

3.2 東北地方太平洋沖地震による地震動の特徴

-岩手・宮城内陸地震との比較を通して-

東北地方太平洋沖地震の地震動、とくに崩壊発生に関係する短周期地震動は、断層全体からのエネルギー放射ではなく、局所的ないくつかの断層破壊域からもたらされている(青井ほか, 2012)。短周期地震動の発生域については、個数、位置ともにいくつかの説が唱えられているが、(独)防災科学技術研究所(2011)によると(図-3.2.1)、地震発生から20~50秒後に宮城県沖の陸地寄り第1波、60~100秒後に再び宮城県沖で第2波、さらに100~140秒後に福島県沖から茨城県沖で第3波を発生させる断層破壊を引き起こしたものと考えられる。したがって、宮城県の内陸には第1と第2の破壊による短周期地震動が主要動として相次いで到達し、福島県南部から茨城県北部の内陸には第3の破壊による短周期地震動が主要動として到達したことになる。第1~第3の地震動が時間的に重なった訳ではないので、地震全体のマグニチュードの大きさに比べて、個々の地震動の規模がそれほど大きくなかったのはこの理由による。

ここでは、岩手・宮城内陸地震時に多数の崩壊・地すべりが発生した岩手・宮城県境付近、両地震時に同じ火砕流台地で地すべりが発生した宮城県築館付近、東北地方太平洋沖地震時に地すべりが多発した福島県南部を対象に、各地区における両地震による地震動の特徴とその崩壊・地すべり発生との関係、さらに直下型と海溝型の地震による地震動の性質にどのような違いがあるのか、などについて検討していく。

3.2.1 岩手・宮城県境付近の地震動

(1) 岩手・宮城内陸地震における KiK-net (一関西) の地震動の特徴

図-3.2.2, 図-3.2.3 に KiK-net 一関西 (IWTH25) の加速度時刻歴, 応答スペクトルお

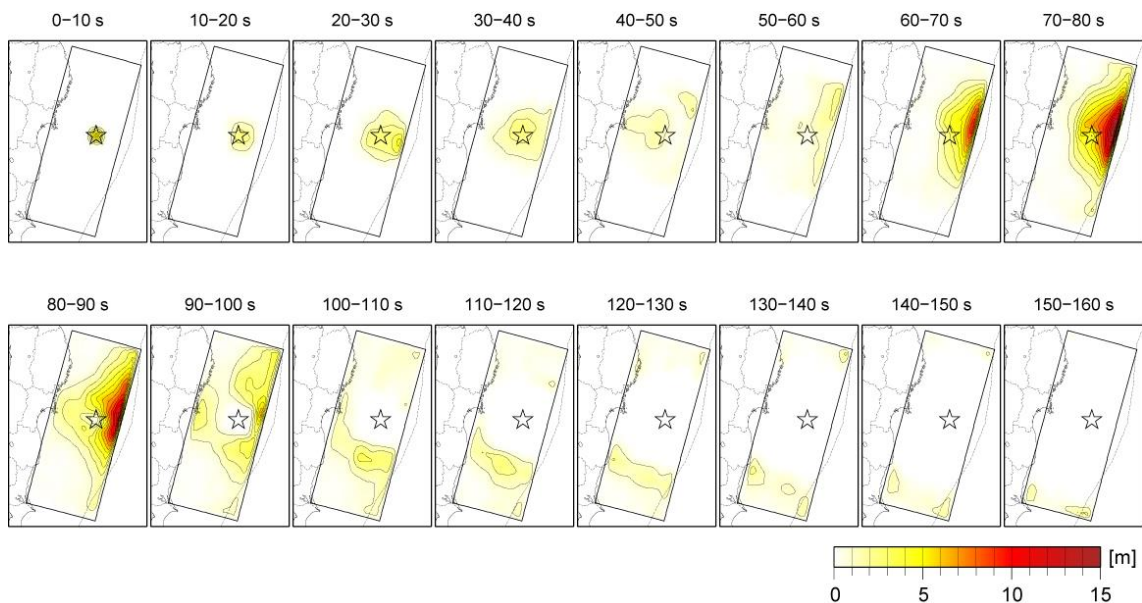


図-3.2.1 断層破壊の時間進展過程 ((独)防災科研 HP より)

よび平面内の振動軌跡を示す。また、表-3.2.1 にそれらの図から読み取れる最大加速度や卓越周期などの諸元を示す。これから、下記のような特徴が導き出される。

①表層で加速度の UD 成分が大きく増幅されているが (5.7 倍の 3866gal に)、UD 成分の卓越周期はほとんど変わっていない。UD 成分に関しては、地中の卓越周期と表層の増幅周期 (固有周期) がほぼ一致していることから (0.08~0.1 秒)、共振に近い現象が起こったのであろう。なお、速度の UD 成分は、地中・地表ともに水平成分より大きい。

②地中の加速度が極めて短周期である。水平面内の表層の増幅周期 (固有周期) がそれより長周期だったため、水平方向の卓越周期は表層で 2 倍ほど引き伸ばされているが、加速度振幅は水平方向に関しては大きな増幅を逃れた。それに対して、地中の速度の卓越周期は 1 秒以上とやや長周期であり、むしろ表層で短周期化している。

③表層で加速度は 1.1~5.7 倍、速度は 1.3~1.8 倍、3 成分合成加速度は 3.7 倍 (UD 成分の増幅が大きく寄与) に増幅している。

KiK-net (一関西) の設置地点の表層はおもに凝灰岩からなり、一部に泥岩や砂・粘土を含んでいる。岩手・宮城県境付近の表層には同様の地質が広く分布しており、とくに大規模地すべりを起こした荒砥沢は、砂岩・シルト岩および凝灰岩からなる湖成層で、同一とみなしてよい。この地域で大小の崩壊・地すべりが多発した原因は、極めて大きな地震動が襲ってきたことが主因であるが、上記①の表層の増幅特性、とくに UD 成分の増幅が大きく作用しているものと考えられる。

(2) 東北地方太平洋沖地震における KiK-net (一関西 2) の地震動の特徴

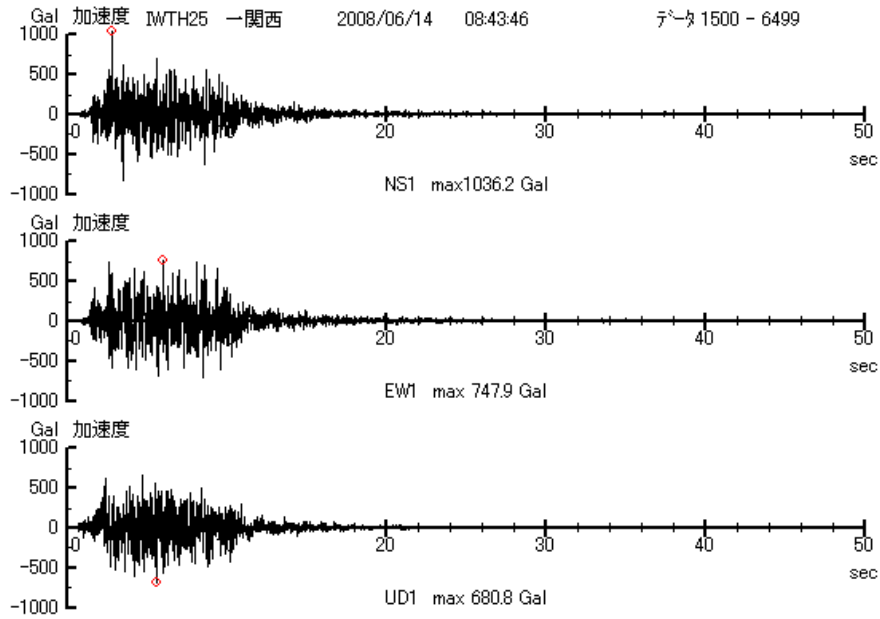
図-3.2.4~3.2.7 に KiK-net 一関西 2 (IWTH28) の加速度時刻歴、応答スペクトルおよび平面内の振動軌跡を示す。また、表-3.2.1 に最大加速度や卓越周期などの諸元を示す。これから、下記のような特徴が導き出される。なお、本観測点では第 1 と第 2 の断層破壊に対応する 2 つの地震動が記録されているので、表-3.2.1 では第 1 波と第 2 波の 2 つに分けて示したが、考察では振幅のやや大きい第 2 波に注目する。

①ほぼ同じ規模の第 1 波と第 2 波が連続して到達したため、各波の継続時間は岩手・宮城内陸地震とほぼ同程度であったが、2 つの波を合計した継続時間は約 2 倍になった。

