

女川原子力発電所 基準地震動の策定のうち 海洋プレート内地震について

平成27年1月9日
東北電力株式会社

目次

1. 世界の海洋プレート内地震	.....	2
2. 検討用地震の選定	.....	6
3. 検討用地震の地震動評価	.....	32
4. 基準地震動 S_s	.....	73
5. まとめ	.....	79

目次

1. 世界の海洋プレート内地震
2. 検討用地震の選定
3. 検討用地震の地震動評価
4. 基準地震動 S_s
5. まとめ

1. 世界の海洋プレート内地震

1.1 世界の海洋プレート内地震の特徴(1)

■ Seno and Yoshida(2004)による海洋プレート内地震

- ・1977～2001年の地震についてハーバードCMTカタログなどから、Mw7.0以上、深さ20～60kmのスラブ内地震を抽出し整理している。
- ・規模は、最大でMw8.3となっている。

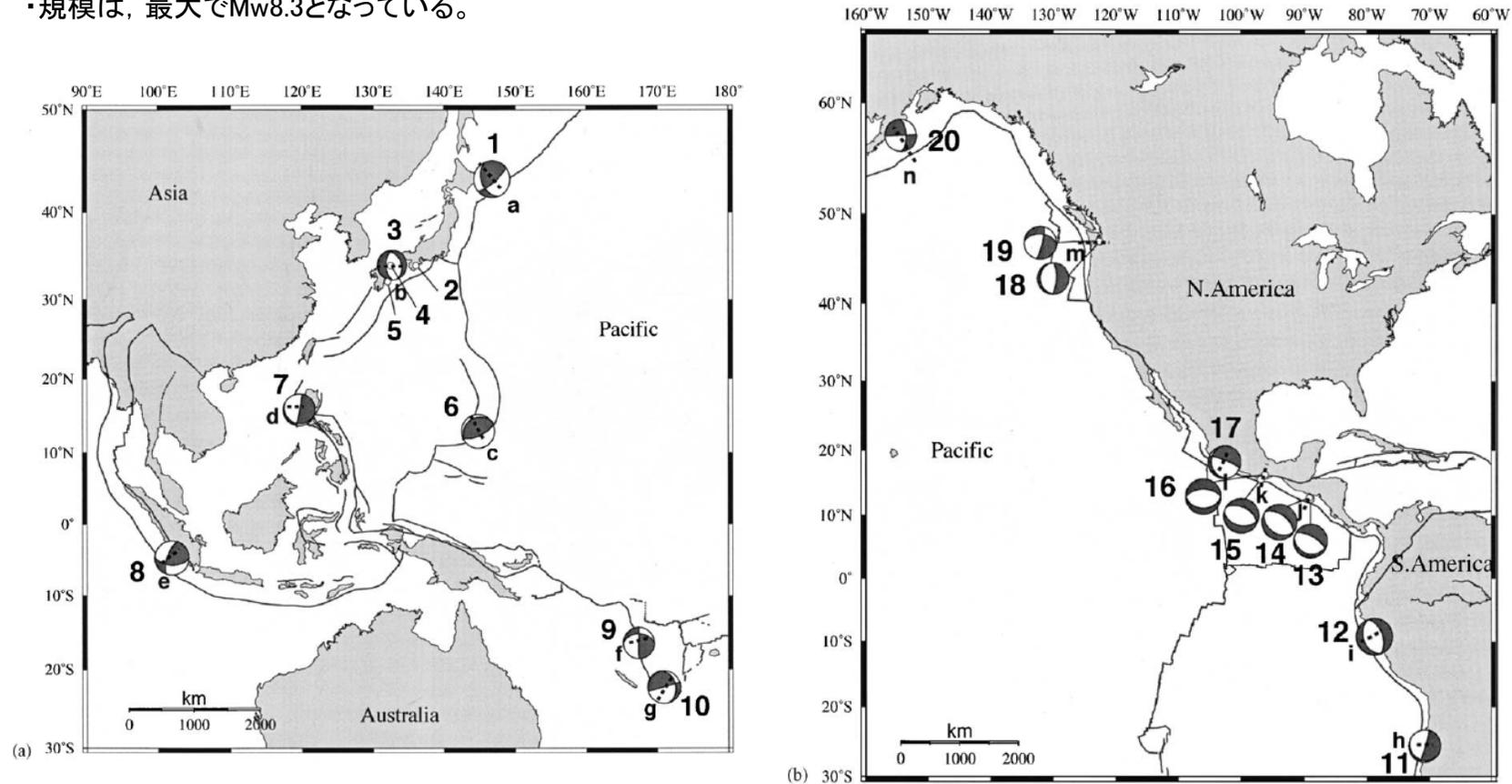


Fig. 1. Focal mechanisms of large shallow intraslab earthquakes listed in Table 1 are plotted with event numbers (lower hemispheres in an equal area projection). For Events 2, 4, and 5, only the epicenters are shown because no reliable mechanism solutions are available for these events. The dotted lines labeled with letters show sections along which *P*- and *T*-axes of nearby smaller events from the Harvard centroid moment tensor catalogue are plotted in Fig. 3. (a) Western and South Pacific regions (b) North and South American regions.

1. 世界の海洋プレート内地震

1.1 世界の海洋プレート内地震の特徴(2)

■ Seno and Yoshida(2004)

- ・1994年北海道東方沖地震が最大規模の地震である。

Table 1
List of large shallow intraslab earthquakes

Region event	Date	Epicenter		M_w	Depth (km)	Strike/dip/rake			Age (Ma)	Upper plate stress
		$^{\circ}$ N	$^{\circ}$ E			$^{\circ}$	$^{\circ}$	$^{\circ}$		
E. Hokkaido										
1 Hokkaido-toho-oki	4 October 1994	43.42	146.81	8.3	33	158	41	24	123	
Kyushu-SW. Japan										
2 Kii-Yamato ^a	7 March 1899	34.1	136.1	7.0	45				15-30	G
3 Geiyo	24 March 2001	34.13	132.71	6.8	47	181	57	-67		
4 Geiyo ^a	2 June 1905	34.1	132.5	7.2	50					
5 Hyuganda ^a	2 November 1931	32.2	132.1	7.1	40					
S. Mariana										
6 Guam	8 August 1993	12.98	144.80	7.7	45	238	24	82	164	G
Manila										
7 Manila	11 December 1999	15.87	119.64	7.2	35	112	13	-169	22	
Sumatra										
8 Sumatra	4 June 2000	-4.73	101.94	7.8	44	92	55	152	66	
Vanuatu										
9 Vanuatu	13 July 1994	-16.50	167.35	7.1	25	272	42	2	35-52	G
10 Vanuatu	6 July 1981	-22.31	170.90	7.5	58	345	30	-179		
N. Chile										
11 Taltal	23 February 1965	-25.67	-70.79	7.0	60	16	86	-78	48	G
C. Peru										
12 Peru	31 May 1970	-9.18	-78.82	7.9	43	160	37	-90	44	G
El Salvador										
13 El Salvador	19 June 1982	12.65	-88.97	7.3	52	102	25	-106	>37	G
14 El Salvador	13 January 2001	12.97	-89.13	7.7	56	121	35	-95		
Mexico										
15 Oaxaca	30 September 1999	15.70	-96.96	7.4	47	102	42	-103	10-17	G
16 Oaxaca	15 January 1931	16.4	-96.3	7.7	40	90	34	-90		
17 Michoacan	11 January 1997	18.34	-102.58	7.1	40	175	18	-28		
N. Cascadia										
18 Nisqually	28 February 2001	47.14	-122.53	6.8	47	176	17	-96	10	G
19 Olympia ^b	13 April 1949	47.17	-122.62	7.1	54	14	82	-135		
Alaska										
20 Kodiak Island	6 December 1999	57.35	-154.35	7.0	36	357	63	-180	55	G

^a Hypocenters and magnitudes are from Utsu (1982), except for the depths of the 1899 and 1905 events which are estimated in this study. Magnitudes are referring to the Japan Meteorological Agency (JMA) magnitude.

^b Hypocenters and magnitudes are from Baker and Langston (1987).

Hypocenters for other events are from the Harvard University centroid moment tensor catalogue (HCMT), except for the depths by individual studies mentioned in the text. Strike, dip and rake are from HCMT except for the 1993 Guam event: Tanioka et al. (1995), 1965 Taltal event: Malgrange and Madariaga (1983), 1970 Peru event: Abe (1972), 1931 Oaxaca event: Singh et al. (1985), and 1949 Olympia event: Baker and Langston (1987). G abbreviates gradient in the upper plate stresses.

1. 世界の海洋プレート内地震

1.1 世界の海洋プレート内地震の特徴(3)

■ Seno and Yoshida(2004)

- 海洋プレートと島弧に働く応力の関係を4つに分類し、規模の大きい海洋プレート内地震が発生しているパターンは、スラブに引張りが作用し、かつ、島弧の応力状態が高いFig12(a),(b)のような地域であるとしている。(Fig12(a),(b)に該当する地域では、1994年北海道東方沖地震(Mw8.3), 1993年グアムの地震(Mw7.7), 2000年スマトラの地震(Mw7.8)等が発生している。)
- 大きな海洋プレート内地震が発生していないパターンは、Fig12(c),(d)のように、海洋プレートに圧縮力が作用している場合か、あるいは、海洋プレート内に中立応力を持っている場合としている。これらの場合、島弧の圧縮の応力に対しバランスが保たれている。

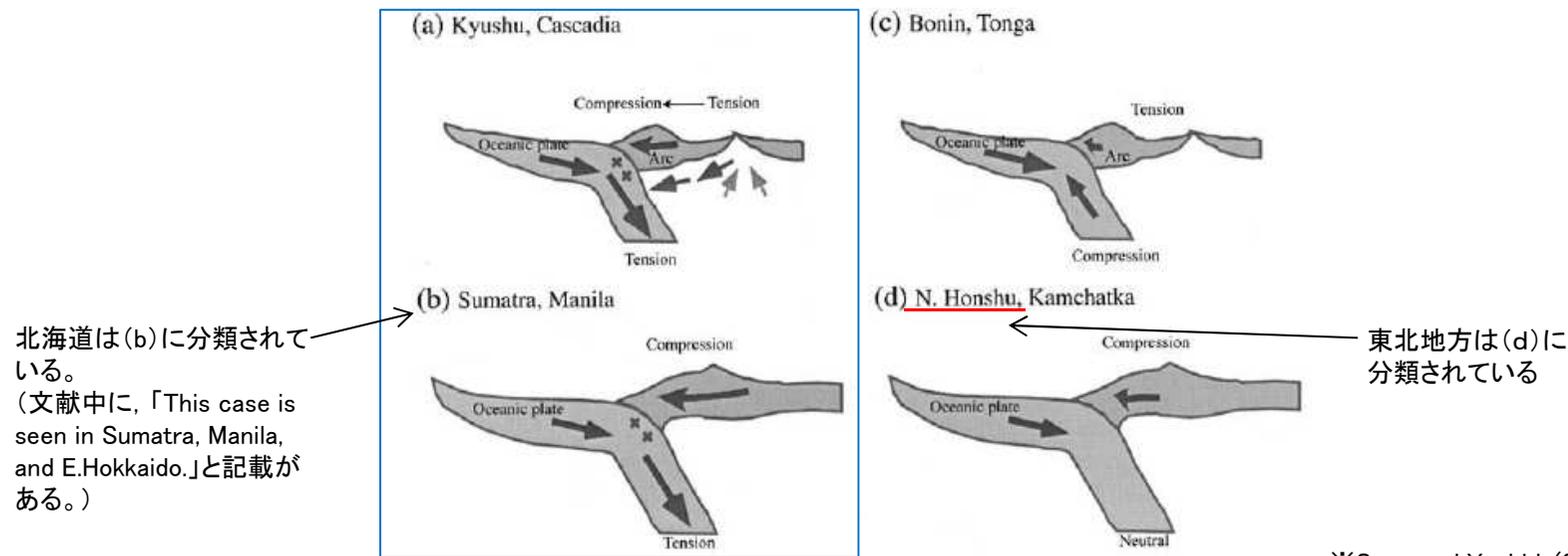


Fig. 12. Relationships between the slab and arc stresses. The ridge push, slab pull and the fore-arc collision force are balanced (Seno and Yamanaka, 1998). (a) The slab is down-dip tensional and the arc is tensional in the back-arc and compressional in the fore-arc. (b) The slab is down-dip tensional and the arc is compressional. (c) The slab is down-dip compressional and the arc is tensional. (d) The slab is neutral in the stress state and the arc is compressional. In regimes (a) and (b), large shallow intraslab earthquakes tend to occur.

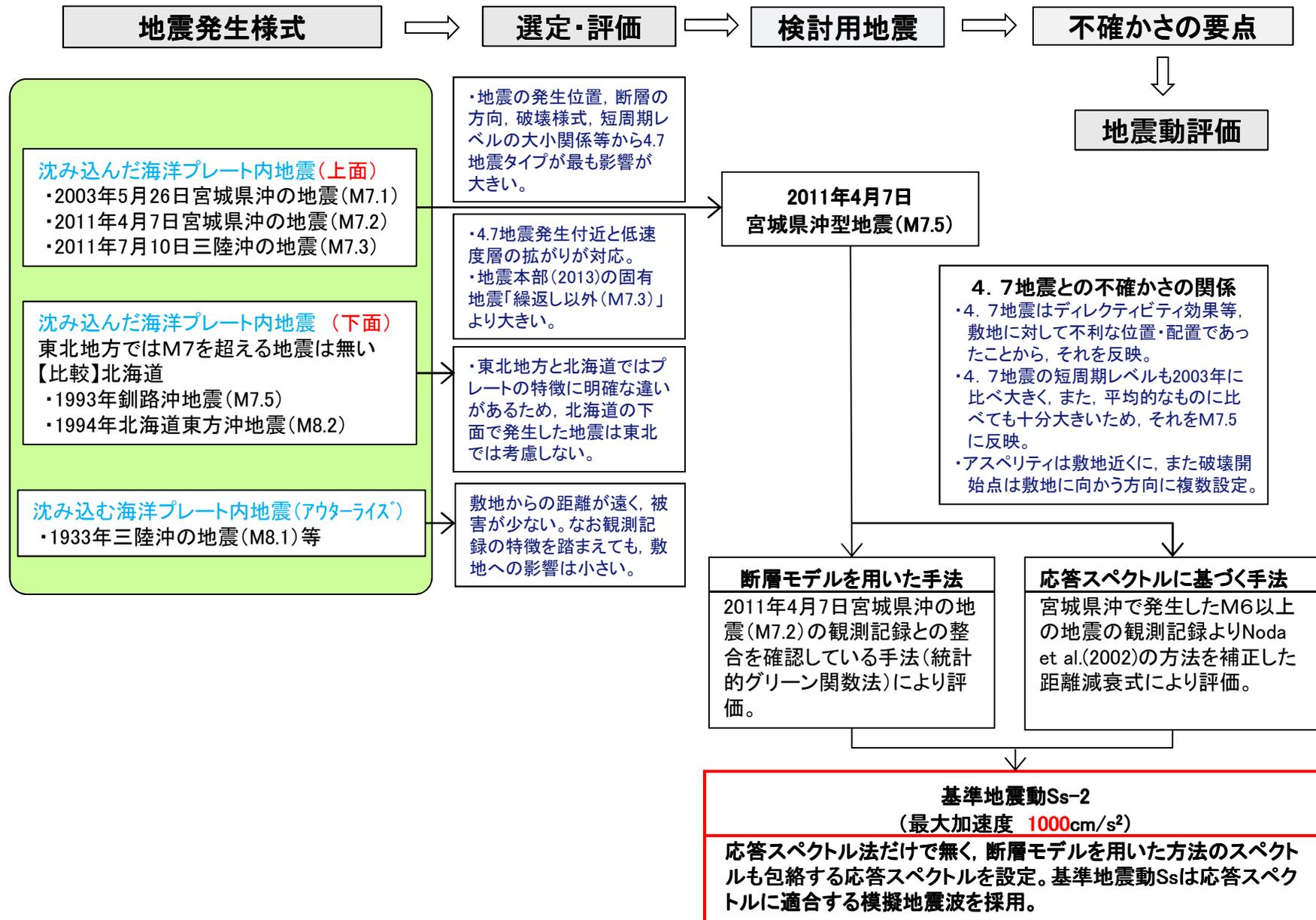
Seno and Yoshida(2004)において最大規模の地震が発生した北海道について、「検討用地震の選定」で東北地方と比較分析を行う。

目次

1. 世界の海洋プレート内地震
- 2. 検討用地震の選定**
3. 検討用地震の地震動評価
4. 基準地震動 S_s
5. まとめ

2. 検討用地震の選定

2.1 検討用地震の選定フロー

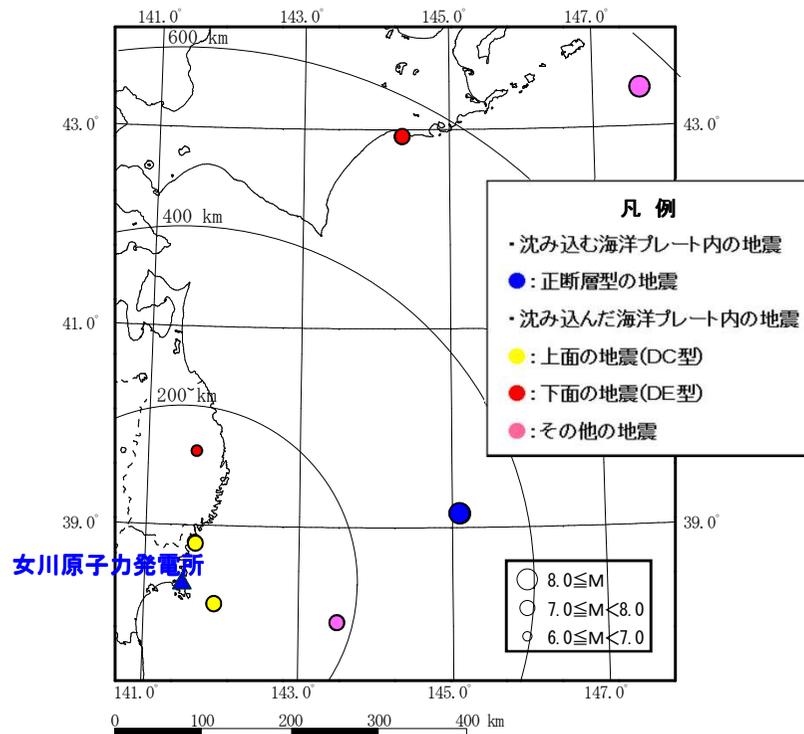


2. 検討用地震の選定

2.1 海洋プレート内地震の特徴

■太平洋プレートのプレート内地震

- ・東北地方から北海道において、海溝から陸側に向かって沈み込んだ海洋プレート内で発生する地震は、二重深発地震面を形成している。
- ・東北地方の二重深発地震面の上面の地震としては、海洋プレート内のやや陸寄りの深い場所で発生した2003年5月26日宮城県沖の地震(M7.1)及び2011年4月7日宮城県沖の地震(M7.2) (以下、「4.7地震」と記載。)がある。
- ・下面の地震としては、海洋プレート内の陸の深い場所で発生した2008年岩手県沿岸北部の地震(M6.8)がある。
- ・また、日本海溝付近の浅い場所で発生した地震として、2011年7月三陸沖の地震(M7.3)がある。
- ・北海道では、深い場所で発生した1993年釧路沖地震(M7.5)、浅い場所で発生した1994年北海道東方沖地震(M8.2)がある。



震央分布

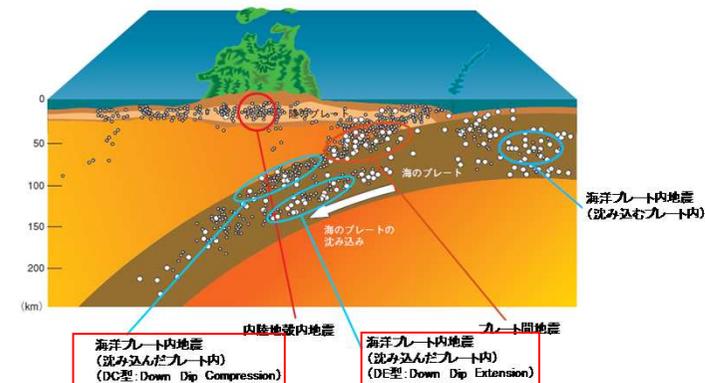
※地震諸元: 気象庁(1951~2012)

【沈み込んだ海洋プレート内地震】

- ① 1993年釧路沖地震(M7.5)
- ② 1994年北海道東方沖地震(M8.2)
- ③ 2003年5月26日宮城県沖の地震(M7.1)
- ④ 2008年7月24日岩手県沿岸北部の地震(M6.8)
- ⑤ 2011年4月7日宮城県沖の地震(M7.2)
- ⑥ 2011年7月10日三陸沖の地震(M7.3)

【沈み込む海洋プレート内地震(アウターライズ)】

- ⑦ 1933年三陸沖の地震(M8.1)
- ・陸地までの距離が遠く、地震動による被害は少ない。



地震発生タイプの模式図

(地震調査研究推進本部(以下、「地震本部」と記載。)(2014)に一部加筆。)

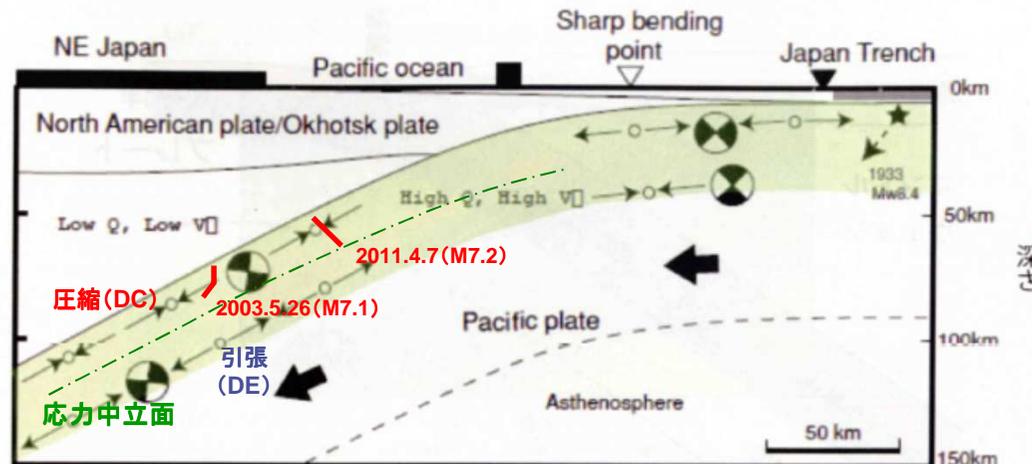
2. 検討用地震の選定

2.2 東北地方と北海道の比較(1)

■太平洋プレートのプレート内地震の東北地方と北海道での主な特徴

- ・東北地方と北海道の海洋プレート内地震の特徴をKita et al.(2010)等の知見から分析を行った。

	東北地方	北海道
主な特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・二重深発地震面の上面での地震活動が優勢である。 ・DC(Down Dip Compression)型の地震が、二重深発地震面の上面に多くみられる。 ・海洋プレートの応力中立面の位置が、<u>海洋プレート表面から深さ21km付近</u>にある。 ・過去の地震は、<u>地震発生層が厚い上面</u>でM7以上の地震が発生している。 	<ul style="list-style-type: none"> ・二重深発地震面の下面での地震活動が優勢である。 ・東北地方に比べ、DE(Down Dip Extension)型の地震が、二重深発地震面の下面に多くみられる。 ・海洋プレートの応力中立面の位置が、<u>海洋プレート表面から深さ9km付近</u>にある。 ・過去の地震は、<u>地震発生層が厚い下面</u>でM7.5以上の地震が発生している。
過去の地震(M7以上)	<ul style="list-style-type: none"> ・2003年5月26日宮城県沖の地震(M7.1,H=72km): DC型 上面 ・4.7地震(M7.2,H=66km): DC型 上面 ・2011年7月10日三陸沖の地震(M7.3,H=34km): 浅い地震, 津波が発生 	<ul style="list-style-type: none"> ・1993年釧路沖地震(M7.5,H=101km): DE型 下面 ・1994年北海道東方沖地震(M8.2,H=28km): 浅い地震, 津波が発生



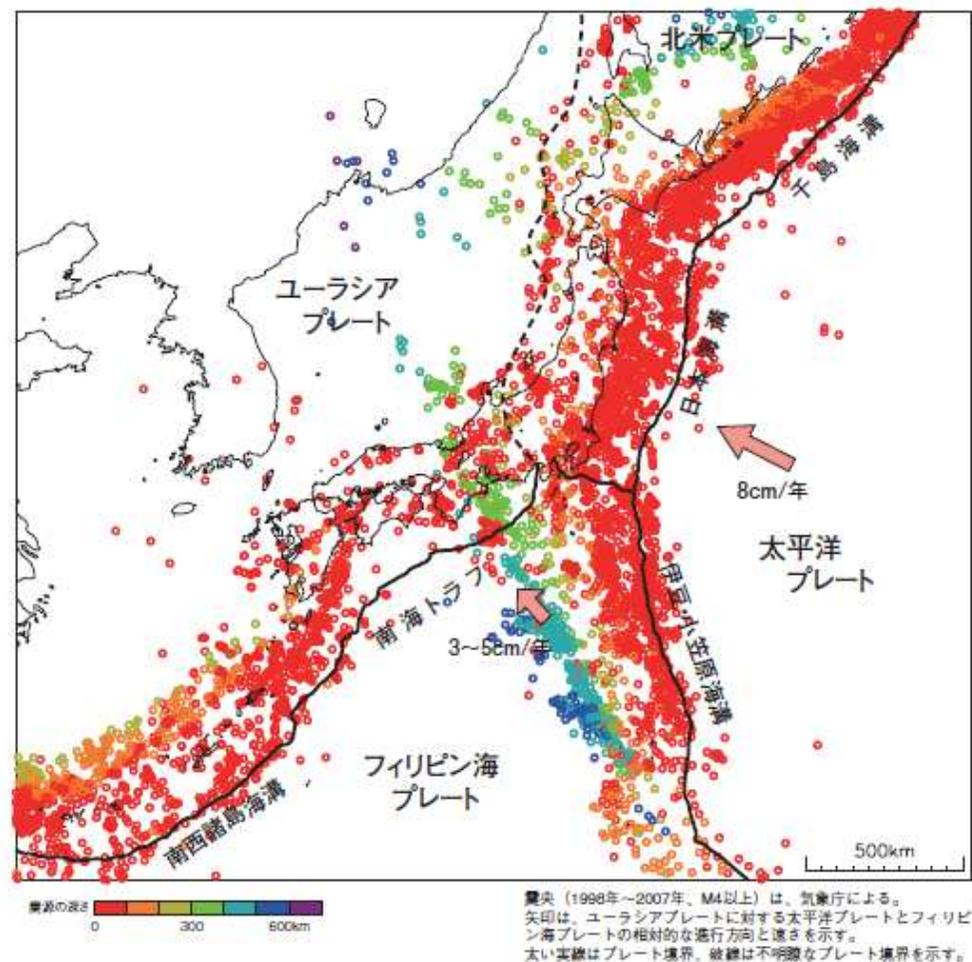
東北地方の前弧部分の島弧横断鉛直断面模式図(Gamage et al.(2009)に一部加筆)

2. 検討用地震の選定

2.2 東北地方と北海道の比較(2)

■太平洋プレートの沈み込み

- ・東北地方(東北日本弧)は, 太平洋プレートの進行方向に対して, ほぼ直交するように位置しているのに対し, 北海道(千島弧)は太平洋プレートの進行方向に対して斜交するように位置している。



日本付近のプレート境界とプレート相対運動(地震本部(2014))

2. 検討用地震の選定

2.2 東北地方と北海道の比較(3)

■ Kosuga et al.(1996)による知見

- ・東北地方から北海道の海洋プレート内地震について、その発生メカニズムを整理している。
- ・東北地方は、海洋プレート上面のDown-dip compressionの地震が優勢。北海道では海洋プレート下面のDown-dip extensionの地震が優勢との特徴がある。

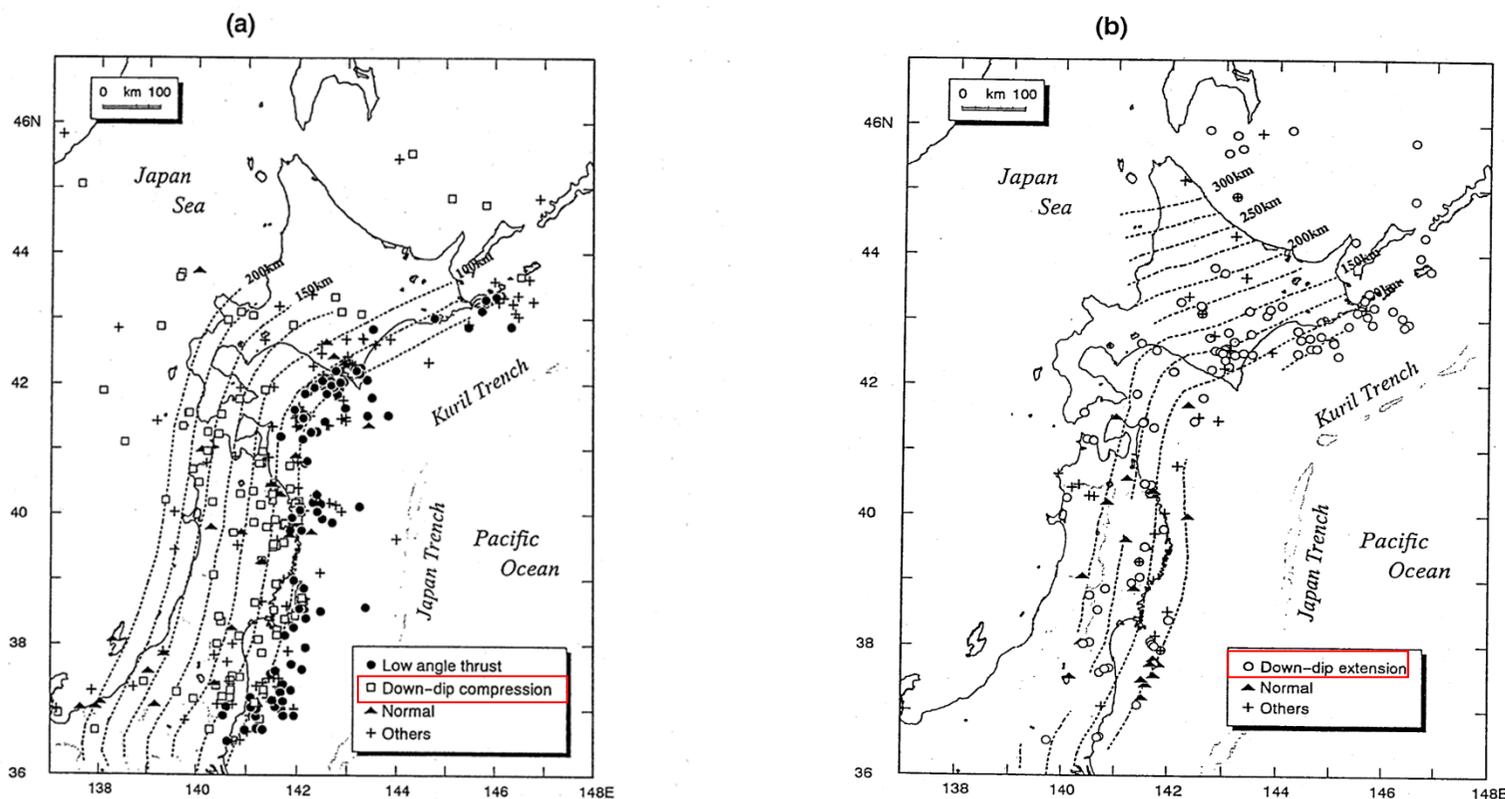


Fig. 6. (a) Plan view of focal mechanism solutions in the upper plane of the double-planned seismic zone. Events are classified from the type of solutions. Dotted lines represent the depth contours of the upper seismic plane (Hasegawa et al., 1993; Umino et al., 1984). Contour interval is 25 km. (b) Epicenter distribution of focal mechanism solutions in the lower plane of the double-planned seismic zone. Dotted lines indicate the depth contours of the lower seismic plane (Hasegawa et al., 1983; Umino et al., 1984). Contour interval is 25 km.

Fig. 6 (continued).

海洋プレート上面の地震

海洋プレート下面の地震



2. 検討用地震の選定

2.2 東北地方と北海道の比較(4)

■ Kita et al.(2010)による知見

- ▶ 北海道から東北地方に至る領域の沈み込んだ太平洋プレート内で発生する地震を詳細に分析し、①上面と下面の間にも少なからずの頻度で海洋プレート内地震が発生していること、②これらの地震のメカニズム解を用いて応力中立面の位置を推定し、北海道東部と東北地方で応力中立面の位置が有意に異なることを見出した。

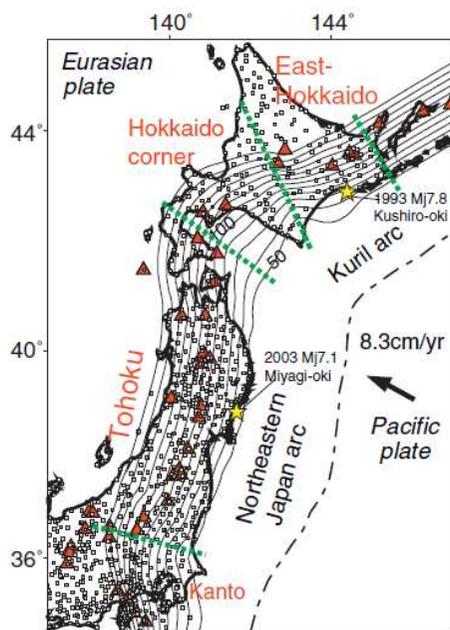


Fig. 1. Tectonic map of northeastern Japan. The Pacific plate is subducting beneath the Kuril arc in Hokkaido and beneath the northeastern Japan arc in Tohoku. Red triangles show active volcanoes and gray squares indicate seismic stations used in this study. Black contours show the depth of the upper surface of the Pacific plate. Black dotted and dashed line shows the location of the trench. Green short dashed lines show boundaries of the three regions, eastern Hokkaido (E-Hokkaido), Hokkaido corner and Tohoku. Locations of the 1993 Mj 7.8 Kushiro-oki and the 2003 Mj 7.1 Miyagi-oki earthquakes are shown by yellow stars.

