観測点ごとに連続モニター波形を印刷し目視にて地震の有無をチェックした。白山近傍の地震と考えられる地震波形を切り出し, 定常観測点のデータと臨時観測点のデータを統合した。図3に観測された白山直下の地震の波形例

表1 2001年臨時地震観測での臨時地震観測点名と観測期間

観測点名	緯度(度)	経度(度)	標高(m)	観測期間
尾口 (OGCH)	36.2658	136.7027	720	2001年7月27日~2001年10月6日
白峰 (SIRA)	36.1557	136.6684	780	2001年7月23日~2001年11月5日
市ノ瀬 (ICHI)	36.1160	136.7139	920	2001年10月6日~2001年10月22日
室堂 (MURO)	36.1536	136.7679	2,540	2001年7月30日~2001年9月27日
白水湖 (HAKU)	36.1397	136.8230	1,240	2001年7月24日~2001年8月27日
大野 (OONO)	36.0168	136.6817	520	2001年7月23日~2001年10月29日

表2 2002年臨時地震観測での臨時地震観測点名と観測期間

観測点名	緯度(度)	経度(度)	標高(m)	観測期間
岩間 (IWAM)	36.2455	136.7473	770	2002年7月15日~2002年11月7日
白峰 (SIRA)	36.1557	136.6684	780	2002年7月15日~2002年11月7日
室堂 (MURO)	36.1536	136.7679	2,540	2002年7月22日~2002年9月30日
白水湖 (HAKU)	36.1397	136.8230	1,240	2001年7月18日~2002年9月26日
荒谷 (ARAT)	36.2276	136.8666	680	2002年7月16日~2002年10月31日

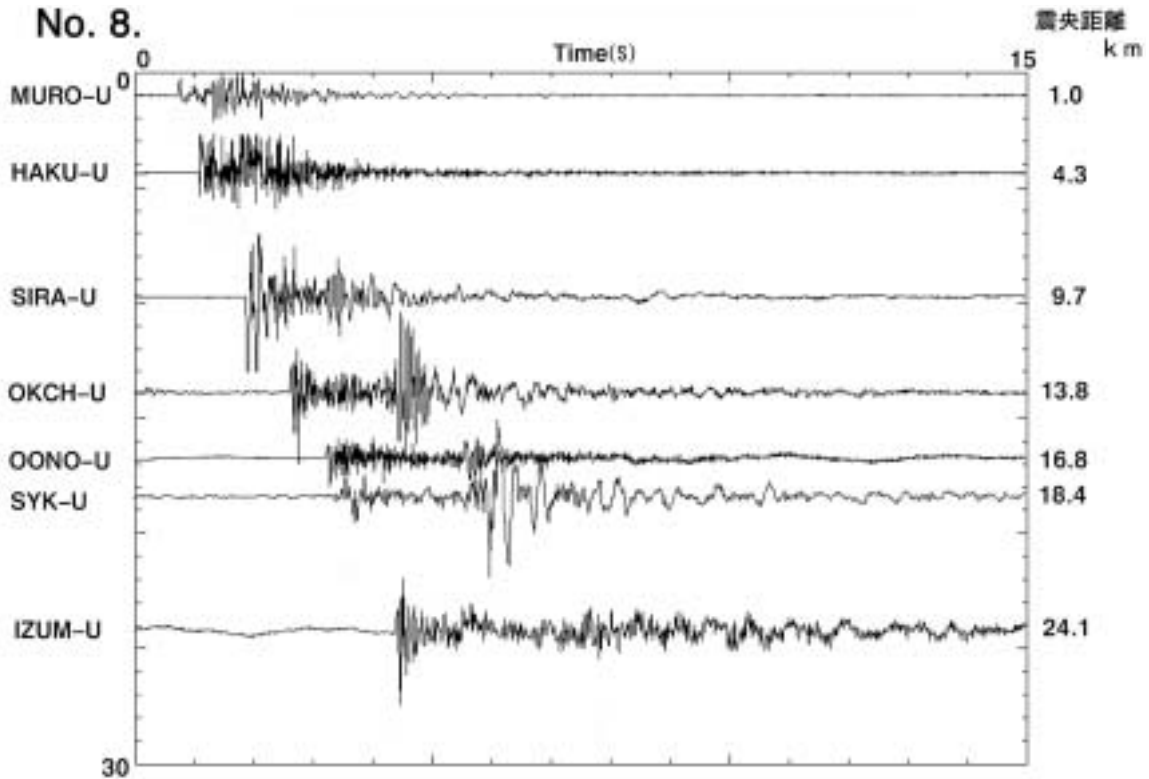


図3 本研究で観測された地震波形（上下動成分）の例（2001年：表3 No. 8）

を示す。統合した地震波形データからWIN SYSTEMを用いてP波，S波，最大振幅の検測を行った。震源決定にはHirata and Matsu'ura (1987) によるhypomhを用いた。この時，震源決定精度を保証するためにP波を最低3点，S波を最低1点以上で検測された地震のみを用いた。マグニチュードの決定には渡辺 (1971) の式を用いた。本研究で用いたP波速度 (V_P) 構造は，東田ほか (1990) で用いられた竹内 (1978) の水平成層構造である (図4)。この構造は解析地域周辺で過去に行われた渥美～能登沖測線 (Aoki *et al.*, 1972)，倉吉～花房測線 (Yoshii *et al.*, 1974) などの人工地震観測結果を参考にして決められている。S波速度 (V_S) については $V_P/V_S = 1.73$ を仮定した。白山の火山体は中生代以前の基盤が標高2,000m付近まで隆起した上に形成されているため，標高0 m以上でも標高0 mと同じ速度を用いた。なお解析の際には渡辺ほか (1978) による速度構造モデルも用いて震源決定を試みたが，後述する震源分布にはほとんど変化がなかった。

地震は岩石が断層面で摩擦滑りを起こすことによって生じる。地震が発生した時の断層運動を明らかにする手段として，震源メカニズム (発震機構) の解析がある。震源メカニズムを決定するためにはP波初動の押し引きが多数の観測点で確認できる比較

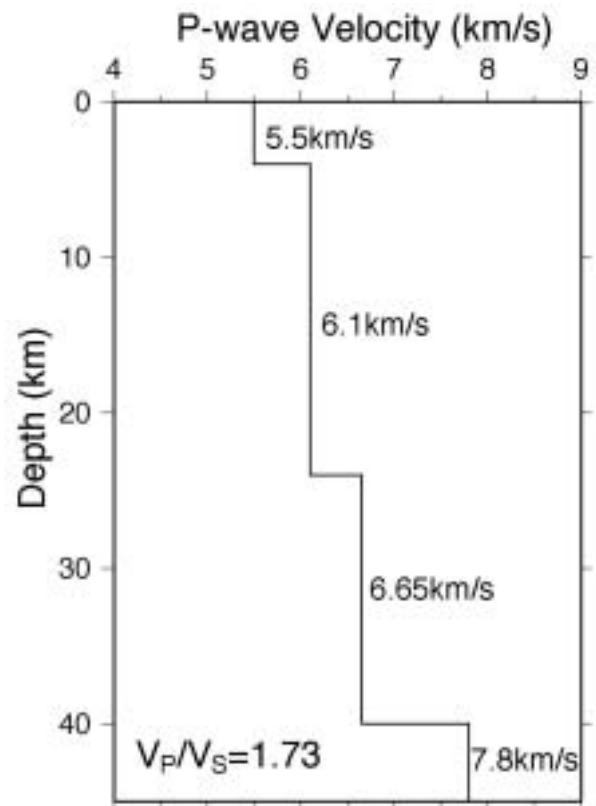


図4 震源決定に用いたP波速度 (V_P) 構造 (竹内, 1978)

