

# 東海第二発電所

# 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動のうち 内陸地殻内地震について

# 平成28年8月26日 日本原子力発電株式会社



# 設置変更許可申請時からの評価条件の主な変更点について

断層長さの変更 約44km(M7.6) 約58km(M7.8) F1断層から塩ノ平地震断層まで連動するものとし,断層長さ約58km(M7.8)で評価。また, 2011年4月11日に発生した福島県浜通りの地震(M7.0)に関する各種知見を反映

地質調査結果と震源モデルの対応の見直し

・地質調査結果の断層線に沿うよう震源モデルを再設定

・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1つの区間とすることで敷地近 〈に配置するアスペリティ面積を大きく設定

断層の上端深さの見直し 5km 3km

2011年福島県浜通りの地震の震源域での地震発生層を分析し,地震発生層の上端深さを浅くすることで断層幅をより厚く想定

断層傾斜角の不確かさケースの考慮

断層調査によりF1断層は高角な断層であるとされているが,2011年福島県浜通りの地震の震源域での余震分布の形状を考慮し,不確かさとして傾斜角45度を考慮

設置変更許可申請時からの評価条件の主な変更点(内陸地殻内地震)

	評価ケース	断層 長さ	М	断層上 端深さ	断層 傾斜角	アスペリティ位置・大 きさ	短周期レベル
亦百分	基本震源モデル	44km	7.6	5km	60度	敷地に近づけて配置 (等面積)	強震動予測レ シピの平均
安史則	短周期レベルの 不確かさ	44km	7.6	5km	60度	敷地に近づけて配置 (等面積)	強震動予測レ シピの1.5倍

				<u> </u>			
	評価ケース	断層 長さ	М	断層上 端深さ	断層 傾斜角	アスペリティ位置・大 きさ	短周期レベル
	基本震源モデル	58km	7.8	3km	3km         60度         敷地に近づけて配置           りティ面積大)         1		強震動予測レ シピの平均
変更後	短周期レベルの 不確かさ	58km	7.8	3km	60度	敷地に近づけて配置 (敷地に近いアスペ リティ面積大)	強震動予測レ シピの1.5倍
	断層傾斜角の 不確かさ	58km	7.8	3km	45度	敷地に近づけて配置 (敷地に近いアスペ リティ面積大)	強震動予測レ シピの平均





1.	評価フロー	 4
2.	敷地周辺の活断層分布	 5
3.	敷地周辺の地震発生状況	 7
4.	検討用地震の選定	 14
	4.1 地震発生層の設定	 15
	4.2 検討用地震の選定	 29
5.	震源モデルの設定	 44
	5.1 地質調査結果の概要	 45
	5.2 基本震源モデルの設定	 46
	5.3 不確かさを考慮した震源モデルの設定	 67
6.	地震動評価	 73
	6.1 地震動評価手法	 74
	6.2 応答スペクトル手法による評価結果	 75
	6.3 断層モデル手法による評価結果	 76
7.	参考文献	 86

#### 参考資料

1	補正係数の算出に用いた地震リスト	 87
2	統計的グリーン関数法による評価	 90



1. 評価フロー

「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動のうち内陸地殻内地震について」の説明範囲





1.	評価フロー	 4
2.	敷地周辺の活断層分布	 5
3.	敷地周辺の地震発生状況	 7
4.	検討用地震の選定	 14
	4.1 地震発生層の設定	 15
	4.2 検討用地震の選定	 29
5.	震源モデルの設定	 44
	5.1 地質調査結果の概要	 45
	5.2 基本震源モデルの設定	 46
	5.3 不確かさを考慮した震源モデルの設定	 67
6.	地震動評価	 73
	6.1 地震動評価手法	 74
	6.2 応答スペクトル手法による評価結果	 75
	6.3 断層モデル手法による評価結果	 76
7.	参考文献	 86

#### 参考資料

1	補正係数の算定に用いた地震リスト	 87
2	統計的グリーン関数法による評価	 90



# 2. 敷地周辺の活断層分布

「敷地周辺及び近傍の地質・地質構造」の審議を踏まえた震源として考慮する活断層分布を示す。



震源として考慮する活断層のリスト

断層名	長さ (km)	地震規模M <sup>1</sup>
棚倉破砕帯東縁断層 , 同西縁断層の連動	42	7.5
関口 - 米平リニアメント	6	6.8 <sup>2</sup>
竪破山リニアメント	4	6.8 <sup>2</sup>
宮田町リニアメント	1	6.8 <sup>2</sup>
F1断層,北方陸域の断層,塩/平地震断層の連動	58	7.8
F3断層,F4断層の連動	16	6.8
F 8 断層	26	7.2
F16断層	26	7.2
A - 1背斜	20	7.0
関谷断層	40	7.5
関東平野北西縁断層帯	82	8.0
F11断層	5	6.8 <sup>2</sup>

1 地震規模は松田(1975)により算定

2 長さの短い断層については地震規模をM6.8として評価

● 敷地周辺の地質・地質構造に関する調査の結果,上記の断層を震源として考慮する活断層として評価する。

● 敷地近傍(敷地を中心とする半径約5kmの範囲)において,震源として考慮する活断層は認められない。



1.	評価フロー	 4
2.	敷地周辺の活断層分布	 5
3.	敷地周辺の地震発生状況	 7
4.	検討用地震の選定	 14
	4.1 地震発生層の設定	 15
	4.2 検討用地震の選定	 29
5.	震源モデルの設定	 44
	5.1 地質調査結果の概要	 45
	5.2 基本震源モデルの設定	 46
	5.3 不確かさを考慮した震源モデルの設定	 67
6.	地震動評価	 73
	6.1 地震動評価手法	 74
	6.2 応答スペクトル手法による評価結果	 75
	6.3 断層モデル手法による評価結果	 76
7.	参考文献	 86

#### 参考資料

1	補正係数の算出に用いた地震リスト	 87
2	統計的グリーン関数法による評価	 90





- 敷地東方においては,陸側のプレートの下に太平洋プレートが沈み込んでいる。
- 敷地南方においては,陸側のプレートの下に相模トラフから北西方向にフィリピン海プレートが沈み込んでいる。
- さらにその下には,日本海溝から西向きに太平洋プレートが沈み込んでいる。



# 3. 敷地周辺の地震発生状況 敷地周辺の地震活動(M4.0以下,深さ30km以浅,震央分布)



dəifhTh

# 3. 敷地周辺の地震発生状況 敷地周辺の地震活動(M4.0以下,敷地北方,震源鉛直分布)



- 2011年3月以降は,福島県と茨城県の県境付近の深さ10km程度において内陸地殻内地震が発生している。
- 深さ80km程度以深では,太平洋プレートの二重深発地震面が見られる。



# 3. 敷地周辺の地震発生状況 敷地周辺の地震活動(M4.0以下,敷地周辺,震源鉛直分布)



● 深さ80km程度以深では,太平洋プレートの二重深発地震面が見られる。



# 3. 敷地周辺の地震発生状況 敷地周辺の地震活動(M4.0以下,敷地南方,震源鉛直分布)





# 3. 敷地周辺の地震発生状況 敷地周辺の地震活動(M4.0以下,敷地周辺(広域),震源鉛直分布)



- 2011年3月以降は,深さ10km程度において内陸地殻内地震が発生している。
- 深さ30km程度では,フィリピン海プレートに関する地震が見られる。
- 深さ60km程度以深では,太平洋プレートに関する地震が見られる。



1.	評価フロー	 4
2.	敷地周辺の活断層分布	 5
3.	敷地周辺の地震発生状況	 7
4.	検討用地震の選定	 14
	4.1 地震発生層の設定	 15
	4.2 検討用地震の選定	 29
5.	震源モデルの設定	 44
	5.1 地質調査結果の概要	 45
	5.2 基本震源モデルの設定	 46
	5.3 不確かさを考慮した震源モデルの設定	 67
6.	地震動評価	 73
	6.1 地震動評価手法	 74
	6.2 応答スペクトル手法による評価結果	 75
	6.3 断層モデル手法による評価結果	 76
7.	参考文献	 86

#### 参考資料

1	補正係数の算出に用いた地震リスト	 87
2	統計的グリーン関数法による評価	 90



## 4. 検討用地震の選定 4.1 地震発生層の設定 地震発生層の設定の考え方

敷地周辺の微小地震分布や,速度構造,2011年4月11日に発生した福島県浜通りの地震(M7.0)に関する各種知見等を総合的に 判断し,地震発生層上端,下端を設定する。

微小地震分布

速度構造

コンラッド面深さ

キュリー点深度

2011年福島県浜通りの地震に関する知見

·微小地震分布

・トモグラフィ解析による速度構造

・震源インバージョン解析によるすべり分布



### 4. 検討用地震の選定 4.1 地震発生層の設定 微小地震分布: D10%, D90%の深さ

震源として考慮する活断層の分布を概ねカバーする福島県南部から茨城県南部までの領域(左図に示す検討対象範囲)のうち,深さ 30km以浅で発生した微小地震分布からD10%,D90%の深さを求める。震源データは,気象庁一元化カタログ(2011年3月~2015年7月), M2以上のデータを利用する。



○ 4.0 M
○ 3.0 M < 4.0</li>
· M < 3.0</li>

気象庁一元化カタログを用い算定したD10%は深さ5.2km, D90%は深さ12.3kmである。

地震の震央分布及び鉛直分布(深さ30km以浅)



### 4. 検討用地震の選定 4.1 地震発生層の設定 微小地震分布: D10%, D90%の深さ(文献)

前頁の検討は,地震発生場所が福島県と茨城県の県境に偏 在する問題がある。これは東北地方太平洋沖地震以降,当 該領域での地震活動が活発化したためである。

そこで,東北地方太平洋沖地震以前のデータを使用した原子力安全基盤機構(2004)に基づいて検討を行う。

原子力安全基盤機構(2004)は,気象庁震源記録のうち, 1997年10月~2001年9月の震源記録を,日本全国の15の 地震域毎に振り分け,地殻内地震の地震発生上下限層に関 するパラメータ(震源深さの最浅値,D10%,D50%,D90%,震源 深さの最深値)を地震域毎に評価している。

敷地が含まれる「福島茨城」は,データ数が少ないものの「M 区分」による検討結果がどれも同様の傾向を示し,安定して いることから,発生層の推定の目安に資すると考えられる。



マグニチュード区分による累積度数と震源深さの関係(地震域 = 福島茨城)



