

浅間山の地震波減衰域について

碓井勇二*・永井直昭**

The mass of seismic wave absorption under Mt. Asama
Yuuji Usui and Naoaki Nagai

(Received Nov.1,1997, Accepted Feb.1,1998)

1. はじめに

浅間山は長野県と群馬県の県境に位置し、近年もブルカノ式噴火を繰り返している日本を代表する火山のひとつである。

浅間山からの震央距離が80~300km程度の地震(以後、近地地震)は、図1に示す浅間山の火口から4km以内に設置された5震動観測点(A点~E点)ではラディエーションパターンの影響がほとんどなくなり、ほぼ同程度の振幅の波形が観測されるはずである。しかし、

実際には山体およびその地下構造が複雑であるため観測点により振幅の大きさが異なる。浅間山ではとりわけ地震波の到達方位によって各観測点の振幅比が変化する。これは毎日の波形験測で経験的には理解しているが、何が影響しているかを述べているものは少ない。沢田他(1983)は浅間山のP波速度を調査し、浅間山の地下に低速度域の存在を報告している。しかし具体的な深さは特定していない。

2. 目的

今回、浅間山の地下に地震波を吸収し、振幅を小さくさせる部分(以後、減衰域)が存在するという仮定(碓井他, 1996)のもと、観測点から見ていろいろな方位から到達する地震波の波形、振幅の大きさ、スペクトル等の相違を比較し、減衰域の位置や大きさを推定することを試みた。

3. 調査方法

軽井沢測候所の火山活動解析装置は1995年3月22日から正式運用となった。観測点の地震計はA, B, C点がマークプロダクト製のL-4C, D, E点が沖電気製の62F型地震計である。各地震計とも固有周期は1秒で、周波数特性は1Hzにピークを持つ。解析用波形データはサンプリング周波数100Hzのデジタルデータで、各地震ごとに光磁気ディスクに収録される。波形データがデジタル化されたことにより、スペクトル解析等の波形解析が容易に行えるようになった(碓井, 1997)。今回の調査対象期間は1995年4月から1997年10月までの31ヶ月である。

調査は次の3項目について行った。

- (1) 各観測点独自の振動特性を調査するため、地震波がほぼ真下から入射する震央距離1000km以上

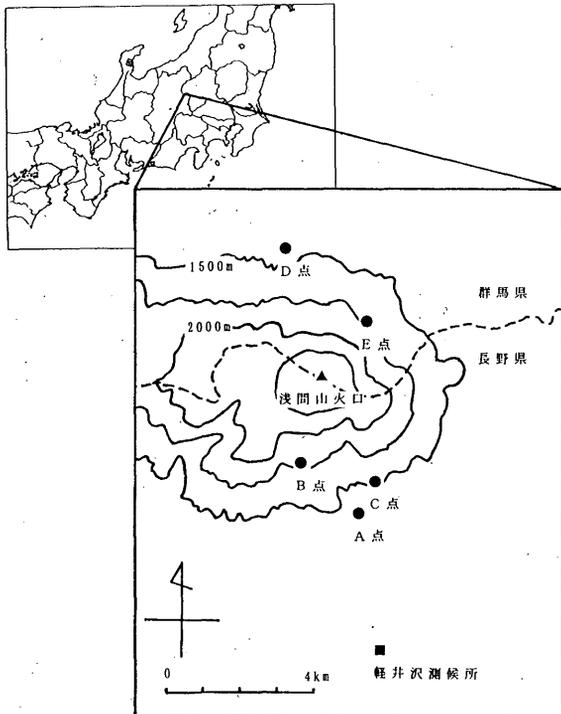


図1 浅間山に設置された5震動観測点
▲浅間山火口
●震動観測点
■軽井沢測候所

*軽井沢測候所(現気象庁地震火山部火山課)

**気象庁地震火山部地震予知情報課

の遠地震を選び出し、最大振幅を比較した。選び出した地震は振幅が大きく、いろいろな方位から到達する遠地震、計12個である。

- (2) 近地震のうち地震計が振り切れない程度に振幅が大きいマグニチュード4程度の地震を選ぶ。そのうち電源が太平洋側に偏在する35km以深の地震は除く。以上の条件を満たす調査対象とした近地震76個の震央を図2に示す。電源データは1995年4月～1997年7月の地震は気象庁震源速報、1997年8月～10月の地震は気象