S波速度 (V_S) については $V_P/V_S = 1.73$ を仮定している。

表3 2001年臨時地震観測結果を用いて室堂(MURO)を含めて震源決定した場合における白山周辺10km四方で発生した地震の震源リスト

No	年	月	日	時	分	秒	緯度(度)	経度(度)	深さ(km)	M
1	2001	7	31	1	28	43.04	36.1574	136.7615	0.21	-0.1
2	2001	7	31	1	28	54.05	36.1586	136.7622	0.56	-0.3
3	2001	7	31	1	28	57.09	36.1566	136.7612	0.28	-0.2
4	2001	7	31	1	29	-0.09	36.1513	136.7607	0.26	0.2
5	2001	7	31	11	50	50.65	36.1522	136.7722	0.76	-0.1
6	2001	7	31	13	47	53.74	36.1475	136.7717	0.33	0.1
7	2001	8	2	6	8	37.87	36.1494	136.7713	0.55	-0.2
8	2001	8	2	7	56	0.46	36.1483	136.7713	0.90	1.4
9	2001	8	2	8	45	52.98	36.1499	136.7712	0.60	0.1
10	2001	8	3	9	55	9.52	36.1361	136.7572	1.65	1.3
11	2001	8	5	3	0	13.42	36.1534	136.7694	0.07	0.8
12	2001	8	5	17	53	26.95	36.1671	136.7800	0.48	0.7
13	2001	8	8	1	30	27.95	36.1321	136.7514	1.63	-0.6
14	2001	8	12	10	31	3.03	36.1815	136.7918	0.37	-0.2
15	2001	8	13	19	26	18.14	36.1400	136.7576	1.57	0.5
16	2001	8	17	2	50	38.03	36.1774	136.7835	1.05	-0.6
17	2001	8	19	6	11	55.71	36.1527	136.7722	1.01	0.1
18	2001	8	20	0	38	37.18	36.1779	136.7809	0.72	0.2
19	2001	8	20	5	42	0.92	36.1451	136.8028	0.57	0.7
20	2001	8	20	5	53	23.45	36.1497	136.8043	0.59	0.4
21	2001	8	25	7	46	6.35	36.1642	136.7683	0.30	0.9
22	2001	8	27	5	26	16.47	36.1699	136.7707	1.50	0.6
23	2001	8	31	4	36	31.20	36.1765	136.7729	2.14	1.6
24	2001	9	6	5	26	12.12	36.1115	136.7557	4.15	0.6
25	2001	9	8	18	56	22.62	36.1559	136.7736	0.65	0.1
26	2001	9	8	20	13	32.83	36.1536	136.7755	0.57	1.4
27	2001	9	12	18	8	14.35	36.1578	136.7650	0.25	0.6
28	2001	9	17	10	23	43.27	36.1613	136.7744	0.92	1.1
29	2001	9	23	8	15	1.79	36.1589	136.7626	0.97	0.7
30	2001	9	27	0	55	15.63	36.1564	136.7615	0.53	1.0
31	2001	9	27	0	55	35.84	36.1525	136.7676	0.81	0.9
32	2001	9	27	0	56	50.31	36.1544	136.7609	0.26	0.6
33	2001	9	27	0	58	8.71	36.1561	136.7665	0.59	0.0
34	2001	9	27	1	13	21.48	36.1505	136.7629	0.84	1.2
35	2001	9	27	1	27	24.24	36.1564	136.7620	0.41	0.0
36	2001	9	27	1	41	43.40	36.1550	136.7601	0.52	0.3
37	2001	9	27	1	45	31.26	36.1556	136.7643	0.43	0.1
38	2001	9	27	4	17	40.15	36.1514	136.7604	0.84	1.1
39	2001	9	27	12	38	37.99	36.1552	136.7607	0.14	0.3
40	2001	9	27	12	39	53.12	36.1502	136.7644	0.86	1.2
41	2001	9	27	16	47	33.51	36.1535	136.7595	0.44	0.8
42	2001	9	27	19	40	24.81	36.1558	136.7645	0.46	0.1

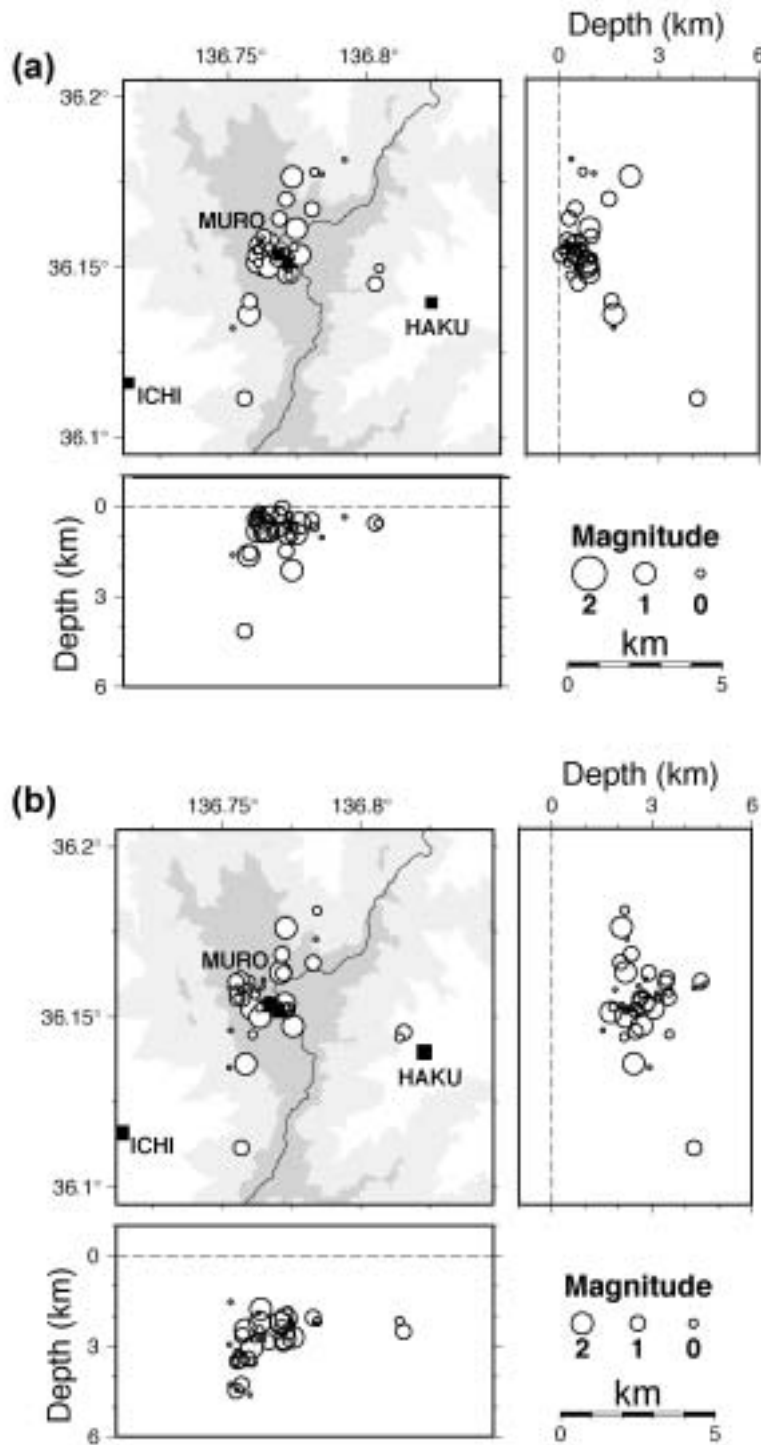


図5 2001年臨時地震観測による白山周辺10km四方で発生した地震の震源分布
 丸の大きさはマグニチュードの大きさを表す。(a) 室堂 (MURO) を含めて震源決定を
 した場合の震源分布。(b) 室堂 (MURO) を含めずに震源決定をした場合の震源分布。
 薄い灰色の領域は標高1300m以上、濃い灰色の領域は標高2000m以上の地域を表す。

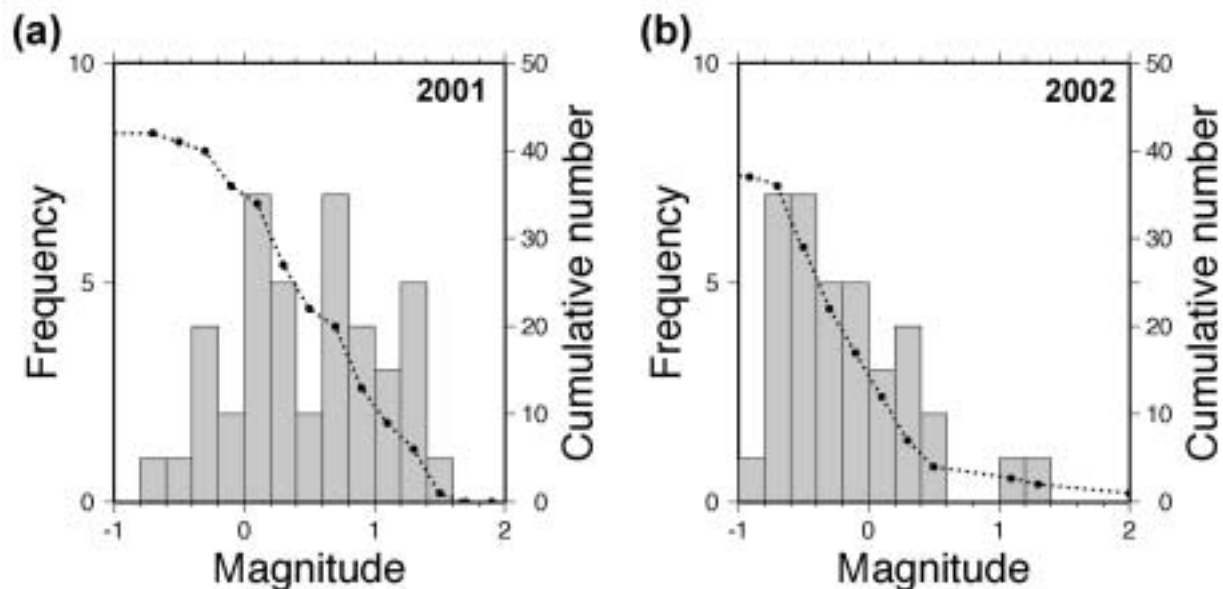


図6 臨時地震観測による白山周辺10km四方で発生した地震のマグニチュード別頻度分布(棒グラフ)と累積個数分布(黒丸と点線)。(a)は2001年,(b)は2002年。