「福島茨城」における地震発生上下限層のパラメータ

地震域	M 区分	最浅 (km)	D10% (km)	D50% (km)	D90% (km)	最深 (km)	データ数	D90%-D10% (km)	<ul><li>震源域</li><li>上端深さ</li><li>最浅値</li><li>(飯田式)</li></ul>	
	$2.0 \le M < 2.5$	4.1	5.9	8.0	16.0	27.1	24	10.1	3.4	
	$2.5 \le M < 3.0$	6.3	7.2	8.9	18.7	18.7	13	11.5	5.4	
福島	$3.0 \le M < 3.5$	4.9	5.0	8.3	18.1	18.1	5	13.1	3.5	
茨城	$3.5 \le M < 4.0$	7.6	7.6	7.6	7.7	7.6	2	0.1	5.0	
	$4.0 \leq M$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	
	全データ	4.1	6.1	8.0	18.1	27.1	44	12.0	3.4	
	原子力安全基盤機構(2004)に一部加筆									

15地震域の区分

敷地が位置する「福島茨城」(44地震のデータ)のD10%は深さ6.1km, D90%は深さ18.1kmである。



# 速度構造:深部構造探査結果に基づく知見

三浦ほか(2000)

三浦ほか(2000)では,茨城県沖の日本海溝付近から福島県中通りにかけて,海底地震計,エアガン等を用いた深部構造探査結果に基づき,速度構造モデルを推定している。



福島県の海岸線においてP波速度5.5km/s, 6.0km/s, 6.5km/sとなる深さは, それぞれ約6km, 約9km及び約15kmとなっている(赤破線)。



4. 検討用地震の選定 4.1 地震発生層の設定 コンラッド面深さ(1/2)

> 地殻はコンラッド不連続面(以下「コンラッド面」という。)を境に上部地殻と下部地殻に分類され,内陸地殻内地震は主に上部地 殻内で発生する。

> Zhao et al.(1992)は,国内の大学の地震観測網で観測した地震記録を用いた走時解析により,全国のモホ面とコンラッド面の深 さを求めている。



Dapeng Zhao ,Shigeki Horiuchi, Akira Hasegawa (1992): Seismic velocity structure of the crust beneath the Japan Islands , Tectonophysics 212



4. 検討用地震の選定 4.1 地震発生層の設定 コンラッド面深さ(2/2)

Katsumata(2010) について

 Katsumata (2010) は,国内の大学・自治体の地震観測網で観測した地震記録を用いたトモグラフィ解析により,全国のモホ面とコンラッ
 (a) Conrad

 作面の深さを求めている。
 45° N

 「の深さを求めている。
 40° N



Akio Katsumata (2010) : Depth of the Moho discontinuity beneath the Japanese islands estimated by traveltime analysis , JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 115, B04303, doi:10.1029/2008JB005864, 2010



•

# キュリー点深度







Fig. 8. Plot of the depth to the basal depth of magnetic sources  $(Z_b)$  against the seismogenic layer thickness  $(D_{90})$  beneath the Japanese islands.

Tanaka and Ishikawa(2005)より抜粋

 
 ● 敷地周辺のZbは20~22km程度であり,D90%の深度とZbの関係 と照らすと,D90%深度は17~23km程度となる。

 ● 敷地よりも北方(福島県と茨城県の県境付近)ではZbは浅くなる

#### 傾向が見られる。

Akiko Tanaka, Yuzo Ishikawa (2005): Crustal thermal regime inferred from magnetic anomaly data and its relationship to seismogenic layer thickness: The Japanese islands case study, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 152



### 4. 検討用地震の選定 4.1 地震発生層の設定 2011年福島県浜通りの地震に関する知見:微小地震分布によるD10%, D90%深さ

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)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	<b>最浅</b> (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



### 4. 検討用地震の選定 4.1 地震発生層の設定 2011年福島県浜通りの地震に関する知見:微小地震分布の範囲





Figure 1. (a) Spatiotemporal evolution of induced seismicity in the northern part of Buraki Prefecture and the southern part of Fukushima Prefecture. The carthquakes plotted are listed in the JMA catalog and occurred at depths shallower than 10 km, with  $M \ge 10$ , (b) Map of seismic stations and carthquakes used in the tomography analysis, with carthquakes shown as circles with nulli scaled to carthquake magnitude and colored according to depth. The grid used in the tomographic analysis is plotted with gray crosses. The open squares indicate the locations of temperancy offline (04 closely spaced squares) and permanent online seismic stations. The moment tensors (in red and white) of large events ( $M \ge 6.0$ ) were determined by NED. The red lines delineate the surface traces of major active faults, Inset map shows the location of the shuly area with respect to preferences in Japan and the large-ship zone of the 2011 Tohoku-OK mainhock, from *Kato and Agaranh* [2012].



Figure 2. Vertical depth sections of  $V_p$  velocity perturbations and nearby earthquakes. The cross-sections are constructed along lines drawn from W2SS to E2SN (see Figure 1b). Relocited earthquakes (superimposed gray circles) correspond to those distributed within  $\pm$  1.5 km (laterally) of each vertical cross-section. The masked areas marked by gray color on these vertical depth sections correspond to regims where model resolution is relatively low (as defined in the Supporting Information, Fig. S1). The red arrows at the top of each section correspond to the locations of surface ruptures. The red and white moment termor solutions for the largest earthquakes are shown using a lower hemisphere projection rotated into the plane of each section.

- Kato et al.(2013)では,東北地方太平洋沖地震後の2011年3月28日~2011年10月31日の期間に福島県から茨城県にかけての臨時地震観測で得られた記録を 用い,地震波トモグラフィ解析(double-differenceトモグラフィ解析)により震源再決定をしている。
- Kato et al.(2013)では、震源分布の断面図のうち、2011年福島県浜通りの地震(M7.0)の余震分布からは、本震を含む Y=-3km断面から北方のY=12km断面までの区間(赤枠の図)において、西傾斜の面状(灰色の破線)に微小地震が発生しており、その面を地表へ延長した位置は、地表地震断層の位置と概ね対応しているとされている。一方、Y=12km断面より北方の断面においては、このような微小地震は見られないと判断できる。
- 再決定された微小地震の震源分布の断面図からは,地震発生層の上限深さは3km程度,下限深さは15km程度であると考えられる。

Aitaro Kato, Toshihiro Igarashi, Kazushige Obara, Shinichi Sakai, Tetsuya Takeda, Atsushi Saiga, Takashi Iidaka, Takaya Iwasaki, Naoshi Hirata, Kazuhiko Goto, Hiroki Miyamachi, Takeshi Matsushima, Atsuki Kubo, Hiroshi Katao, Yoshiko Yamanaka, Toshiko Terakawa, Haruhisa Nakamichi, Takashi Okuda, Shinichiro Horikawa, Noriko Tsumura, Norihito Umino, Tomomi Okada, Masahiro Kosuga, Hiroaki Takahashi, Takuji Yamada12(2013): Imaging the source regions of normal faulting sequences induced by the 2011 M9.0 Tohoku-Oki earthquake, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 40, 1 6, doi:10.1002/GRL.50104, 2013



#### 赤枠は西傾斜の面状に微小地震が発生している断面

4. 検討用地震の選定 4.1 地震発生層の設定

# 2011年福島県浜通りの地震に関する知見:トモグラフィ解析による速度構造



4. 検討用地震の選定 4.1 地震発生層の設定
 2011年福島県浜通りの地震に関する知見:震源インバージョン解析によるすべり分布(1/3)

芝・野口(2012)による震源インバージョン



#### 芝・野口(2012)によるモデル

芝・野口(2012)より抜粋

- 芝·野口(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、「合成波形は比較的多数の観測点で主要なフェーズを再現できている」とさ れている。
- 設定されている断層モデルの上端深さは2km,断層傾斜角は65度,断層幅は15.4kmであり,モデル下端深さは16km程度となる。

【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



# 4. 検討用地震の選定 4.1 地震発生層の設定 2011年福島県浜通りの地震に関する知見:震源インバージョン解析によるすべり分布(2/3)

引間(2012)による震源インバージョン





	Strike Dip	Length	Width	Reference point				
	(*)	(°)	(km)	(km)	Lat. (*)	Lon. (*)	Dep. (km)	definition
Idosawa segment	158	62	: 26	16	36.9451	.140,6780	5.7	Hypocenter*
Yunotake segment	125	60	14	16	37.0667	140.6857	20	Upper left

The hypocenter is located at 17 km in length, and 7 km in width from upper left corner on Ido sawa 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



### 4. 検討用地震の選定 4.1 地震発生層の設定 2011年福島県浜通りの地震に関する知見:震源インバージョン解析によるすべり分布(3/3)

Tanaka et al. (2014) による震源インバージョン



Pault	sume angle	Dip angle	(km²)	('N)*	("E)"	(km)*
	(*)	(7				
Itozawa fault	156	73	22×14	36.952	140.686	6.96
Yunodake fault	130	62	18×14	37.014	140.676	11,48

"Latitude, longitude, and depth are the values at the rupture starting point.

