

### 3. 地震動

#### 3.1 道路、河川、ダム関係の本震記録

##### 3.1.1 加速度記録

今回の地震により、北海道および東北地方において、道路橋、ダム、河川堤防およびその周辺地盤に設置された多くの工学式強震計が作動し強震記録が得られた。強震記録が得られた観測地点の位置を図3.1.1に示し、観測地点の概要および最大加速度値を表3.1.1に示す。表中の\*1を付した数値は、SMAC型強震計で得られたアナログ記録を自動数値化装置を用いて1/100秒等時間間隔のデジタル記録に変換した後に、1/12~3秒の周波数領域でバンドパスフィルターをかけ、この領域内で計器補

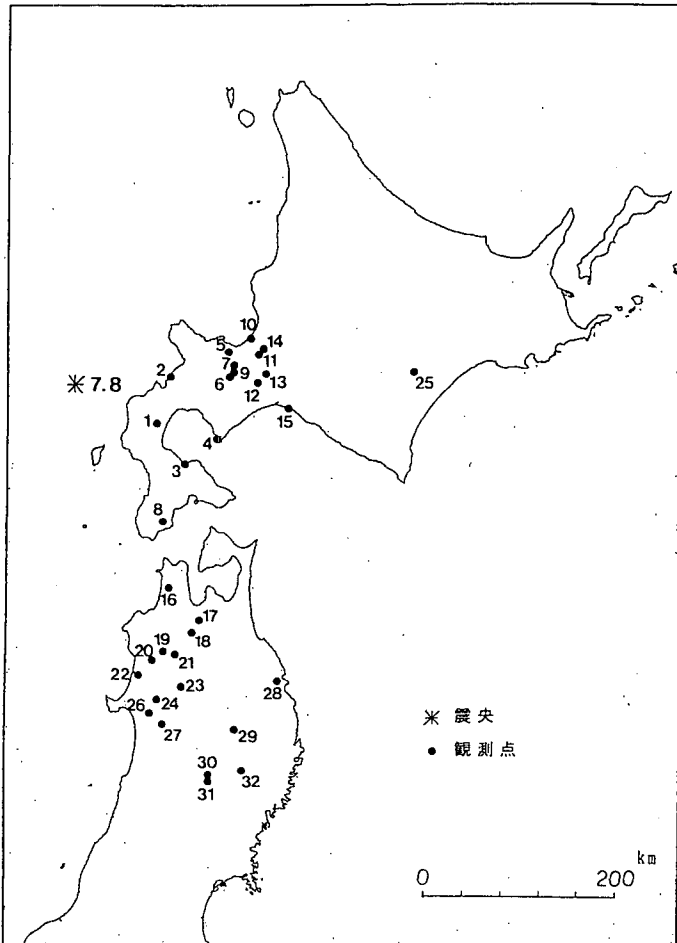


図3.1.1 強震記録の得られた観測地点の位置 (図中の番号は表3.1.1の番号に対応している)

表 3.1.1(1) 道路橋, ダム, 河川堤防およびその周辺地盤で観測された強震記録

No.	観測地点名	機 種	震央距離 (km)	地震計設置位置	最大加速度 (gal)		
					LG.	TR.	U-D
1	美利河ダム	SDA-204	89	監査廊	123	117	73
				天端	95	142	83
		SDA-112		右岸基礎岩盤	101	114	94
2	磯谷橋	SMAC-D	96	地盤	118 <sup>*1</sup>	158 <sup>*1</sup>	53 <sup>*1</sup>
				橋台	145	135	80
3	上鳥崎橋	SMAC-Q	135	地盤	186 <sup>*1</sup>	241 <sup>*1</sup>	82 <sup>*1</sup>
				橋脚	640	600	120
4	白鳥大橋	AJE-306	152	-35m	40	47	43
				-25m	50	58	33
				-13m	75	83	50
				-3m	160	155	87
5	朝里ダム	SDA-204	155	底設監査廊	14	15	12
				天端	36	69	20
6	無意根大橋	SMAC-D	157	地盤	10	15	10
				橋脚	10	15	35
7	豊平峡ダム	SDA-204	160	天端	19	120	16
				中段監査廊	13	34	11
				底設監査廊	7	10	8
8	七峰橋	SMAC-B2	161	地盤	379 <sup>*1</sup>	386 <sup>*1</sup>	153 <sup>*1</sup>
				橋脚	235	259	150
9	定山溪ダム	SDA-204	161	基盤内(埋設)	8	8	6
				左岸岩盤	10	8	6
				右岸地山	15	10	9
				中段監査廊	11	14	9
				天端	20	37	14
10	石狩河口橋	SMAC-B2	182	地盤	31 <sup>*1</sup>	49 <sup>*1</sup>	12 <sup>*1</sup>
				橋脚	34	欠測	欠測
11	札幌IC高架橋	SMAC-Q	184	地盤	38 <sup>*1</sup>	55 <sup>*1</sup>	25 <sup>*1</sup>
				橋脚	40	45	15
12	漁川ダム	PTK-300	184	底設監査廊	3	3	3
				PTK-130	下流法面(スラブ)	3	4
		コア内		18	20	10	
13	島松沢橋	AJE-305	191	-40m	10	10	2
				橋脚	26	34	13
		SMAC-Q		橋脚	28	24	1
14	新石狩大橋	SMAC-B2	192	地盤	10	5	微少
				地盤	122 <sup>*1</sup>	109 <sup>*1</sup>	33 <sup>*1</sup>
15	新浜厚真橋	AJE-306	217	地盤	125	105	45
				-48m	60	40	25
				橋脚	125	125	25
16	津軽大橋	SMAC-D	223	地盤	104 <sup>*1</sup>	101 <sup>*1</sup>	68 <sup>*1</sup>
				橋脚	60	120	45
17	下湯ダム	SDA-240	267	監査廊	17	25	18
				天端	55	63	32
				法面	43	39	25
				左岸リムトンネル	25	23	19
				洪水吐天端	25	43	19
18	浅瀬石川ダム	SDA-240	273	下段監査廊	14	18	12
				中段監査廊	22	34	17
				天端	39	80	20
				右岸下段2号ゲラトソ秘奥	18	28	12
				右岸下段2号ゲラトソ秘手前	22	27	14
				左岸3号ゲラトソ秘	17	23	10
19	早口ダム	DAS-400	282	右岸12BL地山	10	12	—

表 3.1.1(2) 道路橋, ダム, 河川堤防およびその周辺地盤で観測された強震記録

No.	観測地点名	機種	震央距離 (km)	地震計設置位置	最大加速度 (gal)		
					L G.	TR.	U-D
20	糸波里ダム	DAS-400	286	右岸10BL地山	17	14	—
21	山瀬ダム	SDA-240	289	監査廊	14	12	9
				法面	47	54	24
				天端	64	91	35
				右岸地山	13	18	13
				右岸地表	37	60	31
22	米代川堤防		297	地盤	75	75	18
				天端	75	78	18
				地中	23	22	11
23	森吉ダム	DAS-400	326	管理所基礎コンクリート	5	5	—
24	萩形ダム	DAS-400	331	管理所基礎コンクリート	5	5	—
25	千代田大橋	SMAC-B2	342	地盤	2	3	1
26	旭川ダム	DAS-400	343	監査廊底部	7	8	—
27	岩見ダム	SW-9259/3	351	監査廊底部	2	4	5
28	滝ダム	SDA-204	361	基礎埋設	2 <sup>*2</sup>		—
				天端	7 <sup>*2</sup>		—
29	綱取ダム	PTK-300	381	監査廊	1 <sup>*2</sup>		—
				天端	1 <sup>*2</sup>		—
30	湯田ダム	PK-130	412	左岸グラウトトンネル	3	2	0
				天端	2	6	1
31	入畑ダム	SDA-203	421	監査廊	2	1	1
				天端	2	2	1
32	田瀬ダム	PTK-300	422	監査廊(基礎)	1	1	0
				天端	3	8	3

注1) L G: 道路施設: 橋軸方向, 河川施設: 堤軸方向, ダム施設: ダム軸方向  
 TR: 道路施設: 橋軸直角方向, 河川施設: 堤軸直角方向, ダム施設: 上下流方向  
 U-D: 上下方向

注2) \*1を付した記録は、数値化計器補正後のSMAC型強震計記録  
 \*2を付した記録は、水平方向または水平2成分の合成値  
 — は欠測

正を施した記録の最大加速度値である。震央距離 ( $\Delta$ ) が最も近い美利河 (びりか) ダム ( $\Delta=89$  km) の右岸基礎岩盤上では 114 gal が観測されている。震央距離が 250 km 以内の 16 地点のうち、地盤上の最大加速度が 100 gal 以上であったのは 8 地点であり、そのうち、上鳥崎 (かみとりさき) 橋周辺地盤上 ( $\Delta=135$  km) では 241 gal, 七峰 (しちほう) 橋周辺地盤上 ( $\Delta=161$  km) では 386 gal が観測されている。構造物上で観測された最大加速度のうち最も大きいものは、上鳥崎橋橋脚上の橋軸方向成分の 640 gal である。

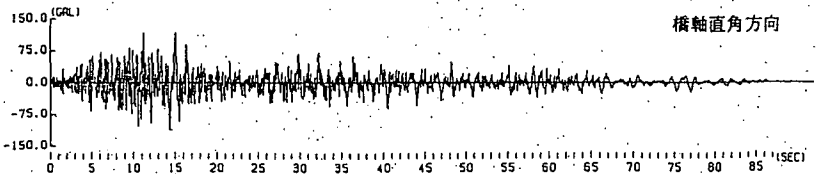
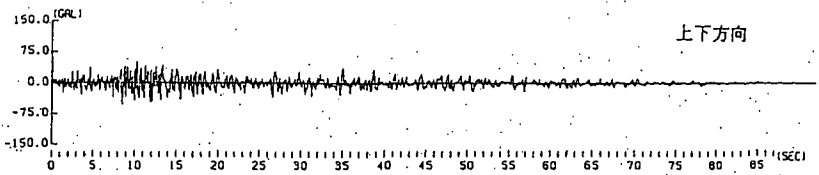
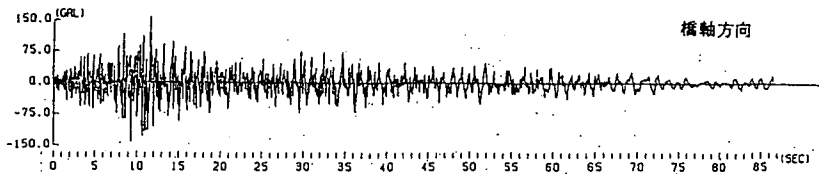
代表的な加速度強震記録として表 3.1.2 に示す 4 地点の地盤上強震記録について、スペクトル解析によりその特性を検討した。これらの観測地点は震央から 96~192 km に位置しており、記録はすべて SMAC 型強震計により観測されたものである。

図 3.1.2 にこれらの強震記録の加速度時刻歴波形を示すが、最大水平加速度は 109~386 gal, 最大鉛直加速度は 33~153 gal である。強震計の起動時刻はいずれの地点においても不明であるが、記録を開始した時刻から最大加速度が発生した時刻までは 10~60 秒とかなりの差が生じている。

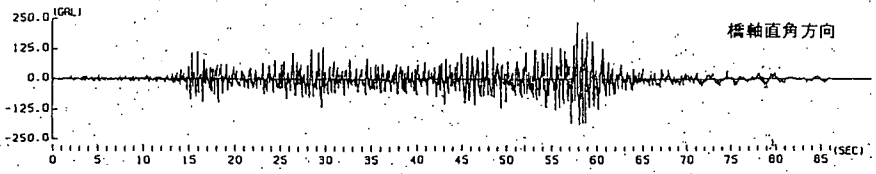
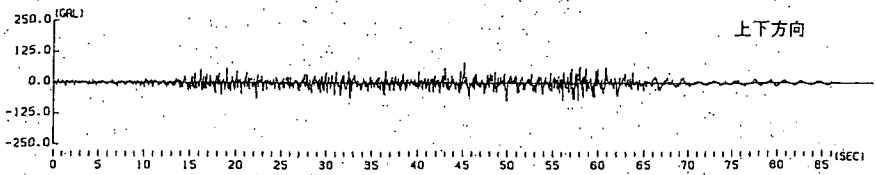
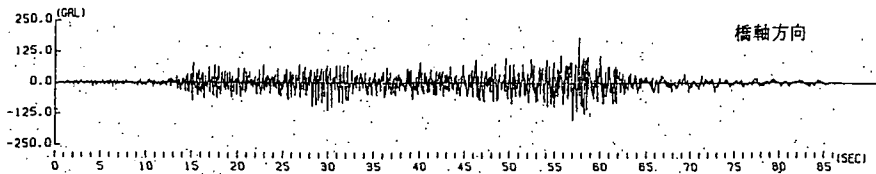
各記録の水平 2 成分の加速度フーリエスペクトルのうちフーリエ振幅値の最大値が大きい方を図 3.1.3 に示す。なお、加速度フーリエスペクトルの算出においては、ウィンドウ幅 2 Hz のハニングウィンドウによる平滑化を行っている。磯谷 (いそや) 橋記録は 9 Hz 付近で最も卓越しており、11 Hz

表 3.1.2 代表的な加速度強震記録

観測地点名	路線名 (市町村名)	震央距離 ( $\Delta$ ) km	最大加速度 (gal)			強震計機種
			L.G.	T.R.	U-D	
磯谷橋 周辺地盤上	一般国道229号 (蘭越町)	96	118	158	53	SMAC-D
上鳥崎橋 周辺地盤上	一般国道5号 (森町)	135	186	241	82	SMAC-Q
七峰橋 周辺地盤上	一般国道228号 (知内町)	161	379	386	153	SMAC-B2
新石狩大橋 周辺地盤上	主要道道札幌沼 田線 (江別市)	192	122	109	33	SMAC-B2

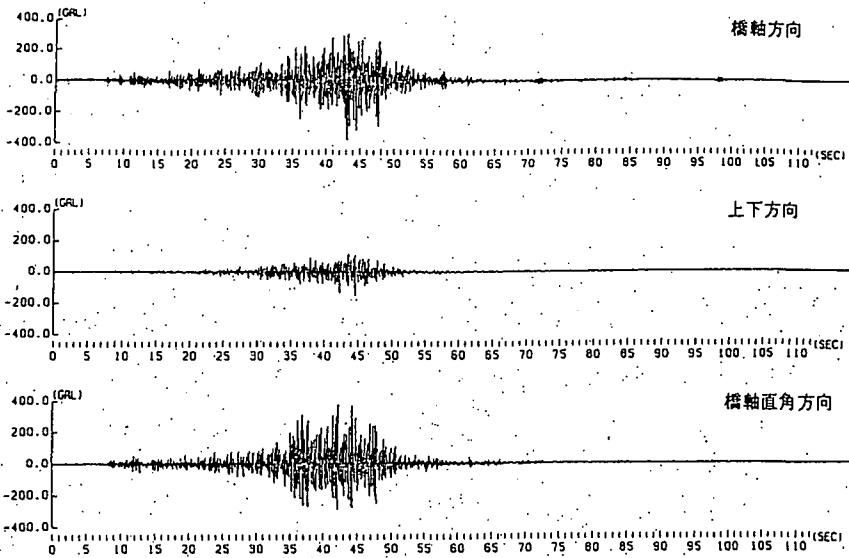


(a) 磯谷橋

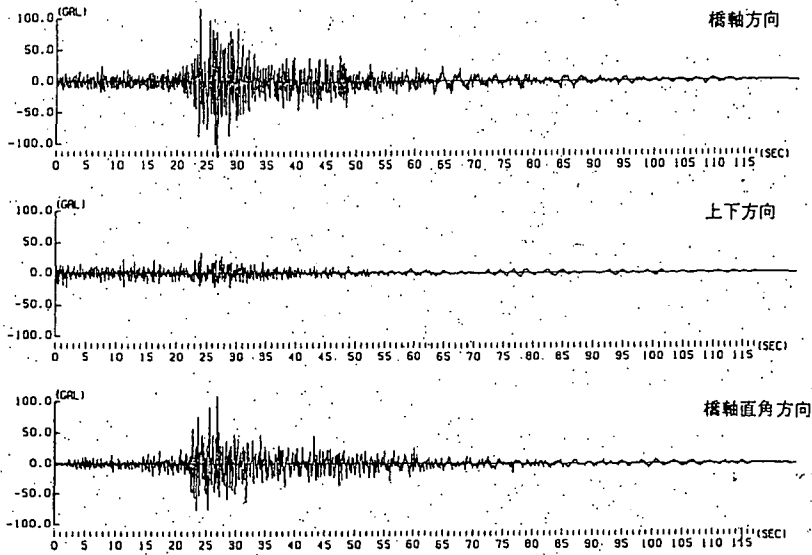


(b) 上鳥崎橋

図 3.1.2(1) 加速度時刻歴波形



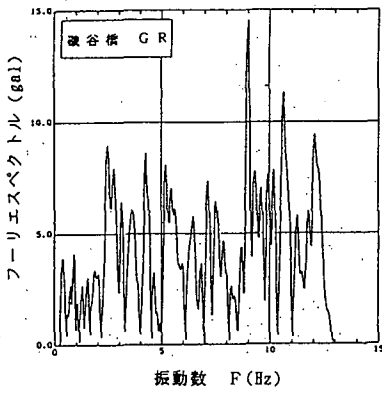
(c) 七峰橋



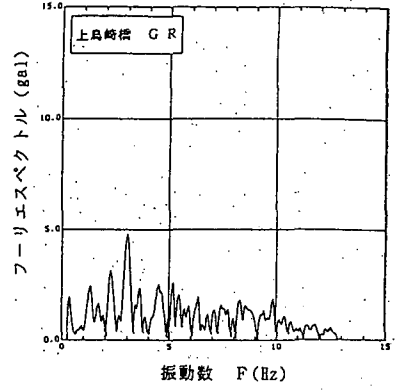
(d) 新石狩大橋

図 3.1.2(2) 加速度時刻歴波形

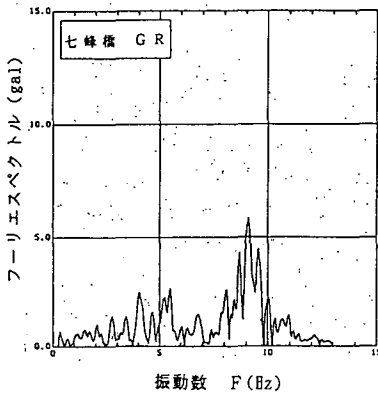
および 12 Hz 付近にも卓越する周波数成分が存在している。上島崎橋記録においては、3 Hz 付近でフーリエ振幅値が最大値を示している。七峰橋記録では、9 Hz 前後の周波数成分が最も卓越しており、4~6 Hz においてもやや卓越する周波数成分がある。また、新石狩（しんいしかり）大橋記録の卓越振動数は 7 Hz 付近であり、3 Hz 以下の低周波領域でも若干の卓越を示している。フーリエ振幅値の最大値は、磯谷橋記録が約 15 gal と最も大きい、他の 3 記録では 5~6 gal でありほぼ同程度の値を示している。



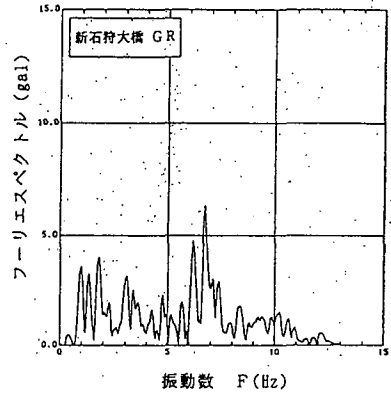
(a) 磯谷橋



(b) 上島崎橋

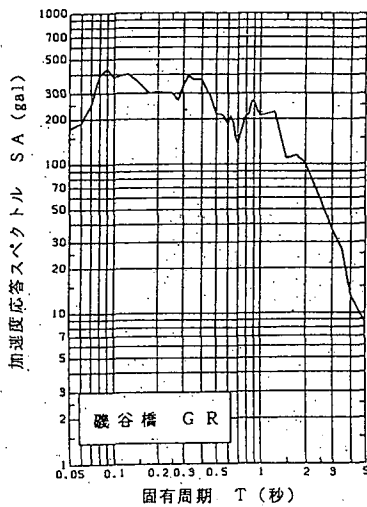


(c) 七峰橋

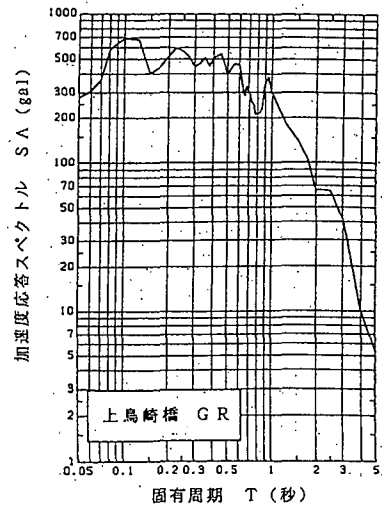


(d) 新石狩大橋

図 3.1.3 加速度フーリエスペクトル



(a) 磯谷橋



(b) 上島崎橋

図 3.1.4 加速度応答スペクトル ( $h=0.05$ )

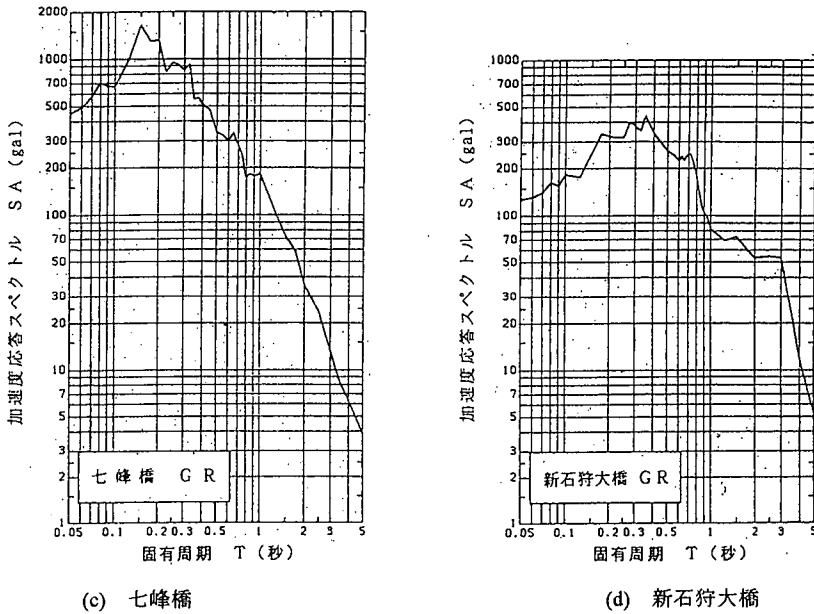


図 3.1.4 (つづき)

図 3.1.4 は最大加速度の大きい方の水平成分について、減衰定数 5% の加速度応答スペクトル (Sa) を示している。磯谷橋記録は、固有周期が 0.075~0.45 秒では Sa は概ね 300 gal 以上を示し、特に 0.09 秒、0.13 秒、0.33 秒では、それぞれ 435 gal、406 gal、394 gal と大きな値を示している。また、0.45~2.0 秒では Sa は 100~200 gal であり、2.0 秒以上では Sa は 100 gal よりも小さくなっている。上鳥崎橋記録は、0.6 秒以下の領域において 5 つの卓越周期が存在し、0.1 秒において Sa は最大の 687 gal、次いで 0.23 秒で 600 gal を示している。また、1.0 秒以下の領域では Sa は 200 gal よりも大きい値を示している。七峰橋記録においては、Sa は 0.15 秒において明瞭なピークを示しておりその値は 1652 gal である。また、0.15 秒以上では Sa はほぼ単調に減少し、0.8 秒付近から Sa は 200 gal よりも小さくなっている。新石狩大橋記録の場合は、0.16~0.45 秒付近で Sa は 300 gal よりも大きく、0.35 秒で最大の 443 gal を示している。また、固有周期が 0.7 秒を越えると Sa は急激に低下するが、1.0~3.0 秒では緩やかに低下し、3.0 秒以上では再び急激に低下している。

### 3.1.2 最大加速度の距離減衰特性

地盤上で得られた最大水平加速度の距離減衰特性を示すと図 3.1.5 のようになる。図中の実線は既往の強震記録の統計解析により導かれたⅡ種地盤の距離減衰式において、マグニチュードを 7.8 とした場合の距離減衰曲線を表しており、破線はこの曲線からの標準偏差分 ( $\pm 1 \sigma$ ) だけ隔てた曲線を示している。これによると、観測値は概ね  $\pm 1 \sigma$  の範囲内にあるが、震央距離が 150 km 付近と 300 km 付近で推定値と離れた観測値が得られている。

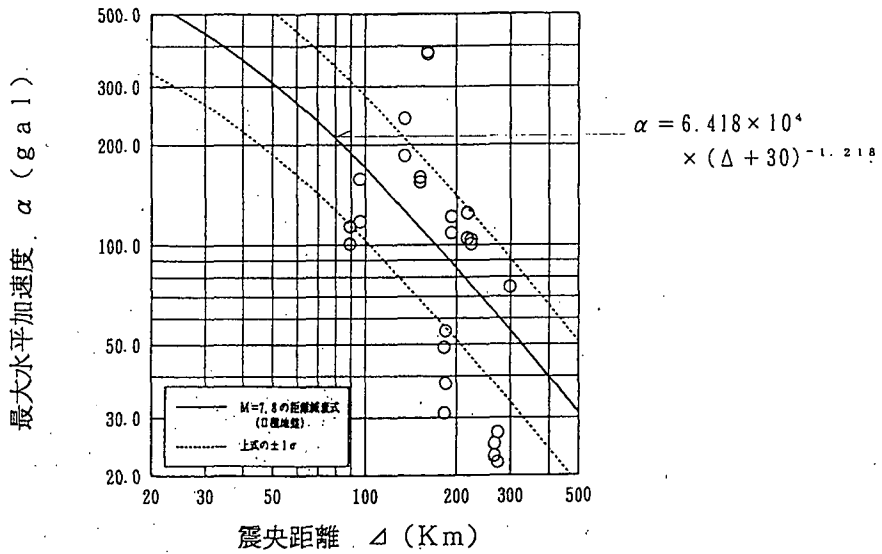


図 3.1.5 地盤最大水平加速度の距離減衰特性

### 3.1.3 地震動主軸の特性

震央近傍の7地点（磯谷橋、上鳥崎橋、七峰橋、石狩河口橋、札幌 IC 高架橋、新石狩大橋、津軽大橋）の地盤上で観測された加速度記録から算出した変位記録の3次元地震動主軸（以下主軸と略す）を水平面に投影すると図 3.1.6 のようになる。主軸が水平面となす角度は、磯谷橋において14度（図中右下がり）を示したが、そのほかの地点で0~5度の範囲にあり、主軸は概ね水平面内に含まれている。水平面に投影された主軸方向は、上鳥崎橋、札幌 IC 高架橋、新石狩大橋、七峰橋および津軽大橋ではほぼ東西が卓越しており、磯谷橋と石狩河口橋ではほぼ南北が卓越している。したがって、磯谷橋と石狩河口橋を除く5地点の主軸方向は、ほぼ断層運動の方向を向いているといえる。