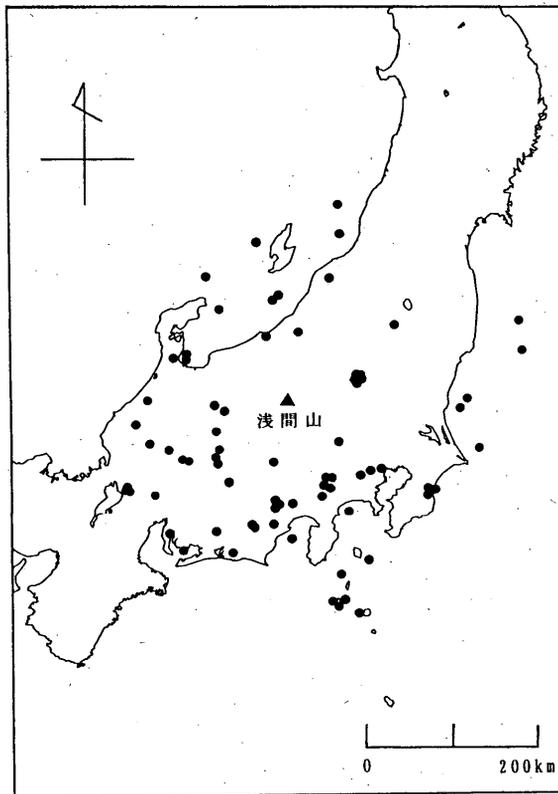


図2 調査対象とした近地震の震央
●震央
▲浅間山
震源データは震源速報及び気象（日本気象協会発行）による。

協会発行)による。対象とした地震全てについて各観測点でのS波の最大振幅を比較した。次にP波到達時刻の明瞭な地震について、各観測点での到達時刻差から入射角を求め、地震波の伝搬経路を定量的に見積った。入射角は5観測点のうち観測点間距離が2km以上となる2観測点全ての走時差から計算し平均した。仮定した山体のP波速度は軽井沢測候所で震源決定に用

いている25km/secである。

- (3) 松代地震（浅間山頂からの方位角315度、震央距離約25km）は、近地震に比べ震央距離が短いので短周期成分を多く含んでいる。そこで、各観測点で観測された松代地震の地震波形、最大振幅およびスペクトルを比較した。比較対象とした地震は、調査期間中最も振幅が大きく明瞭であった1995年9月24日21時31分に発生した地震を用いた。気象庁震源速報によると、電源の深さは9km、マグニチュードは2.6である。

4. 結果

- (1) 遠地震について南北成分の最大振幅を比較した。その結果、B、C点、A点、D、E点の順で振幅が小さくなる特徴があった。これを定量的に表わすため、A点の最大振幅を1としたときの他観測点における最大振幅の比の値を求めた。その結果を表1に示す。各観測点の値は地震波の到達する方位による大きな違いはない。よって、これらの値は観測点近傍の地盤特性によるものと考えられる。

上下動成分については各観測点での振幅はほぼ等しく、観測点による特徴はなかった。

- (2) 調査した近地震の例として、観測点の南西方向から到達する1995年12月7日14時13分、岐阜県南東部を震央とする地震（地震番号52）の南北成分波形を図3に示す。横軸は時間、縦軸は変位を表わす。気象庁震源速報によると、震源の深さは12km、マグニチュードは4.5、浅間山頂からの方位角は240度である。この地震波はA、B、C点でP波、S波が明瞭であるのに対し、浅間山北側のD、E点では特にS波の振幅が減衰しており不明瞭になっている。これは地震波が浅間山の下部を通過する際にS波が吸収されたことを示すと考えられる。

次に観測点の北方から到達する地震波の例として、1995年8月9日4月27分、新潟県沖を震央とする地震（地震番号71）の南北成分波形を図4に示す。気象庁震源速報によると、震源の深さは24km、マグニチュードは4.1、方位角は351度である。この地震では波形について観測点による大きな違いは見られない。また最大振幅

表1 遠地地震の観測結果

上下動成分は各観測点で振幅比はほぼ等しいが、南北動成分は観測点近傍の地盤の影響で振幅比に差がある。震源データは気象（日本気象協会発行）による。

南北動成分

年月日	A点	B点	C点	D点	E点	方位角	震源地
1996 5 8	1	1.7	2.1	0.7	0.7	27 度	千島列島
1996 6 21	1	1.0	1.1	0.7	0.7	37	カムチャッカ半島
1996 6 10	1	2.2	2.7	0.6	1.0	49	アリューシャン列島
1995 7 30	1	1.4	1.2	0.5	0.6	68	チリ北部沿岸
1995 4 19	1	1.6	1.6	0.5	0.6	68	チリ北部
1995 7 28	1	1.4	1.8	0.5	0.8	134	トンガ諸島
1996 4 16	1	1.8	2.0	0.5	0.8	138	フィジー諸島南方沖
1996 4 29	1	1.7	1.6	0.8	0.9	157	ソロモン諸島
1995 6 24	1	1.4	1.5	0.6	0.5	158	ニューアイランド島
1995 8 14	1	1.4	1.5	0.5	0.5	161	ニューブリテン島
1996 7 22	1	1.4	1.2	0.6	0.7	207	シーナハサ半島
1996 5 3	1	1.2	1.5	0.7	0.7	289	内モンゴル自治区
平均値	1	1.5	1.7	0.6	0.7		

