

女川原子力発電所
基準地震動の策定のうち
内陸地殻内地震について
(コメント回答)

平成28年4月8日
東北電力株式会社

審査会合におけるコメント

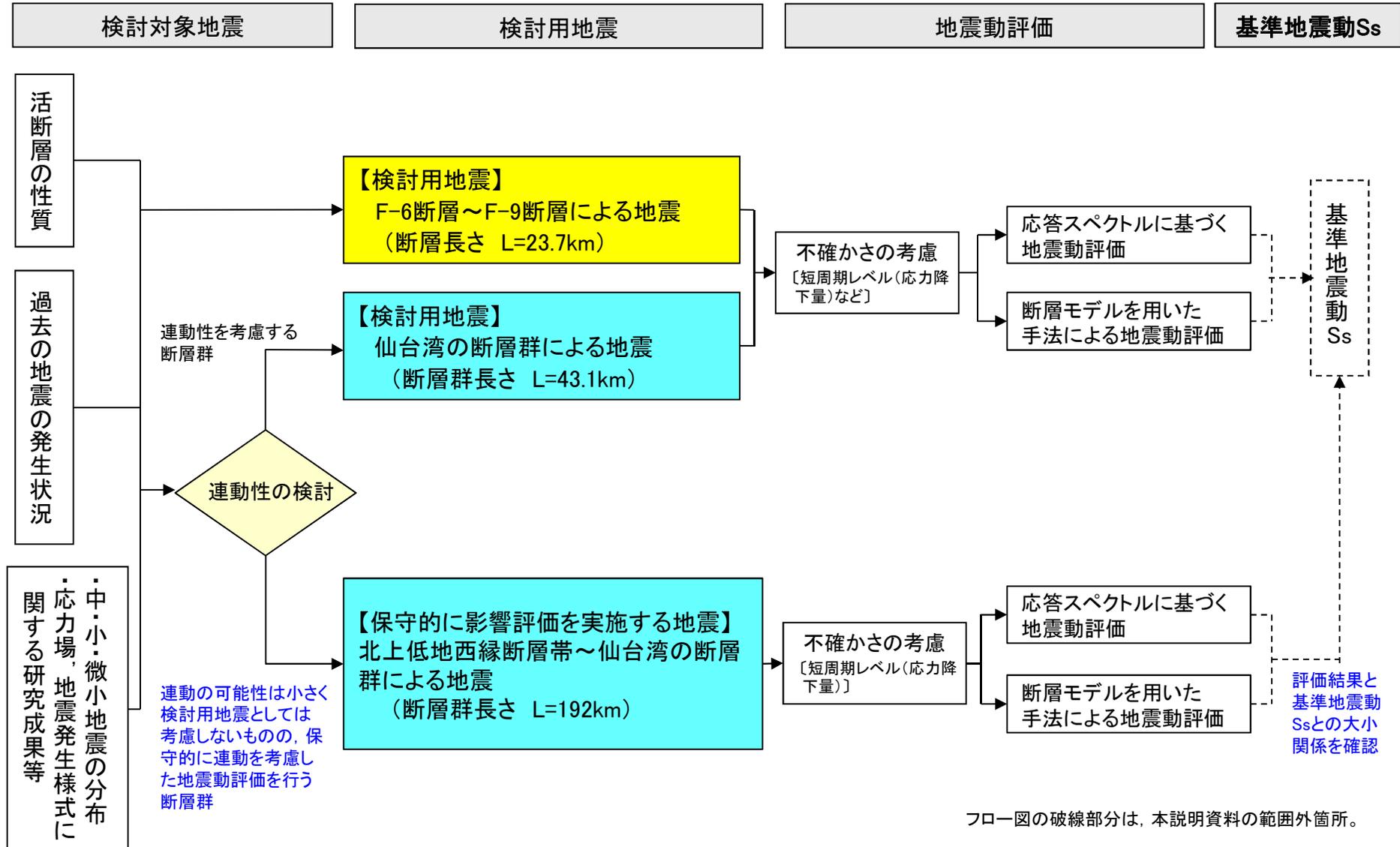
No.	コメント時期	コメント内容	該当箇所
S105	1月8日 第316回審査会合	内陸地殻内地震の検討用地震の選定において、縦軸をリニアで表示した耐専スペクトルによる比較も提示すること。	第3章(p.33, 34)
S106	1月8日 第316回審査会合	F-6断層～F-9断層による地震の応答スペクトルに基づく地震動評価について、断層長さから求めた地震規模(M)だけでなく、地震モーメントから求めたMIについても検討すること。	第4章(p.52, 53) ➢ 松田(1975)及び武村(1990)による検討を実施し、保守的な値を採用することに見直し。
S107	1月8日 第316回審査会合	F-6断層～F-9断層による地震について、断層の配置からアスペリティを2つ設定しているが、アスペリティを1まとめにしたケースについても検討すること。	第4章(p.35～62) ➢ アスペリティの不確かさケースを追加することに見直し。
S108	1月8日 第316回審査会合	F-6断層～F-9断層による地震の地震動評価について、参考にハイブリッド前の統計的グリーン関数法のみでの結果も提示すること。	参考資料B(p.96～100)
S109	1月8日 第316回審査会合	F-6断層～F-9断層による地震の地震動評価において、水平2成分の地震動の大きさが異なる点について、要因を整理すること。	参考資料C(p.101～106) ➢ 水平2成分の放射特性の傾向について分析を実施。
S110	1月8日 第316回審査会合	仙台湾の断層群による地震の経験的グリーン関数法による評価に用いた要素地震について、観測記録を用いて長周期の卓越を説明すること。	参考資料D(p.107～110) ➢ 要素地震の時刻歴波形の分析を実施。
S111	1月8日 第316回審査会合	仙台湾の断層群による地震の地震動評価について、経験的グリーン関数法の要素地震がやや離れて分布しているため、統計的グリーン関数法による評価も行うこと。	参考資料E(p.111～119)
S112	1月8日 第316回審査会合	理論的手法に用いる地下構造モデルの地震基盤相当以浅のQ値について、統計的グリーン関数法と同じ3%とした場合の影響を確認すること。	参考資料F(p.120～122) ➢ 浅部のQ値を3%とした理論計算を実施し、影響は殆どないことを確認。

申請時からの主な変更点

内陸地殻内地震に関する申請時からの主な変更点

No.	項目	申請時	今回説明
1	主な活断層	遠方の活断層である一関-石越撓曲については、文献調査の結果、短い活断層として記載。	連動性の観点から、一関-石越撓曲を詳細な文献調査により再評価。
2	F-6断層～F-9断層の追加地質調査結果を踏まえた断層モデルの見直し	断層長さ 22(km) 地震規模 M7.1 等価震源距離 16(km) <hr/> ・基本ケース ・短周期レベルの不確かさケース	断層長さ 23.7(km) 地震規模 M7.1 等価震源距離 19(km) <hr/> ・基本ケース ・短周期レベルの不確かさケース ・断層傾斜角の不確かさケース ・アスペリティの不確かさケース
3	仙台湾の断層群(検討用地震)	F-12断層～F-14断層及びF-15断層・F-16断層として個別に評価。	連動したケースを検討用地震として評価。
4	北上低地西縁断層帯から仙台湾の断層群	旭山撓曲・須江断層周辺の3断層について連動評価。	保守的な影響評価として北上低地西縁断層帯から仙台湾に至る連動を評価。

内陸地殻内地震の地震動評価フロー



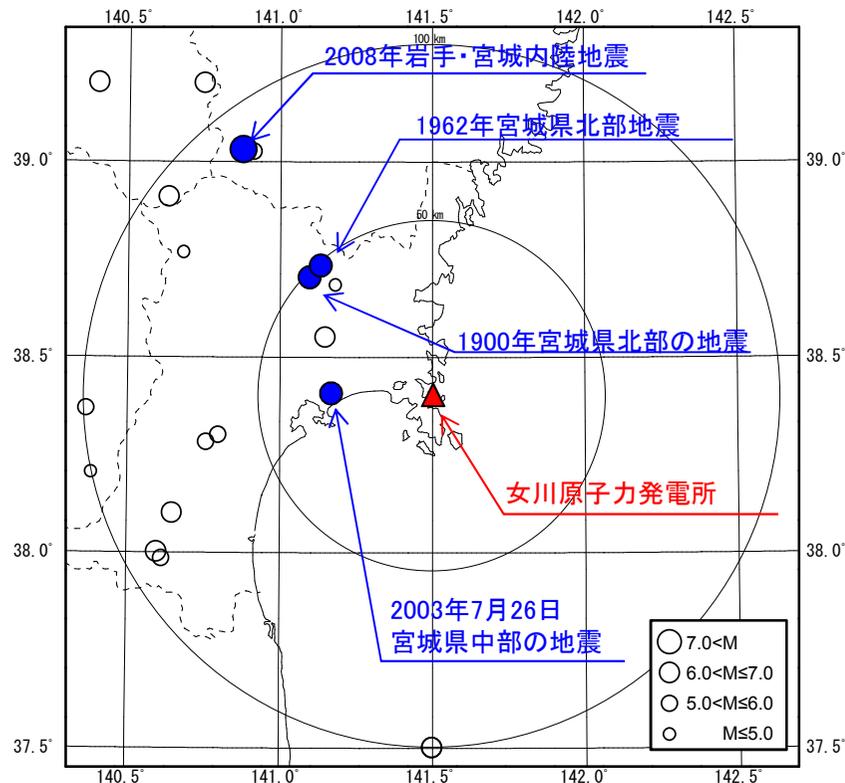
目次

1. 敷地周辺の被害地震及び活断層による地震	5
2. 敷地周辺の内陸地殻内地震の地震発生層	19
3. 内陸地殻内地震の検討用地震の選定	31
4. 検討用地震の地震動評価	35
4. 1 地震動評価の基本事項	36
4. 2 F-6断層～F-9断層による地震の地震動評価	42
4. 3 仙台湾の断層群による地震の地震動評価	63
5. 北上低地西縁断層帯から仙台湾の断層群の保守的連動評価	76
【参考資料】	92

1. 敷地周辺の被害地震及び活断層による地震

1.1 敷地周辺の被害地震(1)

- 敷地が位置する北上山地南部では、被害地震は知られていない。
- 敷地で震度5程度であったとされている被害地震としては、1900年宮城県北部の地震(M7.0)がある〔渡辺(1993)の詳細な震度分布では震度4〕。
- その他に震度4程度であったとされている被害地震としては、1962年宮城県北部地震(M6.5)及び2003年7月26日宮城県中部の地震(M6.4)がある。また、脊梁山地では2008年岩手・宮城内陸地震(M7.2)が発生しているが、気象庁の震度分布では敷地周辺で震度3程度であり、敷地への影響は小さい。



敷地周辺の内陸で発生した主な被害地震

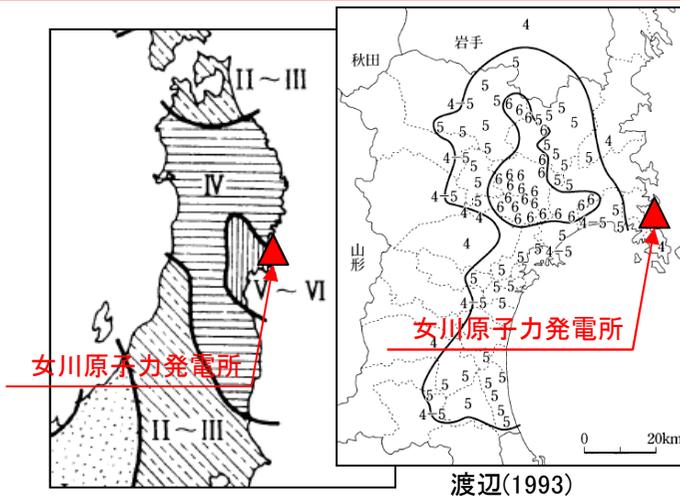
地震名	マグニチュード	震央距離(△)
1900年宮城県北部の地震	M7.0	48km
1962年宮城県北部地震	M6.5	49km
2003年7月26日宮城県中部の地震	M6.4	29km
2008年岩手・宮城内陸地震	M7.2	88km

敷地で震度4程度以上であったとされている被害地震のうち、地震規模と距離との関係から、1900年宮城県北部の地震及び2003年宮城県中部の地震を検討用地震の対象として選定する。

敷地周辺の内陸の被害地震(震源深さ ≤ 30 km)

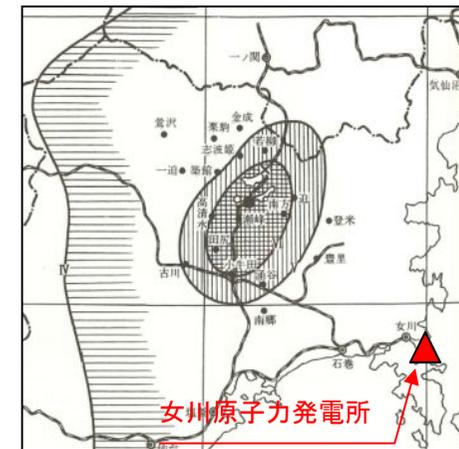
[1922年以前は宇佐美ほか(2013), 1923年から2014年は気象庁地震カタログによる]

1. 1 敷地周辺の被害地震(2)



中央気象台(1904)

1900年5月12日宮城県北部の地震(M7.0)の震度分布
〔宇佐美ほか(2013)に一部加筆〕



1962年4月30日宮城県北部地震(M6.5)の震度分布
〔宇佐美ほか(2013)に一部加筆〕



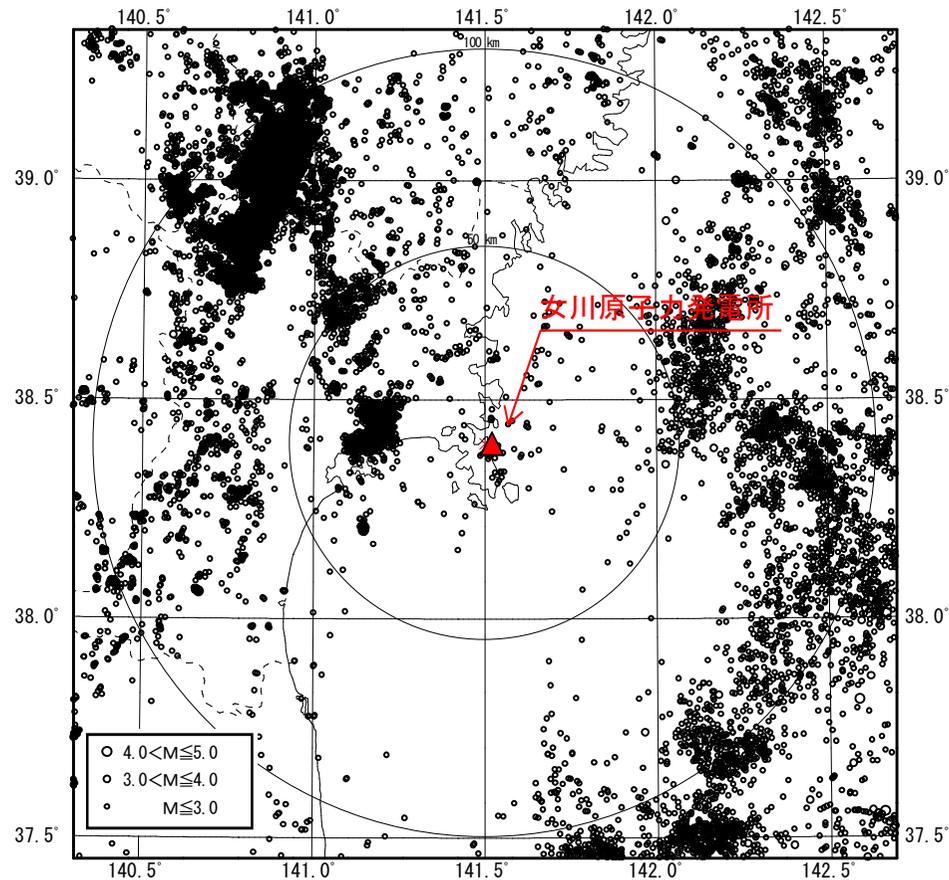
2003年7月26日7時13分宮城県中部の地震(M6.4)の震度分布
〔気象庁震度検索データベース(a)に一部加筆〕



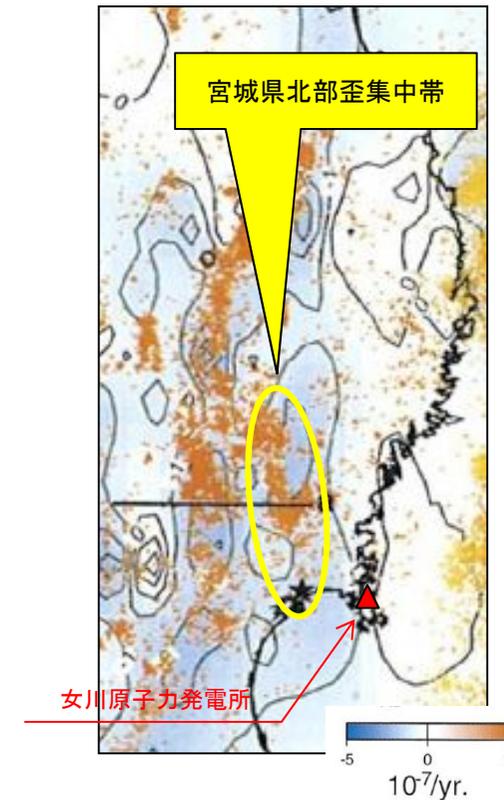
2008年6月14日岩手・宮城内陸地震(M7.2)の震度分布
〔気象庁震度検索データベース(b)に一部加筆〕

1.2 敷地周辺の内陸地殻内地震の発生状況

- 敷地付近(北上山地南部)と内陸地域(宮城県北部歪集中帯)の地震活動性には違いが見られ、敷地付近の微小地震は、内陸地域に比べて発生が少ない。



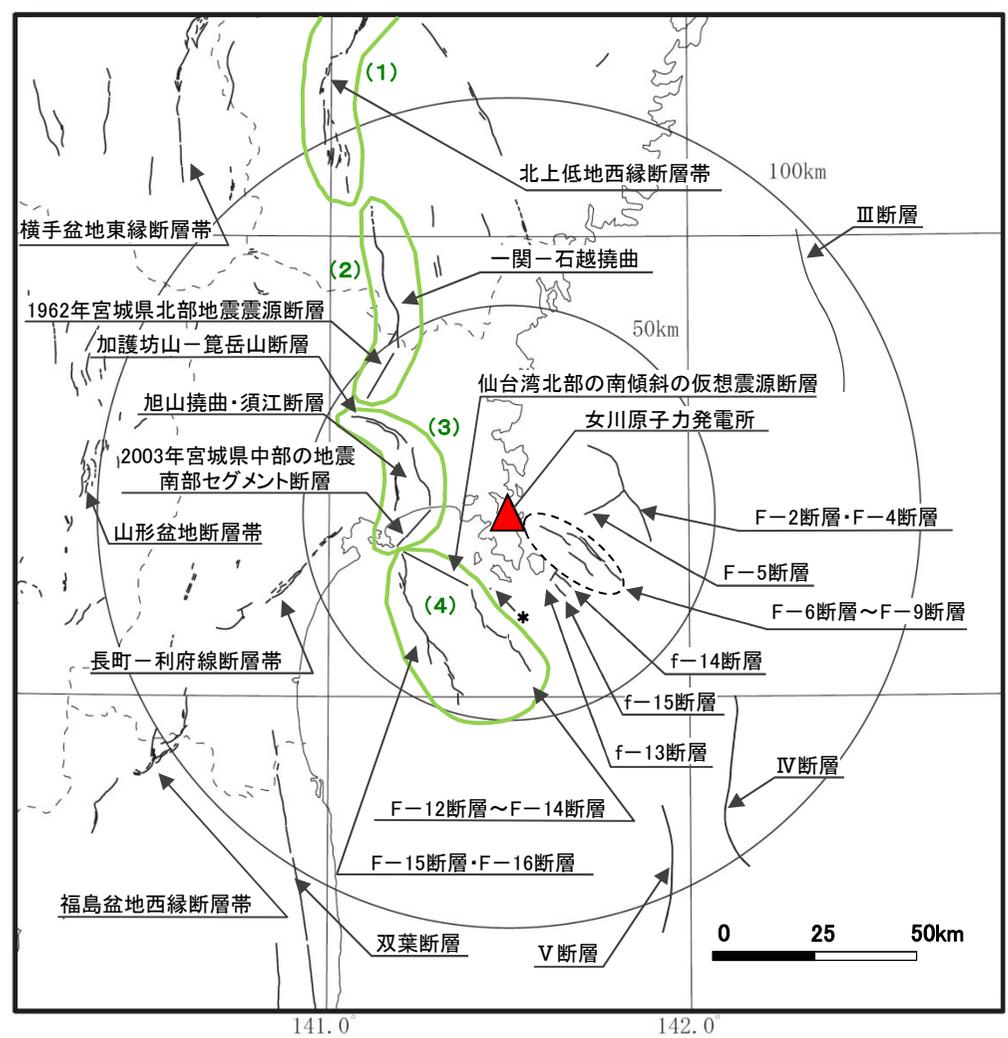
敷地周辺の微小地震分布 ($M \leq 5$, 震源深さ ≤ 30 km)
2006年1月～2011年2月
(気象庁地震カタログ)



GPSに基づき求められた東西成分の歪速度分布
〔長谷川ほか(2004)に一部加筆〕
赤点は浅い地震の分布を示す。

1.3 敷地周辺の主な活断層

➤ 地質調査結果に基づき、敷地周辺の震源として考慮する活断層を示す。



震源として考慮する活断層

震源として考慮する活断層

断層名	断層長さ	連動考慮※3		
		グループ	断層長さ	
加護坊山-笈岳山断層	約17km	(3)	約35km	
旭山撓曲・須江断層	約16km	(3)		
2003年宮城県中部の地震南部セグメント断層	約12km	(3)		
陸域 30km 以遠※1	長町-利府線断層帯	約40km	—	
	北上低地西縁断層帯	約62km	(1)	約62km
	山形盆地断層帯	約60km	—	
	福島盆地西縁断層帯	約57km	—	
	双葉断層	約40km	—	
	横手盆地東縁断層帯	約56km	—	
	1962年宮城県北部地震震源断層	約12km	(2)	約45km
	一関-石越撓曲	約30km	(2)	
F-2断層・F-4断層	約27.8km	—		
F-5断層	約11.2km	—		
F-6断層~F-9断層	約23.7km	—		
仙台湾北部の南傾斜の仮想震源断層※2	約20km	(4)	約40km	
F-12断層~F-14断層	約24.2km	(4)		
F-15断層・F-16断層	約38.7km	(4)		
f-13断層	約3.3km	—		
f-14断層	約5.1km	—		
f-15断層	約3.7km	—		
* 網地島南西沖で1測線のみで認められる断層	—	—		
30km 以遠※1	III断層	約41km	—	
	IV断層	約43km	—	
	V断層	約31km	—	

※1: 敷地から半径30km以遠の断層については文献調査結果に基づき評価した。
 ※2: 連動可能性を考慮する上で仮想的に設定する断層。
 ※3: さらに保守的な観点から、地震動評価では(1)~(4)が連動した場合も考慮する。
 黄色網掛けした断層等は、申請時(H25.12.27)から評価が変更になったものを示す。

1.4 敷地周辺の主な活断層による地震(1) 断層諸元

No.	断層名	活断層長さ (km)	マグニチュード※1,2 M	等価震源距離※3 (km)	備考
1	F-2断層・F-4断層	27.8	7.2	24	<ul style="list-style-type: none"> ・No.1～No.9の断層長さ及び断層位置は地質調査結果による。 ・No.10の位置は活断層研究会編(1991)に、No.11及びNo.12の位置は徳山ほか(2001)による。 ・断層傾斜角は、F-6断層～F-9断層の地質調査結果から60度に設定。 ・地震発生層は、敷地周辺の微小地震分布等を参考に3～15kmに設定。
2	F-5断層	11.2	6.7	23	
3	F-6断層～F-9断層	23.7	7.1	19	
4	F-12断層～F-14断層	24.2	7.1	32	
5	f-13断層	3.3	6.7	17	
6	f-14断層	5.1	6.7	23	
7	f-15断層	3.7	6.7	24	
8	F-15断層・F-16断層	38.7	7.5	39	
9	網地島南西沖で1測線のみで認められる断層	—	6.7	27	
10	Ⅲ断層	41	7.5	86	
11	Ⅳ断層	43	7.6	82	<ul style="list-style-type: none"> ・断層長さ及び断層位置は地質調査結果による。 ・断層傾斜角は、2003年7月26日0時13分宮城県中部の地震を参考に45度に設定。 ・地震発生層は、海野ほか(2004)を参考に2km～11kmに設定。
12	Ⅴ断層	31	7.3	91	
13	加護坊山-箕岳山断層	17	6.9	36	
14	旭山撓曲・須江断層	16	6.8	28	
15	2003年宮城県中部の地震南部セグメント断層	—	5.6	28	<ul style="list-style-type: none"> ・断層位置は、佐藤編著(1989)による。
16	一関-石越撓曲	30	7.3	66	
17	1962年宮城県北部地震震源断層	12(※4)	6.5	48	
18	長町-利府線断層帯	40	7.5	61	<ul style="list-style-type: none"> ・断層諸元は、地震本部(2009a)に基づく。
19	北上低地西縁断層帯	62	7.8	113	
20	山形盆地断層帯	60	7.8	118	
21	福島盆地西縁断層帯	57	7.8	103	
22	双葉断層	40	7.5	82	
23	横手盆地東縁断層帯	56	7.7	125	

※1: 孤立した短い断層については、震源断層が地震発生層の上限から下限まで拵がっているとした場合を考慮し、断層幅と同等の断層長さを仮定した。

※2: 地震規模は松田(1975)による。ただし、2003年宮城県中部の地震南部セグメント断層及び1962年宮城県北部地震震源断層は、気象庁地震カタログによる。

※3: 等価震源距離は一樣断層を仮定して算定。

※4: 震源断層長さ。

: 連動を考慮する断層

1.4 敷地周辺の主な活断層による地震(2) 検討用地震の対象の整理

- 主な活断層による地震について、地震規模と等価震源距離による整理を行い、検討用地震の対象を選定した。

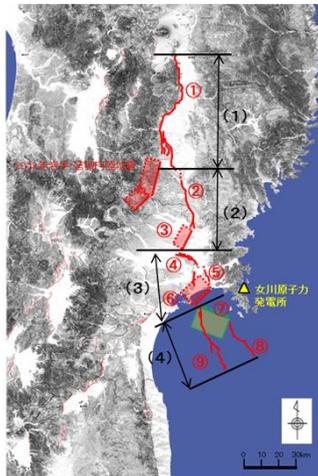
主な活断層による地震(p.10の表を並び替え)				地震規模と等価震源距離による整理結果			
No.	断層名	M	Xeq(km)	No.	断層名	M	Xeq(km)
21	福島盆地西縁断層帯	7.8	103	21	福島盆地西縁断層帯	7.8	103
19	北上低地西縁断層帯	7.8	113				
20	山形盆地断層帯	7.8	118				
23	横手盆地東縁断層帯	7.7	125				
11	IV断層	7.6	82	11	IV断層	7.6	82
8	F-15断層・F-16断層	7.5	39	8	F-15断層・F-16断層	7.5	39
18	長町-利府線断層帯	7.5	61				
22	双葉断層	7.5	82				
10	Ⅲ断層	7.5	86				
16	一関-石越撓曲	7.3	66				
12	V断層	7.3	91				
1	F-2断層・F-4断層	7.2	24	1	F-2断層・F-4断層	7.2	24
3	F-6断層~F-9断層	7.1	19	3	F-6断層~F-9断層	7.1	19
4	F-12断層~F-14断層	7.1	32				
13	加護坊山-箕岳山断層	6.9	36				
14	旭山撓曲・須江断層	6.8	28				
5	f-13断層	6.7	17	5	f-13断層	6.7	17
2	F-5断層	6.7	23				
6	f-14断層	6.7	23				
7	f-15断層	6.7	24				
9	網地島南西沖で1測線のみで認められる断層	6.7	27				
17	1962年宮城県北部地震震源断層	6.5	48				
15	2003年宮城県中部の地震南部セグメント断層	5.6	28				

■ : 連動を考慮する断層, Xeq: 等価震源距離

1.5 断層の連動に関する地質学的な検討

連動しやすいグループに関する地質学的な検討

断層名	既往文献にて一連の断層帯として評価	過去に短い時間差で地震が発生	幾何学的配置				連動しやすいグループとして連動を考慮	(参考) 力学的影響の検討結果(Δ CFF)	
			ほぼ同一線上		弧状配列 (互いに断層面が接するような方向・配置)				
①北上低地西縁断層帯	○	-	■		■		○	(1)グループ ①	
②一関-石越横曲	-	-	-		-		×	△ (弱い促進傾向)	
③1962年宮城県北部地震震源断層	-	-	○	○	○	○	○	○ (顕著な促進傾向)	
④加護坊山-笈岳山断層	-	-	×	×	×	×	×	× (抑制傾向)	
⑤旭山横曲・須江断層	-	○	-	○	○	○	○	○ (顕著な促進傾向)	
⑥2003年宮城県中部の地震南部セグメント断層	-	○	-	○	○	○	○	○ (顕著な促進傾向)	
⑦仙台湾北部の南傾斜の仮想震源断層	-	-	×	×	×	×	×	× (抑制傾向)	
⑧F-15断層・F-16断層	-	-	-	-	△	○	○	○ (顕著な促進傾向)	
⑨F-12断層 ~F-14断層	-	-	-	-	○	○	○	○ (顕著な促進傾向)	



- 既往文献の連動評価の状況、過去の地震の発生状況及び断層分布の幾何学的配置状況を踏まえ、(1)グループ~(4)グループの4つの断層群(グループ)に区分した。
- このうち、(2)グループと(3)グループの連動、(3)グループと(4)グループの連動は、幾何学的配置が連動しにくい配置となっていること、また、力学的影響検討結果(Δ CFF)が抑制傾向を示すことから、連動の可能性は小さいと評価。
- (1)グループと(2)グループの連動は、力学的影響検討(Δ CFF)から弱い促進傾向を示すが、(1)グループは、既に複数のセグメントの集合として評価された長大な断層として扱われており、保守的な評価となっていることから、さらなる連動の可能性は小さいと評価。

中田・今泉(2002)に一部加筆

1.6 地震テクトニクス(1) 宮城県北部歪集中帯と脊梁山地歪集中帯

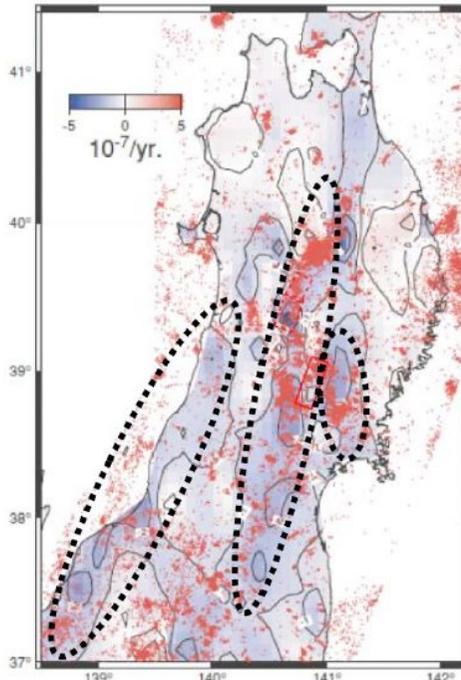
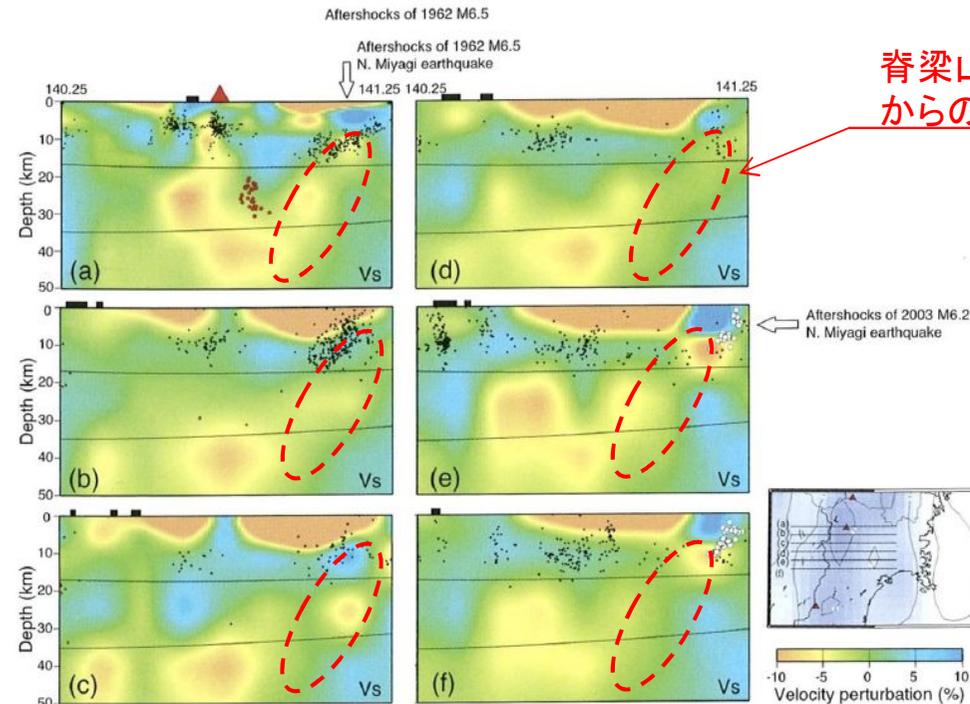


図1 GPS観測によって得られた、東北地方の東西短縮ひずみレートの分布。青い領域は短縮ひずみレートが高いことを表しており、特に顕著な領域を黒点線の楕円で示します。赤点は微小地震の震央分布を表します (Miura et al., 2004)。

出典:(独)防災科学技術研究所

ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクト HP



脊梁山地深部からの分岐

宮城県北部歪集中帯の深部構造〔長谷川ほか(2004)に一部加筆〕

- 脊梁山地直下の最上部マントルに広がる部分熔融域から、宮城県北部歪集中帯に向って地殻浅部まで低速度域が分岐して伸びている。

- 防災科学技術研究所では、東北地方において短縮ひずみレートが特に顕著な箇所として3箇所の歪集中帯を指摘しているが、(1)グループは脊梁山脈沿いの歪集中帯内に、(2)グループ、(3)グループは宮城県北部の歪集中帯内に位置している。(4)グループは宮城県北部の歪集中帯の南方延長部に位置している。
- 長谷川ほか(2004)によれば、宮城県北部歪集中帯の深部には脊梁山地歪集中帯の深部から分岐した低速度層がみられ、水の供給による影響が示唆されるとしている。

1.6 地震テクトニクス(2) 宮城県北部歪集中帯と脊梁山地歪集中帯

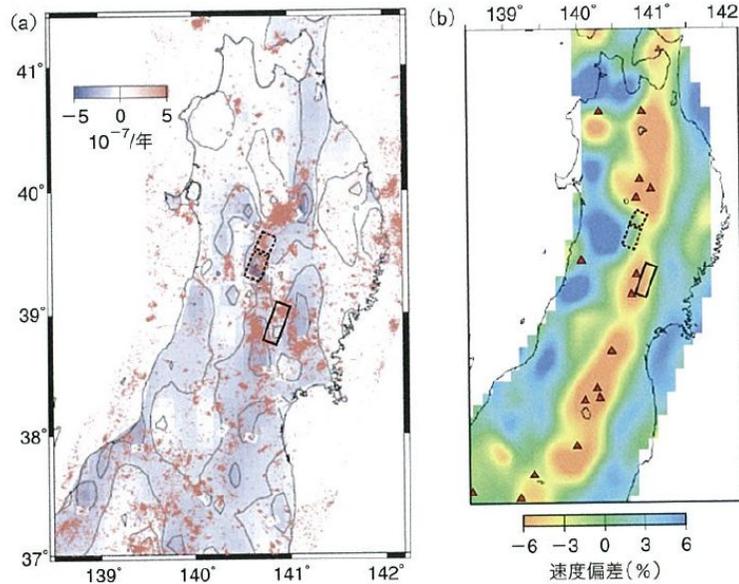


図1—(a)GPSデータから求めた東アジア分布。文献(1)より。期間は1997年～2001年。実線の口は岩手・宮城内陸地震の震源域。破線の口は1896年陸羽地震の震源域⁽¹³⁾を示す。赤点は同じ期間に発生した深さ40kmより浅い微小地震の震源を示す。陸地の細線は歪量の等値線。(b)地震波速度トモグラフィによる深さ40kmでのS波速度偏差分布。文献(3)より。赤▲は活火山。

岡田ほか(2008)

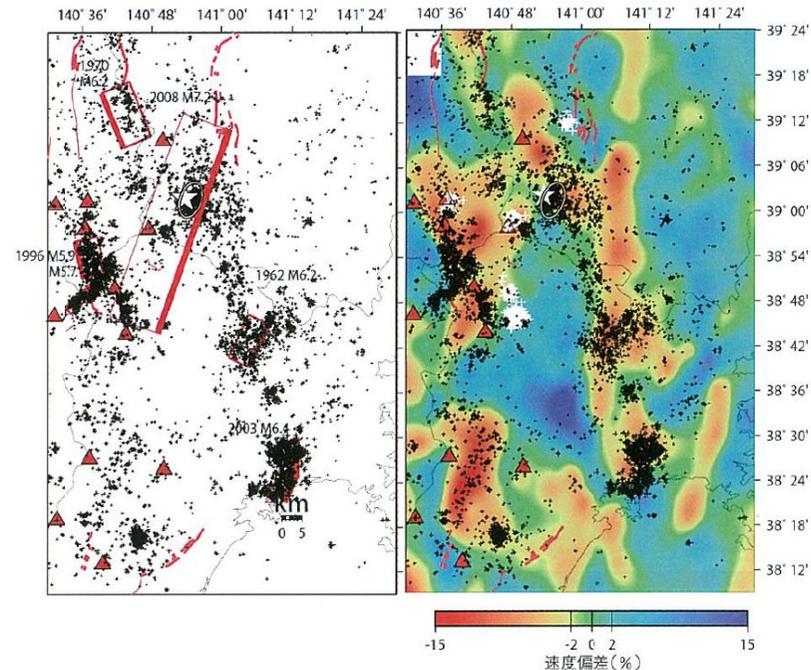


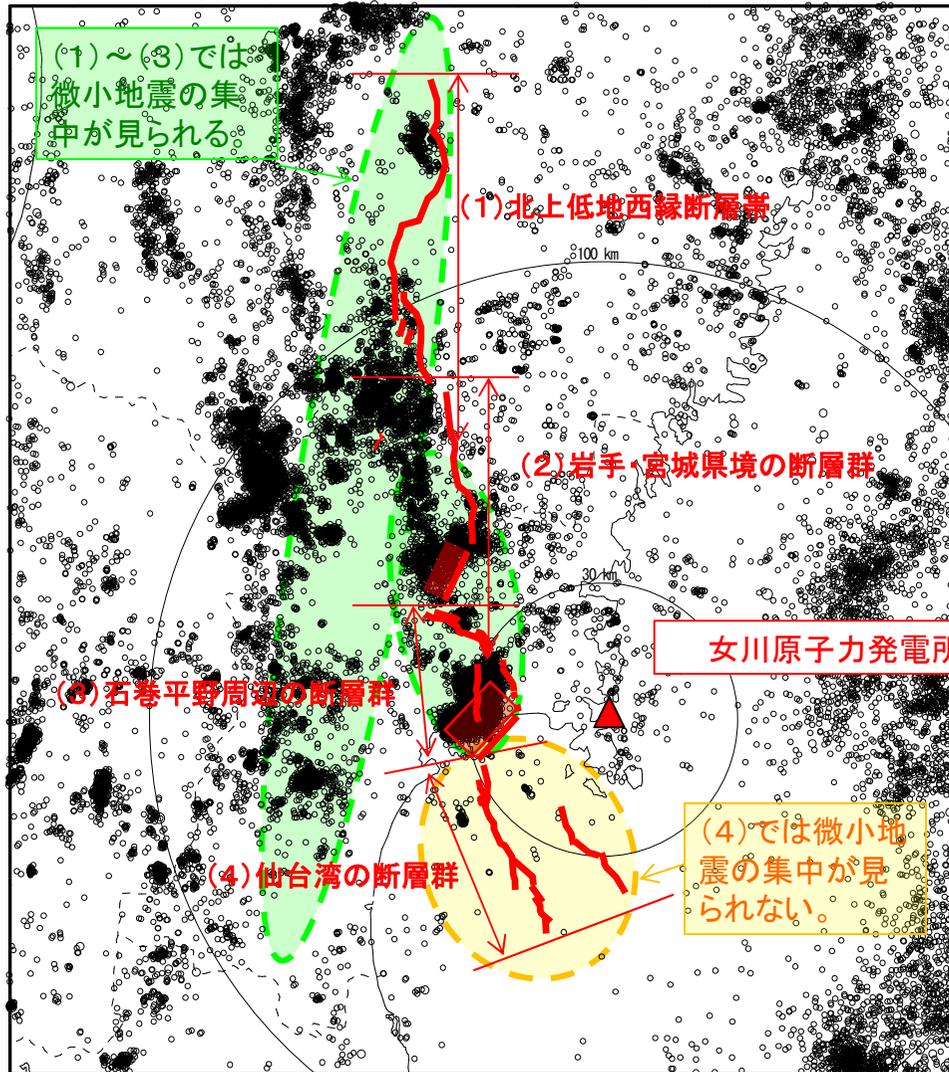
図5—震源域周辺における地震活動と深部構造。文献(12)より。(左)1997年から2008年までの震源を小黑十字で示す。赤▲は第四紀火山、赤太線は活断層を示す。白☆は2008年岩手・宮城内陸地震本震震源を示す。本震震源近くの白抜き楕円は2000年に発生したM4.9の地震の余震域のおよその広がりを示す。1960年以降に発生したM5.5以上の地震の断層面⁽¹³⁾をあわせて示す。太線は断層の浅い側を示す。(右)深さ24kmのS波速度偏差分布を重ねて示す。白十字は深部低周波微小地震。

岡田ほか(2008)によると、脊梁山地歪集中帯では深さ40km位置と深さ24km位置に低速度層が、宮城県北部歪集中帯では深さ24km位置に低速度層が認められるとしている。このことから、宮城県北部歪集中帯は、深部で脊梁山地歪集中帯から分岐した流体の影響を受けていることが示唆される。

【岡田ほか(2008)の知見】

- ✓ 2008年岩手・宮城内陸地震の震源域は脊梁山地歪集中帯に位置し、東西圧縮場において短縮を示している地域である。
- ✓ 歪集中帯に沿ってNNW-SSE方向に地震活動帯がみられる。
- ✓ 深さ24kmのS波速度偏差分布によれば、上記の地域に対応して、深部(地殻中部～下部)には地震波低速度域がみられる。
- ✓ 上記の地震は、震源断層がリフト期に形成された高角な正断層の反転運動により生じたと推定されるが、高角の正断層の(逆断層としての)反転運動のためには、(断層にはたらく摩擦力を低下させるために)高い流体圧が必要であると考えられる。
- ✓ 震源域直下にみられる低速度域は流体の供給源を示し、震源域が高い間隙流体圧の領域になっていることを示唆している。

1.6 地震テクトニクス(3) 微小地震分布



活断層群の分布と震央分布

気象庁地震カタログ(1983年10月~2008年6月), 震源深さ ≤ 30 km

※期間は, 岡田ほか(2008)との対比を考慮し2008年岩手・宮城内陸地震の発生前までとした。

【(1)グループと(2)グループの関係について】

- (1)グループ(北上低地西縁断層帯)の南端付近から, 微小地震の集中箇所が脊梁山脈沿いの歪集中帯と宮城県北部の歪集中帯に分岐するが, 両歪集中帯の微小地震ともクラスタ状の微小地震の集中箇所が認められるなど, 明らかに他のエリアと比べて活動性が高いことが示唆される。
- また, (1)グループの南方の脊梁山脈沿いの歪集中帯にはリニアメントや短い活断層の存在[鈴木ほか(2008)]が, 宮城県北部の歪集中帯には一関-石越撓曲の存在が指摘されている。
- 以上を踏まえると, (1)グループとの連動としては, 同じ脊梁山脈沿いの歪集中帯の南方への連動が主であり, 分岐した宮城県北部歪集中帯方向[(2)グループ方向]への連動の可能性はそれよりも小さいと考えられる。

【(2)グループと(3)グループの関係について】

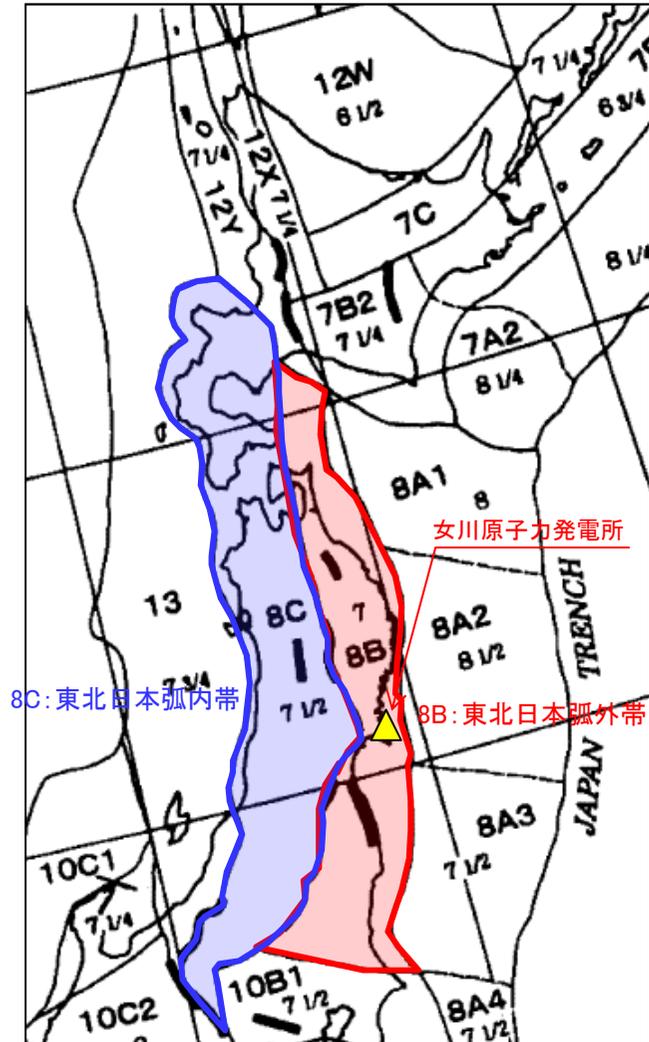
- (2)グループ及び(3)グループが位置する宮城県北部歪集中帯では, 微小地震の集中が見られる。

【(3)グループと(4)グループの関係について】

- (4)グループでは微小地震の集中は見られない。

1.6 地震テクトニクス(4) 地震地体構造区分

■地震地体構造区分



垣見ほか(2003)に一部加筆

【垣見ほか(2003)による知見】

- 地震活動や活断層分布から地震地体構造区分図を作成。
 - 東北地方では、島弧に平行して、B:島弧外帯(非火山性外弧), C:島弧内帯(火山性内弧)等に区分。
- ➔
- 女川原子力発電所及び仙台湾の断層群[(4)グループ]は東北日本弧外帯(8B)に区分されている。
 - 一方、北上低地西縁断層帯[(1)グループ], 岩手・宮城県境の断層群[(2)グループ], 石巻平野周辺の断層群[(3)グループ]は東北日本弧内帯(8C)に区分されている。

垣見ほか(2003)による地震地体構造区の特徴

	8C:東北日本弧内帯	8B:東北日本弧外帯
垣見ほかの知見		
区分の特徴	島弧内帯	島弧外帯
火山との関連	火山性内弧	非火山性外弧, 安定域
地震活動性	高	低
活断層	密度:中, 長さ:中	密度:極小, 長さ:短
歴史地震	1900年宮城県北部の地震(M7.0)	敷地周辺の地震は記載されていない。
備考	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 北上低地西縁断層帯, 岩手・宮城県境の断層群, 石巻平野周辺の断層群が含まれる。 ➤ また, 以下の被害地震が発生している。 1962年宮城県北部地震(M6.5) 2003年宮城県中部の地震(M6.4) 2008年岩手・宮城内陸地震(M7.2) 	女川原子力発電所及び仙台湾の断層群が含まれる。