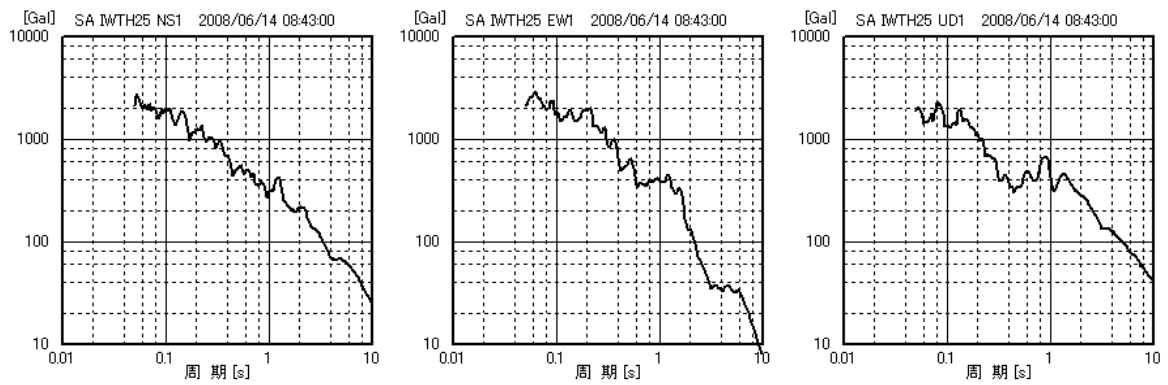
②中小規模の崩壊が発生する 300gal (3 成分合成) にまで表層で増幅されたが、速度は地表でも最大 20kine 程度にとどまり、大規模崩壊が発生するレベルまでは届かなかった。

③地中の加速度の卓越周期は、岩手・宮城内陸地震時の一関西より長周期であった。これは、直下型と海溝型の違いというより、震源距離の違いが原因であろう。地表の加速度の卓越周期は、岩手・宮城内陸地震時の一関西とほぼ同じである。

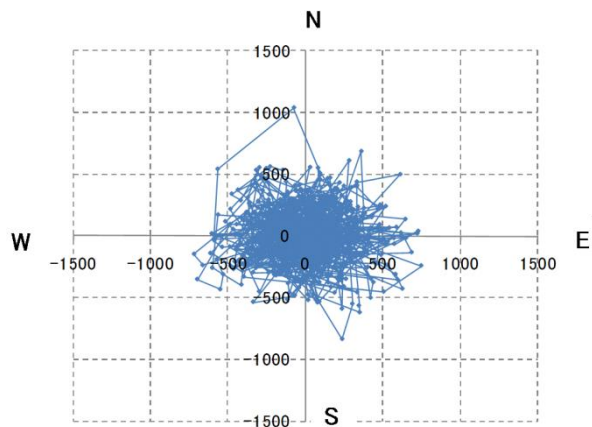
④表層で加速度は 2.7~4.4 倍 (3 成分合成値は 3.6 倍) に、速度は 1.2~2.7 倍に増幅されている。



(a) 加速度時刻歴

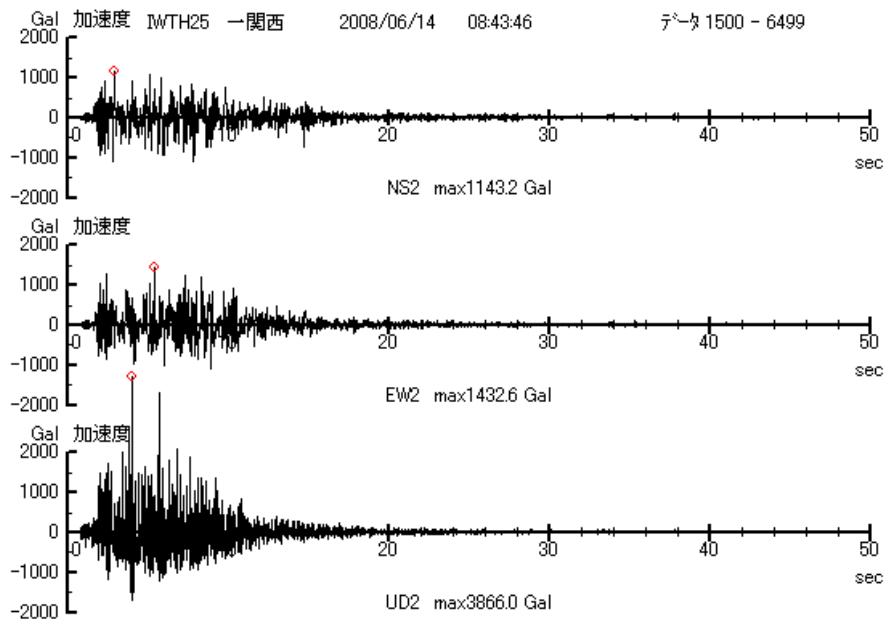


(b) 地震応答スペクトラム (加速度)

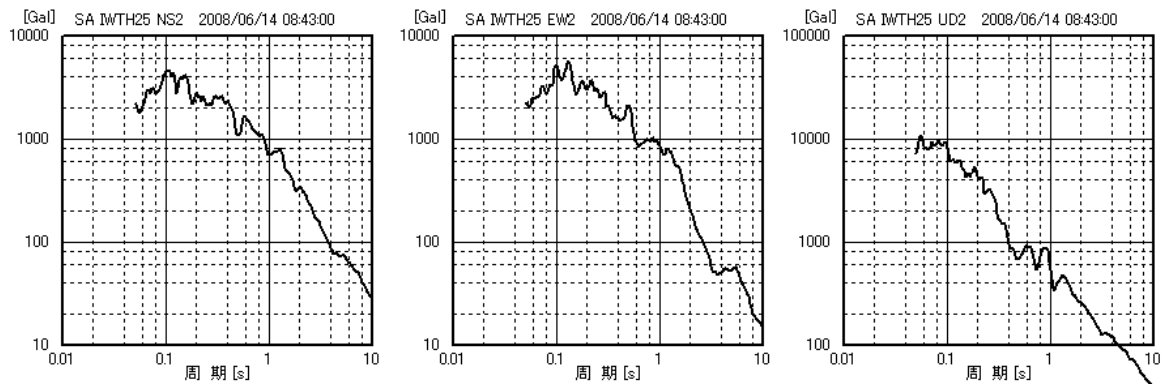


(c) 平面内の振動軌跡 (Gal)

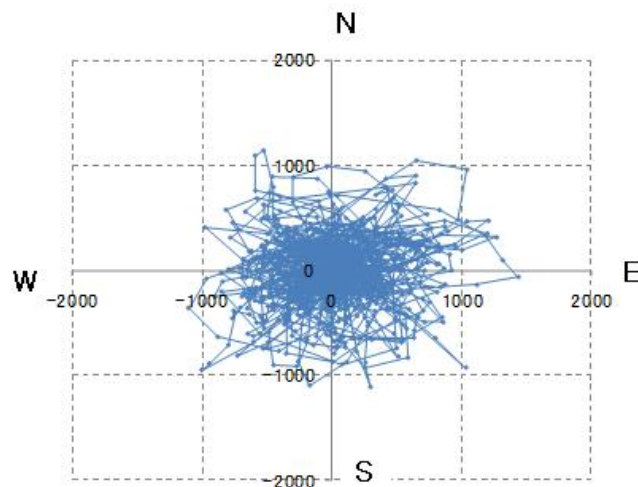
図-3.2.2 岩手・宮城内陸地震における KiK-net 一関西 (IWTH25) (地中) の地震動



(a) 加速度時刻歴

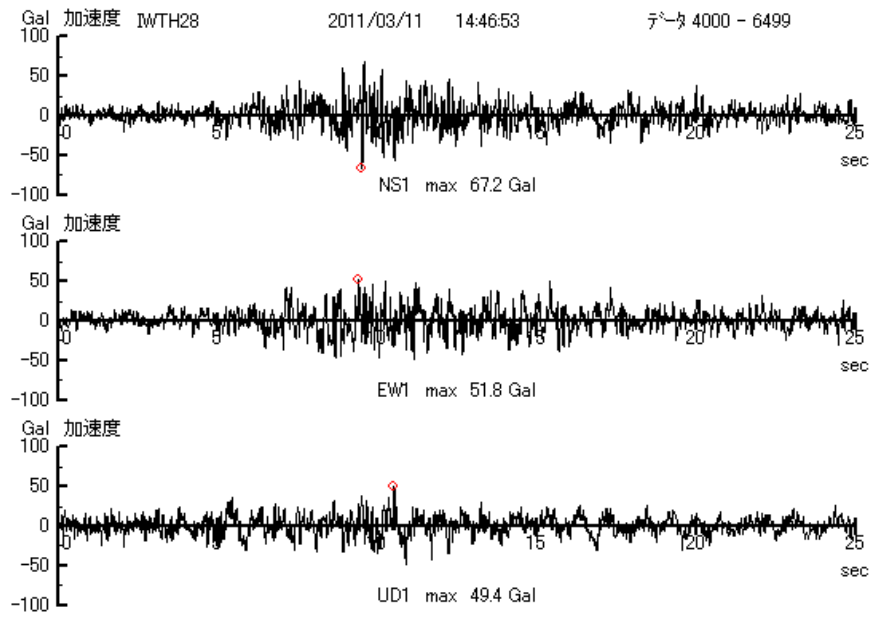


(b) 地震応答スペクトラム (加速度)