研究対象領域

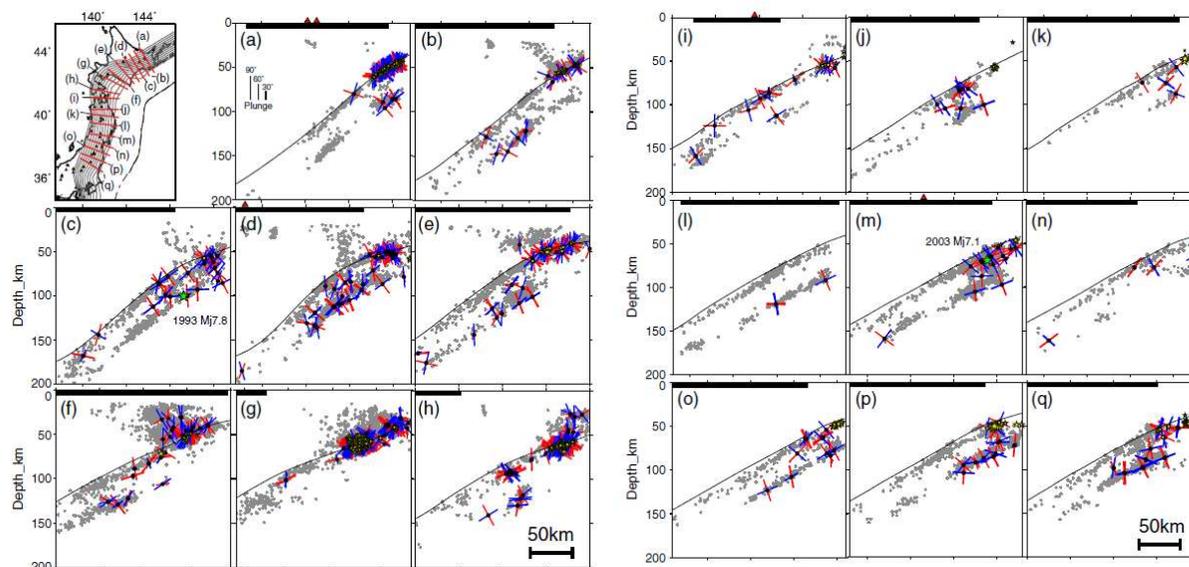


Fig. 2 (continued).

Fig. 2. (a)-(q) Cross-arc vertical cross-sections of relocated earthquakes along lines (a) through (q) in the inserted map beneath Hokkaido and Tohoku. Gray dots indicate earthquakes that occurred within 10 km from each line. Crosses with red and blue lines show P (red) and T (blue) axes of focal mechanisms projected on the section (see Section 3 for detail). Yellow stars and yellow circles respectively show epicenters of small repeating earthquakes (Uchida et al., 2003, 2009) and low-angle thrust-type events (Kita et al., 2010), which are thought to occur on the plate boundary. Thin black lines show the estimated plate interface. Horizontal thick black lines show the area of the land. Locations of the 1993 Kushiro-oki and the 2003 Miyagi-oki earthquakes are shown by green stars in Fig. 2(c) and (m), respectively.

震源の島弧横断鉛直断面(発震機構解のP軸を赤線, T軸を青線で示す)

- ・震源断面図より、すべての断面で上下2枚の面状分布、すなわち二重深発地震面を形成している。
- ・上面と下面の間の領域にも、少なからず地震が分布している。

2. 検討用地震の選定

2.2 東北地方と北海道の比較(5)

■ Kita et al.(2010)による知見

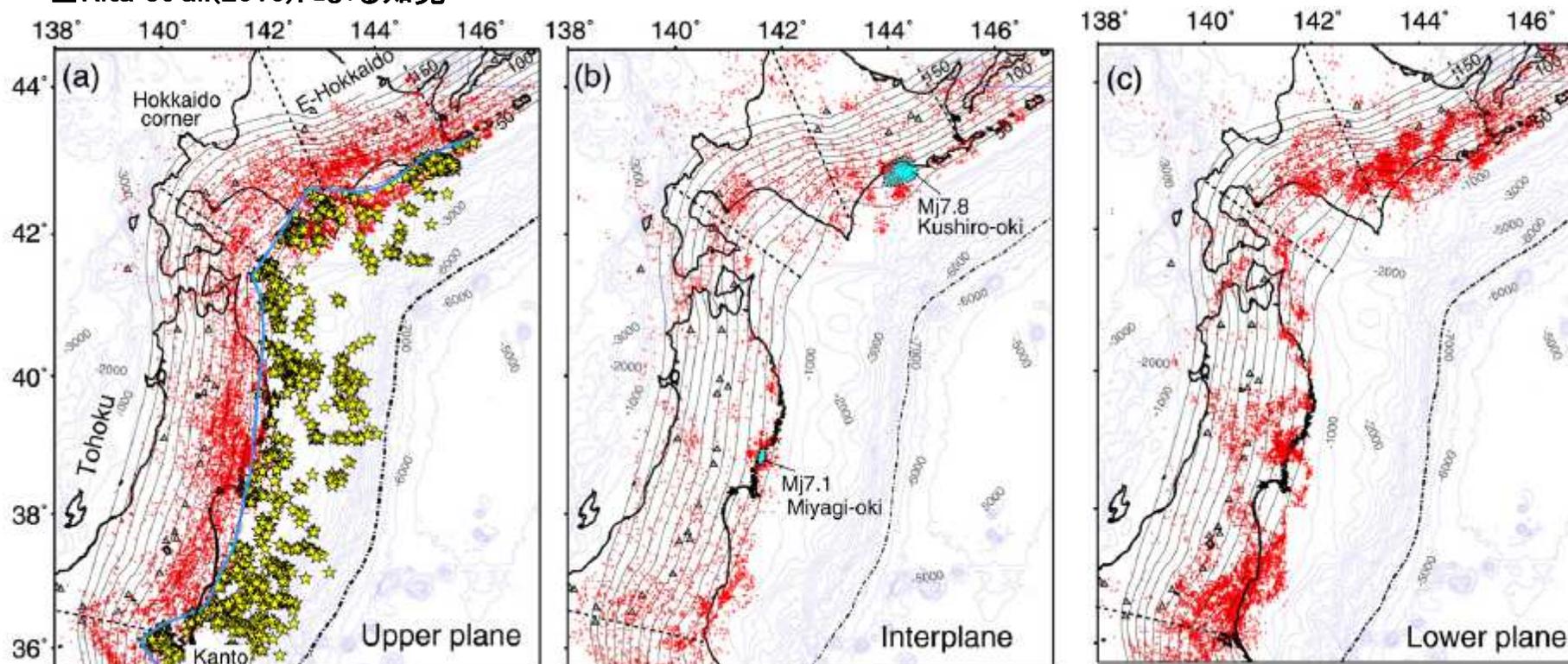


Fig. 4. Epicenter distributions of earthquakes (a) in the upper plane, (b) in the interplane, and (c) in the lower plane. Red dots show earthquakes. Gray triangles and black contours respectively show active volcanoes and the depth of the plate interface. A thick blue line shows the downdip limit of interplate earthquakes. Blue thin lines show contours of the bathymetry every 500 m. Yellow stars and yellow circles show the epicenters of small repeating earthquakes and low-angle thrust type events, respectively. Aftershock area of the 1993 Mj 7.8 Kushiro-oki earthquake (Suzuki and Kasahara, 1996) and that of the 2003 Mj 7.1 Miyagi-oki earthquake (Okada and Hasegawa, 2003) are shown in Fig. 4(b) by shaded areas with blue color.

(a)上面, (b)面間, (c)下面の地震の震央分布

- ・面間地震が北海道から東北地方に広い範囲にわたって発生している。
- ・上面の地震は、前弧側にやや多いものの、全域にわたって空間的にほぼ一様に分布。
- ・それに対し下面の地震は、空間的に非一様に分布する。
- ・面間の地震は、空間的に非一様な分布をし、北海道東部や東北地方南部、東北地方中央部の前弧側に集中し、そこでは下面の地震も集中している。

2. 検討用地震の選定

2.2 東北地方と北海道の比較(6)

■ Kita et al.(2010)による知見

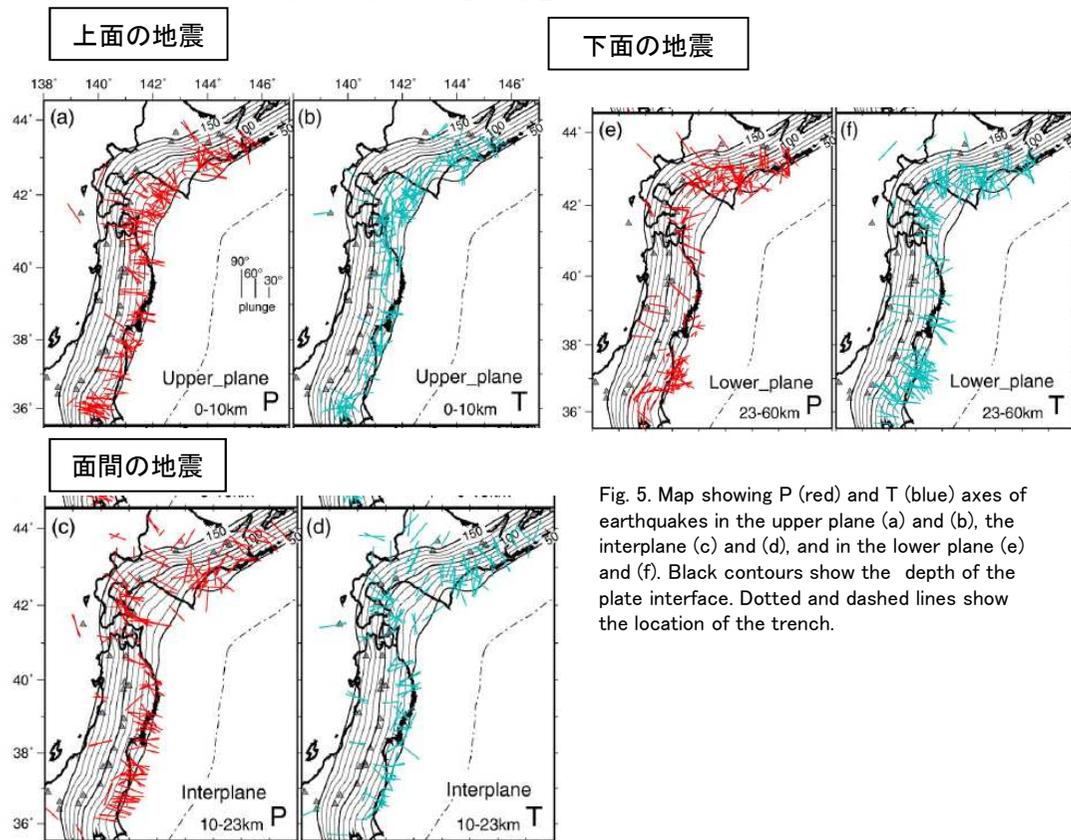
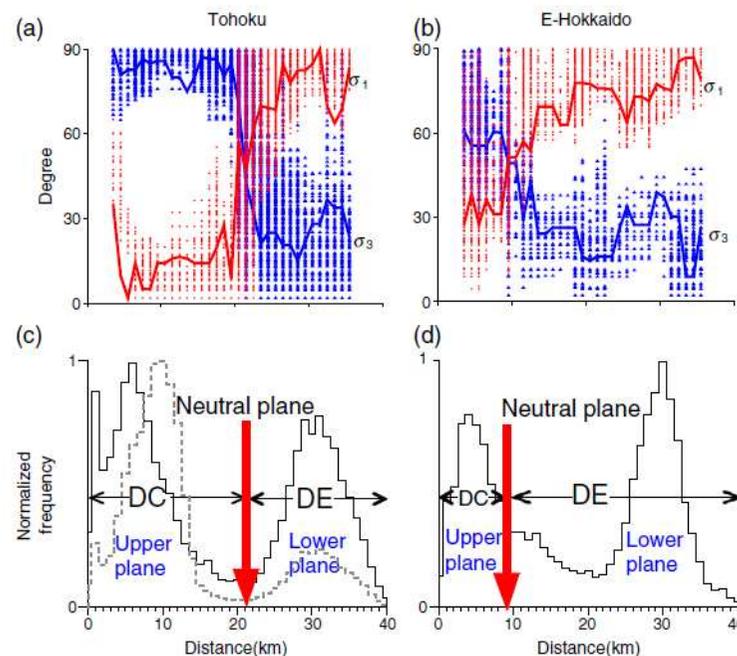


Fig. 5. Map showing P (red) and T (blue) axes of earthquakes in the upper plane (a) and (b), the interplane (c) and (d), and in the lower plane (e) and (f). Black contours show the depth of the plate interface. Dotted and dashed lines show the location of the trench.

上面の地震(a)P軸, (b)T軸, 面間の地震の(c)P軸, (d)T軸, 下面の地震の(e)P軸, (f)T軸

- 東北地方も北海道も, 上面の地震活動はP軸(DC型)が卓越, 下面の地震はT軸(DE型)が卓越する傾向がある。ただし, 北海道東部では, 上面の地震活動は, 東北地方と比べて顕著ではない。
- 面間地震は, 東北地方でP軸(DC型)が, 北海道東部でT軸(DE型)が卓越する傾向がある。



応力テンソルインバージョンの結果

(a)東北地方および(b)北海道東部における, 最大主応力軸(赤線)および最小主応力軸(青線)と海洋プレートの傾斜方向となす角。海洋プレート表面からの距離を横軸にして示す。

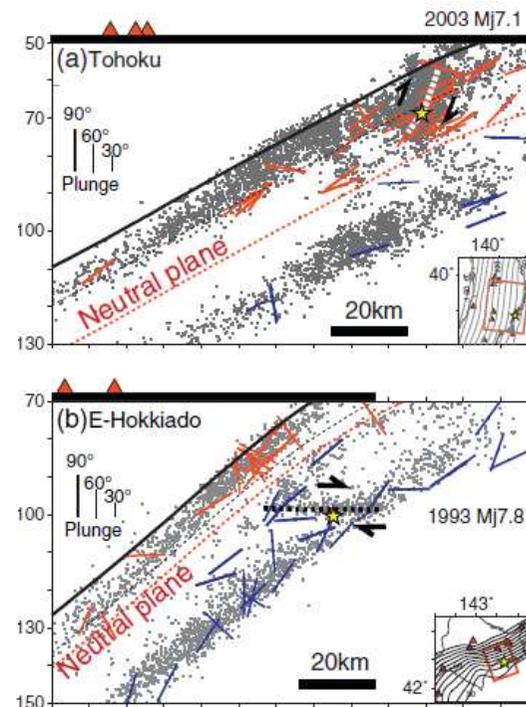
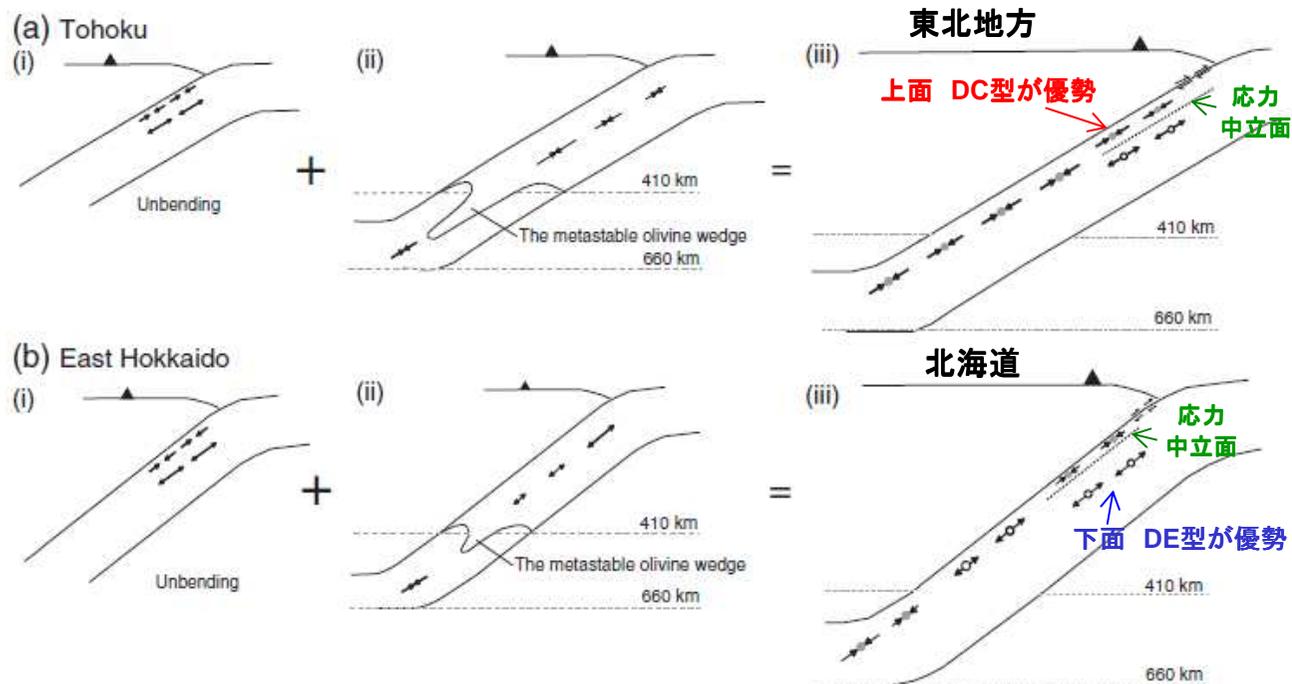
(c)東北地方および(d)北海道東部における, 海洋プレート内地震の発生頻度分布。海洋プレート表面からの深さを横軸。推定された応力中立軸を赤矢印で示す。

- 東北地方と北海道東部で応力中立面の位置が有意に異なり, 東北地方では海洋プレート表面から深さ21km付近に, 北海道東部では海洋プレート表面から深さ9km付近にある。

2. 検討用地震の選定

2.2 東北地方と北海道の比較(7)

■ Kita et al.(2010)による知見



応力中立面位置の違いの原因(Kita et al.(2010)に一部加筆)

- ・Unbendingによる応力は、東北地方と北海道に違いはないが、浮力※1による応力に違いがあることから、二種類の応力の重ね合わせで、応力中立面の位置に違いがでくと推定される。
- ・応力中立面の位置が異なる原因は、北海道下で太平洋プレートが斜め沈み込みをしていることによる熱パラメータ※2の値に違いがあると推定される。

- ・2003年宮城県沖の地震(M7.1)、1993年釧路沖地震(M7.5)のどちらも、その破壊は中立面付近にまで達するものの、それを超えては広がっていない。

※1: 準安定オリビン相が410km不連続面を超えて深くまで及ぶと、周囲のマントルより密度が小さいため浮力が働く。

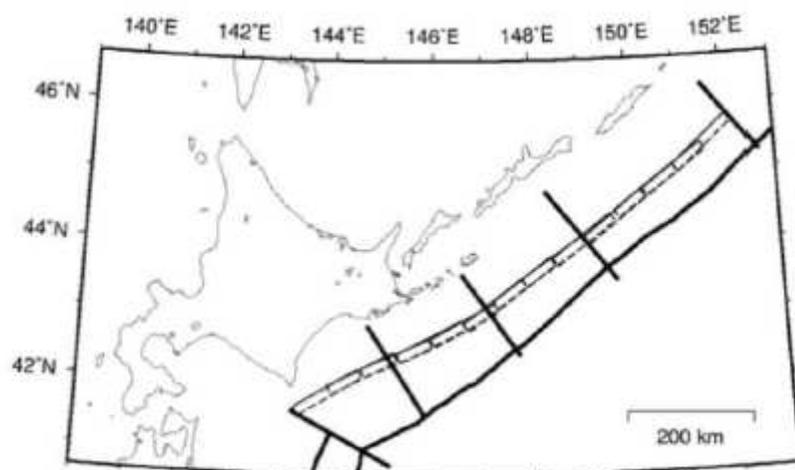
※2: 鉛直方向のプレートの沈み込み速度とプレート年齢をかけたもので、それが大きいほど沈み込んだ海洋プレート、すなわちスラブの中心部の温度が低いことに対応する。

2. 検討用地震の選定

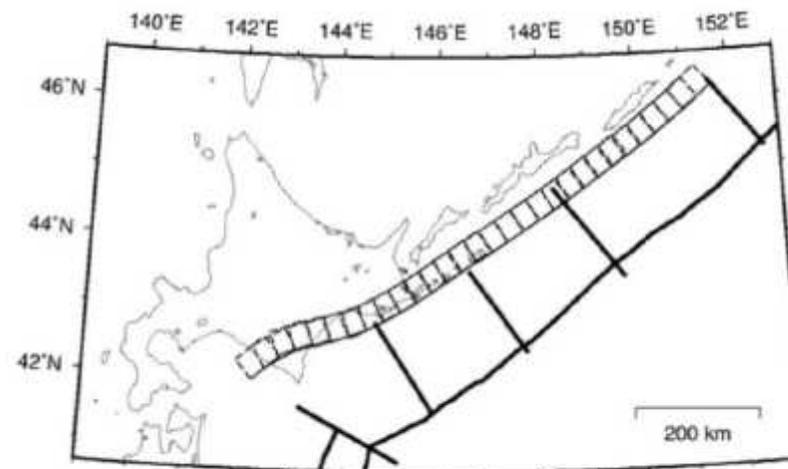
2.2 東北地方と北海道の比較(8)

■地震本部(2013): 今後の地震ハザード評価に関する検討～2013年における検討結果～

- ・地震本部(2013)の確率論的評価では, 千島海溝沿いの地震として, 「沈みこんだプレート内のやや浅い地震(深さ50km程度, M8程度)」, 「沈みこんだプレート内のやや深い地震(深さ100km程度, M7.5程度)」を固有地震として想定している。



プレート内のやや浅い地震



プレート内のやや深い地震

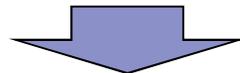
太平洋プレートで発生する長期評価された地震のうち震源が特定されていない地震の断層面
(地震本部(2013))

2. 検討用地震の選定

2.2 東北地方と北海道の比較(9)

■東北地方と北海道の比較 まとめ

- 北海道と東北地方で、海洋プレート内地震の地震活動の特徴に違いがある。
- 北海道は、二重深発地震面のうち下面の地震活動(DE型)が優勢であり、東北地方は上面の地震活動(DC型)が優勢である。
- 過去の地震から、北海道では、深い場所で1993年釧路沖地震(M7.5)、浅い場所で1994年北海道東方沖地震(M8.2)が発生している。東北地方ではM7.3を超える地震は発生していない。
- Kita et al.(2010)によると、北海道と東北地方では、海洋プレートの応力中立面の位置が有意に異なっている。応力中立面が、北海道では海洋プレート表面から深さ9km付近にあるのに対し、東北地方では深さ21km付近にある。北海道は過去に大地震が発生した下面の領域が大きい。
- この応力中立面の位置が異なる原因は、北海道下で太平洋プレートが斜め沈み込みをしていることが要因として推定される。
- 地震本部(2013)では、北海道の領域に、沈み込んだプレート内地震のやや浅い地震(M8程度)とやや深い地震(M7.5程度)を固有地震として想定している。

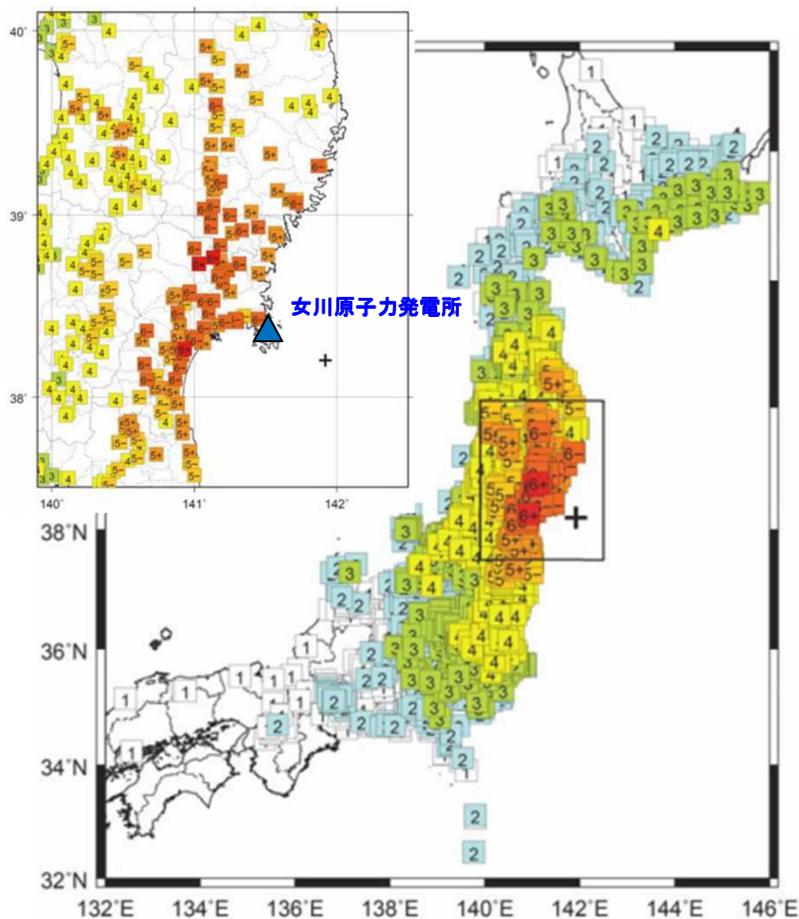


以上を踏まえ、検討用地震の選定にあたっては、敷地が位置する東北地方の領域と北海道の領域とは区分して考える。

2. 検討用地震の選定

2.3 東北地方の海洋プレート内地震 4.7地震

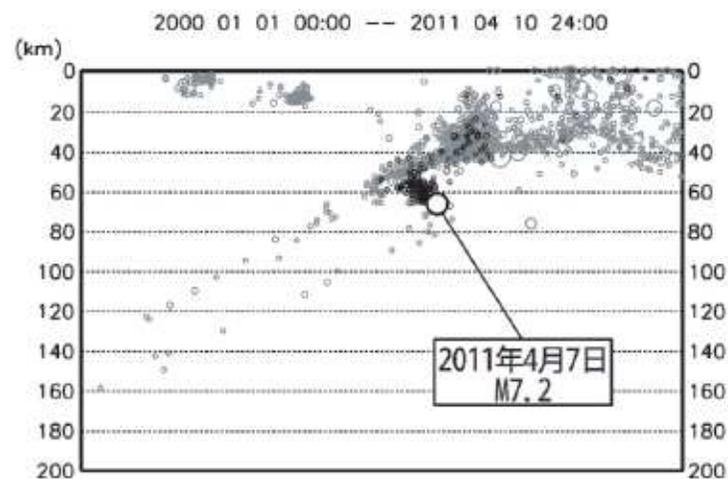
■4.7地震 二重深発地震上面(DC型)



震度分布図(気象庁(2011a)に一部加筆)

地震諸元

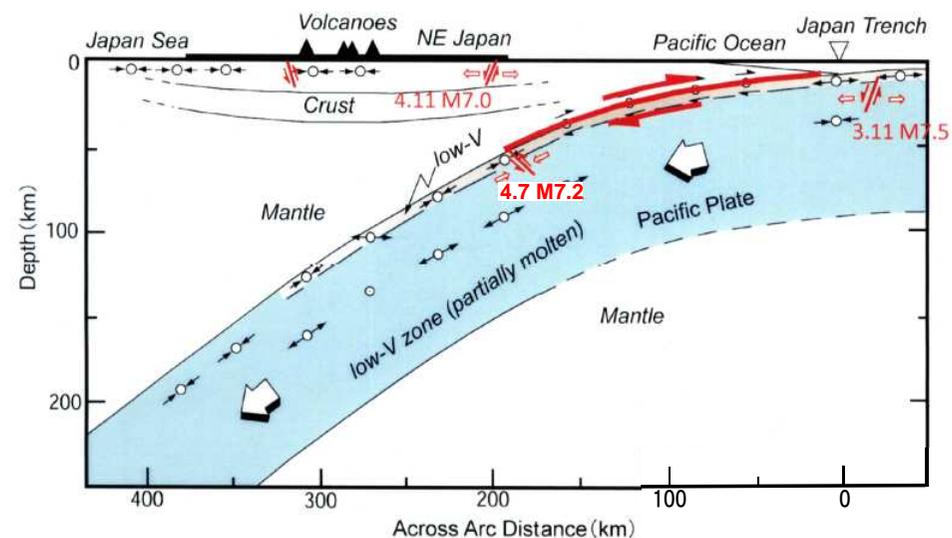
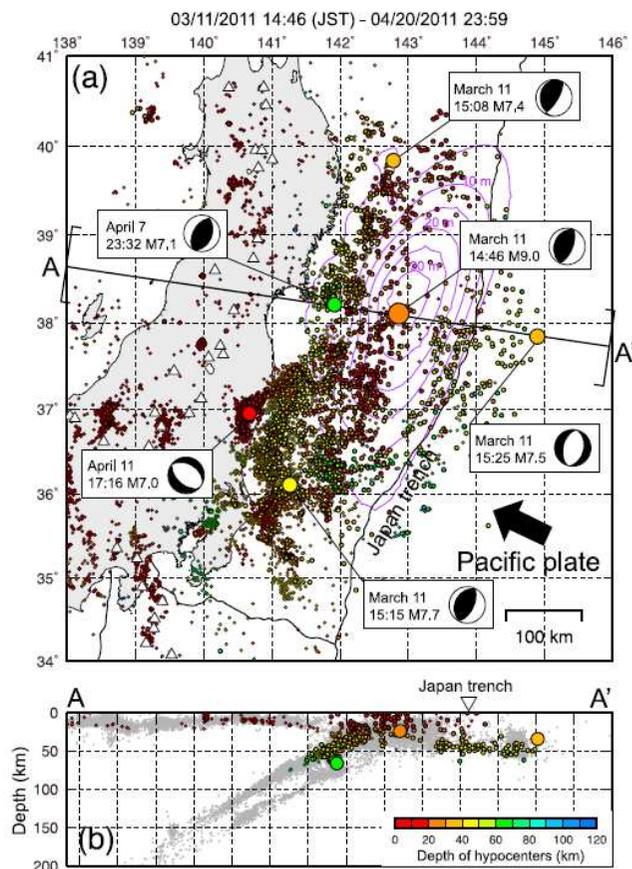
発生日時	2011年4月7日23時32分
震央地	宮城県沖
地震規模	M7.2
震央位置	東経 141° 55.21' 北緯 38° 12.25'
震源深さ	66km
女川発電所との距離	震央距離 43km

2011年4月7日宮城県沖の地震の地震活動
(2011年4月7日～4月10日の地震を濃く表示, 気象庁(2012))

2. 検討用地震の選定

2.3 東北地方の海洋プレート内地震 3.11地震と4.7地震の関係

■ Nakajima et al.(2011)による知見



東北地方の島弧横断鉛直断面模式図(Hasegawa et al.(1994)に一部加筆。)
(3.11地震本震, 余震, 誘発地震の断面図を赤線で示す。)

2011年東北地方太平洋沖地震による大きなすべりに伴いプレート上面の応力が増加

2011年東北地方太平洋沖地震の本震・余震・誘発地震の震源分布(Nakajima et al.(2011))

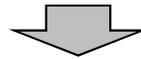
- 2011年4月7日に発生したM7.2の宮城県沖地震(左図中の緑丸)は、メカニズム解と余震分布から、太平洋プレート内の二重深発地震面の上面から面間にかけて広がる海側に傾斜した断層面を持つ海洋プレート内地震である。
- 上面の地震に特徴的なP軸が、プレートの傾斜方向に向くDown-dip compression型のメカニズム解を持つ。
- プレート境界に沿う本震の大きなすべりに伴ってせん断応力が増加したために誘発されて発生したと推定される。

2. 検討用地震の選定

2.3 東北地方の海洋プレート内地震 4.7地震に関する知見(1)

■ Ohta et al.(2011)による知見

- ・GPSデータに基づき4.7地震の断層モデルの推定を行っている。
- ・4.7地震の震源(破壊開始点)は、DCとDEの中立面付近(Kita et al.(2010))にある。



- ・4.7地震の破壊は、プレート内の応力中立面を大きく超えて拡大したものではない。

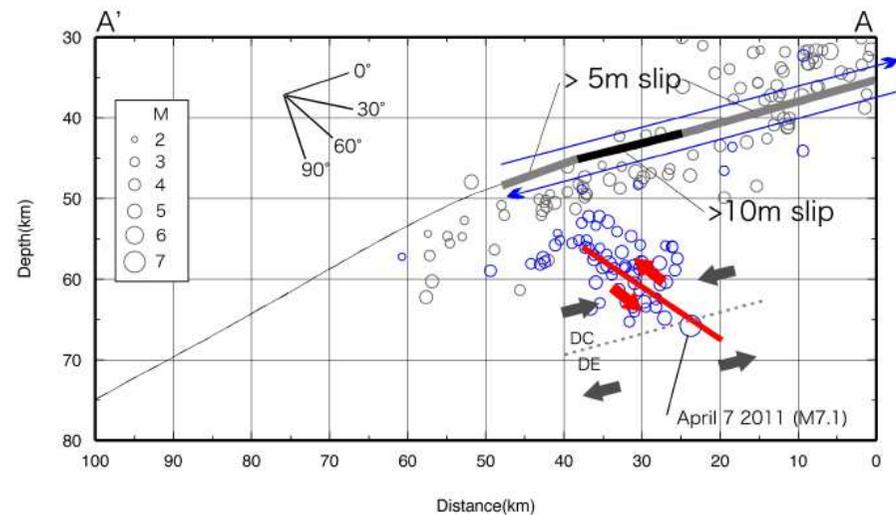
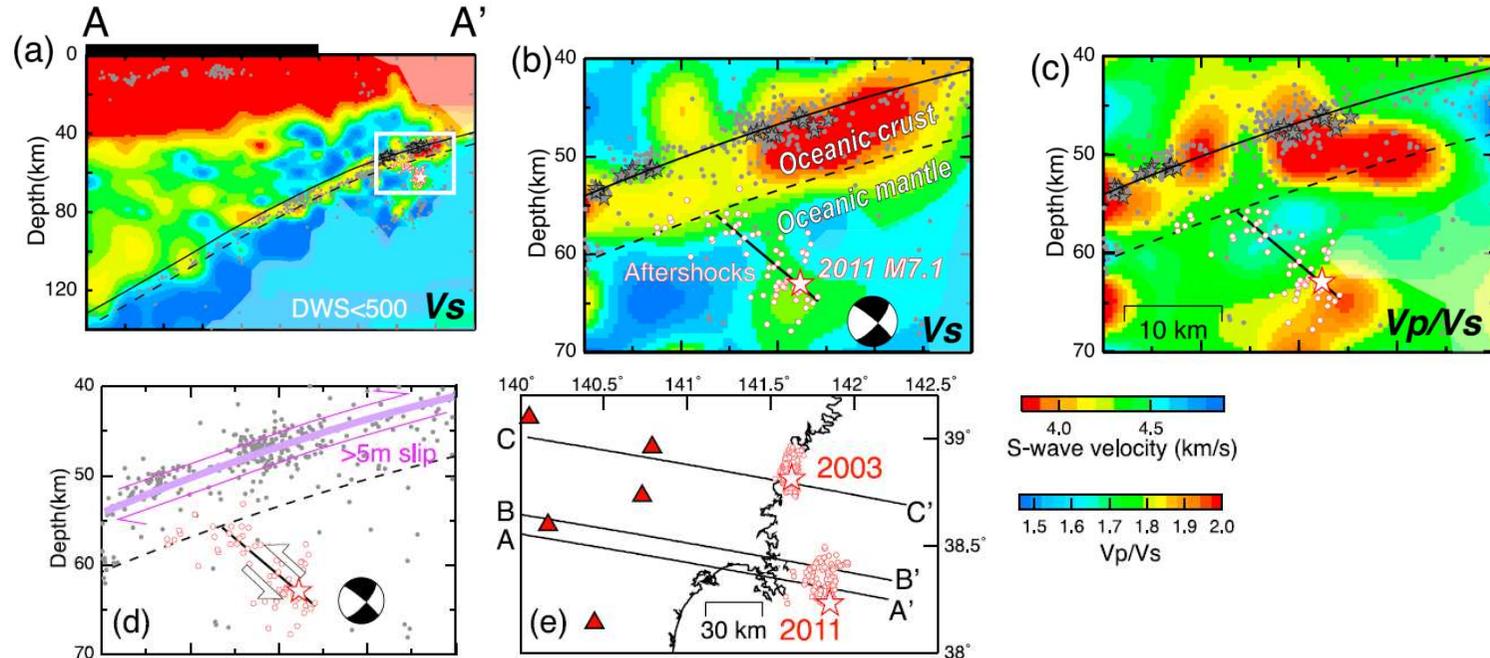


Fig. 4. Location of the estimated fault plane and aftershocks of the $M 9.0$ and $M 7.1$ earthquakes. Along the cross-section is shown by line A–A' in Fig. 3 (a). Small black circles and blue circles represent the aftershocks determined by the JMA between 11 March and 10 April, 2011, and between the 7 April earthquake and 10 April, 2011, respectively. The red thick line denotes the location of the estimated fault plane of the $M 7.1$ event. The black and gray thick lines along the Pacific plate surface denote portions of the fault plane having 10-m- and 5-m-fault slips (Inuma *et al.*, 2011), respectively. The blue and red arrows denote the slip directions of the $M 9$ earthquake and the $M 7.1$, April 7, event, respectively. The gray arrows illustrate the background stress field in the subducting plate. The gray dashed line indicates the neutral stress plane by Kita *et al.* (2010). The protractor indicates the angle from the subducting plate interface.