上下動成分

年月日	A点	B点	C点	D点	E点	方位角	震源地
1996 5 8	1	1.2	1.3	0.7	0.8	27 度	千島列島
1996 6 21	1	0.6	0.7	0.6	0.8	37	カムチャッカ半島
1996 6 10	1	0.7	0.8	0.6	0.5	49	アリューシャン列島
1995 7 30	1	0.9	1.2	0.9	1.3	68	チリ北部沿岸
1995 4 19	1	1.3	1.3	1.0	1.4	68	チリ北部
1995 7 28	1	0.6	0.8	0.6	0.7	134	トンガ諸島
1996 4 16	1	0.9	1.1	0.7	0.7	138	フィジー諸島南方沖
1996 4 29	1	1.3	0.7	0.8	0.9	157	ソロモン諸島
1995 6 24	1	1.1	1.0	0.9	0.8	158	ニューアイランド島
1995 8 14	1	0.8	1.0	0.9	0.9	161	ニューブリテン島
1996 7 22	1	0.8	1.0	0.7	0.7	207	シーナハサ半島
1996 5 3	1	0.8	1.3	1.0	1.1	289	内モンゴル自治区
平均値	1	0.9	1.0	0.8	0.9		

の比は遠地地震とほぼ等しい。これは北側から到達する地震波は山体下部を通過しても大きな影響を受けないことを示すと考えられる。

このように、調査対象とした近地地震について各観測点での地震波形を比較した。また南北成分の最大振幅を遠地地震と同様に、A点の最大振幅を1としたときの他観測点における最大振幅の比の値を求めた。その結果を表2-1~2-4に示す。ここでは近地地震を地震波の到達する方位角およびS波の減衰の程度から東西南北の4タイプに分類した。遠地地震から求めた各観測点の振動特性を考慮したうえで近地地震の最大振幅の比を比較すると、西方（山頂か

らの方位角220~268度）から到達する地震波の振幅はD、E点で大きく減衰する。南方（153~216度）からの地震波の振幅はD点のみで大きく減衰する。しかし、北または東方から到達する地震波の振幅はほとんど減衰しなかった。

次に各観測点へのP波到達時刻差から地震波の入射角を求めた。その代表的な結果を表3に示す。今回調査した近地地震では、全ての地震が地心から約50~60度の入射角であった。

- (3) 1995年9月24日21時31分の松代地震について各観測点で観測された南北成分波形を図5に示す。地震波は観測点のほぼ北西方向から到達する。浅間山の南側にあるA、B、C点では北側にあ

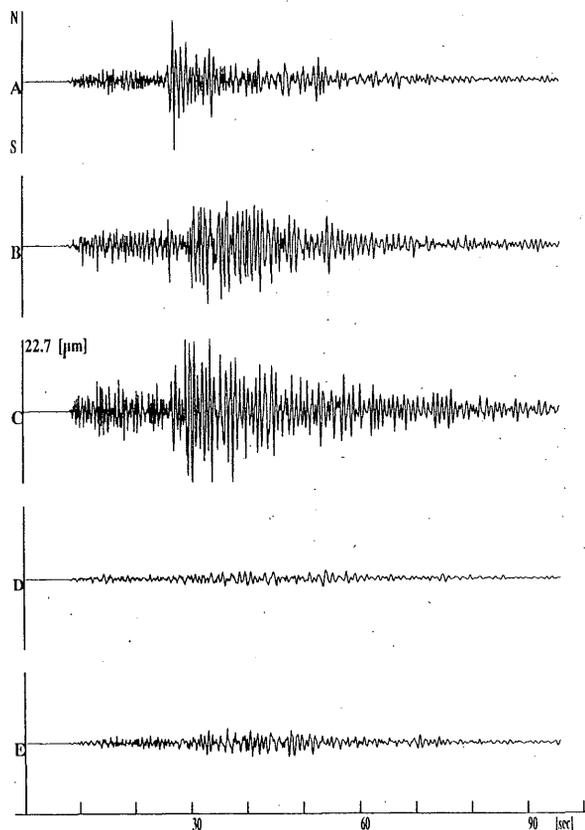


図3 1995年12月7日14時13分岐阜県南東部を震央とする地震(地震番号52)の南北成分波形。横軸は時間(秒)、縦軸は変位(マイクロメートル)。D, E点では振幅が小さく、特にS波が減衰している。