- 連動を考慮する活断層群のうち, (1)北上低地西縁断層帯, (2)岩手・宮城県境の断層群, (3)石巻平野周辺の断層群は同一の地震地体構造区分に分類される。

1.7 グループ間が連動する地震評価の位置づけ

地質学的検討に地震テクニクス等の検討を加味した連動性の評価

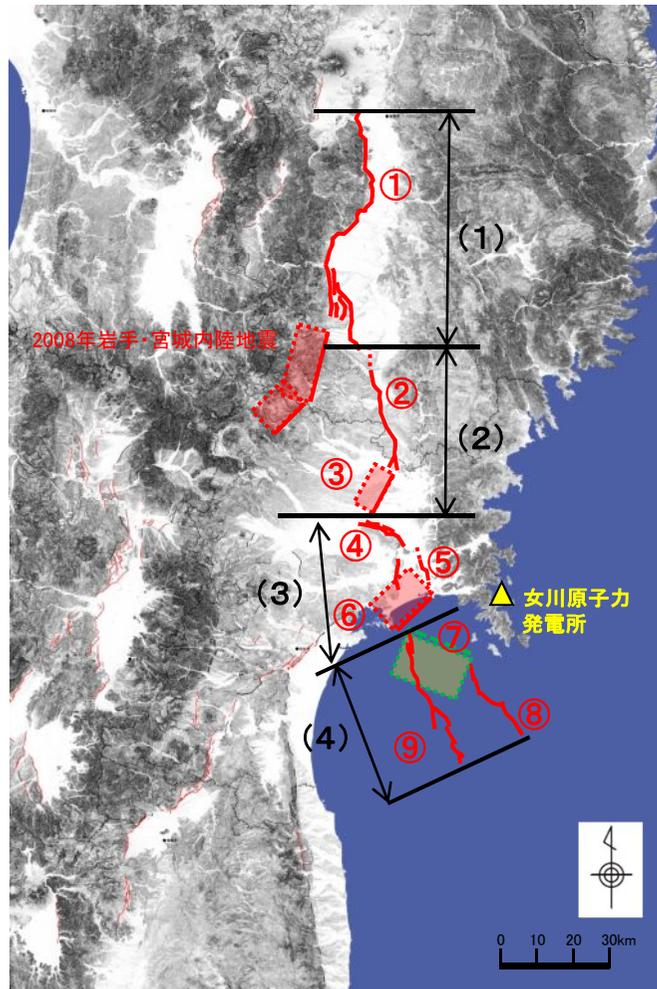
	地質学的検討		歪集中帯	微小地震分布	地震地体構造	地震動評価上考慮するグループ間の連動性	
	幾何学的配置	力学的影響評価 (\angle CFF)				基本的な考え方	保守的な影響評価
(1)北上低地西縁断層帯	脊梁山地歪集中帯、宮城県北部歪集中帯の両方に活断層の存在が指摘されている。	宮城県北部集中帯に属す一関-石越撓曲とは弱い促進傾向を示す。	脊梁山地歪集中帯	集中が見られる。 (南方延長で2008年岩手・宮城内陸地震が発生)	東北日本弧内帯(火山性)に含まれる。	【連動しない】 宮城県北部歪集中帯深部の低速度域は脊梁山地歪集中帯深部から分岐したものであり、(1)の連動は、歪速度と歪集中帯の規模が大きい脊梁山地歪集中帯沿いに想定することが基本と考えられる。	【連動を考慮】 地質学的検討及び微小地震の集中等を考慮して宮城県北部歪集中帯への連動を想定する。
(2)岩手・宮城県境の断層群			宮城県北部歪集中帯(脊梁山地深部から分岐)	集中が見られる。 (1962年宮城県北部地震が発生)	東北日本弧内帯(火山性)に含まれる。		
(3)石巻平野周辺の断層群	連動し難い配置。	抑制傾向を示す。	宮城県北部歪集中帯(脊梁山地深部から分岐)	集中が見られる。 (1900年宮城県北部、2003年宮城県中部の地震が発生)	東北日本弧内帯(火山性)に含まれる。	【連動しない】 幾何学的配置及び力学的影響検討の結果から連動しにくいと考えられる。	【連動を考慮】 微小地震の集中等を考慮して連動を想定する。
	連動し難い配置。	抑制傾向を示す。					
(4)仙台湾の断層群	連動し難い配置。	抑制傾向を示す。	防災科研(p.16)では歪集中帯は示されていない。	集中は見られない。 (被害地震も知られていない)	東北日本弧外帯(非火山性)に含まれる。	【連動しない】 幾何学的配置及び力学的影響検討から、さらに地震地体構造区分及び微小地震分布の特徴が異なることから連動しにくいと考えられる。	【連動を考慮】 (1)(2)(3)の延長上に位置することから、連動を想定する。

※連動し易い傾向を網掛けで示す。

【保守的に影響評価を行なう地震】

- 北上低地西縁断層帯から仙台湾の断層群に至る複数の断層群[(1)+(2)+(3)+(4)]が連動した場合の地震動について、**保守的な観点から影響評価を実施**する。

1.8 考慮する活断層の連動



中田・今泉編(2002)に一部加筆

検討用地震の対象として連動を考慮する断層群

連動のグループ	活断層群による地震	活断層長さ(km)	マグニチュードM	等価震源距離(km)
(1)	北上低地西縁断層帯による地震(※1)	61.1	7.8	113
(2)	岩手・宮城県境の断層群による地震(※2)	43.8	7.6	58
(3)	石巻平野周辺の断層群による地震(※2)	44.0	7.6	31
(4)	仙台湾の断層群による地震(※2)	43.1	7.6	31

※1: 地震本部(2009a)等に基づく。等価震源距離は、一様断層を仮定して算定。

※2: 断層位置は地質評価結果による。断層長さは断層モデルによる。地震規模は松田(1975)による。等価震源距離は一様断層を仮定して算定。

保守的な観点から連動による影響評価を実施する断層群

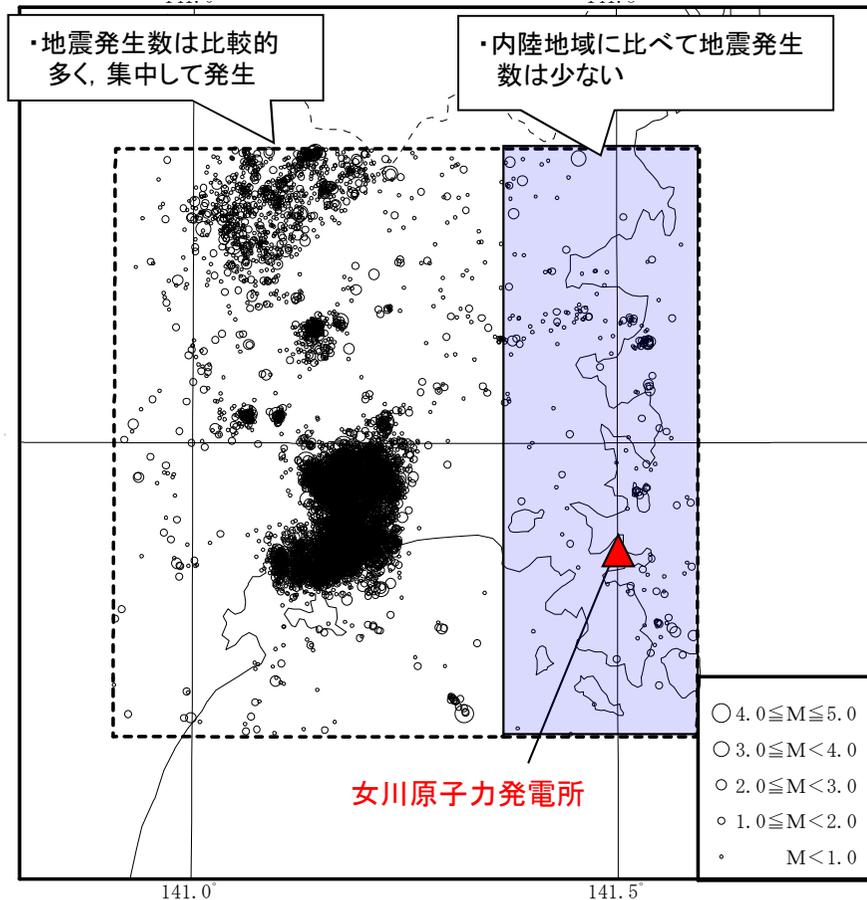
活断層群による地震	活断層長さ(km)	マグニチュードM	等価震源距離(km)
北上低地西縁断層帯～仙台湾の断層群による地震 [(1)+(2)+(3)+(4)]	192	8.1	40

※3: 地震規模は武村(1990)による。等価震源距離は断層モデルを仮定して算定(p.76, 84)。

2. 敷地周辺の内陸地殻内地震の地震発生層

2.1 敷地周辺の微小地震分布(1) $M \leq 5$

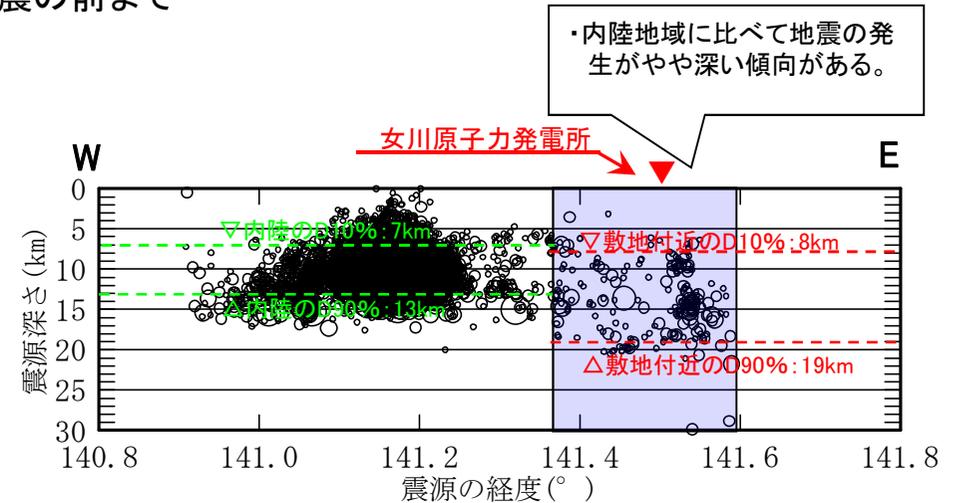
■1998年1月～2011年2月:2011年東北地方太平洋沖地震の前まで



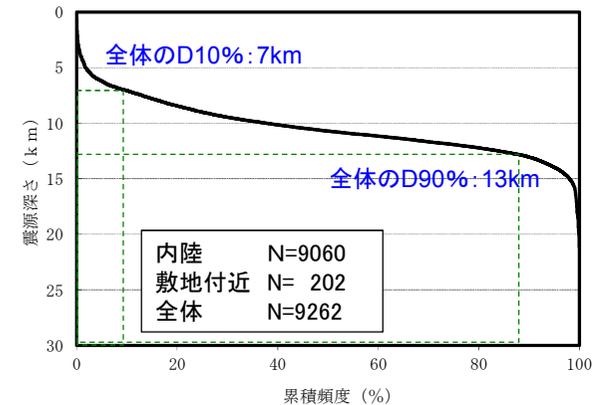
敷地周辺の微小地震分布

震源深さ0～30km, 1998年～2011年2月

(気象庁地震カタログ)



・内陸地域に比べて地震の発生がやや深い傾向がある。

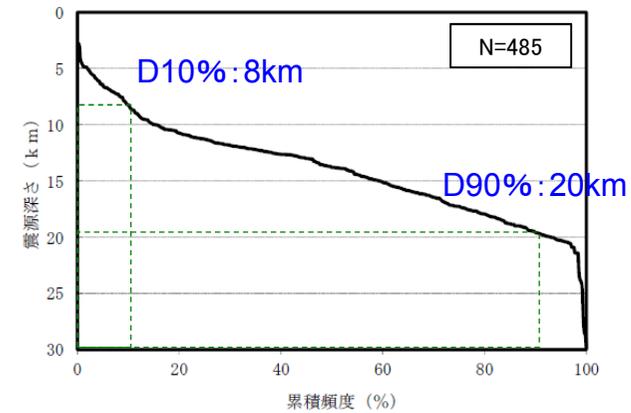
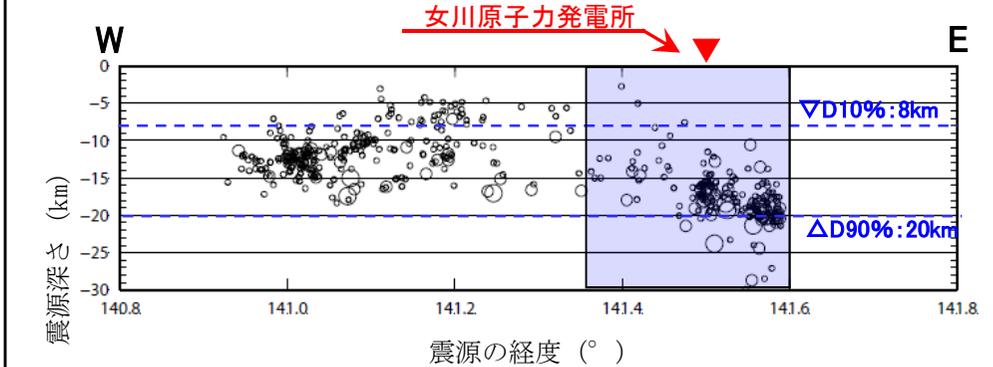
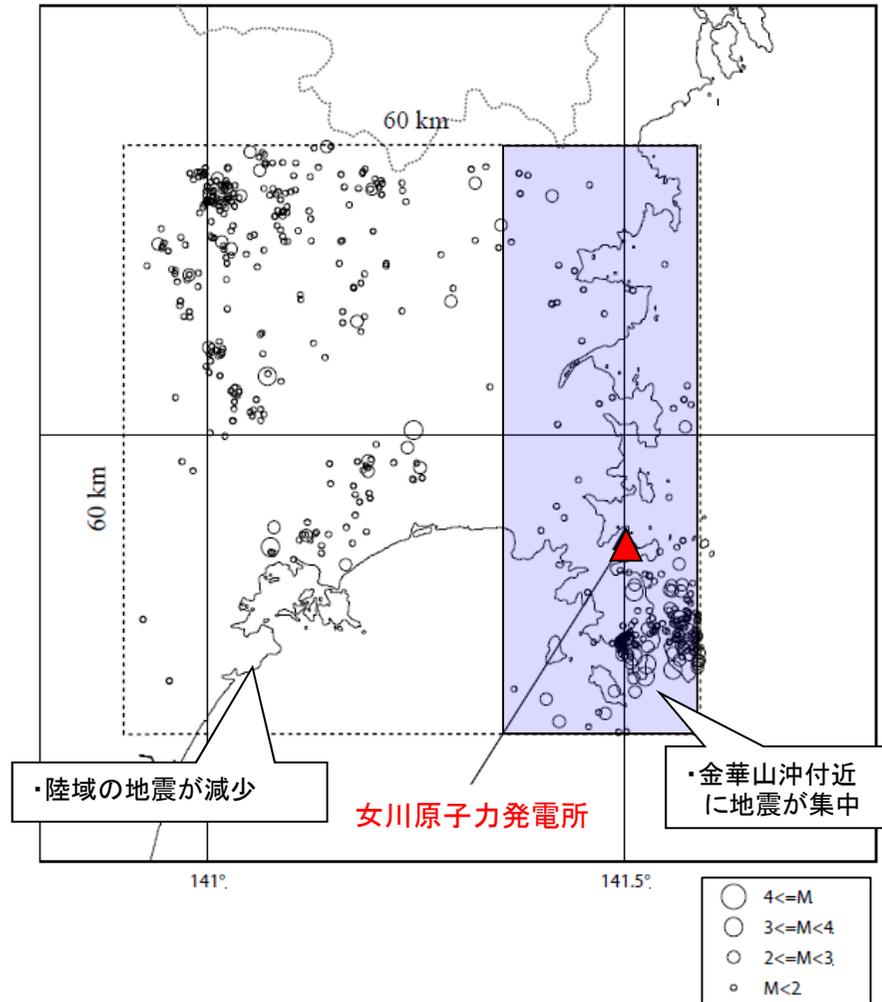


敷地周辺の微小地震の深さ分布

(1998年～2011年2月)

2.1 敷地周辺の微小地震分布(2) $M \leq 5$

■2011年3月～2014年7月:2011年東北地方太平洋沖地震の後



敷地周辺の微小地震深さ分布
(2011年3月～2014年7月)

敷地周辺の微小地震分布
震源深さ0～30km, 2011年3月～2014年7月
(気象庁地震カタログ)

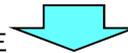
2.2 2003年宮城県中部の地震に関する知見に基づく検討(1)

【海野ほか(2004)】

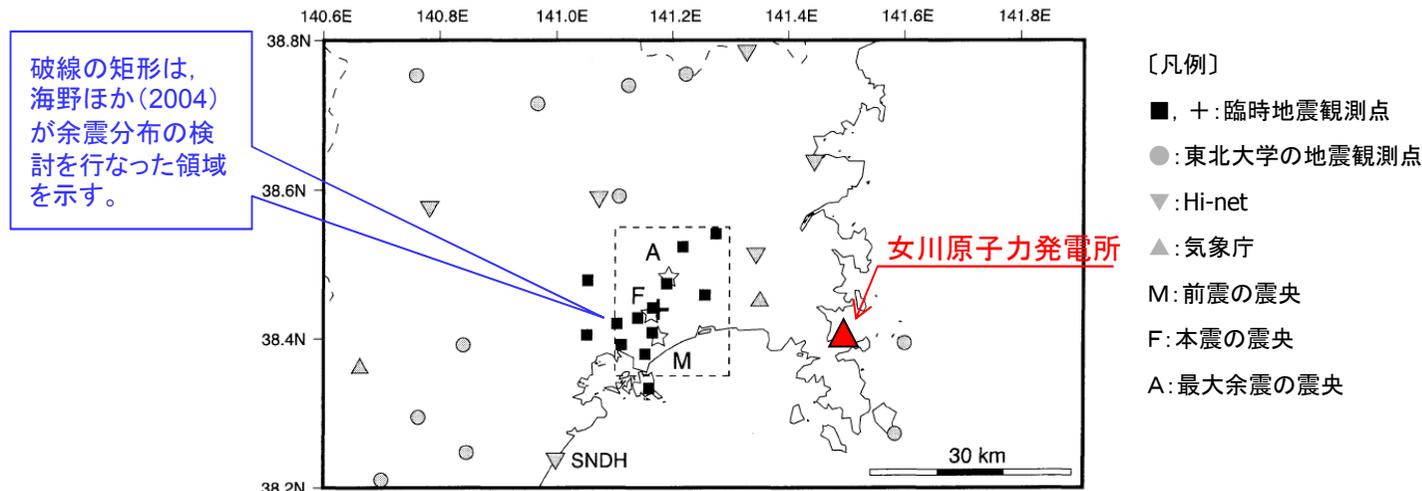
- 2003年宮城県中部の地震の震源域について、定常観測点は15km以上離れていることから、定常観測点のデータだけでは地表から深さ10数kmの範囲に分布する余震を精度よく決められないこと、本震の震源断層の位置・形状の推定に問題が生じることが予想される。
- 震源域の直上に14点の臨時地震観測点を設置して定常観測点のデータと併合処理を行い、余震の震源分布等を求めた。
- 東北大学ルーチン震源決定(※1)に用いる地震波速度構造を用い、さらに堆積層の影響を考慮するため観測点補正(※2)を行った。

※1: 東北大学が行っている震源決定

※2: SNDH観測点ボーリング孔における堆積層のVs, Vpを参考に観測走時を補正



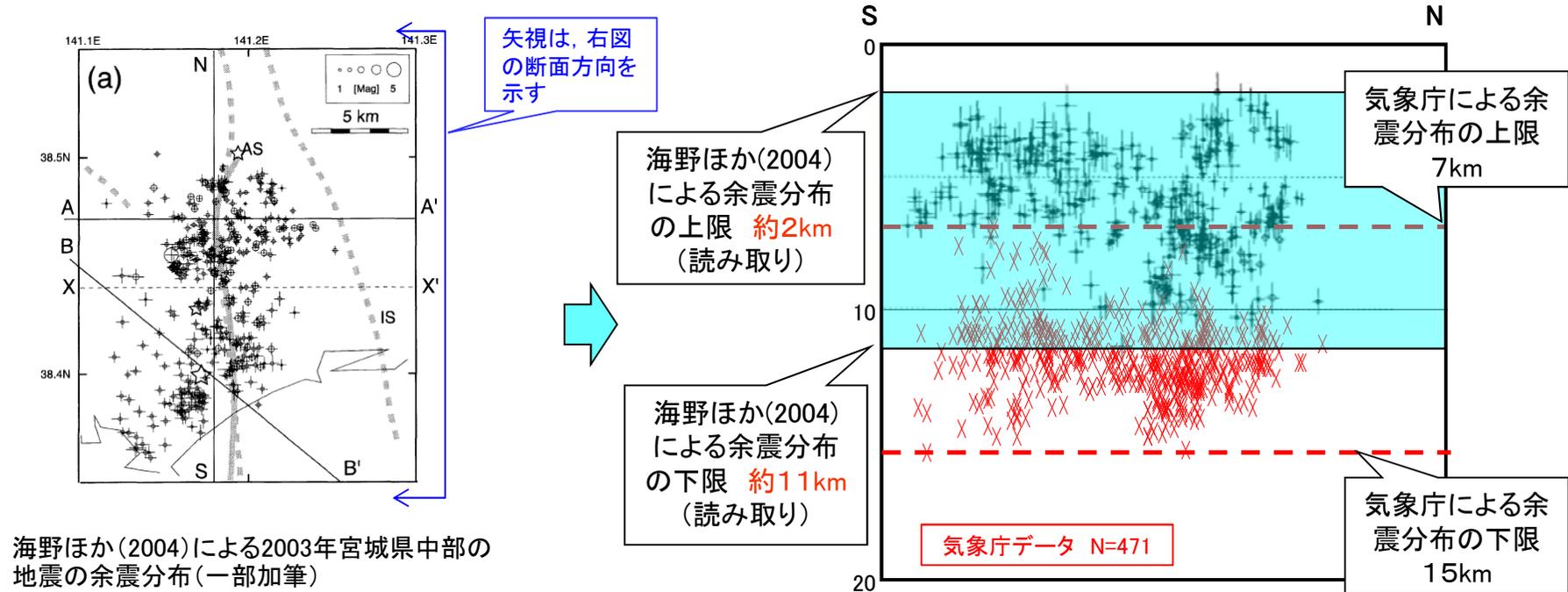
敷地周辺(北上山地南部)の地震発生層を設定するにあたり、海野ほか(2004)のデータによる精度のよい内陸地域の震源深さ分布を比較に用いた。



2003年宮城県中部の地震の震央と海野ほか(2004)による臨時地震観測点(一部加筆)

2.2 2003年宮城県中部の地震に関する知見に基づく検討(2)

■海野ほか(2004)による2003年宮城県中部の地震の余震分布と気象庁データの比較



- 凡例 ☆ : 前震, 本震, 最大余震の震央
○ : 海野ほか(2004)の余震分布
+ : 海野ほか(2004)の余震分布の標準偏差
--- : 旭山撓曲(AS), 石巻湾断層(IS)
※石巻湾断層は須江断層に相当する。

海野ほか(2004)の余震分布と気象庁地震カタログの比較

[気象庁地震カタログの期間と範囲は海野ほか(2004)と同じとした。]

- 凡例 ○ : 海野ほか(2004)の余震分布
+ : 海野ほか(2004)の余震分布の標準偏差
X : 気象庁による余震分布

2003年宮城県中部の地震の例では、稠密地震観測及び適切な速度構造モデルを用いて決定された震源と気象庁の震源を比較すると、余震分布の上限・下限は気象庁に比べて4~5kmほど浅く再決定される。

2.3 敷地周辺の内陸地殻内地震の特徴

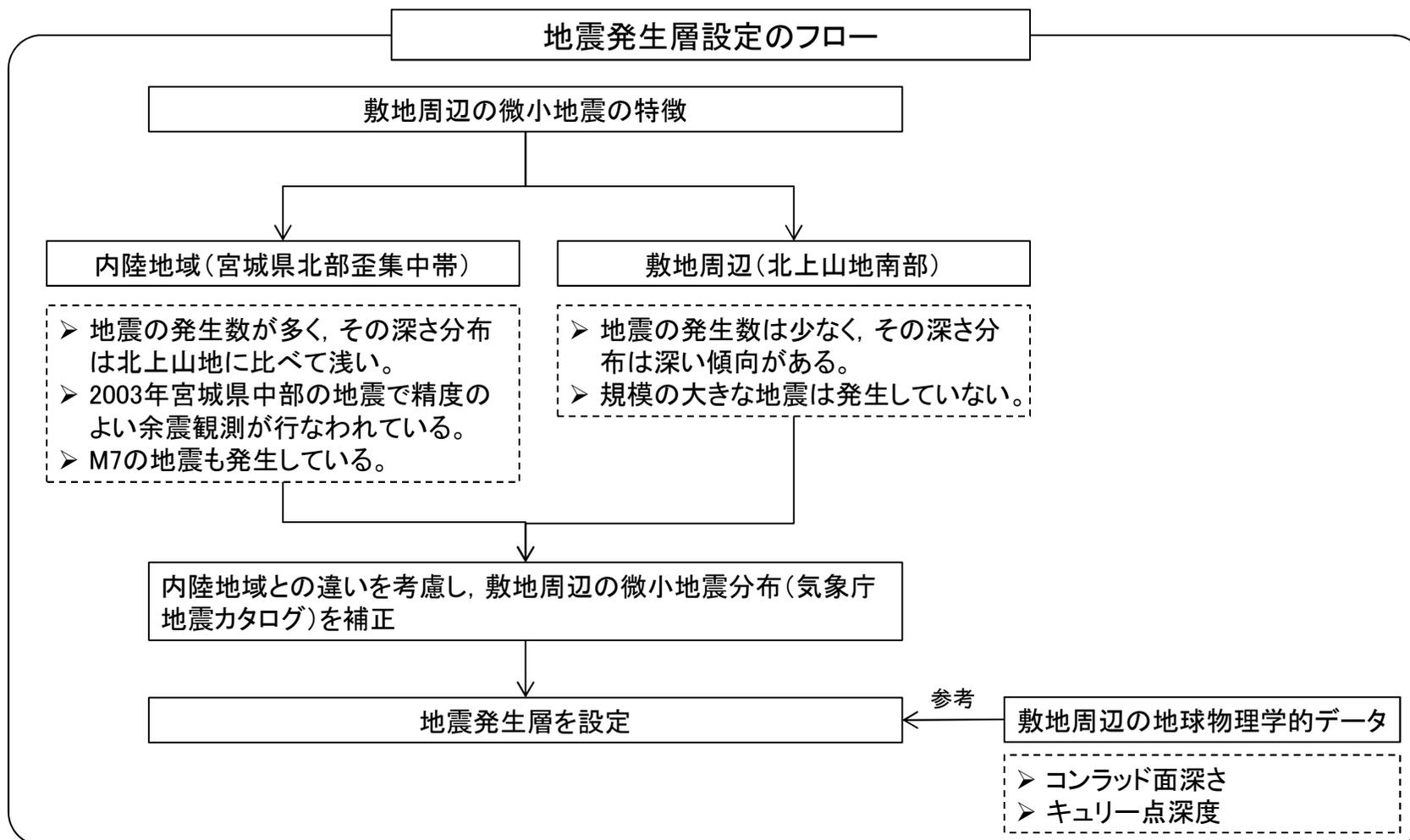
敷地周辺の特徴の整理

着目点		内陸地域(宮城県北部歪集帯)	敷地周辺(北上山地)
微小地震分布	地震発生数	多い。	少ない。
	平面的な分布	集中が見られる。	比較的均質に分布。
	震源深さ分布	精度良く再決定された2003年宮城県中部の地震の余震は、深さ2～11km程度に集中して分布する。気象庁地震カタログに比べ、4～5km浅い。	気象庁地震カタログによれば、浅い領域には発生せず、上端下端とも内陸地域よりもやや深くなる傾向が見られる。
地殻の構造		宮城県北部では、脊梁山地直下から分岐した低速度層の影響により、歪集中帯を形成している。[長谷川ほか(2004)]	古い岩石が広く分布し、比較的安定した地質。地殻変動も比較的小さく、活断層も少ない。[地震本部編(1997)]
過去の地震		M7クラスの地震も発生している。 ・1900年宮城県北部(M7.0)	敷地周辺では、規模の大きな地震は発生していない。また、北上山地でも大きな地震は知られていない。最大でも1931年岩手県小国付近の地震(M6.5)。この地震の深部には低速度域が分布しており※、北上山地の中でも特異な領域と考えられる。

※長谷川ほか(2008)記載の図から読み取り。

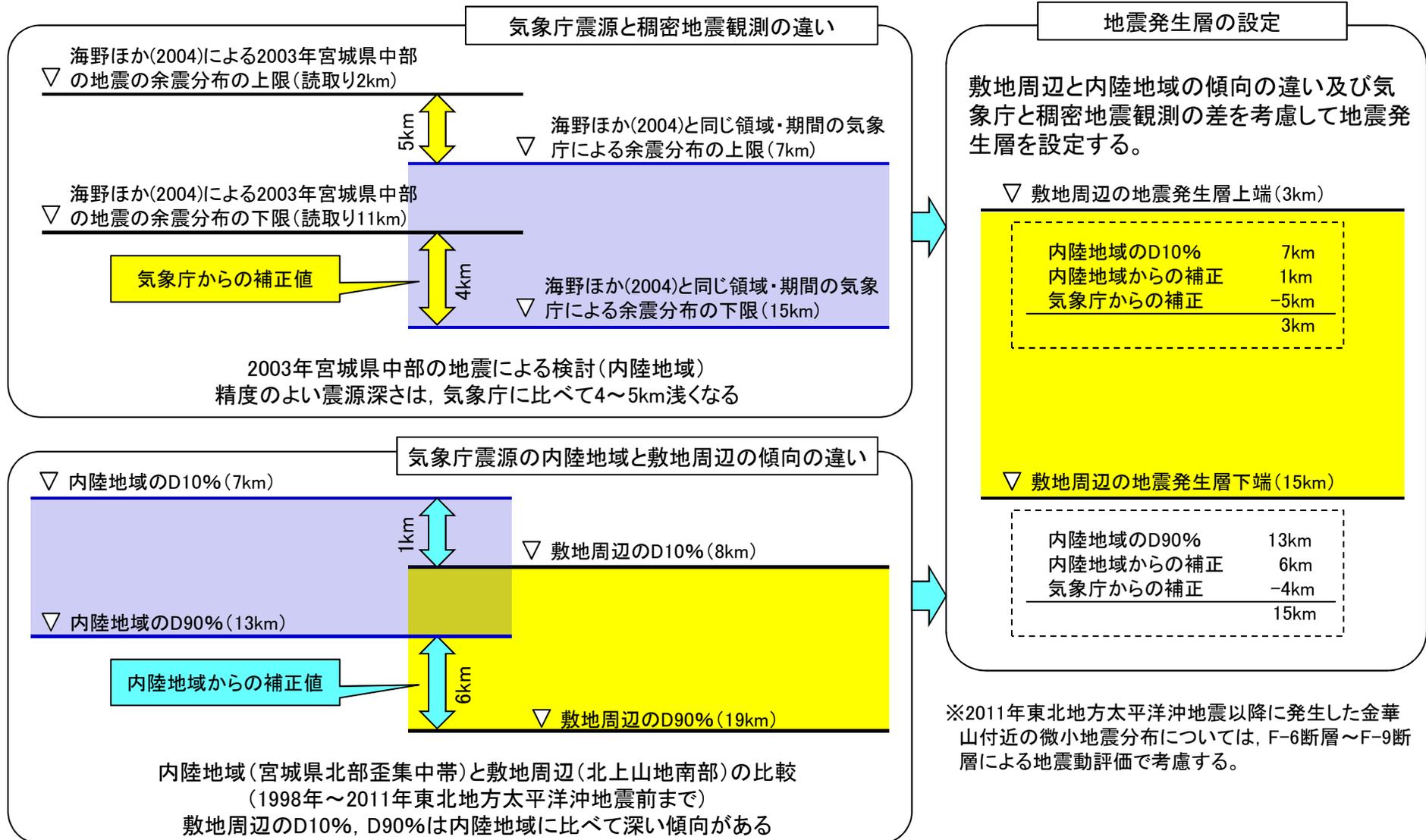
2.4 敷地周辺の地震発生層の設定(1)

- 検討用地震の震源モデルの設定にあたり、敷地周辺の地震発生層の設定を行った。
- 地震発生層は、敷地周辺で発生した微小地震の震源深さ分布から設定し、コンラッド面等の地球物理学的データとの整合を確認した。



2.4 敷地周辺の地震発生層の設定(2)

■内陸地域と敷地周辺の微小地震の深さ分布の違い等を踏まえた地震発生層の設定

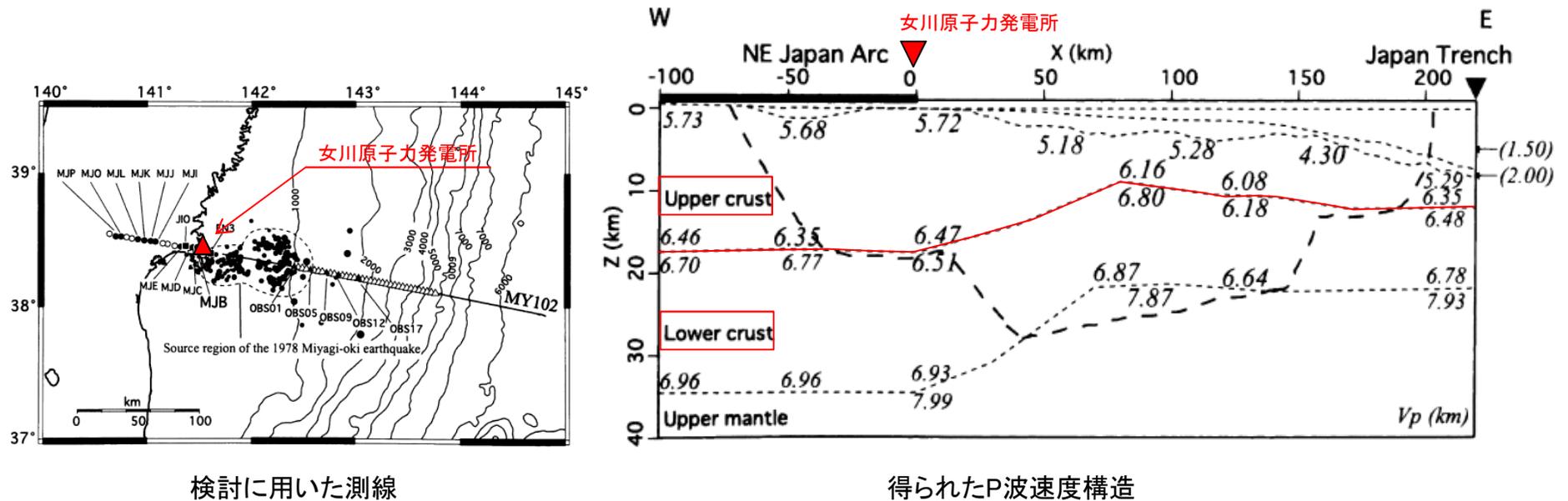


※2011年東北地方太平洋沖地震以降に発生した金華山付近の微小地震分布については、F-6断層~F-9断層による地震動評価で考慮する。

2.4 敷地周辺の地震発生層の設定(3)

■地球物理学的データの確認

- 伊藤ほか(2002)は、1999年に宮城県沖で行なわれた人工地震探査の観測記録を用いて、東北日本前弧における地殻深部及び最上部マントルの構造を求めた。



検討に用いた測線

得られたP波速度構造

凡例 ○, □: 陸上観測点
△: 海底地震計
(●, ■, ▲: 検討に用いた観測点)

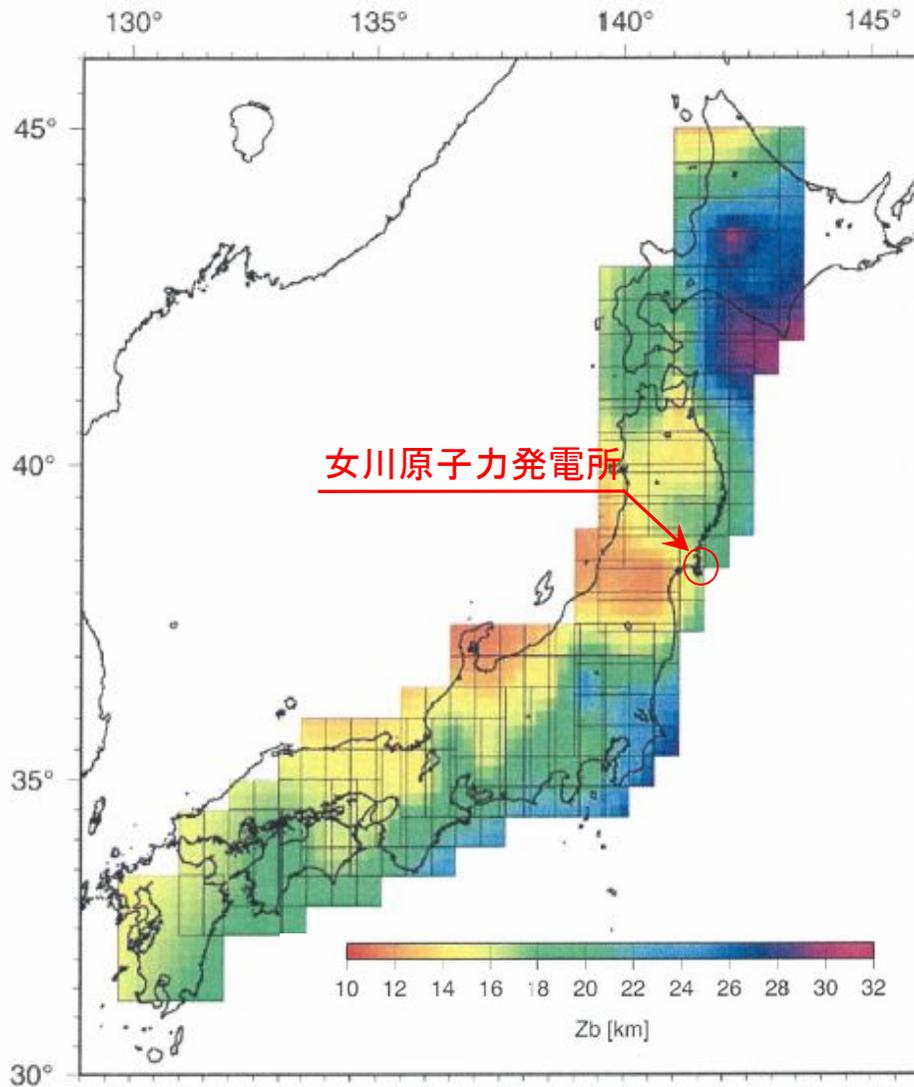
----- : インバージョンに用いた初動の波線が分布する範囲を示す。この範囲内の解像度は1に近く信頼性は高い[伊藤ほか(2002)]。

敷地付近を通る断面の速度構造[伊藤ほか(2002) に一部加筆]

上部地殻と下部地殻の境界であるコンラッド面深さは敷地周辺では18km程度であることから、敷地周辺の地震発生層の下限は18kmより浅いと考えられ、微小地震分布に基づく地震発生層の設定と矛盾しないと考えられる。

2.4 敷地周辺の地震発生層の設定(4)

■地球物理学的データによる確認



Tanaka and Ishikawa (2005)によるキュリー一点深度(一部加筆)

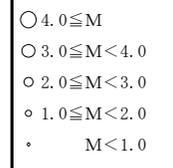
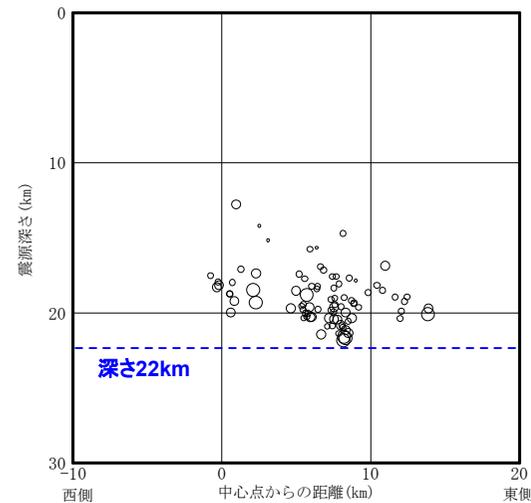
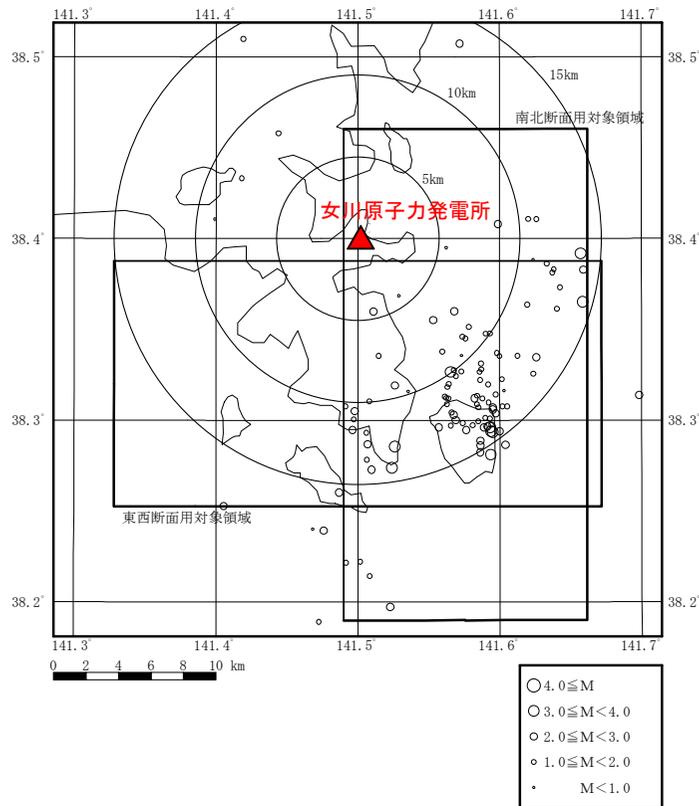
- Tanaka and Ishikawa (2005)は、地殻熱流量と地震発生層、キュリー一点深度の関係について考察を行なっている。
- 敷地付近のキュリー一点深度は内陸地域よりも深めの傾向があり、太平洋側と同程度である。
- これは、敷地周辺及び内陸地域の地震発生層の傾向分析と矛盾しないと考えられる。

2.5 2011年東北地方太平洋沖地震後に発生した金華山付近の地震

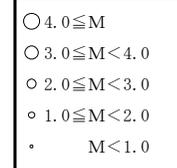
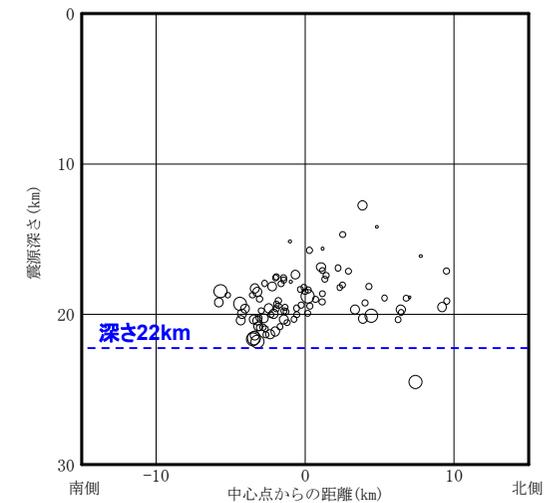
■ 地震発生層の設定 金華山付近の微小地震

2011年東北地方太平洋沖地震後に、金華山付近(サイトから約10km程度)の深さ20km程度に微小地震が発生

- 微小地震は、深さ20km程度で発生しており、F-6断層～F-9断層との直接的な対応は見られない。
- 安全評価上、F-6断層～F-9断層による地震の評価にあたっては、地震発生層の下端深さ22kmを考慮する。



東西断面



南北断面

※東西断面中心点: 141.5°, 南北断面中心点: 38.32°

敷地近傍の震央分布(2011年3月～2012年8月, 深さ30km以浅, 気象庁地震カタログ)

2.6 地震発生層のまとめ

(1) 微小地震分布に基づく地震発生層の設定

- 敷地周辺(北上山地南部)と内陸地域(宮城県北部歪集中帯)の微小地震分布の特徴及び気象庁地震カタログと精度の良い稠密地震観測の震源決定との違いを考慮し, 3~15kmに設定する。

(2) 地球物理学的データによる確認

- 上部地殻と下部地殻の境界(コンラッド面)は, 敷地付近では深さ18km程度であり, (1)と矛盾しない。
- キュリ一点深度分布は, 敷地付近は内陸地域よりも深い傾向にあり, (1)と矛盾しない。

(3) 2011年東北地方太平洋沖地震後の金華山付近の地震

- 海域の活断層との関連はないと考えられるが, 近くに位置するF-6断層~F-9断層による地震の評価にあたっては, 断層下端深さとして22kmを考慮する。

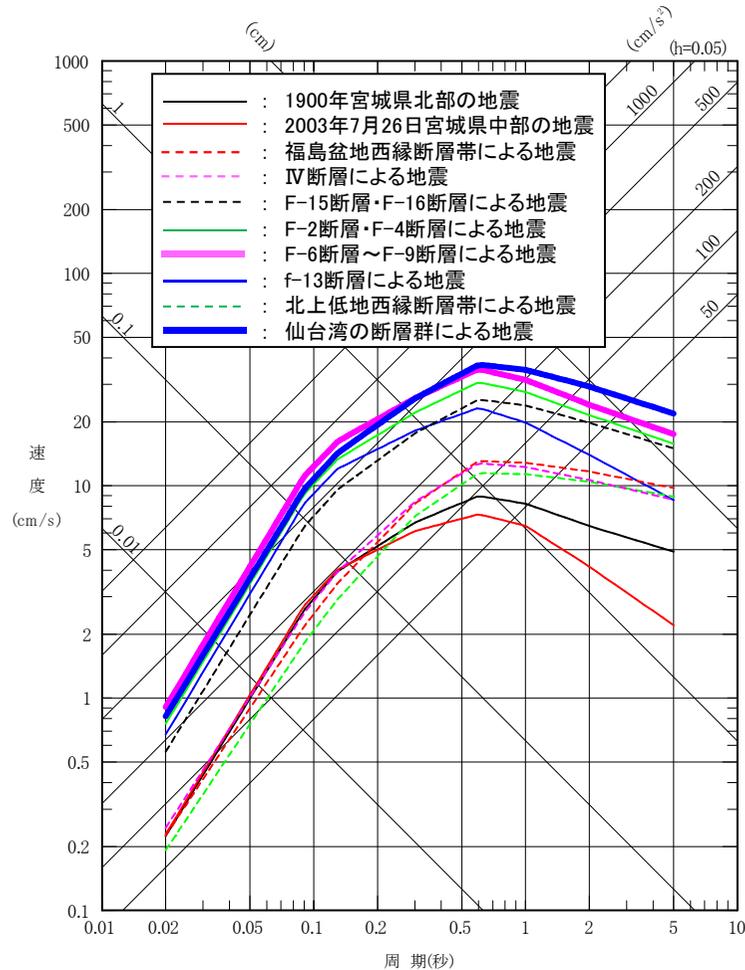
3. 内陸地殻内地震の検討用地震の選定

3. 1 審査会合におけるコメント

No.	コメント時期	コメント内容	該当箇所
S105	1月8日 第316回審査会合	内陸地殻内地震の検討用地震の選定において、縦軸をリニアで表示した耐専スペクトルによる比較も提示すること。	第3章(p.33, 34)

