2003 年草津白根火山人工地震探査概要

筒井智樹[1]・鬼澤真也[2]・森　健彦[3]・野上健治[2]・
平林順一[2]・小川康雄[2]・水橋正英[2]・及川光弘[2]・齋藤政城[2]・
若林　亨[2]・高木憲朗[2]・鈴木敦生[4]・草薙智浩[1]・
梶井達矢[1]・田中麻貴・及川　純[5]・中道治久[6]・
山下祐一郎[7]・吉川　慎[3]・松島　健[8]・河野裕希[8]・
堀　美緒[8]
1:秋田大学
2：東京工業大学
3：京都大学
4：北海道大学
5：東京大学
6：防災科学技術研究所
7：愛知教育大学
8：九州大学

Seismic exploration 2003 in Kusatsu-Shirane Volcano

T. Tsutsui[1], S. Onizawa[2], T. Mori[3], K. Nogami[2],
J. Hirabayashi[2], Y. Ogawa[2], S. Mizuhashi[2], M.Oikawa[2],
M. Saito[2], N. Takagi[2], T. Wakabayashi[2], A. Suzuki[4],
T. Kusanagi[1], T. Kajii[1], M. Tanaka T., H. Nakamichi[6], J. Oikawa[5],
Y. Yamashita[7], S. Yoshikawa[3], T. Matsushima[8], Y. Kohno[8],
and M. Hori[8].
1: Akita University
2: Tokyo Institute of Technology
3: Kyoto University
4: Hokkaido University
5: University of Tokyo
6: National Institiute of Earth Science and Disaster prevention
7: Aichi University of Education
8: Kyushu University

１．はじめに

群馬県北西端に位置する草津白根火山は 1805 年の噴火活動が記録に残されて以来、たびたび噴火活動が報告されてきた活動レベルの高い活火山である（たとえば気象庁, 1984）。最近では 1982-83 年に水蒸気爆発を発生したほか、1989 年にも微噴火を発生している（井田・他, 1989, 平

林, 1996)。このようにいまなお活発な活動が続いている草津白根火山は首都圏から数時間のところにありその立地を生かして観光開発が進められた結果、山頂部へのアクセスがもっとも容易な活火山のひとつでもある。アクセスが容易であるが故にもっとも噴火被害の危険性が高い湯釜火口の際にまで無防備な旅行者の入り込みが可能となり、草津白根火山は他の活火山に比べて火山活動を対象とした防災対策を充実させることが強く要請されている。火山活動を対象とした防災対策の充実のためには火山活動状況の把握と湯釜火口の地下活動のメカニズムを知ることが重要な課題である。

草津白根火山では火山活動状況の把握と湯釜火口の地下活動の解明を目的として、これまでに３回の集中総合観測が行われてきた。これらの集中総合観測などの結果から、湯釜を中心とする山頂火口群の一つである水釜付近の地下で熱水活動が行われていることが示唆された（井田・他, 1989, 桂・他, 1996, 手塚・他, 1996)。

熱水活動を含む活火山の地下活動の状況を監視する際のバロメーターのひとつとして、火山性地震あるいは火山性微動の発生頻度が用いられる。草津白根火山ではこれらの火山地震学的現象を監視することを目的として東京大学地震研究所による常設地震観測網が稼働していたが、2000年以降東京工業大学の手によって高密度地震観測ネットワークが整備され火山性地震の検知能力が向上した（森・他, 2001)。さらに詳細な地下活動の把握を行うためには、火山性地震の震源決定精度を改良する必要があり、震源決定の際の基礎的な物理量である地震波速度構造の精度向上の要請が高まっていた。

このような背景をふまえ、2003 年に行われた草津白根火山集中総合観測では地下活動に対する地震学的アプローチを推進させるべく、人工地震探査が一つの項目として加えられた。今回の人工地震探査のねらいを以下に述べる。

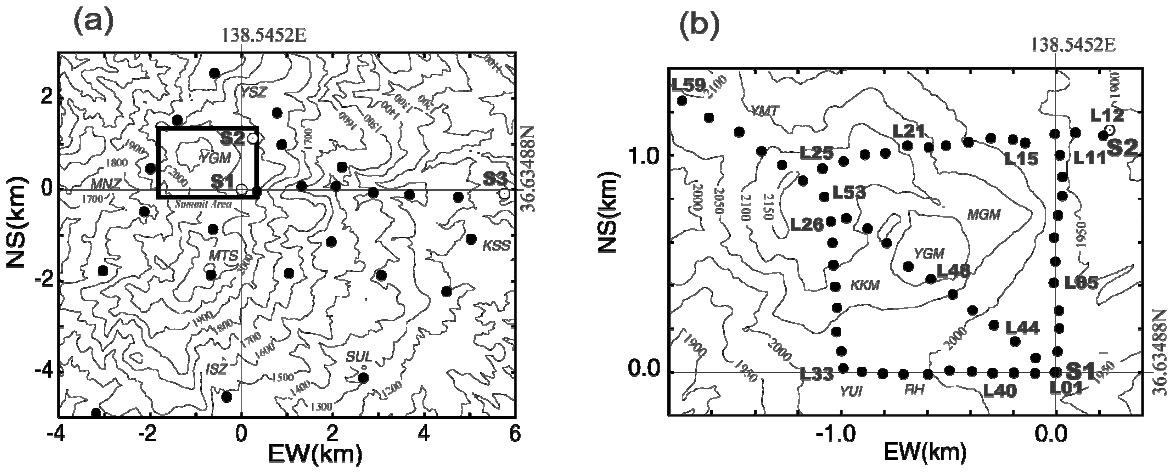
１）草津白根火山山体の地震波速度構造を実証的にとらえる

２）湯釜火口とその周辺の詳細な地下構造イメージを得る

本稿ではこの人工地震探査観測の詳細について述べる。なお、目的 1)については鬼澤・他（本報告書）に、目的 2)については筒井・他（本報告書）に述べられている。

２．人工地震観測の概要

本項目は 2003 年 9 月 25 日～10 月 1 日の期間に実施された。人工地震の震源には合計 40kg のダイナマイト発破を用い、山頂部に２ヶ所および山麓に１ヶ所の発破点を配置した。山頂部の２発破点ではそれぞれ 5kg の薬量を用い、山麓では 30kg の薬量を用いた。これら３つの発破点に加えて合計 96 点の臨時観測点からなる観測網を展開した。観測網は発破点 S1 および S2 を結び高密度に配置された 71 点から構成される山頂部(Summit)観測網と、発破点 S3 から草津白根火山山体全域に展開された 25 点からなる広域(Regional)観測網から構成された。山頂部観測網では擬似反射記録法(Tsutsui, 1992)による湯釜周辺の浅部構造の地下構造イメージングを狙い、また広域観測網では P 波初動走時解析ならびに振幅解析による草津白根火山山体の地震波速度構造を狙っている。観測点測位にはラピッドスタティック法 GPS 測位とトータルステーションをもちいた。観測網を地形図上にプロットしたものを第 1 図に示す。