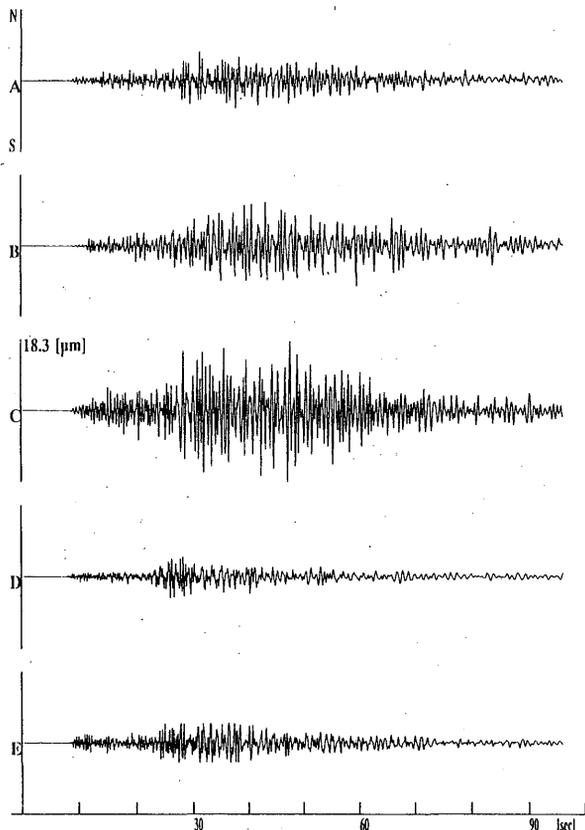


図4 1995年8月9日4時27分新潟県沖を震央とする地震(地震番号71)の南北成分波形。横軸は時間(秒)、縦軸は変位(マイクロメートル)。観測点による大きな違いはない。

るD, E点に比べ振幅が極端に小さくなっている。振幅が震央距離に比例して小さくなるとしても、それだけではこの振幅の減衰を説明することはできない。また、D, E点ではP波, S波共に明瞭である。これに対しA, B, C点では振幅が小さいだけでなく、S波が不明瞭になっている。さらにA, B, C点では振幅が小さくなっているにもかかわらず、Coda波の継続時間がD, E点に比べ長くなる特徴もある。これらの特徴は他の松代地震にも共通する。D, Eの2点で求めた松代地震の入射角は約65度で、近地地震よりもやや浅く入射する。

この地震波の全区間におけるスペクトルを図6に示す。横軸は周期(対数表示)、縦軸はフーリエスペクトルを表わす。平滑化は行っていない。この結果にも浅間山の北側と南側の観測点で顕著な相違が見られる。浅間山の北側にあるD, E点では卓越周期が0.2秒程度であるが、南側にあるA, B, C点では0.8秒程度になる。つ

まり山体下部を通過することにより0.2～0.5秒程度の短周期地震波成分が少なくなっている。

5. 考 察

以上の結果より、浅間山の地下に存在すると思われる地震波を吸収し、振幅を小さくする減衰域の位置および大きさを推定した。減衰域は火口直下で浅い所にあるXと、火口西側で深い所にあるYに分けて考えた。推定した減衰域概念図を図7に示す。E点の西方およびD点の南方からの地震波を減衰するXは火口直下に存在する。北方からB点に到達する地震波は減衰されないことから、その深さは0.5kmと見積った。また、D点の西方からの地震波を減衰するYは火口の西側に存在する。A, B, C点では北西方向からの近地地震は減衰されないが、松代地震は減衰している。それぞれの入射角を考慮し、深いところで約1.5kmと見積った。

次にこの減衰域の性質を考える。地震波が減衰域内を通過することにより、S波部分の振幅が著しく減衰されることから、減衰域は横波を吸収するやわらかな性質

表2-1 近地地震の験測結果(東方)
 東方から到達する地震波の振幅比は遠地地震とほぼ等しい。

地震番号	年月日時分	A点	B点	C点	D点	E点	方位角
1	1997 7 5 09 54	1	1.5	1.7	0.4	0.5	52 度
2	1996 6 15 05 43	1	1.3	2.8	0.5	0.7	70
3	1995 7 6 16 01	1	1.1	1.5	0.8	1.1	72
4	1995 7 7 21 10	1	1.3	2.5	0.7	0.9	72
5	1995 7 18 20 13	1	1.0	2.0	0.7	1.1	74
6	1995 8 4 17 18	1	1.0	2.0	0.7	0.9	74
7	1995 8 18 17 35	1	1.7	1.9	0.5	0.6	75
8	1996 5 9 03 10	1	0.8	1.9	0.6	0.6	76
9	1996 7 6 08 31	1	0.9	1.7	0.5	0.6	77
10	1995 6 20 16 54	1	1.6	2.2	0.4	0.7	89
11	1996 4 7 19 23	1	1.0	1.6	0.4	0.4	92
12	1997 2 21 17 16	1	1.1	2.1	0.4	0.6	105
13	1997 3 11 22 49	1	1.8	3.1	0.4	0.8	106
14	1996 8 28 08 24	1	1.3	1.7	0.3	0.5	124
15	1997 3 1 04 47	1	1.6	2.2	0.4	0.5	124
16	1996 5 19 12 59	1	1.5	2.0	0.4	0.4	127
17	1997 3 26 18 30	1	1.0	1.8	0.3	0.4	129
18	1997 1 14 15 53	1	1.3	1.9	0.4	0.8	133
19	1997 5 1 20 48	1	1.0	2.2	0.6	0.7	135
20	1997 3 13 20 44	1	1.4	2.2	0.4	0.5	138
	平均値	1	1.3	2.1	0.5	0.7	