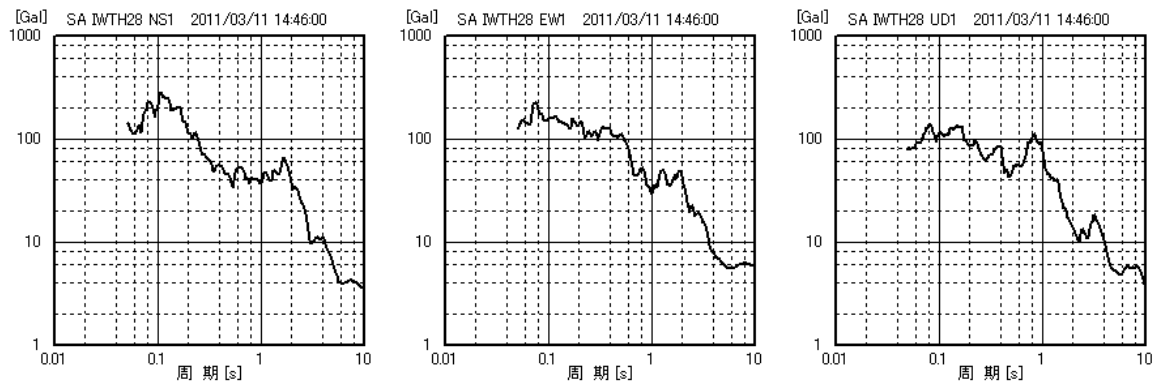


(c) 平面内の振動軌跡 (Gal)

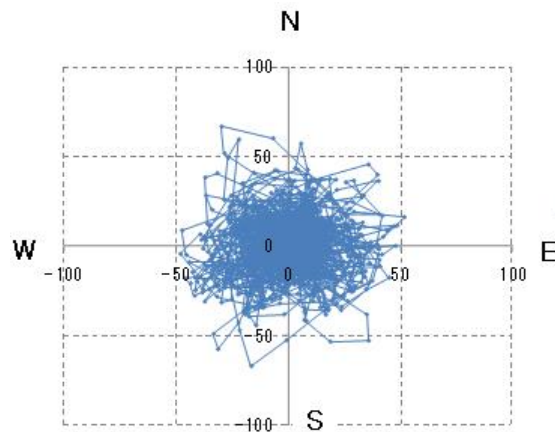
図-3.2.3 岩手・宮城内陸地震における KiK-net 一関西 (IWTH25) (地表) の地震動



(a) 加速度時刻歴

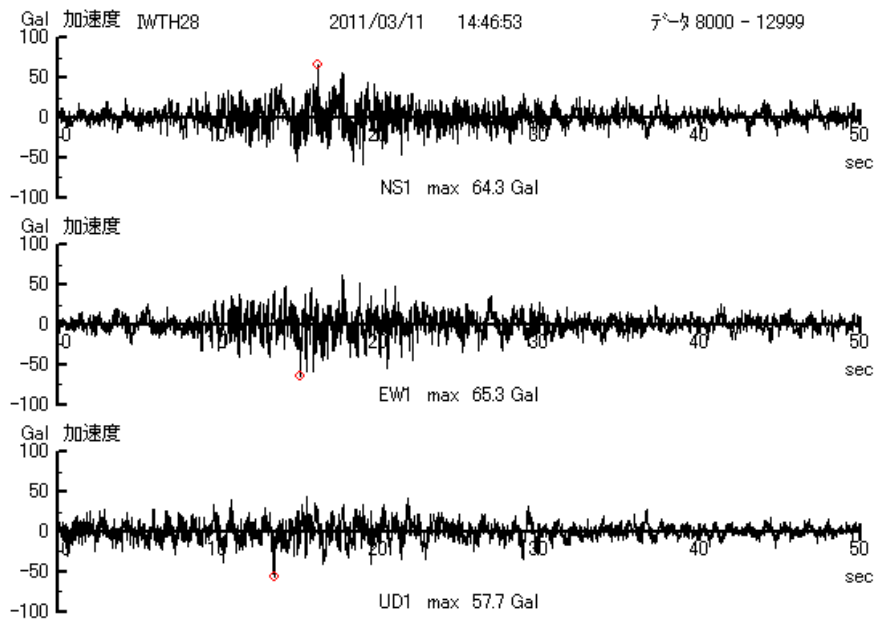


(b) 地震応答スペクトラム (加速度)

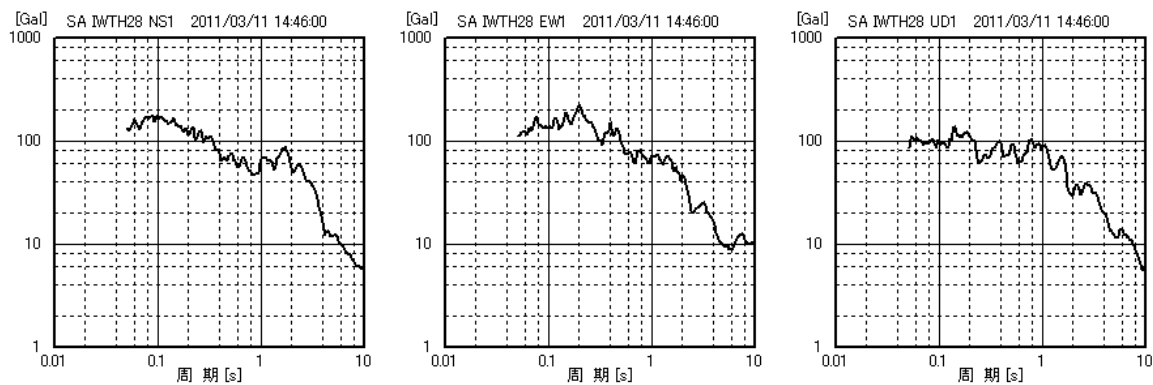


(c) 平面内の振動軌跡 (Gal)

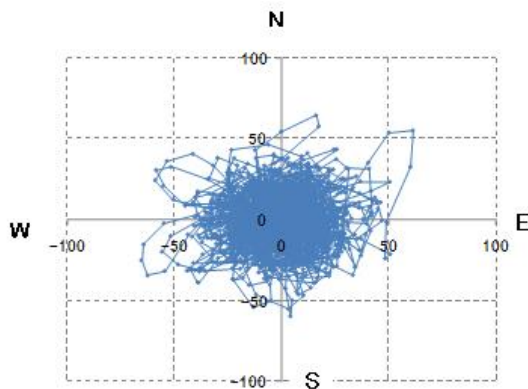
図-3.2.4 東北地方太平洋沖地震における KiK-net 一関西 2 (IWTH28) (地中, 第 1 波) の地震動



(a) 加速度時刻歴

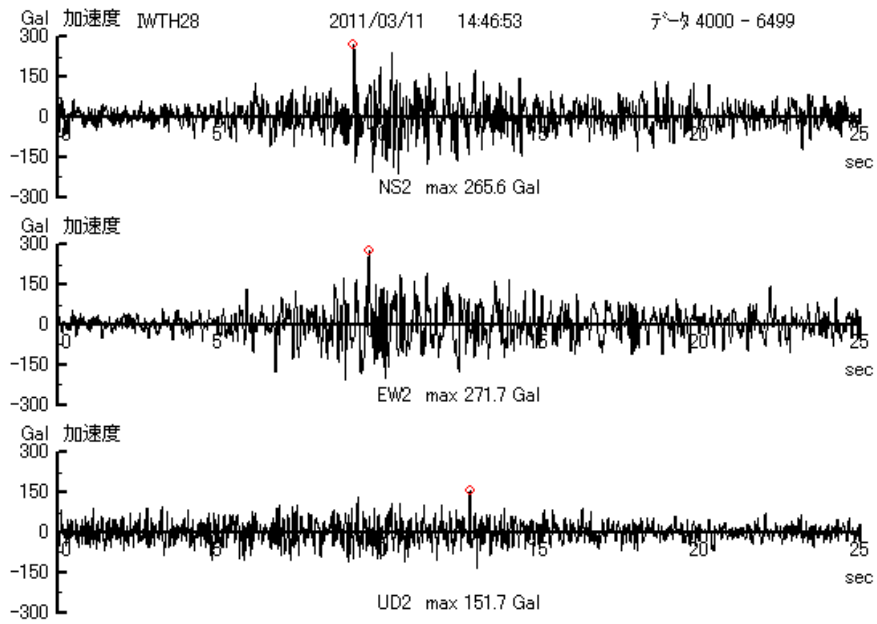


(b) 地震応答スペクトラム (加速度)