第 1 図：草津白根火山構造探査測線。(a)広域(Regional)観測網、 (b)山頂域(Summit)観測網を示す。ともに黒丸は臨時観測点を、白丸は発破点を示す。YGM:湯釜、MTS: 本白根山、MNZ:万座温泉、KSS:草津温泉、SUL:草津硫黄鉱山、ISZ:石津硫黄鉱山、YMT:山田峠、MGM:水釜、KKM:涸釜、YUI:弓ヶ池、RH:草津白根レストハウス。

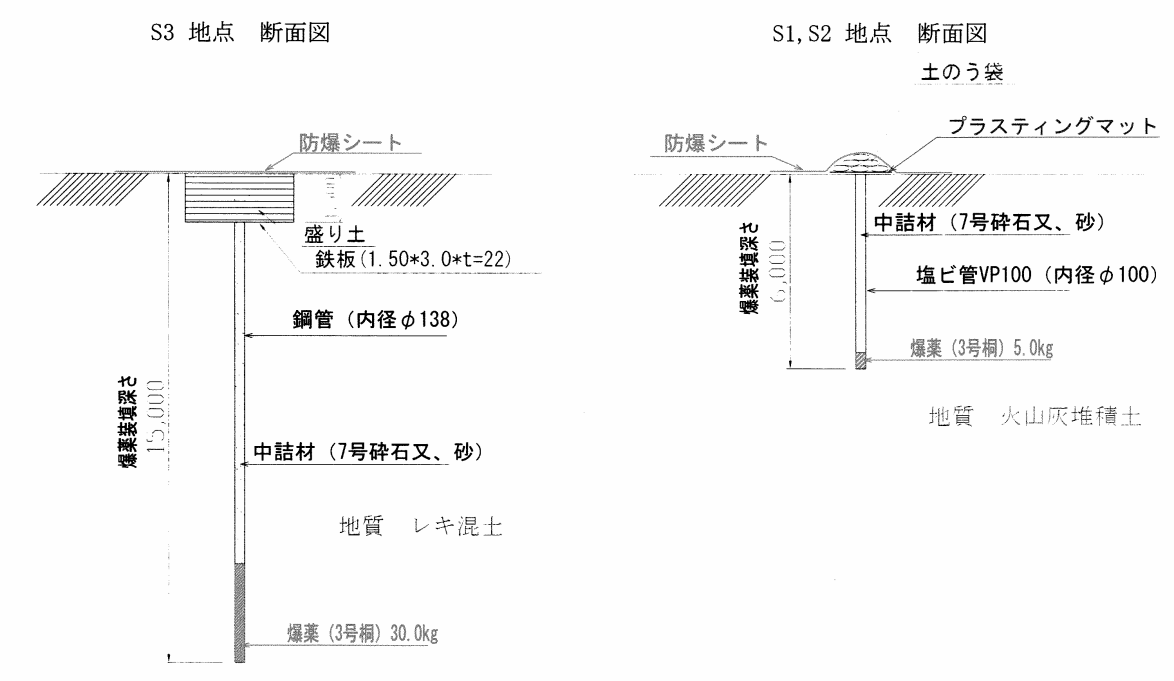
発破作業は 9 月 28 日 21 時 30 分から 22 時にかけて 15 分間隔で行われ、83 観測点で良好な波形データを取得した。また、人工地震探査のために展開された臨時観測網では草津白根火山山頂部に発生する火山性地震の諸元の把握を目的として、9 月 29 日早朝まで自然地震の待ち受け観測が行われ、複数の自然地震波形記録を得ることができた。自然地震観測の報告は堀・他（本報告書）に述べられている。

２．発破作業

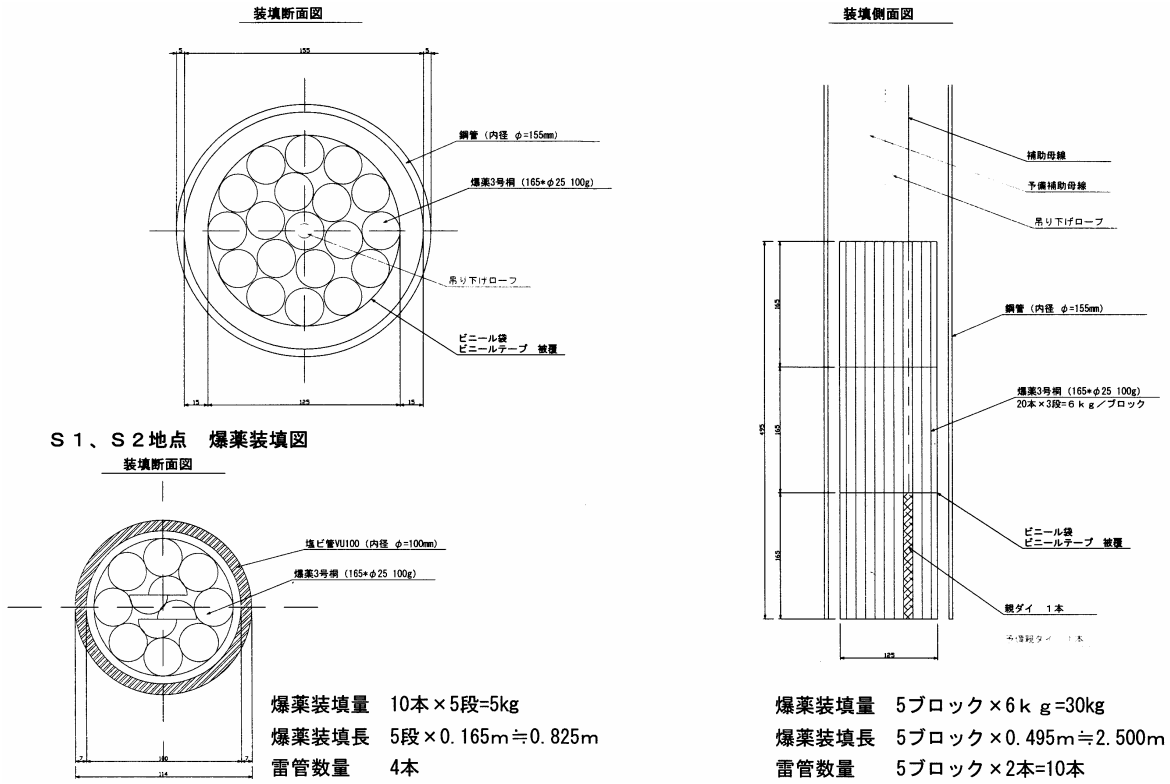
人工地震探査計画の具体的な検討は 2004 年 6 月 4～6 日にかけて東工大火山流体センターで行われた。これまで行われてきた火山体構造探査の実績をもとに当初計画の測線長を勘案して、物理探鉱技術協会(1979)を参考に山頂部 5kg, 山麓部 30kg の発破を用いることとした。また、発破点の発破深度はハウザーの公式と物理探鉱技術協会(1979)を参考に、薬量 5kg の発破 S1 および S2 に対して発破深度約 6m, 薬量 30kg の S3 に対して 15m とした。発破点 S1, S2 はユンボを用いて 5m×5m×深さ 6m の縦穴を掘削の上、ケーシングパイプを埋設した。発破点 S3 はエアー吹き工法で爆破孔掘削を行った。

