

## 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

(コメント回答)

平成28年9月30日

日本原子力発電株式会社

# 審査会合におけるコメント

No.	日付	回次	コメント内容	回答状況	該当箇所
1	平成28年 8月26日	第394回 審査会合	応答スペクトル手法に用いる鉛直成分の補正係数において、観測記録の平均値を一部周期帯でカバーしていないことについて、その妥当性を示すこと。	今回回答	P36, 99
2	平成28年 8月26日	第394回 審査会合	アスペリティ位置は敷地に近い位置に設定する方針としているものの、断層の端点とアスペリティの間に背景領域を設けている根拠を説明すること。	今回回答	P64 ~ 67
3	平成28年 8月26日	第394回 審査会合	断層上端にアスペリティを配置することが保守的かどうかを示すこと。	今回回答	P63
4	平成28年 8月26日	第394回 審査会合	破壊開始点について、アスペリティの下端以外にも、物理的観点に基づけば断層下端からの破壊も考えられることからこの影響検討をすること。	今回回答	P68 ~ 73
5	平成28年 8月26日	第394回 審査会合	検討用地震の震源断層は、最新の強震動予測レシピに基づけばFujii and Matsu'ura(2000)等の適用外であるが、断層モデルを用いた地震動評価ではこれらの知見に基づいてパラメータ設定していることの妥当性を示すこと。	今回回答	P76
6	平成28年 8月26日	第394回 審査会合	要素地震のコーナー周波数を示すこと。	今回回答	P92

# 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

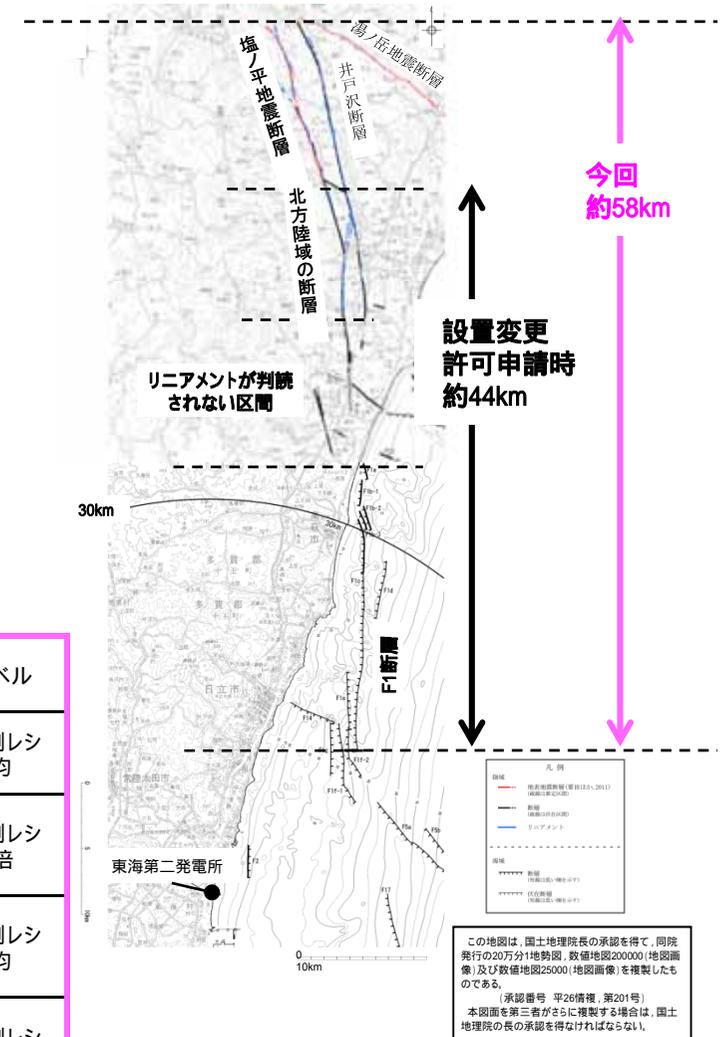
- 地質調査結果と震源モデルの対応の見直し
- 地質調査結果の断層線に沿うよう震源モデルを再設定
- リニアメントが判読されない区間をF1断層側に含め、これらを1つの区間とすることで敷地近くに配置するアスペリティ面積を大きく設定し、更にアスペリティ位置の不確かさについても考慮
- 断層の上端深さの見直し 5km 3km  
2011年福島県浜通りの地震の震源域での地震発生層を分析し、地震発生層の上端深さを浅くすることで断層幅をより厚く想定
- 断層傾斜角の不確かさケースの考慮  
断層調査によりF1断層は高角な断層であるとされているが、2011年福島県浜通りの地震の震源域での余震分布の形状を考慮し、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	M	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
設置変更許可申請時	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)	強震動予測レシビの平均
	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)	強震動予測レシビの1.5倍



	評価ケース	断層長さ	M	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
今回	基本震源モデル	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)	強震動予測レシビの平均
	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)	強震動予測レシビの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)	強震動予測レシビの平均
	アスペリティ位置の不確かさ	58km	7.8	3km	60度	断層端部に配置(敷地に近いアスペリティ面積大)	強震動予測レシビの平均



この地図は、国土地理院長の承認を得て、同院発行の20万分1地勢図、数値地図20000(地図画像)及び数値地図25000(地図画像)を複製したものである。  
(承認番号 平26情複、第201号)  
本図面を第三者がさらに複製する場合は、国土地理院の長の承認を得なければならない。

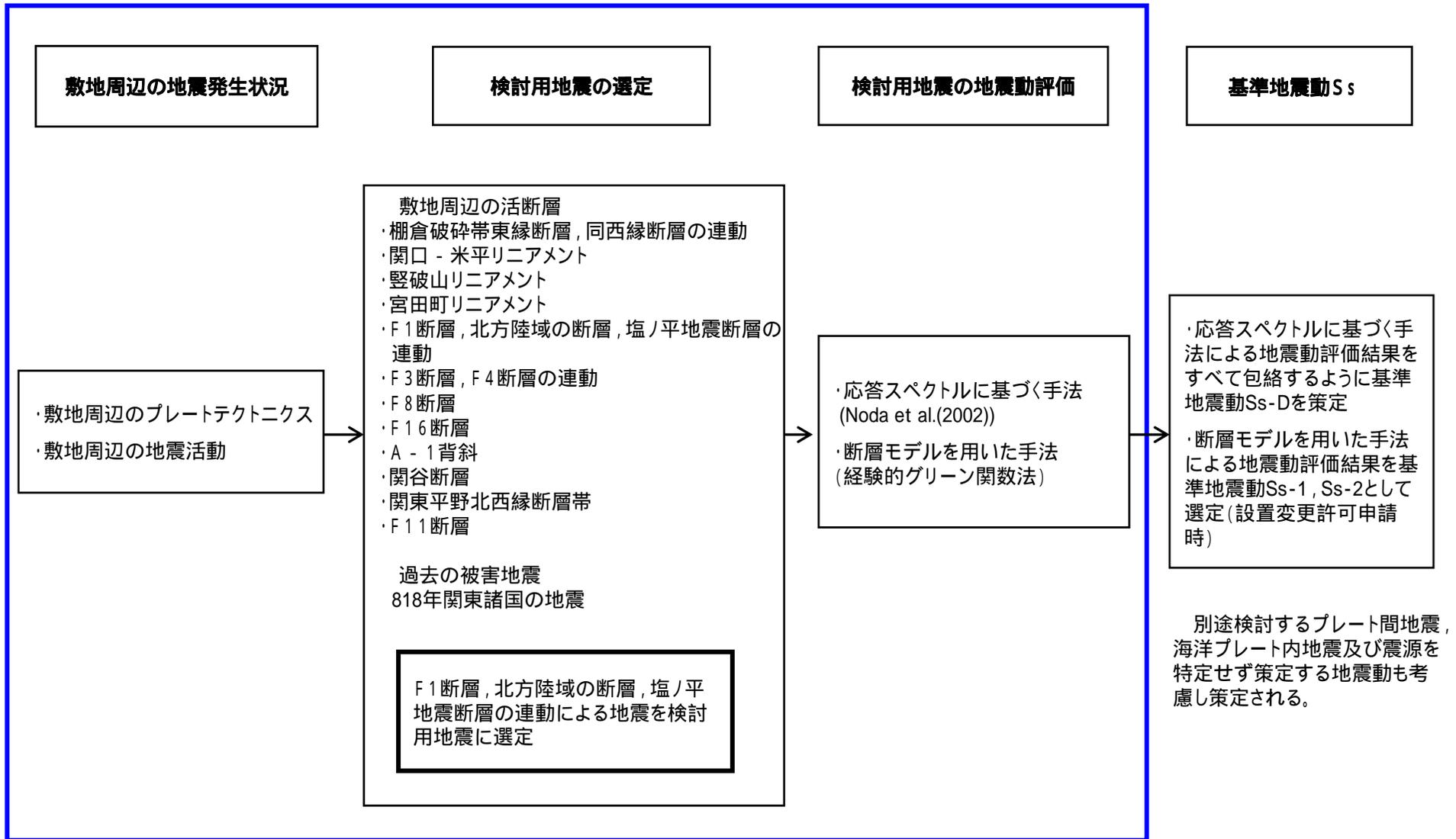
# 目 次

---

1. 評価フロー	5
2. 敷地周辺の活断層分布	6
3. 敷地周辺の地震発生状況	8
4. 検討用地震の選定	15
4.1 地震発生層の設定	16
4.2 検討用地震の選定	30
5. 震源モデルの設定	45
5.1 地質調査結果の概要	46
5.2 基本震源モデルの設定	47
5.3 不確かさを考慮した震源モデルの設定	79
6. 地震動評価	87
6.1 地震動評価手法	88
6.2 応答スペクトル手法による評価結果	89
6.3 断層モデル手法による評価結果	90
7. 参考文献	104
参考資料	
1 補正係数の算出に用いた地震リスト	105
2 基本震源モデル設定における保守性の考え方	110
3 統計的グリーン関数法による評価	112

# 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

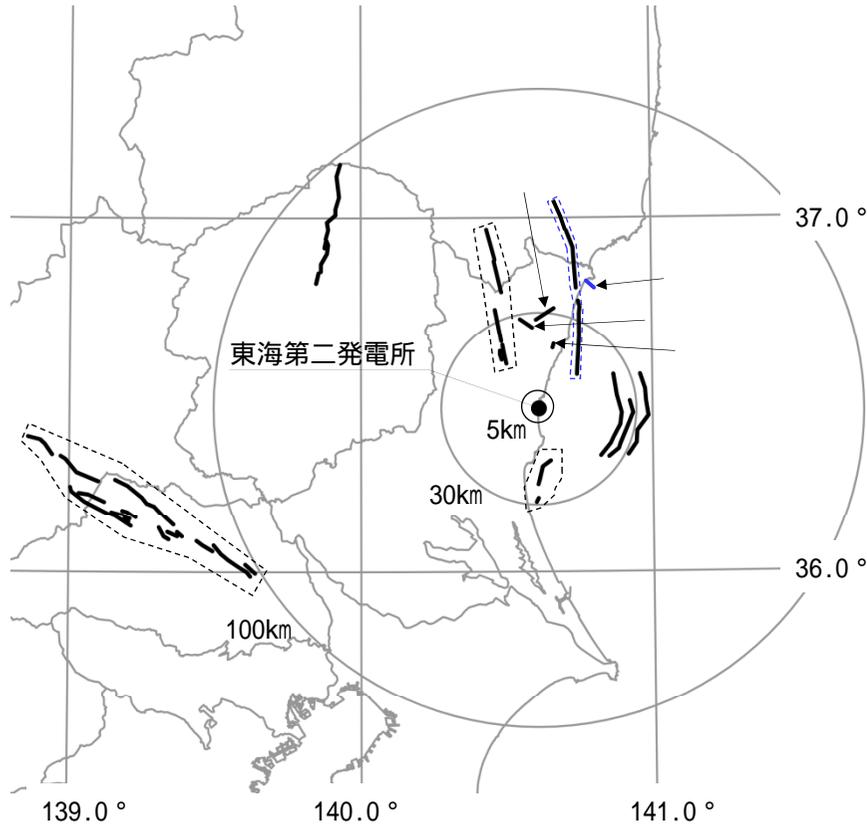


---

1. 評価フロー	5
2. 敷地周辺の活断層分布	6
3. 敷地周辺の地震発生状況	8
4. 検討用地震の選定	15
4.1 地震発生層の設定	16
4.2 検討用地震の選定	30
5. 震源モデルの設定	45
5.1 地質調査結果の概要	46
5.2 基本震源モデルの設定	47
5.3 不確かさを考慮した震源モデルの設定	79
6. 地震動評価	87
6.1 地震動評価手法	88
6.2 応答スペクトル手法による評価結果	89
6.3 断層モデル手法による評価結果	90
7. 参考文献	104
参考資料	
1 補正係数の算出に用いた地震リスト	105
2 基本震源モデル設定における保守性の考え方	110
3 統計的グリーン関数法による評価	112

## 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>
棚倉破碎帯東縁断層, 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>
豎破山リニアメント	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, 塩ノ平地震断層の連動	58	7.8
F3断層, F4断層の連動	16	6.8
F8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>

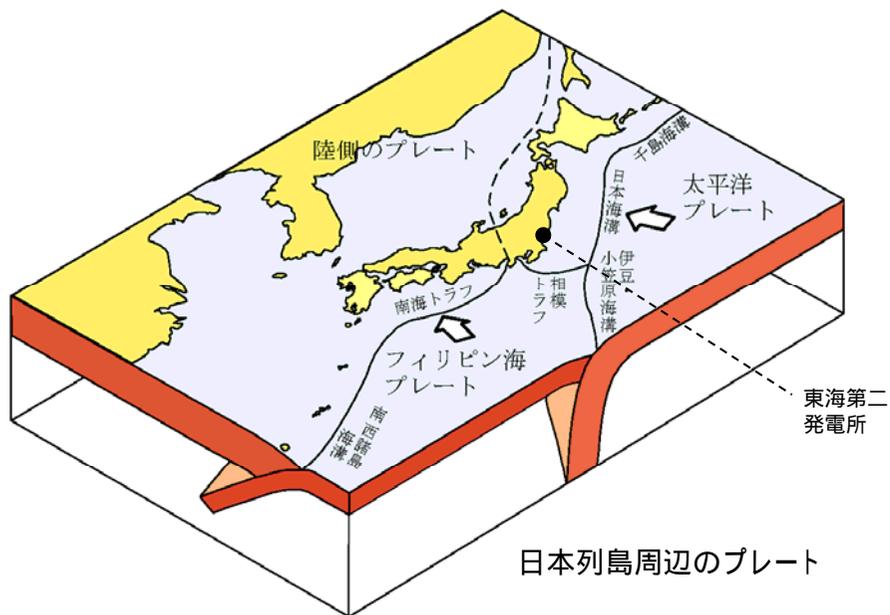
- 地震規模は松田(1975)により算定
- 長さの短い断層については地震規模をM6.8として評価

凡 例	
: 連動を考慮する断層	: 震源として考慮する活断層
: 連動を考慮する断層 (申請時 (H26.5.20) の評価から見直したもの)	: 震源として考慮する活断層 (申請時 (H26.5.20) の評価から見直したもの)

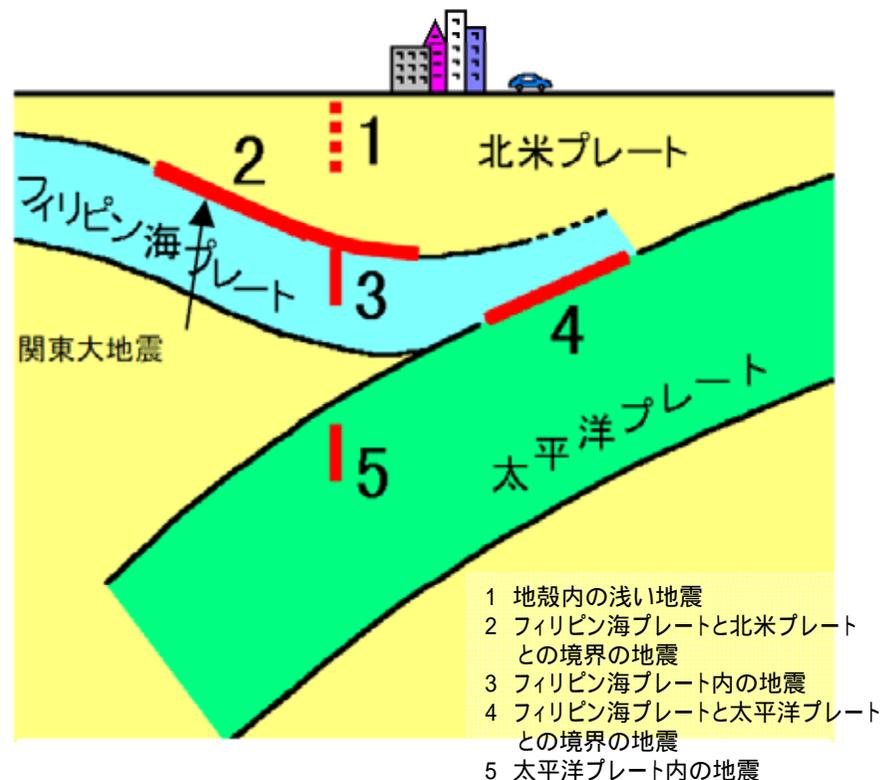
- 敷地周辺の地質・地質構造に関する調査の結果, 上記の断層を震源として考慮する活断層として評価する。
- 敷地近傍(敷地を中心とする半径約5kmの範囲)において, 震源として考慮する活断層は認められない。

1. 評価フロー	5
2. 敷地周辺の活断層分布	6
<b>3. 敷地周辺の地震発生状況</b>	<b>8</b>
4. 検討用地震の選定	15
4.1 地震発生層の設定	16
4.2 検討用地震の選定	30
5. 震源モデルの設定	45
5.1 地質調査結果の概要	46
5.2 基本震源モデルの設定	47
5.3 不確かさを考慮した震源モデルの設定	79
6. 地震動評価	87
6.1 地震動評価手法	88
6.2 応答スペクトル手法による評価結果	89
6.3 断層モデル手法による評価結果	90
7. 参考文献	104
参考資料	
1 補正係数の算出に用いた地震リスト	105
2 基本震源モデル設定における保守性の考え方	110
3 統計的グリーン関数法による評価	112

# 敷地周辺のプレートテクトニクス



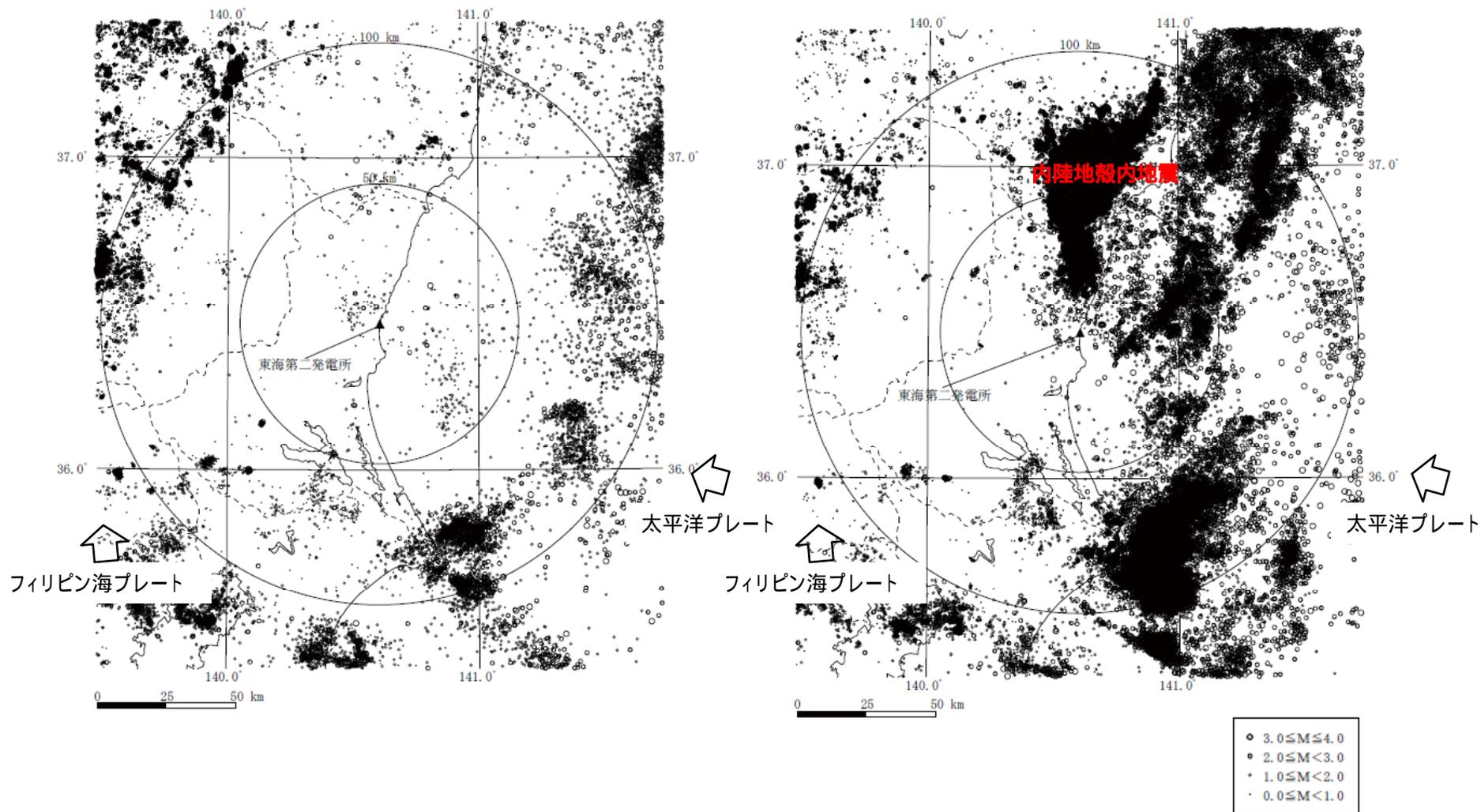
日本のプレートテクトニクスモデル概念図  
(防災科学技術研究所)



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)

- 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。

# 敷地周辺の地震活動(M4.0以下, 深さ30km以浅, 震央分布)

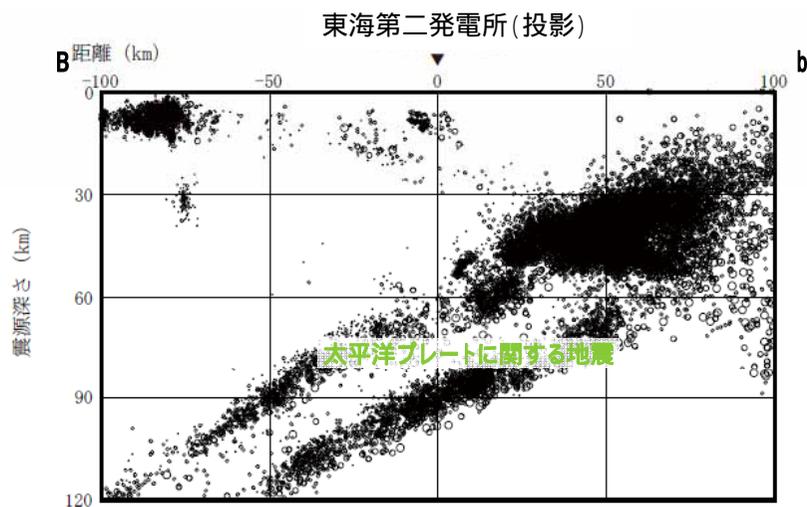


(気象庁, 1997年10月 ~ 2011年2月)

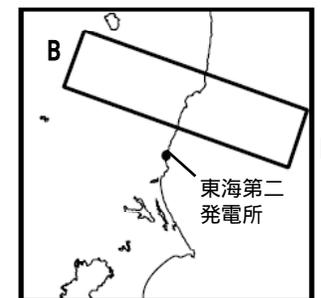
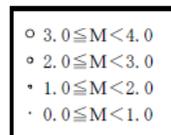
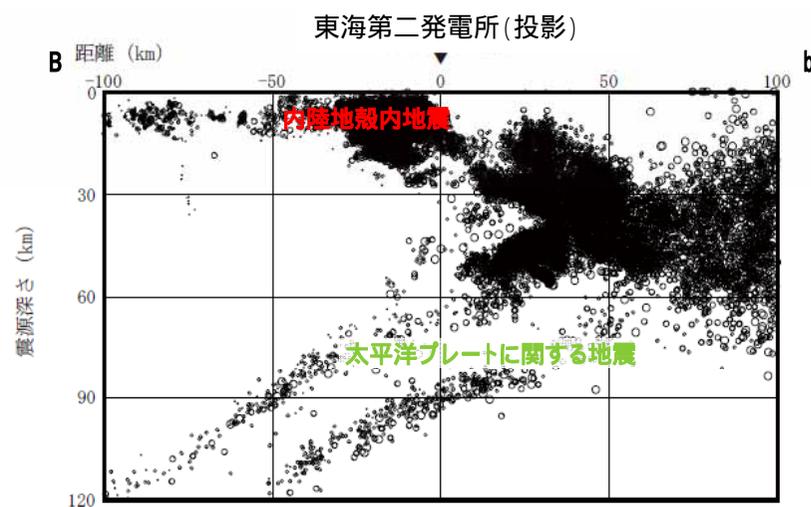
(気象庁, 2011年3月 ~ 2015年7月)

2011年3月以降は、福島県と茨城県の県境付近で内陸地殻内地震が集中して発生している。

# 敷地周辺の地震活動(M4.0以下, 敷地北方, 震源鉛直分布)



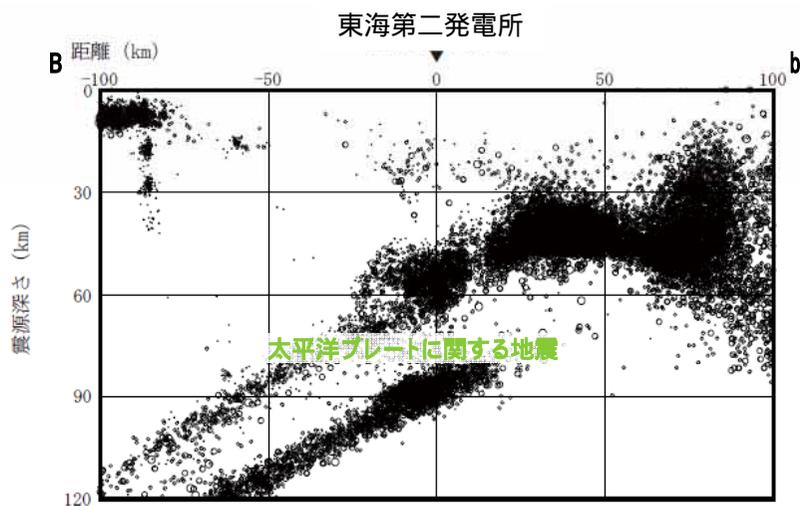
(気象庁, 1997年10月～2011年2月)



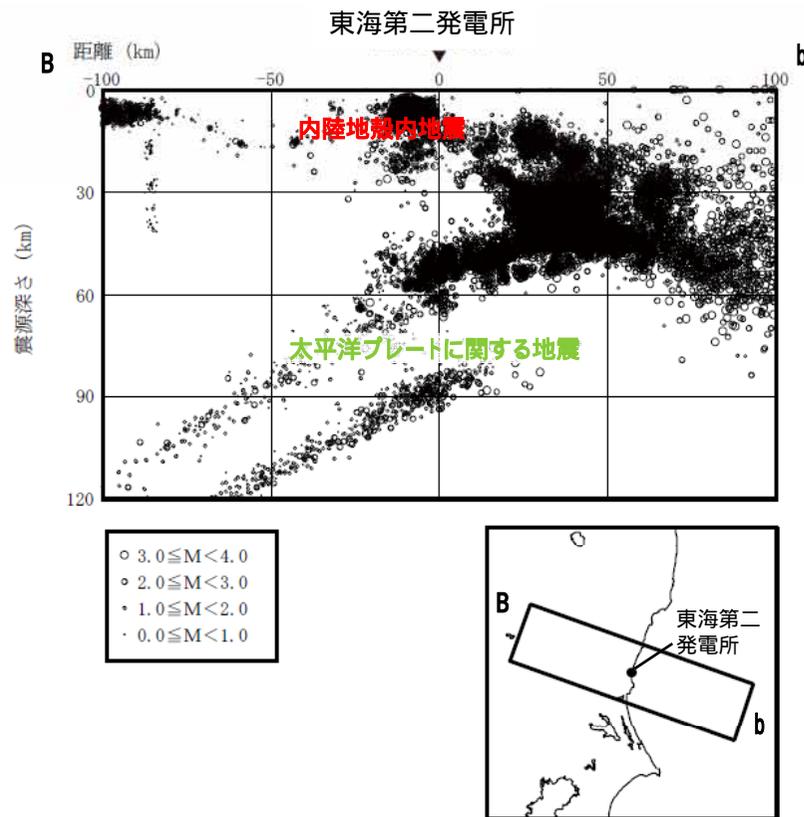
(気象庁, 2011年3月～2015年7月)

- 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。

# 敷地周辺の地震活動(M4.0以下, 敷地周辺, 震源鉛直分布)



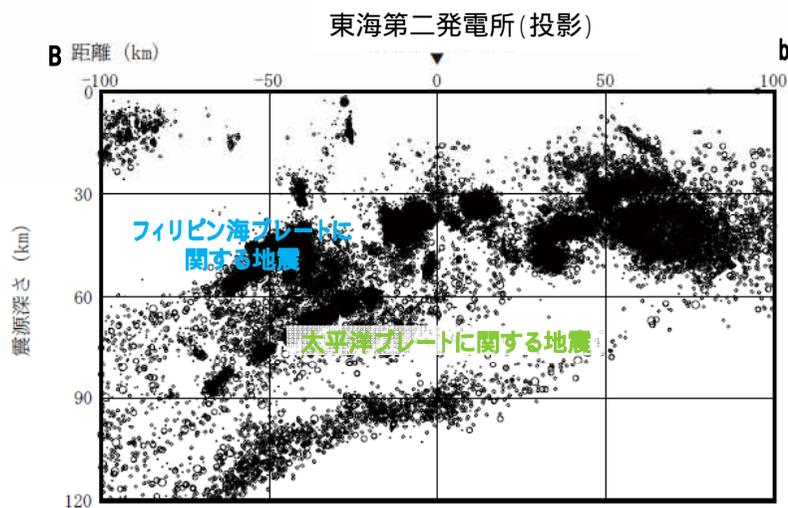
(気象庁, 1997年10月～2011年2月)



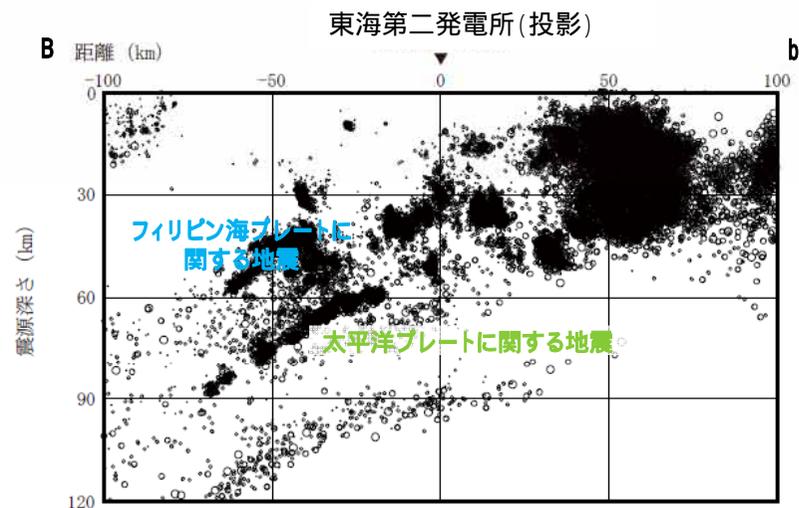
(気象庁, 2011年3月～2015年7月)

- 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。

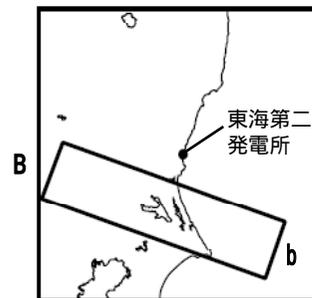
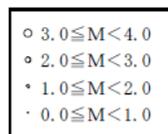
# 敷地周辺の地震活動(M4.0以下, 敷地南方, 震源鉛直分布)



(気象庁, 1997年10月～2011年2月)

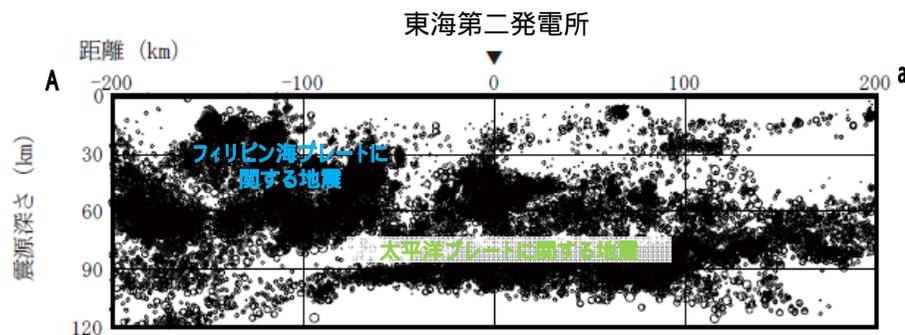


(気象庁, 2011年3月～2015年7月)

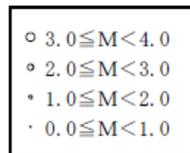
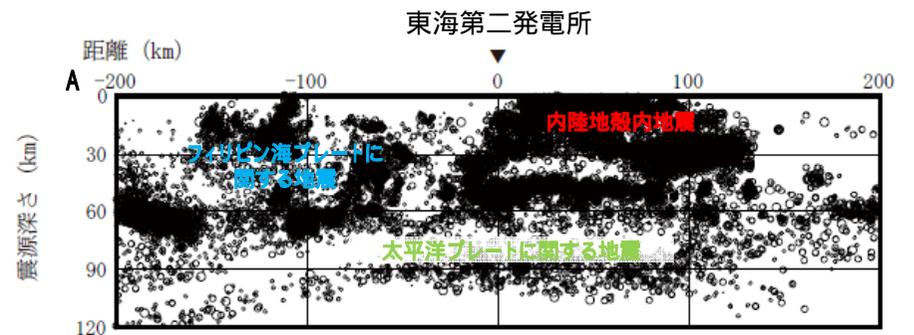


- 深さ40km程度以深では, フィリピン海プレートに関する地震が見られる。
- 深さ80km程度以深では, 太平洋プレートの二重深発地震面が見られる。
- 2011年3月以降, 地震発生頻度は増加したものの, 地震の発生する位置に大きな変化はない。

# 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)



(気象庁, 1997年10月～2011年2月)



(気象庁, 2011年3月～2015年7月)

- 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	5
2. 敷地周辺の活断層分布	6
3. 敷地周辺の地震発生状況	8
4. 検討用地震の選定	15
4.1 地震発生層の設定	16
4.2 検討用地震の選定	30
5. 震源モデルの設定	45
5.1 地質調査結果の概要	46
5.2 基本震源モデルの設定	47
5.3 不確かさを考慮した震源モデルの設定	79
6. 地震動評価	87
6.1 地震動評価手法	88
6.2 応答スペクトル手法による評価結果	89
6.3 断層モデル手法による評価結果	90
7. 参考文献	104
参考資料	
1 補正係数の算出に用いた地震リスト	105
2 基本震源モデル設定における保守性の考え方	110
3 統計的グリーン関数法による評価	112

## 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

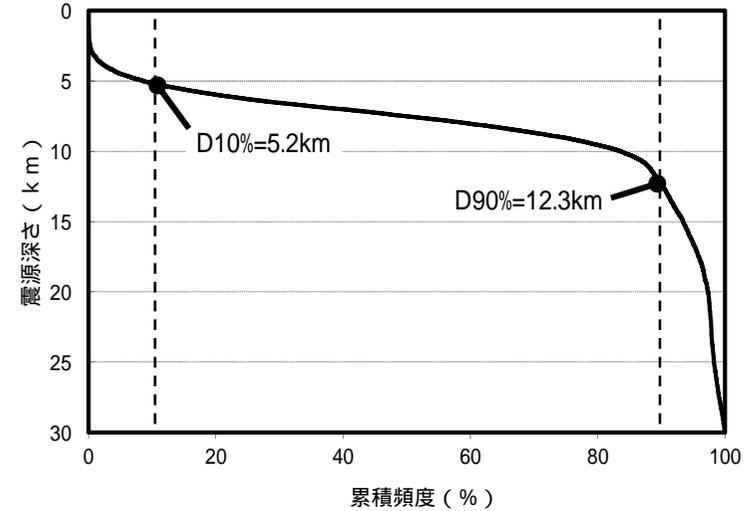
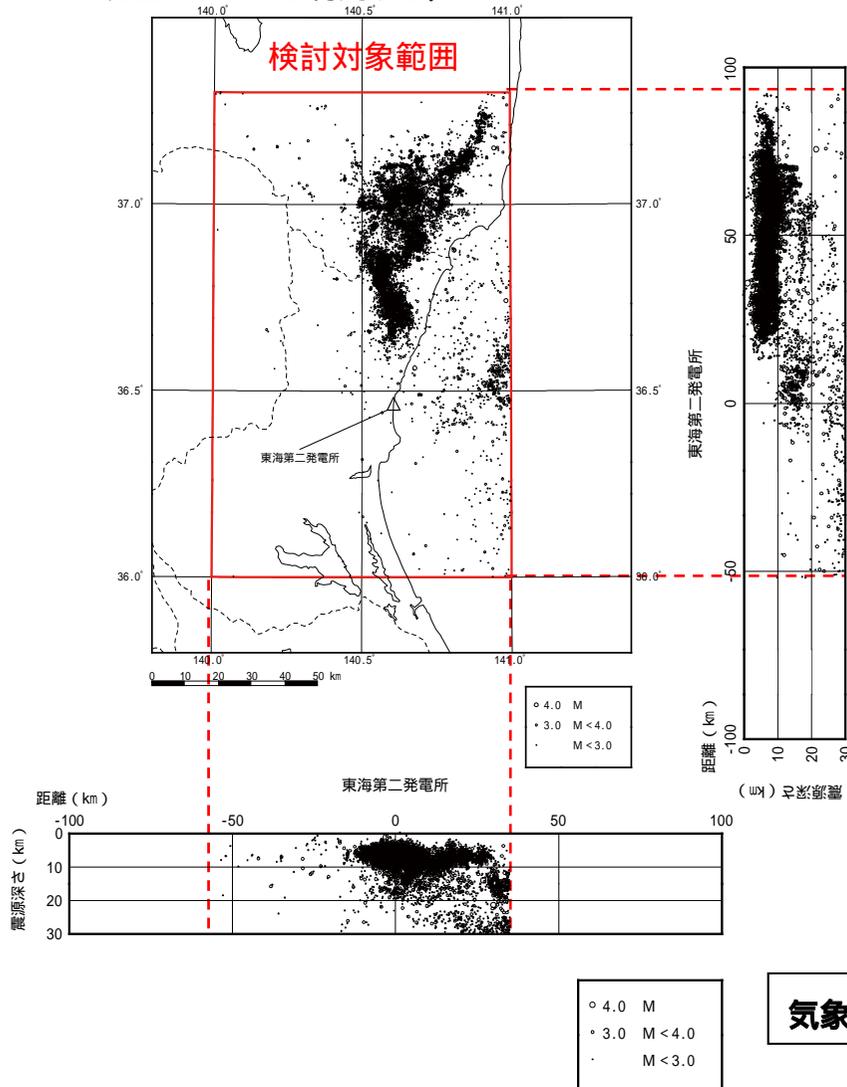
キュリー点深度

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

# 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。



累積頻度と震源深さの関係

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)
2.0 M < 2.5	0.0	5.2	7.5	11.4	30.0	8539	6.2
2.5 M < 3.0	1.0	5.2	7.5	13.1	29.9	3500	8.0
3.0 M < 3.5	2.1	5.2	7.7	13.7	29.9	1374	8.5
3.5 M < 4.0	1.8	5.1	8.3	15.2	29.7	571	10.1
4.0 M <	1.3	4.9	8.1	15.5	21.6	42	10.6
全データ	0.0	5.2	7.5	12.3	30.0	14026	7.2

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)

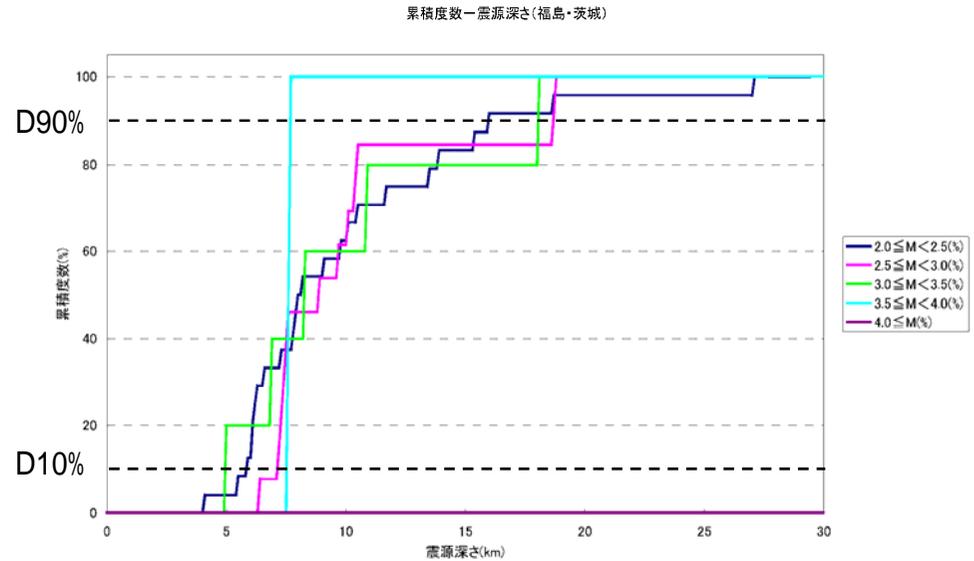
# 微小地震分布：D10% , D90%の深さ(文献)

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)



15地震域の区分

「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)	震源域 上端深さ 最浅値 (飯田式)
福島 茨城	2.0 ≤ M < 2.5	4.1	5.9	8.0	16.0	27.1	24	10.1	3.4
	2.5 ≤ M < 3.0	6.3	7.2	8.9	18.7	18.7	13	11.5	5.4
	3.0 ≤ M < 3.5	4.9	5.0	8.3	18.1	18.1	5	13.1	3.5
	3.5 ≤ M < 4.0	7.6	7.6	7.6	7.7	7.6	2	0.1	5.0
	4.0 ≤ 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