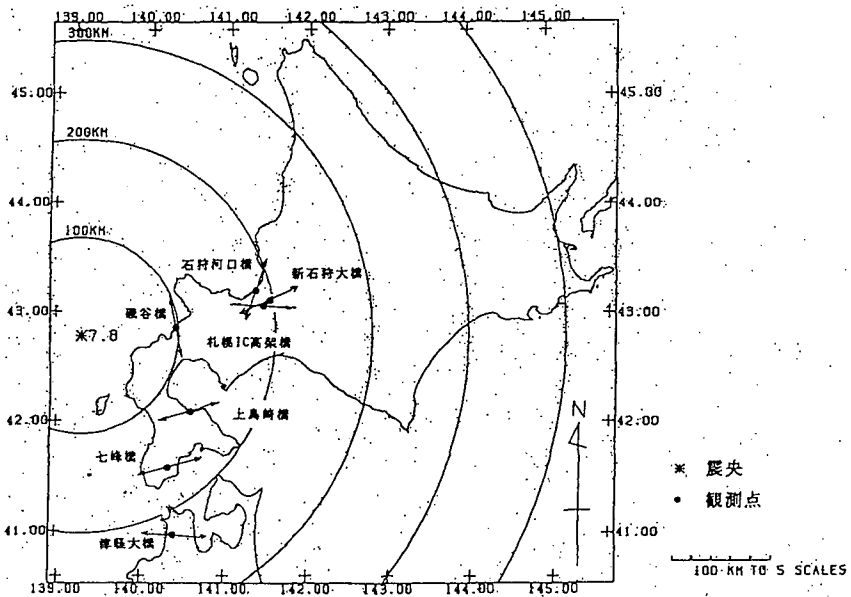


図 3.1.6 三次元地震動（変位）主軸（水平面への投影）



3.1.4 加速度応答スペクトル特性に対する地盤条件の影響

加速度応答スペクトル特性に及ぼす地盤条件の影響を検討するために、表 3.1.2 の強震記録の各水平 2 成分の平均の加速度応答スペクトル倍率  $\beta$  ( $h=5\%$ ) を重ね書きすると図 3.1.7 のようになる。卓越周期は、七峰橋記録と新石狩大橋記録で比較的明瞭に認められ、それぞれ 0.15 秒、0.28 秒である。磯谷橋記録は 0.08~0.13 秒および 0.3~0.4 秒付近と 2 つのピークが存在し、上鳥崎橋記録は 0.1 秒および 0.2 秒付近が卓越している。

応答スペクトル倍率 ( $\beta$ ) のピーク値は、七峰橋が 3.8 倍と最も高く、ついで新石狩大橋記録が 3.0 倍、磯谷橋と上鳥崎橋は 2.6 倍とほぼ同様の値を示している。磯谷橋周辺は、表層に  $N$  値が 20 の礫混じり砂が 10 m ほど堆積しており、その真下には  $N$  値が 10 以下の層厚 2 m の礫混じり砂が存在している。また、深度 12~18 m には、 $N$  値が 15 程度の細砂層がある。上鳥崎橋周辺は、地表面付近の層厚約 40 cm の砂層の下に  $N$  値が 50 以上の砂礫層があり、その下位は砂岩となっている。七峰橋周辺は、表層は層厚約 9 m の玉石混じり砂礫が覆っており、その下位は  $N$  値が 50 以上の凝灰質砂岩である。新石狩大橋周辺は、表層に  $N$  値が 4 程度の軟弱な砂質シルトが堆積しており、15 m 以深には  $N$  値が 10~18 程度の粘土が厚く堆積している。 $N$  値データのある磯谷橋、七峰橋および新石狩大橋について、道路橋示方書の手法により地盤の特性値 (TG) を算出すると、それぞれ 0.48 秒、0.14 秒、0.98 秒となる。したがって、地盤種別は、地盤条件が最も良好である上鳥崎橋と七峰橋が I 種地盤、磯谷橋が II 種地盤、新石狩大橋が III 種地盤となる。

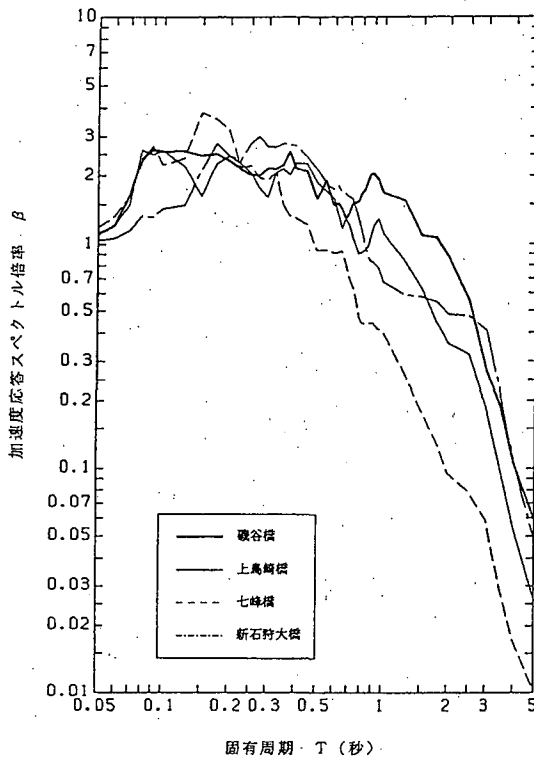


図 3.1.7 加速度応答スペクトル倍率 (水平 2 成分の平均;  $h=0.05$ )

### 3.2 港湾関係の記録

港湾地域強震観測網では、今回の地震により、北海道を中心とする10港13地点で強震計が作動し、6港9地点でデジタルデータとしての加速度記録を得ることができた<sup>1)</sup>。本地震によって強震計が作動した観測地点の一覧を表3.2.1に示す。同表に示すように、本地震によって強震計が作動した港は、浦河港、苫小牧港、室蘭港、小樽港、函館港（地表2箇所、地中、構造物）、青森港、秋田港、酒田港、八戸港、宮古港の10港である。強震計は作動したものの波形記録が得られなかった港は、浦河港、酒田港、八戸港、秋田港の4港である。

本地震によって観測された加速度記録（未補正）の最大値を観測地点の震度とともに図3.2.1にまとめて示す。なお、ここで言う未補正記録とは、基線の補正のみを行い、計器特性による補正を行っていない記録を示している。同図では、観測地点の震度をローマ数字で示し、港湾地域強震観測網による観測記録の最大加速度をアラビア数字（単位：Gal=cm/s<sup>2</sup>）で示している。加速度に

表3.2.1 1993年北海道南西沖地震において強震計が作動した観測地点一覧

港湾	地点名	強震計	設置状況
浦河	浦河-S	SMAC-B2	地表
苫小牧	苫小牧-S	SMAC-B2	地表
室蘭	室蘭-G	ERS-G	地表
小樽	小樽-G	ERS-G	地表
函館	函館-M	ERS-C	地表
	函館-FB	ERS-F	地中
	函館-F	ERS-F	地表
	函館-FR	ERS-F	構造物
青森	青森-S	SMAC-B2	地表
秋田	秋田-S	SMAC-B2	地表
酒田	酒田-S	SMAC-B2	地表
八戸	八戸事-S	SMAC-B2	地表
宮古	宮古-G	ERS-G	地表

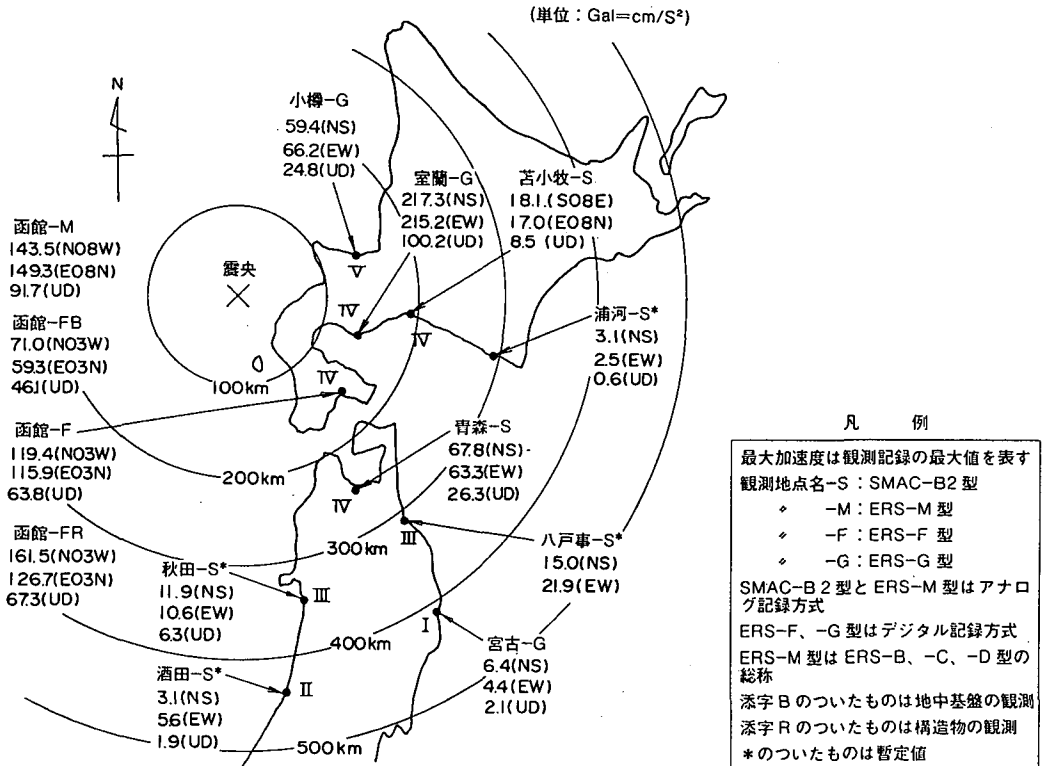


図3.2.1 港湾地域強震観測網による観測結果

続けて示されている括弧内のアルファベットは、強震計の振動方向を示すものであり、NS、EW、UD がそれぞれ北南、東西、上下成分を表している。ただし、強震計の水平振動方向と南北東西方向が一致していない場合には、例えば苫小牧-S のように、方向を表す成分を S08E (南方向を示す成分が  $8^\circ$  東側に傾いている) のように示している。観測地点名、強震計の種類、設置状況等については別報に詳細が報告されている<sup>2)</sup>。

港湾地域強震観測網では、図 3.2.1 中の凡例に示されているとおり、4 種類 (細かくは 6 種類) の強震計が用いられている。使用されている強震計は、機械式の SMAC-B2 型強震計、電磁式アナログ記録方式の ERS-B、-C、-D 型強震計、電磁式デジタル記録方式の ERS-F、-G 型強震計の 6 種類である<sup>2)</sup>。これらの中では、SMAC-B2 型強震計が観測開始当初から主力となっており、同強震計によって得られた記録は、1968 年十勝沖地震における八戸港の記録<sup>3)</sup>をはじめとして、耐震工学関連の研究や設計実務において中心的な役割を果たしてきた。その一例として、1970 年代の野田・上部による最大加速度の距離減衰および最大加速度と設計震度の関係が挙げられる<sup>4)</sup>。1993 年 12 月末現在、28 台の SMAC-B2 型強震計が使用されているが、今後数年のうちにその多くが ERS-G 型強震計に更新される予定である。

SMAC-B2 型強震計は、高周波数領域で感度が低下する特性を持っており、7.1 Hz で 1/2 程度、10 Hz で 1/3 程度感度が低下する<sup>2)</sup>。したがって、地盤加速度に高周波数成分が多く含まれている場合には、SMAC-B2 型強震計では地盤加速度を忠実に計測することはできず、高周波数領域を計算できない分だけ、加速度記録としてはその最大値が実際よりも小さくなる。これに対し ERS 型強震計は、高周波数領域においても感度が低下しないため、SMAC-B2 型強震計よりも実際の地盤加速度を忠実に計測することが可能となる。したがって、実際の地震動に高周波数成分が多く含まれているほど、最大加速度としては、ERS 型強震計から得られた記録の方が SMAC-B2 型強震計から得られた記録よりも大きくなる。逆に、実際の地震動に高周波数成分があまり含まれず、その多くが低周波数成分 (極低周波数成分を除く) からなるものであれば、SMAC-B2 型強震計から得られた記録も ERS 型の強震計から得られた記録も、最大加速度としてはほぼ同一のものとなる。

港湾構造物をはじめとする土木構造物は、一般に大型であり、これらの構造物に破壊力として実効的に作用する成分としては、短時間に変動する高周波数成分よりも、むしろ低周波成分の方が大きく寄与するものと考えられる。したがって、これらの構造物に対しては、高周波数成分までも忠実に計測する ERS 型強震計から得られた記録よりも、むしろ計器特性としてのハイカットフィルターを持つ SMAC-B2 型強震計から得られた記録の方がより直接的な関係を持つものと考えられる。また、港湾構造物の設計実務に取り入れられている、最大加速度と設計震度の関係<sup>4)</sup>を利用するうえにおいても SMAC-B2 型強震計による最大加速度が必要となる。これらの点を考慮して、本地震によって観測された最大加速度を相互に比較しやすい形に変換したものを表 3.2.2 にまとめて示す。同表中、観測記録は記録の基線補正のみを行った加速度記録、補正記録は各強震計の計器特性による補正を行った加速度記録、SMAC EQ 記録は ERS 型強震計から得られた記録を SMAC-B2 型強震計により得られる加速度記録に換算 (高周波数領域を SMAC-B2 型強震計の精器特性に応じてカット) したものを表している。

図 3.2.2～図 3.2.5 には、湾域地域強震観測網によって得られた記録の中から、北海道南西部の記録

表 3.2.2 1993年北海道南西沖地震における港湾地域強震観測網による最大加速度一覧 (単位: Gal = cm/s<sup>2</sup>)

観測地点&記録番号	強震計機種	距離(km)	記録種類	N S成分	E W成分	UD成分
浦河-S S-2526	SMAC-B2	震央距離=303 震源距離=305	観測記録 SMAC EQ 補正記録	3.1 ----- -----	2.5 ----- -----	0.6 ----- -----
苫小牧-S S-2528	SMAC-B2	震央距離=200 震源距離=203	観測記録 SMAC EQ 補正記録	18.1 S08E ----- 19.9 S08E	17.0 E08N ----- 17.5 E08N	8.5 ----- 8.9
室蘭-G F-554	ERS-G	震央距離=153 震源距離=157	観測記録 SMAC EQ 補正記録	217.3 151.9 217.6	215.2 141.0 214.2	100.2 70.8 100.0
小樽-G F-538	ERS-G	震央距離=158 震源距離=162	観測記録 SMAC EQ 補正記録	59.4 33.6 58.4	66.2 36.8 68.2	24.8 19.2 24.9
函館-M M-1472	ERS-C	震央距離=169 震源距離=173	観測記録 SMAC EQ 補正記録	143.5 N08W 131.0 N08W 145.4 N08W	149.3 E08N 134.5 E08N 148.8 E08N	91.7 77.1 87.3
函館-FB F-541	ERS-F GL-201.0m	震央距離=169 震源距離=173	観測記録 SMAC EQ 補正記録	71.0 N03W 64.6 N03W 71.0 N03W	59.3 E03N 51.5 E03N 59.8 E03N	46.1 39.4 45.9
函館-F F-545	ERS-F	震央距離=169 震源距離=173	観測記録 SMAC EQ 補正記録	119.4 N03W 110.9 N03W 118.3 N03W	115.9 E03N 106.8 E03N 115.1 E03N	63.8 51.6 61.5
函館-FR F-549	ERS-F 構造物	震央距離=169 震源距離=173	観測記録 SMAC EQ 補正記録	161.5 N03W 136.4 N03W 157.2 N03W	126.7 E03N 113.3 E03N 127.6 E03N	67.3 62.2 67.9
肯森-S S-2523	SMAC-B2	震央距離=253 震源距離=255	観測記録 SMAC EQ 補正記録	67.8 ----- 72.1	63.3 ----- 68.6	26.3 ----- 26.5
秋田-S S-2525	SMAC-B2	震央距離=345 震源距離=347	観測記録 SMAC EQ 補正記録	11.9 ----- -----	10.6 ----- -----	6.3 ----- -----
酒田-S S-2527	SMAC-B2	震央距離=431 震源距離=432	観測記録 SMAC EQ 補正記録	3.1 ----- -----	5.6 ----- -----	1.9 ----- -----
八戸町-S S-2524	SMAC-B2	震央距離=313 震源距離=315	観測記録 SMAC EQ 補正記録	15.0 ----- -----	21.9 ----- -----	----- ----- -----
宮古-G F-587	ERS-G	震央距離=420 震源距離=421	観測記録 SMAC EQ 補正記録	6.4 5.1 6.5	4.4 3.1 4.2	2.1 1.7 2.1

(注) 観測記録: 基線の補正のみ行ったもの, SMAC EQ: SMAC-B2型強震計の計器特性に換算したものの補正記録: 強震計の計器特性による補正を施したもの

として、小樽港、室蘭港、函館港で得られた記録波計を示している。小樽港および室蘭港の記録はERS-G型強震計(ICカードメモリータイプ)によって得られた地表の記録であり、函館港の記録としてはERS-F型強震計(バブルメモリータイプ)によって得られた地表および地中(GL-201 m)の記録を示している。ERS-F型強震計およびERS-G型強震計は、どちらも同一の周波数特性を持つ強震計であり、記録を比較するうえにおいて強震計の種類による影響はない。なお、強震観測地点の地盤条件については別報に報告されている<sup>3)</sup>。同図中では、上段3成分が補正記録、下段3成分がSMAC EQ記録を示している。これらの記録から、小樽港、室蘭港、函館港で観測された補正加速度記録の最大

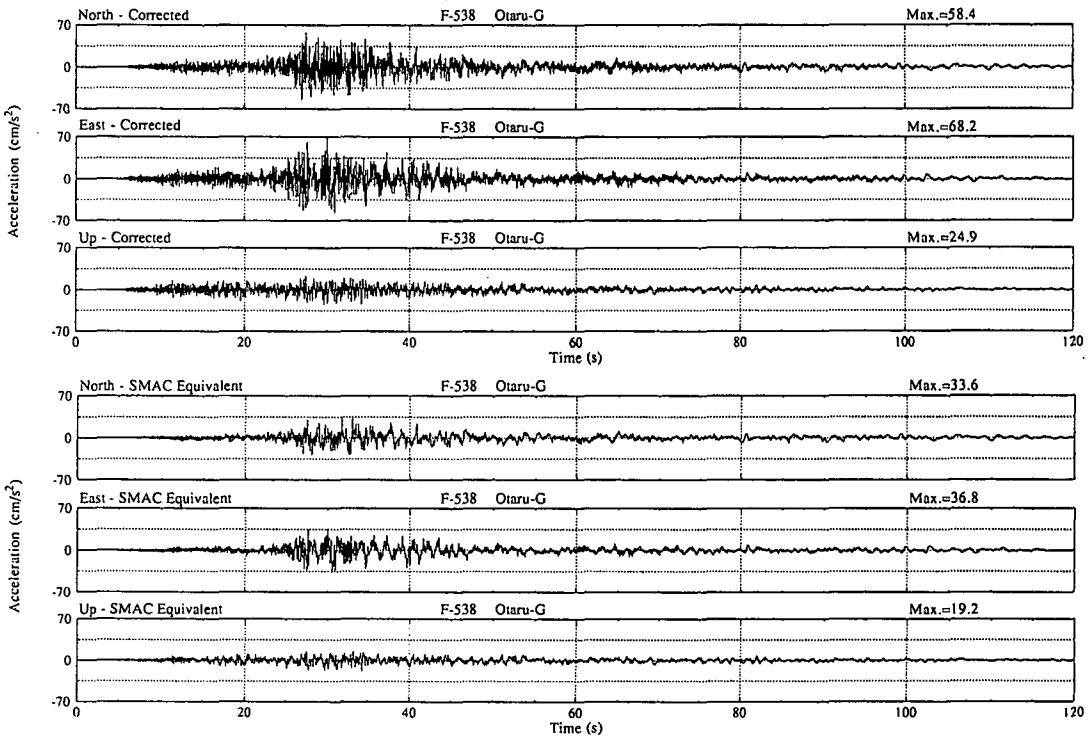


図 3.2.2 小樽港における強震記録

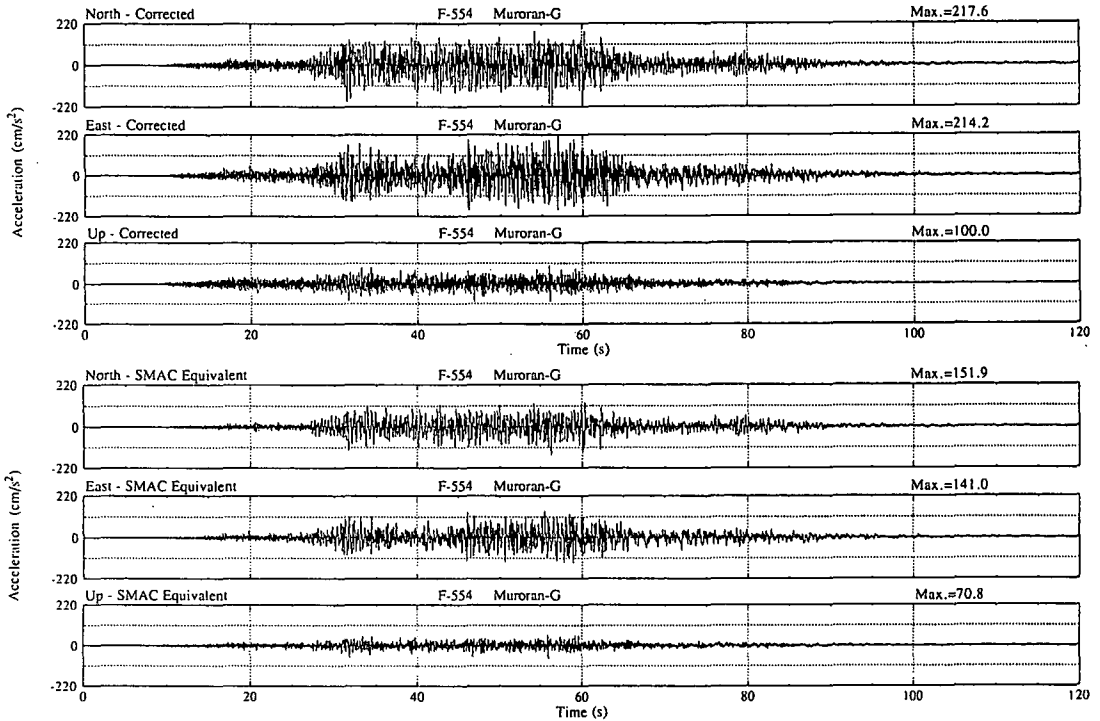


図 3.2.3 室蘭港における強震記録

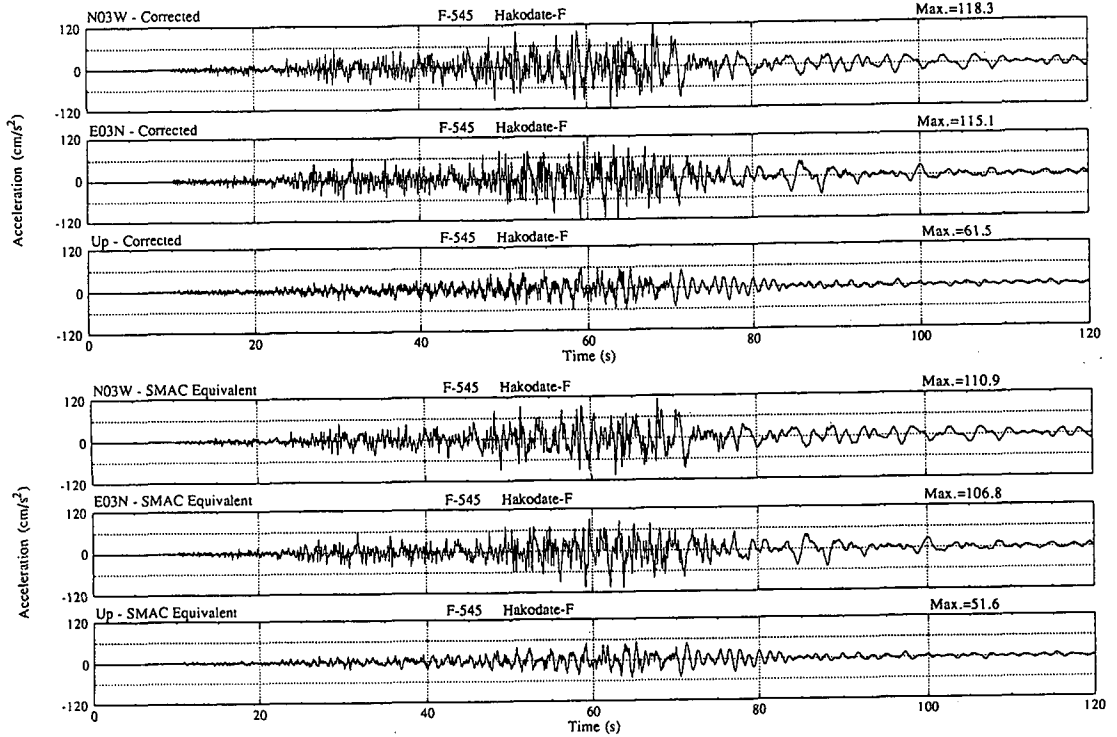


図 3.2.4 函館港における強震記録 (地表)