的マグニチュードの大きな地震が必要となる。WIN SYSTEMを用いて初動の押し引きの検測を行い、Maeda(1992)のプログラムを用いて震源メカニズムを決定する。

低周波地震とはマグニチュードの割に周波数が極端に低い地震のことであり、マグニチュード3の地震では通常地震波の卓越周期は0.1秒程度であるが、低周波地震では1秒程度の卓越周期となる。低周波地震の発生メカニズムは流体やガス、マグマの移動などマグマ活動に関連したものであると考えられている。低周波地震の有無の調査は地震波形データを並べて印刷して目視にて確認して行う。

白山直下の地震の震源決定

2001年と2002年の震源決定結果について以下に述べる。本稿における深さは全て海面下の深さを意味する。したがって、白山の標高は2,702mであるため「白山直下深さ1km」という記述は「白山山頂からの深さ3.7km」を意味することに注意されたい。なお、震源決定の誤差は概ね水平方向に50~100m、深さ方向に100~200mであり、定常観測点のみ用いた場合と比較すると20%程度に減少することが明らかになっている。

2001年

7月下旬から9月下旬までの約2か月間で白山周辺10km四方の範囲に震源が決まった地震の総数は42個である。震源リストを表3に、震源分布を図5(a)に示す。図5(a)から白山直下で起こる地震は白山山頂直下に集中していることが分かる。震源の深さ分布には、白山山頂直下(山頂から1km四方の領域内)で海面下0~1kmと浅く、山頂から離れる(山頂から3km四方の領域内)に従い震源の深さは~2kmと少し深くなる特徴がある。図6(a)に震源決定された地震に対するマグニチュード毎の頻度分布および累積個数分布を示す。最大のマグニチュードは1.5、最小のマグニチュードは-0.7である。気象庁により震源決定されている地震の総数は同期間・同範囲で7個であり、最大のマグニチュードは1.5、最小のマグニチュードは1.2である。臨時観測点の設置により検知能力が向上し、極微小地震まで震源決定することが可能になった。

2002年

検測を行ったのは2002年7月22日~9月30日までの約2か月間である。その検測期間中の気象庁の一元化震源リストでは白山周辺10km四方に2個の震源しか決定されていない。その震源の深さはそれぞれ5.0km, 2.2km, マグニチュードは2.0, 1.5であっ

表 4 2002年臨時地震観測結果を用いて室堂（MURO）を含めて震源決定した場合における白山周辺10km四方で発生した地震の震源リスト

No	年	月	日	時	分	秒	緯度(度)	経度(度)	深さ(km)	M
1	2002	7	24	18	8	23.88	36.1576	136.7786	0.84	-0.6
2	2002	7	24	18	9	21.52	36.1476	136.7787	0.88	-0.8
3	2002	7	27	14	17	35.32	36.1335	136.7787	0.66	-0.2
4	2002	7	28	23	39	6.98	36.1843	136.7678	0.94	-0.6
5	2002	7	29	1	33	15.75	36.1599	136.7727	0.52	-0.4
6	2002	7	30	13	6	19.60	36.1693	136.7855	0.43	-0.4
7	2002	8	5	23	3	9.20	36.1441	136.7452	1.64	-0.5
8	2002	8	10	1	38	51.47	36.1576	136.7506	1.28	-0.7
9	2002	8	11	16	28	29.94	36.1648	136.7501	2.46	-0.1
10	2002	8	11	23	0	50.71	36.1576	136.7826	1.45	0.5
11	2002	8	12	3	37	28.68	36.1465	136.7648	1.89	-0.5
12	2002	8	18	1	26	49.47	36.1564	136.7671	1.07	-0.6
13	2002	8	18	1	26	55.96	36.1480	136.7686	0.02	-0.5
14	2002	8	18	12	18	35.37	36.1411	136.7548	1.13	0.4
15	2002	8	18	23	59	39.37	36.1587	136.7523	0.76	0.1
16	2002	8	19	0	2	25.82	36.1562	136.7553	1.05	-0.6
17	2002	8	19	0	3	3.67	36.1626	136.7616	0.37	1.0
18	2002	8	19	0	4	11.63	36.1604	136.7551	0.70	0.2
19	2002	8	19	18	30	6.90	36.1553	136.7487	0.64	0.1
20	2002	8	19	19	2	46.61	36.1573	136.7670	0.60	-0.3
21	2002	8	19	19	43	6.74	36.1554	136.7781	0.78	0.1
22	2002	8	23	3	43	1.10	36.1492	136.7699	0.32	2.0
23	2002	8	23	3	46	42.65	36.1464	136.7667	0.11	-0.7
24	2002	8	23	4	23	7.68	36.1491	136.7820	0.87	-0.1
25	2002	8	23	4	49	9.81	36.1563	136.7632	-1.15	-0.1
26	2002	8	23	5	17	54.74	36.1738	136.7781	1.67	-0.4
27	2002	8	25	19	40	47.30	36.1775	136.7676	0.87	-0.6
28	2002	8	27	0	37	19.81	36.1537	136.7587	-0.13	-0.1
29	2002	8	27	1	45	9.95	36.1542	136.7589	-0.17	0.3
30	2002	8	27	10	7	9.97	36.1376	136.7541	1.39	0.3
31	2002	9	3	18	9	23.05	36.1600	136.7755	0.78	-0.2
32	2002	9	4	2	10	23.22	36.1384	136.7538	2.05	-0.3
33	2002	9	6	3	5	39.87	36.1230	136.7569	2.85	0.2
34	2002	9	9	19	11	18.78	36.1318	136.7579	1.85	-0.1
35	2002	9	10	13	59	12.01	36.1669	136.7811	1.39	-0.3
36	2002	9	12	0	2	36.95	36.1589	136.7679	-0.58	-0.5
37	2002	9	15	22	57	24.92	36.1632	136.7645	0.36	1.3

た。2002年の臨時地震観測で白山周辺10km四方に震源決定された地震の総数は37個である（表4，図7(a)）。最大のマグニチュードは2.0，最小のマグニチュードは-0.8であった。図6(b)に震源決定がなされた地震に対するマグニチュード毎の頻度分

