

地震・津波関連のご指摘事項への回答 (地震動評価)

- ・1993年釧路沖地震(M7.5)タイプの地震の影響の確認
- ・茨城県周辺の内陸地殻内地震に対する評価の妥当性

平成29年2月21日

日本原子力発電株式会社

第4回 地震・津波関連のご指摘事項

【説明資料】

資料2 新規制基準適合性確認審査の状況について(地震・津波関連)

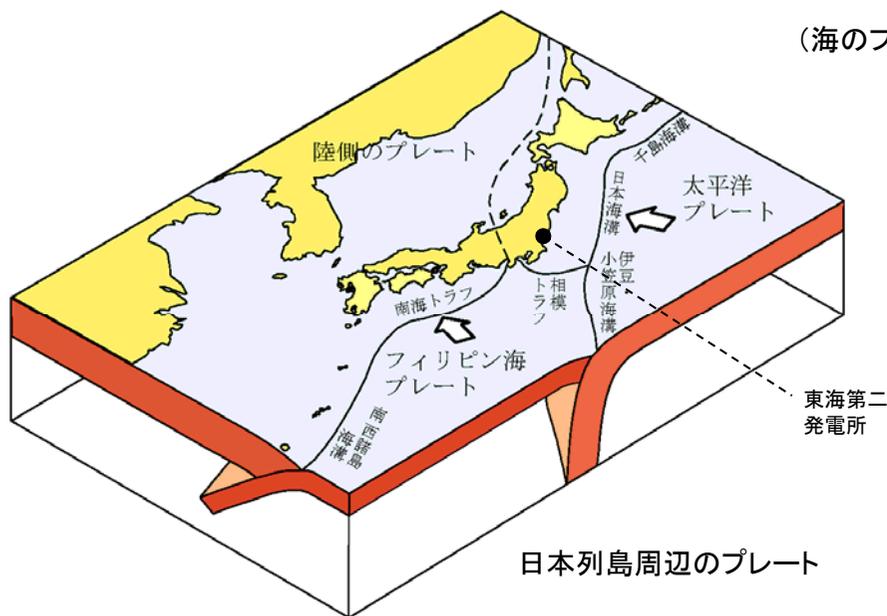
【ご指摘事項 ①】

太平洋プレート内で発生する地震に関し、1993年釧路沖地震(M7.5)タイプの地震が東海第二発電所の地下のやや深いところで発生することを想定し、影響を確認すること。

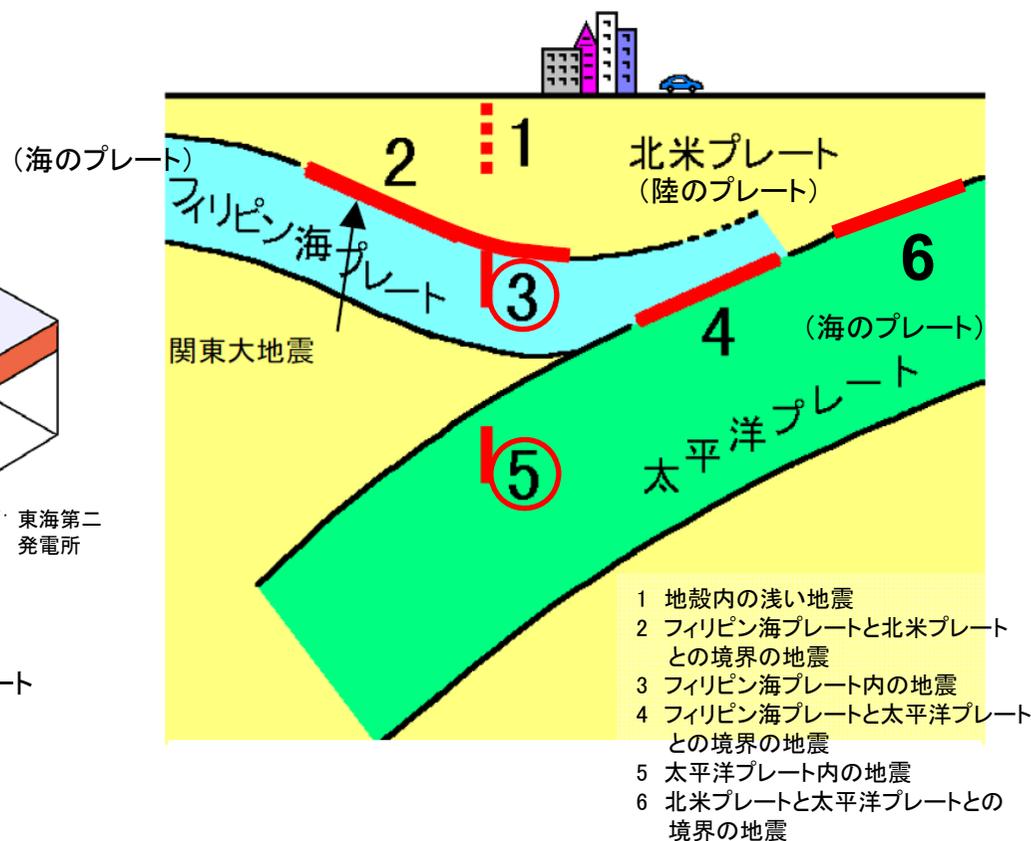
【弊社回答 ①】

1993年釧路沖型地震を東海第二発電所の地下深部の深さ100kmにおける太平洋プレート内に想定した場合の地震動評価を行い、検討用地震である茨城県南部の地震よりも敷地への影響が小さいことを確認している。

敷地周辺のプレートテクトニクス



日本のプレートテクトニクスモデル概念図
(防災科学技術研究所)



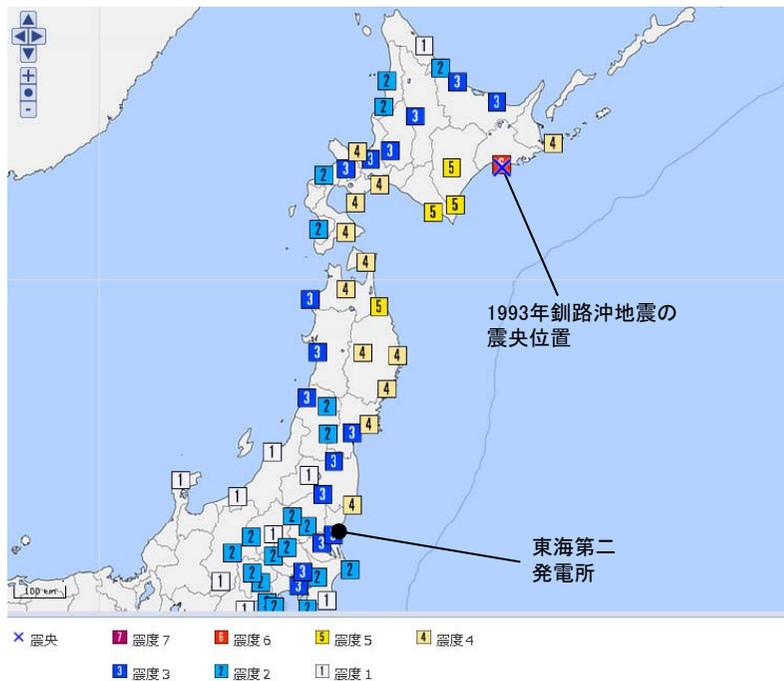
南関東地域で発生する地震のタイプ
(中央防災会議に一部加筆)

- 内陸地殻内地震は陸のプレートの内部で発生する地震で、図の1のタイプである。
- プレート間地震は異なるプレートの境界で発生する地震で、図の2, 4, 6のタイプである。
- 海洋プレート内地震は海のプレートの内部で発生する地震で、図の3, 5のタイプである。中央防災会議(2013)による茨城県南部の地震(前回ご説明)は図の3, 1993年釧路沖地震(M7.5)は図の5のタイプである。

1993年釧路沖地震の概要

■ 1993年釧路沖地震(M7.5)

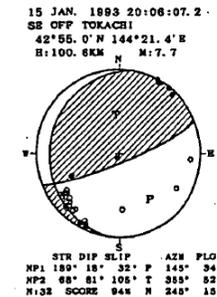
中村ほか(1994)によると、「断層面はもぐり込んでいる太平洋プレートの二重深発面の上面と下面の間にあり上面にはとどいていないように思われる。二重深発地震面の下面においては、down-dip extension型の地震が発生する傾向があることが知られているが、この地震は二重深発地震面の下面の地震としては、典型的な発震機構をもつ地震であると言える。」とされている。



1993年釧路沖地震(M7.5)の震度分布(気象庁)

1993年釧路沖地震(M7.5)の諸元

発生日時	1993年1月15日20時6分
震源地	釧路沖
北緯	42° 55.2′
東経	144° 21.2′
震源深さ	101km
地震規模	M7.5



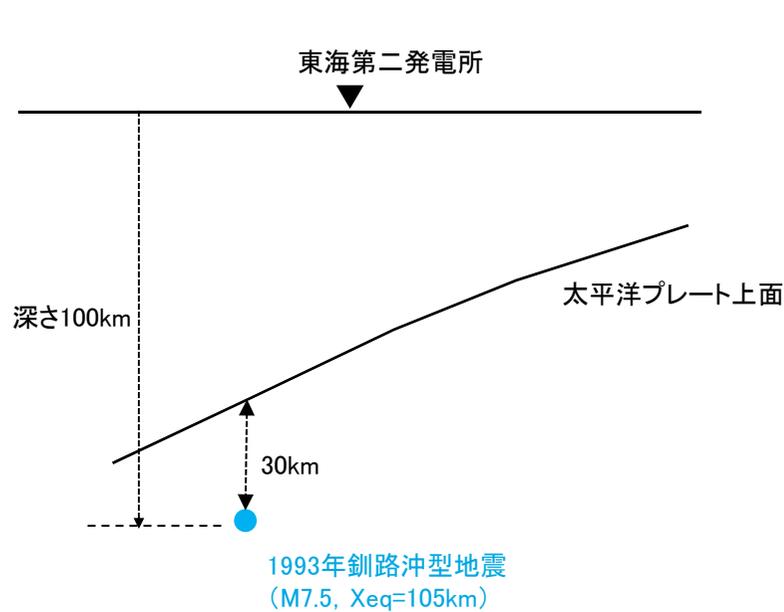
中村ほか(1994)より抜粋

震源メカニズム

1993年釧路沖型地震の想定位置

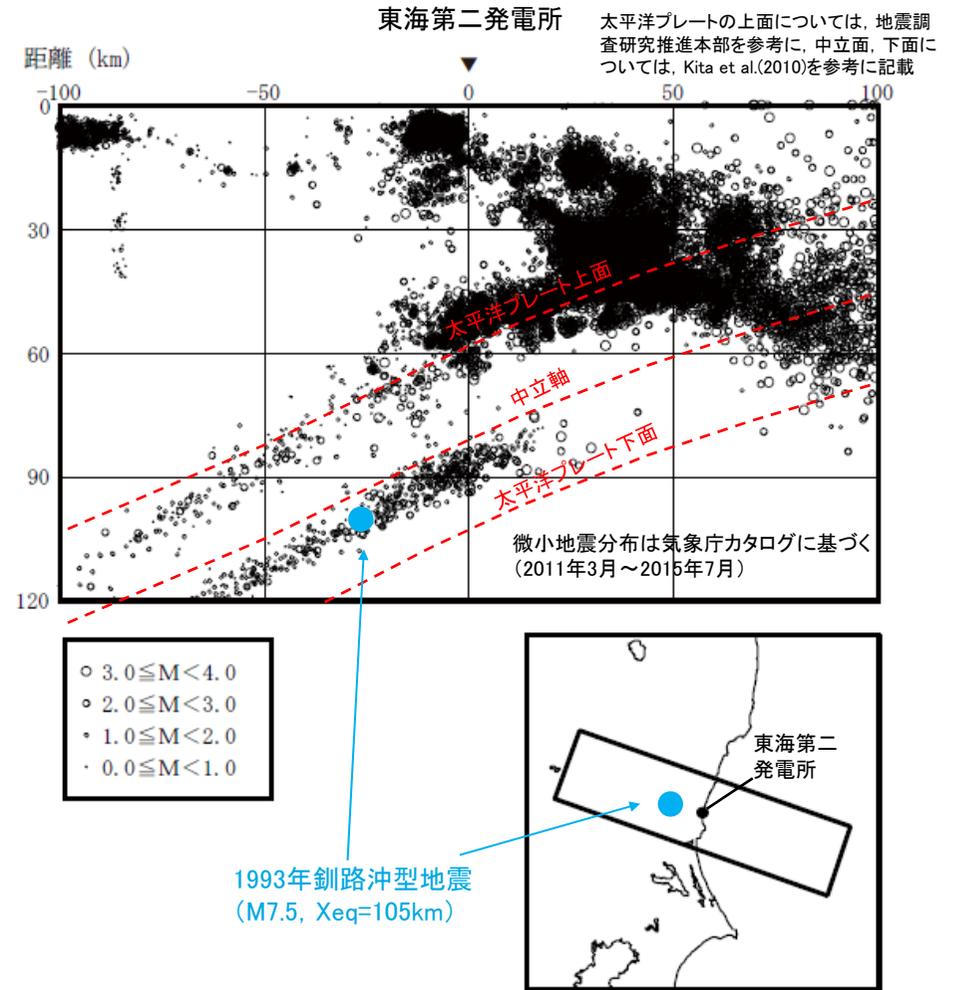
■震源を想定する位置

- ・1993年釧路沖地震と同じ規模であるM7.5の地震が、茨城県周辺の太平洋プレート内のやや深い位置で発生することを想定する。
- ・震源を想定する位置は、1993年釧路沖地震のM7.5の規模が発生した震源深さを重視し、同程度の深さである100kmとする。さらに地震調査研究推進本部を参考に太平洋プレート上面から深さ30kmとなる位置とする。