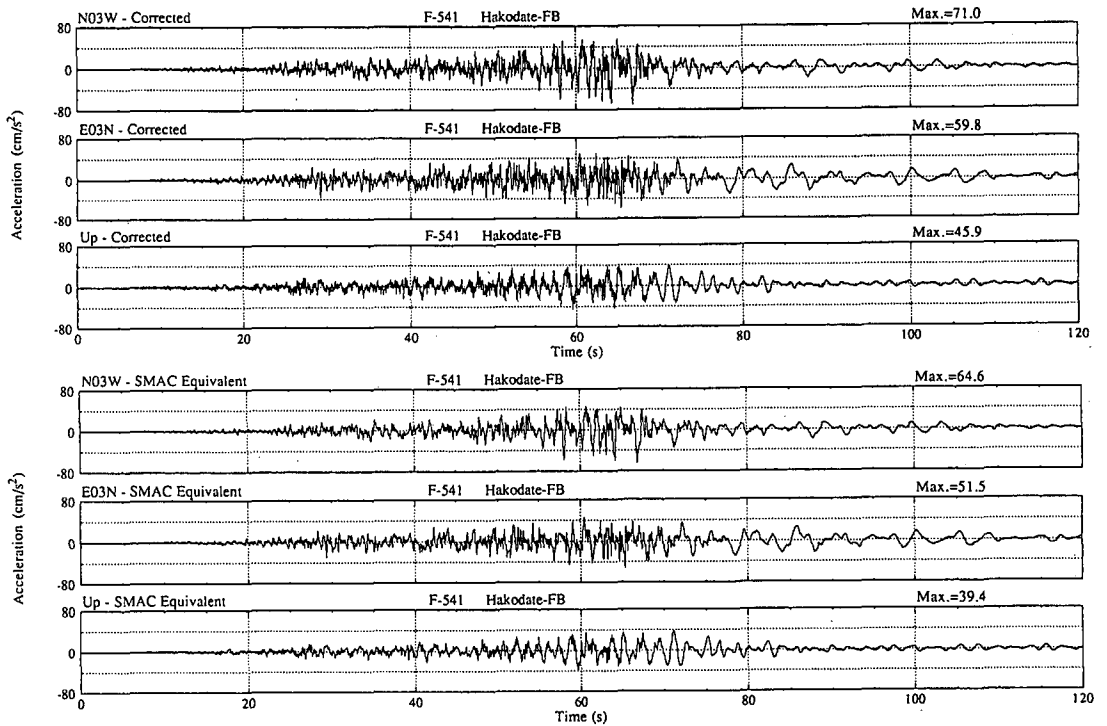


図 3.2.5 函館港における強震記録 (地中)

値（水平成分）を比較すると、小樽港の地表で約 70 Gal、室蘭港の地表で約 220 Gal、函館港では地表で約 120 Gal、地中で約 70 Gal となった。次に、設計実務との整合性をとる観点から、SMAC EQ 記録の最大加速度（水平成分）を比較する。SMAC EQ 記録では、小樽港の地表で約 40 Gal、室蘭港の地表で約 150 Gal、函館港では地表で約 110 Gal、地中で約 65 Gal となった。小樽港および室蘭港では、SMAC EQ 記録の最大加速度が補正記録の最大加速度に比べて大きく低下しているのに対し、函館港の記録では地表および地中ともに低下が少ない。このことから、函館港の記録では、地表および地中の両方において、補正記録と比較して SMAC EQ 記録の最大加速度の低下が少なく、記録に含まれている低周波数成分の割合が小樽港、室蘭港と比較して多くなっていることがわかる。

### 3.3 鉄道関係の本震記録

#### 3.3.1 最大加速度分布と距離減衰特性

地震時の鉄道旅客の安全を守るため、JR の沿線には 400 箇所以上の警報地震計が設置されている。これらの地震計の多くは波形の記録機能を備えている。JR で用いられている主な地震計の諸元を表 3.3.1 に示す。

JR の地震計により観測された、各地の加速度の記録を震央距離ごとに示したのが表 3.3.2 である<sup>6)</sup>。また、図 3.3.1 は表 3.3.2 に示した水平合成加速度の最大加速度のうち主なものを地図上にプロットしたものである。

図 3.3.2 は、最大加速度の距離減衰である。図中に示した曲線は、中村・富田式 (1984)<sup>7)</sup>による基盤相当加速度の推定値である。

$$\log_{10}A = 0.168M - 0.5 \log_{10}(\Delta + H) - 0.0551 \times 10^{-0.156M} \times \Delta + 1.86 \quad (3.3.1)$$

ここに、 $A$ ：推定基盤相当加速度 (Gal)

$M$ ：マグニチュード

$\Delta$ ：震央距離 (km)

$H$ ：震源深さ (km)

図 3.3.2 によれば、観測された最大加速度の下限値は推定された基盤相当加速度とほぼ一致している。

表 3.3.1 JR で用いられる地震計の諸元

地震計の種類	測定帯域(Hz)	固有振動数	減衰定数	記録方式	備考
NEWS改	0.1~5.0:警報	5Hz	0.7	最大値印字	感熱巻紙
	0.1~10.0:記録	10Hz	0.7	16bit,100Hzサンプル Max.1200Gal	ハードディスク
NEWS	0.1~5.0:警報	5Hz	0.7	最大値印字	感熱巻紙
	0.1~10.0:記録	10Hz	0.7	FM記録S/N56dB以上 Max.900Gal	C90カセット
AJA-5RC OKIGAL	0.1~5.0:警報			最大値印字	巻紙
	0.1~30.0:記録			16bit,240Hzサンプル Max.1250Gal	VHSカセット
SMAC-B <sub>2</sub>		7.14Hz	1.0	器械式,送り1cm/s 最大500Gal程度	スタイラス紙
HGA-7B	0.1~5.0:警報	5Hz	0.7	最大値印字	感熱巻紙
HGA-2		10.0Hz	0.7	すず書き(固定板)	アルミ板

表 3.3.2 最大加速度記録

観測点	地震計 の 種 類	震 央 距 離 (km)	測 点 方 位 (度)	最大加速度(Gal)			
				最大値	N-S	E-W	U-D
黒松内	NEWS	91	97	498	403	496	92
長万部	NEWS	101	107	298	191	287	75
八 雲	NEWS	106	123	264	208	214	67
俱知安	NEWS	127	83	87	79	87	43
森	NEWS	135	123	214	167	183	63
伊達紋別	NEWS	140	103	89	88	88	27
湯の里	NEWS改	155	147	81	72	72	74
東室蘭	SMAC-B <sub>2</sub>	157	107	153	89	153	25
七 飯	NEWS	158	128	142	136	122	62
木古内	NEWS	159	139	214	174	180	93
銭 函	NEWS	165	75	41	41	37	19
青函33km	NEWS改	176	149	56	46	47	52
青函30km	NEWS改	178	149	67	67	42	41
札 幌	SM-21	178	79	65	*	*	*
青函21km	NEWS改	187	149	39	39	29	18
青函16km	NEWS改	192	149	38	38	34	16
苫小牧	SMAC-B <sub>2</sub>	197	93	15	x	15	6
千 歳	SMAC-B <sub>2</sub>	200	87	15	12	15	4
増 川	NEWS改	205	149	54	35	47	27
大川平	NEWS	210	148	161	138	125	41
蟹 田	NEWS	228	147	121	120	74	34
新夕張	SMAC-B <sub>2</sub>	232	84	0	x	x	x
滝 川	NEWS	235	67	20	19	20	8
野 内	NEWS	253	147	62	46	42	18
陸奥横浜	NEWS	254	137	37	37	34	10
川 部	NEWS	261	154	84	61	82	19
占 冠	SMAC-B <sub>2</sub>	262	83	0	-	-	-
静 内	HGA7B1	264	99	14	x	x	x
富良野	SMAC-B <sub>2</sub>	267	75	5	4	5	5
岩 館	NEWS	271	166	18	16	18	9
乙 供	NEWS	278	142	80	71	62	17
二ツ井	NEWS	298	162	61	43	57	17
大 館	NEWS	299	157	36	34	30	10
十和田南	NEWS	310	154	27	27	19	11
八 戸	NEWS	313	142	39	34	38	8
八郎潟	NEWS	323	166	16	13	16	6
荒屋新町	NEWS	336	151	10	8	10	6
陸中八木	NEWS	345	140	6	6	6	4
四ツ小屋	NEWS	356	166	14	11	12	4
好 摩	NEWS	363	152	8	8	8	3
大 曲	NEWS	384	163	11	10	9	4
矢 巾	NEWS	388	154	8	8	7	4
福 良	NEWS	416	171	5	5	5	3
北 上	NEWS	421	156	7	5	6	2
網 走	HGA7B1	431	69	26	x	x	x

最大値については次の通り

SMAC型・HGA型:方向別最大値

NEWS型・NEWS改型:水平成分のベクトル合成値の最大値



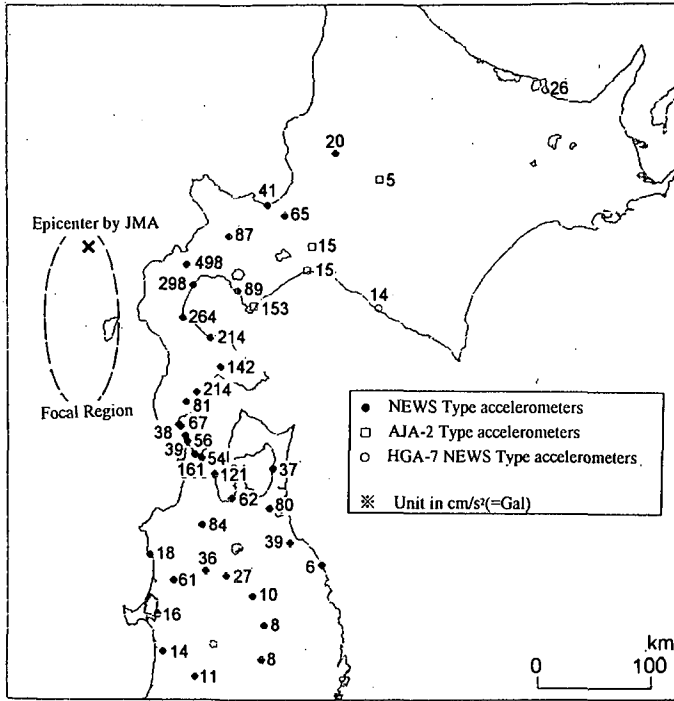


図 3.3.1 最大加速度分布

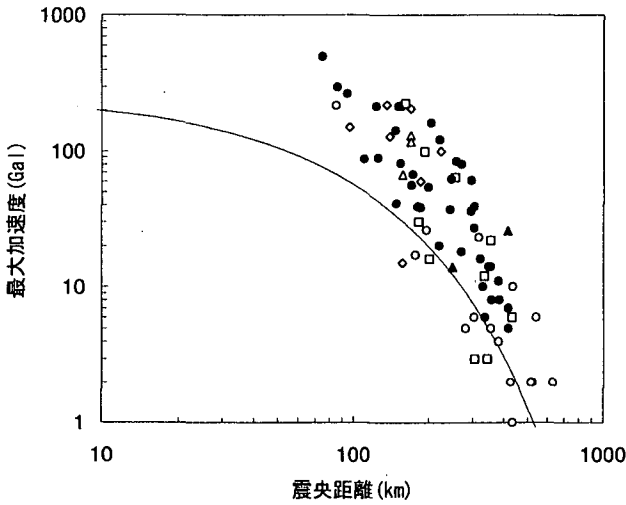


図 3.3.2 最大加速度の距離減衰

### 3.3.2 最大加速度と震央方位の関係（地震波動エネルギーの放射特性）<sup>8)</sup>

ある観測点の地震動は、震源から放射された地震動が当該観測点まで伝播・減衰し、表層地盤で増幅作用を受けたものである。各観測点における最大加速度を、式 (3.3.1) による基盤推定加速度で除した比  $R_{mb}$  には、各地の表層地盤の増幅特性のほか、震源から放射される波動エネルギーの放射特性が含まれている。

一般に表層地盤の増幅倍率と地表面での最大地震動の水平／上下比は、図 3.3.3 のようにほぼ 1:1 に対応している<sup>9)</sup>。したがって、表層地盤の増幅特性は最大加速度値の水平／上下比  $R_{hv}$  で見積もることができる。そこで、 $R_{mb}$  をさらに  $R_{hv}$  で除すことで表層地盤の影響を取り除き、地震波動エネルギーの放射特性を推定する。

ここでは、鉄道で使用している警報地震計 NEWS や強震計 SMAC-B2 による最大加速度記録のほか、気象庁などの観測記録を加えて地震波動の放射特性を検討する。震央距離は基盤加速度推定式の適用限界を考慮して 500 km 以内とし、観測点方位は北を 0°，時計回りを正としている。

図 3.3.4 は北海道南西沖地震の推定基盤相当加速度に対する観測最大加速度の比  $R_{mb}$  と測点方位の関係である。これによると、測点方位 135° 付近にピークがみられるが、値のばらつきが大きく、地震波動の放射特性とともに、各観測地点の地盤特性の影響が強いことを示している。

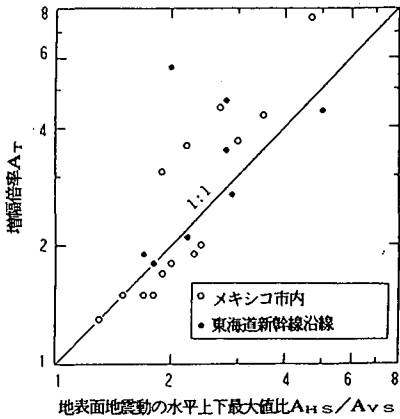


図 3.3.3 地震動の水平上下最大値比と増幅倍率の関係

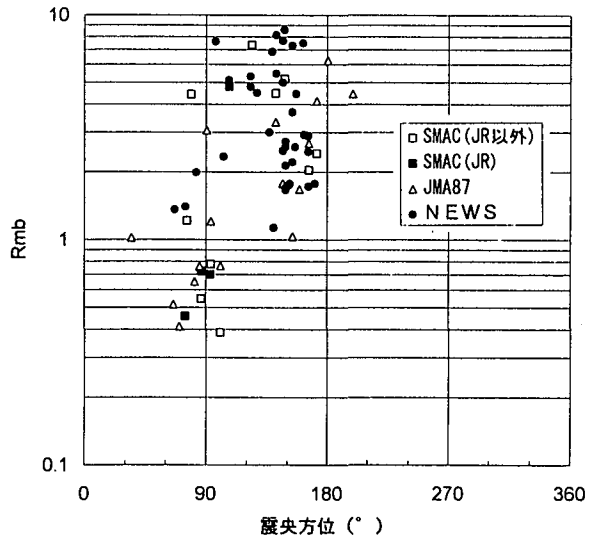


図 3.3.4  $R_{mb}$  と測点方位の関係

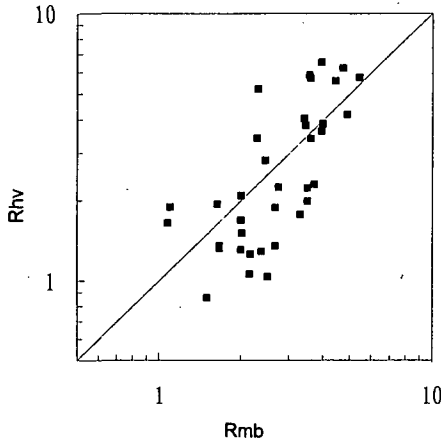


図 3.3.5  $R_{mb}$  と  $R_{hv}$  の関係

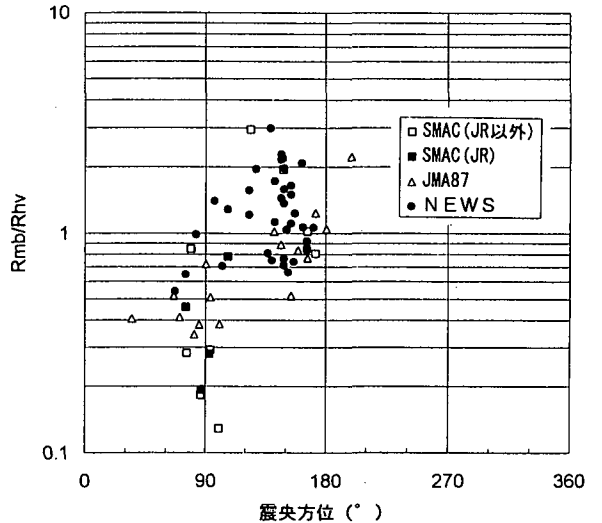


図 3.3.6  $R_{mb}/R_{hv}$  と測点方位の関係

$R_{mb}$ を表層地盤の増幅特性と密接に関係する $R_{iv}$ と対比させたものが図3.3.5である。これによると、 $R_{mb}$ と $R_{iv}$ がほぼ1:1に対応しており、観測最大加速度と推定基盤加速度の比は、平均的に表層地盤の増幅倍率に対応している。

$R_{mb}$ をさらに $R_{iv}$ で除し、表層地盤の影響を取り除いた結果が図3.3.6である。処理結果のばらつきはかなり小さくなり、 $135^\circ$ 付近が大きくなっていることがわかる。断層破壊の伝播方向は $120^\circ \sim 140^\circ$ であり<sup>10)</sup>、最大加速度と震央方位の関係は断層破壊の伝播方向の影響が強く反映したものと考えられる。

### 3.3.3 加速度波形

図3.3.7に、黒松内 ( $\Delta=91$  km)、長万部 ( $\Delta=101$  km)、八雲 ( $\Delta=106$  km)、七飯 ( $\Delta=158$  km)、木古内 ( $\Delta=159$  km)、蟹田 ( $\Delta=228$  km) の各観測点で観測された波形を示す。ただし、UD成分は木古内・蟹田を除いて、記録の不調でノイズが多かったのでここには示していない。

長万部や黒松内では大きな地震動の継続時間が40秒~60秒程度であるのに対して、八雲、七飯、木古内(30秒~20秒程度)、蟹田(15秒程度)と震源域の南に位置するものほど継続時間が短くなっ

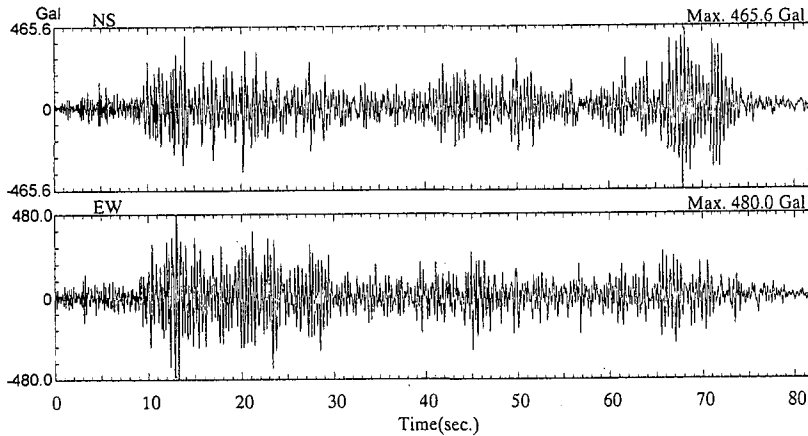


図3.3.7(a) 観測波形(黒松内)

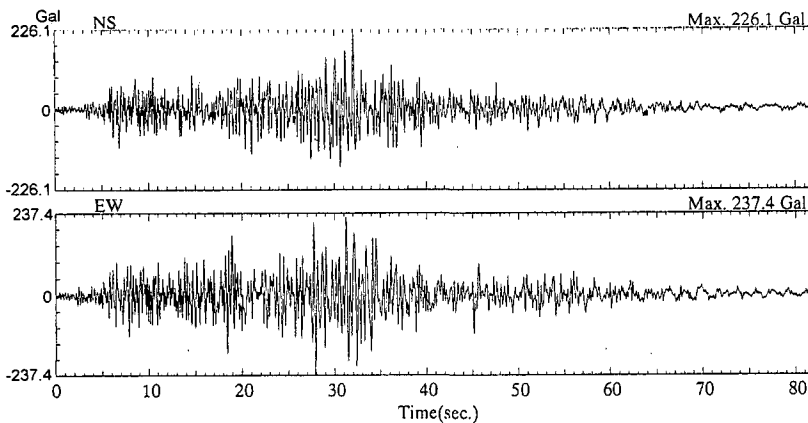


図3.3.7(b) 観測波形(長万部)

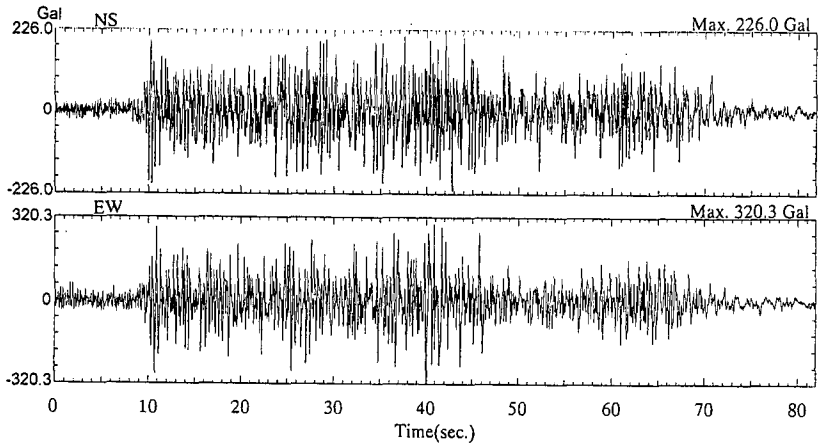


図 3.3.7(c) 観測波形 (八雲)

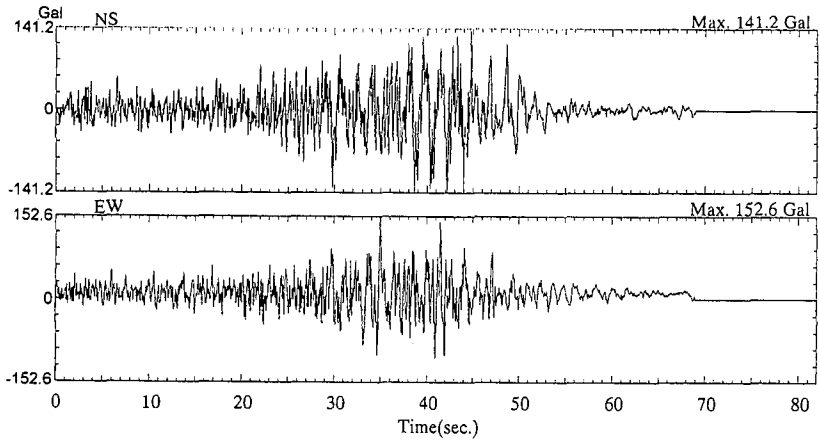


図 3.3.7(d) 観測波形 (七飯)

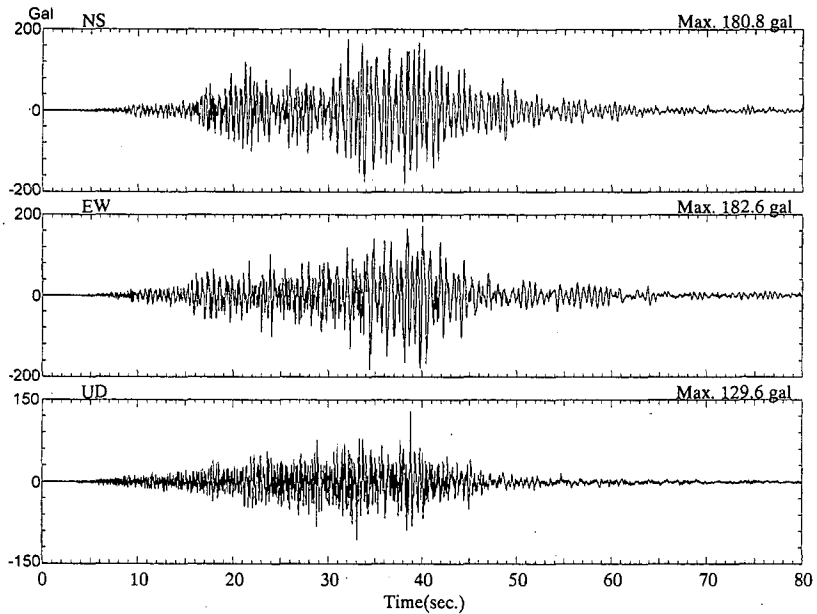


図 3.3.7(e) 観測波形 (木古内)

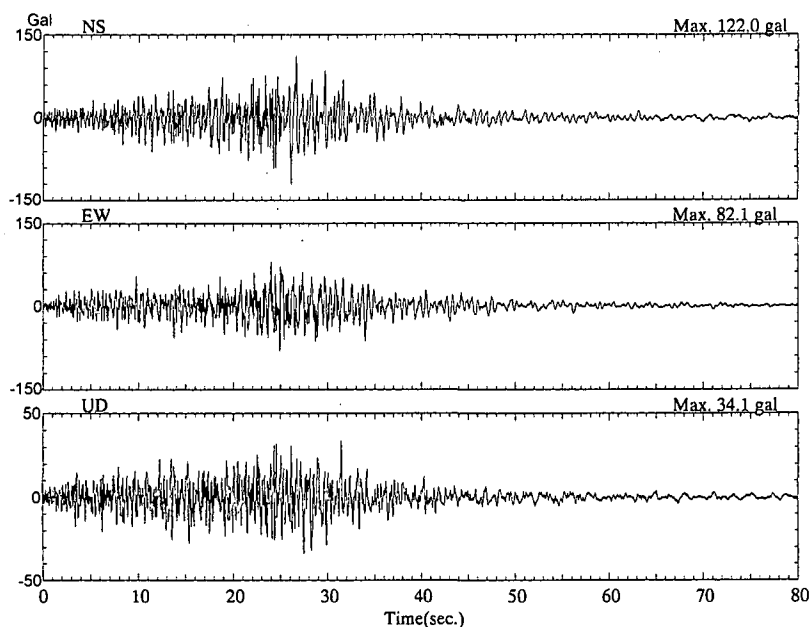


図 3.3.7(1) 観測波形 (蟹田)

