

草津白根火山における火山性地震の震源分布

堀 美緒¹・河野裕希¹・松島 健²

鬼澤真也³・平林順一³・野上健治³

草津白根集中観測 人工地震探査グループ

- 1: 九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻
2: 九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター
3: 東京工業大学火山流体研究センター

Hypocentral distribution of the volcanic earthquakes at Kusatsu-Shirane Volcano

Mio Hori¹・Yuhki Kohno¹・ Takeshi Matsushima²

Shin'ya Onizawa³・ Junichi Hirabayashi³・ Kenji Nogami³

2003 Kusatsu-Shirane Volcano Seismic Experiment Group

- 1: Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, Kyushu Univ.
2: Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu Univ.
3: Volcanic Fluid Research Center Tokyo Institute of Technology

1. はじめに

第 4 回草津白根火山集中総合観測の一環として、2003 年 9 月 25 日から 10 月 1 日までの期間、草津白根山頂部付近で自然地震観測を行った。9 月 28 日夜に実施された人工地震探査の前後に探査用ロガーとは別に 4 地点の臨時観測点を設置し、東京工業大学が収録している定常地震観測点のデータと統合することで火山性地震の震源分布を精度よく求めることができた。

2. 観測

2-1. 観測方法と観測機器について

観測点と発破点の配置を図 1 に示す。設置した地震計は人工地震探査用 84 点の他に、人工地震探査小アレイ 8 点と自然地震観測用 4 点の計 96 点である。そのほかに東京工業大学が収録している定常地震観測点が 6 点ある。自然地震観測用の観測点は、最近発生している地震の震源が集中する湯釜北東部の水釜付近に 1 点と、それを囲むように 3 点設置した。人工地震探査小アレイは、新しく開発された小型軽量ロガー 8 台を用いて湯釜の南東部に展開した。観測された地震の記録はすべて、地震計と接続されたデータロガーに収録された。記録される時刻データは、GPS により時刻較正されたものである。観測点の座標および使用機器は表 1 および表 2 にまとめた。人工地震探査用 84 点の座標や人工地震探査実験の詳細については筒井ほか (2004, 本報告書) を参照されたい。

2-2. 観測結果

観測された自然地震は，自然地震観測地点の4点のデータがそろそろ9月27日16時20分から9月30日9時30分までに30個ほどあった．それらは，いずれも最大振幅が 1×10^{-6} m/s ほどの微小地震であり，卓越周波数 8-10Hz の比較的高周波な火山性地震である．観測点 Q74 で観測された波形の例を図2に示す．波形の特徴としては，*P*相の立ち上がりが明瞭なもの(図2 a)と不明瞭なもの(図2 b)があったが，今回観測された地震の多くは後者の*P*，*S*相が不明瞭な地震であった．