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：深部構造探查結果に基づく知見

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查結果に基づき、速度構造モデルを推定している。

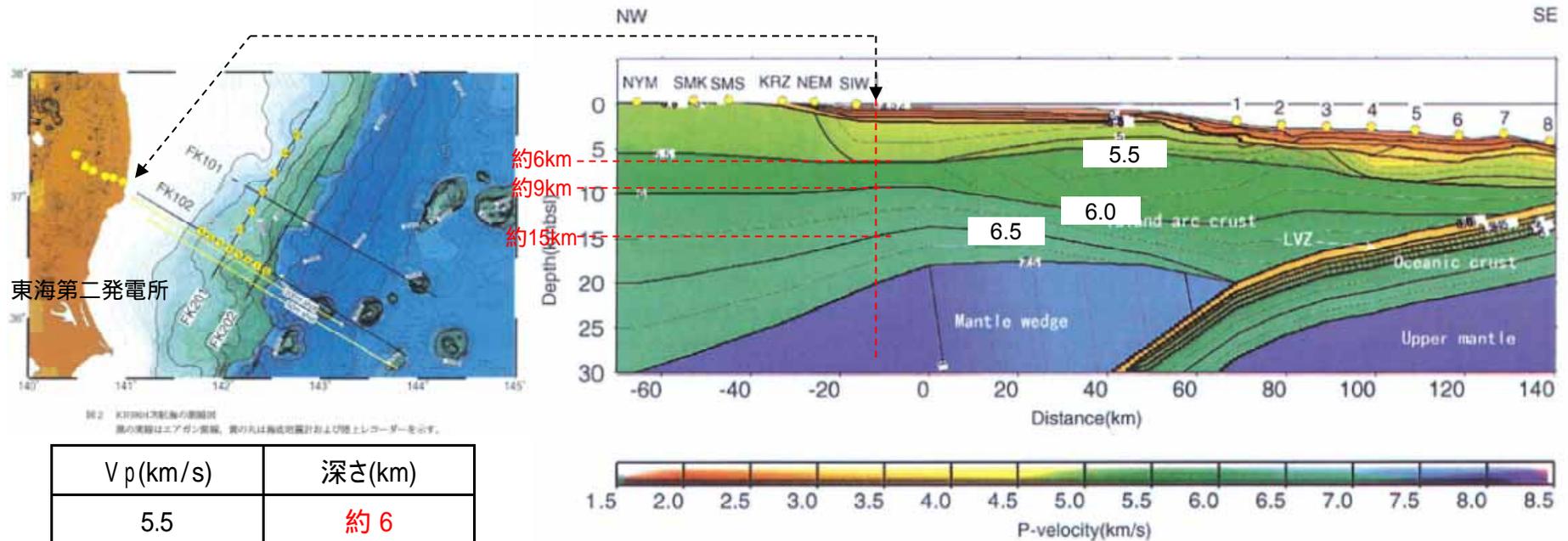


図10 2次元波線追跡法によるFK102の速度構造モデル

縦軸は海面からの深さ(km)、横軸はエアガン発振点の北西端からの距離(km)、P波速度を図下の色見本および等速度線(0.1km/s間隔)で表す。海岸線が矢印付近(-12km)、海溝軸は図の右外(180km)となる。

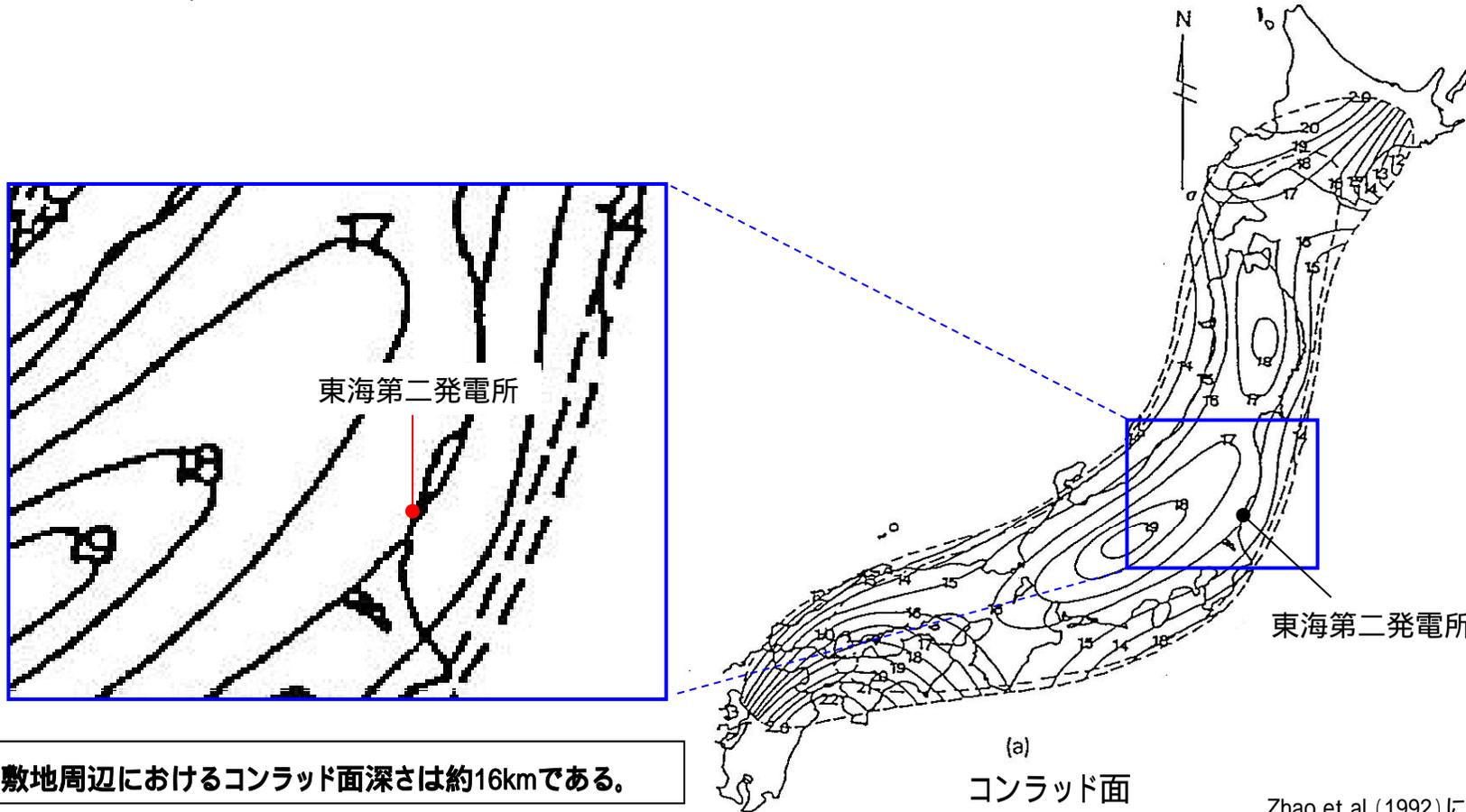
三浦ほか(2000)に一部加筆

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)。

# 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。



敷地周辺におけるコンラッド面深さは約16kmである。

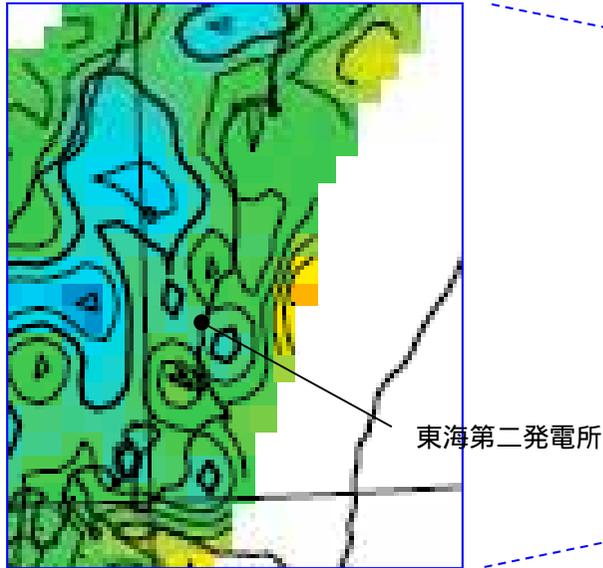
Zhao et al.(1992)に一部加筆

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

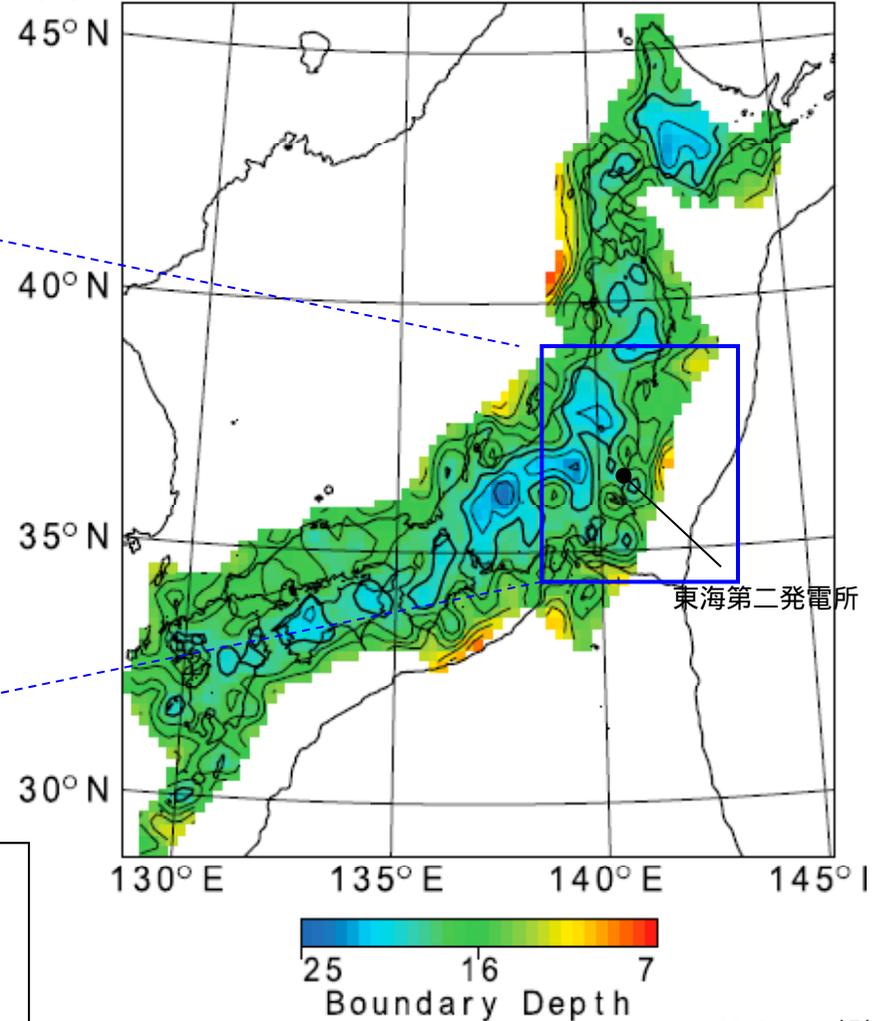
# コンラッド面深さ(2 / 2)

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ド面の深さを求めている。



(a) Conrad



- 敷地周辺におけるコンラッド面の深さは18~20km程度である。
- 敷地よりも北方(福島県と茨城県の県境付近)ではコンラッド面深さが浅くなる傾向が見られる。

Katsumata(2010)に一部加筆

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

# キュリー点深度

Tanaka and Ishikawa(2005)によると, D90%深度とキュリー点深度に相当するZb(磁化層下限値)の間には相関があるとしている。(Fig.8)

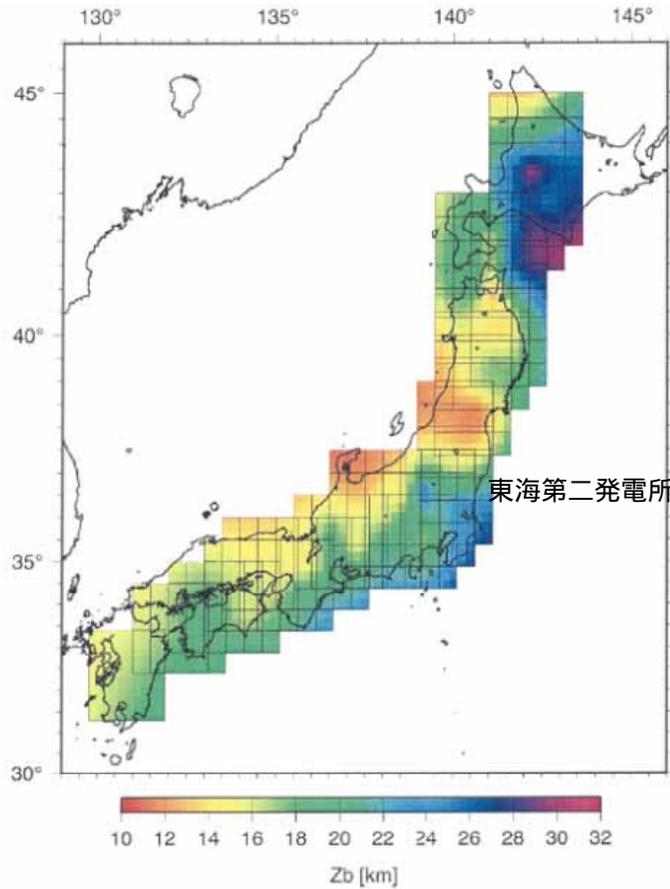


Fig. 6. Map of the basal depth of magnetic sources,  $Z_b$ . Each square represents the area used to calculate  $Z_b$ .

Tanaka and Ishikawa(2005)に一部加筆

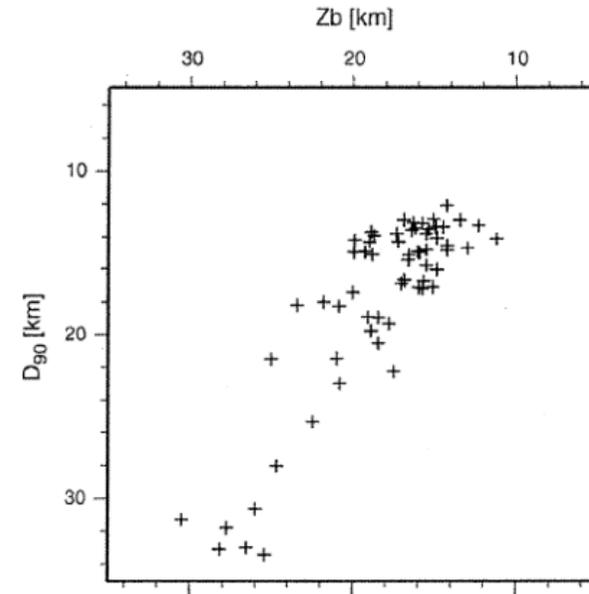


Fig. 8. Plot of the depth to the basal depth of magnetic sources ( $Z_b$ ) against the seismicogenic layer thickness ( $D_{90}$ ) beneath the Japanese islands.

Tanaka and Ishikawa(2005)より抜粋

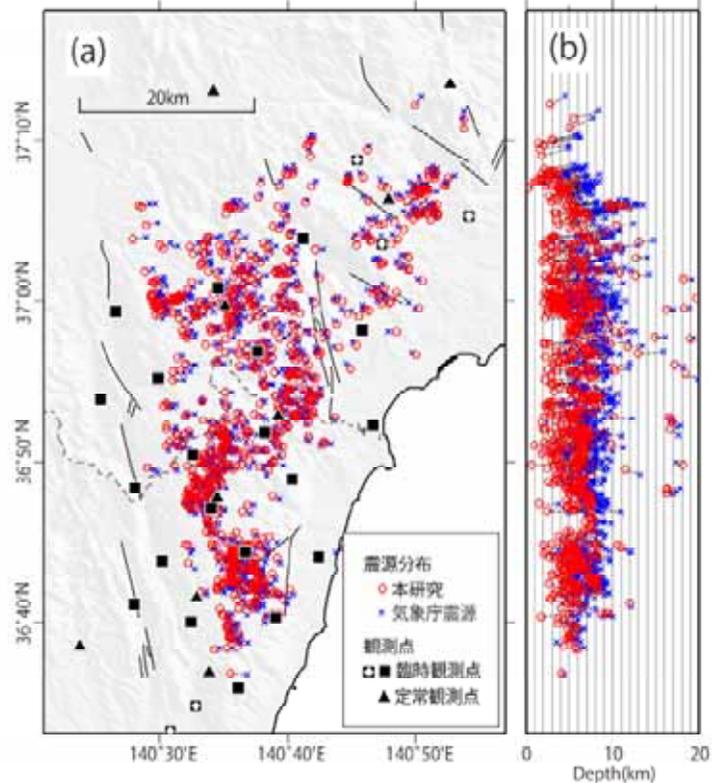
- 敷地周辺のZbは20~22km程度であり, D90%の深度とZbの関係と照らすと, D90%深度は17~23km程度となる。
- 敷地よりも北方(福島県と茨城県の県境付近)ではZbは浅くなる傾向が見られる。

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

# 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

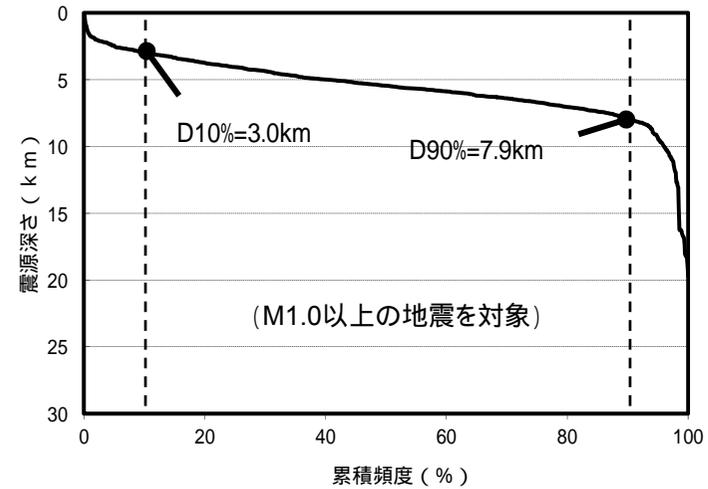
青柳・上田(2012)では、阿武隈南部を対象に東北地方太平洋沖地震後の臨時稠密余震観測(2011年5月17日~7月29日)を行い、Double Difference トモグラフィ解析により震源再決定を行っている。



青柳・上田(2012)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

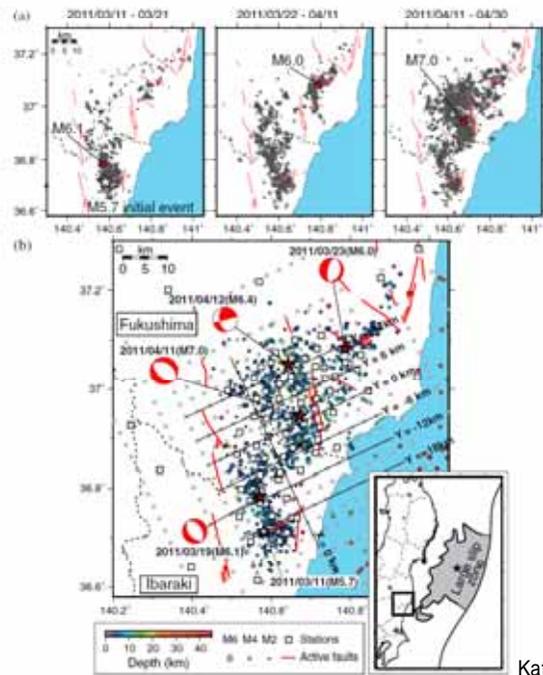
M区分	最浅 (km)	D10% (km)	D50% (km)	D90% (km)	最深 (km)	データ数	D10%-D90% (km)
M < 2.0	0.2	2.7	5.1	7.3	18.1	326	4.6
2.0 M < 2.5	1.2	3.1	5.5	8.0	18.4	391	4.9
2.5 M < 3.0	0.9	3.5	5.7	8.4	19.7	176	4.9
3.0 M < 3.5	1.8	3.5	6.0	8.3	18.2	65	4.8
3.5 M < 4.0	2.8	3.9	5.8	11.1	12.0	15	7.2
4.0 M <	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8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

# 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

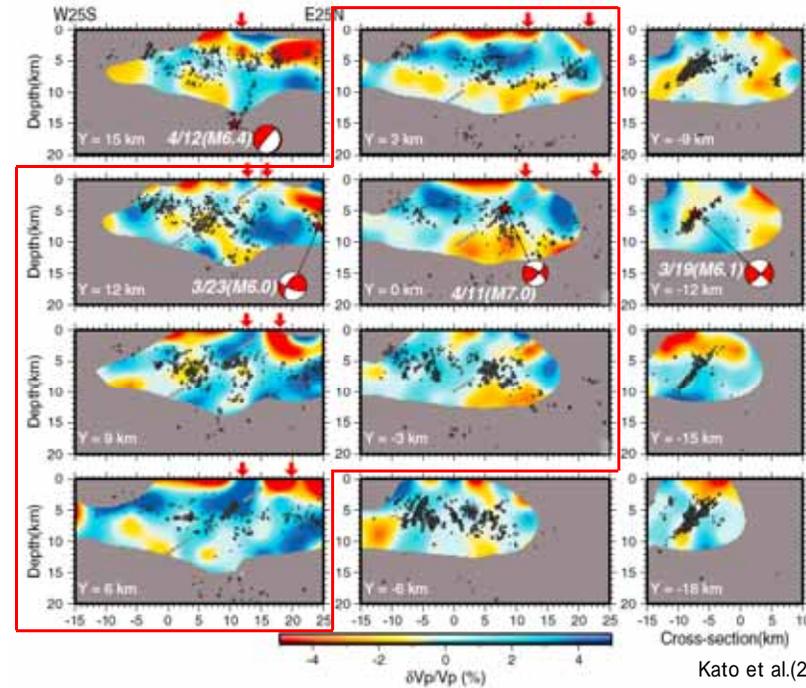
Kato et al.(2013)について



Kato et al.(2013)より抜粋

**Figure 1.** (a) Spatiotemporal evolution of induced seismicity in the northern part of Ibaraki Prefecture and the southern part of Fukushima Prefecture. The earthquakes plotted are listed in the JMA catalog and occurred at depths shallower than 10 km, with  $M \geq 1.0$ . (b) Map of seismic stations and earthquakes used in the tomography analysis, with earthquakes shown as circles with radii scaled to earthquake 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 temporary offline (64 closely spaced squares) and permanent online seismic stations. The moment tensors (in red and white) of large events ( $M \geq 6.0$ ) were determined by NIED. The red lines delineate the surface traces of major active faults. Inset map shows the location of the study area with respect to prefectures in Japan and the large-slip zone of the 2011 Tohoku-Oki mainshock, from Kato and Igarashi [2012].

赤枠は西傾斜の面状に微小地震が発生している断面



Kato et al.(2013)に一部加筆

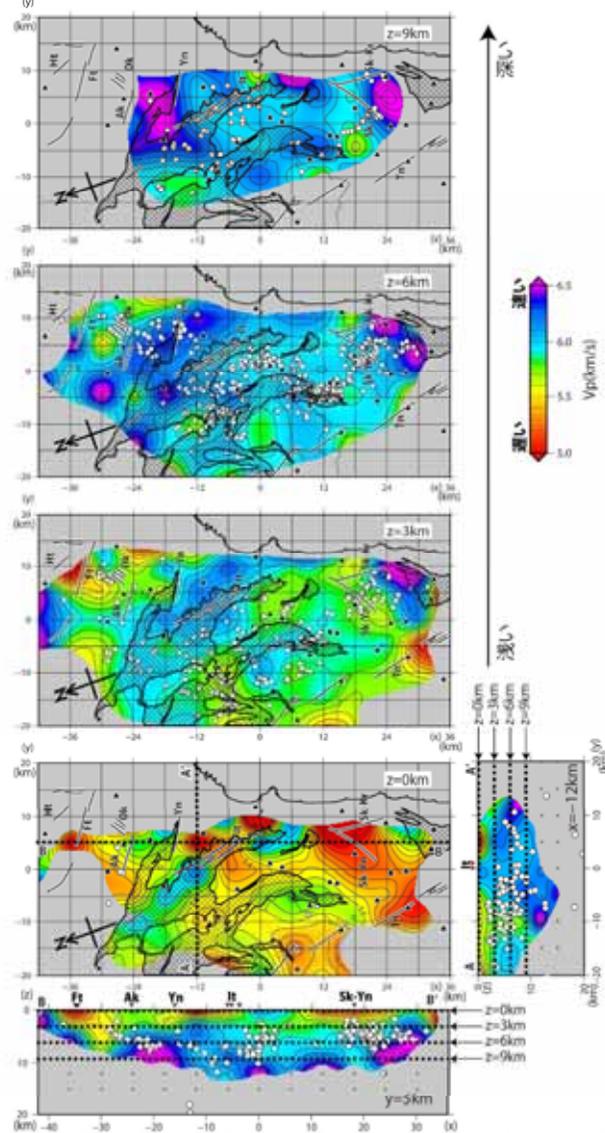
**Figure 2.** Vertical depth sections of  $V_p$  velocity perturbations and nearby earthquakes. The cross-sections are constructed along lines drawn from W25S to E25N (see Figure 1b). Relocated earthquakes (superimposed gray circles) correspond to those distributed within  $\pm 1.5$  km laterally of each vertical cross-section. The masked areas marked by gray color on these vertical depth sections correspond to regions 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 tensor 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  $Y=-3$ km断面から北方の $Y=12$ km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、 $Y=12$ km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 Yamada(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

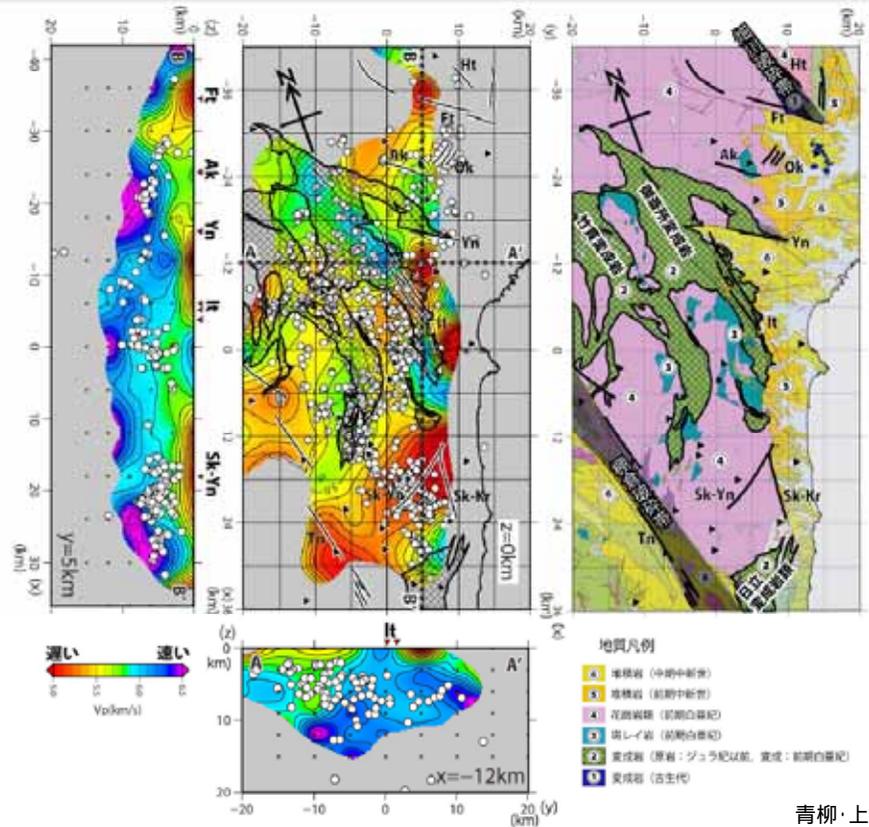
# 2011年福島県浜通りの地震に関する知見：トモグラフィ解析による速度構造

青柳・上田(2012)による阿武隈南部でのトモグラフィ解析



青柳・上田(2012)より抜粋

トモグラフィ解析結果(深度方向のスライス断面)



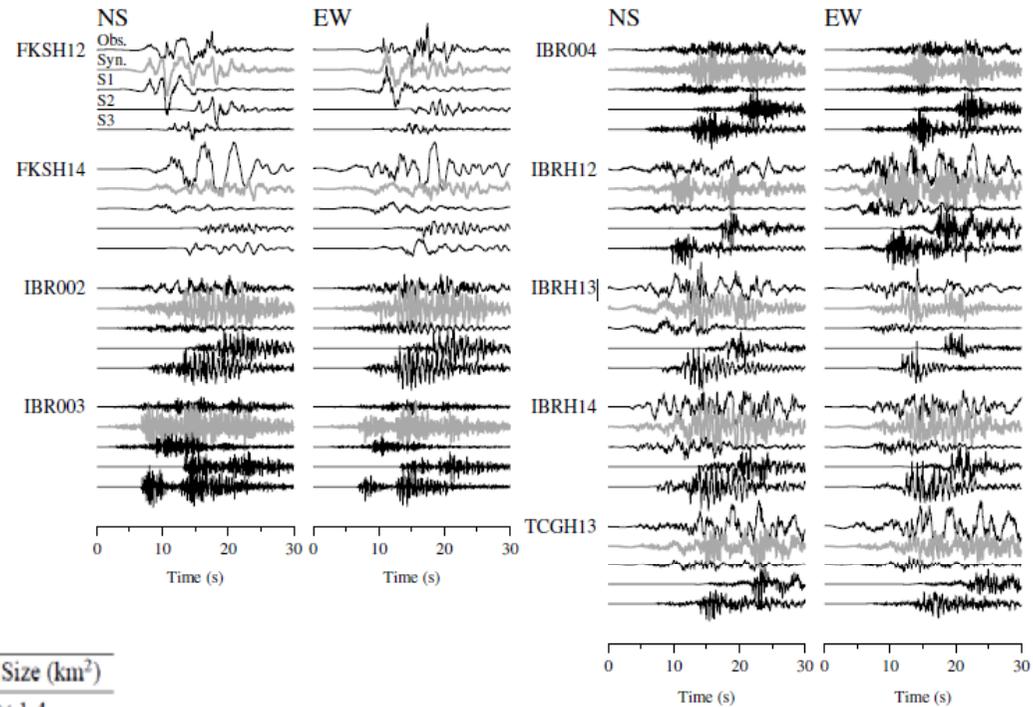
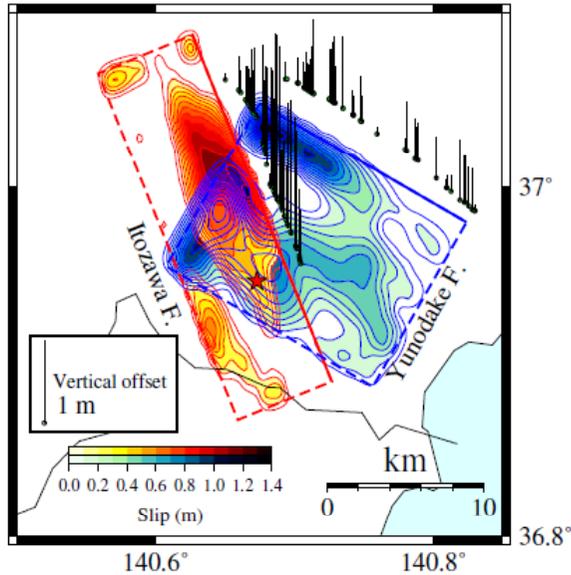
青柳・上田(2012)より抜粋

トモグラフィ解析結果(断面)及び地質との対応

- 阿武隈南部でのDouble Difference トモグラフィ解析結果により, 青柳・上田(2012)では, 「地震の大半はP波速度が5.8km/s~6.1km/sの範囲で生じている。これは近畿地方で見出されている地震発生層のP波速度5.8km/s~6.4km/s(廣瀬・伊藤, 2006)と比較しても, 標準的」とされている。
- 深さ0kmでは速度構造と活断層との間には対応は見られず, 地震はほとんど発生していないとされている。
- 一方, 深さ3km~深さ6kmではVp6km/s程度の層が分布し, その速度領域で地震が多く発生しているとされている。

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



Fault	Strike Angle	Dip Angle	Length (km)	Width (km)	Sub-fault Size (km <sup>2</sup> )
井戸沢断層	158°	65°	23.8	15.4	1.4 × 1.4
湯ノ岳断層	120°	50°	15.3	18.7	1.7 × 1.7

芝・野口 (2012) のモデルによる合成波形と観測波形の比較

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 〕

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

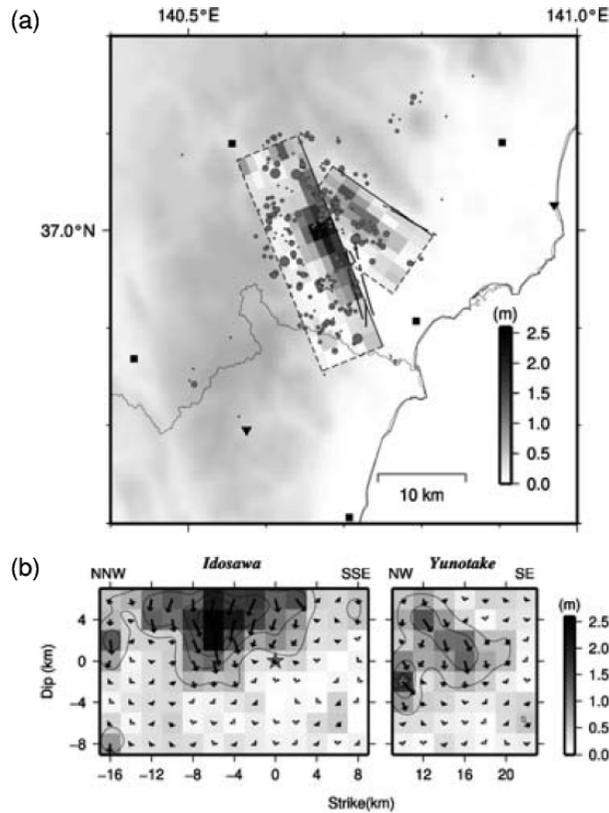


Table 1. Coordinates and geometries of the assumed fault planes of the Fukushima Hamadori earthquake.

	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

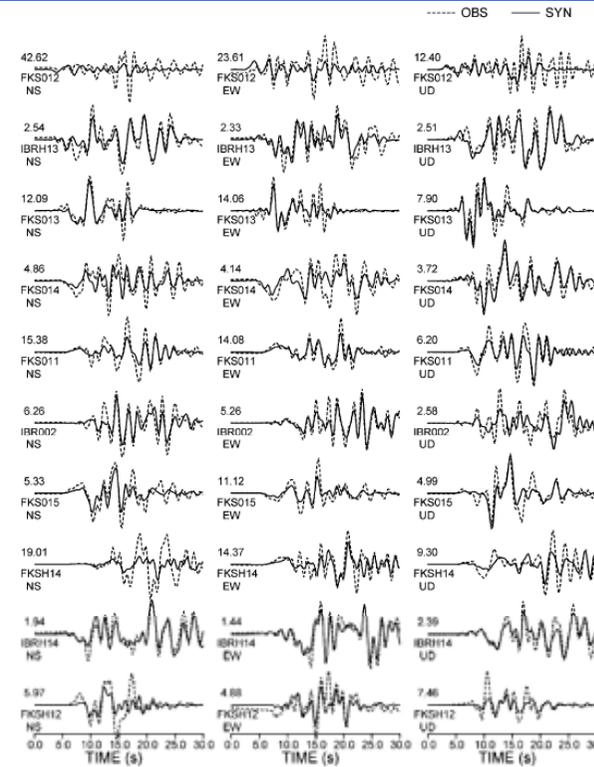


Fig. 8. Comparison between the observed velocity seismograms (dashed traces) and synthesized waveforms (solid traces). The peak velocity for each trace is indicated in units of cm/s above the station code.

引間(2012)より抜粋

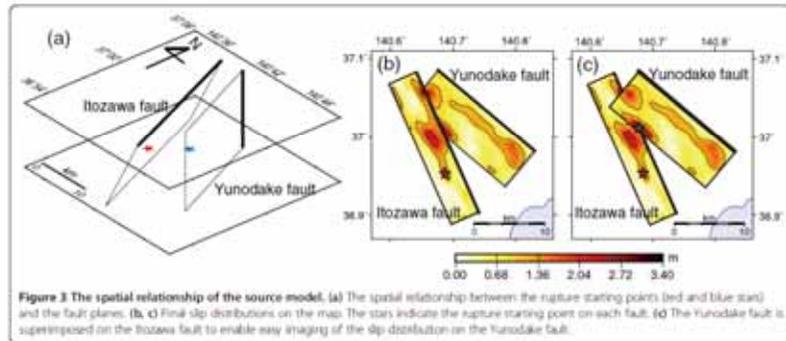
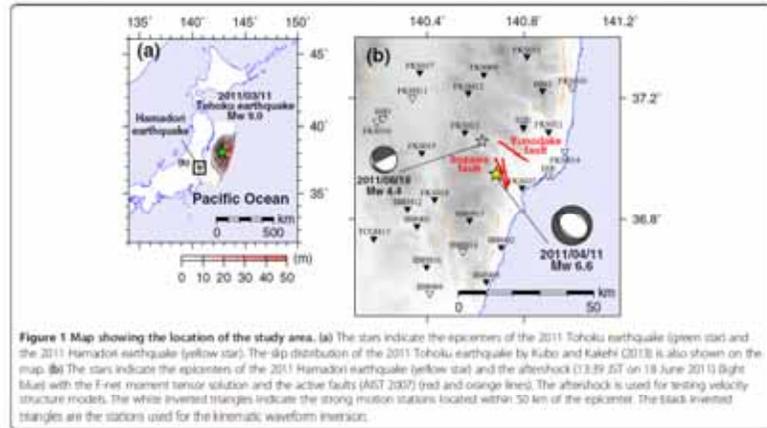
引間(2012)のモデルによる合成波形と観測波形の比較

- 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。

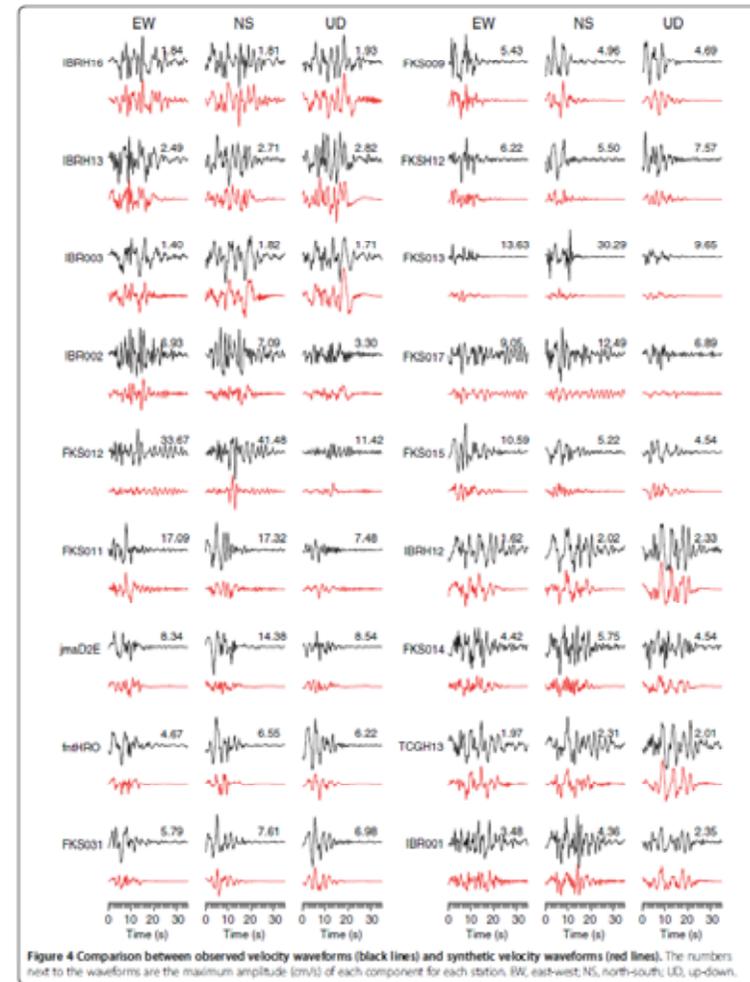
[引間和人(2012):2011年4月11日福島県浜通りの地震(Mj7.0)の震源過程 - 強震波形と再決定震源による2枚の断層面の推定 - ,地震,第2輯,第64巻(2012)243-256頁 ]

# 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



Tanaka et al. (2014) によるモデル



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)
<b>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</b>			
微小地震分布による検討	広域のD10%, D90%(気象庁カタログ)	5.2	12.3
	「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
コンラッド面	Zhao et al.(1992)	-	(約16)
	Katsumata(2010)	-	(約18~20)
キュリー点深度	Tanaka and Ishikawa (2005)	-	(約17~23)
<b>断層上端及び下端の設定値</b>		5	18
<b>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)</b>			
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
	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	青柳・上田(2012)によるトモグラフィ解析	3	-
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)
<b>断層上端及び下端の設定値</b>		3	18 (深さ15kmと考えられるが地震動評価上は深さ18kmとする。)

( )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。

---

## 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

# 検討用地震の選定のフロー

## 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

棚倉破碎帯東縁断層, 同西縁断層の連動による地震  
 関口 - 米平リニアメントによる地震  
 豎破山リニアメントによる地震  
 宮田町リニアメントによる地震  
 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  
 F3断層, F4断層の連動による地震  
 F8断層による地震  
 F16断層による地震  
 A-1背斜による地震  
 関谷断層による地震  
 関東平野北西縁断層帯による地震  
 F11断層による地震

### 過去の被害地震

818年関東諸国の地震

・規模は松田式で評価  
 ・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

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

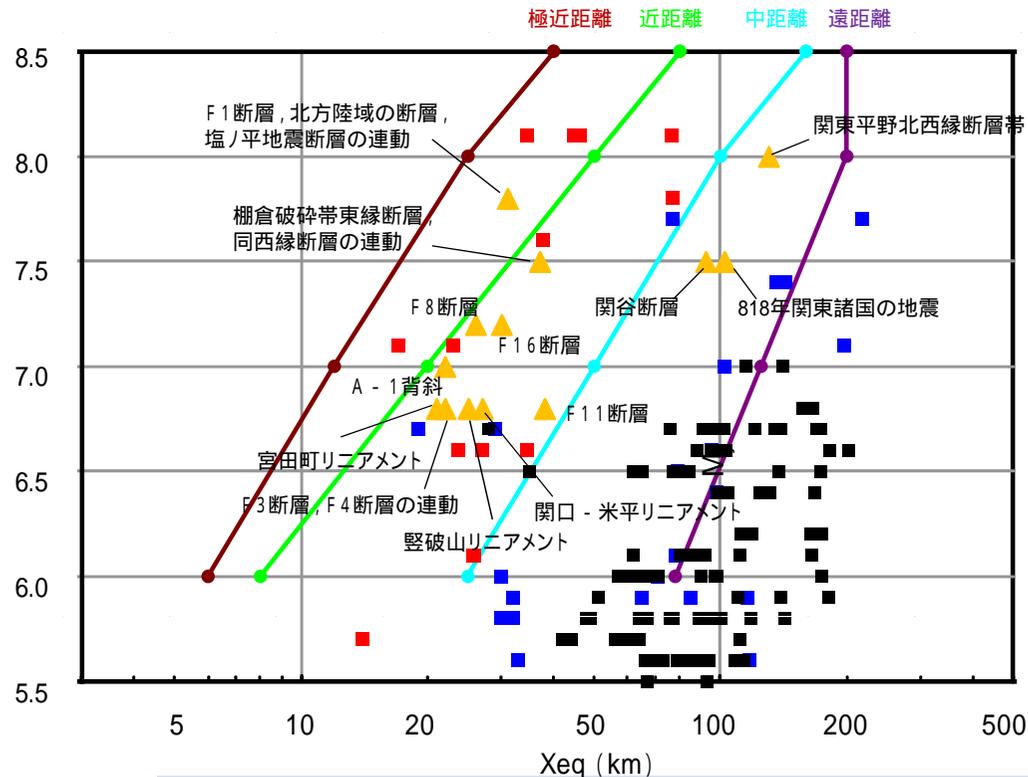
敷地においては, 全周期帯にわたりF1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動による地震が最も影響の大きい評価結果となっていることから, これを検討用地震として選定する。

# 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。

地震名		地震規模 M	等価震源 距離 (km) <sup>2</sup>
活断層による地震	棚倉破砕帯東縁断層, 同西縁断層の連動	7.5	37
	関口 - 米平リニアメント	6.8 <sup>1</sup>	27
	豎破山リニアメント	6.8 <sup>1</sup>	25
	宮田町リニアメント	6.8 <sup>1</sup>	21
	F 1 断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地地震断層の連動	7.8	31
	F 3 断層, F 4 断層の連動 <sup>3</sup>	6.8	22
	F 8 断層	7.2	26
	F 16 断層	7.2	30
	A - 1 背斜	7.0	22
	関谷断層	7.5	92
	関東平野北西縁断層帯	8.0	130
被害地震	818年関東諸国の地震	7.5	102

1 長さの短い断層については、地震規模をM6.8として評価  
 2 活断層による地震の断層傾斜角は60度として評価  
 3 諸元については審議に応じて見直す可能性はあるが、適用範囲内に収まる。



: 帰式の作成に用いた観測記録  
 : 適用性検討に用いた他地点観測記録(海外の地震)  
 : 適用性検討に用いた他地点観測記録(国内観測記録)  
 : 検討用地震の候補