沈み込んだ太平洋プレート内で発生する地震については、地震調査研究推進本部を参考に太平洋プレート上面から30km下方にそれぞれの震源を想定

太平洋プレート内地震の震源の設定位置 (模式図)



東海第二発電所 太平洋プレートの上面については、地震調査研究推進本部を参考に、中立面、下面については、Kita et al.(2010)を参考に記載

微小地震分布は気象庁カタログに基づく (2011年3月～2015年7月)

1993年釧路沖型地震 (M7.5, Xeq=105km)

距離減衰式(Noda et al.(2002))による1993年釧路沖型地震の評価

■ 検討用地震の候補として抽出した震源と1993年釧路沖型地震について、諸元及び位置を示す。

年月日	地震名	地震規模 M	等価震源距離 (km) ^{※1}	プレート	補正係数 ^{※5}
1895. 1.18	霞ヶ浦付近の地震	7.2	69	フィリピン海 ^{※4}	考慮
1921.12. 8	茨城県龍ヶ崎付近の地震	7.0	74	フィリピン海	考慮
—	茨城県南部の地震(中央防災会議(2004))	7.3	64	フィリピン海	考慮
—	茨城県南部の地震(中央防災会議(2013))	7.3	70	フィリピン海	考慮
—	震源断層を予め特定しにくい地震(陸域)(地震調査研究推進本部)	7.1	89 ^{※2}	太平洋	考慮
—	震源断層を予め特定しにくい地震(海域)(地震調査研究推進本部)	7.3	81 ^{※3}	太平洋	考慮
—	海溝寄りのプレート内地震(地震調査研究推進本部)	8.2	164	太平洋	—
—	1993年釧路沖型地震	7.5	105	太平洋	考慮

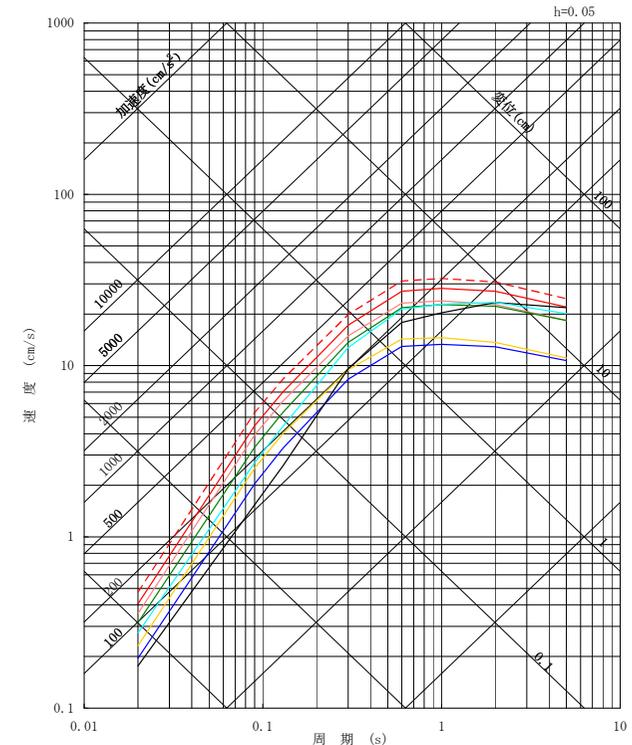
※1 地震カタログによる位置情報やプレート境界等深線等に基づいて算出

※2 敷地直下のプレート境界から30km下方に震源を想定して算出

※3 敷地からプレート境界最短となる線上でプレート境界から30km下方に震源を想定して算出

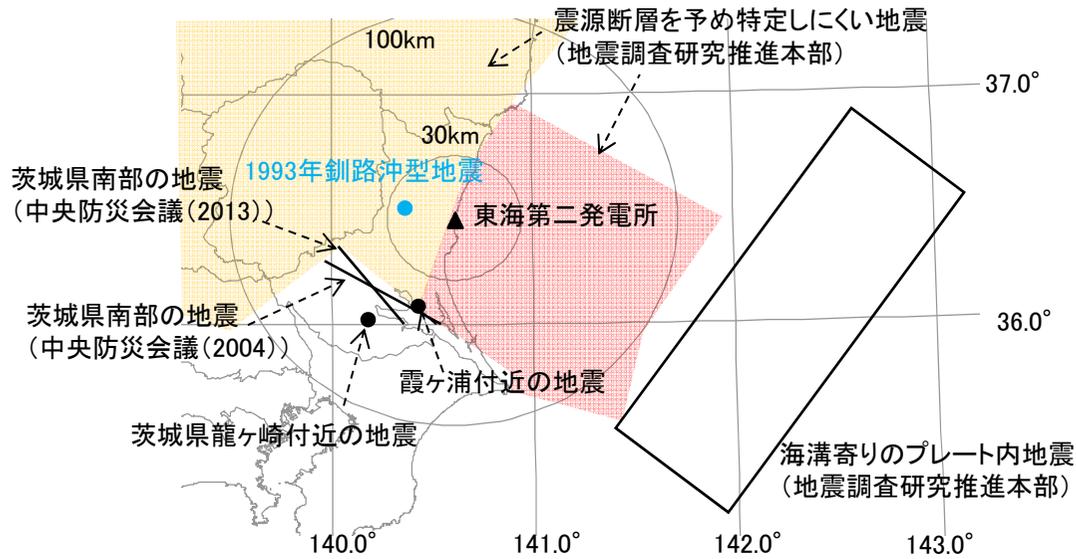
※4 首都直下地震防災・減災特別プロジェクトによると太平洋プレート内地震の可能性が指摘されているが、「信頼性は中程度で、今後のデータ追加により発生場所が変わる可能性を否定できない」とされていることから、敷地への影響の観点からフィリピン海プレートとして扱う。

※5 陸域寄りの場所で発生した海洋プレート内地震による補正係数として全周期帯にわたり2倍を考慮



- 霞ヶ浦付近の地震, M7.2, Xeq=69km
 - 茨城県龍ヶ崎付近の地震, M7.0, Xeq=74km
 - - - 茨城県南部の地震(中央防災会議(2004)), M7.3, Xeq=64km
 - - - 茨城県南部の地震(中央防災会議(2013)), M7.3, Xeq=70km
 - 震源断層を予め特定しにくい地震(地震調査研究推進本部, 陸域), M7.1, Xeq=89km
 - 震源断層を予め特定しにくい地震(地震調査研究推進本部, 海域), M7.3, Xeq=81km
 - 海溝寄りのプレート内地震(地震調査研究推進本部), M8.2, Xeq=164km
 - 1993年釧路沖型地震, M7.5, Xeq=105km
- フィリピン海プレート
- 太平洋プレート

海洋プレート内地震の地震動の応答スペクトル (Noda et al.(2002)の手法に補正係数を考慮)



対象震源位置図

1993年釧路沖型地震を茨城県周辺の太平洋プレート内に想定した場合、検討用地震である茨城県南部の地震よりも敷地への影響が小さい。

1993年釧路沖型地震の基本震源モデル

【震源モデルの位置, 形状等】

・地震規模

地震規模はTakeo et al.(1993)による1993年釧路沖地震の地震モーメントより与える。

$$M_0 = 3.30 \times 10^{20} (\text{Nm})$$

・断層面の位置・形状

アスペリティ面積等については, 強震動予測レシピ(笹谷ほか(2006)のスケーリング則)に基づき算出する。

断層傾斜角を1993年釧路沖地震 Morikawa and Sasatani(2004)に基づき, 0度に設定する。

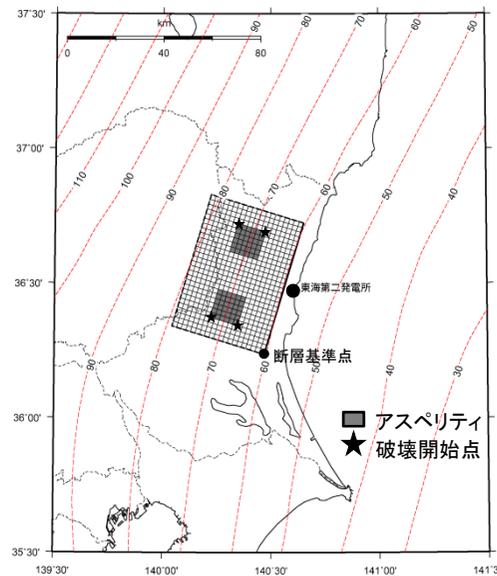
断層面の位置は, 1993年釧路沖地震の震源深さと同程度の深さである100km, かつ地震調査研究推進本部を参考に太平洋プレート上面から深さ30kmとなる位置とする。

・アスペリティ位置

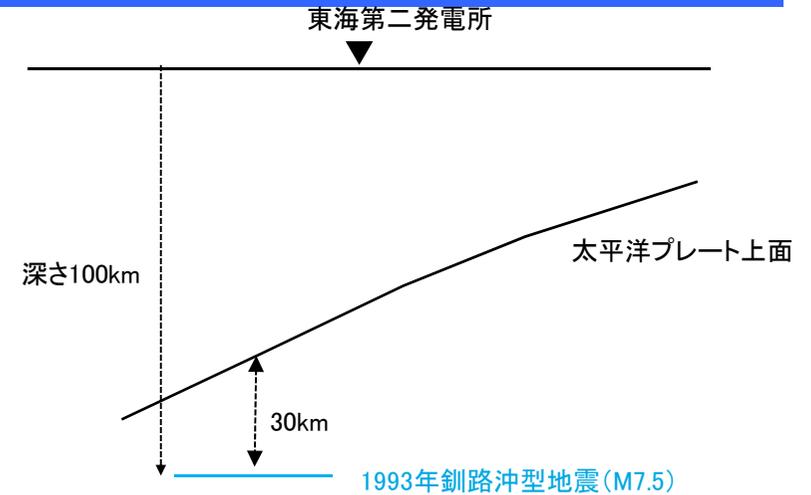
断層面の中央に2箇所設定する。

・ずれの種類

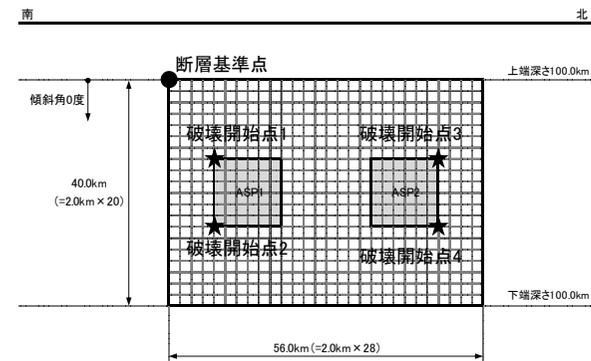
逆断層と設定する。



基本震源モデル



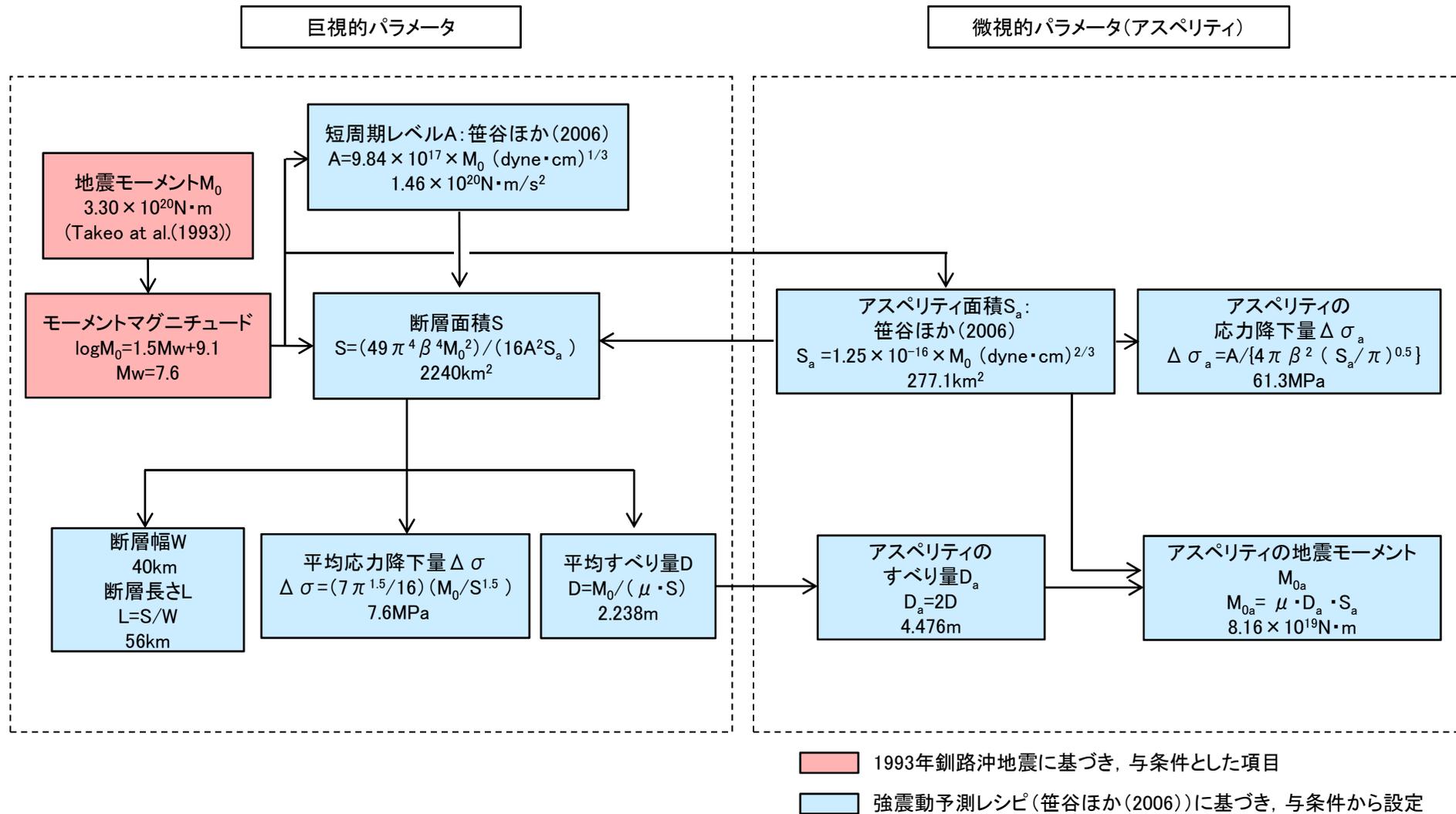
基本震源モデルの設定位置(模式図)