布と累積個数分布を示す。検知能力が向上していることが分かる。

図7(a)から地震は白山山頂付近に集中していることが分かる。震源の深さは白山山頂直下（山頂から1km四方の領域内）で海面下0～1kmに集中

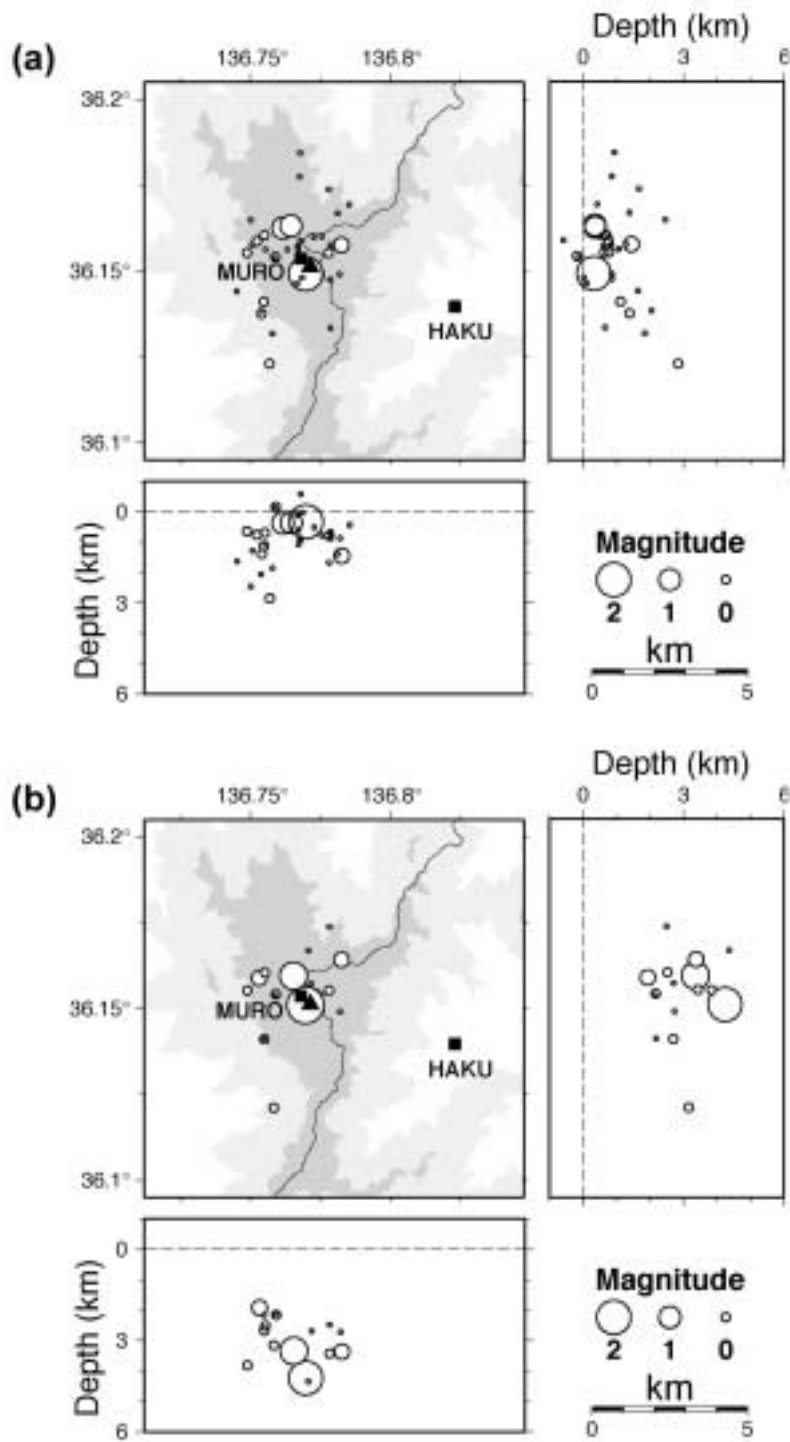


図7 2002年臨時地震観測による白山周辺10km四方で発生した地震の震源分布
 (a) 室堂 (MURO) を含めて震源決定をした場合の震源分布。(b) 室堂 (MURO) を含
 めずに震源決定をした場合の震源分布。图中的記号類は図5と同じである。

し、山頂から離れるにつれて深くなる。これらの特徴は2001年の結果と同様である。2002年の震源分布(図7(a))は2001年の結果(図5(a))と比べるとややばらつきがあるように見える。これは2002年の地震の大きさが相対的に小さいため、震源決定に使用可能な観測点数が少なくなったことが一因であろう。

白山山頂部の観測点が震源決定に及ぼす影響

白山山頂部に設置した観測点室堂(MURO)が震源決定に与える影響を調べるために、2001年、2002年の臨時地震観測結果について室堂(MURO)のデータを含まない場合について震源決定を行った。計算結果を表5・図5(b)(2001年)と表6・図7(b)(2002年)に示す。両年共に、室堂(MURO)を除外して震源決定を行うと震源の深さが海面下2~4kmに集中する。この震源の深さは、山頂部に臨時観測点を設置していない三宅ほか(2001)の結果と調和的であり、地震発生域直上に位置する室堂(MURO)の有無により震源の深さが変化することが分かる。なお、室堂(MURO)を除外して震源決定を行った際の地震数が少なくなるのはP波を最低3点、S波を最低1点以上で検測するという条件を満たさない地震があるためである。ちなみに震源決定精度については室堂(MURO)の有無により有意な差は生じない。ここで室堂(MURO)を含まない震源決定結果(図5(b), 図7(b))が正しいと仮定すると、室堂(MURO)を含めて決定された震源域(図5(a), 図7(a))の深さは全体的に2km程度深くならなければならない。室堂(MURO)を含めた震源決定で、震源域と室堂(MURO)を結ぶ領域(白山火山中心部)が仮定している速度構造と比べ高速度であれば、震源域は深くなると考えられる。しかし震源域を2km程度深くするためには、震源域と室堂(MURO)を結ぶ領域(白山火山中心部)の速度を1層目のP波速度構造と比較して約60%高速度にする必要があり無理があると考えられる。そのため室堂(MURO)を含めた震源決定の結果(図5(a), 図7(a))が正確な震源分布を表していると考えられる。

観測点補正値を用いた精密震源再決定

2001年の観測結果として得られた白山周辺10km

四方の地震に対して震源位置の相対精度を高めるために、P波・S波ともに検測数が多い15点の観測点を選び、観測点補正値を用いた震源決定を試みた。これにより観測点表層部での固有な走時の進み・遅れなどの系統誤差を取り除くことが可能である。観測点補正値を用いた震源再決定は以下の手順で行う(Frohlich, 1979)。白山周辺の42個の地震について観測点毎にP波とS波の走時残差の平均を求め、これを観測点補正値として震源を再計算する。再決定された震源に対して再び走時残差の平均を求め、これを観測点補正値に加えて震源を再計算する。走時残差のRoot Mean Square(RMS)が収束するのを確認し、この作業を本研究では4回で打ち切った。最終的な観測点補正値を表7に示す。観測点補正値を用いる前後で走時残差のRMSを比較すると、P波のRMSは0.041秒から0.020秒、S波は0.103秒から0.050秒に減少した。

図8に観測点補正値を用いた震源分布を示す。表8に震源リストを示す。震源分布(図8)を図5(a)と注意深く比較すると、図8ではさらに白山直下に震源が集中することが分かる。震源の深さに関しては結果的に東田ほか(1990)の結果と一致しているが、本研究では臨時地震観測点の設置および観測点補正値を用いることにより震源決定精度が向上し、白山山頂直下(山頂から1km四方の領域内)では深さ0~1kmという浅部で、白山下(山頂から3km四方の領域内)では深さ0~2kmで地震が発生していることが明らかになった。

Double Difference法を用いた精密震源再決定

震源位置の相対精度を高める方法としては観測点補正値を用いる方法の他に近年開発されたDouble Difference法があり(Waldhauser and Ellsworth, 2000)、Double Difference法は観測点補正値を用いる方法より正確な震源分布を与えることが多い。本研究でも2001年の観測結果である白山周辺の42個の地震と2002年の観測結果である白山周辺の37個の地震についてDouble Difference法を用いた震源再決定を試みた。この方法では近くで発生した2個の地震の走時差の残差を最小にするように震源を決定する。2001年と2002年の計79個の地震についてDouble Difference法の適用前後でP波・S波の走時残差のRMSは0.217秒から0.092秒に減少し、震源決定精度が向上していることが分かる。