発破点工作の詳細を第 2 図に示す。発破に伴う吹き上がりを避けるために S1 および S2 地点では孔口に置いたブラスティングマットの上に土嚢を積み、さらに土嚢の飛散防止として防爆シートで覆った。S3 地点での吹き上がり防止対策としては孔口を 1.5m×3m の鉄板でふさぎ、その上に 1.5m 厚の盛り土を施した上にユンボを載せた。当日の発破点の状況を写真 1 に示す。

さらに発破孔内の火薬の工作の詳細を第 3 図に示す。火薬には桐３号ダイナマイト(１本 100g)を用い、地震探査用雷管で点火を行った。不発対策として発破点 S1 および S2 ではダイナマイト 50 本に 4 本の地震探査用雷管を用いた。同様に発破点 S3 ではダイナマイト 300 本に 10 本の地震探査用雷管を用いた。発破孔に火薬を装填後、タンピング材として砂を込めた。



第２図：発破点工作図。左は S3 地点、右は S1, S2 地点を示す。

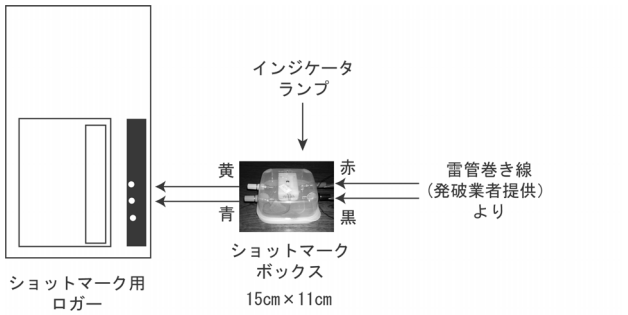


第３図：火薬工作図。下左は S1, S2 地点爆薬装填計画。残りは S3 地点装填計画を示す。

写真１：発破点 S3（森　健彦　撮影)。中央のユンボの下に発破孔がある。

発破の正確な時刻を知るために第 4 図に示すショットマーク発生装置を製作し、孔外雷管とともに現地で用いた。電源として単 3 乾電池 2 本をもちいる簡単な回路であるが、ショットマーク発生完了がインジケータランプ(LED)の点灯で確認できる。発破前の結線完了状態で 0V が、発破完了状態で LED の順方向電圧降下に相当する電圧 1.7V がショットマーク出力にあらわれる。この出力をデータロガーLS8000SH に入力し、1kHz でサンプリングしたものをショットマーク観測データとした。

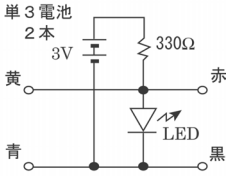
9 月 28 日の発破スケジュールは事前に大学関係者と発破業者との間で綿密に打ち合わせが重ねられた。県境に位置する草津白根火山では山頂部自動車道路への交通量が日没後に著しく減少することと、草津町での人工ノイズ発生状況とを勘案して 21:30 から 15 分間隔で発破作業を行うこととした。



〈動作〉

赤黒間	インジケータランプ	黄青間電圧
ショート	消灯	0V
解放	オレンジ色点灯	約1.8V

〈回路〉



第４図：ショットマークボックス

なお，発破点 S1 については業者のミスによる絶縁不良のためにショットマークが得られなかった．発破 S1 の発破時刻の推定と２回の発破時刻の詳細については筒井・他（本報告書）の付録に記述されている。

３．臨時観測点の展開

人工地震の観測を目的とした臨時観測点の展開は 9 月 26 日～27 日にかけて行われた。本観測参加者が 6 班に分かれ、観測点設置を 4 班が受け持ち、残りの 2 班で測量を行った。合計 96 観測点のうち 84 点を上下動成分で構成し、残りの 12 点で三成分観測を行った。観測網を構成する観測点および発破点の座標を、その詳細とともに第 1 表に示す。

合計 96 点の臨時観測点を構成する装置の組み合わせは次の３種類である。76 点の上下動観測点および 8 点の 3 成分観測点(L01-L59, R01-R19, R91-R97)では固有周波数 2Hz の L-22D と LS8000SH（森田・浜口, 1996； 白山工業製）を使用した。8 観測点(H81-H88)では LS8000SH との比較を目的として 4.5Hz の地震計 GS-11D(GeoSpace 社製)と LS8200SD（白山工業製）を用いて観測を行った。Q71～Q74 は LE-3Dlite（レナルツ社製）と LZ8000（松島他,1998；白山工業製）を使用した。

臨時観測点はつぎのように２つの観測網に割り当てられた。71 点が山頂部観測網を構成し、L01～L59 観測点はほぼ 100m～150m 間隔で設置された。H81～H88 観測点および Q71～Q74 観測点は L01～L59 観測点のカバーする範囲内に設置された。残りの 25 点(R01～R97 観測点)は 1～4km 間隔で広域観測網を構成した。なお、Q71～Q74 観測点における観測の詳細は堀・他（本報告書）に記述されている。