検討用地震の候補については、Noda et al.(2002)の適用範囲内であることを確認した。

検討用地震のマグニチュードと等価震源距離の関係

## 補正係数の算定に用いた地震の選定フロー

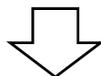
1996年9月以降に東海第二発電所で観測された記録を対象とする。

### 地震の発生位置及び規模

応答スペクトルに基づく手法による地震動評価に際してはNoda et al.(2002)による手法で行うこととする。



Noda et al.(2002)の手法の基となる地震のデータベースを参考に、M5.3以上、震央距離200km以内の地震を対象とする。

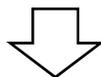


### 地震発生様式

各地震発生様式(内陸地殻内地震, プレート間地震, 海洋プレート内地震)に分類を行い, 内陸地殻内地震を抽出する。



原則として, 地震・火山月報(防災編)に記載されている震源メカニズムに基づいて地震発生様式の分類を行う。ただし, 記載のないものについては震央位置, 震源深さ, 周辺の地震発生状況を踏まえ工学的判断に基づき, 内陸地殻内地震を抽出する。

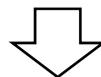


### 内陸地殻内地震の分類

内陸地殻内地震についてずれの種類, 地震発生位置などを考慮した分類を行う。



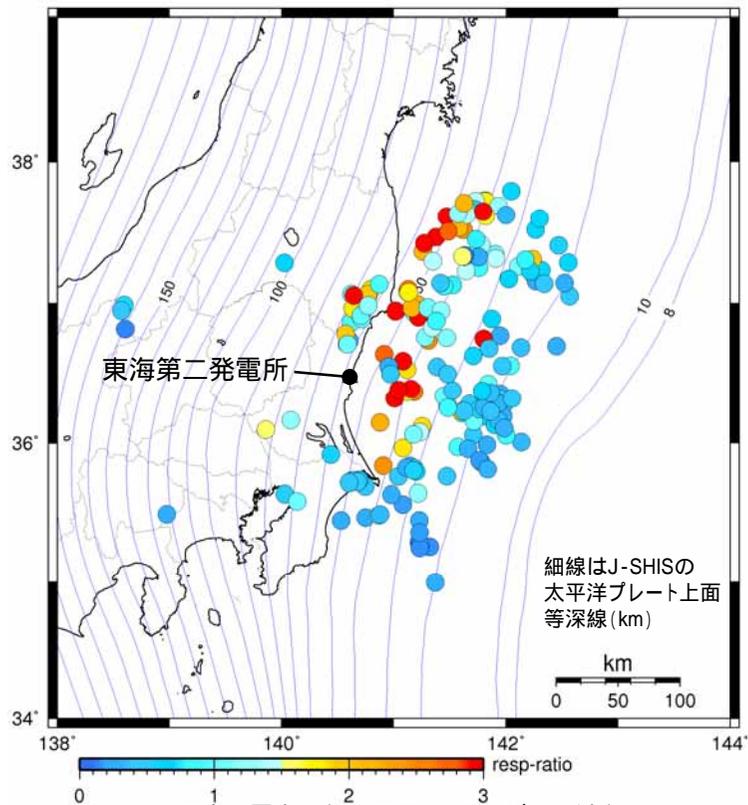
福島県と茨城県の県境付近で発生する内陸地殻内地震については, それを除く地震と比較すると振幅が大きくなる傾向があるため, これについて考慮する。



以上の地震について, 解放基盤波の応答スペクトルをNoda et al.(2002)による手法で除した応答スペクトル比をもとに, 補正係数を算定する。

# 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諸元を参考資料1に示す。



図中の震央の色は図下のカラーバーに対応し、  
応答スペクトル比を示している(周期0.02秒~0.1秒の平均)。

応答スペクトル比の算出に用いた  
M5.3以上の地震の震央分布(すべての地震発生様式)  
(水平成分)

- ・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。

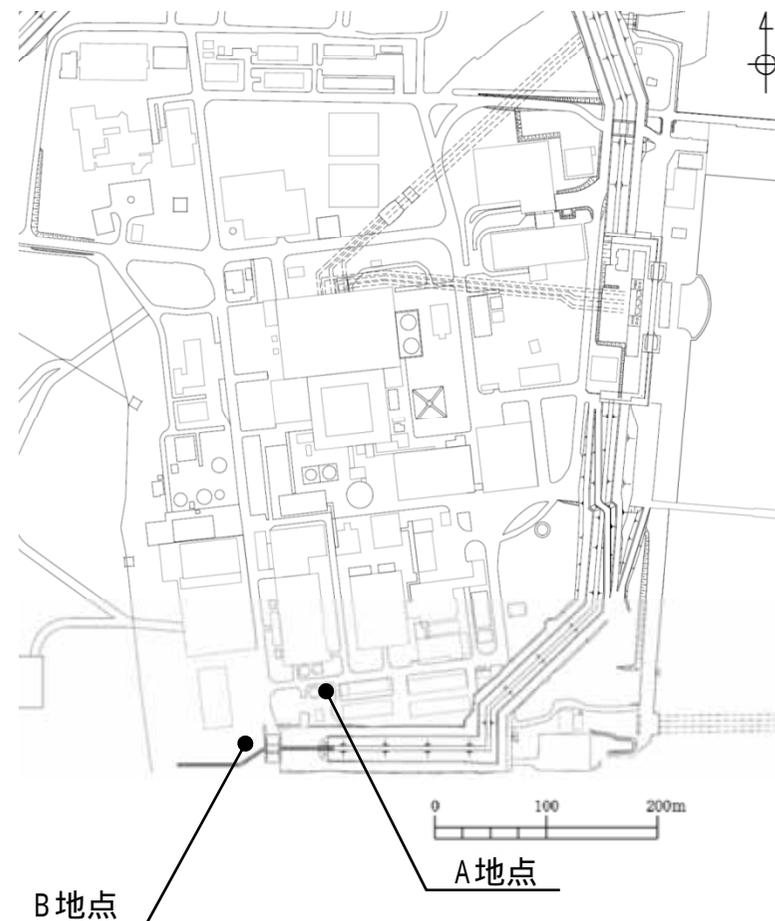
$$\text{応答スペクトル比} = \frac{\text{敷地の観測記録(解放基盤波の応答スペクトル)}}{\text{Noda et al.(2002)による応答スペクトル}}$$

# 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)

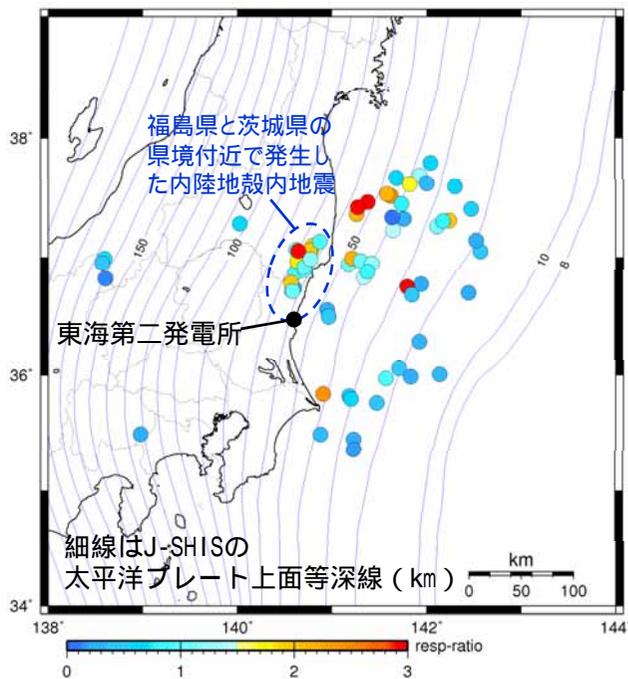
地震計 設置位置	標高	地震観測点位置		
	E.L.	A地点	B地点	地層
地表	+8m (G.L.)			第四系
	-15m			
原子炉建屋 人工岩盤下端相当	-17m			新第三系
	-192m			
解放基盤表面相当 (解放基盤表面E.L.-370m)	-372m			
地震基盤相当	約-700m			先新第三系
	-992m			
	観測開始	1996年3月	2012年8月	



地震観測点位置(平面)

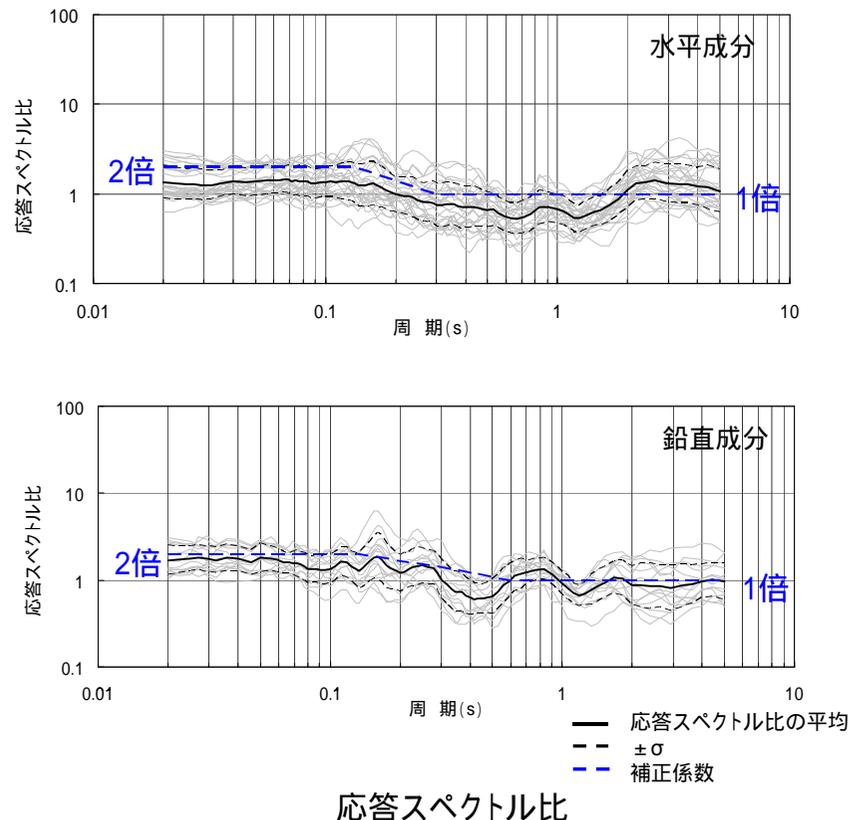
# 内陸地殻内地震の地震動評価に用いる補正係数

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



図中の震央の色は図下のカラーバーに対応し、  
応答スペクトル比を示している(周期0.02秒~0.1秒の平均)。

検討対象地震の震央分布図  
(水平成分)



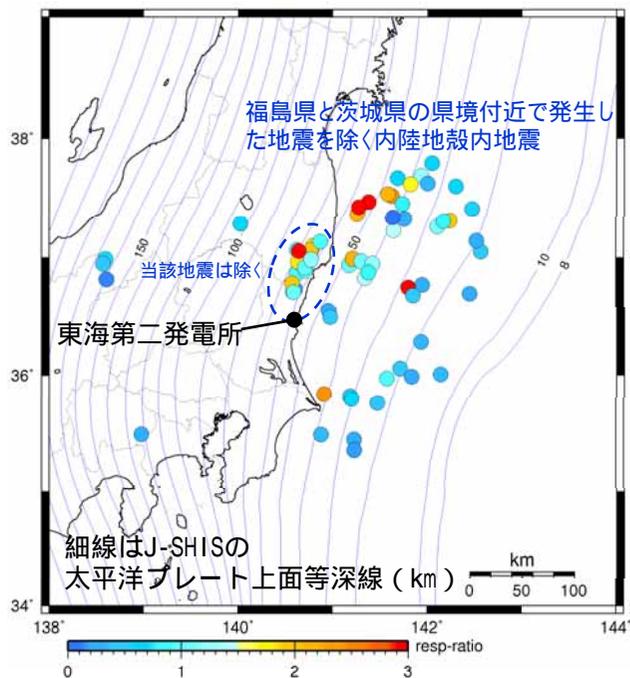
応答スペクトル比

— 応答スペクトル比の平均  
- - ±σ  
- - 補正係数

- 福島県と茨城県の県境付近で発生した地震の応答スペクトル比は短周期側で大きくなる傾向が見られ、水平成分で1.4倍程度、鉛直成分で1.7倍程度となる。データセットの詳細を参考資料1に示す。
- 従って、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対する応答スペクトル手法では、日本電気協会(2016)による内陸地殻内地震に対する補正係数は用いず、上記応答スペクトル比の傾向に基づき、短周期帯を概ね包絡するように短周期側で2倍の補正係数を設定する。

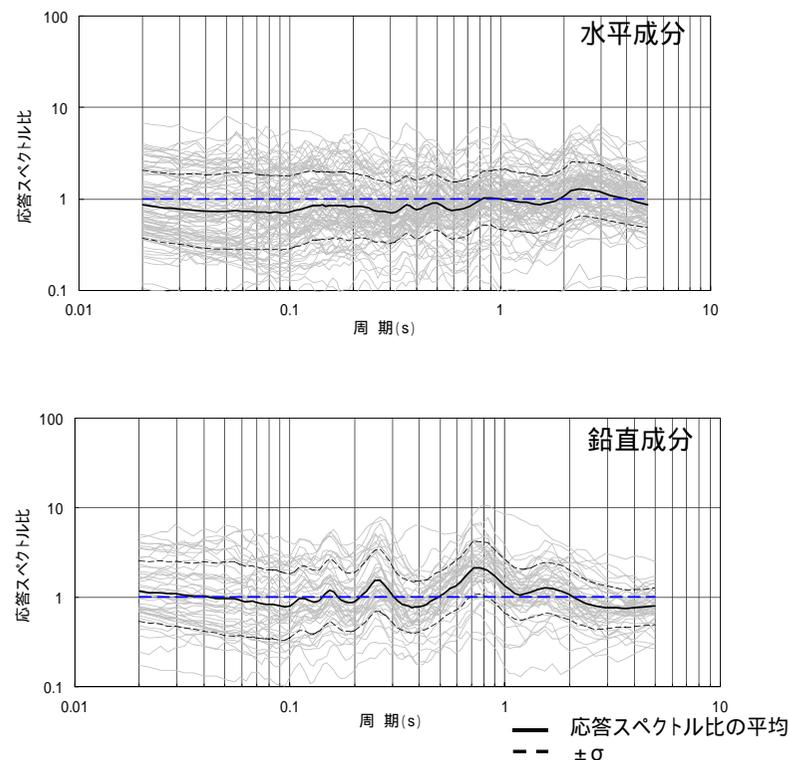
# 内陸地殻内地震の地震動評価に用いる補正係数

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



図中の震央の色は図下のカラーバーに対応し、  
応答スペクトル比を示している(周期0.02秒~0.1秒の平均)。

検討対象地震の震央分布図  
(水平成分)



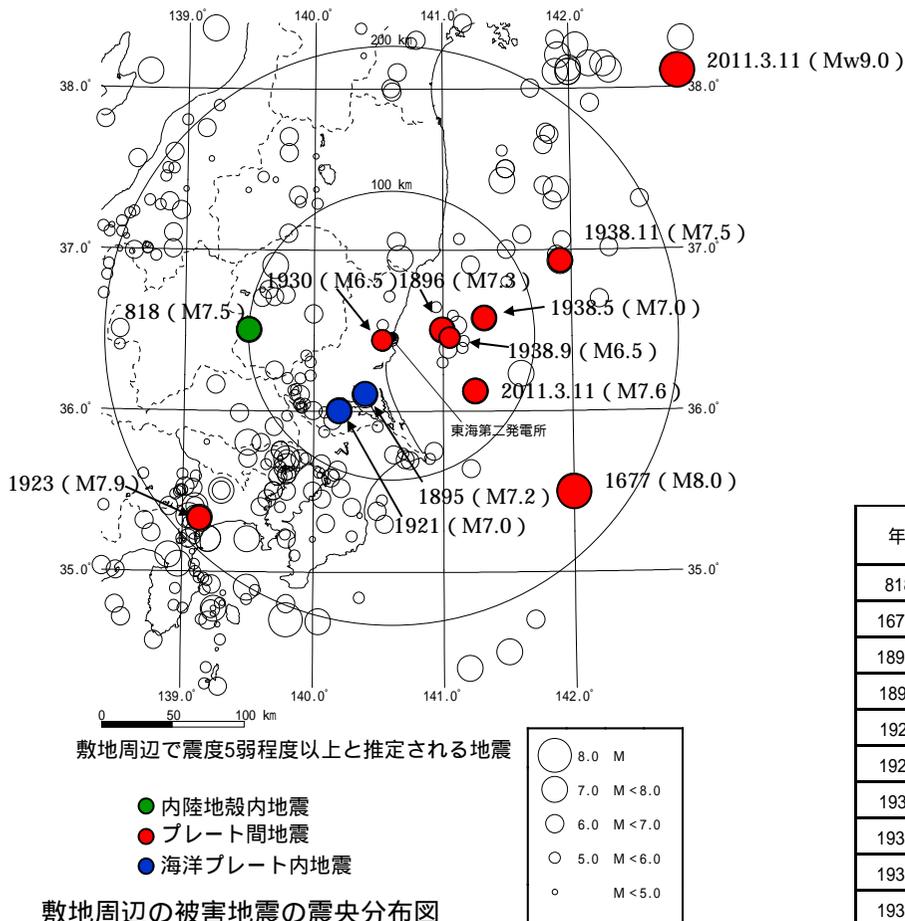
応答スペクトル比

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の応答スペクトル比について、各地震の平均は水平成分、鉛直成分ともほぼ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。

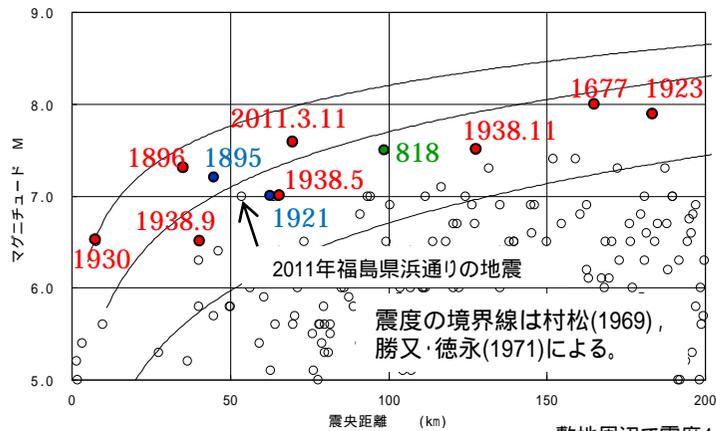
4. 検討用地震の選定 4.2 検討用地震の選定

# 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。



敷地周辺で震度5弱程度以上と推定される地震  
(日本被害地震総覧及び気象庁カタログ)



敷地周辺で震度4  
敷地周辺の被害地震から想定されるMとΔの関係

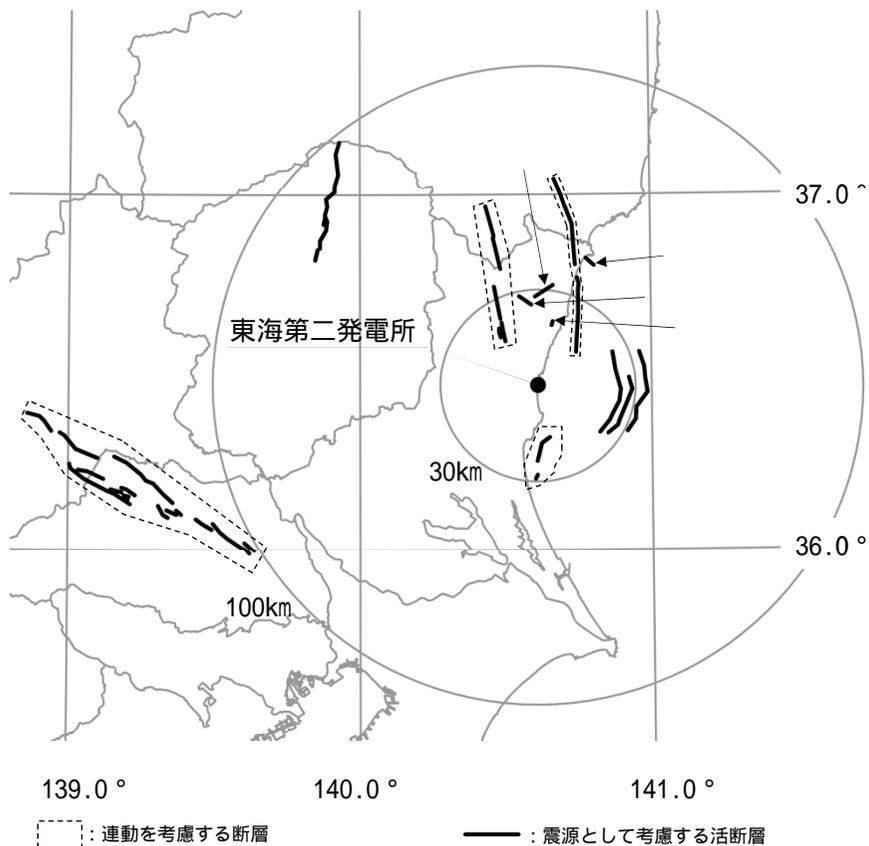
敷地での震度5程度以上となる被害地震リスト

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	-	内陸地殻内地震
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。

# 活断層の分布

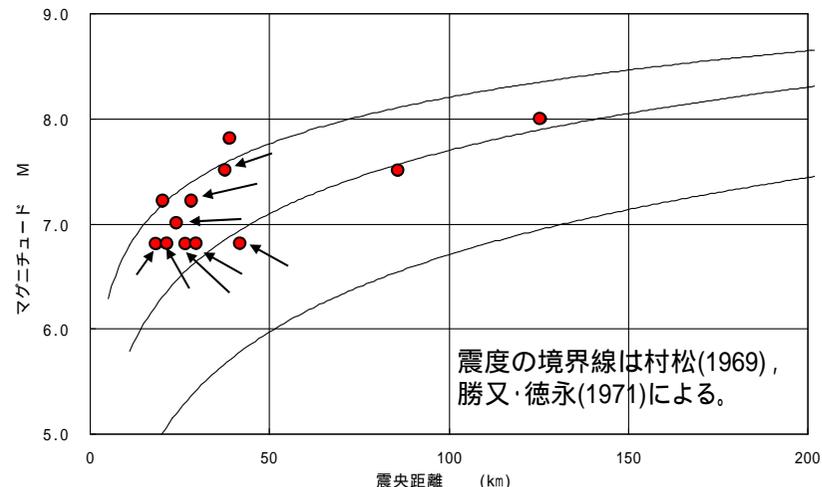
敷地で震度5程度以上となる活断層等を抽出する。



震源として考慮する活断層分布

**震源として考慮する活断層については、全て敷地での震度が5程度以上と想定される。**

- 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(次頁で説明)
- 3 断層傾斜角は60度として評価
- 4 諸元については審議に応じて見直す可能性がある。



震源として考慮する活断層から想定されるMと の関係

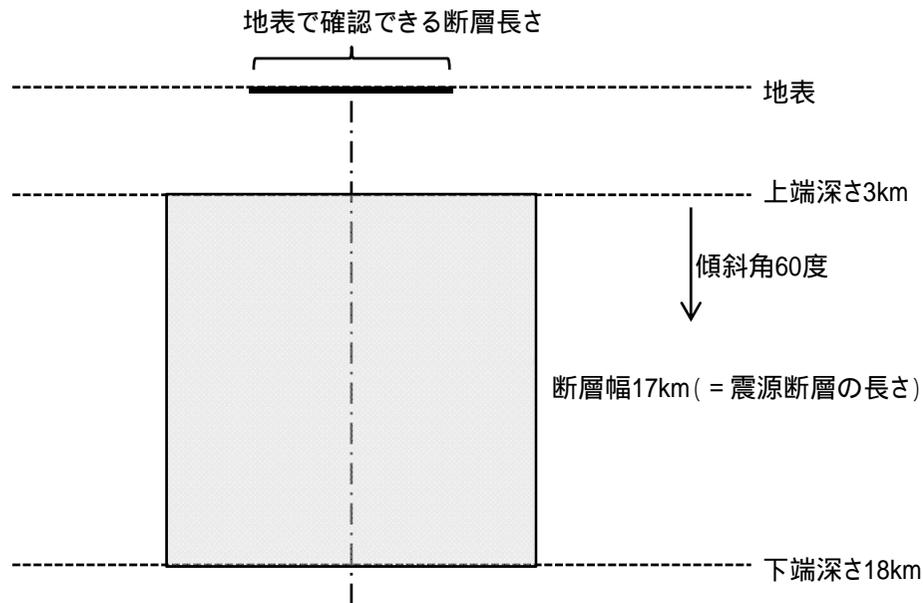
敷地で震度5程度以上となる震源として考慮する活断層のリスト

断層名	長さ (km)	地震規模M <sup>1</sup>	等価震源距離 (km) <sup>3</sup>
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
豎破山リニアメント	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, 塩ノ平地震断層の連動	58	7.8	31
F3断層, F4断層の連動 <sup>4</sup>	16	6.8	22
F8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

## 短い断層の扱い

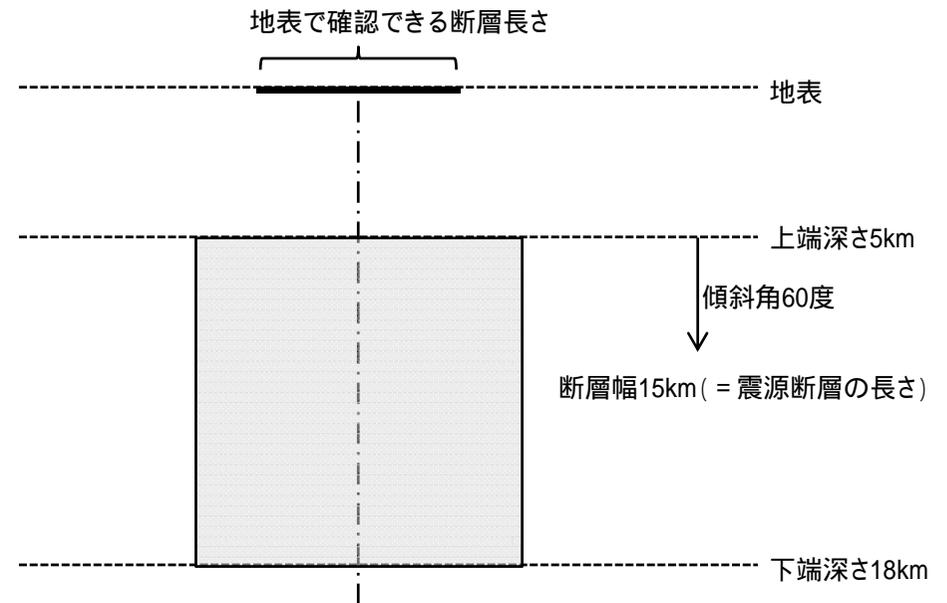
短い断層については、地表で認められる断層長さが震源断層の長さを示さない可能性を踏まえ、地震発生層の厚さや断層傾斜角等を考慮して地震規模を設定する。

- 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。



茨城県の北部における短い断層のモデル化の例

震源断層の面積が291km<sup>2</sup>以上の場合、入倉・三宅(2001)による断層面積と地震モーメントの関係式及び武村(1990)による地震モーメントとマグニチュードの関係式を用いて規模を算出するとM6.8になる。



茨城県の北部以外における短い断層のモデル化の例

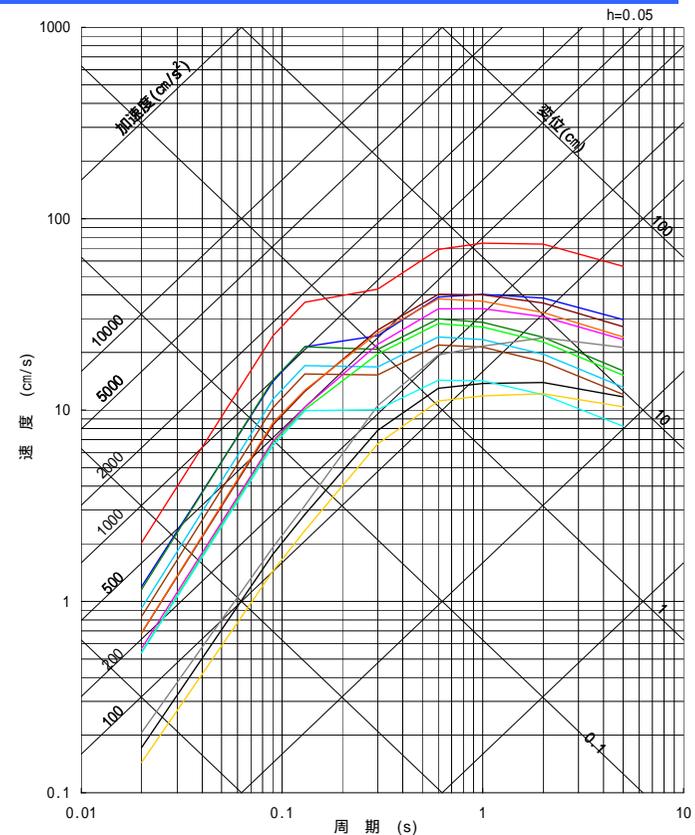
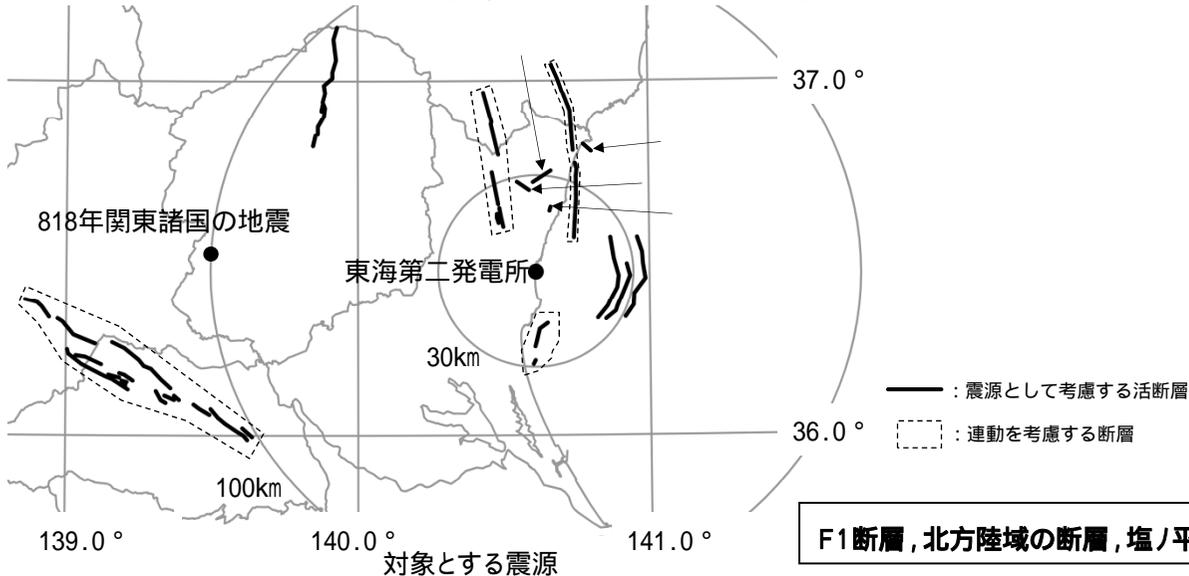
震源断層の面積が291km<sup>2</sup>未満の場合、Somerville et al.(1999)による断層面積と地震モーメントの関係式及び武村(1990)による地震モーメントとマグニチュードの関係式を用いて規模を算出するとM6.7になる。

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

地震名		長さ (km)	地震規模 M	断層上端深さ (km)	等価震源距離 (km) <sup>2</sup>	補正係数
活断層による地震	棚倉破砕帯東縁断層, 同西縁断層の連動	42	7.5	3	37	考慮
	関口 - 米平リニアメント	6	6.8 <sup>1</sup>	3	27	考慮
	豎破山リニアメント	4	6.8 <sup>1</sup>	3	25	考慮
	宮田町リニアメント	1	6.8 <sup>1</sup>	3	21	考慮
	F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動	58	7.8	3	31	考慮
	F3断層, F4断層の連動 <sup>3</sup>	16	6.8	5	22	
	F8断層	26	7.2	5	26	
	F16断層	26	7.2	5	30	
	A-1背斜	20	7.0	5	22	
	関谷断層	40	7.5	5	92	
	関東平野北西縁断層帯	82	8.0	5	130	
F11断層	5	6.8 <sup>1</sup>	3	38	考慮	
被害地震	818年関東諸国の地震	-	7.5	-	102	

- 1 長さの短い断層については、地震規模をM6.8として評価
- 2 活断層による地震の断層傾斜角は60度として評価
- 3 諸元については審議に応じて見直す可能性があるが、検討用地震の選定結果には影響を与えない。



- 棚倉破砕帯東縁断層, 同西縁断層の連動, M7.5, Xeq=37km
- 関口 - 米平リニアメント, M6.8, Xeq=27km
- 豎破山リニアメント, M6.8, Xeq=25km
- 宮田町リニアメント, M6.8, Xeq=21km
- F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動, M7.8, Xeq=31km
- F3断層, F4断層, M6.8, Xeq=22km
- F8断層, M7.2, Xeq=26km
- F16断層, M7.2, Xeq=30km
- A-1背斜, M7.0, Xeq=22km
- 関谷断層, M7.5, Xeq=92km
- 関東平野北西縁断層帯, M8.0, Xeq=130km
- F11断層, M6.8, Xeq=38km
- 818年関東諸国の地震, M7.5, Xeq=102km

内陸地殻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)

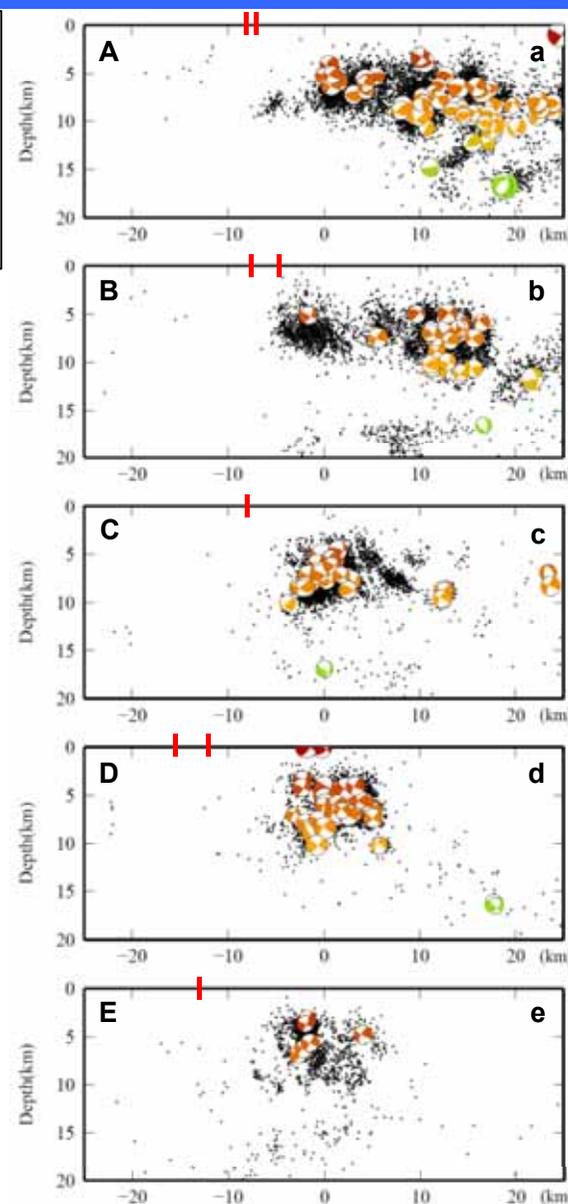
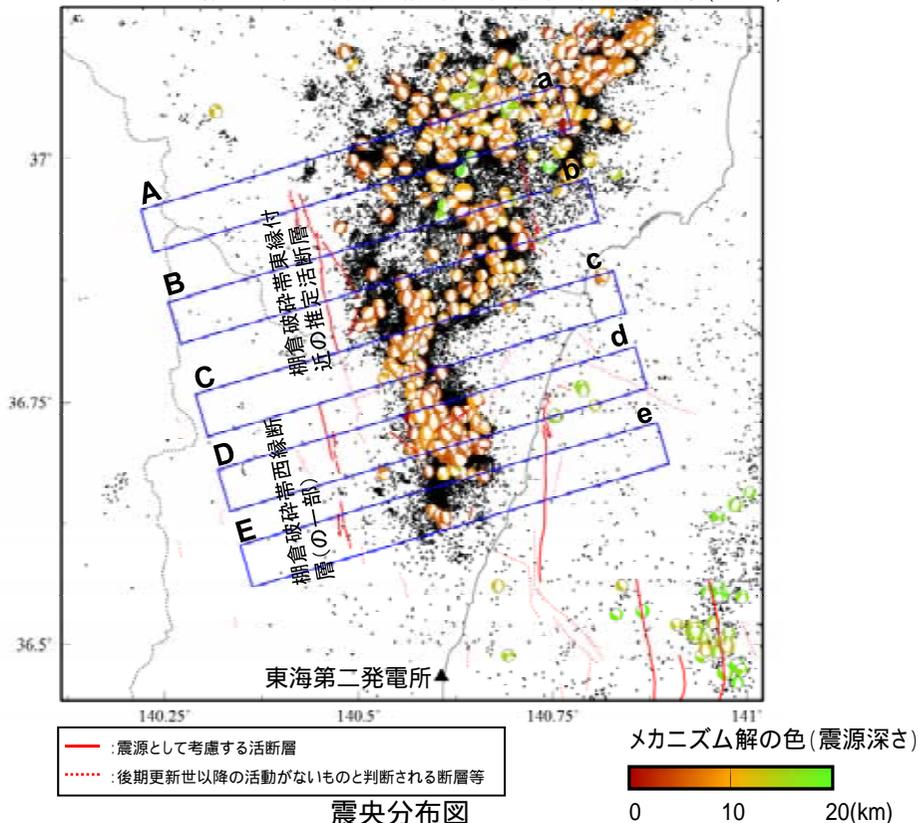
**F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動による地震を検討用地震として選定した。**

# 棚倉破砕帯と周辺の微小地震分布の対応(1 / 2)

棚倉破砕帯の東側の地域(福島県浜通りから茨城県北部)では、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震発生以降、正断層型の内陸地殻内地震が多発しているが、棚倉破砕帯の地表断層位置と震央位置が離れており、棚倉破砕帯の走向とメカニズム解も調和的でないことより、棚倉破砕帯に関連する地震活動ではないものと考えられる。さらに、棚倉破砕帯の北方及び南方についても、地震が集中しているような状況は見られない。

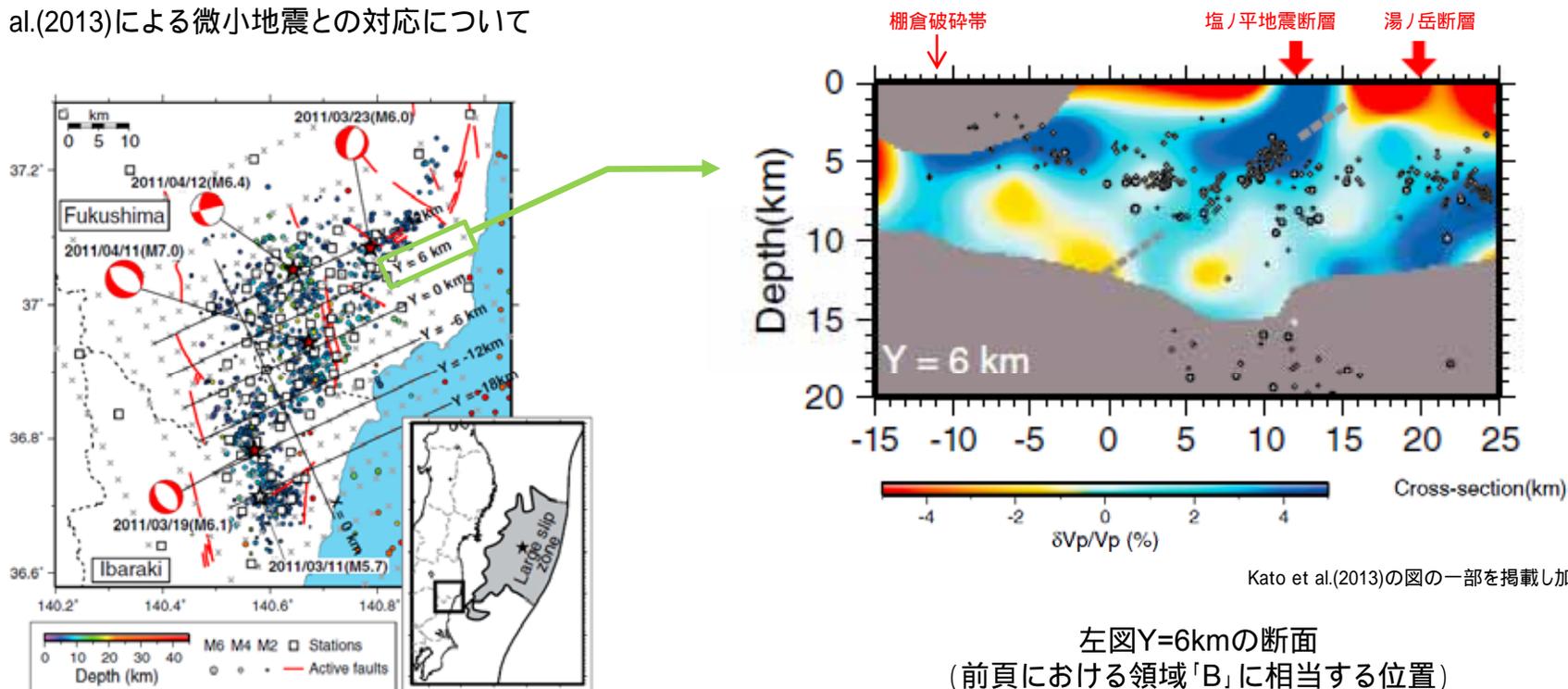
これらより、棚倉破砕帯の活動性や規模については地質・地質構造調査の結果により判断するものとするが、地震動評価における震源の考え方については「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」にて引き続き検討を行う。

使用データ  
 ・データ期間 : 2011年3月11日 ~ 2013年12月31日  
 ・地震諸元 : 気象庁 地震月報(カタログ編)  
 ・メカニズム解 : 防災科学技術研究所 広帯域地震観測網(F-net)