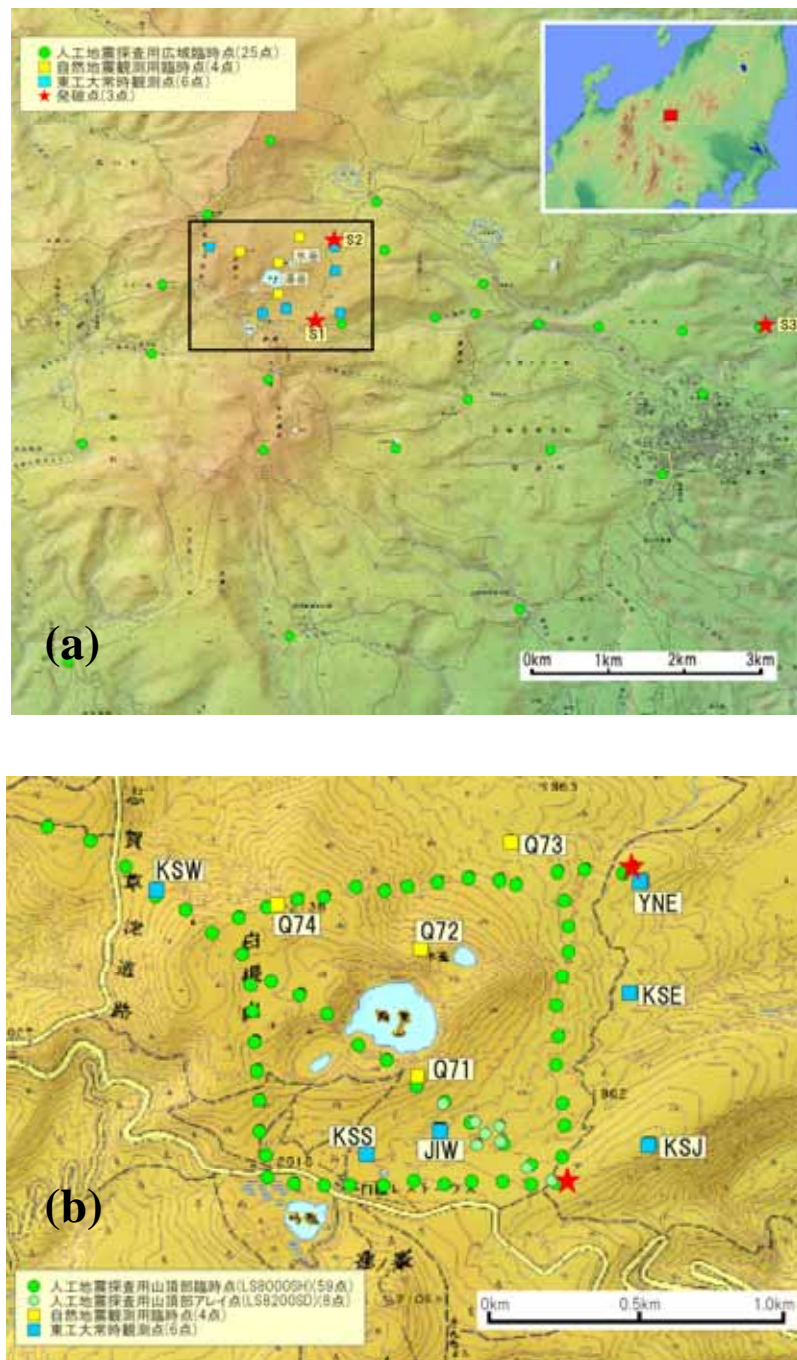


図1 観測点・発破点配置図，(a) 広域，(b) 山頂部．

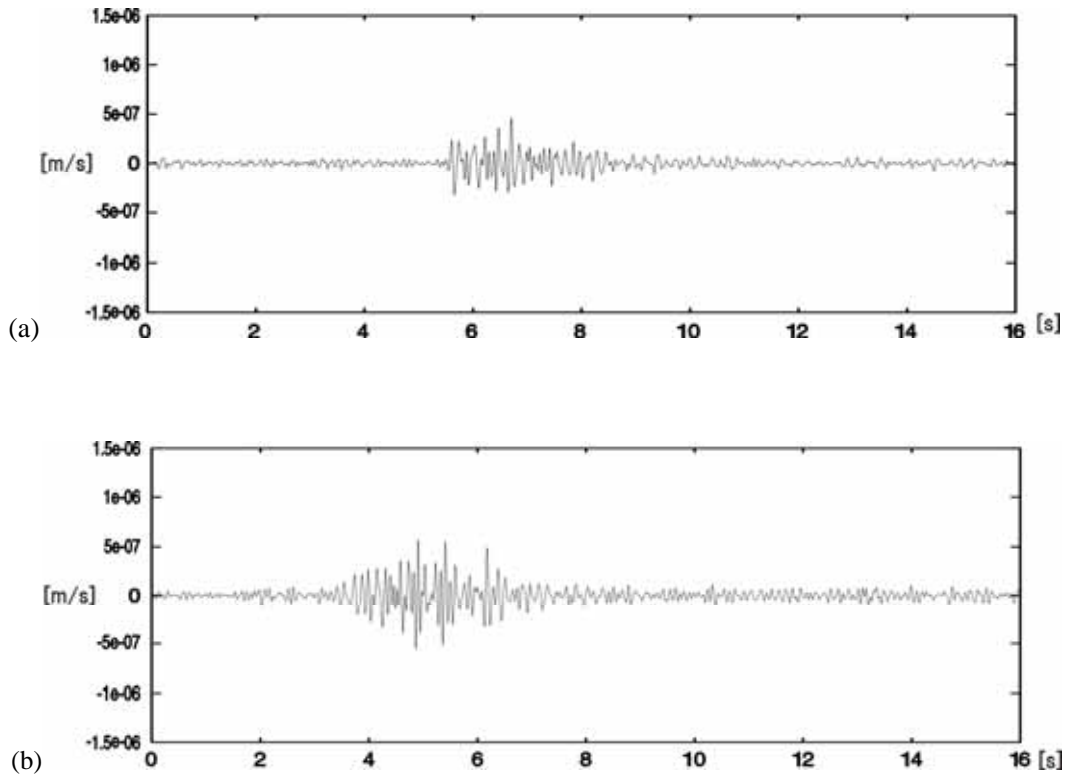


図2 観測点 Q74 で観測された自然地震波形例 . (a) 9月 28 日 19 時 28 分の地震 , (b) 9月 28 日 15 時 43 分の地震 . いずれも 4-16Hz の band-pass filter をかけた波形である .

表 1. 観測点座標

観測点	座標(Tokyo測地系)			観測期間	
	緯度(deg)	経度(deg)	高度(m)		
常時観測点	KSE	36.64081	138.54774	1893	
	KSW	36.64412	138.52980	1883	
	KSJ	36.63603	138.54845	1997	
	KSS	36.63578	138.53774	1906	
	YNE	36.64436	138.54817	1940	
	JIW	36.63650	138.54056	2003	
自然地震観測用 臨時点	Q71	36.63805	138.53974	2048	9/27 10:32:42 ~ 9/30 09:29:59
	Q72	36.64213	138.53992	2080	9/27 14:16:12 ~ 9/30 23:49:59
	Q73	36.64560	138.54322	1961	9/27 15:11:48 ~ 9/30 09:59:59
	Q74	36.64362	138.53435	2124	9/27 16:16:48 ~ 9/30 10:59:59
人工地震探査用 アレイ点	H81	36.63484	138.54505	1977	9/28 20:23:16 ~ 9/29 8:29:59
	H82	36.63541	138.54406	1970	9/28 18:30:00 ~ 9/29 7:19:59
	H83	36.63608	138.54300	1972	欠測