ている。また波形の中には2つないし3つの顕著な位相が認められる。これは特に最も北にある黒松内で明瞭であり、長万部、八雲では不明瞭になる。また七飯では2つの位相が明瞭に認められる。これは、今回の地震が南北に並んだ複数のイベントからなり、断層破壊が北から南に進んだこと<sup>3)</sup>と関連していると考えられる。

黒松内、長万部、八雲、七飯の観測波形のうち、主要動を含む40.96秒間(100 Hz サンプリング)の波形についてフーリエスペクトルを算出した。この際平滑化のためハンギングウィンドウを80回(バンド幅約0.4 Hz)かけている。

図 3.3.8 に示すように、観測波形のフーリエスペクトルでは、概ね1.5~3 Hz にピークが見られる。

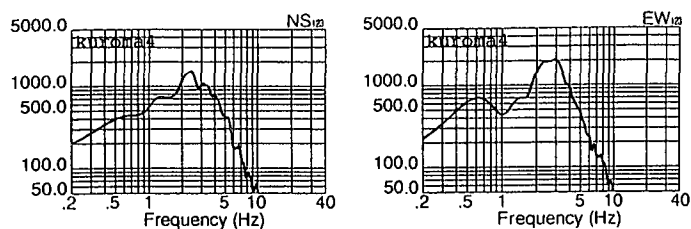


図 3.3.8(a) 観測波形のフーリエスペクトル (黒松内)

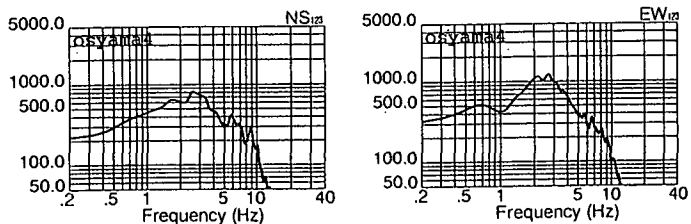


図 3.3.8(b) 観測波形のフーリエスペクトル (長万部)

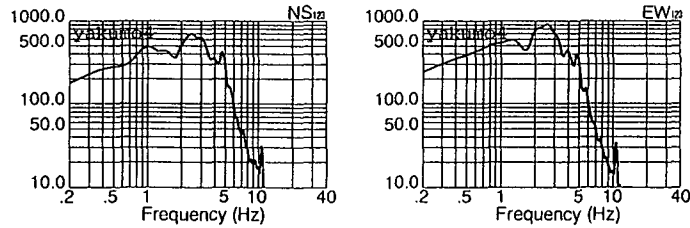


図 3.3.8(c) 観測波形のフーリエスペクトル (八雲)

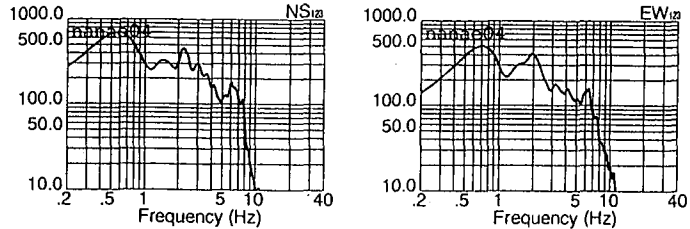


図 3.3.8(d) 観測波形のフーリエスペクトル (七飯)

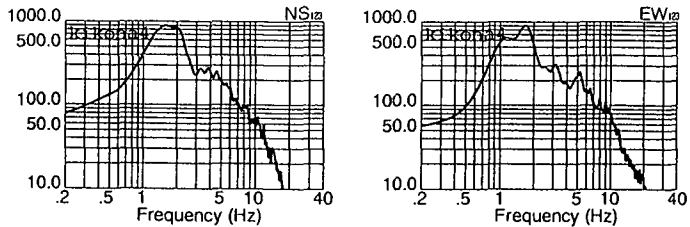


図 3.3.8(e) 観測波形のフーリエスペクトル (木古内)

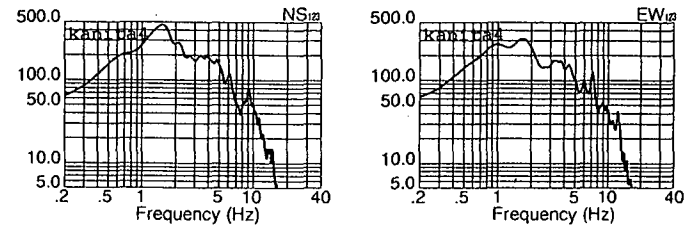


図 3.3.8(f) 観測波形のフーリエスペクトル (蟹田)

また七飯では0.6~0.7 Hzのピークが顕著である。

図 3.3.9 は観測波形の速度応答スペクトルである。両成分とも、2~3 秒周辺のピークは八雲・七飯を除いてあまり目立たなくなっており、黒松内・八雲では0.4 秒前後のピークが大きくなっている。黒松内の NS 成分の0.4 秒前後、七飯の NS 成分の2 秒前後のピークは非常に大きく、減衰2%の速度応答スペクトル値は120 kine を超えている。

加速度波形を積分し、速度波形(等価な速度計の特性、固有振動数 $f_n=0.333$  Hz、減衰定数 $h=0.552$ )、変位波形(等価な変位計の特性、固有振動数 $f_n=0.333$  Hz、減衰定数 $h=0.552$ )に変換した<sup>11)</sup>。これらの波形を図 3.3.10、図 3.3.11 に示す。また得られた最大速度、最大変位を、最大加速度とともに表 3.3.3 に示す。表 3.3.2 と表 3.3.3 で最大加速度の値が異なっているが、これは、NEWS 型地震計では表 3.3.1 に示したように警報用(5 Hz まで)と波形記録用(10 Hz まで)とで測定周波数範囲が異なっているためである。波形記録用の方が高い周波数まで測定しているため、表 3.3.3 の方が大きめ

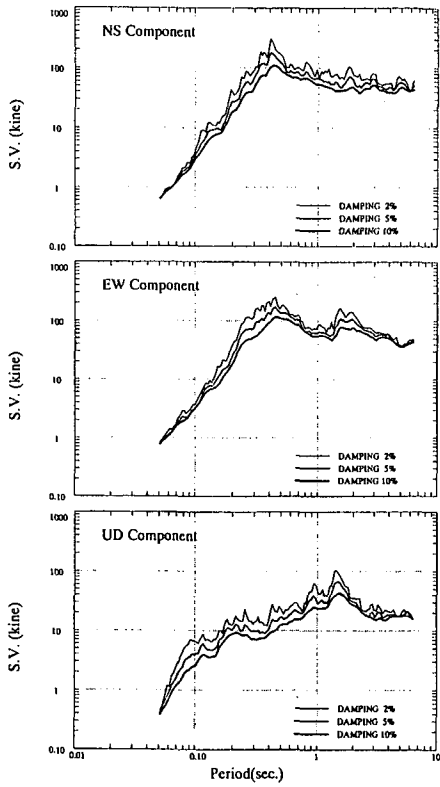


図 3.3.9(a) 速度応答スペクトル (黒松内)

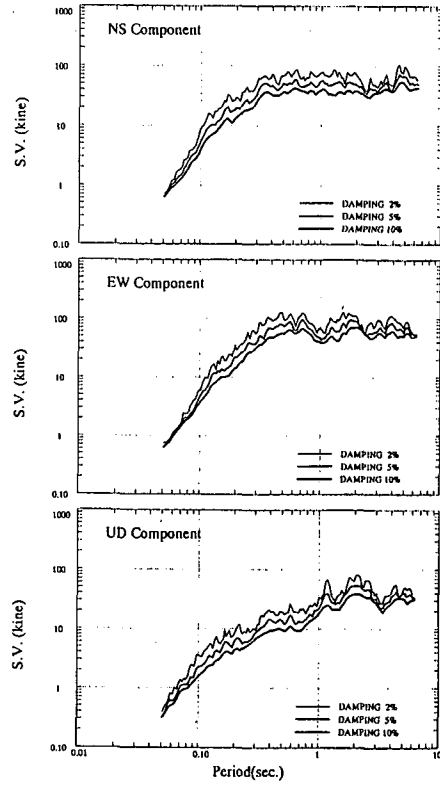


図 3.3.9(b) 速度応答スペクトル (長万部)

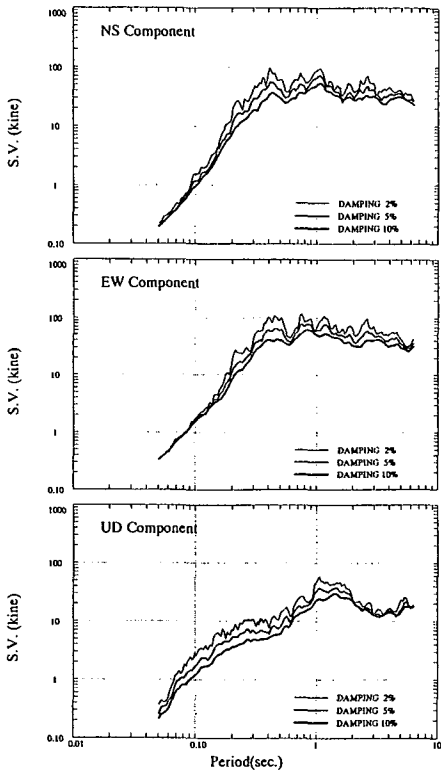


図 3.3.9(c) 速度応答スペクトル (八雲)

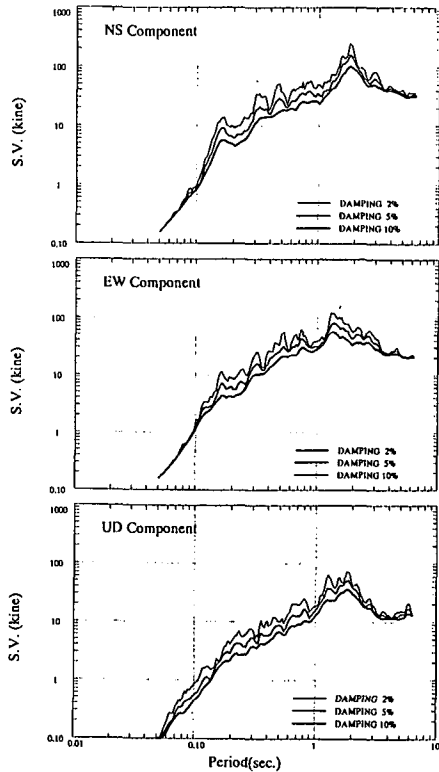


図 3.3.9(d) 速度応答スペクトル (七飯)

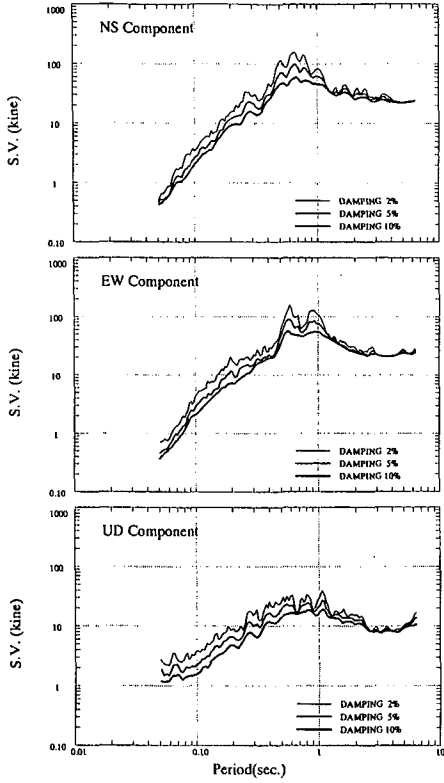


図 3.3.9(e) 速度応答スペクトル (木古内)

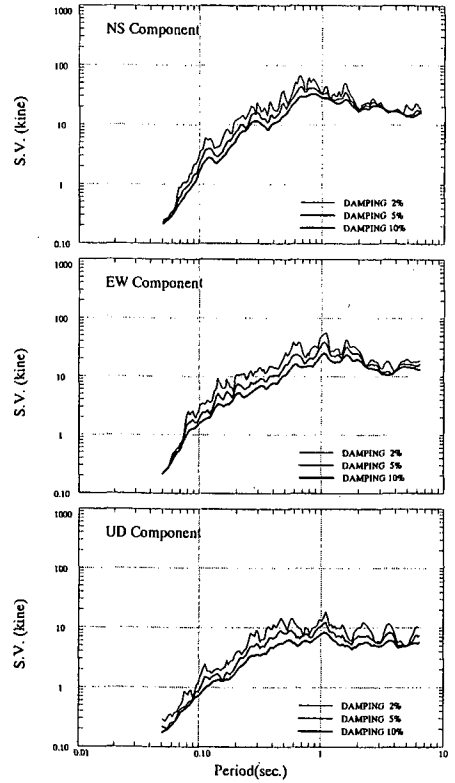


図 3.3.9(f) 速度応答スペクトル (蟹田)

の値となる。両者の差が大きいと 5 Hz 以上の振動成分が多いことを示し、差が少ないものは 5 Hz 以上の振動成分が少ないことを示している。

七飯の最大変位が特に大きな値を示しているが、地震動が軟弱地盤により大きく増幅されたものと推測される。

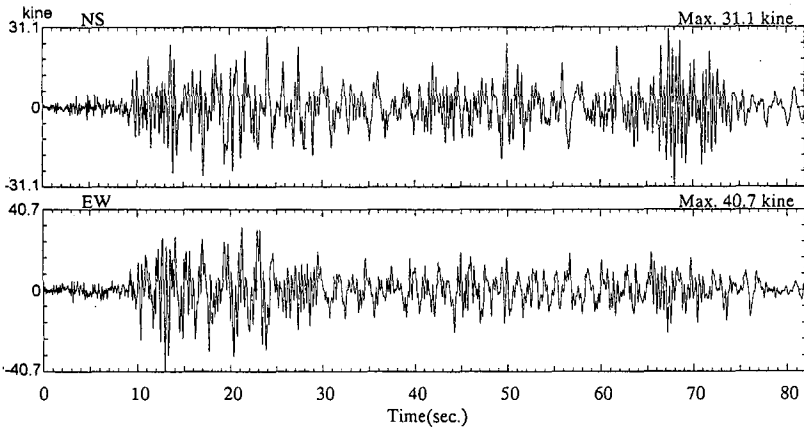


図 3.3.10(a) 積分 ( $h=0.552$ ,  $f=0.333$  Hz) による速度波形 (黒松内)



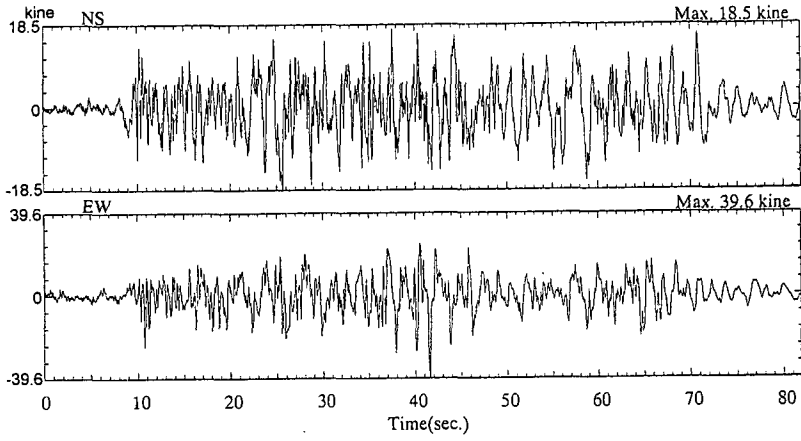


図 3.3.10(b) 積分 ( $h=0.552$ ,  $f=0.333$  Hz) による速度波形 (長万部)

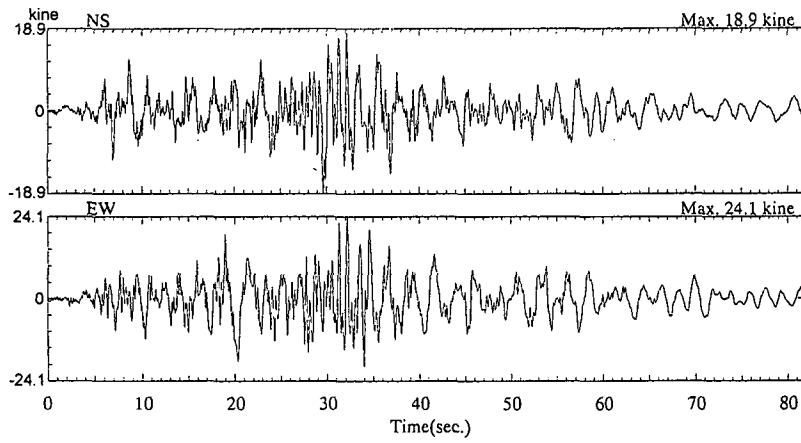


図 3.3.10(c) 積分 ( $h=0.552$ ,  $f=0.333$  Hz) による速度波形 (八雲)

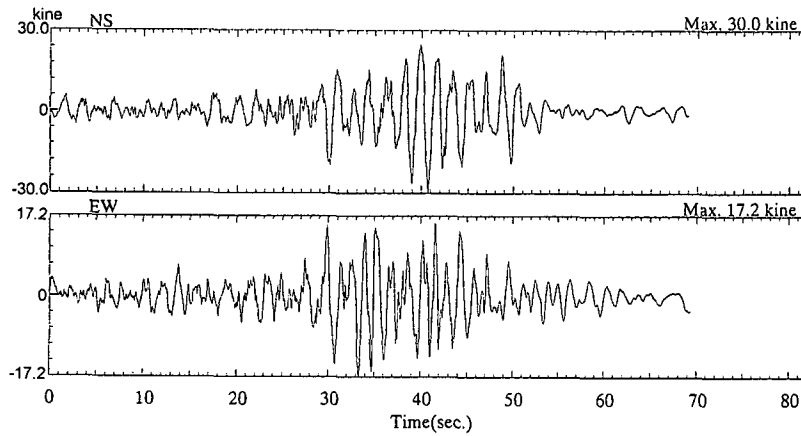


図 3.3.10(d) 積分 ( $h=0.552$ ,  $f=0.333$  Hz) による速度波形 (七飯)

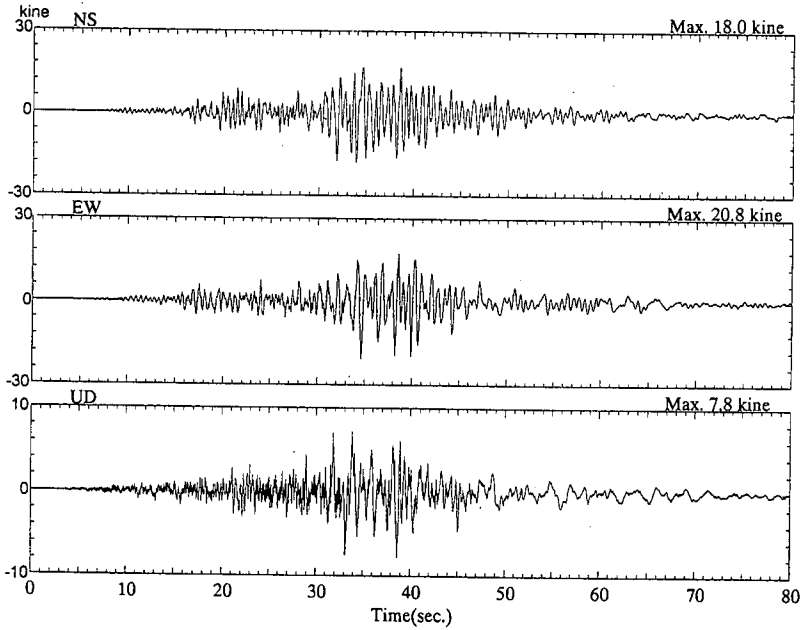


図 3.3.10(e) 積分 ( $h=0.552$ ,  $f=0.333$  Hz) による速度波形 (木古内)

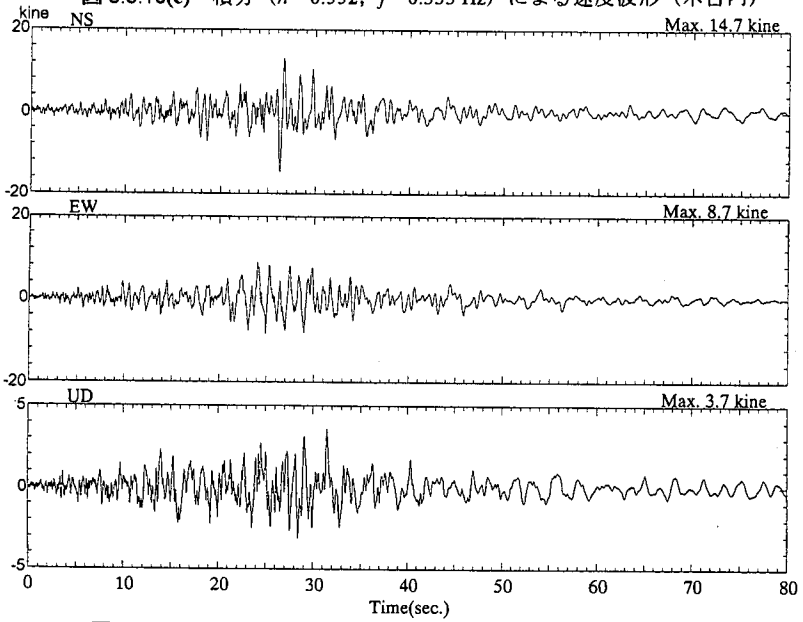


図 3.3.10(f) 積分 ( $h=0.552$ ,  $f=0.333$  Hz) による速度波形 (蟹田)

表 3.3.3 最大加速度，最大速度，最大変位

地点名	震 央 距 離 (km)	最 大 加 速 度 (Gal)	最 大 速 度 (kine)	最 大 変 位 (cm)
黒松内	91	480	40.7	7.1
長万部	101	320	39.6	7.5
八 雲	106	237	24.1	5.8
七 飯	158	153	30.0	8.5
木古内	159	183	20.8	3.5
蟹 田	228	122	14.7	2.2

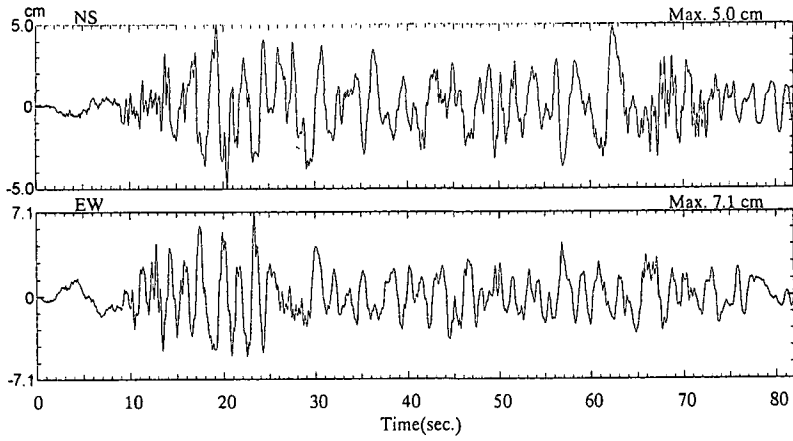


図 3.3.11(a) 積分 ( $h=0.552$ ,  $f=0.333$  Hz) による変位波形 (黒松内)

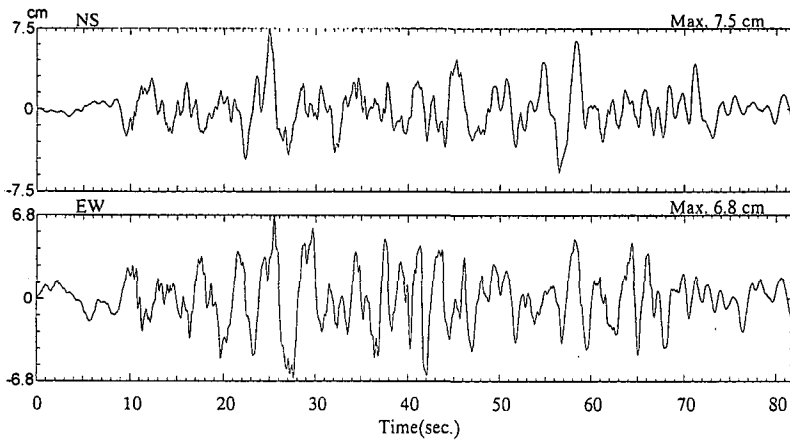


図 3.3.11(b) 積分 ( $h=0.552$ ,  $f=0.333$  Hz) による変位波形 (長万部)

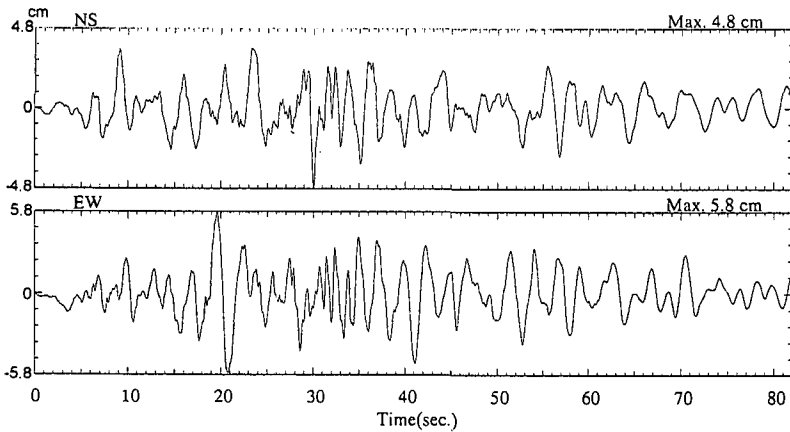


図 3.3.11(c) 積分 ( $h=0.552$ ,  $f=0.333$  Hz) による変位波形 (八雲)