表5 2001年臨時地震観測結果を用いて室堂(MURO)を含めずに震源決定した場合における白山周辺10km四方で発生した地震の震源リスト

No	年	月	日	時	分	秒	緯度(度)	経度(度)	深さ(km)	M
1	2001	7	31	1	28	42.86	36.1602	136.7652	2.93	0.1
2	2001	7	31	1	28	53.92	36.1583	136.7650	2.76	-0.2
3	2001	7	31	1	28	56.97	36.1577	136.7639	2.30	0.0
4	2001	7	31	1	29	-0.23	36.1523	136.7640	2.65	0.5
5	2001	7	31	11	50	50.53	36.1532	136.7758	2.46	0.0
6	2001	7	31	13	47	53.57	36.1518	136.7757	2.43	0.4
7	2001	8	2	6	8	37.72	36.1518	136.7755	2.44	-0.2
8	2001	8	2	7	56	0.37	36.1488	136.7755	2.67	1.4
9	2001	8	2	8	45	52.84	36.1511	136.7752	2.53	0.2
10	2001	8	3	9	55	9.48	36.1372	136.7584	2.49	1.4
11	2001	8	5	3	0	13.32	36.1531	136.7731	2.32	1.2
12	2001	8	5	17	53	26.83	36.1666	136.7841	2.40	0.8
13	2001	8	8	1	30	27.98	36.1459	136.7534	1.71	-0.6
14										
15	2001	8	13	19	26	18.00	36.1437	136.7608	3.37	0.5
16	2001	8	17	2	50	37.95	36.1733	136.7849	2.55	-0.5
17	2001	8	19	6	11	55.63	36.1533	136.7747	2.22	0.5
18	2001	8	20	0	38	37.02	36.1819	136.7853	2.49	0.4
19	2001	8	20	5	42	0.78	36.1430	136.8120	1.97	0.8
20	2001	8	20	5	53	23.24	36.1439	136.8166	2.49	0.6
21	2001	8	25	7	46	6.23	36.1626	136.7715	2.45	1.1
22	2001	8	27	5	26	16.40	36.1686	136.7722	2.62	0.6
23	2001	8	31	4	36	31.20	36.1772	136.7715	2.45	1.2
24	2001	9	6	5	26	12.10	36.1128	136.7547	3.62	0.8
25	2001	9	8	18	56	22.66	36.1584	136.7623	4.32	0.1
26	2001	9	8	20	13	32.81	36.1545	136.7713	2.84	1.1
27	2001	9	12	18	8	14.31	36.1590	136.7619	3.24	0.5
28	2001	9	17	10	23	43.24	36.1618	136.7747	2.70	0.9
29	2001	9	23	8	15	1.79	36.1602	136.7592	3.27	0.6
30	2001	9	27	0	55	15.60	36.1577	136.7587	3.47	0.7
31	2001	9	27	0	55	35.82	36.1546	136.7661	2.88	0.9
32	2001	9	27	0	56	50.30	36.1539	136.7613	2.31	0.5
33	2001	9	27	0	58	8.68	36.1577	136.7578	4.22	0.0
34	2001	9	27	1	13	21.46	36.1529	136.7628	2.83	1.1
35	2001	9	27	1	27	24.18	36.1560	136.7589	2.98	-0.2
36	2001	9	27	1	41	43.38	36.1561	136.7570	3.35	0.3
37	2001	9	27	1	45	31.21	36.1558	136.7650	2.60	0.1
38	2001	9	27	4	17	40.10	36.1530	136.7599	2.98	1.1
39	2001	9	27	12	38	37.89	36.1545	136.7584	3.05	0.5
40	2001	9	27	12	39	53.09	36.1514	136.7627	2.73	1.1
41	2001	9	27	16	47	33.46	36.1545	136.7581	3.32	0.8
42	2001	9	27	19	40	24.80	36.1574	136.7545	4.24	0.0

表6 2002年臨時地震観測結果を用いて室堂（MURO）を含めずに震源決定した場合における白山周辺10km四方で発生した地震の震源リスト

No	年	月	日	時	分	秒	緯度(度)	経度(度)	深さ(km)	M
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7	2002	8	5	23	3	9.20	36.1413	136.755	2.17	-0.5
8										
9										
10	2002	8	11	23	0	50.71	36.1642	136.782	3.37	0.5
11										
12										
13										
14	2002	8	18	12	18	35.39	36.1411	136.755	2.68	0.4
15										
16										
17	2002	8	19	0	3	3.67	36.1589	136.753	1.92	0.9
18	2002	8	19	0	4	11.63	36.1604	136.755	2.52	0.2
19	2002	8	19	18	30	6.90	36.1553	136.749	3.82	0.1
20										
21	2002	8	19	19	43	6.74	36.1554	136.778	3.42	0.1
22	2002	8	23	3	43	1.17	36.1510	136.770	4.23	2.4
23										
24	2002	8	23	4	23	7.68	36.1491	136.782	2.72	-0.1
25										
26	2002	8	23	5	17	54.74	36.1738	136.778	2.48	-0.4
27										
28	2002	8	27	0	37	19.81	36.1537	136.759	2.12	-0.1
29	2002	8	27	1	45	9.95	36.1542	136.759	2.16	0.3
30	2002	8	27	10	7	9.98	36.1282	136.874	2.96	0.4
31	2002	9	3	18	9	23.21	36.1669	136.771	4.36	-0.3
32										
33	2002	9	6	3	5	39.81	36.1212	136.758	3.15	0.1
34										
35										
36	2002	9	12	0	2	36.81	36.1572	136.772	2.69	-0.4
37	2002	9	15	22	57	24.92	36.1595	136.765	3.35	1.5

表7 2001年臨時地震観測結果において観測点補正値を適用した各観測点における観測点補正値

観測点	P波補正値(秒)	S波補正値(秒)
HAKU	0.012	0.036
OKCH	0.054	0.057
MURO	-0.004	0.022
OGCH	-0.019	-0.038
OONO	0.016	0.131
SIRA	0.023	0.172
AMJ	0.012	-0.112
FMJ	0.318	0.016
KAJ	-0.148	-0.210
KAGA	0.029	0.062
EIHH	-0.251	-0.611
IZUH	-0.122	-0.146
TOGH	-0.111	-0.242
FRK	-0.034	-0.250
SYK	-0.155	-0.183

表8 2001年臨時地震観測結果に観測点補正値を適用して震源決定した場合の白山周辺10km四方で発生した地震の震源リスト

No	年	月	日	時	分	秒	緯度(度)	経度(度)	深さ(km)	M
1	2001	7	31	1	28	43.03	36.1557	136.7607	0.29	-0.1
2	2001	7	31	1	28	54.04	36.1571	136.7614	0.66	-0.3
3	2001	7	31	1	28	57.08	36.1549	136.7607	0.35	-0.2
4	2001	7	31	1	29	-0.11	36.1504	136.7601	0.34	0.2
5	2001	7	31	11	50	50.64	36.1502	136.7717	0.83	-0.1
6	2001	7	31	13	47	53.73	36.1462	136.7714	0.38	0.2
7	2001	8	2	6	8	37.85	36.1484	136.7709	0.65	-0.2
8	2001	8	2	7	56	0.46	36.1503	136.7712	0.90	1.4
9	2001	8	2	8	45	52.96	36.1493	136.7709	0.71	0.1
10	2001	8	3	9	55	9.52	36.1386	136.7566	1.69	1.3
11	2001	8	5	3	0	13.41	36.1551	136.7688	0.13	0.8
12	2001	8	5	17	53	26.95	36.1641	136.7789	0.69	0.7
13	2001	8	8	1	30	27.88	36.1302	136.7501	1.97	-0.5
14	2001	8	12	10	31	3.06	36.1754	136.7893	0.90	-0.2
15	2001	8	13	19	26	18.12	36.1412	136.7577	1.71	0.5
16	2001	8	17	2	50	38.07	36.1663	136.7796	1.55	-0.7
17	2001	8	19	6	11	55.69	36.1521	136.7717	1.08	0.1
18	2001	8	20	0	38	37.18	36.1747	136.7797	1.00	0.2
19	2001	8	20	5	42	0.92	36.1426	136.8024	0.50	0.6
20	2001	8	20	5	53	23.45	36.1470	136.8037	0.56	0.4
21	2001	8	25	7	46	6.34	36.1618	136.7674	0.46	0.9
22	2001	8	27	5	26	16.46	36.1676	136.7697	1.66	0.6
23	2001	8	31	4	36	31.26	36.1775	136.7674	1.72	1.5
24	2001	9	6	5	26	12.15	36.1131	136.7475	3.88	0.6
25	2001	9	8	18	56	22.63	36.1547	136.7727	0.64	0.1
26	2001	9	8	20	13	32.87	36.1550	136.7709	0.44	1.4
27	2001	9	12	18	8	14.37	36.1574	136.7658	0.16	0.6
28	2001	9	17	10	23	43.29	36.1610	136.7754	0.79	1.1
29	2001	9	23	8	15	1.81	36.1586	136.7643	0.88	0.7
30	2001	9	27	0	55	15.65	36.1560	136.7631	0.45	1.0
31	2001	9	27	0	55	35.88	36.1546	136.7652	0.59	0.9
32	2001	9	27	0	56	50.33	36.1543	136.7635	0.22	0.6
33	2001	9	27	0	58	8.72	36.1550	136.7654	0.56	0.0
34	2001	9	27	1	13	21.52	36.1533	136.7633	0.70	1.2
35	2001	9	27	1	27	24.26	36.1552	136.7604	0.32	0.0
36	2001	9	27	1	41	43.42	36.1546	136.7618	0.46	0.3
37	2001	9	27	1	45	31.27	36.1551	136.7659	0.38	0.1
38	2001	9	27	4	17	40.19	36.1535	136.7580	0.58	1.0
39	2001	9	27	12	38	38.01	36.1542	136.7588	0.00	0.3
40	2001	9	27	12	39	53.17	36.1526	136.7620	0.60	1.2
41	2001	9	27	16	47	33.54	36.1534	136.7612	0.34	0.8
42	2001	9	27	19	40	24.83	36.1546	136.7629	0.39	0.1