表2-2 近地地震の験測結果(南方)
 南方から到達する地震波はD点で大きく減衰する。

地震番号	年月日時分	A点	B点	C点	D点	E点	方位角
21	1995 8 9 18 47	1	1.1	2.0	0.2	0.5	153 度
22	1997 10 9 04 30	1	1.5	2.5	0.4	0.6	154
23	1995 6 3 16 42	1	1.4	3.1	0.4	0.7	156
24	1996 5 7 13 01	1	1.8	3.3	0.3	0.9	156
25	1995 7 7 10 06	1	1.4	2.6	0.3	0.6	157
26	1996 6 12 07 08	1	1.2	2.2	0.3	0.7	159
27	1996 10 17 12 13	1	1.2	1.9	0.3	0.4	161
28	1997 7 8 02 16	1	1.1	1.4	0.2	0.6	163
29	1995 9 19 20 00	1	1.5	2.4	0.4	0.5	163
30	1996 4 14 11 48	1	1.2	2.2	0.2	0.4	164
31	1996 5 2 21 29	1	1.4	1.8	0.3	0.7	165
32	1996 5 2 21 56	1	1.3	2.8	0.5	0.6	166
33	1996 5 20 06 06	1	1.4	2.2	0.3	0.5	168
34	1996 11 30 03 54	1	1.8	3.3	0.3	0.7	180
35	1995 6 22 03 21	1	1.1	1.7	0.1	0.4	180
36	1995 7 28 12 25	1	1.9	2.2	0.2	0.4	183
37	1995 11 26 03 26	1	2.5	2.4	0.2	0.6	184
38	1997 7 5 15 27	1	1.8	1.7	0.2	0.6	185
39	1996 1 18 01 57	1	1.8	3.3	0.2	0.4	185
40	1995 4 22 04 49	1	1.6	1.6	0.2	0.6	192
41	1996 11 22 08 22	1	1.9	2.8	0.3	0.7	194
42	1996 10 6 21 56	1	2.0	2.1	0.2	0.5	195
43	1995 8 30 22 51	1	1.0	2.0	0.1	0.3	200
44	1997 3 16 15 37	1	1.7	2.6	0.1	0.4	207
45	1996 6 8 16 24	1	2.6	3.2	0.3	0.6	213
46	1995 11 10 18 31	1	2.2	2.4	0.3	0.7	216
	平均値	1	1.6	2.4	0.3	0.6	

表2-3 近地地震の験測結果(西方)
西方から到達する地震波はD, E点で大きく減衰する。

地震番号	年月日時分	A点	B点	C点	D点	E点	方位角
47	1996 8 31 15 12	1	0.6	2.2	0.2	0.4	220 度
48	1996 11 18 06 57	1	0.7	1.1	0.1	0.2	229
49	1996 11 3 03 34	1	1.9	2.2	0.2	0.3	232
50	1995 10 1 13 25	1	1.2	1.4	0.1	0.2	232
51	1996 9 8 23 16	1	1.7	1.9	0.2	0.4	233
52	1995 12 7 14 13	1	0.7	1.1	0.1	0.2	240
53	1996 3 17 16 49	1	1.1	1.0	0.1	0.3	240
54	1997 1 1 18 35	1	1.3	1.8	0.2	0.3	241
55	1996 7 28 13 48	1	1.0	0.9	0.1	0.2	241
56	1996 7 28 08 24	1	1.0	1.0	0.1	0.2	241
57	1996 2 12 16 58	1	0.8	1.2	0.1	0.2	244
58	1996 10 6 13 03	1	1.0	1.7	0.2	0.4	246
59	1995 8 11 04 27	1	0.9	1.3	0.1	0.2	250
60	1997 7 24 14 00	1	1.6	1.7	0.2	0.4	252
61	1996 10 22 17 32	1	1.1	1.7	0.3	0.4	259
62	1995 9 21 18 18	1	0.6	1.1	0.2	0.2	263
63	1996 7 29 10 26	1	1.3	1.8	0.3	0.4	268
	平均値	1	1.1	1.5	0.2	0.3	