※断層傾斜角は0度(水平面)

1993年釧路沖型地震の基本震源モデル

■ 震源モデルのパラメータについて、強震動予測レシピ(2016)(笹谷ほか(2006))に基づき設定する。地震モーメントについては1993年釧路沖地震に関する知見(Takeo et al.(1993))に基づき設定する。断層パラメータの設定フローを下記に示す。



1993年釧路沖型地震の断層パラメータ

■ 基本震源モデルの断層パラメータ

項目		設定値	設定方法	項目		設定値	設定方法		
基準点 (断層南東端)	N	36° 14' 08"	敷地前面の位置	ア ス ペ リ テ ィ 全 体	面積	$S_a(\text{km}^2)$	277.1	$S_a=1.25 \times 10^{-16} M_0^{2/3} [\text{dyne-cm}]$ (笹谷ほか(2006)の M_0 - S_a 関係)	
	E	140° 28' 08"			すべり量	$D_a(\text{m})$	4.476	$D_a=2D$	
上端深さ	$h(\text{km})$	100	地震モーメント		$M_{0a}(\text{N}\cdot\text{m})$	8.16E+19	$M_{0a}=\mu D_a S_a$		
気象庁マグニチュード	M_j	7.5	応力降下量		$\Delta \sigma_a(\text{MPa})$	61.3	$\Delta \sigma_a=A/(4\pi\beta^2)/(S_a/\pi)^{0.5}$		
モーメントマグニチュード	M_w	7.6				(92.0)	$\Delta \sigma_a=A/(4\pi\beta^2)/(S_a/\pi)^{0.5} \times 1.5$		
地震モーメント	$M_0(\text{N}\cdot\text{m})$	3.30E+20	Takeo et al.(1993)		各 ア ス ペ リ テ ィ	面積	$S_{a1}(\text{km}^2)$	138.5	$S_{a1}=S_a/2$
走向	$\theta(\text{度})$	17	プレート境界等深線より設定			すべり量	$D_{a1}(\text{m})$	4.476	$D_{a1}=D_a$
傾斜角	$\delta(\text{度})$	0	1993年釧路沖地震(Morikawa and Sasatani(2004))			地震モーメント	$M_{0a1}(\text{N}\cdot\text{m})$	4.08E+19	$M_{0a1}=\mu D_{a1} S_{a1}$
ずれの種類	—	逆断層	—			応力降下量	$\Delta \sigma_{a1}(\text{MPa})$	61.3	$\Delta \sigma_{a1}=\Delta \sigma_a$
すべり角	$\lambda(\text{度})$	90	—		(92.0)			$\Delta \sigma_{a1}=\Delta \sigma_a$	
平均応力降下量	$\Delta \sigma(\text{MPa})$	7.6	$\Delta \sigma=(7\pi^{1.5}/16)(M_0/S^{1.5})$	背 景 領 域	面積	$S_b(\text{km}^2)$	1963.2	$S_b=S-S_a$	
断層面積	$S(\text{km}^2)$	2240	$S=(49\pi^4\beta^4 M_0^2)/(16A^2 S_a)$		すべり量	$D_b(\text{m})$	1.922	$D_b=M_{0b}/(\mu S_b)$	
断層長さ	$L(\text{km})$	56	$L=S/W$		地震モーメント	$M_{0b}(\text{N}\cdot\text{m})$	2.48E+20	$M_{0b}=M_0-M_{0a}$	
断層幅	$W(\text{km})$	40	1993年釧路沖地震(Morikawa and Sasatani(2004))				実効応力	$\Delta \sigma_b(\text{MPa})$	7.9
密度	$\rho(\text{g/cm}^3)$	3.25	地震調査研究推進本部(2004)		(11.8)	$\Delta \sigma_b=(D_b/W_b)/(D_a/W_a)\Delta \sigma_a$, $W_a=12\text{km}$			
せん断波速度	$V_s(\text{km/s})$	4.5	地震調査研究推進本部(2004)		Q値	Q	110f ^{0.69}	佐藤(1994)	
剛性率	$\mu(\text{N/m}^2)$	6.58E+10	$\mu=\rho V_s^2$		※ 設定値における ()は不確かさケースでの値				
平均すべり量	$D(\text{m})$	2.238	$D=M_0/(\mu S)$						
破壊伝播速度	$V_r(\text{km/s})$	3.2	$V_r=0.72V_s$ (Geller,1976)						
短周期レベル	$A(\text{N}\cdot\text{m/s}^2)$	1.46E+20	$A=9.84 \times 10^{17} \times M_0^{1/3} [\text{dyne-cm}]$ (笹谷ほか(2006)の M_0 - A 関係)						
高周波遮断係数	$f_{\text{max}}(\text{Hz})$	13.5	地震調査研究推進本部の海溝型地震						

不確かさの考慮について

- 不確かさの検討の要否を踏まえ、基本震源モデルに対し、地震動評価の観点から影響が大きいと考えられるパラメータに対し不確かさを考慮する。

評価ケース	地震規模	応力降下量	破壊開始点
基本震源モデル	Mw7.6	強震動予測レシピに基づく	アスペリティ 端部に複数設定
応力降下量の 不確かさ	Mw7.6	強震動予測レシピの 1.5倍※	アスペリティ 端部に複数設定

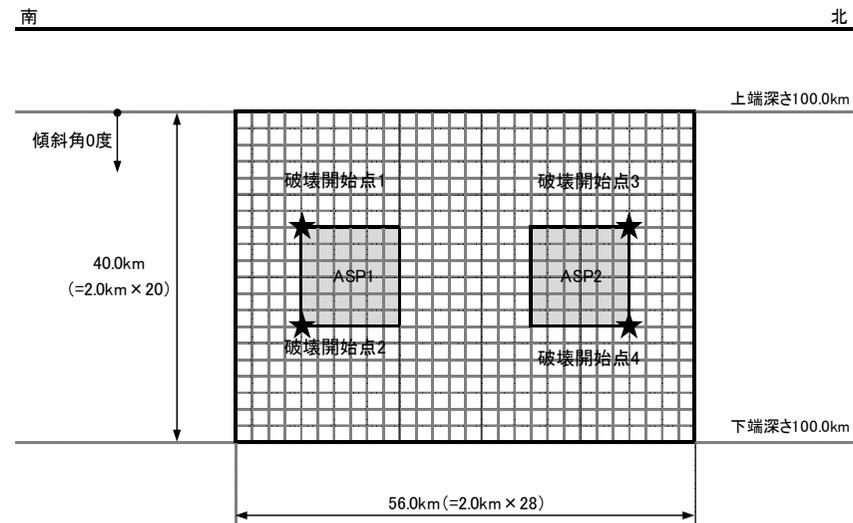
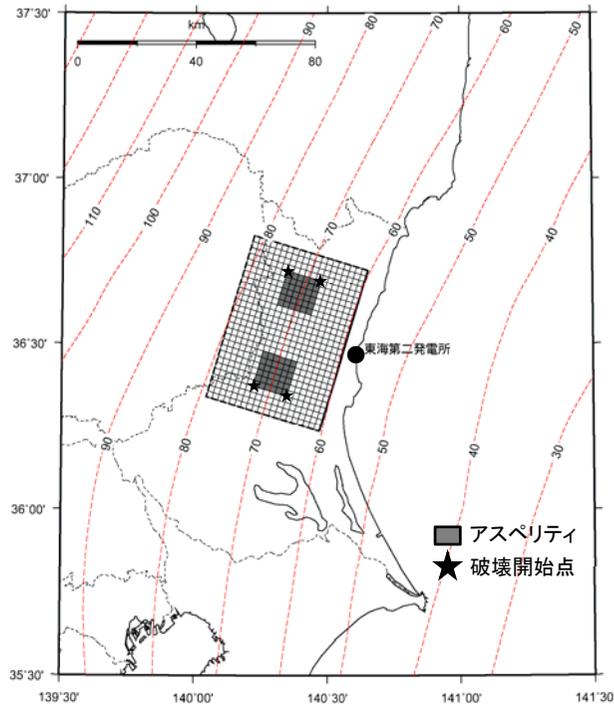
※応力降下量のみ1.5倍し、断層面積は基本モデルと同様とする。

 不確かさを考慮して設定するパラメータ

断層モデルを用いた手法による評価

■統計的グリーン関数法による地震動評価

想定した震源付近では適切な要素地震の観測記録が敷地で得られていないため、統計的グリーン関数法により評価する。



基本震源モデル

統計的グリーン関数法の評価に用いる地盤モデル※

※ 敷地内で実施したボーリングデータ等に基づき、速度構造や減衰定数を設定

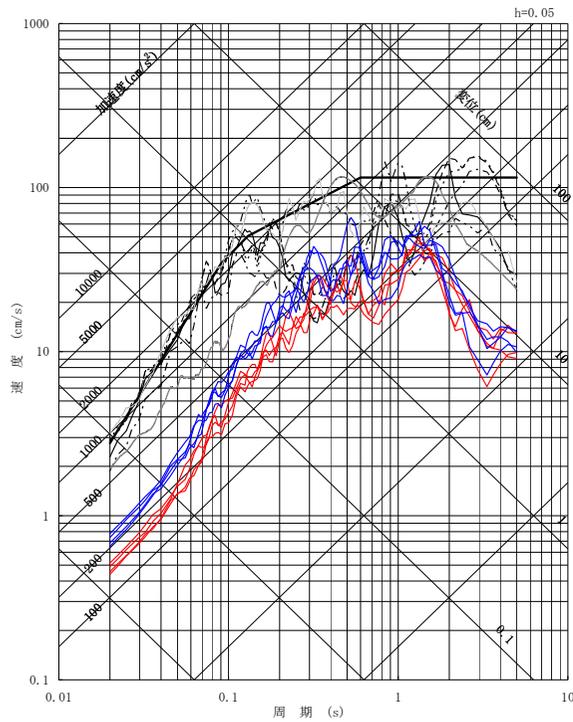
上面深度		層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	hs	hp	備考
G.L.(m)	E.L.(m)							
0	8	378	—	—	—	—	—	▼解放基盤表面 E.L.-370m
-378	-370	107	1.85	790	2000	0.02 (Q=25)	0.01 (Q=50)	▼地震基盤 E.L.-677m
-485	-477	200	1.96	840	2110			
-685	-677	—	2.63	2750	4740	Q=110f ^{0.69}	Q=110f ^{0.69}	

断層モデルを用いた手法による評価結果：応答スペクトル

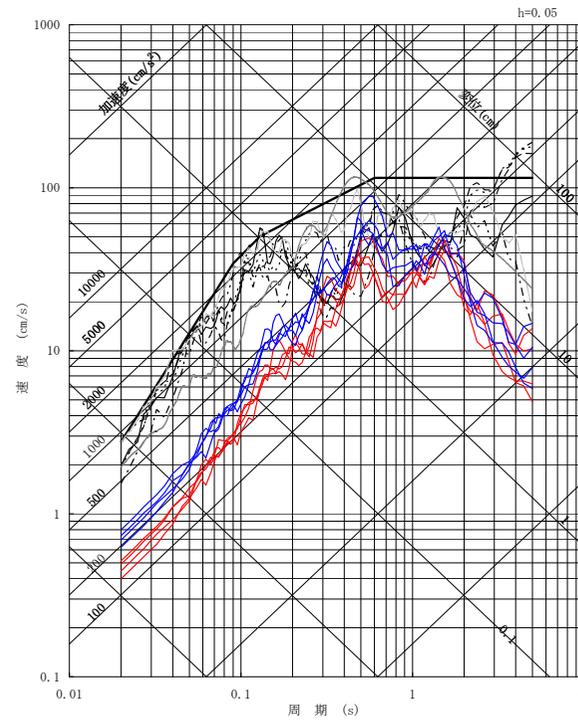
■統計的グリーン関数法による地震動評価結果

- 基本震源モデル(破壊開始点1~4)
- 応力降下量の不確かさ(破壊開始点1~4)