3.2 内陸地殻内地震の検討用地震の選定(1) 対数表示

- 検討用地震は、敷地周辺の被害地震、活断層による地震及び連動を考慮する断層群による地震のうち、敷地に対して最も影響の大きい地震を選定した。
- 選定にあたっては、Noda et al.(2002)の応答スペクトルによる比較を行った。



検討用地震の選定

[Noda et al.(2002), 内陸補正なし]

内陸地殻内地震の検討用地震の選定に用いた地震の諸元

種別	地震	マグニチュード M	等価震源距離 (km)
被害地震 (※1)	1900年宮城県北部の地震	7.0	51
	2003年7月26日宮城県中部の地震	6.4	32
活断層による地震 (※2)	福島盆地西縁断層帯による地震	7.8	103
	IV断層による地震	7.6	82
	F-15断層・F-16断層による地震	7.5	39
	F-2断層・F-4断層による地震	7.2	24
	F-6断層～F-9断層による地震	7.1	19
	f-13断層による地震	6.7	17
連動を考慮する断層群による地震 (※3)	北上低地西縁断層帯による地震	7.8	113
	仙台湾の断層群による地震	7.6	31

※1: 点震源として等価震源距離を算定した。

※2: p.11に示す整理結果を反映した。

※3: p.18に示す連動を考慮する断層群による地震のうち、断層位置、形状、地震規模と距離の比較から選定した。

検討用地震として「F-6断層～F-9断層による地震」、「仙台湾の断層群による地震」を選定する。

3.2 内陸地殻内地震の検討用地震の選定(2) 真数表示

- 検討用地震は、敷地周辺の被害地震、活断層による地震及び連動を考慮する断層群による地震のうち、敷地に対して最も影響の大きい地震を選定した。
- 選定にあたっては、Noda et al.(2002)の応答スペクトルによる比較を行った。

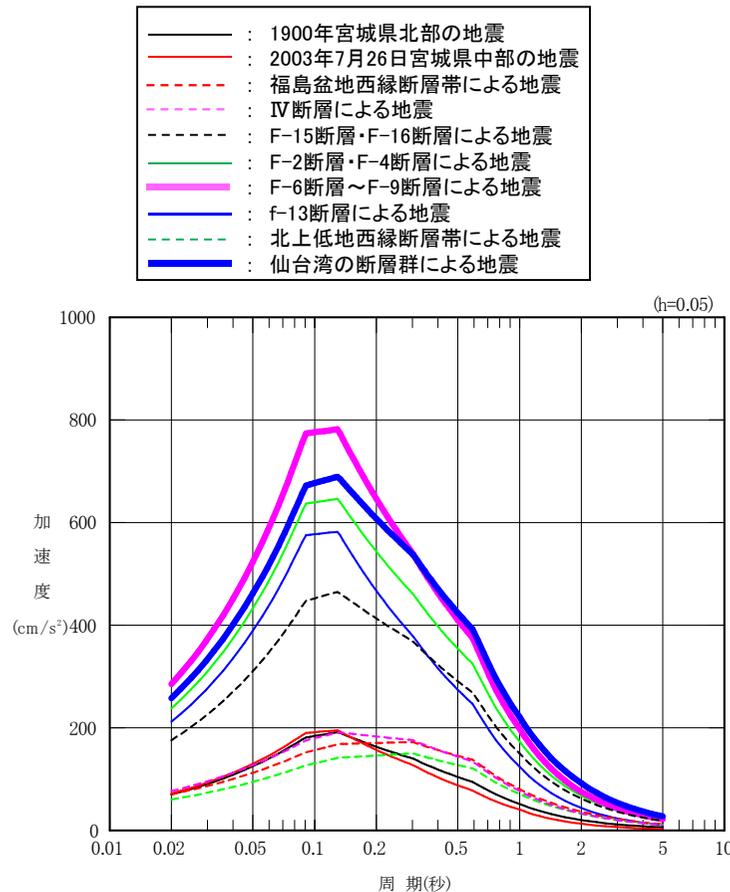
内陸地殻内地震の検討用地震の選定に用いた地震の諸元

種別	地震	マグニチュード M	等価震源距離 (km)
被害地震 (※1)	1900年宮城県北部の地震	7.0	51
	2003年7月26日宮城県中部の地震	6.4	32
活断層による地震 (※2)	福島盆地西縁断層帯による地震	7.8	103
	IV断層による地震	7.6	82
	F-15断層・F-16断層による地震	7.5	39
	F-2断層・F-4断層による地震	7.2	24
	F-6断層～F-9断層による地震	7.1	19
	f-13断層による地震	6.7	17
連動を考慮する断層群による地震 (※3)	北上低地西縁断層帯による地震	7.8	113
	仙台湾の断層群による地震	7.6	31

※1: 点震源として等価震源距離を算定した。

※2: p.11に示す整理結果を反映した。

※3: p.18に示す連動を考慮する断層群による地震のうち、断層位置、形状、地震規模と距離の比較から選定した。



検討用地震の選定

[Noda et al.(2002), 内陸補正なし]

検討用地震として「F-6断層～F-9断層による地震」、「仙台湾の断層群による地震」を選定する。

4. 検討用地震の地震動評価

4. 1 地震動評価の基本事項

No.	コメント時期	コメント内容	該当箇所
S106	1月8日 第316回審査会合	F-6断層～F-9断層による地震の応答スペクトルに基づく地震動評価について、断層長さから求めた地震規模(M)だけでなく、地震モーメントから求めたMIについても検討すること。	第4章(p.52, 53) ➤ 松田(1975)及び武村(1990)による検討を実施し、保守的な値を採用することに見直し。
S107	1月8日 第316回審査会合	F-6断層～F-9断層による地震について、断層の配置からアスペリティを2つ設定しているが、アスペリティを1まとめにしたケースについても検討すること。	第4章(p.35～62) ➤ アスペリティの不確かさケースを追加することに見直し。

4. 1. 1 検討用地震の地震動評価

- 検討用地震について、応答スペクトルに基づく地震動評価及び断層モデルを用いた手法による地震動評価を行った。
- 応答スペクトルに基づく地震動評価には、解放基盤表面における水平方向及び鉛直方向を予測し、敷地の特性を適切に反映することが可能なNoda et al.(2002)を用いた。
- F-6断層～F-9断層による地震の断層モデルを用いた手法による地震動評価には、短周期側を入倉ほか(1997)の統計的グリーン関数法とし、長周期側を久田(1997)の理論的手法としたハイブリッド合成法を用いた。
- 仙台湾の断層群による地震の断層モデルを用いた手法による地震動評価には、入倉ほか(1997)及び司ほか(2015)の経験的グリーン関数法を用いた。

4. 1. 2 ハイブリッド合成法のうち統計的グリーン関数法に用いる浅部地下構造モデル

- はぎとり解析に用いる地下構造モデルと同じ速度構造を用い、減衰は強震動シミュレーション結果を踏まえ3%に設定(第128回審査会合「敷地地盤の振動特性」)。
- 敷地で観測された強震記録と当モデルを用いた強震動シミュレーションが整合することを確認(第128回審査会合「敷地地盤の振動特性」)。

統計的グリーン関数法に用いる浅部地下構造モデル

上端深さ		層厚 (m)	密度 (t/m ³)	V _S (m/s)	V _P (m/s)	減衰 (%)	
G.L.(m)	O.P.(m)						
-27.3	-8.6	7.2	2.55	1500	2882	3.00	▽岩盤上部 (解放基盤表面相当)
-34.5	-15.8	27.0	2.66	2000	4101		
-61.5	-42.8	20.3	2.68	2200	4503		
-81.8	-63.1	65.3		2600	5300		
-147.1	-128.4	∞	2.68	3000	—	※	▽地震基盤相当

※内陸地殻内地震

$$Q(f) = 110 \cdot f^{0.69} \quad (f \geq 1\text{Hz}), \quad 110 (f < 1\text{Hz}) \quad [\text{地震本部(2005)}]$$

注: O.P.は女川原子力発電所工事用基準面(Onagawa peil)であり, O.P.±0m = T.P.(東京湾平均海面)-0.74m。

4. 1. 3 ハイブリッド合成法のうち理論的手法に用いる深部地下構造モデル

- 地震基盤以浅を浅部地下構造モデルの速度構造を用い、地震基盤以深の構造を地震本部(2012)等を用いて設定した(申請時に用いたモデルを最新知見を反映して見直しを行った)。

理論的手法に用いる深部地下構造モデル

上端深さ		層厚 (m)	密度 (t/m ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q
G.L.(m)	O.P.(m)					
-27.3	-8.6	7.2	2.55	1500	2882	150
-34.5	-15.8	27.0	2.66	2000	4101	200
-61.5	-42.8	20.3	2.68	2200	4503	200
-81.8	-63.1	65.3	2.68	2600	5300	200
-147.1	-128.4	2,062.34	2.60	3100	5500	300
-2,209.44	-2,190.74	4,066.3	2.65	3200	5500	400
-6,275.74	-6,257.04	9,304.78	2.70	3400	5800	400
-15,580.52	-15,561.82	13,210.6	2.80	3800	6400	400
-28,791.12	-28,772.42	—	3.20	4500	7500	500

▽岩盤上部
(解放基盤表面相当)

▽地震基盤相当

4.1.4 地震動評価における不確かさの整理

- 検討用地震の断層モデルの設定における不確かさについて、認識論的な不確かさと偶然的な不確かさの観点から整理を行った。

地震動評価における不確かさの整理

区 分		項 目	基本ケースの考え方	不確かさケースの考え方
認識論的な不確かさ	事前の詳細な調査や経験式などに基づき設定できるもの。	地震規模 (断層長さ)	詳細な地質調査結果に基づき設定する。	F-6断層～F-9断層による地震については、詳細な調査に基づくことから、不確かさは考慮しない。
		断層の位置		仙台湾の断層群による地震については、仙台湾北部の南傾斜の仮想震源断層を含んでいることから、不確かさは考慮しない。
		地震発生層	微小地震分布の調査等に基づき設定する(※)。	詳細な調査に基づくことから、不確かさは考慮しない。
		アスペリティの位置	F-6断層～F-9断層による地震では、断層の分布密度が高いF-9断層にアスペリティ1(大)を、F-6断層にアスペリティ2(小)を配置する。 いずれも保守性を考慮して断層上端敷地寄りとする。	F-6断層～F-9断層による地震では、アスペリティを断層上端敷地寄りに集約したケースを考慮する。
			仙台湾の断層群による地震では、保守性を考慮し断層上端敷地寄りにアスペリティを設定する。	仙台湾の断層群による地震では、基本ケースでアスペリティを断層上端敷地寄りに集約しており、不確かさは考慮しない。
		傾斜角	地質調査結果及び地震本部(2009b)により設定する。	F-6断層～F-9断層による地震では、より低角を考慮する。
アスペリティの短周期レベル	経験的に求められた平均的な値である地震本部(2009b)を基本ケースとする。	新潟県中越沖地震の知見を反映し、不確かさとして1.5倍を考慮する。		
偶然的な不確かさ	事前の詳細な調査や経験式などに基づく特定が困難なもの。	破壊開始点	特定は困難であることから、破壊が敷地に向かう位置に複数設定する。	基本ケースと同様に、破壊が敷地に向かう位置に複数設定する。

※: F-6断層～F-9断層による地震の断層モデルでは、活断層とは関連しないと考えられるが、2011年東北地方太平洋沖地震後に発生した金華山付近の微小地震を踏まえて地震発生層の下限を設定する。

4.1.5 検討用地震の基本ケースと考慮する不確かさ

検討用地震の基本ケースと考慮する不確かさ

	検討ケース	断層モデルの設定条件						
		地震規模	断層の位置	破壊開始点	地震発生層	アスペリティの位置	傾斜角	アスペリティの短周期レベル
F-6断層～F-9断層による地震	基本ケース	M _j 7.1(※2) M _j 7.2(※3)	地質調査結果	破壊が敷地に向かう位置(複数)	3～22km	敷地寄せ断層上端	60°	地震本部(2009b)×1.0
	短周期レベルの不確かさ(※1)	M _j 7.1(※2) M _j 7.2(※3)	同上	同上	同上	同上	同上	地震本部(2009b)×1.5
	断層傾斜角の不確かさ	M _j 7.1(※2) M _j 7.4(※3)	同上	同上	同上	同上	45°	地震本部(2009b)×1.0
	アスペリティの不確かさ	M _j 7.1(※2) M _j 7.2(※3)	同上	同上	同上	集約敷地寄せ断層上端	60°	同上
仙台湾の断層群による地震	基本ケース	M _j 7.6(※2) M _j 7.3(※3)	地質調査結果	破壊が敷地に向かう位置(複数)	3～15km	敷地寄せ断層上端	60°	地震本部(2009b)×1.0
	短周期レベルの不確かさ(※1)	同上	同上	同上	同上	同上	同上	地震本部(2009b)×1.5

 : 予めモデルに織り込む不確かさ
 : 考慮する不確かさ

※1:新潟県中越沖地震の知見を反映し、短周期レベル(応力降下量)×1.5倍を考慮。

※2:松田(1975)による。

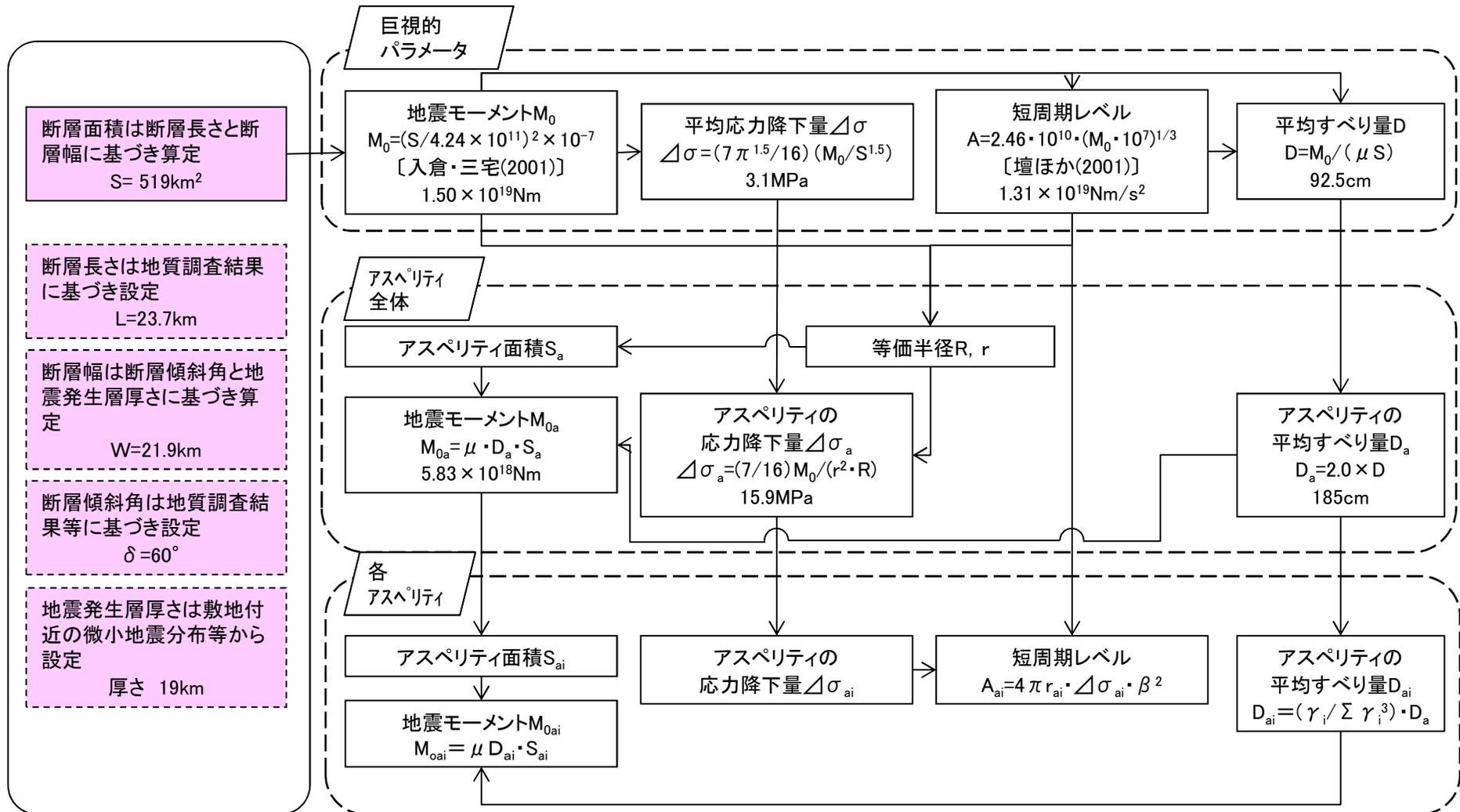
※3:武村(1990)による。

4. 2 F-6断層～F-9断層による地震の地震動評価

No.	コメント時期	コメント内容	該当箇所
S106	1月8日 第316回審査会合	F-6断層～F-9断層による地震の応答スペクトルに基づく地震動評価について、断層長さから求めた地震規模(M)だけでなく、地震モーメントから求めたMIについても検討すること。	第4章(p.52, 53) ➢ 松田(1975)及び武村(1990)による検討を実施し、保守的な値を採用することに見直し。
S107	1月8日 第316回審査会合	F-6断層～F-9断層による地震について、断層の配置からアスペリティを2つ設定しているが、アスペリティを1まとめにしたケースについても検討すること。	第4章(p.35～62) ➢ アスペリティの不確かさケースを追加することに見直し。

※p.36のコメントを再掲

4. 2. 1 基本ケース及び短周期レベルの不確かさケースの断層モデル(2)



□ : 与条件の項目

4.2.1 基本ケース及び短周期レベルの不確かさケースの断層モデル(3)

基本ケース及び短周期レベルの不確かさケースの断層パラメータ

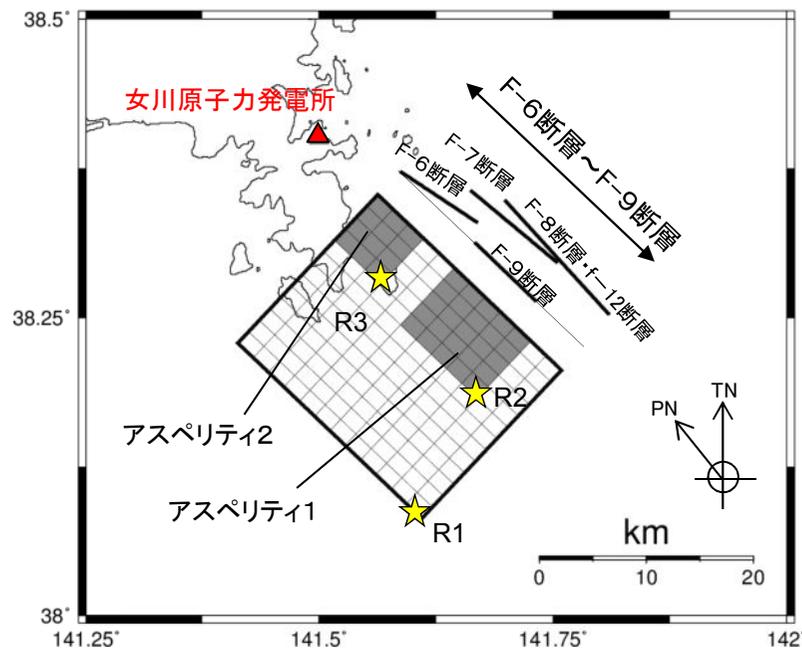
	断層パラメータ	設定方法	設定値	
			基本ケース	不確かさケース
断層面全体	断層長さ(km)	地質調査結果に基づき設定	23.7	同左
	断層幅(km)	地震発生層厚さと傾斜角から設定	21.9	同左
	断層面積(km ²)	S=LW	519	同左
	断層上端深さ(km)	微小地震分布等に基づき設定	3	同左
	断層下端深さ(km)	微小地震分布等に基づき設定	22	同左
	走向(°)	地質調査結果に基づき設定	133.5	同左
	傾斜角(°)	地質調査結果等に基づき設定	60	同左
	破壊伝播形式	—	放射状	同左
	地震モーメント(N・m)	$M_0=(S/4.24 \times 10^{11})^2 \times 10^{-7}$ 入倉・三宅(2001)	1.50×10^{19}	同左
	剛性率(N/m ²)	$\mu = \rho \beta^2$, $\beta = 3.4\text{km/s}$, $\rho = 2.7\text{g/cm}^3$, 地震本部(2009a)	3.12×10^{10}	同左
	平均すべり量(cm)	$D=M_0/(\mu S)$	92.5	同左
	平均応力降下量(MPa)	$\Delta\sigma=(7\pi^{1.5}/16)(M_0/S^{1.5})$	3.1	同左
	破壊伝播速度(km/s)	$Vr=0.72 \times \beta$, 地震本部(2009b)	2.45	同左
	短周期レベル(N・m/s ²)	$A=2.46 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3}$ 壇ほか(2001)	1.31×10^{19}	同左

	断層パラメータ	設定方法	設定値	
			基本ケース	不確かさケース
アスペリティ全体	地震モーメント(N・m)	$M_{0a}=\mu D_a S_a$	5.83×10^{18}	同左
	面積(km ²)	$S_a=\pi r^2, r=(7\pi M_0 \beta^2)/(4AR)$, $R=(S/\pi)^{0.5}$	101.0	同左
	平均すべり量(cm)	$D_a=2 \times D$	185.0	同左
	応力降下量(MPa)	$\Delta\sigma_a=(7/16) \times M_0/(r^2 \times R)$	15.9	23.8
	短周期レベル※(N・m/s ²)	$A_a=(A_{a1}^2+A_{a2}^2)^{0.5}$	1.31×10^{19}	1.96×10^{19}
	アスペリティ1	地震モーメント(N・m)	$M_{0a1}=\mu D_{a1} S_{a1}$	4.31×10^{18}
面積(km ²)		$S_{a1}=(2/3)S_a$	67.3	同左
平均すべり量(cm)		$D_{a1}=(\gamma i/\sum \gamma i^3) \times D_a$, $\gamma i=ri/r$	205.0	同左
応力降下量(MPa)		$\Delta\sigma_{a1}=\Delta\sigma_a$	15.9	23.8
短周期レベル※(N・m/s ²)		$A_{a1}=4 \pi \times r \times \Delta\sigma_a \times \beta^2$	1.07×10^{19}	1.60×10^{19}
アスペリティ2		地震モーメント(N・m)	$M_{0a2}=\mu D_{a2} S_{a2}$	1.52×10^{18}
	面積(km ²)	$S_{a2}=(1/3)S_a$	33.7	同左
	平均すべり量(cm)	$D_{a2}=(\gamma i/\sum \gamma i^3) \times D_a$, $\gamma i=ri/r$	145.0	同左
	応力降下量(MPa)	$\Delta\sigma_{a2}=\Delta\sigma_a$	15.9	23.8
	短周期レベル※(N・m/s ²)	$A_{a2}=4 \pi \times r \times \Delta\sigma_a \times \beta^2$	7.54×10^{18}	1.13×10^{19}
	背景領域	地震モーメント(N・m)	$M_{0b}=M_0-M_{0a}$	9.15×10^{18}
面積(km ²)		$S_b=S-S_a$	418.0	同左
平均すべり量(cm)		$D_b=M_{0b}/(\mu S_b)$	70.1	同左
実効応力(MPa)		$\sigma_b=(D_b/W_b) \cdot (\pi^{1/2}/D_a) \cdot r \cdot \sum \gamma i^3 \cdot \sigma_a$	2.0	3.1
f_{\max} (Hz)		香川ほか(2003)	8.3	同左

※アスペリティの短周期レベルは参考として記載。

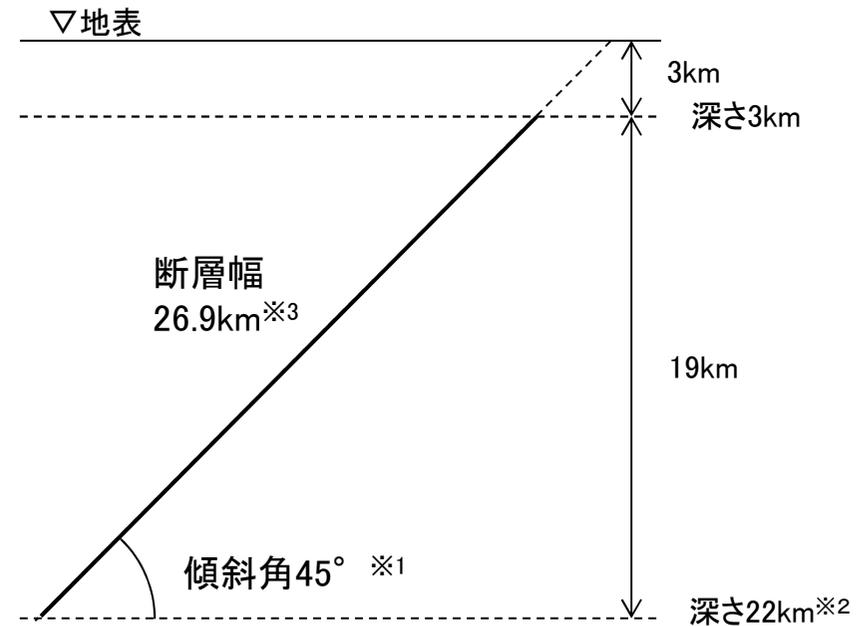
4. 2. 2 断層傾斜角の不確かさケースの断層モデル(1)

- 地質調査結果を踏まえ評価した長さ(23.7km)を断層長さとし、強震動予測レシピに基づき断層モデルを設定。不確かさとして傾斜角 45° を考慮。



★:破壊開始点(R)

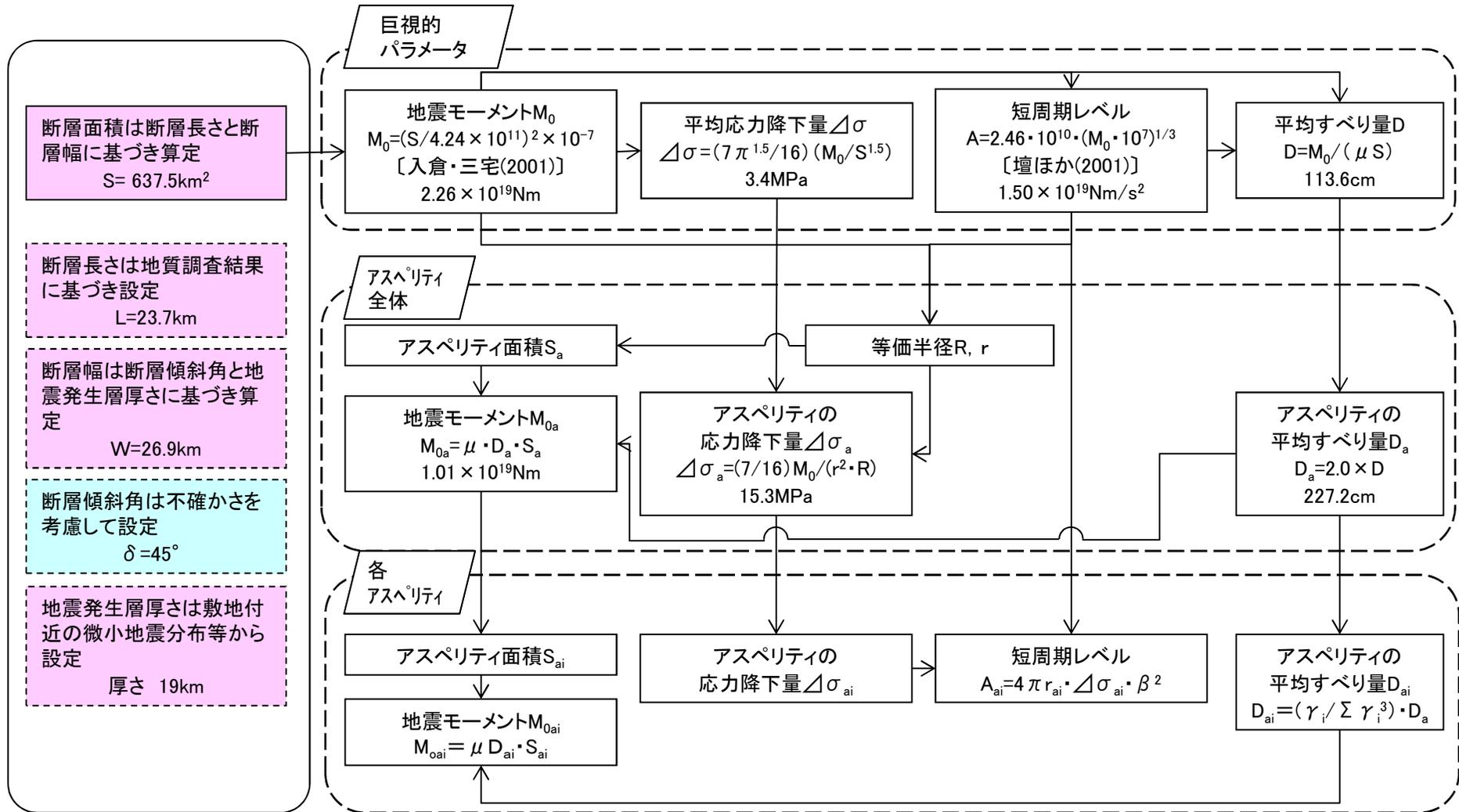
断層モデル平面図



断面図

- ※1 傾斜角:地質調査結果では傾斜角は 90° ないし高角の北東落ちであるが、不確かさを考慮して 45° に設定。
- ※2 地震発生層下端:金華山付近の微小地震の発生深さを考慮し設定。
- ※3 断層幅:傾斜角,地震発生層厚さから設定。

4. 2. 2 断層傾斜角の不確かさケースの断層モデル(2)



: 与条件の項目
 : 考慮する不確かさ

4. 2. 2 断層傾斜角の不確かさケースの断層モデル(3)

断層傾斜角の不確かさケースの断層パラメータ

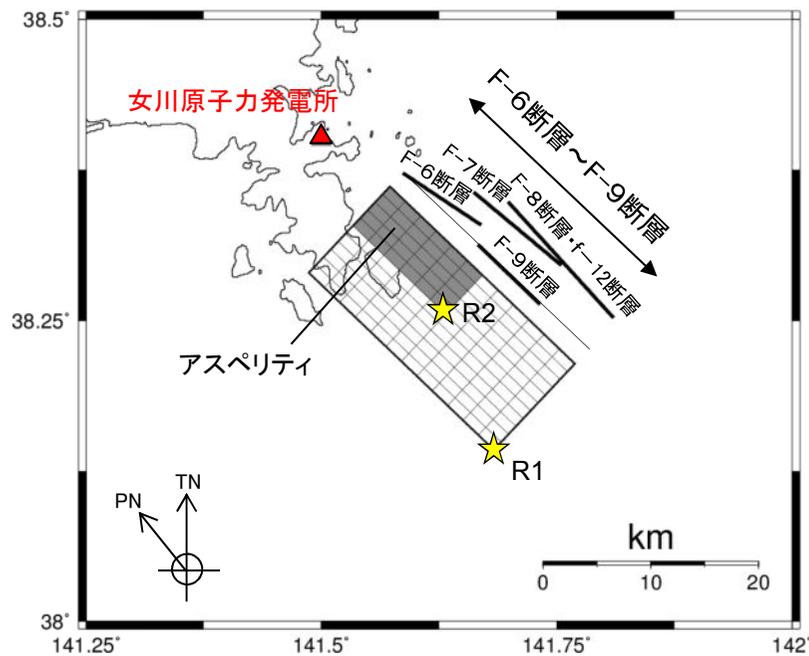
	断層パラメータ	設定方法	設定値
断層 面 全 体	断層長さ(km)	地質調査結果に基づき設定	23.7
	断層幅(km)	地震発生層厚さと傾斜角から設定	26.9
	断層面積(km ²)	S=LW	637.5
	断層上端深さ(km)	微小地震分布等に基づき設定	3
	断層下端深さ(km)	微小地震分布等に基づき設定	22
	走向(°)	地質調査結果に基づき設定	133.5
	傾斜角(°)	不確かさを考慮して設定	45
	破壊伝播形式	—	放射状
	地震モーメント(N・m)	$M_0=(S/4.24 \times 10^{11})^2 \times 10^{-7}$ 入倉・三宅(2001)	2.26×10^{19}
	剛性率(N/m ²)	$\mu = \rho \beta^2$, $\beta = 3.4\text{km/s}$, $\rho = 2.7\text{g/cm}^3$, 地震本部(2009a)	3.12×10^{10}
	平均すべり量(cm)	$D=M_0/(\mu S)$	113.6
	平均応力降下量(MPa)	$\Delta\sigma=(7\pi^{1.5}/16)(M_0/S^{1.5})$	3.4
	破壊伝播速度(km/s)	$Vr=0.72 \times \beta$, 地震本部(2009b)	2.45
短周期レベル(N・m/s ²)	$A=2.46 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3}$ 壇ほか(2001)	1.50×10^{19}	

	断層パラメータ	設定方法	設定値
ア ス ペ リ テ ィ 全 体	地震モーメント(N・m)	$M_{0a}=\mu D_a S_a$	1.01×10^{19}
	面積(km ²)	$S_a=\pi r^2, r=(7\pi M_0 \beta^2)/(4AR)$, $R=(S/\pi)^{0.5}$	142.3
	平均すべり量(cm)	$D_a=2 \times D$	227.2
	応力降下量(MPa)	$\Delta\sigma_a=(7/16) \times M_0/(r^2 \times R)$	15.3
	短周期レベル*(N・m/s ²)	$A_a=(A_{a1}^2+A_{a2}^2)^{0.5}$	1.50×10^{19}
	ア ス ペ リ テ ィ 1	地震モーメント(N・m)	$M_{0a1}=\mu D_{a1} S_{a1}$
面積(km ²)		$S_{a1}=(2/3)S_a$	94.9
平均すべり量(cm)		$D_{a1}=(\gamma i / \sum \gamma i^3) \times D_a, \gamma i=ri/r$	251.8
応力降下量(MPa)		$\Delta\sigma_{a1}=\Delta\sigma_a$	15.3
短周期レベル*(N・m/s ²)		$A_{a1}=4 \pi \times r \times \Delta\sigma_a \times \beta^2$	1.22×10^{19}
ア ス ペ リ テ ィ 2	地震モーメント(N・m)	$M_{0a2}=\mu D_{a2} S_{a2}$	2.64×10^{18}
	面積(km ²)	$S_{a2}=(1/3)S_a$	47.4
	平均すべり量(cm)	$D_{a2}=(\gamma i / \sum \gamma i^3) \times D_a, \gamma i=ri/r$	178.1
	応力降下量(MPa)	$\Delta\sigma_{a2}=\Delta\sigma_a$	15.3
	短周期レベル*(N・m/s ²)	$A_{a2}=4 \pi \times r \times \Delta\sigma_a \times \beta^2$	8.65×10^{18}
背 景 領 域	地震モーメント(N・m)	$M_{0b}=M_0-M_{0a}$	1.25×10^{19}
	面積(km ²)	$S_b=S-S_a$	495.2
	平均すべり量(cm)	$D_b=M_{0b}/(\mu S_b)$	81.0
	実効応力(MPa)	$\sigma_b=(D_b/W_b) \cdot (\pi^{1/2}/D_a) \cdot r \cdot \sum \gamma i^3 \cdot \sigma_a$	1.8
	f_{\max}	香川ほか(2003)	8.3

※アスペリティの短周期レベルは参考として記載。

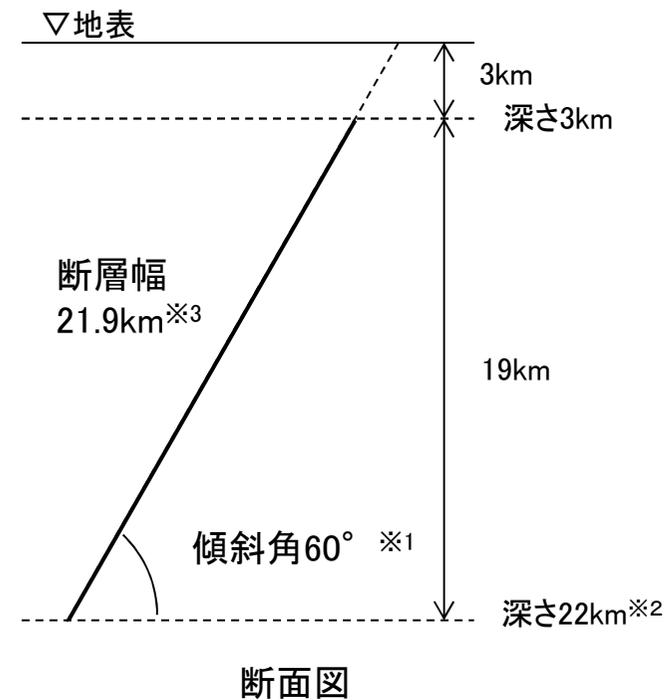
4. 2. 3 アスペリティの不確かさケースの断層モデル(1)

- 地質調査結果を踏まえ評価した長さ(23.7km)を断層長さとし, 強震動予測レシピに基づき断層モデルを設定。不確かさとしてアスペリティを敷地寄り断層上端に集約。



★:破壊開始点(R)

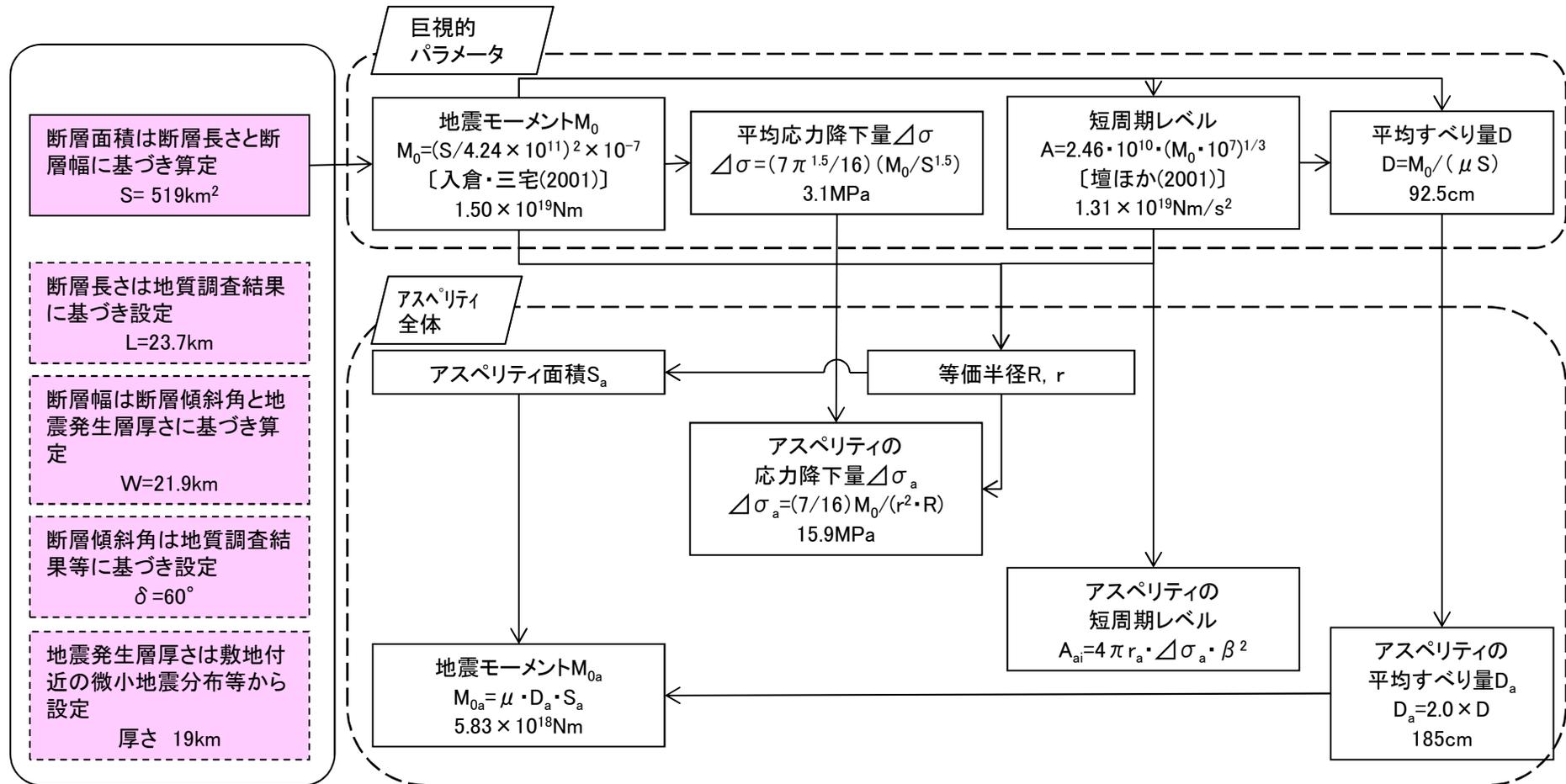
断層モデル平面図



断面図

- ※1 傾斜角:地質調査結果では傾斜角は90° ないし高角の北東落ちであることから, 地震本部(2009b)を参考に60° に設定。
- ※2 地震発生層下端:金華山付近の微小地震の発生深さを考慮し設定。
- ※3 断層幅:傾斜角, 地震発生層厚さから設定。

4. 2. 3 アスペリティの不確かさケースの断層モデル(2)



■ : 与条件の項目

4. 2. 3 アスペリティの不確かさケースの断層モデル(3)

アスペリティ集約の影響検討ケースの断層パラメータ

	断層パラメータ	設定方法	設定値
断層面全体	断層長さ(km)	地質調査結果に基づき設定	23.7
	断層幅(km)	地震発生層厚さと傾斜角から設定	21.9
	断層面積(km ²)	S=LW	519
	断層上端深さ(km)	微小地震分布等に基づき設定	3
	断層下端深さ(km)	微小地震分布等に基づき設定	22
	走向(°)	地質調査結果に基づき設定	133.5
	傾斜角(°)	地質調査結果等に基づき設定	60
	破壊伝播形式	—	放射状
	地震モーメント(N・m)	$M_0=(S/4.24 \times 10^{11})^2 \times 10^{-7}$ 入倉・三宅(2001)	1.50×10^{19}
	剛性率(N/m ²)	$\mu = \rho \beta^2$, $\beta = 3.4 \text{ km/s}$, $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$, 地震本部(2009a)	3.12×10^{10}
	平均すべり量(cm)	$D=M_0/(\mu S)$	92.5
	平均応力降下量(MPa)	$\Delta\sigma=(7\pi^{1.5}/16)(M_0/S^{1.5})$	3.1
	破壊伝播速度(km/s)	$Vr=0.72 \times \beta$, 地震本部(2009b)	2.45
	短周期レベル(N・m/s ²)	$A=2.46 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3}$ 壇ほか(2001)	1.31×10^{19}

	断層パラメータ	設定方法	設定値
アスペリティ	地震モーメント(N・m)	$M_{0a} = \mu D_a S_a$	5.83×10^{18}
	面積(km ²)	$S_a = \pi r^2$, $r = (7\pi M_0 \beta^2)/(4AR)$, $R = (S/\pi)^{0.5}$	101.0
	平均すべり量(cm)	$D_a = 2 \times D$	185.0
	応力降下量(MPa)	$\Delta\sigma_a = (7/16) \times M_0 / (r^2 \times R)$	15.9
	短周期レベル※(N・m/s ²)	$A_a = 4\pi r_a \cdot \Delta\sigma_a \cdot \beta^2$	1.31×10^{19}
背景領域	地震モーメント(N・m)	$M_{0b} = M_0 - M_{0a}$	9.15×10^{18}
	面積(km ²)	$S_b = S - S_a$	418.0
	平均すべり量(cm)	$D_b = M_{0b} / (\mu S_b)$	70.1
	実効応力(MPa)	$\sigma_b = (D_b/W_b) \cdot (D_a/W_a) \cdot \sigma_a$	2.7
	f_{\max} (Hz)	香川ほか(2003)	8.3

※アスペリティの短周期レベルは参考として記載。

4.2.4 F-6断層～F-9断層による地震の断層モデル

検討ケースの主なパラメータの比較

検討ケース	断層モデルの設定条件							
	断層長さ (km)	地震規模	等価 震源距離 (km)	傾斜角	断層面積 (km ²)	地震 モーメント (Nm)	アスペリティの 応力降下量 (MPa)	アスペリティの 短周期レベル (Nm/s ²)
基本ケース	23.7	M _j 7.1(※1) M _j 7.2(※2)	19.7	60°	519	1.50 × 10 ¹⁹	15.9	1.31 × 10 ¹⁹
短周期レベルの 不確かさ	23.7	M _j 7.1(※1) M _j 7.2(※2)	19.7	60°	519	1.50 × 10 ¹⁹	23.8	1.96 × 10 ¹⁹
断層傾斜角の不 確かさ	23.7	M _j 7.1(※1) M _j 7.4(※2)	20.2	45°	637.5	2.26 × 10 ¹⁹	15.3	1.50 × 10 ¹⁹
アスペリティの不 確かさケース	23.7	M _j 7.1(※1) M _j 7.2(※2)	16.5	60°	519	1.50 × 10 ¹⁹	15.9	1.31 × 10 ¹⁹

※1:松田(1975)による。 ※2:武村(1990)による。

主な断層パラメータの設定根拠(基本ケース)

	パラメータの設定根拠
断層面積	断層長さ × 断層幅
断層長さ	地質調査結果による。
断層幅	断層傾斜角と地震発生層厚さより算定。地震発生層厚さは、北上山地の南部に位置する敷地と内陸地域(歪集中帯)の微小地震等の特徴を踏まえ、さらに3.11地震後に金華山付近で発生した微小地震を考慮して設定。
断層傾斜角	地質調査結果では90° ないし高角の北東落ちであることから、地震本部(2009b)を参考に60° とした。
断層の走向	地質調査結果による。

■地震動評価方法

➤ 応答スペクトルに基づく方法による地震動評価

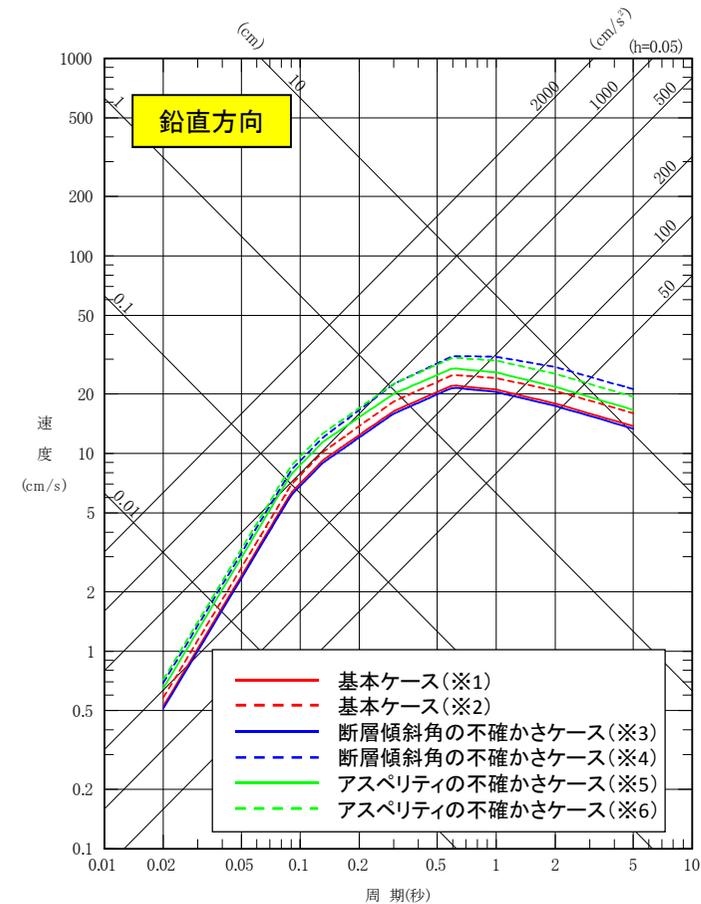
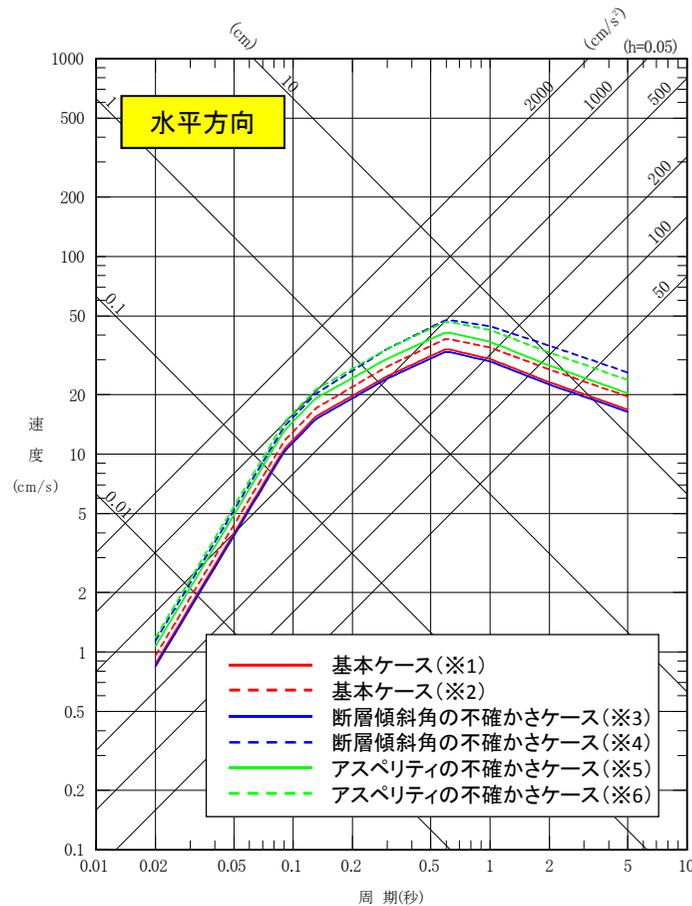
Noda et al.(2002)の方法を用いた地震動評価を行う。内陸地殻内地震の観測記録が少ないことから、内陸補正係数は考慮しない。