<u>Tanaka et al. (2014) によるモデル</u>



#### Tanaka et al. (2014) によるモデルによる合成波形と観測波形の比較

- Tanaka et al. (2014)では, 2011年福島県浜通りの地震の断層面を余震や既往文献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、観測記録を再現できているとされている。

#### ● 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73度,断層幅は14kmであり,モデル下端深さは13km程度となる。

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



# 地震発生層の知見に基づく断層上端深さ,下端深さの設定

2011年福島県浜通りの地震の知見は,当該領域の地域性が現れていると考えられる。従って断層上端深さ,下端深さの設定は,このような地震発生層の地域性を考慮して設定する。

	検討項目	上端深さ(km)	下端深さ(km)				
福島県と茨城県の県境	付近以外の断層については下記 ~ (広域の検討)に基づき	設定					
ᄷᆹᄮᄔᆕᆕᄭᅔᇉᇉᇰᄻᆋ	広域のD10%, D90%(気象庁カタログ)	5.2	12.3				
「瓜小心展汀巾による快引 	「原子力安全基盤機構(2004)」(福島·茨城)によるD10%,D90%	6.1	18.1				
速度構造による検討	三浦ほか(2000)	約6~9	約15				
コンショッド市	Zhao et al.(1992)	-	(約16)				
コノフット回	Katsumata(2010)	-	(約18~20)				
キュリー点深度	Tanaka and Ishikawa (2005)	-	(約17~23)				
	断層上端及び下端の設定値	5	18				
福島県と茨城県の県境付	福島県と茨城県の県境付近の断層(2011年福島県浜通りの地震の知見反映)						
2011年福島県浜通りの地震に	関する知見						
微小地震分布	青柳・上田(2012)の稠密地震観測データによるD10%, D90%	3.0	7.9				
אר נגאאטיי ניאא	Kato et al.(2013) の震源再決定データ(福島県 ~ 茨城県)	約3	約15				
速度構造	速度構造 青柳・上田(2012)によるトモグラフィ解析		-				
震源インバージョン解析	芝·野口(2012)	-	(約16)				
	引間(2012)	-	(約14)				
	Tanaka et al.(2014)	-	(約13)				
	断層上端及び下端の設定値	3	18 (深さ15kmと考えら <b>れるが地震</b> 動評価上は深さ18kmと <b>する。</b> )				

()は参考とする値

● 東海第二発電所の敷地周辺を含む広域の地震発生層に関する知見に基づき,断層上端深さを5km,下端深さを18kmと設定する。

● 2011年福島県浜通りの地震の地震発生層に関する知見に基づき,福島県と茨城県の県境付近の断層については断層上端深さを3km,下端深さを 18kmと設定する。

👍 if hT h

# 4. 検討用地震の選定

4.1 地震発生層の設定

# 4.2 検討用地震の選定



#### 検討用地震の候補

過去の被害地震や敷地周辺の活断層による地震について整理した。					
敷地周辺の活断層による地震	過去の被害地震				
棚倉破砕帯東縁断層,同西縁断層の連動による地震	818年関東諸国の地震				
<ul> <li>関口 - 米平リニアメントによる地震</li> <li>竪破山リニアメントによる地震</li> <li>宮田町リニアメントによる地震</li> <li>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</li> <li>F3断層,F4断層の連動による地震</li> <li>F8断層による地震</li> <li>F16断層による地震</li> <li>A - 1背斜による地震</li> <li>関令断層による地震</li> <li>関東平野北西縁断層帯による地震</li> <li>F11断層による地震</li> </ul>	<ul> <li>・規模は松田式で評価</li> <li>・等価震源距離は,前頁で設定した断層上端,下端深さを考慮した断層面に基づき設定</li> </ul>				
	」 設置変更許可申請時から変更している箇所				

評価手法

検討用地震の候補について,Noda et al.(2002)の手法による評価を実施した。当該手法を用いるにあたり,検討用地震の候補につ いて適用性の確認を行った。

補正係数の算出

福島県と茨城県の県境付近で発生した内陸地殻内地震の補正係数を当該場所で想定する地震に考慮した。

検討用地震の選定結果



🗲>15hTh

# 4. 検討用地震の選定 4.2 検討用地震の選定 Noda et al.(2002)の適用性について

検討用地震の候補について, Noda et al.(2002) を用い評価を行う。 評価に際しては,適用範囲の確認を行う。



検討用地震のマグニチュードと等価震源距離の関係

あることを確認した。

IFhT h

## 4. 検討用地震の選定 4.2 検討用地震の選定 補正係数の算定に用いた地震の選定フロー

1996年9月以降に東海第二発電所で観測された記録を対象とする。

#### 地震の発生位置及び規模





### 4. 検討用地震の選定 4.2 検討用地震の選定 応答スペクトルに基づく手法による地震動評価に用いる補正係数

応答スペクトルに基づく手法による地震動評価は,Noda et al.(2002)による手法(耐専スペクトル)で行う。 評価に際しては,地震発生様式ごとに分類した地震観測記録の分析に基づく補正係数を考慮する。補正係数算出に用いた地震のリ ストを参考資料に示す。



・東海第二発電所の地震観測記録のうちM5.3以上で震央距離200km以内の地震を対象に,解放基盤波の応答スペクトルをNoda et al.(2002)による手法(耐専スペクトル)で除した「応答スペクトル比」を算出する。
 ・プレート間地震,海洋プレート内地震,内陸地殻内地震の地震発生様式ごとに各地震の「応答スペクトル比」を算出し,地域性の観点からグルーピングを行う。

敷地の観測記録(解放基盤波の応答スペクトル)

Noda et al.(2002)による応答スペクトル



## 4. 検討用地震の選定 4.2 検討用地震の選定 補正係数の算定に用いた地震観測点位置

東海第二発電所では,敷地地盤において以下のとおり地震観測 を実施している。補正係数の算出に際しては,解放基盤表面相当 であるE.L.-372mの地震観測記録を用いた。



地震観測点位置(深さ方向)



200m

A地点

地震観測点位置(平面)

B地点

⊕

### 4. 検討用地震の選定 4.2 検討用地震の選定 内陸地殻内地震の地震動評価に用いる補正係数

福島県と茨城県の県境付近で発生した内陸地殻内地震の補正係数





### 4. 検討用地震の選定 4.2 検討用地震の選定 内陸地殻内地震の地震動評価に用いる補正係数

福島県と茨城県の県境付近で発生した地震を除く内陸地殻内地震の補正係数



福島県と茨城県の県境付近を除く地域で発生した内陸地殻内地震については,応答スペクトル比がほぼ1倍であるため日本電気協会 (2016)による内陸地殻内地震に対する補正や観測記録の応答スペクトル比に基づく補正は行わない。


# 過去の被害地震

敷地で震度5程度以上となる過去の被害地震を抽出する。





敷地周辺の被害地震から想定されるΜとΔの関係

敷地での震度5程度以上となる被害地震リスト

年月日	地震	地震規模 M	震央距離 (km)	深さ (km)	地震発生様式
818	関東諸国の地震	7.5	99	-	内陸地殼内地震
1677.11.4	磐城・常陸・安房・上総・下総の地震	8.0	165	-	プレート間地震
1895. 1.18	霞ヶ浦付近の地震	7.2	45	-	海洋プレート内地震
1896. 1. 9	鹿島灘の地震	7.3	35	-	プレート間地震
1921.12.8	茨城県龍ヶ崎付近の地震	7.0	64	-	海洋プレート内地震
1923. 9. 1	関東大地震	7.9	183	23	プレート間地震
1930. 6. 1	那珂川下流域の地震	6.5	8	54	プレート間地震
1938. 5.23	塩屋崎沖の地震	7.0	65	35	プレート間地震
1938. 9.22	鹿島灘の地震	6.5	40	48	プレート間地震
1938.11. 5	福島県東方沖地震	7.5	128	43	プレート間地震
2011. 3.11	2011年東北地方太平洋沖地震の本震	Mw9.0	270	23.7	プレート間地震
2011. 3.11	2011年東北地方太平洋沖地震の最大余震	7.6	69	42.7	プレート間地震

- 敷地で震度5程度以上となる被害地震について、気象庁カタログや文献から震源位置を求め地震発生様式毎に分類した。
- 敷地で震度5程度以上となる被害地震は、その多くがプレート間地震または海洋プレート内地震である。
- 内陸地殻内地震としては,818年関東諸国の地震が敷地で震度5程度以上となる。



# 4. 検討用地震の選定 4.2 検討用地震の選定 活断層の分布

敷地で震度5程度以上となる活断層等を抽出する。





#### 敷地で震度5程度以上となる震源として考慮する活断層のリスト

断層名	長さ (km)	地震規 模M <sup>_1</sup>	等価震源 距離(km)
棚倉破砕帯東縁断層,同西縁断層の連動	42	7.5	37
関口 - 米平リニアメント	6	6.8 <sup>2</sup>	27
竪破山リニアメント	4	6.8 <sup>2</sup>	25
宮田町リニアメント	1	6.8 <sup>2</sup>	21
F1断層,北方陸域の断層,塩/平地震断層の連動	58	7.8	31
F3断層,F4断層の連動	16	6.8	22
F 8 断層	26	7.2	26
F16断層	26	7.2	30
A - 1背斜	20	7.0	22
関谷断層	40	7.5	92
関東平野北西縁断層帯	82	8.0	130
F11断層	5	6.8 <sup>2</sup>	38



# 4. 検討用地震の選定 4.2 検討用地震の選定 短い断層の扱い

短い断層については,地表で認められる断層長さが震源断層の長さを示さない可能性を踏まえ,地震発生層の厚さや断層傾斜角等を考慮して地震規模を設定する。 ・断層傾斜角を考慮して地震発生層を飽和するよう断層幅を算出し,震源断層の長さ=断層幅となる震源を想定する。断層傾斜角については,敷地周辺では縦ずれの断 層が多いことを考慮して60度とする。

・地表の断層長さが震源断層の長さより短い断層を短い断層として選定する。

茨城県の北部に分布する断層のうち,断層長さが17km未満の断層を短い断層として選定する。

茨城県の北部以外の断層のうち,断層長さが15km未満の断層を短い断層として選定する。

・地震の規模については,震源断層の面積から想定される地震規模や新潟県中越沖地震を踏まえM6.8を考慮する。

・等価震源距離については,上記で設定した震源断層面から算出する。





#### 4. 検討用地震の選定 4.2 検討用地震の選定

# 検討用地震の選定





# 4. 検討用地震の選定 4.2 検討用地震の選定 棚倉破砕帯と周辺の微小地震分布の対応(1/2)





# 4. 検討用地震の選定 4.2 検討用地震の選定 **棚倉破砕帯と周辺の微小地震分布の対応(2/2)**



- Kato et al.(2013)では,東北地方太平洋沖地震後の2011年3月28日~2011年10月31日の期間に福島県から茨城県にかけての臨時 地震観測で得られた記録を用い,地震波トモグラフィ解析(double-differenceトモグラフィ解析)により震源再決定をするとともに,震 源分布の形状を検討している。
- 検討の結果,2011年福島県浜通りの地震の余震分布からは,本震を含む Y=-3km断面から北方のY=12km断面までの区間において, 西傾斜の面状(灰色の破線)に微小地震が発生しており,その面を地表へ延長した位置は,地表地震断層の位置と概ね対応してい るとされている。
- Y=6km(前頁の領域Bに相当)での微小地震分布の形状から, 棚倉破砕帯と関連は薄いと考えられる。