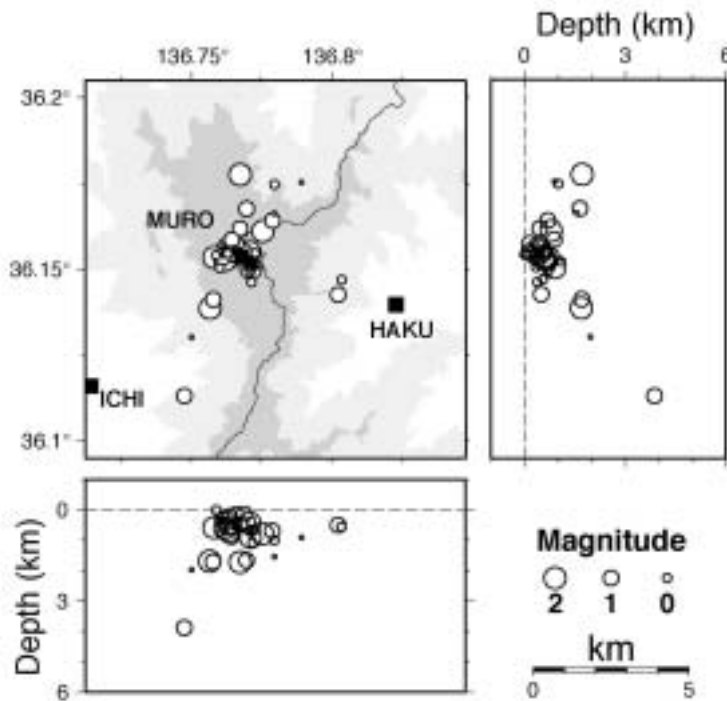


図8 2001年臨時地震観測結果に観測点補正値を適用して震源決定した場合の白山周辺10km四方で発生した地震の震源分布。図中の記号類は図5と同じである。

2001年、2002年の観測結果に対してDouble Difference法を用いた震源再決定の結果の図はそれぞれ図9(a)、図9(b)であり、また表9、表10にDouble Difference法により再決定された震源のリストを示す。図5(a)、図7(a)と図9(a)、図9(b)を比較すると白山直下に震源がより集中することが見てとれる。この結果によると観測点補正値を用いた場合と同様に白山山頂直下(山頂から1km四方以内)では震源は0~1kmに集中し、白山下(山頂から3km四方の領域内)では深さ0~2kmで地震が発生していることが確認できた。また白山下(山頂から3km四方の領域内)では2kmより深部に地震は全く発生していないことも確認できた。

これらの精密震源決定の結果から、白山火山の直下で発生する地震の深さの下限は山頂から1km四方以内では1km、山頂から3km四方の領域内では2kmと山頂から離れるにつれ深くなることが確かになった。一般に地震の深さの下限は地下の温度構造により決まり、地下に高温のマグマが存在する活火山下では地震の深さの下限は浅くなる。白山火山の直下で地下2km以深に地震が発生しないことから、白山の地下2km以深に高温のマグマが存在している可能性が高い(高橋ほか, 2003)。

白山直下の地震の震源メカニズム決定

震源メカニズムを決定することができた地震は2002年臨時地震観測でのNo. 21とNo. 36の計2つの地震である。表11に決定された断層面解を、図10にそれらを下半球投影したものを示す。Maeda(1992)の方法で決定した2つの地震の震源メカニズム(下半球投影、図10)を見ると、白山直下で発生したこれら2つの地震は横ずれ断層型(Strike-Slip型)に近い地震であることが分かる。またP軸の位置から主圧縮軸は北西-南東方向であることが分かる(図10, 表11)。小泉ほか(1993)、和田ほか(2001)によって報告されている白山周辺地域に分布する地震の震源メカニズムを見ると、主圧縮軸は北西-南東方向の向きを示す地震が多く、この地域の広域水平圧縮応力の方向は北西-南東であることが分かる。火山地域の地震の震源メカニズムは、その地域の広域的な応力場と一致することが多く(Zobin, 1972)、今回の解析で得られた白山直下の地震の震源メカニズムもこの地域の応力場と一致していることが分かる。

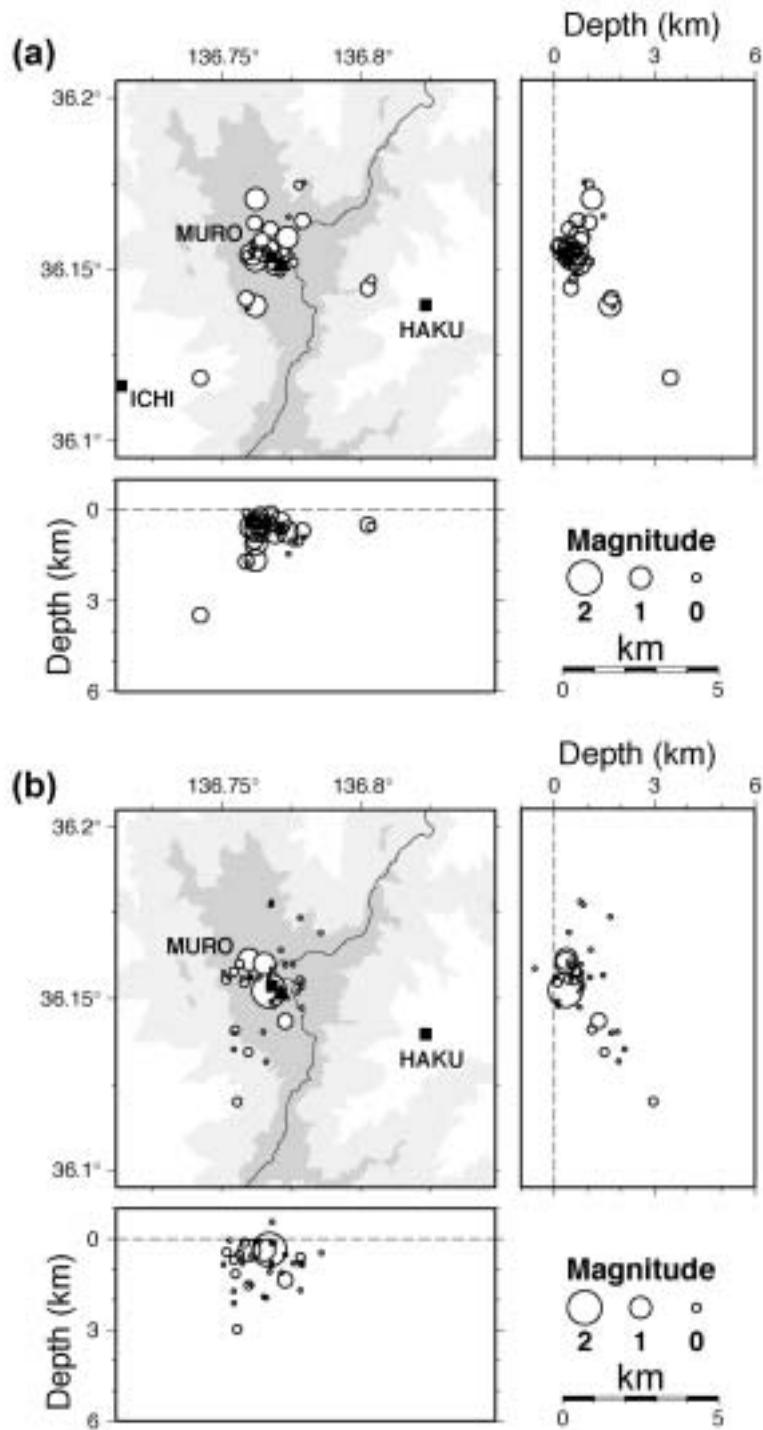


図9 臨時地震観測結果にDouble Difference法を適用して震源決定した場合の白山周辺10km四方で発生した地震の震源分布
 図中の記号類は図5と同じである。(a)は2001年,(b)は2002年。