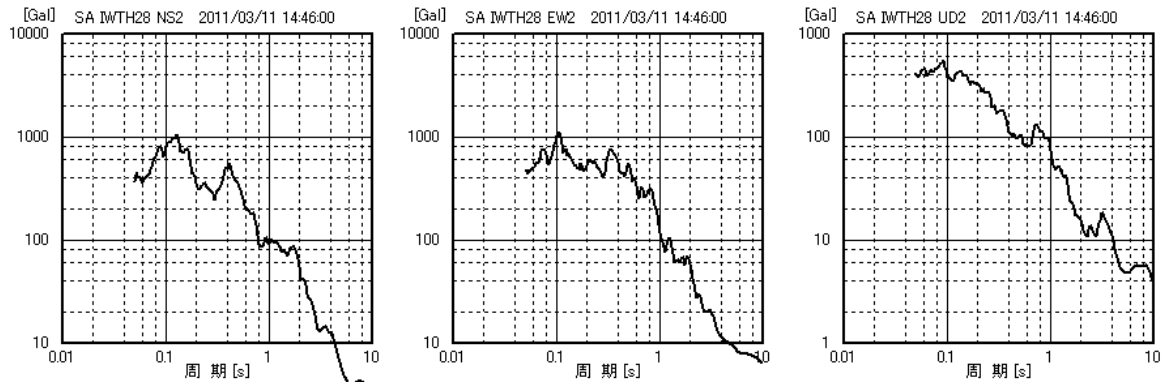


(c) 平面内の振動軌跡 (Gal)

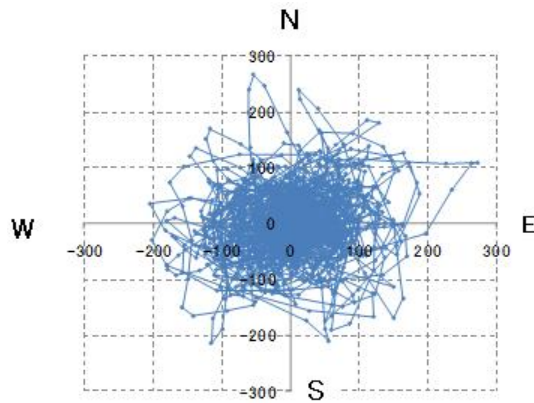
図-3.2.5 東北地方太平洋沖地震における KiK-net 一関西 2 (IWTH28) (地中, 第 2 波) の地震動



(a) 加速度時刻歴

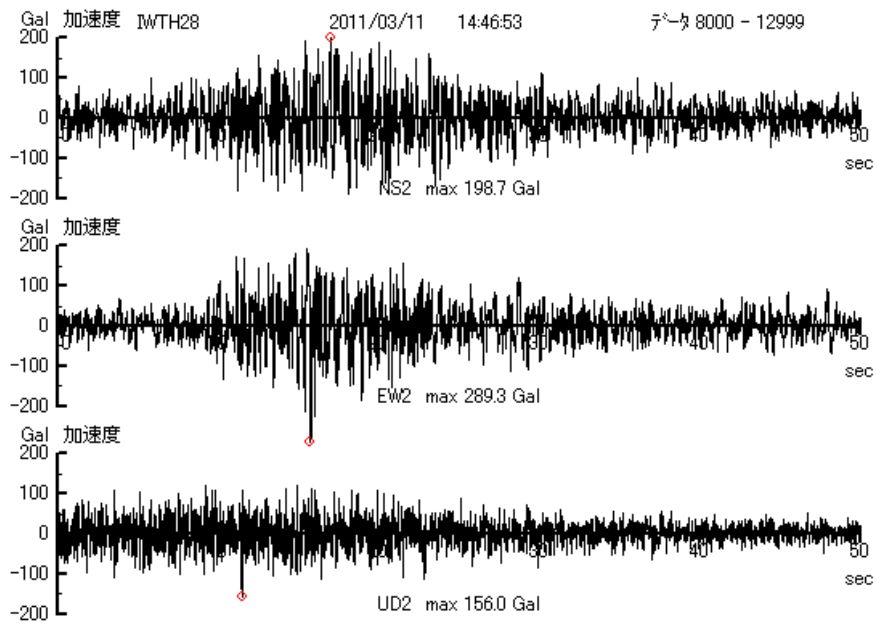


(b) 地震応答スペクトラム (加速度)

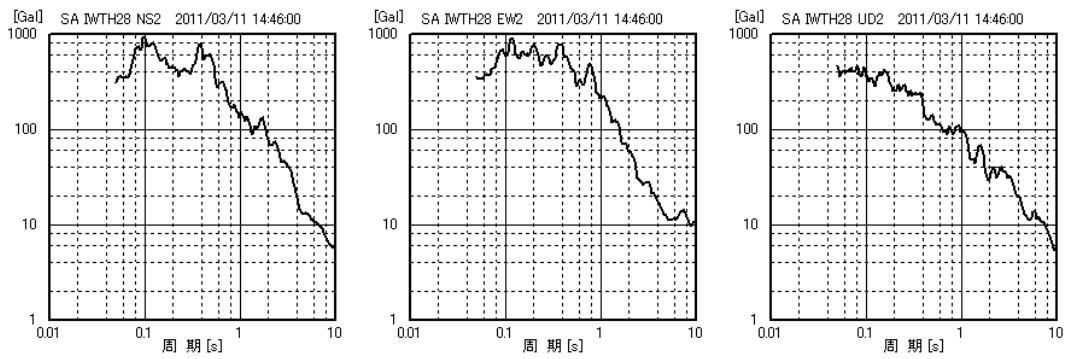


(c) 平面内の振動軌跡 (Gal)

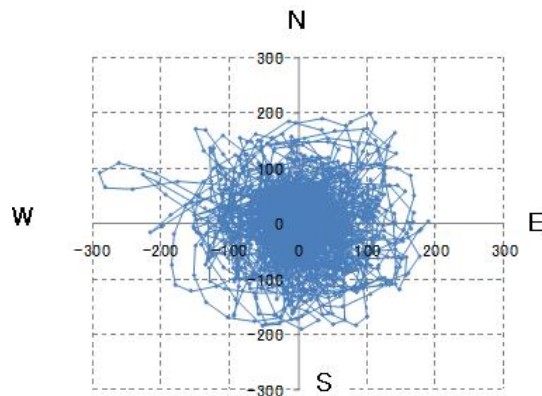
図-3.2.6 東北地方太平洋沖地震における KiK-net 一関西 2 (IWTH28) (地表, 第 1 波) の地震動



(a) 加速度時刻歴



(b) 地震応答スペクトラム (加速度)



(c) 平面内の振動軌跡 (Gal)

図-3.2.7 東北地方太平洋沖地震における KiK-net 一関西 2 (IWTH28) (地表, 第 2 波) の地震動

3.2.2 宮城県築館付近の地震動

(1) 岩手・宮城内陸地震における K-NET（築館）の地震動の特徴

図-3.2.8 に K-NET 築館（MYG004）の加速度時刻歴，応答スペクトルおよび平面内の振動軌跡を示す。K-NET では地表部にのみ地震計が置かれている。表-3.2.1 に最大加速度や卓越周期などの諸元を示す。これから，下記のような特徴が導き出される。

①地表の3成分合成加速度は 812gal，速度も 50kine 程度あるので，中小規模の崩壊・地すべりを起こすのには十分なレベルである。

②速度の卓越周期が極めて大きい（2～4 秒）。同じ地震でありながら，一関西と比較して加速度，速度ともに全般的に周期が長い。築館観測点の地下 1m以深は岩盤なので，この長周期化は震源と観測点間の伝播経路の性質によるものと考えられる。

2003 年 5 月の宮城県沖を震源とする地震により，築館・館下地区の火砕流台地の谷埋盛土で地すべりが発生している。本地震では，この地すべりに隣接する谷埋盛土で地すべりが発生した。地震動の卓越振動方向は不明瞭であるが，強いて言えば NE-SW である。一方，地すべりの方向は NNE→SSW でほぼ一致している。