# 棚倉破碎帯と周辺の微小地震分布の対応(2 / 2)

Kato et al.(2013)による微小地震との対応について



Kato et al.(2013)に一部加筆

- 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、棚倉破碎帯と関連は薄いと考えられる。

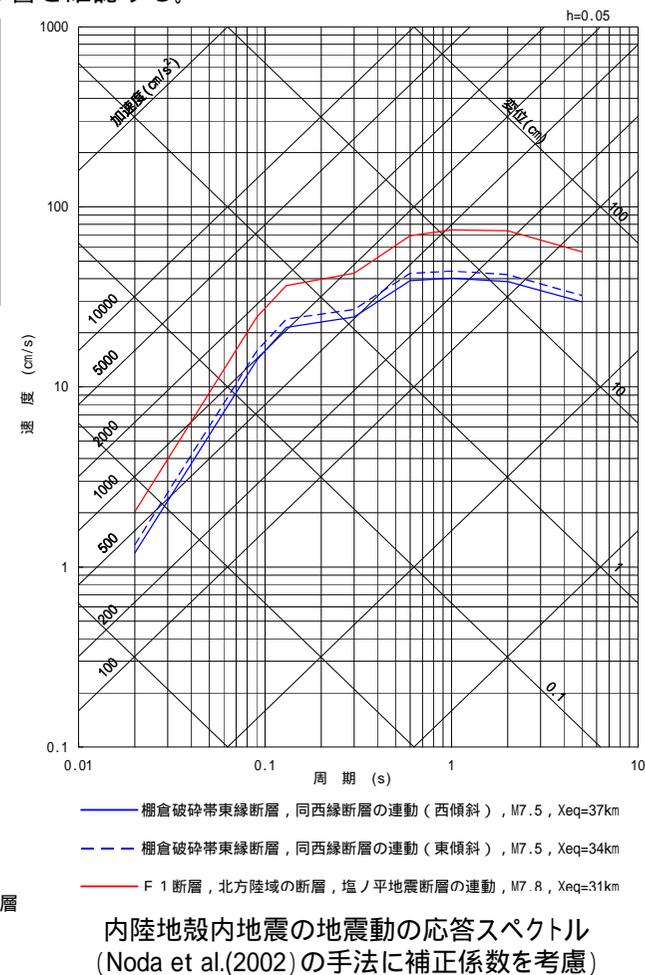
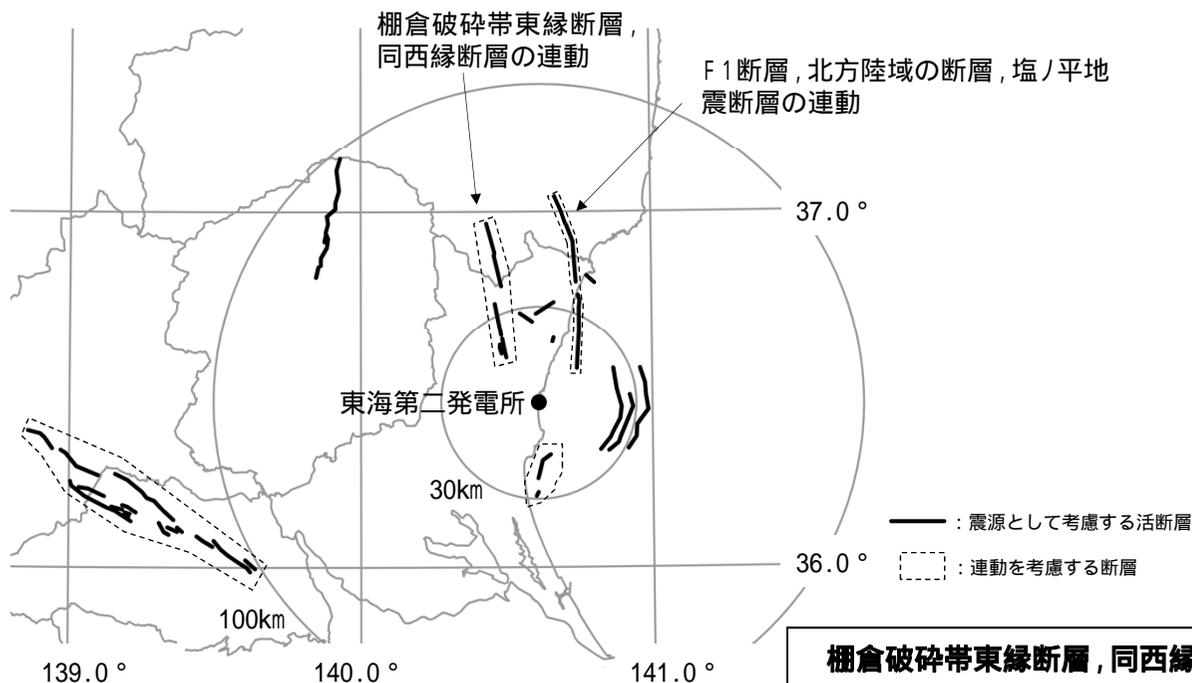
# 棚倉破碎帯の地震動評価への影響について

## 棚倉破碎帯の地震動評価への影響の検討

棚倉破碎帯東縁断層，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。

断層	長さ (km)	地震規模 M	等価震源距離 (km)	補正係数
棚倉破碎帯東縁断層，同西縁断層の連動(西傾斜60度)	42	7.5	37	考慮
棚倉破碎帯東縁断層，同西縁断層の連動(東傾斜60度)	42	7.5	34	考慮
F1断層，北方陸域の断層，塩ノ平地震断層の連動	58	7.8	31	考慮

断層上端深さ3km，下端深さ18km，断層傾斜角60度として評価



棚倉破碎帯東縁断層，同西縁断層の連動による震源モデルを東傾斜と仮定した際の影響は，F1断層，北方陸域の断層，塩ノ平地震断層の連動よりも小さいことを確認した。

---

1. 評価フロー	5
2. 敷地周辺の活断層分布	6
3. 敷地周辺の地震発生状況	8
4. 検討用地震の選定	15
4.1 地震発生層の設定	16
4.2 検討用地震の選定	30
5. 震源モデルの設定	45
5.1 地質調査結果の概要	46
5.2 基本震源モデルの設定	47
5.3 不確かさを考慮した震源モデルの設定	79
6. 地震動評価	87
6.1 地震動評価手法	88
6.2 応答スペクトル手法による評価結果	89
6.3 断層モデル手法による評価結果	90
7. 参考文献	104
参考資料	
1 補正係数の算出に用いた地震リスト	105
2 基本震源モデル設定における保守性の考え方	110
3 統計的グリーン関数法による評価	112

# F1断層，北方陸域の断層及び塩ノ平地震断層の同時活動性の評価結果

## 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

\* 震源として考慮する活断層の北端については、地震断層、リニアメント及び文献が示す活構造のうち、断層長さが最長となる地震断層(丸山ほか、2013及び栗田ほか、2011)の北端とした。(182頁参照)  
なお、2011年4月11日の地震の地殻変動、余震分布及び震源過程解析によるすべり分布は、地震断層の範囲と対応している。

## 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。

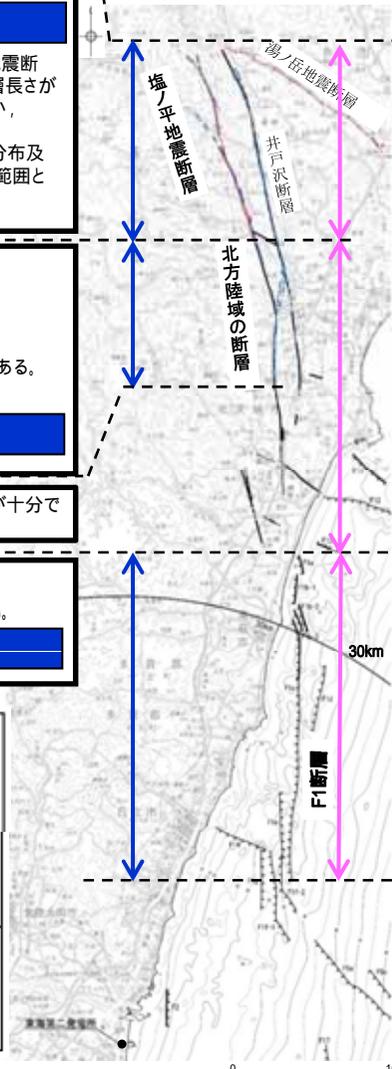
### 震源として考慮する活断層として評価

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以降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



## 塩ノ平地震断層とF1断層及び北方陸域の断層の同時活動性

- 他機関の調査結果も含め、後期更新世以降に「塩ノ平断層」が「F1断層」や「北方陸域の断層」と同時活動した事実はない。
- このため、これらの断層の同時活動の評価にあたっては、「塩ノ平断層」の「活動履歴」や「単位変位量」の情報から、地震本部の評価手法も参考に検討した。その結果、「塩ノ平断層」自体の今後50年間に於ける地震発生確率はほぼ0%であり、また「塩ノ平断層」とF1断層及び北方陸域の断層が今後50年間で同時活動する場合の地震発生確率は更に小さい」と評価される。
- しかしながら、断層の走向・傾斜の類似性等も勘案し、これらの断層の同時活動を考慮する。

\*約10<sup>-8</sup>パーセント

## F1断層と北方陸域の断層の同時活動性

- 断層の連続性や離隔距離等が十分に確認できないことから、同時活動を考慮する。

約58km

F1断層と北方陸域の断層に加え、塩ノ平地震断層も含めた同時活動性については、塩ノ平地震断層が既に応力解放されているため、これらの断層が同時活動する可能性は極めて低いものと判断される。  
しかしながら、断層の走向・傾斜の類似性等も勘案し、これらの断層の同時活動を考慮することとした。

この地図は、国土地理院長の承認を得て、同院発行の20万分1地勢図、数値地図200000(地図画像)及び数値地図25000(地図画像)を複製したものである。  
(承認番号 平28情複、第124号)  
本図面を第三者がさらに複製する場合は、国土地理院の長の承認を得なければならない。

---

## 5. 震源モデルの設定

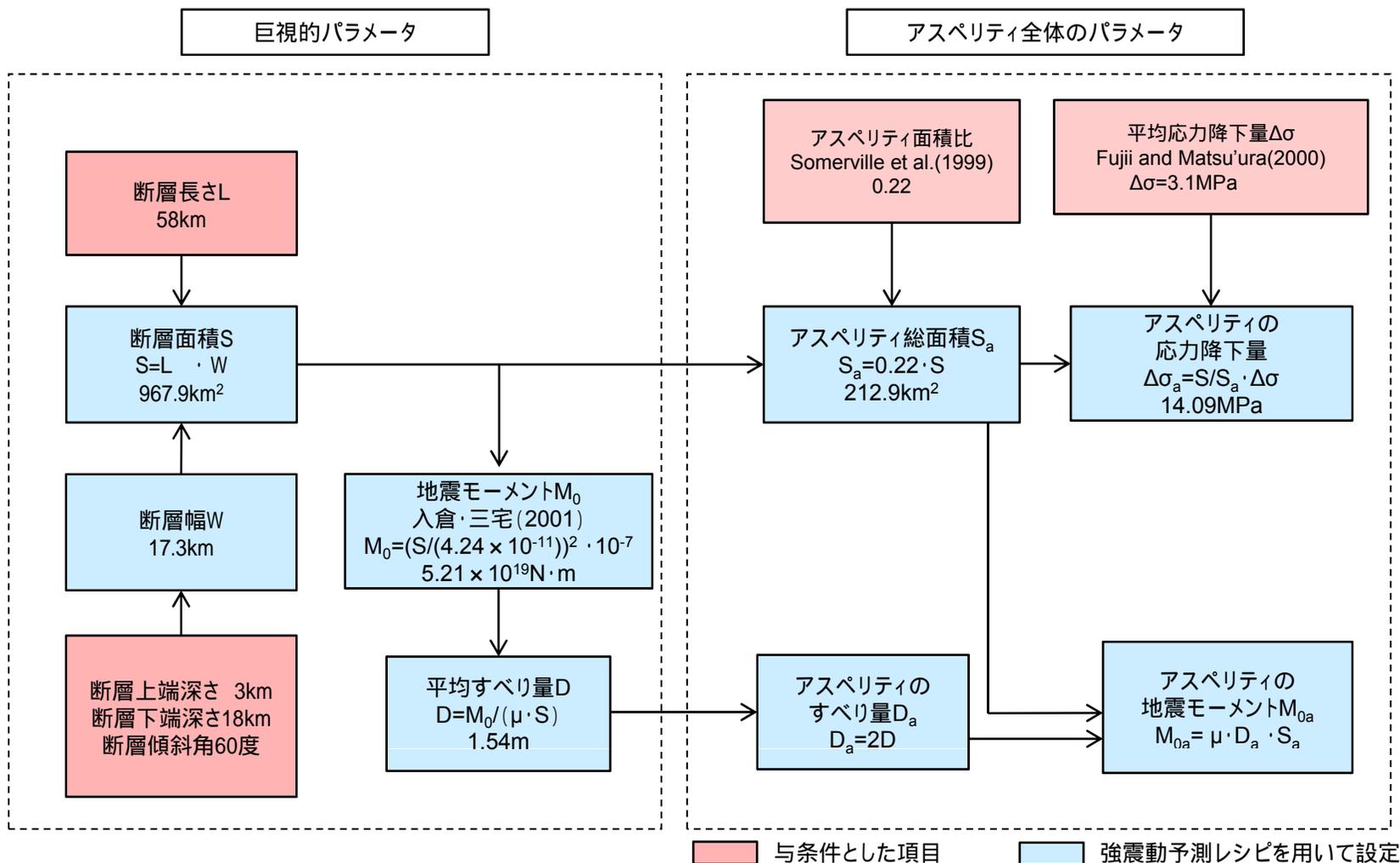
### 5.1 地質調査結果の概要

### 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

# 基本震源モデルの設定フロー

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。

# 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】

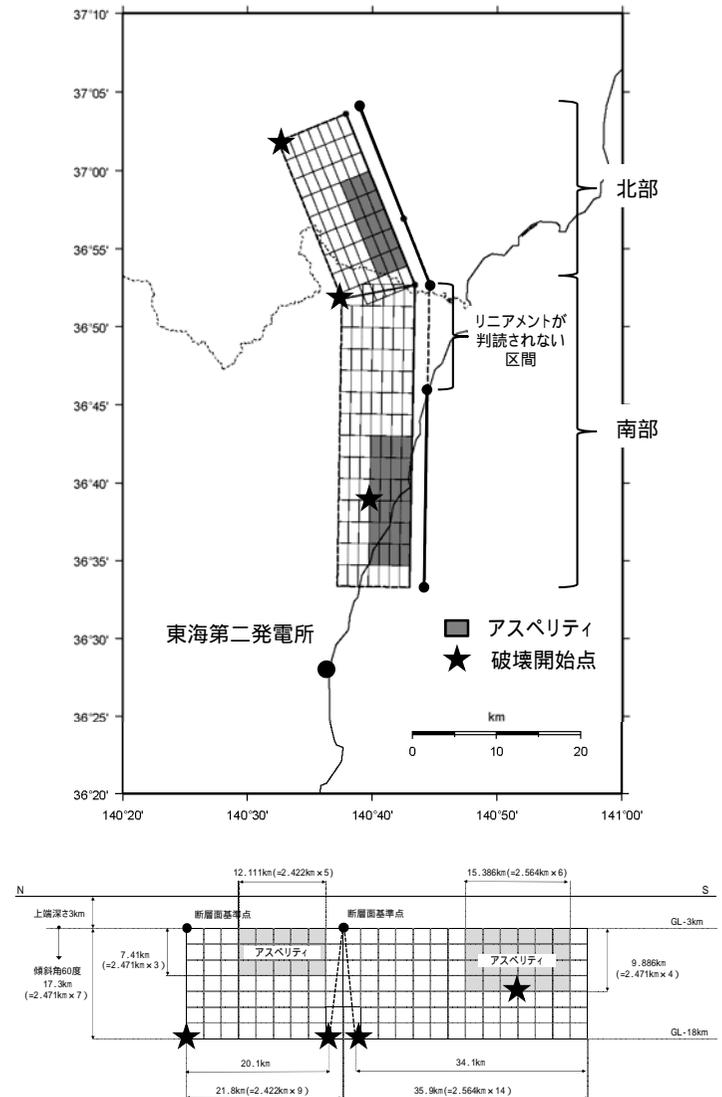
- アスペリティの位置については,地質調査結果に基づき,南部区間のうち調査でわかっているF1断層に1つ,北部では北方陸域の断層~塩ノ平地震断層に1つ,それぞれ敷地に近くなるように配置する。
- 断層長さ方向の配置については,Manighetti et al.(2005)等の知見を踏まえるとアスペリティのように大きなすべりが生じる領域とすべりが無い領域が隣接することは考えにくいことから,断層端部との間に1マス分背景領域を設定する。断層幅方向の配置については,すべりに追従する表層(地表から断層上端までの強震動を出さない層)が存在するので安全側に断層上端にアスペリティを配置する。
- なお,リニアメ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

## 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 $S(\text{km}^2)$

断層長さと断層幅より算出

#### ・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 (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 Matsuura(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,

$S_a$  : アスペリティ総面積 ( $\text{km}^2$ )

$a$  : 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。

## 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

アスペリティ配置

破壊開始点位置

短周期レベル

破壊伝播速度

2016年版強震動予測レシピとの関係

# 地質調査結果と震源モデルの対応

**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。

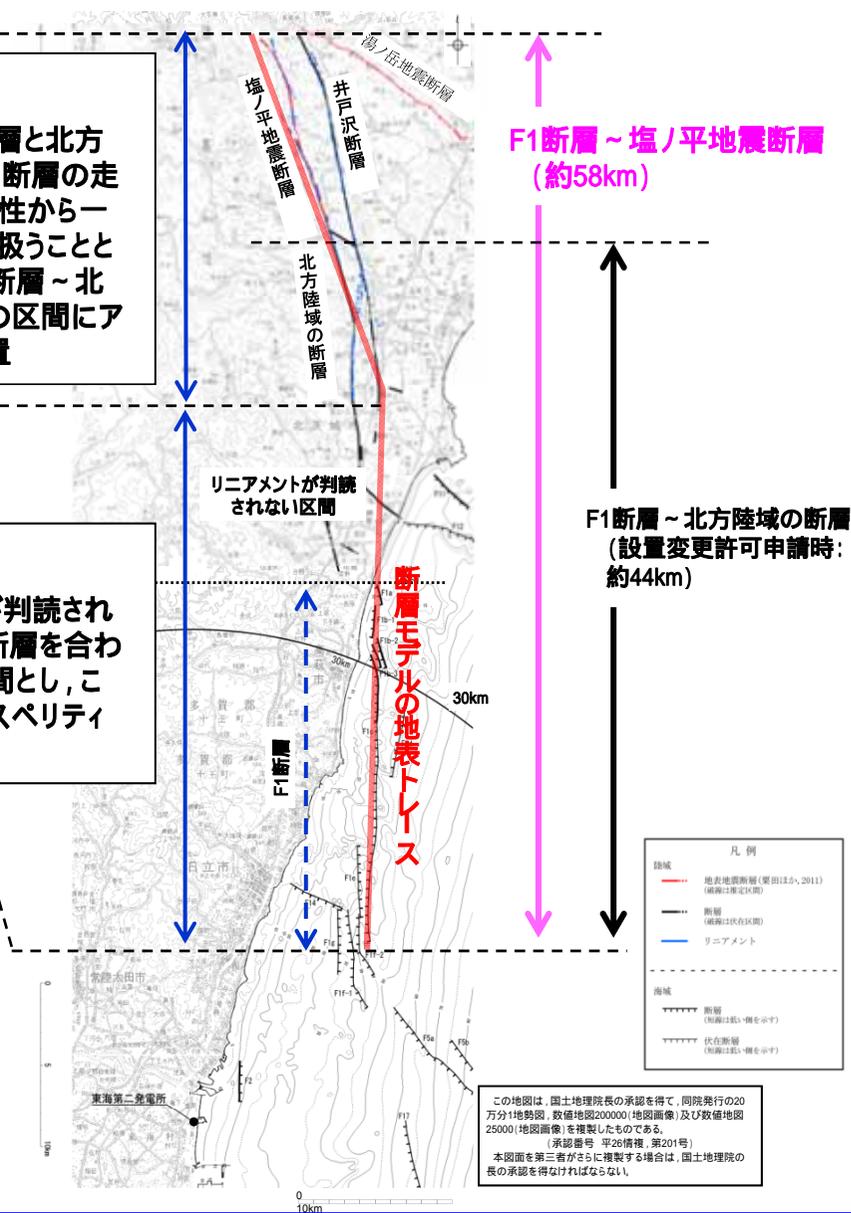
震源として考慮する活断層として評価

**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



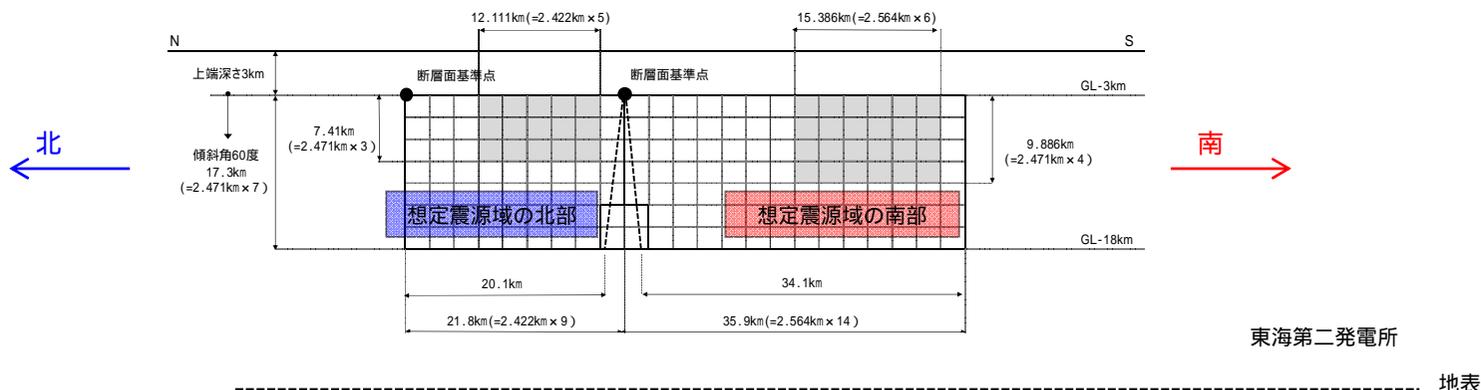
- 巨視的面は地質調査による断層線に沿うよう設定する。
- 断層の分布状況から震源を南部、北部に区分する。
- アスペリティは、地質調査結果や各種文献に基づき、南部ではF1断層に1つ、北部では北方陸域の断層～塩ノ平地震断層に1つ、それぞれ敷地寄りに配置する。
- リニアメントが判読されない区間はF1断層側に含め、これらを合わせて一つの区間とすることで敷地に近い南部に配置するアスペリティの地震モーメントを大きくし、安全側の設定とする。(参考資料2)

この地図は、国土地理院長の承認を得て、同院発行の20万分1地勢図、数値地図200000(地図画像)及び数値地図25000(地図画像)を複製したものである。  
(承認番号：平20情推、第201号)  
本図面を第三者がさらに複製する場合は、国土地理院長の承認を得なければならない。

# 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。



東海第二発電所

地表

青柳・上田(2012)の稠密地震観測D10% 3km  
Kato et al.(2013)の微小地震分布  
(震源再決定) 3km  
青柳・上田(2012)のトモグラフィ解析 3km

青柳・上田(2012)の稠密地震観測D90% 7.9km

Kato et al.(2013)の微小地震分布  
(震源再決定) 15km

2011年福島県浜通りの地震の震源インバージョンモデルの下端深さ 13~16km程度

断層上端深さの設定値3km

傾斜角60度  
断層幅17.3km

断層下端深さの設定値18km

広域の微小地震D10% 5.2km

原子力安全基盤機構(2004)の微小地震D10% 6.1km

広域の微小地震D90% 12.3km

三浦ほか(2000)深部構造探査 約15km

原子力安全基盤機構(2004)の微小地震D90% 18.1km

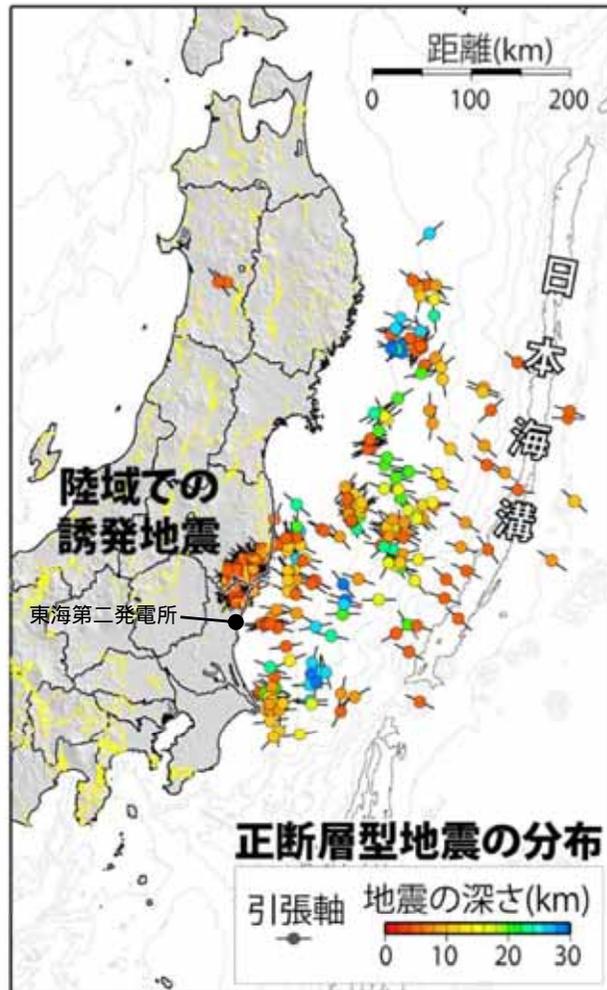
コンラッド面深さ(Zhao et al.(1992), Katsumata(2000))  
16~20km程度

断層上端深さ, 下端深さの設定 (概念図)

- 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。

# 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)



- 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。
- 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

正断層型誘発地震の分布

# 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)

Kato et al.(2011)について

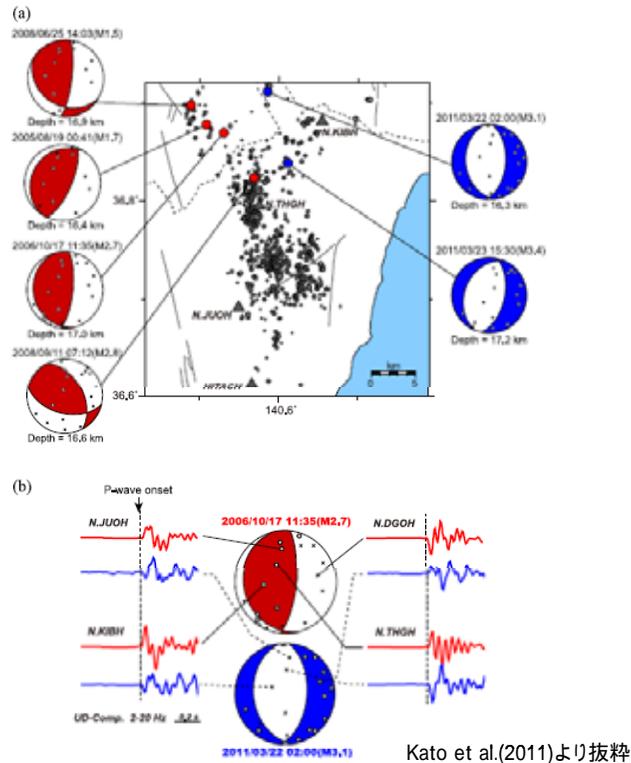


Fig. 3. (a) Focal mechanisms of six earthquakes with magnitude greater than 1.5 that occurred before and after the 2011 Tohoku Earthquake. The origin time, magnitude and depth of each event are denoted above and below each beach ball. The distribution of polarities of P-waves is shown as circles (up) 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.

Imanishi et al.(2012)について

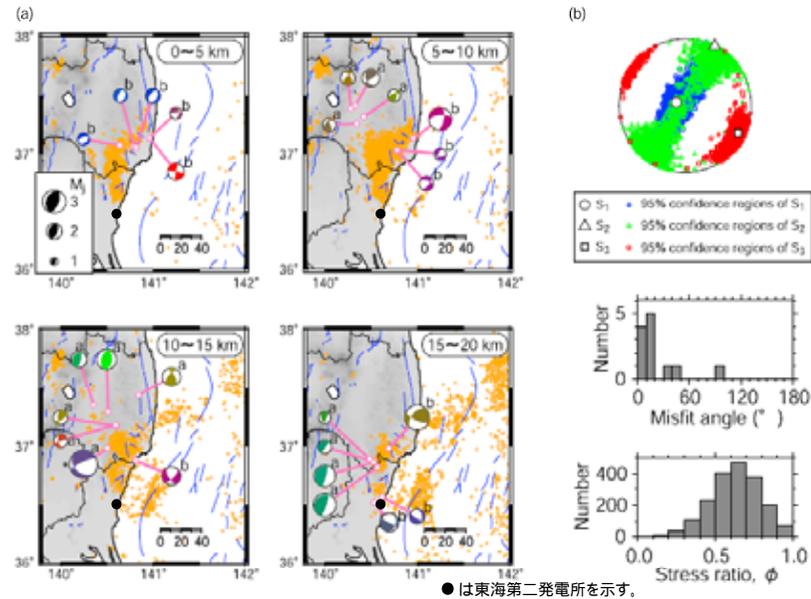


Figure 3. (a) Focal mechanism solutions of microearthquakes determined in the present study that occurred before the 2011 Tohoku earthquake (lower hemisphere, equal-area projection). The same triangle diagram as that of Figure 1 is used to differentiate faulting types. A mechanism marked with asterisk 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 stereonet. (middle) Misfit angle for the data with respect to the best solution 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。

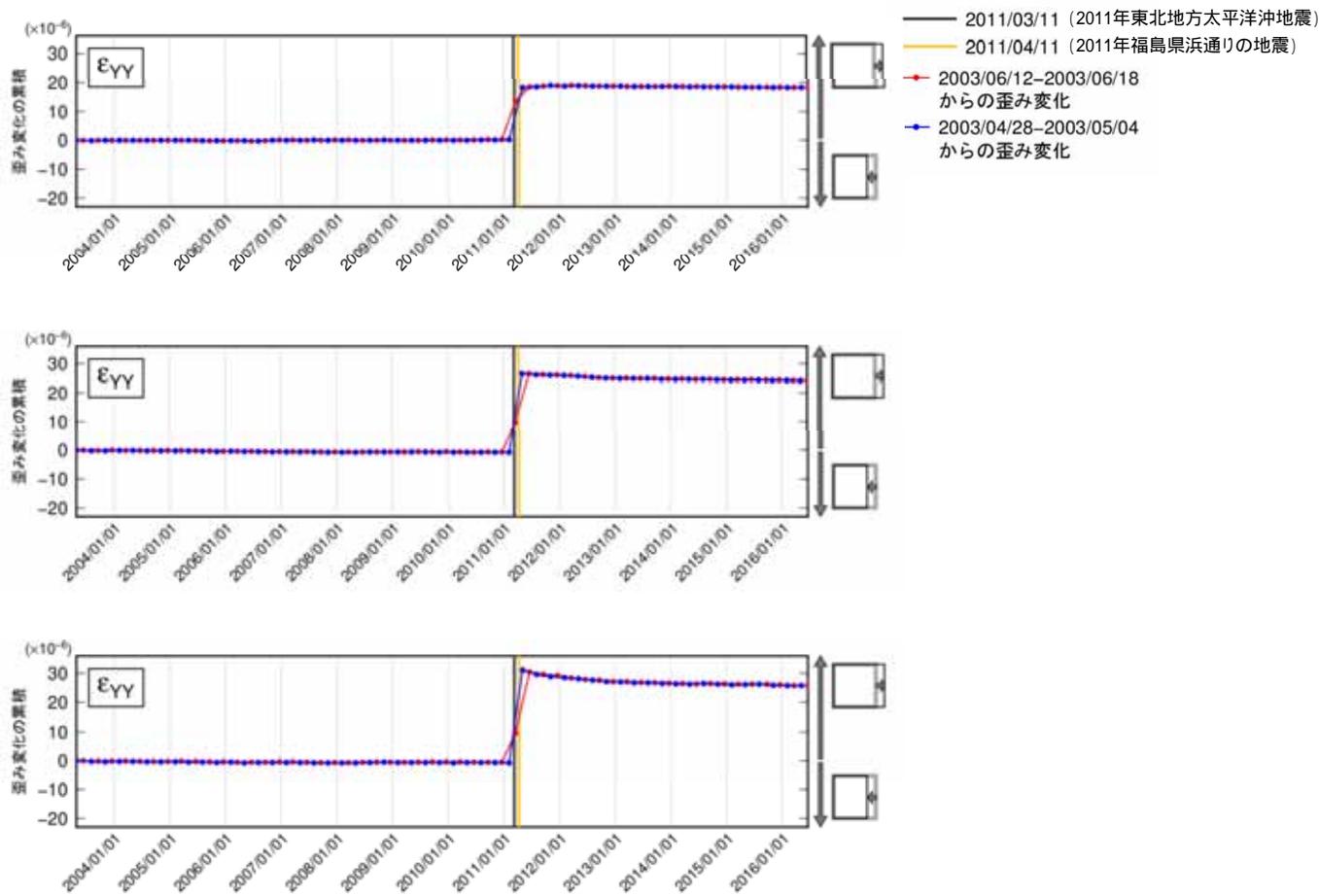
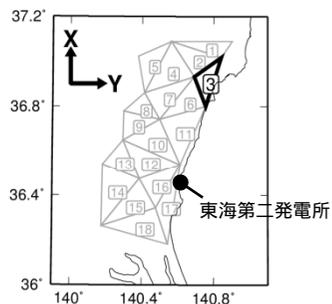
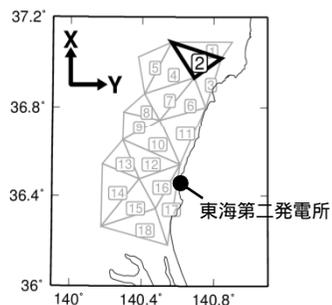
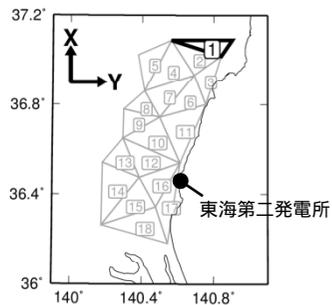
・Aitaro Kato, Shin ichi Sakai, and Kazushige Obara (2011): A normal-faulting seismic sequence triggered by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake: Wholesale stress regime changes in the upper plate, *Earth Planets Space*, 63, 745–748, 2011

・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

# 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

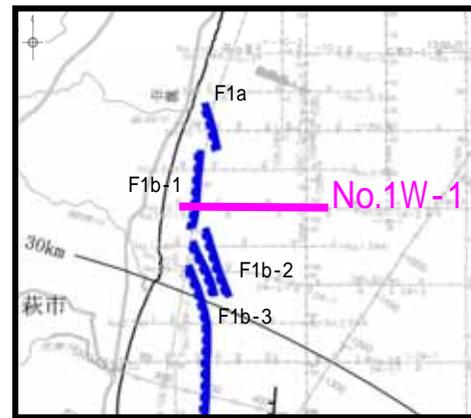
国土地理院によるGNSS(全地球衛星測位システム)の観測データを用い, 震源域から東海第二発電所にかけての地域を対象に歪み解析を実施した。具体的には, 観測点同士を線で結んだ三角網を構築し, 各三角要素内の平均的な歪み変化(2003年5月時点を0と仮定)を推定した。解析対象期間は2003年5月~2016年6月とした。



歪み変化の累積(2011年福島県浜通りの地震の震源域周辺)

2011年福島県浜通りの地震の震源域(図の1, 2, 3)では, 東北地方太平洋沖地震や2011年福島県浜通りの地震などにより東西方向に変位を受けており, 2016年6月時点ではその変位は戻っていない。

# 断層タイプ, 断層傾斜角: 海上音波探査結果(1 / 4)

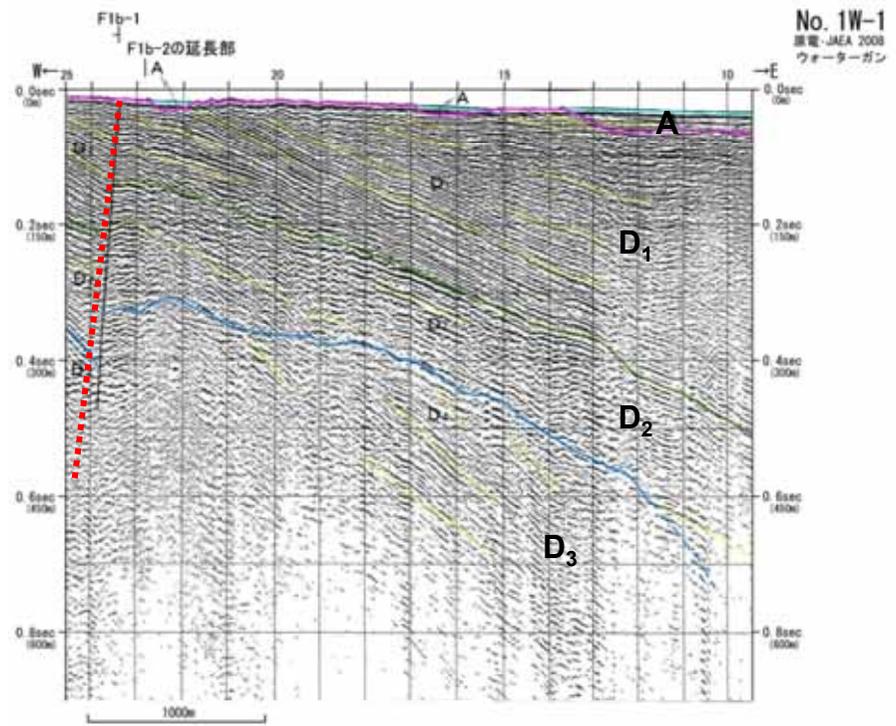
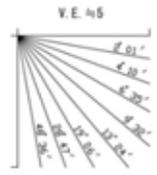


海上音波探査記録から, F1断層は西側落下の正断層と推定される。

(凡例)

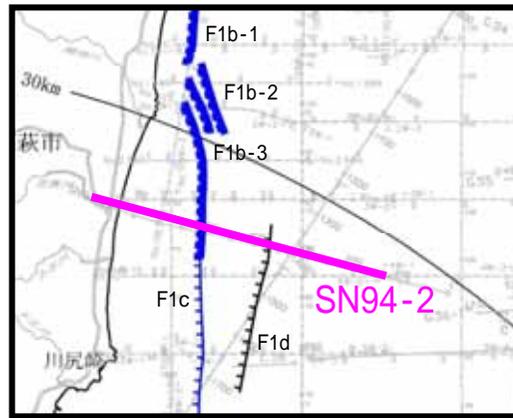
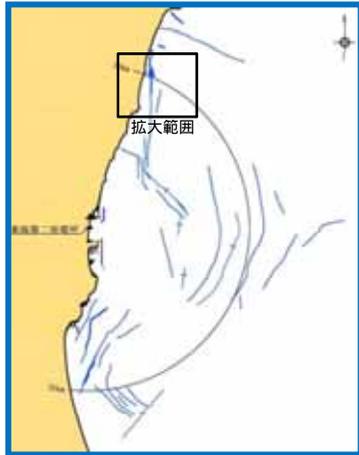
地質時代	音響層序区分
第四紀	完新世 A
	後期 B <sub>1</sub>
	中期 B <sub>2</sub>
	前期 B <sub>3</sub>
第三紀	C <sub>1</sub>
	C <sub>2</sub>
	中新世 D <sub>1</sub>
	古新世 D <sub>3</sub>

- F1 断層及び断層記号
- F2 換曲及び換曲記号
- F30 断層
- F10 断層又は換曲の延長位置
- F15 探査深度外に認められる断層



..... 傾斜角60度の補助線

# 断層タイプ, 断層傾斜角: 海上音波探査結果(2 / 4)

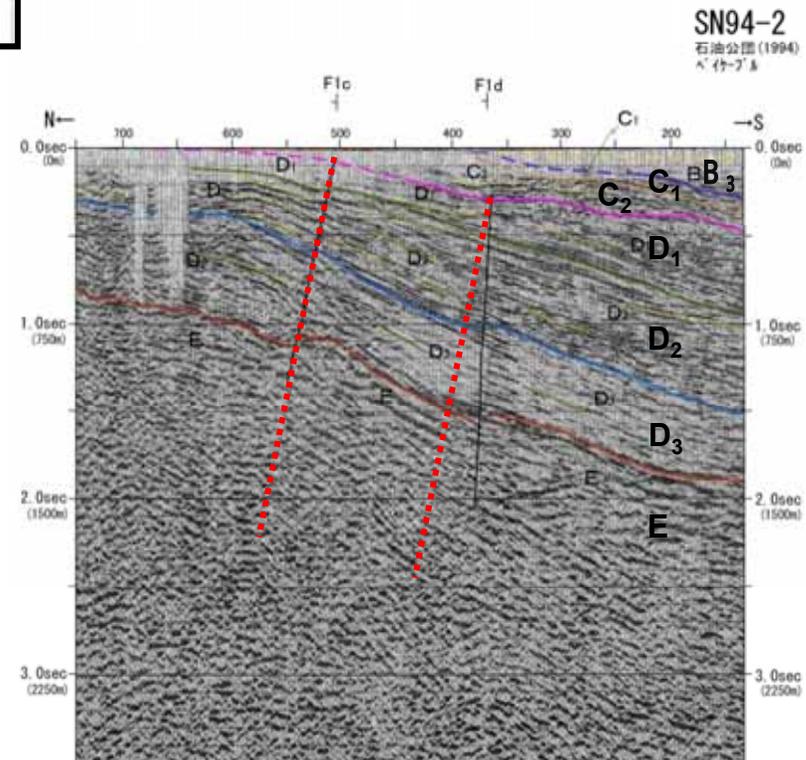
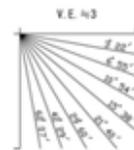


海上音波探査記録から, F1断層は西側落下の正断層と推定され, その傾斜は高角の西傾斜であると考えられる。

(凡例)

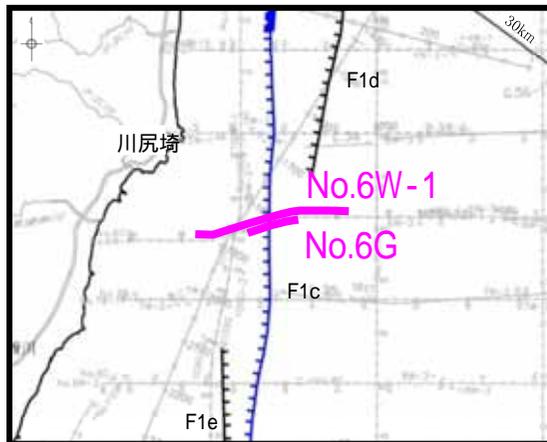
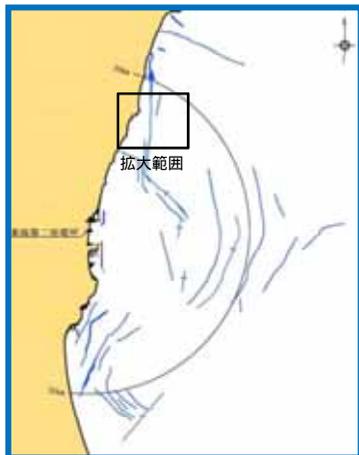
地質時代	音響層序区分
第四紀	完新世 A
	後期 B <sub>1</sub>
	中期 B <sub>2</sub>
	前期 B <sub>3</sub>
第三紀	C <sub>1</sub>
	C <sub>2</sub>
	C <sub>3</sub>
	D <sub>1</sub>
	D <sub>2</sub>
	D <sub>3</sub>
先第三紀	E