2. 検討用地震の選定

2.3 東北地方の海洋プレート内地震 4.7地震に関する知見(2)

■ Nakajima et al.(2011)による知見



4.7地震の震源域周辺のS波速度構造等の鉛直分布図(Nakajima et al.(2011))

白丸は再決定した余震。黒の太線はメカニズム解から推定した断層面。黒実線はプレート境界。破線は海洋プレートモホ面。

【Nakajima et al.(2011)】

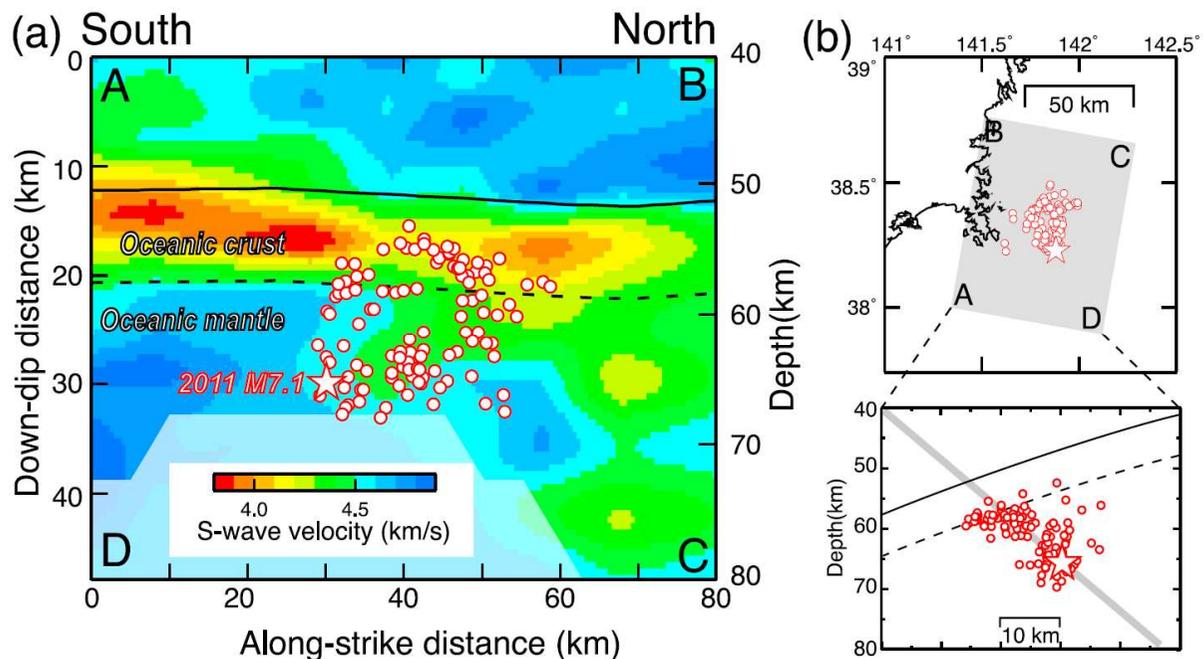
- ・M7.1※の地震の震源域の詳細な速度構造を推定したところ、海洋性マントルが低速度になっている領域で余震が発生している。M7.1の地震は海洋性マントル最上部の低速度域内で発生したことを示している。
- ・余震の並びとプレート境界とのなす角は約60度であり、アウターライズで生成された含水化した正断層が再活動して、M7.1の地震を発生させたことが示唆される。

※4.7地震の気象庁暫定値

2. 検討用地震の選定

2.3 東北地方の海洋プレート内地震 4.7地震に関する知見(3)

■ Nakajima et al.(2011)による知見



4.7地震の震源域周辺のS波速度構造の南北鉛直分布図(Nakajima et al.(2011))

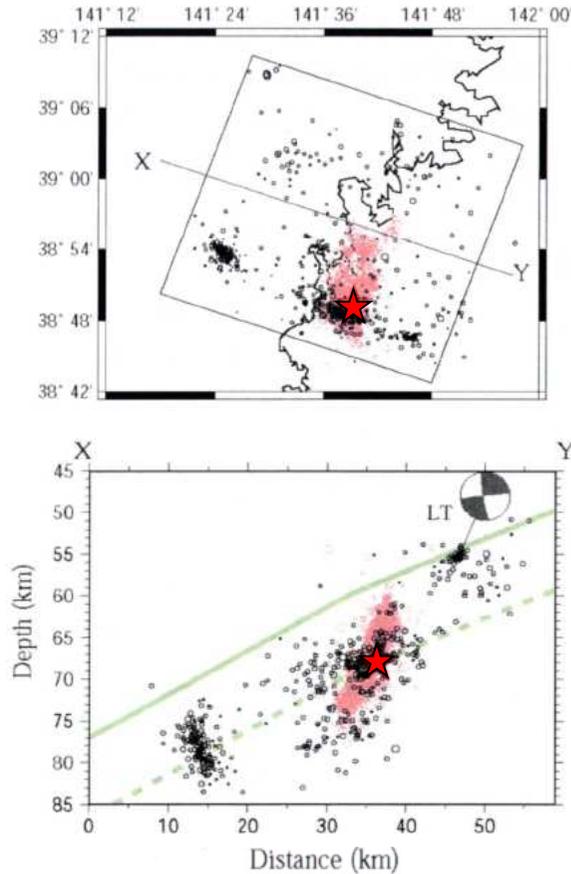
白丸は再決定した余震。黒実線はプレート境界。破線は海洋プレートモホ面。

4.7地震の断層面に沿ったS波速度分布から、スラブマントル内の低速度域の拡がり、余震の分布から推定される断層面の拡がりに対応している。

2. 検討用地震の選定

2.3 東北地方の海洋プレート内地震 2003年宮城県沖地震との比較(1)

■2003年宮城県沖の地震(M7.1)と4.7地震の比較

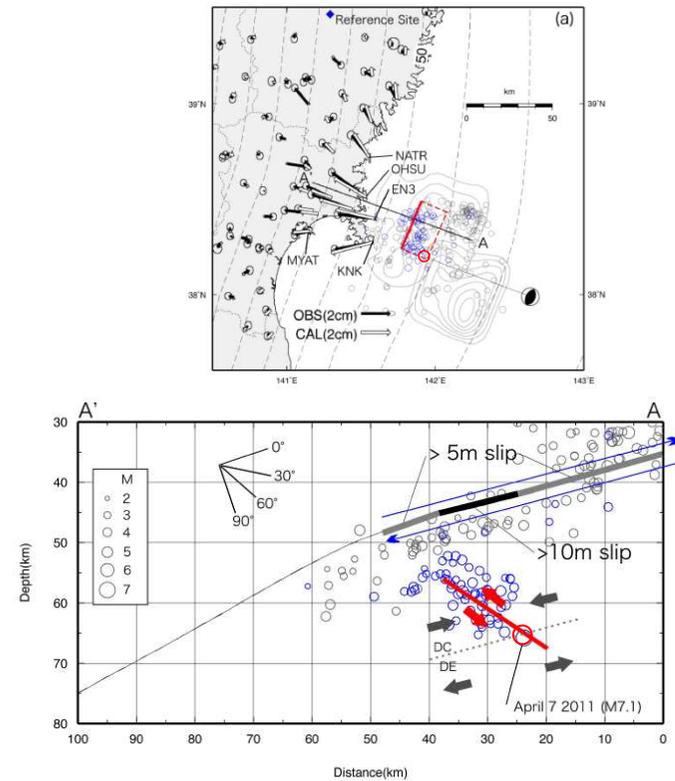


2003年宮城県沖の地震の震源(迫田ほか(2004))

【凡例】★:2003年宮城県沖地震

○:2003年地震の余震分布

○:1997年から2003年地震直前までの分布



4.7地震の震源(Ohta et al.(2011))

【凡例】□:推定された断層面

○:2011年3月11日~4月10日までの地震の分布

○:2011年4月7日宮城県沖の地震(4.7地震)

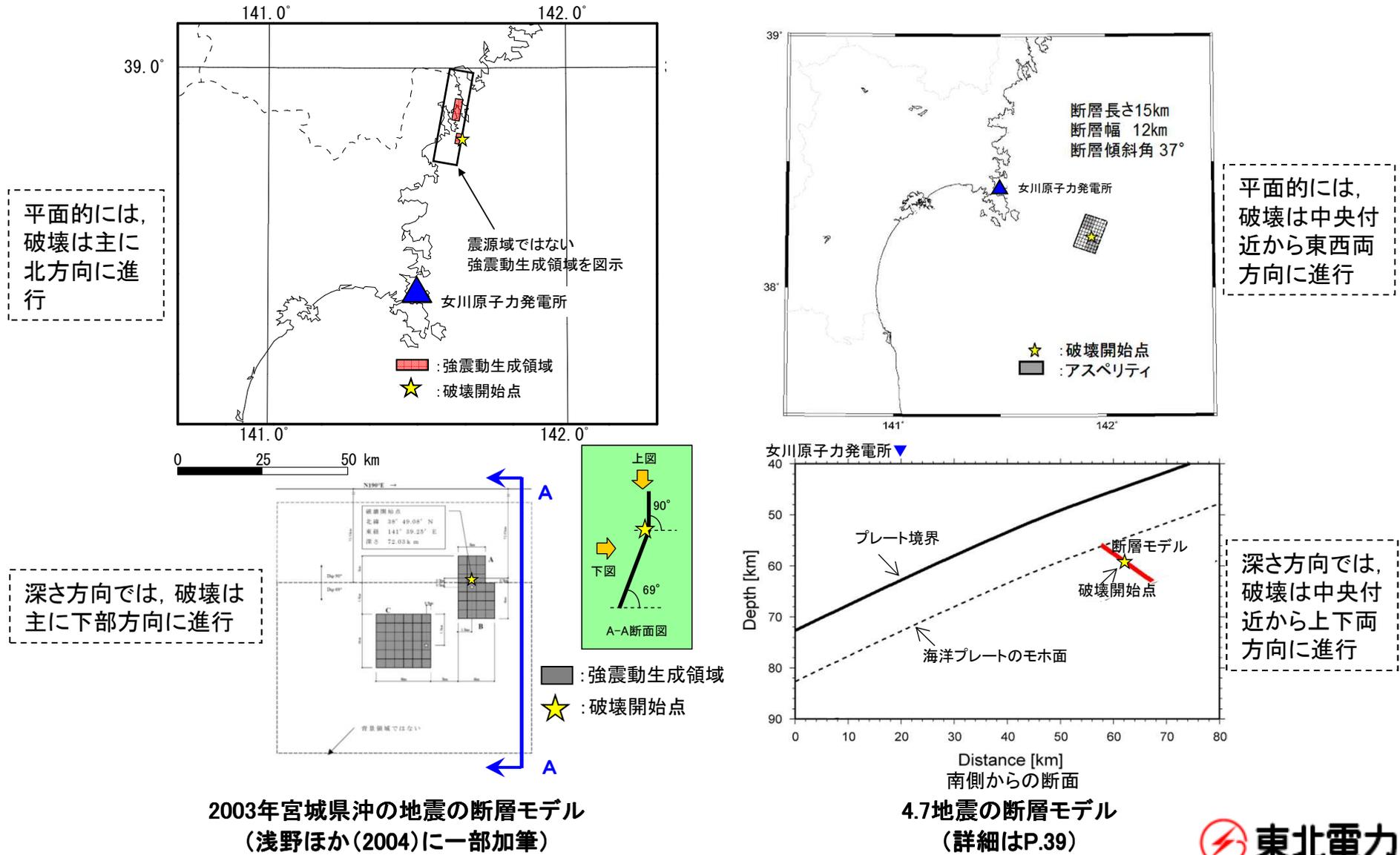
○:2011年4月7日~4月10日までの4.7地震の余震の分布

- ・2003年の地震は、海洋プレートモホ面付近から破壊が開始し、海洋マントルと海洋地殻に破壊が進行したと考えられる。
- ・4.7地震は、海洋マントル内で破壊が開始し、海洋プレートモホ面へ向かって破壊が進行したと考えられる。

2. 検討用地震の選定

2.3 東北地方の海洋プレート内地震 2003年宮城県沖地震との比較(2)

■2003年宮城県沖の地震(M7.1)と4.7地震の比較:シミュレーションに用いた断層モデル

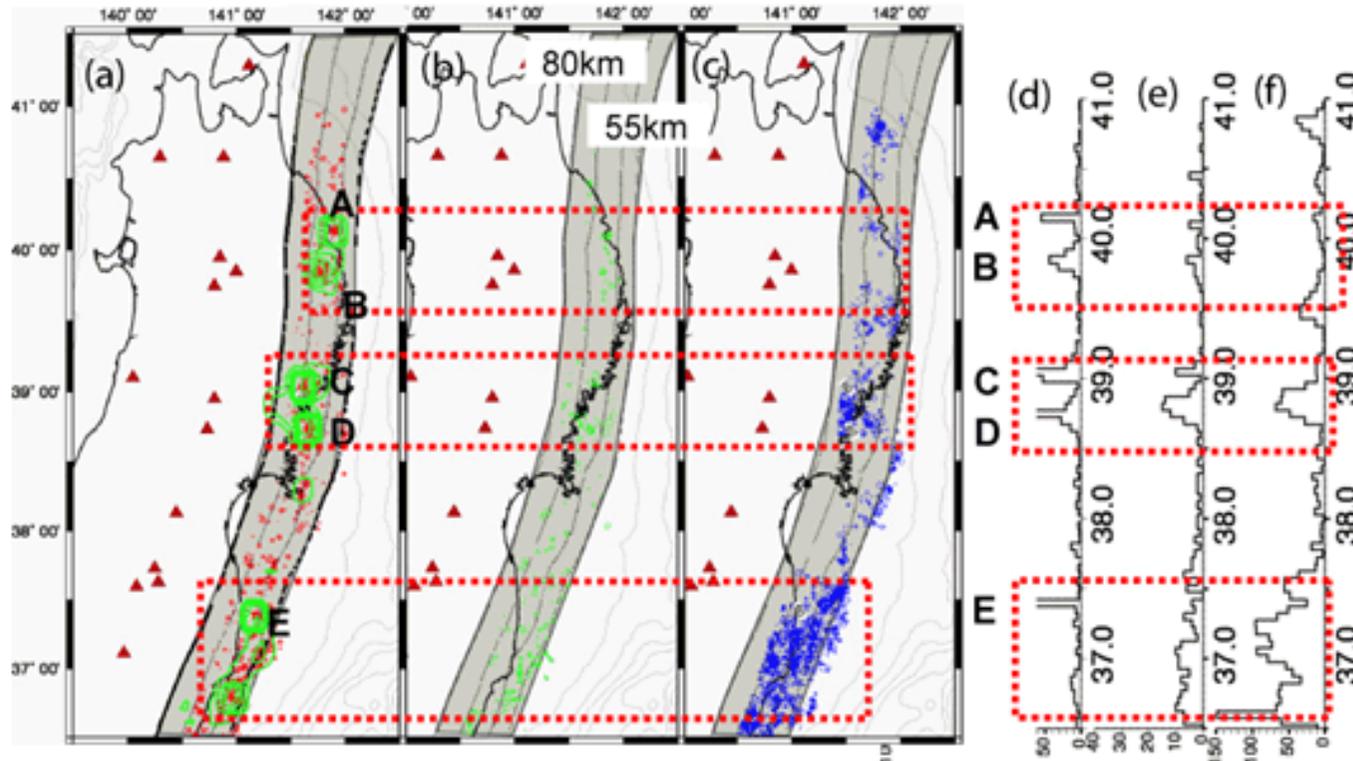


2. 検討用地震の選定

2.3 東北地方の海洋プレート内地震 2003年宮城県沖地震との比較(3)

■2003年宮城県沖地震のテクトニクス背景

- ・二重深発地震面上面の深さ60~90キロメートルに見られる上面地震帯およびその周辺の詳細な震源分布から、上面地震帯は震源が空間的に一様に分布する上部(上部地殻に対応する領域)と、非一様にクラスター状に分布する下部(下部地殻からマントル最上部)とに分かれること、さらに二重深発地震面の上面および下面の間に発生する地震(面間地震)が存在すること、これらの上面下部・面間・下面の震央分布を比較すると、図に示すように空間的にお互いによく対応していることを指摘している。(Kita et al.(2007))
- ・2003年宮城県沖の地震の余震域は、上面下部・面間・下面の分布して領域と対応してる。



(a)上面下部, (b)面間および(c)下面の地震の震央分布

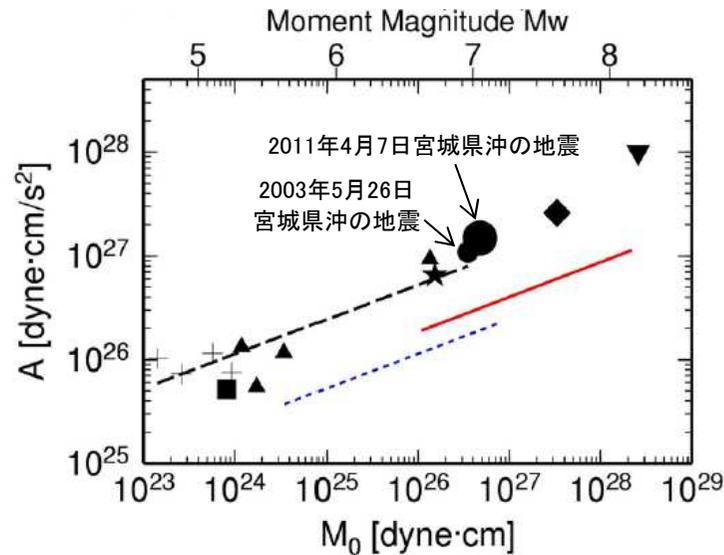
A~Eは上面下部に見られる顕著な地震クラスターを示す。(d)上面下部、(e)面間および(f)下面の地震の緯度別頻度分布。

2. 検討用地震の選定

2.3 東北地方の海洋プレート内地震 2003年宮城県沖地震との比較(4)

■4.7地震の短周期レベル

- 地殻内地震の平均(壇・他,2001)
- 太平洋プレートのプレート境界地震の平均(佐藤,2010)
- 宮城県沖と福島県沖のスラブ内地震の平均(佐藤,2004)
- 2001年静岡県の地震(佐藤,2003)
- ★ 2001年芸予地震(片岡・他,2006)
- ▼ 1994年北海道東方沖地震(片岡・他,2006)
- ◆ 1993年釧路沖地震(片岡・他,2006)
- ▲ 福島県沖のスラブ内地震(佐藤・他,2000)
- + 宮城県沖のスラブ内地震(佐藤,2004)
- 2003年宮城県沖地震(佐藤,2004)
- 2011年4月7日の宮城県沖地震:EQ0(本研究)



4.7地震の短周期レベルAは、同じ太平洋プレート上面(DC型)で発生した2003年5月26日宮城県沖の地震と比較し大きい*。

*4.7地震の短周期レベルAは、2003年5月26日宮城県沖の地震(M7.1)の短周期レベルAの約1.4倍。

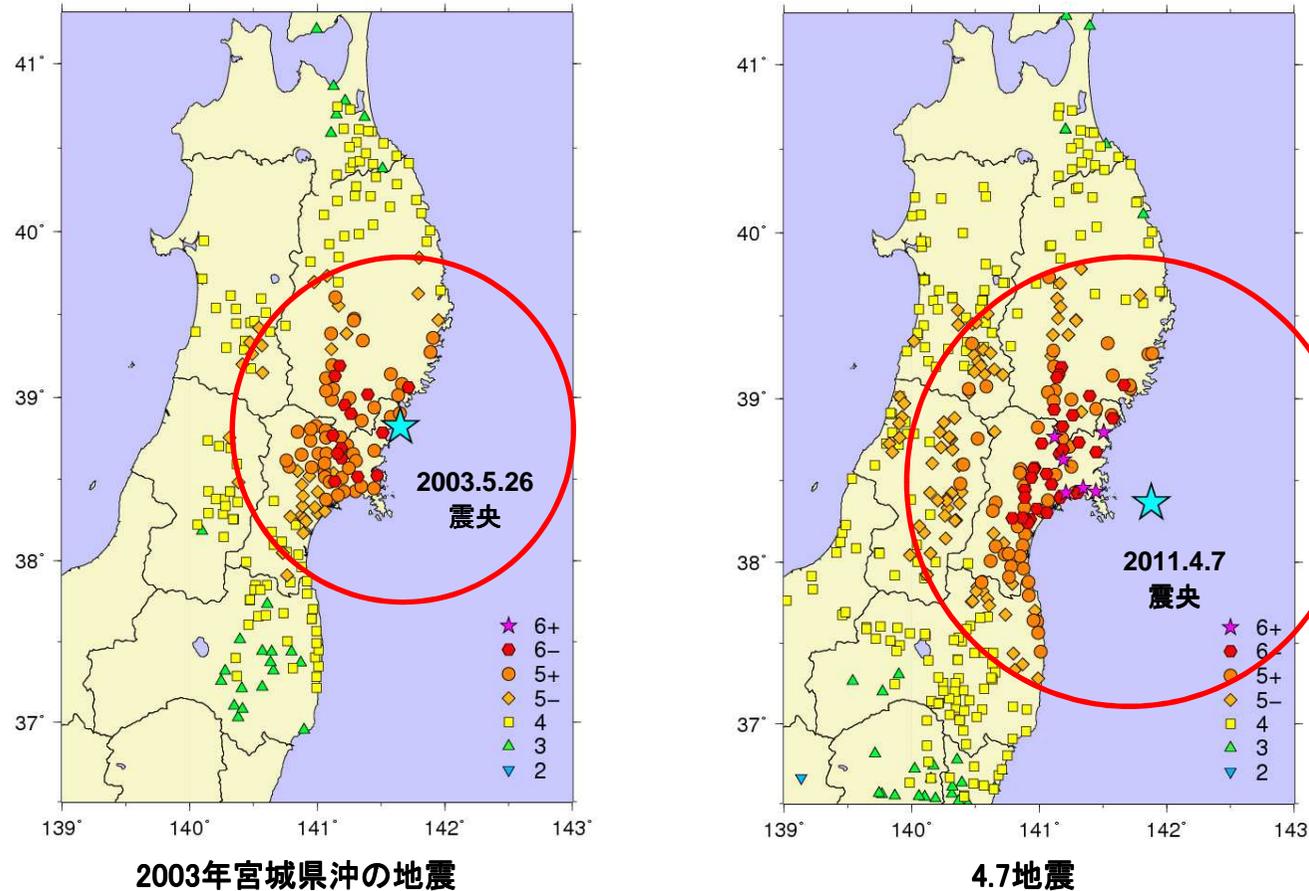
なお、規模の差を差し引いて求めた短周期レベルA(短周期レベルAが $M_0^{1/3}$ に比例すると仮定して算定)の差は約1.2倍となる。

海洋プレート内地震の地震モーメントと短周期レベルの関係(佐藤(2012))に一部加筆)

2. 検討用地震の選定

2.3 東北地方の海洋プレート内地震 2003年宮城県沖地震との比較(5)

■2003年宮城県沖の地震(M7.1)と4.7地震の比較: 神田ほか(2013)



相対震度*で補正後の震度分布(赤円はおおよそ震度5弱以上の領域を示す。)

震度6以上の観測点は4.7地震の方が多い。また、4.7地震の震度6以上の分布は北側の方が南側に比べて多い。

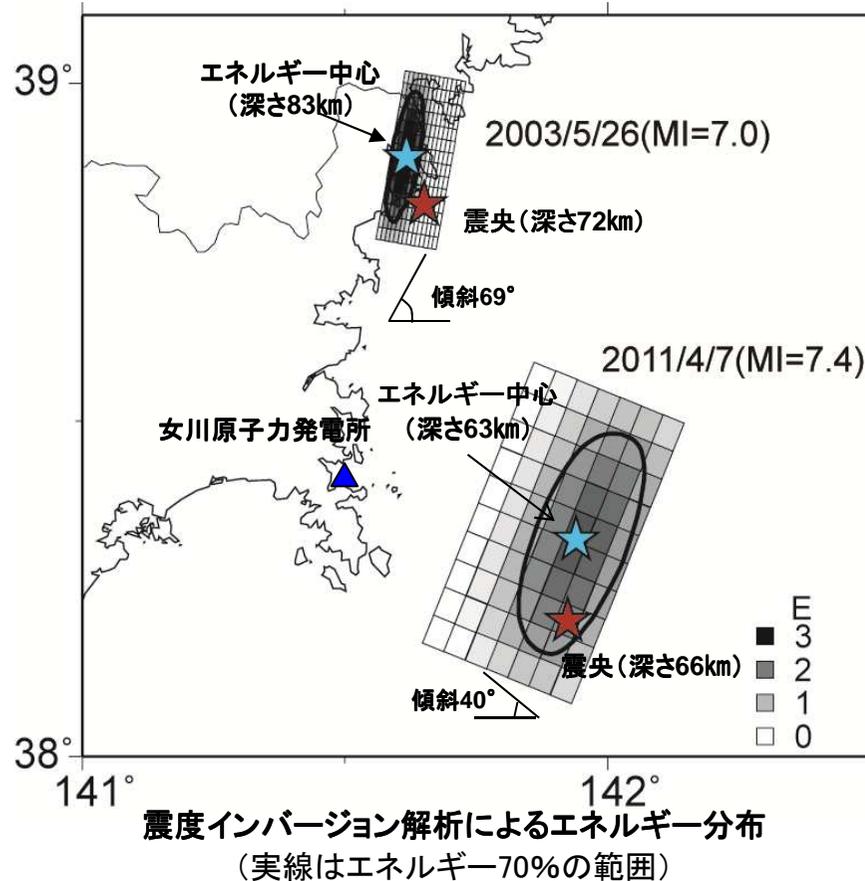
※相対震度:各地点の揺れやすさを示す指標。最大震度5弱以上、宮城県で震度4以上を観測した地震により算定。

2. 検討用地震の選定

2.3 東北地方の海洋プレート内地震 2003年宮城県沖地震との比較(6)

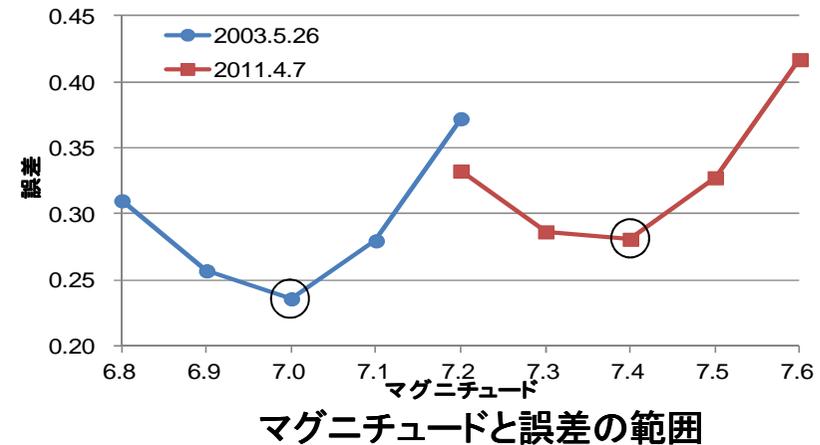
■2003年宮城県沖の地震(M7.1)と4.7地震の比較:神田ほか(2013)

・震度インバージョンによる比較



解析結果

	2003年5月26日宮城県沖	2011年4月7日宮城県沖
地震規模	$M_I=7.0$ (参考) $M_J=7.1$	$M_I=7.4$ (参考) $M_J=7.2$
エネルギー中心 震央位置 (女川からの距離)	55km (参考)気象庁位置:48km	39km (参考)気象庁位置:43km
エネルギー中心 震源深さ	深さ83km (参考)気象庁深さ:72km	深さ63km (参考)気象庁深さ:66km