すべての発破が完了した翌日、臨時観測点の撤去作業とともに観測データの回収が行われた。全 96 観測点のうち、89 点で波形データを得ることができた。データを得られなかった点ではスケジュール設定ミスおよび地震計系統の断線・転倒の他にバッテリー消耗が主な原因であった。

４．観測波形とその特徴

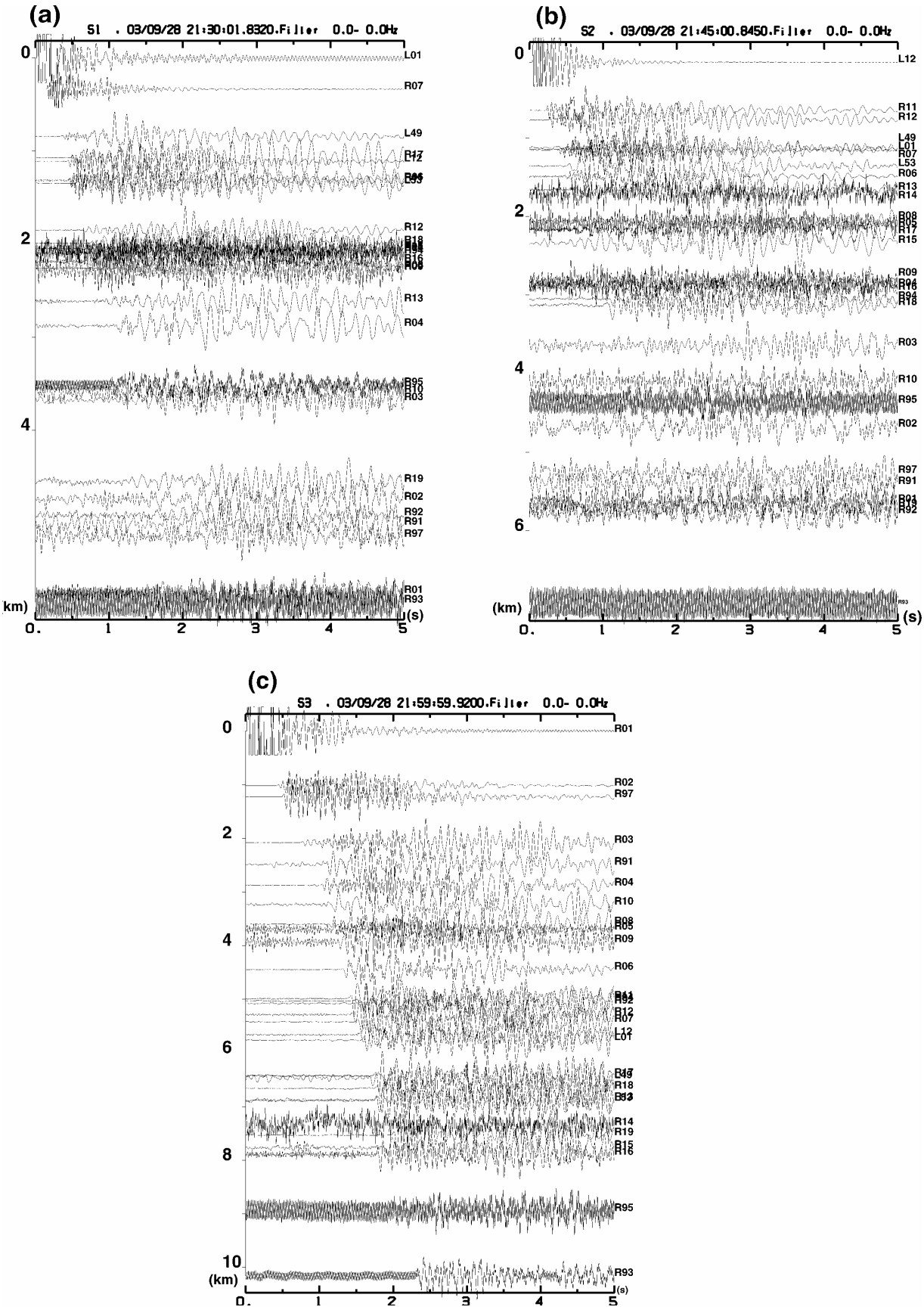
本発破によって広域観測網で得られた人工地震波形を第 5 図 a～c に示す。第 5 図は縦軸に震源距離(km)、横軸に走時(s)をとって表示している。第 5 図 a, b にみられるように発破 S1, S2 は震源距離約 3km の距離まで初動が明瞭に確認できる。一方発破 S3 では震源距離 10km を超えて明瞭に初動が確認される（第 5 図 c)。なお第 5 図は山頂部観測網を含む領域を示しているが、図の見やすさを考慮して山頂部観測網の波形は一部のみをプロットした。山麓部の発破 S3 に対する初動では約 2.5km/s の見かけ速度が震源距離 2km 以下の場所で観測されるとともに、約 6km/s の見かけ速度が震源距離 5.5km 以上の場所で観測される。