F1	断層及び断層記号
F2	換曲及び換曲記号
F3	断層又は換曲の延長位置
F4	探査深度外に認められる断層



..... 傾斜角60度の補助線

# 断層タイプ, 断層傾斜角: 海上音波探査結果(3 / 4)

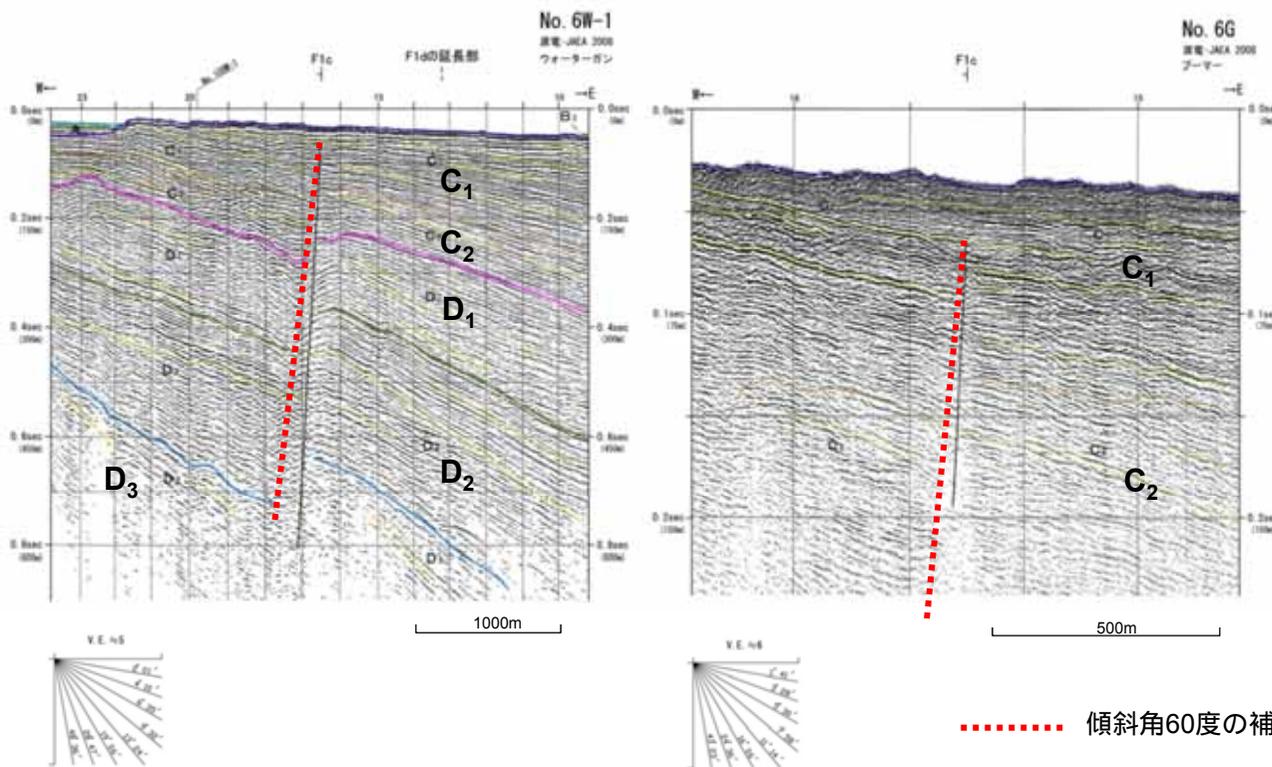


海上音波探査記録から, F1断層は西側落下の正断層と推定される。

(凡例)

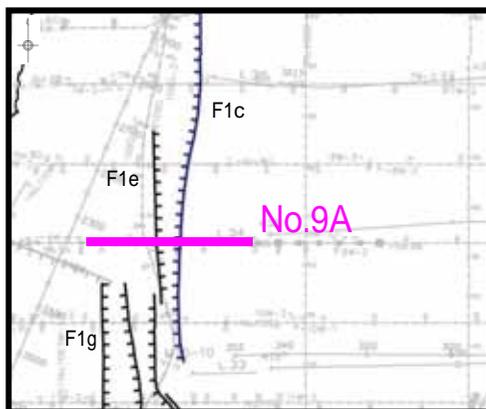
地質時代	音響層序区分
第四紀	完新世 A
	後期 B <sub>1</sub>
	中期 B <sub>2</sub>
	前期 B <sub>3</sub>
第三紀	C <sub>1</sub>
	C <sub>2</sub>
	D <sub>1</sub>
	D <sub>2</sub>
	D <sub>3</sub>
	E

F1	断層及び断層記号
F2	換曲及び換曲記号
F3	断層又は換曲の延長位置
(-)	探査深度外に認められる断層



..... 傾斜角60度の補助線

# 断層タイプ, 断層傾斜角: 海上音波探査結果(4 / 4)

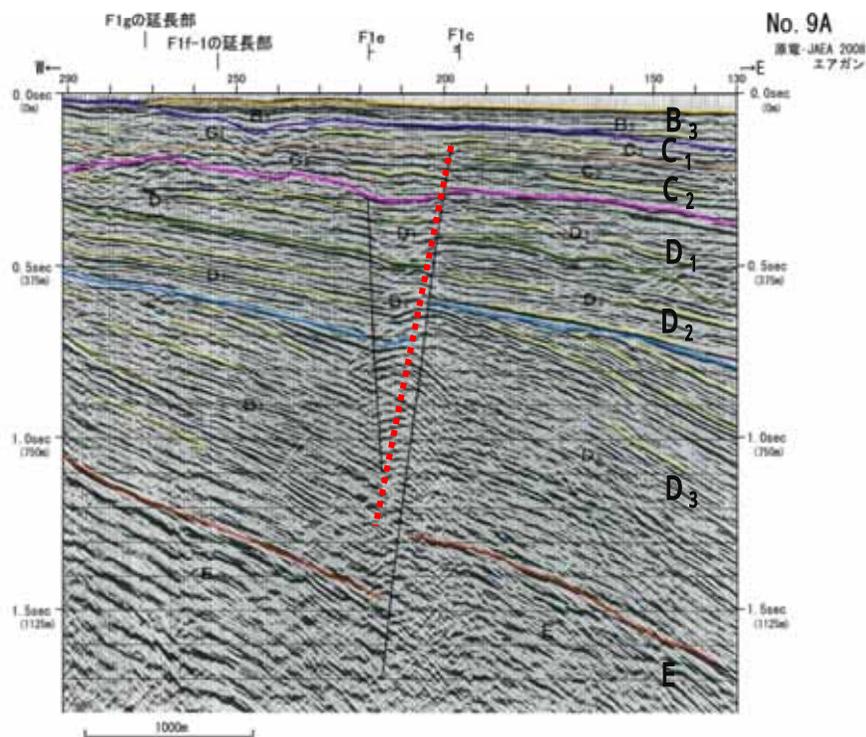
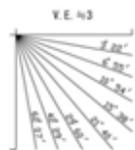


海上音波探査記録から, F1断層は西側落下の正断層と推定され, その傾斜は高角の西傾斜であると考えられる。

(凡例)

地質時代	音響層序区分
第四紀	完新世 A
	後期 B <sub>1</sub>
	中期 B <sub>2</sub>
	前期 B <sub>3</sub>
第三紀	C <sub>1</sub>
	C <sub>2</sub>
	C <sub>3</sub>
	D <sub>1</sub>
	D <sub>2</sub>
	D <sub>3</sub>
白垩紀	E

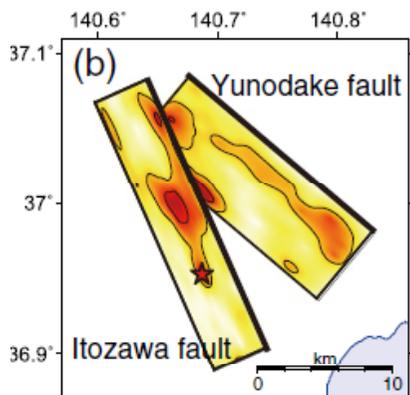
F1	断層及び断層記号
F2	換曲及び換曲記号
F3	断層又は換曲の延長位置
(-)	探査深度外に認められる断層



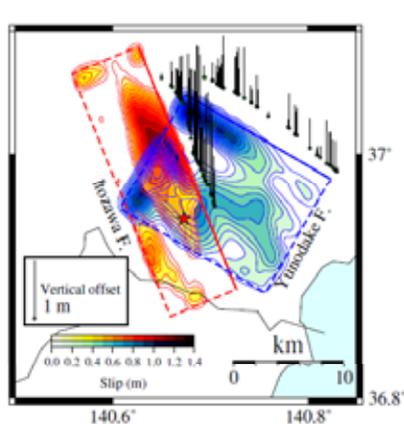
..... 傾斜角60度の補助線

# 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

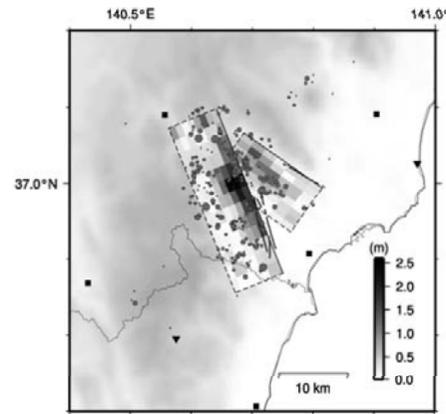
2011年福島県浜通りの地震の近地強震記録を用いた震源インバージョン解析を行った文献を収集し, 解析の際に設定した断層傾斜角を整理する。



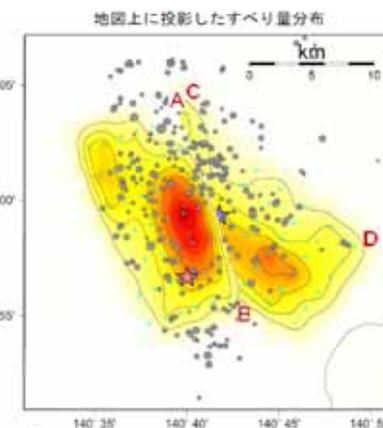
(Tanaka et al.(2014))



(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	-	

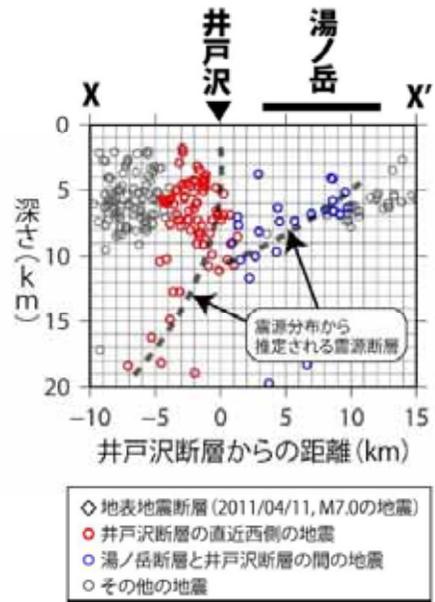
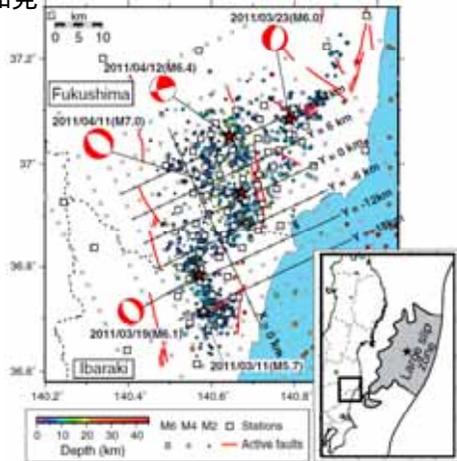
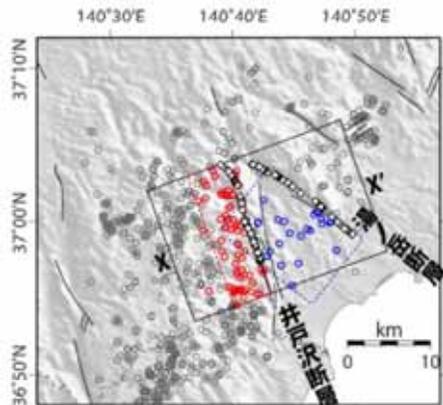
井戸沢断層のパラメータを記載

- 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 - 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 ]

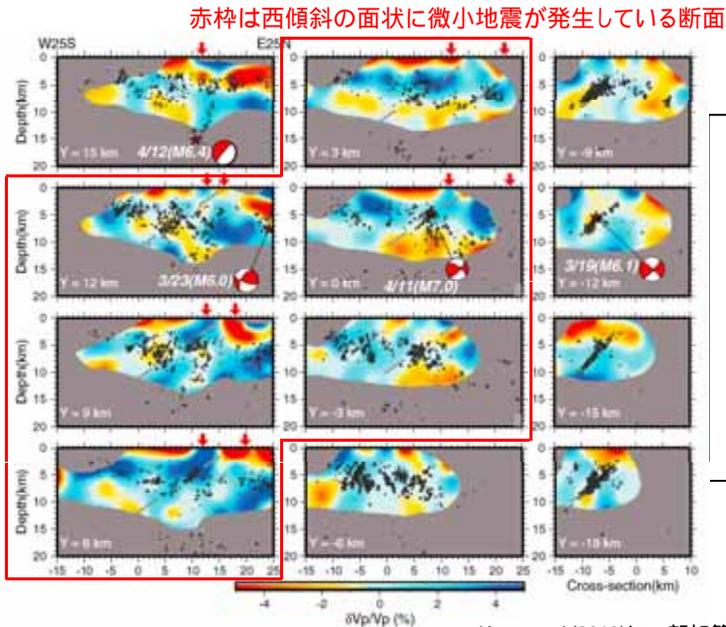
# 断層タイプ, 断層傾斜角: 余震分布による傾斜角

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



青柳・上田(2012)より抜粋

(青柳・上田(2012))



赤枠は西傾斜の面状に微小地震が発生している断面

Kato et al.(2013)に一部加筆

(Kato et al.(2013))

- 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。

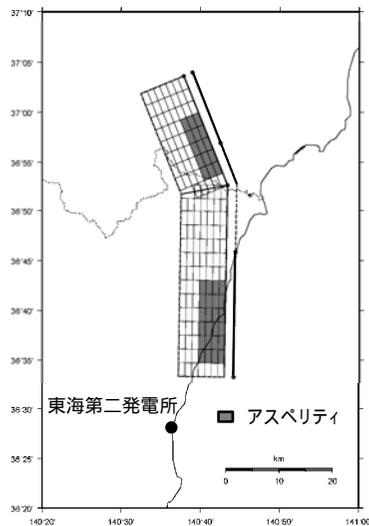
・対象期間 2011年5月17日~2011年7月29日  
・震源決定手法 臨時観測データを使ったDDトモグラフィ解析による再決定

・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

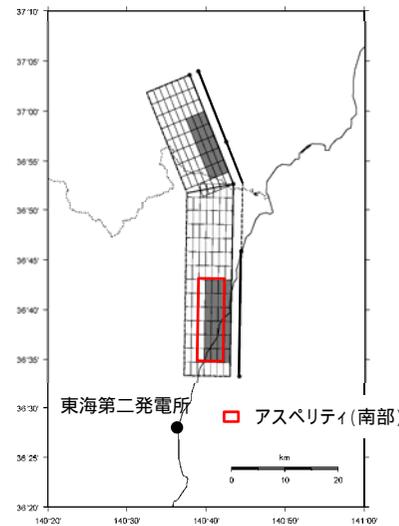
## アスペリティ配置:1) 断層幅方向のアスペリティ配置について

アスペリティ配置について(断層幅方向)

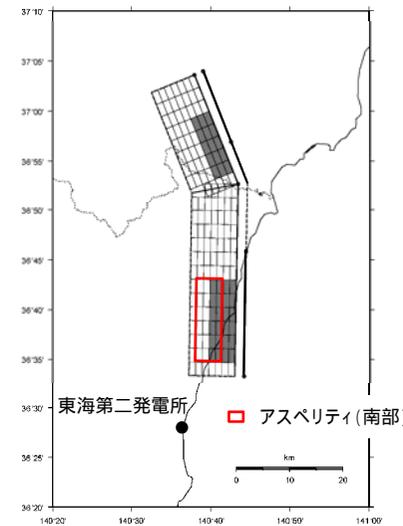
基本震源モデルのアスペリティ位置は安全側に断層の上端に設定しているが、その設定が敷地に近くなるように設定されていることを確認するため、南部のアスペリティ位置を断層幅方向に移動させた際の等価震源距離の比較を示す。



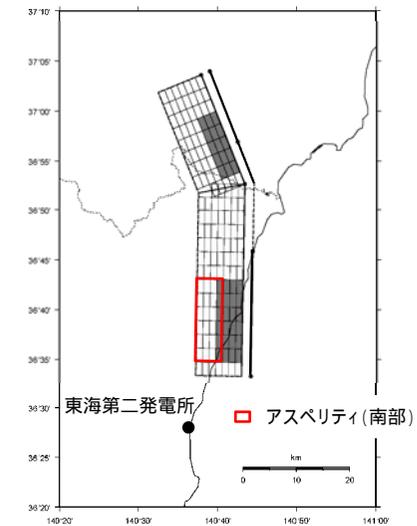
基本震源モデル(断層上端)



1マス移動



2マス移動



3マス移動(断層下端)

南部のアスペリティの断層幅方向への移動	等価震源距離 (km)
断層上端	26.3
1マス移動	26.7
2マス移動	27.2
3マス移動(断層下端)	28.0

断層全体の等価震源距離

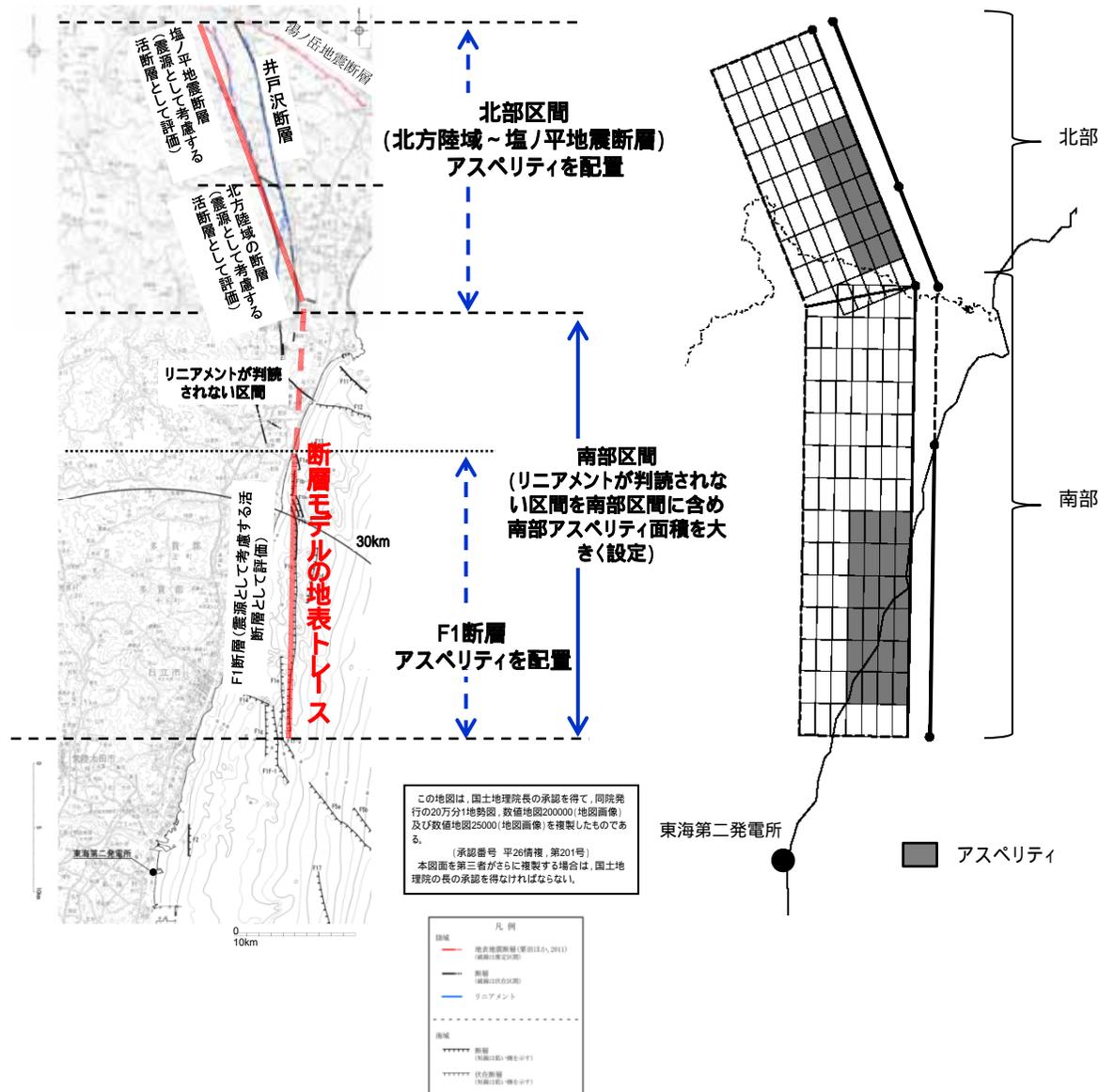
アスペリティを断層上端に配置するケースにおいて敷地へ最も近くなることを確認した。

## アスペリティ配置:2) 断層長さ方向のアスペリティ配置について

断層長さ方向のアスペリティ配置については、地質調査結果に基づき、南部区間のうち変位が確認されているF1断層に1つ、北部区間では断層の確認されている北方陸域の断層～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。

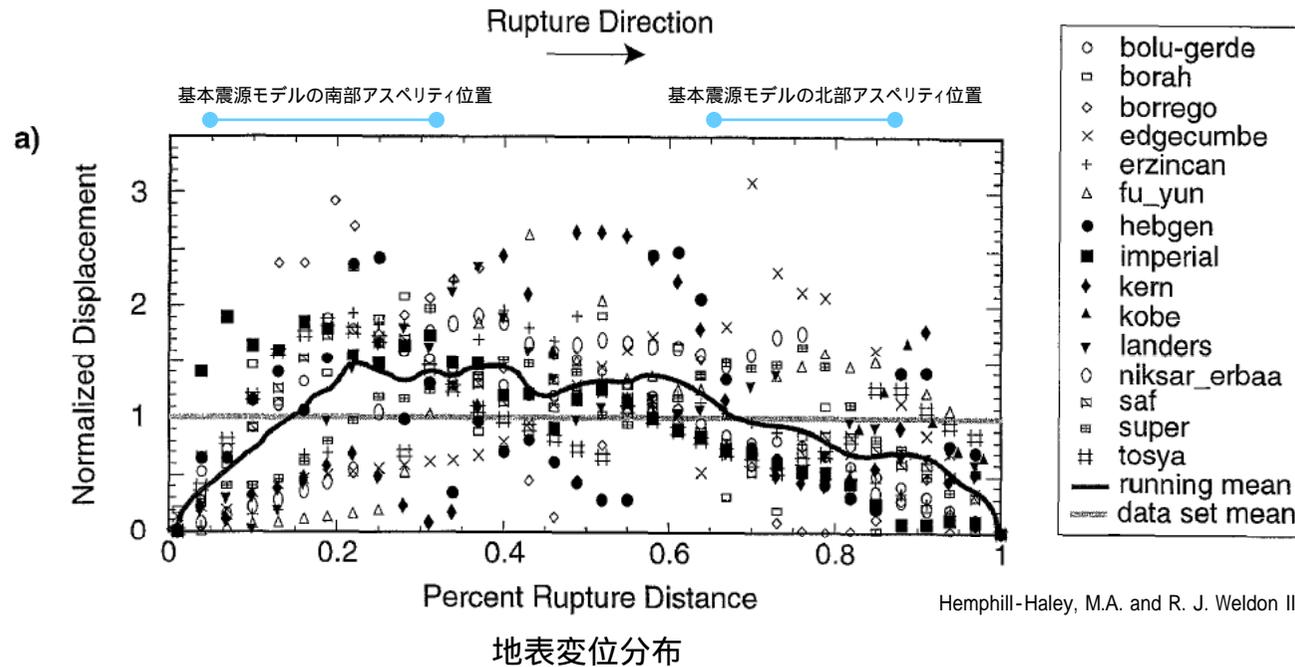
また、その際 Manighetti et al.(2005)等の知見を踏まえるとアスペリティのように大きなすべりが生じる領域とすべりが無い領域が隣接することは考えにくいことから、断層端部との間に1マス分背景領域を設定する。以下、下記観点で文献調査を行う。

- ・地表に現れた変位分布と断層端部の関係
- ・震源インバージョン解析で得られた震源でのすべり分布と断層端部の関係



## 2) 断層長さ方向のアスペリティ配置について: 文献調査 (1 / 3)

地表の断層変位分布と断層端部の関係について



Hemphill-Haley, M.A. and R. J. Weldon II (1999)に一部加筆

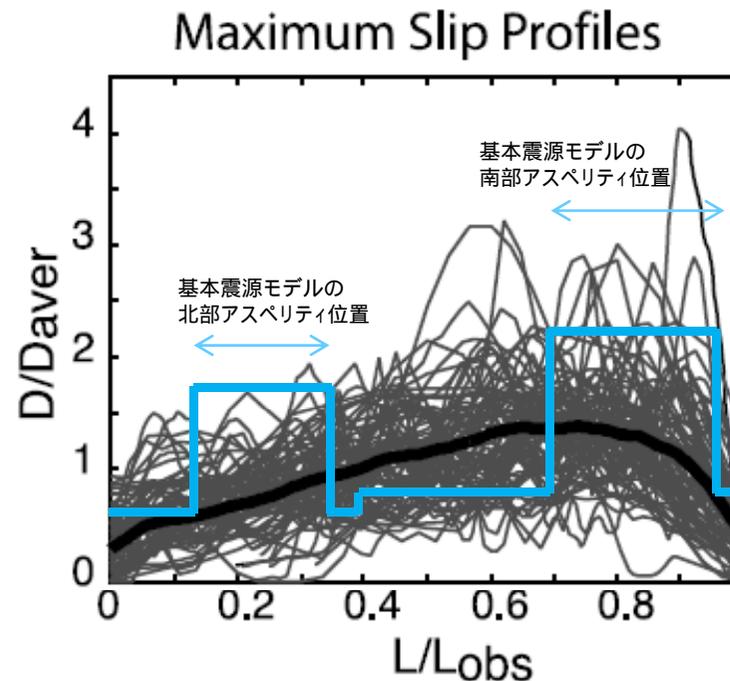
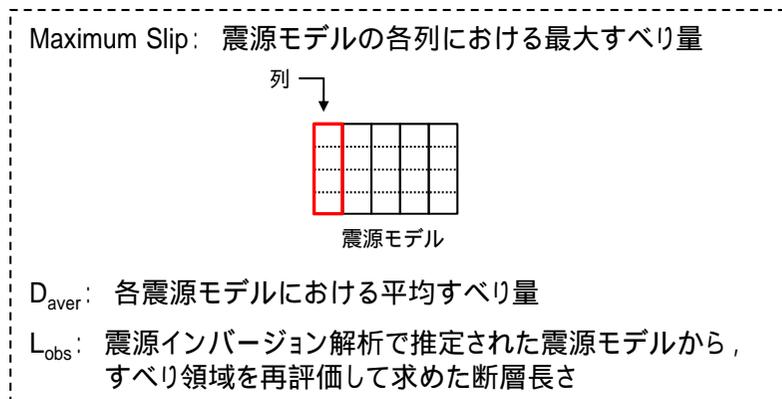
- Hemphill-Haley, M.A. and R. J. Weldon II (1999)は、断層変位から地震規模を推定する目的で近年の地震に関する地表断層変位データを収集・整理している。
- 上図に示す地震の地表変位分布データの平均は、破壊が開始する側の端部から、破壊域の全長に対し20%程度の位置に向けて変位量が急峻に立ち上がり、全長の45%程度は相対的に変位が大きい区間がフラットに続き、35%程度は徐々に変位が小さくなる区間としている。
- 上記地表変位分布では、断層端部においては変位は認められず、基本震源モデルにおいてアスペリティを端部ではなく、そこからある程度離隔することが合理的であると考えられる。

Hemphill-Haley, M.A. and R. J. Weldon II (1999) : Estimating prehistoric earthquake magnitude from point measurements of surface rupture, Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 89 no. 5, pp. 1264-1279.

## 2) 断層長さ方向のアスぺリティ配置について: 文献調査 (2 / 3)

震源のすべり分布と断層端部の関係について

- : 震源インバージョン解析で得られた Maximum Slipの分布 (77モデル)
- : Maximum Slipの77モデル平均
- : 基本震源モデルにおける最大すべり分布



Manighetti et al.(2005)に一部加筆

震源インバージョン解析で得られた震源断層の最大すべり量の分布

- Manighetti et al.(2005)では、77個の既存インバージョン解析モデルから得られた震源断層のすべり分布が $L_{obs}$ (震源インバージョン解析で推定された震源モデルから、すべり領域を再評価して求めた断層長さ)に対して示されている。
- 上記すべり分布では、断層端部でのすべり量は小さくなる傾向が見られる。
- これらの傾向からもアスぺリティを断層端部から離隔することが合理的と考えられる。そこで1マス離隔した基本震源モデルのすべり分布と比較すると両者は概ね対応していることがわかる。

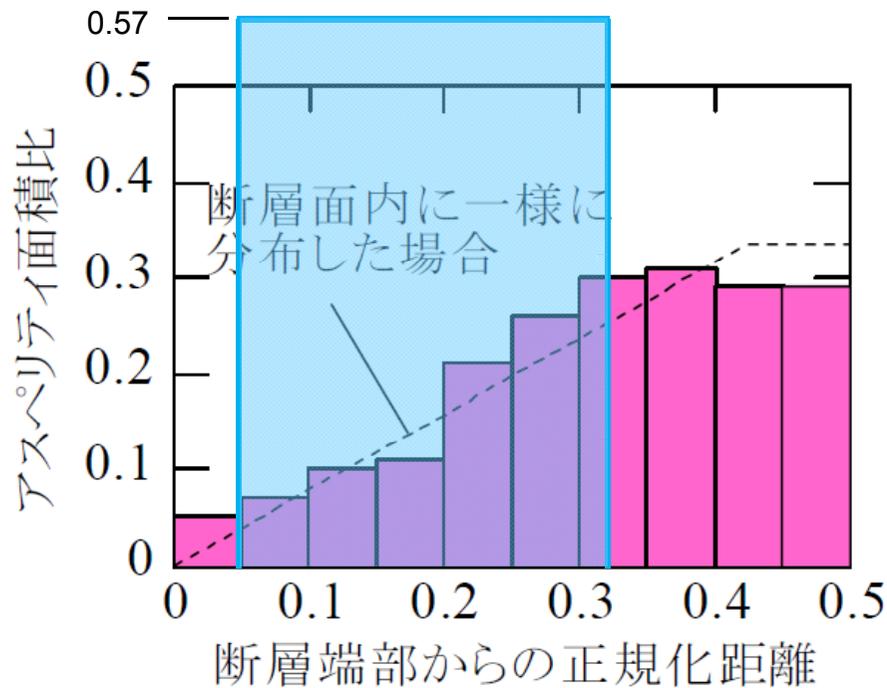
I. Manighetti, M. Campillo, C. Sammis, P. M. Mai, G. King (2005): Evidence for self-similar, triangular slip distributions on earthquakes: Implications for earthquake and fault mechanics, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL.110, B05302, doi:10.1029/2004JB003174, 2005

## 2) 断層長さ方向のアスペリティ配置について: 文献調査 (3 / 3)

## アスペリティ分布について

系井ほか(2009)では、断層パラメータのバラツキが地震動の応答スペクトルのバラツキの特性に与える影響を評価している。そのパラメータの一つとしてアスペリティ分布についても検討され、国内の内陸地殻内地震のうち既往研究によりすべり分布が求められている地震を対象に、断層面積に対してアスペリティが占める面積の割合(アスペリティ面積比)を断層走向方向の分布として整理している。具体的には、断層面の長さ $L$ を正規化し、 $0.05L$ 刻みの帯状領域でアスペリティ面積比を求め、検討対象とした全地震で平均している。

青網掛け: 基本震源モデルの南部アスペリティ面積比



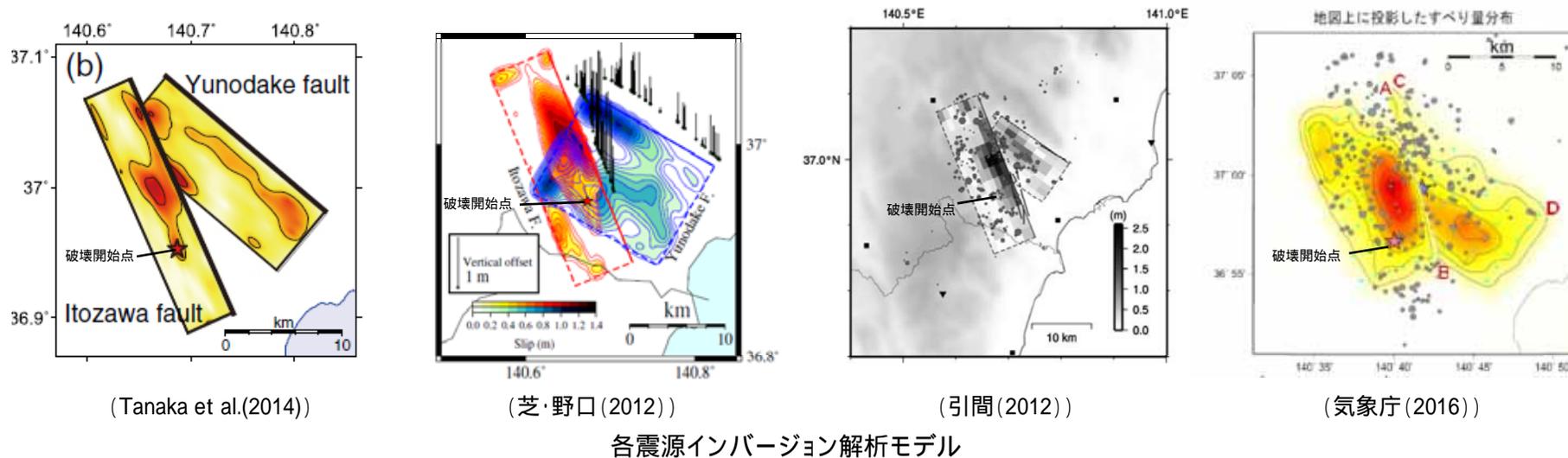
断層面内におけるアスペリティ面積比の分布

系井ほか(2009)に一部加筆

- 系井ほか(2009)の結果では、断層端部に近づくにつれてアスペリティ面積比が小さくなっている。
- 基本震源モデルの南部アスペリティについて、系井ほか(2009)と同様の方法でアスペリティ面積比の分布を求め、それを系井ほか(2009)の結果と比較して左図(青色のハッチ部分)に示す。
- 系井ほか(2009)のすべり分布は震源インバージョン解析結果に基づいているため、そのモデル端部は地表地震断層端部と一致しない可能性はあるものの、基本震源モデルでは、南部アスペリティ端部においてアスペリティ面積比を大きく設定していることから、1マス離隔した影響を補っていると考えられる。

## 破壊開始点位置：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すべり量の分布と破壊開始点の位置関係について示す。

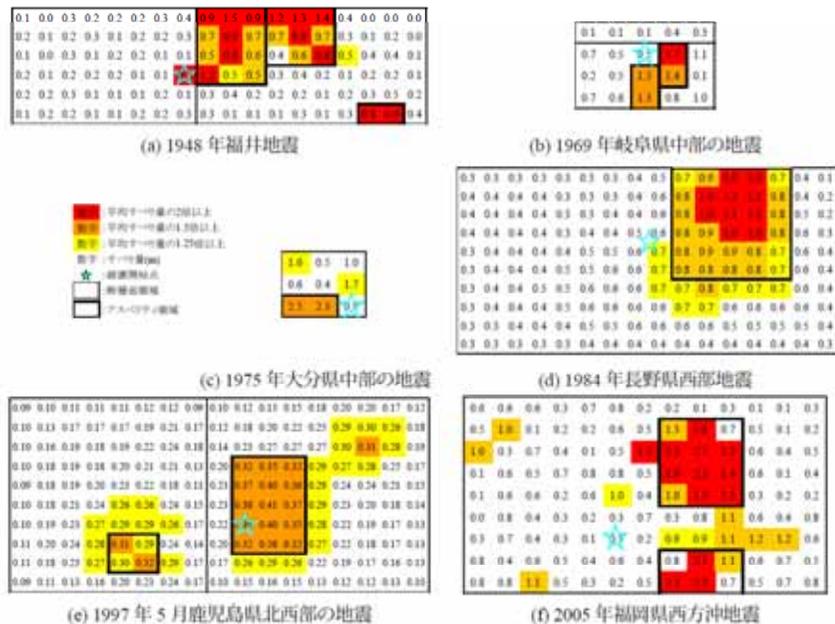


各文献における2011年福島県浜通りの地震のすべり量の分布と破壊開始点との対応をみると、井戸沢断層におけるすべり量の大きい領域の端部に破壊開始点が位置している。

# 破壊開始点位置:文献整理

## アスペリティ周辺からの破壊

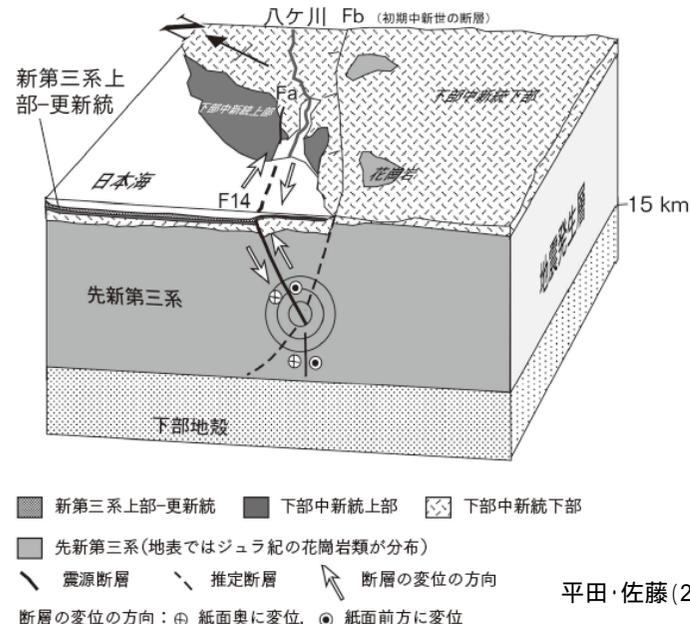
糸井ほか(2009)は、国内で発生した内陸地殻内地震のすべり分布を用いて特性化震源モデルの統計的特性を検討している。そのなかで、破壊開始点位置については、アスペリティ周辺部に分布していると指摘している。



特性化震源と破壊開始点位置

## 断層深部からの破壊

平田・佐藤(2007)は、2007年能登半島地震の本震の破壊は破壊域の中央部の下端で開始し上方に伝播したが、本震発生0.5秒前の初期破壊(小地震)は、本震の破壊開始点のさらに下方で発生したと推定している。



2007年能登半島地震の震源域

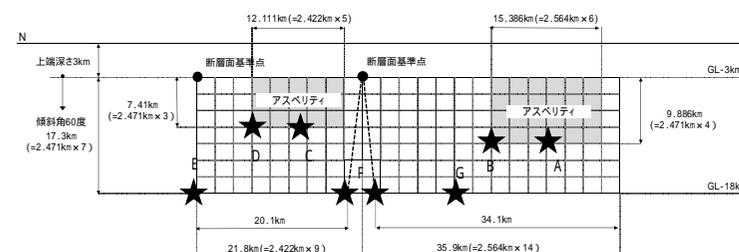
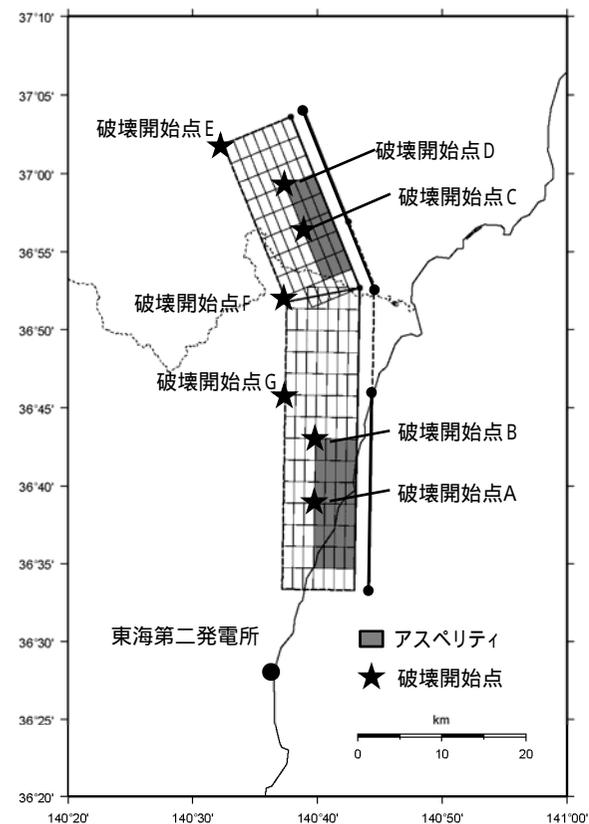
- 2011年福島県浜通りの地震の破壊開始点位置や糸井ほか(2009)による知見を参考に、破壊開始点についてはアスペリティ下端に設定することが基本と考えられる。
- しかしながら、平田・佐藤(2007)が示す2007年能登半島地震の事例のように、断層深部から破壊が始まる事例も確認されている。
- 以上を踏まえ、アスペリティ下端及び断層下端に破壊開始点を複数設定する。

平田直・佐藤比呂志(2007): 2007年能登半島地震の意味 防災のための活断層の考え方, 科学, 2007年6月号

## 破壊開始点位置:検討方針

破壊開始点の設定位置については、下記の方針で検討する。

- 破壊開始点について、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及び断層下端に設定する。
- 設定に際しては、破壊が敷地に向かう位置に複数設定する。具体的には各アスペリティ下端(中央及び北)と断層下端(中央及び北)に設定する。また、物理的観点から、ひずみの差が生じる可能性のあるF1断層の断層下端にも設定する。
- 基本震源モデルを対象に、経験的グリーン関数法により評価を実施し、影響の大きい破壊開始点を代表として選定し今後の地震動評価を行う。

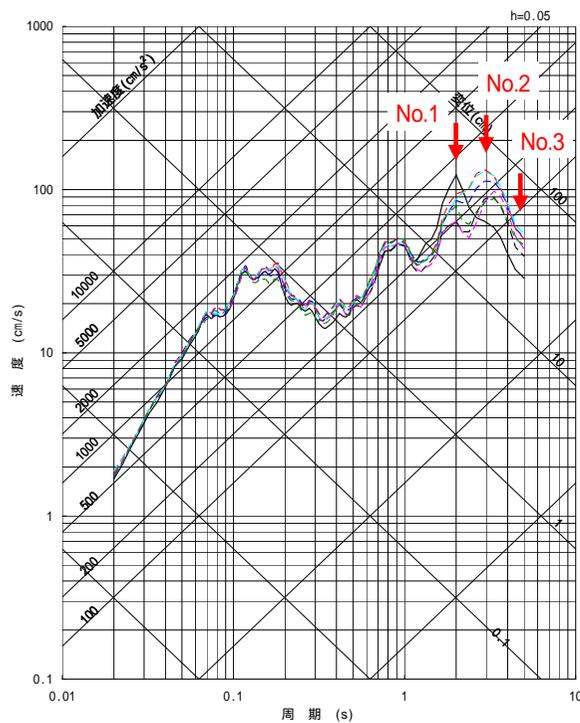


基本震源モデル

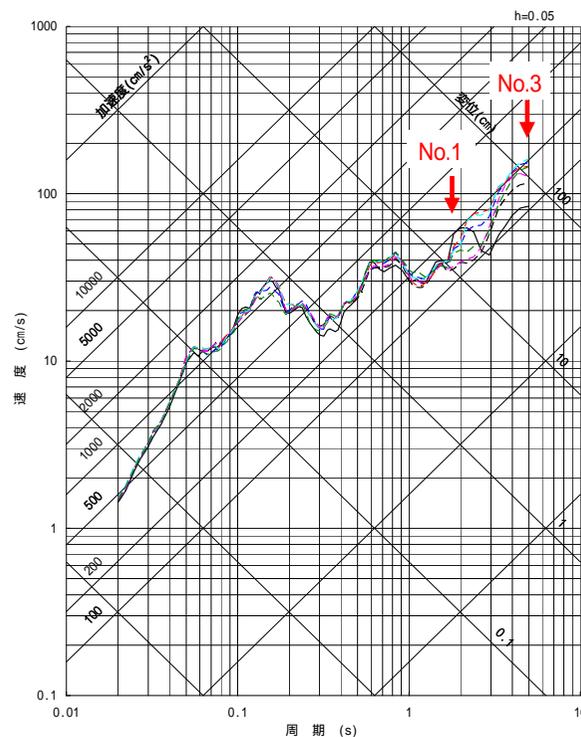
# 破壊開始点位置:破壊開始点の選定結果

各破壊開始点による地震動評価結果(平均応答スペクトル)