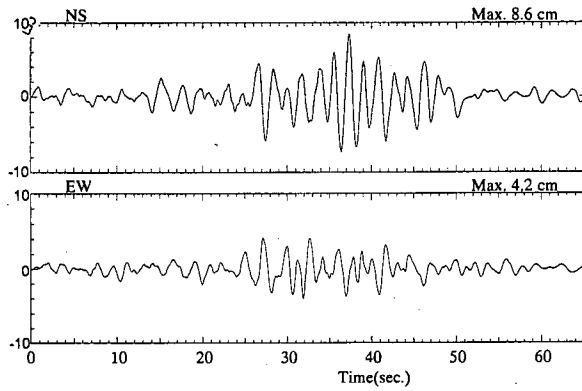


図 3.3.11(d) 積分 ( $h=0.552$ ,  $f=0.333$  Hz) による変位波形 (七飯)

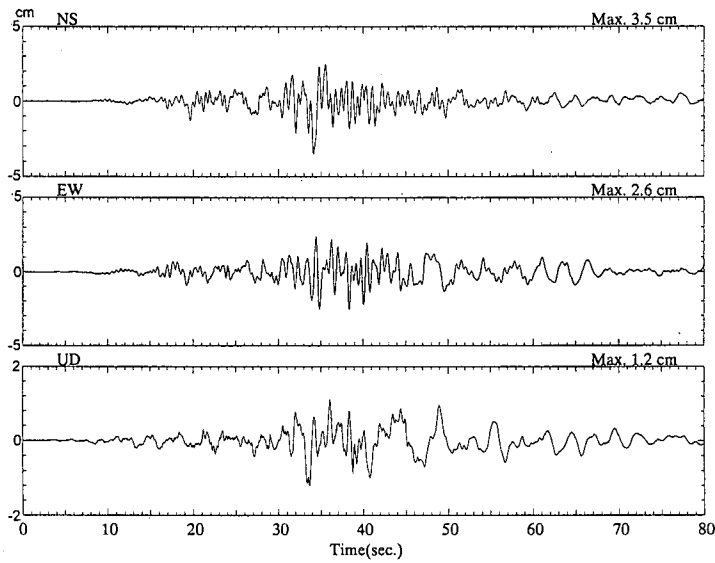


図 3.3.11(e) 積分 ( $h=0.552$ ,  $f=0.333$  Hz) による変位波形 (木古内)

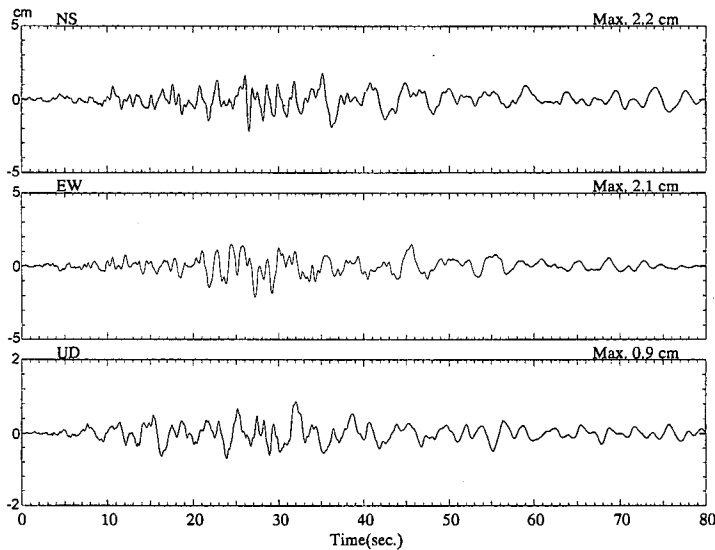


図 3.3.11(f) 積分 ( $h=0.552$ ,  $f=0.333$  Hz) による変位波形 (蟹田)

### 3.4 余震の記録

#### 3.4.1 はじめに

1993年北海道南西沖地震の後に実施された北海道大学理学部, 京都大学防災研究所, 東京大学地震研究所による臨時の共同強震観測 (合計 10 地点) により取得された, 最大余震の強震記録を中心に報告する. 図 3.4.1 に余震分布と大学共同の強震観測点を示す. 余震活動の多くは奥尻島の西に南北約 170 km, 東西約 40 km の範囲に発生しているが, 8月8日に発生した M 6.3 (気象庁) の地震はこの余震活動の範囲から 50 km ほど離れた江差沖で発生した. この地震については7月12日の本震に伴う直接の余震ではなく, 広域的な応力変化の影響下で発生した地震とも考えられる<sup>12)</sup>が, 広義の意味での余震活動の一つと捉え, ここでは最大余震と称する. 震源域で発生した余震のマグニチュードは, 本震直後に6を越える地震が2個発生しているものの, その後は高々5程度である. これは, 同じような大地震であった1968年十勝沖地震, 1983年日本海中部地震で経験したM7クラスの余震を伴った例とは様子を異にしている. また, M6.3の最大余震はM4程度以下の余震を伴っており, 本報告はこの最大余震およびその余震群の強震記録の解析を中心に据えている.

図 3.4.2 は8月8日の最大余震による最大加速度<sup>13)</sup>の距離減衰を示しており, Fukushima and Tanaka<sup>14)</sup>によるわが国での平均曲線とよく符合している. しかし, 震源に最も近い (震央距離 18 km) 乙部町の観測点 (OTB) の1成分は経験式から大きくはずれており, 水平動としては世界最大級の加速度  $1586 \text{ cm/s}^2$  が観測されている.

大学共同強震観測点分布

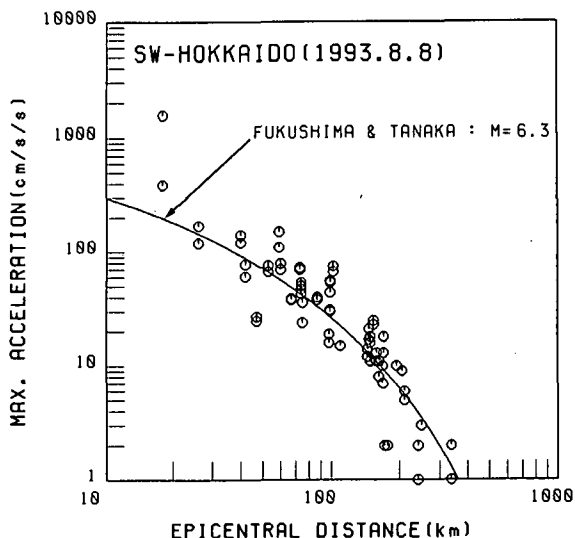
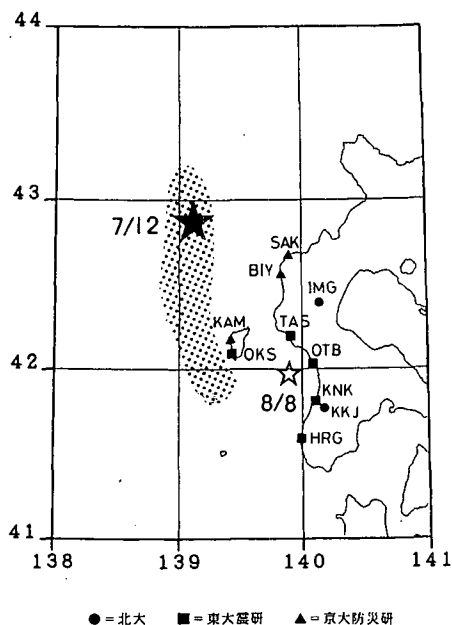


図 3.4.1 (左) 1993年北海道南西沖地震 (7月12日, M 7.8) の震央 (★) と余震分布, 最大余震 (8月8日, M 6.3) の震央 (☆), および大学共同 (北大理, 東大, 京大) 強震観測点

図 3.4.2 (右) 最大余震による最大加速度の距離減衰

1gを越える強震記録は1971年San Fernando地震以来、いくつかの例はあるものの、決して多い数ではない。建築・土木の耐震設計は構造物への加速度入力を基本としており、大加速度がなぜ発生し何をもたらしたかは多くの興味のあるところである。ただし、大加速度であっても必ずしも被害と結びついているわけではなく、古くは1962年広尾沖地震の際に釧路市における強震記録と（無）被害の関係について議論のあったところである<sup>15)</sup>。また、1993年釧路沖地震の際に $900\text{ cm/s}^2$ を越える観測記録が得られたが、同様の興味を持って検討されている<sup>16)</sup>。一方、余震観測点の一つである上の国町では、7月12日の本震の際に地盤の液状化が発生し、建物に不等沈下や亀裂などの被害が生じている。近傍の岩盤サイトとの地震動の比較を通じて軟弱地盤での地震応答について検討した。

### 3.4.2 最大余震の強震記録

$1586\text{ cm/s}^2$ を記録した計器は力平衡型加速度計を内蔵したSMAD-2で、フルスケール $2000\text{ cm/s}^2$ 、A/D:12ビット、AGC:2段( $\times 1/4$ ,  $\times 1/16$ )の仕様である。観測点の明和小学校(爾志郡乙部町花磯)はしび(鮪)の岬の付け根に位置しており、強震計は2階建て鉄筋コンクリート造の1階床にアンカーボルトで固定した。

観測された加速度記象とS波以降10秒間のフーリエスペクトルを図3.4.3に示す。観測後に重力を利用した感度検定を行い、計器上の問題はなかったことを確認している。最大加速度としては世界最大級であるという特徴のほか、水平2成分間に4倍程度の差があることは極めてまれな例と言えよう。さらに、S波部分には少なくとも2つの明瞭なフェイズが見え、2つ以上のイベントが重畳した結果と推定される。M6.3の地震で震源距離が20km程度では、‘Near Field’とは言いがたいところであるが、なぜ $1586\text{ cm/s}^2$ もの最大加速度を記録したか、なぜ水平動に4倍もの差が生じたのか等について検討する。

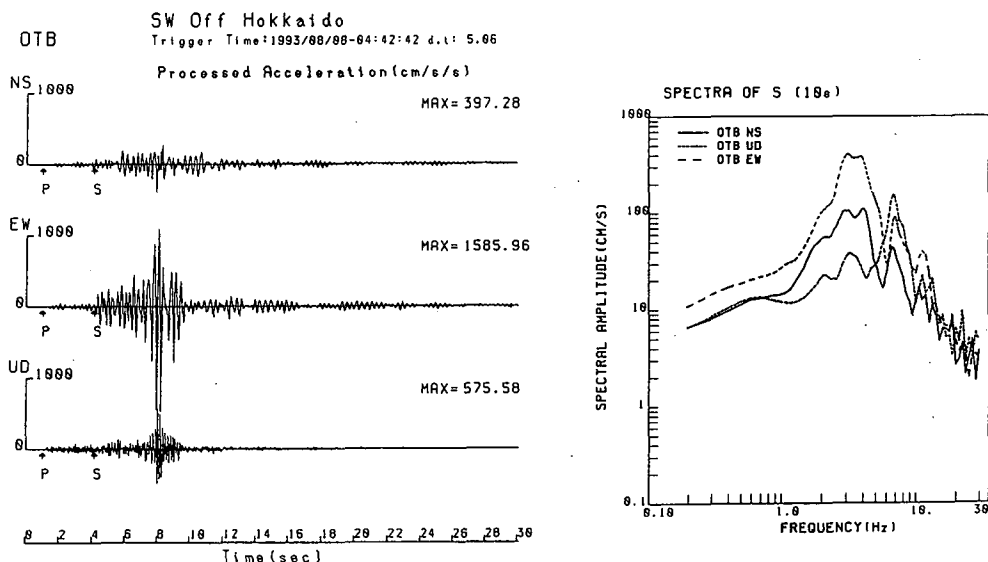


図3.4.3 OTB(北海道爾志郡乙部町明和小学校)における最大余震(8月8日, M6.3)の加速度記象とフーリエスペクトル

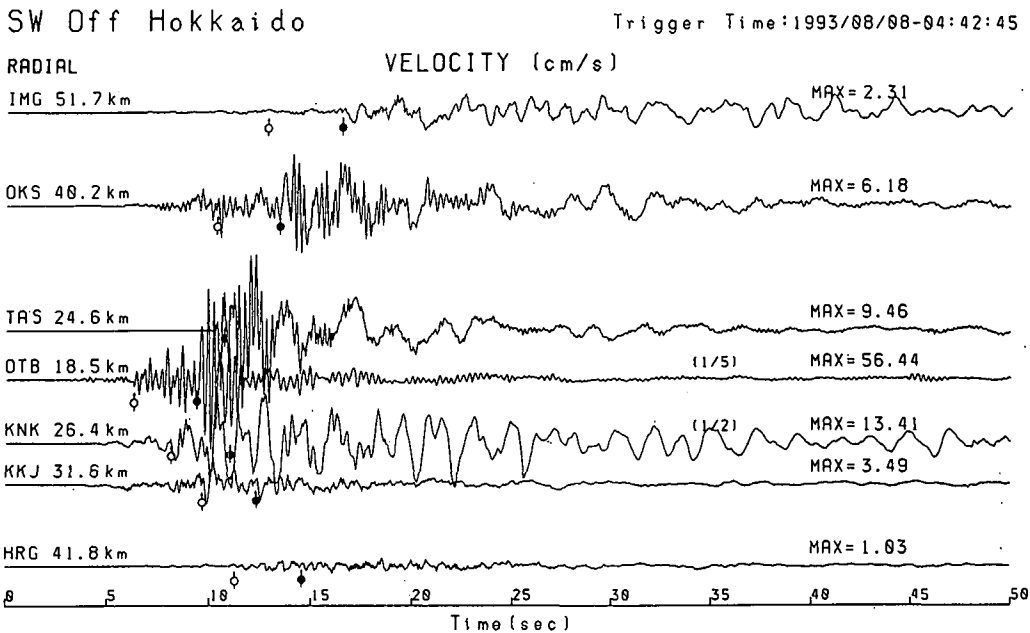


図 3.4.4 各地における最大余震の速度記録 (左の数値は震央距離を、右は最大速度、( ) 内は縮尺を示す。白抜き、塗りつぶしのマークはそれぞれ第 1, 第 2 震の S 波を示す)

図 3.4.4 は大学共同強震観測で得られた M6.3 の速度記録の Radial 成分で、震源に最も近い OTB を中心に置き、震源より北側の観測を上、南側のそれを下側にそれぞれ震央距離の順に並べてある。OTB 観測点を含め、少なくとも 2 つの顕著な位相を指摘できる。水平動成分に 2 種類のマークを記してあるが、それぞれ第 1 イベント、第 2 イベントの S 波の到達を示す。第 1 イベントの S 波の振幅は、距離減衰を考えれば北側と南側とに大きな差はない。しかし、第 2 イベントに関しては、北側の位相は極めて顕著であるのに対して、南側では不明瞭で、南側だけの観測記録では第 2 イベントの指摘が困難なほどである。菊地 (1993: 私信) による遠地 P 波の解析では北方への破壊伝播が指摘されており、また破壊過程の中で震源機構が変化することは示唆されていない。したがって、第 2 イベントの方がやや大きく、破壊が北へ進行したために北側の観測点での振幅が大きくなったと考えられる。

### 3.4.3 大加速度の発生原因について

渡島半島の中央部にある鯨の岬は中新生 (Miocene) の火山活動に伴う溶岩流によって形成され、北側の崖には柱状節理の発達した安山岩が露出している。観測点は岬の付け根の、標高 50 m の溶岩台地にあり、安山岩の上を段丘堆積物が覆っている。ボーリング調査から、段丘堆積物は層厚 8.6 m で下部の安山岩と接している。岬の北方に露出する江差層 (頁岩、泥岩: Miocene) が安山岩の下部を形成し、さらにその下部の松前層 (Pre-Tertiary) が基盤をなすと考えられている<sup>17)</sup>。

大加速度の原因として、軟らかい段丘堆積層や地形の影響が考えられたため、小地震 (余震群) を対象とした比較観測を行った。観測点配置および地形断面を図 3.4.5 に示す。同時に観測された地震に対し、安山岩が露頭している OT1 を規準として他観測点とのフーリエスペクトル比を求めたところ、段丘堆積層のある OT2, OT3, OT5 で卓越する周波数は 4~6 Hz 程度の違いはあるものの増幅度

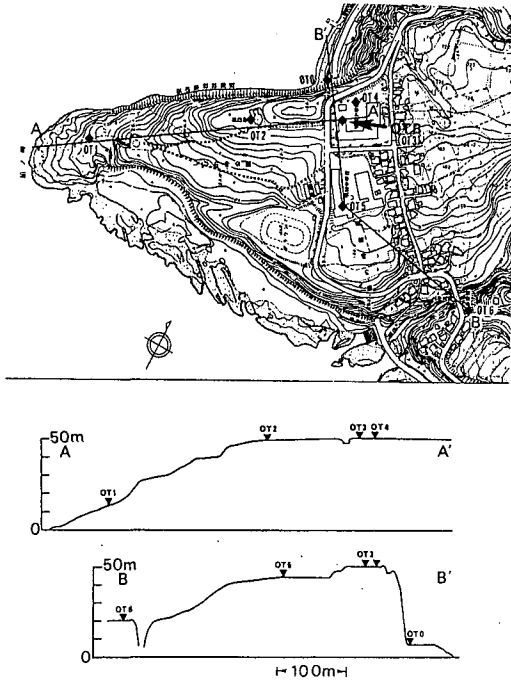


図 3.4.5 OTB 周辺の地形および小地震アレイ観測点

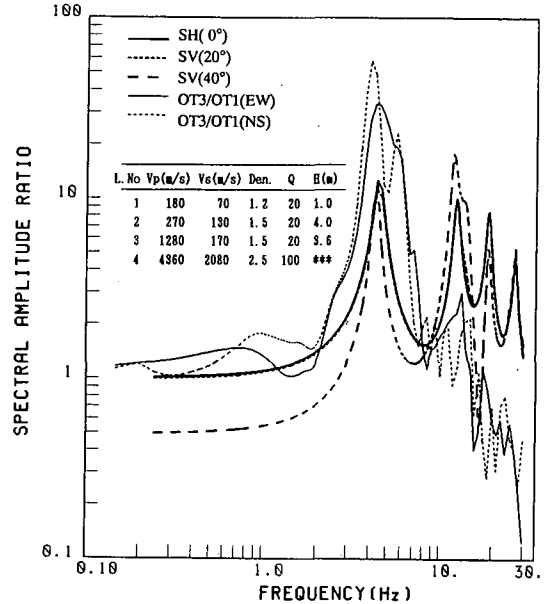


図 3.4.6 OTB における岩盤サイトとのスペクトル比と重複反射理論による計算結果の比較

は 30~40 倍に達している。OTB (OT3) とのスペクトル比を一例として図 3.4.6 に示す。地盤調査の粗解析結果から求めた速度構造をもとに、S 波の重複反射により 4 Hz 程度の卓越と 20 倍程度の増幅をおおよそ説明できる。ただし、増幅度で 2~3 倍程度、観測スペクトルの短周期での減衰等、説明が不完全であるが、構造物との相互作用や地盤調査の精査を待って改めて検討したい。

M6.3 の地震の余震と考えられる記録がいくつか得られているが、震動レベルの違い (M の差に相当) によるスペクトル形状を図 3.4.7 により検討した。M が 3.7 以下 (最大加速度は数 10 cm/s<sup>2</sup> 以下) ではほぼ 4 Hz に卓越しており、小地震の例と同等である。M4.1 の場合 (最大加速度は 175 cm/s<sup>2</sup>) は 3.5 Hz, M6.3 では 3 Hz と 4 Hz にピークを持つ。したがって、震動レベルの上昇に伴い地盤の非線形性が生じたと考えることも可能である。ただし、最大余震の EW 成分のランニングスペクトルを見ると (図 3.4.8), 大振幅の近傍では 3 Hz と 4 Hz の波がほぼ同じ時刻に現れており、4 Hz の卓越は線形的に増幅したものと考え、3 Hz の大振幅は M が大きいために見かけ上生じたとする考え方も可能である。地盤の非線形性については不明確であるが、最大余震で 1586 cm/s<sup>2</sup> もの加速度を記録したことは、線形的増幅が大きく寄与したと考えるべきであろう。

また、地形が地震動に及ぼす考察<sup>18)</sup>を参考に本観測地点の崖の影響を見積もると、大きな影響は 10 Hz 以上の帯域でしか現れてこない。したがって、1586 cm/s<sup>2</sup> という大加速度に至った主原因は、段丘堆積層による増幅であり、地形による 2・3 次元的波動伝播の影響は、あるとしても 1 オーダー少ないと言える。

記録の特徴として、1586 cm/s<sup>2</sup> の大加速度であったことのほかに、水平 2 成分に約 4 倍もの差があり、極めてまれな例といえる。M6.3 にひき続いた余震では、水平 2 成分の最大加速度の比は、3 倍



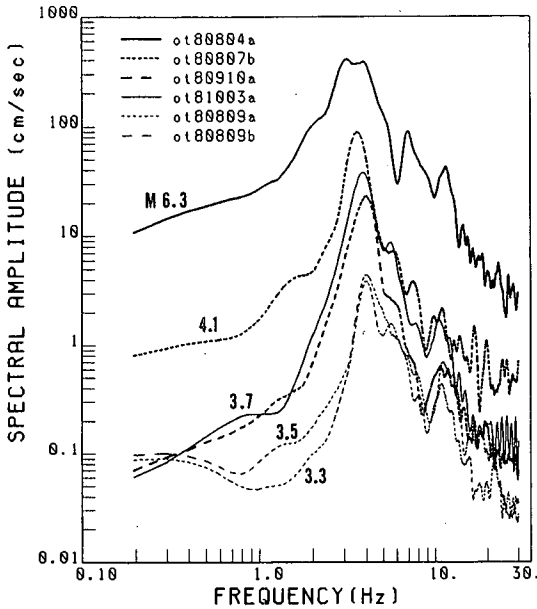


図 3.4.7 OTBにおける震動レベルの異なる(Mの違い) スペクトル(EW成分)の比較

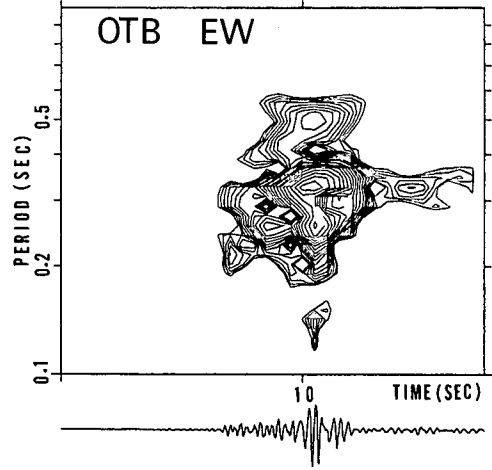


図 3.4.8 OTBにおける最大余震記録(EW成分)のランニングスペクトル

程度になる例もあるが、ほぼ等しいものから2倍程度以内の例が多い。さらに、その余震群ではP波とS波の振幅比が大きく異なる例が含まれる。図3.4.6から、NS成分(ほぼTransverse成分)とEW成分(ほぼRadial成分)の増幅度はほぼ等価であり、最大余震で水平2成分間にこのような大きな差が現れたことは、震源にその原因を求めざるを得ない。遠地P波から求めた震源解(菊地, 1993: 私信)に基づき、射出角 $110^\circ$ 程度を仮定してSV波とSH波の震源放射係数の比を求めると、観測されたEW/NSの大きな比をおおよそ説明することができる。したがって、大加速度に寄与したもう一つの要因は震源放射特性、つまり、OTBの方向にSV波が卓越し、その結果としてEW成分の振幅を大きくしたと言える。

観測点である校舎では屋外のガスボンベから室内に引き込んでいる配管にひびが入ったほか、棚のものや壁に掛けたものが落下するなどの被害があったものの、校舎の構造的被害は皆無であり、窓ガラスも割れていない。観測点から100 m程度西にあり、地学環境が類似した神社(OT2)では、石灯籠の転倒、こま犬の回転等があった。また神社木造建物の柱の基礎部分が縦に割れるなどの被害があった。しかし、応答が100 cm/sを越える(減衰5%以下)地震動であったにもかかわらず、いずれも極めて軽微な被害であったことは、釧路沖地震(1993年)と同様、地震動強さと被害との関係について問題を提起したと言えよう。

### 3.4.4 液状化発生日の地震動

図3.4.1中のKNK観測点は北海道大学檜山地方演習林敷地内にあり、強震計は1階建て鉄筋コンクリート造の床に設置した。この演習林敷地では、7月12日の本震の際に地盤の液状化が発生し、建築物に亀裂が入るなどの被害が生じた。またKKJは、北大地震予知観測センター所有の観測壕(岩盤)

内にある。なお、両観測点間の距離は約5 kmである。KNKとKKJで同時に得られた記録を比較することにより、本震時に液状化現象を起こした軟弱地盤の地震応答に検討を加えた。

KNKでは加速度型強震計(PDR-1)を、KKJで村松式速度型強震計(VS-1)を用いた。KKJで得られた速度記録を微分して加速度記録に変換し、解析を行った。

両観測点で共通に得られた強震動記録は8月8日に江差沖で起こったM6.3の最大余震とその余震のM3.9~M4.1の4地震の合計5地震によるものである。これらの地震の震央距離はKNKで約26 km, KKJで約31 kmである。また、両観測点の方位はほぼ等しく、震源放射特性の影響は同等とみなし得る。