	H84	36.63679	138.54187	1985	9/28 18:30:00 ~ 9/29 7:19:59
	H85	36.63740	138.54076	2013	欠測
	H86	36.63611	138.54207	1978	9/28 18:30:00 ~ 9/29 7:19:59
	H87	36.63639	138.54236	1979	9/28 18:30:00 ~ 9/29 7:19:59
	H88	36.63670	138.54292	1979	9/28 18:30:00 ~ 9/29 7:19:59

表 2 . 観測機器

観測点	地震計		サンプリング		増幅率			
	感度(V/m/s)	固有周期(Hz)	周波数(Hz)	VH	NS	EW	VL	
常時観測点	KSE	167.0,173.6,168.7	1	100	×10	×10	×10	
	KSW	183.1,182.4,180.9	1	100	×10	×10	×10	
	KSJ	165	1	100	×10	-	-	
	KSS	305,223,220	1	100	×1	×1	×1	
	YNE	240	1	100	×500	-	-	
	JIW	240	1	100	×500	-	-	
自然地震観測用臨時点	Q71	400	1	200	×100	×100	×100	×10
Lennartz社製	Q72	400	1	200	×100	×100	×100	×10
LE - 3 Dlite	Q73	400	1	200	×100	×100	×100	×10
白山工業製LZ-8000	Q74	400	1	200	×100	×100	×100	×10
人工地震探査用 アレイ点	H81	82.7	4.5	500	×1			
	H82	82.7	4.5	500	×1			
	H83	82.7	4.5	500	×1			
	Geo Space社製	H84	82.7	4.5	500	×1		
	GS-11D	H85	82.7	4.5	500	×1		
	白山工業製	H86	82.7	4.5	500	×1		
	LS-8200SD	H87	82.7	4.5	500	×1		
		H88	82.7	4.5	500	×1		