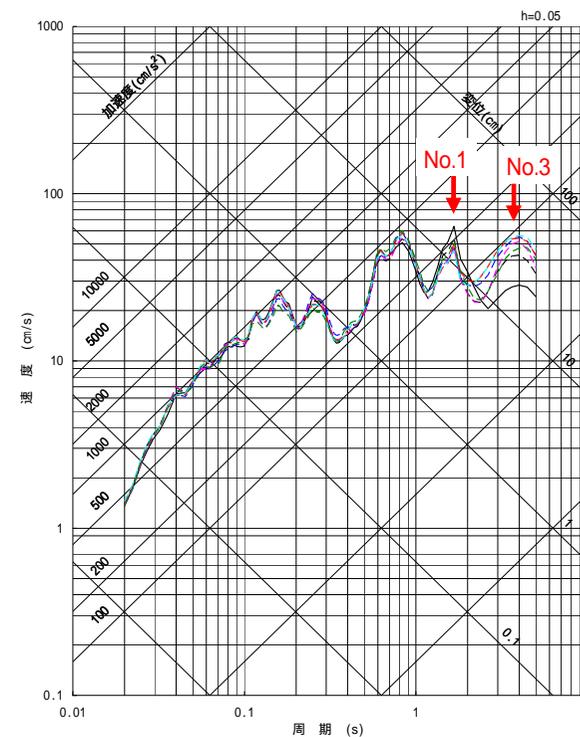
- 破壊開始点A(破壊開始点1)
- - - 破壊開始点B
- - - 破壊開始点C
- - - 破壊開始点D
- - - 破壊開始点E(破壊開始点2)
- - - 破壊開始点F(破壊開始点3)
- - - 破壊開始点G



NS成分



EW成分



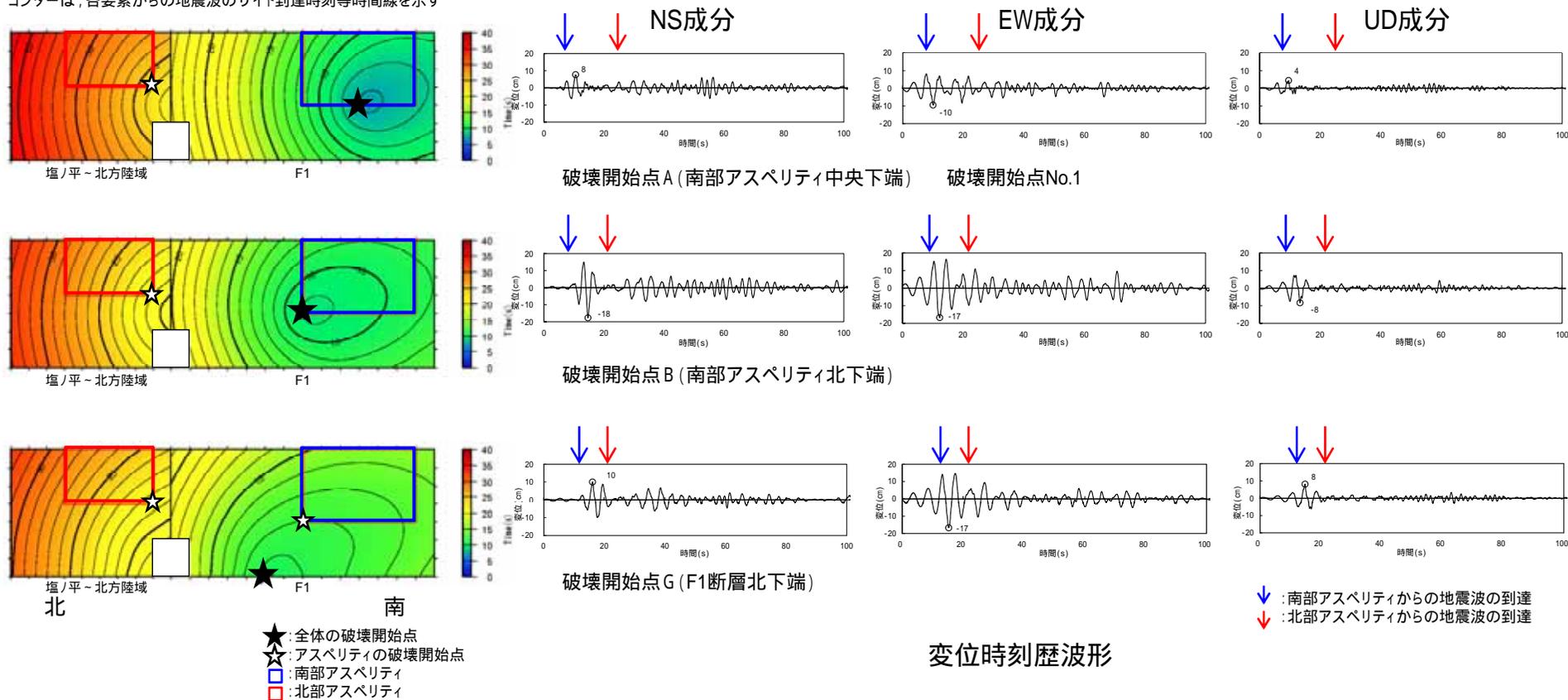
UD成分

短周期側においては、各破壊開始点の地震動評価結果は同様の傾向を示している。長周期側においては破壊開始点A、E、Fの影響がやや大きい。断層モデルを用いた手法による地震動評価の破壊開始点は、破壊開始点A、E、F(以降、それぞれ破壊開始点1、2、3と表記)で代表させる。

# 破壊開始点位置：破壊開始点の選定結果(時刻歴波形)

各破壊開始点による経時特性(南部区間から破壊するケース)

コンターは、各要素からの地震波のサイト到達時刻等時間線を示す

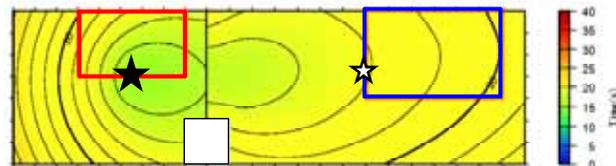


震源断層の南部から破壊させるケースでは、最初に敷地に近い南部アスペリティからの地震波が敷地へ到達し、その後時間差を  
おいて北部アスペリティからの地震波が敷地へ到達する。

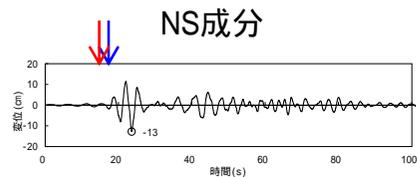
# 破壊開始点位置:破壊開始点の選定結果(時刻歴波形)

各破壊開始点による経時特性(北部区間から破壊するケース)

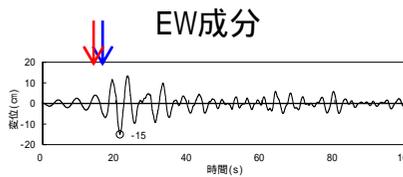
コンターは、各要素からの地震波のサイト到達時刻等時間線を示す



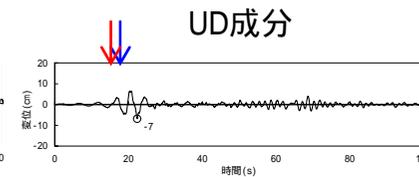
塩ノ平～北方陸域 F1



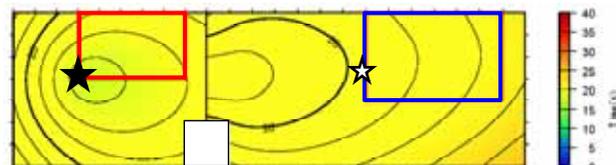
破壊開始点C(北部アスペリティ中央下端)



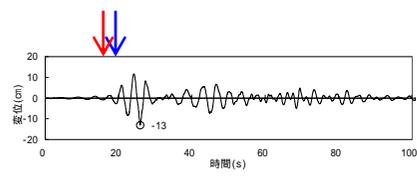
EW成分



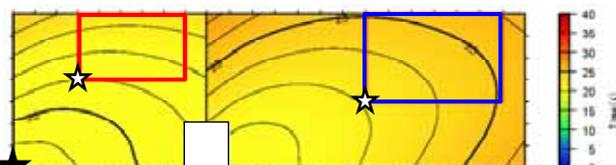
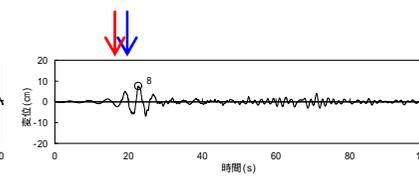
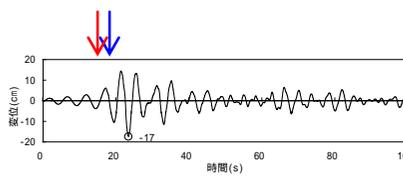
UD成分



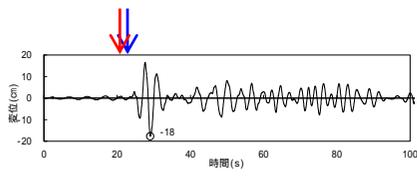
塩ノ平～北方陸域 F1



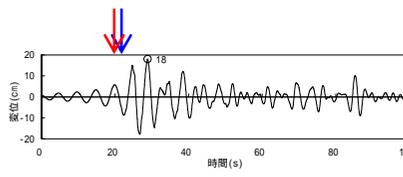
破壊開始点D(北部アスペリティ北下端)



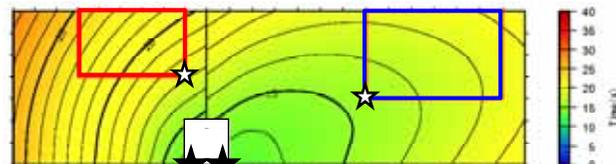
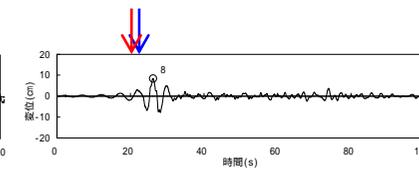
塩ノ平～北方陸域 F1



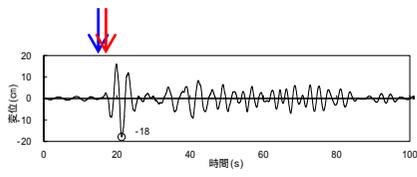
破壊開始点E(断層北下端)



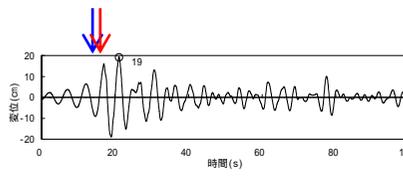
破壊開始点No.2



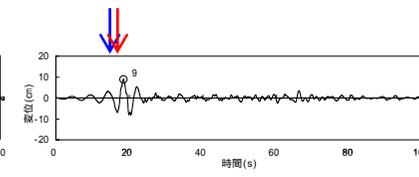
塩ノ平～北方陸域 F1



破壊開始点F(断層屈曲点下端)



破壊開始点No.3



変位時刻歴波形

↓ : 南部アスペリティからの地震波の到達  
 ↓ : 北部アスペリティからの地震波の到達

★: 全体の破壊開始点  
 ☆: アスペリティの破壊開始点  
 □: 南部アスペリティ  
 □: 北部アスペリティ

アイソクロン

震源断層の北部から破壊させるケースでは、南部、北部それぞれのアスペリティからの地震波の到達する時間差が短く、地震波が重なりやすくなっている。

# 短周期レベル：2011年福島県浜通りの地震に関する検討

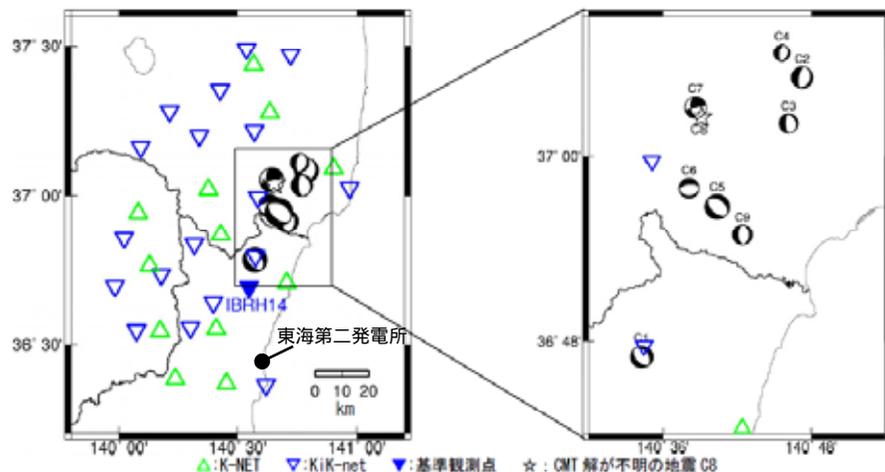
佐藤・堤 (2012) による正断層の地震の短周期レベルの推定

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

地震番号	発震時* (日本時間)			深さ* km	$M_J^*$	$M_0^{**}$ dyne·cm	$M_w^{**}$	$A^{***}$ dyne·cm/s <sup>2</sup>	$M_w^*$	
	年	月	日							
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

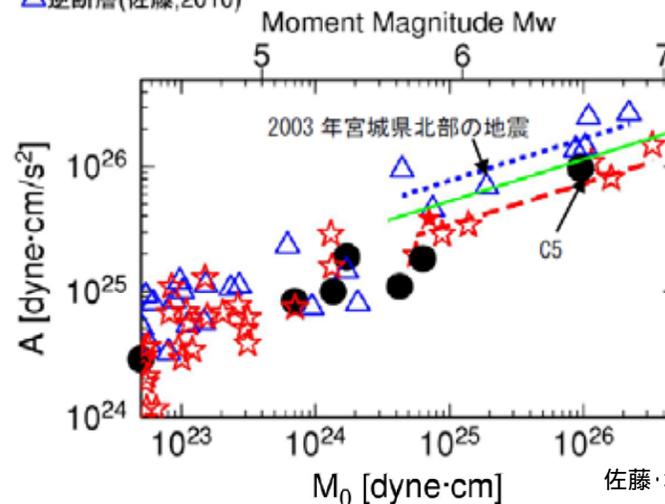
\*気象庁 \*\*F-net \*\*\*本研究



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) より抜粋

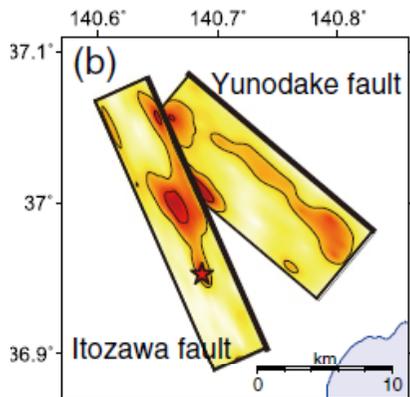
佐藤・堤 (2012) による福島県浜通りの地震群の地震モーメントと短周期レベルとの関係

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、強震動予測レシビと整合している。

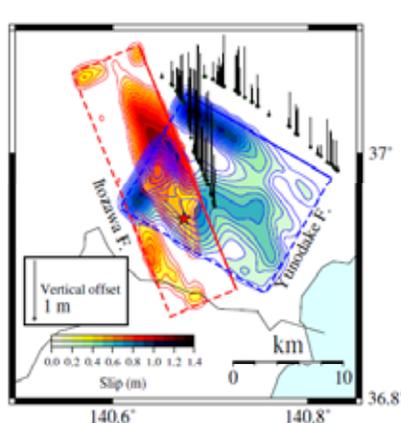
佐藤智美・堤英明(2012):2011年福島県浜通り付近の正断層の地震の短周期レベルと伝播経路・地盤増幅特性,日本地震工学会論文集 第12巻,第7号,2012

# 破壊伝播速度：2011年福島県浜通りの地震に関する検討

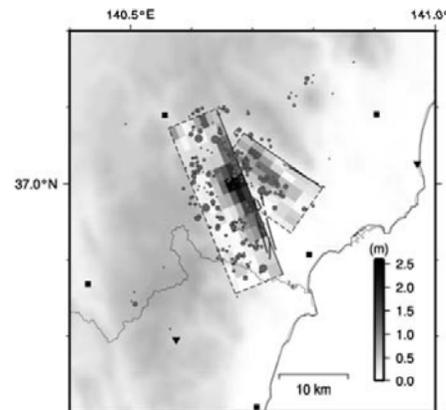
2011年福島県浜通りの地震の近地強震記録を用いた震源インバージョン解析を行った文献を収集し、破壊伝播速度の設定値について整理する。



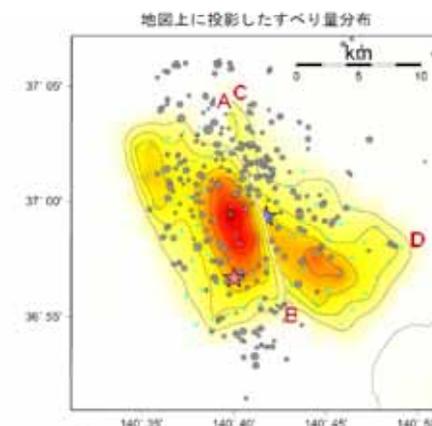
(Tanaka et al.(2014))



(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破壊伝播速度の整理

文献	破壊伝播速度 $V_r$ (km/s)	破壊伝播速度の設定
Tanaka et al.(2014)	2.04	$V_r=2.04, 2.21, 2.38, 2.55, 2.72, 2.89$ km/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	$V_r=0.72V_s, V_s=3.6$ km/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  $V_r$  は、 $0.72V_s$  (強震動予測レシビによる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 ]

## 2016年版強震動予測レシピとの関係

### 2016年版強震動予測レシピと2009年版強震動予測レシピに基づくパラメータ設定

2016年版強震動予測レシピでは、Fujii and Matsuura(2000)による平均応力降下量3.1MPaやSomerville et al.(1999)によるアスペリティ面積比22%を適用する範囲について「暫定的に、断層幅と平均すべり量とが飽和する目安となる $M_0=1.8E+10^{20}(N\cdot m)$ を上回る断層の地震を対象とする。」としていることから、地震モーメントが $5.21E+10^{19}(N\cdot m)$ であるF1断層、北方陸域の断層、塩ノ平地震断層の連動については、これら値の適用外となる。

そこで、F1断層、北方陸域の断層、塩ノ平地震断層の連動のパラメータを、2016年版強震動予測レシピに従い円形破壊面を仮定した方法により設定し、2009年版強震動予測レシピに基づいて設定した値との比較を行う。

項目	F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動	
	2009年版強震動予測レシピ (平均応力降下量3.1MPa, アスペリティ 面積比22%を適用)	2016年版強震動予測レシピ (円形破壊面を仮定)
断層長さ(km)	56.0	56.0
断層面積(km <sup>2</sup> )	969.7	969.7
地震モーメント $M_0(N\cdot m)$	5.21E+19	5.21E+19
アスペリティ面積 $S_a(km^2)$	212.9	358.7
アスペリティ面積比	0.220	0.371
平均応力降下量 (MPa)	3.10	4.22
アスペリティの応力降下量 $a(MPa)$	14.09	11.38
アスペリティの短周期レベル $A(N\cdot m/s^2)$	1.89E+19	1.98E+19
背景領域の地震モーメント $M_{0b}(N\cdot m)$	2.92E+19	1.35E+19

- F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動について, 2016年版強震動予測レシピに基づき円形破壊を仮定した方法でパラメータ設定を行うとアスペリティ面積比が40%近くになり, 現実的な値とはならない。また, 短周期レベルはほぼ同じ値になるものの, アスペリティの応力降下量は2009年版強震動予測レシピに基づく場合よりも2割程度小さく設定される。
- 以上のことから, F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動の地震動評価では, 2009年版強震動予測レシピに基づき平均応力降下量3.1MPaやアスペリティ面積22%を適用してパラメータ設定を行う。

## 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した。また，断層の分布状況から震源を南部，北部に区分した。
- ・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，安全側の設定となっていることを確認した。(参考資料2)

### 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，断層幅が厚くなるように，断層上端深さを3km，断層下端深さを18kmと設定した。

### 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した。
- ・断層傾斜角については，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度と設定した。

### アスペリティ位置

- ・断層幅方向の配置については，断層上端に配置していることが安全側の設定であることを確認した。
- ・断層長さ方向の配置については，地質調査結果により，南部ではF1断層に一つ，北部では北方陸域の断層～塩ノ平地震断層に一つ，それぞれ敷地に近くなるように配置し，その際，Manighetti et al.(2005)等の知見に基づき，断層端部とアスペリティの間に1マス分の背景領域を設けた。

### 破壊開始点位置

糸井ほか(2009)や平田・佐藤(2007)に基づき設定した7点の破壊開始点の中から，敷地への影響の大きい3点で代表させることとした。

### 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した。

### 2016年版強震動予測レシピとの関係

2016年版強震動予測レシピに基づいて断層パラメータ設定を行うと非現実的な値となるため，2009年版強震動予測レシピに基づきパラメータ設定を行った。

# 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	$M_0 = (S / (4.24 \times 10^{-11}))^2 / 10^7$ 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 <sup>2</sup> )	3.50E+10	3.50E+10	3.50E+10	$\mu = 2.7g/cm^3, v = 3.6km/s$ ( $\mu$ は敷地周辺を対象にした地震波速度トモグラフィ, $v$ 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 (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	-	-	$A = 2.46 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3}$	
アスベリ テイ	面積S <sub>a</sub> (km <sup>2</sup> )	212.9	79.7	133.2	$S_a = 0.22S$
	平均すべり量D <sub>a</sub> (cm)	307.7	260.1	336.2	$D_a = 2D$
	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 $\sigma_a$ (MPa)	14.09	14.09	14.09	$\sigma_a = \mu \times S / S_a$
	短周期レベルA(N・m/s <sup>2</sup> )(参考)	1.89E+19	1.16E+19	1.49E+19	$A = 4 \times r_a \times \sigma_a^2$
背景領 域	面積S <sub>b</sub> (km <sup>2</sup> )	755.0	282.7	472.3	$S_b = S - S_a$
	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>0b</sub> (N・m)	2.92E+19	9.24E+18	1.99E+19	$M_{0b} = M_0 - M_{0a}$
	実効応力 $\sigma_b$ (MPa)	2.82	2.82	2.82	$\sigma_b = 0.2 \times \sigma_a$

---

## 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に基づき設定できるもの      それぞれ独立させて考慮する。

【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。

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
認識論的 不確かさ	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DDT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。
	断層傾斜角	60度(西傾斜)	・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。 ・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。
	アスペリティ位置	敷地に近い位置に配置	【断層幅方向の配置】 安全側に断層上端に配置しているため不確かさは考慮しない。 【断層長さ方向の配置】 地質調査結果により、南部ではF1断層に一つ、北部では北方陸域の断層～塩ノ平地震断層の一つ、それぞれ敷地に近くなるように配置し、その際、Manighetti et al.(2005)等の知見に基づき、断層端部とアスペリティの間に1マス分の背景領域を設けている。しかしながら、Manighetti et al.(2005)で示されたすべり分布の断層端部におけるばらつきを考慮し、断層長さ方向の配置については1マス空けずに断層端部にアスペリティを配置したケースを不確かさとして考慮する。
	短周期レベル	強震動予測レシビの 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。
	破壊伝播速度	Geller(1976)による 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	破壊開始点	複数設定	各不確かさと重畳させる。

## 不確かさの考慮

### 不確かさの考慮

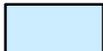
F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動による地震に関する各パラメータについて, 地震動への影響の程度を検討し, 敷地に大きな影響を与えると考えられるパラメータに対して不確かさを考慮する。

評価ケース	認識論的不確かさ					偶然的な不確かさ
	断層上端 深さ <sup>1</sup>	断層下端 深さ <sup>2</sup>	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

# 断層パラメータ：短周期レベルの不確かさ

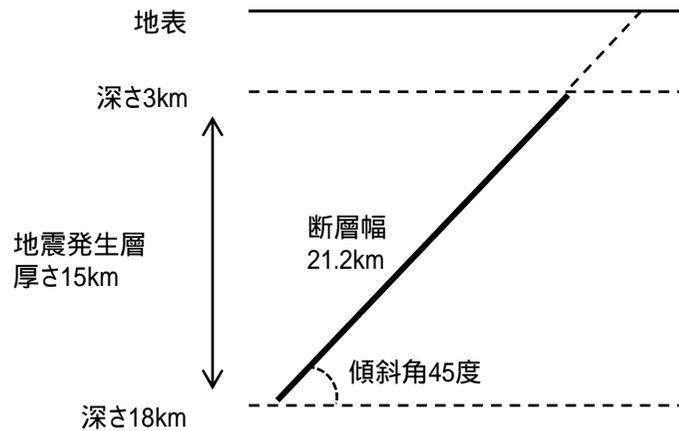
断層パラメータ(短周期レベルの不確かさを考慮したモデル)

項目	設定値			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	$M_0 = (S / (4.24 \times 10^{-11}))^2 / 10^7$ 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 <sup>2</sup> )	3.50E+10	3.50E+10	3.50E+10	$\mu = 2.7g/cm^3, \nu = 3.6km/s$ ( $\nu$ は敷地周辺を対象にした地震波速度トモグラフィ, $\mu$ 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 (MPa)	3.1	3.1	3.1	Fujii and Matsuura(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	-	-	$A = 2.46 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3}$	
アスベリテイ	面積S <sub>a</sub> (km <sup>2</sup> )	212.9	79.7	133.2	$S_a = 0.22S$
	平均すべり量D <sub>a</sub> (cm)	307.7	260.1	336.2	$D_a = 2D$
	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 $\sigma_a$ (MPa)	21.14	21.14	21.14	$\sigma_a = \nu \times S / S_a \times 1.5$
	短周期レベルA(N・m/s <sup>2</sup> )(参考)	2.83E+19	1.73E+19	2.24E+19	$A = 4 \nu \sigma_a / \nu_a^2$
背景領域	面積S <sub>b</sub> (km <sup>2</sup> )	755.0	282.7	472.3	$S_b = S - S_a$
	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>0b</sub> (N・m)	2.92E+19	9.24E+18	1.99E+19	$M_{0b} = M_0 - M_{0a}$
	実効応力 $\sigma_b$ (MPa)	4.23	4.23	4.23	$\sigma_b = 0.2 \sigma_a$

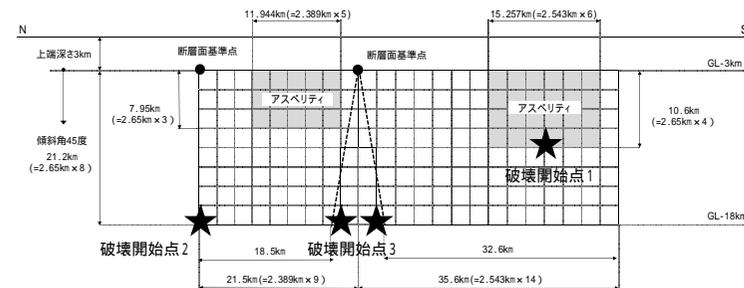
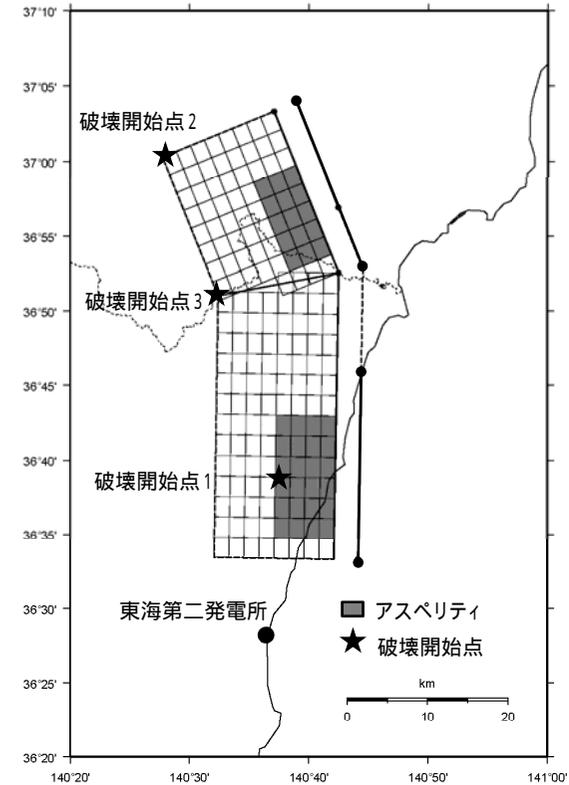
# 断層傾斜角の不確かさについて

## 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。



断面図 (模式図)



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

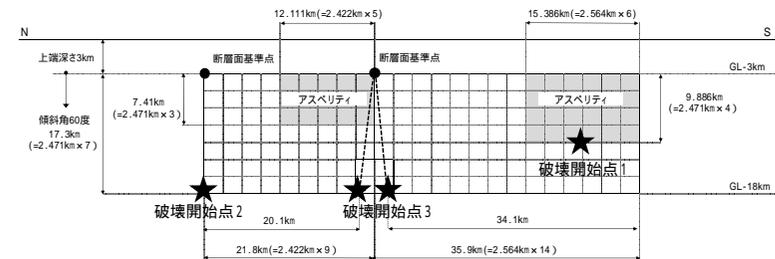
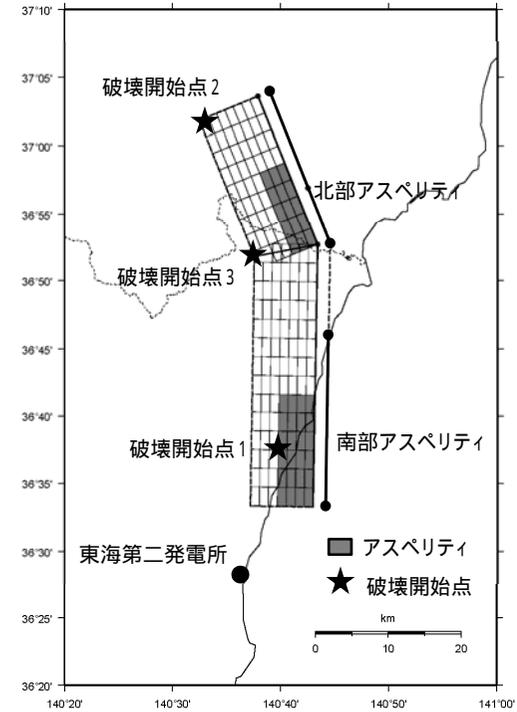
断層パラメータ(断層傾斜角の不確かさを考慮したモデル)

項目	設定値			設定方法	
	全体	北部	南部		
断層上端長さ(km) 断層下端長さ(km)	57.1 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	$M_0 = (S / (4.24 \times 10^{-11}))^2 / 10^7$ 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 <sup>2</sup> )	3.50E+10	3.50E+10	3.50E+10	$\mu = 2.7g/cm^3, v = 3.6km/s$ ( $v$ は敷地周辺を対象にした地震波速度トモグラフィ, $v$ 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	$D = M_0 / (\mu S)$	
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	-	-	$A = 2.46 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3}$	
アスベリテイ	面積S <sub>a</sub> (km <sup>2</sup> )	252.3	93.3	159.0	$S_a = 0.22S$
	平均すべり量D <sub>a</sub> (cm)	364.6	305.7	399.2	$D_a = 2D$
	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 $\sigma_a$ (MPa)	14.09	14.09	14.09	$\sigma_a = \mu \times S / S_a$
	短周期レベルA(N・m/s <sup>2</sup> )(参考)	2.06E+19	1.25E+19	1.63E+19	$A = 4 \times r_a \times \sigma_a^2$
背景領域	面積S <sub>b</sub> (km <sup>2</sup> )	894.6	330.7	563.9	$S_b = S - S_a$
	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>0b</sub> (N・m)	4.10E+19	1.27E+19	2.83E+19	$M_{0b} = M_0 - M_{0a}$
	実効応力 $\sigma_b$ (MPa)	2.82	2.82	2.82	$\sigma_b = 0.2 \times \sigma_a$

# アスペリティ位置の不確かさについて

## アスペリティの配置について

- 基本震源モデルのアスペリティ位置については、敷地に近くなるよう配置することを基本とするが、Hemphill-Haley, M.A. and R. J. Weldon II (1999)の地表変位分布やManighetti et al.(2005)の震源におけるすべり分布に関する知見等を参考に、断層端部とアスペリティの間に1マス分の背景領域を設ける。
- しかしながら、Manighetti et al.(2005)で示されたすべり分布の断層端部におけるばらつきを考慮し、1マス空けずに断層端部にアスペリティを配置したケースを不確かさとして考慮する。
- その際、北部のアスペリティ位置についても、基本震源モデルから1マス近づけることとする。



アスペリティ位置の不確かさを考慮した震源モデル

# 断層パラメータ：アスペリティ位置の不確かさ

断層パラメータ(アスペリティ位置の不確かさを考慮したモデル)

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	$M_0 = (S / (4.24 \times 10^{-11}))^2 / 10^7$ 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 <sup>2</sup> )	3.50E+10	3.50E+10	3.50E+10	$\mu = 2.7g/cm^3, = 3.6km/s$ ( 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	$D = M_0 / (\mu S)$	
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	-	-	$A = 2.46 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3}$	
アスペリティ	面積S <sub>a</sub> (km <sup>2</sup> )	212.9	79.7	133.2	$S_a = 0.22S$
	平均すべり量D <sub>a</sub> (cm)	307.7	260.1	336.2	$D_a = 2D$
	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)	14.09	14.09	14.09	<sub>a</sub> = $\times S / S_a$
	短周期レベルA(N・m/s <sup>2</sup> )(参考)	1.89E+19	1.16E+19	1.49E+19	$A = 4 r_a a^2$
背景領域	面積S <sub>b</sub> (km <sup>2</sup> )	755.0	282.7	472.3	$S_b = S - S_a$
	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>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>

---

1. 評価フロー	5
2. 敷地周辺の活断層分布	6
3. 敷地周辺の地震発生状況	8
4. 検討用地震の選定	15
4.1 地震発生層の設定	16
4.2 検討用地震の選定	30
5. 震源モデルの設定	45
5.1 地質調査結果の概要	46
5.2 基本震源モデルの設定	47
5.3 不確かさを考慮した震源モデルの設定	79
6. 地震動評価	87
6.1 地震動評価手法	88
6.2 応答スペクトル手法による評価結果	89
6.3 断層モデル手法による評価結果	90
7. 参考文献	104
参考資料	
1 補正係数の算出に用いた地震リスト	105
2 基本震源モデル設定における保守性の考え方	110
3 統計的グリーン関数法による評価	112

## 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(36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とする。

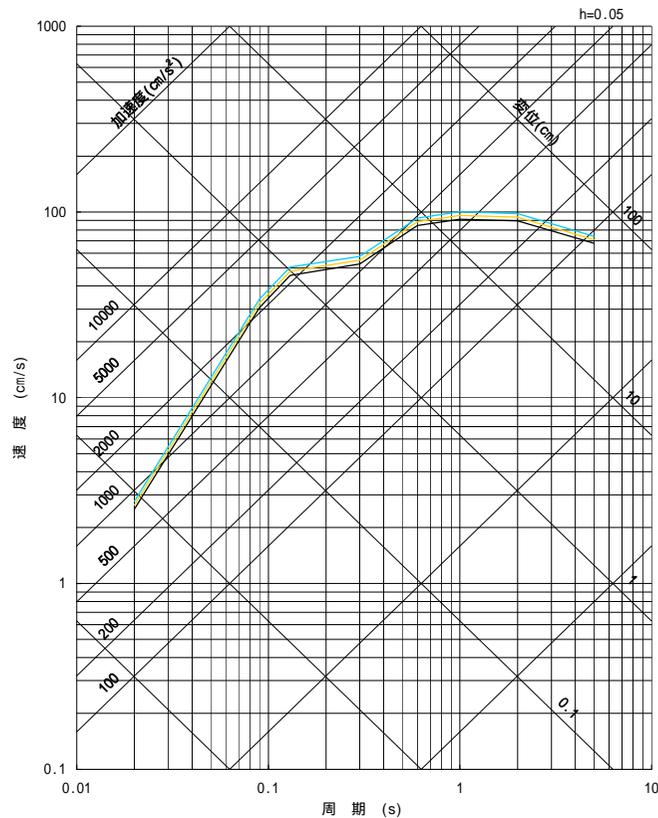
### 応答スペクトルに基づく手法による評価ケース

評価ケース	地震規模 M	等価震源距離 (km)	補正係数
基本震源モデル	7.8	26.3	考慮
短周期レベルの不確かさ	7.8	26.3	考慮
断層傾斜角の不確かさ	7.8	25.3	考慮
アスペリティ位置の不確かさ	7.8	24.4	考慮

### 断層モデルを用いた手法による地震動評価

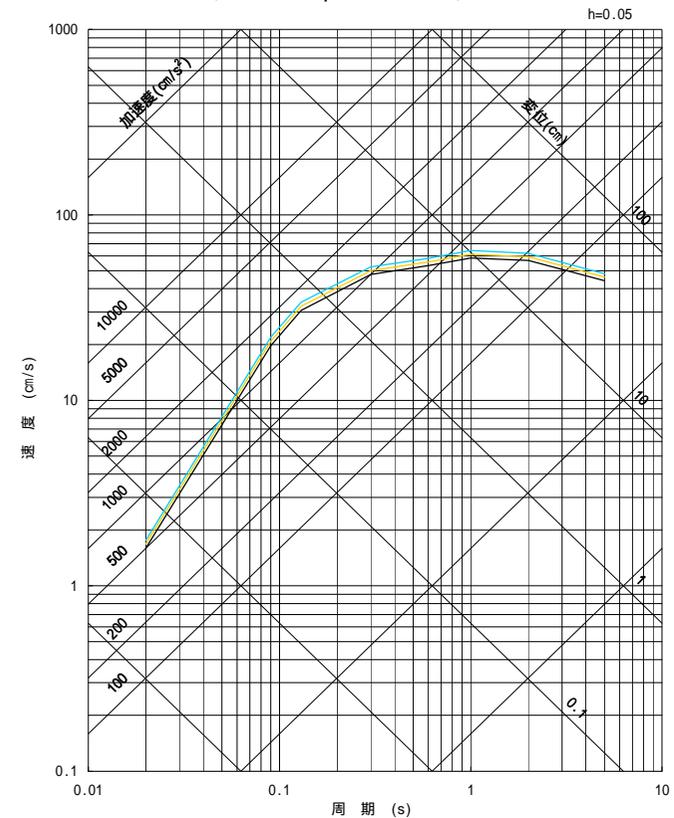
震源近傍で発生した適切な要素地震の観測記録が敷地で得られているため、経験的グリーン関数法により評価する。波形合成はDan et al.(1989)の手法に基づき実施する。

## 6.2 応答スペクトル手法による評価結果



水平成分

- 基本震源モデル及び短周期レベルの不確かさを考慮 (M7.8,  $X_{eq} = 26.3$  km)
- 断層傾斜角の不確かさを考慮 (M7.8,  $X_{eq} = 25.3$  km)
- アスペリティ位置の不確かさを考慮 (M7.8,  $X_{eq} = 24.4$  km)



鉛直成分

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(1 / 3)

## 要素地震の選定のフロー

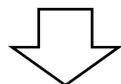
1996年9月以降に東海第二発電所で観測された記録を対象とする。

### 発生位置

想定断層面付近で発生しており、震源から到来する伝播経路特性が反映されている地震



東北地方太平洋沖地震の発生後福島県から茨城県にかけて発生している内陸地殻内地震の中から選定する。



### 規模

要素地震として適切な規模の地震



クラック破壊を想定した  $\sigma^2$ モデルが適用できるM5程度を目安とする。



### 震源メカニズム

震源メカニズムが明らかである地震のうち、放射特性が同様であり、想定地震と同様の震源メカニズムを有する地震



想定地震と同様の震源メカニズムを有する正断層のメカニズムの地震を選定する。

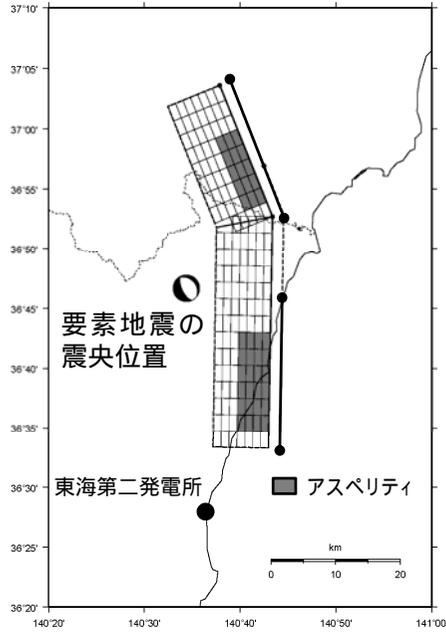


2011年4月14日の地震(M5.1)を用いることとする。

# 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。

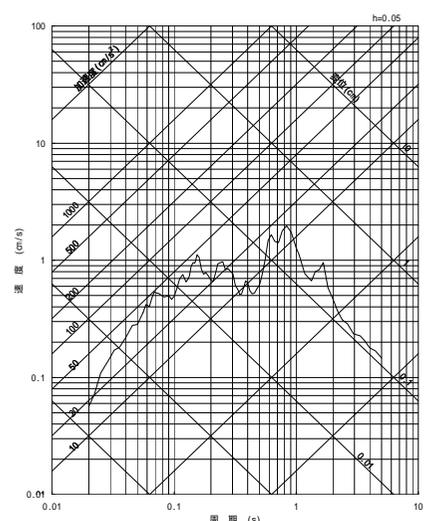
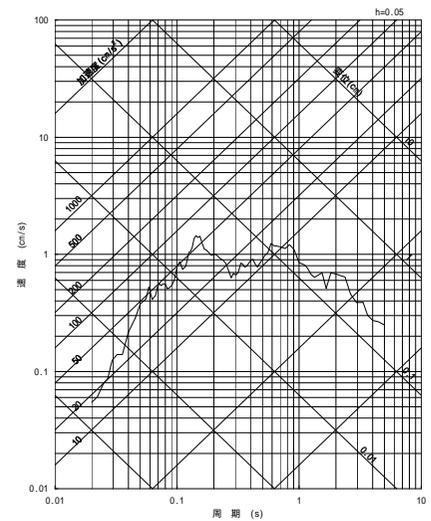
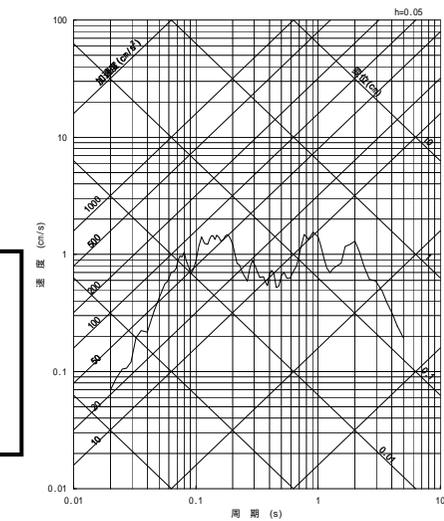
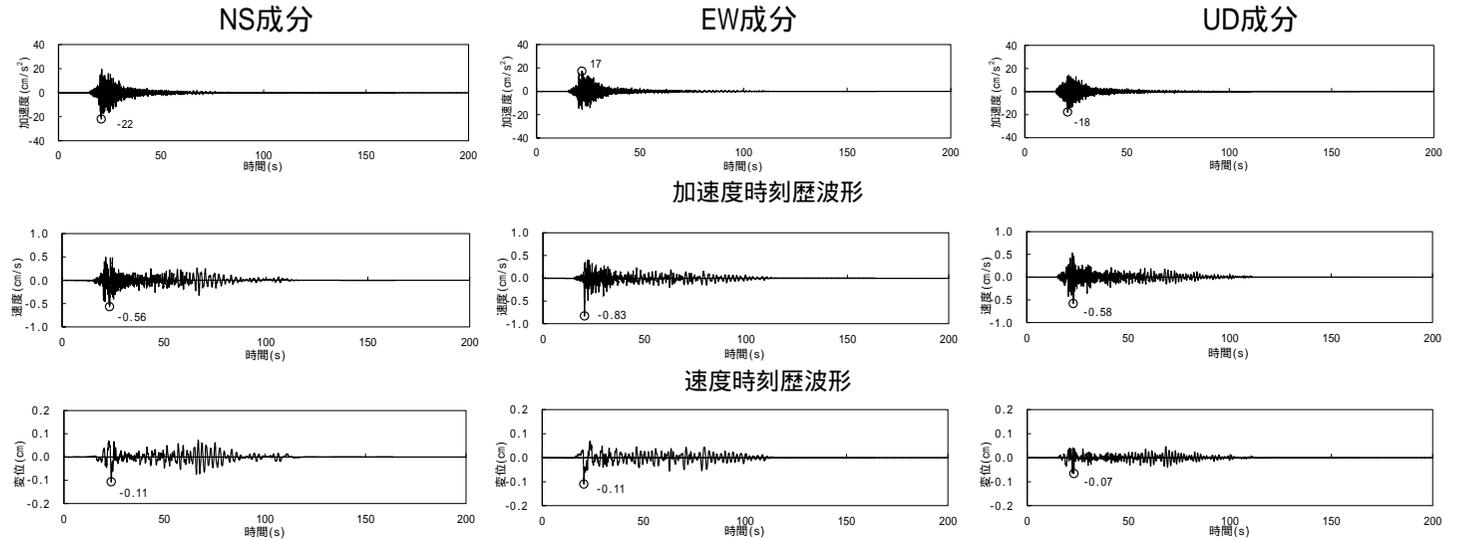