第１表　発破点・臨時観測点座標。Region 欄の Summmit は山頂部観測網を、Regional は広域観測網を構成する観測点であることを示す。

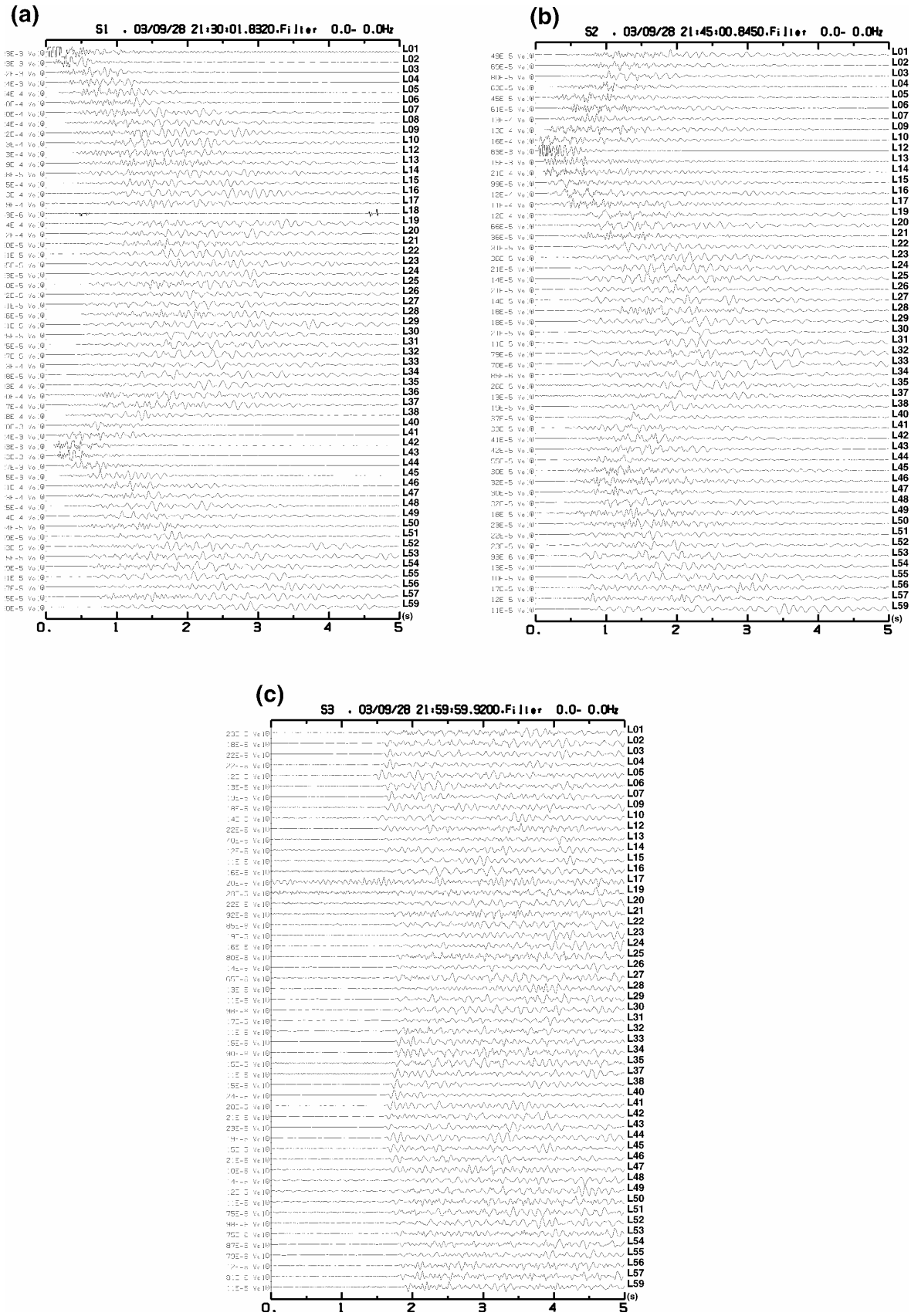
Region	Station	Coordinate (Tokyo Datum)								Comp.	Logger			Sensor					Field Note	Remark
		Latitude			Longitude			Altitude	Measurement		Number	Mem.	Samp. Freq	Number	Comp.	Nat. Freq.	Damp. Cnst.	Sensitivity		
		[deg]	[min]	[sec]	[deg]	[min]	[sec]	[m]				[MB]	[Hz]			[Hz]		[V/m/s]		
Shot	S1	36	38	5.58	138	32	42.74	1974	Static		草津071	4	1000						薬量: 5kg	
Shot	S2	36	38	41.77	138	32	52.63	1934	Static		草津072	4	1000						薬量: 5kg	
Shot	S3	36	38	2.55	138	36	34.36	1079	Total Station		草津073	4	1000						薬量:30kg	
Summit	*L01*	*36*	*38*	*5.58*	*138*	*32*	*42.43*	*1980*	*DPGS*	*3*	*島原064*	*20*	*250*	*島原2*	*3*	*2*	*0.7*	*57.4*		
Summit	L02	36	38	8.66	138	32	42.92	1967	Total Station	1	有珠201	20	250	有珠201	1	2	0.7	57.4		
Summit	L03	36	38	12.09	138	32	43.21	1968	Total Station	1	有珠202	20	250	有珠202	1	2	0.7	57.4		
Summit	L04	36	38	14.79	138	32	43.18	1968	Total Station	1	有珠203	20	250	有珠203	1	2	0.7	57.4		
Summit	L05	36	38	18.93	138	32	42.20	1970	Total Station	1	有珠204	20	250	有珠204	1	2	0.7	57.4	撤収時measure end	スケジュールおかしい
Summit	*L06*	*36*	*38*	*22.12*	*138*	*32*	*42.53*	*1982*	*Total Station*	*3*	*島原068*	*20*	*250*	*島原10*	*3*	*2*	*0.7*	*57.4*		
Summit	L07	36	38	25.71	138	32	42.27	1982	Total Station	1	有珠205	20	250	有珠205	1	2	0.7	57.4		
Summit	L08	36	38	29.02	138	32	42.98	1976	Total Station	1	有珠206	20	250	有珠206	1	2	0.7	57.4		S1までO.K., その後地震計orロガー死亡
Summit	L09	36	38	31.91	138	32	43.79	1961	Total Station	1	有珠207	20	250	有珠207	1	2	0.7	57.4		
Summit	L10	36	38	34.80	138	32	43.82	1953	Total Station	1	有珠208	20	250	有珠208	1	2	0.7	57.4	撤収時measure end	スケジュールおかしい
Summit	L11	36	38	37.88	138	32	43.43	1956	Total Station	1	有珠209	20	250	有珠209	1	2	0.7	57.4	地震計のネジがゆるんでいる	
Summit	L12	36	38	40.96	138	32	51.47	1942	Total Station	1	有珠210	20	250	有珠210	1	2	0.7	57.4		
Summit	L13	36	38	41.42	138	32	46.27	1950	Total Station	1	有珠211	20	250	有珠211	1	2	0.7	57.4		極性反転？
Summit	*L14*	*36*	*38*	*41.19*	*138*	*32*	*42.44*	*1962*	*Total Station*	*3*	*島原069*	*20*	*250*	*島原3*	*3*	*2*	*0.7*	*57.4*		
Summit	L15	36	38	39.86	138	32	36.85	1978	Total Station	1	有珠212	20	250	有珠212	1	2	0.7	57.4		
Summit	L16	36	38	40.38	138	32	34.55	1984	Total Station	1	有珠213	20	250	有珠213	1	2	0.7	57.4	地図のplotとGPS位置が違うみたい	
Summit	L17	36	38	40.59	138	32	30.46	1991	Total Station	1	有珠214	20	250	有珠214	1	2	0.7	57.4	撤収時measure end	
Summit	L18	36	38	39.96	138	32	26.26	1997	Rapid Static	1	有珠215	20	250	有珠215	1	2	0.7	57.4		地震計orロガー死亡
Summit	L19	36	38	39.44	138	32	22.09	2026	Total Station	1	有珠216	20	250	有珠216	1	2	0.7	57.4		
Summit	*L20*	*36*	*38*	*39.18*	*138*	*32*	*18.82*	*2060*	*Rapid Static*	*3*	*島原070*	*20*	*250*	*島原13*	*3*	*2*	*0.7*	*57.4*		
Summit	L21	36	38	39.45	138	32	14.90	2071	Rapid Static	1	阿蘇106	20	250	阿蘇106	1	2	0.7	57.4		
Summit	L22	36	38	38.35	138	32	10.77	2102	Rapid Static	1	阿蘇107	20	250	阿蘇107	1	2	0.7	57.4		
Summit	L23	36	38	38.11	138	32	6.93	2119	Rapid Static	1	阿蘇108	20	250	阿蘇108	1	2	0.7	57.4		ch. 2に変なノイズ
Summit	L24	36	38	37.12	138	32	2.93	2120	Rapid Static	1	阿蘇109	20	250	阿蘇109	1	2	0.7	57.4		
Summit	*L25*	*36*	*38*	*36.05*	*138*	*31*	*58.97*	*2120*	*Rapid Static*	*3*	*秋大こまち1号*	*20*	*250*	*秋大3comp-1*	*3*	*2*	*0.7*	*57.4*		
Summit	L26	36	38	28.12	138	32	0.55	2097	Rapid Static	1	阿蘇110	20	250	阿蘇110	1	2	0.7	57.4		
Summit	L27	36	38	24.91	138	32	0.85	2097	Rapid Static	1	阿蘇111	20	250	阿蘇111	1	2	0.7	57.4		