図3.4.9に8月8日4:42(M6.3)と9:57(M4.1)の地震によるEW成分の30秒間の加速度記象を示す。KNKでの最大振幅は、両地震ともKKJの約3倍の大きさである。また、見かけ上の卓越周波数はKNKで約3 Hzであるのに対しKKJでは約5 Hzで地盤応答の違いが現れている。小地震の波形に注目すると、KKJでは孤立的なS波であるが、KNKではS波以降にも後続波群がみられ、継続時間が長くなっている。S波以降の10秒間のスペクトルを求め、図3.4.10に5つの地震の結果を重ね

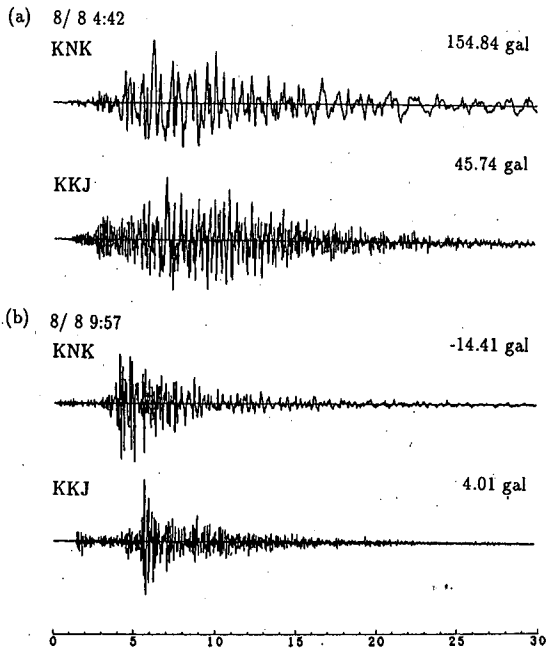


図3.4.9 観測波形例(EW成分)(a) 8/84:42(M6.3),  
(b) 8/89:57(M4.1)

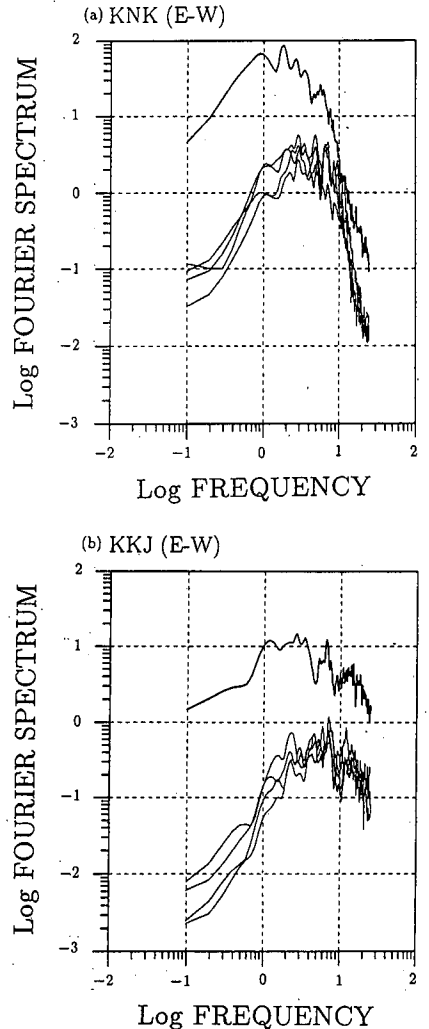


図3.4.10 加速度記録のEW成分のS波スペクトル  
(EW成分)(a) KNK, (b) KKJ

て示す。ただし、小振幅の記録では周波数約 0.5 Hz 以下の信頼性は低い。両観測点とも余震 (M4 程度) のスペクトルのばらつきは 2 倍程度の範囲におさまっている。また、最大余震のスペクトルはその余震のスペクトルと比べると低周波数側では 100 倍、高周波数では 10 倍ほど大きい。岩盤サイトである KKJ のスペクトル形状は平均的に平坦であるのに対し、軟弱地盤の KNK では高周波数でのスペクトル振幅の減少が大きい。特に、KNK の本震のスペクトルにおいてその傾向が顕著に現れている。この原因としては軟弱地盤の減衰効果として理解され得るが、KNK の地震計が建物の内に設置されていることから、建築物と地盤の相互作用による影響を受けた可能性も十分考慮する必要がある。

軟弱地盤の地震応答特性を調べるために、KKJ に対する KNK のスペクトル比を求め図 3.4.11 に示す。小地震のスペクトル比 (細線) に着目すると、軟弱地盤 KNK での地震動は 1 Hz 以下で約 20 倍、1~3.5 Hz で平均的に 10 倍に、さらに 10 Hz 程度まで比のピークはほぼ同様の値を示す。10 Hz を越えるとスペクトル比は急激に減少し、12 Hz 程度で KKJ と KNK の振幅が逆転する。最大余震のスペクトル比 (太線) は小地震のそれに比べ全体的に小さくなっており、特に 9 Hz 以上で顕著である。また、小地震にみられる 3 Hz、5 Hz、6.5 Hz などのスペクトル比=10 程度が、最大余震では 3~4 程度に低下している。弱震時と比べて強震時に地盤の増幅度が低下したことを示しており、最大余震のときに地盤の非線形効果が現れたものと考えられる。

### 3.4.5 まとめ

1993 年北海道南西沖地震の余震域からややはずれて発生した最大余震とその余震群の強震記録を中心に解析した。最大余震 (8 月 8 日、M 6.3) で OTB において  $1586 \text{ cm/s}^2$  という大加速度を記録した理由として筆頭にあげるべきことは、ごく表層による増幅であり、卓越周波数近傍で約 40 倍、時間領域では加速度で 4~5 倍、速度で約 10 倍増幅した。第 2 の要因は、OTB が震源放射特性の影響で最も振幅を大にする位置にあったことである。したがって、OTB での大加速度は、軟弱な表層と震源の放射特性の影響を重畳して受けた結果であると結論できる。

7 月 12 日の本震時に液化化が発生した地点と岩盤サイトでの地震動の比較を通じて、最大余震時にも、地盤の非線形性が生じた可能性を指摘した。最大余震時の最大加速度は  $150 \text{ cm/s}^2$  程度と、OTB に比べ 1 桁小さいにもかかわらず非線形性の影響がみられることは、地盤の地震動に対する挙動の多様性を示唆していると言えよう。

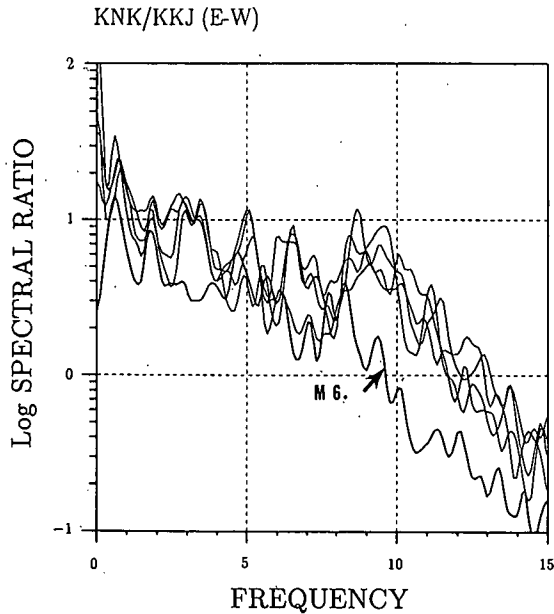


図 3.4.11 KKJ に対する KNK の S 波のスペクトル比 (EW 成分) (太線は最大余震を示す)

### 3.5 アンケート方式による震度調査

強震観測網の整備により多くの強震記録が得られるようになってきたものの、得られる記録は断片的な点の情報であり、地震動入力の分布を詳細に把握できるまでには至っていない。地震動入力の分布を詳細に求める方法として、アンケート方式による震度調査が実施され、地震災害を理解する基本的な資料として利用されている。この地震で各機関・研究者が行った震度調査の結果を整理して示す。

#### 3.5.1 気象庁発表による震度

気象庁発表の各地の震度は下記のとおりであり、震度VIの地点はなく寿都など4箇所がVであった<sup>19)</sup>。被害の集中した奥尻には気象官署がなく、後に臨時観測点が設けられ余震の震度が報告されている。

震度V：小樽、寿都、江差、深浦

IV：倶知安、苫小牧、室蘭、函館、むつ、  
青森

III：羽幌、留萌、岩見沢、札幌、帯広、八戸、秋田

II：稚内、旭川、浦河、盛岡、酒田、新庄

I：雄武、網走、釧路、広尾、宮古、大船渡、  
仙台、山形、新潟、輪島、小名浜

その分布図を図3.5.1に示す。

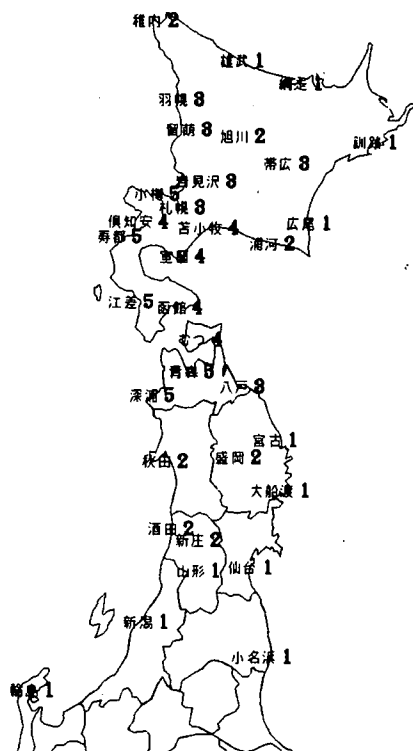


図3.5.1 気象庁発表の震度分布

#### 3.5.2 アンケート方式による震度調査

##### (1) 北海道の市町村別震度

北海道大学工学部耐震工学研究室(高井ら<sup>20)</sup>)が中心となり、この地震による北海道全域の揺れの分布を知ることが目的に、市町村を単位として震度調査を行っている。気象庁発表の震度は気象官署が所在する地点の震度であり、町を代表する平均的な震度ではない。これに対し、アンケート方式による広域震度分布調査による市町村別震度は町の平均的震度を求める工夫が必要とされる。したがって、震度調査対象者はできるだけ町内に均一に分布していることが調査要件となる。この地震の発生は夜間であったため、役場職員のほとんどが在宅中であったことから役場職員を調査対象とした震度調査が実施された。職員を対象とするとアンケートの回収率が高くなることも調査対象者とした理由の一つである。

地震発生2日後に、北海道町総務部防災課経由で道内212全市町村に調査を依頼し、約2か月後にアンケート票の回収を終了した。各市町村へのアンケート配布枚数は各市に50部、各町村に25部ず

つである。ただし、同様の調査が同時期に重複するのを避けるため、室蘭工業大学との間で調査票配布担当地域の調整を行った。表 3.5.1 に市町村別に求められた震度とその解析に用いられたアンケート枚数が示されている。震度の値は小数点以下を四捨五入すると気象庁震度階級に一致する（以下、アンケート方式による震度の表現は同様である）。これによれば震度の最大値は奥尻町の 5.5（気象庁震度階Ⅵの下限）である。

図 3.5.2 は平滑化した等震度線図である。等震度線図にみられる特長は震源を中心にほぼ同心円を描いていることである。太平洋側で発生した地震（例えば 1993 年釧路沖地震）にみられる特長は東

表 3.5.1 1993 年北海道南西沖地震の震度調査一覧

市町村名	解析 枚数	算定 震度	市町村名	解析 枚数	算定 震度	市町村名	解析 枚数	算定 震度	市町村名	解析 枚数	算定 震度	市町村名	解析 枚数	算定 震度
[石狩支庁]			ニセコ町	28	4.4	名寄市	50	0.9	紋別市	49	0.6	三石町	20	3.0
札幌市	4744	3.5	真狩村	24	4.5	富良野市	49	2.5	東藻琴村	21	1.1	浦河町	28	3.1
江別市	214	3.5	留寿都村	25	4.2	鷹栖町	20	2.8	女満別町	19	0.7	様似町	24	2.7
千歳市	60	3.5	喜茂別町	23	4.2	東神楽町	18	2.0	美幌町	30	0.0	えりも町	20	0.5
恵庭市	187	3.5	京極町	23	4.3	当麻町	25	2.3	津別町	22	0.0	[十勝支庁]		
広島町	168	3.5	倶知安町	29	4.2	比布町	24	1.4	斜里町	24	0.0	帯広市	59	2.9
石狩町	284	3.6	共和町	22	4.3	清里町	23	1.8	清里町	25	0.0	音更町	13	1.9
当別町	23	3.7	岩内町	27	4.9	上川町	12	0.4	小清水町	25	0.2	士幌町	23	1.4
新篠津村	24	3.6	泊村	21	4.0	東川町	21	1.0	端野町	20	0.5	上士幌町	23	1.2
厚田村	16	4.0	神恵内村	24	4.4	美瑛町	21	1.2	馴子府町	22	0.0	鹿追町	21	2.4
浜益村	23	3.4	積丹町	23	4.1	上富良野町	21	2.4	置戸町	23	0.0	新得町	16	2.2
[渡島支庁]			古平町	24	4.2	中富良野町	19	3.0	留辺蕊町	26	0.0	清水町	23	2.9
函館市	36	4.4	仁木町	19	4.2	南富良野町	25	1.7	佐呂間町	21	0.0	芽室町	24	2.5
松前町	23	4.5	余市町	43	4.4	占冠村	21	1.4	常呂町	22	0.0	中札内村	24	1.3
福島町	22	4.9	赤井川村	21	4.3	和寒町	22	3.0	生田原町	24	0.0	更別村	24	1.4
知内町	23	4.1	[空知支庁]			剣淵町	27	3.0	遠軽町	27	0.4	忠類村	20	1.8
木古内町	24	4.8	夕張市	49	2.9	朝日町	22	2.4	丸瀬布町	19	0.0	大樹町	24	1.3
上磯町	29	5.1	岩見沢市	74	3.4	風速町	23	1.7	白滝村	25	0.6	広尾町	19	1.4
大野町	16	4.6	美瑛市	50	3.2	下川町	25	1.7	上湧別町	26	0.0	幕別町	27	2.8
七飯町	23	4.5	芦別市	53	2.2	美深町	24	1.5	湧別町	21	0.6	池田町	17	1.9
戸井町	17	4.0	赤平市	50	2.4	音威子府村	24	1.0	滝上町	24	0.0	豊頃町	22	2.7
恵山町	23	4.2	三笠市	42	3.2	中川町	23	2.2	興部町	22	1.5	本別町	21	1.5
機法華村	18	4.1	滝川市	54	3.5	[留萌支庁]			西興部村	23	0.0	足寄町	24	1.2
南茅部町	22	3.9	砂川市	55	3.3	留萌市	56	3.5	雄武町	24	0.8	陸奥町	24	0.9
鹿部町	20	4.3	歌志内市	42	2.7	増毛町	24	3.4	[胆振支庁]			浦幌町	23	2.6
砂原町	25	4.5	深川市	49	2.9	小平町	22	3.8	*室蘭市	3583	4.1	[釧路支庁]		
森町	24	4.8	北村	20	3.5	苫前町	24	3.2	▽苫小牧市	13	3.5	釧路市	53	1.0
*八雲町	588	4.6	栗沢町	23	3.5	羽幌町	24	3.2	*登別市	2312	4.2	釧路町	19	1.7
長万部町	24	5.4	南幌町	23	3.6	初山別村	28	2.4	伊達市	56	4.4	厚岸町	22	1.8
[檜山支庁]			奈井江町	25	3.1	遠別町	22	2.7	豊浦町	24	4.4	浜中町	20	0.8
江差町	22	5.0	上砂川町	20	2.7	天塩町	21	2.7	虻田町	26	4.1	標茶町	23	1.5
上ノ国町	21	4.8	由仁町	23	3.2	幌延町	23	2.9	洞爺村	18	4.4	弟子屈町	24	1.0
厚沢部町	24	5.2	長沼町	26	3.6	[宗谷支庁]			大滝村	20	4.3	阿寒町	27	1.6
乙部町	24	5.2	栗山町	21	3.4	稚内市	47	1.9	壮瞥町	12	4.1	鶴居村	19	0.7
熊石町	26	5.0	月形町	22	3.7	猿払村	25	2.1	白老町	22	4.0	白糠町	23	2.3
大成町	24	4.9	浦臼町	24	3.4	浜頓別町	26	1.0	早来町	23	3.6	音別町	21	2.7
奥尻町	25	5.5	新十津川町	24	3.5	中頓別町	20	0.0	追分町	19	3.6	[根室支庁]		
瀬棚町	24	5.3	妹背牛町	19	3.0	枝幸町	22	0.5	厚真町	22	3.8	△根室市	-	0.0
北檜山町	24	5.2	秩父別町	20	3.1	歌登町	24	1.0	釧路町	24	3.8	別海町	22	0.6
今金町	26	5.2	雨竜町	25	3.1	豊富町	26	2.8	穂別町	26	3.3	中標津町	23	0.8
[後志支庁]			北竜町	25	3.2	礼文町	23	1.0	[日高支庁]			標津町	25	0.1
小樽市	407	3.9	沼田町	22	3.2	利尻町	24	1.6	日高町	22	2.4	羅臼町	23	0.7
島牧村	25	4.8	幌加内町	21	2.3	利尻富士町	22	1.9	平取町	25	3.2			
寿都町	24	4.8	[上川支庁]			[網走支庁]			門別町	22	3.5			
黒松内町	25	5.1	旭川市	69	2.4	北見市	52	0.7	新冠町	22	3.6			
蘭越町	24	4.7	士別市	42	2.6	網走市	54	0.5	静内町	29	3.5			

\* 室蘭工業大学の調査による（後藤・他、1994）

△ 全員無感との回答による

▽ 他市町村へ配布分のみより算定

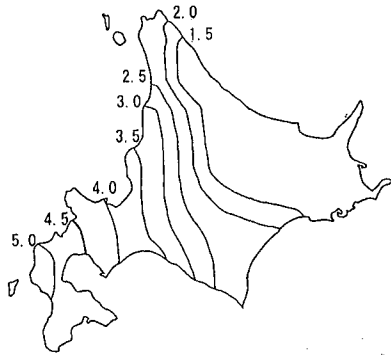


図 3.5.2 等震度分布

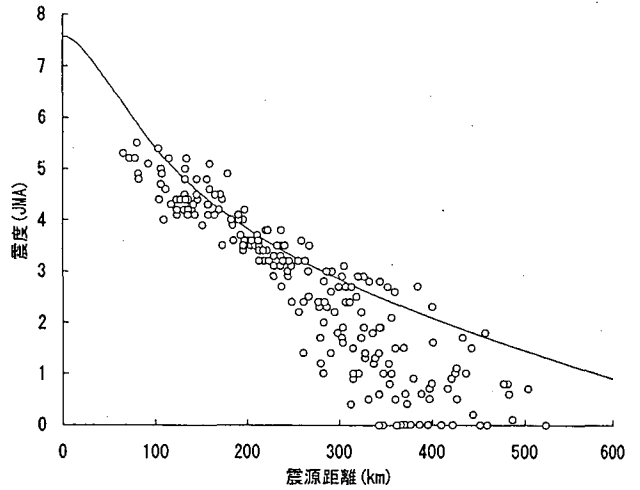


図 3.5.3 震度と震央距離の関係

西方向への震度の距離減衰が小さいことであり、震度分布はほぼ東西方向を長軸とする楕円となるのが普通であるが、この特長はここでは認められない。震度と震央距離との関係が図 3.5.3 に示されているが、図に示されている河角によるわが国の平均的震度減衰曲線に比べ、この地震の距離減衰がかなり大きいことがわかる。マクロな地下構造が影響したものであり、日本海側で発生した地震が与える北海道の震度分布に現れる特長と思われる。

(2) 噴火湾沿岸市町村における詳細震度分布

室蘭工業大学(後藤ら<sup>21)</sup>)が中心となって、噴火湾沿岸の19市町村を対象に震度調査を行っている。その調査目的は当該市町村の平均震度を求めるほかに、市長村内の揺れの違いをも評価することをねらっている。広域マイクロゾーニングとでもいうべき特長ある調査である。図 3.5.4 に調査対象市町村とその平均震度を示す。アンケートの配布・回収は教育委員会を經由し、中学校を中心に行っ

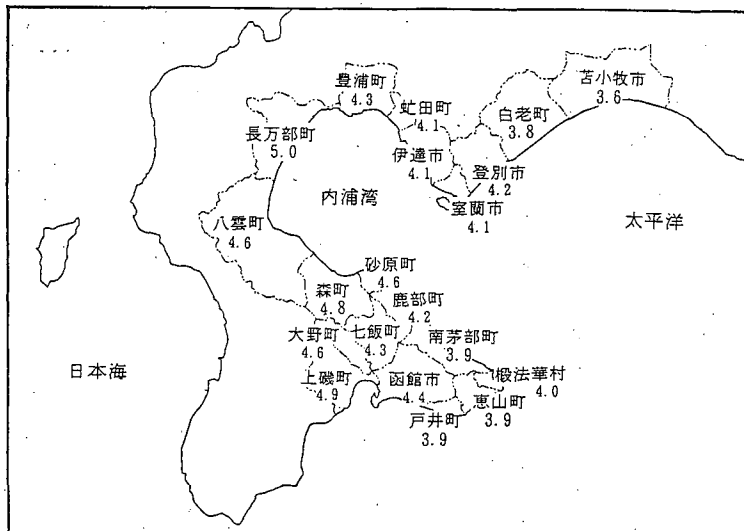


図 3.5.4 噴火湾沿岸市町村における震度分布

た。その他、小学校・高校・企業等にも配布し、調査密度を上げている。アンケートの総配布枚数は40119枚で、そのうち回収枚数は24608枚であった（回収率61.3%）。最終的に、当該地域における市町村の町丁目を単位に震度を算定している。

図3.5.5は河内ら<sup>22)</sup>による噴火湾沿岸の中心地域である室蘭市の町丁目別詳細震度分布図である。なお地域内の震度の違いを表層地質の差違に基づいて説明している。

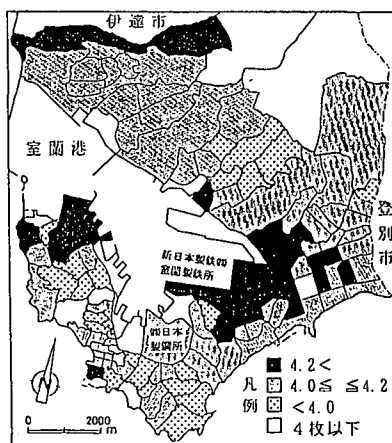


図3.5.5 室蘭市の町丁目別震度分布

### (3) 道央札幌圏における詳細震度分布

札幌市・小樽市・江別市・恵庭市・広島町・

石狩町・当別町の道央中心地域におけるマイクロゾーニングが北海道大学工学部耐震工学研究室（安部ら<sup>23)</sup>により行われている。同地域は北海道の政治・経済等の中心となっており、地震被害を被ったときの北海道の他地域へ与える影響は大きく防災上重要な地域であるため、当該地域への地震動入力評価のためにこれまでの地震においても同様の調査を続けてきている。この地震では当該地域は震度Ⅲ程度であったが、以上の観点により、同年に発生した釧路沖地震で行った震度調査と同一の方法で調査票の配布・回収・解析を行っている。すなわち、札幌市5000枚、小樽市500枚、江別市300枚、恵庭市200枚、石狩町420枚、広島町200枚を配布している。調査は釧路沖地震のときに解答してくれた市町村役場職員を対象としている。調査票の回収率は約90%で、釧路沖地震のとき（約80%）よりも高い。震度は国土数値情報の3次メッシュを4等分した一辺約500mの区画を単位に計算している。得られた震度分布図を図3.5.6に示す。表層地質ごとの震度差を計算しており、釧路沖地震との間に高い相関を得ている。地震波の到来方向が逆の2つの地震による震度分布を比較して得た結果であり、札幌圏は表層地質が震度の分布パターンの多くを決定付けているようである。

### (4) 奥尻島における集落別震度分布

北海道大学・大阪市立大学・東京都立大学が共同でこの地震の被害中心地となった奥尻島の全世帯を対象にアンケートによる各種被害調査を行っている。この調査票には震度評価に関するいくつかの質問が含まれており、これから奥尻島の集落別震度が算定されている（岡田ら<sup>24)</sup>）。この調査は地震発生約1か月後に調査票を1604の全世帯に配布し、1014の回収をみている（回収率63.2%）。調査票は被害・避難行動・人的被害に関するものなど多くの質問項目からなっているため、解答者の負担を考慮すると、従来のアンケートによる震度調査票をそのまま添付することはできなかった。そこでいくつかの項目を抜粋し、それから震度を簡略的に求めることを試みている。図3.5.7にその震度分布図を示す。これによると最大震度は富里の5.9（気象庁震度階Ⅵの中程度）であり、最小震度は勘太浜の4.4（気象庁震度階Ⅳの上限）である。その他震度が大きかったのは青苗地区の6区・7区が震度5.9であった。島はほぼ全域が第三紀以前の岩盤に被われているが、島南端の青苗地区に唯一沖積層が堆積しており、この地区の震度は大きくなっている。震度が小さかったのは震源距離がむしろ近い、島の北側であったようである。