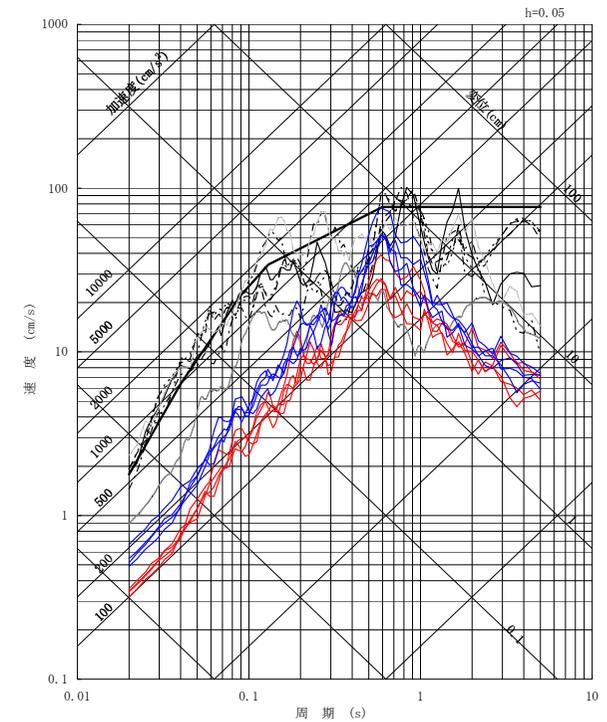
黒線: 基準地震動Ss



NS成分



EW成分



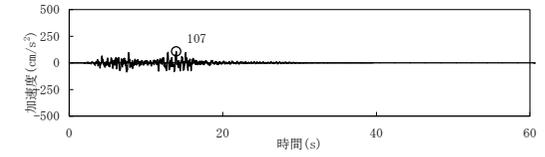
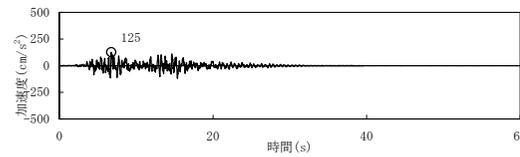
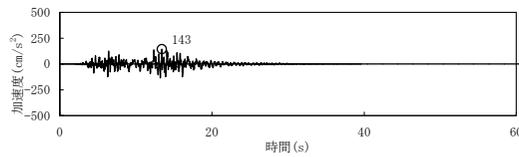
UD成分

1993年釧路沖型地震の地震動評価結果は、基準地震動Ssを下回っていることを確認した。

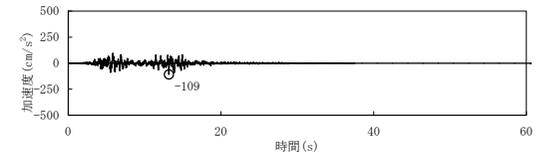
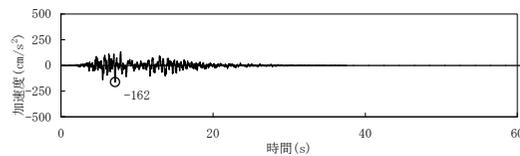
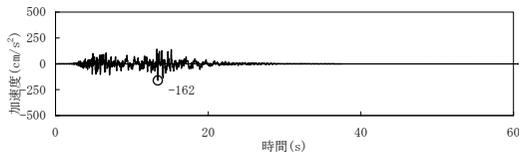
断層モデルを用いた手法による評価結果：時刻歴波形

■統計的グリーン関数法による地震動評価結果(基本震源モデル)

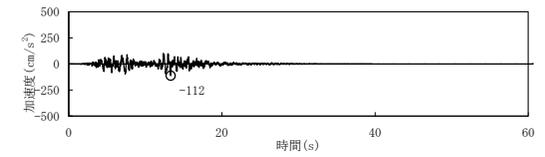
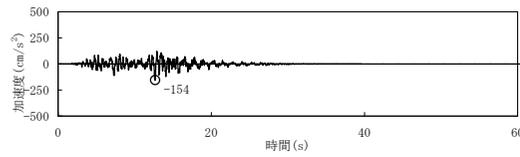
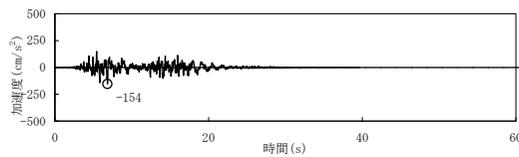
破壊開始点1



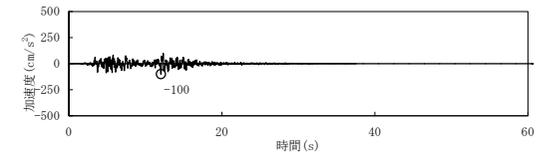
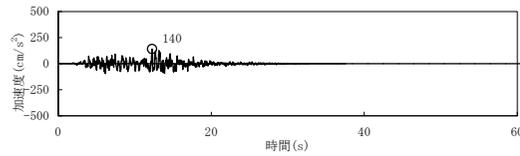
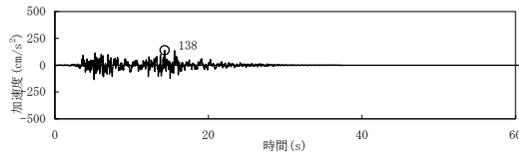
破壊開始点2



破壊開始点3



破壊開始点4



NS成分

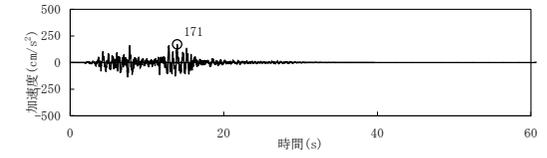
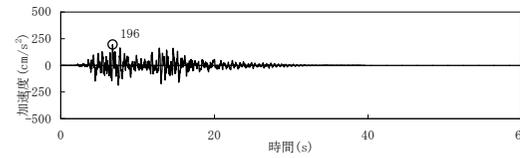
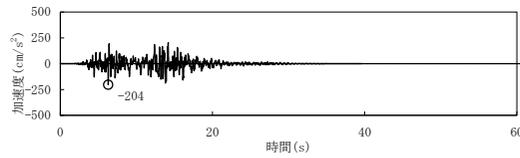
EW成分

UD成分

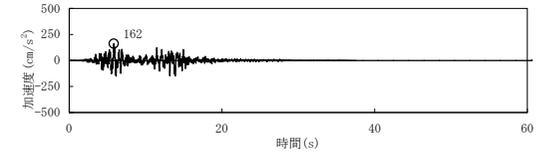
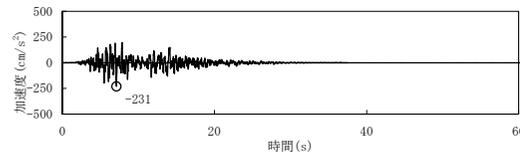
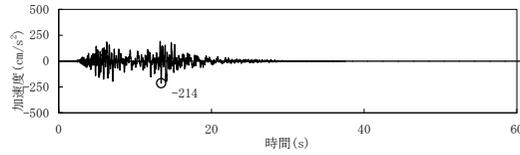
断層モデルを用いた手法による評価結果：時刻歴波形

■統計的グリーン関数法による地震動評価結果(応力降下量の不確かさ)

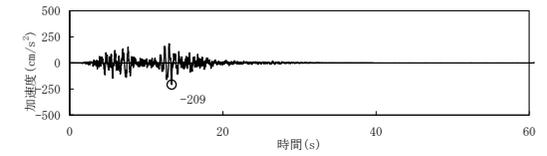
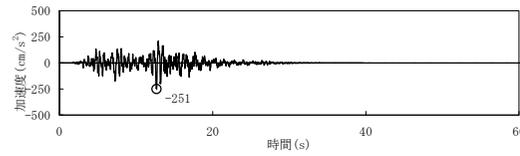
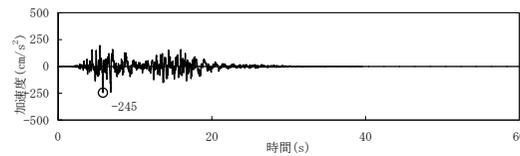
破壊開始点1



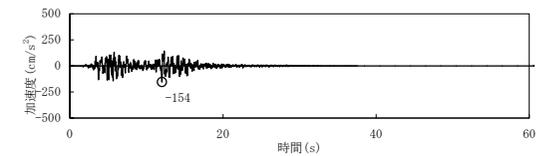
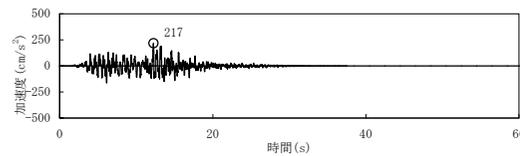
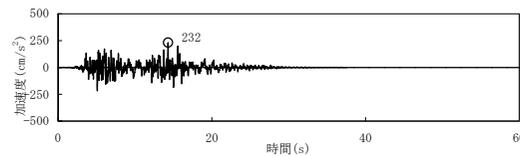
破壊開始点2



破壊開始点3



破壊開始点4



NS成分

EW成分

UD成分

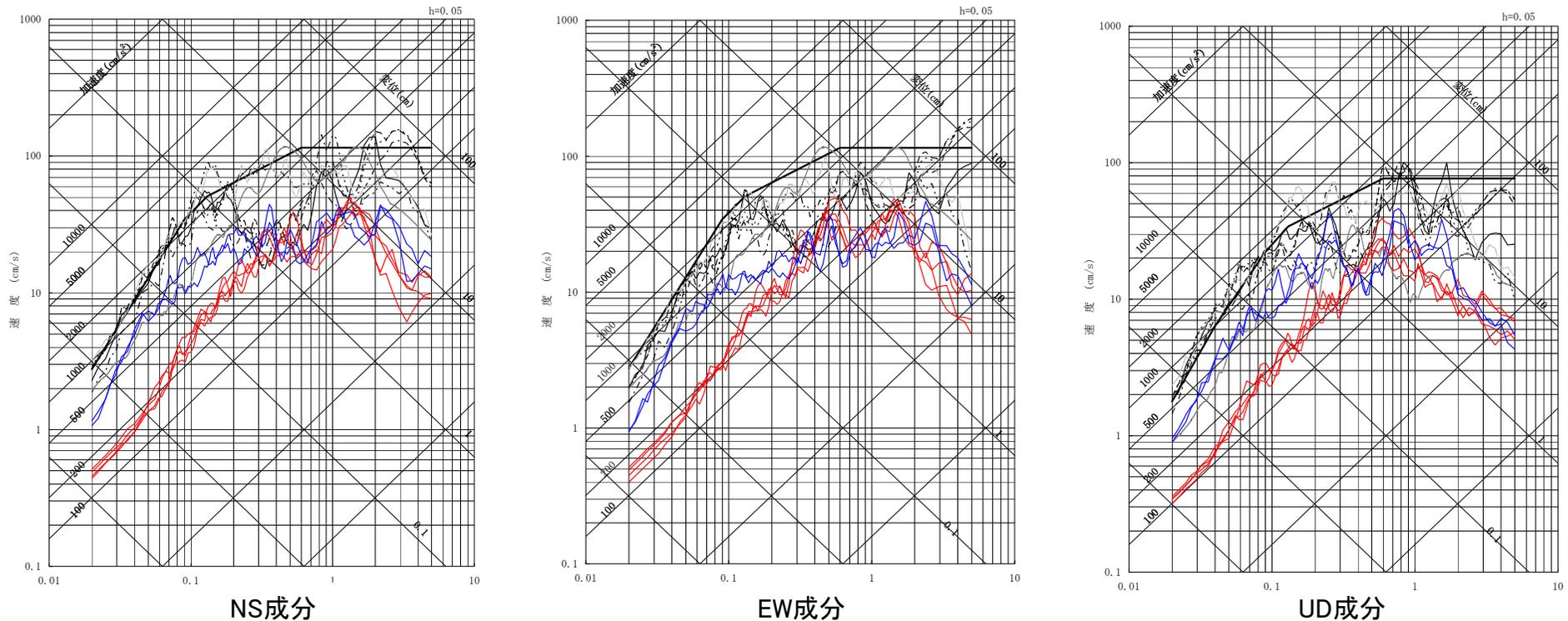
断層モデルを用いた手法による評価結果：茨城県南部の地震との比較

■茨城県南部の地震との比較

検討用地震である茨城県南部の地震と1993年釧路沖型地震の評価結果について、基本震源モデルによる比較を行う。

- 1993年釧路沖型地震(基本震源モデル)
- 茨城県南部の地震(基本震源モデル)

黒線: 基準地震動Ss



1993年釧路沖型地震の地震動評価結果は、短周期側においては茨城県南部の地震による地震動評価結果を下回っており、長周期側は同程度であることを確認した。

参考文献

- ・ 気象庁:地震年報2012年版他
- ・ 中村雅基, 勝間田明男, 桑山辰夫, 白井恒雄, 草野富二雄, 永岡修, 橋田俊彦, 橋本勲(1994):平成5年(1993年)釧路沖地震の地震活動について, 験震時報第58巻(1994)11~48頁
- ・ Minoru Takeo, Satoshi Ide, Yasuhiro Yoshida (1993): The 1993 Kushiro-oki, Japan earthquake: A high stress-drop event in a subducting slab., Geophys. Res. Lett., 1993; 20: 2607-2010.
- ・ Morikawa, Nobuyuki. and Tsutomu. Sasatani: Source models of two large intraslab earthquakes from broadband strong ground motions, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 94, pp.803-817, 2004.
- ・ Shizuo Noda, Kazuhiko Yashiro, Katsuya Takahashi, Masayuki Takemura, Susumu Ohno, Masanobu Tohdo, Takahide 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
- ・ 地震調査研究推進本部(2016):震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)
- ・ 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, Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan, No. 69, March 2006, pp. 123-134