Summit	L28	36	38	21.61	138	32	1.04	2090	Rapid Static	1	阿蘇112	20	250	阿蘇112	1	2	0.7	57.4		
Summit	*L29*	*36*	*38*	*18.37*	*138*	*32*	*1.38*	*2079*	*Rapid Static*	*3*	*秋大こまち2号*	*20*	*250*	*秋大3comp-2*	*3*	*2*	*0.7*	*57.4*		
Summit	L30	36	38	15.21	138	32	1.71	2061	Rapid Static	1	阿蘇113	20	250	阿蘇113	1	2	0.7	57.4		
Summit	L31	36	38	11.60	138	32	1.57	2033	Rapid Static	1	阿蘇114	20	250	阿蘇114	1	2	0.7	57.4		
Summit	L32	36	38	8.70	138	32	2.52	2016	Rapid Static	1	島原057	20	250	島原057	1	2	0.7	57.4		
Summit	*L33*	*36*	*38*	*6.16*	*138*	*32*	*2.90*	*2010*	*Rapid Static*	*3*	*島原065*	*20*	*250*	*島原12*	*3*	*2*	*0.7*	*57.4*	*写真なし*	
Summit	L34	36	38	5.64	138	32	6.34	2020	Rapid Static	1	島原058	20	250	島原058	1	2	0.7	57.4		
Summit	L35	36	38	5.34	138	32	10.30	2012	Rapid Static	1	島原059	20	250	島原059	1	2	0.7	57.4		
Summit	L36	36	38	5.26	138	32	14.12	2008	Rapid Static	1	島原060	20	250	島原060	1	2	0.7	57.4		
Summit	L37	36	38	5.25	138	32	18.69	2000	Rapid Static	1	島原061	20	250	島原061	1	2	0.7	57.4		
Summit	*L38*	*36*	*38*	*5.80*	*138*	*32*	*22.72*	*1991*	*Rapid Static*	*3*	*島原066*	*20*	*250*	*島原14*	*3*	*2*	*0.7*	*57.4*		
Summit	L39	36	38	5.38	138	32	26.61	1990	Total Station	1	島原062	20	250	島原062	1	2	0.7	57.4	Tcal失敗	一部Tcal失敗
Summit	L40	36	38	5.43	138	32	30.79	1988	Total Station	1	島原063	20	250	島原063	1	2	0.7	57.4		
Summit	L41	36	38	5.45	138	32	34.79	1982	Total Station	1	有珠222	20	250	有珠222	1	2	0.7	57.4		
Summit	L42	36	38	5.37	138	32	38.70	1978	Total Station	1	有珠218	20	250	有珠218	1	2	0.7	57.4		
Summit	L43	36	38	7.71	138	32	38.80	1971	Total Station	1	有珠219	20	250	有珠219	1	2	0.7	57.4		
Summit	L44	36	38	10.14	138	32	34.97	1975	Total Station	1	有珠220	20	250	有珠220	1	2	0.7	57.4		
Summit	L45	36	38	12.62	138	32	31.02	1987	Total Station	1	有珠221	20	250	有珠221	1	2	0.7	57.4		
Summit	L46	36	38	14.82	138	32	27.05	2016	Total Station	1	有珠217	20	250	有珠217	1	2	0.7	57.4		
Summit	L47	36	38	17.22	138	32	23.34	2051	Total Station	1	有珠223	20	250	有珠223	1	2	0.7	57.4		
Summit	*L48*	*36*	*38*	*19.50*	*138*	*32*	*19.29*	*2047*	*Rapid Static*	*3*	*島原067*	*20*	*250*	*島原9*	*3*	*2*	*0.7*	*57.4*		
Summit	L49	36	38	21.39	138	32	15.01	2037	Rapid Static	1	島原056	20	250	島原056	1	2	0.7	57.4	ひょっとすると結線が反対. 初動Downに見える	
Summit	L50	36	38	24.89	138	32	11.03	2093	Rapid Static	1	阿蘇115	20	250	阿蘇115	1	2	0.7	57.4		
Summit	L51	36	38	27.05	138	32	7.39	2084	Rapid Static	1	阿蘇116	20	250	阿蘇116	1	2	0.7	57.4		
Summit	L52	36	38	28.58	138	32	3.44	2096	Rapid Static	1	阿蘇117	20	250	阿蘇117	1	2	0.7	57.4		
Summit	L53	36	38	31.80	138	31	59.35	2112	Rapid Static	1	阿蘇118	20	250	阿蘇118	1	2	0.7	57.4		
Summit	L54	36	38	34.23	138	31	55.37	2130	Rapid Static	1	阿蘇119	20	250	阿蘇119	1	2	0.7	57.4		
Summit	L55	36	38	36.62	138	31	51.46	2116	Rapid Static	1	阿蘇120	20	250	阿蘇120	1	2	0.7	57.4		
Summit	L56	36	38	38.63	138	31	47.62	2084	Rapid Static	1	有珠224	20	250	有珠224	1	2	0.7	57.4		
Summit	L57	36	38	41.52	138	31	43.41	2060	Rapid Static	1	有珠225	20	250	有珠225	1	2	0.7	57.4		
Summit	L58	36	38	44.71	138	31	38.61	2082	Rapid Static	1	草津083	4	250	草津083	1	2	0.7	57.4	Tcalについて注意, 撤収時measure end	
Summit	L59	36	38	46.21	138	31	32.77	2093	Rapid Static	1	草津084	4	250	草津084	1	2	0.7	57.4		
Regional	R01	36	38	2.2	138	36	34.0	1097	e-trex	1	有珠026	20	250	有珠026	1	2	0.7	57.4		
Regional	R02	36	38	0.3	138	35	53.6	1251	e-trex	1	有珠027	20	250	有珠027	1	2	0.7	57.4		
Regional	R03	36	38	1.8	138	35	10.6	1326	e-trex	1	有珠028	20	250	有珠028	1	2	0.7	57.4		
Regional	R04	36	38	3.5	138	34	38.6	1409	e-trex	1	有珠029	20	250	有珠029	1	2	0.7	57.4		