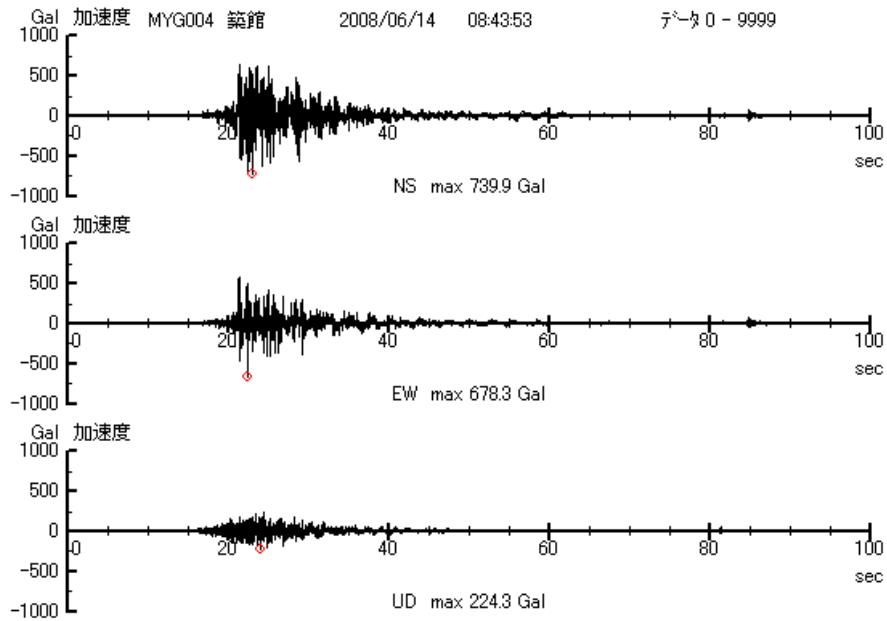
(2) 東北地方太平洋沖地震における K-NET（築館）の地震動の特徴

図-3.2.9，図-3.2.10 に K-NET 築館（MYG004）の加速度時刻歴，応答スペクトルおよび平面内の振動軌跡を示す。また，表-3.2.1 に最大加速度や卓越周期などの諸元を示す。これから，下記のような特徴が導かれる。なお，本観測点でも第 1 と第 2 の断層破壊に対応する 2 つの地震動が記録されているので，表-7.1.1 では第 1 波と第 2 波の 2 つに分けて示したが，考察では第 1 波より約 2 倍大きい第 2 波に注目する。

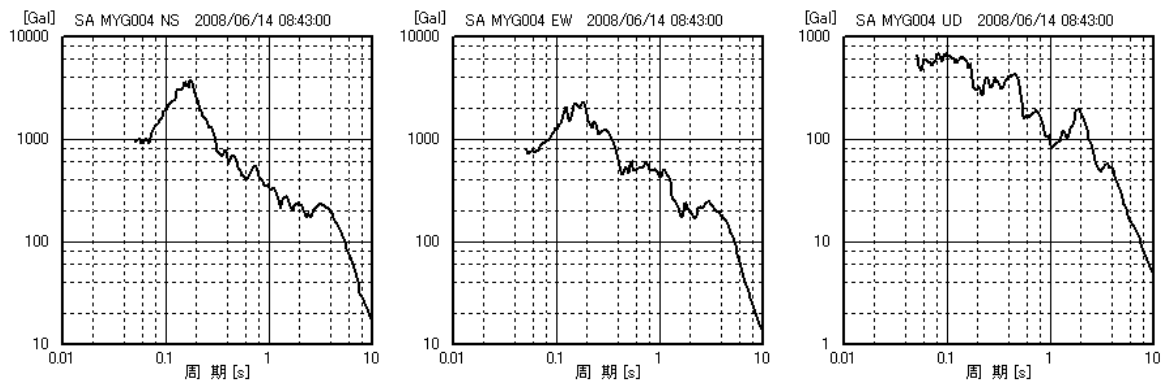
①第 2 波は 3 成分合成加速度で 2933gal，速度も NS 成分で 111kine と極めて大きな値を示し，大規模崩壊の原因となり得る大きさを持っている。

②第 1 波と第 2 波が連続して到達したため，各波の継続時間は岩手・宮城内陸地震とほぼ同程度であったが，2 つの波を合計した継続時間は約 2 倍になった。

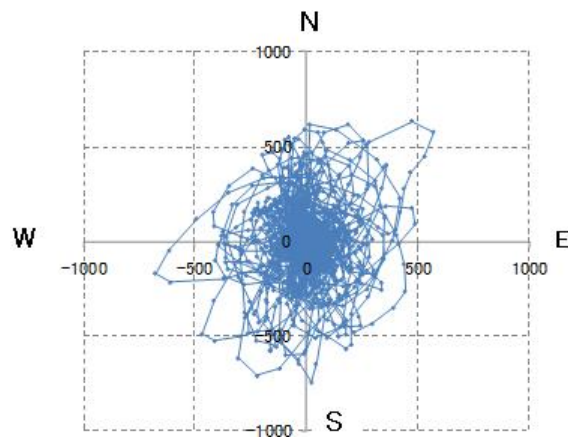
2003 年 5 月の宮城県沖を震源とする地震と岩手・宮城内陸地震により地すべりが生じた築館・館下地区の火砕流台地で，これらの地すべりに隣接する谷埋盛土で，三度亀裂と地すべりの発生が報告されている。地震動の卓越振動方向は N-S であり，一方，地すべり方向は N→S で一致している。



(a) 加速度時刻歴

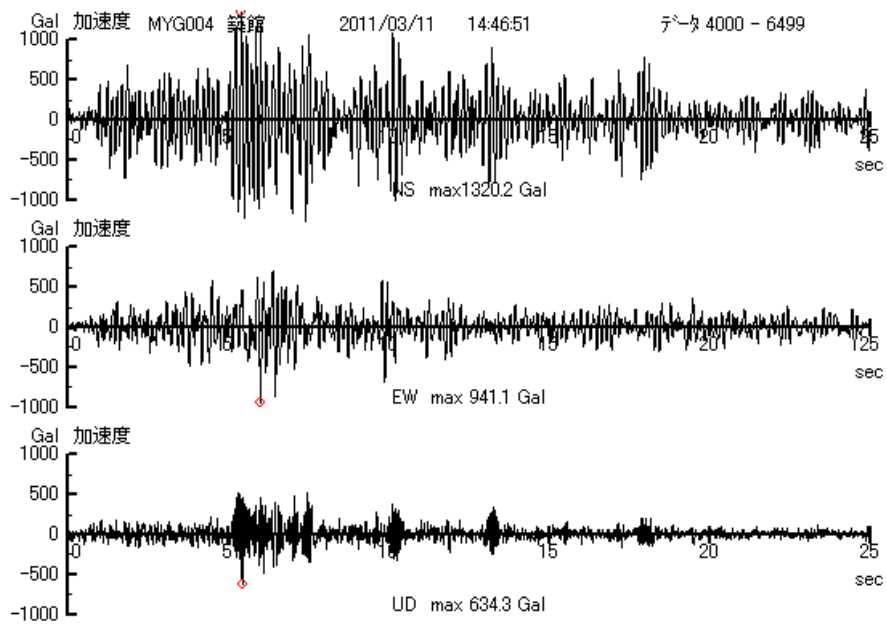


(b) 地震応答スペクトラム (加速度)

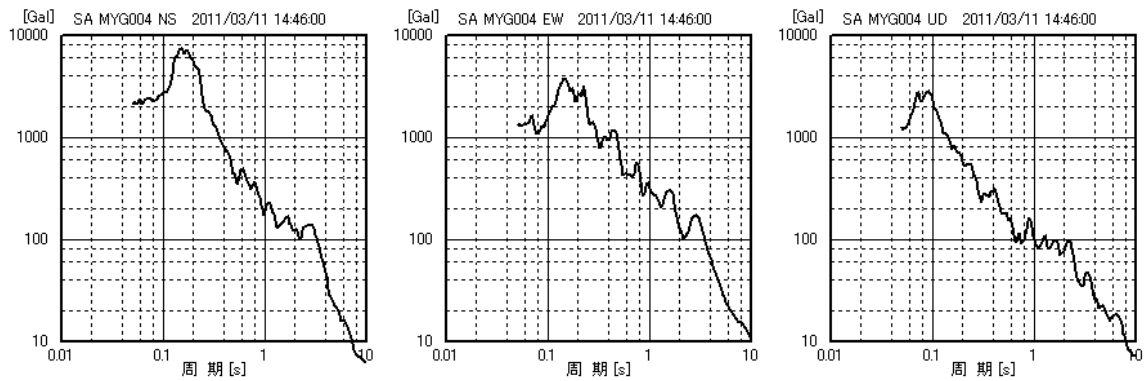


(c) 平面内の振動軌跡 (Gal)