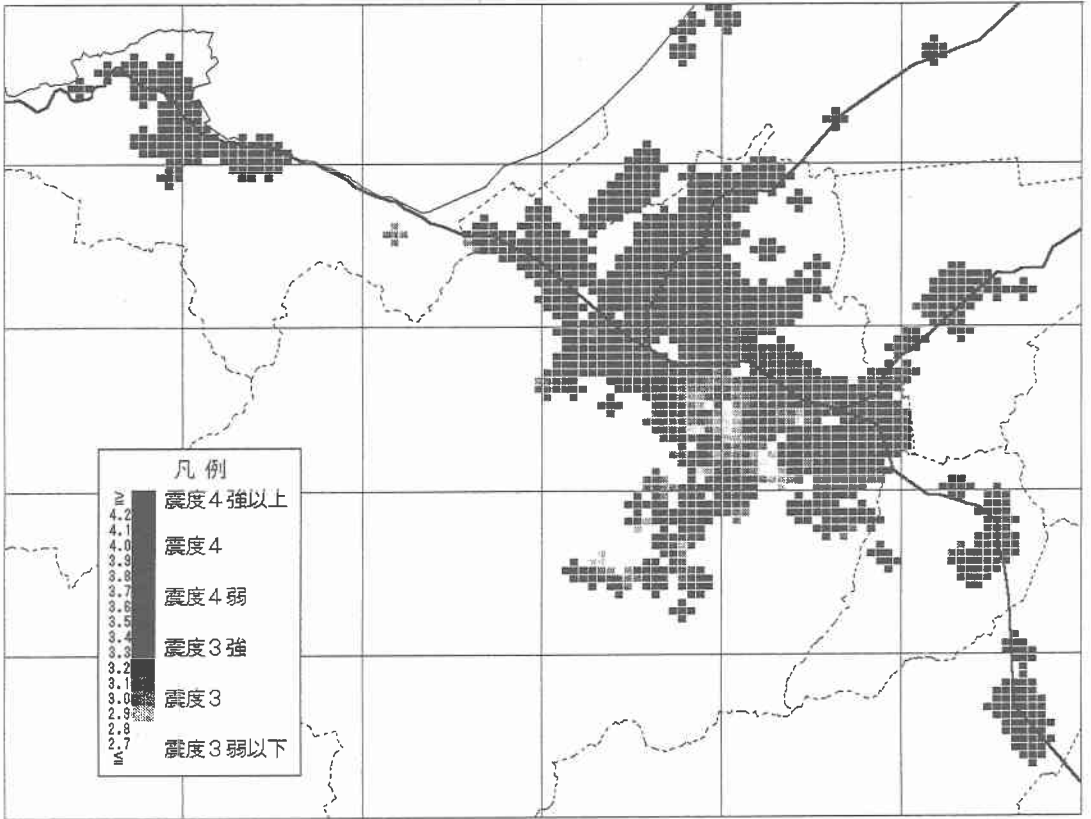


図3.5.6 道央札幌圏における震度分布

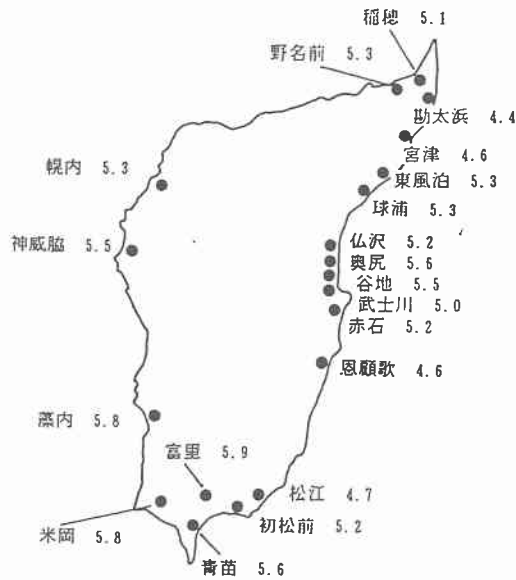


図3.5.7 奥尻島における集落別震度分布



### 3.6 微動と地盤振動

#### 3.6.1 地震観測点における常時微動測定

今回の地震の震源域付近にある警報地震計の設置点の地盤の地震動特性を把握するため、常時微動測定を行った。(財)鉄道総研で規格化した方法で測定し解析した。すなわち、鉄道総研製の微動計PICを用いて、1/100秒サンプリングで4096個(約41秒間)の測定を3回繰り返す、それぞれに対してFFTによりフーリエスペクトルを算出する。このとき周波数領域でハニングウィンドウを80回かけて平滑化したうえで3回分を平均して最終的なフーリエスペクトルとした。周波数分解能は約0.025 Hz、バンド幅は約0.4 Hzとなっている。また、それぞれの測定ごとに上下スペクトルに対する水平スペクトルの比を算定し、この3回分を平均してQTスペクトル<sup>25)</sup>を算出している。

これから算定されたフーリエスペクトルを図3.6.1に、QTスペクトルを図3.6.2にそれぞれ示す。これらから読み取られる卓越振動数、増幅倍率などを表3.6.1にまとめた。

これらによると、黒松内の地盤は、5 Hz 弱と比較的高い固有振動数(F)で3倍強の増幅倍率(A)が推測されている。そのほか、長万部では2~3 Hz・3倍程度、八雲では約4 Hz・7倍程度、七飯では約0.6 Hz・3倍強、木古内では約1.4 Hz・6倍程度、蟹田では約1 Hz・5倍弱となっている。

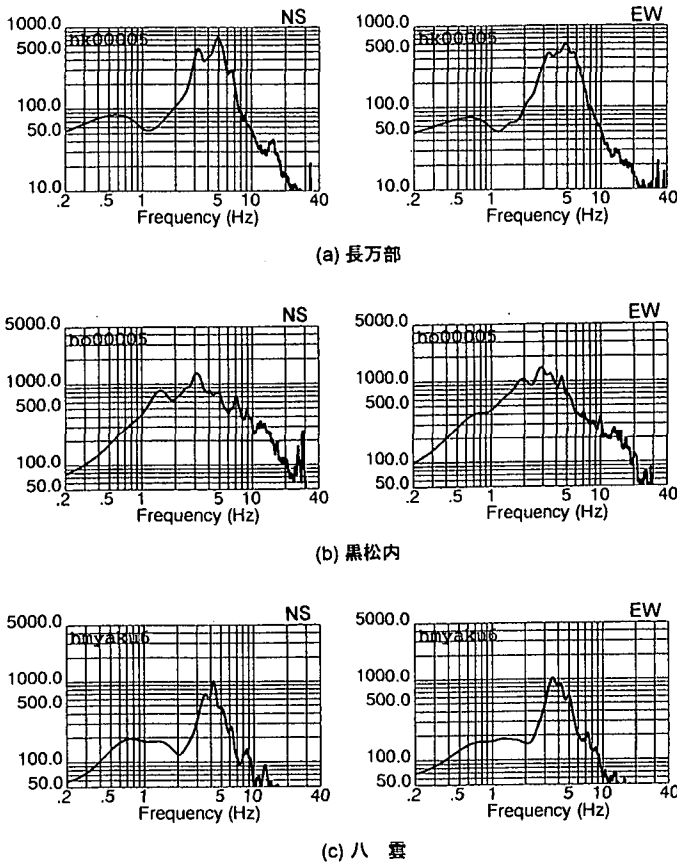
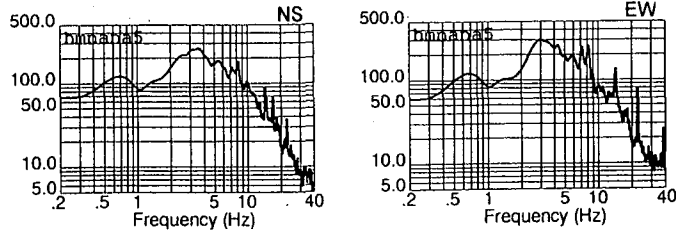
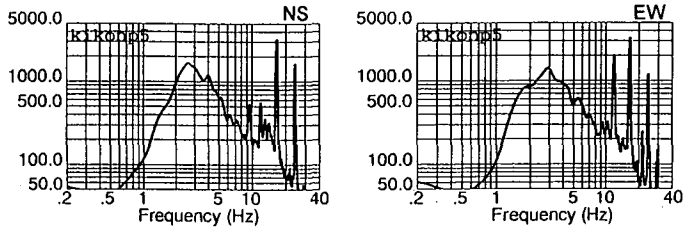


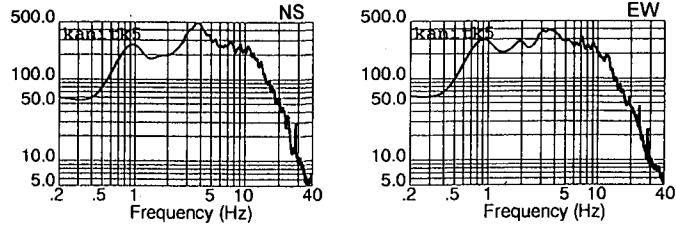
図3.6.1 常時微動のフーリエスペクトル



(d) 七飯



(e) 木古内

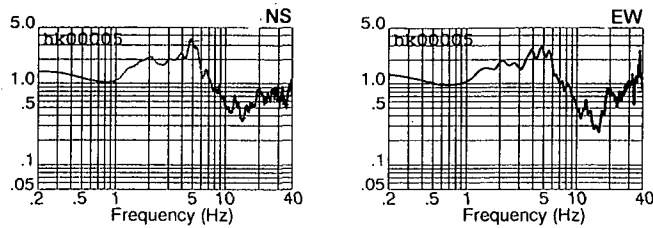


(f) 蟹田

図 3.6.1 常時微動のフーリエスペクトル (つづき)

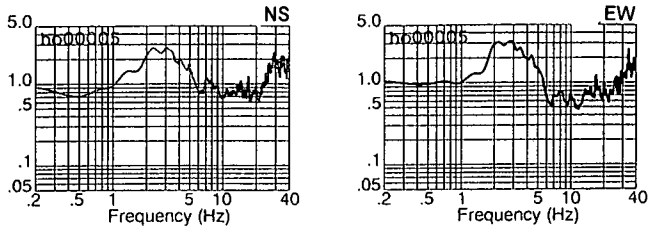
表 3.6.1 卓越振動数, 増幅倍率

地点名	フーリエ スペクトル		QTスペクトル			
	卓越振動数(Hz)				増幅倍率	
	NS成分	EW成分	NS成分	EW成分	NS成分	EW成分
黒松内	4.88	4.83	4.81	4.79	3.62	2.90
長万部	3.10	2.88	3.03	2.83	2.74	3.21
八雲	4.25	3.56	4.30	3.61	7.15	6.18
七飯	3.54	3.03	0.61	0.61	3.26	3.23
木古内	2.59	2.91	1.25	1.44	5.36	6.08
蟹田	3.74	3.59	1.00	0.95	4.50	5.03

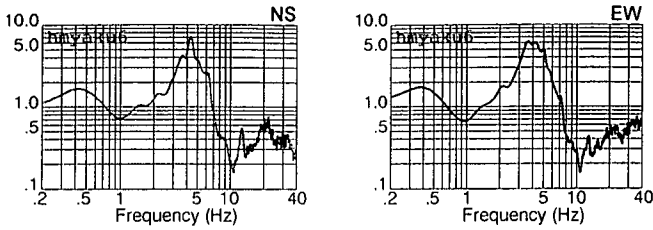


(a) 黒松内

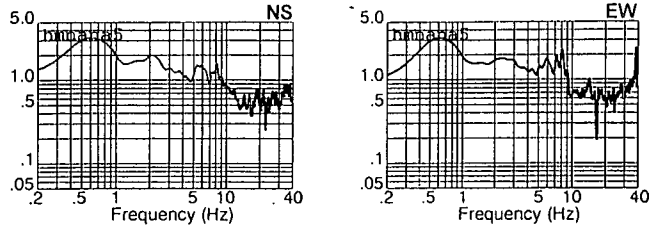
図 3.6.2 常時微動のQTスペクトル



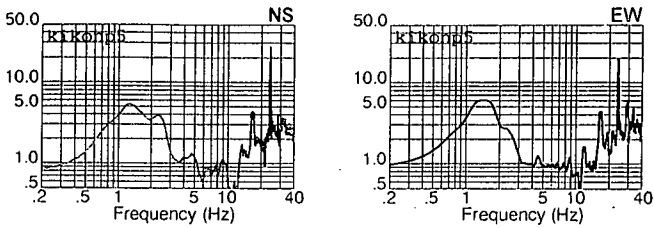
(b) 長万部



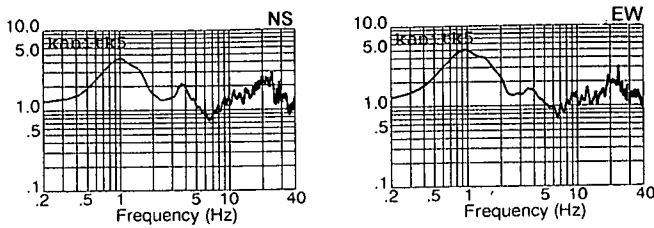
(c) 八雲



(d) 七飯



(e) 木古内



(f) 蟹田

図 3.6.2 常時微動の QT スペクトル (つづき)

これらの地点の液状化しやすさ指数  $K$  値 ( $=A^2/F$ )<sup>25)</sup>を算定すると、黒松内は約2、長万部は約3、八雲は約10、七飯は約15、木古内および蟹田は約25となる。推定した  $K$  値によると、各表層地盤の卓越振動数で同一の大きさ・継続時間の基盤地震動に対しては、木古内・蟹田が最も液状化しやすく、七飯、八雲がこれに続く。黒松内、長万部はかなり液状化しにくいと判断される。これらは警報地震計が設置された鉄道駅付近の地盤の性質であり、付近の地盤および構造物には外観上なんらの被害も認められていない。

### 3.6.2 常時微動と地震動

各観測点における常時微動の QTS の最大ピーク振動数は、図 3.6.3 に示す地震動のフーリエスペクトルの最大ピーク振動数と概ね一致し、表層地盤の地震動特性への影響の大きさを示している。ただし、黒松内と八雲の2観測点は例外で、地震動の最大ピーク振動数 (2~3 Hz) は QTS の最大ピーク振動数と異なっている。2~3 Hz の振動は最大ではないが、そのほかの観測点でも共通に卓越しているところから、震源からのものと推測される。

記録された地震動波形の上下動成分は、木古内・蟹田を除いてノイズが多少混入している。しかしノイズの影響は高い振動数成分に現れるものと考えられるので、地震動の QTS を算定して、常時微

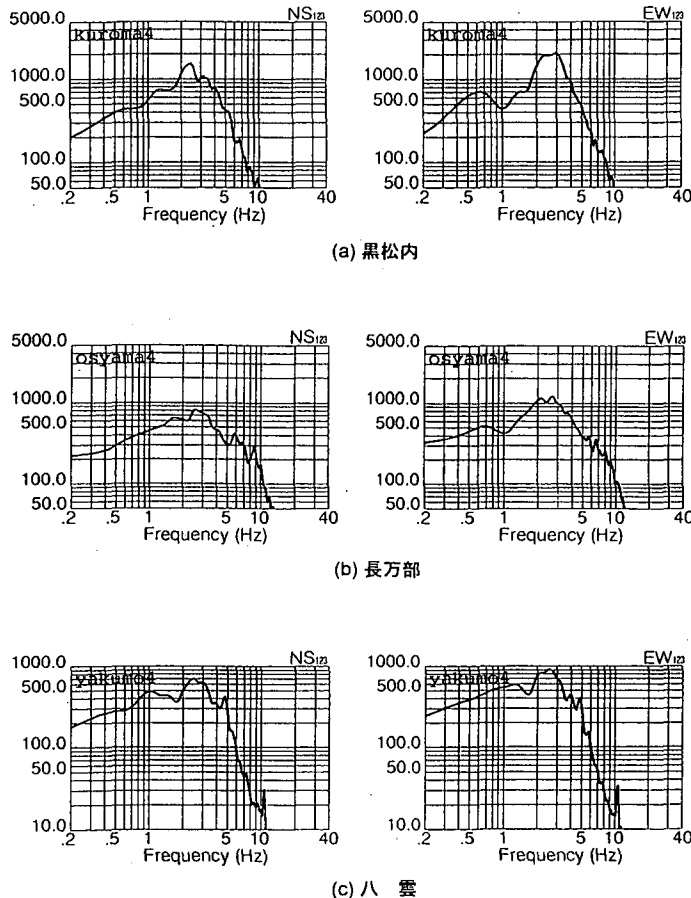
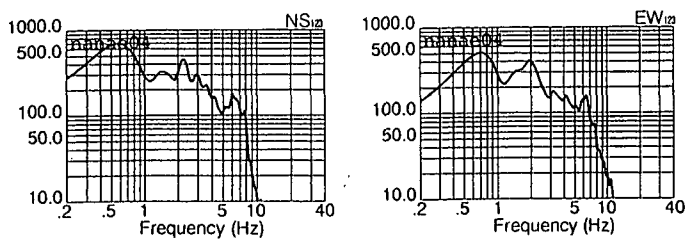
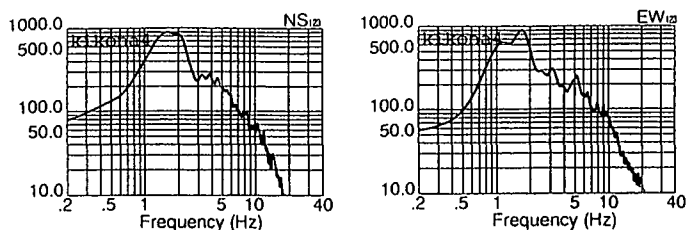


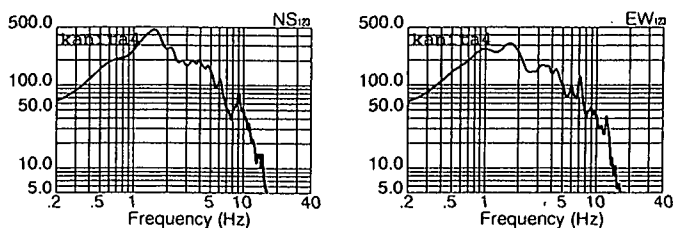
図 3.6.3 地震動のフーリエスペクトル



(d) 七飯



(e) 木古内



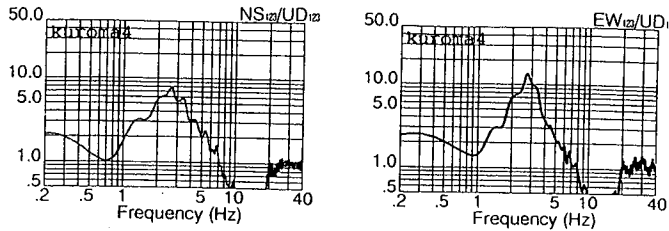
(f) 蟹田

図 3.6.3 地震動のフーリエスペクトル (つづき)

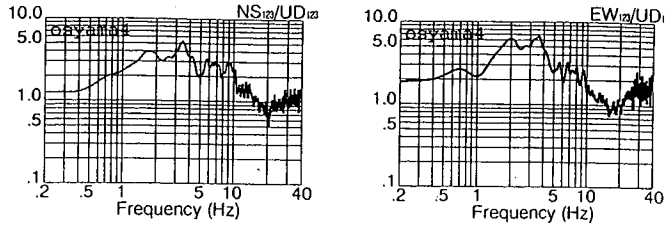
動の QTS と比較する。主要動部分約 41 秒間 (平滑化ハニング 80 回) を対象に QTS を算定した結果を図 3.6.4 に示す。また、大きな地震動が観測された黒松内では、時々刻々の QTS の変化をみるため、約 10 秒間 (平滑化ハニング 5 回) の区間を 5 秒ずつずらして解析した。結果の一部を常時微動の QTS とあわせて図 3.6.5 に示す。

図 3.6.5 によると、QTS の形状やピーク振動数については地震動の弱い部分と常時微動とで概ね一致している。このことから地震動でも QTS の手法で表層地盤の特性を把握できるものと考えられる。図 3.6.5 は常時微動から推測される特性が大きな地震動により急激に塑性化し、地盤の固有振動数が低下していることを示唆している。時間の経過とともに地震動が小さくなり、固有振動数はもとの値に戻っていく様子が認められるが、塑性化の程度が大きいためか復元しきれていない。これらの QTS のピーク振動数と該当区間の加速度値から 5 秒ごとの  $G/G_0$  と  $\gamma$  を推定していわゆる  $G-\gamma$  図を作成すると図 3.6.6 のようになる。なお図 3.6.6 に示した曲線群は石原<sup>20)</sup>によりまとめられた多くの研究者による砂質土についての実験データである。この図によると、今回の地震では最大  $10^{-2}$  程度のひずみが生じ、剛性は 20% にまで低下しているものと推測される。その後振幅が小さくなるとともに剛性も回復しているが、記録の終端部でも 50~60% 程度しか回復していない。

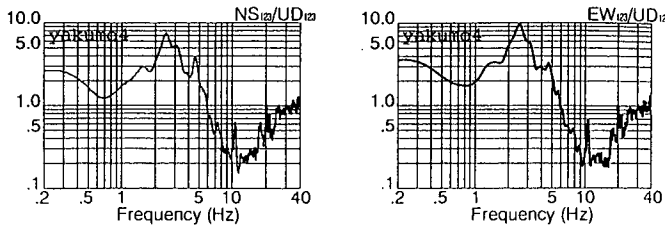
なお、付近の地質データはないが、基盤の S 波速度を 600 m/s と仮定すると、常時微動の QTS から



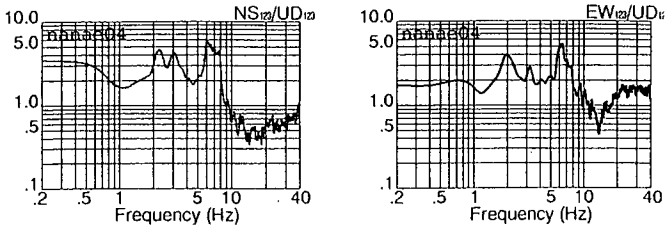
(a) 黒松内



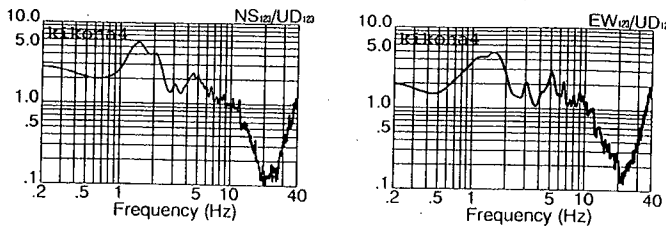
(b) 長万部



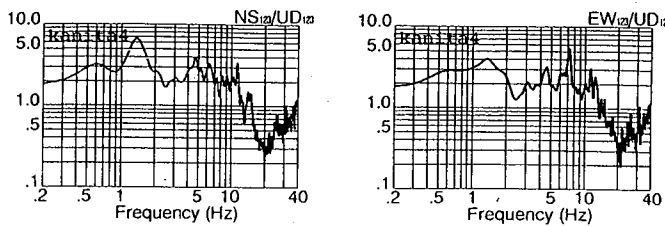
(c) 八雲



(d) 七飯



(e) 木古内



(f) 蟹田

図 3.6.4 地震動のQTスペクトル

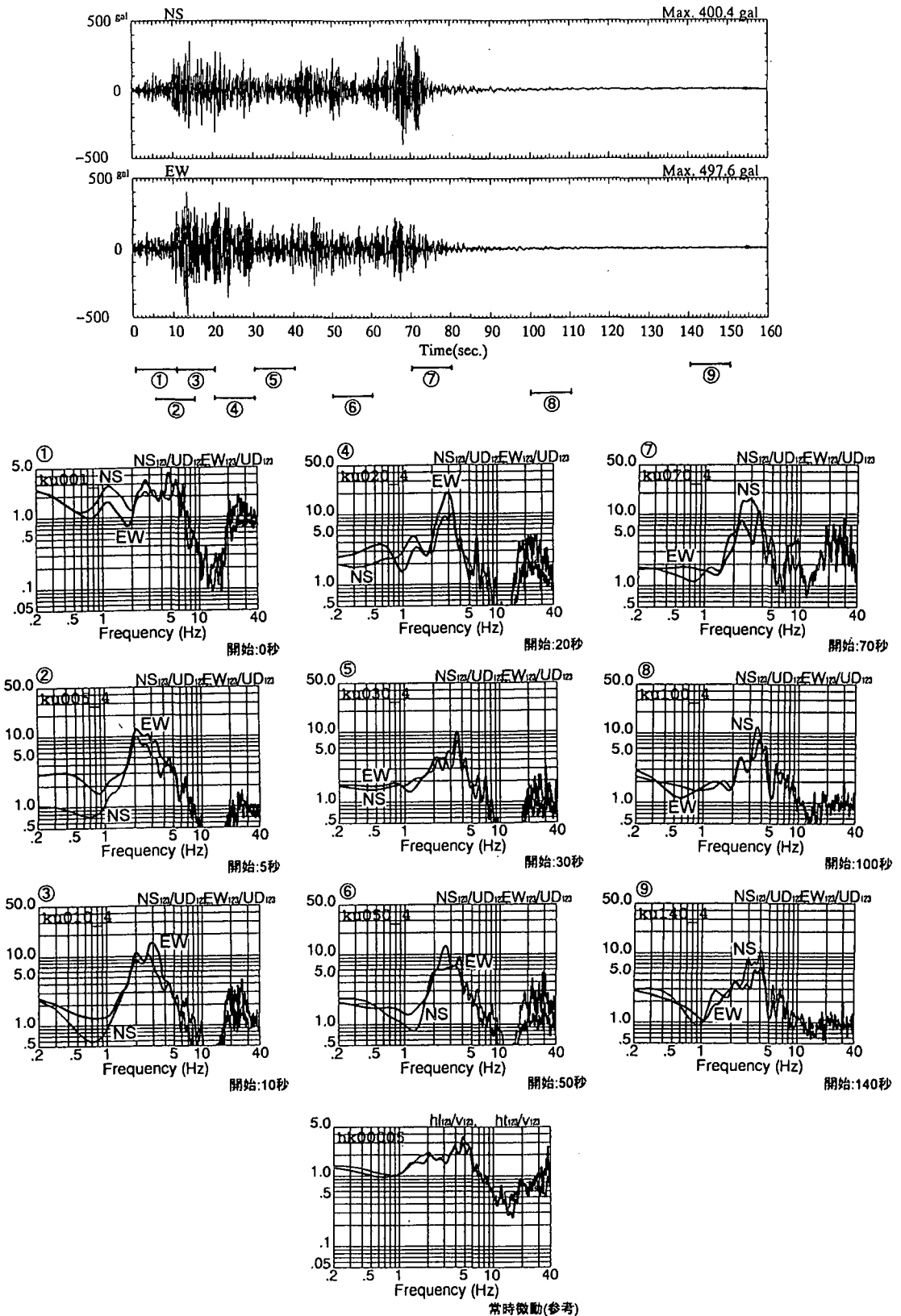


図 3.6.5 地震動の QTS の時間的変化 (黒松内)