Region	Station	Coordinate (Tokyo Datum)							Measurement	Comp.	Logger			Sensor					Field Note	Remark
		Latitude			Longitude			Altitude			Number	Mem.	Samp. Freq	Number	Comp.	Nat. Freq.	Damp. Cnst.	Sensitivity		
		[deg]	[min]	[sec]	[deg]	[min]	[sec]	[m]				[MB]	[Hz]			[Hz]		[V/m/s]		
Regional	R05	36	38	7.9	138	34	5.7	1465	e-trex	1	有珠030	20	250	有珠030	1	2	0.7	57.4	川のノイズ大	
Regional	R06	36	38	7.9	138	33	35.5	1649	e-trex	1	有珠031	20	250	有珠031	1	2	0.7	57.4		
Regional	R07	36	38	4.3	138	32	56.2	1903	e-trex	1	有珠032	20	250	有珠032	1	2	0.7	57.4		
Regional	R08	36	38	21.7	138	34	11.4	1562	e-trex	1	有珠033	20	250	有珠033	1	2	0.7	57.4		
Regional	R09	36	37	28.4	138	34	1.8	1548	e-trex	1	有珠034	20	250	有珠034	1	2	0.7	57.4		
Regional	R10	36	37	4.6	138	34	45.9	1350	e-trex	1	有珠035	20	250	有珠035	1	2	0.7	57.4		
Regional	R11	36	38	37.5	138	33	18.3	1856	e-trex	1	有珠036	20	250	有珠036	1	2	0.7	57.4		
Regional	R12	36	39	0.1	138	33	13.9	1831	e-trex	1	有珠037	20	250	有珠037	1	2	0.7	57.4	撤収時measure end	エリア途中まで
Regional	R13	36	39	28.2	138	32	18.8	2177	e-trex	1	有珠038	20	250	有珠038	1	2	0.7	57.4	有珠038pickを修理	
Regional	R14	36	38	55.0	138	31	46.0	2074	e-trex	1	有珠039	20	250	有珠039	1	2	0.7	57.4	地震計転倒	まともな波形をかいていない
Regional	R15	36	38	20.5	138	31	22.4	2029	e-trex	1	有珠040	20	250	有珠040	1	2	0.7	57.4		
Regional	R16	36	37	50.0	138	31	16.8	1762	e-trex	1	有珠226	20	250	有珠226	1	2	0.7	57.4		
Regional	R17	36	37	37.3	138	32	17.6	2035	e-trex	1	有珠227	20	250	有珠227	1	2	0.7	57.4	バッテリーダウン・但しarea23まで測定，No base module・データ回収出来ず	
Regional	R18	36	37	4.8	138	32	15.9	2148	e-trex	1	有珠228	20	250	有珠228	1	2	0.7	57.4		
Regional	R19	36	35	38.3	138	32	29.6	1487	e-trex	1	有珠229	20	250	有珠229	1	2	0.7	57.4		
Regional	R91	36	36	53.1	138	35	43.3	1207	e-trex	1	草津077	4	250	草津077	1	2	0.7	57.4		
Regional	R92	36	35	51.8	138	34	30.1	1266	e-trex	1	草津078	4	250	草津078	1	2	0.7	57.4		
Regional	R93	36	35	26.6	138	30	34.3	1472	e-trex	1	草津079	4	250	草津079	1	2	0.7	57.4		
Regional	R94	36	37	6.2	138	33	24.3	1759	e-trex	1	草津080	4	250	草津080	1	2	0.7	57.4		ch. 2ドリフト
Regional	R95	36	37	8.1	138	30	40.6	1778	e-trex	1	草津081	4	250	草津081	1	2	0.7	57.4		
Regional	R97	36	37	30.5	138	36	5.1	1176	e-trex	1	草津082	4	250	草津082	1	2	0.7	57.4		
Hakusan	H81	36	38	5.41	138	32	42.17	1977	DGPS	1	01010		500		1	4.5	0.7	82.7		旧L01. 単一エリア.
Hakusan	H82	36	38	7.49	138	32	38.60	1970	DGPS	1	01019		500		1	4.5	0.7	82.7		旧L43
Hakusan	H83	36	38	9.90	138	32	34.80	1972	DGPS	1	01020		500		1	4.5	0.7	82.7		旧L44. データなし.
Hakusan	H84	36	38	12.46	138	32	30.72	1985	DGPS	1	01011		500		1	4.5	0.7	82.7		旧L45
Hakusan	H85	36	38	14.64	138	32	26.72	2013	DGPS	1	01018		500		1	4.5	0.7	82.7		旧L46. データなし.
Hakusan	H86	36	38	9.99	138	32	31.44	1978	DGPS	1	01013		500		1	4.5	0.7	82.7		旧H03
Hakusan	H87	36	38	11.02	138	32	32.51	1979	DGPS	1	01014		500		1	4.5	0.7	82.7		旧H01
Hakusan	H88	36	38	12.13	138	32	34.52	1979	DGPS	1	01016		500		1	4.5	0.7	82.7		旧H02
Continuous	Q71	36	38	16.99	138	32	23.07	2048	DGPS?	3			200		3	1	0.7	400		旧Q01
Continuous	Q72	36	38	31.68	138	32	23.70	2080	DGPS?	3			200		3	1	0.7	400		旧Q02
Continuous	Q73	36	38	44.16	138	32	35.58	1961	DGPS?	3			200		3	1	0.7	400		旧Q03
Continuous	Q74	36	38	37.02	138	32	3.66	2124	DGPS?	3			200		3	1	0.7	400		旧Q04