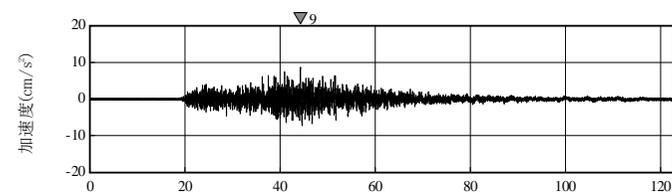
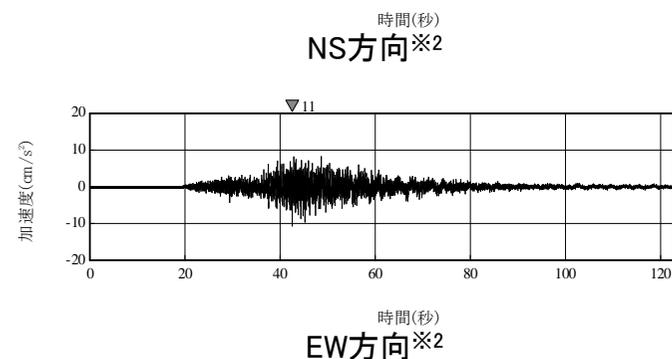
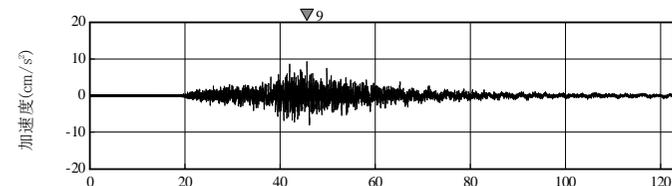
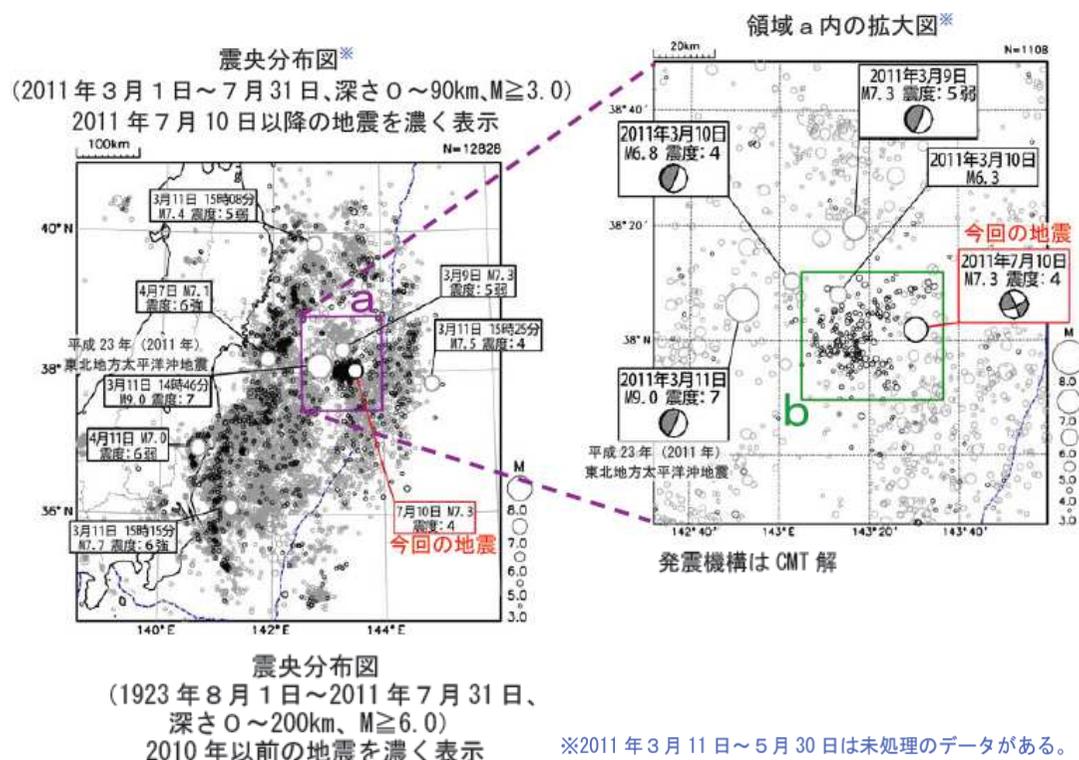
- ・震度インバージョン解析の結果, 2011年4月7日宮城県沖の地震の地震規模は, $M_I 7.4$ となり, $M_J 7.2$ に比べ大きく評価された。震源位置(エネルギー中心)は気象庁震源位置に対し北側(陸側)に評価され, 震源深さは気象庁の66kmに対し63kmと浅くなる評価となった。
- ・一方, 2003年5月26日宮城県沖の地震の地震規模は, $M_I 7.0$ となり, $M_J 7.1$ に比べ小さく評価された。

2. 検討用地震の選定

2.3 東北地方の海洋プレート内地震 その他の地震

■2011年7月10日三陸沖の地震 沈み込んだ海洋プレート内地震

- ・2011年7月10日に太平洋プレート内の日本海溝付近の浅い場所で地震が発生(M7.3, 震源深さ34km, 震央距離180km, 震源距離183km)している。地震規模としては, 東北地方の沈み込んだプレート内地震としては最大規模であった。
- ・敷地岩盤上部(O.P.*¹-8.6m)での観測記録の最大加速度は, 11cm/s²であり, この地震による影響は小さい。



敷地岩盤上部での観測記録

気象庁(2011b) 平成23年7月地震・火山月報(防災編)

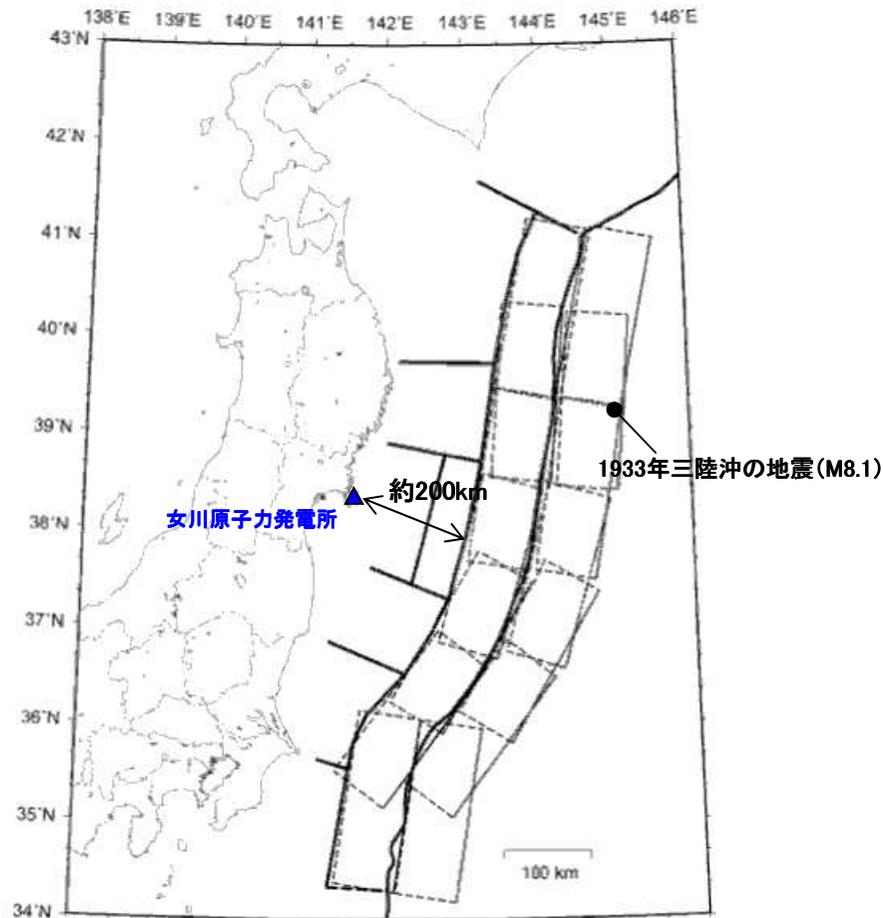
*¹ O.P.は女川原子力発電所工事用基準面(Onagawa peil)であり, O.P.±0m = T.P.(東京湾平均海面)-0.74m。

*² NS,EWは, プラントノースを基準として記載している。プラントノースは真北に対し, 反時計回りに38.909° の方向。

2. 検討用地震の選定

2.4 沈み込む海洋プレート内地震(正断層型)

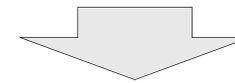
■沈み込む海洋プレート内地震(正断層型)の検討



海溝寄り (正断層)

太平洋プレートで発生する長期評価された地震のうち震源が特定されていない地震の断層面(地震本部(2013)に一部加筆)

・地震本部(2013)の確率論的評価では、正断層型の地震(M8.2)として三陸沖北部から房総沖の海溝寄りと海溝軸の東側に震源を想定。



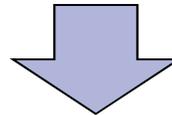
仮に、敷地に最も近い三陸沖に考慮したとしても、敷地までの距離および地震観測記録の特徴等を考慮すると敷地に与える影響は小さい。

2. 検討用地震の選定

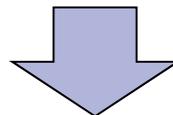
2.5 検討用地震の選定

■東北地方の海洋プレート内地震の特徴など

- 東北地方では、太平洋プレートの二重深発地震面のうち上面の地震活動(DC型)が優勢である。
- 東北地方で発生した上面で発生したDC型の最大の地震は4.7地震である。
- 4.7地震は、海洋マントル最上部の低速度域内で発生したと考えられる。
- 4.7地震の破壊は海洋マントル内で開始し、海洋プレートモホ面へ向かって破壊が進行したと考えられることから、破壊は敷地に向かう方向であった。
- 4.7地震の短周期レベルは、2003年宮城県沖の地震と比較して大きいものであった。
- 神田ほか(2013)の震度インバージョンでは、4.7地震の地震規模は $M_17.4$ となり、実際の規模より大きく評価される。
- 海溝付近の浅い場所で発生した2011年7月10日三陸沖のプレート内地震(M7.3)は、敷地への影響は小さかった。
- 沈み込む海洋プレート内地震(正断層型)については、敷地までの距離および地震観測記録の特徴等を考慮すると敷地に与える影響は小さい。



- ・東北地方では、4.7地震のような二重深発地震の上面の地震の活動が卓越しており、4.7地震は、その震源断層の位置からも敷地に最も影響が大きい地震であった。



検討用地震として、
「2011年4月7日宮城県沖型地震(4.7型地震)」を選定。

目次

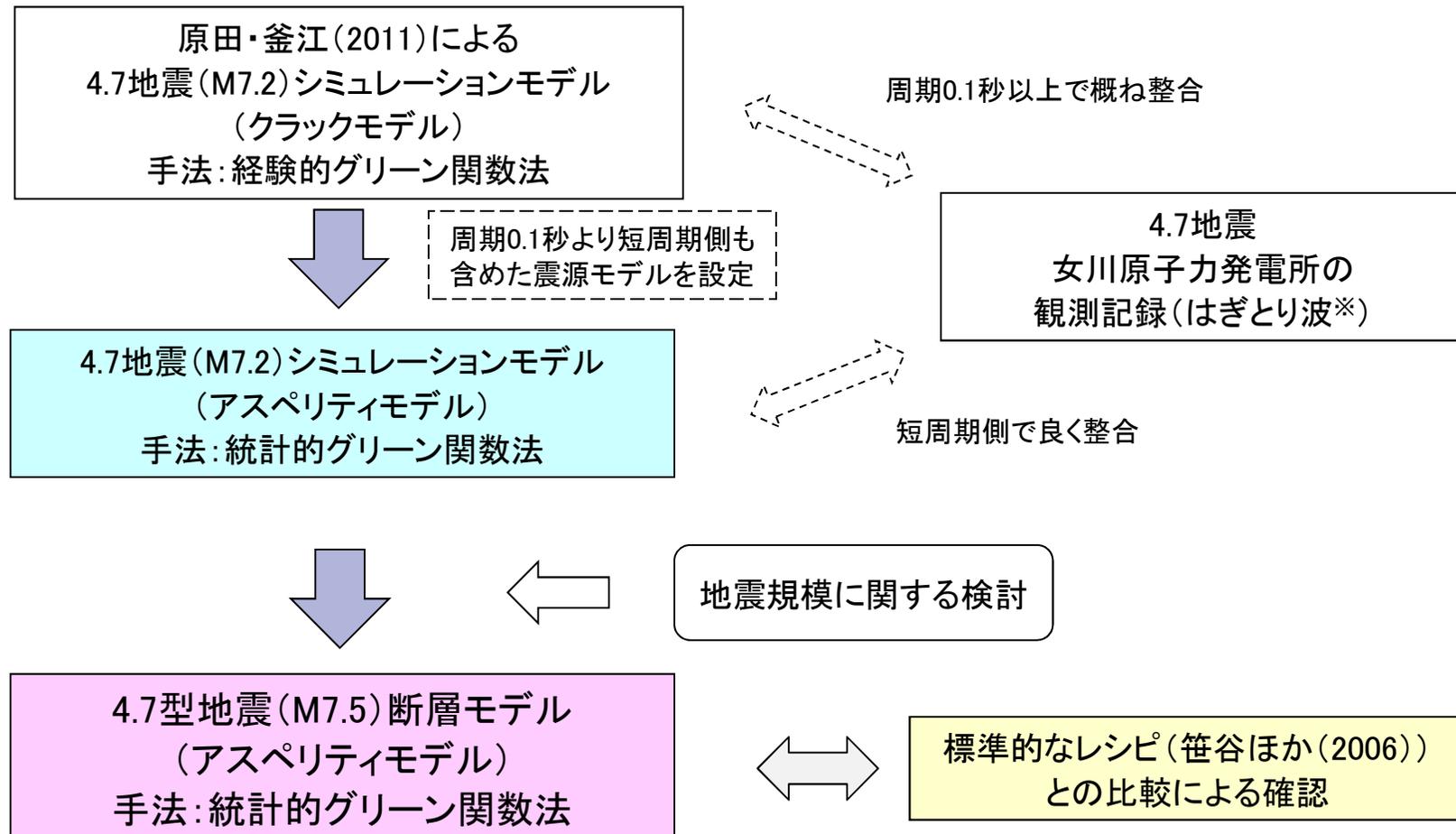
1. 世界の海洋プレート内地震
2. 検討用地震の選定
- 3. 検討用地震の地震動評価**
4. 基準地震動 S_s
5. まとめ

3. 検討用地震の地震動評価

3.1 検討用地震の地震動評価の考え方

■地震動評価の考え方

- ・検討用地震の地震動評価にあたり、4.7地震の地震動シミュレーション解析を行い、4.7地震の特徴を把握し地震動評価に反映する。



※4.7地震による敷地での岩盤上部(O.P.-8.6m)の観測記録について、表層の影響を除去した地震動。

詳細については、「資料1-2 女川原子力発電所 基準地震動の策定のうち海洋プレート内地震について(補足説明資料)」に示す。

3. 検討用地震の地震動評価

3.2 原田・釜江(2011)に基づく4.7地震(M7.2)シミュレーション(1)

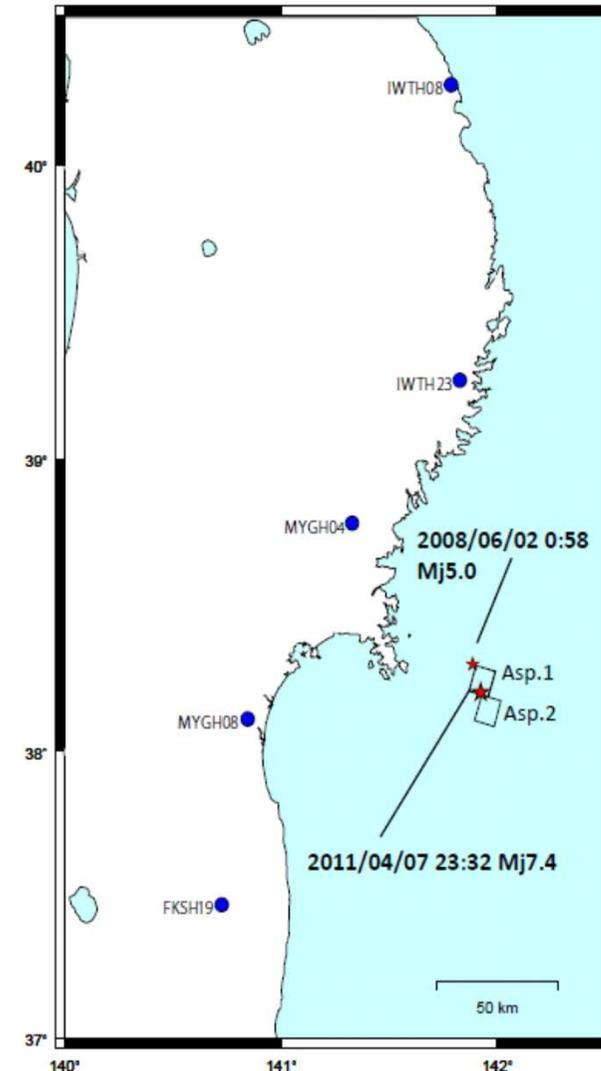
■原田・釜江(2011)の概要

- ・KiK-net観測点の記録を使用し, 経験的グリーン関数法によるアスペリティのみでのモデル化(クラックモデル)を行っている。
- ・震源モデルは, 北側と南側に強震動生成域を設定し, バイラテラルな破壊過程を考えることにより, 震源の北側の観測点(IWTH23やMYGH04)で見られる指向性パルスや継続時間が再現されているとしている。
- ・ただし, 合成が過大となる観測点もあり, 詳細な検討が必要であるとしている。

グリーン関数として使用した地震の震源パラメータ

Origin Time*	(JST)	2008/6/2 0:58
Latitude*	(deg.)	38.300
Longitude*	(deg.)	141.883
Depth*	(km)	50.0
Mj*		5.0
Mo**	(N·m)	1.46×10^{16}
$\Delta\sigma$	(MPa)	7.1
f_c	(Hz)	1.5
Strike/dip/rake**	(deg.)	20/75/87 212/16/101

*気象庁, **F-net

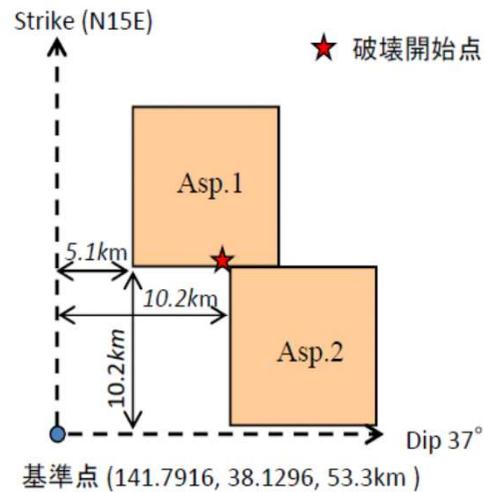


本震及びグリーン関数として使用した地震の震央位置, KiK-net観測点, 並びに強震動生成域の位置

3. 検討用地震の地震動評価

3.2 原田・釜江(2011)に基づく4.7地震(M7.2)シミュレーション(2)

原田・釜江モデルの震源パラメータ



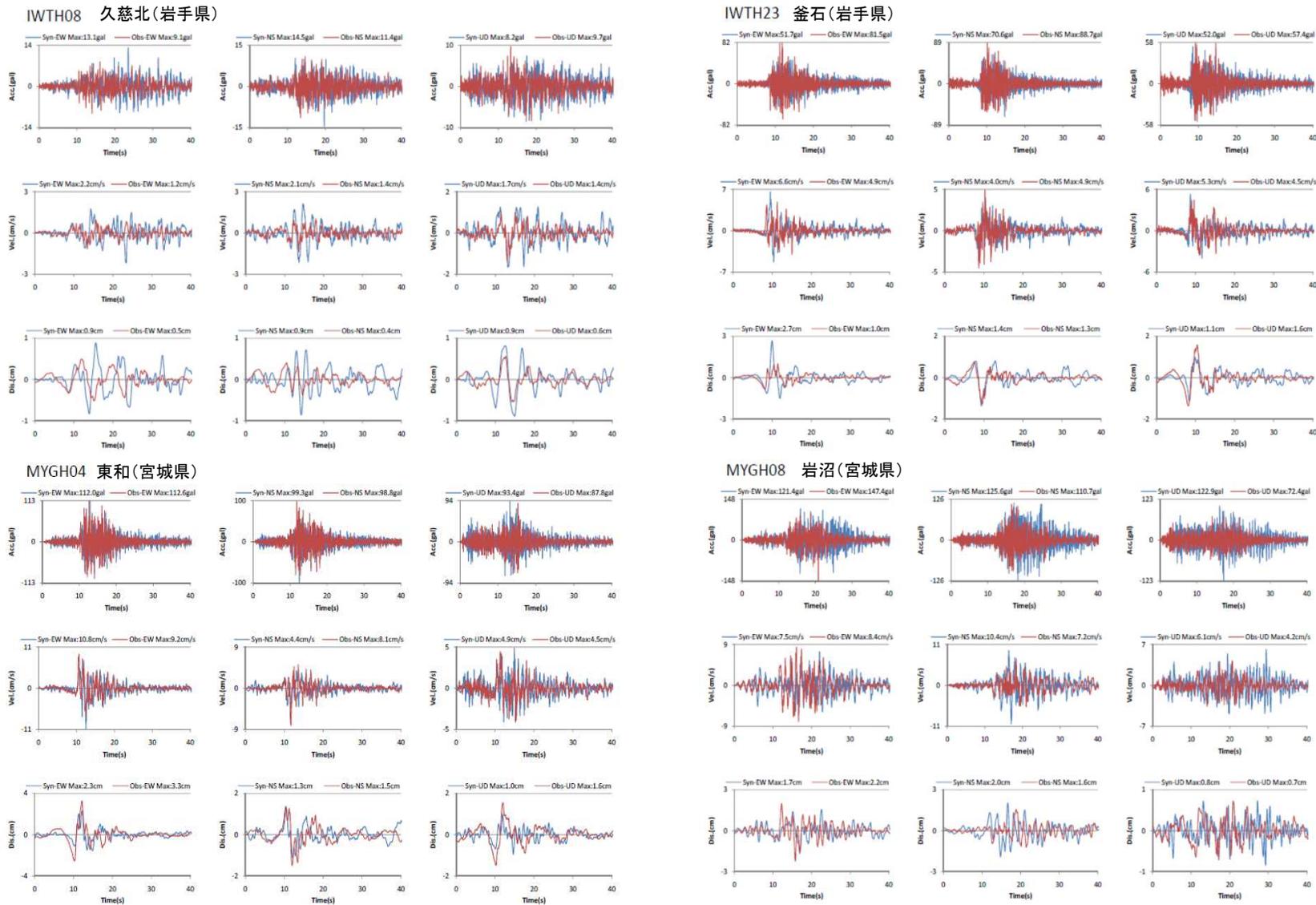
アスペリティが2つからなる震源モデル

		Asp1	Asp2
走向	(°)	15	15
傾斜角	(°)	37	37
面積	(km ²)	10.2 × 10.2	10.2 × 10.2
地震モーメント	(N・m)	3.2 × 10 ¹⁹	3.2 × 10 ¹⁹
応力降下量	(MPa)	70.6	70.6
ライズタイム	(s)	0.6	0.6
破壊開始時間	(s)	0.0	0.0
経験的グリーン関数 として用いた地震		2008/06/02 00:58 M5.0	2008/06/02 00:58 M5.0

(原田・釜江(2011)に一部修正)

3. 検討用地震の地震動評価

3.2 原田・釜江(2011)に基づく4.7地震(M7.2)シミュレーション(3)



KiK-net観測点の観測波形(赤線)とシミュレーション結果(青線) (原田・釜江(2011)に一部加筆)

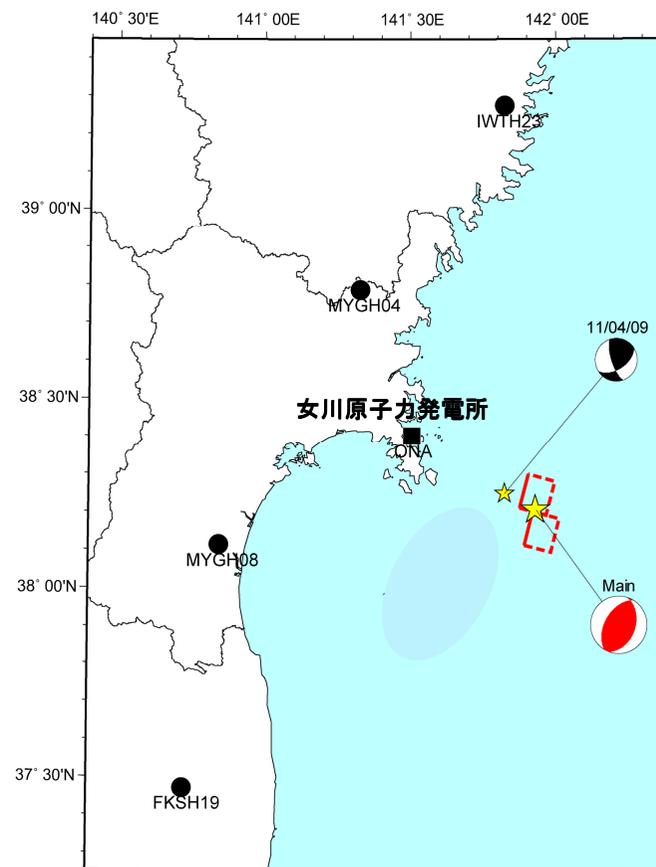
3.2 原田・釜江(2011)に基づく4.7地震(M7.2)シミュレーション(4)

■原田・釜江(2011)に基づく女川原子力発電所のシミュレーション解析は、経験的グリーン関数法により検討を行った。要素地震は、4.7地震の余震を用いる。

要素地震の諸元

年月日時分※1	2011. 4. 9 18:42
北緯 (°) ※1	38° 14.8′
東経 (°) ※1	141° 48.8′
深さ (km) ※1	58
M※1	5.4
M ₀ (Nm) ※2	1.21 × 10 ¹⁷

※1: 気象庁、※2: F-net



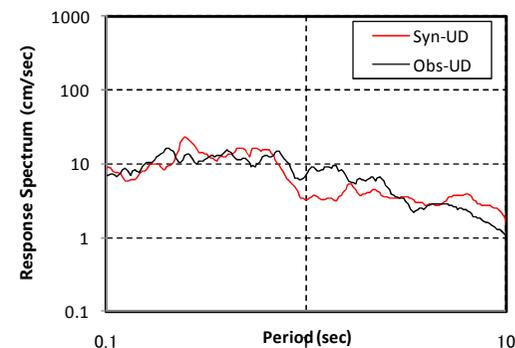
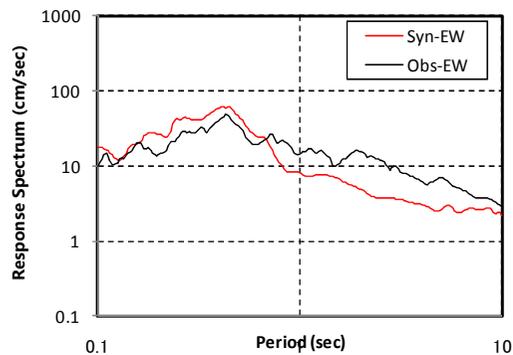
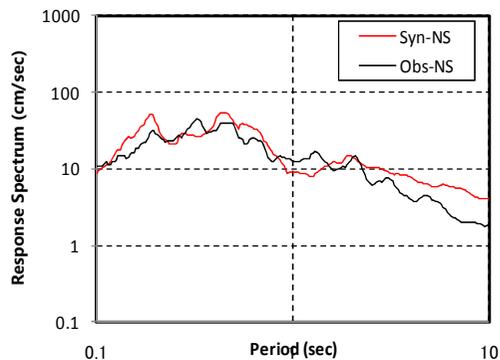
原田・釜江モデルの震源モデルと要素地震の位置図

3. 検討用地震の地震動評価

3.2 原田・釜江(2011)に基づく4.7地震(M7.2)シミュレーション(5)

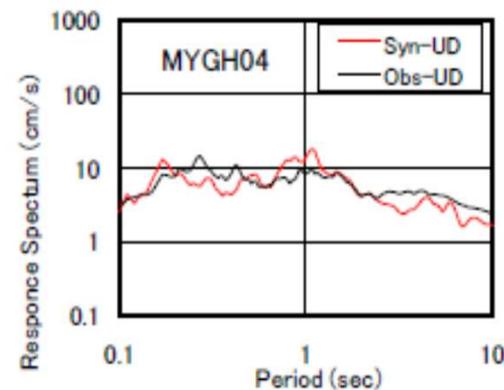
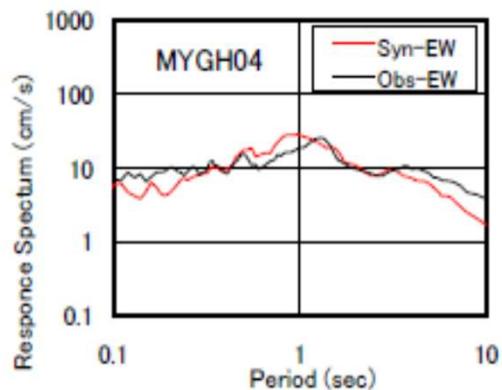
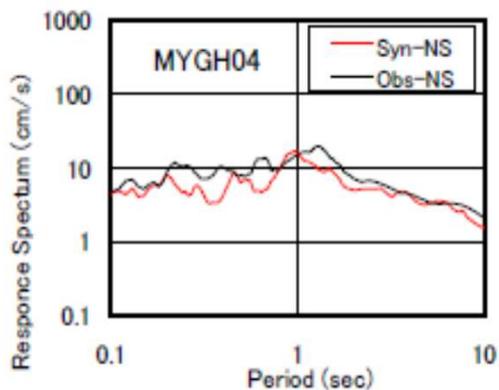
◇女川原子力発電所の応答スペクトル(h=5%)

岩盤上部の
観測点
(O.P.-8.6m)



◇(参考)周辺KiK-net観測点の応答スペクトル(h=5%) 【原田・釜江(2011)より抜粋】

KiK-net
MYGH04
(東和)
観測点



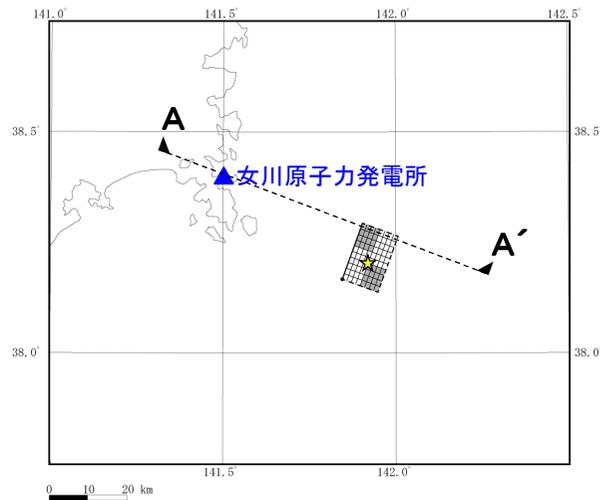
- ・シミュレーション結果は、観測記録の応答スペクトルを概ね再現している。
- ・短周期成分(0.1秒より短周期側)を含めて観測記録と整合する断層モデルが必要。

3. 検討用地震の地震動評価

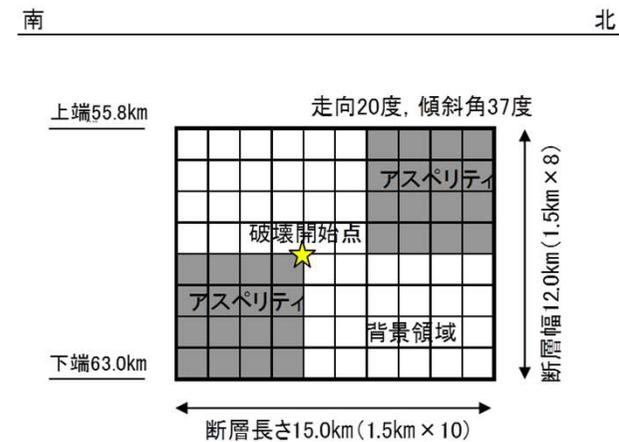
3.3 4.7地震のシミュレーション(1)

■震源断層モデルの設定

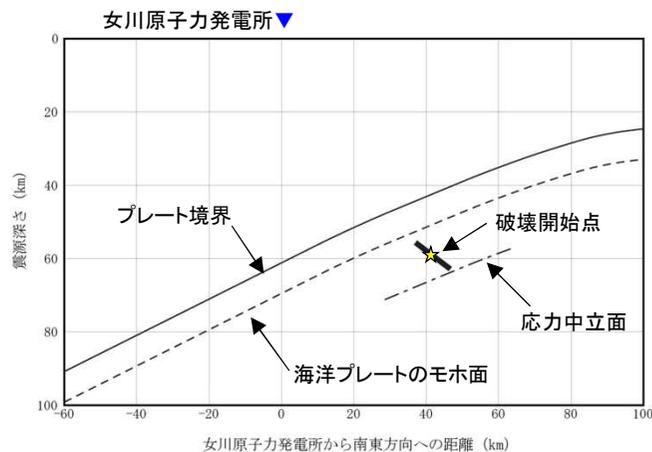
・原田・釜江(2011)のクラックモデルを参考に、アスペリティと背景領域も持つアスペリティモデルを新たに設定。



断層モデル平面図



展開図



A-A'断面図

断層位置の設定の考え方

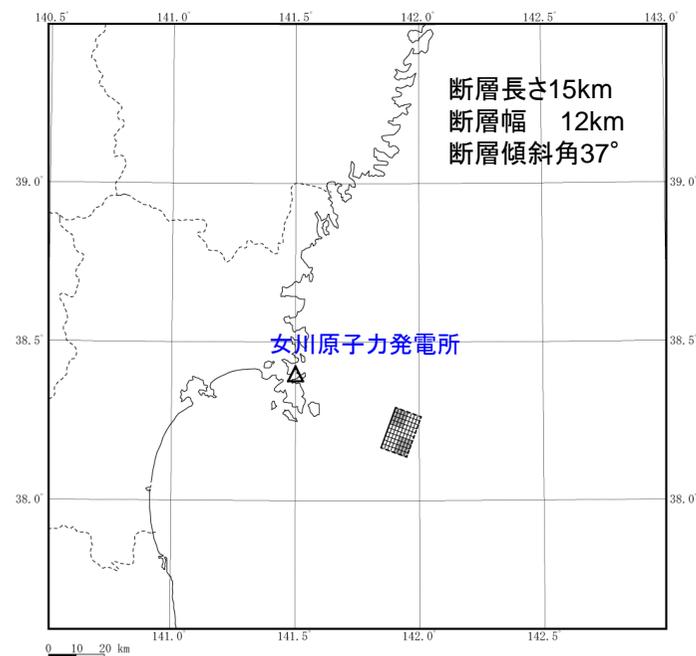
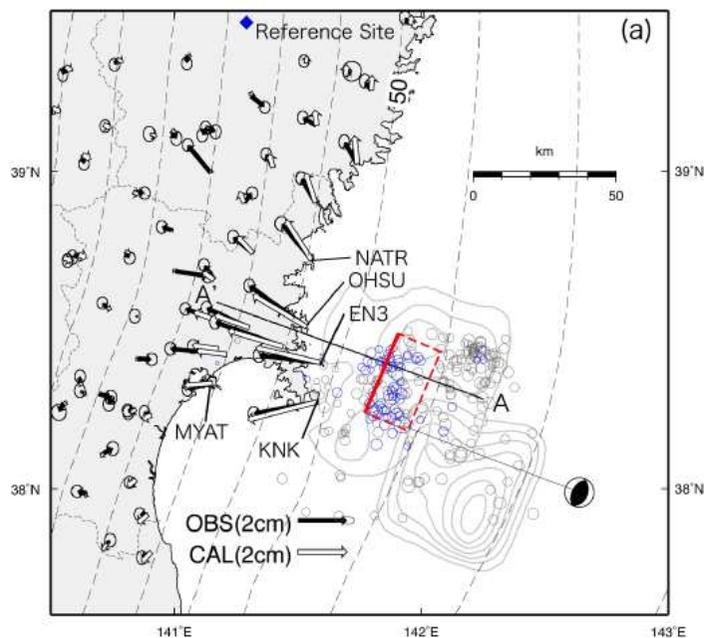
- ① 4.7地震シミュレーションモデルの基準となる位置を原田・釜江(2011)破壊開始点とする。
- ② アスペリティの個数, 配置を原田・釜江(2011)を参考に設定。
- ③ 断層モデルの傾斜角は原田・釜江(2011)と同様に設定し, 断層の上端は, 海洋プレートモホ面付近とし, 下端はプレートの応力中立面付近に設定。