## 4. 検討用地震の選定 4.2 検討用地震の選定 **棚倉破砕帯の地震動評価への影響について**

#### 棚倉破砕帯の地震動評価への影響の検討

棚倉破砕帯東縁断層,同西縁断層の連動による震源が東傾斜である可能性を考慮した場合の影響を確認する。





1.	評価フロー	 4
2.	敷地周辺の活断層分布	 5
3.	敷地周辺の地震発生状況	 7
4.	検討用地震の選定	 14
	4.1 地震発生層の設定	 15
	4.2 検討用地震の選定	 29
5.	震源モデルの設定	 44
	5.1 地質調査結果の概要	 45
	5.2 基本震源モデルの設定	 46
	5.3 不確かさを考慮した震源モデルの設定	 67
6.	地震動評価	 73
	6.1 地震動評価手法	 74
	6.2 応答スペクトル手法による評価結果	 75
	6.3 断層モデル手法による評価結果	 76
7.	参考文献	 86

#### 参考資料

1	補正係数の算出に用いた地震リスト	 87
2	統計的グリーン関数法による評価	 90



5. 震源モデルの設定 5.1 地質調査結果の概要

# F1断層,北方陸域の断層及び塩/平地震断層の同時活動性の評価結果

第381回審査会合 資料1 - 1再掲





- 5. 震源モデルの設定
  - 5.1 地質調査結果の概要

# 5.2 基本震源モデルの設定

5.3 不確かさを考慮した震源モデルの設定



基本震源モデルについて,強震動予測レシピに基づいてパラメータ設定を行う。



断層形状を台形でモデル化しているため,断層面積を計算する際の断層長さは, 上辺と下辺の平均値である56.0kmとする。



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回に基づき,F1断層から塩/平地震断層ま での同時活動を考慮した約58kmとする。
- ・巨視的面については,地質調査による断層線に沿うように2枚の断層面を設定する。
- ・地震のタイプは、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,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。

・断層上端深さを3km,下端深さを18kmとする。

・断層幅については,断層傾斜角60度とし地震発生層を飽和した値として17.3kmとする。

#### 【アスペリティ位置】

- ・F1断層の区間,北方陸域の断層~塩/平地震断層の区間にそれぞれ1個ずつ配置する。その際,リニアメントが判読されない区間をF1断層側に含め,これらを一つの区間とすることで敷地近くに配置するアスペリティ面積を安全側に大きく設定する。
- ・アスペリティ位置は、それぞれの区間内、発生層内で安全側に敷地に近い位置とする。水平方向については、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な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メッシュ分背景領域を設定する。上下方向についてはすべりに追随する表層(地表から断層上端までの強震動を出さない層)が存在するので断層上端にアスペリティを配置する。

#### 【破壊開始点位置】

糸井ほか(2009)は,破壊開始点はアスペリティ周辺に分布すると指摘している。また,強震動 予測レシピは,縦ずれ成分が卓越する場合はアスペリティ下端中央に配置することを基本として いることを踏まえ,各アスペリティ下端中央に設定する。

#### 【破壞伝播速度Vr】

強震動予測レシピで用いられているGeller(1976)よりVr=0.72Vs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。









# 5. 震源モデルの設定 5.2 基本震源モデルの設定 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。 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(km<sup>2</sup>)

断層長さと断層幅より算出

・地震モーメント M<sub>0</sub>(N·m)

入倉·三宅(2001)よりM<sub>0</sub>={S/(4.24×10<sup>-11</sup>)}<sup>2.0</sup>/10<sup>7</sup>

## ·平均応力降下量 (MPa),アスペリティ面積比S<sub>a</sub>/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
$_{a} = (S / S_{a}) \cdot$
ここで、
S <sub>a</sub> ∶アスペリティ総面積 (km²)
<sub>a</sub> ∶アスペリティの応力降下量(MPa)
: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。



# 5. 震源モデルの設定 5.2 基本震源モデルの設定 基本震源モデルの設定に関する詳細説明

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。

### 地質調査結果と震源モデルの対応

断層上端深さ,下端深さ

断層タイプ,断層傾斜角

短周期レベル

破壊開始点位置

破壊伝播速度



5. 震源モデルの設定 5.2 基本震源モデルの設定 地質調査結果と震源モデルの対応



👉 IFhT h

5. 震源モデルの設定 5.2 基本震源モデルの設定

断層上端深さ,下端深さ

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DD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。



5. 震源モデルの設定 5.2 基本震源モデルの設定 断層タイプ,断層傾斜角: 福島県,茨城県の県境付近の応力場(1/3)

青柳·上田(2012)



正断層型誘発地震の分布

- 青柳・上田(2012)では、2011年福島県浜通りの地震を含む阿 武限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。
- 同論文では,東北地方太平洋沖地震の発生以前の応力場については,同地震以前は東西圧縮場だったものが,地震以降引張場に変わったとする見解と,地震以前から引張場とする見解に分かれるとしている。

青柳・上田(2012)より抜粋



5. 震源モデルの設定 5.2 基本震源モデルの設定 断層タイプ,断層傾斜角: 福島県,茨城県の県境付近の応力場(2/3)





Fig. 3. (a) Focal mechanisms of six earthquakes with magnitude greater than 1.5 that occurred before and after the 2011 Tohoku Earthquake. The origin time, magnitude and depth of each event are denoted above and below each beach ball. The distribution of polarities of *P*-waves is shown as circles (up) and crosses (down). Stations are plotted in lower hemisphere of focal sphere using the equal-area projection. These six events occurred at depths of 16.3 to 17.2 km, which are deeper than aligned hypocenters shown in Fig. 2(b). Gray circles are epicenters of relocated earthquakes in the present study. (b) Examples of 2–20 Hz filtered waveforms around the *P*-waves for two events, of which focal mechanisms are reverse (red waveforms) and normal faulting (blue waveforms). Each waveform is normalized by the maximum amplitude and aligned at the onset time of the *P*-wave.



Figure 3. (a) Focal mechanism solutions of microearthquakes determined in the present study that occurred before the 2011 Tohoku earthquake (lower hemisphere, equal-area projection). The same triangle diagram as that of Figure 1 is used to differentiate faulting types. A mechanism marked with asterisk is also listed in the JMA catalogue; this is almost the same as that determined by JMA. The alphabetical letters "a" or "b" denote events which are outside or within the source area of the normal-faulting earthquake sequence. (b) Stress tensor inversion result. (top) Principal stress axes with their 95% confidence regions plotted on lower hemisphere stereonets. (middle) Misfit angle for the data with respect to the best stress tensor determined by the stress tensor inversion. Here, the misfit angle represents the angle between the tangential traction predicted by the best solution and the observed slip direction on each plane determined from the focal mechanism. (bottom) Histogram of stress ratio  $\phi = (S_2 - S_3)(S_1 - S_3)$  that belongs to the 95% confidence region.

Imanishi et al.(2012)に一部加筆

Kato et al.(2011)では,東北地方太平洋沖地震発生前後の地震について震源メカニズムを分析したところ,発生前は逆断層のメカニズムだったものが発生後は正断層のメカニズムに変化したことから,同地震を契機に東西圧縮場から東西引張場に応力変化が起こった可能性を指摘している。
 Imanishi et al.(2012)は,東北地方太平洋沖地震の発生以前に福島県,茨城県の県境付近で発生した地震のメカニズム解の分析等から,当該地域の応力場は東北地方太平洋沖地震の発生前から正断

層場であったことを示している。

· Aitaro Kato, Shin ichi Sakai, and Kazushige Obara (2011): A normal-faulting seismic sequence triggered by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake: Wholesale stress regime changes in the upper plate , Earth Planets Space, 63, 745, 748, 2011

·Kazutoshi Imanishi, Ryosuke Ando, and Yasuto Kuwahara (2012) Unusual shallow normal-faulting earthquake sequence in compressional northeast Japan activated after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake , GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 39, L09306, doi:10.1029/2012GL051491, 2012



## 5. 震源モデルの設定 5.2 基本震源モデルの設定 断層タイプ, 断層傾斜角: 福島県, 茨城県の県境付近の応力場(3/3)

GNSS観測による検討

国土地理院によるGNSS(全地球衛星測位システム)の観測データを用い,震源域から東海第二発電所にかけての地域を対象に歪み解析を実施した。具体的には,観測点同士を線で結んだ三角網を構築し,各三角要素内の平均的な歪み変化(2003年5月時点を0と仮定)を推定した。解析対象期間は2003年5月~2016年6月とした。



変位を受けており、2016年6月時点ではその変位は戻っていない。



5. 震源モデルの設定 5.2 基本震源モデルの設定 断層タイプ,断層傾斜角: 海上音波探査結果(1/4)







V.E. ≒5











断層又は撓曲の延長位置

) 探査深度外に認められる断層

5. 震源モデルの設定 5.2 基本震源モデルの設定 断層タイプ,断層傾斜角: 海上音波探査結果(2/4)





第381回審査会合

資料1-1加筆修正

5. 震源モデルの設定 5.2 基本震源モデルの設定 断層タイプ,断層傾斜角: 海上音波探査結果(3/4)







👉 ifhTh

) 探査深度外に認められる断層

5. 震源モデルの設定 5.2 基本震源モデルの設定 断層タイプ,断層傾斜角: 海上音波探査結果(4/4)







(凡例)





V.E. 43



5. 震源モデルの設定 5.2 基本震源モデルの設定 断層タイプ,断層傾斜角: 震源インバージョン解析で設定している傾斜角

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。



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		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パ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 - 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



5. 震源モデルの設定 5.2 基本震源モデルの設定 断層タイプ,断層傾斜角: 余震分布による傾斜角

W25

2011年福島県浜通りの地震の余震分布と傾斜角の対応に関する知見





赤枠は西傾斜の面状に微小地震が発生している断面



青柳・上田(2012)より抜粋

(青柳·上田(2012))



•

している。 Kato et al.(2013)は,余震分布の形状につ . いて面状の配列が約45度南西傾斜として 認められるとしている。

青柳・上田(2012)は、余震分布の形状から

塩ノ平地震断層(文献では井戸沢断層と呼 称)の傾斜角について、「深さ2~10kmまで 鉛直に近く,10~18kmで60°Wである。」と

·対象期間 2011年3月28日~2011年10月31日 ·震源決定手法 臨時観測データを使ったDDトモグラフィ解析による再決定

·対象期間 2011年5月17日~2011年7月29日 ·震源決定手法 臨時観測データを使ったDDトモグラフィ解析による再決定



# 5. 震源モデルの設定 5.2 基本震源モデルの設定 短周期レベル: 2011年福島県浜通りの地震に関する検討

#### 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	. 発震時 <sup>*</sup> (日本時間)			深さ"	<i>M</i> ,*	M0**	Mu**	A***	<i>ll</i> w*	
番号	年	月日	時:分	秒	km		dyne • cm		dyne · cm/s <sup>2</sup>	
01	2011	3月19日	18:56	48.1	5.4	6.1	6.35E+24	5.8	1.85E+25	5.9
G2	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