➤ 断層モデルを用いた手法による地震動評価

短周期を入倉ほか(1997)による統計的グリーン関数法、長周期を久田(1997)の理論的方法(波数積分法)によるハイブリッド合成法により評価。

4.2.5 応答スペクトルに基づく方法による地震動評価

- 松田(1975)及び武村(1990)で算定した地震規模を用いたNoda et al.(2002)による評価を示す。
- F-6断層～F-9断層の地震動評価においては、武村(1990)は松田(1975)と比べて保守的な評価となることから、応答スペクトルに基づく地震動評価としては武村(1990)を用いた評価を採用する。



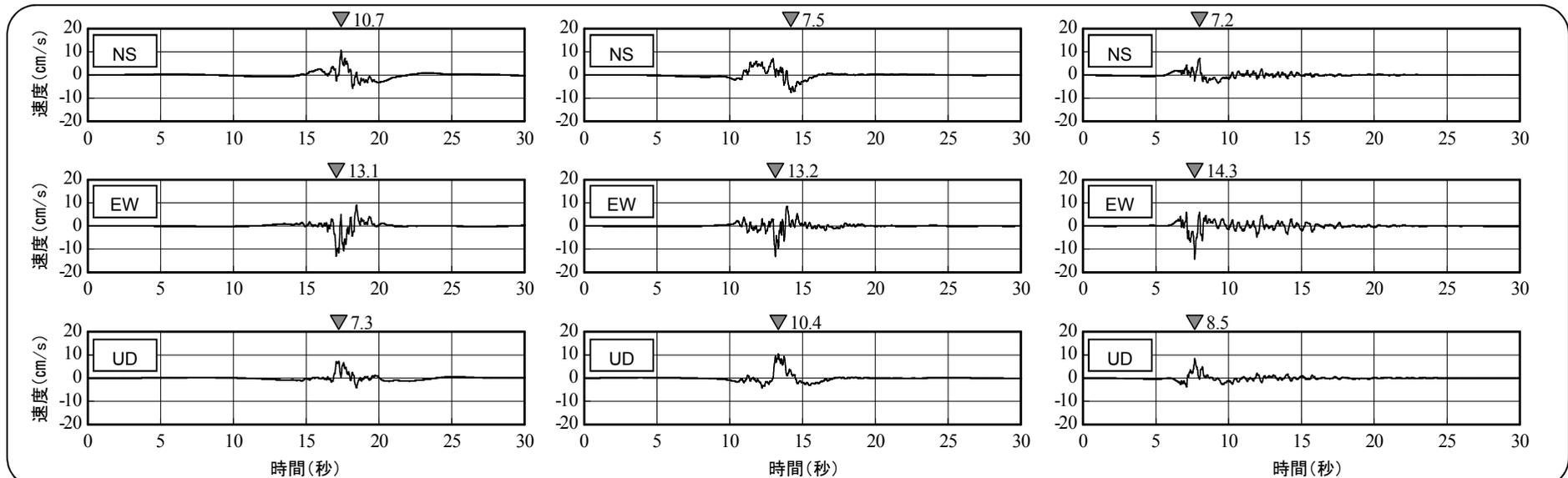
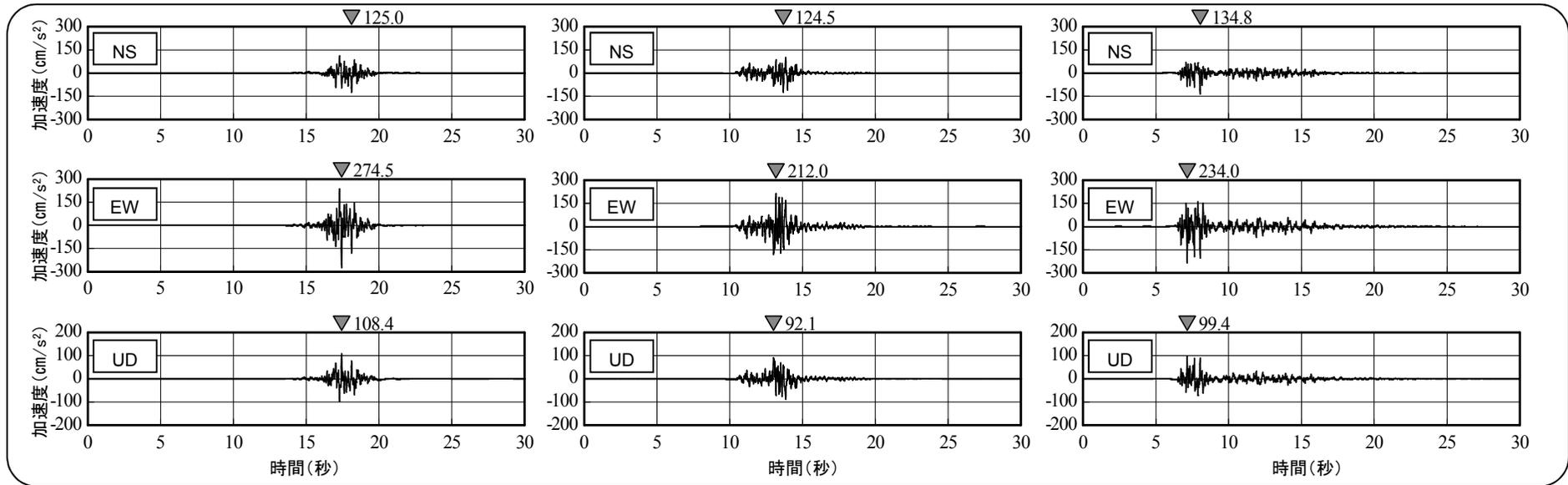
※1 : $M_j 7.1$ [松田(1975)], $X_{eq}=19.7\text{km}$
(短周期レベルの不確かさケース)
※3 : $M_j 7.1$ [松田(1975)], $X_{eq}=20.2\text{km}$
※5 : $M_j 7.1$ [松田(1975)], $X_{eq}=16.5\text{km}$

※2 : $M_j 7.2$ [武村(1990)], $X_{eq}=19.7\text{km}$
(短周期レベルの不確かさケース)
※4 : $M_j 7.4$ [武村(1990)], $X_{eq}=20.2\text{km}$
※6 : $M_j 7.2$ [武村(1990)], $X_{eq}=16.5\text{km}$

4. 2. 6 基本ケースの地震動評価(1)

ハイブリッド合成法の時刻歴波形(接続周期帯 1.0~2.0秒)

第316回審査会合(H28.1.8)
資料1 p.50, 51 一部修正



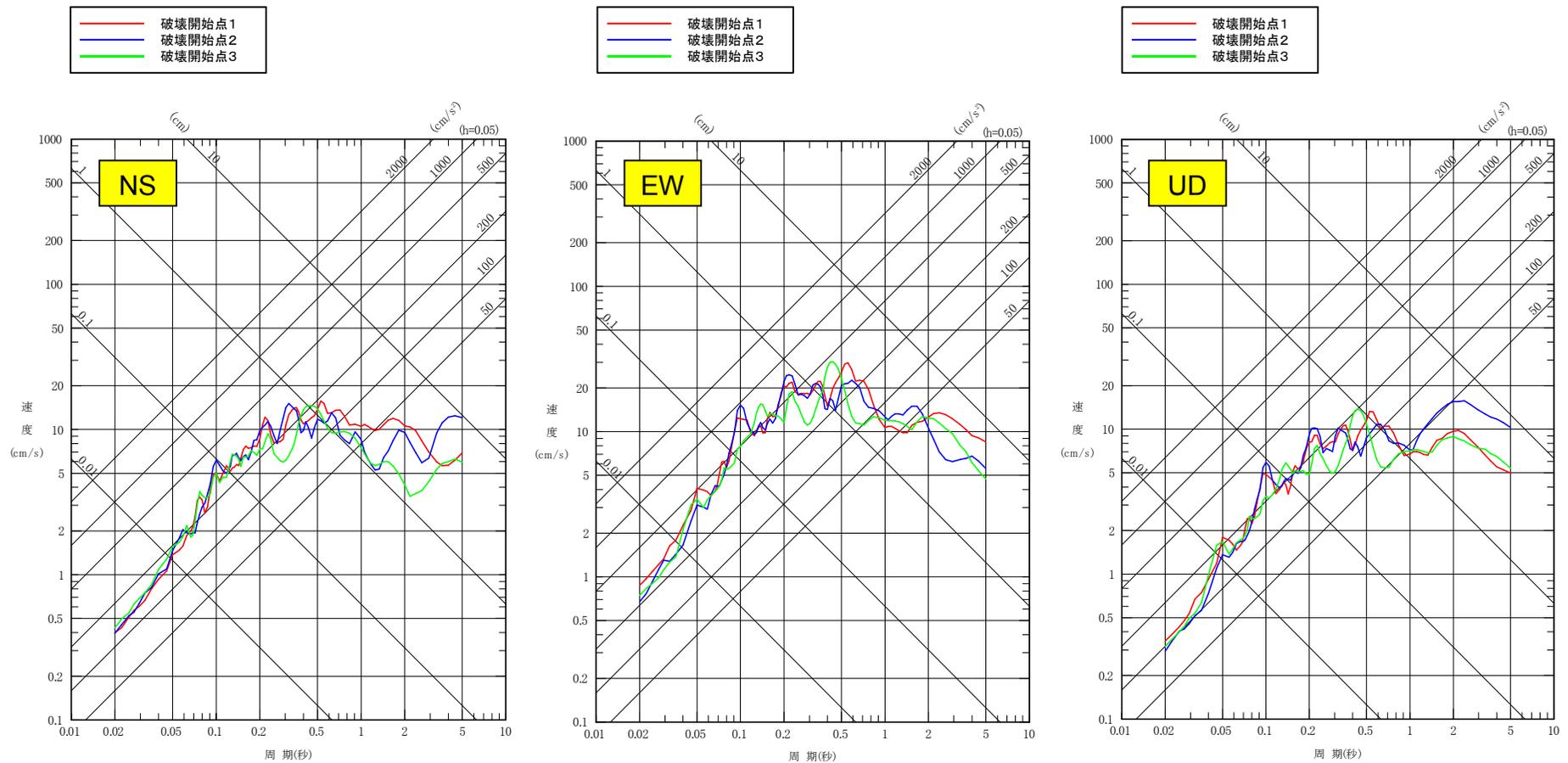
破壊開始点1

破壊開始点2

破壊開始点3 

4. 2. 6 基本ケースの地震動評価(2)

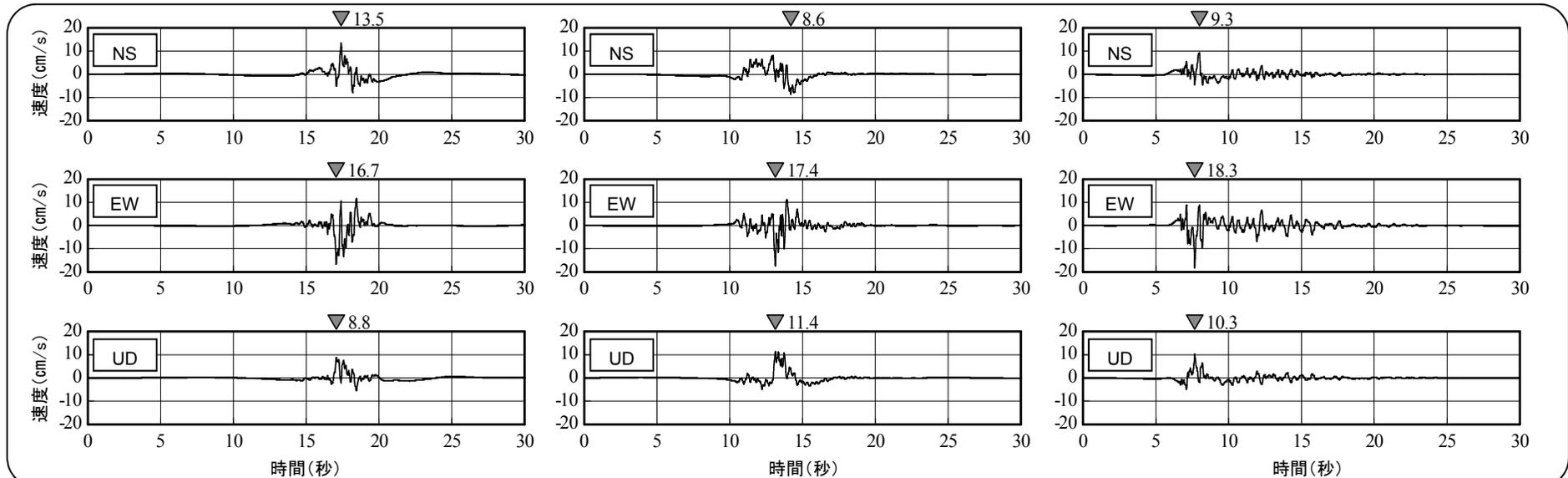
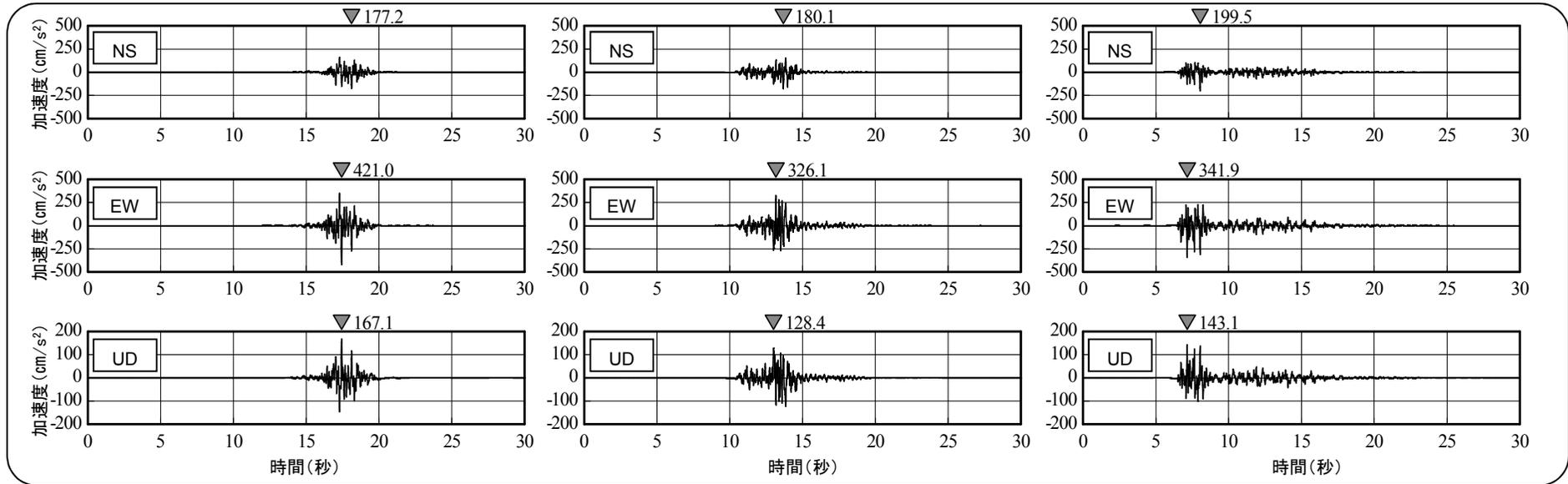
- F-6断層～F-9断層による地震(基本ケース)のハイブリッド合成法(接続周期帯1.0～2.0秒)による地震動評価の応答スペクトルを示す。



4. 2. 7 短周期レベルの不確かさケースの地震動評価(1)

ハイブリッド合成法の時刻歴波形(接続周期帯 1.0~2.0秒)

第316回審査会合(H28.1.8)
資料1 p.53, 54 一部修正



破壊開始点1

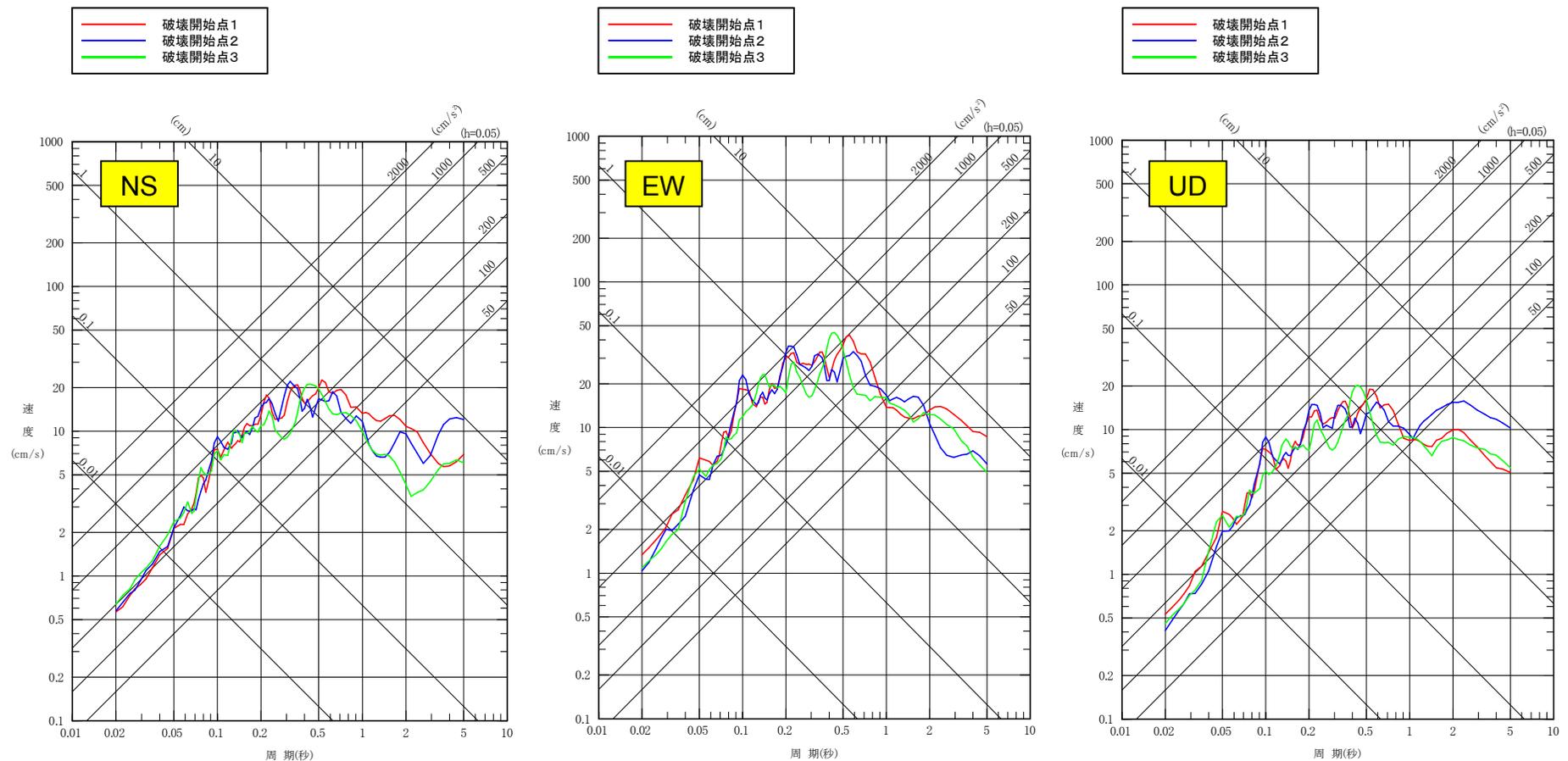
破壊開始点2

破壊開始点3



4. 2. 7 短周期レベルの不確かさケースの地震動評価(2)

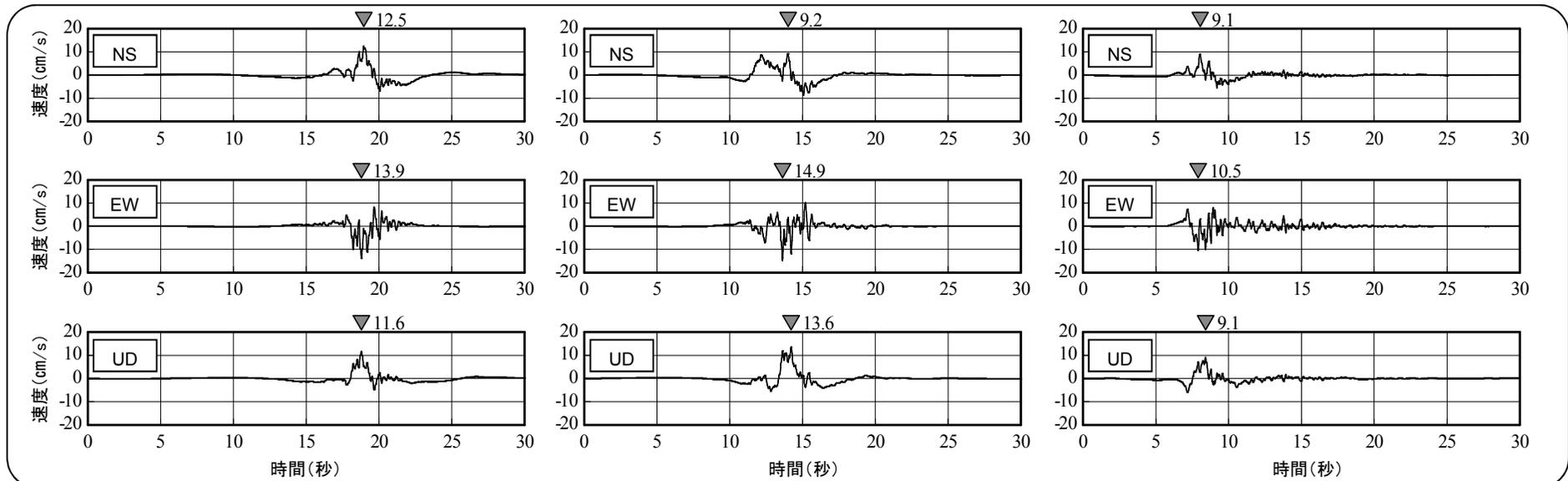
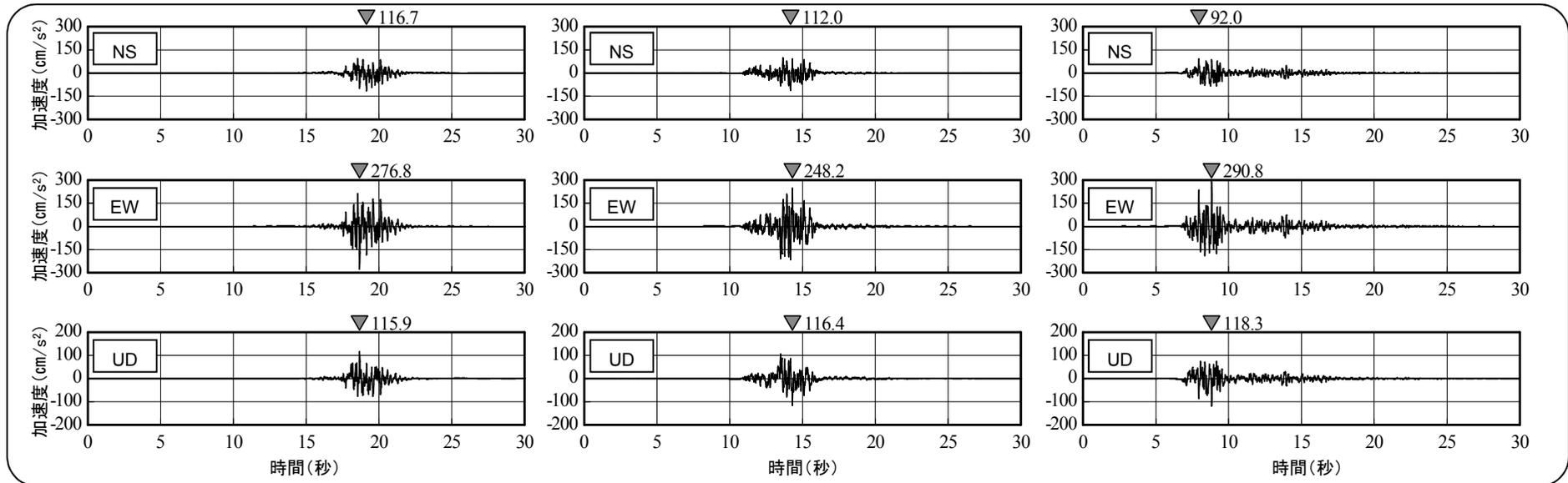
- F-6断層～F-9断層による地震(短周期レベルの不確かさケース)のハイブリッド合成法(接続周期帯1.0～2.0秒)による地震動評価の応答スペクトルを示す。



4. 2. 8 断層傾斜角の不確かさケースの地震動評価(1)

ハイブリッド合成法の時刻歴波形(接続周期帯 1.0~2.0秒)

第316回審査会合(H28.1.8)
資料1 p.56, 57 一部修正



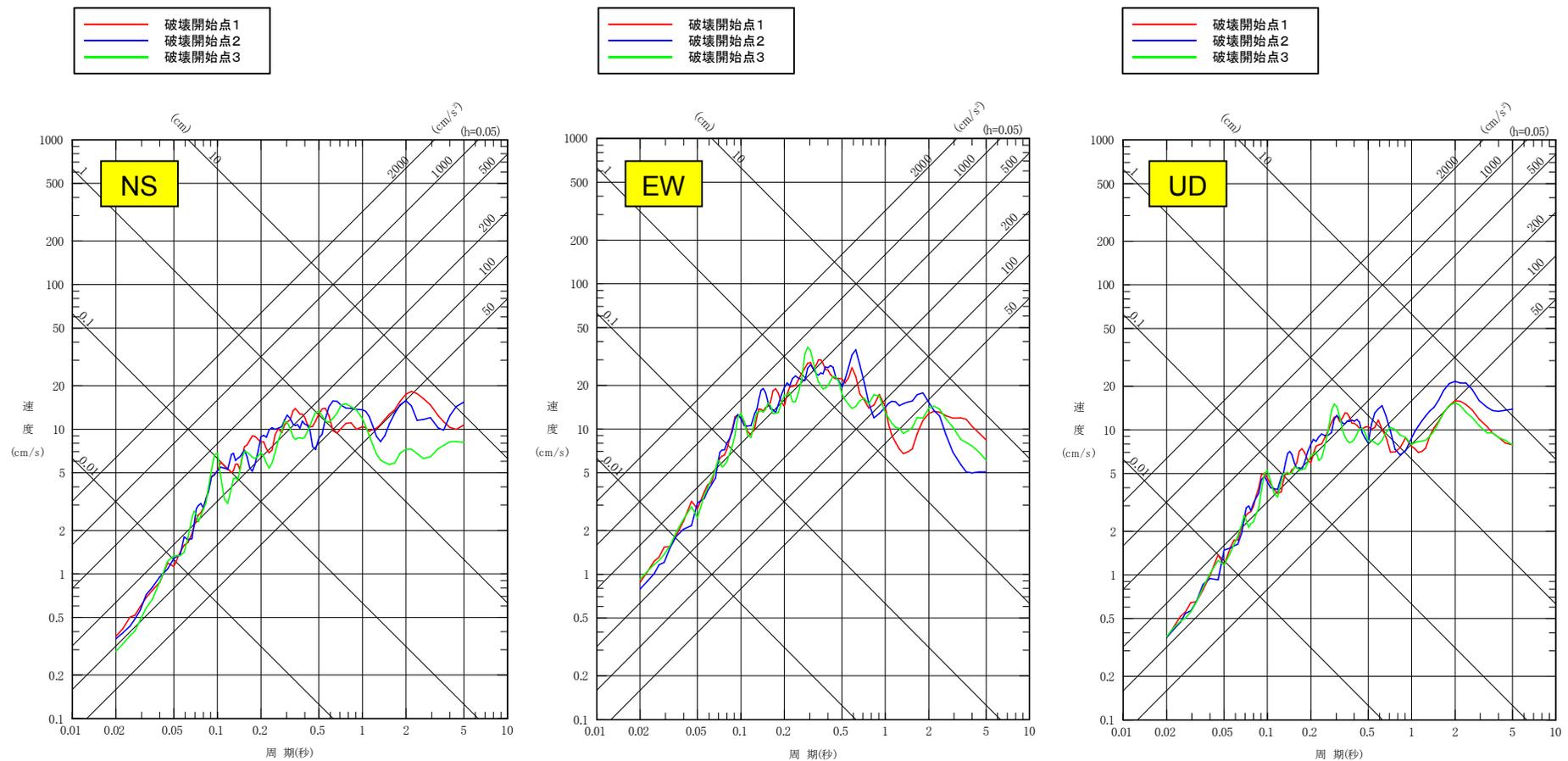
破壊開始点1

破壊開始点2

破壊開始点3 

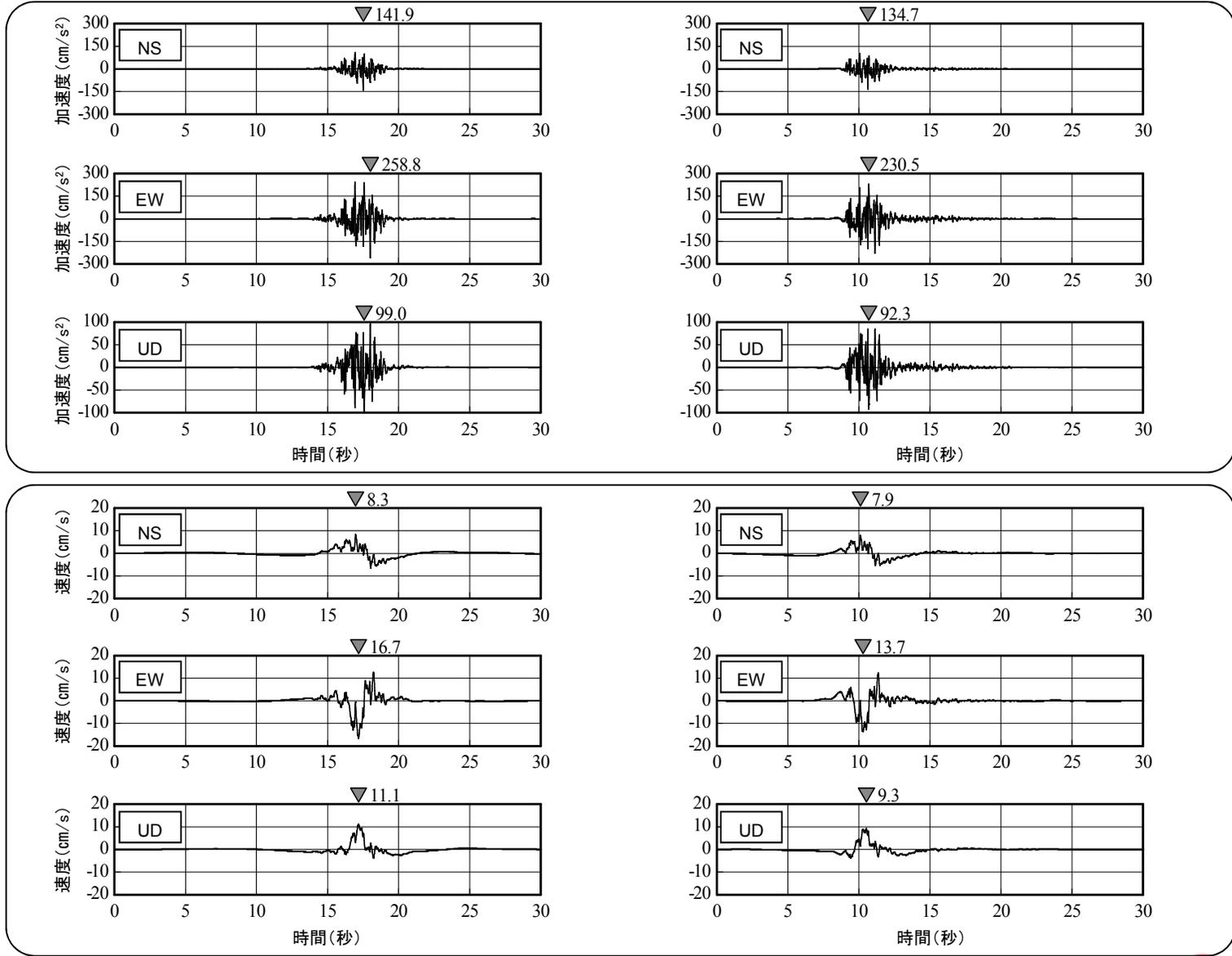
4. 2. 8 断層傾斜角の不確かさケースの地震動評価(2)

- F-6断層～F-9断層による地震(断層傾斜角の不確かさケース)のハイブリッド合成法(接続周期帯1.0～2.0秒)による地震動評価の応答スペクトルを示す。



4. 2. 9 アスペリティの不確かさケースの地震動評価(1)

ハイブリッド合成法の時刻歴波形(接続周期帯 1.0~2.0秒)

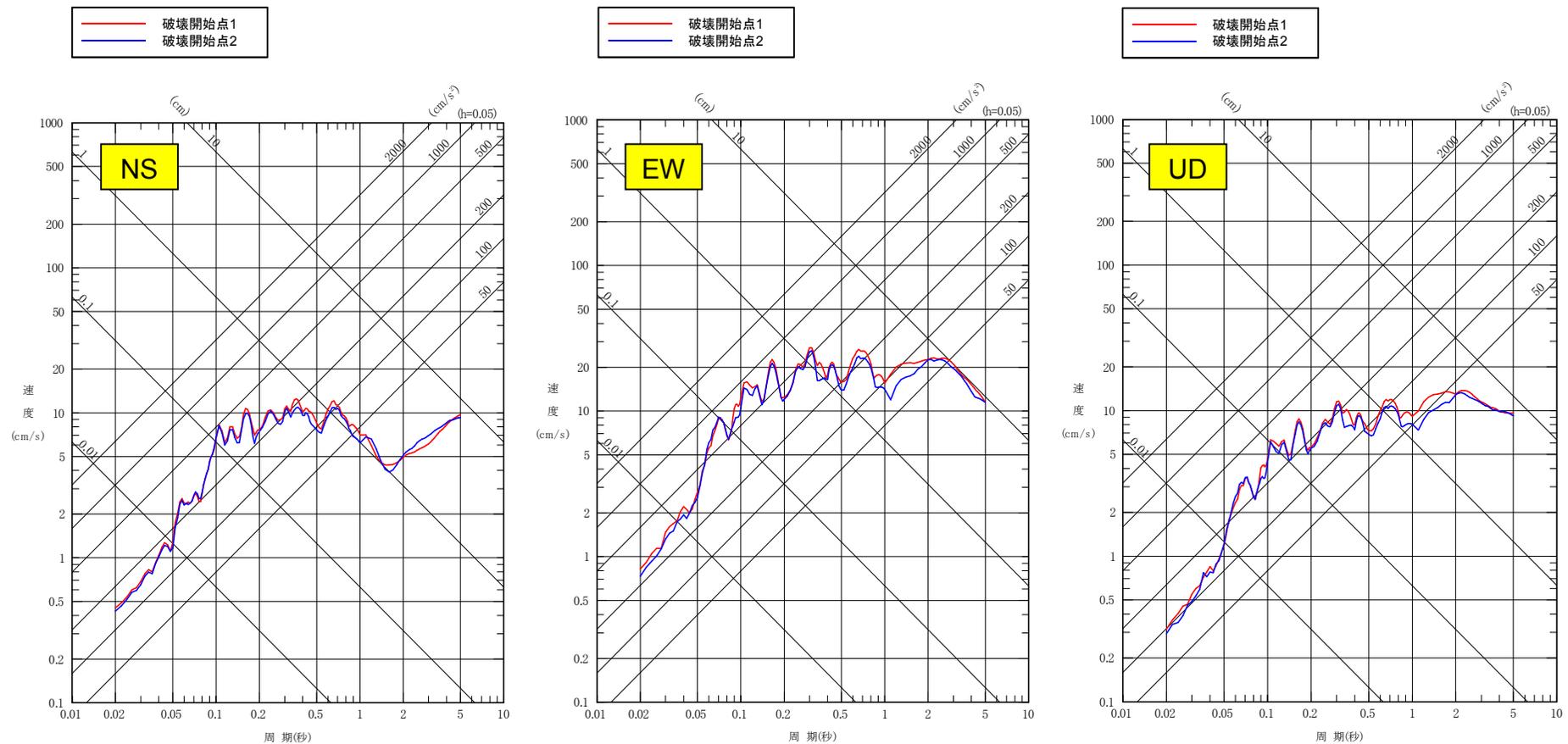


破壊開始点1

破壊開始点2

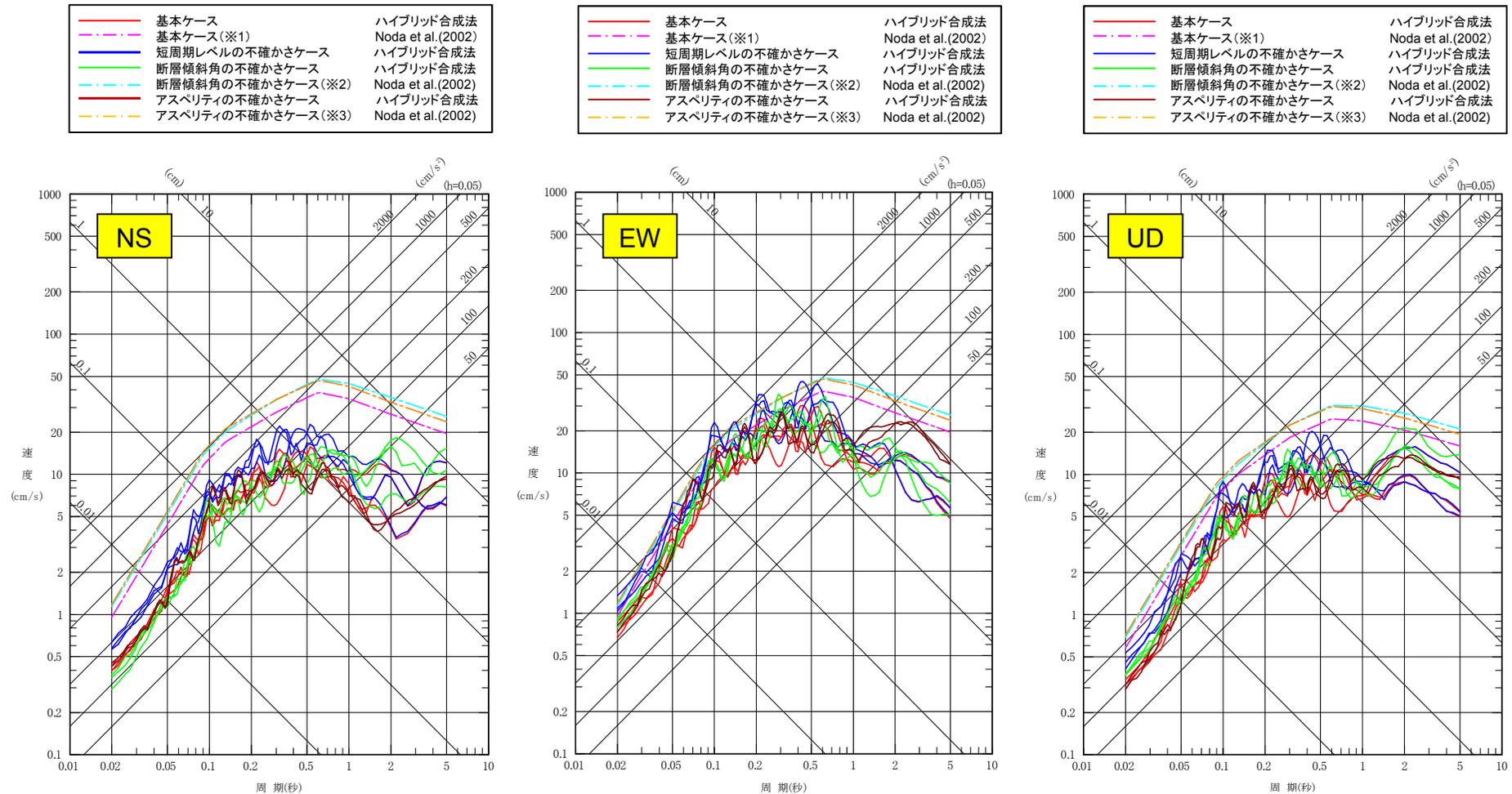
4. 2. 9 アスペリティの不確かさケースの地震動評価(2)

- F-6断層～F-9断層による地震(アスペリティの不確かさケース)のハイブリッド合成法(接続周期帯1.0～2.0秒)による地震動評価の応答スペクトルを示す。



4. 2. 10 F-6断層～F-9断層による地震の地震動評価

- F-6断層～F-9断層による地震の応答スペクトルに基づく方法及び断層モデルを用いた手法 (ハイブリッド合成法) による地震動評価を示す。



※1 : $M_j 7.2$ [武村(1990)], $X_{eq}=19.7\text{km}$

※2 : $M_j 7.4$ [武村(1990)], $X_{eq}=20.2\text{km}$

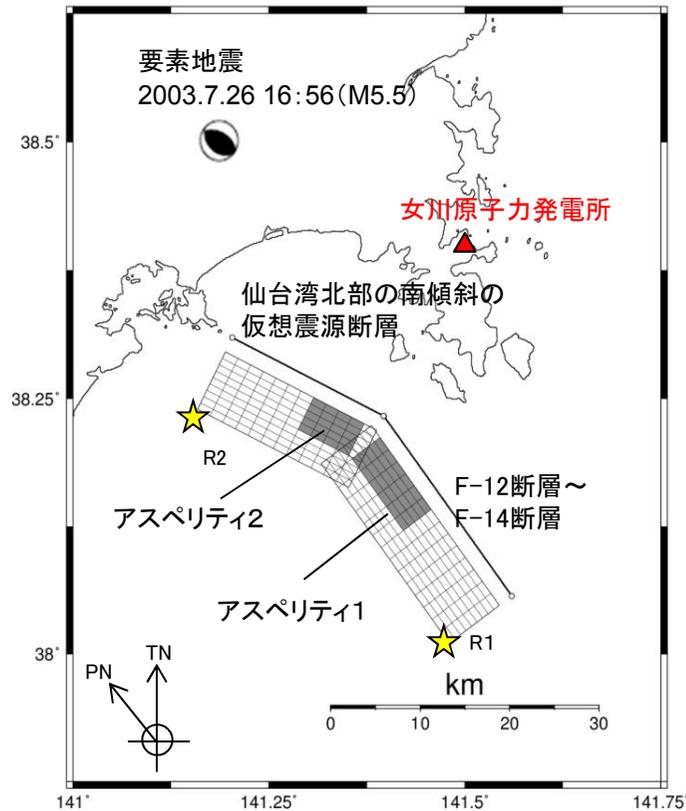
※3 : $M_j 7.2$ [武村(1990)], $X_{eq}=16.5\text{km}$

4. 3 仙台湾の断層群による地震の地震動評価

4.3.1 仙台湾の断層群による地震の断層モデル(1)

➤ 断層モデルの設定(基本ケース, 短周期レベルの不確かさケース)

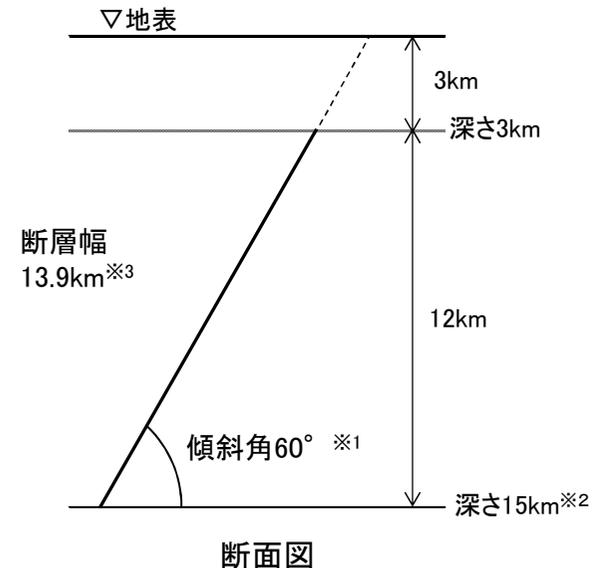
- ・仙台湾の断層群による地震としてF-12断層～F-14断層(24.2km)と仙台湾北部の南傾斜の仮想震源断層(18.9km)を合わせた長さを断層長さとして, 強震動予測レシピにより断層モデルを設定する。
- ・アスペリティ位置は, 安全側の評価となるようにそれぞれの巨視的断層面上端に敷地に寄せて設定する。



★ : 破壊開始点 (R)