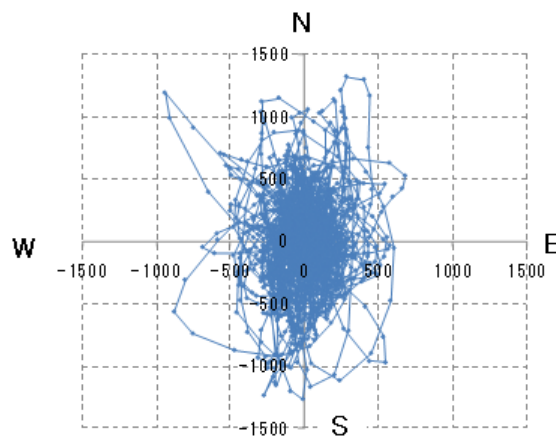
図-3.2.8 岩手・宮城内陸地震における K-NET 築館 (MYG004) (地表) の地震動



(a) 加速度時刻歴

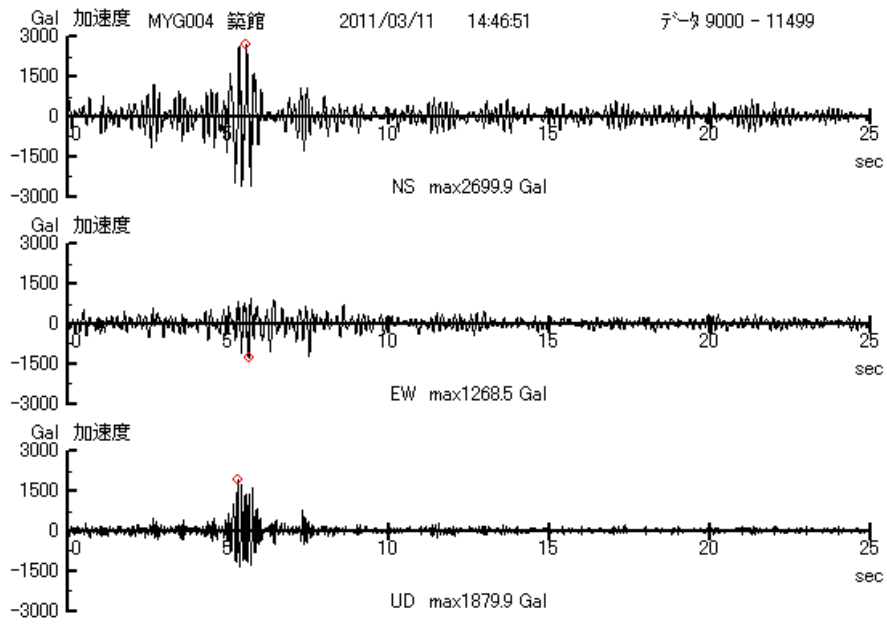


(b) 地震応答スペクトラム (加速度)

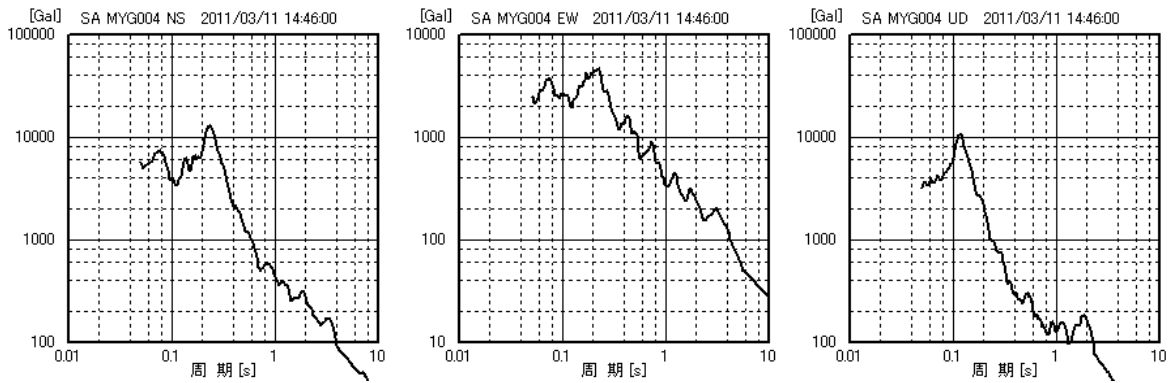


(c) 平面内の振動軌跡 (Gal)

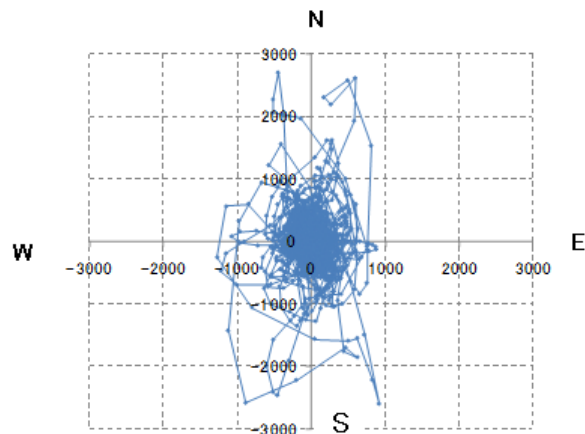
図-3.2.9 東北地方太平洋沖地震における K-NET 築館 (MYG004) (地表, 第1波) の地震動



(a) 加速度時刻歴



(b) 地震応答スペクトラム (加速度)



(c) 平面内の振動軌跡 (Gal)

図-3.2.10 東北地方太平洋沖地震における K-NET 築館 (MYG004) (地表, 第2波) の地震

3.2.3 福島県南部の地震動

この地域は、岩手・宮城内陸地震では大きな地震動を受けていないため、解析は東北地方太平洋沖地震のみで行った。取り上げた地震動は KiK-net 西郷 (FKSH10) である。図-3.2.11, 図-3.2.12 に加速度時刻歴, 応答スペクトルおよび平面内の振動軌跡を示す。また, 表-3.2.1 に最大加速度や卓越周期などの諸元を示す。これから, 下記のような特徴が導かれる。なお, 本観測点では第3の断層破壊に対応する地震動が記録されている。

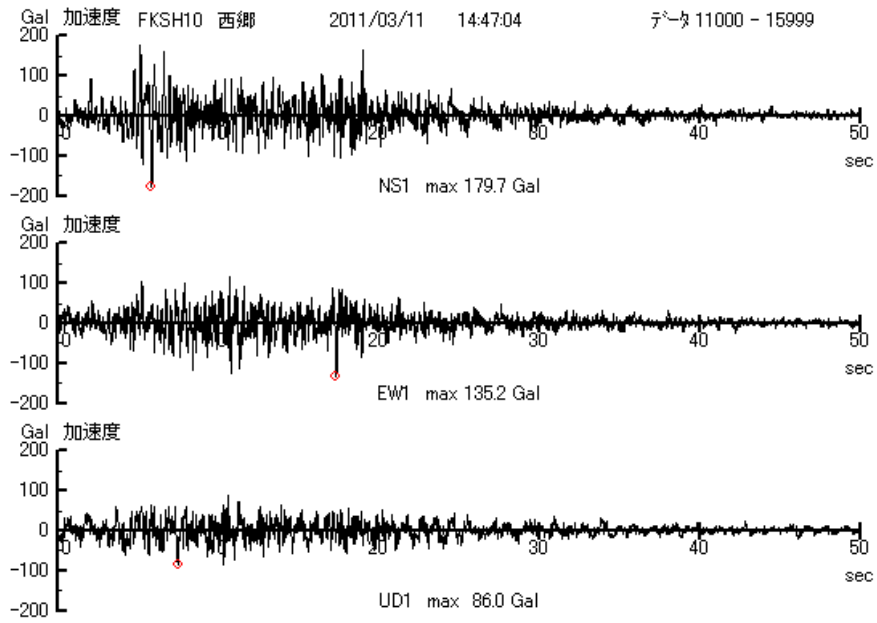
①表層での加速度 (とくに UD 成分) の増幅が極めて大きい (NS : 5.9 倍, EW : 5.7 倍, UD : 11.8 倍, 3成分合成 : 6.7 倍)。表層での速度の増幅は 1.9~3.3 倍である。