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. 震源モデルの設定 5.2 基本震源モデルの設定 破壊開始点位置:アスペリティ位置との関係

#### 糸井ほか(2009)について

日本国内で発生した内陸地殻内地震のすべり分布を用いて特性化震源モデルの統計的特性を検討している。



特性化震源と破壊開始点位置

糸井ほか(2009)より抜粋

糸井達哉·翠川三郎·鬼頭順三·三浦弘之·内山泰生·坂本成弘(2009):統計的グリーン関数法で評価した地殻内地震の応答スペクトルのバラツキ,日本地震工学 会論文集 第9巻,第1号,2009



# 5. 震源モデルの設定 5.2 基本震源モデルの設定 破壊伝播速度: 2011年福島県浜通りの地震に関する検討

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,破壊伝播速度の設定値について整理する。



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破壊伝播速度の整理

文献	破壊伝播速 度Vr(km/s)	破壊伝播速度の設定
Tanaka et al.(2014)	2.04	Vr=2.04, 2.21, 2.38, 2.55, 2.72, 2.89km/sの中で, 最適な値として 2.04km/sを選定している。
芝·野口(2012)	2.6	小断層の破壊開始時刻を直接未知数として設定し,破壊伝播速度 はインバージョン結果の平均的な値として示されている。
引間(2012)	2.8	観測波形と計算波形との残差が小さくなる条件を考慮して設定
気象庁(2016)	2.2	観測波形と理論波形の残差変化を調べ,残差が小さい時の値を採 用(岩切ほか(2014))
平均	2.41	
基本震源モデルでの設定値 (Geller(1976))	2.59	Vr=0.72Vs , Vs=3.6km/s

•	各文献で示された破壊伝播速度を整理すると平
	均で2.41km/sとなった。
•	基本震源モデルの破壊伝播速度Vrは,0.72Vs
	( <b>強震動予測レシピによる</b> Geller, 1976)より
	2.59km/sと設定しており、2011年福島県浜通りの
	地震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。

【 岩切一宏・川添安之・長谷川嘉臣(2014) : 地震波形を用いた気象庁の震源過程解析 - 解析方法と断層すべり分布のスケーリング則 - , 験震時報 第78 巻 , 65 ~ 91頁 , 2014



# 5. 震源モデルの設定 5.2 基本震源モデルの設定 パラメータ設定の根拠,妥当性に関するまとめ

### 地質調査結果と震源モデルの対応

・地質調査から得られる断層線に沿うように巨視的面を設定する。

・アスペリティはF1断層の区間に一つ,北方陸域の断層~塩/平地震断層の区間に一つ設定する。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近くに配置するアスペリティ面積を安全側に大きく設定する。
・アスペリティ位置は,それぞれの区間内で安全側に敷地に近い位置とする。

### 断層上端深さ,下端深さ

臨時地震観測データに基づく知見や速度構造に関する知見等を総合的に判断して上端深さ3km,下端深さ18kmと設定する。

## 断層タイプ,傾斜角

・断層タイプについては,福島県と茨城県の県境付近における応力場について検討した知見から正断層として評価する。

・傾斜角については,海上音波探査結果,福島県と茨城県の県境付近で発生した余震分布形状,震源インバージョン解析で設定している値から,西傾斜60度と設定する。

## 短周期レベル

2011年福島県浜通りの地震(M7.0)の短周期レベルが,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ことを確認した。

## 破壞開始点位置

糸井ほか(2009)や強震動予測レシピに基づき,南側アスペリティ,北側アスペリティそれぞれの下端中央に設定する。

## 破壊伝播速度

強震動予測レシピによるGeller(1976)より2.59km/sと設定しており,2011年福島県浜通りの地震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する。



断層パラメータ(基本震源モデル)

百日		設定値			铅宁士注	
	坦日	全体	北部	南部	ī爻上刀/法	
断層 断層	上端長さ(km) 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)	活断層調査結果に基づき設定	
断層 断層	上端深さ(km) 下端深さ(km)	3 18	3 18	3 18	微小地震の発生及び地下構造から設定	
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(km²)	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 <sub>0</sub> (N·m)	5.21E+19	1.65E+19	3.56E+19	M <sub>0</sub> ={S/(4.24×10 <sup>-11</sup> )) <sup>2</sup> /10 <sup>7</sup> 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/m²)	3.50E+10	3.50E+10	3.50E+10	μ = <sup>2</sup> , =2.7g/cm <sup>3</sup> , =3.6km/s ( は敷地周辺を対象にした地震波速度トモグラフィ, 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 <sub>0</sub> /(µS)	
平均	応力降下量 (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 (Geller,1976による)	
短周	期レベルA(N·m/s <sup>2</sup> )(参考)	1.98E+19	-	-	A=2.46 × $10^{10}$ × $(M_0$ × $10^7)^{1/3}$	
	面積S <sub>a</sub> (km <sup>2</sup> )	212.9	79.7	133.2	S <sub>a</sub> =0.22S	
7	平均すべり量D <sub>a</sub> (cm)	307.7	260.1	336.2	D <sub>a</sub> =2D	
ふり	地震モーメントM <sub>0a</sub> (N·m)	2.29E+19	7.26E+18	1.57E+19	$M_{0a} = \mu S_a D_a$	
ティ	応力降下量 <sub>a</sub> (MPa)	14.09	14.09	14.09	$a = \times S/S_a$	
	短周期レベルA(N·m/s <sup>2</sup> )(参考)	1.89E+19	1.16E+19	1.49E+19	A=4 r <sub>a a</sub> <sup>2</sup>	
	面積S <sub>b</sub> (km <sup>2</sup> )	755.0	282.7	472.3	S <sub>b</sub> =S-S <sub>a</sub>	
背景	平均すべり量D <sub>b</sub> (cm)	110.5	93.4	120.7	$D_b = M_{0b} / (\mu S_b)$	
領 域	地震モーメントM <sub>0b</sub> (N·m)	2.92E+19	9.24E+18	1.99E+19	$M_{0b}=M_0-M_{0a}$	
	実効応力 <sub>b</sub> (MPa)	2.82	2.82	2.82	<sub>b</sub> =0.2 <sub>a</sub>	



- 5. 震源モデルの設定
  - 5.1 地質調査結果の概要
  - 5.2 基本震源モデルの設定
  - 5.3 不確かさを考慮した震源モデルの設定



# 不確かさとして考慮するパラメータの選定

主要な断層パラメータについて,認識論的不確かさと偶然的不確かさに分類し,敷地での地震動に大きな影響を与えるパラメータを 不確かさとして考慮する。

【認識論的不確かさ】:事前の詳細な調査や経験式などに基づき設定できるもの それぞれ独立させて考慮することを基本とする。 【偶然的不確かさ】 :事前の詳細な調査や経験式からは設定が困難なもの 重畳させて考慮する。

不確かさの 種類	パラメータ	基本震源モデルの設定	不確かさ検討の要否
	断層上端 , 下端 深さ	上端3km	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DD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。よって不確かさは考慮しない。
		下端18km	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。よって不確かさは考慮しない。
認識論的 不確かさ	断層傾斜角	60度(西傾斜)	<ul> <li>・F1断層の海上音波探査結果や,2011年福島県浜通りの地震の震源インバージョン解析で 設定している断層傾斜角を踏まえ西傾斜60度としている。</li> <li>・しかしながら海上音波探査結果は浅部にとどまることや,震源再決定した余震分布形状は 必ずしも明瞭なトレンドを示していないことを考慮して,断層全長にわたり45度に傾斜させ たケースを不確かさとして考慮する。</li> </ul>
	短周期レベル	強震動予測レシピの平均	・佐藤・堤(2012)では,正断層である2011年福島県浜通りの地震の短周期レベルは,壇ほか(2001)による内陸地殻内地震の平均的な値であるとしている。 ・しかしながら新潟県中越沖地震の知見を踏まえ,基本震源モデルの短周期レベルの1.5倍を不確かさとして考慮する。
	強震動予測レシピで採用さ 破壊伝播速度 るS波速度の0.72倍		2011年福島県浜通りの地震の震源インバージョン解析で設定されている破壊伝播速度を踏 まえても概ね基本震源モデルと同等となっているため,不確かさは考慮しない。
偶然的 不確かさ	アスペリティ位置	敷地に近い位置に設定	・2011年福島県浜通りの地震の震源域にアスペリティを設定することも考えられるが,基本 震源モデルの設定段階で,より敷地に近い位置に設定している。
	破壊開始点	各アスペリティ下端中央に 設定	各不確かさと重畳させる。



#### 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ると考えられるパラメータに対して不確かさを考慮する。

		認語	職論的不確かさ	偶然的不確かさ		
評価ケース	断層上端 深さ <sup>1</sup>	断層下端 深さ <sup>2</sup>	断層傾斜角 3	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	敷地に近くなる ように配置	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	敷地に近くなる ように配置	複数設定
断層傾斜角の 不確かさ	3km	18km		強震動予測レシピの 平均	敷地に近くなる ように配置	複数設定

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。
 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。
 3 F1断層の調査結果では高角の断層と判断できるが、断層面積が大きくなるよう保守的に基本震源モデルにおいて60度として設定した。