表9 2001年臨時地震観測結果にDouble Difference法を適用した場合の白山周辺10km四方で発生した地震の震源リスト

No	年	月	日	時	分	秒	緯度(度)	経度(度)	深さ(km)	M
1	2001	7	31	1	28	43.03	36.1557	136.7607	0.34	-0.1
2	2001	7	31	1	28	54.04	36.1571	136.7613	0.57	-0.3
3	2001	7	31	1	28	57.08	36.1548	136.7606	0.35	-0.2
4	2001	7	31	1	29	-0.11	36.1543	136.7601	0.35	0.2
5	2001	7	31	11	50	50.64	36.1529	136.7696	0.50	-0.1
6	2001	7	31	13	47	53.73	36.1513	136.7678	0.38	0.2
7	2001	8	2	6	8	37.85	36.1484	136.7709	0.65	-0.2
8	2001	8	2	7	56	0.46	36.1515	136.7691	0.75	1.4
9	2001	8	2	8	45	52.96	36.1492	136.7709	0.71	0.1
10	2001	8	3	9	55	9.52	36.1394	136.7621	1.67	1.3
11	2001	8	5	3	0	13.41	36.1563	136.7675	0.13	0.8
12	2001	8	5	17	53	26.95	36.1641	136.7789	0.69	0.7
13	2001	8	8	1	30	27.88	36.1389	136.7594	1.76	-0.5
14	2001	8	12	10	31	3.06	36.1753	136.7793	0.90	-0.2
15	2001	8	13	19	26	18.12	36.1415	136.7587	1.71	0.5
16	2001	8	17	2	50	38.07	36.1653	136.7739	1.46	-0.7
17	2001	8	19	6	11	55.69	36.1521	136.7757	1.06	0.1
18	2001	8	20	0	38	37.18	36.1746	136.7776	1.04	0.2
19	2001	8	20	5	42	0.92	36.1445	136.8023	0.50	0.6
20	2001	8	20	5	53	23.45	36.1469	136.8036	0.56	0.4
21	2001	8	25	7	46	6.34	36.1617	136.7673	0.46	0.9
22	2001	8	27	5	26	16.46	36.1635	136.7617	1.05	0.6
23	2001	8	31	4	36	31.26	36.1705	136.7622	1.13	1.5
24	2001	9	6	5	26	12.15	36.1183	136.7423	3.48	0.6
25	2001	9	8	18	56	22.63	36.1551	136.7723	0.62	0.1
26	2001	9	8	20	13	32.87	36.1549	136.7708	0.43	1.4
27	2001	9	12	18	8	14.37	36.1570	136.7637	0.18	0.6
28	2001	9	17	10	23	43.29	36.1593	136.7734	0.73	1.1
29	2001	9	23	8	15	1.81	36.1585	136.7643	0.80	0.7
30	2001	9	27	0	55	15.65	36.1560	136.7631	0.45	1.0
31	2001	9	27	0	55	35.88	36.1546	136.7652	0.58	0.9
32	2001	9	27	0	56	50.33	36.1543	136.7635	0.36	0.6
33	2001	9	27	0	58	8.72	36.1549	136.7654	0.56	0.0
34	2001	9	27	1	13	21.52	36.1543	136.7622	0.70	1.2
35	2001	9	27	1	27	24.26	36.1552	136.7603	0.32	0.0
36	2001	9	27	1	41	43.42	36.1546	136.7617	0.46	0.3
37	2001	9	27	1	45	31.27	36.1551	136.7659	0.38	0.1
38	2001	9	27	4	17	40.19	36.1542	136.7602	0.58	1.0
39	2001	9	27	12	38	38.01	36.1541	136.7588	0.11	0.3
40	2001	9	27	12	39	53.17	36.1526	136.7619	0.60	1.2
41	2001	9	27	16	47	33.54	36.1533	136.7611	0.34	0.8
42	2001	9	27	19	40	24.83	36.1545	136.7629	0.39	0.1

表10 2002年臨時地震観測結果にDouble Difference法を適用した場合の白山周辺10km四方で発生した地震の震源リスト

No	年	月	日	時	分	秒	緯度(度)	経度(度)	深さ(km)	M
1	2002	7	24	18	8	23.88	36.1549	136.7786	0.84	-0.6
2	2002	7	24	18	9	21.52	36.1534	136.7786	0.84	-0.8
3	2002	7	27	14	17	35.32	36.1475	136.7786	0.76	-0.2
4	2002	7	28	23	39	6.98	36.1783	136.7677	0.78	-0.6
5	2002	7	29	1	33	15.75	36.1599	136.7726	0.50	-0.4
6	2002	7	30	13	6	19.60	36.1693	136.7854	0.44	-0.4
7	2002	8	5	23	3	9.20	36.1401	136.7541	1.70	-0.5
8	2002	8	10	1	38	51.47	36.1576	136.7505	0.82	-0.7
9	2002	8	11	16	28	29.94	36.1568	136.7599	1.45	-0.1
10	2002	8	11	23	0	50.71	36.1436	136.7726	1.32	0.5
11	2002	8	12	3	37	28.68	36.1404	136.7648	1.89	-0.5
12	2002	8	18	1	26	49.47	36.1563	136.7670	1.07	-0.6
13	2002	8	18	1	26	55.96	36.1480	136.7685	0.12	-0.5
14	2002	8	18	12	18	35.37	36.1410	136.7547	1.13	0.4
15	2002	8	18	23	59	39.37	36.1580	136.7542	0.66	0.1
16	2002	8	19	0	2	25.82	36.1560	136.7572	0.79	-0.6
17	2002	8	19	0	3	3.67	36.1616	136.7597	0.36	1.0
18	2002	8	19	0	4	11.63	36.1604	136.7563	0.50	0.2
19	2002	8	19	18	30	6.90	36.1557	136.7516	0.42	0.1
20	2002	8	19	19	2	46.61	36.1563	136.7603	0.54	-0.3
21	2002	8	19	19	43	6.74	36.1553	136.7780	0.58	0.1
22	2002	8	23	3	43	1.10	36.1525	136.7668	0.33	2.0
23	2002	8	23	3	46	42.65	36.1493	136.7676	0.11	-0.7
24	2002	8	23	4	23	7.68	36.1521	136.7771	0.77	-0.1
25	2002	8	23	4	49	9.81	36.1562	136.7632	0.07	-0.1
26	2002	8	23	5	17	54.74	36.1738	136.7780	1.67	-0.4
27	2002	8	25	19	40	47.30	36.1774	136.7675	0.87	-0.6
28	2002	8	27	0	37	19.81	36.1565	136.7526	0.03	-0.1
29	2002	8	27	1	45	9.95	36.1548	136.7579	0.10	0.3
30	2002	8	27	10	7	9.97	36.1345	136.7595	1.50	0.3
31	2002	9	3	18	9	23.05	36.1600	136.7755	0.78	-0.2
32	2002	9	4	2	10	23.22	36.1354	136.7542	2.10	-0.3
33	2002	9	6	3	5	39.87	36.1201	136.7554	2.95	0.2
34	2002	9	9	19	11	18.78	36.1318	136.7658	1.92	-0.1
35	2002	9	10	13	59	12.01	36.1643	136.7711	1.09	-0.3
36	2002	9	12	0	2	36.95	36.1588	136.7679	-0.58	-0.5
37	2002	9	15	22	57	24.92	36.1604	136.7651	0.35	1.3