第4回 地震・津波関連のご指摘事項

【説明資料】

資料2 新規制基準適合性確認審査の状況について 地震・津波関連

【ご指摘事項 ②】

茨城県周辺の内陸地殻内地震に対する評価の妥当性を示すこと。

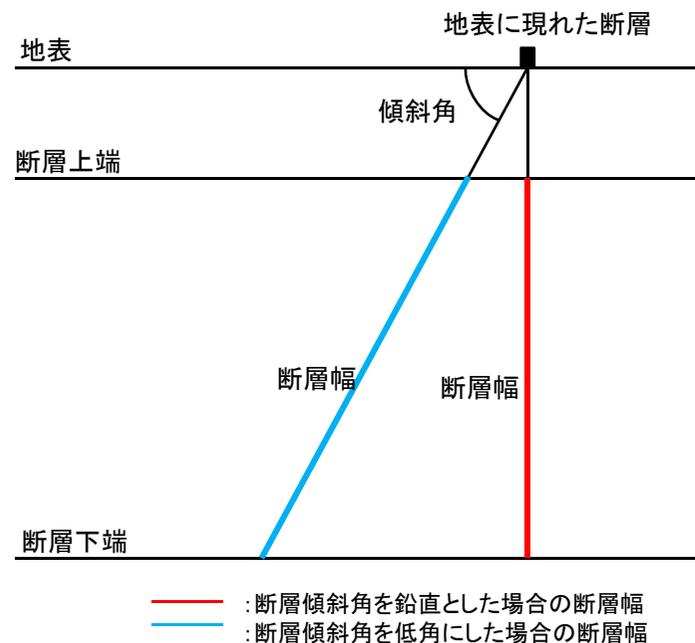
【弊社回答 ②】

- (1) 茨城県周辺の内陸地殻内地震は、斜めに傾斜し断層幅が大きくなる(地震規模が大きくなる)縦ずれの断層として評価している。
- (2) 検討用地震に選定したF1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動による地震の評価では, 基本震源モデルの段階で既に下記のとおり設定している。
- ・断層長さについて, 2011年4月に活動した直後である塩ノ平地震断層との連動を考慮
 - ・断層上端深さ, 下端深さを保守的に設定し断層幅が大きくなるよう配慮
 - ・音波探査からは傾斜角70~80度と推定される区間も含め, 断層全長にわたり傾斜60度の正断層として評価することで断層幅を保守的に設定し, より大きな地震規模(地震モーメント)を確保している。
 - ・2011年福島県浜通りの地震の短周期レベルは, 地震調査研究推進本部「強震動予測レシピ」と整合していることを確認
- (3) その上で, 短周期レベルの不確かさ(基本ケースの1.5倍), 断層傾斜角の不確かさ(45度)等を考慮。

断層幅の設定と地震動評価の関係

【入倉三宅式】
断層面積から地震モーメント(地震規模)を求める式

- ・断層面積は断層長さ×断層幅で算出する。
- ・断層長さが同じであっても断層幅が大きければ断層面積も大きくなり、地震規模が大きく評価される。
- ・断層幅は、断層上端深さを浅く、下端深さを深く設定するほど大きくなる。また、断層傾斜角を低角にするほど大きくなる。

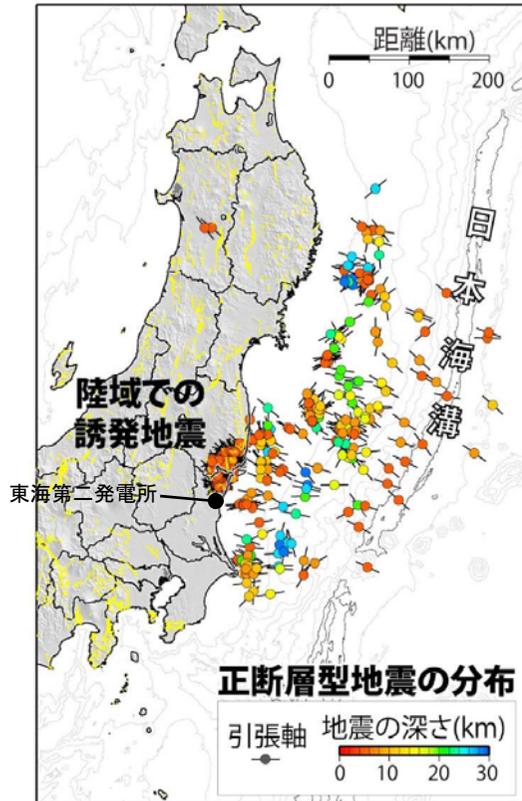


断層幅のイメージ図

断層パラメータ比較

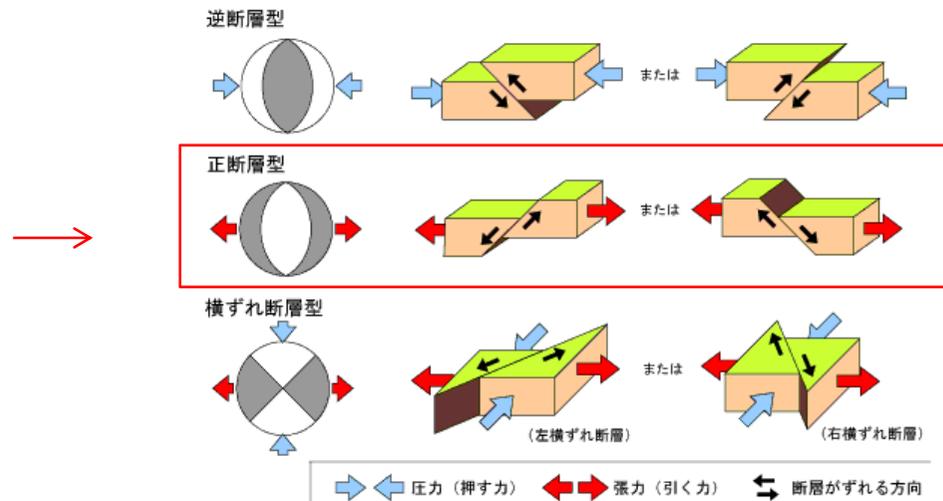
内陸地殻内地震の評価ケース		断層長さ (km)	断層上端 深さ(km)	断層下端 深さ(km)	断層傾斜 角(度)	断層幅 (km)	地震モーメント (N・m)
F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動による地震	基本震源モデル	58	3	18	60	17.3	5.21E+19
	断層傾斜角の不確かさ	58	3	18	45	21.2	7.32E+19
【参考】F1断層, 北方陸域 の断層の連動による地震 (設置変更許可申請時)	基本震源モデル	44	5	18	60	15.0	2.40E+19

茨城県周辺の活断層タイプ



青柳・上田(2012)より抜粋

正断層型誘発地震の分布



気象庁HPより

震源メカニズム

【茨城県周辺の内陸地殻内地震の特徴】

青柳・上田(2012)では、2011年福島県浜通りの地震を含む阿武隈南部地域で稠密地震観測を実施し震源メカニズム解を求め、余震域周辺の海域も含めこの地域が正断層の誘発地震の発生場であることを示している。

F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層: 基本震源モデルの設定(概要)

■地質調査結果や2011年福島県浜通りの地震から得られる知見を参考に基本震源モデルを設定する。

【断層形状, 断層タイプ】

- 断層長さについては、新規制基準適合性審査第381回会合に基づき、F1断層から塩ノ平地震断層までの同時活動を考慮した約58kmとする。
- 地震動評価におけるセグメント区分については、断層の分布状況から震源を南部と北部に区分する。その際、リニアメントが判読されない区間はF1断層側に含め、これらを合わせて一つの区間とすることで敷地に近い南部区間の地震モーメントを大きくし、安全側の設定とする。
- 地震のタイプについては、2011年福島県浜通りの地震が正断層であることや福島県から茨城県にかけての領域は正断層応力場とする知見(例えば青柳・上田(2012))、さらにF1断層における音波探査結果から正断層センスのずれが認められることを踏まえ正断層とする。
- 断層傾斜角については、F1断層における音波探査結果や2011年福島県浜通りの地震の震源インバージョンモデルでの傾斜角(57~73度)を参考に西傾斜60度とする。
- 断層幅については、断層上端深さを3km, 下端深さを18kmとして断層傾斜角60度を考慮した17.3kmとする。

【アスペリティ位置】

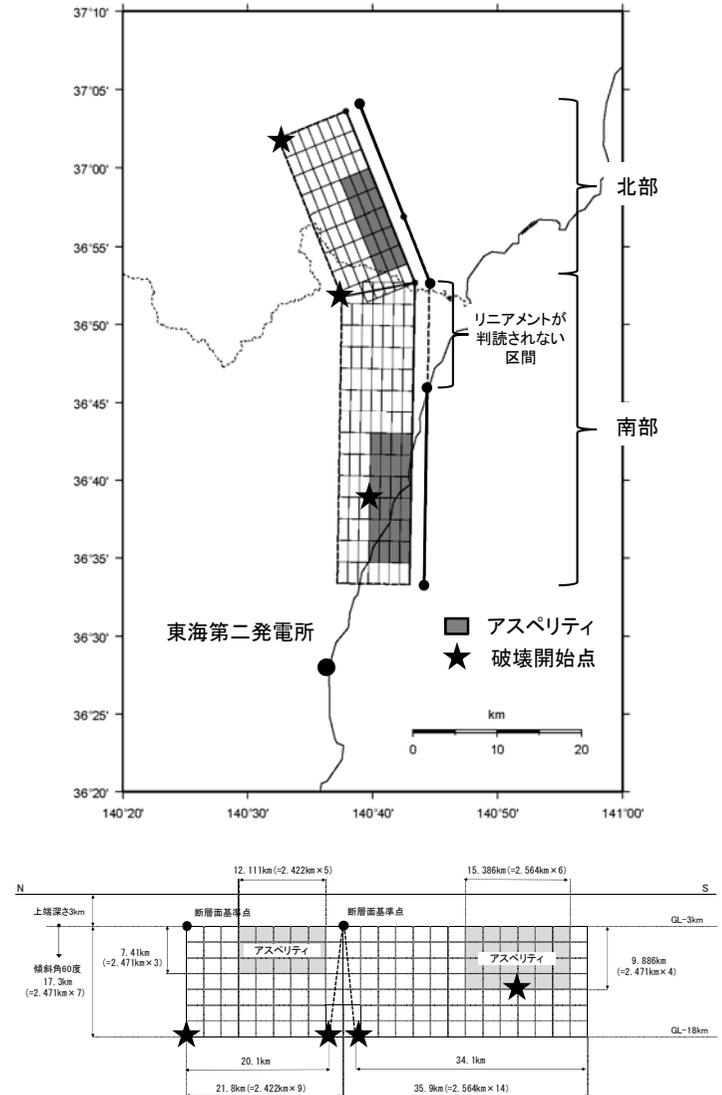
- アスペリティの位置については、地質調査結果に基づき、南部区間のうち調査でわかっているF1断層に1つ、北部では北方陸域の断層~塩ノ平地震断層に1つ、それぞれ敷地に近くなるように配置する。
- 断層長さ方向の配置については、Manighetti et al.(2005)等の知見を踏まえるとアスペリティのように大きなすべりが生じる領域とすべりが無い領域が隣接することは考えにくいことから、断層端部との間に1マス分背景領域を設定する。断層幅方向の配置については、すべりに追従する表層(地表から断層上端までの強震動を出さない層)が存在するので安全側に断層上端にアスペリティを配置する。
- なお、リニアメントが判読されない区間をF1断層側に含め、これらを合わせて一つの区間とすることで、敷地に近い南部に配置するアスペリティの地震モーメントを大きくし、安全側の設定とする。

【破壊開始点位置】

破壊開始点については、強震動予測レシピ、糸井ほか(2009)、平田・佐藤(2007)を踏まえ、アスペリティ下端や断層下端のうち敷地への影響の大きい位置に複数設定する。

【破壊伝播速度Vr】

破壊伝播速度については、強震動予測レシピで用いられているGeller(1976)より、 $V_r=0.72V_s$ とする。ただし、2011年福島県浜通りの地震における破壊伝播速度の各知見と比較の上、妥当性を確認する。



基本震源モデル

F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層: 基本震源モデルの設定(概要)

■主要なパラメータの設定

下記4個の断層パラメータを与条件として与え, アスペリティの応力降下量 $\Delta \sigma_a$ については, Madariaga(1979)の関係式を用いて算定する。

・断層面積 $S(\text{km}^2)$

断層長さと同断層幅より算出

・地震モーメント $M_0(\text{N}\cdot\text{m})$

入倉・三宅(2001)より $M_0 = \{S / (4.24 \times 10^{-11})\}^{2.0} / 10^7$

・平均応力降下量 $\Delta \sigma$ (MPa), アスペリティ面積比 S_a/S

Boatwright(1988), 壇ほか(2001)からアスペリティ面積を算出すると30%を超えるため, 与条件として平均応力降下量をFujii and Matsu'ura(2000)より3.1MPa, アスペリティ面積比をSomerville et al.(1999)より0.22と設定する。

Madariaga(1979)の関係式

$$\Delta \sigma_a = (S / S_a) \cdot \Delta \sigma$$

ここで,

S_a : アスペリティ総面積 (km^2)

$\Delta \sigma_a$: アスペリティの応力降下量(MPa)

$\Delta \sigma$: 平均応力降下量(MPa)

佐藤・堤(2012)では, 正断層の地震である2011年福島県浜通りの地震の短周期レベルは, 内陸地殻内地震の平均的な値であると推定されている。

基本震源モデルの断層パラメータ

■断層パラメータ(基本震源モデル)