平面図

※断層面の屈曲を考慮し, アスペリティは一体のものとして想定。



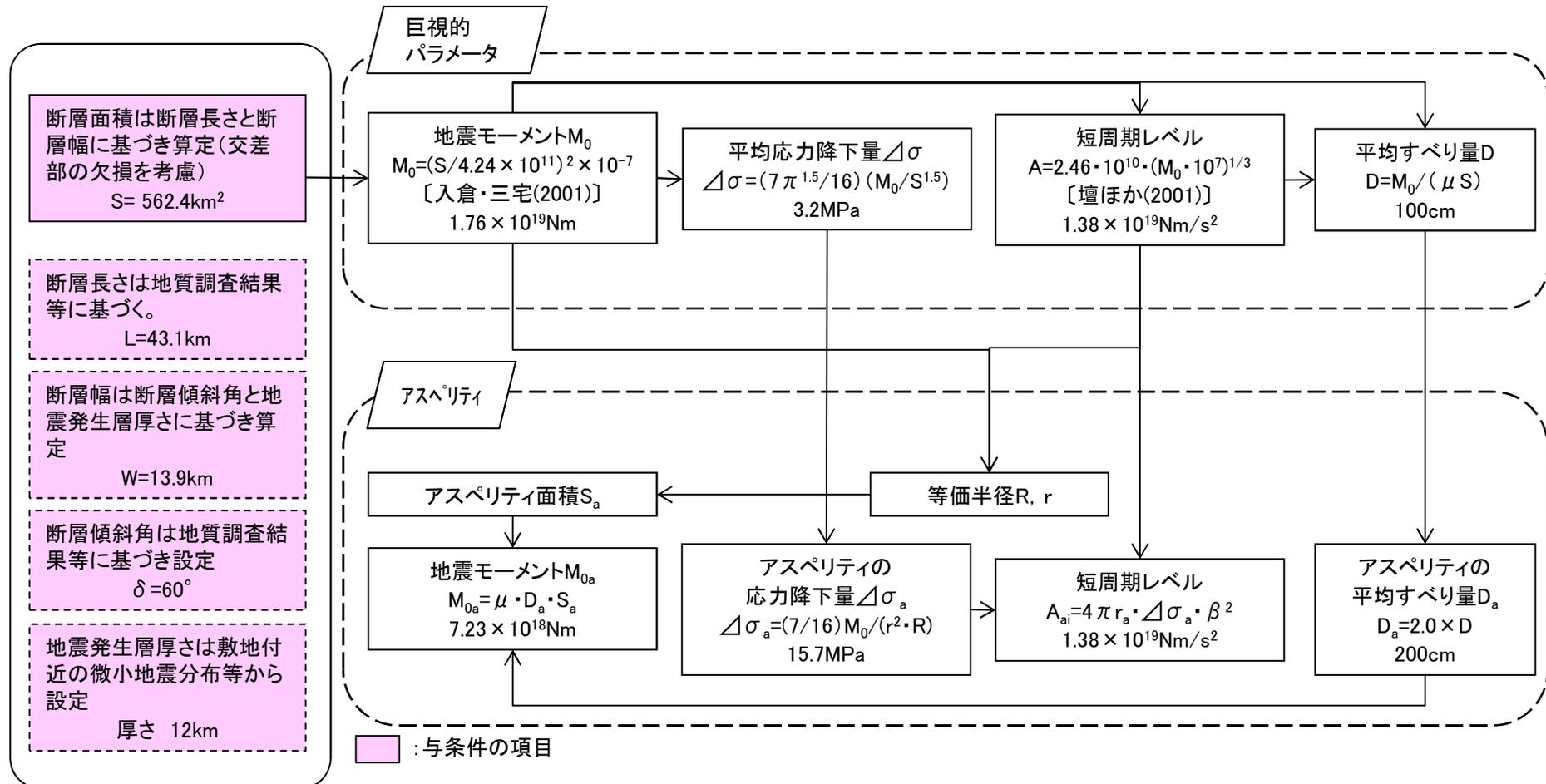
断面図

※1: 傾斜角: F-12断層～F-14断層は地質調査結果では傾斜角は90°ないし高角の南西上がりであることから, 地震本部(2009b)を参考に60°に設定。仮想震源はF-12断層～F-14断層と同様の傾斜角に設定。

※2: 地震発生層下端: 金華山付近のような微小地震の集積がみられないことから15kmと設定。

※3: 断層幅: 傾斜角, 地震発生層厚さから設定。

4. 3. 1 仙台湾の断層群による地震の断層モデル(2)



4.3.1 仙台湾の断層群による地震の断層モデル(3)

基本ケース及び短周期レベルの不確かさケースの断層パラメータ

	断層パラメータ	設定方法	設定値	
			基本ケース	不確かさケース
断層面全体	断層長さ(km)	地質調査結果に基づき設定	43.1	同左
	断層幅(km)	地震発生層厚さと傾斜角から設定	13.9	同左
	断層面積(km ²)	S=LW(断層面の重複を考慮)	562.4	同左
	断層上端深さ(km)	微小地震分布等に基づき設定	3	同左
	断層下端深さ(km)	微小地震分布等に基づき設定	15	同左
	傾斜角(°)	地質調査結果等に基づき設定	60	同左
	破壊伝播形式	—	放射状	同左
	地震モーメント(N・m)	$M_0=(S/4.24 \times 10^{11})^2 \times 10^{-7}$ 入倉・三宅(2001)	1.76×10^{19}	同左
	剛性率(N/m ²)	$\mu = \rho \beta^2$, $\beta = 3.4 \text{ km/s}$, $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$, 地震本部(2009a)	3.12×10^{10}	同左
	平均すべり量(cm)	$D = M_0 / (\mu S)$	100	同左
	平均応力降下量(MPa)	$\Delta \sigma = (7 \pi^{1.5} / 16) (M_0 / S^{1.5})$	3.2	同左
	破壊伝播速度(km/s)	$V_r = 0.72 \times \beta$, 地震本部(2009b)	2.45	同左
	短周期レベル(N・m/s ²)	$A = 2.46 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3}$ 壇ほか(2001)	1.38×10^{19}	同左

	断層パラメータ	設定方法	設定値	
			基本ケース	不確かさケース
アスペリティ	地震モーメント(N・m)	$M_{0a} = \mu D_a S_a$	7.23×10^{18}	同左
	面積(km ²)	$S_a = \pi r^2$, $r = (7 \pi M_0 \beta^2) / (4AR)$, $R = (S / \pi)^{0.5}$	115.5	同左
	平均すべり量(cm)	$D_a = 2 \times D$	200	同左
	応力降下量(MPa)	$\Delta \sigma_a = (7/16) \times M_0 / (r^2 \times R)$	15.7	23.5
	短周期レベル*(N・m/s ²)	$A_a = 4 \pi \times r \times \Delta \sigma_a \times \beta^2$	1.38×10^{19}	2.07×10^{19}
	背景領域	地震モーメント(N・m)	$M_{0b} = M_0 - M_{0a}$	1.04×10^{19}
面積(km ²)		$S_b = S - S_a$	446.9	同左
平均すべり量(cm)		$D_b = M_{0b} / (\mu S_b)$	74	同左
実効応力(MPa)		$\sigma_b = (D_b / W_b) \cdot (D_a / W_a) \cdot \sigma_a$	3.4	5.2
f_{\max} (Hz)		香川ほか(2003)	8.3	同左

*アスペリティの短周期レベルは参考として記載。

4.3.1 仙台湾の断層群による地震の断層モデル(4)

検討ケースの主なパラメータの比較

検討ケース	断層モデルの設定条件							
	断層長さ (km)	地震規模	等価 震源距離 (km)	傾斜角	断層面積 (km ²)	地震 モーメント (Nm)	アスペリティの 応力降下量 (MPa)	アスペリティの 短周期レベル (Nm/s ²)
基本ケース	43.1	M _j 7.6	28	60°	562	1.76 × 10 ¹⁹	15.7	1.38 × 10 ¹⁹
短周期レベルの 不確かさ	43.1	M _j 7.6	28	60°	562	1.76 × 10 ¹⁹	23.5	2.07 × 10 ¹⁹

※ 地震規模は松田(1975)による。

主な断層パラメータの設定根拠

	パラメータの設定根拠
断層面積	断層長さ×断層幅 重複部分は除く。
断層長さ	地質評価結果による。
断層幅	断層傾斜角と地震発生層厚さより算定。地震発生層厚さは、北上山地の南部に位置する敷地と内陸地域(歪集中帯)の微小地震等の特徴を踏まえ設定。
断層傾斜角	F-12断層～F-14断層は地質調査結果では傾斜角は90° ないし高角の南西上がりであることから、地震本部(2009b)を参考に60° に設定。仮想震源はF-12断層～F-14断層と同様の傾斜角に設定。
断層の走向	地質評価結果による。

■地震動評価方法

➤ 応答スペクトルに基づく方法による地震動評価

Noda et al.(2002)の方法を用いた地震動評価を行う。内陸地殻内地震の観測記録が少ないことから、内陸補正係数は考慮しない。

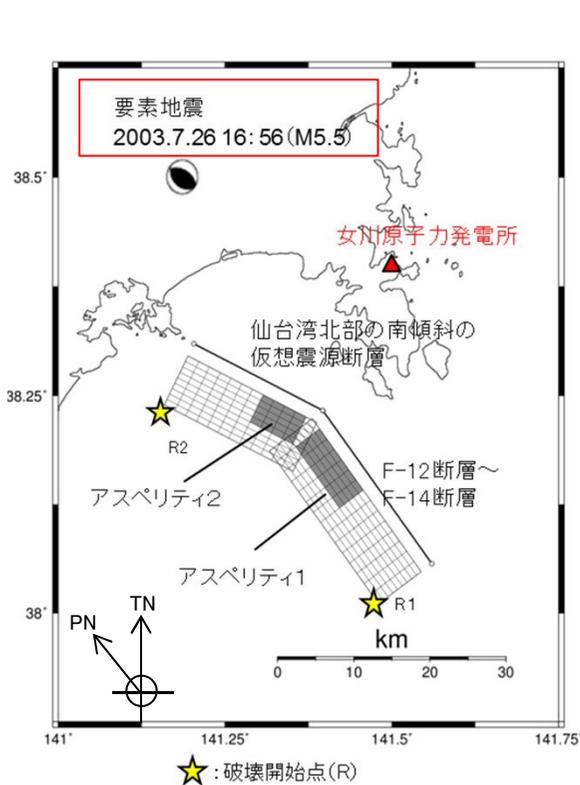
➤ 断層モデルを用いた手法による地震動評価

- ✓ 入倉ほか(1997)及び司ほか(2015)の経験的グリーン関数法により評価を行う。
- ✓ 要素地震は、敷地の西側領域(石巻平野周辺から仙台湾の断層群)付近で発生し、想定する断層と同様の震源メカニズム(逆断層)の地震である2003年7月26日16:56宮城県中部の地震(M5.5)を用いる。

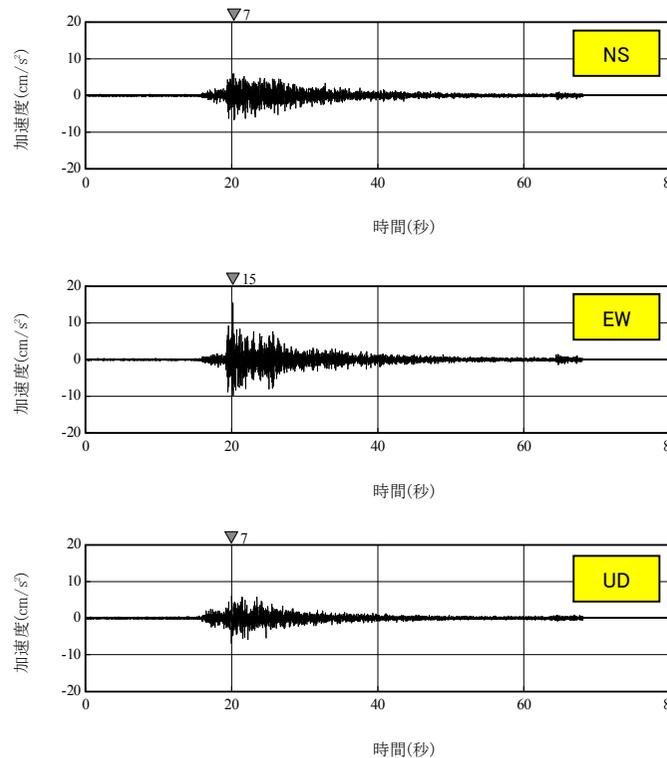
4. 3. 2 経験的グリーン関数法に用いる要素地震(1)

■ 経験的グリーン関数法に用いる要素地震〔2003年7月26日16:56(M5.5)〕

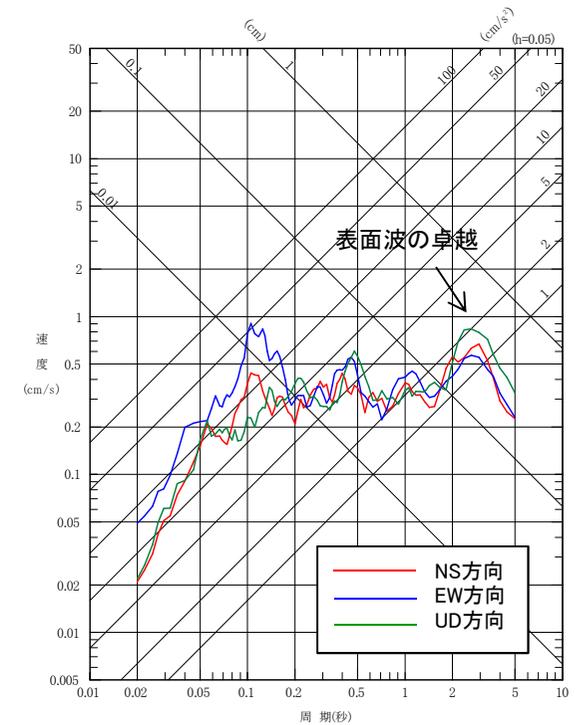
- 活断層の連動による規模の大きな地震では、表面波の卓越が考えられることから、敷地周辺で観測された内陸地域の地震のうち、メカニズムが想定する断層面に近く、さらに表面波の卓越が見られる地震を要素地震として選定した。



要素地震の震央分布



加速度時刻歴波形



応答スペクトル

要素地震の観測記録〔自由地盤の解放基盤相当(O.P.-8.6m)でののはぎとり波〕

注: O.P.は女川原子力発電所工事用基準面(Onagawa peil)であり, O.P.±0m = T.P.(東京湾平均海面)-0.74m。

4.3.2 経験的グリーン関数法に用いる要素地震(2)

■要素地震の諸元と震源スペクトル

■要素地震の諸元

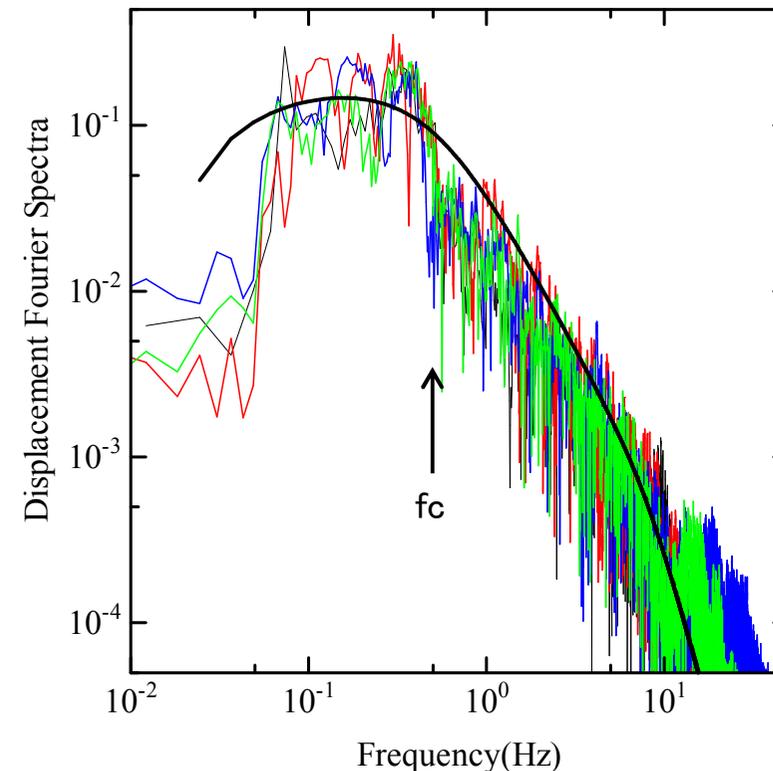
- 要素地震の諸元は気象庁等に基づく。
- 応力降下量は、女川原子力発電所及び周辺のKiK-net観測点の岩盤の記録を用いて検討を行った。
 - ✓ KiK-net観測点の記録は、地表記録から理論増幅率を用いて解放基盤での地震波形を推定した。
 - ✓ 幾何減衰による補正を行った。

要素地震の諸元

	要素地震
発生日時※1	2003.7.26 16:56
震源地※1	宮城県中部
震源位置※1	東経 141° 11.3′ 北緯 38° 30′
震源深さ(km)※1	12
地震の規模 M※1	5.5
地震モーメント M_0 (N・m)※2	9.45×10^{16}
モーメントマグニチュード M_w	5.3
コーナー周波数(Hz)	0.499
応力降下量(MPa)	3.0

※1: 気象庁地震カタログによる。

※2: F-netによる値。

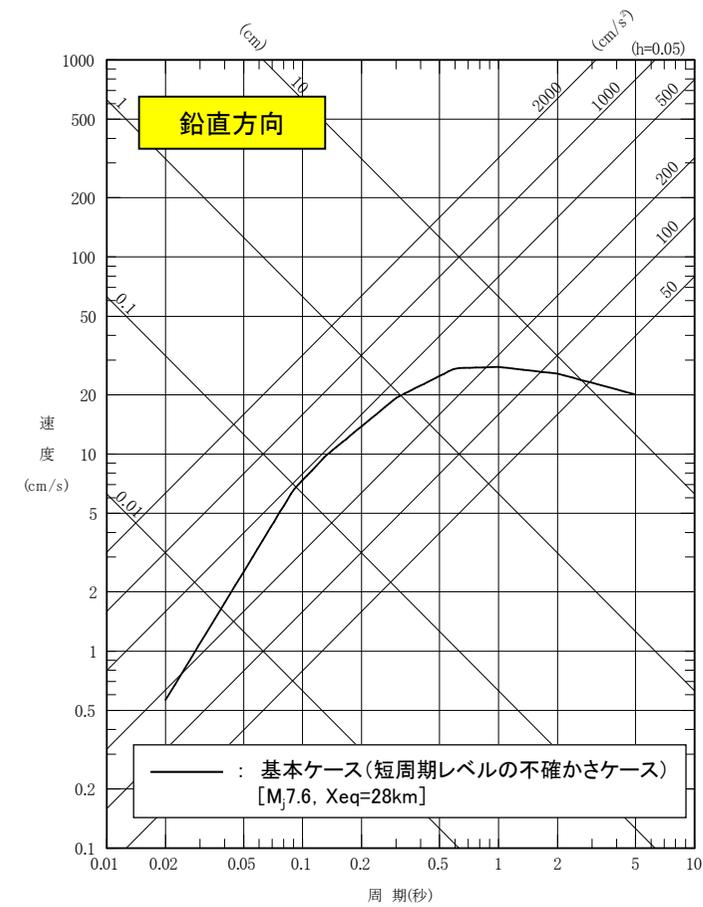
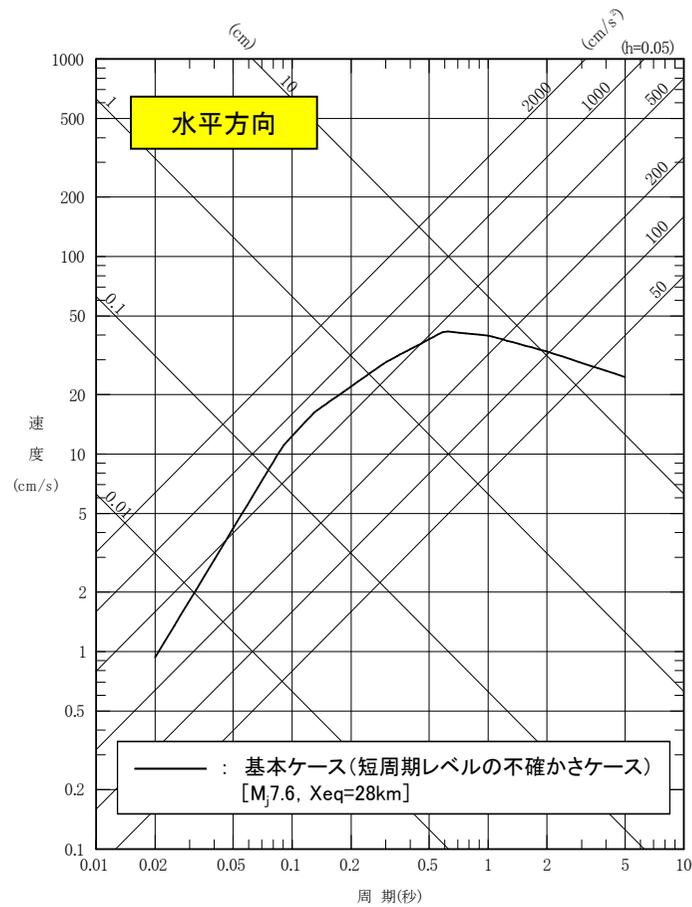


要素地震の震源スペクトル

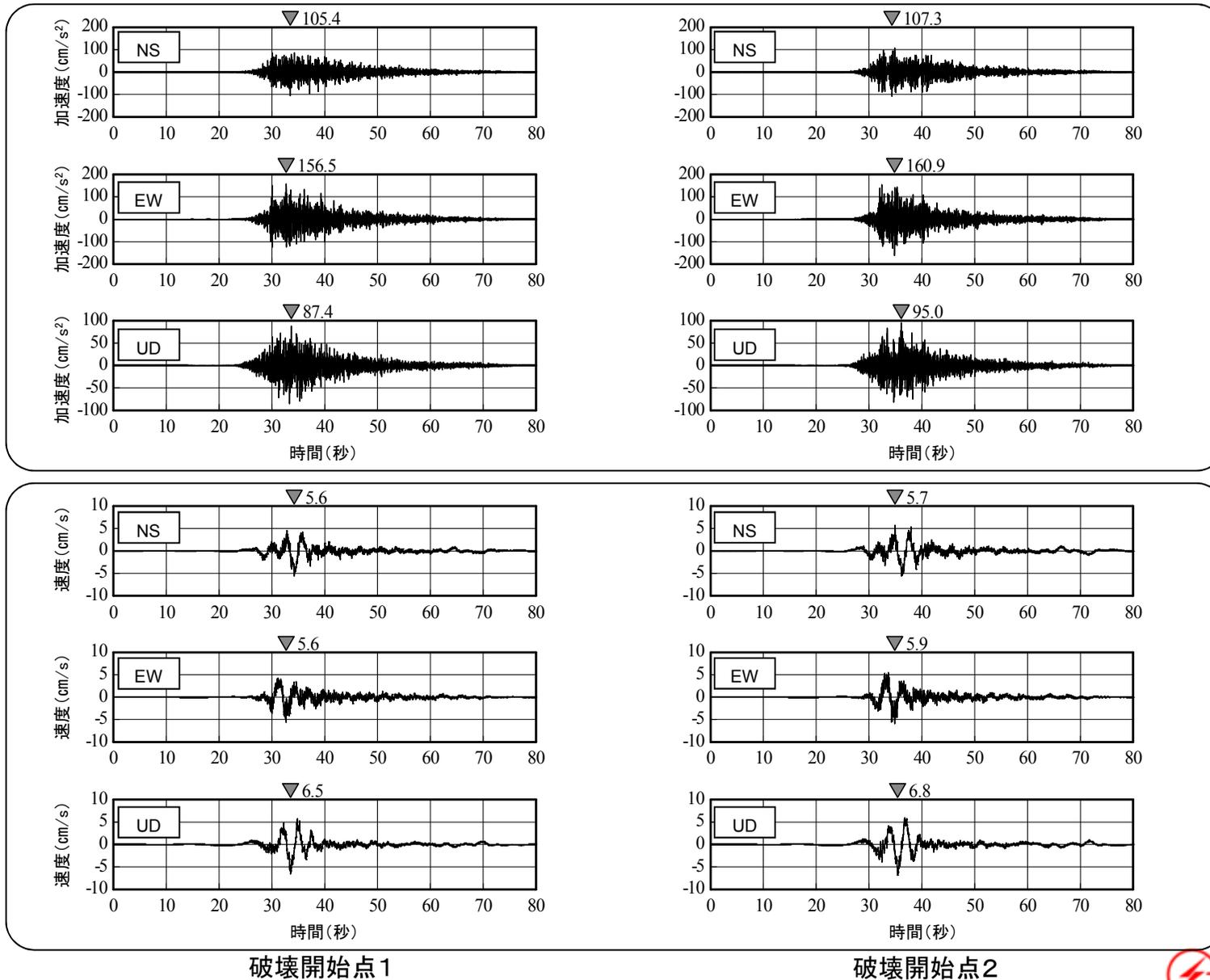
- 凡例
- : 女川原子力発電所
 - : KiK-net MYGH03(唐桑)
 - : KiK-net MYGH04(東和)
 - : KiK-net MYGH12(志津川)
 - : Boore(1983)

4.3.3 応答スペクトルに基づく方法による地震動評価

- ▶ 仙台湾の断層群による地震の応答スペクトルに基づく方法による地震動評価結果〔Noda et al.(2002)〕を示す。

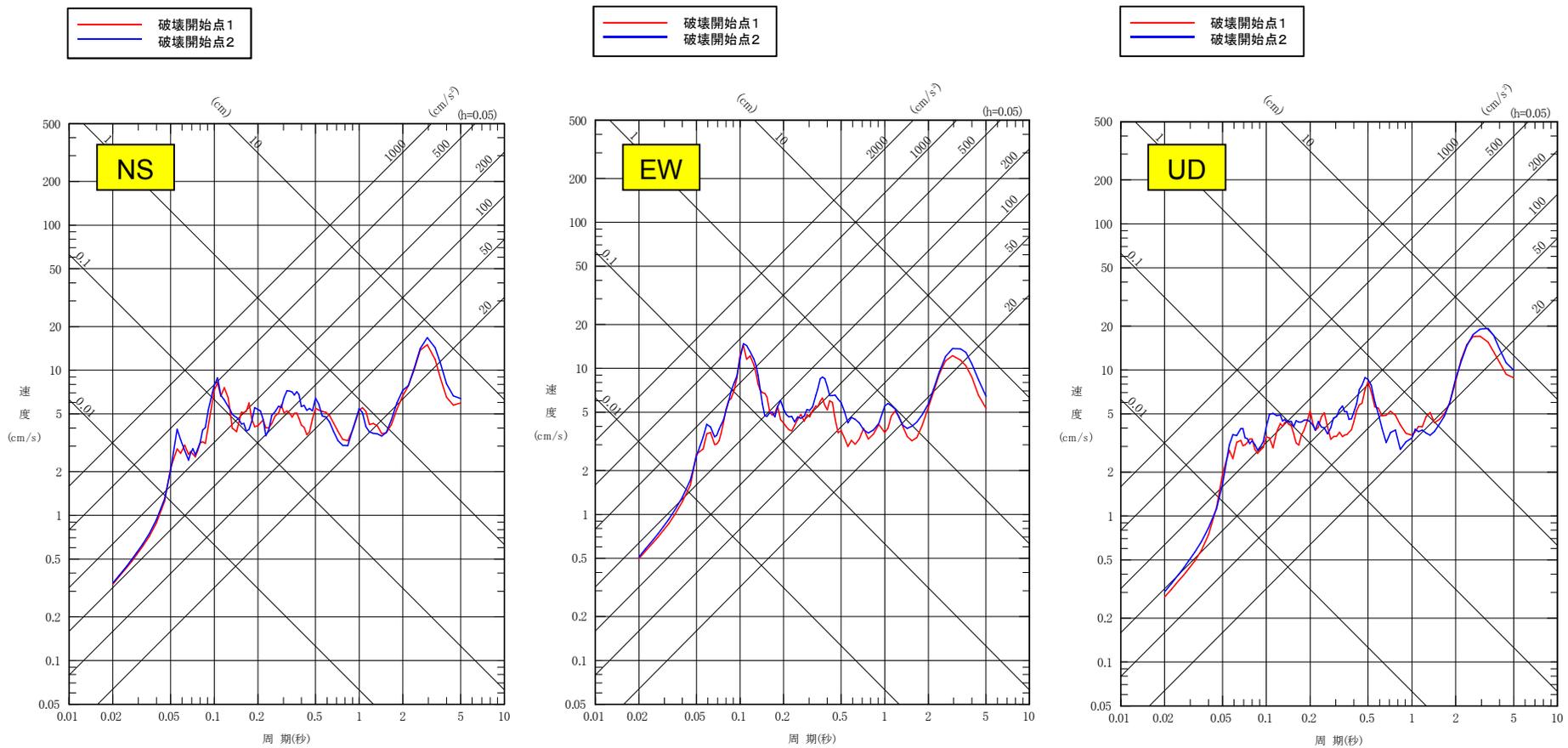


4. 3. 4 基本ケースの地震動評価(1) 経験的グリーン関数法



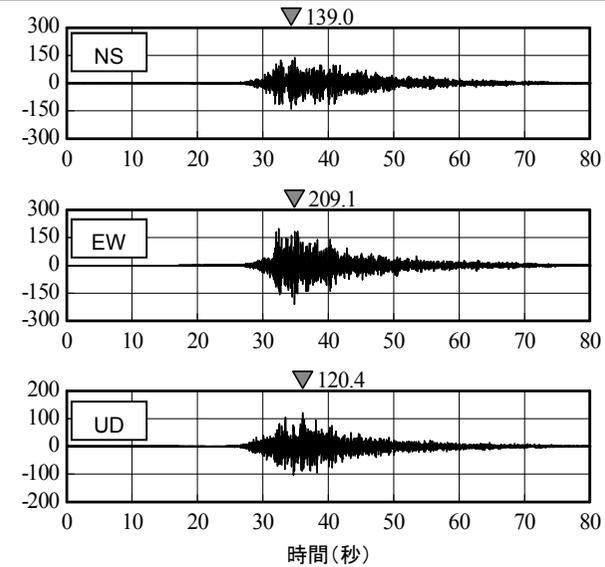
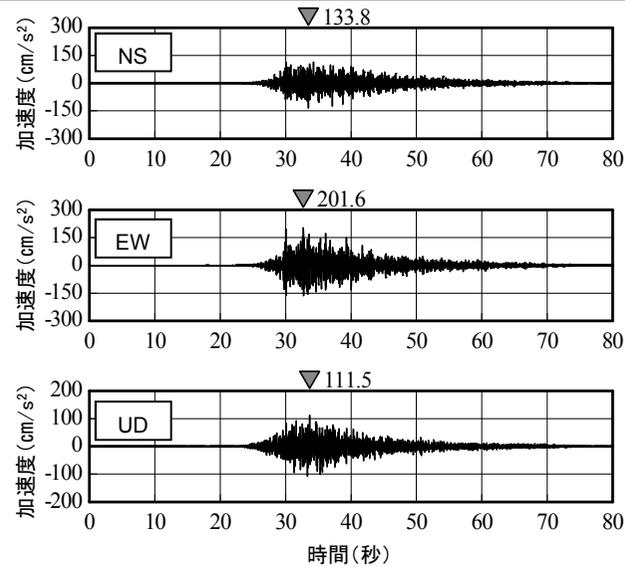
4. 3. 4 基本ケースの地震動評価(2)

- 仙台湾の断層群による地震の基本ケースの地震動評価を示す。
- 評価手法は経験的グリーン関数法による。



4.3.5 短周期レベルの不確かさケースの地震動評価(1)

経験的グリーン関数法

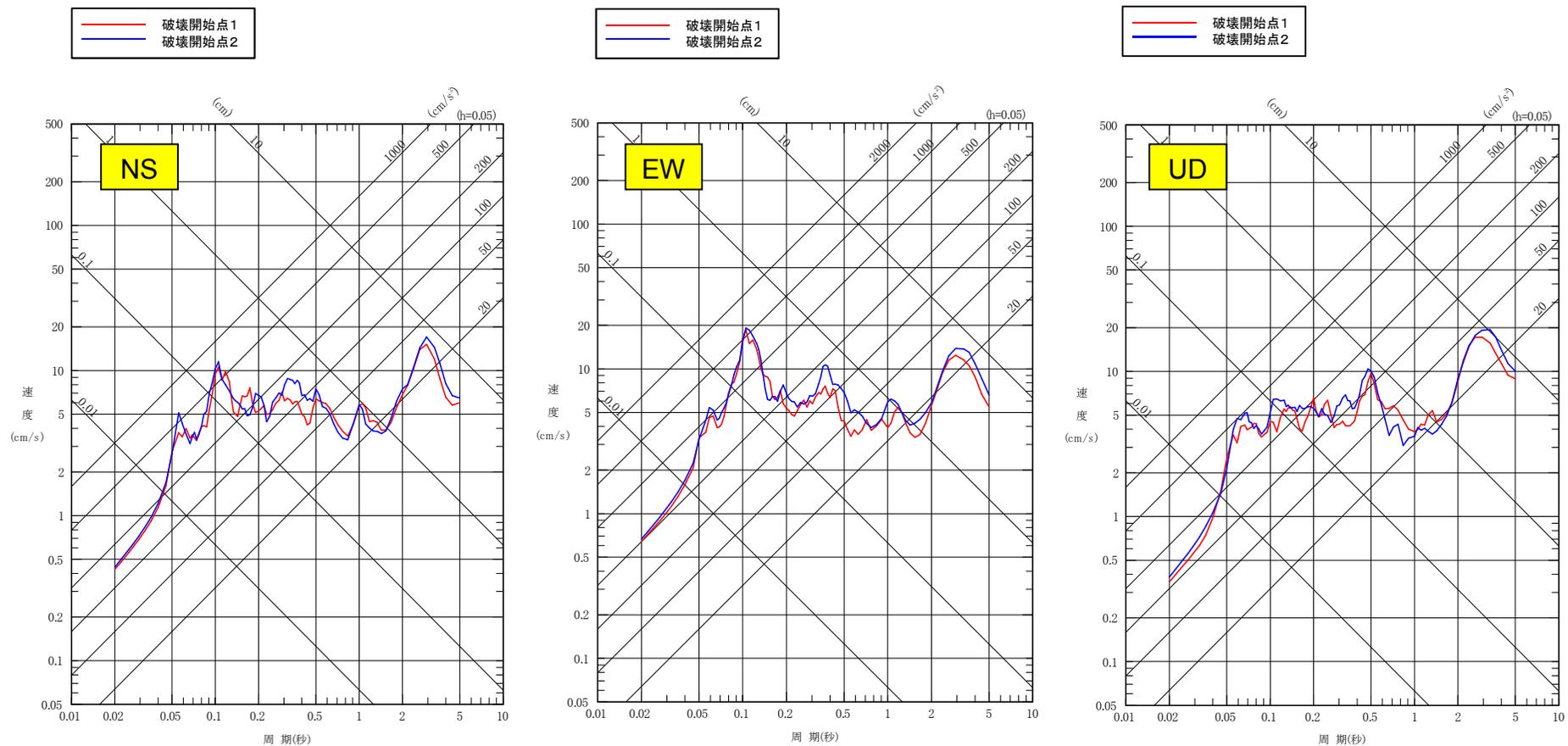
第316回審査会合(H28.1.8)
資料1 p.70, 71 一部修正

破壊開始点1

破壊開始点2

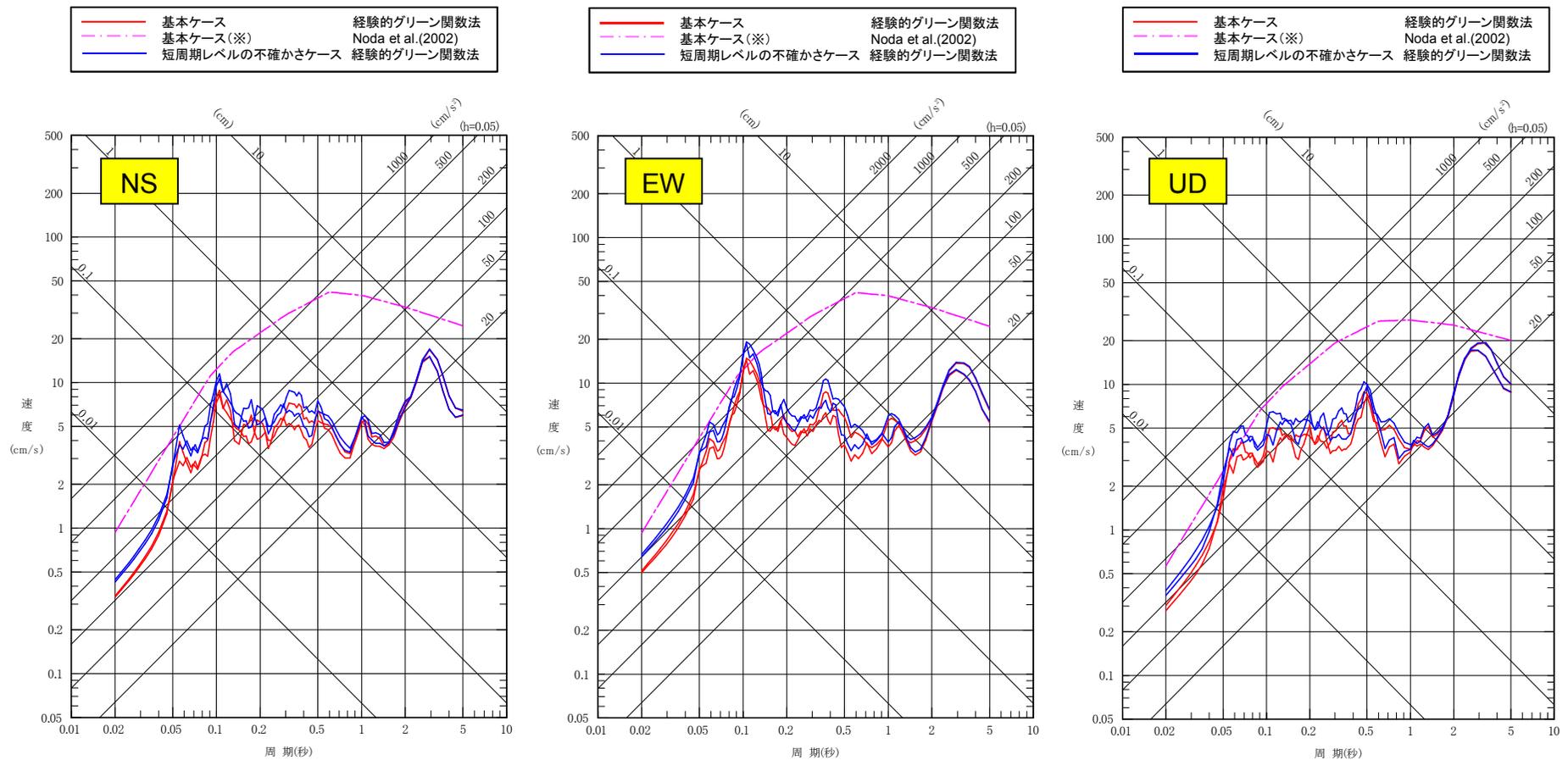
4.3.5 短周期レベルの不確かさケースの地震動評価(2)

- ▶ 仙台湾の断層群による地震の短周期レベルの不確かさケースの地震動評価を示す。
- ▶ 評価手法は経験的グリーン関数法による。



4.3.6 仙台湾の断層群による地震の地震動評価

- ▶ 仙台湾の断層群による地震の応答スペクトルに基づく方法及び断層モデルを用いた手法(経験的グリーン関数法)による地震動評価を示す。



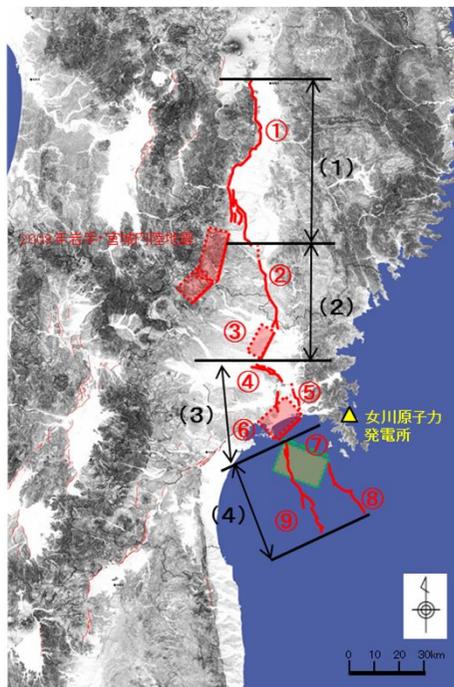
※ : $M_j 7.6$ [松田(1975)], $X_{eq}=28.0\text{km}$ (短周期レベルの不確かさケース)

5. 北上低地西縁断層帯から仙台湾の断層群の 保守的連動評価

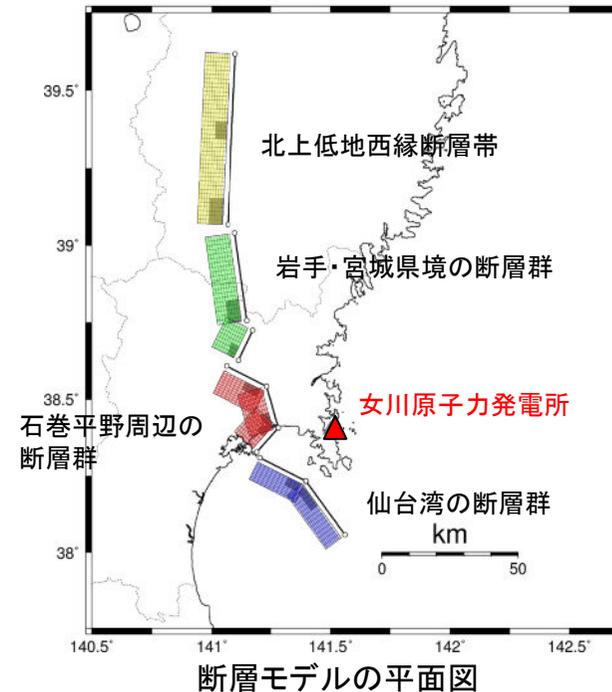
5.1 北上低地西縁断層帯～仙台湾の断層群の断層モデル(1)

■ 保守的に影響評価を実施する断層群の連動(192km)の断層モデル

- ▶ 北上低地西縁断層帯, 岩手・宮城県境の断層群, 石巻平野周辺の断層群及び仙台湾の断層群の連動を考慮し断層モデルを設定する。
- ▶ 断層パラメータは, 長大な断層群であることから, 壇ほか(2015)による長大逆断層の地震動予測レシピに基づき設定する。
- ▶ 地震発生層は, 海域については仙台湾の断層群による地震の評価と同様に3~15kmとし, 陸域については2003年7月26日宮城県中部の地震の稠密地震観測による余震観測を参考に2~11kmに設定する。
- ▶ アスペリティは各断層に考慮し, 位置は安全側の評価となるようそれぞれの巨視的断層面上端に敷地に寄せて設定する。



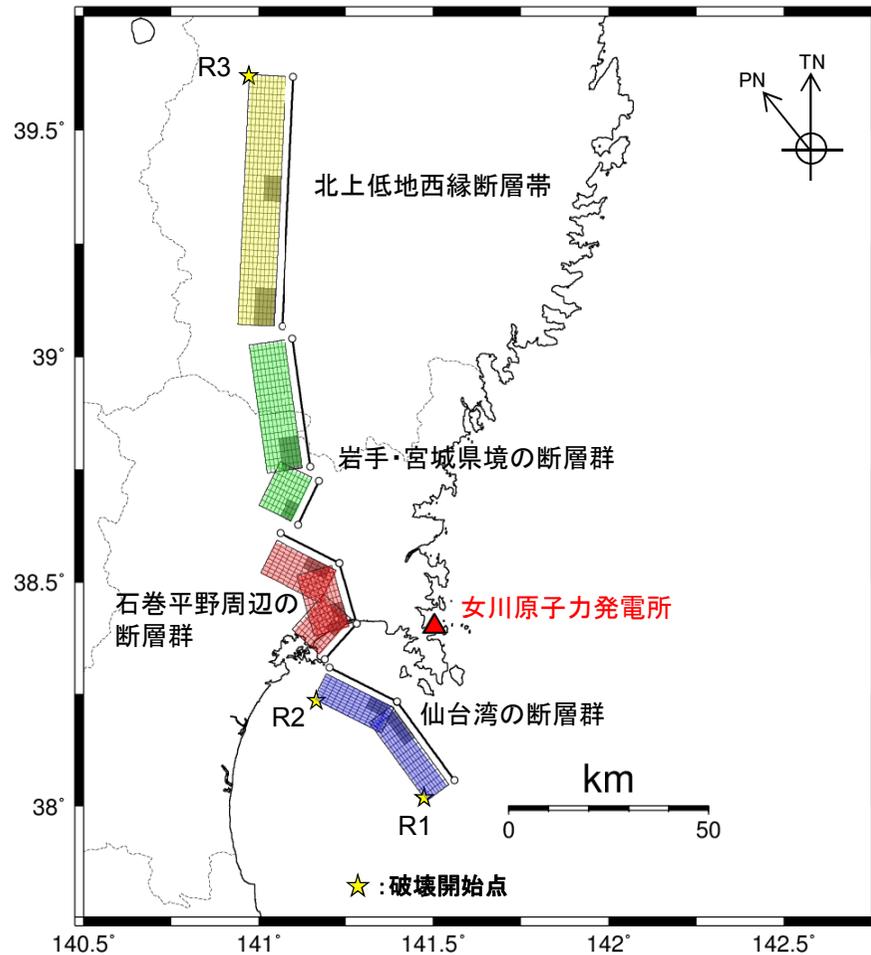
中田・今泉(2002)に一部加筆



断層モデルの平面図

5.1 北上低地西縁断層帯～仙台湾の断層群の断層モデル(2)

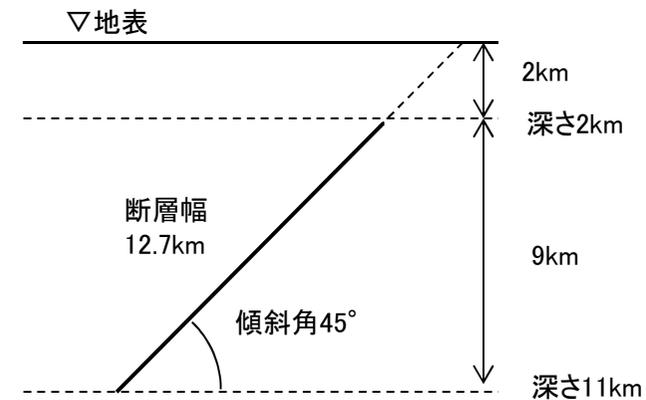
■全ての断層群の連動(192km)の断層モデル



北上低地西縁断層帯～仙台湾の断層群の断層モデル

断層群	地震発生層		傾斜角 (°)	断層長さ L (km)	断層幅 W (km)
	上端 (km)	下端 (km)			
(1) 北上低地西縁断層帯	2	11	45	61.1	12.7
(2) 岩手・宮城県境の断層群	2	11	45	43.8	12.7
(3) 石巻平野周辺の断層群	2	11	45	44.0	12.7
(4) 仙台湾の断層群	3	15	60	43.1	13.9

※陸域の断層の傾斜角は地震本部(2009b)(逆断層)により45°と設定



5.3 断層パラメータの設定(1)

基本ケースと考慮する不確かさ

検討ケース	断層モデルの設定条件						
	地震規模	断層の位置	破壊開始点	地震発生層	アスペリティの位置	傾斜角	アスペリティの短周期レベル
基本ケース	M _j 8.1(※2)	地質調査結果	破壊が敷地に向かう位置(複数)	2~11km(内陸) 3~15km(海域)	敷地寄せ断層上端	45°(内陸) 60°(海域)	地震本部(2009b)×1.0
短周期レベルの不確かさ(※1)	同上	同上	同上	同上	同上	同上	地震本部(2009b)×1.5

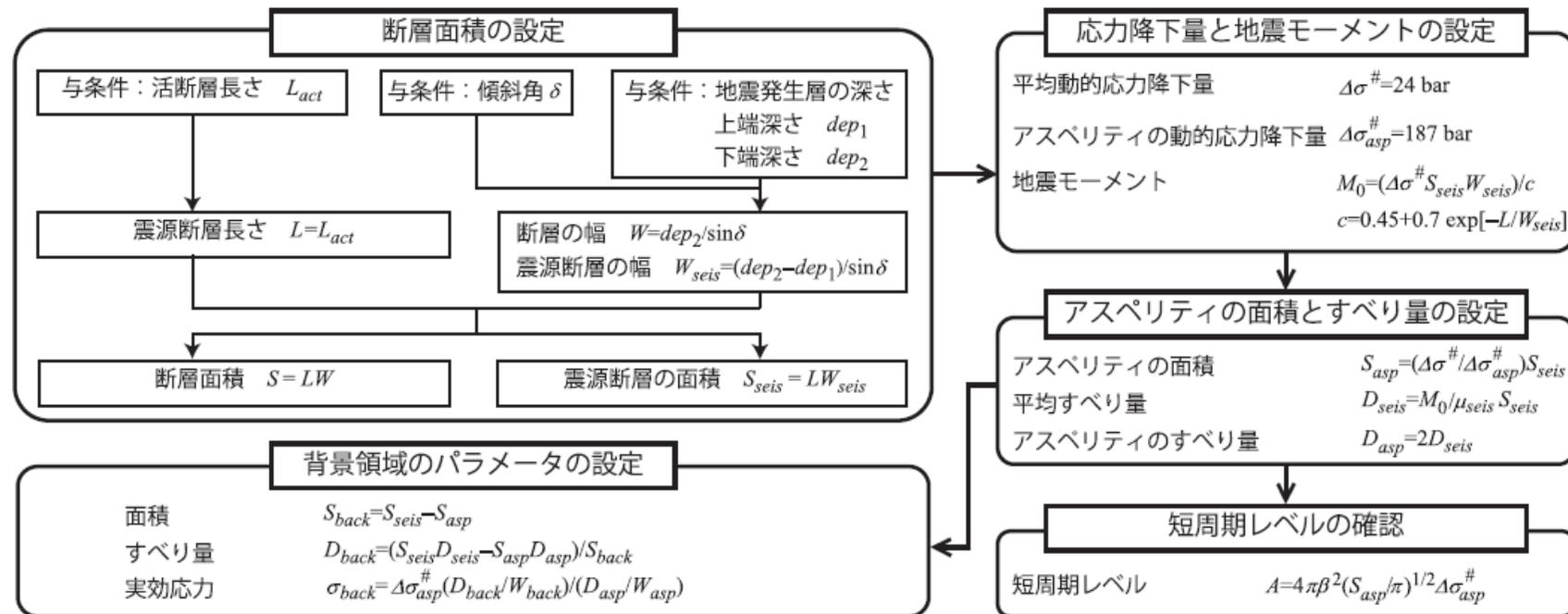
: 予めモデルに織り込む不確かさ
 : 考慮する不確かさ

※1:新潟県中越沖地震の知見を反映し、短周期レベル(応力降下量)×1.5倍を考慮。

※2:武村(1990)による。

5.3 断層パラメータの設定(2)