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



### 断層パラメータ(短周期レベルの不確かさを考慮したモデル)

項目		設定値			
		全体	北部	南部	战 <b>⊬</b> 万/法
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)	活断層調査結果に基づき設定
断層上端深さ(km) 断層下端深さ(km)		3 18	3 18	3 18	微小地震の発生及び地下構造から設定
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 <sup>2</sup> )		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 <sub>0</sub> (N·m)		5.21E+19	1.65E+19	3.56E+19	M <sub>0</sub> ={S/(4.24×10 <sup>-11</sup> )} <sup>2</sup> /10 <sup>7</sup> 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/m²)		3.50E+10	3.50E+10	3.50E+10	μ = <sup>2</sup> , =2.7g/cm <sup>3</sup> , =3.6km/s ( は敷地周辺を対象にした地震波速度トモグラフィ, 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 <sub>0</sub> /(µS)
平均応力降下量 (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 (Geller,1976による)
短周期レベルA(N·m/s <sup>2</sup> )(参考)		1.98E+19	-	-	A=2.46 × $10^{10}$ × $(M_0$ × $10^7)^{1/3}$
アスペリティ	面積S <sub>a</sub> (km <sup>2</sup> )	212.9	79.7	133.2	S <sub>a</sub> =0.22S
	平均すべり量D <sub>a</sub> (cm)	307.7	260.1	336.2	D <sub>a</sub> =2D
	地震モーメントM <sub>0a</sub> (N·m)	2.29E+19	7.26E+18	1.57E+19	$M_{0a} = \mu S_a D_a$
	応力降下量 <sub>a</sub> (MPa)	21.14	21.14	21.14	$_{a}$ = ×S/S <sub>a</sub> ×1.5
	短周期レベルA(N·m/s <sup>2</sup> )(参考)	2.83E+19	1.73E+19	2.24E+19	A=4 r <sub>a a</sub> <sup>2</sup>
背景領域	面積S <sub>b</sub> (km <sup>2</sup> )	755.0	282.7	472.3	S <sub>b</sub> =S-S <sub>a</sub>
	平均すべり量D <sub>b</sub> (cm)	110.5	93.4	120.7	$D_{b}=M_{0b}/(\mu S_{b})$
	地震モーメントM <sub>ob</sub> (N·m)	2.92E+19	9.24E+18	1.99E+19	M <sub>ob</sub> =M <sub>o</sub> -M <sub>oa</sub>
	実効応力 <sub>b</sub> (MPa)	4.23	4.23	4.23	<sub>b</sub> =0.2 a



### 断層形状,断層タイプ

- ・基本震源モデルの断層傾斜角について,F1断層の海上音波探査結 果では高角とされているが,縦ずれ断層であることを考慮し西傾斜60 度としている。
- ・しかしながら,海上音波探査結果はその範囲が浅部にとどまることや 震源再決定した青柳・上田(2012), Kato et al.(2013)における2011年 福島県浜通りの地震の余震分布形状が,必ずしも明瞭なトレンドを示 していないことを踏まえ,不確かさとして断層全域にわたり傾斜角45 度を考慮する。
- ・断層幅は,地震発生層上端深さ3km,下端深さ18kmについて断層傾 斜角を考慮して飽和した値として21.2kmとする。
- ・基本震源モデルと同様に正断層とする。





### 断層傾斜角の不確かさを考慮した震源モデル



# 断層パラメータ: 断層傾斜角の不確かさ

### 断層パラメータ(断層傾斜角の不確かさを考慮したモデル)

項目		設定値			51.今子 34
		全体	北部	南部	或止力法
断層上端長さ(km) 断層下端長さ(km)		57.1 51.1	21.5 18.5	35.6 32.6	活断層調査結果による位置を基に設定
断層傾斜角(度)		45(西傾斜)	45(西傾斜)	45(西傾斜)	活断層調査結果の不確かさなどを踏まえ設定
断層上端深さ(km) 断層下端深さ(km)		3 18	3 18	3 18	微小地震の発生及び地下構造から設定
断層幅W(km)		21.2	21.2	21.2	地震発生層と断層傾斜角から設定
断層面積S(km <sup>2</sup> )		1146.9	424.0	722.9	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 <sub>0</sub> (N·m)		7.32E+19	2.27E+19	5.05E+19	M <sub>0</sub> ={S/(4.24×10 <sup>-11</sup> )} <sup>2</sup> /10 <sup>7</sup> 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/m²)		3.50E+10	3.50E+10	3.50E+10	μ = <sup>2</sup> , =2.7g/cm <sup>3</sup> , =3.6km/s ( は敷地周辺を対象にした地震波速度トモグラフィ, 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)		182.3	152.9	199.6	D=M <sub>0</sub> /(µS)
平均応力降下量 (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 (Geller,1976による)
短周期レベルA(N·m/s <sup>2</sup> )(参考)		2.22E+19	-	-	A=2.46 × 10 <sup>10</sup> × $(M_0 × 10^7)^{1/3}$
アスペリティ	面積S <sub>a</sub> (km <sup>2</sup> )	252.3	93.3	159.0	S <sub>a</sub> =0.22S
	平均すべり量D <sub>a</sub> (cm)	364.6	305.7	399.2	D <sub>a</sub> =2D
	地震モーメントM <sub>0a</sub> (N·m)	3.22E+19	9.98E+18	2.22E+19	$M_{0a} = \mu S_a D_a$
	応力降下量 <sub>a</sub> (MPa)	14.09	14.09	14.09	$a = x S/S_a$
	短周期レベルA(N·m/s <sup>2</sup> )(参考)	2.06E+19	1.25E+19	1.63E+19	A=4 r <sub>a a</sub> <sup>2</sup>
背景領域	面積S <sub>b</sub> (km <sup>2</sup> )	894.6	330.7	563.9	S <sub>b</sub> =S-S <sub>a</sub>
	平均すべり量D <sub>b</sub> (cm)	130.9	109.7	143.3	$D_{b}=M_{0b}/(\mu S_{b})$
	地震モーメントM <sub>ob</sub> (N·m)	4.10E+19	1.27E+19	2.83E+19	M <sub>ob</sub> =M <sub>o</sub> -M <sub>oa</sub>
	実効応力 <sub>b</sub> (MPa)	2.82	2.82	2.82	<sub>b</sub> =0.2 <sub>a</sub>


1.	評価フロー	 4
2.	敷地周辺の活断層分布	 5
3.	敷地周辺の地震発生状況	 7
4.	検討用地震の選定	 14
	4.1 地震発生層の設定	 15
	4.2 検討用地震の選定	 29
5.	震源モデルの設定	 44
	5.1 地質調査結果の概要	 45
	5.2 基本震源モデルの設定	 46
	5.3 不確かさを考慮した震源モデルの設定	 67
6.	地震動評価	 73
	6.1 地震動評価手法	 74
	6.2 応答スペクトル手法による評価結果	 75
	6.3 断層モデル手法による評価結果	 76
7.	参考文献	 86

#### 参考資料

1	補正係数の算出に用いた地震リスト	 • •	• •	•	 	• •	• •	• •	0	• •	• •	•	• •	0	87
2	統計的グリーン関数法による評価	 			 	• •	• •	• •	0	• •				1	90



#### 6. 地震動評価

## 6.1 地震動評価手法

応答スペクトルに基づく手法による地震動評価

- 解放基盤表面における地震動として評価できること、震源の広がりを考慮できること、敷地における地震観測記録等を用いて諸特性が考慮できること、さらに水平方向及び鉛直方向の地震動を評価できることから、Noda et al.(2002)を採用する。
- ・ 地震動評価に際しては,福島県と茨城県の県境付近で発生した内陸地殻内地震による補正係数(35頁)を考慮 する。日本電気協会(2016)による内陸地殻内地震に対する補正は行わない。
- ・ 地震規模は松田式によりM7.8, 等価震源距離(Xeq)は基本震源モデルで26.3km, 断層傾斜角の不確かさケースで25.3kmとなる。

断層モデルを用いた手法による地震動評価

震源近傍で発生した適切な要素地震の観測記録が敷地で得られているため,経験的グリーン関数法により評価する。波形合成はDan et al.(1989)の手法に基づき実施する。



## 6. 地震動評価 6.2 応答スペクトル手法による評価結果



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応答スペクトルに基づく手法による地震動評価は,Noda et al.(2002) の手法に補正係数を考慮し算定した。



#### 要素地震の選定のフロー

1996年9月以降に東海第二発電所で観測された記録を対象とする。

#### 発生位置



2011年4月14日の地震(M5.1)を用いることとする。



6. 地震動評価 6.3 断層モデル手法による評価結果

# **要素地震の選定(2/3)**

要素地震の選定結果

設定した断層モデル近辺で発生した同じ断層タイプ(正断層)の地震で,規模がM5程度である2011年4月14日の地震(M5.1)を選定する。



👉 iFhTh

#### 6. 地震動評価 6.3 断層モデル手法による評価結果 要素地震の選定(3/3)

ここで,短周期レベル(A)を観測記録から評価した加速度 震源スペクトルのf=2~5Hzの平均値により求め、下式に示

すBrune(1970)より応力降下量 を求める。

#### 要素地震の応力降下量の評価

要素地震の応力降下量は、Boore(1983)等による理論震源スペクトルを敷地及び敷地周辺のKiK netの観測記録を用いて求めた震源スペクトル にフィッティングさせることにより評価する。



要素地震の震源スペクトルの推定結果

応力降下量

7.54

(MPa)

地震

モーメント

 $M_0(N \cdot m)$ 

 $2.41 \times 10^{16}$ 

要素地震の諸元

震源深さ

(**km**)

8.8

$A = \left(2\pi f_c\right)^3 \cdot M_0$		震失	位置	M
$f_c = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{7}{16}\right)^{1/6} \cdot \beta \cdot \left(\frac{\Delta\sigma}{M_0}\right)^{1/3}$	発生日	緯度 (度)	経度 (度)	IVI
	2011年4月14日	36.778	140.573	5.1