3. 検討用地震の地震動評価

3.3 4.7地震のシミュレーション(2)

■ 測地データに基づく断層モデルとの比較

- ・4.7地震モデルの巨視的面はGPSデータに基づき求められたOhta et al.(2011)の断層モデルと比較すると小さいモデルとなっている。



4.7地震シミュレーションのモデル平面図

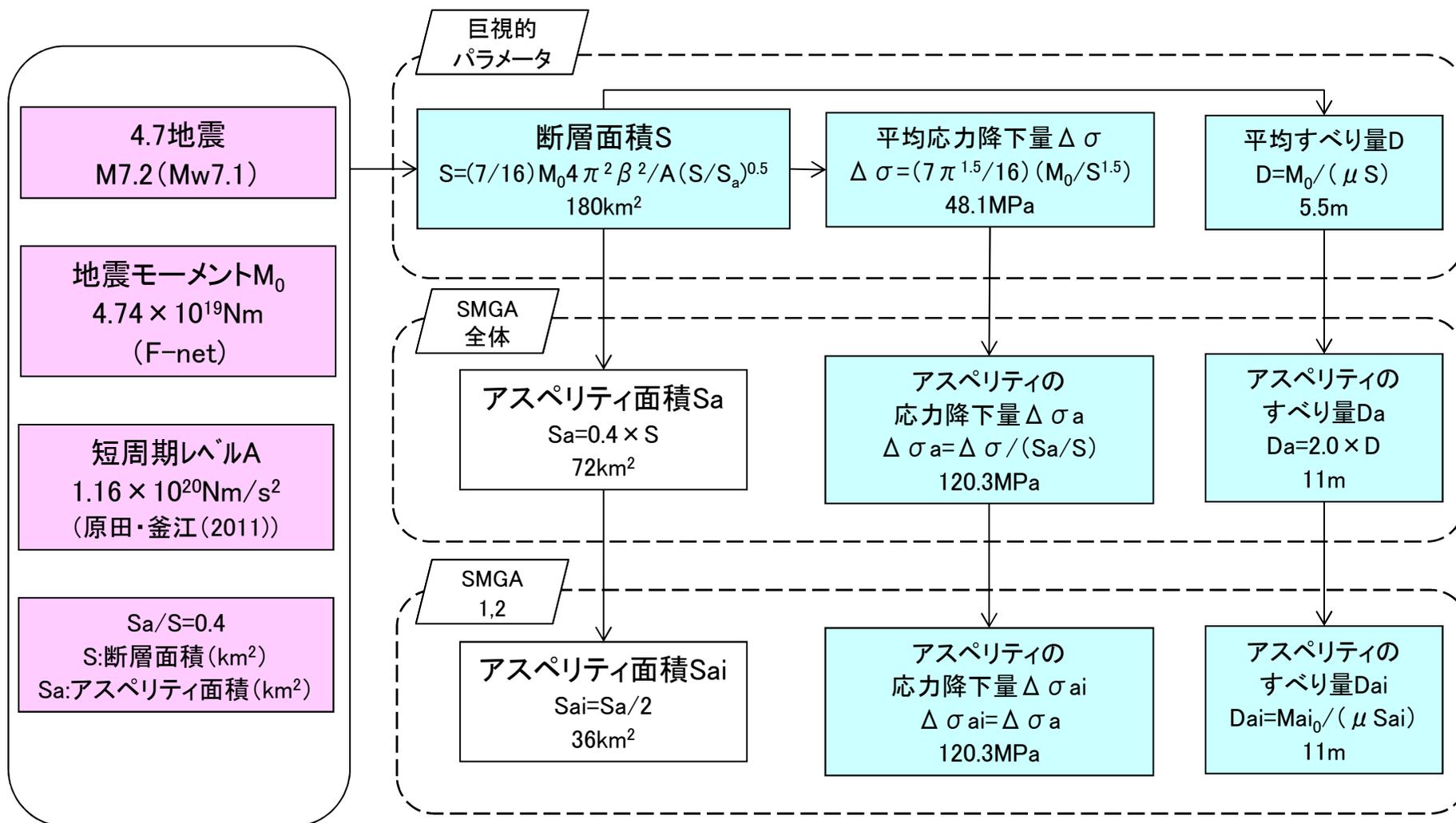
Table 1. Estimated fault parameters of the optimal rectangular fault. Longitude, latitude, and depth denote the location of the upper-left corner of a rectangular fault plane, looking down from the eastward side.

Longitude (degree)	Latitude (degree)	Depth (km)	Length (km)	Width (km)	Strike (degree)	Dip (degree)	Rake (degree)	Slip (m)
141.773	38.242	56.1	30.1	20.0	23.0	35.3	97.9	2.4

GPSデータによる断層モデル(Ohta et al.(2011))

3.3 4.7地震のシミュレーション(2)

■断層パラメータの設定フロー



: 与条件の項目
 : 標準的なレシピに基づき与条件から設定

3. 検討用地震の地震動評価

3.3 4.7地震のシミュレーション(3)

■断層パラメータ(その1)

断層パラメータ		設定方法	設定値
断層 面 全 体	基準点	E(° ' ") N(° ' ")	東北大学(2011)等を参考に設定 経度141° 54' 13" 緯度 38° 17' 39"
	走向	θ (°)	東北大学(2011)等を参考に設定 20
	傾斜角	δ (°)	原田・釜江(2011)を参考に設定 37
	断層長さ	L(km)	L=S/W 15
	断層幅	W(km)	東北大学(2011)等を参考に設定 12
	断層面積	S(km ²)	S=(7/16)M ₀ ² $\pi^2\beta^2/A(S/S_a)^{0.5}$, S _a /S=0.4 (S _a /S=0.4は事前検討結果を踏まえ設定) 180
	断層上端深さ	h(km)	東北大学(2011)等を参考に設定 55.8
	地震モーメント	M ₀ (Nm)	4.7地震のF-netによる値 4.74 × 10 ¹⁹
	気象庁マグニチュード	M _J	気象庁による 7.2
	モーメントマグニチュード	M _w	M _w =(logM ₀ -9.1)/1.5 7.1
	剛性率	μ (N/m ²)	$\mu = \rho \beta^2$, $\rho = 3.0\text{g/cm}^3$, $\beta = 4.0\text{km/s}$ 4.80 × 10 ¹⁰
	平均すべり量	D(cm)	D=M ₀ /(μS) 551
	平均応力降下量	$\Delta \sigma$ (MPa)	$\Delta \sigma = (7\pi^{1.5}/16)(M_0/S^{1.5})$ 48.1
	短周期レベル	A(Nm/S ²)	原田・釜江(2011)を参考に設定 1.16 × 10 ²⁰
	破壊伝播形式	-	- 放射状
	破壊伝播速度	V _r (km/s)	V _r =0.72 β 2.88
立ち上がり時間	τ (s)	原田・釜江(2011)を参考に設定 0.6	

3. 検討用地震の地震動評価

3.3 4.7地震のシミュレーション(4)

■断層パラメータ(その2)

	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	M_{0a} (Nm)	$M_{0a} = \mu S_a D_a$	3.79×10^{19}
	断層面積	S_a (km ²)	$S_a/S=0.4$	72
	平均すべり量	D_a (cm)	$D_a = \gamma_D D, \gamma_D=2.0$	1101.6
	応力降下量	$\Delta \sigma_a$ (MPa)	$\Delta \sigma_a = \Delta \sigma / (S_a/S), (S_a/S)=0.4$	120.3
アスペリティ1	地震モーメント	M_{0a1} (Nm)	$M_{0a1} = M_{0a}/2$	1.90×10^{19}
	断層面積	S_{a1} (km ²)	$S_{a1} = S_a/2$	36
	平均すべり量	D_{a1} (cm)	$D_{a1} = M_{0a1} / (\mu S_{a1})$	1101.6
	応力降下量	$\Delta \sigma_{a1}$ (MPa)	$\Delta \sigma_{a1} = \Delta \sigma_a$	120.3
アスペリティ2	地震モーメント	M_{0a2} (Nm)	$M_{0a2} = M_{0a}/2$	1.90×10^{19}
	断層面積	S_{a2} (km ²)	$S_{a2} = S_a/2$	36
	平均すべり量	D_{a2} (cm)	$D_{a2} = M_{0a2} / (\mu S_{a2})$	1101.6
	応力降下量	$\Delta \sigma_{a2}$ (MPa)	$\Delta \sigma_{a2} = \Delta \sigma_a$	120.3
背景領域	地震モーメント	M_{0b} (Nm)	$M_{0b} = M_0 - M_{0a}$	9.48×10^{18}
	断層面積	S_b (km ²)	$S_b = S - S_a$	108
	平均すべり量	D_b (cm)	$D_b = M_{0b} / (\mu S_b)$	183.6
	応力降下量	$\Delta \sigma_b$ (MPa)	$\sigma_b = (D_b/W_b)(\pi^{0.5}/D_a)r \cdot \sum (r_i/r)^3 \Delta \sigma_a, r=(S_a/\pi)^{0.5}$	12.7
Q値	Q	佐藤・巽(2002)	$114f^{0.92}$	
高域遮断周波数	fmax(Hz)	浅野ほか(2004)による2003年宮城県沖の地震のシミュレーション解析結果と敷地の観測記録の適合を確認した値を設定	18	

3.3 4.7地震のシミュレーション(5)

■断層パラメータの設定根拠

震源パラメータ	パラメータの設定根拠
断層面積	事前検討からアスペリティの面積比(S_a/S)=0.4を採用し、理論式より設定。 なお、笹谷ほか(2006)により設定した場合のアスペリティ面積と同程度となる。
断層長さ	断層面積/断層幅=断層長さ
断層幅	4.7地震震源位置(原田・釜江(2011)の破壊開始点)から上端と下端に均等に配置し、上端を海洋プレートモホ面付近、下端はプレートの応力中立面付近に設定。
断層傾斜角	原田・釜江(2011)による。東北大学(2011)の断層モデルの傾斜角と対応する。
断層の走向	東北大学(2011)、防災科学技術研究所F-netの値を参考に設定。
剛性率	$\mu = \rho \beta^2$ 、密度とS波速度は佐藤・巽(2002)による。 佐藤・巽(2002)では、この値を用いて東日本の海洋性地震(プレート境界地震、スラブ内地震)のスペクトルインバージョンが行われている。
高域遮断周波数	浅野ほか(2004)による2003年宮城県沖の地震のシミュレーション解析結果と敷地の観測記録の適合性を確認した値を設定。

3. 検討用地震の地震動評価

3.3 4.7地震のシミュレーション(6)

■断層パラメータ アスペリティ面積 S_a

- ・アスペリティ面積比(S_a/S)=0.4で設定したシミュレーションモデルのアスペリテ面積は、笹谷ほか(2006)に基づき設定した場合のアスペリティ面積と同程度になる。

断層パラメータ	シミュレーションモデル $S_a/S=0.4$	笹谷ほか(2006)に 基づき設定 した場合
地震モーメント M_0 ($N\cdot m$)	4.74×10^{19}	4.74×10^{19}
短周期レベル A ($N\cdot m/s^2$)	1.16×10^{20}	7.67×10^{19}
アスペリティ面積比 S_a/S	0.4	0.2
断層面積 S (km^2)	180	384
アスペリティ面積 S_a (km^2)	72	76
アスペリティの応力低下量 $\Delta \sigma_a$ (MPa)	120	77.6

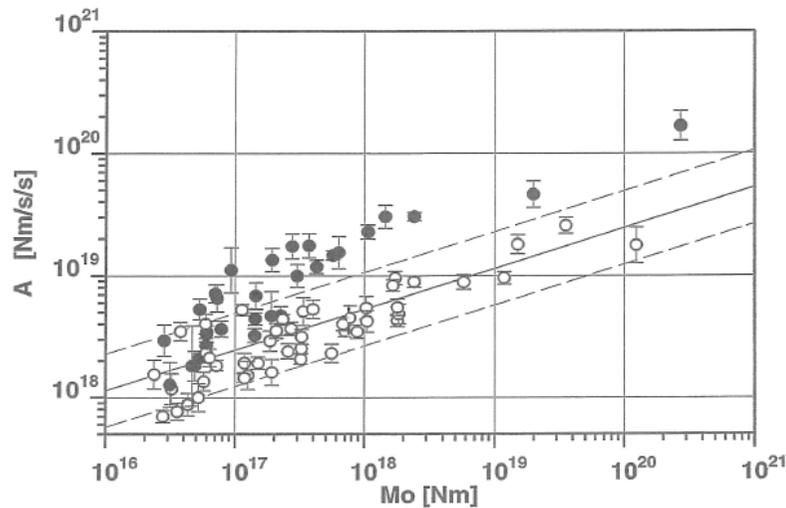
3. 検討用地震の地震動評価

3.3 4.7地震のシミュレーション(7)

■断層パラメータ 短周期レベル

- ・4.7地震シミュレーションモデルの短周期レベルは、原田・釜江(2011)の短周期レベル※を参考に設定。
- ・設定した短周期レベルは、笹谷ほか(2006)によるスラブ内地震の M_0 -短周期レベルAの関係と比較して約1.5倍大きい。

※壇ほか(2001)による内陸地殻内地震の M_0 -Aの6倍 ($A=a \times 2.46 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3}$, $a=6$)



笹谷ほか(2006)による M_0 -Aの関係

(○プレート間地震, ●スラブ内地震, -: 壇ほか(2001)の M_0 -A)

笹谷(2006)によるスラブ内地震 M_0 -Aの関係式

$$A(\text{dyne} \cdot \text{cm}/\text{s}^2) = 9.84 \times 10^{17} \times M_0^{1/3}(\text{dyne} \cdot \text{cm})$$

4.7地震シミュレーションモデル 短周期レベルA

断層パラメータ	地震モーメント M_0 (N·m)	短周期レベルA (N·m/s ²)
設定値	4.74×10^{19}	1.16×10^{20}
(参考) 笹谷ほか(2006)を 用いた場合の 短周期レベルA	4.74×10^{19}	7.67×10^{19}

約1.5倍

3. 検討用地震の地震動評価

3.3 4.7地震のシミュレーション(8)

■断層モデルを用いた地震動評価

- ・地震動評価は、統計的グリーン関数法によって行う。
- ・統計的グリーン関数法に用いる地震モデルは、2003年5月26日宮城県沖の地震、2005年8月16日宮城県沖の地震等のシミュレーション解析に用いた地震モデルと同様。

統計的グリーン関数法に用いる地下構造モデル

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					
-34.5	-15.8	7.2	2.55	1500	2882	3.00
-61.5	-42.8	27.0	2.66	2000	4101	
-81.8	-63.1	20.3	2.68	2200	4503	
-147.1	-128.4	65.3		2600	5300	
—	—	∞	2.68	3000	—	※

▽岩盤上部
(解放基盤表面相当)

▽地震基盤相当

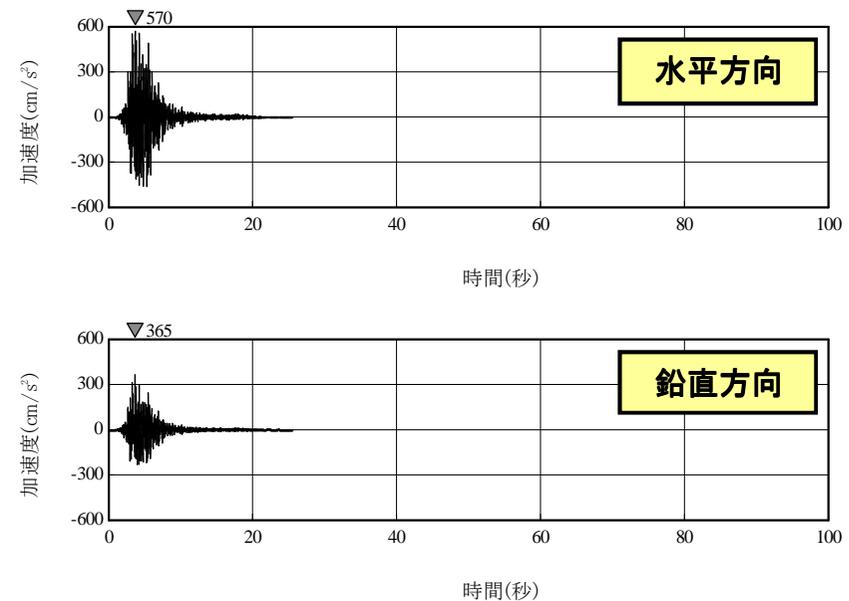
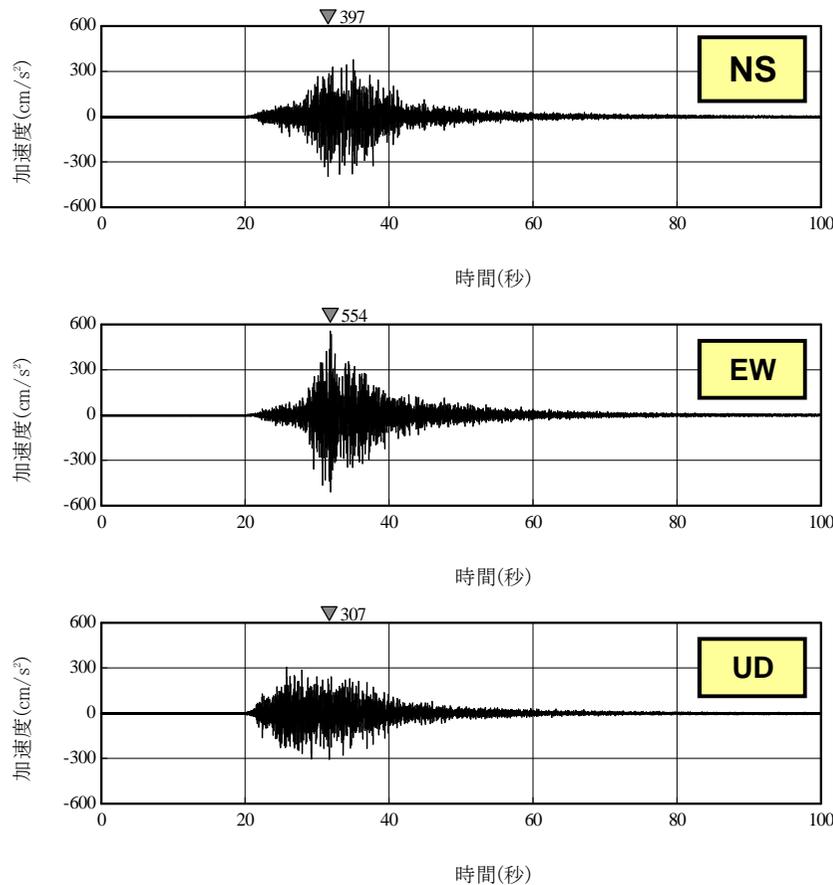
※ $Q(f) = 114 \cdot f^{0.92}$ (佐藤(2004))

3. 検討用地震の地震動評価

3.3 4.7地震のシミュレーション(9)

■ 統計的グリーン関数法による地震動評価結果 加速度時刻歴波形

- 最大加速度値は、水平方向の観測記録(はぎとり波)の最大値554ガルに対し解析結果は570ガル、鉛直方向は観測記録(はぎとり波)の最大値307ガルに対し365ガルであり、ほぼ整合している。



解放基盤相当(O.P.-8.6m)の観測記録のはぎとり波

シミュレーション結果

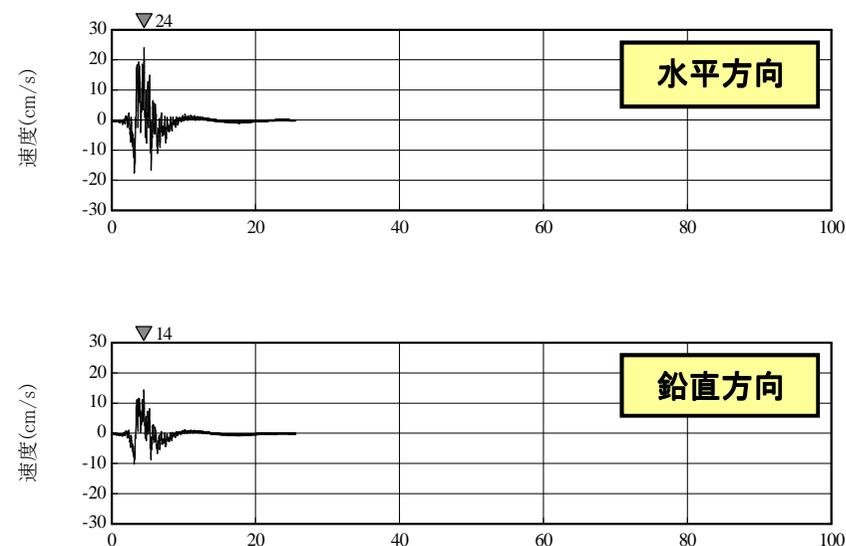
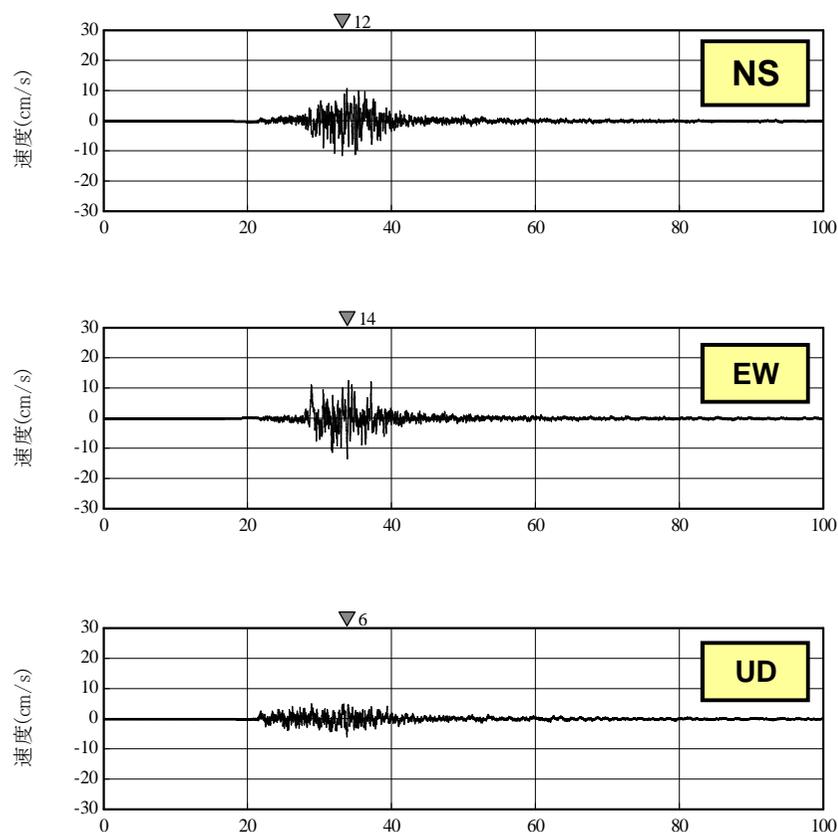


3. 検討用地震の地震動評価

3.3 4.7地震のシミュレーション(10)

■ 統計的グリーン関数法による地震動評価結果 速度時刻歴波形

- 最大速度値は、水平方向の観測記録(はぎとり波)の最大値14cm/sに対し解析結果は24cm/s、鉛直方向は観測記録(はぎとり波)の最大値6cm/sに対し14cm/sであり、やや大きい。



解放基盤相当(O.P.-8.6m)の観測記録のはぎとり波

シミュレーション結果

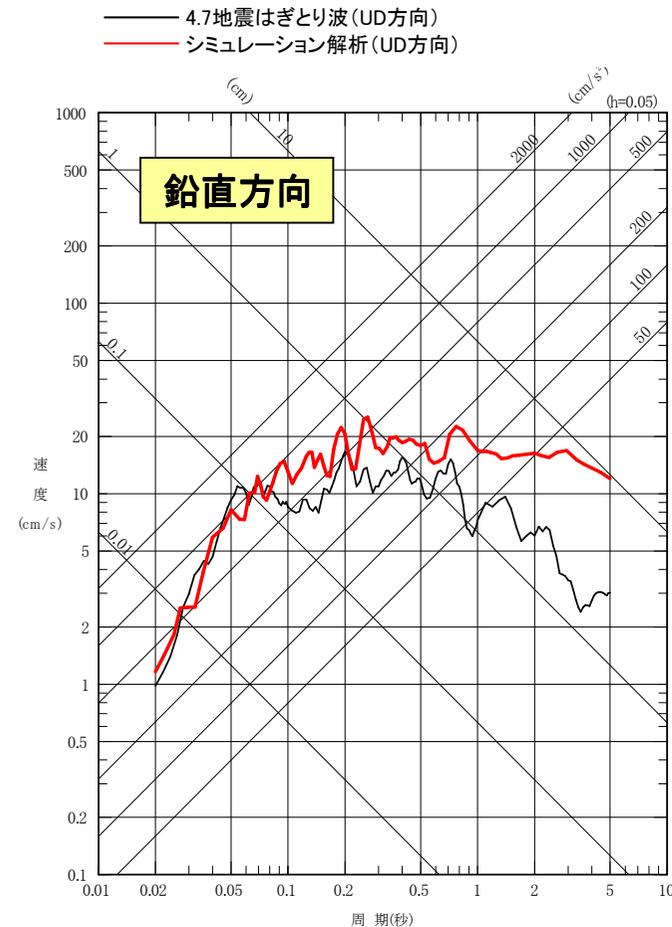
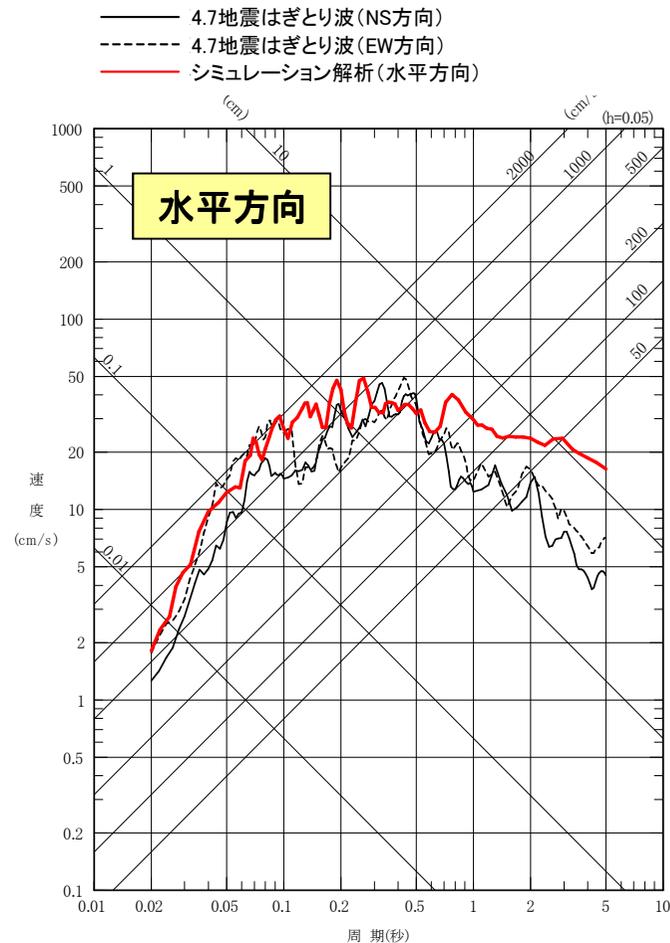


3. 検討用地震の地震動評価

3.3 4.7地震のシミュレーション(11)

■ 統計的グリーン関数法による地震動評価結果

- ・応答スペクトルの比較では、周期0.1秒より短周期側では解析結果と観測記録(はぎとり波)は、良く整合している。長周期側では解析結果が大きめの結果となった。
- ・地震動シミュレーション結果は長周期が大きい等の課題は残るものの、原子力発電所において特に問題となる短周期における適合性が良いことから、施設に与える影響検討という観点からは、良好な評価と考えられる。



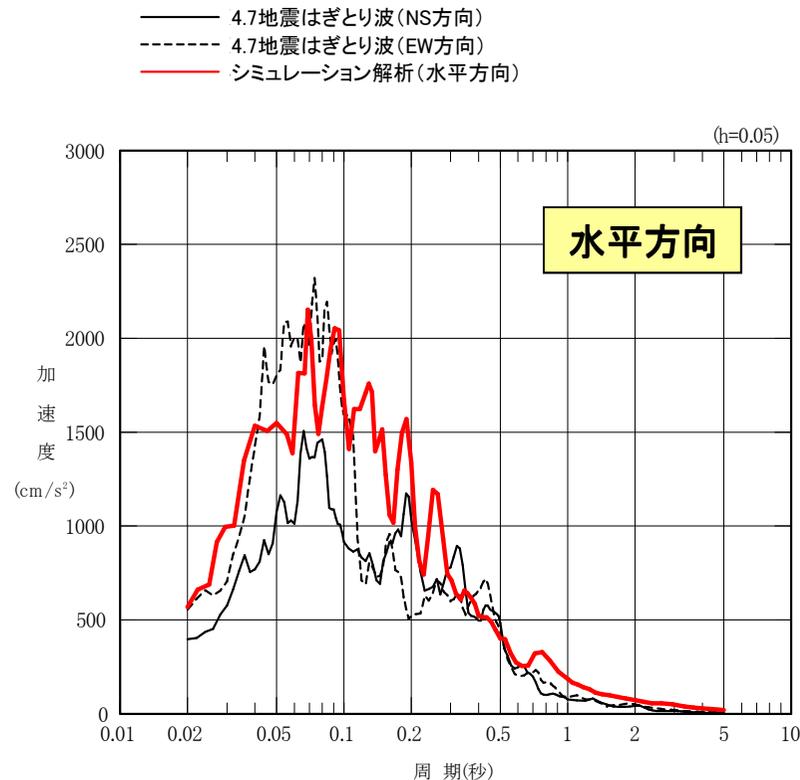
※放射特性係数は0.62

3. 検討用地震の地震動評価

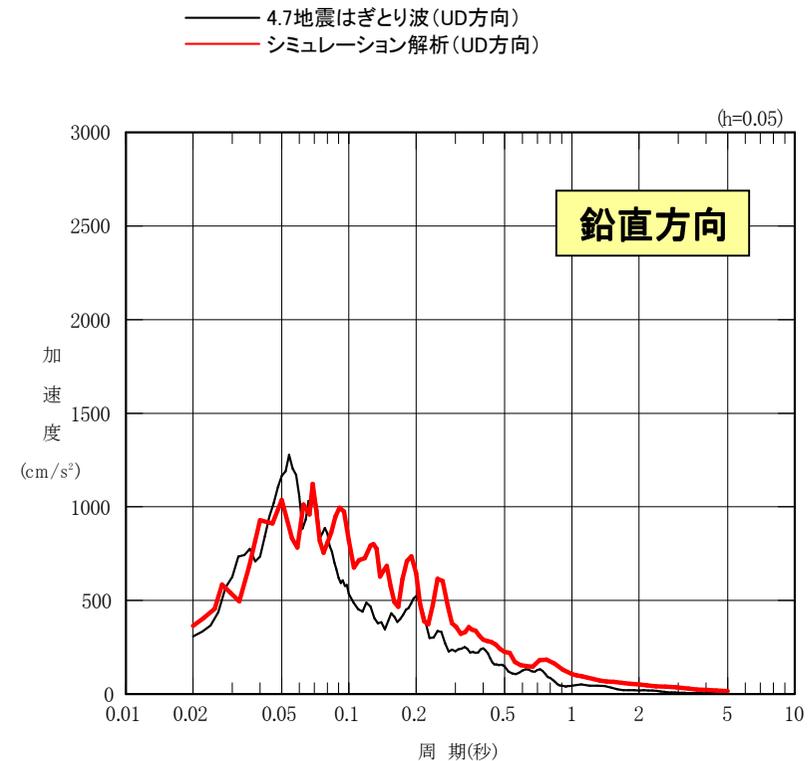
3.3 4.7地震のシミュレーション(12)

■ 統計的グリーン関数法による地震動評価結果

- ・応答スペクトルの比較では、周期0.1秒より短周期側では解析結果と観測記録(はぎとり波)は、良く整合している。長周期側では解析結果が大きめの結果となった。
- ・地震動シミュレーション結果は長周期が大きい等の課題は残るものの、原子力発電所において特に問題となる短周期における適合性が良いことから、施設に与える影響検討という観点からは、良好な評価と考えられる。