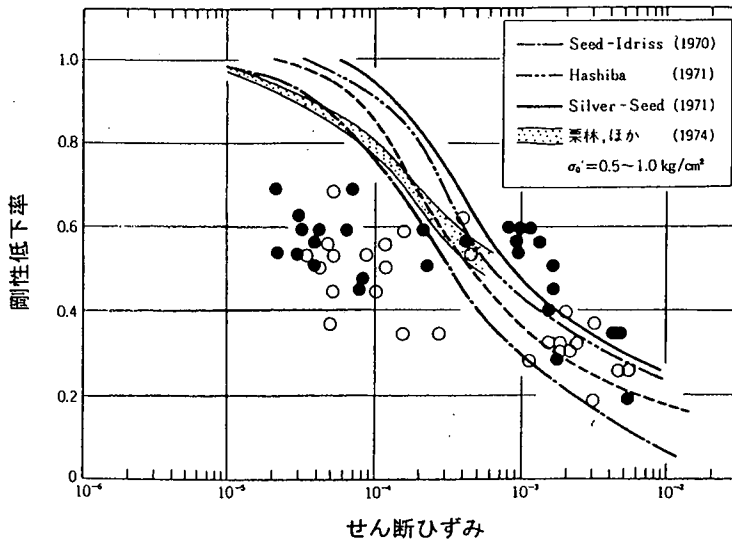


図 3.6.6  $G \sim \gamma$  図 (黒松内, 1994/07/12) (● : EW, ○ : NS)

表層の厚さは約 10 m, S 波速度は 200 m/s 程度と推測される。

常時微動の QTS は表層地盤の地震動特性をよく近似しているが, 地震動の QTS もまた表層地盤の地震動特性を近似していると考えられる。したがって, 大地震動記録を用いた QTS の分析によって表層地盤の非線形特性を把握することができ, 常時微動で測定される初期状態の応答特性が地震時にごう変化するかが実測的に明らかにされるものと期待される。

### 3.7 解析的な最大加速度の推定値

地震動の強度は, 地震直後に各地の気象台から発表される震度階や, 気象庁や建設省が設置している加速度計, 運輸省が各港湾施設に設置している地震計の記録などから知ることができる。しかし, これらの記録を用いて内陸部を含む広範な領域のマクロな加速度分布特性を再現することは, 記録計の設置場所の分布特性のために, 困難なことが多い。ここでは理論解析によって北海道全域にわたる最大加速度の推定を行った。

#### 3.7.1 解析法の概略

統計解析に基づいたマグニチュードと震央距離に関する地盤種別ごとの既存の最大加速度の距離減衰則だけでは, ばらつきの大い実際の最大値動の特性を把握することは困難であるとの考えから, 断層の広がりや破壊過程を考慮できる最大地動の推定法を開発してきた。そして, 種々の断層パラメータの変化が最大加速度の距離減衰特性に及ぼす影響を明確にし, 特に断層近傍での最大加速度が頭打ちとなり, その現象に対応する震央距離が高々断層の長さ程度であることを示した。さらに, 地震基盤から入射する地震波動の表層地盤による増幅特性および各地域ごとの値を考慮することにより, これまでに日本周辺で発生した歴史地震や諸外国の最近の地震についての最大加速度分布を再現した<sup>27)</sup>。解析法の概略は以下のとおりである。



大地震の断層面を  $n \times n$  個の小断層に分割し、断層面上の小区域に小地震を対応させれば、断層の破壊過程に従って小地震を重ね合わせることで大地震を合成することができる<sup>28)</sup>。いま、大地震の地震動のフーリエ変換を  $g_{0L}(\omega)$  とすれば、これは小地震動の震源スペクトル  $g_{0S}(\omega)$  を用いて次式で表される<sup>27)</sup>。

$$g_{0L}(\omega) = \left\{ \sum_{i=1}^{n_L} \sum_{j=1}^{n_W} g_{0S}(\omega) \exp(-i\omega t_{ij}) + \sum_{i=1}^{n_L} \sum_{j=1}^{n_W} \sum_{k=1}^{(n_D-1)^{n'}} g_{0S}(\omega) \exp(-i\omega t_{ijk}) \right\} \exp\left(-\frac{\omega R_{ij}}{2v_s Q}\right) \quad (3.7.1)$$

ただし、 $t_{ij}$  と  $t_{ijk}$  の各々は地震動の伝播による時間遅れ、断層面上を破壊が伝播するのに要する時間遅れ、ならびに断層のくいちがいの進行に基づく時間遅れによって表される時間の長さ<sup>28)</sup>、 $R_{ij}$  は観測点と小地震の破壊点 ( $ij$ ) のあいだの距離、 $v_s$  は媒質のせん断波速度である。 $g_{0S}(\omega)$  としてはなるべく簡単な表現形式を用いることとし、Geller の提案した震源スペクトル<sup>29)</sup>を用いた。 $Q^{-1}$  は媒質の内部減衰を表すパラメータで次式で定義<sup>30)</sup>されるものとした。

$$\log Q^{-1} = -0.5 \log\left(\frac{\omega}{2\pi}\right) - 2.3 \quad (3.7.2)$$

式(3.7.1)における重ね合わせ数は大地震と小地震の間に成立する相似則によって決まる値で、両者の地震モーメントの比を用いて次式のように表している。

$$n_W = n_L = n_D = n = \left(\frac{M_{0L}}{M_{0S}}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.7.3)$$

したがって、大地震のパワースペクトルは次式で与えられる。

$$P(\omega) = \frac{1}{T} g_{0L}(\omega) g_{0L}^*(\omega) \quad (3.7.4)$$

ここに、 $T$  は地震動の継続時間、 $g_{0L}^*(\omega)$  は  $g_{0L}(\omega)$  の共役関数である。

いったんパワースペクトルが求まれば、次式により最大地動の期待値を決定することができる<sup>31)</sup>。

$$U_{\max} = p \sqrt{\lambda_0} \quad (3.7.5)$$

ここに、 $p$  はピーク係数で、次式で定義されるスペクトルモーメント  $\lambda_m$  ( $m=0,1,2$ ) の関数として表される。

$$\lambda_m = \int_0^{\infty} \omega^m P(\omega) d\omega \quad (3.7.6)$$

以上が、せん断波速度にして 3 km/s 程度の基盤岩における最大値動の推定法であるが、地表面での最大値動を推定するためには表層地盤の増幅特性の評価が必要になる。ここでは、小林・翠川<sup>32)</sup>が過去の震害例から地質条件と地震動の増幅度との間に相関性のあることを指摘し、地質条件と最大加速度に対する地盤の増幅度との関係を次のように与えているので、その値を用いることとした。

$$G_4 = \{5.5(\text{第四紀層}), 5.0(\text{第三紀} \sim \text{第四紀層}), 4.0(\text{第四紀噴出物}), 3.5(\text{第三紀層}), 2.5(\text{先第三紀層})\} \quad (3.7.7)$$

### 3.7.2 地震動強度の推定

北海道南西沖地震に対する断層の諸元については、地震発生直後から 5 機関が独自の解析結果を発表している<sup>33)~35)</sup>。表 3.7.1 にその結果を示した。断層解には共役な面があるが、ここでは低角のもの

表 3.7.1 各種機関の発表による震源解

	EQ. Record	Strike (°)	Dip (°)	Slip (°)	Mo ( $\times 10^{27}$ dyn $\cdot$ cm)
Harv CMT	Surface Wave	1	24	84	5.6
Calit CMT	Surface Wave	350	45	65	4.9
ERI Tokyo Univ.	Surface Wave	9	35	97	4.2
USGS	P-wave	221	37	123	0.9
Yokohama City Univ.	P- & S-wave	188	31	76	2.7

表 3.7.2 菊池<sup>33)</sup>による多重震源解

event	Time (sec)	Location* (km)	Depth (km)	Strike (°)	Dip (°)	Slip (°)	Mo ( $\times 10^{27}$ dyn $\cdot$ cm)
1	6 - 16	0	12	193	31	77	1.12
2	18 - 28	0	4	202	36	82	0.82
3	28 - 43	60 - 80	8	187	65	111	0.55
4	39 - 89	90 - 110	4 - 12	192	73	102	2.29

\* distance from the epicenter

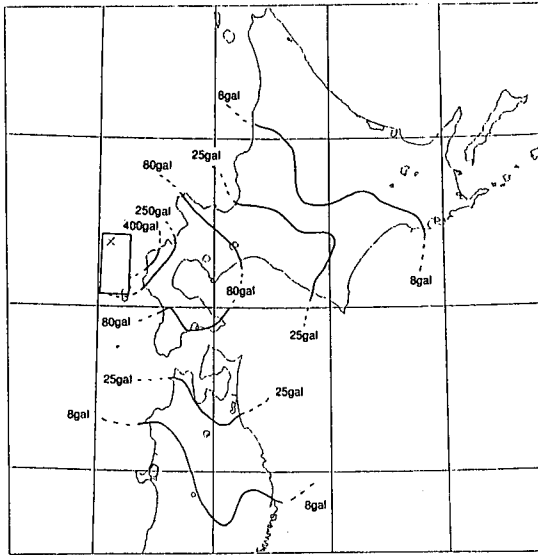
( $<45^\circ$ ) を選んでいるので、大きく2つのグループに分けることができる。基本的には2つの断層面を持つ逆断層タイプであり、遠地表面波から求めた解は西落ち急傾斜/東落ち緩傾斜の逆断層であるのに対し、実体波や稍長周期波の結果は西落ち緩傾斜/東落ち急傾斜の逆断層解になっている。表 3.7.2 は菊池による多重震源解の震源パラメータを示したものである<sup>33)</sup>。ここでは、この解を基にして、6つの断層モデルを構成して最大値動の推定値を計算した。これは、共役な2つの断層面のどちらが地震断層になっているかを余震分布から決定することが困難であったため、数種の断層破壊メカニズムを仮定したものである。

モデル1 (1a, 1b) は西落ちの1枚の断層面から構成されているもので、モデル1aの震源パラメータは、地震モーメント  $M_0 = 2.7 \times 10^{20}$  Nm, 走行  $\phi = N 188^\circ E$ , 傾斜角  $\delta = 31^\circ$  である。モデル1bは地震モーメントのみを  $M_0 = 3.6 \times 10^{20}$  Nm としたものである。断層は3 $\times$ 3個の小断層に分割しており、破壊は余震分布と本震の位置関係を基に、北西隅の小断層の中央を破壊開始点(北緯42度47分, 東経39度12分)とし、破壊速度は地震基盤のS波速度3.4 km/sの0.9倍でほぼ一様に破壊が進行するものとした。

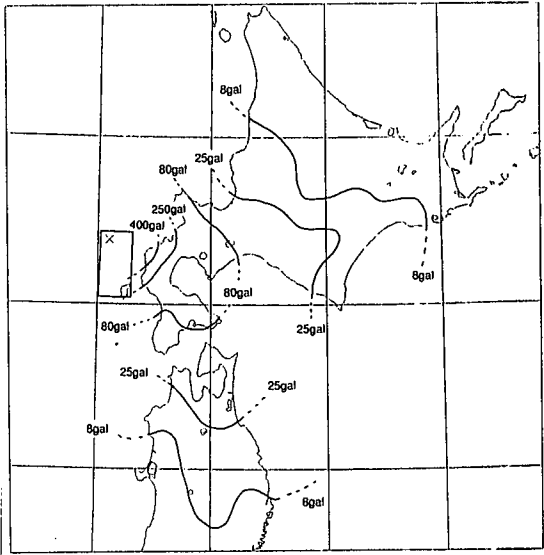
これに対し、モデル2 (2a, 2b) とモデル3 (3a, 3b) は北側と南側の2枚の断層面(各々3 $\times$ 3個の小断層に分割)から構成されている。北側の断層の地震モーメントを  $M_0 = 1.94 \times 10^{20}$  Nm, 走行を  $N 193^\circ E$  とし、南側の断層の地震モーメントを  $M_0 = 2.84 \times 10^{20}$  Nm, 走行を  $N 192^\circ E$  とし、北側の断層破壊が開始した後30秒後に南側の断層の北西隅の小断層から破壊が進行するものとした。モデル2aでは西落ちの逆断層を仮定し、南北両断層の傾斜角をそれぞれ  $73^\circ$  と  $31^\circ$  とした。モデル2bはモデル2aの南側断層を東落ち逆断層と仮定し、その傾斜角を  $17^\circ$  としたものである。モデル3aでは北側の断層を東落ちの逆断層, 南側の断層を西落ちの逆断層とし、その傾斜角をそれぞれ  $17^\circ$  と  $73^\circ$  とした。モデル3bではモデル3aの南側断層を東落ち逆断層と仮定し、その傾斜角を  $17^\circ$  としたもの

である。いずれの破壊過程においても震源深さが 12 km になるように断層上面の深さを設定した。

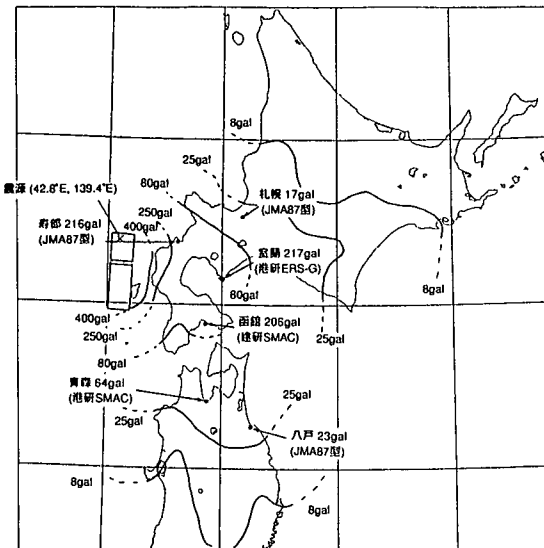
図 3.7.1(a)~(f)は、北海道地方を縦 20, 横 20, 合計 400 個のメッシュで覆い、各交点上での地質条件に基づく増幅度を考慮して最大加速度の期待値を計算した後、この値を用いて等加速度線を描いたものである。等加速度線は気象庁震度階に対応する 8~25 gal(Ⅲ), 25~80 gal(Ⅳ), 80~250 gal(Ⅴ), 250~400 gal(Ⅵ)に対して求めている。奥尻島ではどのモデルにおいても 400 gal 以上の地動加速度が出ており、気象庁震度階でⅥ以上の揺れを受けたことになる。モデル 2 a の図中に示した数値は、気象庁の 87 型電磁強震計や運輸省港湾技術研究所の強震観測網および建設省建築研究所の強震計で記録された各都市の最大加速度である。数値計算結果と観測された加速度の最大値の分布はよく対応している。また、これらの観測値と本手法で計算した推定値を距離減衰特性で比較したものが図 3.7.2



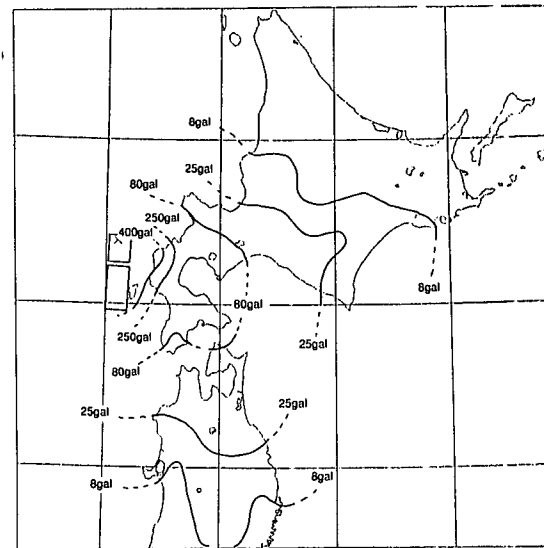
(a) モデル 1 a の結果



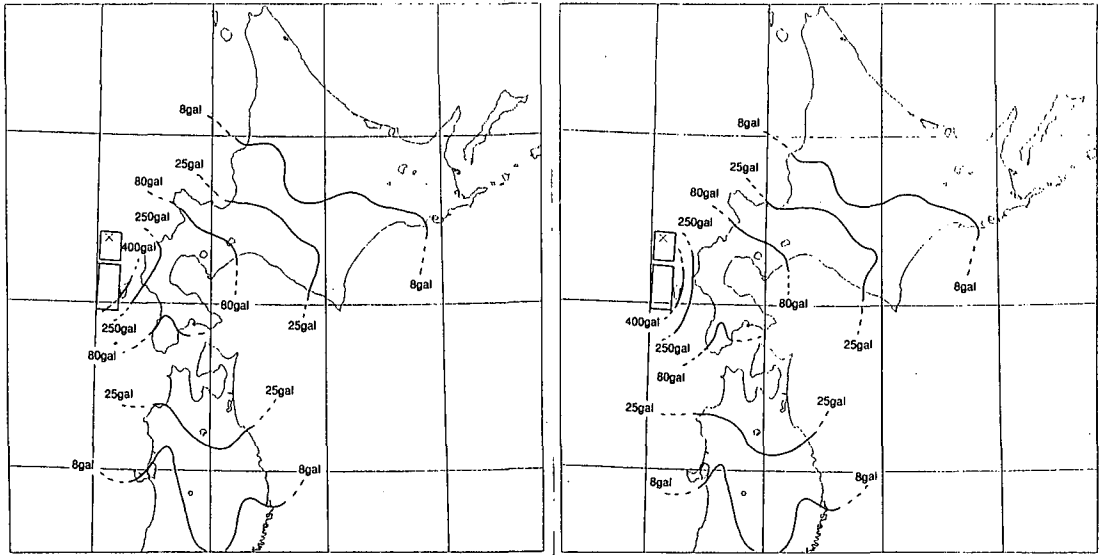
(b) モデル 1 b の結果



(c) モデル 2 a の結果



(d) モデル 2 b の結果



(e) モデル3aの結果

(f) モデル3bの結果

図 3.7.1 各断層モデルから求められる等加速度線

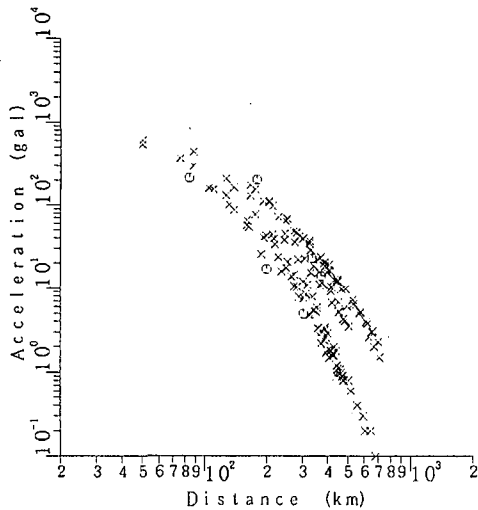


図 3.7.2 観測値 (○印) と計算値 (×印) の距離減衰特性

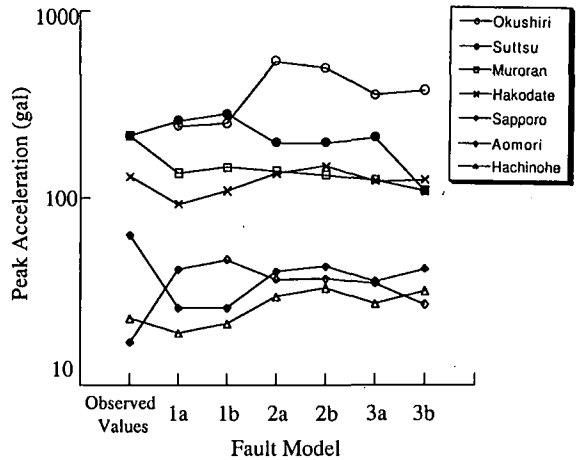


図 3.7.3 断層モデルの違いによる最大加速度の推定値のばらつき

である。ここでも最大加速度の推定値 (×印) と観測値 (○印) の距離減衰特性はよい対応のとれていることがわかる。図 3.7.3 は断層モデルの違いによって主な地点での最大加速度の推定値がどのように変化するかを示したものである。図中の左端の観測値は気象庁の発表している値である。図から明らかなように、断層モデルの違いによって最大加速度の期待値はかなり変化しているが、断層モデルとしては一枚の断層でモデル化するよりも二枚の断層としてモデル化の方が、より観測値の傾向をとらえているようである。実際の断層運動に近いとされているモデル 2a では奥尻島で 500 gal を越える最大加速度が求められている。

## 参考文献

- 1) 松永康男・桜井博孝・森田年一・井合 進：1993年北海道南西沖地震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料，No.780，1993年6月
- 2) 松永康男・桜井博孝・森田年一・井合 進：港湾地域強震観測年報（1992&1993），港湾技研資料，No.778，1993年6月
- 3) 土田 肇・倉田栄一・須藤克子：1968年十勝沖地震とその余震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料，No.80，1969年6月
- 4) 野田節男・上部達生・千葉忠樹：重力式岸壁の震度と地盤加速度，港湾技術研究所報告，第14巻，第4号，1975年12月
- 5) 稲富隆昌ほか：1993年北海道南西沖地震による港湾施設被害報告，港湾技研資料，1994年12月
- 6) Nakamura Laboratory for the Earthquake Disaster Prevention, Railway Technical Research Institute : Strong Accelerations and Damage of 1993 Hokkaido Nansei-Oki Earthquake (Quick Report), JR Earthquake Information No.19b, July 1993
- 7) 中村 豊・富田健司：最大加速度の推定式，第39回土木学会年次学術講演会講演概要集，1984年10月
- 8) 中村 豊・齋田 淳・田母神宗幸：警報地震計による釧路沖地震と北海道南西沖地震の強震動観測結果，鉄道総研報告，1994年5月
- 9) 中村 豊：常時微動測定に基づく表層地盤の地震動特性の推定，鉄道総研報告，1988年4月
- 10) 中西一郎・菊池正幸：1.1 地震の特徴，地震工学振興会ニュース No.133，平成5年（1993年）北海道南西沖地震特集，1993年11月
- 11) 中村 豊：地震計の特性変換による地震動記録波形の微分，積分および特性補正，鉄道技術研究報告 No.1315，1986年3月
- 12) 中西一郎・菊池正幸：地震の特徴および地震動，平成5年（1993年）北海道南西沖地震特集，地震工学振興会ニュース，No.133，1993
- 13) 強震観測事業推進連絡会議：1993年8月8日北海道南西沖地震，強震情報，No.35，1993
- 14) M. Fukushima and T. Tanaka: A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.80,757-783, 1990
- 15) 金井 清・酒井良男：広尾沖地震における釧路の強震記録と構造物被害，第3回日本地震工学シンポジウム（1970）講演集，771-778，1970
- 16) 壇 一男・渡辺宏一・菊池 優・海老原学：1993年釧路沖地震（M7.8）の釧路気象台における強震記録のもつ建物破壊力に関する検討，日本建築学会構造系論文集，第454号，51-60，1993
- 17) 松波武雄・嵯峨山稯：乙部町の地質，乙部町，1989
- 18) 座間信作：不規則構造に対する地震波の挙動 その1. 崖地形が地震動に及ぼす影響，地震研究所彙報，56，741-752，1981
- 19) 気象庁：災害時地震・津波警報 平成5年（1993年）北海道南西沖地震，1993年8月
- 20) 高井伸雄・鏡味洋史・岡田成幸：1993年7月12日北海道南西沖地震の市町村別震度調査，日本建築学会学術講演梗概集（東海），1994年9月
- 21) 後藤典俊・武藤 章・河内邦夫・山本裕司・鈴木一成：アンケートによる噴火湾沿岸地域の詳細震度分布，地震・津波と北海道南西地方—1993年北海道南西沖地震被害調査研究—報告書，1994年3月
- 22) 河内邦夫・山本裕司・小松貴昭・後藤典俊・武藤 章：アンケート調査による釧路沖地震（1993.1.15）
- 23) 安部 賢・鏡味洋史・岡田成幸・村上公一：札幌都市圏のサイスミックゾーンネイション（2）1993年釧路沖・北海道南西沖地震の震度分布，日本地震学会講演予稿集，1994年3月
- 24) 岡田成幸・村上ひとみ・宮野道雄：1993年北海道南西沖地震の奥尻島における建物被害・人的被害・島民避難行動パターンにみる特長，1993年北海道南西沖地震による被害の調査研究，1994年3月
- 25) 中村 豊・滝沢太郎・富田健司・齋田 淳・西永雅行：常時微動測定による地盤変状予測の試み，鉄道総研報告，1993年10月

- 26) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，1986年8月
- 27) Sato, T. and J. Kiyono: Estimation of seismic intensity of ground motion during the 21 August 1988 earthquake in the Nepal-India border region, *Jour. of Natural Disaster Science*, Vol.11, No.2, pp.21-36, 1989
- 28) Iriguchi, K. : Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, *Proceedings of Seventh Japan Earthquake Engineering*, pp.151-156, 1986
- 29) Geller, R. J. : Scaling relation for earthquake source parameters and magnitude, *Bull. Seism. Soci., Am.*, Vol.65, pp.1073-1095, 1975
- 30) Sato, T. and J. Kiyono: Estimation of seismic intensity of ground motion during the 16 July 1990 Philippine earthquake, *Jour. of Natural Disaster Science*, Vol.13, No.1, pp.39-52, 1991
- 31) Der-Kiureghian A. : Structural response to stationary excitation, *Jour. Eng. Mech. Div., ASCE, EM6*, pp.1195-1213, 1980
- 32) 翠川三郎・小林啓美：震源域およびその周辺での地表面最大加速度分布の推定，日本建築学会論文報告集，第290号，pp.83-94，1980
- 33) 菊池正幸：YCU地震学レポート，横浜市立大学，No.24，1993
- 34) USGS: Preliminary Determination of Epicenters, *Monthly listing*, 1993
- 35) Dziewonski, A.M., G. Ekstrom and M.P. Saganik: Centroid-moment tensor solution for July-September, *Physics of the Earth and Planetary Interior*, Vol.38, 1993