■壇ほか(2015)による断層パラメータ設定について



長大な逆断層による内陸地震の強震動予測用の断層パラメータ算定手順[壇ほか(2015)]

【壇ほか(2015)】

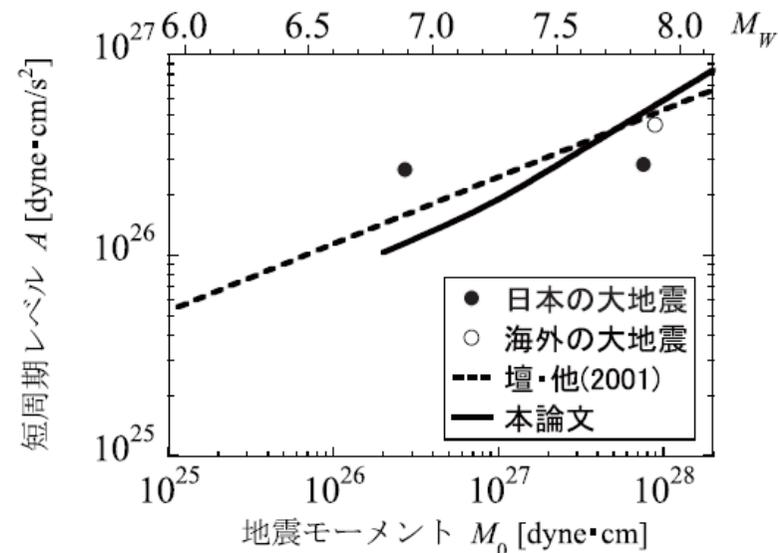
- ・内陸地殻内地震のうち、例えば中央構造線のように、全長がきわめて長いとき、「強震動予測のためのレシピ」だとアスペリティの面積が断層面積の50%をこえ背景領域のすべり量が負となって、断層モデルが設定できないことがあり、課題となっていた。
- ・本論文では、入江・他(2013)の近似式を用いて、実際の地震データに基づき、平均動的応力低下量とアスペリティの動的応力低下量を求めた。ついで、これらの経験的関係式に基づいて、アスペリティモデルを記述する各パラメータの設定方法を提案した。
- ・本論文で用いた短周期レベルのデータは3地震と少なかった。したがって、今後、強震動予測の精度をさらに向上させるには、マグニチュード8クラスの内陸地殻内地震の短周期レベルの蓄積を行う必要がある。

5.3 断層パラメータの設定(3)

■壇ほか(2015)により設定した短周期レベルの確認

表1 逆断層による内陸地震の断層パラメータ

(a) 日本								(b) 日本以外									
年	地震	気象庁 マグニ チュード	震源 断層 長さ	断層 幅	断層 面積	地震モー メント	短周期 レベル	平均 動的応力 降下量	年	地震	モーメン トマグニ チュード	震源 断層 長さ	断層 幅	断層 面積	地震モー メント	短周期 レベル	平均 動的応力 降下量
		M_J	L	W	S	M_0	A	$\Delta\sigma^\#$			M_W	L	W	S	M_0	A	$\Delta\sigma^\#$
		[km]	[km]	[km ²]	[dyne·cm]	[dyne·cm/s ²]	[bar]				[km]	[km]	[km ²]	[dyne·cm]	[dyne·cm/s ²]	[bar]	
1896	陸羽	7.2	40	21	840	1.4×10^{27}	-	60	1977	Caucete	7.4	80	30	2400	1.86×10^{27}	-	24
1940	積丹半島沖	7.5	100	35	3500	2.4×10^{27}	-	21	1978	Tabas	7.3	74	22	1628	1.32×10^{27}	-	26
1964	男鹿半島沖	6.9	50	20	1000	4.3×10^{26}	-	15	1979	Montenegro	6.9	50	29	1450	3.11×10^{26}	-	7
1964	新潟	7.5	80	30	2400	3.2×10^{27}	-	42	1980	El Asnam	7.1	55	15	825	5.07×10^{26}	-	22
1983	日本海中部	7.7	120	40	4800	7.6×10^{27}	2.82×10^{26}	49	1985	New Ireland	7.2	48	23	1104	8.27×10^{26}	-	25
2008	岩手・宮城内陸	7.2	40	18	720	2.72×10^{26}	2.66×10^{26}	14	1999	Chi-Chi	7.6	89	39	3435	3.38×10^{27}	-	31
									2008	Sichuan	7.9	279	46	12781	8.97×10^{27}	4.44×10^{26}	22



短周期レベルと地震モーメントとの関係[壇ほか(2015)]

5.3 断層パラメータの設定(4)

■ 壇ほか(2015)による断層パラメータ設定のフロー

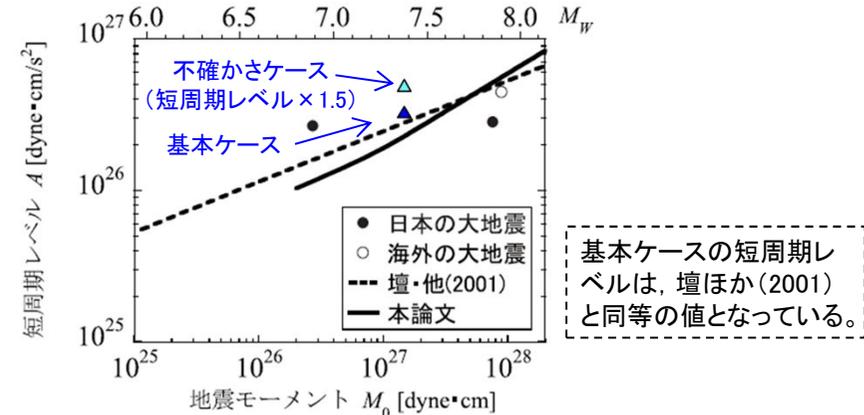
北上低地西縁断層帯から仙台湾の断層群による地震
基本ケース

断層面積S(断層長さL, 断層幅W)の設定
 $S_{seis} = \sum S_{seis} = (L \cdot W) = 2293.2 \text{ km}^2$
 ※断層面が重複している部分があることから各断層の面積を足し合わせている。

応力降下量 $\Delta\sigma$ と地震モーメント M_0 の設定
 $\Delta\sigma \# = 2.4 \text{ MPa}$ [壇ほか(2015)]
 $\Delta\sigma_a \# = 18.7 \text{ MPa}$ [壇ほか(2015)]
 $M_0 = 1.46 \times 10^{20} \text{ Nm}$ ←

アスペリティの面積 S_{asp} とすべり量 D_{asp} の設定
 $S_a = (\Delta\sigma \# / \Delta\sigma_a \#) \cdot S_{seis} = 0.128 \times 2293.2 = 294.3 \text{ km}^2$
 $D = M_0 / (\mu S_{seis}) = 2.04 \text{ m}$
 $D_a = 2.0 \times D = 4.08 \text{ m}$
 $M_{0a} = \mu \cdot D_a \cdot S_a = 3.75 \times 10^{19} \text{ Nm}$

短周期レベルAの確認
 $A_a = 4\pi \beta^2 \Delta\sigma_a \# (S_a / \pi)^{0.5} = 2.63 \times 10^{19} \text{ Nm/s}^2$
 $A_b = 4\pi \beta^2 \Delta\sigma_b \# (S_b / \pi)^{0.5} = 1.68 \times 10^{19} \text{ Nm/s}^2$
 $A = (A_a^2 + A_b^2)^{0.5} = 3.12 \times 10^{19} \text{ Nm/s}^2$



短周期レベルと地震モーメントとの関係 [壇ほか(2015)に一部加筆]

壇ほか(2015)
 $M_0 = \Delta\sigma \# \cdot S_{seis} \cdot W_{seis} / c$
 $c = 0.45 + 0.7 \exp(-L / W_{seis}) = 0.45$

背景領域のパラメータの設定
 $S_b = S - S_a = 2293.2 - 294.3 = 1998.9 \text{ km}^2$
 $\sigma_b \# = (D_b / W_b) \cdot (\pi^{0.5} / D_a) \cdot r \cdot \sum \gamma_i^3 \cdot \Delta\sigma_a \# = 4.59 \text{ MPa}$

【参考】
 比例定数cは断層のアスペクト比に応じた式となっており、壇ほか(2015)で仮定されている W_{seis} の17kmでcを算定すると0.45で同じ値となり、 W_{seis} の違いによる影響はない。

※不確かさケースとして短周期レベル×1.5を考慮している。

5.3 断層パラメータの設定(5)

断層パラメータ	記号	単位	設定方法	全体	(1)北上低地 西縁断層帯	(2)岩手・宮城県境の 断層群			(3)石巻平野周辺の断層群			(4)仙台湾の断層群	
						一関一石越 撓曲	1962年宮城県 北部の地震	加護坊山一 覧岳山断層	旭山撓曲・ 須江断層	南部セグメ ント断層	仙台湾北部の南傾 斜の仮想震源断層	F-12断層～ F-14断層	
走向	θ	°	—	—	182.7	172.0	206.0	116.6	164.0	222.0	116.6	143.7	
傾斜角	δ	°	—	—	45	45	45	45	45	45	60	60	
断層上端深さ	—	km	—	—	2	2	2	2	2	2	3	3	
断層下端深さ	—	km	—	—	11	11	11	11	11	11	15	15	
断層長さ	L	km	—	192	61.1	31.8	12.0	16.6	15.6	11.8	18.9	24.2	
断層幅	W	km	W=S/L	11.9	12.7	12.7	12.7	12.7	12.7	12.7	13.9	13.9	
断層面積	S	km ²	S=∑Si	2293.2	777.7	404.7	152.7	174.9	116.3	104.3	562.4		
剛性率	μ	N/m ²	$\mu = \rho \beta^2, \beta = 3.4 \text{ km/s}, \rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$ 地震本部(2009a)	3.12E+10	3.12E+10	3.12E+10	3.12E+10	3.12E+10	3.12E+10	3.12E+10	3.12E+10		
破壊伝播速度	Vr	km/s	Vr=0.72×β, 地震本部(2009b)	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45		
平均動的応力降下量	$\Delta\sigma^{\#}$	MPa	壇ほか(2015)	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4		
地震モーメント	M ₀	N・m	壇ほか(2015)	1.46E+20	4.95E+19	2.58E+19	9.73E+18	1.11E+19	7.41E+18	6.64E+18	3.58E+19		
モーメントマグニチュード	Mw	—	Mw=(logM ₀ -9.1)/1.5	7.4	7.1	6.9	6.6	6.6	6.5	6.5	7.0		
平均すべり量	D	m	D=M ₀ /μS	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04		
短周期レベル	A	N・m/s ²	A=(A _a ² +A _b ²) ^{0.5}	3.12E+19 (4.69E+19)	1.82E+19 (2.73E+19)	1.31E+19 (1.97E+19)	8.05E+18 (1.21E+19)	8.62E+18 (1.30E+19)	7.03E+18 (1.06E+19)	6.66E+18 (1.00E+19)	1.55E+19 (2.32E+19)	9.20E+18	
全 ASP	地震モーメント	M _{0a}	N・m	M _{0a} =μD _a S _a	3.75E+19	1.27E+19	6.62E+18	2.50E+18	2.86E+18	1.90E+18	1.71E+18	9.20E+18	
	面積	S _a	km ²	S _a =($\Delta\sigma^{\#}$ / $\Delta\sigma_a^{\#}$)S	294.3	99.8	52.0	19.6	22.5	14.9	13.4	72.2	
	動的応力降下量	$\Delta\sigma_a^{\#}$	MPa	壇ほか(2015)	18.7 (28.1)	18.7 (28.1)	18.7 (28.1)	18.7 (28.1)	18.7 (28.1)	18.7 (28.1)	18.7 (28.1)	18.7 (28.1)	
	平均すべり量	D _a	m	D _a =2×D	4.08	4.08	4.08	4.08	4.08	4.08	4.08	4.08	
短周期レベル※	A _a	N・m/s ²	A _a =4πβ ² $\Delta\sigma_a^{\#}$ (S _a /π) ^{0.5}	2.63E+19 (3.95E+19)	1.53E+19 (2.30E+19)	1.10E+19 (1.66E+19)	6.79E+18 (1.02E+19)	7.26E+18 (1.09E+19)	5.92E+18 (8.90E+18)	5.61E+18 (8.43E+18)	1.30E+19 (1.96E+19)	9.20E+18	
第1 ASP	地震モーメント	M _{0a1}	N・m	M _{0a1} =μD _{a1} S _{a1}	—	9.39E+18	6.62E+18	2.50E+18	2.86E+18	1.90E+18	1.71E+18	9.20E+18	
	面積	S _{a1}	km ²	S _{a1} =(2/3)×S _a	—	66.5	52.0	19.6	22.5	14.9	13.4	72.2	
	動的応力降下量	$\Delta\sigma_{a1}^{\#}$	MPa	$\Delta\sigma_{a1}^{\#}=\Delta\sigma_a^{\#}$	—	18.7 (28.1)	18.7 (28.1)	18.7 (28.1)	18.7 (28.1)	18.7 (28.1)	18.7 (28.1)	18.7 (28.1)	
	平均すべり量	D _{a1}	m	D _{a1} =(γ ₁ /∑γ _i ³)×D _a	—	4.52	4.08	4.08	4.08	4.08	4.08	4.08	
短周期レベル※	A _{a1}	N・m/s ²	A _{a1} =4πβ ² $\Delta\sigma_{a1}^{\#}$ (S _{a1} /π) ^{0.5}	—	1.25E+19 (1.88E+19)	1.10E+19 (1.66E+19)	6.79E+18 (1.02E+19)	7.26E+18 (1.09E+19)	5.92E+18 (8.90E+18)	5.61E+18 (8.43E+18)	1.30E+19 (1.96E+19)	9.20E+18	
第2 ASP	地震モーメント	M _{0a2}	N・m	M _{0a2} =μD _{a2} S _{a2}	—	3.32E+18	—	—	—	—	—	—	
	面積	S _{a2}	km ²	S _{a2} =(1/3)×S _a	—	33.3	—	—	—	—	—	—	
	動的応力降下量	$\Delta\sigma_{a2}^{\#}$	MPa	$\Delta\sigma_{a2}^{\#}=\Delta\sigma_a^{\#}$	—	18.7 (28.1)	—	—	—	—	—	—	
	平均すべり量	D _{a2}	m	D _{a2} =(γ ₂ /∑γ _i ³)×D _a	—	3.20	—	—	—	—	—	—	
短周期レベル※	A _{a2}	N・m/s ²	A _{a2} =4πβ ² $\Delta\sigma_{a2}^{\#}$ (S _{a2} /π) ^{0.5}	—	8.84E+18 (1.33E+19)	—	—	—	—	—	—		
背景 領域	地震モーメント	M _{0b}	N・m	M _{0b} =M ₀ -M _{0a}	1.09E+20	3.68E+19	1.92E+19	7.23E+18	8.28E+18	5.51E+18	4.94E+18	2.66E+19	
	面積	S _b	km ²	S _b =S-S _a	1998.9	677.9	352.8	133.1	152.5	101.4	90.9	490.2	
	実効応力	$\sigma_b^{\#}$	MPa	$\sigma_b^{\#}=(D_b/W_b) \cdot (\pi^{0.5}/D_a) \cdot r \cdot \sum \gamma_i^3$ $\Delta\sigma_a^{\#}$	4.6 (6.89)	4.6 (6.89)	4.6 (6.89)	4.6 (6.89)	4.6 (6.89)	4.6 (6.89)	4.6 (6.89)	4.6 (6.89)	
	平均すべり量	D _b	m	D _b =M _{0b} /μS _b	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	
短周期レベル※	A _b	N・m/s ²	A _b =4πβ ² $\Delta\sigma_b^{\#}$ (S _b /π) ^{0.5}	1.68E+19 (2.53E+19)	9.79E+18 (1.47E+19)	7.06E+18 (1.06E+19)	4.34E+18 (6.52E+18)	4.64E+18 (6.98E+18)	3.79E+18 (5.69E+18)	3.58E+18 (5.39E+18)	8.32E+18 (1.25E+19)		

()に記載の数値は、短周期レベルの不確かさケースにおける値を示す。

※アスペリティの短周期レベルは参考として記載。

5.3 断層パラメータの設定(6)

検討ケースの主なパラメータの比較

検討ケース	断層モデルの設定条件							
	断層長さ (km)	地震規模 (※1)	等価 震源距離 (km)	傾斜角	断層面積 (km ²)	地震 モーメント (Nm)	アスペリティの 動的応力 降下量(MPa)	アスペリティの 短周期レベル (Nm/s ²)
基本ケース	192	M _j 8.1	40	60° (※2) 45° (※3)	2293.2	1.46 × 10 ²⁰	18.7	2.63 × 10 ¹⁹
短周期レベルの 不確かさ	192	M _j 8.1	40	60° (※2) 45° (※3)	2293.2	1.46 × 10 ²⁰	28.1	3.95 × 10 ¹⁹

※1: 地震モーメントより武村(1990)を用いて算定。

※2: F-12・F-14断層, 仙台湾北部の南傾斜の仮想震源断層。

※3: 南部セグメント断層～北上低地西縁断層帯。

主な断層パラメータの設定根拠

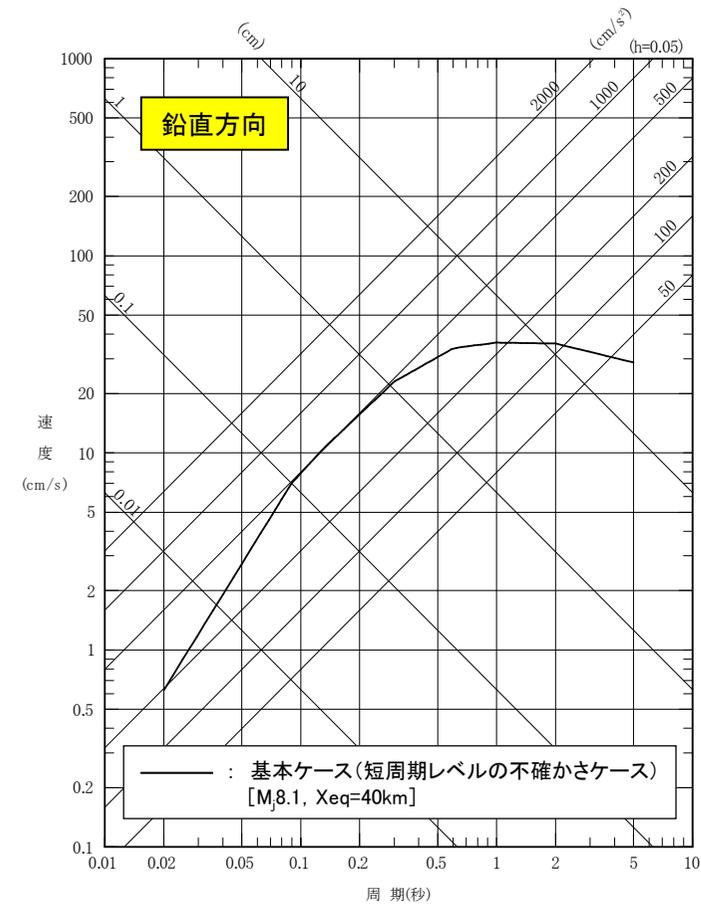
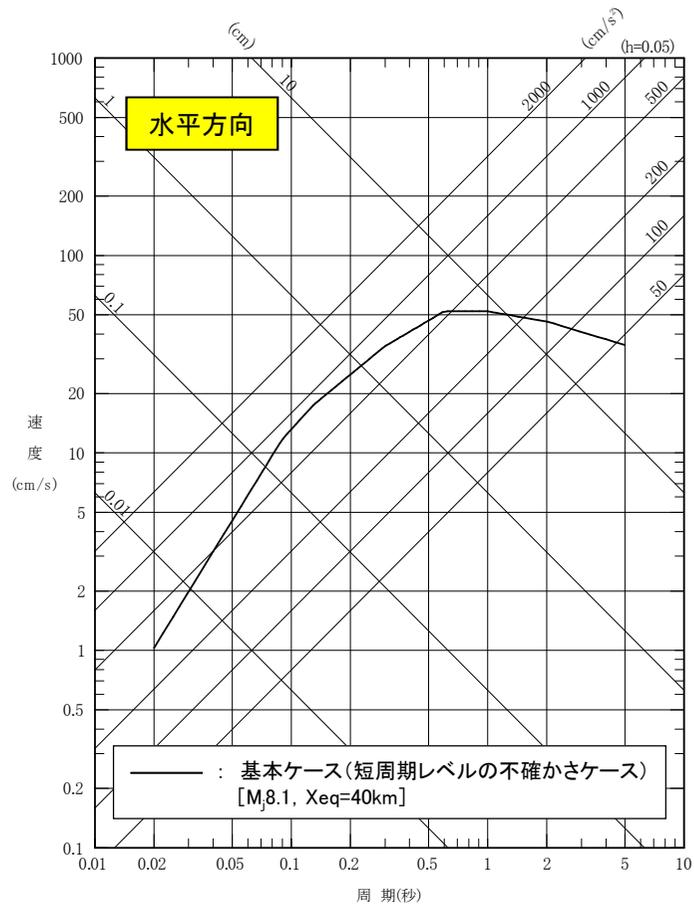
	パラメータの設定根拠
断層面積	断層長さ×断層幅 重複部分は除く。
断層長さ	地質評価結果による。
断層幅	断層傾斜角と地震発生層厚さより算定。地震発生層厚さは、北上山地の南部に位置する敷地と内陸地域(歪集中帯)の微小地震等の特徴を踏まえ設定。
断層傾斜角	地質評価結果等より設定。
断層の走向	地質評価結果による。

■地震動評価方法

- 応答スペクトルに基づく方法による地震動評価
Noda et al.(2002)の検証データの範囲外だが、参考として地震動評価を行う。内陸地殻内地震の観測記録が少ないことから、内陸補正係数は考慮しない。
- 断層モデルを用いた手法による地震動評価
 - ✓ 入倉ほか(1997)及び司ほか(2015)の経験的グリーン関数法により評価を行う。
 - ✓ 要素地震は、敷地の西側領域(石巻平野から仙台湾の断層群)付近で発生し、想定する断層と同様の震源メカニズム(逆断層)の地震である2003年7月26日16:56宮城県中部の地震(M5.5)を用いる。

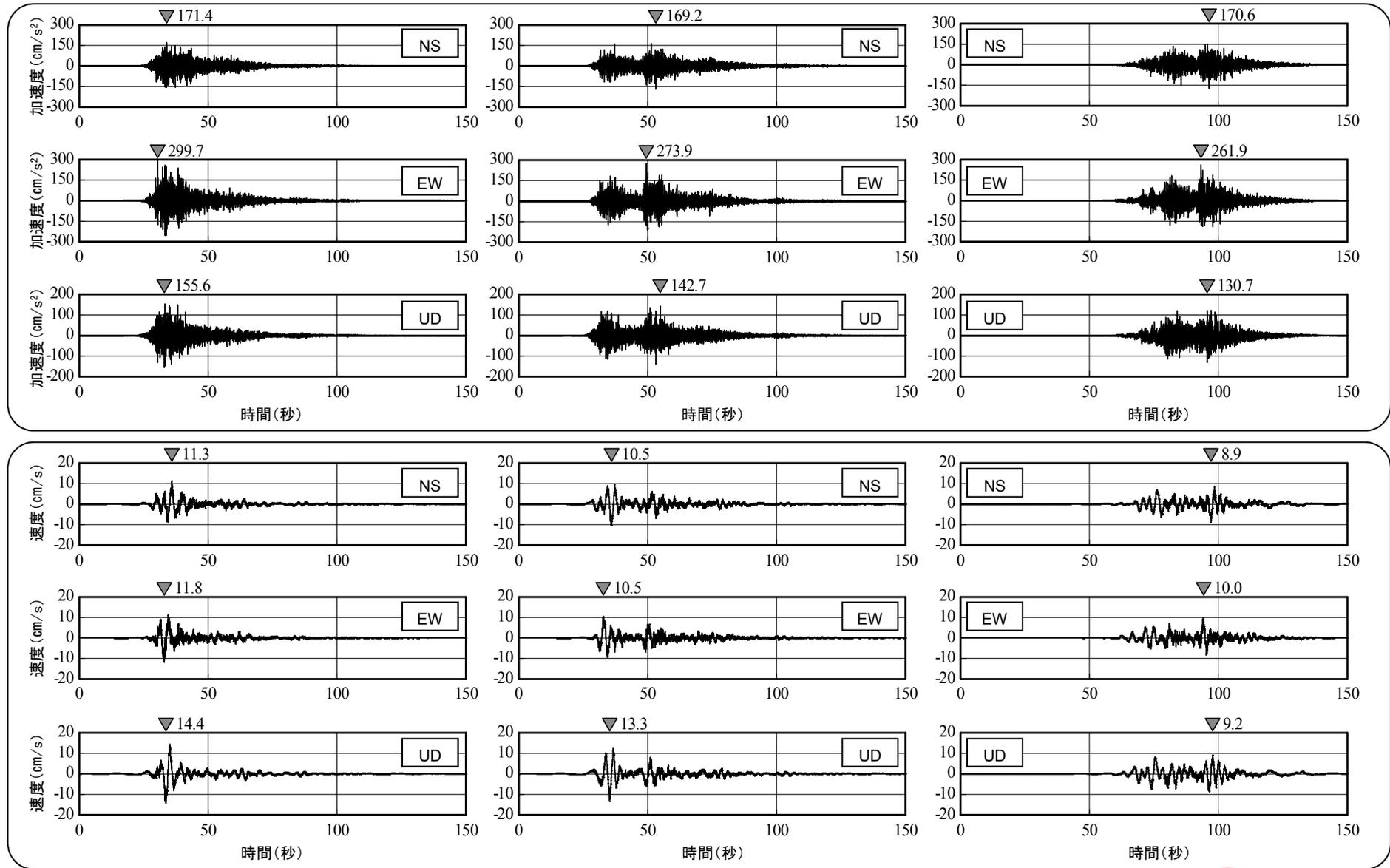
5.4 応答スペクトルに基づく方法による地震動評価

- 保守的な影響評価として、北上低地西縁断層帯～仙台湾の断層群による地震の応答スペクトルに基づく方法〔Noda et al.(2002)〕による地震動評価結果を示す。



5.5 基本ケースの地震動評価(1) 経験的グリーン関数法

第316回審査会合(H28.1.8)
資料1 p.87, 88 一部修正



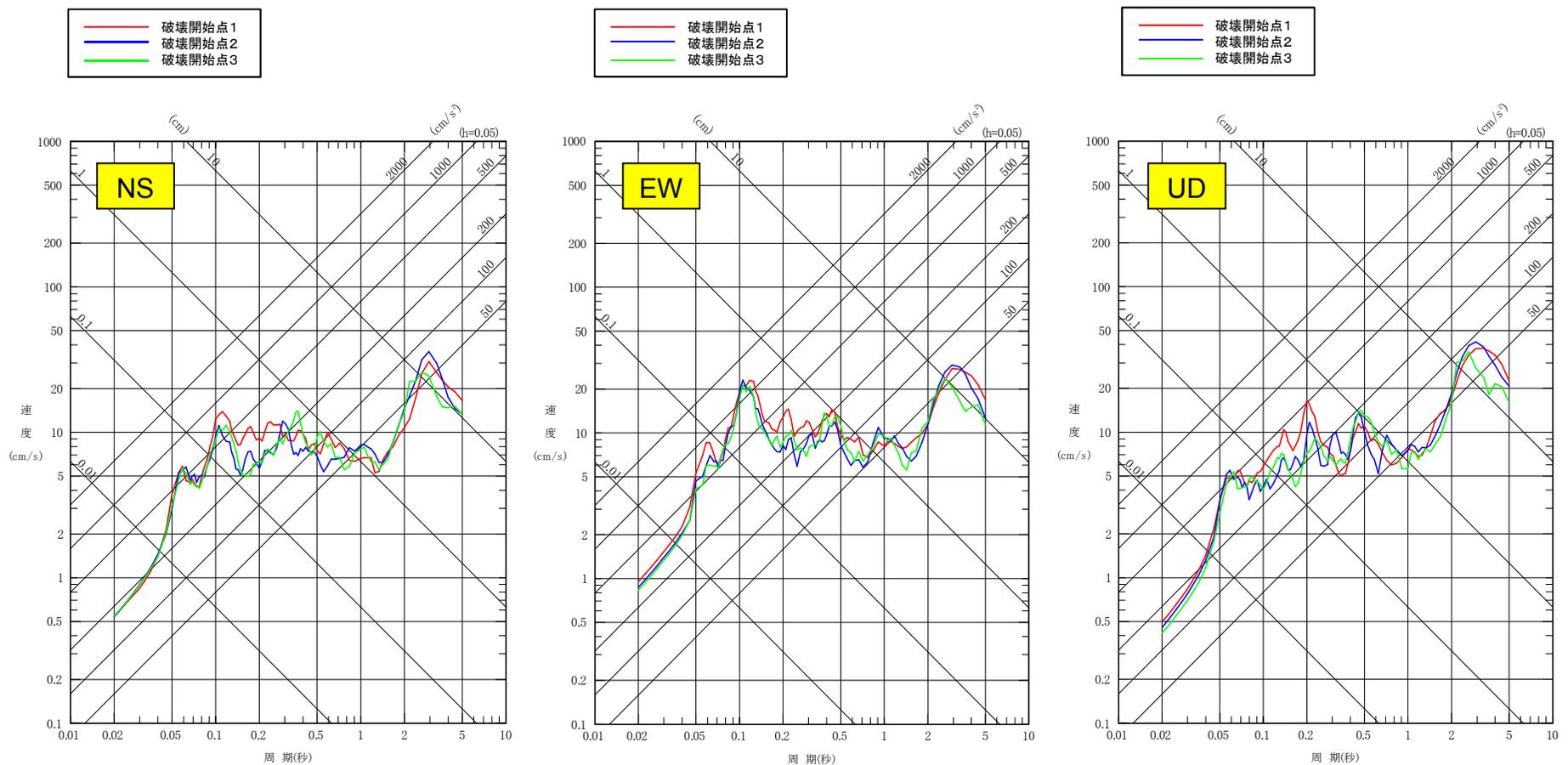
破壊開始点1

破壊開始点2

破壊開始点3 

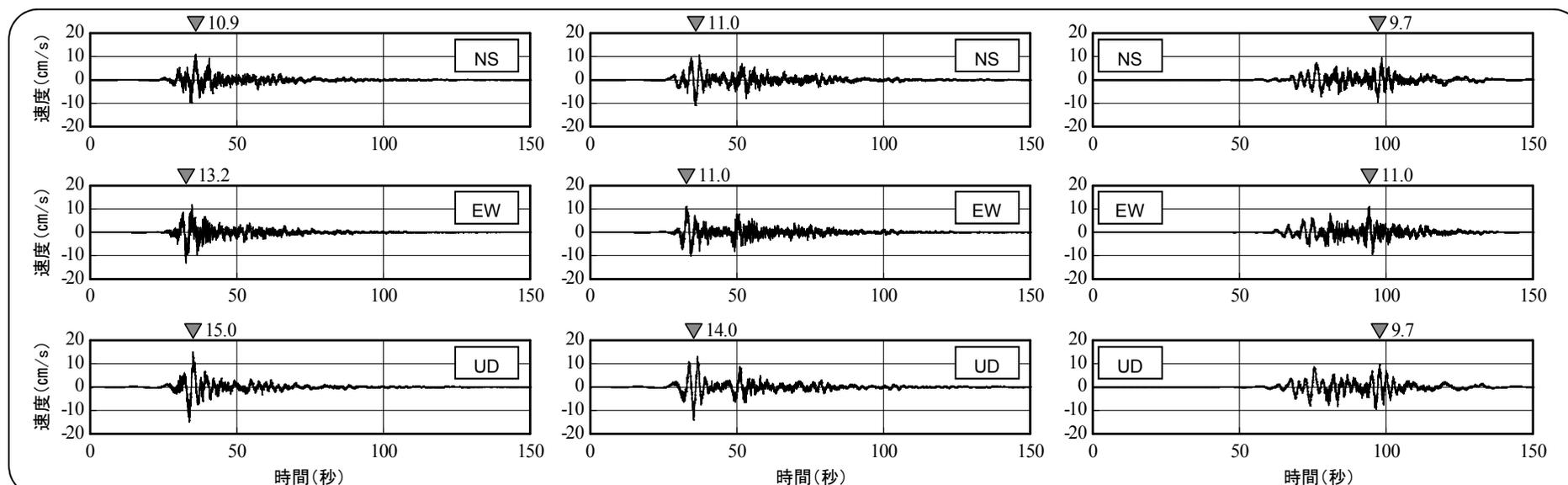
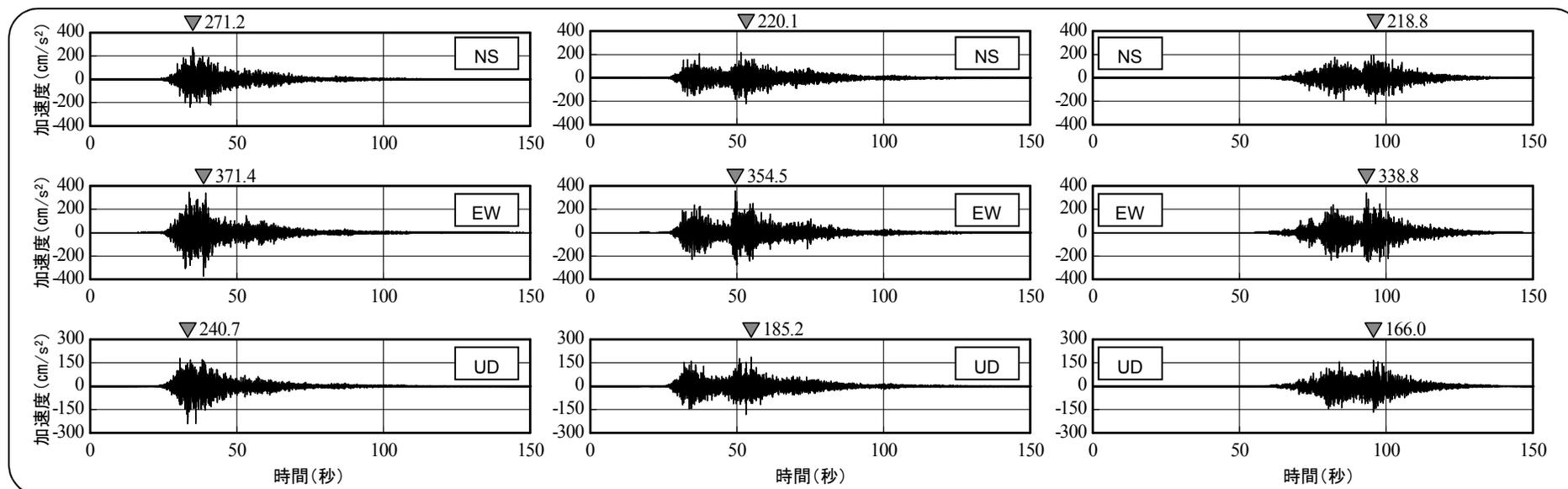
5.5 基本ケースの地震動評価(2) 経験的グリーン関数法

- 保守的な影響評価として、北上低地西縁断層帯～仙台湾の断層群による地震のうち、基本ケースの地震動評価を示す。
- 評価手法は経験的グリーン関数法による。



5.6 短周期レベルの不確かさケースの地震動評価(1)

経験的グリーン関数法

第316回審査会合(H28.1.8)
資料1 p.90, 91 一部修正

破壊開始点1

破壊開始点2

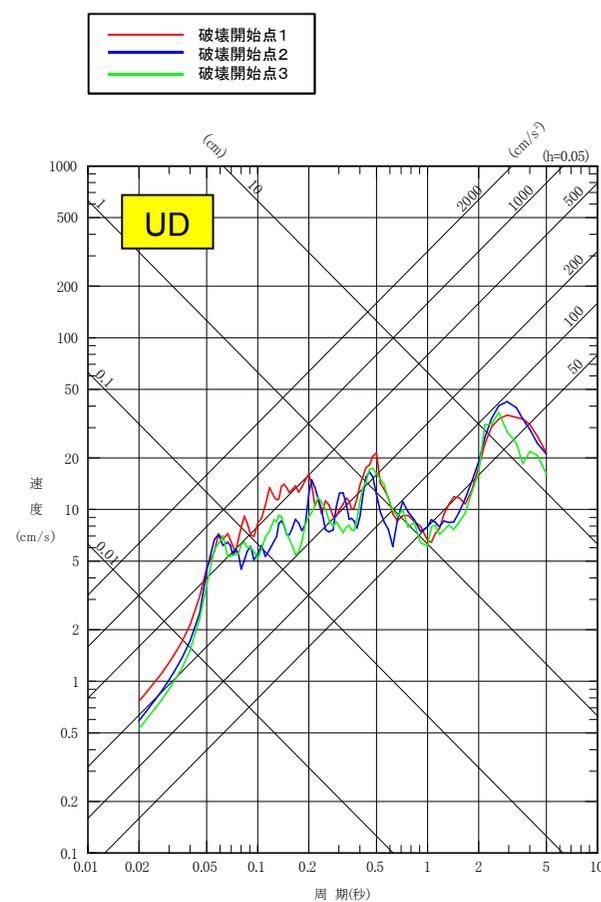
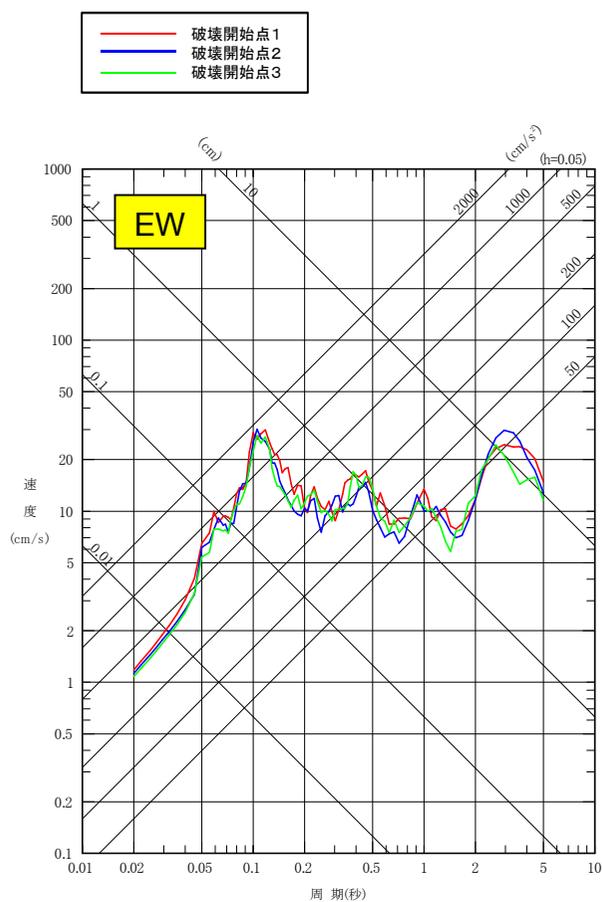
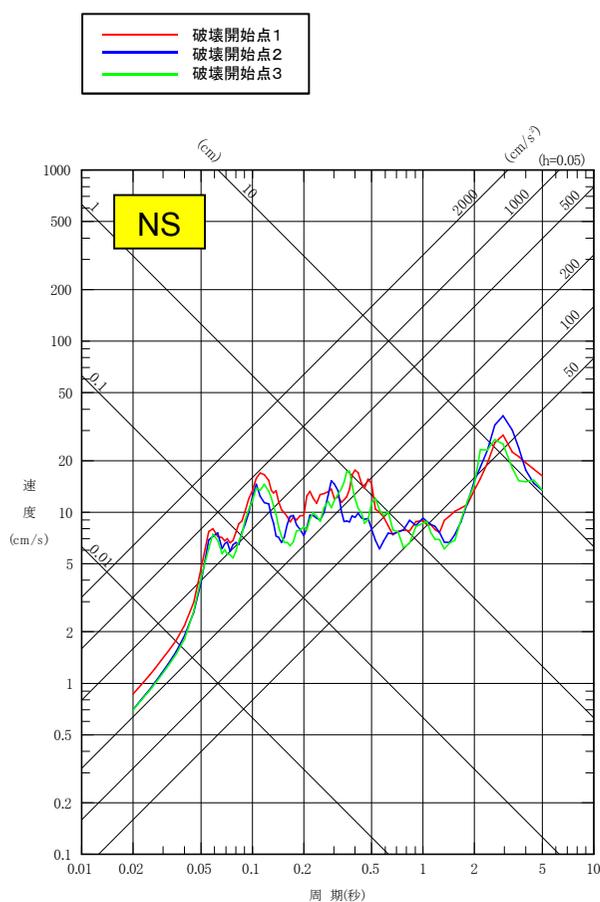
破壊開始点3

5.6 短周期レベルの不確かさケースの地震動評価(2)

経験的グリーン関数法

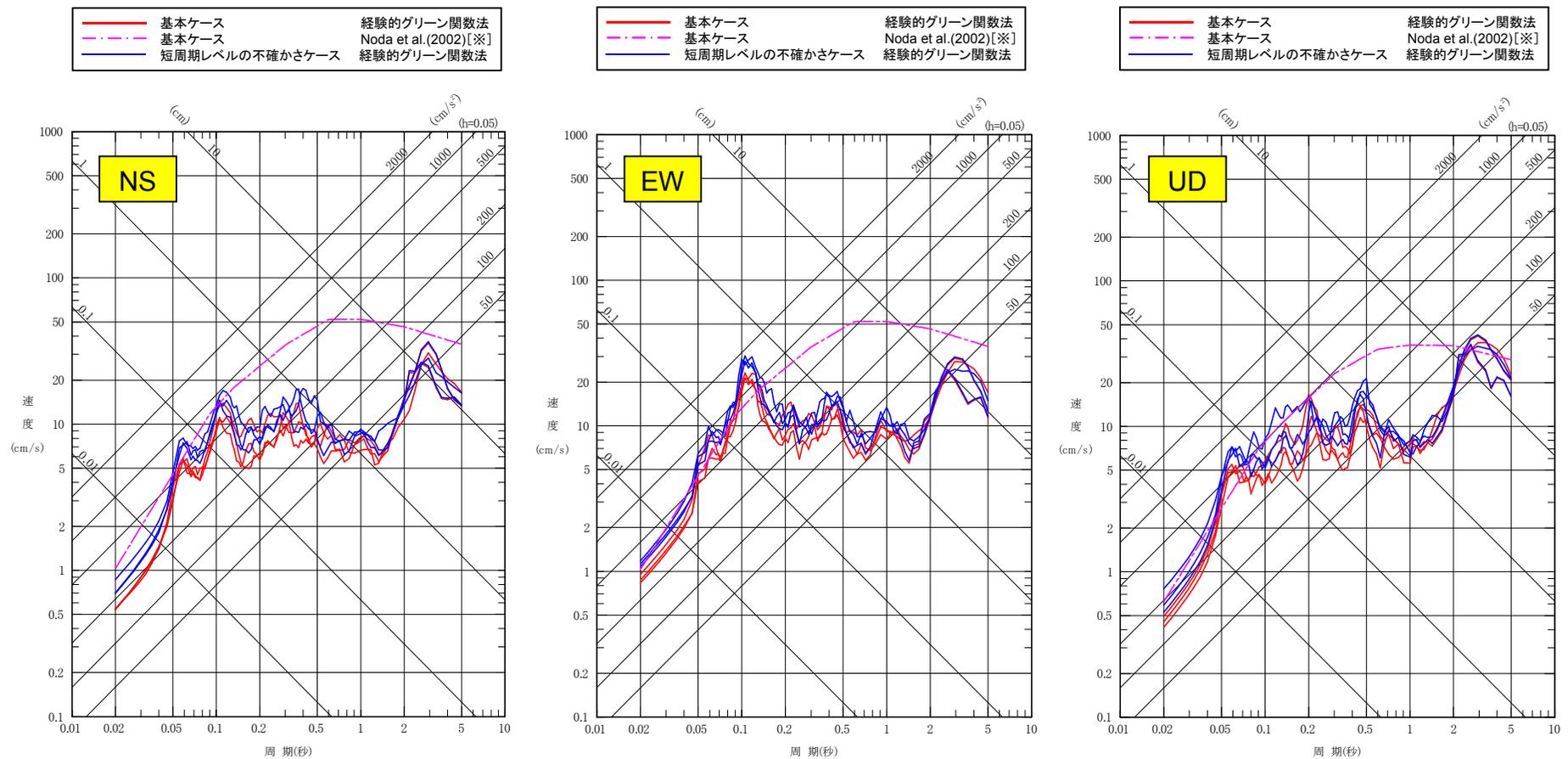
第316回審査会合 (H28.1.8)
資料1 p.92 一部修正

- 保守的な影響評価として、北上低地西縁断層帯～仙台湾の断層群による地震のうち、短周期レベルの不確かさケースの地震動評価を示す。
- 評価手法は経験的グリーン関数法による。



5.7 北上低地西縁断層帯から仙台湾の断層群による地震の地震動評価

- 保守的な影響評価として、北上低地西縁断層帯～仙台湾の断層群による地震の応答スペクトルに基づく方法及び断層モデルを用いた手法(経験的グリーン関数法)による地震動評価を示す。



※ : M_j8.1[武村(1990)], X_{eq}=40.0km(短周期レベルの不確かさケース)