※放射特性係数は0.62

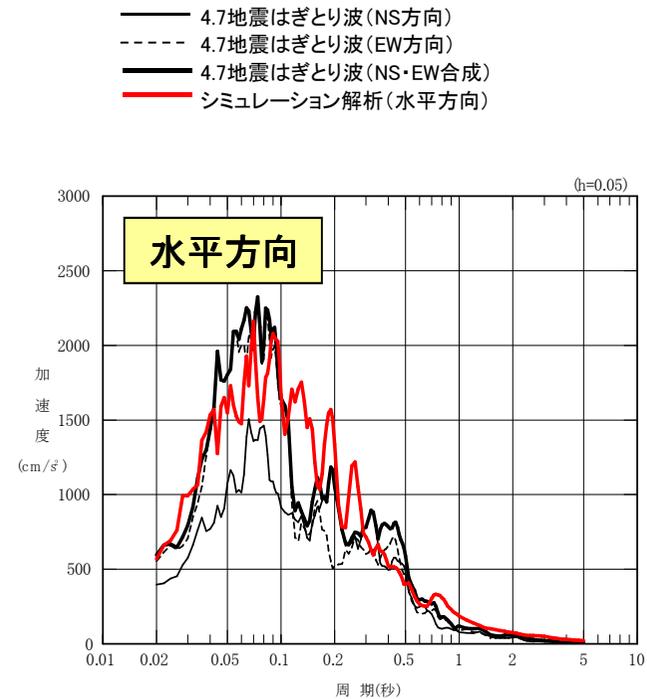
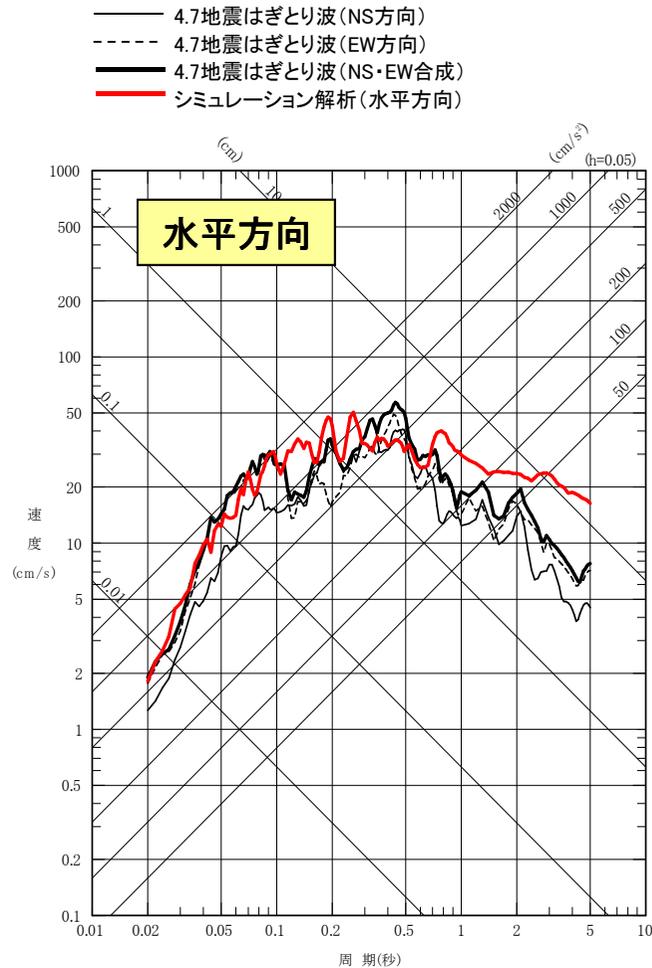


3. 検討用地震の地震動評価

3.3 4.7地震のシミュレーション(13)

■ 統計的グリーン関数法による地震動評価結果 観測記録波の水平2方向合成との比較

- ・4.7地震の観測記録(はぎとり波)の水平2方向を合成した応答スペクトルと比較を行った。
- ・シミュレーション解析結果は、観測記録の合成波とも対応している。



3.4 4.7地震のシミュレーション まとめ

■2011年4月7日宮城県沖の地震のシミュレーション

○4.7地震の地震動シミュレーション解析を行い、敷地の観測記録と整合する断層モデルを設定した。

○得られたシミュレーションモデルの特徴(短周期レベル, 破壊開始点等)から, 4.7地震は, 敷地に対して影響が大きい地震であった。

3. 検討用地震の地震動評価

3.5 4.7型地震の規模

■今後の地震ハザード評価に関する検討～2013年における検討結果～

表 地震活動モデルの概要(抜粋)

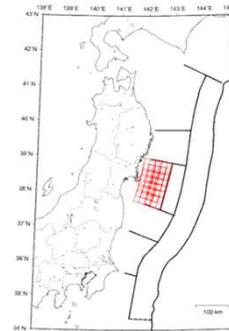
	2011年・2012年における検討			2013年起点						
	モデル1	モデル2	モデル3	従来モデル (モデル1)	検討モデル (モデル2)	参照モデル (モデル3)				
カテゴリー I	想定東海	M8.0, P30=88	同左	同左	M8~9, P30=66.5	同左				
	東南海	M8.1, P30=72								
	南海	M8.4, P30=62								
	南海トラフ連動	M8.4~8.5								
	大正型関東	M7.9, P30=0.18	同左	同左	2011年・2012年における検討のモデル1と同じ	M7.9~8.6 G-Rモデル	同左			
	元禄型関東	なし (P30=0)								
	東北地方太平洋沖型	P30=0	同左	不特定に統合 (*1)	2011年・2012年における検討のモデル1と同じ	2011年・2012年における検討のモデル2と同じ	2011年・2012年における検討のモデル3と同じ			
	三陸沖北部	M8.0, P30=7.3								
	宮城県沖	M7.4, P30=55*	不特定に統合	同左	2011年・2012年における検討のモデル1と同じ	同左	不特定に統合 (*2)			
	十勝沖	M8.1, P30=1.4								
	根室沖	M7.9, P30=47								
	十勝沖・根室沖連動	M8.3, 6回に1回								
	色丹島沖	M7.8, P30=54								
	択捉島沖	M8.1, P30=63								
	南海トラフ震源不特定	Mu = -/7.4	同左					同左	Mu = 8.0/8.0	同左	同左
相模トラフ M7	M6.7~7.2, P30=72*	同左	同左					2011年・2012年における検討のモデル1と同じ	Mu = 7.8/7.8	同左
震源不特定	Mu = 6.6/-									
三陸沖北部繰り返し以外	M7.1~7.6, P30=88*	同左	同左	2011年・2012年における検討のモデル1と同じ	Mu = 7.9/8.2	同左				
震源不特定	Mu = 7.0/7.0									
三陸沖中部震源不特定	Mu = 8.0/7.5						Mu = 8.2/8.2			
宮城県沖繰り返し以外	M7.0~7.3, P30=61*	同左	同左	2011年・2012年における検討のモデル1と同じ	Mu = 8.4/8.2	2011年・2012年における検討のモデル3と同じ				
震源不特定	Mu = 8.0/7.5									
三陸沖南部繰り返し以外	M7.2~7.6, P30=51*	同左	同左	2011年・2012年における検討のモデル1と同じ	Mu = 9.5/8.2	同左				
震源不特定	Mu = 8.0/7.5									
三陸房総海溝寄震源不特定	Mu = 8.0/-	同左	同左	2011年・2012年における検討のモデル1と同じ	Mu = 8.2/8.2	同左				
福島県沖震源不特定	Mu = 8.0/7.5									
茨城県沖繰り返し以外	M6.9~7.6, P30=69*	同左	同左	2011年・2012年における検討のモデル1と同じ	Mu = 8.3/8.2	同左				
震源不特定	Mu = 8.0/7.5									
房総沖震源不特定	Mu = 8.0/7.5	同左	同左	2011年・2012年における検討のモデル1と同じ	Mu = 8.3/8.2	同左				
東北陸域太平洋プレート内	Mu = -/7.5						Mu = -/8.2			

(地震本部(2013)に一部加筆)

海洋プレート内地震(左表□枠)について整理

地震	従来モデル	検討モデル	参照モデル
宮城県沖繰り返し以外の地震※	M7.0~7.3	—	—
宮城県沖震源不特定の地震	M7.5	M8.2	M8.2
東北陸域太平洋プレート内の震源不特定の地震	M7.5	M8.2	M8.2

※地震本部(2012.2)の長期評価において、繰り返し以外の地震として、2003年5月26日(M7.1)と2011年4月7日(M7.2)のプレート内地震が考慮されている。



宮城県沖繰り返し以外の地震の断層面

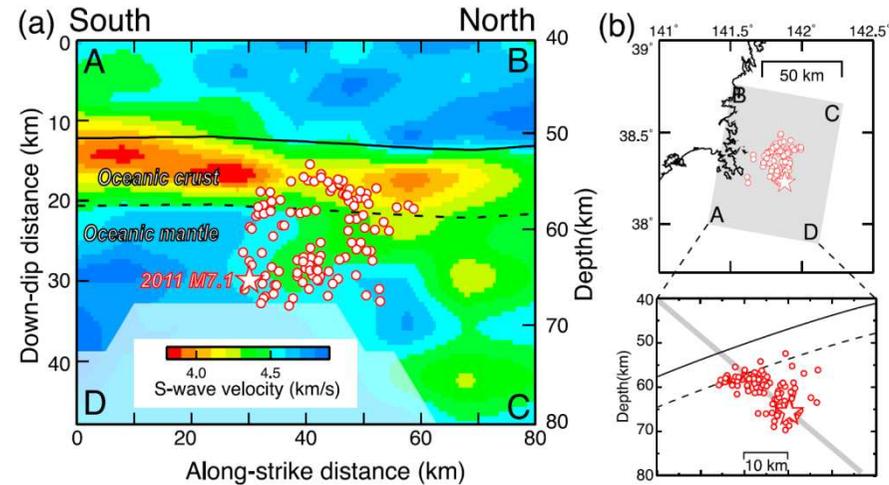
宮城県沖の領域に、繰り返し地震よりも規模の小さい「繰り返し以外の地震」(固有地震)としてM7.0~7.3が考慮されている。



検討用地震の地震規模としてM7.0~M7.3を考慮

3. 検討用地震の地震動評価

3.6 4.7型地震の規模と位置



4.7地震の震源域周辺のS波速度構造の南北鉛直分布図(Nakajima et al.(2011))

白丸は再決定した余震。黒実線はプレート境界。破線は海洋プレートモホ面。

【Nakajima et al.(2011)】からの整理

- ・4.7地震の断層面に沿ったS波速度分布から、スラブマンタル内の低速度域の拡がり、余震の分布から推定される断層面の拡がりに対応している。
- ・4.7地震の震源から南側のスラブマンタル内は高速度域となっており、余震の分布はない。
- ・一方、北側のスラブマンタル内は低速度域は余震分布の更に北側にも拡がっている。

地震本部(2013)の「宮城県沖の領域の繰返し以外の地震」の規模(M7.0~M7.3)。

- ・4.7型地震の規模は、安全側に余裕を考慮しM7.5に設定。
- ・断層モデルは、低速度域の拡がりを考慮し、4.7地震モデルを北側に拡張する。

標準的なレシピ(笹谷ほか(2006))との比較による確認

3. 検討用地震の地震動評価

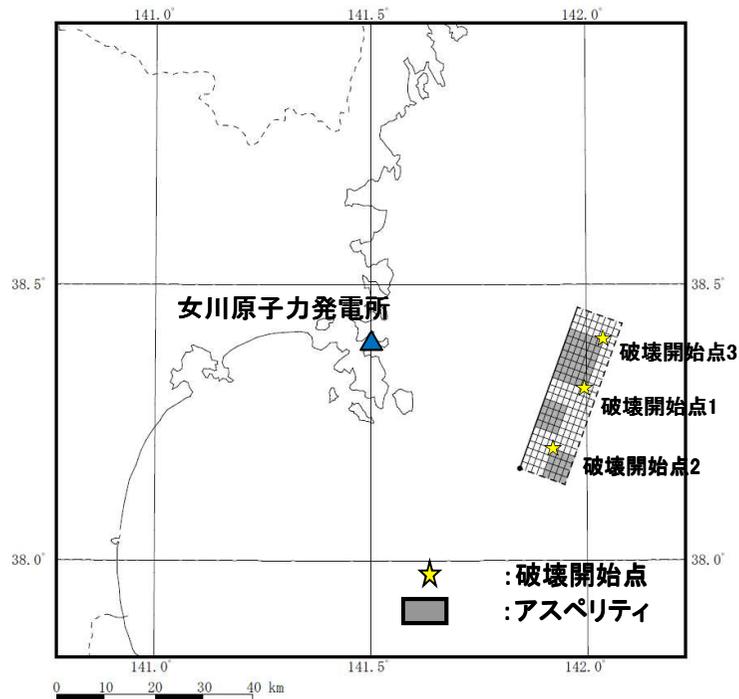
3.7 4.7型地震の断層モデルの概要

■断層モデル

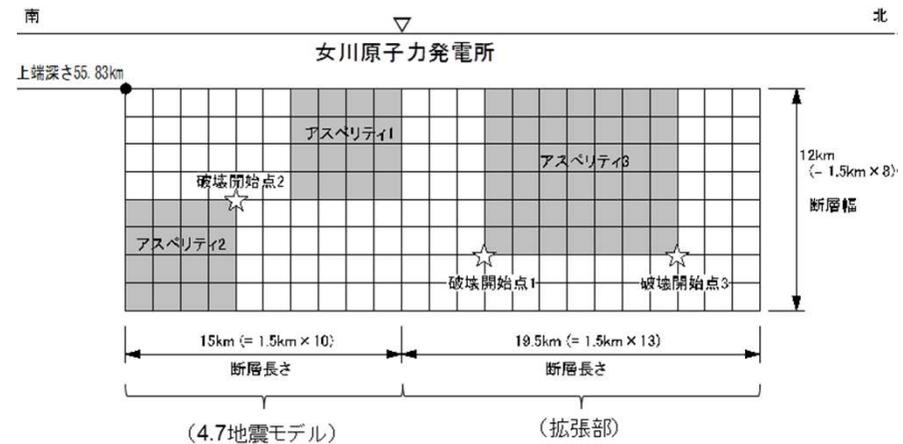
- ・4.7型地震の断層モデル(M7.5)は、4.7地震シミュレーションモデル(M7.2)を北側に拡張したものとして設定。
- ・断層パラメータは、4.7地震のシミュレーションに基づき設定。アスペリティは、4.7地震モデルと同じとし、拡張部分に残りのアスペリティを集中して配置。破壊開始点は敷地に向う方向に複数点設定。

■断層モデルを用いた地震動評価

- ・統計的グリーン関数法により評価。なお、4.7地震の敷地での観測記録のシミュレーション解析を統計的グリーン関数法により行い、観測記録との整合性を確認している。



4.7型地震(M7.5)の断層モデル(平面図)



4.7型地震(M7.5)の断層モデル(展開図)

3. 検討用地震の地震動評価

3.8 4.7型地震の地震動評価の考え方(1)

■ 4.7地震の不確かさについてシミュレーションモデルに基づき整理を行った。

ケース	不確かさ項目					地震動評価 (断層モデルによる 評価)
	地震 規模	断層位置	アスペリティ 位置	短周期レベル (応力降下量)	破壊開始点	
4.7地震	M7.2	4.7地震シミュレーションモデルの位置	4.7地震シミュレーションモデルの位置	4.7地震シミュレーションモデル(笹谷ほか(2006)の約1.5倍)	4.7地震シミュレーションモデルの位置	観測記録のはぎとり波を採用
参考ケース 1	M7.2	保守的な設定を確認(①4.7地震は低速度域で発生(Nakajima(2011)), ②4.7地震はサイトに対しディレクティビティ効果が厳しい位置で発生)	4.7地震シミュレーションモデルの位置	4.7地震シミュレーションモデル(笹谷ほか(2006)の約1.5倍)	4.7地震シミュレーションモデルの位置	補足説明資料参照(4.7地震のSs超過要因分析として実施。シミュレーションモデルの位置が敷地に対して影響が大きいことを確認)
参考ケース 2	M7.2	4.7地震シミュレーションモデルの位置	保守的な設定を確認(①1つはサイト近くのモデル上端に設定されている, ②実際に発生した地震であり実現象を反映)	4.7地震シミュレーションモデル(笹谷ほか(2006)の約1.5倍)	4.7地震シミュレーションモデルの位置	—
参考ケース 3	M7.2	4.7地震シミュレーションモデルの位置	4.7地震シミュレーションモデルの位置	保守的な設定を確認(4.7地震の短周期レベルは地域最大)	4.7地震シミュレーションモデルの位置	—
参考ケース 4	M7.2	4.7地震シミュレーションモデルの位置	4.7地震シミュレーションモデルの位置	4.7地震シミュレーションモデル(笹谷ほか(2006)の約1.5倍)	不確かさを考慮破壊開始点が敷地に対し向かって行く位置に設定するとディレクティビティ効果が大きくなることを確認。	補足説明資料参照(4.7地震のSs超過要因分析として実施, 結果はSsを下回ることを確認)

※解析結果等については「資料1-2 女川原子力発電所 基準地震動の策定のうち海洋プレート内地震について(補足説明資料)」に示す。

3. 検討用地震の地震動評価

3.8 4.7型地震の地震動評価の考え方(2)

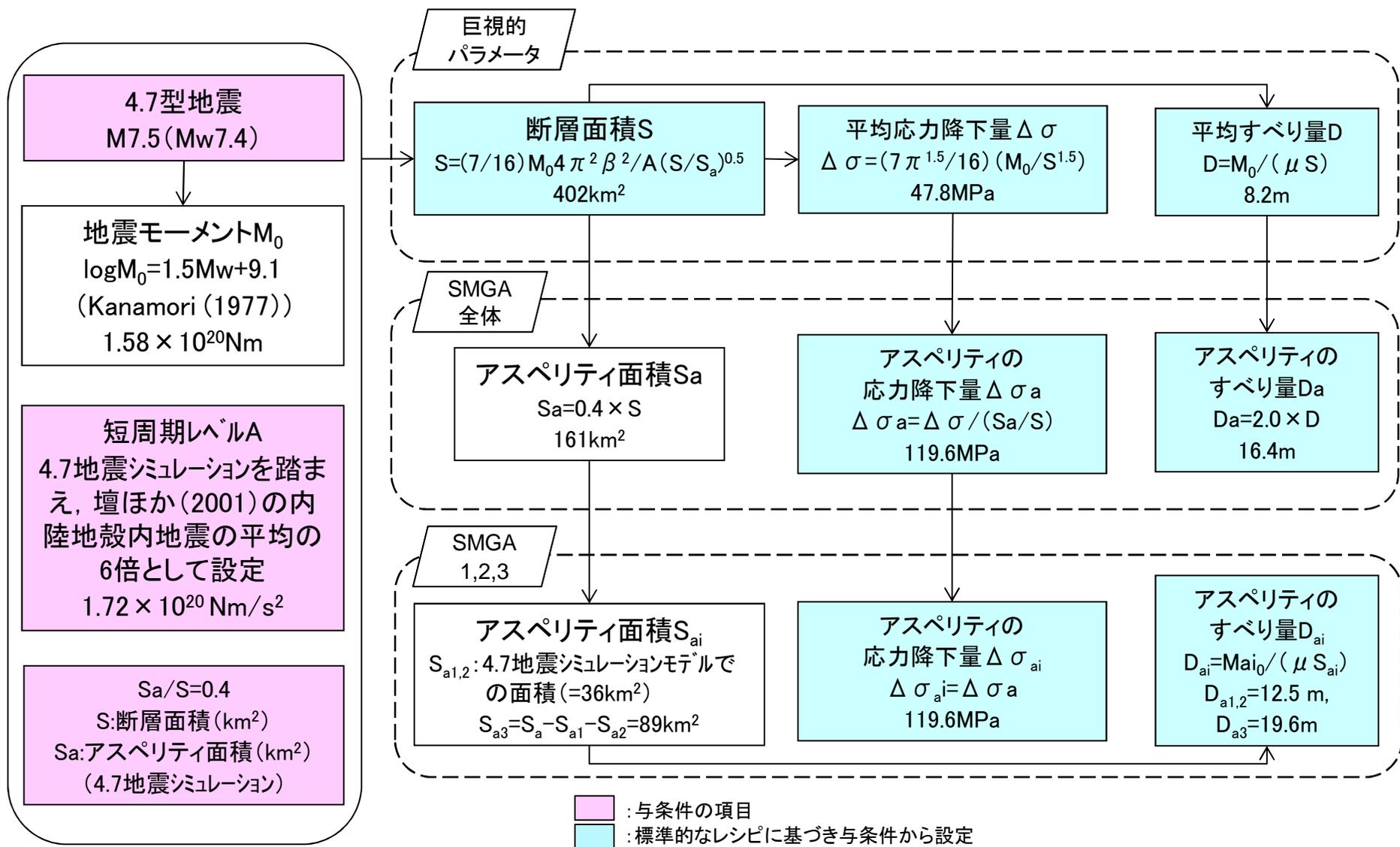
■4.7地震のシミュレーションモデル(4.7地震モデル)をベースに、4.7地震の知見等を踏まえ、検討用地震である4.7型地震を設定し、地震動評価を実施。

地震	不確かさ項目					地震動評価 (断層モデルによる評価)
	地震規模	断層位置※	アスペリティ位置	短周期レベル (応力降下量)	破壊開始点※	
4.7地震	M7.2	4.7地震モデルの位置 (敷地に対しての影響が大きい位置)	4.7地震モデルの位置 (敷地に対しての影響が大きい位置)	4.7地震モデル (笹谷ほか(2006)の約1.5倍)	4.7地震モデルの位置	観測記録のはぎとり波を採用
4.7型地震 (不確かさも含め設定)	M7.5 (地震本部(2013)や低速度層の拡がりを考慮)	4.7地震モデルの位置+その北方 (低速度層の拡がりを考慮)	4.7地震部分: 4.7地震モデルの位置 北方部分:最上端に設定	4.7地震モデル (笹谷ほか(2006)の約1.5倍)	4.7地震モデルを踏まえ複数点設定	基準地震動Ssは、評価結果を包絡するように設定

※断層位置および破壊開始点の不確かさに関する検討については、

「資料1-2 女川原子力発電所 基準地震動の策定のうち海洋プレート内地震について(補足説明資料)」に示す。

3.9 断層パラメータ設定フロー



3. 検討用地震の地震動評価

3.10 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	気象庁マグニチュード	M_J	設定条件	7.5	
	モーメントマグニチュード	M_w	4.7地震の M_J と M_w の関係を基に設定	7.4	
	走向	$\theta (^{\circ})$	Nakajima et al.(2011)を参考に設定	20	
	傾斜角	$\delta (^{\circ})$	原田・釜江(2011)	37	
	断層長さ	$L(\text{km})$	$L=S/W$	33.5	
	断層幅	$W(\text{km})$	東北大学(2011)等を参考に設定	12	
	断層面積	$S(\text{km}^2)$	$S=(7/16)M_0^2\pi^2\beta^2/A(S/S_a)^{0.5}$, $S_a/S=0.4$	402	
	断層上端深さ	$h(\text{km})$	東北大学(2011)等を参考に設定	55.8	
	地震モーメント	$M_0(\text{Nm})$	$M_w=(\log M_0-9.1)/1.5$	1.58×10^{20}	
	剛性率	$\mu (\text{N/m}^2)$	$\mu = \rho \beta^2$, $\rho = 3.0\text{g/cm}^3$, $\beta = 4.0\text{km/s}$	4.80×10^{10}	
	平均すべり量	$D(\text{cm})$	$D=M_0/(\mu S)$	821	
	平均応力降下量	$\Delta \sigma (\text{MPa})$	$\Delta \sigma = (7\pi^{1.5}/16)(M_0/S^{1.5})$	47.8	
	短周期レベル	$A(\text{Nm/S}^2)$	$A=a \times 2.46 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3}$, $a=6.0$	1.72×10^{20}	
	破壊伝播形式	-	-	放射状	
	破壊伝播速度	$V_r(\text{km/s})$	$V_r=0.72\beta$	2.88	
断層面全体	アスペリティ全体	地震モーメント	$M_{0a}(\text{Nm})$	$M_{0a}=\mu S_a D_a$	1.27×10^{20}
		断層面積	$S_a(\text{km}^2)$	$S_a=(S_a/S) \times S$, $(S_a/S)=0.4$	161
		平均すべり量	$D_a(\text{cm})$	$D_a=\gamma_D D$, $\gamma_D=2.0$	1641
		応力降下量	$\Delta \sigma_a (\text{MPa})$	$\Delta \sigma_a = \Delta \sigma / (S_a/S)$, $(S_a/S)=0.4$	119.6
	アスペリティ1,2	地震モーメント	$M_{0a1,2}(\text{Nm})$	$M_{0a1,2}$ (面積の1.5乗の重みで配分)	2.15×10^{19}
		断層面積	$S_{a1,2}(\text{km}^2)$	$S_{a1,2}$ (4.7地震シミュレーションモデル)	36
		平均すべり量	$D_{a1,2}(\text{cm})$	$D_{a1,2}=M_{0a1,2}/(\mu S_{a1,2})$	1247
		応力降下量	$\Delta \sigma_{a1,2}(\text{MPa})$	$\Delta \sigma_{a1,2}=\Delta \sigma_a$	119.6
	アスペリティ3	地震モーメント	$M_{0a3}(\text{Nm})$	M_{0a3} (面積の1.5乗の重みで配分)	8.37×10^{19}
		断層面積	$S_{a3}(\text{km}^2)$	$S_{a3}=S_a-S_{a1}-S_{a2}$	89
		平均すべり量	$D_{a3}(\text{cm})$	$D_{a3}=M_{0a3}/(\mu S_{a3})$	1960
		応力降下量	$\Delta \sigma_{a3}(\text{MPa})$	$\Delta \sigma_{a3}=\Delta \sigma_a$	119.6
背景領域	地震モーメント	$M_{0b}(\text{Nm})$	$M_{0b}=M_0-M_{0a}$	3.17×10^{19}	
	断層面積	$S_b(\text{km}^2)$	$S_b=S-S_a$	241	
	平均すべり量	$D_b(\text{cm})$	$D_b=M_{0b}/(\mu S_b)$	274	
	応力降下量	$\Delta \sigma_b (\text{MPa})$	$\sigma_b=(D_b/W_b)(\pi^{0.5}/D_a)r \cdot \sum (r_i/r)^3 \Delta \sigma_a$, $r=(S_a/\pi)^{0.5}$	13.1	
高域遮断周波数		$f_{\text{max}}(\text{Hz})$	2003年宮城県沖の地震のシミュレーション結果	18	

3. 検討用地震の地震動評価

3.10 断層パラメータ(2)

■ 笹谷ほか(2006)により断層パラメータを算定した場合との比較

- ・ 笹谷ほか(2006)により断層パラメータを算定すると、断層面積は4.7型地震の2倍程度になるが、アスペリティ面積は4.7型地震と同程度となる。
- ・ 短周期レベルは、4.7型地震の断層モデルのほうが大きい。

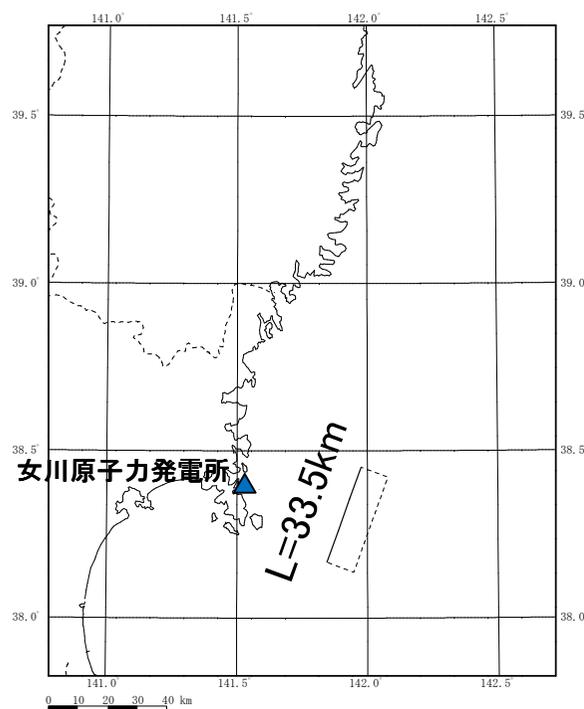
断層パラメータ	4.7型地震	笹谷ほか(2006)により設定した場合
地震モーメント M_0 ($N \cdot m$)	1.58×10^{20}	1.58×10^{20}
短周期レベル A ($N \cdot m/s^2$)	1.72×10^{20}	1.15×10^{20}
アスペリティ面積比 S_a/S	0.4	0.2
断層面積 S (km^2)	402	858
アスペリティ面積 S_a (km^2)	161	170
アスペリティの応力降下量 $\Delta \sigma_a$ (MPa)	119.6	77.6

3. 検討用地震の地震動評価

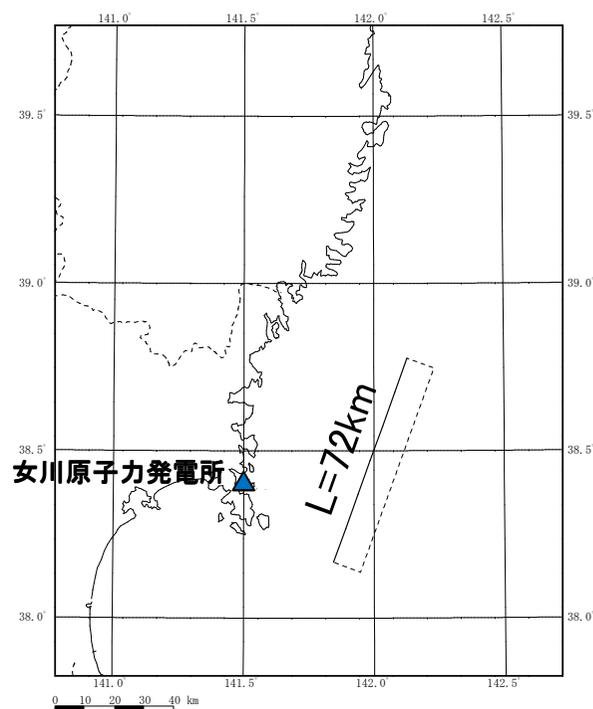
3.10 断層パラメータ(3)

■ 笹谷ほか(2006)により断層パラメータを算定した場合との比較

- ・参考として、4.7型地震の断層モデルの南端を基準に、笹谷ほか(2006)により算定した断層パラメータに基づき断層面(巨視的面)を設定した。
- ・笹谷ほか(2006)による断層面は、4.7型地震を北側に拡張した形状となるため、その拡張部分はサイトから遠ざかる方向に設定される。



4.7型地震の断層モデル



笹谷ほか(2006)による
断層モデル

※断層幅を12kmとして断層長さを $L=S/W$ により設定。

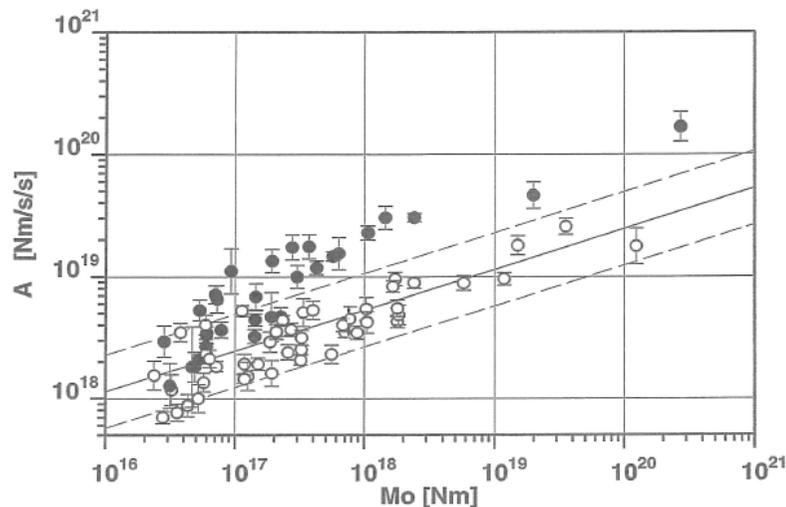
3. 検討用地震の地震動評価

3.10 断層パラメータ(4)

■短周期レベルの比較

- ・4.7型地震の断層モデルの短周期レベルは、4.7地震の観測記録を用いた強震動シミュレーションを行っている原田・釜江(2011)の短周期レベル*を参考に設定。
- ・設定した短周期レベルは、笹谷ほか(2006)による海洋プレート内地震の M_0 -短周期レベルAの関係と比較して約1.5倍大きい。

*壇ほか(2001)による内陸地殻内地震の M_0 -Aの6倍 ($A=a \times 2.46 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3}$, $a=6$)



笹谷ほか(2006)による M_0 -Aの関係

(○プレート間地震, ●スラブ内地震, - : 壇ほか(2001)の M_0 -A)

笹谷(2006)による海洋プレート内地震 M_0 -Aの関係式

$$A(\text{dyne} \cdot \text{cm}/\text{s}^2) = 9.84 \times 10^{17} \times M_0^{1/3}(\text{dyne} \cdot \text{cm})$$

4.7型地震の短周期レベルA

断層パラメータ	地震モーメント M_0 (N·m)	短周期レベルA (N·m/s ²)
設定値	1.58×10^{20}	1.72×10^{20}
(参考) 笹谷ほか(2006) を用いた場合の 短周期レベルA	1.58×10^{20}	1.15×10^{20}