第1表（つづき）



第５図：広域(regional)観測網における観測記録。(a)発破点 S1, (b)発破点 S2, (c)発破点 S3。



第６図：　山頂部(Summit)観測網における波形記録例。(a)発破点 S1, (b)発破点 S2, (c)発破点 S3。

さらに山頂部観測網で得られた波形記録を第6図a～cに示す。第6図の横軸は走時(s)であるが、観測点ごとに波形記録を等間隔に並べて示した。山頂観測網内では発破 S1, S2 のいずれも明瞭に初動が観測される（第6図 a, b）。また、震源距離が 6-8km の範囲である山麓における発破 S3 に対しても明瞭な初動が観測されている（第6図 c）。

山頂部の発破S1およびS2の初動は震源距離2km付近まで約3km/s以上の見かけ速度を示すが、震源近傍では 4km/s を超える見かけ速度を示す。さらに第6図 c の各波形では北西ほど後続相の出現走時が系統的に早くなる傾向が認められ、東に向かって深くなる基盤深度分布の傾向（牧野・他, 2002）と調和的であることから、湯釜近傍の浅部構造の影響を反映していることが期待される。解析結果については鬼澤・他（本報告書）、筒井・他（本報告書）に記述されている。

５．まとめ

今回の集中観測では草津白根火山の地下構造調査を目的に、3 地点における発破を山体上に展開された 96 臨時観測点で観測した。草津白根火山山頂部では観測点間隔 100～150m の高密度観測網の中で薬量 5kg の発破を２ヶ所で行い、山麓では薬量 30kg の発破を１ヶ所で行った。山頂部の発破ではいずれも震源距離 3km まで初動が明瞭に観測された。初動走時は震源近傍で 4km/s を超える見かけ速度を示した後、震源距離 2km 付近まで 3km/s の見かけ速度を示す。山麓の発破は震源距離 10km を超えて明瞭な初動が観測された。山麓の発破に対する初動走時は震源距離 2km 以内では 2.5km/s の見かけ速度を示し、震源距離 5.5km 以上の地点では約 6km/s の見かけ速度を示す。さらに山麓の発破に対する山頂部観測網の各点では系統的に出現時刻が変化する後続相が認められる。以上のことから今回の観測で得られた観測データは草津白根山の地下構造の解明に貢献するであろうことが期待される。

謝辞

本観測の実施にあたり、草津町、六合村の皆様に理解をいただき、絶大なる協力を賜った。また、草津町役場、株式会社コクド、群馬県中之条土木事務所、群馬県中之条行政事務所、環境省万座自然保護官事務所、林野庁吾妻森林管理署にはご助力をいただいた。発破孔の作孔には山田工業株式会社の協力を得た上、円滑かつ安全な発破作業は久住土建株式会社の献身的な協力に負うところが大きかった。利根コンサルタンツ東北支店伊藤憲哉氏には本計画の立ち上げの際にお世話になった。また、ショットタイムの取得のための雷管周りの工作は日本油脂（株）民田利明氏にご指導をいただいた。本観測は東京大学地震研究所客員教官研究費、及び東京大学地震研究所共同利用研究費（課題番号：2003-G-17、研究課題：重複反射波を用いた火山体内部構造の推定の試み）を用いて行われた。

引用文献

物理探鉱技術協会 (1979) 土木地質調査における屈折法地震探査の調査計画に関する要項、物理探鑛. **32**, 252-269.

平林順一 (1996) 草津白根山の最近の活動状況、第３回草津白根山の集中総合観測報告書、1.

堀　美緒・河野裕希・松島　健・鬼澤真也・平林順一・野上健治・草津白根集中観測　人工地

震探査グループ (2004) 草津白根火山における火山性地震の震源分布、本報告書.

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 月の小噴火、地震研究所彙報、**64**, 325-345.

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.

気象庁 (1984) 草津白根山, 日本活火山総覧, 183-193.

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.

松島　健・清水　洋・植平賢司・安達繁樹・安藤　浩（1998）地震観測用小型テレメタリングシステムの開発, 日本地震学会秋季大会, P04.

森　健彦・平林順一・野上健治・金嶋　聰・須藤靖明・吉川　慎 (2001)　草津白根火山における地震観測、地球惑星科学関連学会 2001 年合同大会予稿集, Jp-P012.

森田裕一・浜口博之 (1996) 火山体構造探査のための高精度小型データロガーの開発、火山、**41**, 127-139.

手塚雅美・山崎　明・中谷　清・中島新三郎・小島美都子 (1996) 草津白根山における全磁力観測、第３回草津白根山の集中総合観測報告書、53-60.

Tsutsui, T. (1992) Pseudo Reflection Profiling Method: an efficient complement to the CDP method, *Geophysical Prospecting*, **40**, 15-30.

筒井智樹・草薙智浩・梶井達矢・鬼澤真也・森　健彦・野上健治・平林順一・小川康雄・水橋正英・及川光弘・齋藤政城・若林　亨・高木憲朗・鈴木敦生・田中麻貴・及川　純・中道治久・山下祐一郎・吉川　慎・松島　健・河野裕希・堀　美緒 (2004) 草津白根火山湯釜火口周辺の地震反射断面 －擬似反射記録法による反射断面の推定－ 、本報告書

鬼澤真也・森　健彦・筒井智樹・平林順一・野上健治・松島　健・草津白根集中観測　人工地震探査グループ （2004）　草津白根火山における人工地震探査　－Ｐ波速度構造－、本報告書