表2-4 近地地震の験測結果(北方向)
北方から到達する地震波の振幅比は遠地地震とほぼ等しい。

地震番号	年月日時分	A点	B点	C点	D点	E点	方位角
64	1996 10 15 21 00	1	1.8	2.6	0.5	0.5	289 度
65	1997 5 7 07 12	1	1.8	2.6	0.5	0.5	290
66	1997 5 7 08 05	1	1.5	2.6	0.6	0.6	290
67	1995 9 4 14 01	1	1.5	2.1	1.0	0.8	323
68	1995 6 10 23 59	1	1.0	2.6	0.7	0.9	326
69	1995 9 14 19 43	1	1.9	3.1	0.9	0.9	340
70	1995 11 3 09 00	1	1.9	2.6	1.1	1.3	349
71	1995 8 9 04 27	1	1.4	2.2	0.8	0.8	351
72	1996 5 20 18 26	1	1.3	2.2	1.1	0.9	359
73	1995 6 18 11 20	1	1.6	1.8	---	0.5	8
74	1996 4 30 17 11	1	1.5	2.3	0.3	0.7	14
75	1996 9 10 10 36	1	1.5	1.8	0.5	0.7	16
76	1996 5 21 01 27	1	1.7	2.9	0.8	1.0	16
	平均値	1	1.6	2.4	0.7	0.8	

表3 近地震の代表的な入射角
全ての地震で入射角は約50~60度であった。

1995年 7月 7日 10時 06分		地震番号	方位角	157
P波到達時刻	観測点	観測点間距離	入射角	
A点 7.62 秒	A-D	6.800 km	59 度	
B点 8.04	A-E	4.332	56	
C点 7.70	B-D	4.818	58	
D点 8.88	B-E	2.350	52	
E点 8.28	C-D	6.252	59	
	C-E	3.784	56	
	D-E	2.468	64	
	平均		58	

1995年 7月 28日 12時 25分		地震番号	方位角	183
P波到達時刻	観測点	観測点間距離	入射角	
A点 22.46 秒	A-D	6.429 km	57 度	
B点 23.26	A-E	4.744	63	
C点 23.05	B-D	5.044	49	
D点 23.54	B-E	3.359	52	
E点 23.60	C-D	5.524	51	
	C-E	3.839	56	
	平均		55	

1995年 12月 7日 14時 13分		地震番号	方位角	240
P波到達時刻	観測点	観測点間距離	入射角	
A点 8.03 秒	A-E	2.311 km	46 度	
B点 7.84	B-D	2.125	49	
C点 8.12	B-E	2.940	51	
D点 7.96	平均		49	
E点 8.07				

1995年 6月 18日 11時 20分		地震番号	方位角	8
P波到達時刻	観測点	観測点間距離	入射角	
A点 8.86 秒	A-D	6.163 km	57 度	
B点 8.63	A-E	4.711	56	
C点 8.76	B-D	4.875	57	
D点 7.83	B-E	3.423	56	
E点 8.13	C-D	5.185	58	
	C-E	3.733	57	
	平均		57	

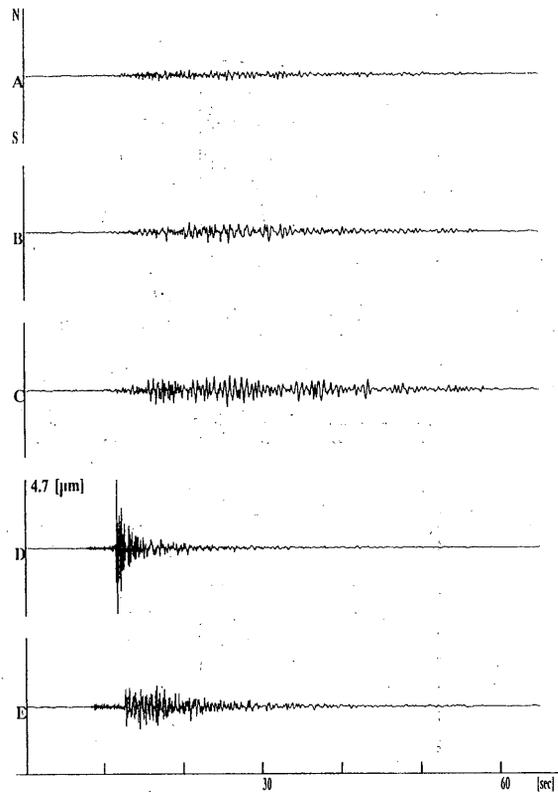


図5 1995年9月24日21時31分に発生した松代地震の南北成分波形
横軸は時間(秒),縦軸は変位(マイクロメートル)。
A, B, C点では振幅が小さく,特にS波が減衰している。