## 6. 地震動評価 6.3 断層モデル手法による評価結果 断層モデル手法による評価結果:基本震源モデル

基本震源モデルによる評価結果の応答スペクトル

- 基本震源モデル

実線∶破壊開始点1 破線∶破壊開始点2





## 6. 地震動評価 6.3 断層モデル手法による評価結果 断層モデル手法による評価結果:短周期レベルの不確かさ

短周期レベルの不確かさケースによる評価結果の応答スペクトル

破線∶破壊開始点2





## 6. 地震動評価 6.3 断層モデル手法による評価結果 断層モデル手法による評価結果:断層傾斜角の不確かさ

傾斜角の不確かさケースによる評価結果の応答スペクトル





## 6. 地震動評価 6.3 断層モデル手法による評価結果 断層モデル手法による評価結果:全ケース

基本震源モデル及び各不確かさケースの応答スペクトル



IFhTh

基本震源モデル

実線:破壊開始点1

短周期レベルの不確かさ 断層傾斜角の不確かさ

# 応答スペクトル手法と断層モデル手法の評価結果



## 6. 地震動評価 6.3 断層モデル手法による評価結果 **断層モデル手法による評価結果:全ケースの加速度時刻歴波形**



ー・ドルブル

## 6. 地震動評価 6.3 断層モデル手法による評価結果 断層モデル手法による評価結果:全ケースの速度時刻歴波形



👉 iFhTh

7.参考文献

- ・ 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」)
- · 気象庁:地震年報2012年版他
- · 宇佐美龍夫·石井寿·今村隆正·武村雅之·松浦律子(2013):日本被害地震総覧599-2012,東京大学出版会
- 宇津徳治(1982):日本付近のM6.0以上の地震および被害地震の表:1885年~1980年,東京大学地震研究所彙報, Vol.57
- · 気象庁・消防庁(2009):震度に関する検討会報告書,平成21年3月
- ・ 村松郁栄(1969):震度分布と地震のマグニチュードとの関係,岐阜大学教育学部研究報告,自然科学,第4巻,第3号,168-176
- ・ 勝又譲・徳永規一(1971):震度の範囲と地震の規模および震度と加速度の対応,験震時報,第36巻,第3,4号,1-8
- ・ 松田時彦(1975):活断層から発生する地震の規模と周期について,地震第2輯,第28巻, p.269-283
- 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
- ・ 原子力安全基盤機構(2004): 地震記録データベースSANDEL のデータ整備と地震発生上下限層深さの評価に関する報告書(平成15年度), JNES / SAE04 017
- 三浦誠一・小平秀一・仲西理子・鶴哲郎・高橋成実・金田義行(2000):エアガン 海底地震計データによる日本海溝・福島沖前弧域の地震波速度構造, JAMSTEC深海研究, 第16号
- Dapeng Zhao ,Shigeki Horiuchi, Akira Hasegawa (1992): Seismic velocity structure of the crust beneath the Japan Islands , Tectonophysics 212
- Akio Katsumata (2010): Depth of the Moho discontinuity beneath the Japanese islands estimated by traveltime analysis, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 115, B04303, doi:10.1029/2008JB005864, 2010
- Akiko Tanaka, Yuzo Ishikawa (2005): Crustal thermal regime inferred from magnetic anomaly data and its relationship to seismogenic layer thickness: The Japanese islands case study, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 152
- 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 lwata, 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
- ・ 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〈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
- Aitaro Kato, Toshihiro Igarashi, Kazushige Obara, Shinichi Sakai, Tetsuya Takeda, Atsushi Saiga, Takashi Iidaka, Takaya Iwasaki, Naoshi Hirata, Kazuhiko Goto, Hiroki Miyamachi, Takeshi Matsushima, Atsuki Kubo, Hiroshi Katao, Yoshiko Yamanaka, Toshiko Terakawa, Haruhisa Nakamichi, Takashi Okuda, Shinichiro Horikawa, Noriko Tsumura, Norihito Umino, Tomomi Okada, Masahiro Kosuga, Hiroaki Takahashi, Takuji Yamada12 (2013) : Imaging the source regions of normal faulting sequences induced by the 2011 M9.0 Tohoku-Oki earthquake, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 40, 1 6, doi:10.1002/GRL.50104, 2013
- Aitaro Kato, Shin ichi Sakai, and Kazushige Obara (2011): A normal-faulting seismic sequence triggered by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake: Wholesale stress regime changes in the upper plate, Earth Planets Space, 63, 745, 748, 2011
- Kazutoshi Imanishi, Ryosuke Ando, and Yasuto Kuwahara (2012) : Unusual shallow normal-faulting earthquake sequence in compressional northeast Japan activated after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 39, L09306, doi:10.1029/2012GL051491, 2012
- ・ 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
- ・・ 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
- ・ 糸井達哉·翠川三郎·鬼頭順三·三浦弘之·内山泰生·坂本成弘(2009):統計的グリーン関数法で評価した地殻内地震の応答スペクトルのバラツキ,日本地震工学会論文集第9巻, 第1号,2009
- ・・ 岩切一宏・川添安之・長谷川嘉臣(2014):地震波形を用いた気象庁の震源過程解析 解析方法と断層すべり分布のスケーリング則 ,験震時報 第78 巻,65~91頁,2014



1.	評価フロー	 4
2.	敷地周辺の活断層分布	 5
3.	敷地周辺の地震発生状況	 7
4.	検討用地震の選定	 14
	4.1 地震発生層の設定	 15
	4.2 検討用地震の選定	 29
5.	震源モデルの設定	 44
	5.1 地質調査結果の概要	 45
	5.2 基本震源モデルの設定	 46
	5.3 不確かさを考慮した震源モデルの設定	 67
6.	地震動評価	 73
	6.1 地震動評価手法	 74
	6.2 応答スペクトル手法による評価結果	 75
	6.3 断層モデル手法による評価結果	 76
7.	参考文献	 86

#### 参考資料

1	補正係数の算出に用いた地震リスト	 87
2	統計的グリーン関数法による評価	 90



#### <sup>参考資料</sup> 1 補正係数の算出に用いた地震リスト(1/2)

検討対象期間:	1996年9月~	2012年12月	月 検討	対象地震	数: 67	地震				
	必要口	10±	震央	位置	震源深さ	マグニ	方位角	震央距離	見かけの	地雷發生样士
	光辰口	164	緯度(度)	経度(度)	(km)	チュード	(度)	(km)	入射角(度)	地辰光王惊巧
	2010/09/29	16:59:55.98	37.285	140.026	7.62	5.7	330.5	104.6	85.8	内陸地殻内地震
	2011/03/11	14:51:20.56	37.311	142.238	33.00	6.8	56.7	173.0	79.2	内陸地殻内地震
	2011/03/11	14:54:42.13	36.713	140.582	9.53	5.7	355.3	27.6	70.9	内陸地殼内地震(福島茨城県境)
	2011/03/11	14:58:05.58	37.689	141.934	35.20	6.6	40.6	179.9	78.9	内陸地殻内地震
	2011/03/11	15:05:06.38	37.519	141.622	22.48	5.9	37.4	147.8	81.4	内陸地殻内地震
	2011/03/11	15:11:19.00	36.865	140.619	6.41	5.5	1.4	44.3	81.8	内陸地殼内地震(福島茨城県境)
	2011/03/11	15:12:58.66	37.228	141.645	38.90	6.7	47.3	125.4	72.8	内陸地殻内地震
	2011/03/11	15:57:13.25	35.819	141.182	27.53	6.2	144.1	88.5	72.7	内陸地殻内地震
	2011/03/11	16:30:15.63	37.365	141.260	26.96	5.9	30.1	115.5	76.9	内陸地殻内地震
	2011/03/11	16:54:43.35	37.669	141.684	35.43	5.5	35.4	164.3	77.8	内陸地殻内地震
	2011/03/11	16:56:09.24	37.049	142.569	11.24	6.2	69.1	186.8	86.6	内陸地殻内地震
	2011/03/11	17:04:53.53	37.260	142.110	19.17	5.9	56.2	160.4	83.2	内陸地殻内地震
	2011/03/11	17:10:28.59	36.057	141.709	18.45	5.4	114.3	108.9	80.4	内陸地殻内地震
	2011/03/11	17:31:07.88	37.468	141.377	30.71	5.9	31.5	130.6	76.8	内陸地殻内地震
	2011/03/11	17:40:54.53	37.424	141.273	29.91	6.0	29.0	121.8	76.2	内陸地殻内地震
	2011/03/11	17:52:20.63	36.772	141.948	0.11	5.6	73.8	124.7	89.9	内陸地殻内地震
	2011/03/11	18:04:13.52	36.551	140.956	16.53	5.3	73.2	32.7	63.2	内陸地殻内地震
	2011/03/11	18:55:21.24	36.750	141.802	0.00	5.4	73.2	111.5	90.0	内陸地殻内地震
	2011/03/11	20:20:59.95	35.795	141.200	38.55	5.6	144.2	91.6	67.2	内陸地殻内地震
	2011/03/11	20:44:23.03	36.697	142.451	13.00	5.7	80.6	167.0	85.5	内陸地殻内地震
	2011/03/11	21:56:03.61	37.794	142.048	28.99	5.3	40.6	195.2	81.6	内陸地殻内地震
	2011/03/11	22:34:32.93	36.285	141.930	23.00	5.6	99.2	120.4	79.2	内陸地殻内地震
	2011/03/11	23:53:58.22	36.006	142.138	13.00	5.4	109.9	146.8	84.9	内陸地殻内地震
	2011/03/11	23:56:13.86	35.972	141.570	31.21	5.8	122.1	102.5	73.1	内陸地殻内地震
	2011/03/12	00:32:31.66	37.307	142.173	13.56	5.3	55.8	168.0	85.4	内陸地殻内地震
	2011/03/12	03:59:15.62	36.986	138.598	8.38	6.7	288.4	188.5	87.5	内陸地殻内地震
	2011/03/12	04:31:55.60	36.949	138.573	0.78	5.9	287.0	189.5	89.8	内陸地殻内地震
	2011/03/15	22:27:53.62	37.599	142.299	10.03	6.2	49.6	196.2	87.1	内陸地殻内地震
	2011/03/15	22:37:54.91	37.624	142.001	29.51	5.3	43.6	178.6	80.6	内陸地殻内地震
	2011/03/16	12:52:02.77	35.837	140.907	9.97	6.1	158.8	74.8	82.4	内陸地殻内地震
	2011/03/16	13:14:29.65	37.535	141.581	25.33	5.6	35.9	146.9	80.2	内陸地殻内地震
	2011/03/17	17:25:22.76	36.681	141.851	17.21	5.4	77.5	113.9	81.4	内陸地殻内地震
	2011/03/18	03:55:31.97	37.142	142.523	9.00	5.7	65.7	186.8	87.2	内陸地殻内地震
	2011/03/18	09:41:16.26	35.986	141.831	28.00	5.4	115.5	122.3	77.1	内陸地殻内地震
	2011/03/19	08:49:31.45	36.737	140.605	4.95	5.3	359.6	30.1	80.7	内陸地殼内地震(福島茨城県境)
	2011/03/19	18:56:48.06	36.784	140.572	5.37	6.1	354.9	35.4	81.4	内陸地殼内地震(福島茨城県境)
	2011/03/20	10:30:45.53	36.939	141.177	29.31	5.5	44.0	73.2	68.2	内陸地殻内地震
	2011/03/23	07:12:28.78	37.085	140.788	7.60	6.0	13.2	70.6	83.9	内陸地殻内地震(福島茨城県境)