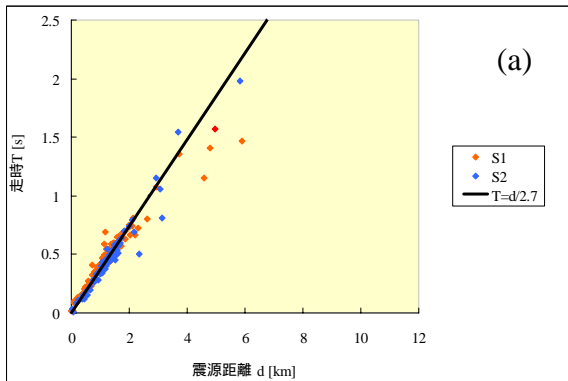
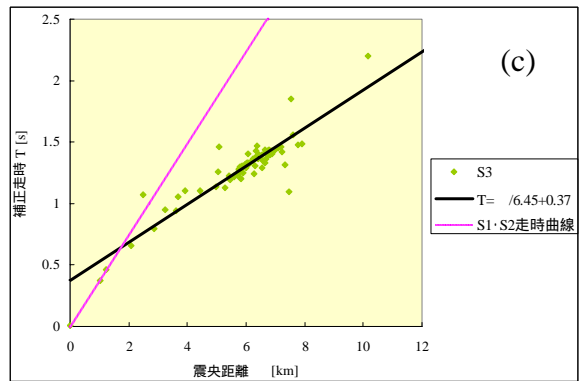
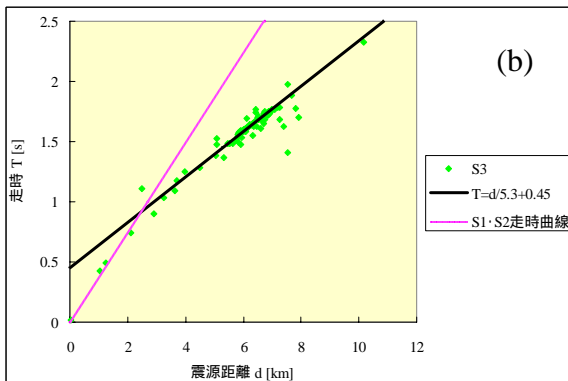


図 3 人工地震で得られた走時曲線 . (a) S1・S2 の発破によるもの , (b) S3 の発破によるもの , (c) S3 の発破によるものに高度補正したもの