約1.5倍

3. 検討用地震の地震動評価

3.11 統計的グリーン関数法による地震動評価

■断層モデルを用いた地震動評価

- ・地震動評価は、統計的グリーン関数法によって行う。なお、4.7地震シミュレーション解析は、統計的グリーン関数法により評価を行っており、観測記録と整合性を確認している。

統計的グリーン関数法に用いる地下構造モデル

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					
-34.5	-15.8	7.2	2.55	1500	2882	3.00
-61.5	-42.8	27.0	2.66	2000	4101	
-81.8	-63.1	20.3	2.68	2200	4503	
-147.1	-128.4	65.3		2600	5300	
—	—	∞	2.68	3000	—	※

▽岩盤上部
(解放基盤表面相当)

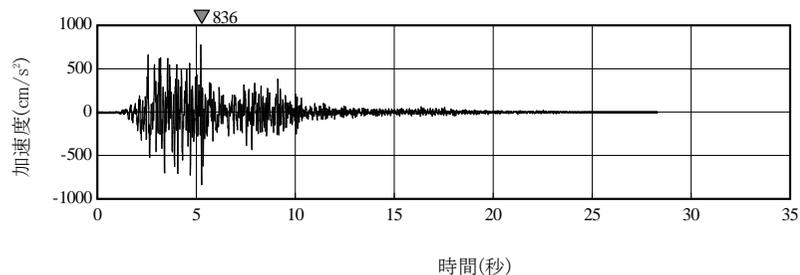
▽地震基盤相当

※ $Q(f) = 114 \cdot f^{0.92}$ (佐藤(2004))

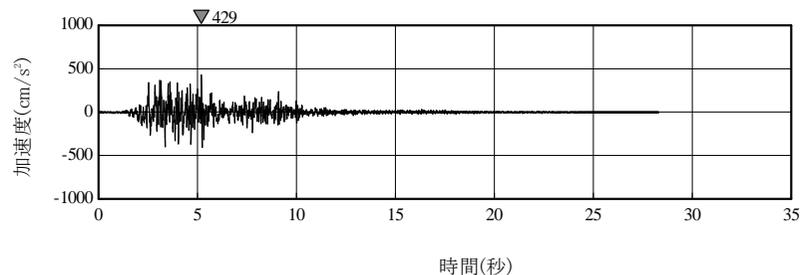
3. 検討用地震の地震動評価

3.12 地震動評価結果(統計的グリーン関数法)(1)

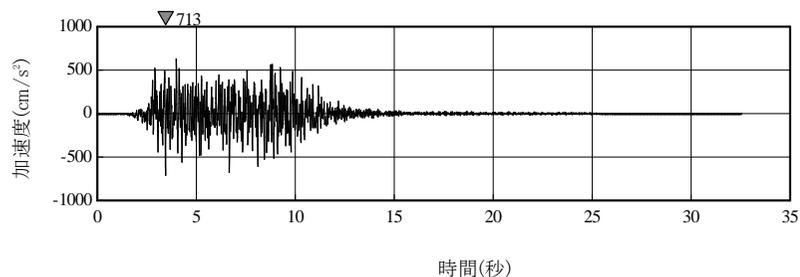
■ 加速度時刻歴波形



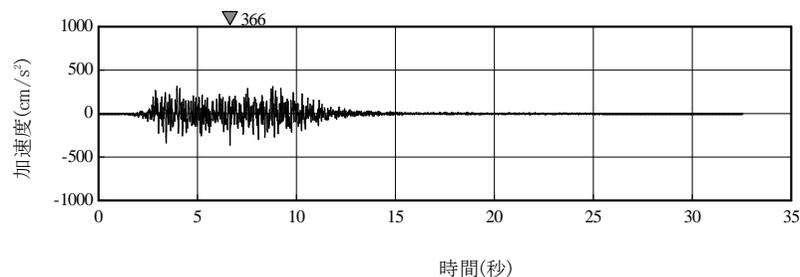
水平方向(破壊開始点1)



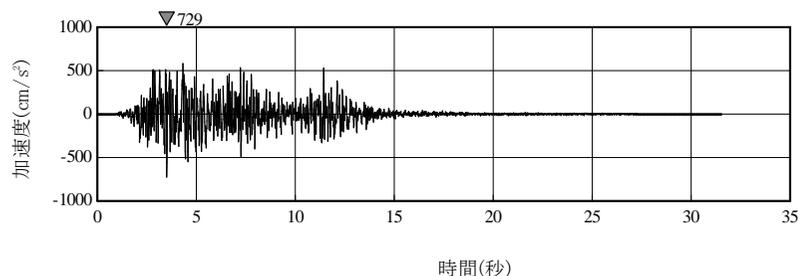
鉛直方向(破壊開始点1)



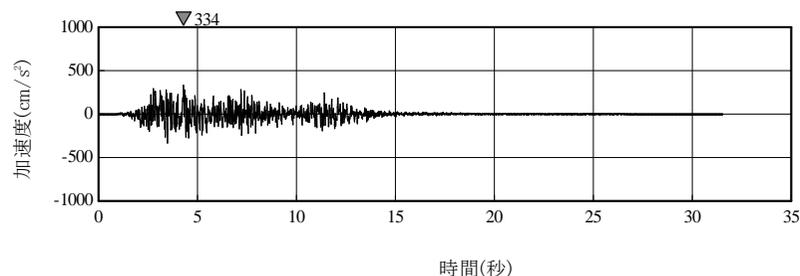
水平方向(破壊開始点2)



鉛直方向(破壊開始点2)



水平方向(破壊開始点3)

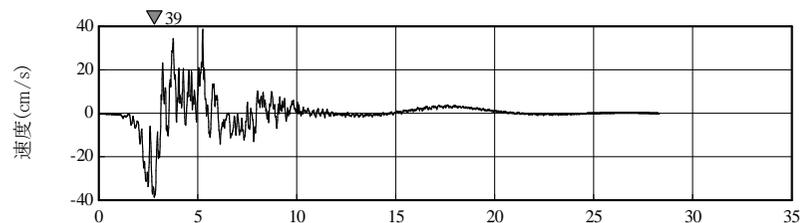


鉛直方向(破壊開始点3)

3. 検討用地震の地震動評価

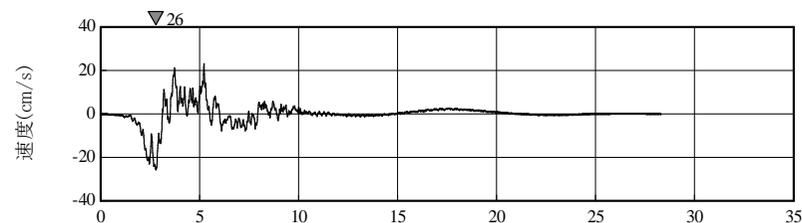
3.12 地震動評価結果(統計的グリーン関数法)(2)

■速度時刻歴波形



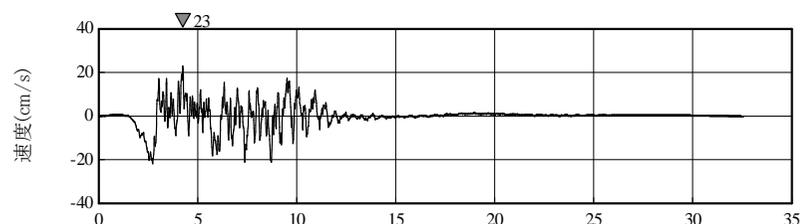
時間(秒)

水平方向(破壊開始点1)



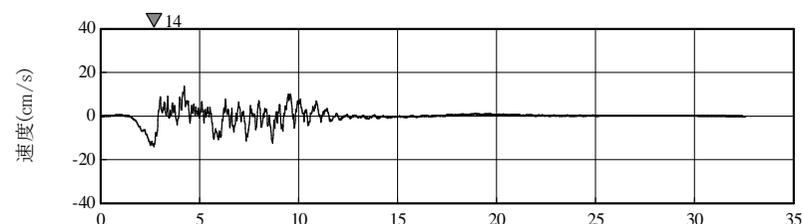
時間(秒)

鉛直方向(破壊開始点1)



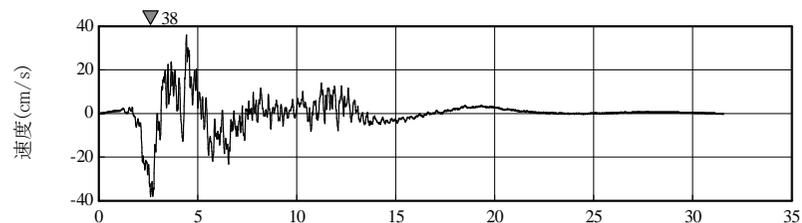
時間(秒)

水平方向(破壊開始点2)



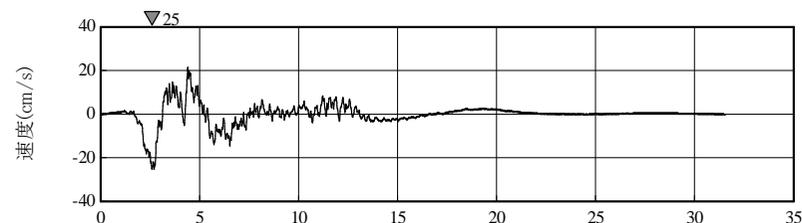
時間(秒)

鉛直方向(破壊開始点2)



時間(秒)

水平方向(破壊開始点3)



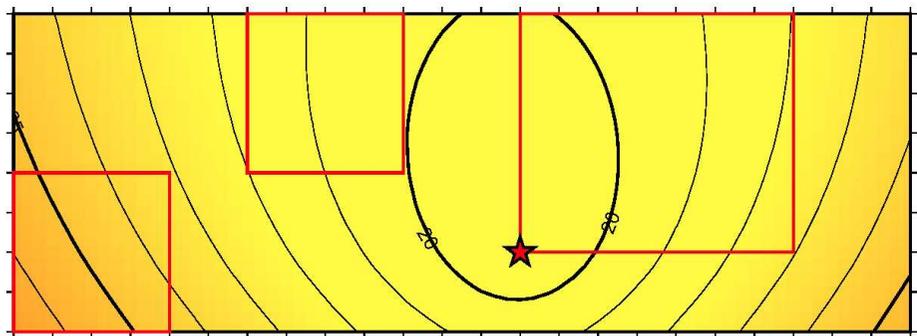
時間(秒)

鉛直方向(破壊開始点3)

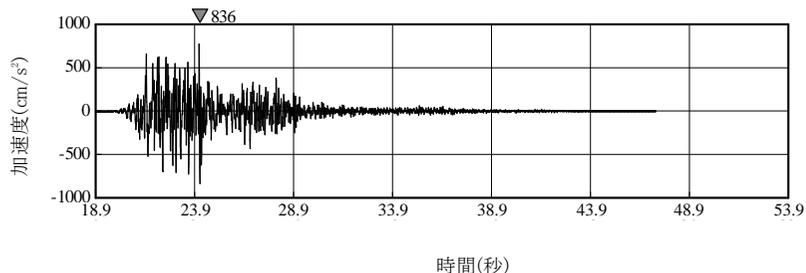
3. 検討用地震の地震動評価

3.12 地震動評価結果(統計的グリーン関数法)(3)

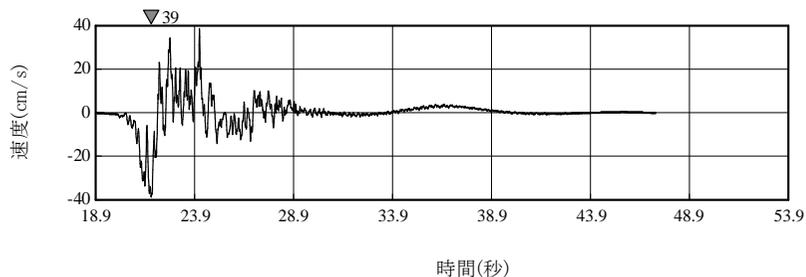
■破壊開始点1のアイソクロン



破壊開始点1のアイソクロン

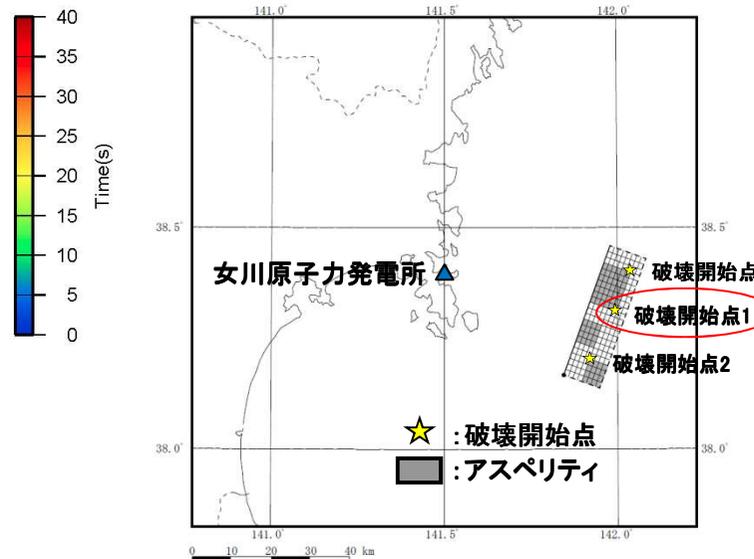


水平方向 加速度時刻歴波形※

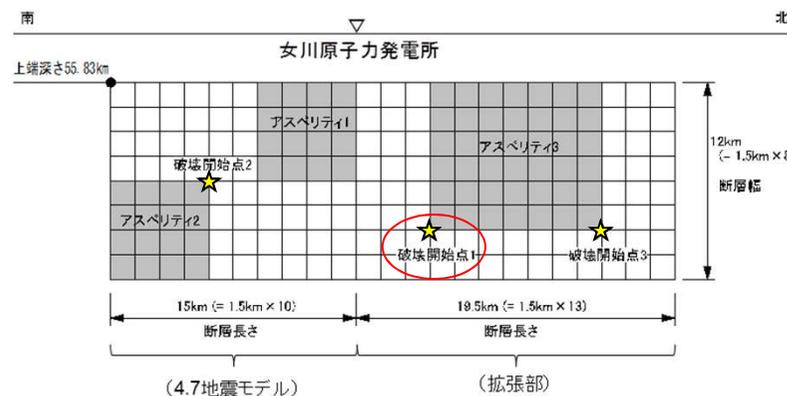


水平方向 速度時刻歴波形※

※横軸は、アイソクロンの時間軸と合わせ、波が評価対象地点に到達するまでの時間を考慮した表記としている。



(平面図)



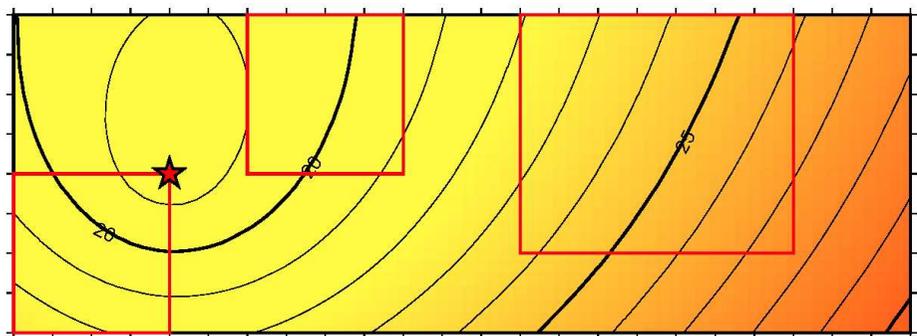
(展開図)

4.7型地震(M7.5)の断層モデル

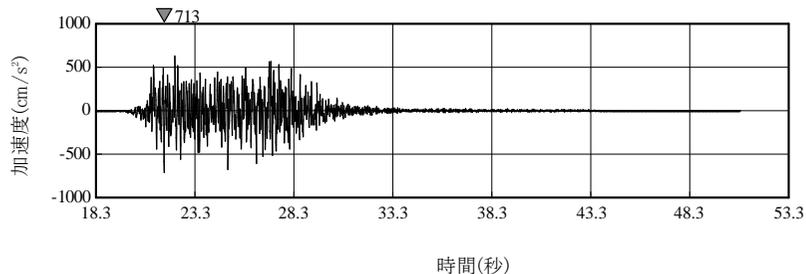
3. 検討用地震の地震動評価

3.12 地震動評価結果(統計的グリーン関数法)(4)

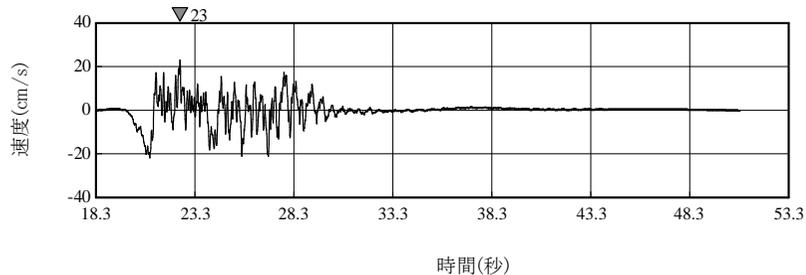
■破壊開始点2のアイソクロン



破壊開始点2のアイソクロン

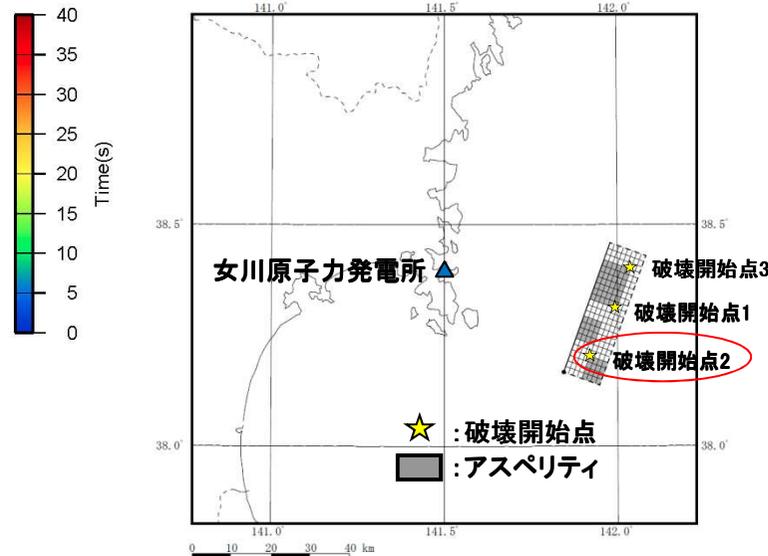


水平方向 加速度時刻歴波形※

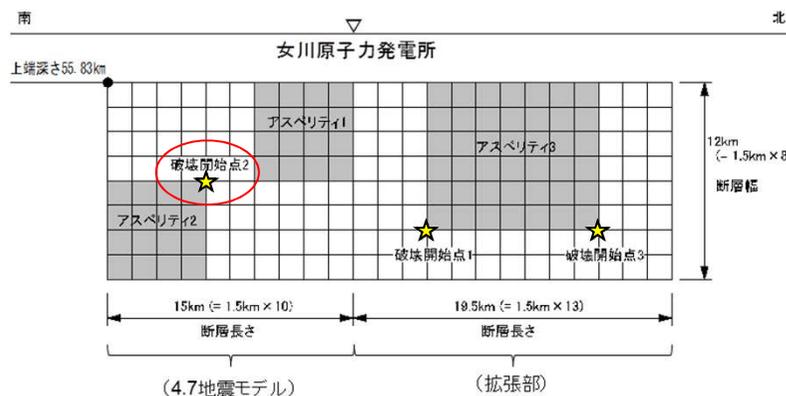


水平方向 速度時刻歴波形※

※横軸は、アイソクロンの時間軸と合わせ、波が評価対象地点に到達するまでの時間を考慮した表記としている。



(平面図)



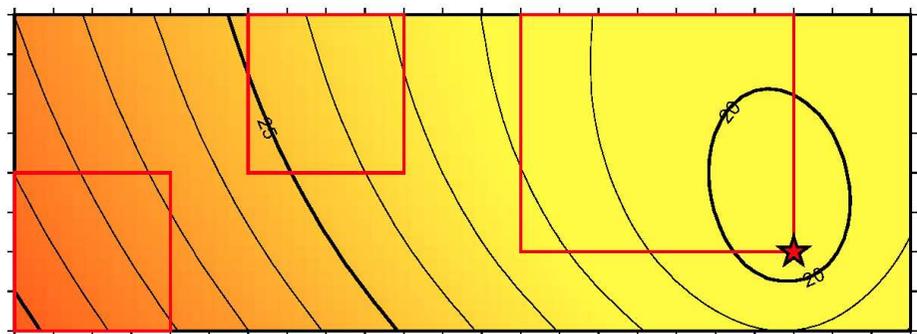
(展開図)

4.7型地震(M7.5)の断層モデル

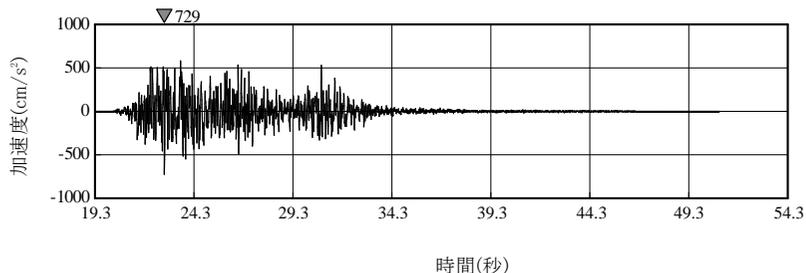
3. 検討用地震の地震動評価

3.12 地震動評価結果(統計的グリーン関数法)(5)

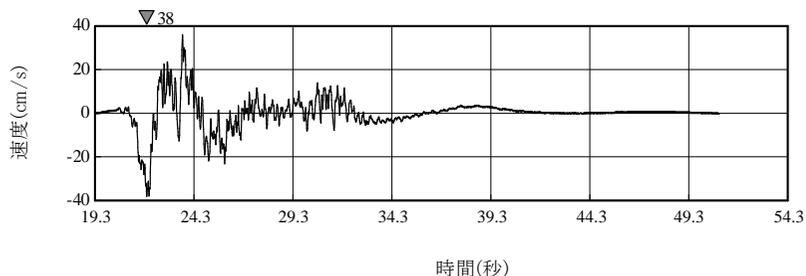
■破壊開始点3のアイソクロン



破壊開始点3のアイソクロン



水平方向 加速度時刻歴波形※

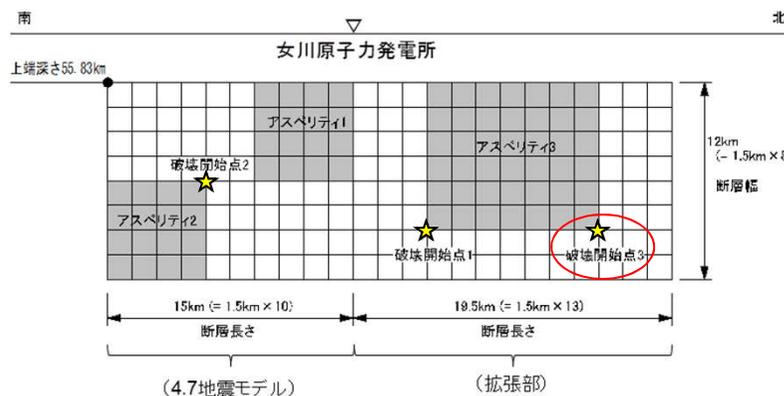


水平方向 速度時刻歴波形※

※横軸は、アイソクロンの時間軸と合わせ、波が評価対象地点に到達するまでの時間を考慮した表記としている。



(平面図)



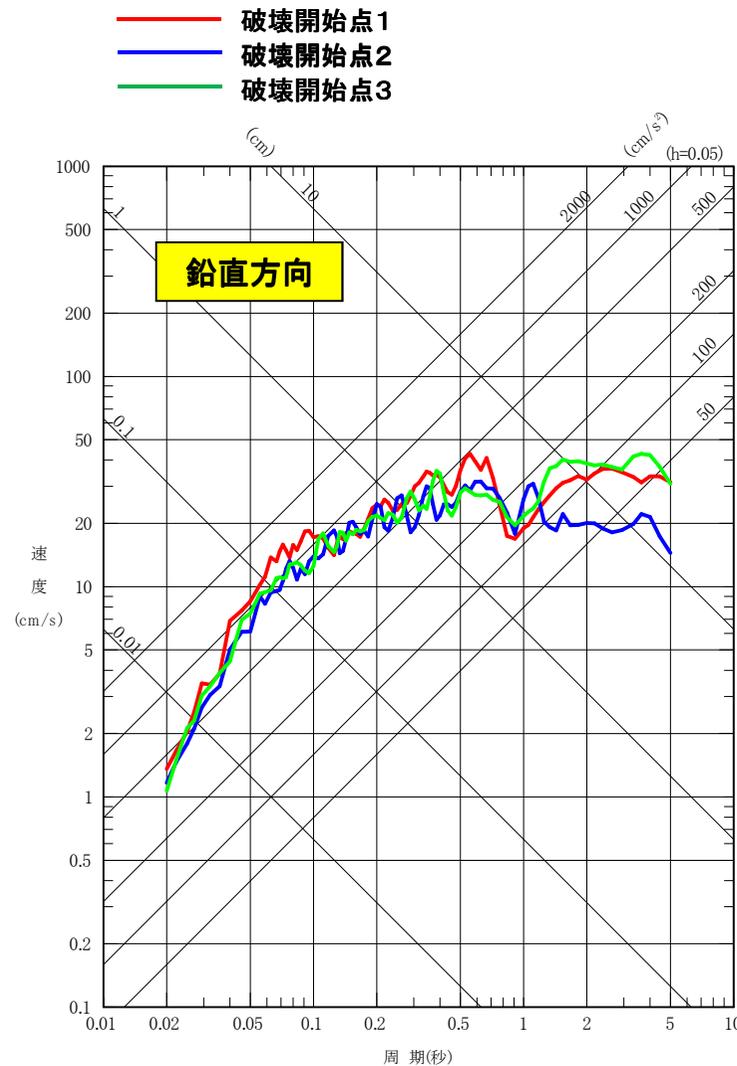
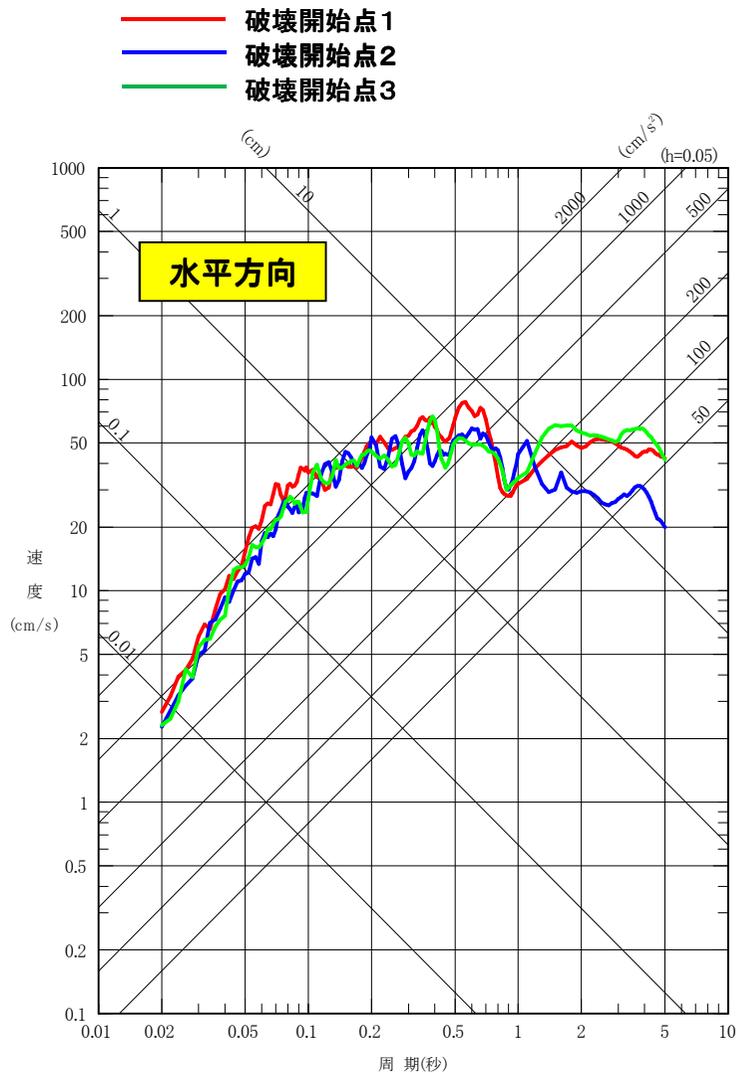
(展開図)

4.7型地震(M7.5)の断層モデル

3. 検討用地震の地震動評価

3.12 地震動評価結果(統計的グリーン関数法)(6)

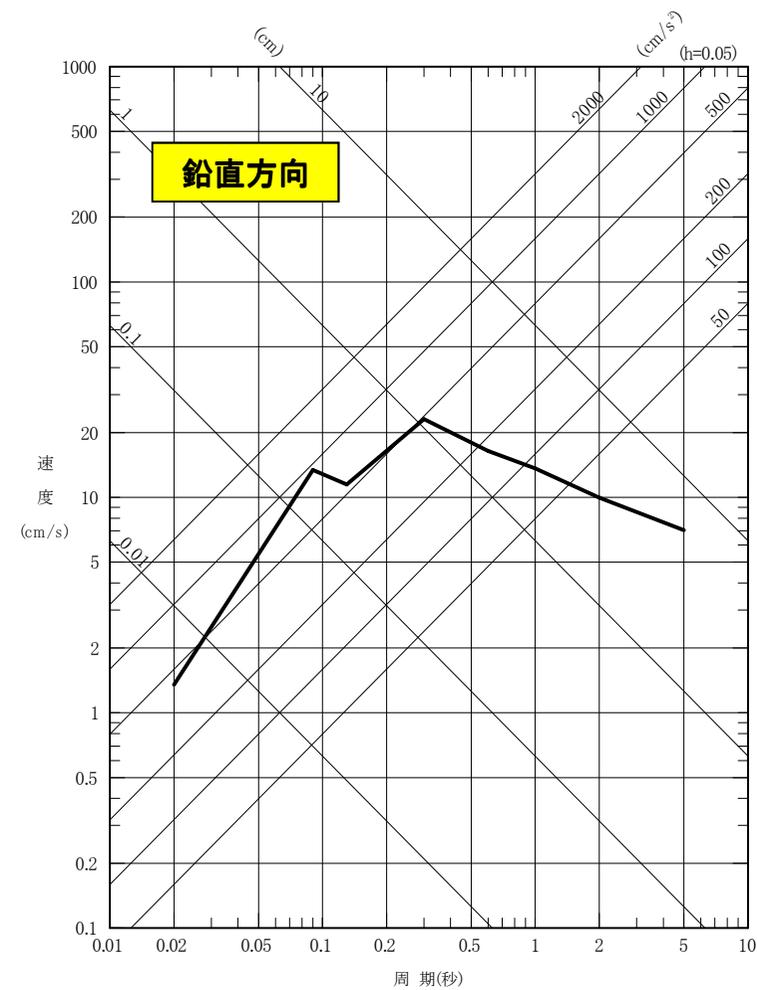
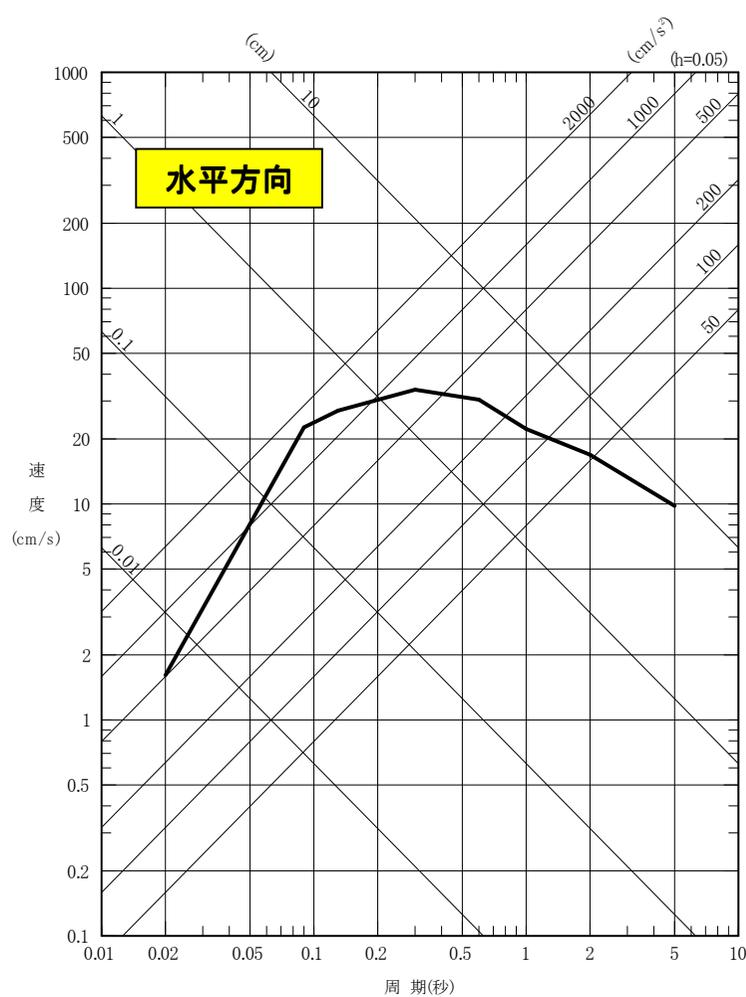
■ 応答スペクトル



3. 検討用地震の地震動評価

3.13 応答スペクトルに基づく地震動評価

- Noda et al.(2002)の方法を用いて地震動評価を実施(M7.5, $X_{eq}=72\text{km}$)
- 海洋プレート内地震(宮城県沖のM6以上, 5地震)の敷地での観測記録の応答スペクトルとNoda et al.(2002)に基づく応答スペクトルの比をサイト補正係数として考慮。

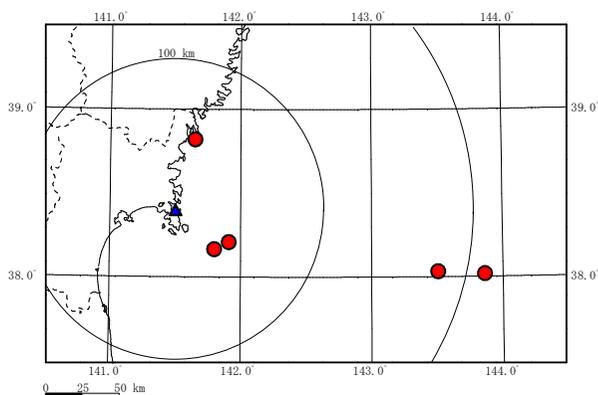


3. 検討用地震の地震動評価

3.13 応答スペクトルに基づく地震動評価

■ サイト補正係数

- ・敷地から約200kmの範囲内で発生したM6以上のプレート内地震5地震を対象とし、これらの観測記録の応答スペクトルとNoda et al.(2002)に基づく応答スペクトルの比の平均値をサイト補正係数として考慮した。
- ・サイト補正係数のコントロールポイントは、Noda et al.(2002)によるコントロールポイントの周期(8点)の値とした。



サイト補正係数算定に用いた地震の震央分布

サイト補正係数算定に用いた地震の諸元

No.	発生日時	M	震央距離 (km)	震源深さ (km)
1	2003年5月26日	7.1	48	72
2	2011年4月7日	7.2	43	66
3	2011年7月10日	7.3	180	34
4	2012年12月7日	7.3	211	49
5	2013年8月4日	6.0	37	58

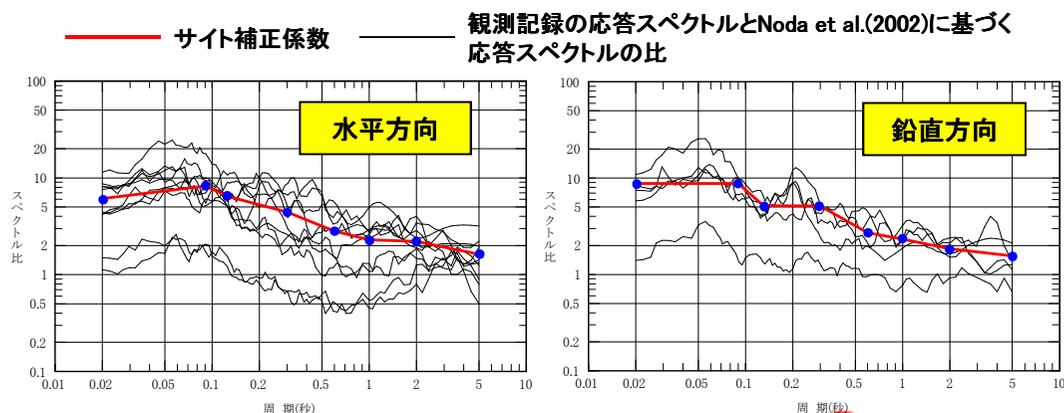
※地震諸元: 気象庁地震カタログ

Table 1. Control Points of Horizontal Earthquake Motion on Seismic Bedrock

Field	M	Xeq (km)	Coordinates of Control Points pSv (cm/s)							
			A	B	C	D	E	F	G	H
			TA(s)	TB(s)	TC(s)	TD(s)	TE(s)	TF(s)	TG(s)	TH(s)
			0.02	0.09	0.13	0.3	0.6	1	2	5
Very Near	8.5	40	1.62	18.44	27.32	47.87	68.05	64.66	53.52	40.06
	8	25	1.69	20.05	28.96	48.22	67.80	65.25	52.51	38.35
	7	12	1.40	17.20	24.84	33.86	43.42	36.42	25.15	17.85
Near	8.5	80	0.73	7.36	11.43	22.92	34.79	32.58	27.60	21.96
	8	50	0.67	7.45	11.17	20.05	28.65	27.06	22.70	17.19
	7	20	0.78	9.44	13.64	19.10	24.83	20.69	14.46	10.37
Intermediate	8.5	160	0.26	2.22	3.67	9.45	15.17	14.83	13.64	12.26
	8	100	0.32	3.08	4.86	10.27	16.04	14.96	12.73	10.37
	7	50	0.23	2.65	4.01	6.02	7.64	6.68	4.87	3.64
Far	8.5	200	0.18	1.44	2.43	6.87	11.17	11.17	10.67	10.04
	8	200	0.10	0.80	1.35	3.82	6.21	6.21	5.93	5.58
	7	125	0.046	0.43	0.70	1.34	1.81	1.59	1.26	1.05

The value of pSv is pseudo-velocity response spectrum with a damping factor of 5%.