②地表では, 加速度が 1335gal と大きい割には, 速度は 40kine 程度である。

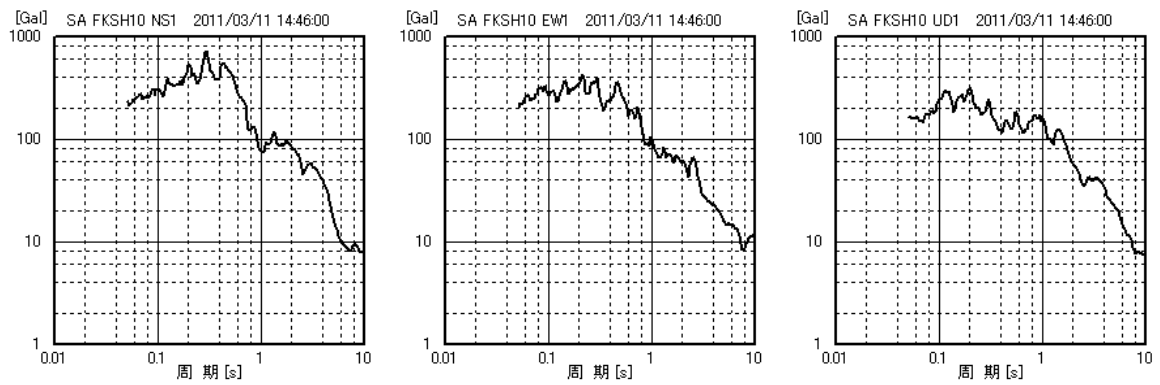
③加速度の卓越周期は地表と地中でほとんど変わらず, 地中の加速度の卓越周期と表層の増幅周期 (固有周期) は概ね一致している。したがって, 3成分とも表層で共振に近い現象が起こったものと考えられる。

KiK-net (西郷) の表層部は V_s が極めて低い凝灰岩で構成されている。一方, 大規模地すべりを起こした葉の木平は火山堆積物地帯であり, 地質的にはほとんど同類とみなしてよい。地震動の卓越振動方向は, NNE と SSW に傾きつつ, 下から上へと突上げる方向である。葉の木平の斜面の向きは NE あり, したがって, 斜面を (鉛直ではなく) 垂直に突き上げる形となっている。岩手・宮城内陸地震時の荒砥沢地すべりと同様, U-D 方向の激しい振動が大規模地すべりの誘因と考えられる。

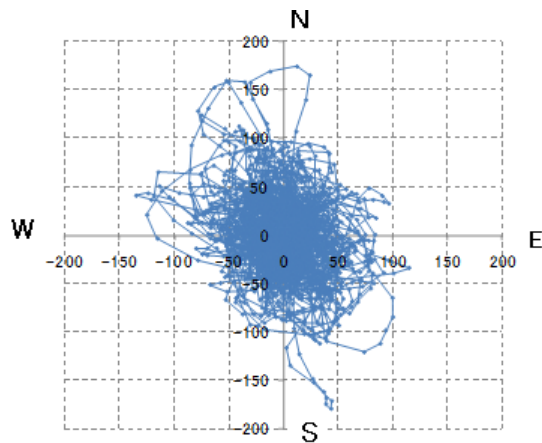
3.2.1~3.2.3 で検討した地震波形データの最大加速度や卓越周期などの諸元は表-3.2.1 のようにとりまとめられる。



(a) 加速度時刻歴

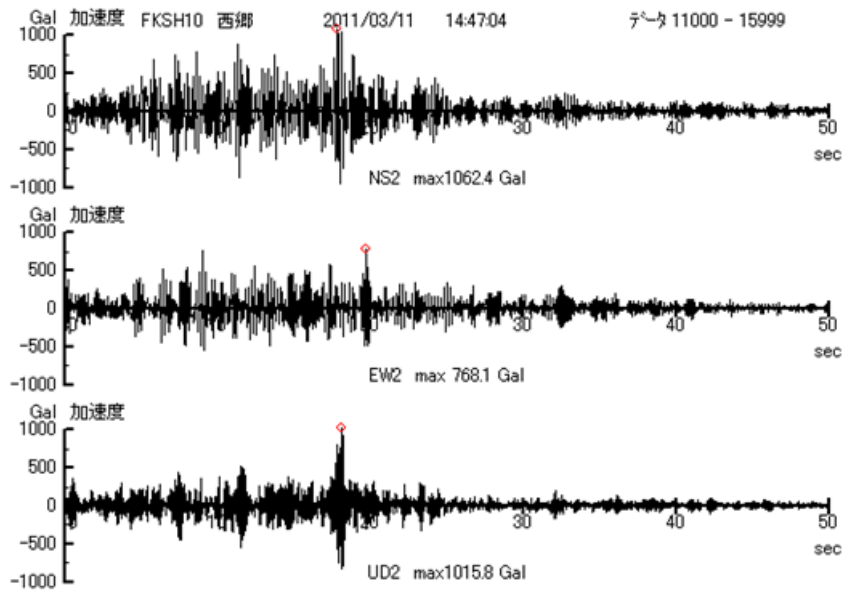


(b) 地震応答スペクトラム (加速度)

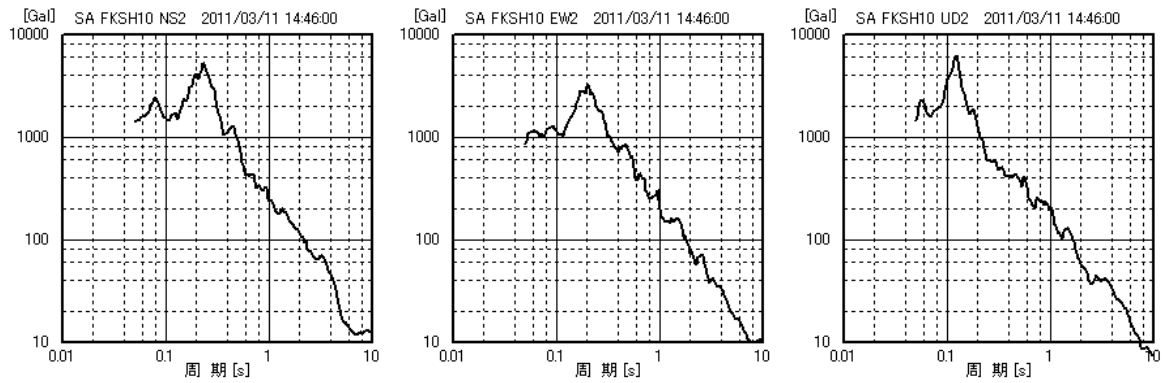


(c) 平面内の振動軌跡 (Gal)

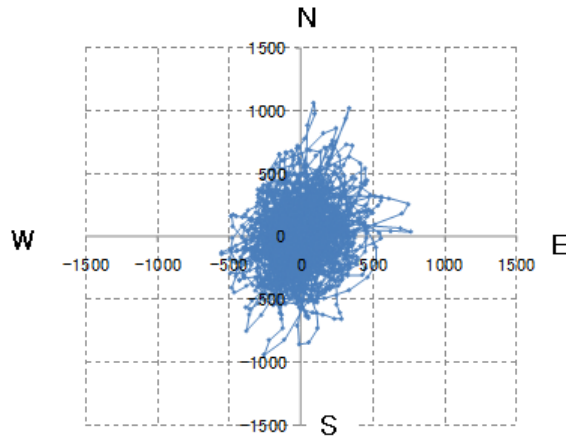
図-3.2.11 東北地方太平洋沖地震における KiK-net 西郷 (FKSH10) (地中, 第3波) の地震動



(a) 加速度時刻歴



(b) 地震応答スペクトラム (加速度)



(c) 平面内の振動軌跡 (Gal)