要素地震の震央位置

発生日	2011年4月14日
地震規模	1 M5.1
震源深さ	1 8.8km
地震モーメント	2 2.41E+16(N・m)

要素地震のメカニズム解(下半球)

- 1 気象庁による。
- 2 F-netによる。



応答スペクトル

要素地震の解放基盤波

# 要素地震の選定 ( 3 / 3 )

## 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。

Boore (1983) 等を参考に, 敷地の基盤における変位フーリエスペクトルを下式でモデル化する。

$$U(f) = \frac{R_{\theta\phi} \cdot FS}{4\pi\rho\beta^3} \cdot \frac{M_0}{1+(f/f_c)^2} \cdot \frac{1}{R} \cdot \exp\left(-\pi f R / Q(f)\beta\right) \cdot \sqrt{\frac{\rho\beta}{\rho_s\beta_s}}$$

ここで

- $U(f)$  : 観測記録の変位フーリエスペクトル
- $M_0$  : 地震モーメント
- $f_c$  : コーナー周波数
- $R$  : 放射係数(等方の場合の二乗和平均値0.63と仮定)
- $FS$  : 地表面における増幅率(地中では1とする)
- $\rho_s$  : 震源の地盤密度(内陸地殻内の値として2.7g/cm<sup>3</sup>)
- $\beta_s$  : 震源の地盤せん断波速度(内陸地殻内の値として3.6km/s)
- $\rho$  : サイト基盤(観測点)における地盤密度とせん断波速度
- $\beta$  : 震源距離
- $Q(f)$  : Q値で,  $Q=110f^{0.69}$  (佐藤(1994))より与える。

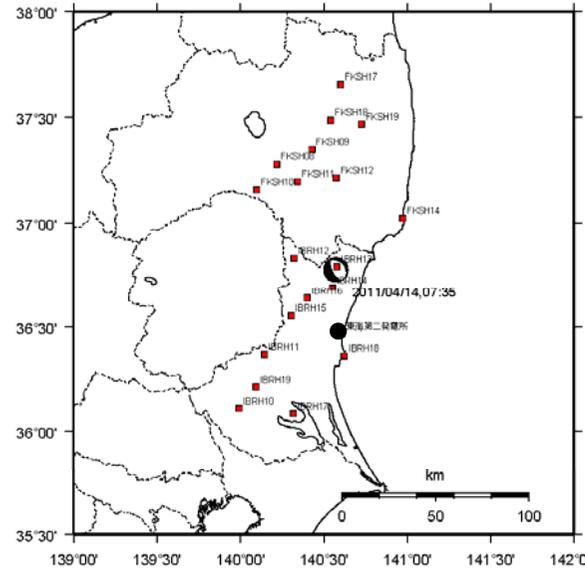
地震モーメントについては, F-netを用いると, 変位震源スペクトル $S(f)$ は以下のように求められる。

$$S(f) = \frac{M_0}{1+(f/f_c)^2} = U(f) \cdot \left\{ \frac{R_{\theta\phi} \cdot FS}{4\pi\rho\beta^3} \cdot \frac{1}{R} \cdot \exp\left(-\pi f R / Q(f)\beta\right) \cdot \sqrt{\frac{\rho\beta}{\rho_s\beta_s}} \right\}$$

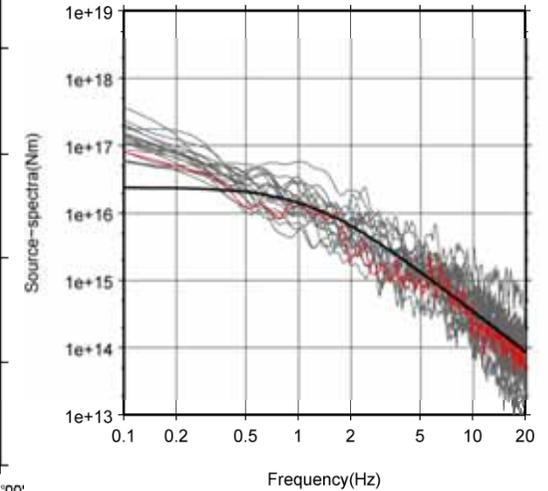
ここで, 短周期レベル(A)を観測記録から評価した加速度震源スペクトルの $f=2 \sim 5$ Hzの平均値により求め, 下式に示すBrune (1970)より応力降下量を求める。

$$A = (2\pi f_c)^3 \cdot M_0$$

$$f_c = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{7}{16} \right)^{1/6} \cdot \beta \cdot \left( \frac{\Delta\sigma}{M_0} \right)^{1/3}$$



■ 検討に用いたKiK-net等観測点



— 各観測点で求めた震源スペクトル  
— 東海第二発電所の観測点で求めた震源スペクトル  
— 2モデルによる震源スペクトル

要素地震の震源スペクトルの推定結果

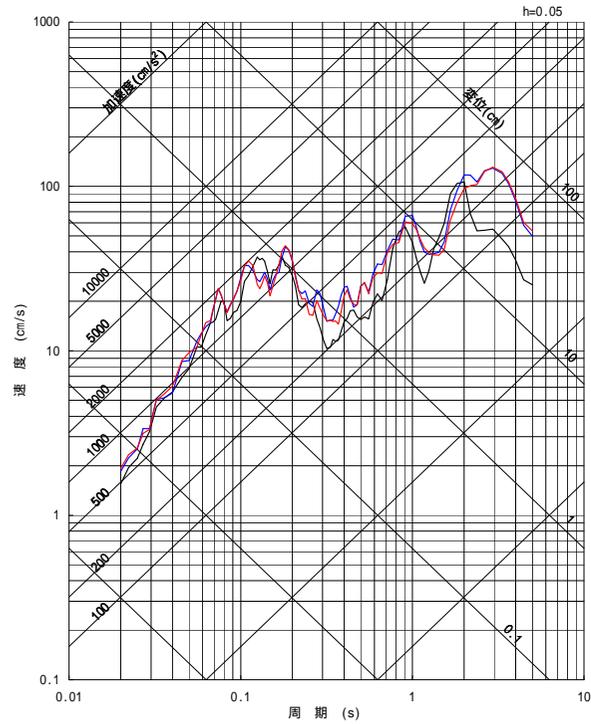
要素地震の諸元

発生日	震央位置		M	震源深さ (km)	地震モーメント $M_0$ (N·m)	コーナー周波数 $f_c$ (Hz)	応力降下量 (MPa)
	緯度 (度)	経度 (度)					
2011年4月14日	36.778	140.573	5.1	8.8	$2.41 \times 10^{16}$	1.2	7.54

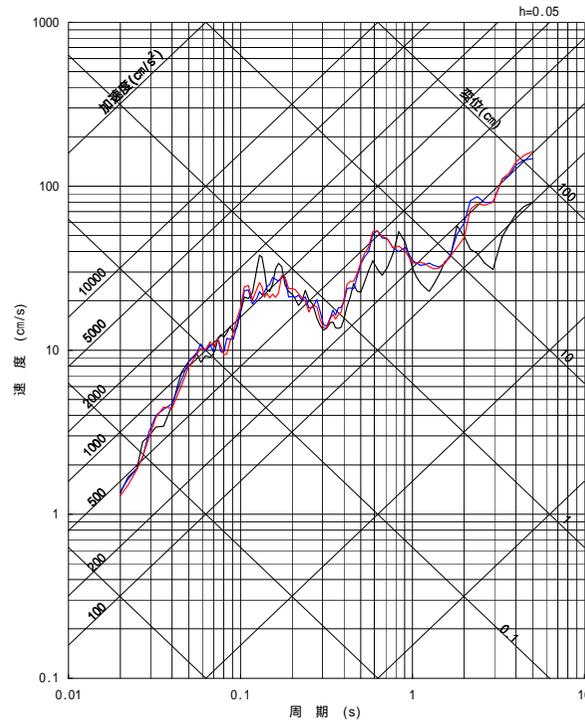
# 断層モデル手法による評価結果: 基本震源モデル

基本震源モデルによる評価結果の応答スペクトル

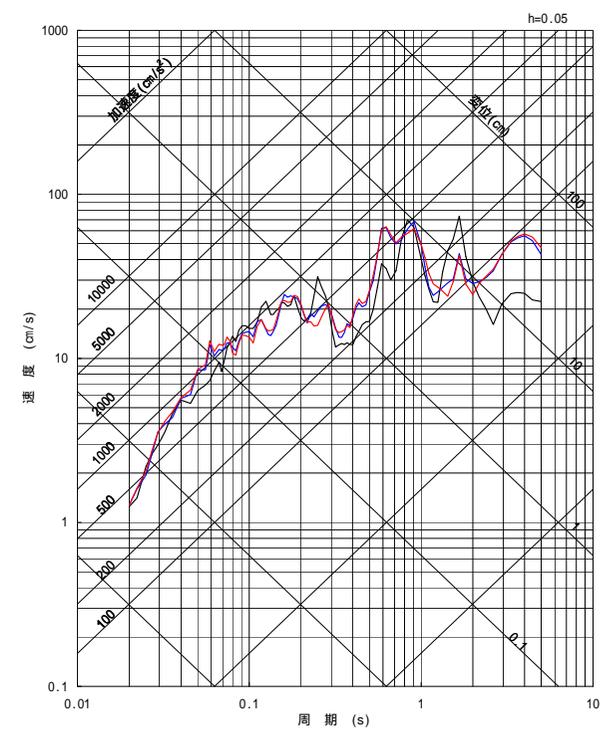
- 破壊開始点 1
- 破壊開始点 2
- 破壊開始点 3



NS成分



EW成分

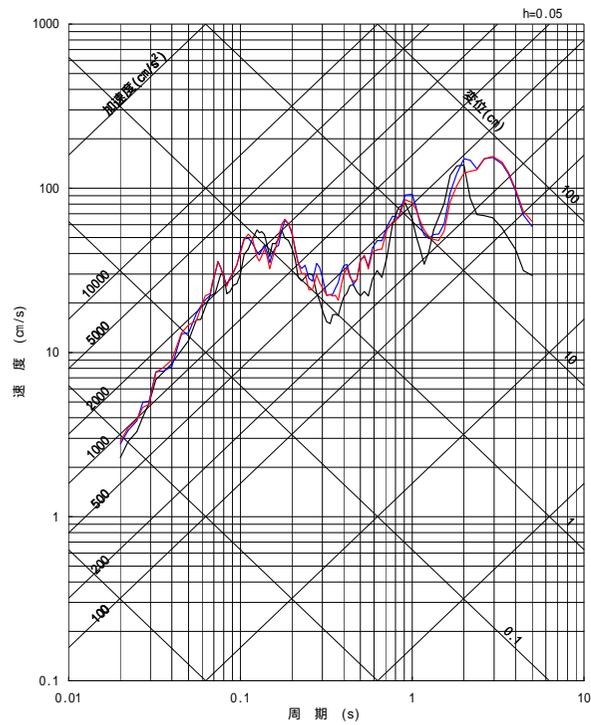


UD成分

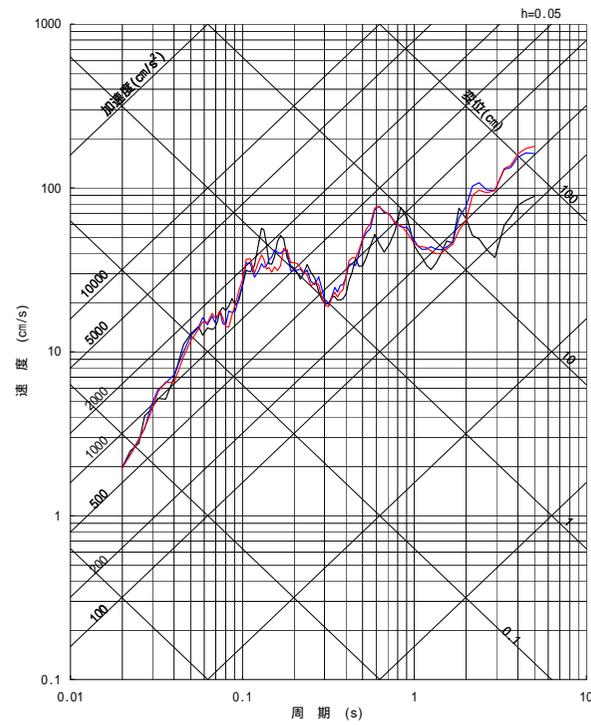
# 断層モデル手法による評価結果: 短周期レベルの不確かさ

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

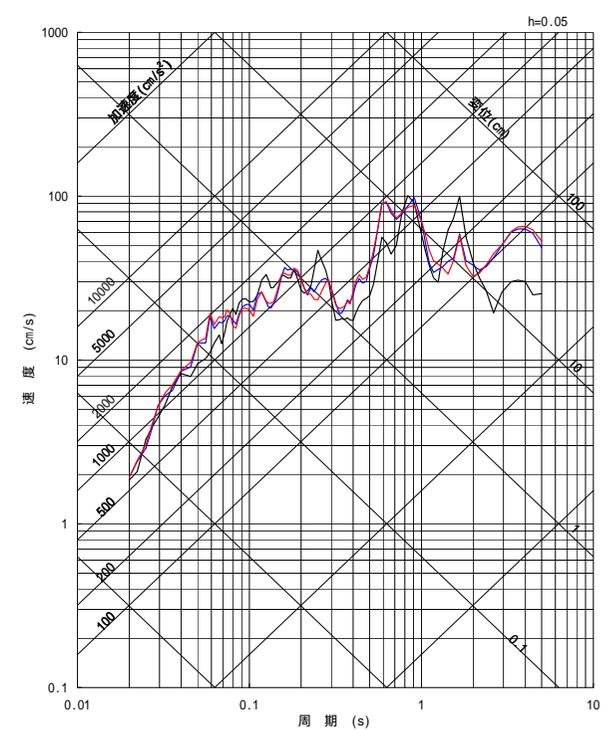
- 破壊開始点 1
- 破壊開始点 2
- 破壊開始点 3



NS成分



EW成分

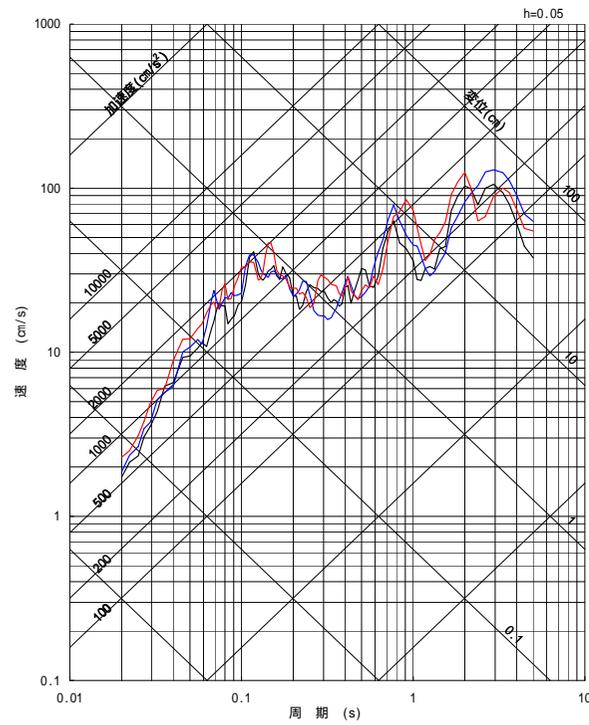


UD成分

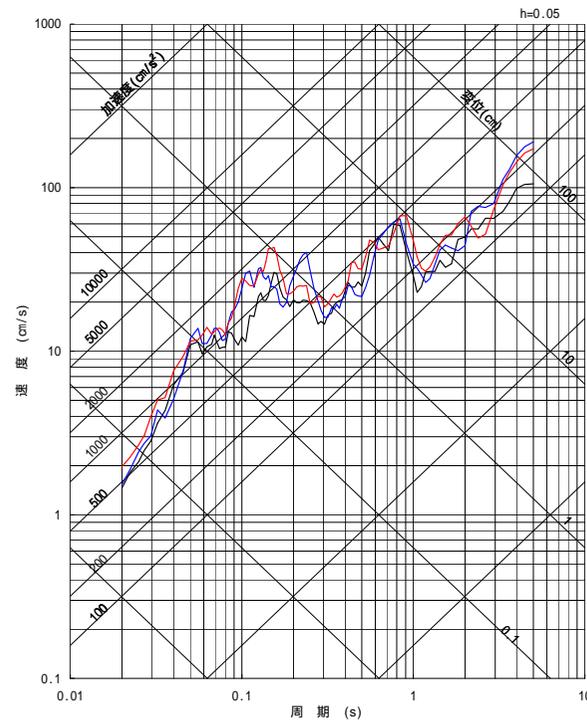
# 断層モデル手法による評価結果: 断層傾斜角の不確かさ

断層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

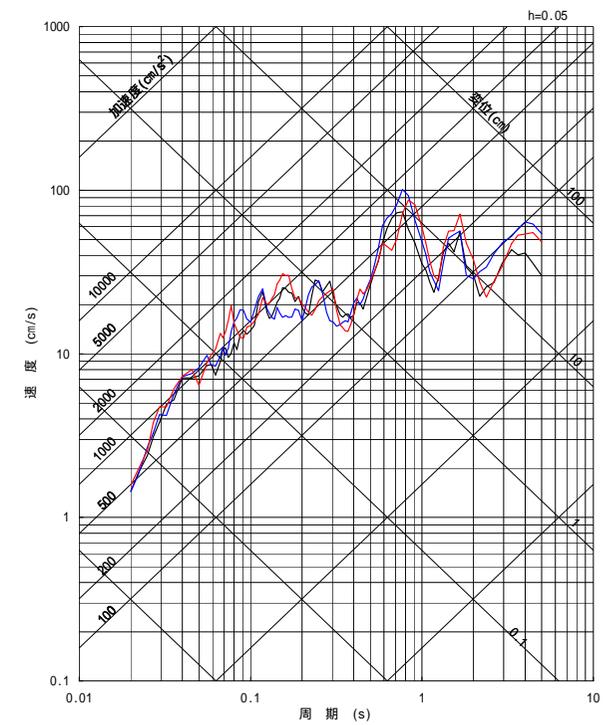
- 破壊開始点 1
- 破壊開始点 2
- 破壊開始点 3



NS成分



EW成分

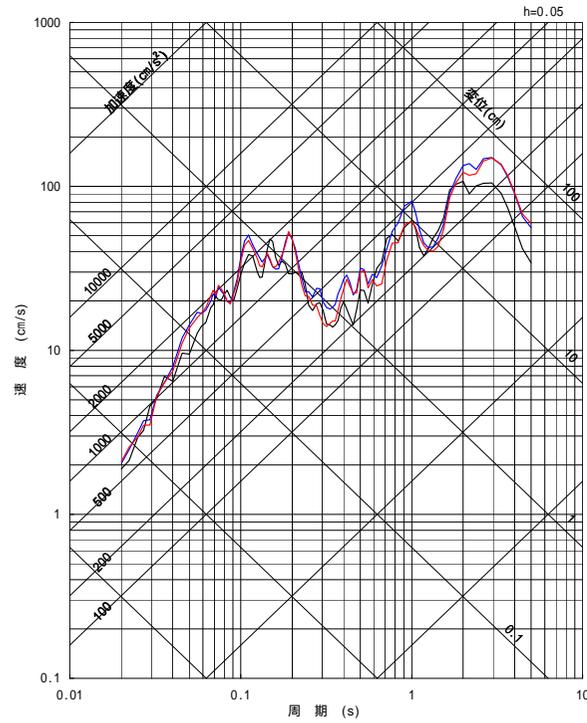


UD成分

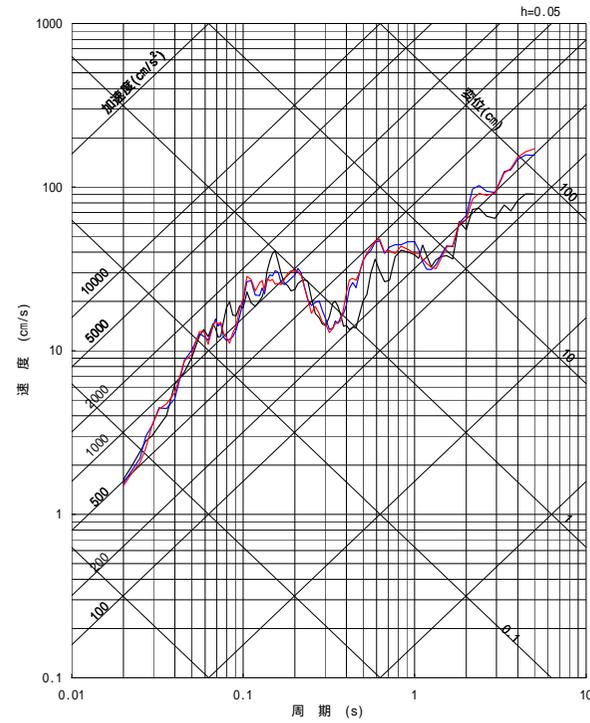
# 断層モデル手法による評価結果: アスペリティ位置の不確かさ

アスペリティ位置の不確かさケースによる評価結果の応答スペクトル

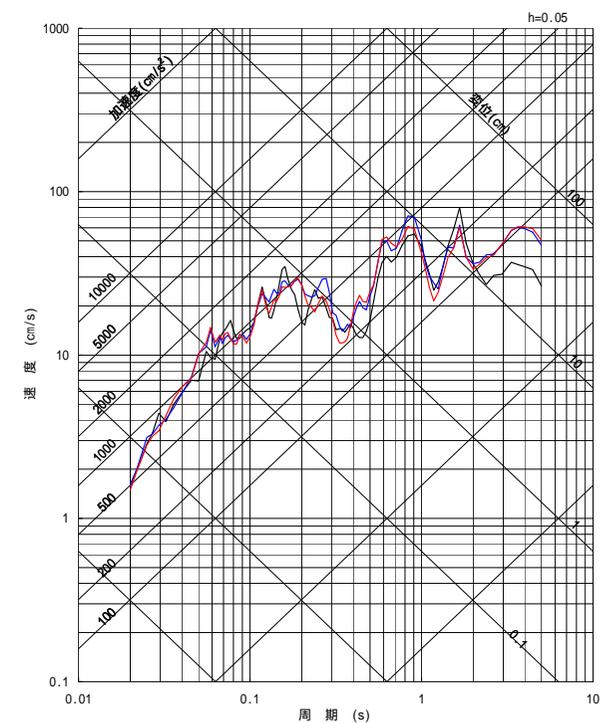
- 破壊開始点 1
- 破壊開始点 2
- 破壊開始点 3



NS成分



EW成分

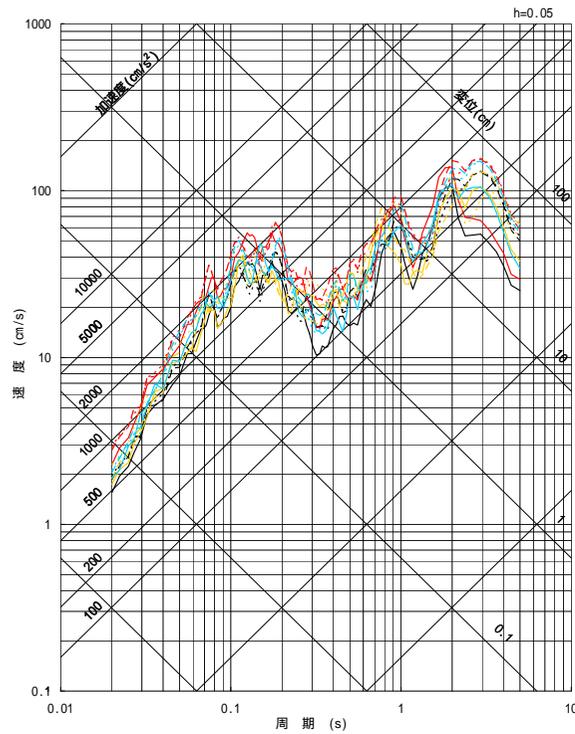


UD成分

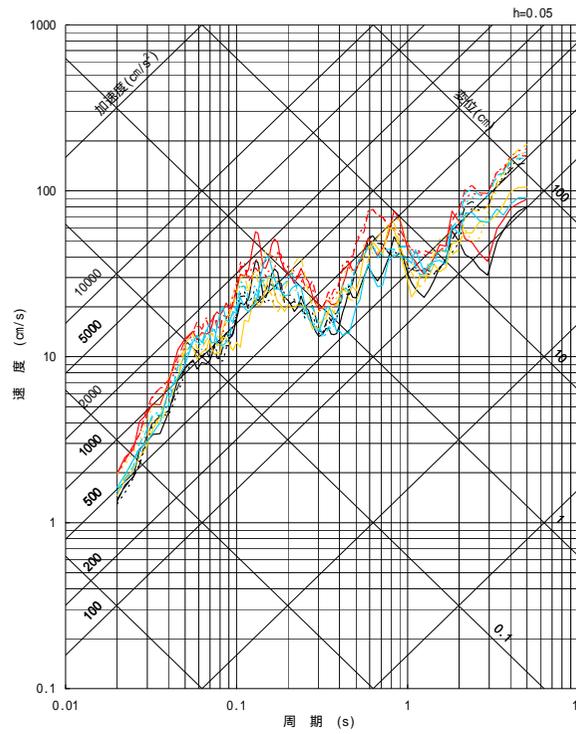
# 断層モデル手法による評価結果: 全ケース

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

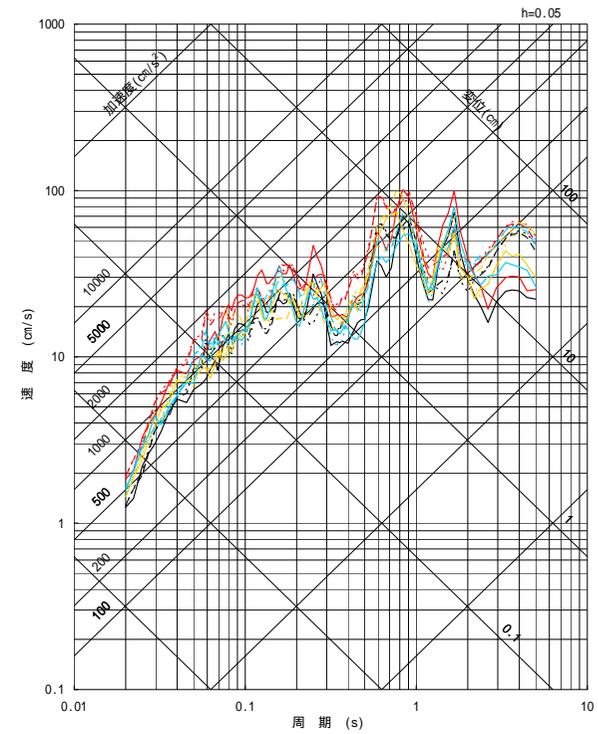
基本震源モデル	破壊開始点1	——	破壊開始点2	---	破壊開始点3	----
短周期レベルの不確かさ	破壊開始点1	—	破壊開始点2	- - -	破壊開始点3	- - - -
断層傾斜角の不確かさ	破壊開始点1	—	破壊開始点2	- - -	破壊開始点3	- - - -
アスペリティ位置の不確かさ	破壊開始点1	—	破壊開始点2	- - -	破壊開始点3	- - - -



NS成分



EW成分



UD成分

# 応答スペクトル手法と断層モデル手法の評価結果

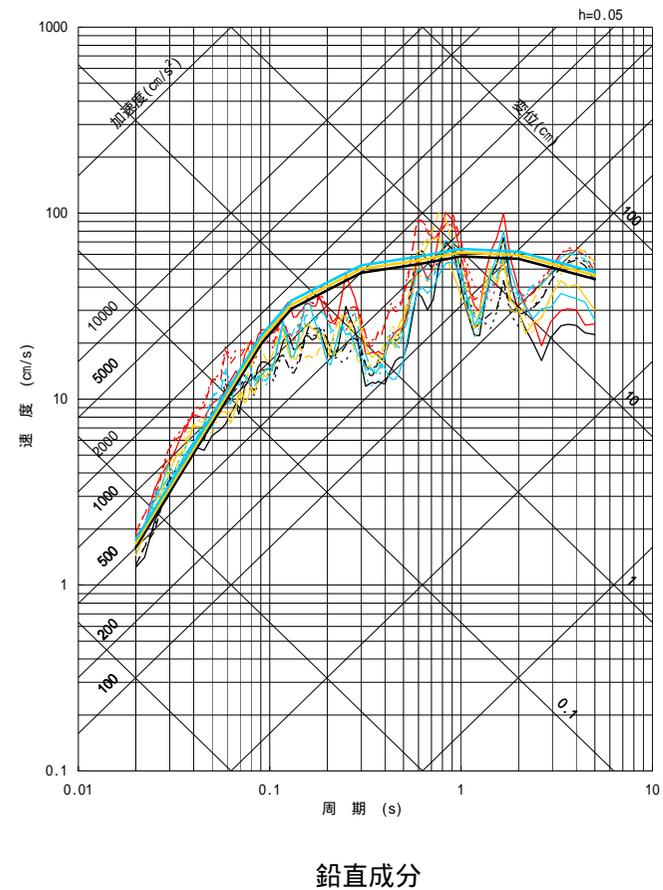
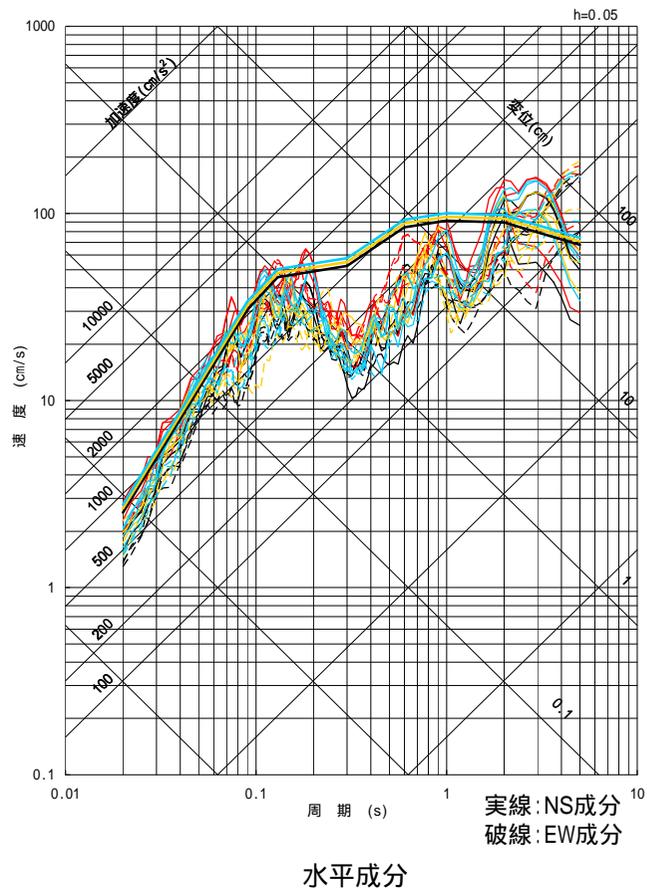
応答スペクトル手法と断層モデル手法の各評価結果

【応答スペクトル手法】

- 基本震源モデル
- 断層傾斜角の不確かさ
- アスペリティ位置の不確かさ

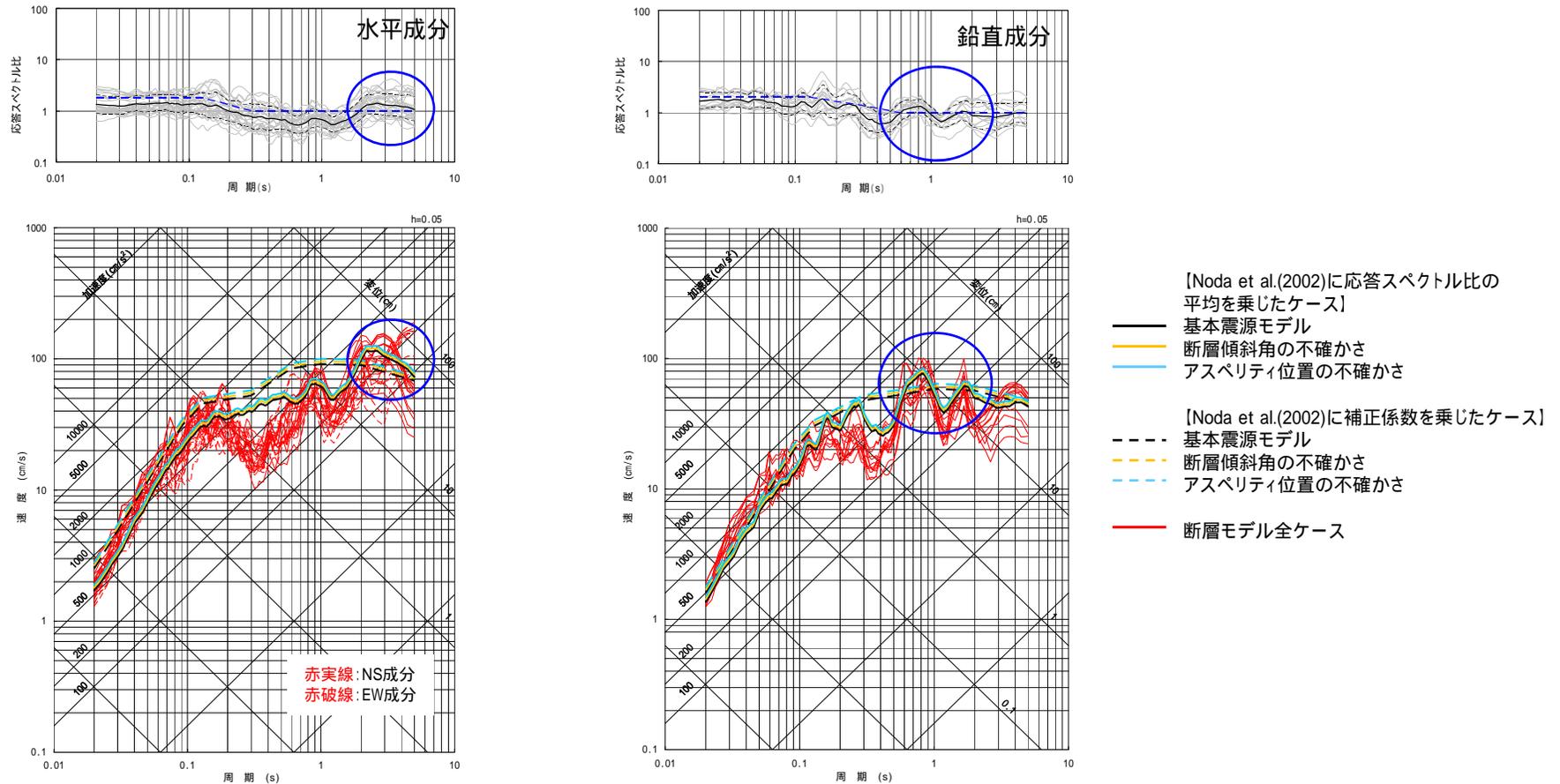
【断層モデル手法】

- 基本震源モデル(破壊開始点1~3)
- 短周期レベルの不確かさ(破壊開始点1~3)
- 断層傾斜角の不確かさ(破壊開始点1~3)
- アスペリティ位置の不確かさ(破壊開始点1~3)



# 応答スペクトル手法の補正係数と断層モデル手法の対応

応答スペクトル手法で用いた補正係数と断層モデル手法の評価結果を比較し、安全性評価の観点から両者の関係について考察する。

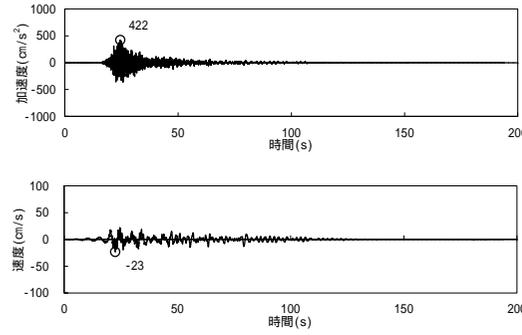
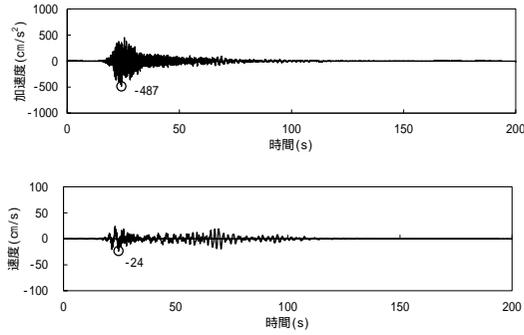


応答スペクトル手法に用いた補正係数(上段)と地震動評価結果(下段)

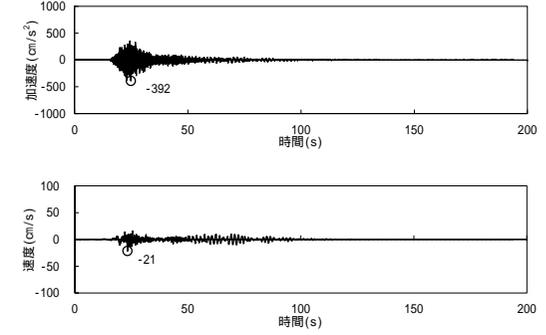
- 応答スペクトル比の平均が補正係数を上回っている一部周期帯(上段図中の 印)は、経験的グリーン関数法を用いた断層モデル手法による地震動評価結果のピーク(下段図中の 印)と一致している。
- そこで、応答スペクトル手法について補正係数の代わりに応答スペクトル比の平均そのものに乗じて断層モデル手法による結果と比較すると、上記周期帯は断層モデル手法による結果で概ね包絡されている。
- 従って応答スペクトル手法と断層モデル手法の評価結果が補完的な関係であり、両手法の組み合わせで総合的に安全性を確保していることを確認した。

# 断層モデル手法による評価結果:時刻歴波形(基本震源モデル)

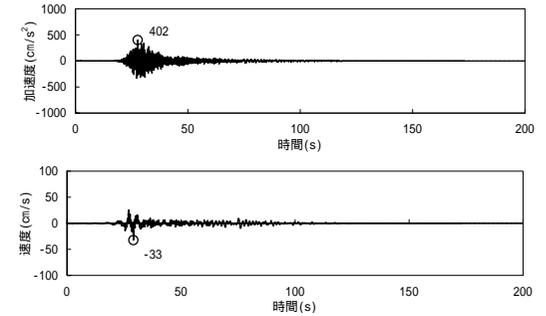
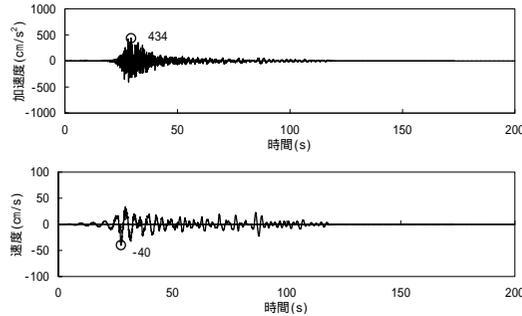
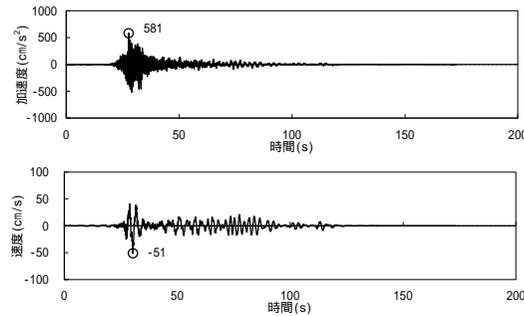
破壊開始点1



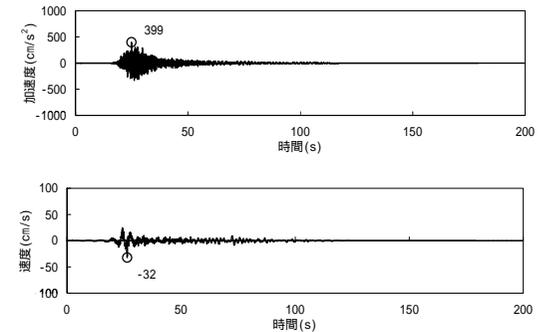
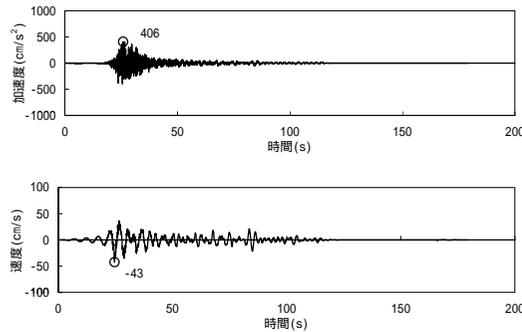
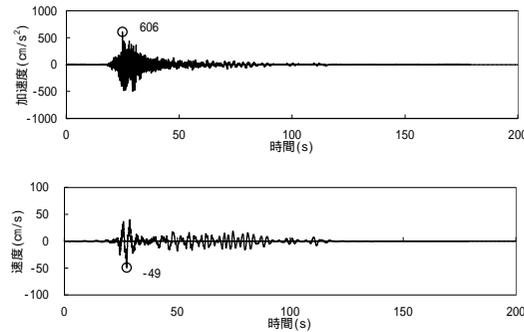
上段:加速度時刻歴波形  
下段:速度時刻歴波形



破壊開始点2



破壊開始点3



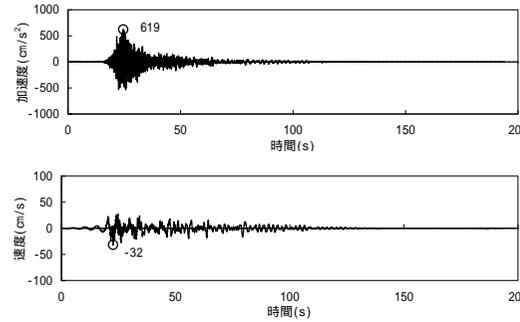
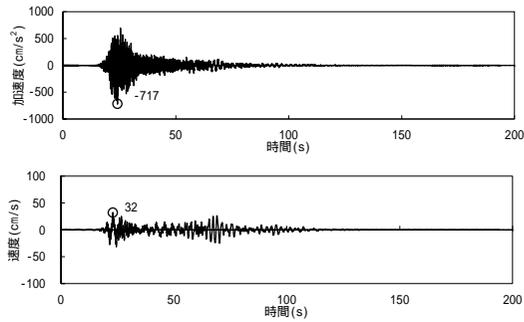
NS成分