項目	設定値			設定方法	
	全体	北部	南部		
断層上端長さ(km) 断層下端長さ(km)	57.7 54.2	21.8 20.1	35.9 34.1	活断層調査結果による位置を基に設定	
断層傾斜角(度)	60(西傾斜)	60(西傾斜)	60(西傾斜)	活断層調査結果や2011年福島県浜通りの地震の震源インバージョン解析モデルを参考に設定。海上音波探査記録からはF1断層は西側落下の高角な断層であると考えられるものの、傾斜角60度と設定する。	
断層上端深さ(km) 断層下端深さ(km)	3 18	3 18	3 18	断層上端深さは、2011年福島県浜通りの地震の震源域における微小地震分布等の知見を考慮し3kmと設定している。震源モデルの南部では3kmよりも深いと想定されるが、保守的に3kmとする。 断層下端深さは、広域の微小地震分布を考慮し18kmと設定している。震源モデルの北部ではそれよりも浅いと想定されるが、保守的に18kmとする。	
断層幅W(km)	17.3	17.3	17.3	地震発生層と断層傾斜角から設定	
断層面積S(km ²)	967.9	362.4	605.5	断層面より算定	
破壊伝播様式	同心円状	同心円状	同心円状	—	
地震モーメントM ₀ (N・m)	5.21E+19	1.65E+19	3.56E+19	$M_0=[S/(4.24 \times 10^{-11})]^2/10^7$ 全体の地震モーメントを断層面積の1.5乗比で分配	
剛性率(N/m ²)	3.50E+10	3.50E+10	3.50E+10	$\mu = \rho \beta^2$, $\rho = 2.7\text{g/cm}^3$, $\beta = 3.6\text{km/s}$ (β は敷地周辺を対象にした地震波速度トモグラフィ、 ρ は地震本部による「全国1次地下構造モデル(暫定版)」を参考に設定)	
平均すべり量D(cm)	153.9	130.1	168.1	$D=M_0/(\mu S)$	
平均応力降下量 $\Delta \sigma$ (MPa)	3.1	3.1	3.1	Fujii and Matsu'ura(2000)による	
破壊伝播速度Vr(km/s)	2.59	2.59	2.59	$Vr=0.72 \beta$ (Geller,1976による)	
短周期レベルA(N・m/s ²)(参考)	1.98E+19	—	—	$A=2.46 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3}$	
アスペリティ	面積S _a (km ²)	212.9	79.7	133.2	$S_a=0.22S$
	平均すべり量D _a (cm)	307.7	260.1	336.2	$D_a=2D$
	地震モーメントM _{0a} (N・m)	2.29E+19	7.26E+18	1.57E+19	$M_{0a}=\mu S_a D_a$
	応力降下量 $\Delta \sigma_a$ (MPa)	14.09	14.09	14.09	$\Delta \sigma_a = \Delta \sigma \times S/S_a$
	短周期レベルA(N・m/s ²)(参考)	1.89E+19	1.16E+19	1.49E+19	$A=4 \pi r_a \Delta \sigma_a \beta^2$
背景領域	面積S _b (km ²)	755.0	282.7	472.3	$S_b=S-S_a$
	平均すべり量D _b (cm)	110.5	93.4	120.7	$D_b=M_{0b}/(\mu S_b)$
	地震モーメントM _{0b} (N・m)	2.92E+19	9.24E+18	1.99E+19	$M_{0b}=M_0-M_{0a}$
	実効応力 $\Delta \sigma_b$ (MPa)	2.82	2.82	2.82	$\Delta \sigma_b=0.2 \Delta \sigma_a$

詳細説明

■震源モデルの設定に関し、下記事項については次頁以降に詳細に示す。

- ① 断層長さ
- ② 断層上端深さ, 下端深さ
- ③ 断層傾斜角
- ④ 短周期レベル
- ⑤ 不確かさの考慮

① 断層長さ

塩ノ平地震断層

- リニアメントにほぼ一致して断層が認められる。
- 後期更新世以降の活動が認められる。
(2011年4月11日の地震等)

⇒ 震源として考慮する活断層として評価

北方陸域の断層

- リニアメントにほぼ一致して断層が認められる。
- 後期更新世以降の活動は否定できない。
 - 確認された断層は、軟質な粘土を伴い、平面的である。
 - 上載地層との関係は確認できない。

⇒ 震源として考慮する活断層として評価

リニアメントは判読されないが、断層の連続性等の情報が十分でない。

F1断層

上載地層法により後期更新世の活動が否定できない。

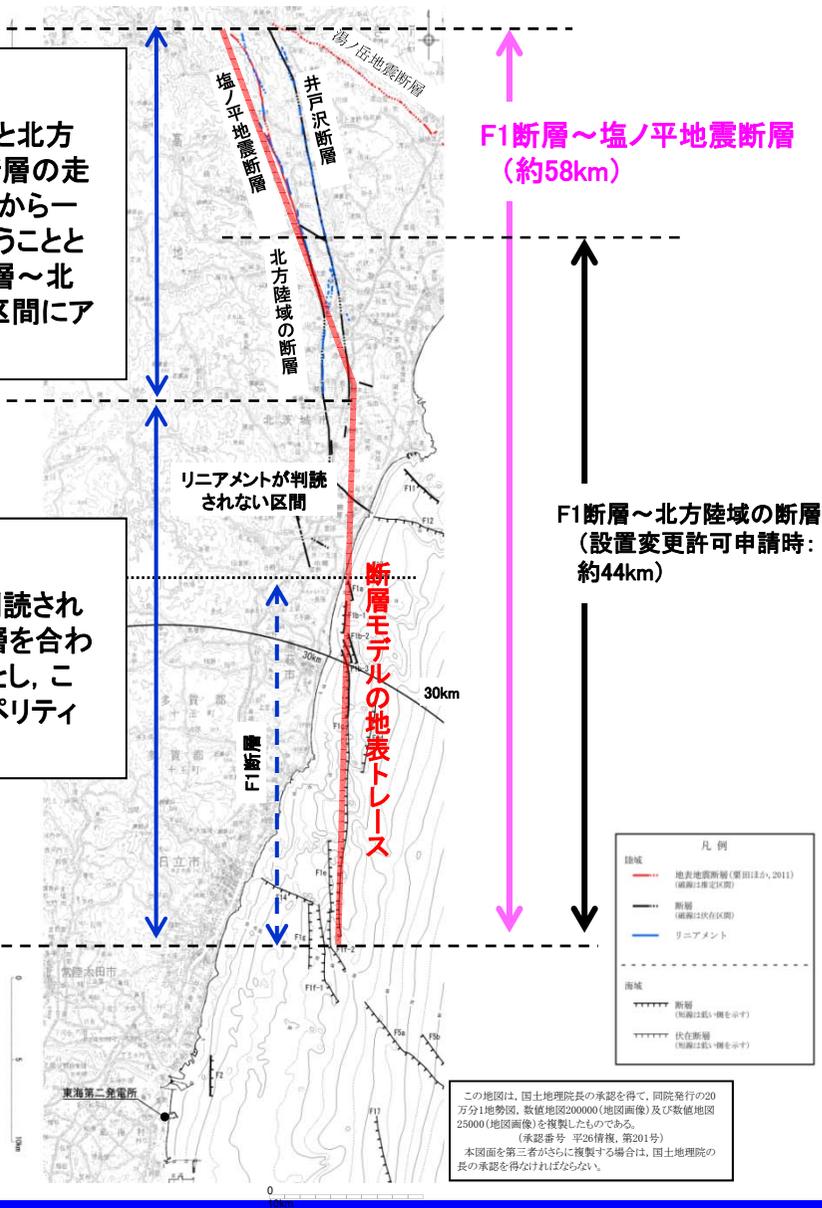
⇒ 震源として考慮する活断層として評価

■北部

塩ノ平地震断層と北方陸域の断層は、断層の走向・傾斜の類似性から一連の断層として扱うこととし、塩ノ平地震断層～北方陸域の断層の区間にアスペリティを配置

■南部

リニアメントが判読されない区間とF1断層を合わせて一つの区間とし、この区間内にアスペリティを配置



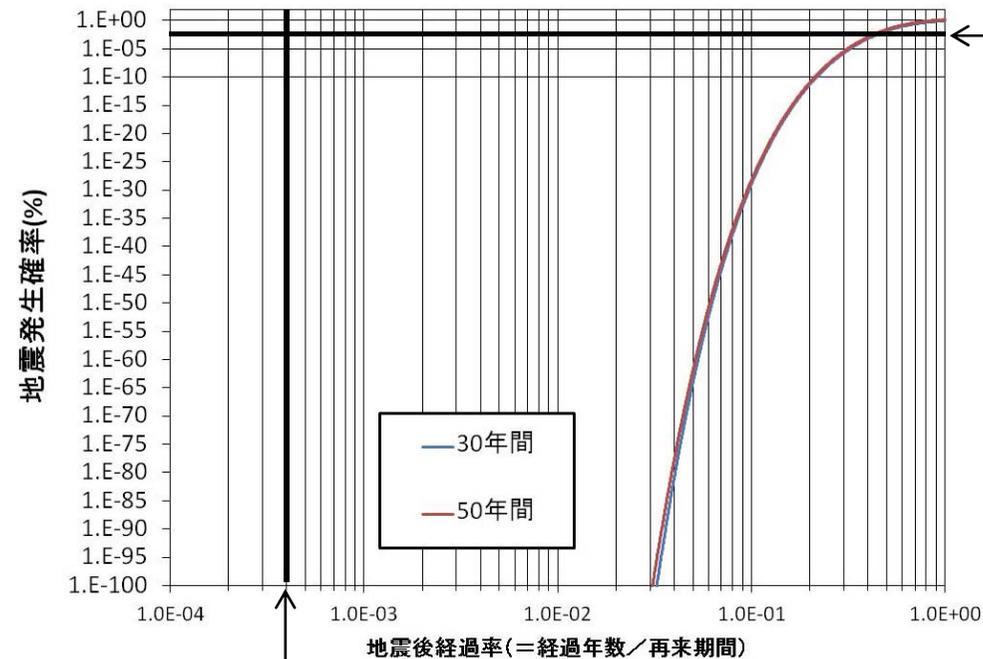
- ・ 塩ノ平地震断層については2011年4月に活動した直後であり、今後30年間、50年間の発生確率は非常に低い。
- ・ しかしながら、断層長さについては、塩ノ平地震断層との連動を考慮し、全長約58kmとして評価
- ・ 断層長さを44kmから58kmに延長したことにより、地震モーメントは $2.40E+19$ (N・m)から $5.21E+19$ (N・m)に増大する。

① 断層長さ： 塩ノ平地震断層の地震発生確率

以下の条件で、BPT分布に基づく地震発生確率を算定した。

- 再来期間12,500年(文献調査結果のうち最短とした)
- 地震後経過年数 5年(2016年4月時点に相当)
- 地震発生間隔のばらつき $\alpha=0.24$ (地震調査研究推進本部による標準的値)

この結果、今後30年間、50年間の地震発生確率はほぼ0%となった。



← 地震調査研究推進本部では、10の-3乗パーセント未満の場合は地震発生確率を「ほぼ0%」としている。

地震後経過年数:5年
地震後経過率:5年/12,500年間= 4×10^{-4}

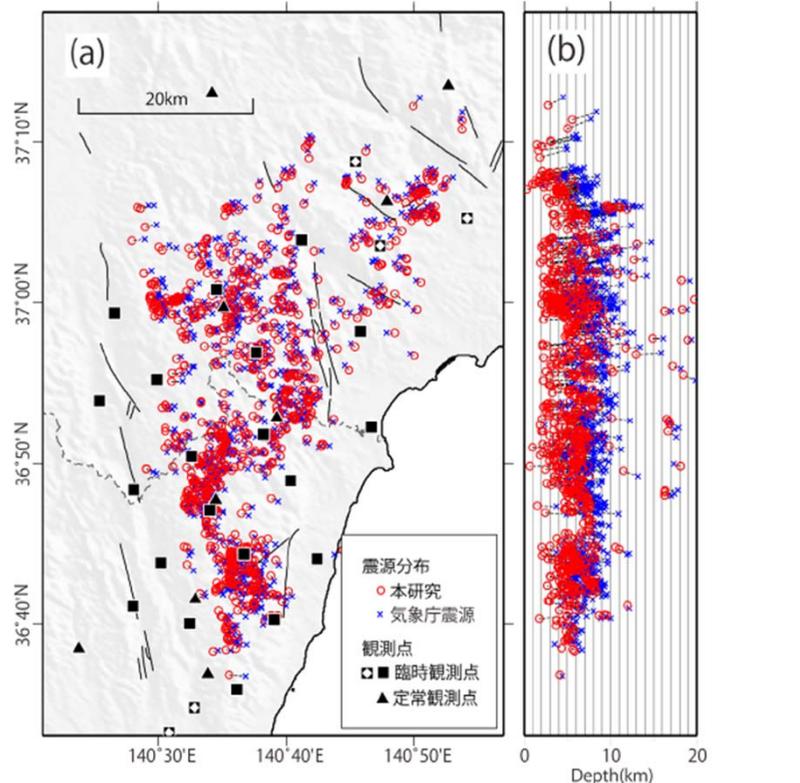
地震発生確率の算定結果

期間	地震発生確率
今後30年間	6×10^{-1338} パーセント
今後50年間	1×10^{-848} パーセント

② 断層上端深さ, 下端深さ: 2011年福島県浜通りの地震に関する知見

■青柳・上田(2012)について

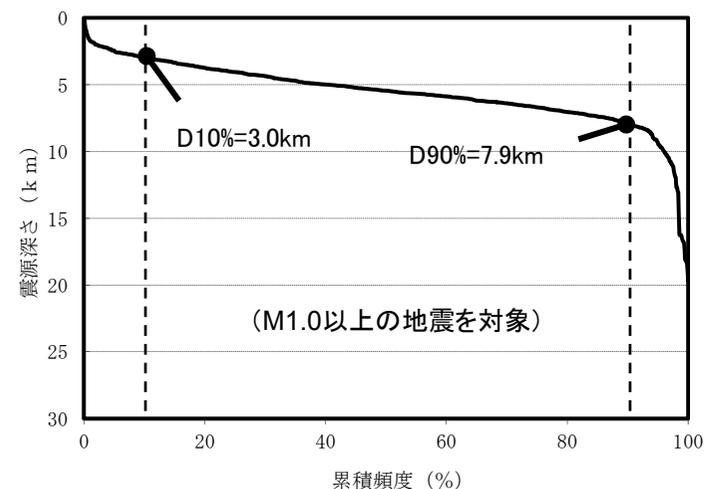
青柳・上田(2012)では, 阿武隈南部を対象に東北地方太平洋沖地震後の臨時稠密余震観測(2011年5月17日~7月29日)を行い, Double Difference トモグラフィ解析により震源再決定を行っている。