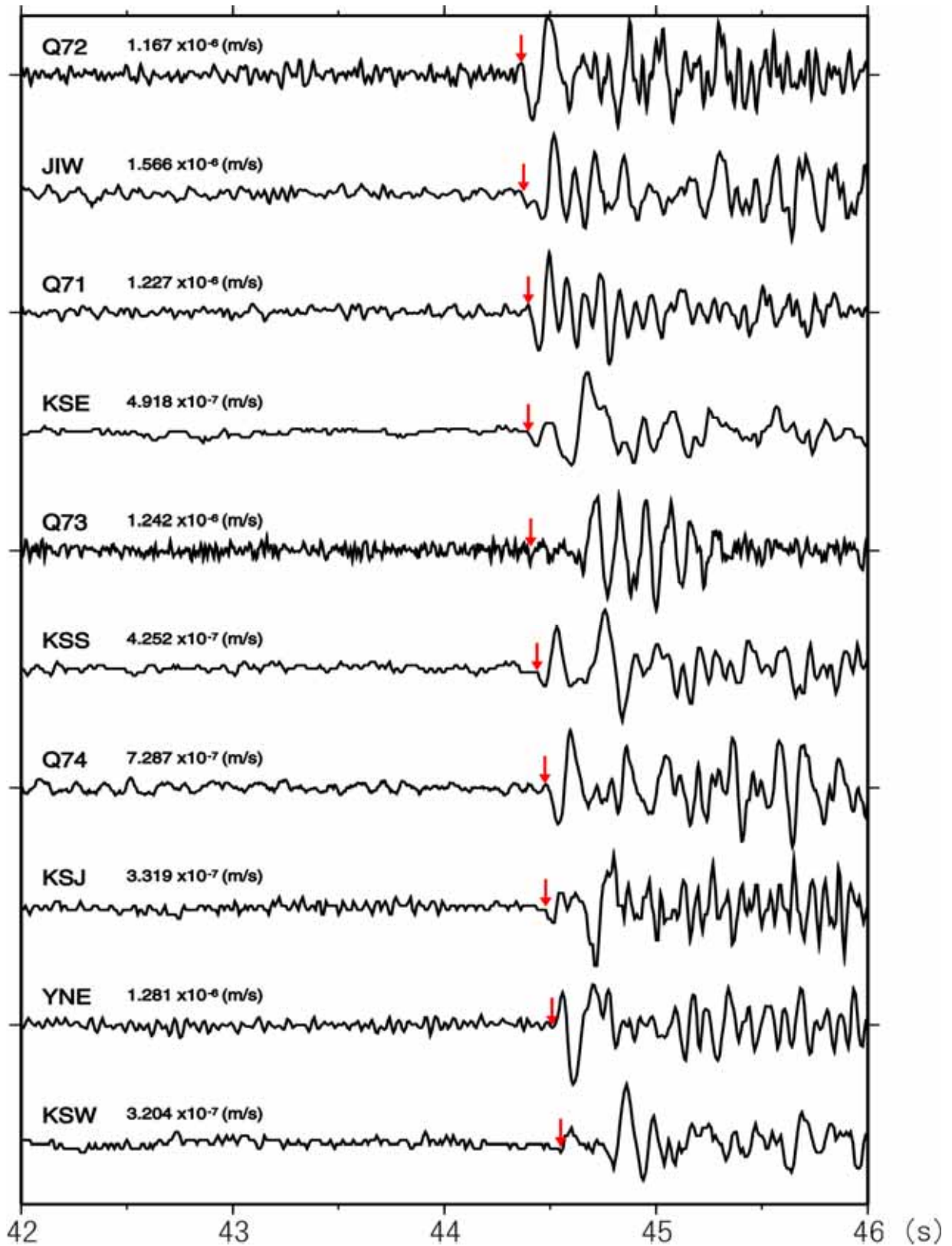


図4. 2003年9月28日19時28分44秒の地震波形．観測点名の横の数字はそれぞれの最大振幅，赤矢印はP波初動の読み取り位置を示す．

3. 震源決定

3-1. 震源決定の方法

震源決定は、最小二乗法による方法で行った。仮震源の座標と仮震源時を初期値として与え、走時残差の二乗和が最小になる補正値を求める。今回は、仮震源の座標を観測網の中心付近、深さを海拔 1500m とし、仮震源時は各地震の観測データの P 波到着時から適当な値を与え、観測方程式から正規方程式をたてて補正値を求めた。Gauss-Newton 法で計算の反復を行い、補正値がいずれも 0.015 以下になったときに解が収束したとみなし、震源を決定した。

計算走時は、人工地震探査の波形データから P 波到着時を読み取って作った走時曲線(図 3 a, b, c)から、速度構造を推定して求めた。走時データの分布の形状から水平二層構造を仮定し、まず発破点 $S1, S2$ の走時から表層の速度(V_1)を、発破点 $S3$ の走時から下層の速度(V_2)を求めた。 V_2 を決定する際には、観測点を $S3$ の高度に補正し、震央距離と補正走時から V_2 と境界面の深さを求めた。 P 波速度は、 $V_1=2.7\text{km/s}$ 、 $V_2=6.45\text{km/s}$ 、境界面は海拔 500m と推定された。

3-2. 使用データ

震源決定には、集中観測で設置した自然地震用観測点 4 点($Q71 \sim Q74$)と、東京工業大学火山流体研究センターで収録している常時観測点 6 点($J1W, KSE, KSJ, KSS, KSW, YNE$)の計 10 点の観測データを使用した。観測点の位置は図 1 a, b に示している。震源決定を行った自然地震の数は 28 個である。読み取りに使った波形の例を図 4 に示す。これは 9 月 28 日 16 時 28 分のデータで、震源決定を行ったデータのうち、比較的初動が明瞭なものである。横軸に時間軸をとり、観測走時の早い順に並べてある。このような波形データから、今回は P 波到着時のみを読み取り、震源決定を行った。