方位角:東海第二発電所から震央位置を望む方向を北から時計回りの 角度で示している。 見かけの入射角:震央距離と震源深さから求めた震源方向の角度を示している。垂直が0度,水平が90度となる。

見かけの入射角 = tan<sup>-1</sup>(震央距離 / 震源深さ)

震央距離:東海第二発電所から震央位置までの距離を示している。



88

#### <sup>参考資料</sup> 1 補正係数の算出に用いた地震リスト(2/2)

改善口吐		震央	立置	震源深さ	マグニ	方位角	震央距離	見かけの	业高改生技士
光宸日	時	緯度(度)	経度(度)	(km)	チュード	(度)	(km)	入射角(度)	地莀ヂ生惊式
2011/03/23	07:13:52.77	37.035	140.769	0.93	5.8	12.9	64.8	89.2	内陸地殼内地震(福島茨城県境)
2011/03/23	07:34:56.09	37.098	140.796	6.69	5.5	13.5	72.2	84.7	内陸地殼内地震(福島茨城県境)
2011/03/23	07:36:31.31	37.063	140.771	7.30	5.8	12.4	67.9	83.9	内陸地殼内地震(福島茨城県境)
2011/03/29	19:54:30.44	37.409	142.470	13.37	6.6	57.2	196.2	86.1	内陸地殻内地震
2011/03/30	21:51:37.17	35.444	141.228	30.12	5.3	153.5	126.4	76.6	内陸地殻内地震
2011/04/11	17:16:12.02	36.946	140.673	6.42	7.0	6.3	53.6	83.2	内陸地殼内地震(福島茨城県境)
2011/04/11	17:17:47.50	36.891	140.715	9.18	5.7	11.6	48.2	79.2	内陸地殼内地震(福島茨城県境)
2011/04/11	17:26:29.04	37.063	140.623	5.25	5.4	1.3	66.2	85.5	内陸地殼内地震(福島茨城県境)
2011/04/11	20:42:35.16	36.966	140.635	10.58	5.9	2.6	55.5	79.2	内陸地殼内地震(福島茨城県境)
2011/04/12	07:26:16.87	36.819	138.606	0.00	5.6	282.9	183.2	90.0	内陸地殻内地震
2011/04/12	14:07:42.28	37.053	140.644	15.08	6.4	2.9	65.2	77.0	内陸地殼内地震(福島茨城県境)
2011/04/13	08:36:20.20	35.487	140.879	26.90	5.3	167.2	111.4	76.4	内陸地殻内地震
2011/04/13	10:07:58.05	36.915	140.707	4.52	5.7	10.1	50.7	84.9	内陸地殻内地震(福島茨城県境)
2011/04/14	12:08:58.35	36.984	140.773	10.75	5.4	14.4	59.4	79.7	内陸地殼内地震(福島茨城県境)
2011/06/04	01:00:14.16	36.990	141.211	29.61	5.5	42.7	79.4	69.5	内陸地殻内地震
2011/06/09	19:38:32.94	36.497	140.971	12.59	5.7	83.8	32.8	69.0	内陸地殻内地震
2011/06/18	20:31:04.61	37.618	141.821	27.65	6.0	39.8	167.4	80.6	内陸地殻内地震
2011/06/21	17:49:39.90	35.760	141.474	21.10	5.5	134.8	110.6	79.2	内陸地殻内地震
2011/07/19	10:38:48.40	37.326	141.758	30.80	5.4	46.7	140.1	77.6	内陸地殻内地震
2011/09/29	19:05:05.66	37.133	140.870	8.84	5.4	17.5	77.6	83.5	内陸地殼内地震(福島茨城県境)
2011/10/03	01:49:00.69	37.338	141.636	17.58	5.3	43.2	133.3	82.5	内陸地殻内地震
2011/11/20	10:23:40.78	36.711	140.588	8.99	5.3	356.5	27.2	71.7	内陸地殼内地震(福島茨城県境)
2012/01/12	12:20:49.03	36.968	141.304	33.35	5.9	48.0	83.6	68.2	内陸地殻内地震
2012/01/28	07:43:14.09	35.489	138.977	18.16	5.4	234.1	182.6	84.3	内陸地殻内地震
2012/04/12	20:19:57.23	36.829	141.343	28.81	5.6	58.3	77.2	69.5	内陸地殻内地震
2012/04/12	23:50:50.42	37.452	141.734	26.80	5.9	42.2	148.5	79.8	内陸地殻内地震
2012/04/13	19:10:00.37	36.947	141.422	31.54	6.0	53.5	90.4	70.8	内陸地殻内地震
2012/11/09	12:51:53.47	36.878	141.380	32.50	5.5	56.3	82.8	68.6	内陸地殻内地震
2012/11/16	17:25:53.87	35.357	141.230	30.24	5.5	155.3	135.3	77.4	内陸地殻内地震

方位角:東海第二発電所から震央位置を望む方向を北から時計回りの 角度で示している。 見かけの入射角:震央距離と震源深さから求めた震源方向の角度を示している。垂直が0度,水平が90度となる。 見かけの入射角 = tan<sup>-1</sup>(震央距離/震源深さ)

震央距離:東海第二発電所から震央位置までの距離を示している。



1. 評価フロー	 4
2. 敷地周辺の活断層分布	 ļ
3. 敷地周辺の地震発生状況	 -
4. 検討用地震の選定	 14
4.1 地震発生層の設定	 1
4.2 検討用地震の選定	 2
5. 震源モデルの設定	 4
5.1 地質調査結果の概要	 4
5.2 基本震源モデルの設定	 4
5.3 不確かさを考慮した震源モデルの設定	 6
6. 地震動評価	 7
6.1 地震動評価手法	 7
6.2 応答スペクトル手法による評価結果	 7
6.3 断層モデル手法による評価結果	 7
7. 参考文献	 8

#### 参考資料

2	統計的グリーン関数法による評価	 90
1	補正係数の算出に用いた地震リスト	 87



## <sup>参考資料</sup> 2 統計的グリーン関数法による評価(1/4)

#### 評価条件

経験的グリーン関数法に用いる要素地震の妥当性確認のため,基本震源モデルに対し,統計的グリーン関数法による地震動評価を 実施する。震源モデル及び評価に用いる地盤モデルを示す。



-685

-677

-

2.63

2750

4740

Q=110f<sup>0.69</sup>

Q=110f<sup>0.69</sup>



基本震源モデル



# <sup>参考資料</sup> 2 統計的グリーン関数法による評価(2/4)

#### 断層パラメータ(基本震源モデル)

	百日		設定値					
	坦日	全体	北部	南部	<b>议</b> 上力/云			
断層	髾上端長さ(km) 霄下端長さ(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	M (度)	60(西傾斜)	60(西傾斜)	60(西傾斜)	活断層調査結果に基づき設定			
断層上端深さ(km) 断層下端深さ(km)		3 18	3 18	3 18	微小地震の発生及び地下構造から設定			
断層	髾幅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	督面積S(km <sup>2</sup> )	967.9	362.4	605.5	断層面より算定			
破壞	<b>ē</b> 伝播様式	同心円状	同心円状	同心円状	-			
地震	夏モーメントM <sub>o</sub> (N・m)	5.21E+19	1.65E+19	3.56E+19	M <sub>0</sub> ={S/(4.24×10 <sup>-11</sup> )) <sup>2</sup> /10 <sup>7</sup> 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	E率(N/m²)	3.50E+10	3.50E+10	3.50E+10	μ = <sup>2</sup> , =2.7g/cm <sup>3</sup> , =3.6km/s ( は敷地周辺を対象にした地震波速度トモグラフィ, 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 <sub>0</sub> /(µS)			
平均	回応力降下量 (MPa)	3.1	3.1	3.1	Fujii and Matsu ura(2000)による			
破壊	ē伝播速度Vr(km/s)	2.59	2.59	2.59	Vr=0.72 (Geller,1976による)			
短周	副期レベルA(N·m/s²)(参考)	1.98E+19	-	-	A=2.46 × $10^{10}$ × $(M_0$ × $10^7)^{1/3}$			
高周	]波遮断係数f <sub>max</sub> (Hz)	6	6	6	活断層による地震に関する強震動予測レシピ			
	面積S <sub>a</sub> (km²)	212.9	79.7	133.2	S <sub>a</sub> =0.22S			
アフ	平均すべり量D <sub>a</sub> (cm)	307.7	260.1	336.2	D <sub>a</sub> =2D			
ペリ	地震モーメントM <sub>0a</sub> (N·m)	2.29E+19	7.26E+18	1.57E+19	$M_{0a}$ = $\mu S_a D_a$			
ティ	応力降下量 <sub>a</sub> (MPa)	14.09	14.09	14.09	$a = x S/S_a$			
	短周期レベルA(N·m/s <sup>2</sup> )(参考)	1.89E+19	1.16E+19	1.49E+19	A=4 r <sub>a a</sub> <sup>2</sup>			
	面積S <sub>b</sub> (km²)	755.0	282.7	472.3	$S_b = S - S_a$			
背景	平均すべり量D <sub>h</sub> (cm)	110.5	93.4	120.7	$D_h=M_{nh}/(\mu S_h)$			
領 域	地震モーメントM <sub>0b</sub> (N·m)	2.92E+19	9.24E+18	1.99E+19	M <sub>0b</sub> =M <sub>0</sub> -M <sub>0a</sub>			
	実効応力 <sub>b</sub> (MPa)	2.82	2.82	2.82	<sub>b</sub> =0.2 a			



## <sup>参考資料</sup> 2 統計的グリーン関数法による評価(3/4)

#### 基本震源モデルによる地震動評価結果の応答スペクトル

基本震源モデルに対し、経験的グリーン関数法による評価結果と統計的グリーン関数法による評価結果を比較する。



- 統計的グリーン関数法による評価結果について, EW方向及びUD方向の周期0.3~1秒程度から長周期側において経験的グリーン関数法による評価結果と概ね整合している。
- 短周期側における評価結果の差異は、経験的グリーン関数法においてf<sub>max</sub>の補正無しで評価したことにより、要素地震のf<sub>max</sub>の特性がそのまま合成結果に現れたためと考えられる。

👍 げんてん

- 経験的グリーン関数法

## <sup>参考資料</sup> 2 統計的グリーン関数法による評価(4/4)

基本震源モデルによる地震動評価結果の時刻歴波形