青柳・上田(2012)より抜粋

青柳・上田(2012)による再決定後の震源(赤丸)

■青柳・上田(2012)が再決定した震源データを用い, D10%, D90%深さを検討する。



累積頻度と震源深さの関係(青柳・上田(2012)のデータより算定)

マグニチュードごとの算定

M区分	最浅 (km)	D10% (km)	D50% (km)	D90% (km)	最深 (km)	データ数	D10%-D90% (km)
M<2.0	0.2	2.7	5.1	7.3	18.1	326	4.6
2.0≤M<2.5	1.2	3.1	5.5	8.0	18.4	391	4.9
2.5≤M<3.0	0.9	3.5	5.7	8.4	19.7	176	4.9
3.0≤M<3.5	1.8	3.5	6.0	8.3	18.2	65	4.8
3.5≤M<4.0	2.8	3.9	5.8	11.1	12.0	15	7.2
4.0≤M<	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	1	0.0
全データ	0.2	3.0	5.5	7.9	19.7	974	4.9

- 青柳・上田(2012)では, 阿武隈南部を対象に東北地方太平洋沖地震後の臨時稠密余震観測により震源再決定を行い, 気象庁一元化震源と比較し, 1~3km程度浅く見直されている。
- 青柳・上田(2012)の震源再決定のデータを用いたD10%は深さ3.0km, D90%は深さ7.9kmである。

青柳恭平・上田圭一(2012):2011年東北地方太平洋沖地震による阿武隈南部の正断層型誘発地震の特徴—臨時余震観測に基づく震源分布と速度構造—, 電力中央研究所報告 N11048, 平成24年4月

② 断層上端深さ, 下端深さ: 2011年福島県浜通りの地震に関する知見

■ 引間(2012)による震源インバージョン

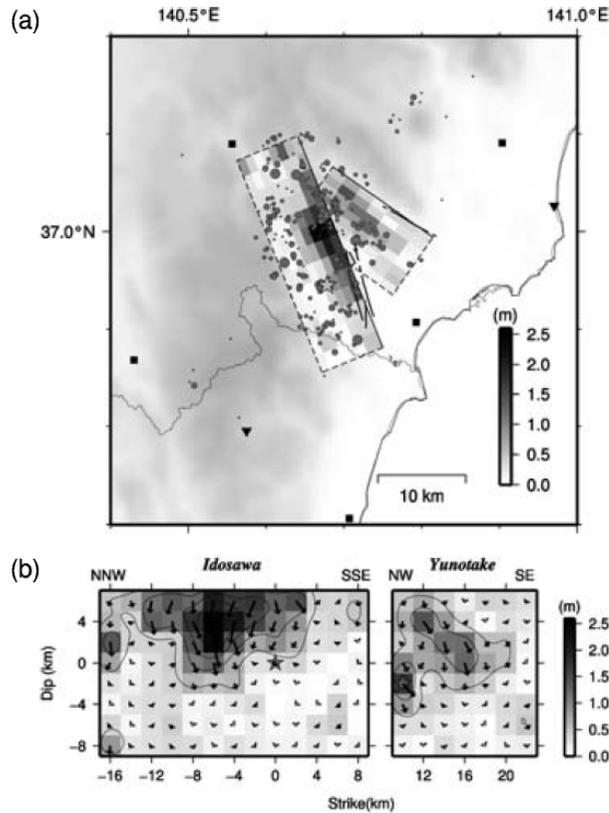
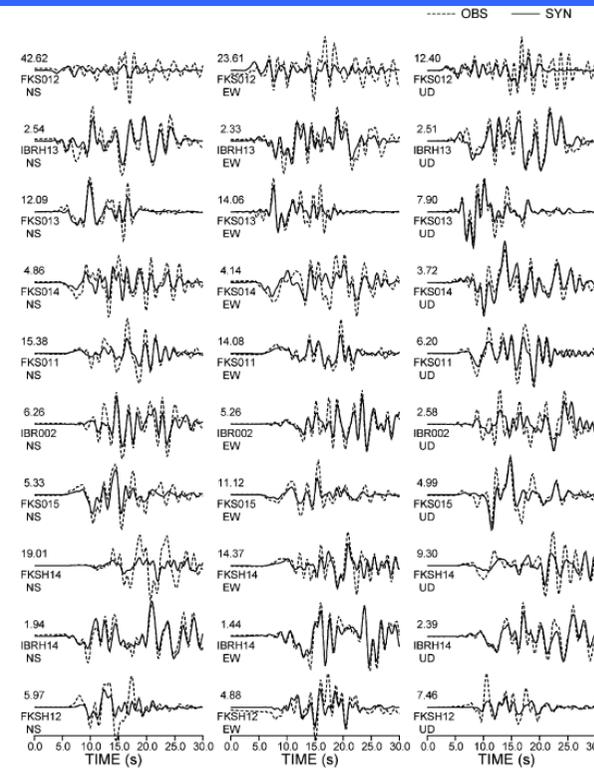


Table 1. Coordinates and geometries of the assumed fault planes of the Fukushima Hamadori earthquake.

	Strike (°)	Dip (°)	Length (km)	Width (km)	Reference point			definition
					Lat. (°)	Lon. (°)	Dep. (km)	
Idosawa segment	158	62	26	16	36.9451	140.6780	5.7	Hypocenter*
Yunotake segment	125	60	14	16	37.0667	140.6857	2.0	Upper left

*The hypocenter is located at 17 km in length, and 7 km in width from upper left corner on Idosawa segment.

引間(2012)によるモデル



引間(2012)より抜粋

Fig. 8. Comparison between the observed velocity seismograms (dashed traces) and synthesized waveforms (solid traces). The peak velocity for each trace is indicated in units of cm/s above the station code.

引間(2012)のモデルによる合成波形と観測波形の比較

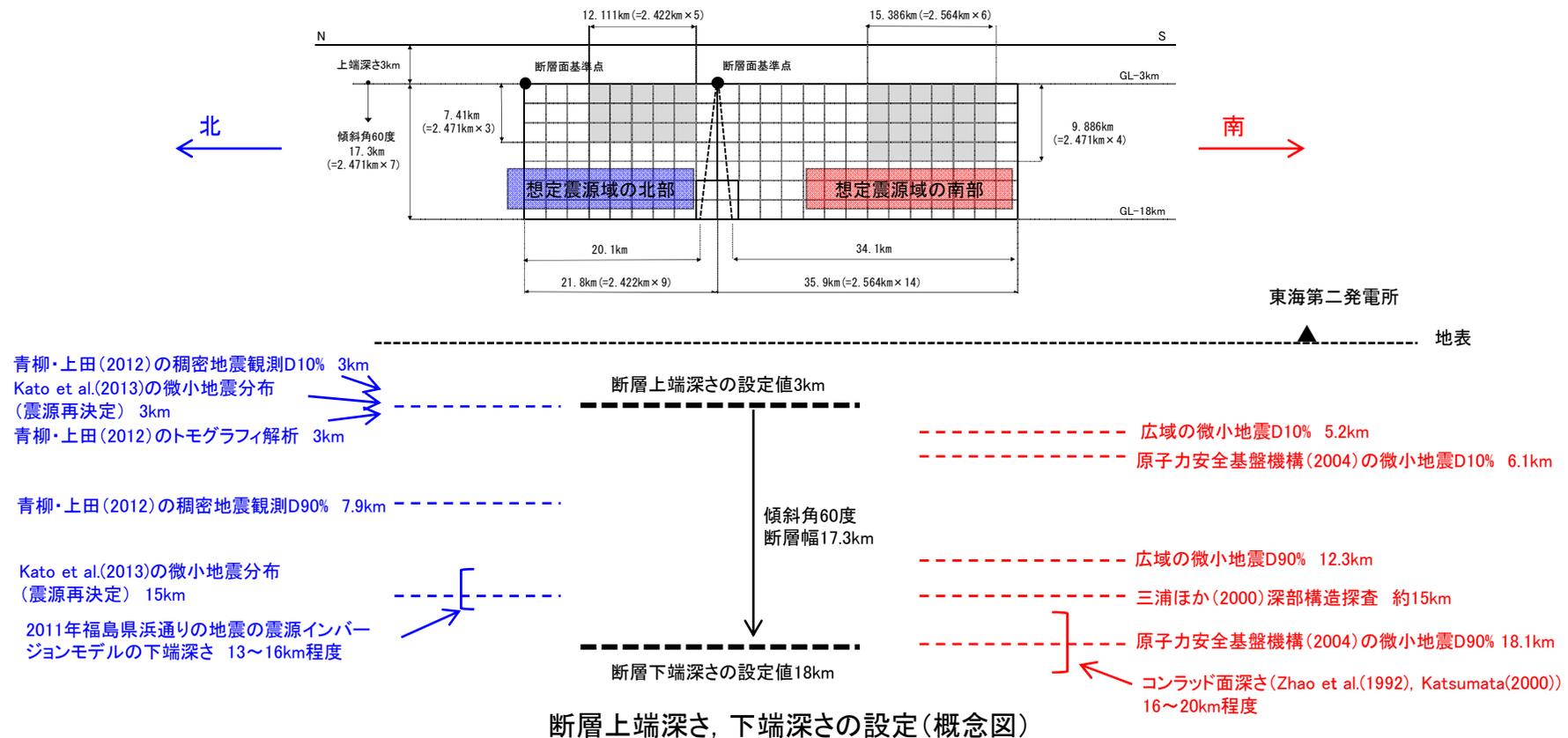
- 引間(2012)では、2011年福島県浜通りの地震の断層面を余震や地表地震断層の分布を参考に設定している。
- 設定した断層モデルによる計算結果と観測記録と比較したところ、観測記録に見られる特徴的な位相は再現されており、波形の一致は比較的良好であるとされている。
- 設定されている断層モデルの上端深さは0km, 断層傾斜角は62度, 断層幅は16kmであり, モデル下端深さは14km程度となる。

[引間和人(2012):2011年4月11日福島県浜通りの地震(Mj7.0)の震源過程—強震波形と再決定震源による2枚の断層面の推定—,地震,第2輯,第64巻(2012)243-256頁]

② 断層上端深さ, 下端深さ: 設定値

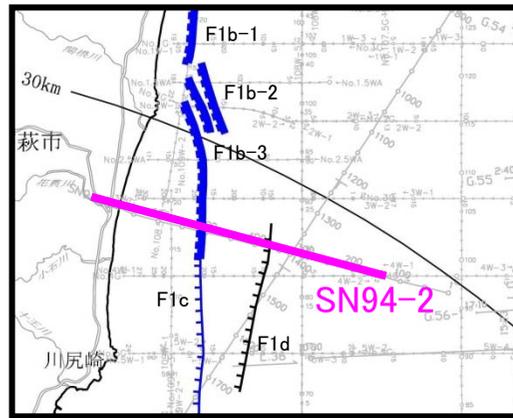
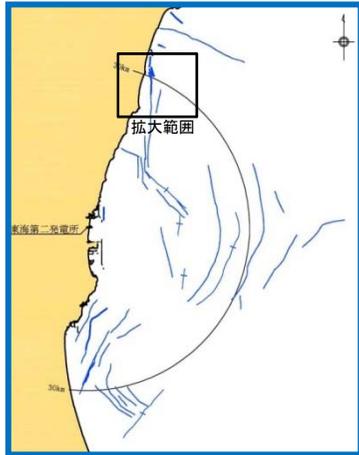
■断層上端深さ, 下端深さの設定について

2011年福島県浜通りの地震の知見や, 敷地周辺の広域の地震発生状況等の知見を踏まえた地震発生層の設定に基づく断層上端深さ, 下端深さの設定の概念図を示す。



- 断層上端深さは, 2011年福島県浜通りの地震の震源域における微小地震分布等の知見を考慮し3kmと設定している。これらの知見は臨時観測データを使ったDDTトモグラフィ解析により再決定された震源分布であり精度が高いと考えられる。震源モデルの南部では3kmよりも深いと想定されるが, 保守的に3kmとする。
- 断層下端深さは, 広域の微小地震分布を考慮し18kmと設定している。2011年福島県浜通りの地震の震源域(震源モデルの北部に対応)ではそれよりも浅いと想定されるが保守的に18kmとする。