Noda et al.(2002)のコントロールポイント



サイト補正係数

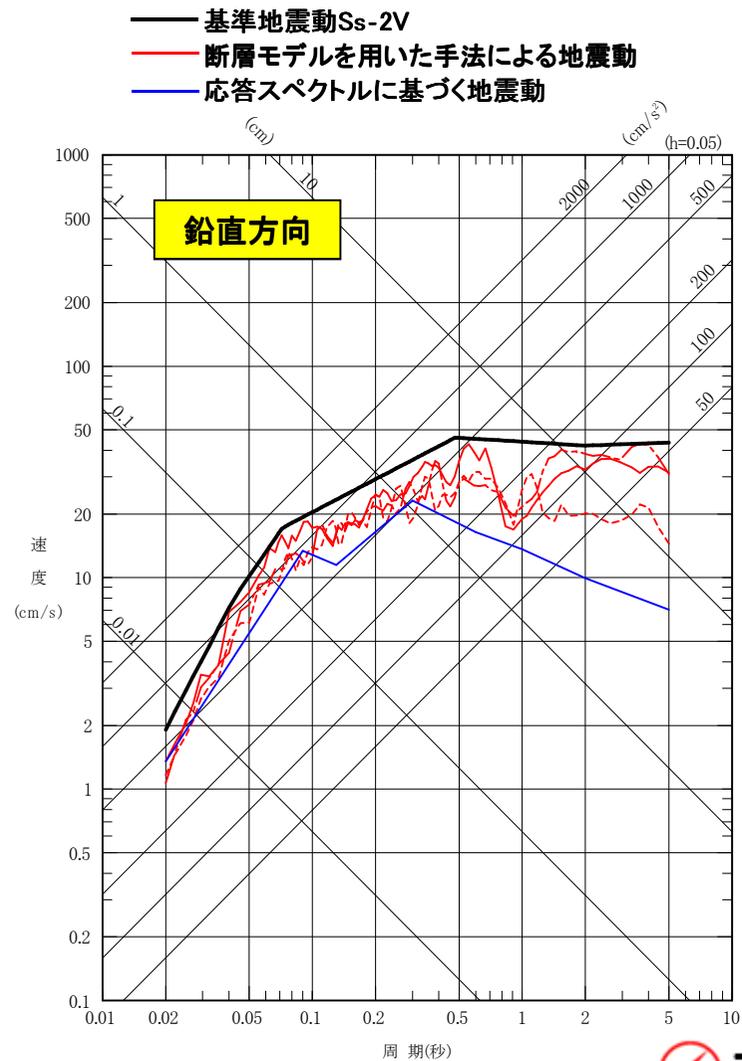
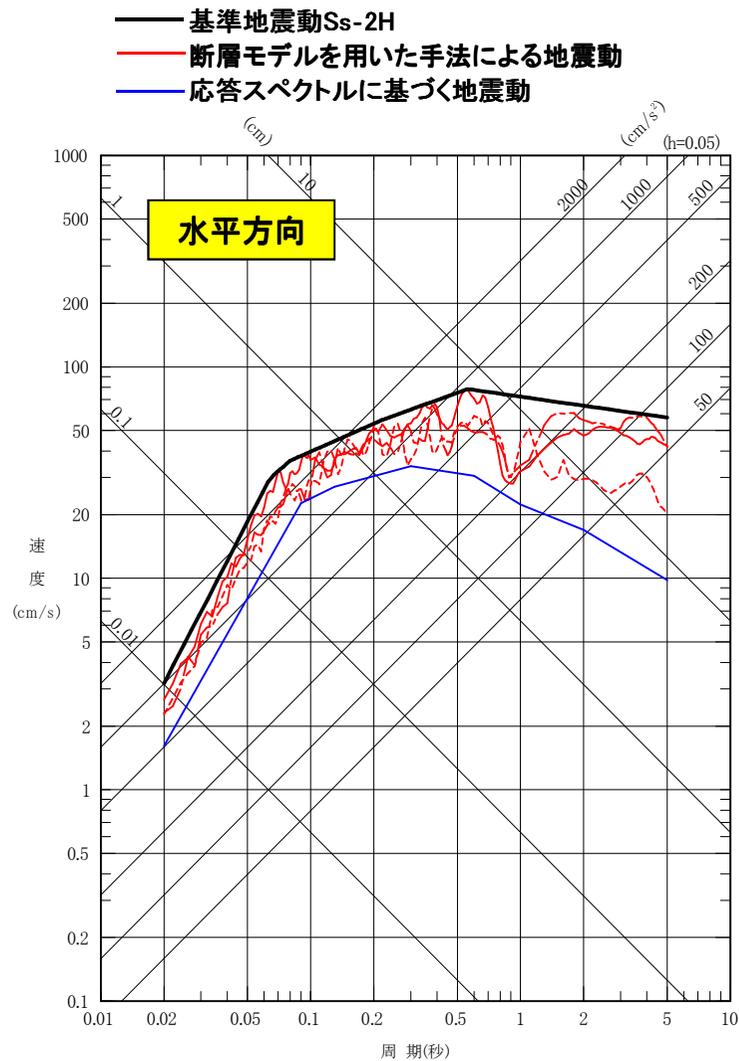
目次

1. 世界の海洋プレート内地震
2. 検討用地震の選定
3. 検討用地震の地震動評価
- 4. 基準地震動 S_s**
5. まとめ

4. 基準地震動Ss

4.1 基準地震動Ss-2 設計用応答スペクトル(1)

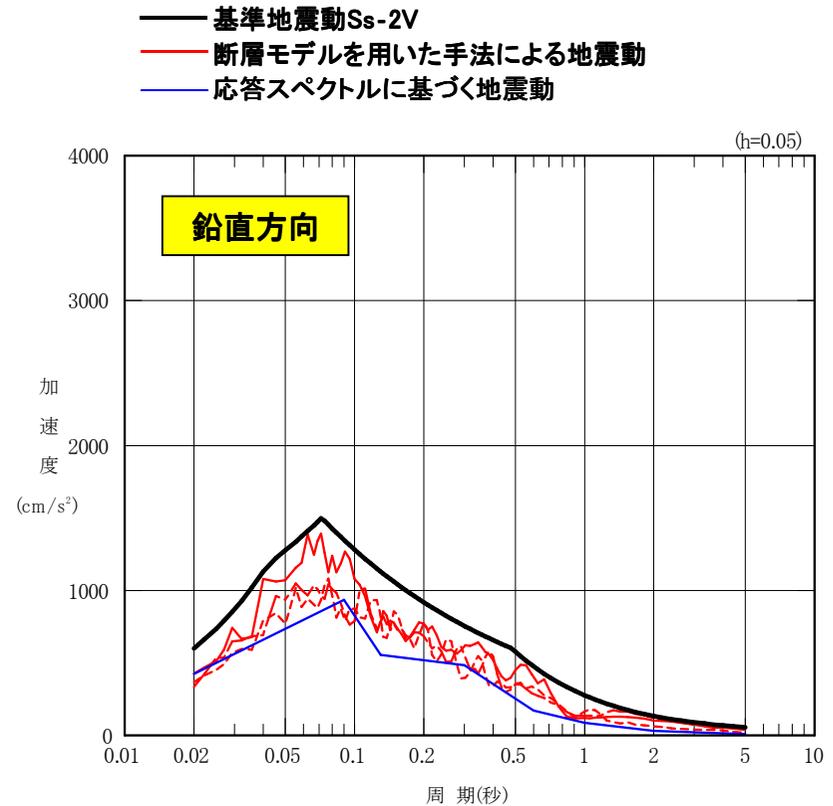
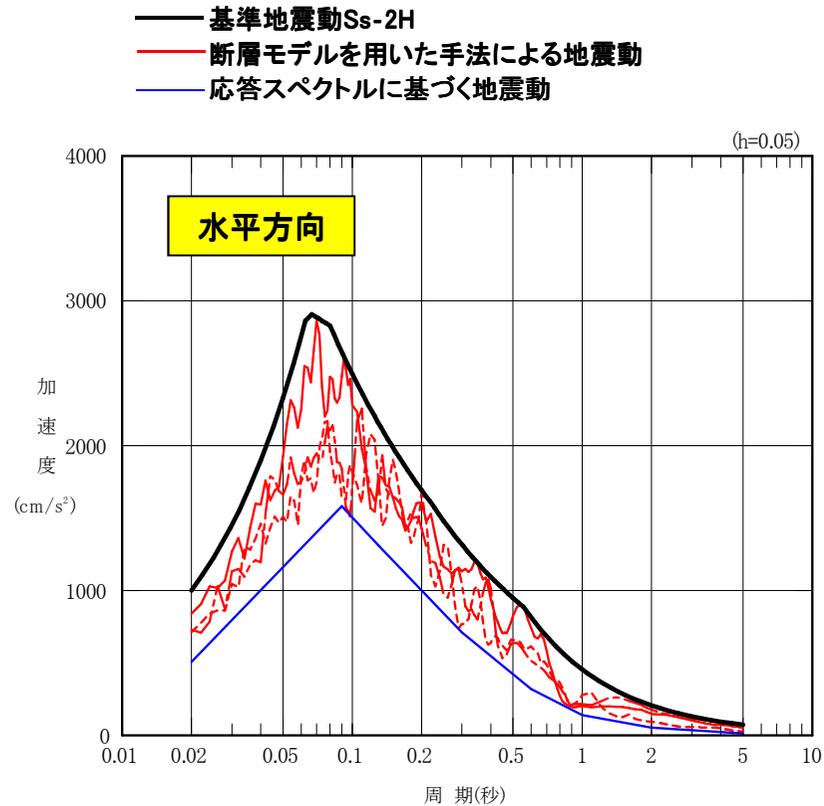
■基準地震動Ss-2の設計用応答スペクトルは、4.7型地震(M7.5)の断層モデルを用いた手法による地震動および応答スペクトルに基づく地震動を全て包絡するように設定。



4. 基準地震動Ss

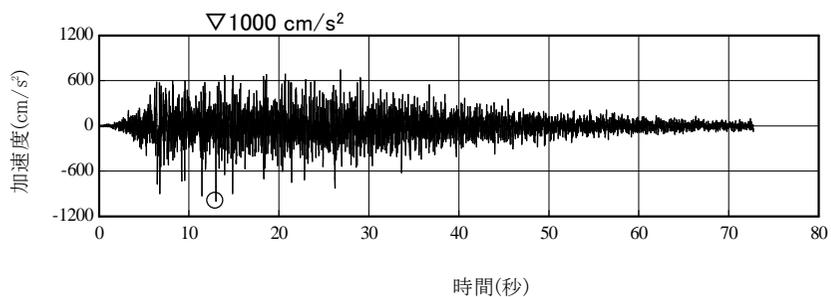
4.1 基準地震動Ss-2 設計用応答スペクトル(2)

■基準地震動Ss-2の設計用応答スペクトルは、4.7型地震(M7.5)の断層モデルを用いた手法による地震動および応答スペクトルに基づく地震動を全て包絡するように設定。

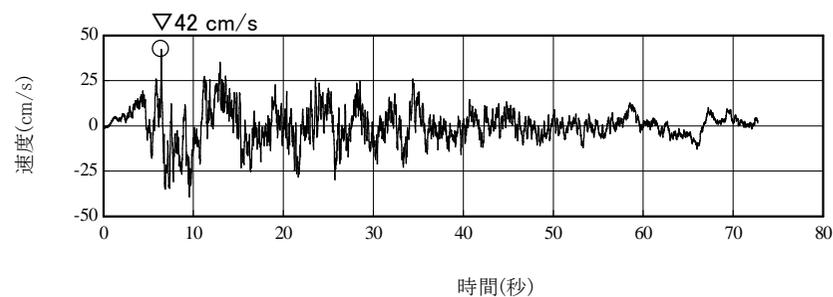


4. 基準地震動Ss

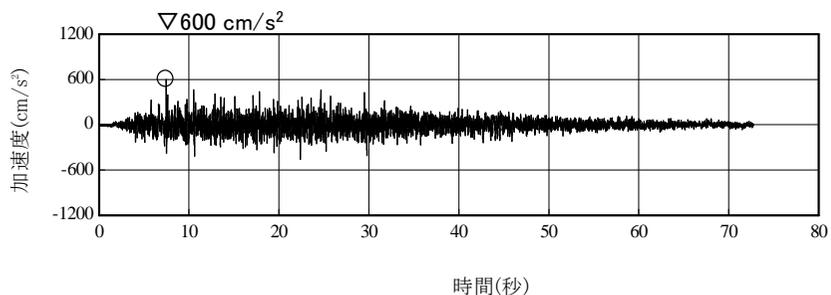
4.2 基準地震動Ss-2 加速度時刻歴波形, 速度時刻歴波形



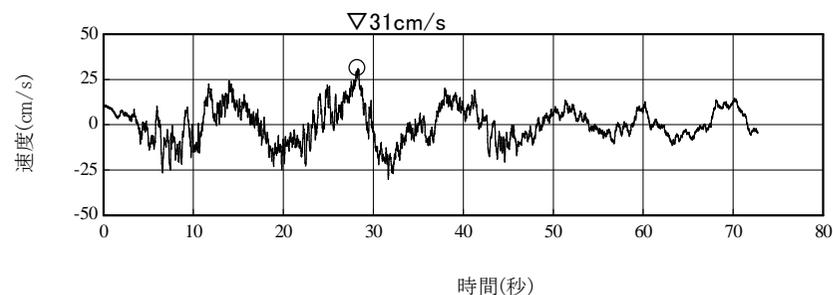
(水平方向)



(水平方向)



(鉛直方向)



(鉛直方向)

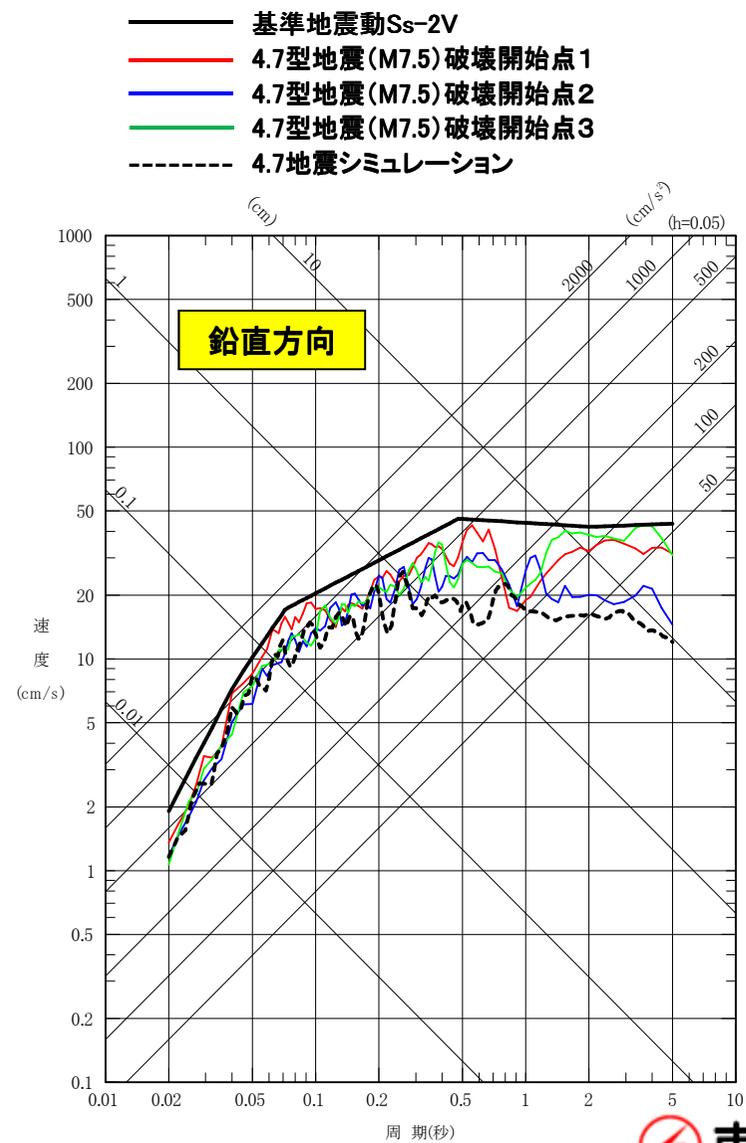
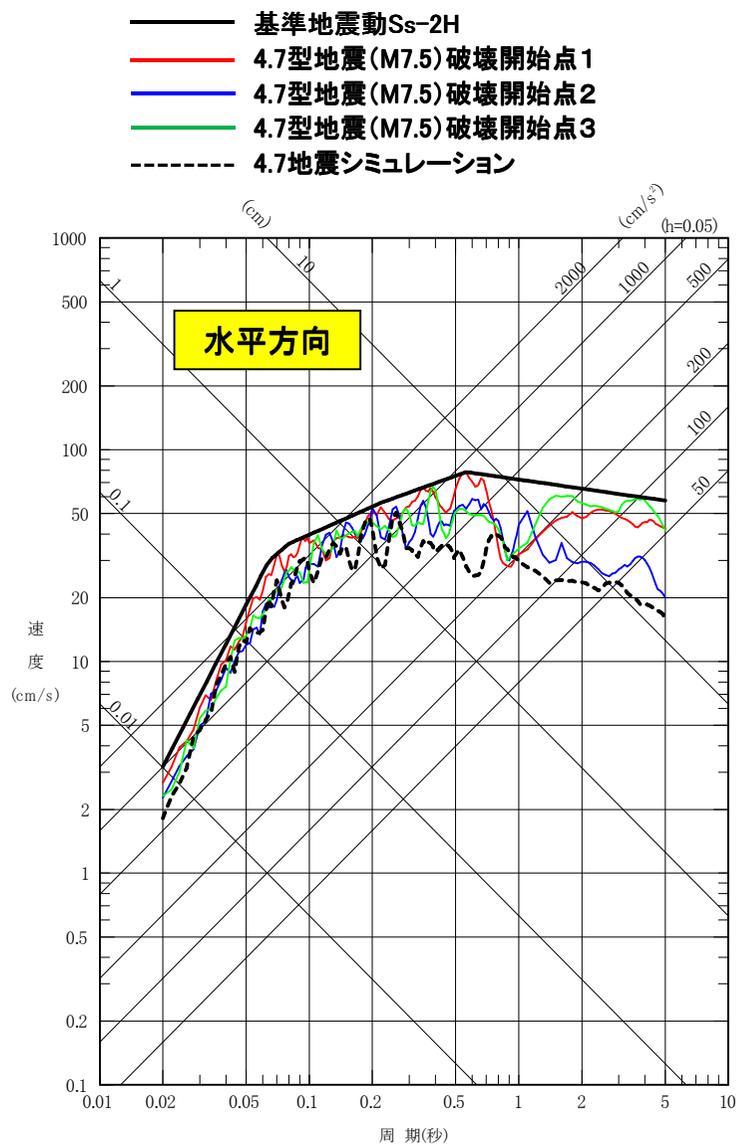
加速度時刻歴波形

速度時刻歴波形

4. 基準地震動Ss

4.3 4.7地震(M7.2)シミュレーション結果との比較(1)

■応答スペクトルによる比較(縦軸:速度)



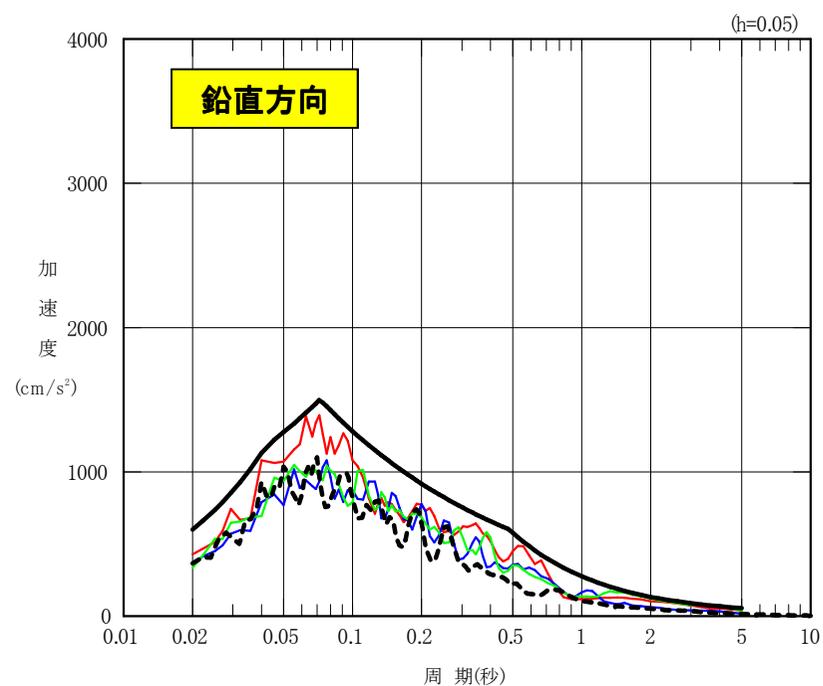
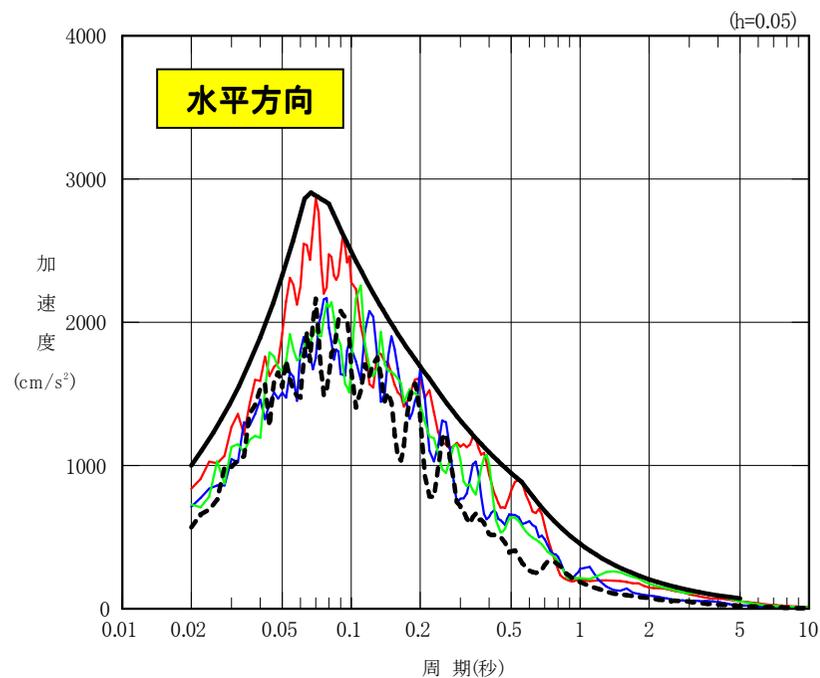
4. 基準地震動Ss

4.3 4.7地震(M7.2)シミュレーション結果との比較(2)

■応答スペクトルによる比較(縦軸:加速度)

— 基準地震動Ss-2H
 — 4.7型地震(M7.5)破壊開始点1
 — 4.7型地震(M7.5)破壊開始点2
 — 4.7型地震(M7.5)破壊開始点3
 - - - 4.7地震シミュレーション

— 基準地震動Ss-2V
 — 4.7型地震(M7.5)破壊開始点1
 — 4.7型地震(M7.5)破壊開始点2
 — 4.7型地震(M7.5)破壊開始点3
 - - - 4.7地震シミュレーション



目次

1. 世界の海洋プレート内地震
2. 検討用地震の選定
3. 検討用地震の地震動評価
4. 基準地震動 S_s
5. まとめ

5. まとめ

- 東北地方では、二重深発地震面上面の地震活動が卓越しており、上面で発生した4.7地震は、その震源断層の位置からも女川原子力発電所に対し最も影響が大きい地震であった。
- このことから、基準地震動 S_s の設定においては、検討用地震として、「2011年4月7日宮城県沖型地震」を選定した。
- 2011年4月7日宮城県沖型地震の断層モデルは、4.7地震のシミュレーションモデル等を踏まえたものであり、安全側に設定されている。
- 基準地震動 S_s-2 の設計用応答スペクトルは、2011年4月7日宮城県沖型地震における応答スペクトルに基づく地震動評価結果および断層モデルを用いた手法による地震動評価結果を全て包絡するように設定した。

参考文献

1. Seno, T and M. Yoshida (2004): Where and why do large shallow intraslab earthquakes occur?, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 141, 183–206.
2. 気象庁(1951～2012): 地震月報ほか
3. 地震調査研究推進本部(2014): 地震がわかる!, <http://www.jishin.go.jp/main/pamphlet/wakaru_shiryo2/index.htm>
4. Kita, S., T. Okada, A. Hasegawa, J. Nakajima and T. Matsuzawa (2010): Existence of interplane earthquakes and neutral stress boundary between the upper and lower planes of the double seismic zone beneath Tohoku and Hokkaido, northeastern Japan, *Tectonophysics*, 496.
5. Gamage, S.S.N., N. Umino, A. Hasegawa, and S.H. Kirby (2009): Offshore double-planed shallow seismic zone in the NE Japan forearc region revealed by sP depth recorded by regional networks, *Geophys. J. Int.*, 78, 195–214.
6. Kosuga, M., T. Sato, A. Hasegawa, T. Matsuzawa, S. Suzuki, and Y. Motoya (1996): Spatial distribution of intermediate-depth earthquakes with horizontal or vertical nodal planes beneath northeastern Japan, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 93, 63–89, 1996.
7. 地震調査研究推進本部(2013): 今後の地震動ハザード評価に関する検討～2013年における検討結果～, <http://jishin.go.jp/main/chousa/13_yosokuchizu/index.htm>
8. 気象庁(2011a): 平成23年4月 地震・火山月報(防災編), <<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/gaikyo/>>
9. 気象庁(2012): 気象庁技術報告 第133号 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震調査報告, <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/gizyutu/133/gizyutu_133.html>
10. Nakajima, J., A. Hasegawa, and S. Kita (2011): Seismic evidence for reactivation of a buried hydrated fault in the Pacific slab by the 2011 M9.0 Tohoku Earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L00G06, doi:10.1029/2011GL048432, 2011.
11. Hasegawa, A., S. Horiuchi, and N. Umino(1994): Seismic structure of the northeastern Japan convergent margin: A synthesis, *J. Geophys. Res.*, 99, 22295–22311, 1994.
12. Ohta Y., S. Miura, M. Ohzono, S. Kita, T. Iinuma, T. Demachi, K. Tachibana, T. Nakayama, S. Hirahara, and S. Suzuki, T. Sato, N. Uchida, A. Hasegawa, and N. Umino(2011): Large intraslab earthquake (2011 April 7 M7.1) after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake (M9.0): Coseismic fault model based on the dense GPS network data, *Earth Planets Space*, 63(12), 1207–1211, 2011.
13. 迫田浩司, 岡田知己, 菅ノ又淳一, 長谷川昭(2004): 2003年5月26日宮城県沖地震(M7.1)と二重深発地震面上面の地震活動—スラブ内大地震震源域における地震活動の特徴抽出—, *地震* 第2輯, 第57巻
14. 浅野公之, 岩田知孝, 入倉孝次郎(2004): 2003年5月26日に宮城県沖で発生したスラブ内地震の震源モデルと強震動シミュレーション, *地震* 第2輯, 第57巻

参考文献

15. Kita, S., T. Okada, J. Nakajima, T. Matsuzawa, N. Uchida, A. Hasegawa (2007): Precise hypocenter distribution and earthquake generating and stress in and around the upper-plane seismic belt in the subducting Pacific slab beneath NE Japan, Eos Trans. AGU, 88(52), Fall Meet. Suppl., Abstract DI51A-0290, 2007.
16. 佐藤智美 (2012): 経験的グリーン関数法に基づく2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデル—プレート境界地震の短周期レベルに着目して—, 日本建築学会構造系論文集, 第77号, 2012年5月
17. 神田 克久, 広谷 浄, 石川 和也 (2013): 震度分布に基づく太平洋プレート内のスラブ内地震の短周期励起特性, 日本地球惑星科学連合大会2013年大会
18. 気象庁 (2011b): 平成23年7月 地震・火山月報(防災編), <<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/gaikyo/>>
19. 原田 怜, 釜江 克宏 (2011): 2011年4月7日宮城県沖のスラブ内地震の震源のモデル化, <<http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/jishin/>>
20. 笹谷 努, 森川 信之, 前田 宜浩 (2006): スラブ内地震の震源特性, 北海道大学地球物理学研究報告, No.69
21. 東北大学 (2011): 東北大学大学院理学研究科 第190回 地震予知連絡会, <<http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/project/yoti/y-zisin/ccep/>>
22. 佐藤智美, 巽誉樹 (2002): 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, 第556号
23. 壇一男, 渡辺基史, 佐藤俊明, 石井透 (2001): 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, 545, 51-62
24. Kanamori, H. (1977) : The Energy Release in Great Earthquakes, J. Geophys. Vol. 82
25. 佐藤智美 (2004): 強震記録に基づく2003年宮城県沖の地震の大加速度の成因に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第581号, 2004年4月
26. 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.