図-3.2.12 東北地方太平洋沖地震における KiK-net 西郷 (FKSH10) (地表, 第3波) の地震動

地域	観測点名	地震	深度(m)	対象波形	方位	最大加速度 (gal)	卓越周期 (秒)	表層の増幅 周期(秒)	100gal以上 の継続時間 (秒)	最大速度 (km)	卓越周期 (秒)	水平面内の 卓越振動方向	3成分合成値		備考		
													PGA(gal)	振動方向			
岩手・宮城 県境付近	一関西 (IWT25)	①	地中(260)	全体	NS	1036	0.05	0.18			37.5	(1.2)~3.0		1078	—	ボーリング柱状 図は別図	
					EW	748	0.06	0.43		13	34.1	1.2					
					UD	681	~0.08	0.10	(0.21)		56.0	1.5					
			NS		1143	0.10	—			66.9	~1.3						
			EW		1433	~0.14	—		20	62.7	0.5			(E-W)	4022		U-D (構体の軸脚 がややNE-SW に傾く)
			UD		3866	0.06	—			74.8	0.2						
	一関西2 (IWT28)	②	地中(263)	第1波(40~60秒) 第2波(80~110秒)	NS	67.2	0.10	0.36	(0.46)			4.7	1.70		79	(やや構体の 長軸がUS-DN 方向に傾く)	
					EW	51.8	0.08	0.72	(0.11)	0	4.7	1.90					
					UD	49.4	0.08	0.06	(0.10)		4.1	0.85					
			NS		64.3	~0.10	0.52	(0.40)		6.6	1.80						
			EW		65.3	0.20	0.34	(0.79)	0	6.2	1.50			(E-W)	84	—	
			UD		57.7	0.14	~0.053	(0.28)		6.7	~2.80						
福島県南部	築館 (MYG004)	①	地表	全体	NS	266	0.13	—		(H)14	10.2	0.40		298	—	0~-1m:粘 性土 -1~-10m: 岩盤	
					EW	272	0.10	—		(V)8	15.3	~0.80					
					UD	152	0.09	—			6.0	0.75					
			NS		199	0.1	(0.4)			14.4	~0.50						
			EW		289	0.12	—		20	16.6	0.80						
			UD		156	~0.08	—			8.2	~2.80						
	西郷 (FKSH10)	②	地表	第1波(40~60秒) 第2波(90~110秒)	NS	740	0.17	—		(H)18	45.3	(0.17)~4.0		(NE-SW)	812	(NE-SW)	
					EW	678	~0.18	—		(V)12	38.7	3.5					
					UD	224	~0.10	—			14.7	2.0					
			NS		1320	0.15	—			43.4	0.17						
			EW		941	0.15	—		20	49.7	0.23			(N-S)	1521	N-S	
			UD		634	~0.09	—			12.3	0.09	(2.3)					
西郷 (FKSH10)	②	地表	第3波(110~140秒)	NS	2700	0.23	—			111	0.23		N-S	2933	N-S (UD成分も比較 的)		
				EW	1269	0.22	—		20	49.6	0.22						
				UD	1880	0.12	—			34.2	0.12						
		NS		180	0.30	0.25	(0.23)		16.6	0.5	(4.0)						
		EW		135	~0.20	0.21	(0.17)	(H)13	9.6	(0.5)~2.4			(N-S)	199	DNNW-USSE		
		UD		86	(0.12)~0.2	0.094	(0.12)	(V)0	12.8	(1.0)~1.4							
西郷 (FKSH10)	②	地表	第3波(110~140秒)	NS	1062	0.25	—			36.2	0.25		(NNE-SSW)	1335	ボーリング柱状 図は別図		
				EW	768	0.20	—		30	31.2	0.20						
				UD	1016	0.13	—			24.6	0.13						

① 岩手・宮城内陸地震(2008/06/14-08:43)
② 東北地方太平洋沖地震(2011/03/11-14:46)

3.2.1 地震動の特徴

3.2.4 直下型と海溝型の地震に起因する地震動の比較

(1) KiK-net（一関西および一関西 2）における直下型と海溝型の相違

海溝型の加速度の卓越周期は、地中では直下型の2～3倍であり（直下<0.08秒<海溝）、地表ではほぼ同程度になっている（表層の固有周期の影響か）。地中で異なるのは、直下型や海溝型による違いというより、震源距離の長短の影響であろう。また、加速度と速度の大きさは、直下≫海溝となっているが、これは勿論震源距離の違いによるものである。

一方、卓越振動方向に特徴はない。強いて言えばどちらもE-Wで、断層（海溝型の場合海溝軸）の走向（NNE-SSW）にほぼ直交している。

「一関西」は岩手・宮城内陸地震後に「一関西 2」に移設されたもので、ほとんど同一の場所であるため、地中の構造は同じと考えてよい。図-3.2.13と図-3.2.14は同地点における地中に対する地表の地震動の加速度応答スペクトル比であり、表層約260mの増幅特性を示している。(1)は岩手・宮城内陸地震、(2)は東北地方太平洋沖地震の第2波である。同じ地盤なので同じ傾向のスペクトル比が得られてもいいはずであるが、明らかに異なる。(1)はピークが明瞭ではなく、水平動は0.1～0.5秒、UDは0.05～0.2秒に緩やかな膨らみが見られる。一方、(2)もピークは明瞭ではなく、水平動は0.3～0.8秒に、UDは0.05～0.3秒に緩やかな膨らみが見られる。UDはほぼ一致しているが、水平動はずれている。(1)の入力地震動は約1000gal（3成分合成）、(2)は84gal（同）と大きく異なり、同一地盤の増幅度の違いは、入力地震動の大きさによって現れる地盤の非線形性の影響とみられる（直下型、海溝型による違いではない）。被害地震については、(1)の増幅度が目安になる。

ちなみに、図-3.2.15は「西郷」における加速度応答スペクトル比である。ここでは比較的ピークははっきりしており、水平動は0.15～0.25秒、UD成分は0.09～0.15秒にピークがある。大きいところではスペクトル比が30を超えており（一関西では大きくても10～13程度）、入力地震動の卓越周期もほぼその範囲にあったため、表層で激しく増幅された。

以上、地震動から見て、直下型地震と海溝型地震の違いは、単に震源距離の違いに帰すことができるようである。

(2) K-NET（築館）の地表における直下型と海溝型の相違

地表における加速度の卓越周期は、一関西と同様、直下型と海溝型でほぼ等しい。これは表層の固有周期の影響と考えられ、地震の型は関係ない。

卓越振動方向は、直下型（NE-SW）も海溝型（N-S）も、断層（海溝型は海溝軸）の走向（NNE-SSW）にほぼ平行している。

ここでも、直下型と海溝型の違いを裏付けるデータはない。

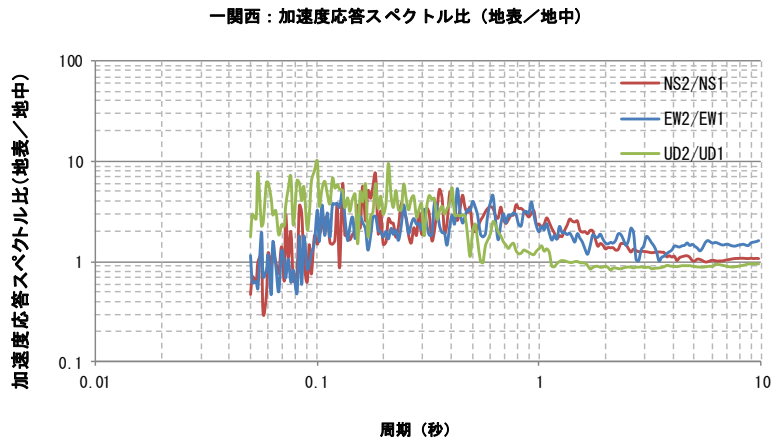


図-3.2.13 加速度応答スペクトル比（一関西，岩手・宮城内陸地震）

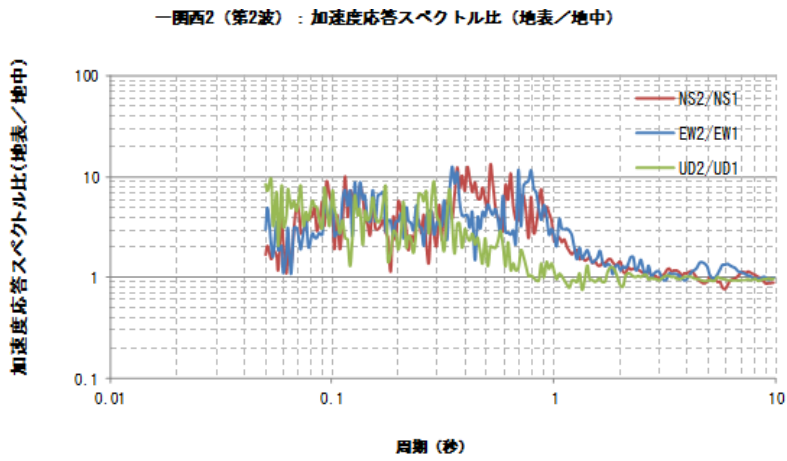


図-3.2.14 加速度応答スペクトル比（一関西2，東北地方太平洋沖地震の第2波）

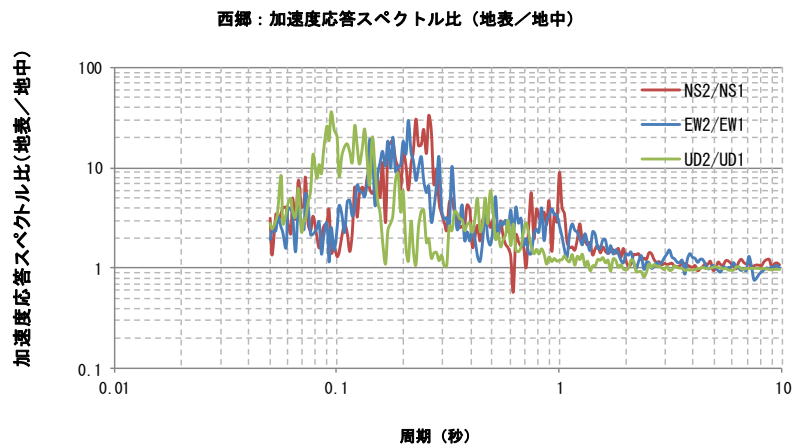


図-3.2.15 加速度応答スペクトル比（西郷，東北地方太平洋沖地震の第3波）