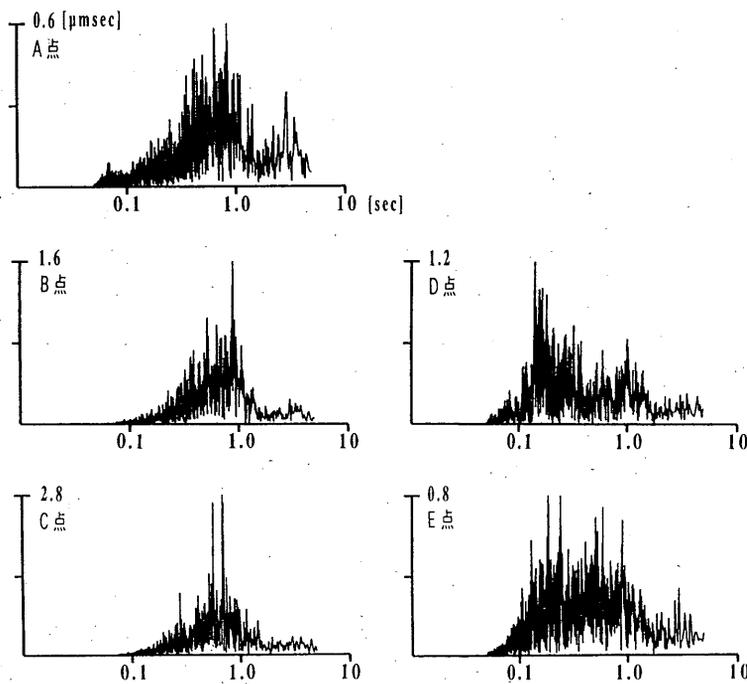


図6 1995年9月24日21時31分に発生した松代地震の南北成分のスペクトル解析
横軸は周期(対数表示),縦軸はフーリエスペクトル。
D, E点にある0.2秒程度のピークがA, B, C点ではなくなっている。

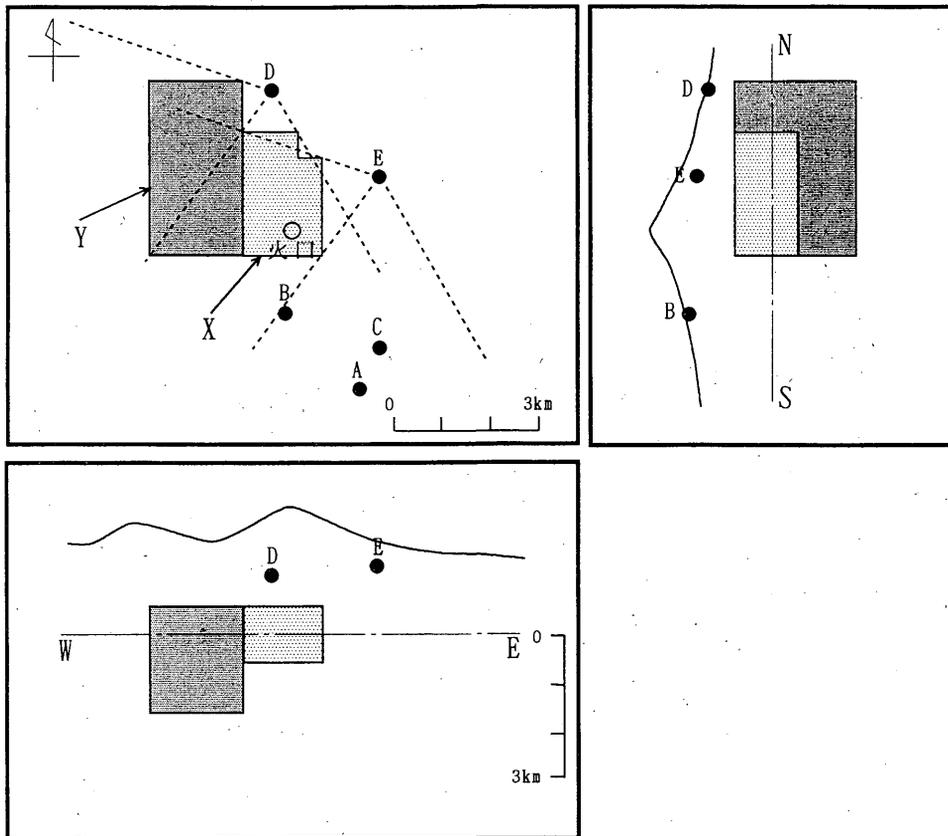


図7 今回の調査から推定した減衰域
点線はD, E点に南方, 西方から到達する地震波の境界線。

を持っていることが想像できる。ただし毎日の波形験側から火山性地震にS x S波等の反射波は観測されないため、明瞭な境界があるとは考えられない。しかし、松代地震でA, B, C点で観測されたCoda波は、減衰域内での地震波の乱反射が原因かもしれない。