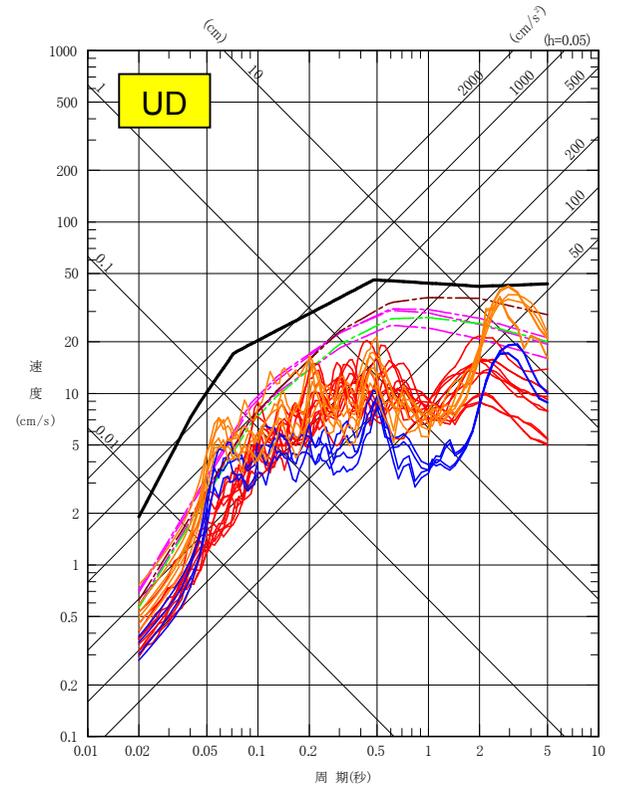
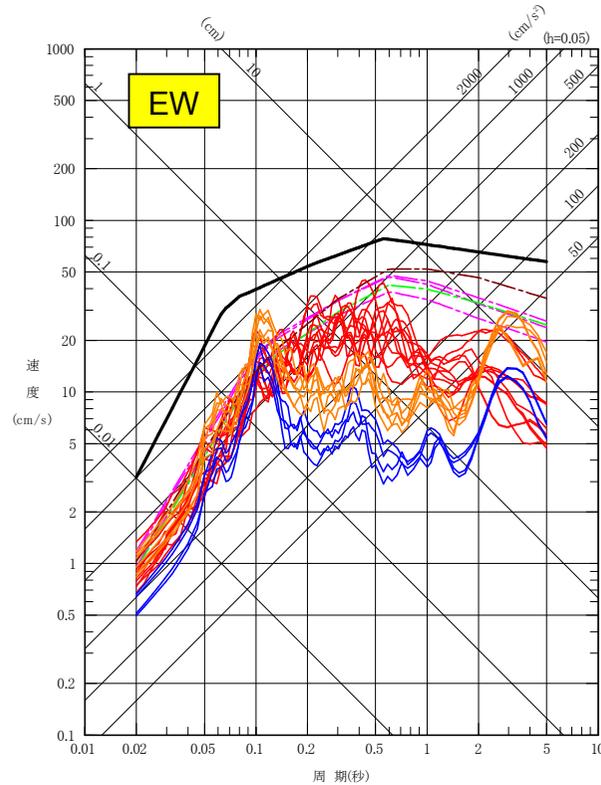
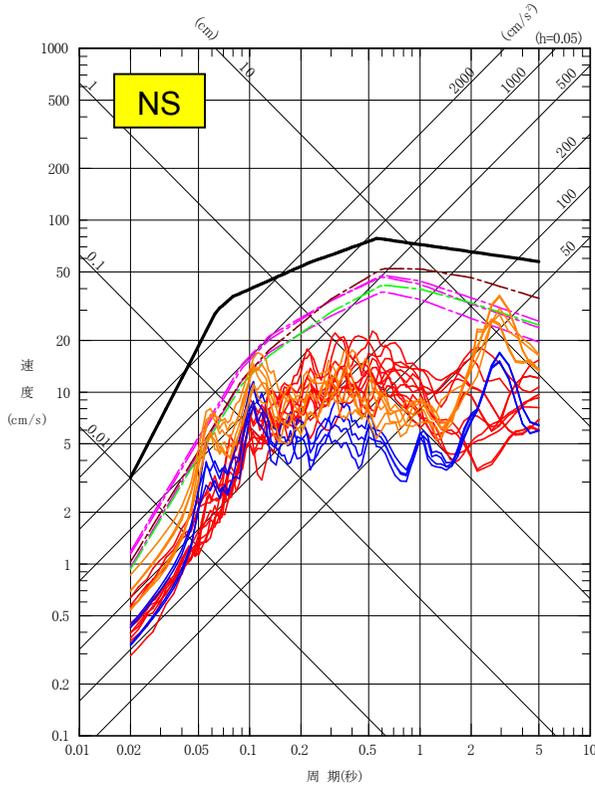
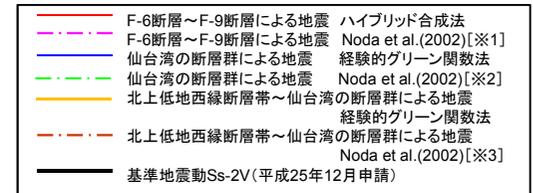
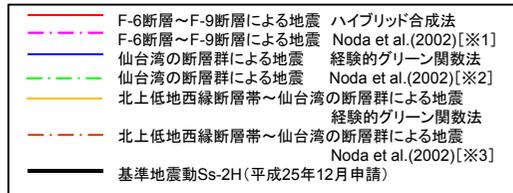
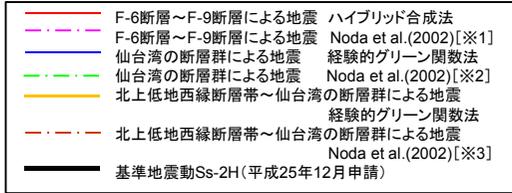
【参考資料】

- A. 基準地震動S_s-2(平成25年12月申請)との比較
- B. F-6断層～F-9断層による地震の統計的グリーン関数法による地震動評価
- C. F-6断層～F-9断層による地震の水平2成分の違いについて
- D. 仙台湾の断層群による地震の評価に用いた要素地震の長周期卓越について
- E. 仙台湾の断層群による地震の統計的グリーン関数法による地震動評価(経験的グリーン関数法との比較)
- F. 理論的手法における浅部地盤のQ値の影響について

A. 基準地震動Ss-2(平成25年12月申請)との比較

A. 1 基準地震動との比較(1)

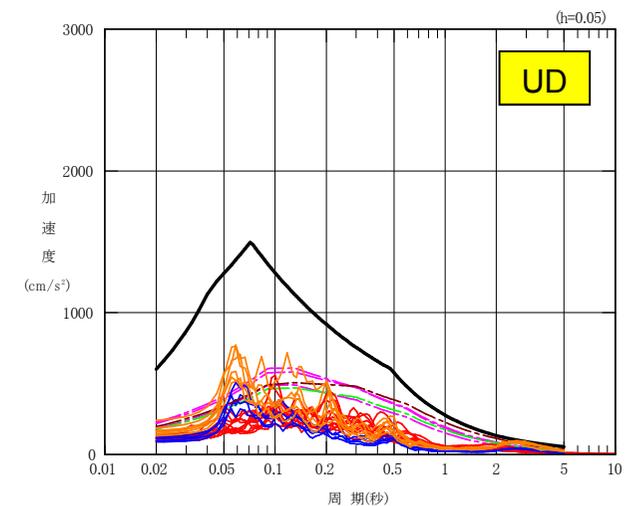
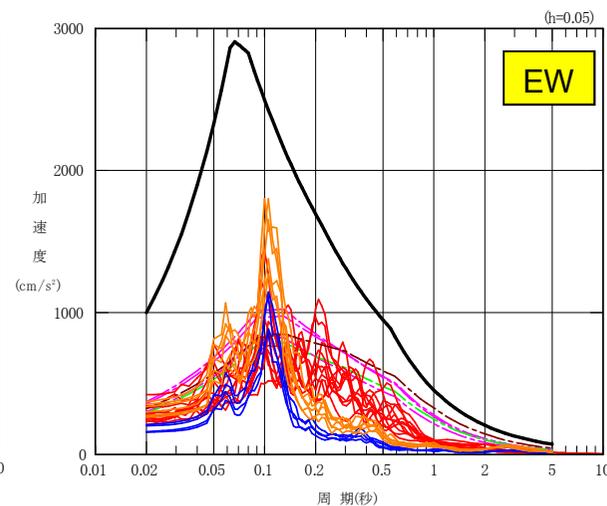
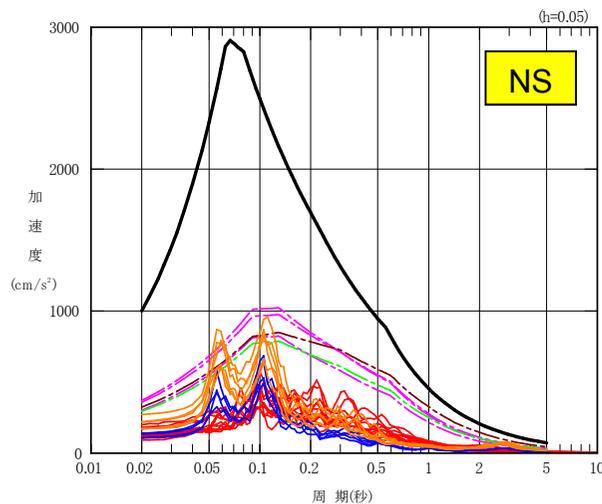
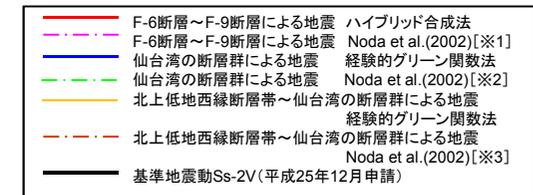
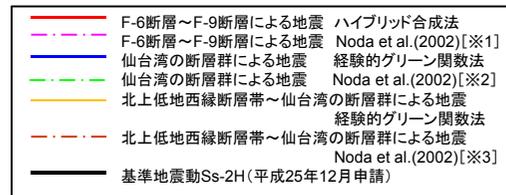
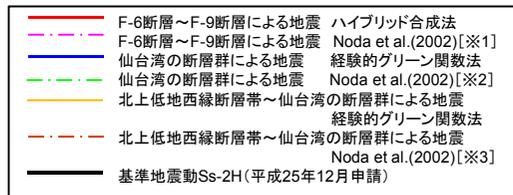
- 検討用地震の地震動評価及び保守的な影響評価として実施した北上低地西縁断層帯～仙台湾の断層群による地震の地震動評価と基準地震動Ss-2(平成25年12月申請)との比較を示す。
- いずれも基準地震動Ss-2を下回る。



※1 : 基本ケース[M_j7.2[武村(1990)], X_{eq}=19.7km], 断層傾斜角の不確かさケース[M_j7.4[武村(1990)], X_{eq}=20.2km], アスペリティの不確かさケース[M_j7.2[武村(1990)], X_{eq}=16.5km]
 ※2 : 基本ケース[M_j7.6[松田(1975)], X_{eq}=28.0km]
 ※3 : 基本ケース[M_j8.1[武村(1990)], X_{eq}=40.0km]

A. 1 基準地震動との比較(2)

- 検討用地震の地震動評価及び保守的な影響評価として実施した北上低地西縁断層帯～仙台湾の断層群による地震の地震動評価と基準地震動Ss-2(平成25年12月申請)との比較を示す。
- いずれも基準地震動Ss-2を下回る。



※1 : 基本ケース[M_j7.2[武村(1990)], X_{eq}=19.7km], 断層傾斜角の不確かさケース[M_j7.4[武村(1990)], X_{eq}=20.2km], アスペリティの不確かさケース[M_j7.2[武村(1990)], X_{eq}=16.5km]

※2 : 基本ケース[M_j7.6[松田(1975)], X_{eq}=28.0km]

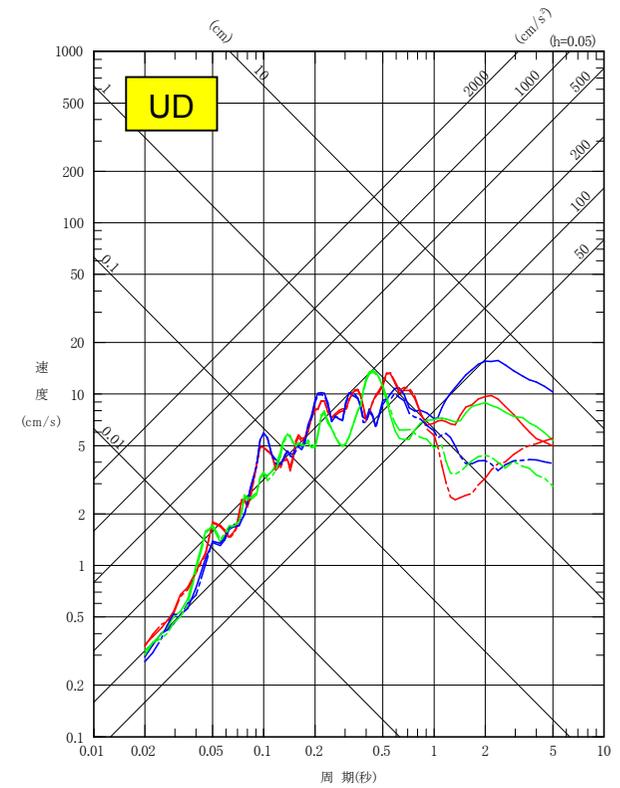
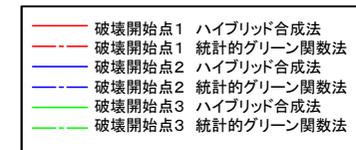
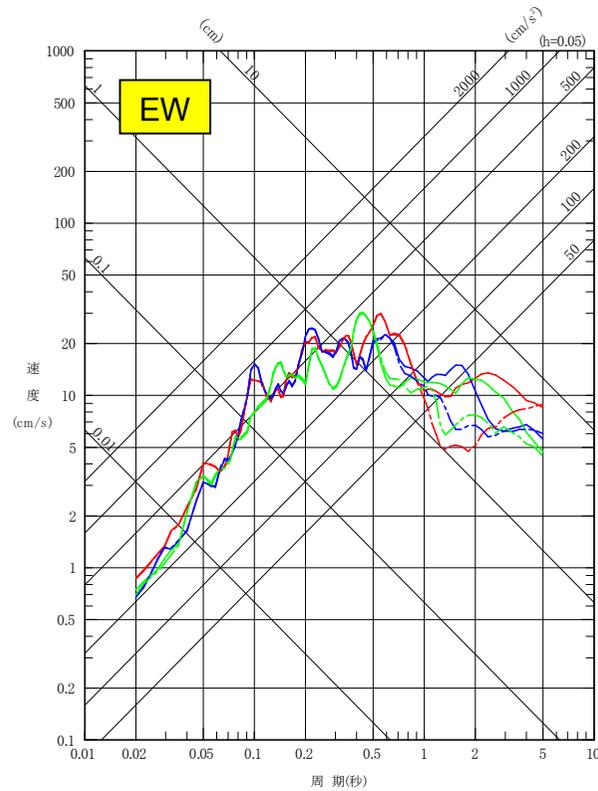
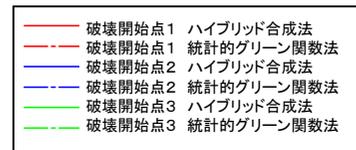
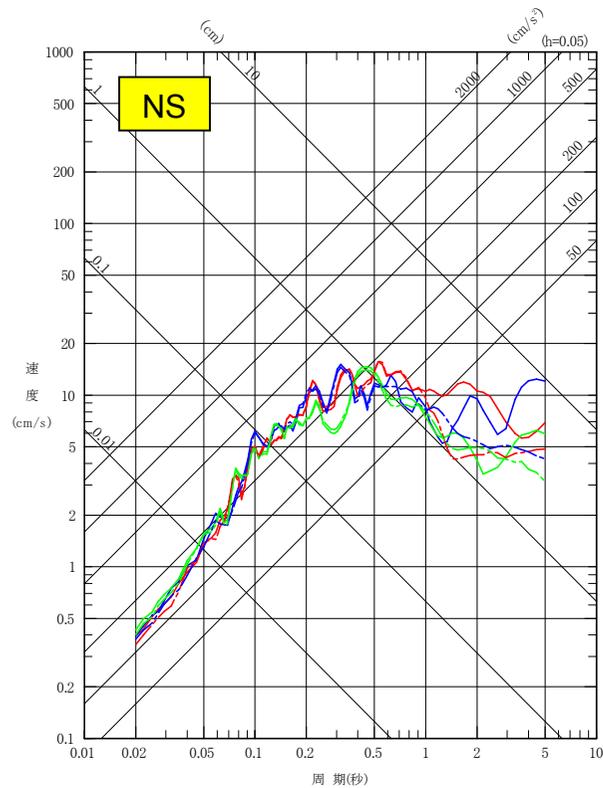
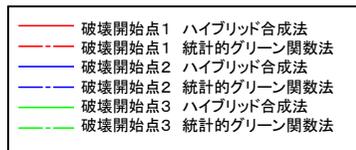
※3 : 基本ケース[M_j8.1[武村(1990)], X_{eq}=40.0km]

B. F-6断層～F-9断層による地震の 統計的グリーン関数による地震動評価

No.	コメント時期	コメント内容	該当箇所
S108	1月8日 第316回審査会合	F-6断層～F-9断層による地震の地震動評価について、参考にハイブリッド前の統計的グリーン関数法のみでの結果も提示すること。	参考資料B(p.96～100)

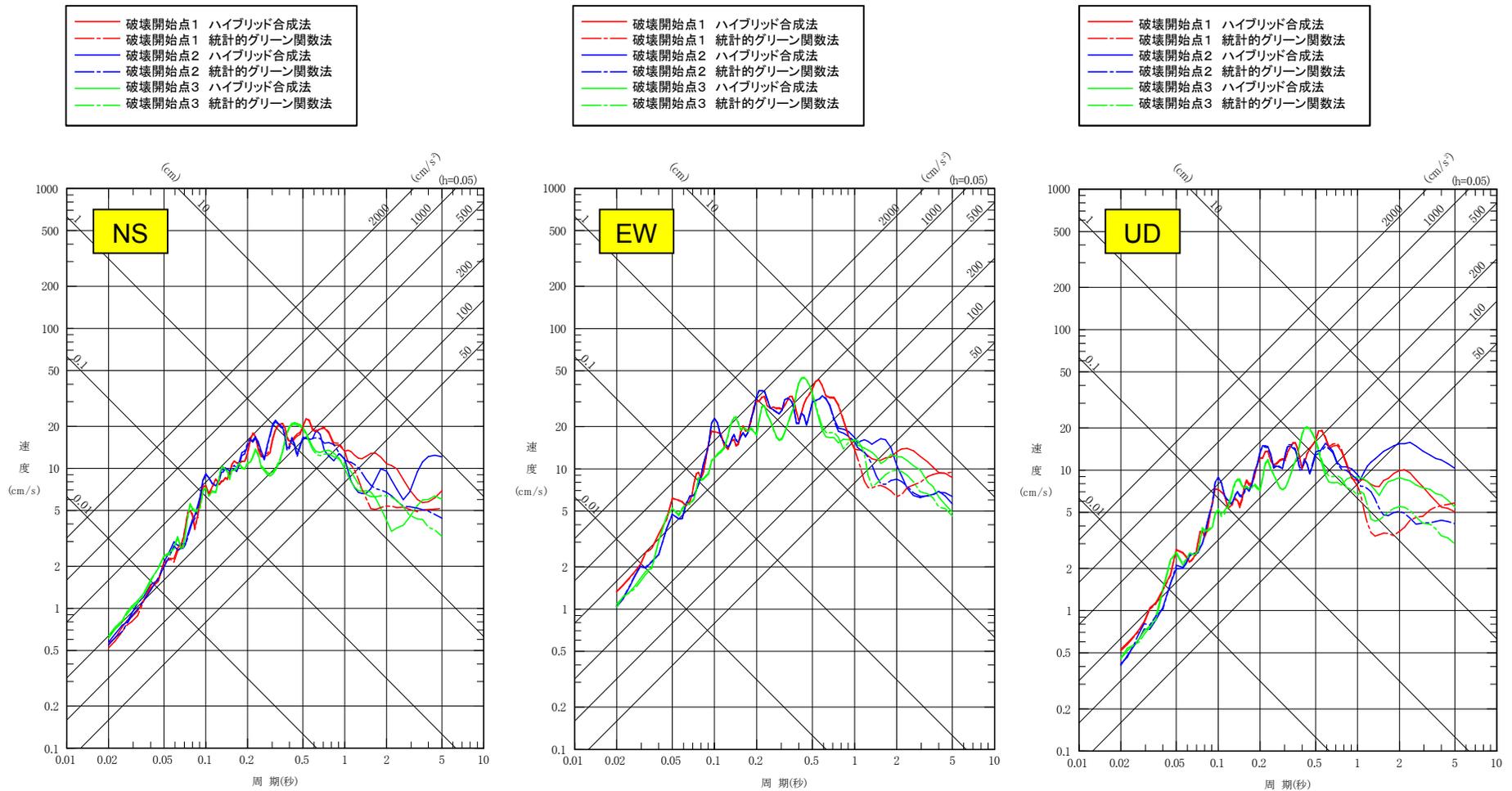
B. 1 基本ケースの地震動評価

- 統計的グリーン関数法及びハイブリッド合成法(接続周期帯1.0~2.0秒)の応答スペクトルを示す。
- 長周期側では, ハイブリッド合成法は統計的グリーン関数法に比べて保守的な評価となる。



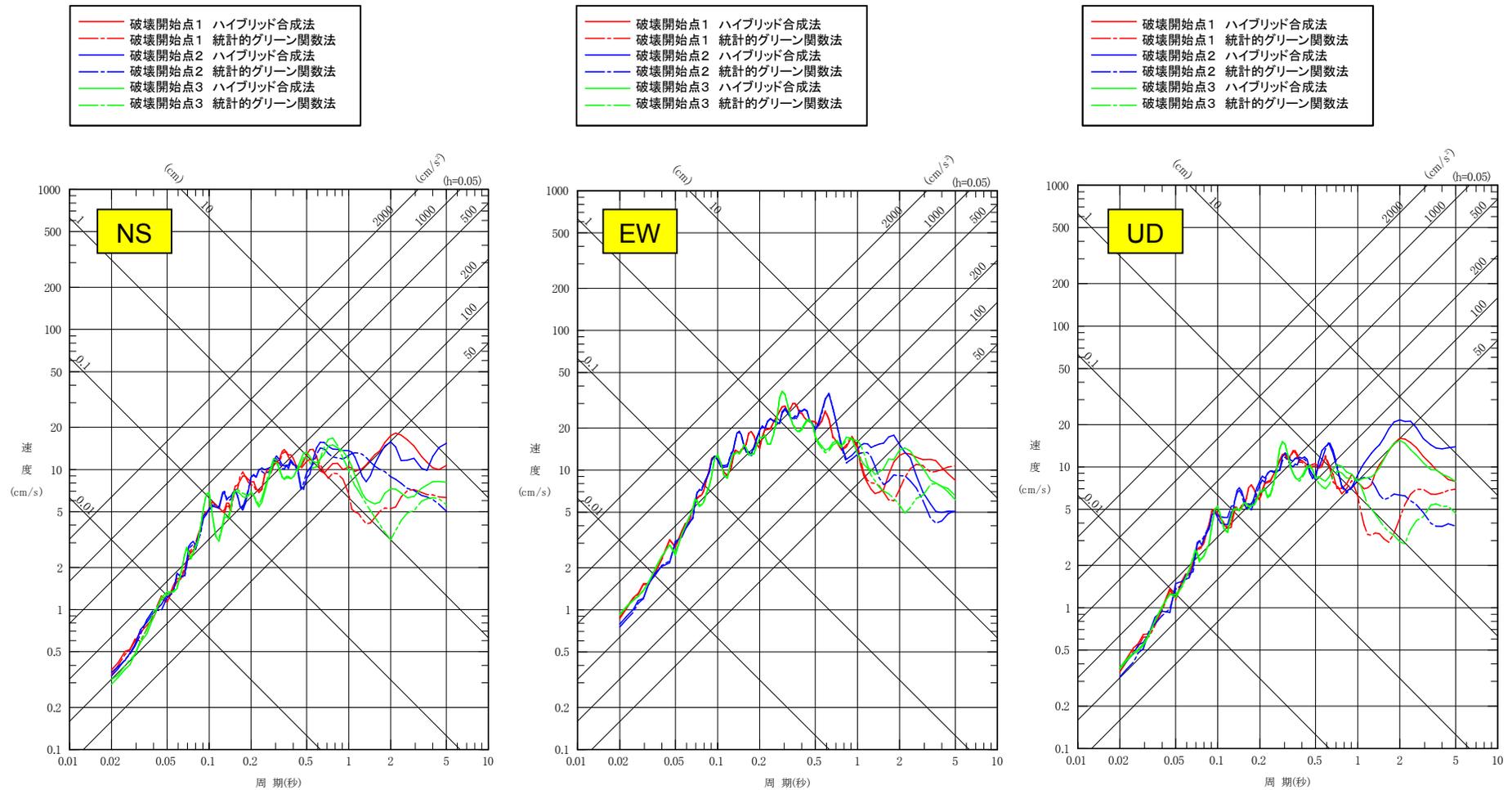
B. 2 短周期レベルの不確かさケースの地震動評価

- 統計的グリーン関数法及びハイブリッド合成法(接続周期帯1.0~2.0秒)の応答スペクトルを示す。
- 長周期側では, ハイブリッド合成法は統計的グリーン関数法に比べて保守的な評価となる。



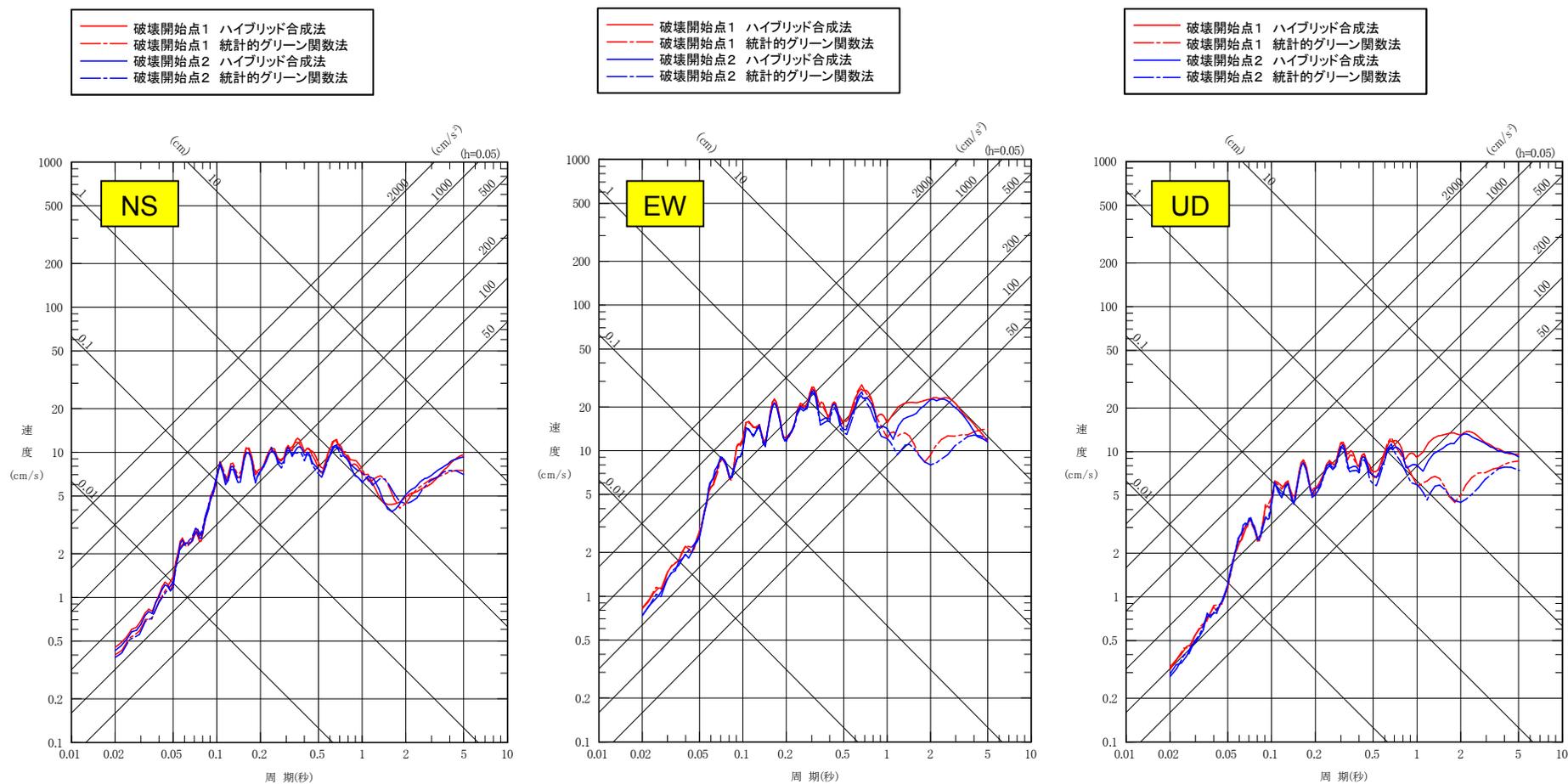
B. 3 断層傾斜角の不確かさケースの地震動評価

- 統計的グリーン関数法及びハイブリッド合成法(接続周期帯1.0~2.0秒)の応答スペクトルを示す。
- 長周期側では, ハイブリッド合成法は統計的グリーン関数法に比べて保守的な評価となる。



B. 4 アスぺリティの不確かさケースの地震動評価

- 統計的グリーン関数法及びハイブリッド合成法(接続周期帯1.0~2.0秒)の応答スペクトルを示す。
- 長周期側では, ハイブリッド合成法は統計的グリーン関数法に比べて保守的な評価となる。

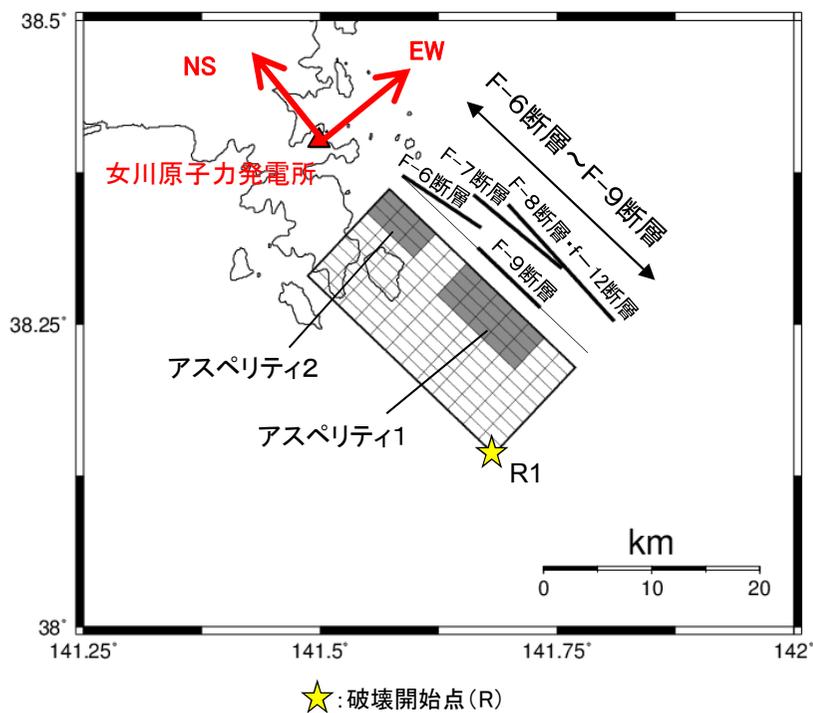


C. F-6断層～F-9断層による地震の 水平2成分の違いについて

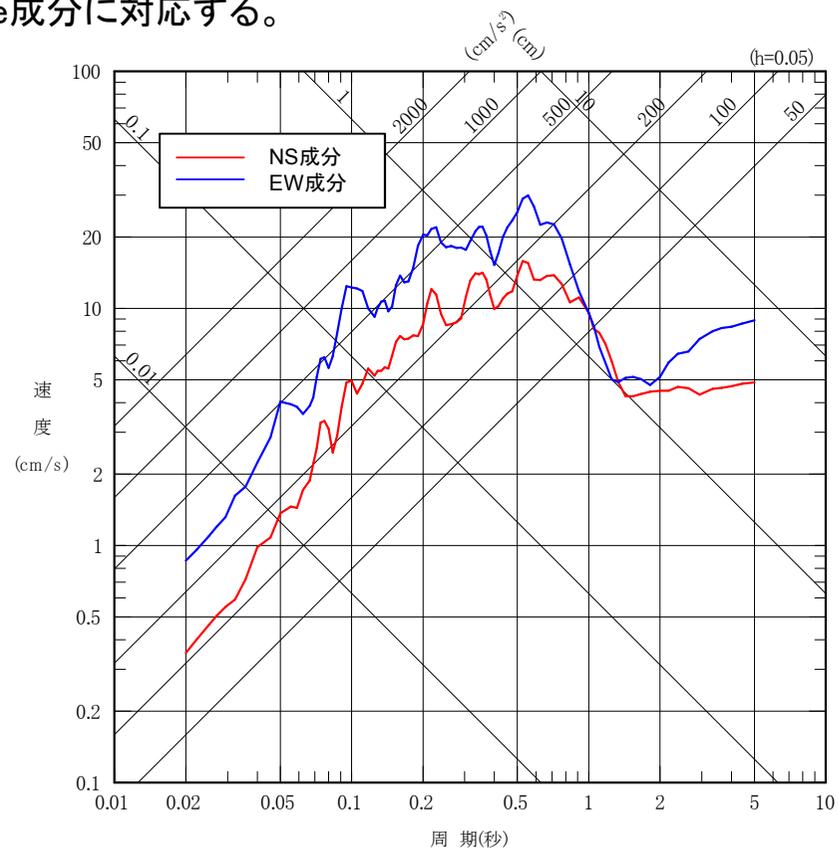
No.	コメント時期	コメント内容	該当箇所
S109	1月8日 第316回審査会合	F-6断層～F-9断層による地震の地震動評価において、水平2成分の地震動の大きさが異なる点について、要因を整理すること。	参考資料C(p.101～106) ➤ 水平2成分の放射特性の傾向について分析を実施。

C. 1 統計的グリーン関数の応答スペクトルにおける水平方向2成分の違い

- F-6断層～F-9断層による地震の水平2成分の違いについて検討を行う。
- いずれの検討ケースにおいても水平2成分に同様の違いが見られることから、代表して基本ケース(破壊開始点1)について検討を行う。
- 敷地のNS成分及びEW成分は、ほぼ断層走向方向及び断層直交方向に対応する。また、アスペリティからの地震動に着目すると、それぞれRadial成分及びTransverse成分に対応する。



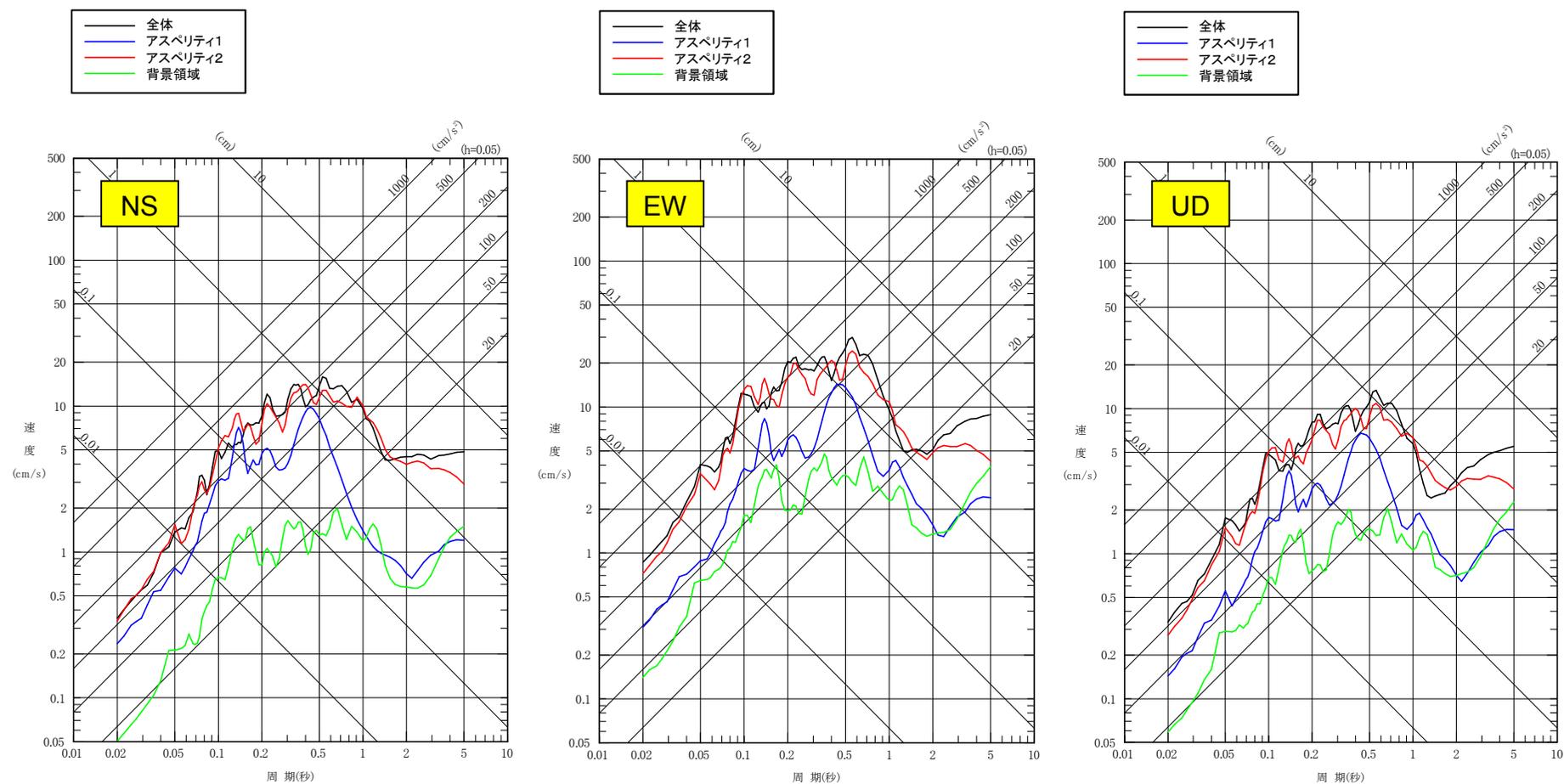
F-6断層～F-9断層の断層モデル平面図
(基本ケース)



F-6断層～F-9断層による地震の応答スペクトル
(基本ケース, 破壊開始点1, 統計的グリーン関数法)

C. 2 支配的な部位の検討

- F-6断層～F-9断層による地震(基本ケース, 破壊開始点1)について, 各アスペリティ及び背景領域の敷地の地震動に対する寄与について検討を行った。
- いずれの成分についても, 敷地に近いアスペリティ2の影響が支配的であることを確認した。



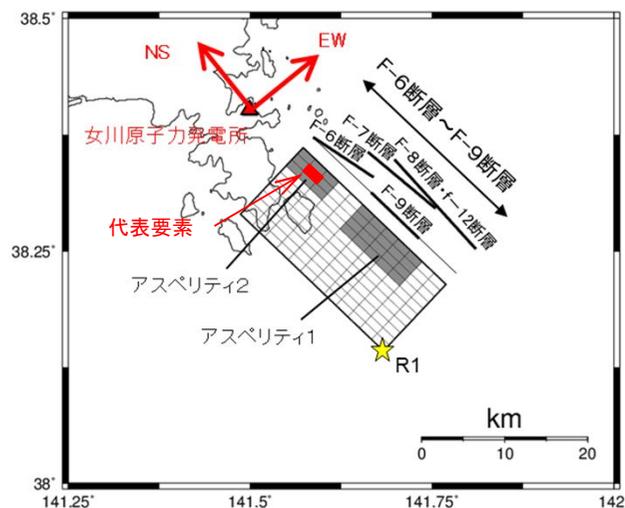
C. 3 フーリエスペクトルによる検討

- 敷地への影響が大きいアスペリティ2の中央の1要素について、フーリエスペクトルに基づく検討を行った。
- 0.5Hz以下では、EW成分がNS成分を上回り、理論放射特性の違いを反映している。
- 5.0Hz以上では、水平2成分は同程度のレベルとなっており、一様な放射特性を反映している。

【統計的グリーン関数法における放射特性】

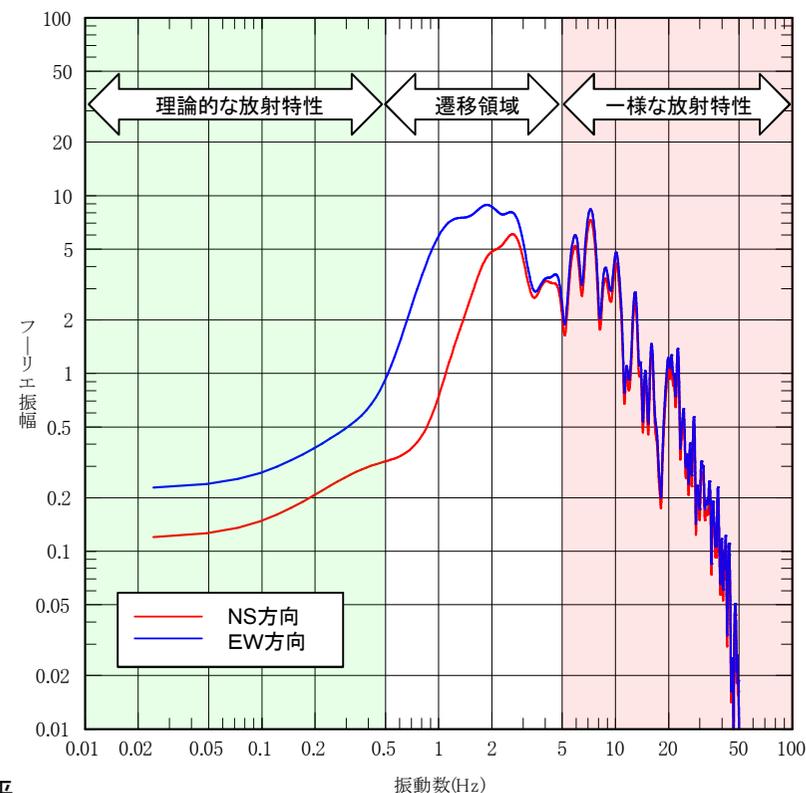
- 釜江ほか(1990)を参考に以下とした。

0.5Hz以下	理論的な放射特性
0.5~5.0Hz	遷移領域
5.0Hz以上	方位によらず一様な放射特性



★: 破壊開始点(R)

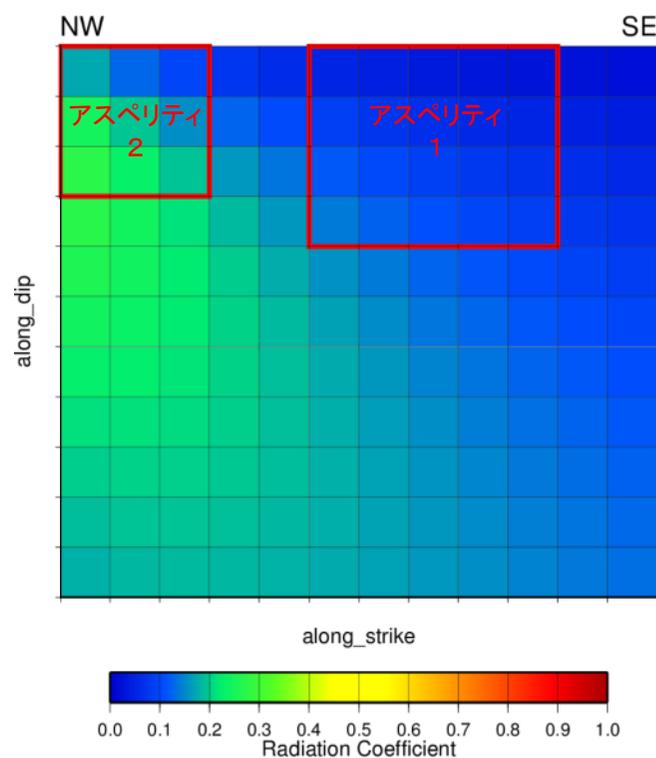
F-6断層~F-9断層の断層モデル平面図とアスペリティ2の代表要素
(基本ケース)



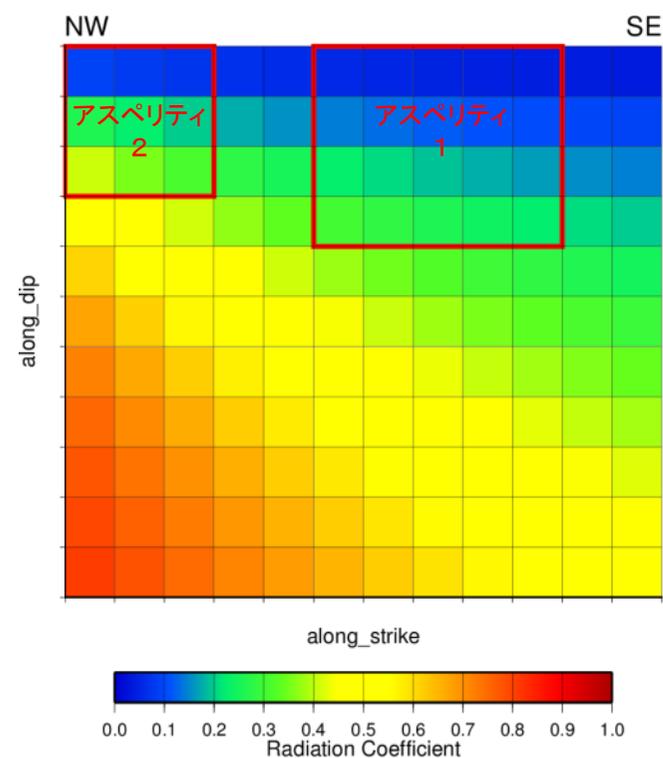
F-6断層~F-9断層による地震のフーリエスペクトル
基本ケース, アスペリティ2の代表要素
統計的グリーン関数法

C. 4 理論的な放射特性

- 長周期における水平2成分の違いについて、理論放射特性に基づく検討を行った。
- 断層各部位のSV波及びSH波の理論放射特性から、NS成分及びEW成分に分解した理論放射特性を求めた。
- 理論放射特性は、NS成分と比較してEW成分が卓越する。



NS成分の理論放射特性
(SV波+SH波, 絶対値)



EW成分の理論放射特性
(SV波+SH波, 絶対値)

C. 5 水平2成分の違いのまとめ

- 要素地震波の長周期側では，水平2成分のフーリエスペクトルの大きさに違いがあり，EW成分がNS成分を上回る。これは理論放射特性の傾向を反映している。
- 一方，要素地震波の短周期側では，水平2成分のフーリエスペクトルは同程度のレベルとなっており，方位によらない一様な放射特性を反映している。
- 以上のことから，ハイブリッド合成法による地震動評価の水平2成分の違いは，以下の通り整理される。

長周期側 : 放射特性の反映によりEW成分がNS成分を上回る。

短周期側 : 方位によらない一様な放射特性を反映し，フーリエスペクトルではNS成分とEW成分は同程度の大きさであるが，応答スペクトルでは長周期側の影響によりEW成分がNS成分を上回る。

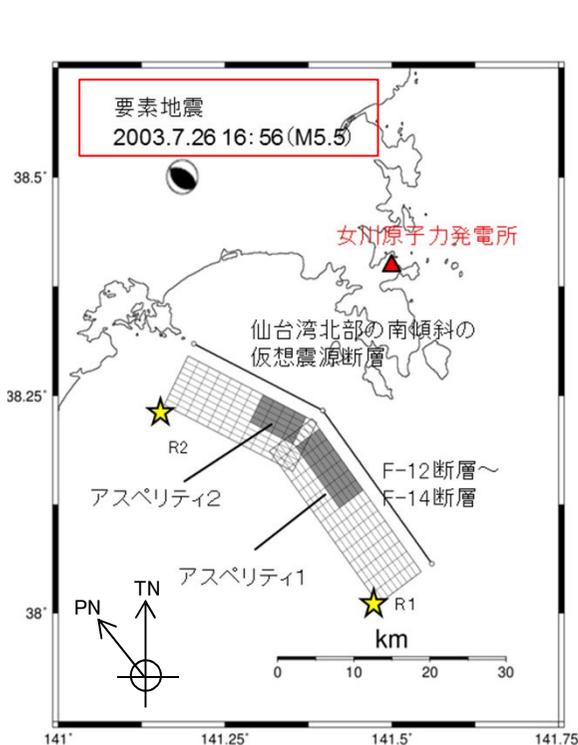
D. 仙台湾の断層群による地震の評価に用いた 要素地震の長周期卓越について

No.	コメント時期	コメント内容	該当箇所
S110	1月8日 第316回審査会合	仙台湾の断層群による地震の経験的グリーン関数法による評価に用いた要素地震について、観測記録を用いて長周期の卓越を説明すること。	参考資料D(p.107～110) ➤ 要素地震の時刻歴波形の分析を実施。