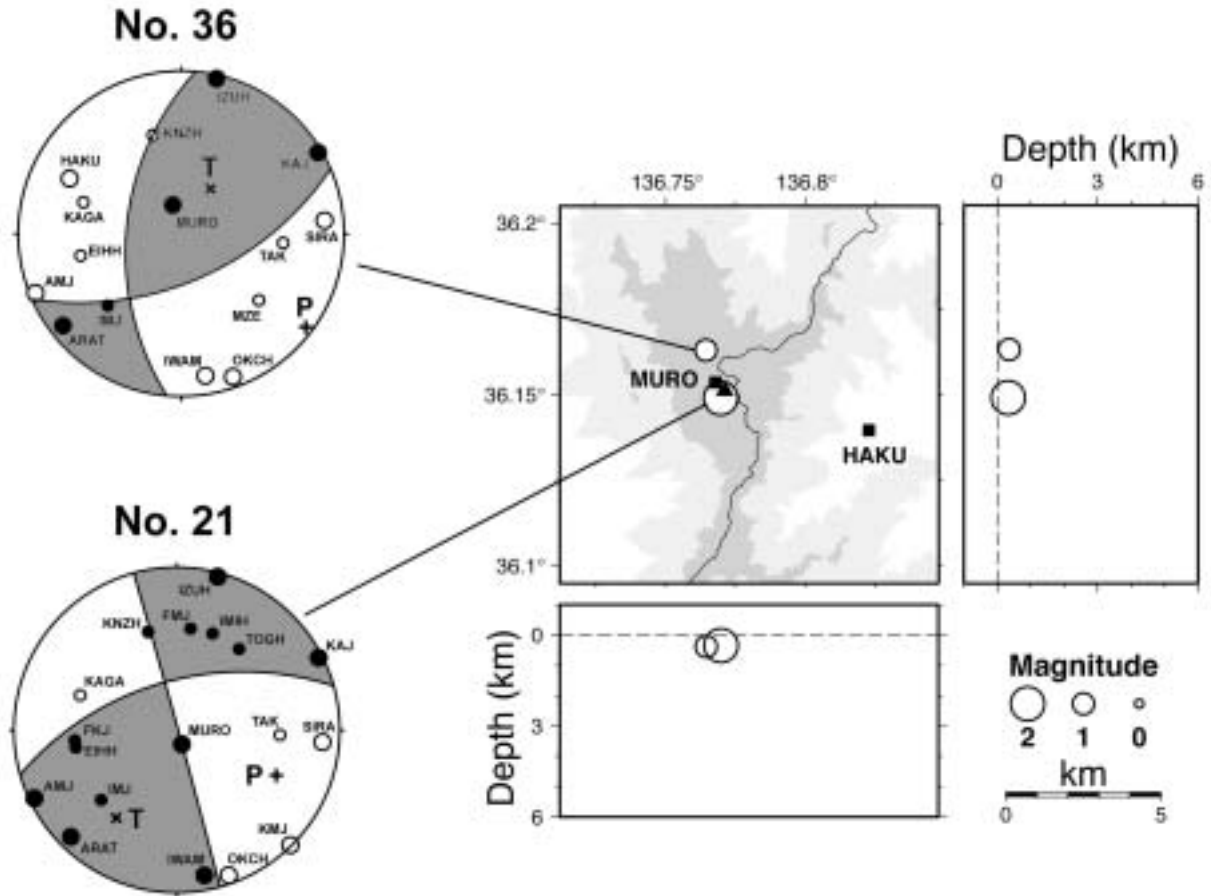


図10 2002年臨時地震観測による白山直下の2つの地震（No. 21とNo. 36）の震源メカニズム（下半球投影）

表11 2002年臨時地震観測による白山直下の2つの地震（No. 21とNo. 36）の震源メカニズム（断層面解）

No	P軸		T軸		節面1			節面2		
	方位角	傾斜角	方位角	傾斜角	走行	伏角	すべり角	走行	伏角	すべり角
21	114	23	215	24	254	56	179	345	89	34
36	127	3	33	54	185	53	42	66	58	134

各パラメータの値はAki and Richard (1980) の定義に従って表されている。各パラメータの値の単位は度である。

火山性微動・低周波地震

気象庁による一元化震源リストによると白山直下のモホ面付近での低周波地震の発生が報告されている（平松，2001）。火山活動の指標としては火山下の浅部で発生する低周波地震や火山性微動の発生頻度が役立つ。臨時地震観測点で得られた地震波形連続記録を紙面上に印刷し、目視にて火山性微動と低周波地震の有無を確認したところ、火山性微動や低

周波地震の発生を確認することができなかった。2001年と2002年の臨時地震観測結果の比較からも有意な地震活動の変化は認められない。白山直下の地震活動に変化がないことは白山直下でマグマ活動がないことを示唆する。したがって、白山直下にて火山性微動や低周波地震のようなマグマ活動に関連した地震が実際に発生した可能性は低いと考えられる。

摘要

白山山頂部および山麓部に臨時地震観測点を設置することにより、検知能力が向上しマグニチュード1.0以下の微小地震も検知可能となった。その結果、白山直下の地震の震源は深さ0～2 kmに局所的に集中した。また、観測点補正やDouble Difference法を用いた震源再決定により、白山山頂直下では深さ0～1 kmに震源がより集中することが明らかになった。比較的大きな2個の地震の震源メカニズムは横ずれ断層型で主圧縮軸は北西-南東の方向であり、この地域の広域水平圧縮応力の方向と調和的である。白山山頂部の観測点室堂(MURO)が白山直下の地震の震源決定において重要な役目を果たしているため、白山山頂部で定常的な地震観測がリアルタイムで行われることが白山の火山活動監視のためには望ましい。

謝辞

東京大学地震研究所共同利用により観測機材(地震計, DATレコーダー, GPSアンテナ)と解析用PCを借用した。気象庁地震火山部, 京都大学防災研究所地震予知研究センター, 名古屋大学大学院環境学研究科付属地震火山・防災研究センター, 防災技術科学研究所防災研究情報センターには北陸地方の地震データを提供して頂いた。白山比咩神社, 岐阜森林管理署荏荏事務所, 電源開発株式会社御母衣電力所, 国土交通省北陸地方整備局金沢工事事務所白峰砂防出張所, 石川県鶴来土木事務所には臨時地震観測点の設置に御協力を頂いた。東京大学地震研究所地震予知研究推進センター平田直教授, 蔵下英司博士, 永井悟氏には地震データ変換・解析時に御指導, 御協力を頂いた。本研究を遂行するに当たり白山自然保護調査研究会平成13, 14年度研究費による援助を受けた。記して感謝します。

文献

- Aki, K. and P. G. Richards (1980) Quantitative Seismology. Vol. 1, W. H. Freeman and Company, New York.
- 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 observation. *J. Phys. Earth*, 20, 197-223.
- Frohlich, C. (1979) An efficient method for joint hypocenter determination for large group of earthquakes. *Comput. and Geosci.* 5, 387-389.
- 羽田敏夫・酒井要・小林勝・橋本真一・井上義弘・三浦禮子・田上貴代子・松原誠(1999) デジタルオーディオ記録器(DATレコーダー)を用いた地震観測(1997-1998 東北合同観測). 東京大学地震研究所技術報告, No. 5, 39-64.
- 東野外志男(1989) 白山火山の歴史時代の活動に関連する資料. 石川県白山自然保護センター研究報告, No. 16, 1-8.
- 平松良浩(2001) 白山の低周波地震. はくさん, 28-4, 2-5.
- Hirata, N. and M. Matsu'ura (1987) Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique. *Phys. Earth Planet. Interiors*, 47, 50-61.
- 粕野義夫(2001) 石川県地質誌・補遺, 194pp, 石川県.
- 小泉誠・伊藤潔・和田博夫(1993) 中部地方北西部における地震の発震機構. 京都大学防災研究所年報, 36, 66-85.
- Maeda, N.(1992) A Method of determining focal mechanisms for an earthquake and quantifying the determined focal mechanisms for microearthquakes. *Bull. Sessmol. Soc. Am.*, 82, 2410-2429.
- 三宅学・高橋直季・石原吉明・臼井佑介・浅田哲司・平松良浩・古本宗充・河野芳輝・東野外志男・平田直(2001) 白山近傍での微小地震観測その(1). 地震学会講演会予稿集2001年度秋季大会, 124.
- 守屋以智雄(2000) 白山火山の噴火の予知と防災体制. 金沢大学自然科学研究科地球環境専攻紀要, 6, 44-56.
- 高橋直季・三宅学・平松良浩・古本宗充・平田直(2003) 白山火山近傍での微小地震観測. 地震2, 56, 89-94.
- 竹内文朗(1978) 北陸地方の微小地震観測について(その2). 京都大学防災研究所年報, 36, 145-151.
- 束田進也・西上欽也・平野憲雄・和田博夫(1990) 白山付近に発生する地震の震源再決定. 地震2, 43, 453-457.
- ト部卓・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). 地震学会講演会予稿集1992年度秋季大会, 331.
- Waldhauser, F. and W.L. Ellsworth (2000) A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 90, 1353-1368.
- 和田博夫・伊藤潔・大見士朗・小泉誠・平野憲雄(2001) 跡津川断層系周辺における稠密地震観測. 京都大学防災研究所年報, 44, 229-236.
- 渡辺 晃(1971) 近地地震のマグニチュード. 地震2, 24, 189-200.
- 渡辺邦彦・平野憲雄・岸本兆方(1978) 北陸地方の微小地震活動(第一報). 京都大学防災研究所年報, 21, 57-67.
- Yoshii, T., Y. Sasaki, T. Tada, H. Okada, S. Asano, I. Muramatsu, M. Hashizume and T. Morita (1974) The third Kurayoshi explosion and the crustal structure in the western part of Japan. *J. Phys. Earth*, 22, 109-121.
- Zobin, V. M.(1972) Focal mechanism of volcanic earthquakes. *Bull. Volcanol.*, 36, 561-571.