4. 結果

決定した震源分布を図 5 に示す。震源決定の結果、草津白根火山周辺の地震とみられるものは 27 個である(表 3)。そのうち、解が収束したものは 18 個あったが、それらはすべて湯釜・水釜周辺に決定された。そのほかの地震に関しては、解が発散するか、ある値を中心として振動してしまい最終的に値が定まらなかった。震源分布の特徴としては、井田ほか(1989)で求められた震源分布と同様に湯釜北東部に集まる形になった。震源の深さはほとんどが海拔 1500m 以浅に決まり、これまでより浅くなった。地震のマグニチュードは $-1.0 \sim -2.0$ 程度であった。

5. 考察

今回の震源決定では、人工地震探査のデータから求めた速度構造を使用することで精度よく震源座標が求められた。しかし、解が発散するものや空中に震源が決まるものがあった。この問題に関しては、速度構造をさらに詳しく解析することや計算過程において非負の拘束条件を与えることなどで改善する必要がある。

震源分布に関しては、桂ほか(1996)の電磁気探査による比抵抗構造において湯釜・水釜周辺の地下に低比抵抗域が求められていることや、牧野ほか(2002)の重力探査で水釜円頂丘付近に負の重力異常分布が見られていることなどから、地震発生域付近にマグマや熱水などがあり、その活動によってこの領域で地震が発生していると考えられる。