浅間山で微噴火があった1990年の火山性地震の震源分布図を図8に示す。震源は全て軽井沢測候所で決定したものである。B型地震は深さ-0.5km付近に集中しており、減衰域Xに対応している。また、震源は深くなるほど火口から西側に傾く特徴があり、推定した減衰域Yでは地震があまり発生していない。さらに、浅間山の西側は古くは火口があった場所（下鶴他, 1995）であることを考えると、減衰域Yはマグマ溜りの可能性もある。

6. まとめ

調査から浅間山火口からその西側にかけて地震波減衰域が存在するとした。特に西側の減衰域Yは熱的要

員でやわらかくなっている可能性がある。そこで浅間山周辺の全磁力分布を測量し減衰域との対応を調べた。その結果は本蔵他（1977）の調査結果とほぼ等しく、局所的な異常はいくつか見られたが、減衰域に対応するような異常は見られなかった。

今回推定した減衰域は震動観測点の数が少ないため、おおまかな位置しか推定できなかった。減衰域の推定精度向上のためには、減衰域を地震波線が通過する火口西方に観測点を配置した臨時観測などが必要と考える。

7. 謝辞

本調査にあたり富山大学理学部地球科学教室酒井英男助教授にはプロトン磁力計を借用させて頂きました。全磁力日変化のデータは東京大学地震研究所八ヶ岳地球電磁気観測所の小山茂氏に貴重なデータを頂きました。軽井沢測候所の職員の方々には地磁気測量に協力頂きました。査読者には貴重なご意見、ご指導を頂き

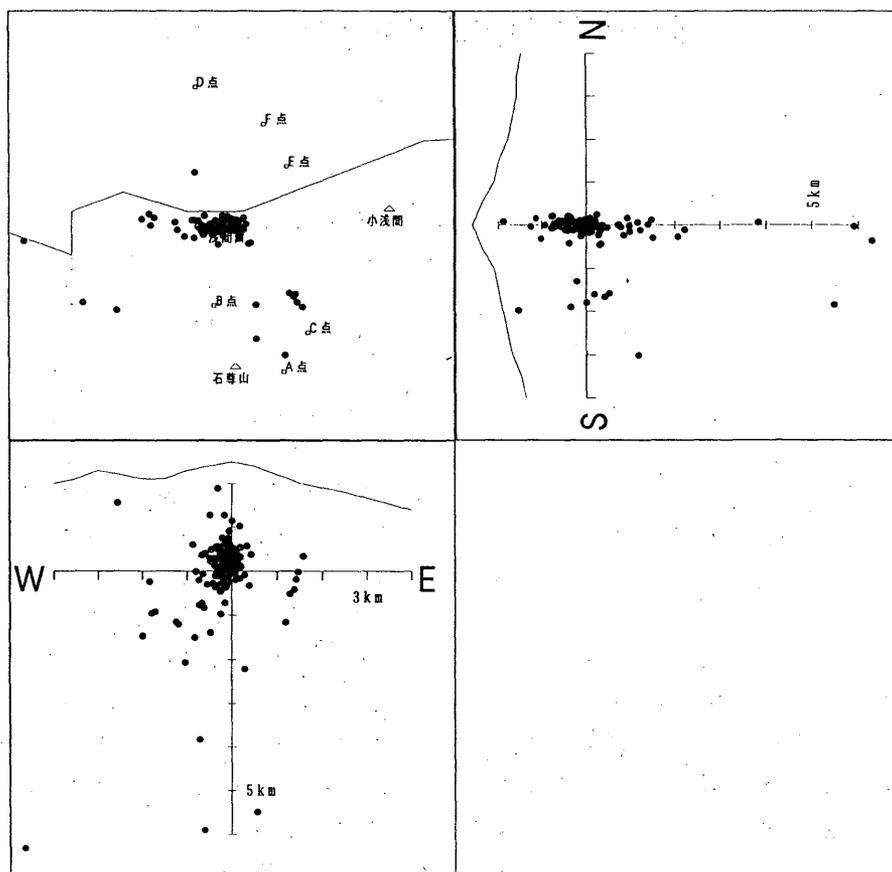


図8 1990年の浅間山火山性地震の震源分布図

ました。これらの方々に心から御礼申し上げます。

参考文献

碓井勇二・永井直昭（1996）：浅間山の地下構造について，東京管区気象研究会誌，29，148－149。

碓井勇二（1997）：軽井沢測候所の火山解析処理装置について，東管技術ニュース；128，1－6。

沢田宗久・行田紀也・小山悦郎・辻浩・鍵山恒臣・宮崎努（1983）：浅間山のP波速度構造，火山，28，301。

下鶴大輔・荒牧重雄・井田喜明（1995）：火山の事典，第1版，朝倉書店，543 p。

本蔵義守・小山茂（1978）：浅間山の電磁気学的調査（第1報），東京大学地震研究所彙報，53，523－532。