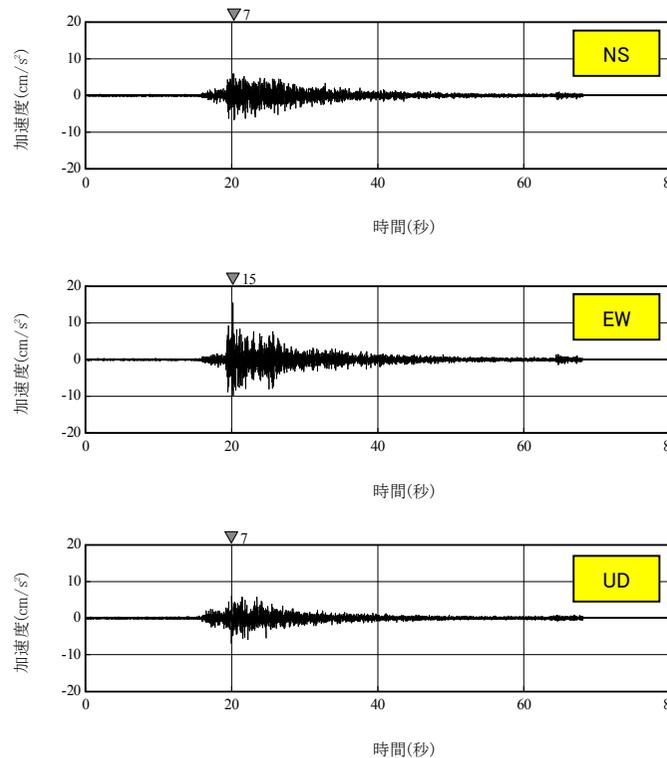
D. 1 経験的グリーン関数法に用いる要素地震

■ 経験的グリーン関数法に用いる要素地震〔2003年7月26日16:56(M5.5)〕

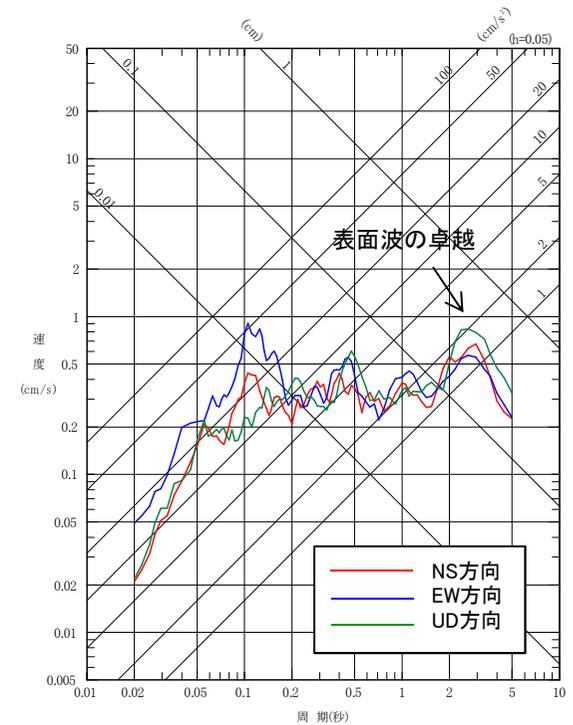
- 活断層の連動による規模の大きな地震では、表面波の卓越が考えられることから、敷地周辺で観測された内陸地域の地震のうち、メカニズムが想定する断層面に近く、さらに表面波の卓越が見られる地震を要素地震として選定した。



★: 破壊開始点(R)
要素地震の震央分布



加速度時刻歴波形



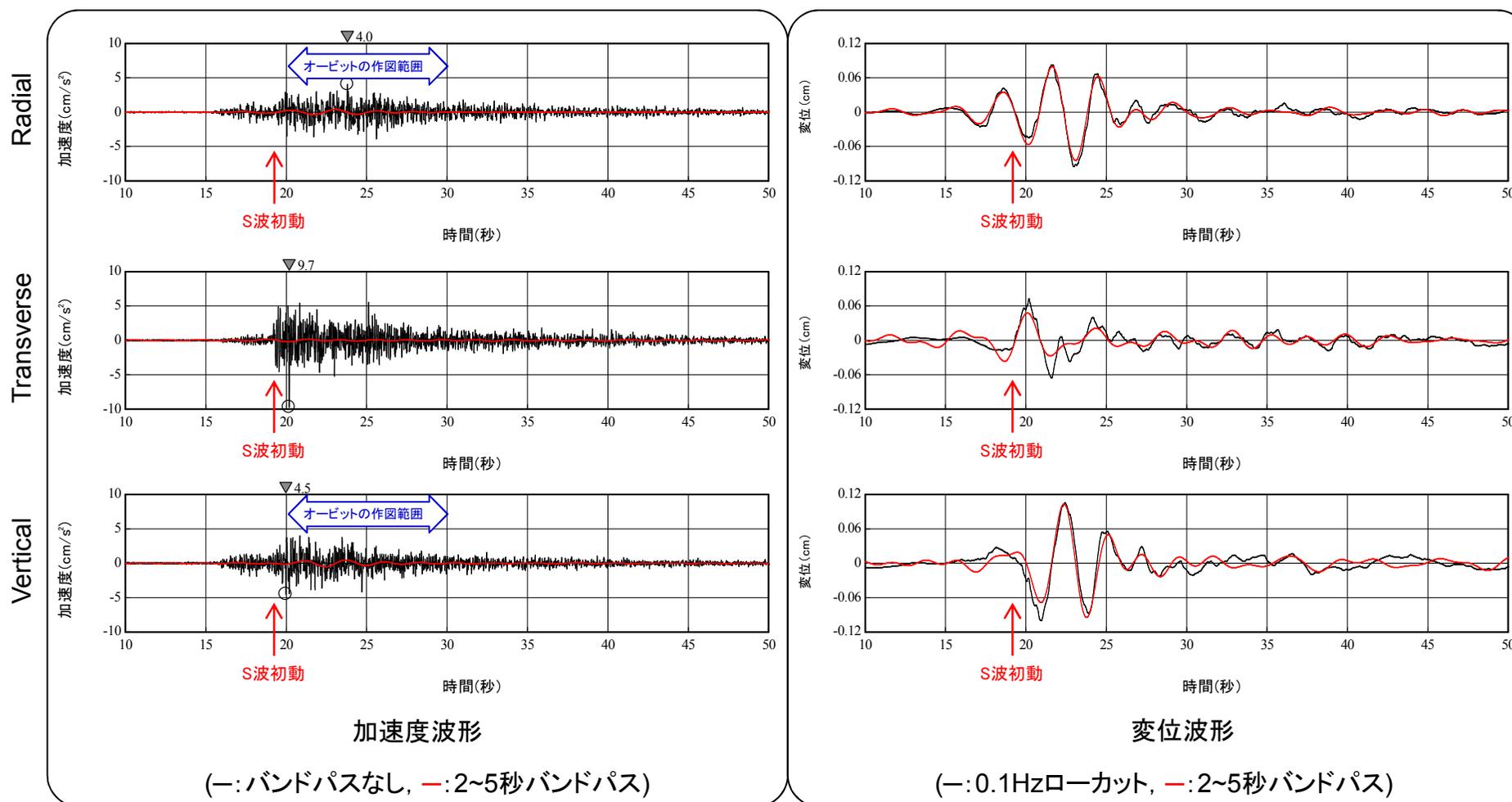
応答スペクトル

要素地震の観測記録〔自由地盤の解放基盤相当(O.P.-8.6m)でののはぎとり波〕

注: O.P.は女川原子力発電所工事用基準面(Onagawa peil)であり, O.P.±0m = T.P.(東京湾平均海面)-0.74m。

D. 2 要素地震波における長周期の卓越(1)

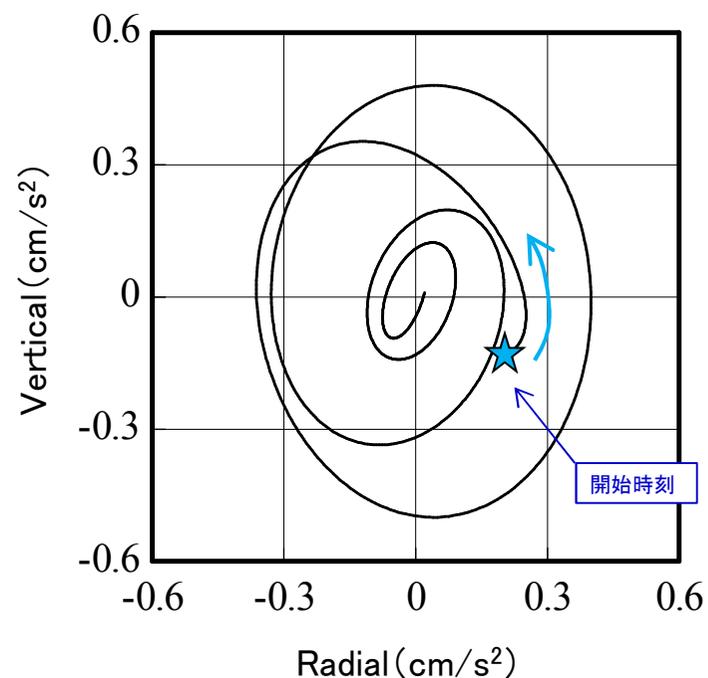
- 要素地震の応答スペクトルに見られる周期2~5秒の卓越に着目し、バンドパス処理を行った時刻歴波形を示す。
- 長周期成分の到達は直達波であるS波初動からずれており、その最大振幅もさらに遅れて到達しており、表面波の特徴を示している。



※要素地震の観測記録は、自由地盤の解放基盤相当(O.P.-8.6m)での地中波を用いた。

D. 2 要素地震波における長周期の卓越(2)

- 卓越する周期2～5秒の時刻歴波形について、加速度オービットの確認を行う。
- 検討に用いた観測記録は、O.P.-8.6m観測点(解放基盤相当)の地中波とした。
- Radial-Vertical平面では、オービットは反時計回りの楕円を描き、表面波の特徴を示している。



Radial-Vertical平面の加速度オービット
バンドパス: 2～5秒
O.P.-8.6m観測点 地中波
時刻: 20.00秒～29.99秒

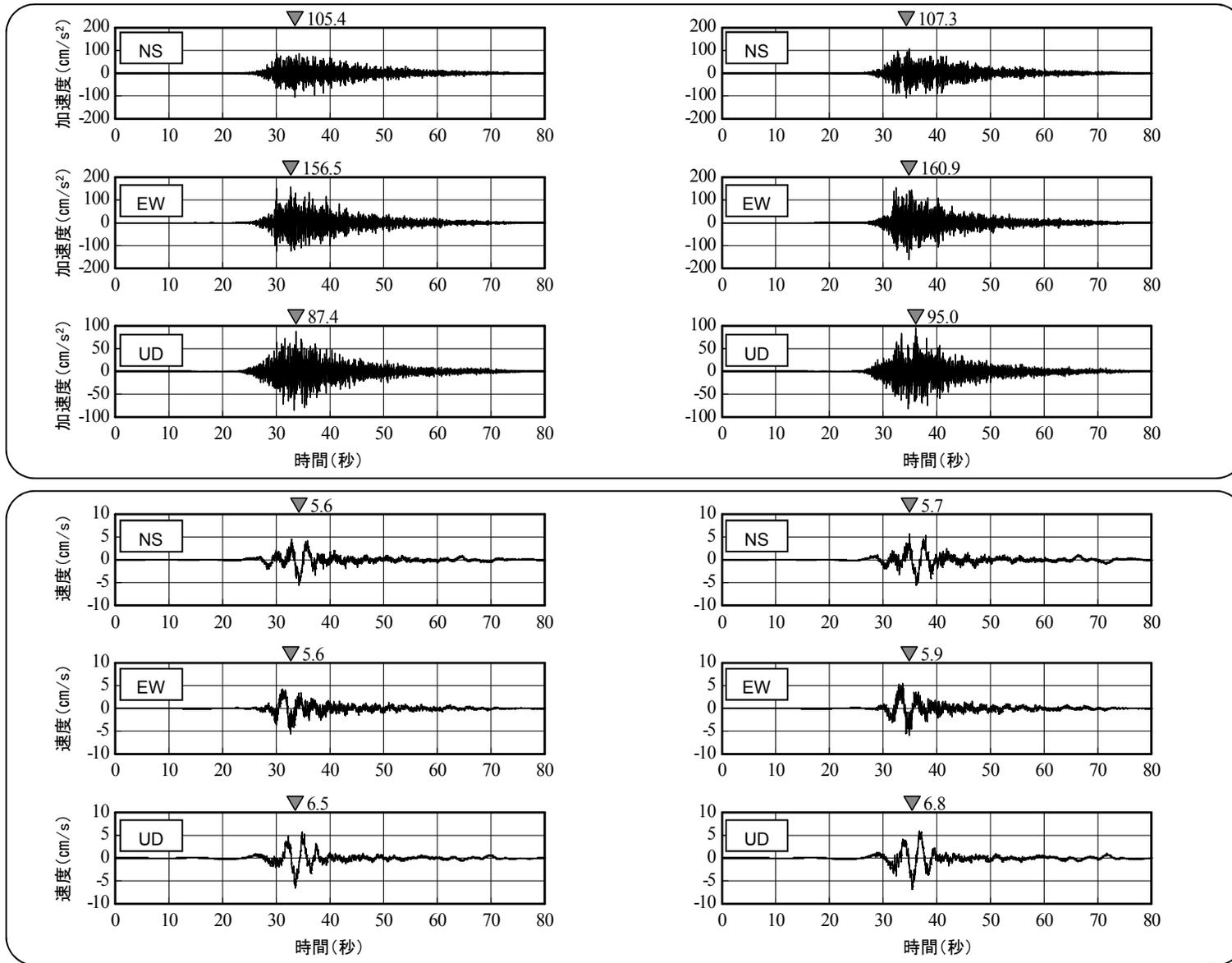
E. 仙台湾の断層群による地震の 統計的グリーン関数法による地震動評価 (経験的グリーン関数法との比較)

No.p。	コメント時期	コメント内容	該当箇所
S111	1月8日 第316回審査会合	仙台湾の断層群による地震の地震動評価について、経験的グリーン関数法の要素地震がやや離れて分布しているので、統計的グリーン関数法による評価も行うこと。	参考資料E(p.111～119)

E. 1 統計的グリーン関数法による検討

- 仙台湾の断層群による地震の経験的グリーン関数法による評価において、要素地震の位置がやや離れていることから、統計的グリーン関数法による評価も実施し、経験的グリーン関数法との比較を行なった。
- 用いた手法は、入倉ほか(1997)による。

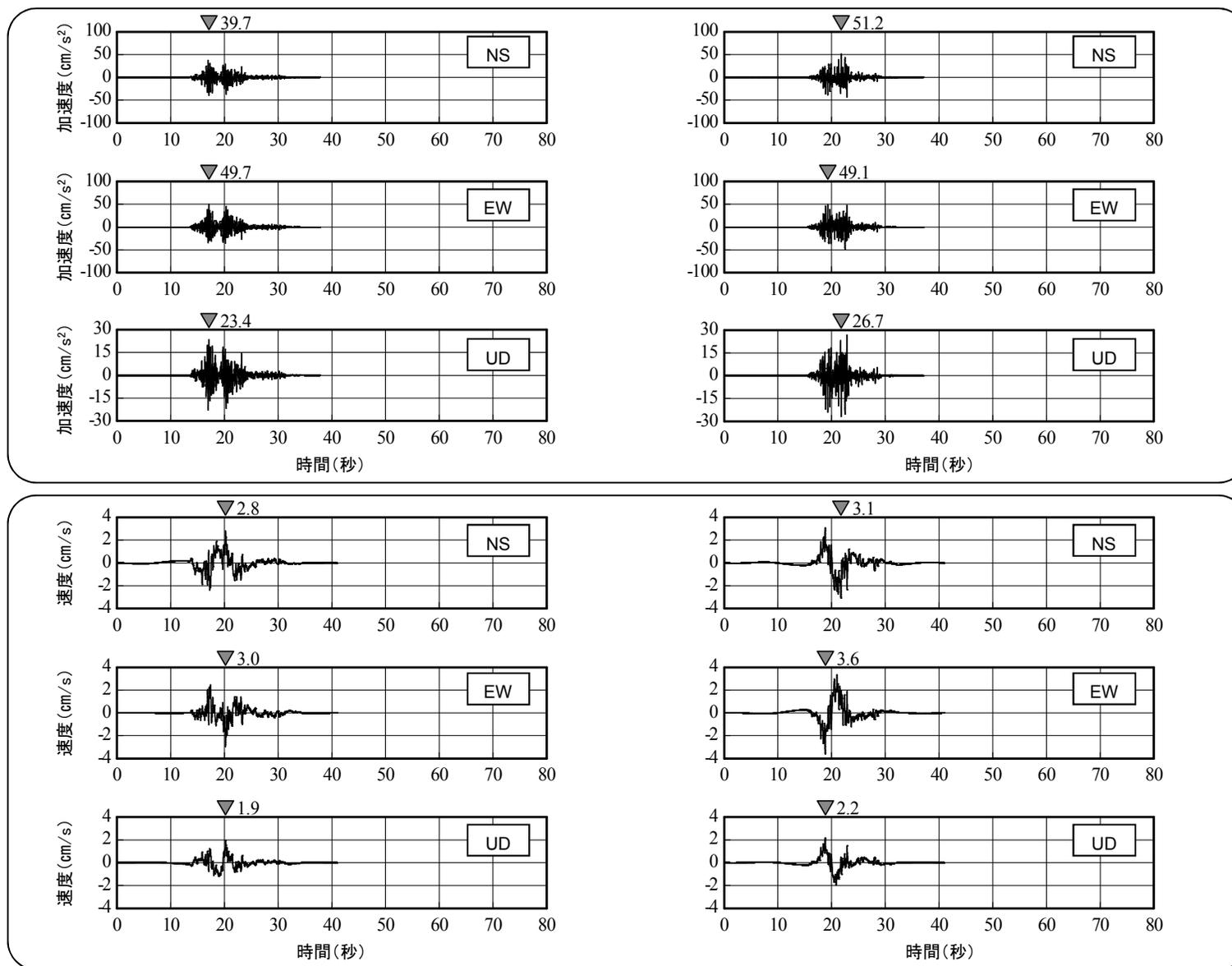
E. 2 基本ケース(1) 経験的グリーン関数法



破壊開始点1

破壊開始点2

E. 2 基本ケース(2) 統計的グリーン関数法

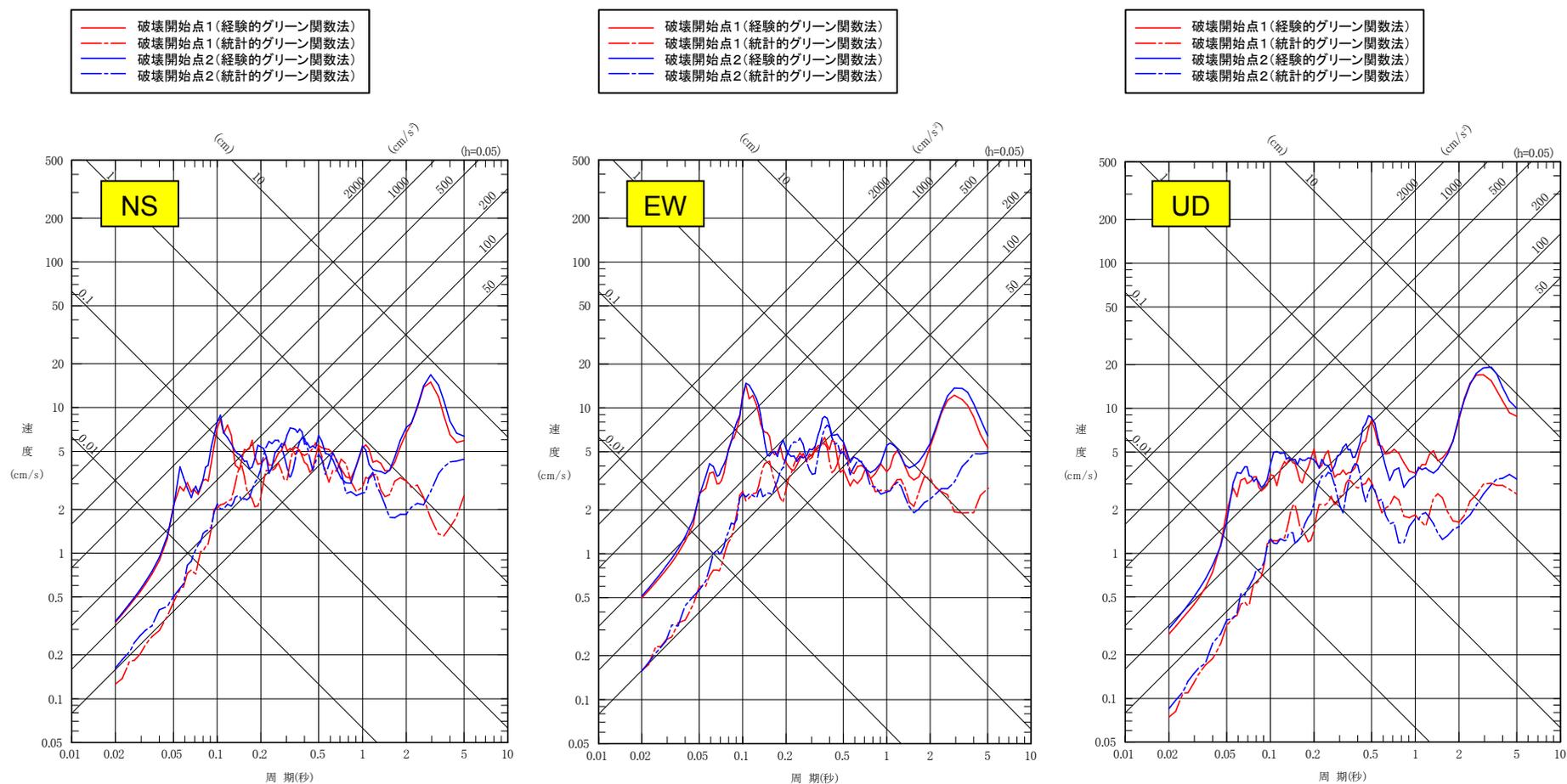


破壊開始点1

破壊開始点2

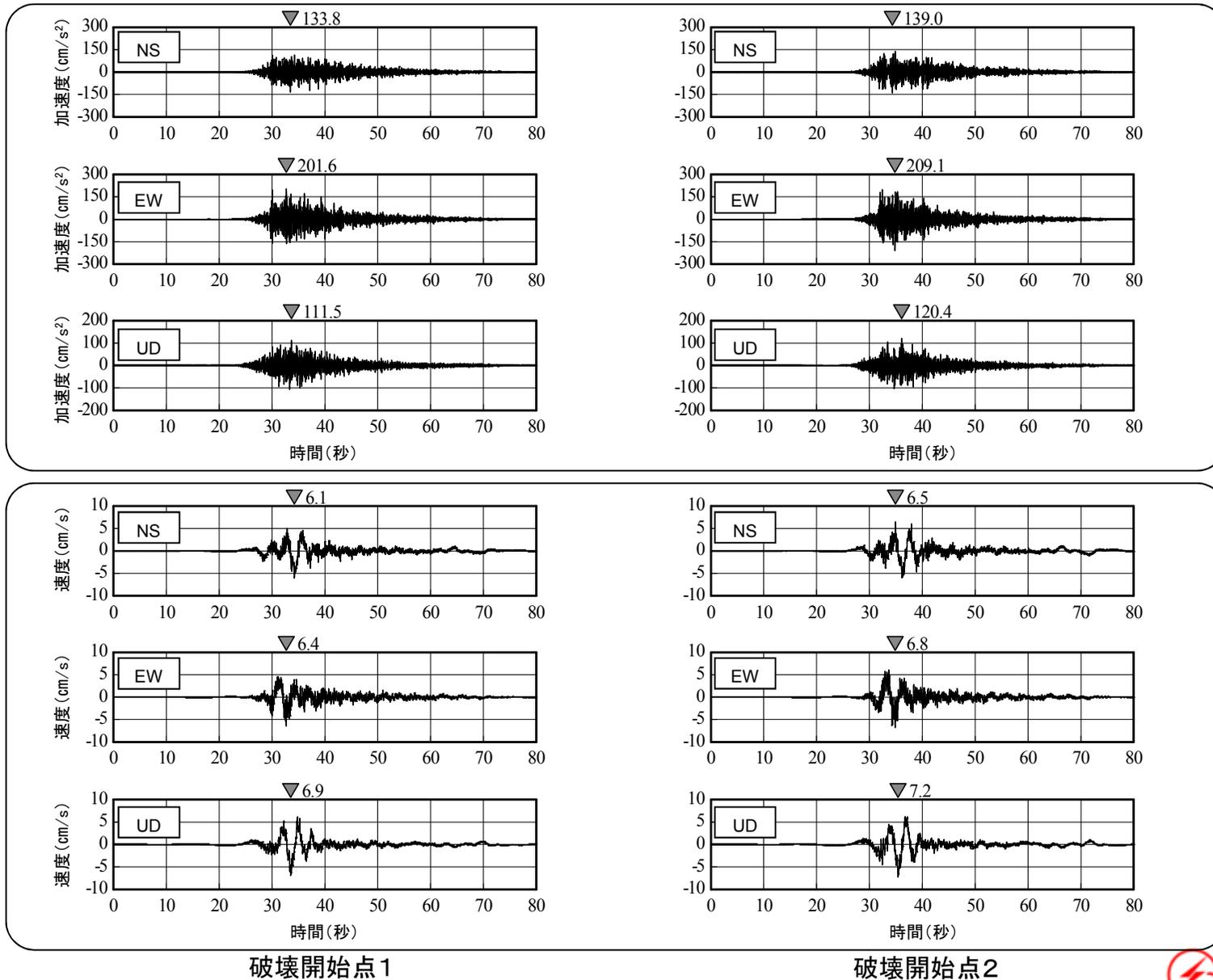
E. 2 基本ケース(3) 応答スペクトルの比較

- 統計的グリーン関数法による評価を経験的グリーン関数法による評価と合わせて示す。
- 経験的グリーン関数法による評価は、要素地震の特徴を反映した卓越する周期がみられ、統計的グリーン関数法よりも保守的な評価となっている。



(余白)

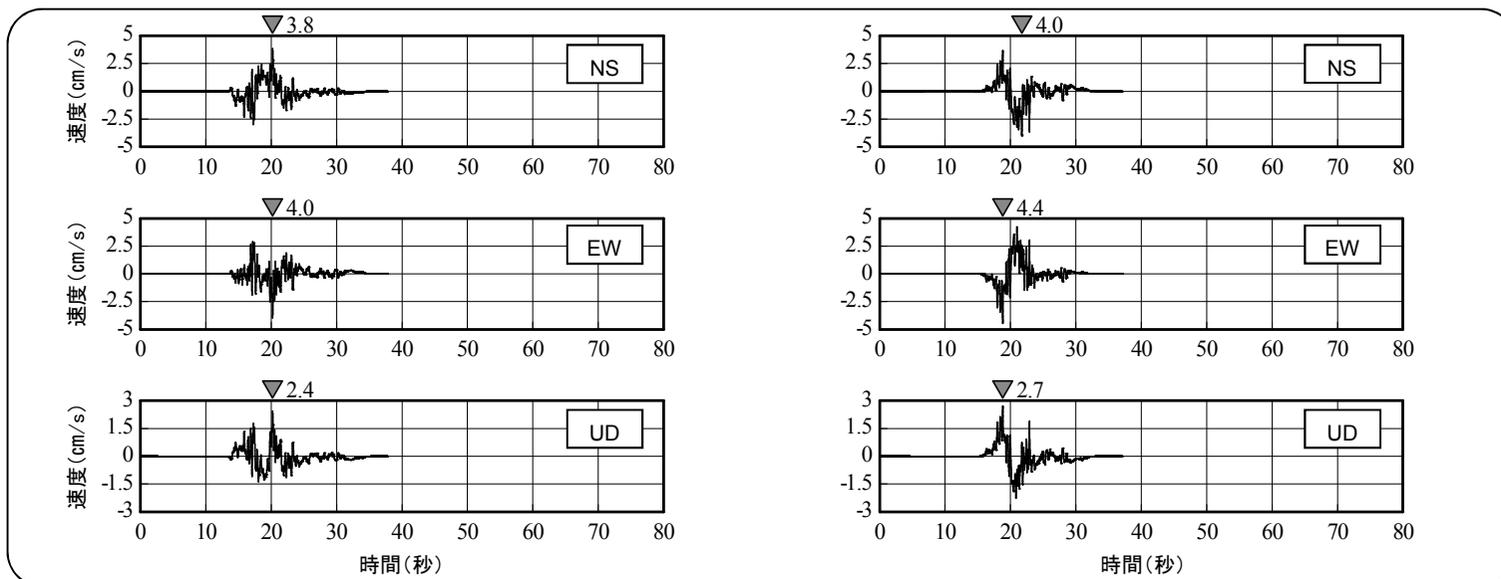
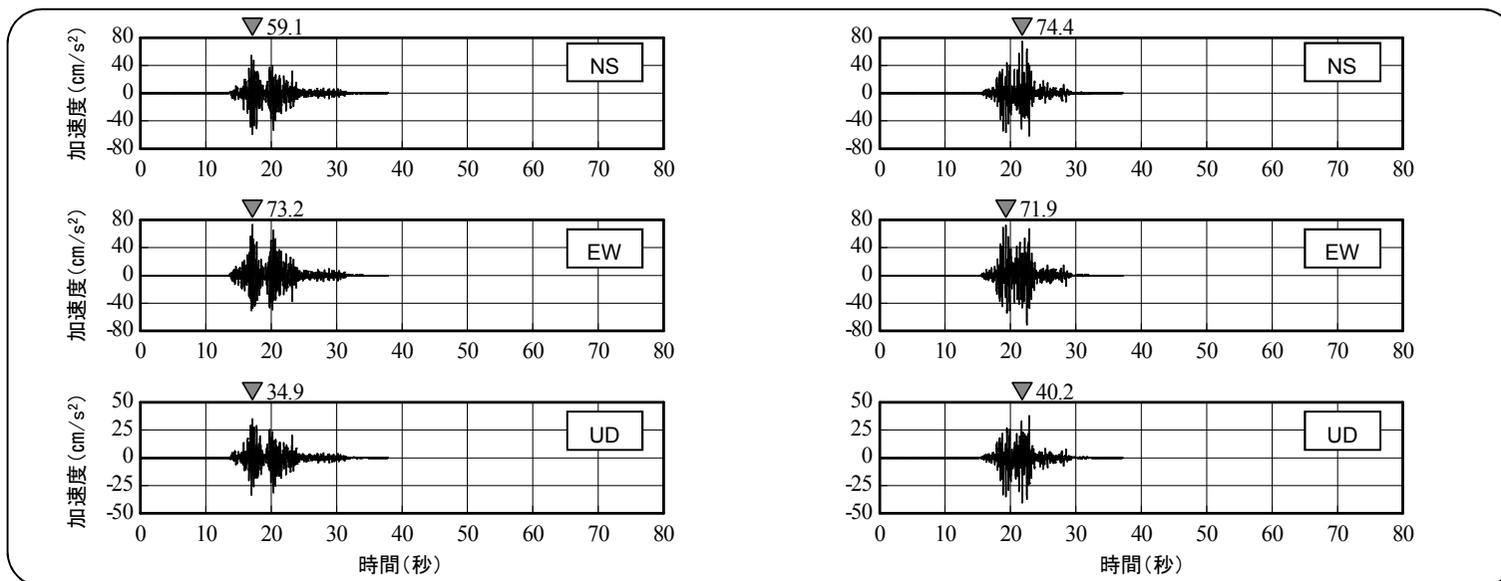
E. 3 短周期レベルの不確かさケース(1) 経験的グリーン関数法



破壊開始点1

破壊開始点2

E. 3 短周期レベルの不確かさケース(2) 統計的グリーン関数法

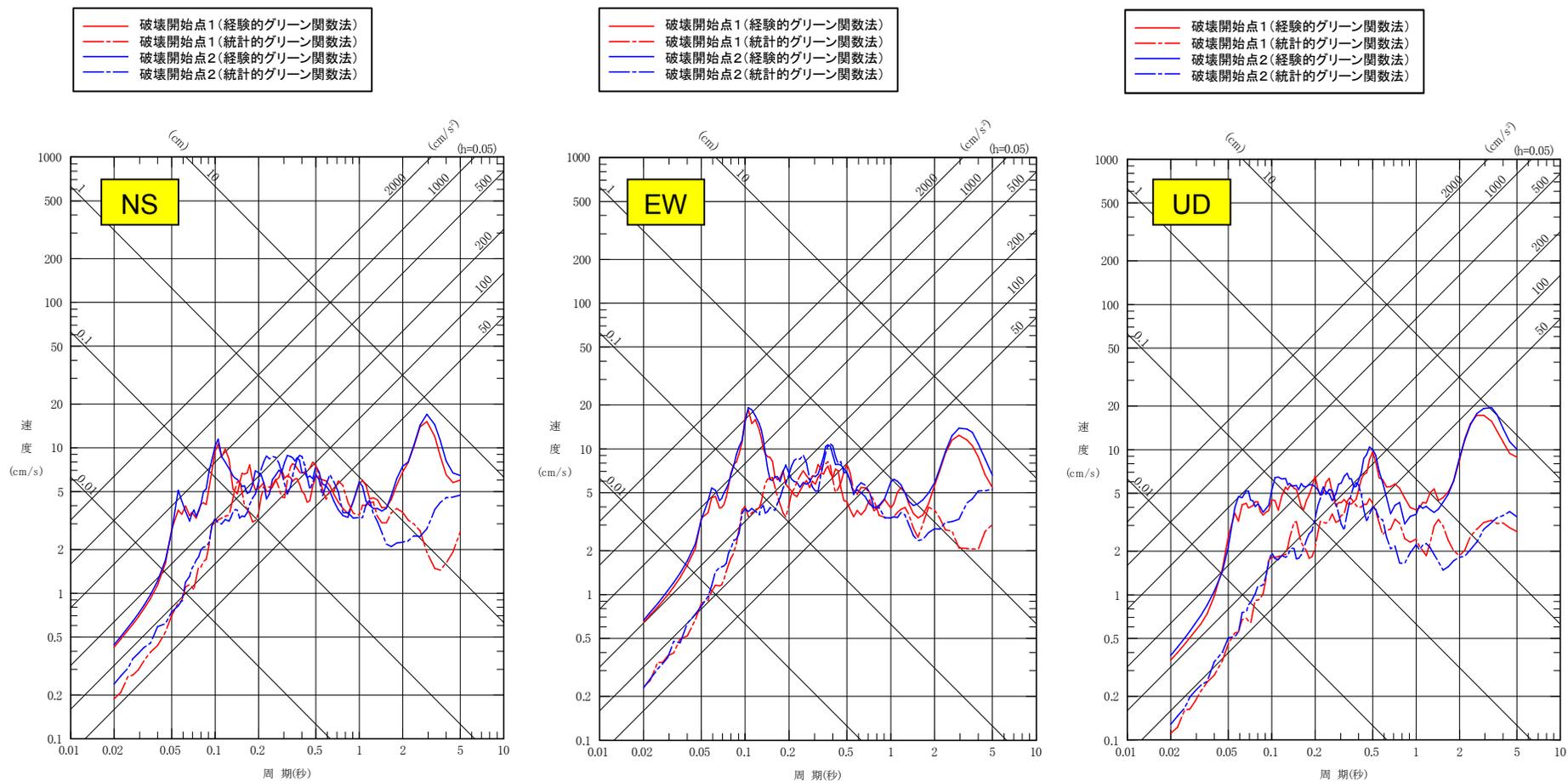


破壊開始点1

破壊開始点2

E. 3 短周期レベルの不確かさケース(3) 応答スペクトルの比較

- 統計的グリーン関数法による評価を経験的グリーン関数法による評価と合わせて示す。
- 経験的グリーン関数法による評価は、要素地震の特徴を反映した卓越する周期がみられ、統計的グリーン関数法よりも保守的な評価となっている。



F. 理論的手法における浅部地盤のQ値の影響について

No.	コメント時期	コメント内容	該当箇所
S112	1月8日 第316回審査会合	理論的手法に用いる地下構造モデルの地震基盤相当以浅のQ値について、統計的グリーン関数法と同じ3%とした場合の影響を確認すること。	参考資料F(p.120～122) ➤ 浅部のQ値を3%とした理論計算を実施し、影響は殆どないことを確認。

F. 1 浅部地盤のQ値の影響(1)

- 理論的手法に用いる地下構造モデルのうち、地震基盤相当(O.P.-128.4m)以浅の速度構造は、統計的グリーン関数法に用いる地下構造モデルと同じとしているが、Q値は、防災科学技術研究所(2012)[深部地盤モデルデータV2]を用いている。
- 地震基盤相当以浅について、統計的グリーン関数法と同じ $Q=16$ ($h=3\%$)とした場合の理論的手法への影響を確認した。

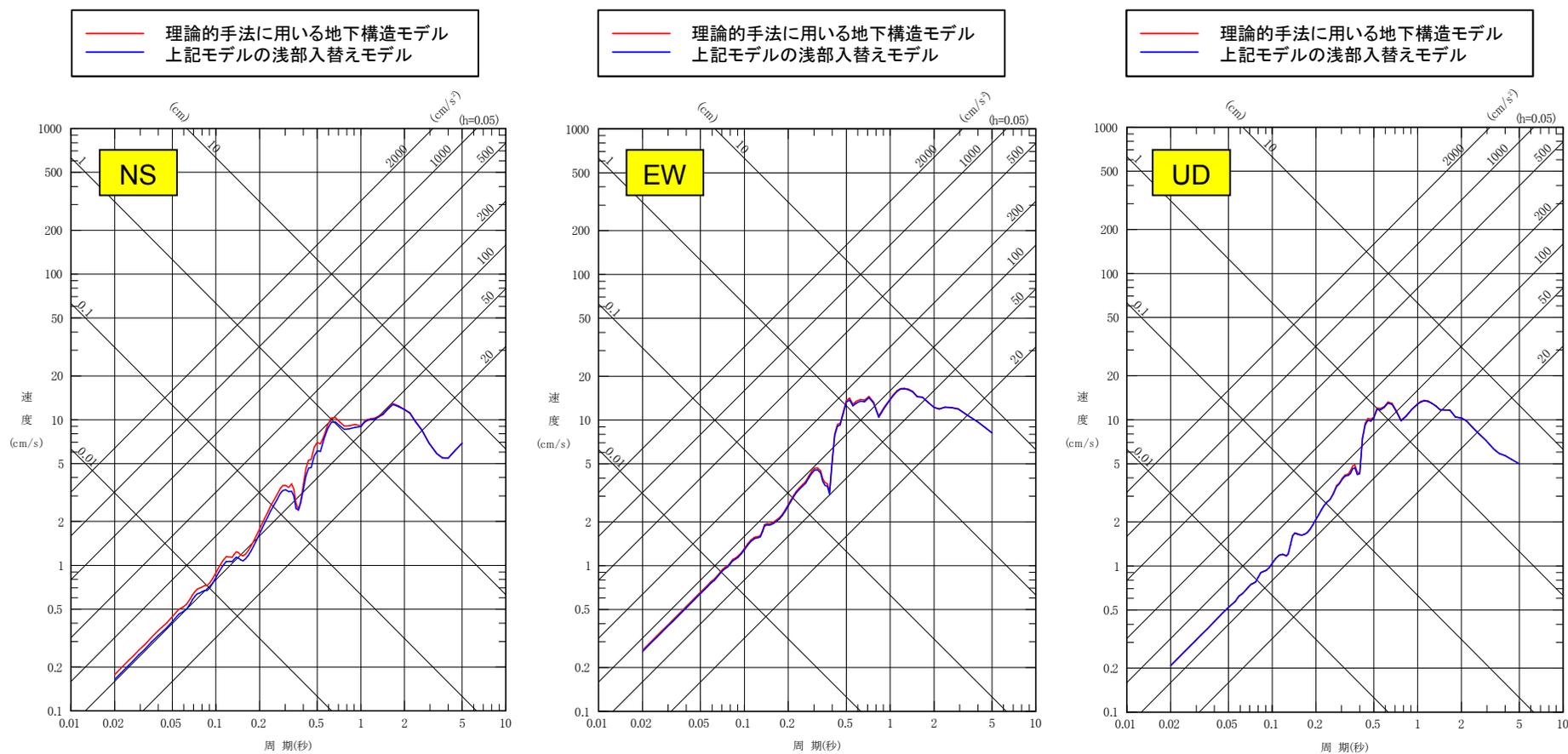
理論的手法に用いる深部地下構造モデル

層No.	上端深さ		層厚 (m)	密度 (t/m^3)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	Q
	G.L.(m)	O.P.(m)					
1	-27.3	-8.6	7.2	2.55	1500	2882	150
2	-34.5	-15.8	27.0	2.66	2000	4101	200
3	-61.5	-42.8	20.3	2.68	2200	4503	200
4	-81.8	-63.1	65.3	2.68	2600	5300	200
5	-147.1	-128.4	2,062.34	2.60	3100	5500	300
6	-2,209.44	-2,190.74	4,066.3	2.65	3200	5500	400
7	-6,275.74	-6,257.04	9,304.78	2.70	3400	5800	400
8	-15,580.52	-15,561.82	13,210.6	2.80	3800	6400	400
9	-28,791.12	-28,772.42	—	3.20	4500	7500	500

- O.P.-128.4以浅のQ値を統計的グリーン関数と同じ $Q=16$ ($h=3\%$)に置き換えた検討を行う。
- 検討は、F-6断層～F-9断層の基本ケースとする。

F. 1 浅部地盤のQ値の影響(2)

- 地震基盤相当(O.P.-128.4m)以浅のQ値の違いによる理論的手法(波数積分法)の結果への影響について検討を行った。
- F-6断層~F-9断層の基本ケース(破壊開始点1)を用いて比較を行なった。
- 地震基盤が浅いため、Q値の違いによる影響は殆ど見られない。



参考文献

1. 宇佐美龍夫, 石井寿, 今村隆正, 武村雅之, 松浦律子(2013): 日本被害地震総覧 599-2012, 東京大学出版会
2. 気象庁地震カタログ(1923~2014): 地震月報ほか
3. 気象庁震度検索データベース(a): <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/Event.php?ID=161500>
4. 気象庁震度検索データベース(b): <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/Event.php?ID=170719>
5. 中央气象台(1904): 中央气象台地震報告
6. 渡辺偉人(1993): 1861年(文久元)年の被害地震の震央および1900(明治33)年宮城県北部地震の震度分布, 地震 第2輯, 第46巻
7. 長谷川昭, 中島淳一, 海野徳仁, 三浦哲, 諏訪謡子(2004): 東北日本弧における地殻の変形と内陸地震の発生様式, 地震 第2輯, 第56巻
8. 活断層研究会編(1991): [新編]日本の活断層—分布図と資料
9. 徳山英一, 本座英一, 木村政昭, 倉本真一, 芦寿一郎, 岡村行信, 荒戸裕之, 伊藤康人, 徐垣, 日野亮太, 野原壮, 阿部博信, 坂井眞一, 向山建二郎(2001): 日本周辺海域中新世最末期以降の構造発達史, 海洋調査技術 Vol.13, No.1
10. 海野徳仁, 岡田知己, 中島淳一, 堀修一郎, 河野俊夫, 中山貴史, 内田直希, 清水淳平, 菅ノ又淳一, ガマゲシヤンタ, 仁田交市, 矢部 康男, 迫田浩司, 佐藤凡子, 伊藤実, 長谷川昭, 浅野陽一, 長谷見晶子, 出町知嗣, 矢島良紀(2004): 余震観測から推定した2003年7月26日宮城県北部地震(M6.4)の余震の震源とメカニズム解の分布, 地震 第2輯, 第56巻
11. 佐藤良輔編著(1989): 日本の地震断層パラメーター・ハンドブック, 鹿島出版会
12. 地震調査研究推進本部(2009a): 全国地震動予測地図
13. 松田時彦(1975): 活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震 第2輯, 第28巻
14. 中田高, 今泉俊文編(2002): 活断層詳細デジタルマップ
15. (独)防災科学技術研究所 ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクトHP: http://www.hizumi.bosai.go.jp/pdf/report/Matome/Matome_2.1.6.pdf
16. 岡田知己, 海野徳仁, 長谷川昭, 2008年岩手・宮城内陸地震緊急観測グループ(2008): 2008年岩手・宮城内陸地震—震源域の地下構造からみたマグマ・地殻流体との関係—, 科学, 78, 978-984
17. 鈴木康弘, 渡辺満久, 中田高, 小岩直人, 杉戸信彦, 熊原康博, 廣内大助, 澤祥, 中村優太, 丸島直史, 島崎邦彦(2008): 2008年岩手・宮城内陸地震に関わる活断層とその意義—関巖美町付近の調査速報—, 活断層研究 29号
18. 垣見俊弘, 松田時彦, 相田勇, 衣笠善博(2003): 日本列島と周辺海域の地震地体構造区分, 地震 第2輯, 第55巻
19. 地震調査研究推進本部編(1997): 日本の地震活動—被害地震から見た地域別の特徴—
20. 長谷川昭, 中島淳一, 北佐枝子, 辻優介, 新居恭平, 岡田知己, 松澤暢, 趙大鵬(2008): 地震波でみた東北日本沈み込み帯の水の循環—スラブから島弧地殻への水の供給, 地学雑誌
21. 伊藤亜妃, 日野亮太, 西野実, 藤本博巳, 三浦誠一, 小平秀一, 長谷見晶子(2002): エアガン人工地震探査による東北日本前弧域の地殻深部構造, 地震 第2輯, 第54巻
22. Tanaka,A and Y. Ishikawa(2005): Crustal thermal regime inferred from magnetic anomaly data and its relationship to seismogenic layer thickness, The Japanese islands case study, Phys. Earth Planet Interiors, 152
23. Noda,S., K. Yashiro, K. Takahashi, M. Takemura, S. Ohno, M.Tohdo and T. Watanabe (2002): RESPONSE SPECTRA FOR DESIGN PURPOSE OF STIFF STRUCTURES ON ROCK SITES, OECD-NEA Workshop on the Relations between Seismological Data and Seismic Engineering Analysis. Oct. 16-18, Istanbul
24. 入倉孝次郎, 香川敬生, 関口春子(1997): 経験的グリーン関数法を用いた強震動予測方法の改良, 日本地震学会講演予稿集, No.2, B25
25. 久田嘉章(1997): 成層地盤における正規モード解およびグリーン関数の効率的な計算法, 日本建築学会構造系論文集 第501号
26. 司宏俊, 福土知司, 石川和也, 栗山利男(2015): 補正経験的グリーン関数を用いた2003年7月26日Mw6.0宮城県北部の地震の地震動評価, 日本地震学会講演予稿集2015年度秋季大会

参考文献

27. 地震調査研究推進本部(2005): 宮城県沖地震を想定した強震動評価(一部修正版)
28. 地震調査研究推進本部(2012): 長周期地震動予測地図
29. 地震調査研究推進本部(2009b): 震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)
30. 武村雅之(1990): 日本およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係, 地震 第2輯, 第43巻
31. 入倉孝次郎, 三宅弘恵(2001): シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌 110(6)
32. 壇一男, 渡辺基史, 佐藤俊明, 石井透(2001): 断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化, 日本建築学会構造系論文集 第545号
33. 香川敬生, 鶴久雅人, 佐藤信光(2003): 硬質サイトの強震観測記録にみられる高周波低減特性の検討, 土木学会地震工学論文集, 523
34. Boore,D.B.(1983): Stochastic Simulation of High-Frequency Ground Motions Based on Seismological Models of Radiated Spectra, Bull. of the Seismological Society of America, Vol.73, No.6
35. 壇一男, 入江紀嘉, 具典淑, 島津奈緒未, 鳥田晴彦(2015): 長大な逆断層による内陸地震の断層モデルのパラメータの設定方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第707号, 2015年1月
36. 入江紀嘉, 壇一男, 鳥田晴彦, 加瀬祐子(2013): 長大断層を対象とした逆断層型内陸地震の動的応力降下量の算定式の検討, 日本地震工学会第10回年次大会梗概集
37. 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長(1990): 地域的な震源スケーリング則を用いた大地震(M7級)のための設計用地震動予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 416
38. 防災科学技術研究所(2012): 深部地盤モデルデータV2, 2014年3月17日公開