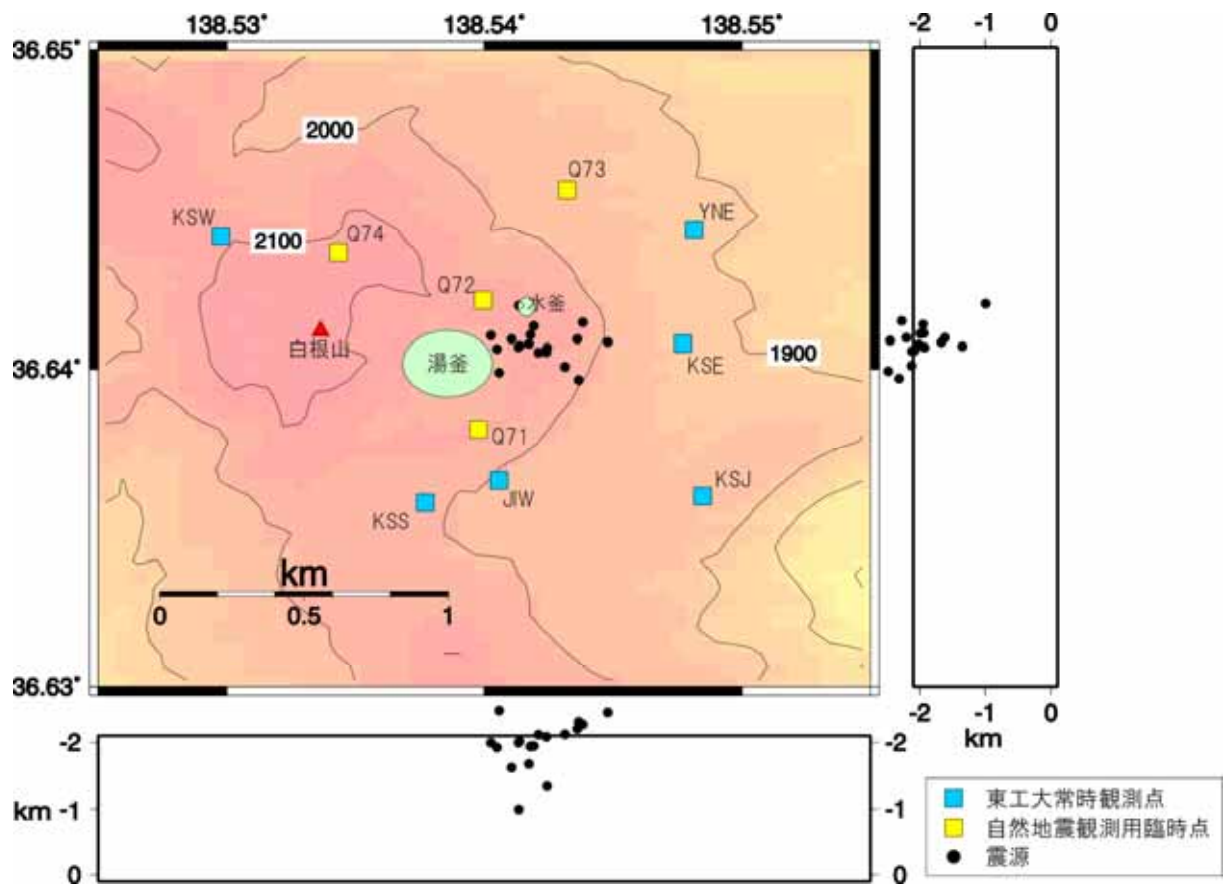


図 5. 震源分布図

6. まとめ

2003年9月25日から10月1日までの期間、群馬県北西部に位置する草津白根火山で集中総合観測の一環として人工地震探査・自然地震観測を行った。この観測で得られた人工地震探査の走時データから速度構造を推定し、最小二乗法により震源決定を行い、草津白根火山周辺で発生する火山性地震の震源分布を求めた。その結果、震源はこれまでよりも浅い位置に決まり、白根山の湯釜・水釜周辺の1500m以浅に集中した。この分布は、草津白根火山における熱水活動との関連性を示唆するものといえる。

謝辞

震源決定プログラムを作成するにあたり、九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センターの清水 洋教授に丁寧にご指導いただいた。ここに記して感謝する。

表 3 . 震源決定結果 . 深さは海拔 0mを基準として下方方向に正である . 震源座標が空欄のものは , 解が収束しなかった地震を示す .

震源時	震源座標(Tokyo 測地系)			震源時	震源座標(Tokyo 測地系)		
	緯度 (deg)	経度 (deg)	深さ (km)		緯度 (deg)	経度 (deg)	深さ (km)
9/27 17:56:40.726	36.6399	138.5406	-2.48	9/28 07:47:59.539	36.6413	138.5419	-1.95
9/27 18:29:41				9/28 12:17:03			
9/27 19:14:17				9/28 13:50:59			
9/27 19:34:36.911	36.6405	138.5421	-2.12	9/28 15:43:41.038	36.6407	138.5424	-1.35
9/27 20:17:20.113	36.6407	138.5413	-2.00	9/28 17:24:03.144	36.6411	138.5418	-1.94
9/27 20:47:00.978	36.6420	138.5413	-0.99	9/28 19:28:44.192	36.6410	138.5411	-1.62
9/27 21:45:23.600	36.6397	138.5437	-2.31	9/28 21:19:08			
9/27 22:09:52.385	36.6406	138.5405	-1.93	9/29 01:57:07			
9/28 04:33:47				9/29 02:41:50.004	36.6407	138.5413	-2.02
9/28 05:08:14.629	36.6409	138.5436	-2.21	9/29 04:18:01			
9/28 05:21:04.095	36.6405	138.5424	-2.08	9/29 05:06:38.485	36.6410	138.5403	-1.99
9/28 05:58:47.762	36.6401	138.5431	-2.13	9/29 05:14:40			
9/28 06:02:22.589	36.6415	138.5438	-2.28	9/29 17:04:43.601	36.6408	138.5417	-1.67
9/28 07:38:30.763	36.6408	138.5448	-2.46				

参考文献

- 井田喜明・長田昇・沢田宗久・小山悦郎・鍵山恒臣, 1989, 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, 東京大学地震研究所彙報第64号, 325-345
- 笠原順三・友田好文, 1993, コンピュータ地球科学, 東京大学出版会
- 桂郁雄・川東慶子・Djedi S. Widarto・西村進・茂木透・下泉政志・西田潤一・楠建一郎・鈴木浩一・藤光康宏・城森明・山本哲也・山崎明・田口陽介, 1996, 草津白根火山での CSMT および TDEM 探査, 第3回草津白根山の集中総合観測報告書, 61-72
- 牧野雅彦・渡辺史郎・住田達哉・小川康雄, 2002, 草津白根山の重力探査, 月刊地球, 号外 No.39, 52-56
- 中川徹・小柳義夫, 1982, 最小二乗法による実験データ解析, 東京大学出版会