③ 断層傾斜角：海上音波探査結果



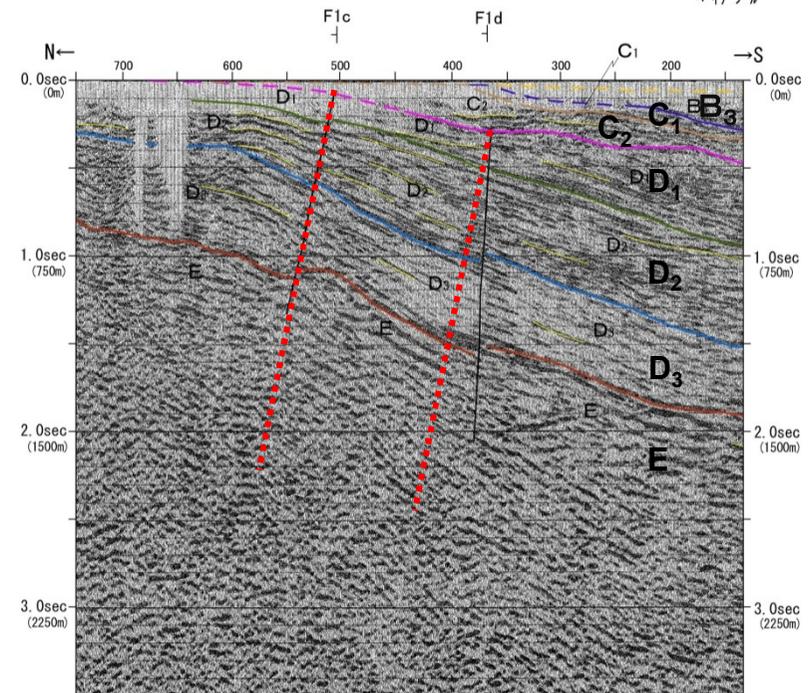
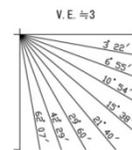
海上音波探査記録から、F1断層は西側落下の正断層と推定され、その傾斜は高角の西傾斜であると考えられる。

SN94-2
石油公団(1994)
ペイケーブル

(凡例)

地質時代	音響層序区分
第四紀	全新世 A
	後期 B ₁
	中期 B ₂
	前期 B ₃
第三紀	C ₁
	C ₂
	D ₁
	D ₂
古第三紀	D ₃
	E

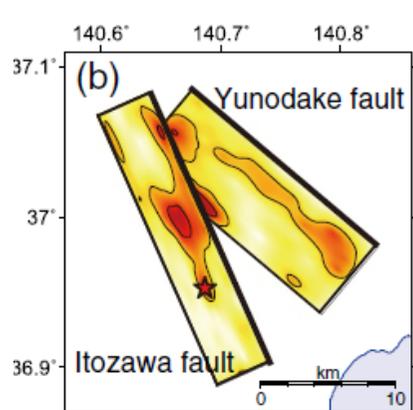
F11	断層及び断層記号
F21	断層及び断層記号
F30	断層又は断層の延長位置
F11	断層傾斜外に認められる断層



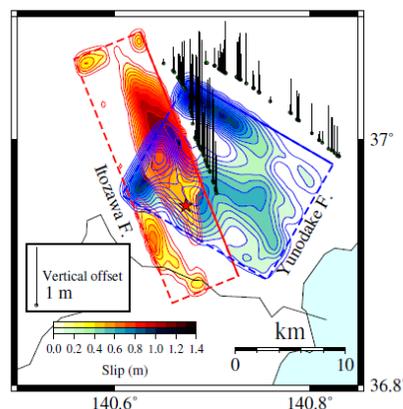
..... 傾斜角60度の補助線

③ 断層傾斜角： 2011年福島県浜通りの地震に関する知見

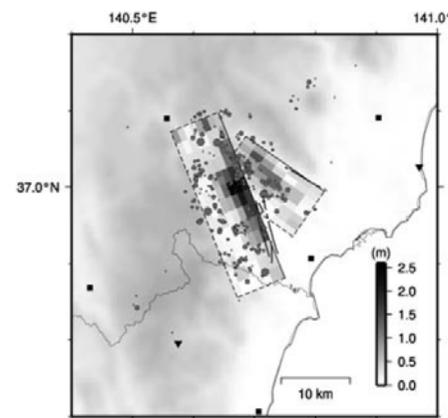
■ 2011年福島県浜通りの地震の近地強震記録を用いた震源インバージョン解析を行った文献を収集し、解析の際に設定した断層傾斜角を整理する。



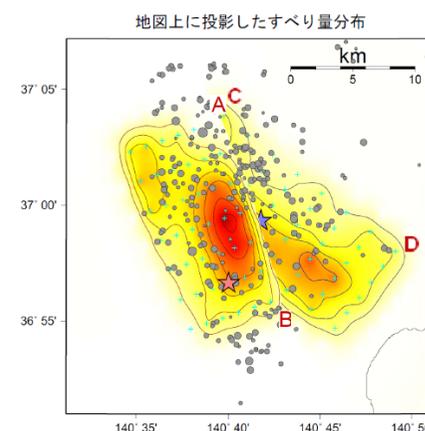
(Tanaka et al.(2014))



(芝・野口(2012))



(引間(2012))



(気象庁(2016))

各震源インバージョン解析モデル

各震源インバージョン解析モデルの断層傾斜角の整理

文献	断層傾斜角(度) [※]	使用データ	断層面の設定
Tanaka et al.(2014)	73	近地強震記録	・Fukushima et al.(2013)の設定を採用 ・Fukushima et al.(2013)はSAR干渉画像解析結果から設定
芝・野口(2012)	65	近地強震記録	・一元化震源分布を考慮し設定 ・余震データの対象期間は2011年4月11日福島県浜通りの地震(M7.0)発生後24時間
引間(2012)	62	近地強震記録	・DD法により再決定した余震分布を考慮し設定 ・余震データの対象期間は2011年3月11日～2011年5月11日
気象庁(2016)	57	近地強震記録	・DD法により再決定した余震分布とSAR干渉画像解析結果をもとに設定
基本震源モデルの設定値	60	—	

※ 井戸沢断層のパラメータを記載

- 各文献の断層傾斜角の設定値を整理すると57～73度となる。
- 基本震源モデルの断層傾斜角の設定(西傾斜60度)は、2011年福島県浜通りの地震の震源インバージョン解析モデルの知見を踏まえても概ね同等の設定となっていることを確認した。

[気象庁(2016):4月11日 福島県浜通りの地震ー 近地強震波形による震源過程解析(暫定)ー, 気象庁ホームページ, 2016/01/15更新]

④ 短周期レベル： 2011年福島県浜通りの地震に関する知見

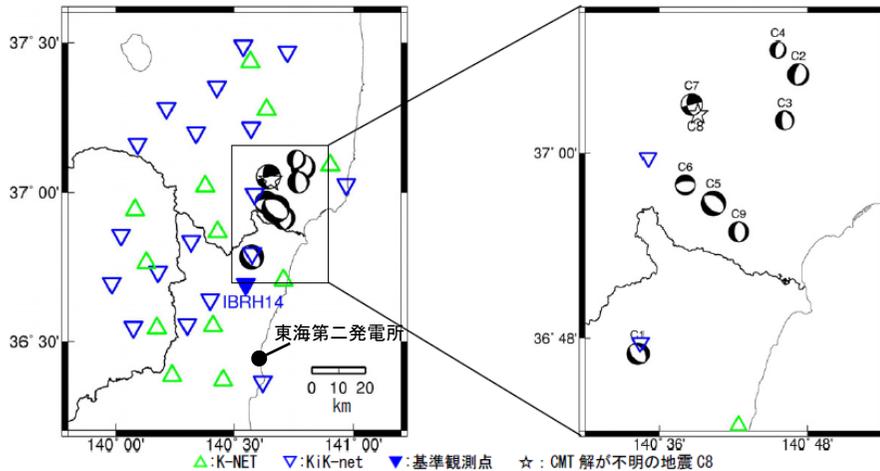
■ 佐藤・堤(2012)による正断層の地震の短周期レベルの推定

佐藤・堤(2012)では、東北地方太平洋沖地震後に福島県浜通り付近で発生した正断層の地震群の強震記録を用いて、スペクトルインバージョンにより短周期レベルを推定している。

表1 スペクトルインバージョンに用いた地震の諸元と本研究で推定した短周期レベル A

地震番号	発震時*(日本時間)				深さ*	M_J^*	M_0^{**}	M_w^{**}	A^{***}	M_w^*	
	年	月	日	時:分:秒							
C1	2011	3月	19日	18:56	48.1	5.4	6.1	6.35E+24	5.8	1.85E+25	5.9
C2	2011	3月	23日	7:12	28.8	7.6	6.0	4.26E+24	5.7	1.10E+25	5.7
C3	2011	3月	23日	7:13	52.8	0.9	5.8	7.01E+23	5.2	8.36E+24	-
C4	2011	3月	23日	18:55	20.2	9.0	4.7	5.00E+22	4.4	2.89E+24	4.4
C5	2011	4月	11日	17:16	12.0	6.4	7.0	9.58E+25	6.6	9.70E+25	6.7
C6	2011	4月	11日	20:42	35.2	10.6	5.9	1.72E+24	5.4	1.90E+25	5.4
C7	2011	4月	12日	14:07	42.3	15.1	6.4	7.05E+24	5.8	3.86E+25	5.9
C8	2011	4月	12日	14:26	33.2	13.9	4.8	-	-	-	-
C9	2011	4月	13日	10:07	58.0	4.5	5.7	1.36E+24	5.4	9.99E+24	5.4

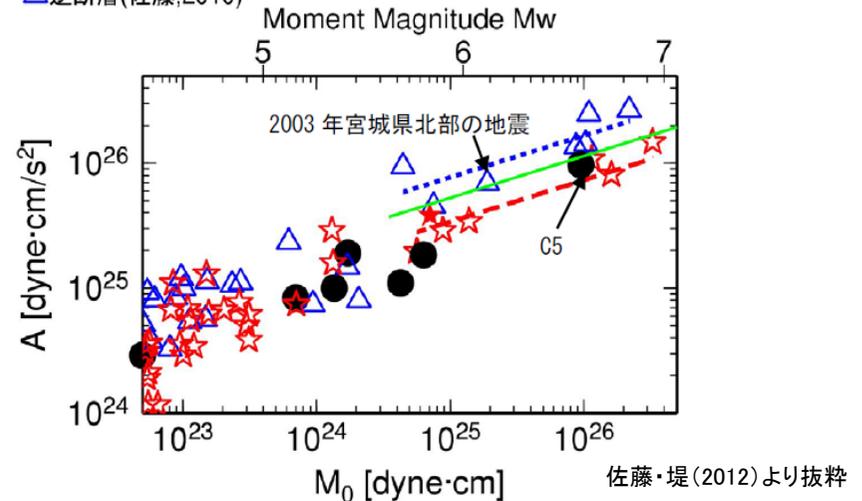
*気象庁 **F-net ***本研究



佐藤・堤(2012)に一部加筆

スペクトルインバージョンに用いた地震の震央位置と観測点位置

- 横ずれ断層の平均(佐藤,2010)
- 逆断層の平均(佐藤,2010)
- 地殻内断層の平均(壇・他,2001)
- 福島県浜通りの正断層(本研究)
- ★ 福島県浜通りの横ずれ断層C7(本研究)
- ☆ 横ずれ断層(佐藤,2010)
- △ 逆断層(佐藤,2010)



佐藤・堤(2012)による福島県浜通りの地震群の地震モーメントと短周期レベルとの関係

2011年4月11日の福島県浜通りの地震(M7.0)の短周期レベルは、壇ほか(2001)による内陸地殻内地震の平均値とほぼ同じであるとされており、強震動予測レシピと整合している。

佐藤智美・堤英明(2012):2011年福島県浜通り付近の正断層の地震の短周期レベルと伝播経路・地盤増幅特性, 日本地震工学会論文集 第12巻, 第7号, 2012

⑤ 不確かさの考慮

■不確かさの考慮

F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動による地震に関する各パラメータについて, 地震動への影響の程度を検討し, 敷地に大きな影響を与えと考えられるパラメータに対して不確かさを考慮する。

評価ケース	認識論的不確かさ					偶然的不確かさ
	断層上端 深さ※1	断層下端 深さ※2	断層 傾斜角	短周期レベル	アスペリティ位置	破壊開始点
基本震源モデル	3km	18km	60度 (西傾斜)	強震動予測レシピの 平均	敷地に近い位置に配置	複数設定
短周期レベルの 不確かさ	3km	18km	60度 (西傾斜)	強震動予測レシピの 1.5倍	敷地に近い位置に配置	複数設定
断層傾斜角の 不確かさ	3km	18km	45度 (西傾斜)	強震動予測レシピの 平均	敷地に近い位置に配置	複数設定
アスペリティ位置 の不確かさ	3km	18km	60度 (西傾斜)	強震動予測レシピの 平均	断層端部に配置	複数設定

※1 2011年福島県浜通りの地震の震源域以外では断層上端深さは3kmよりも深いことが推定されるが, 震源モデルの全域にわたり保守的に3kmに設定した。

※2 2011年福島県浜通りの地震の震源域では断層下端深さは浅いことが推定されるが, 震源モデルの全域にわたり保守的に18kmに設定した。

 不確かさを考慮して設定するパラメータ

 基本震源モデルの段階で予め不確かさを考慮して設定するパラメータ

参考文献

- ・ 地震調査研究推進本部(2016):震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)
- ・ 地震調査研究推進本部(2009):震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)
- ・ 青柳恭平・上田圭一(2012):2011年東北地方太平洋沖地震による阿武隈南部の正断層型誘発地震の特徴—臨時余震観測に基づく震源分布と速度構造—,電力中央研究所報告 N11048,平成24年4月
- ・ 芝良昭・野口科子(2012):広帯域地震動を規定する震源パラメータの統計的特性—震源インバージョン解析に基づく検討—,電力中央研究所報告,研究報告N11054
- ・ 引間和人(2012):2011年4月11日福島県浜通りの地震(Mj7.0)の震源過程—強震波形と再決定震源による2枚の断層面の推定—,地震,第2輯,第64巻(2012)243-256頁
- ・ Miho Tanaka, Kimiyuki Asano, Tomotaka Iwata, Hisahiko Kubo(2014):Source rupture process of the 2011 Fukushima-ken Hamadori earthquake: how did the two subparallel faults rupture?, Earth, Planets and Space 2014, 66:101
- ・ 気象庁(2016):4月11日福島県浜通りの地震—近地強震波形による震源過程解析(暫定)—,気象庁ホームページ,2016/01/15更新