EW成分

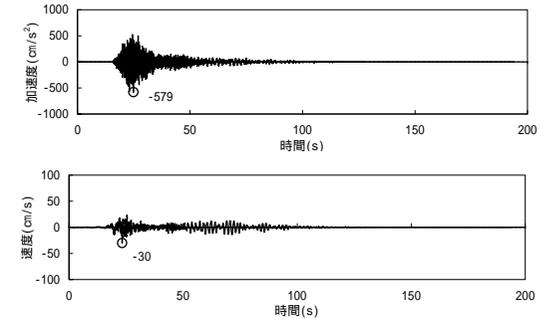
UD成分

# 断層モデル手法による評価結果:時刻歴波形(短周期レベルの不確かさ)

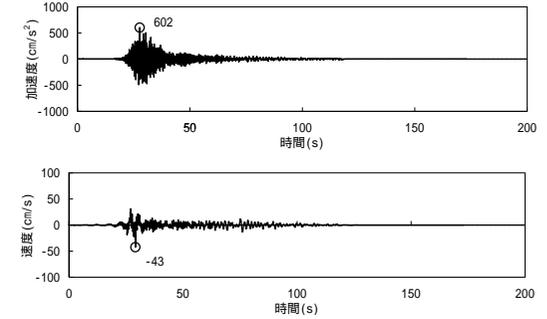
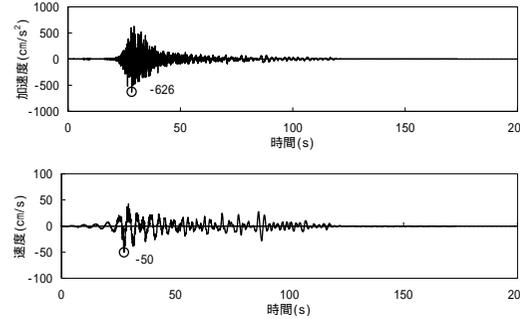
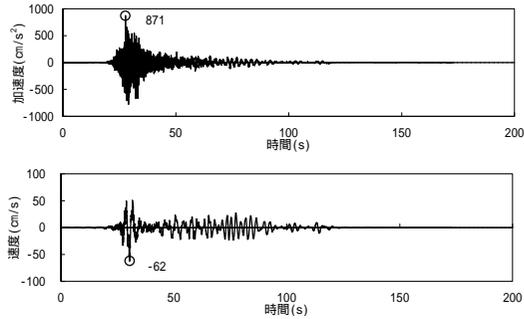
破壊開始点1



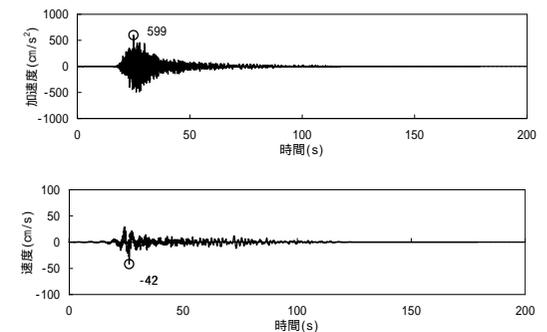
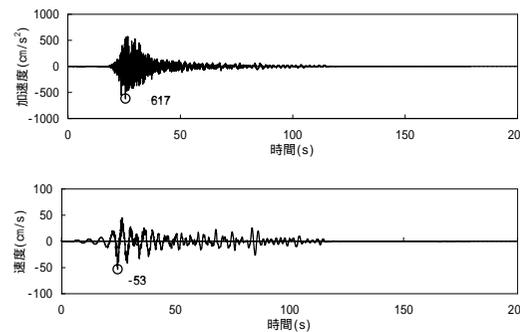
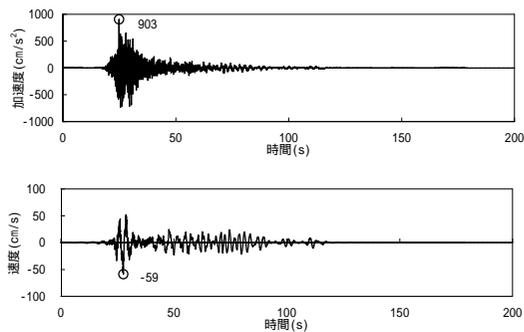
上段:加速度時刻歴波形  
下段:速度時刻歴波形



破壊開始点2



破壊開始点3



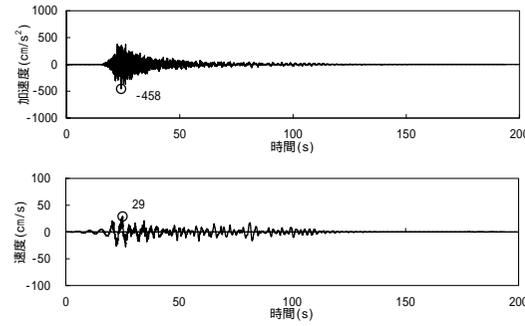
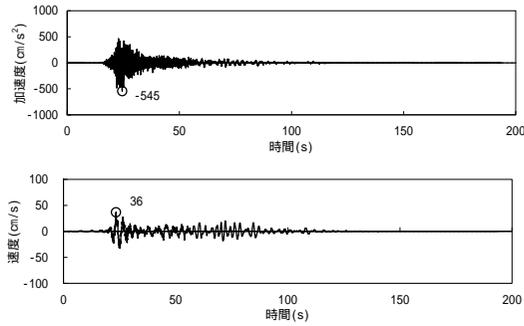
NS成分

EW成分

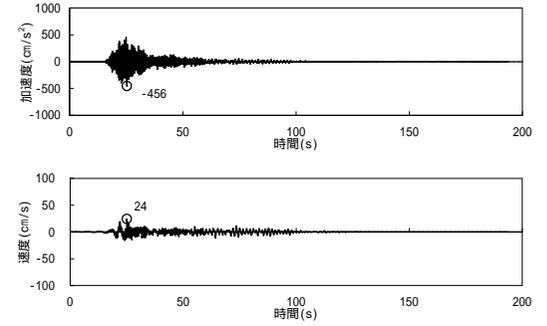
UD成分

# 断層モデル手法による評価結果:時刻歴波形(断層傾斜角の不確かさ)

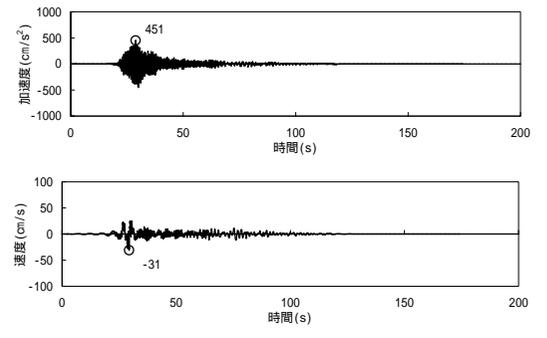
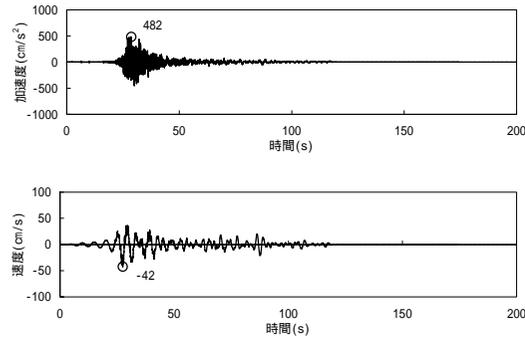
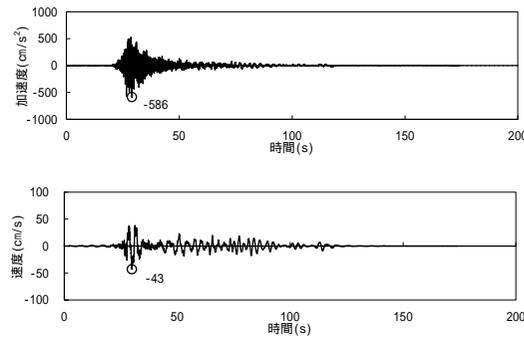
破壊開始点1



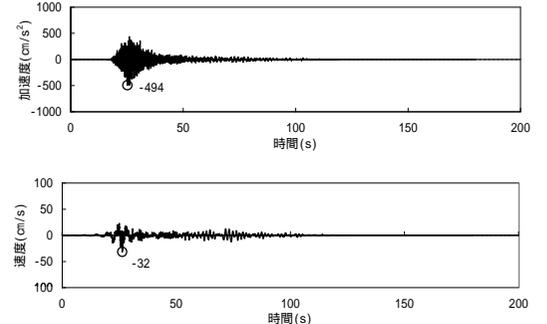
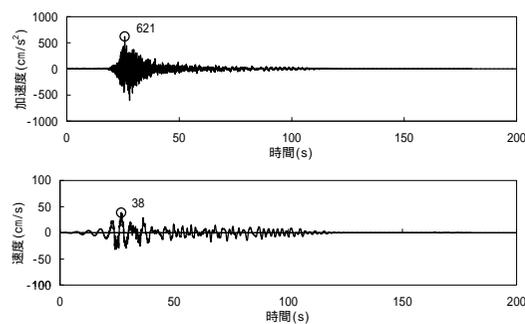
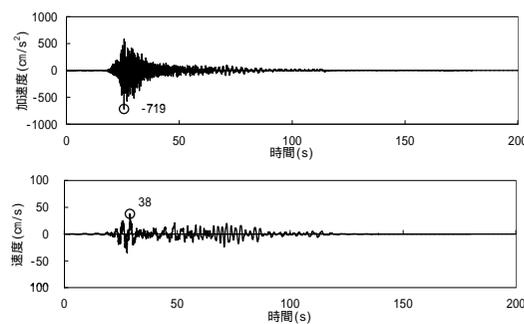
上段:加速度時刻歴波形  
下段:速度時刻歴波形



破壊開始点2



破壊開始点3



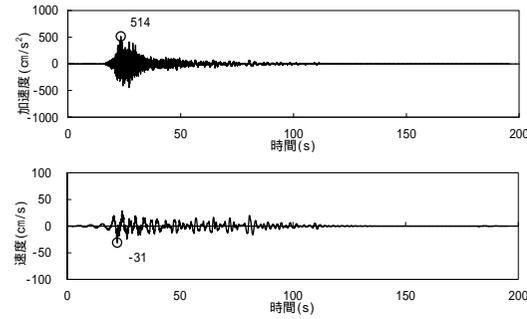
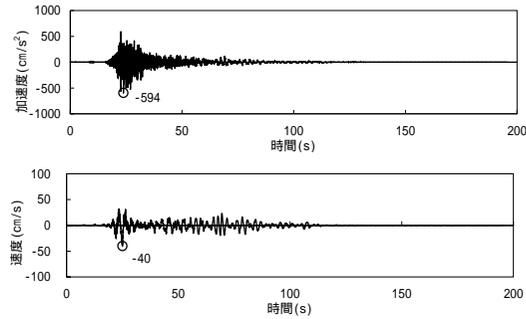
NS成分

EW成分

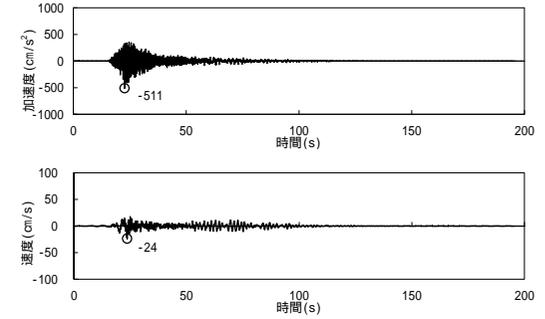
UD成分

# 断層モデル手法による評価結果:時刻歴波形(アスペリティ位置の不確かさ)

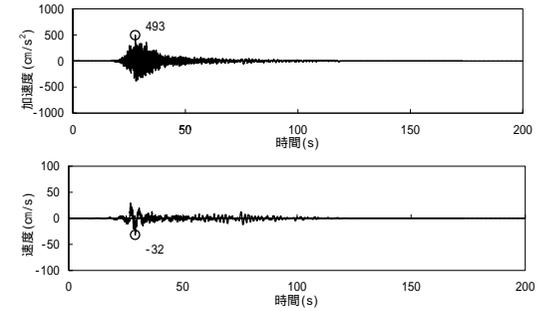
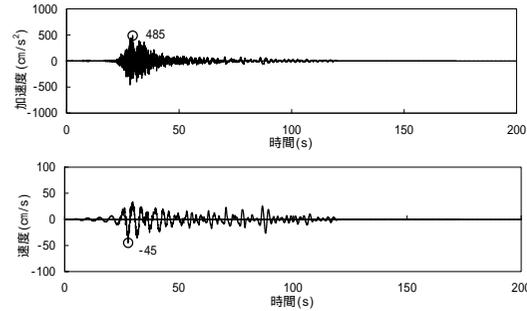
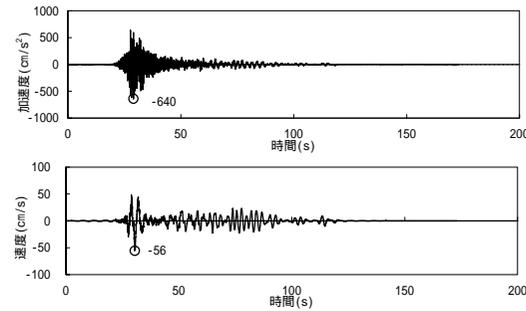
破壊開始点1



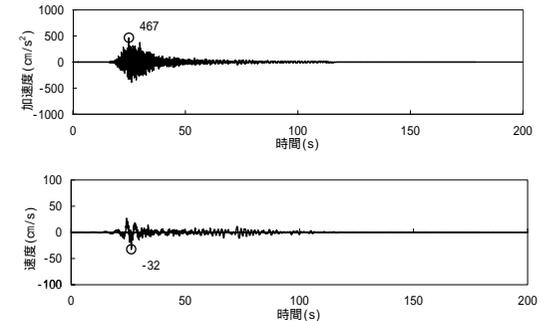
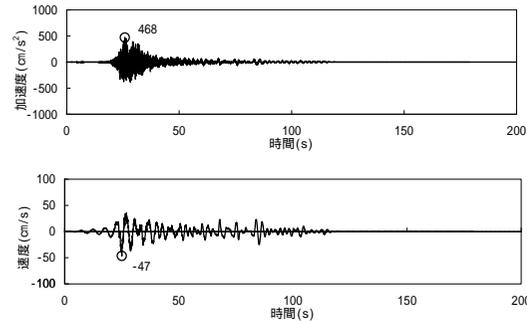
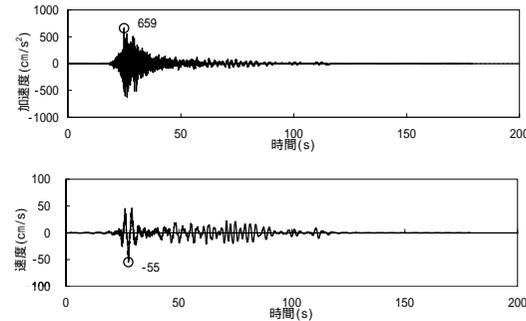
上段:加速度時刻歴波形  
下段:速度時刻歴波形



破壊開始点2



破壊開始点3



NS成分

EW成分

UD成分

## 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(「レシビ」)
- 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(「レシビ」)
- 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
- 勝又謙・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 travelttime 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
- 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
- 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 Yamada(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
- 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
- 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
- Hemphill-Haley, M.A. and R. J. Weldon II (1999): Estimating prehistoric earthquake magnitude from point measurements of surface rupture, Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 89 no. 5, pp. 1264-1279.
- I. Manighetti, M. Campillo, C. Sammis, P. M. Mai, G. King (2005): Evidence for self-similar, triangular slip distributions on earthquakes: Implications for earthquake and fault mechanics, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL.110, B05302, doi:10.1029/2004JB003174, 2005
- 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
- 平田直・佐藤比呂志(2007):2007年能登半島地震の意味 防災のための活断層の考え方, 科学, 2007年6月号
- 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
- 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	5
2. 敷地周辺の活断層分布	6
3. 敷地周辺の地震発生状況	8
4. 検討用地震の選定	15
4.1 地震発生層の設定	16
4.2 検討用地震の選定	30
5. 震源モデルの設定	45
5.1 地質調査結果の概要	46
5.2 基本震源モデルの設定	47
5.3 不確かさを考慮した震源モデルの設定	79
6. 地震動評価	87
6.1 地震動評価手法	88
6.2 応答スペクトル手法による評価結果	89
6.3 断層モデル手法による評価結果	90
7. 参考文献	104

#### 参考資料

1 補正係数の算出に用いた地震リスト	105
2 基本震源モデル設定における保守性の考え方	110
3 統計的グリーン関数法による評価	112

# 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 検討対象地震数： 67地震

発震日時	震央位置		震源深さ (km)	マグニ チュード	方位角 (度)	震央距離 (km)	見かけの 入射角(度)	地震発生様式	品質	備考	
	緯度(度)	経度(度)									
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	91.78	
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	内陸地殻内地震(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	内陸地殻内地震(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	74.52	
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	85.11	
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	85.7	
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	81.22	
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	92.9	
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	84.14	
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	89.15	
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	88.88	
2011/03/19	08:49:31.45	36.737	140.605	4.95	5.3	359.6	30.1	80.7	内陸地殻内地震(福島茨城県境)	85.44	除外
2011/03/19	18:56:48.06	36.784	140.572	5.37	6.1	354.9	35.4	81.4	内陸地殻内地震(福島茨城県境)	85.29	
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)	90.39	

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。

品質：防災科学技術研究所F-netより

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。

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 =  $\tan^{-1}$ (震央距離 / 震源深さ)

# 1 補正係数の算出に用いた地震リスト(2 / 2)

発震日時		震央位置		震源深さ (km)	マグニ チュード	方位角 (度)	震央距離 (km)	見かけの 入射角(度)	地震発生様式	品質	備考
		緯度(度)	経度(度)								
2011/03/23	07:13:52.77	37.035	140.769	0.93	5.8	12.9	64.8	89.2	内陸地殻内地震(福島茨城県境)	63.01	
2011/03/23	07:34:56.09	37.098	140.796	6.69	5.5	13.5	72.2	84.7	内陸地殻内地震(福島茨城県境)	84.36	
2011/03/23	07:36:31.31	37.063	140.771	7.30	5.8	12.4	67.9	83.9	内陸地殻内地震(福島茨城県境)	88.5	
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	74.58	
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	内陸地殻内地震(福島茨城県境)	86.83	
2011/04/11	17:17:47.50	36.891	140.715	9.18	5.7	11.6	48.2	79.2	内陸地殻内地震(福島茨城県境)	-	除外
2011/04/11	17:26:29.04	37.063	140.623	5.25	5.4	1.3	66.2	85.5	内陸地殻内地震(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	内陸地殻内地震(福島茨城県境)	87.03	
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	89.12	
2011/04/12	14:07:42.28	37.053	140.644	15.08	6.4	2.9	65.2	77.0	内陸地殻内地震(福島茨城県境)	84.57	除外
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	84.46	
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)	90.46	
2011/04/14	12:08:58.35	36.984	140.773	10.75	5.4	14.4	59.4	79.7	内陸地殻内地震(福島茨城県境)	85.81	
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	80.63	
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	87.57	
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	90.41	
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	77.58	
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	83.22	
2011/09/29	19:05:05.66	37.133	140.870	8.84	5.4	17.5	77.6	83.5	内陸地殻内地震(福島茨城県境)	91.49	
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	86.52	
2011/11/20	10:23:40.78	36.711	140.588	8.99	5.3	356.5	27.2	71.7	内陸地殻内地震(福島茨城県境)	89.55	
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	86.45	
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	83.31	
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	87.74	
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	89.21	
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	87.09	
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	86.02	
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	66.72	

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。

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。

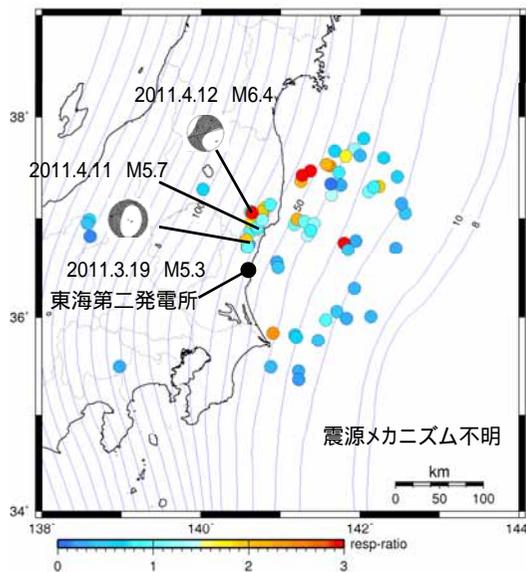
見かけの入射角:震央距離と震源深さから求めた震源方向の角度を示している。垂直が0度,水平が90度となる。

$$\text{見かけの入射角} = \tan^{-1}(\text{震央距離} / \text{震源深さ})$$

品質:防災科学技術研究所F-netより

# 補正係数検討のデータセットから除外した地震

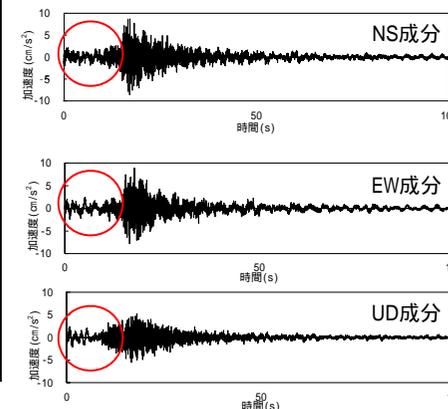
福島県と茨城県の県境付近で発生した内陸地殻内地震に関する補正係数検討の際、観測記録の応答スペクトル比が対象領域の平均的な傾向から大きく外れる地震について示す。



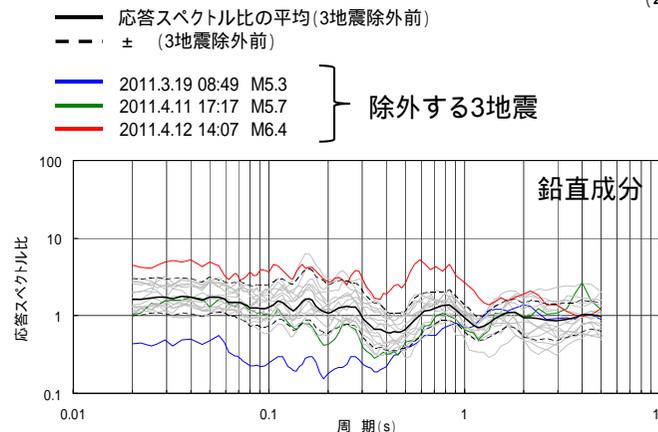
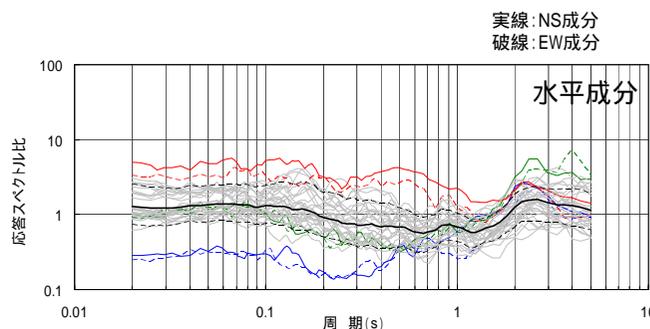
震央位置

発生日時	深さ (km)	M	除外理由	備考
2011年3月19日 08:49	4.95	5.3	短周期側の振幅が極端に小さいことから除外	約30秒前に発生した地震(福島県沖の地震M5.3)の影響を何らかの形で受けている可能性がある。
2011年4月11日 17:17	9.18	5.7	直前に発生した地震(福島県浜通りの地震の本震(M7.0)の揺れが混入している可能性があるため除外(右図)	-
2011年4月12日 14:07	15.08	6.4	短周期側の振幅が極端に大きいことから除外	福島県と茨城県の県境付近で発生した他の地震と比較し震源深さが深い。また、横ずれ成分を含む。

赤丸: 2011年4月11日17:16の地震(福島県浜通りの地震M7.0)の揺れが継続している可能性がある。



東海第二発電所 GL 380m 加速度時刻歴波形 (2011年4月11日17:17の地震, M5.7)



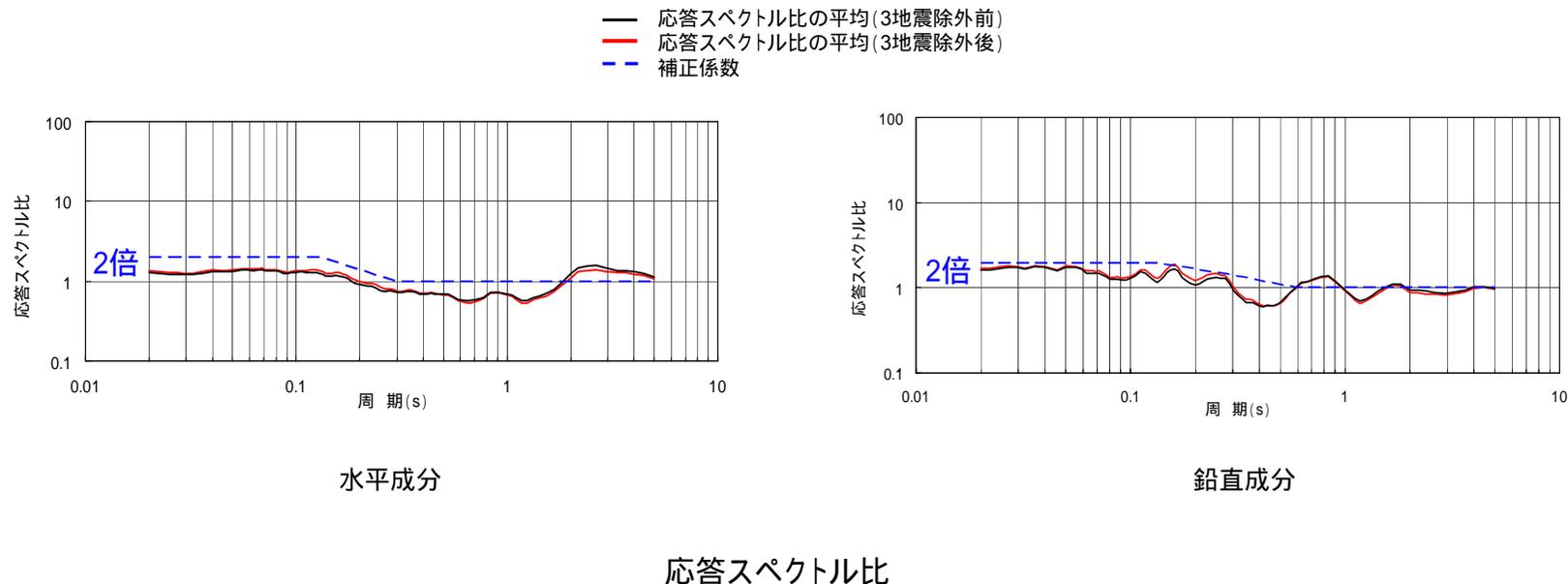
除外する3地震の応答スペクトル比

- 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関する補正係数検討の際、観測記録の応答スペクトル比が対象領域の平均的な傾向から大きく外れる地震は、傾向の分析を行ううえで適切でないと考えられ、上記3地震についてはデータセットから除外することとする。

## 3地震除外した応答スペクトル比と補正係数

### 応答スペクトル手法の補正係数

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データセットから3地震を除外した上で応答スペクトル比の平均を求め、補正係数を設定する。



- 福島県と茨城県の県境付近で発生した地震の応答スペクトル比は短周期側で大きくなる傾向が見られ、水平成分で1.4倍程度、鉛直成分で1.7倍程度となる。
- 従って、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対する応答スペクトル手法では、日本電気協会(2016)による内陸地殻内地震に対する補正係数は用いず、上記応答スペクトル比の傾向に基づき、短周期帯を概ね包絡するように短周期側で2倍の補正係数を設定する。

1. 評価フロー	5
2. 敷地周辺の活断層分布	6
3. 敷地周辺の地震発生状況	8
4. 検討用地震の選定	15
4.1 地震発生層の設定	16
4.2 検討用地震の選定	30
5. 震源モデルの設定	45
5.1 地質調査結果の概要	46
5.2 基本震源モデルの設定	47
5.3 不確かさを考慮した震源モデルの設定	79
6. 地震動評価	87
6.1 地震動評価手法	88
6.2 応答スペクトル手法による評価結果	89
6.3 断層モデル手法による評価結果	90
7. 参考文献	104

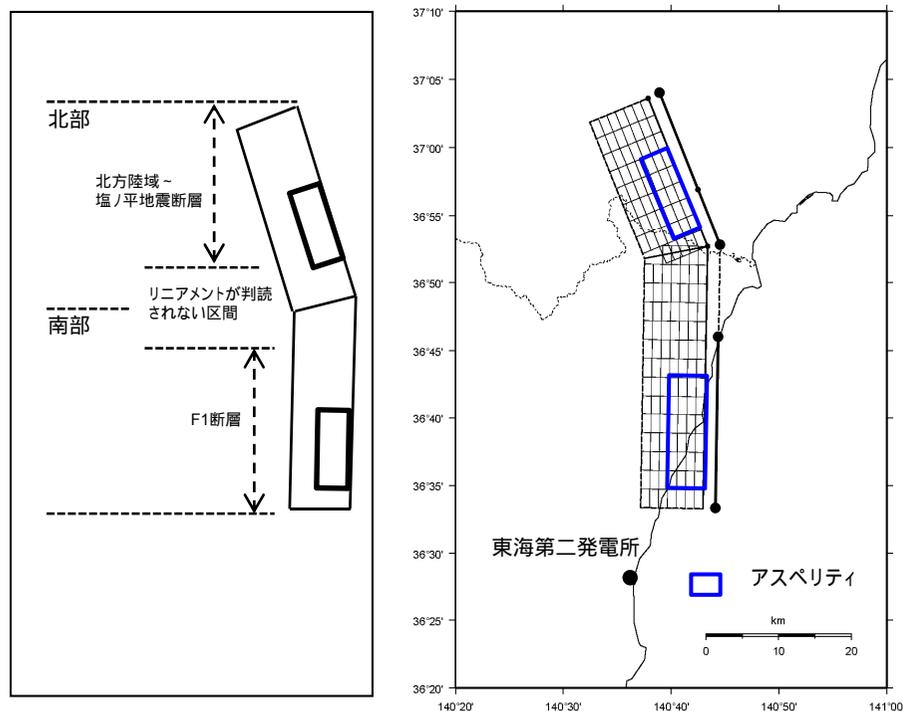
#### 参考資料

1 補正係数の算出に用いた地震リスト	105
2 基本震源モデル設定における保守性の考え方	110
3 統計的グリーン関数法による評価	112

## 2 基本震源モデル設定における保守性の考え方

基本震源モデルの設定では、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ことで保守性を確保している。

そこで、北部、南部区間を均等とし、南北アスペリティの地震モーメントが同じになるモデルに比べて、基本震源モデルにどの程度保守性が含まれることになるか、地震モーメント比で示す。



南北均等モデル

基本震源モデル  
(南部アスペリティ地震モーメント大)

各モデルのアスペリティの地震モーメントの比較

モデル名	アスペリティ面積 (南部)(km <sup>2</sup> )	アスペリティの 地震モーメント (南部)(N·m)	地震 モーメント比
南北均等モデル	106.5	1.15E+19	1.00
基本震源モデル (南部アスペリティ地震 モーメント大)	133.2	1.57E+19	1.37

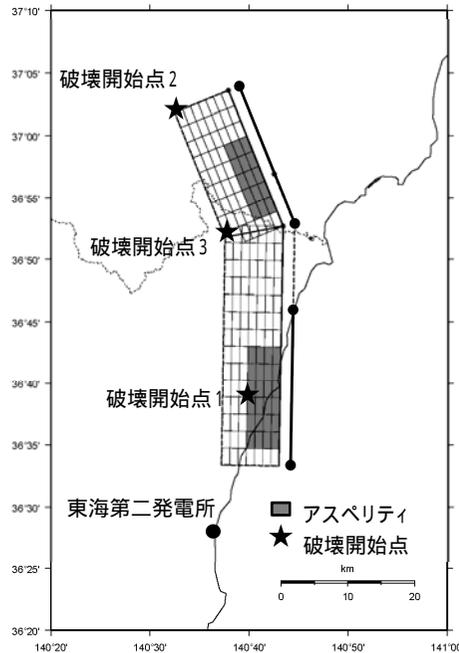
リニアメントが判読されない区間をF1断層とあわせて一つの区間とすることで、基本震源モデルの南部アスペリティの地震モーメントを大きく設定した。南北均等とした場合に比べて南部アスペリティの地震モーメントが1.3～1.4倍となり、これが基本震源モデルに保守性として含まれている。

1. 評価フロー	5
2. 敷地周辺の活断層分布	6
3. 敷地周辺の地震発生状況	8
4. 検討用地震の選定	15
4.1 地震発生層の設定	16
4.2 検討用地震の選定	30
5. 震源モデルの設定	45
5.1 地質調査結果の概要	46
5.2 基本震源モデルの設定	47
5.3 不確かさを考慮した震源モデルの設定	79
6. 地震動評価	87
6.1 地震動評価手法	88
6.2 応答スペクトル手法による評価結果	89
6.3 断層モデル手法による評価結果	90
7. 参考文献	104
<b>参考資料</b>	
1 補正係数の算出に用いた地震リスト	105
2 基本震源モデル設定における保守性の考え方	110
3 統計的グリーン関数法による評価	112

### 3 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。

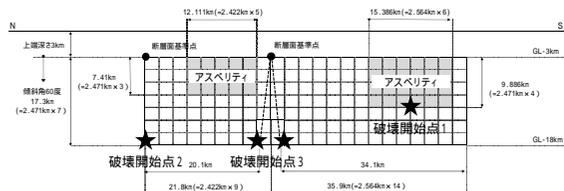


**主な計算条件**

- ・地震基盤への鉛直入射を仮定し、一次元波動論に基づき解放基盤表面における地震波を作成する。
- ・要素地震のスペクトル特性、経時特性ともBoore (1983) を用いる。
- ・Dan et al.(1989)の手法により波形合成を行う。

統計的グリーン関数法の評価に用いる地盤モデル

上面深度		層厚 (m)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	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 <sup>0.69</sup>	Q=110f <sup>0.69</sup>	



基本震源モデル

### 3 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)

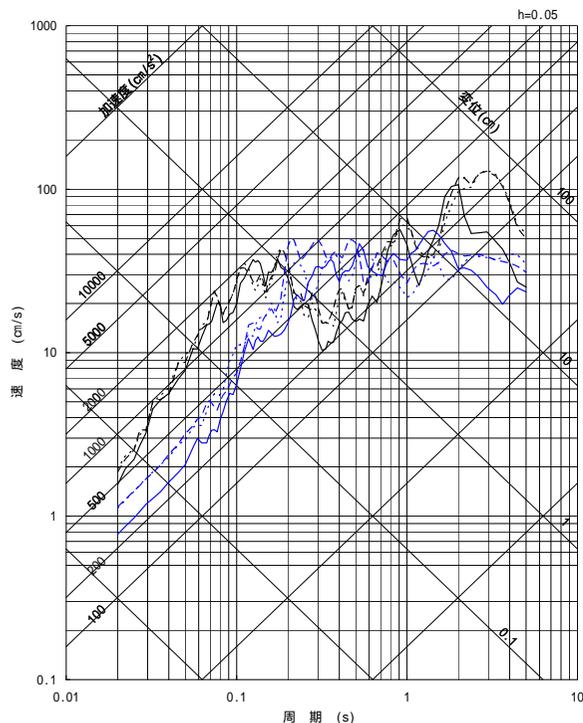
項目	設定値			設定方法	
	全体	北部	南部		
断層上端長さ(km) 断層下端長さ(km)	57.7 54.2	21.8 20.1	35.9 34.1	活断層調査結果による位置を基に設定	
断層傾斜角(度)	60(西傾斜)	60(西傾斜)	60(西傾斜)	活断層調査結果に基づき設定	
断層上端深さ(km) 断層下端深さ(km)	3 18	3 18	3 18	微小地震の発生及び地下構造から設定	
断層幅W(km)	17.3	17.3	17.3	地震発生層と断層傾斜角から設定	
断層面積S(km <sup>2</sup> )	967.9	362.4	605.5	断層面より算定	
破壊伝播様式	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	$M_0 = (S / (4.24 \times 10^{-11}))^2 / 10^7$ 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 <sup>2</sup> )	3.50E+10	3.50E+10	3.50E+10	$\mu = \rho v_s^2$ , $\rho = 2.7g/cm^3$ , $v_s = 3.6km/s$ ( $\rho$ は敷地周辺を対象にした地震波速度トモグラフィ, $v_s$ 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 (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	$Vr = 0.72 v_s$ (Geller,1976による)	
短周期レベルA(N・m/s <sup>2</sup> )(参考)	1.98E+19	-	-	$A = 2.46 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3}$	
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ビ	
アスベリティ	面積S <sub>a</sub> (km <sup>2</sup> )	212.9	79.7	133.2	$S_a = 0.22S$
	平均すべり量D <sub>a</sub> (cm)	307.7	260.1	336.2	$D_a = 2D$
	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 $\sigma_a$ (MPa)	14.09	14.09	14.09	$\sigma_a = \mu \times S / S_a$
	短周期レベルA(N・m/s <sup>2</sup> )(参考)	1.89E+19	1.16E+19	1.49E+19	$A = 4 \times r_a \times \sigma_a^2$
背景領域	面積S <sub>b</sub> (km <sup>2</sup> )	755.0	282.7	472.3	$S_b = S - S_a$
	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>0b</sub> (N・m)	2.92E+19	9.24E+18	1.99E+19	$M_{0b} = M_0 - M_{0a}$
	実効応力 $\sigma_b$ (MPa)	2.82	2.82	2.82	$\sigma_b = 0.2 \times \sigma_a$

### 3 統計的グリーン関数法による評価 (3 / 4)

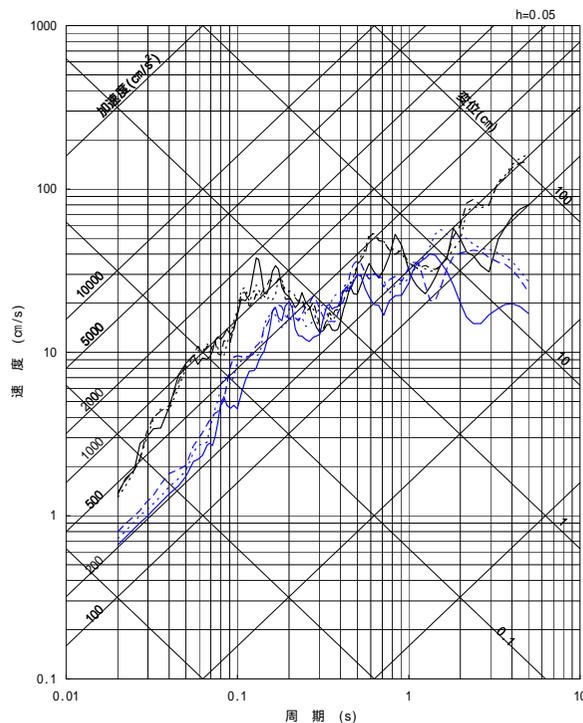
基本震源モデルによる地震動評価結果の応答スペクトル

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。

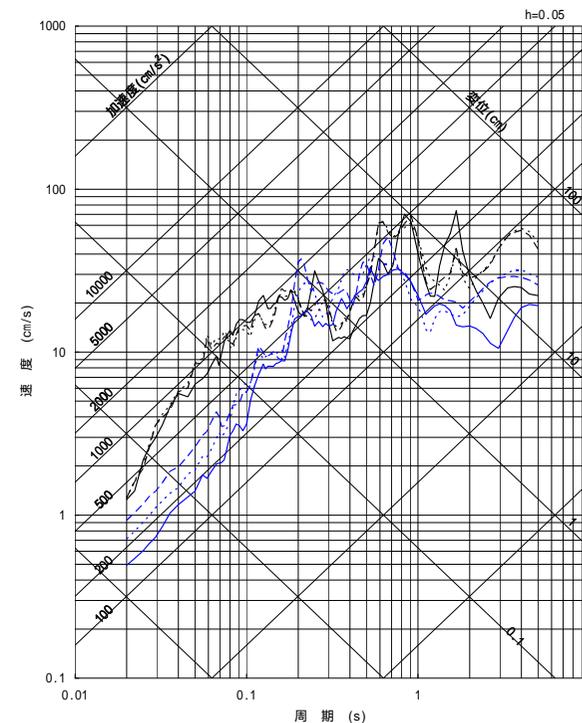
経験的グリーン関数法 破壊開始点1 ——— 破壊開始点2 - - - 破壊開始点3 - - - -  
 統計的グリーン関数法 破壊開始点1 ——— 破壊開始点2 - - - 破壊開始点3 - - - -



NS成分



EW成分



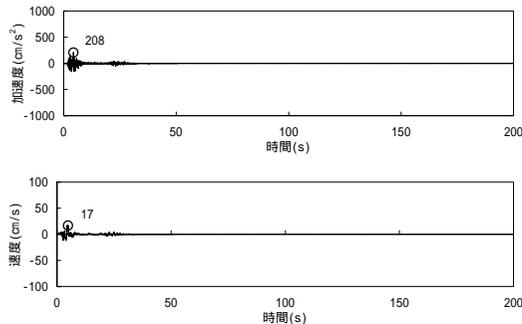
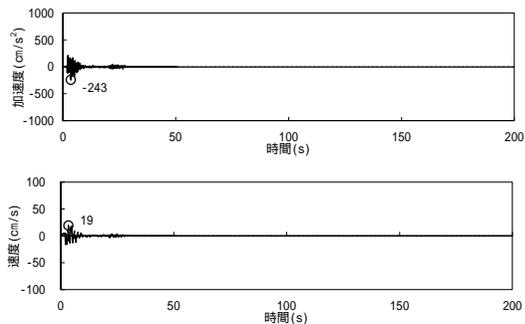
UD成分

- 統計的グリーン関数法による評価結果について、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 $f_{max}$ の補正無しで評価したことにより、要素地震の $f_{max}$ の特性がそのまま合成結果に現れたためと考えられる。

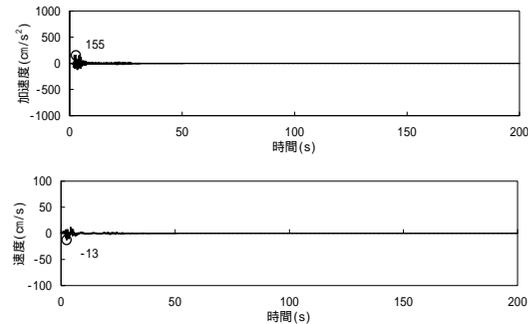
### 3 統計的グリーン関数法による評価(4 / 4)

基本震源モデルによる地震動評価結果の時刻歴波形

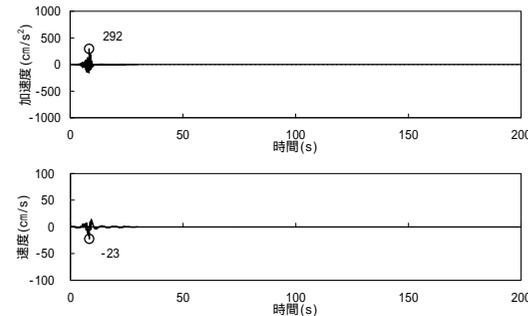
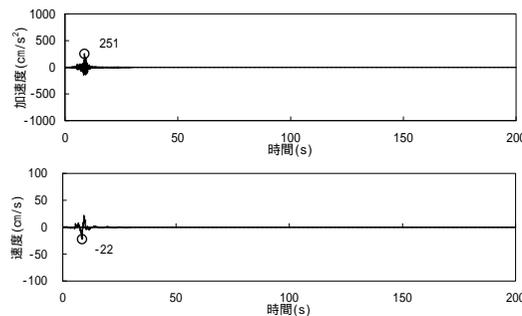
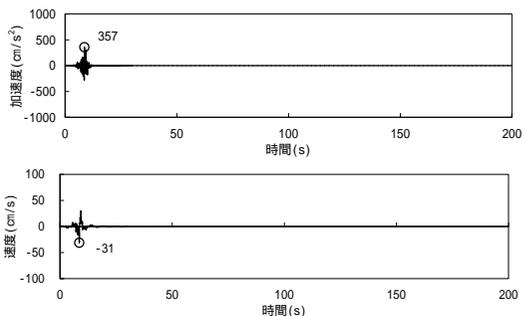
破壊開始点1



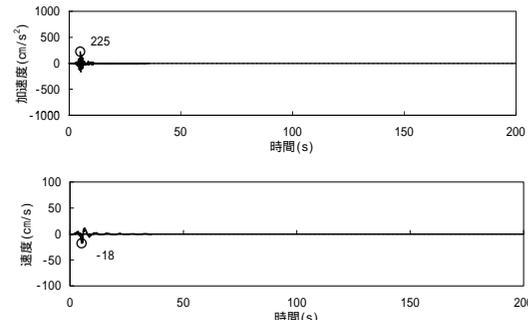
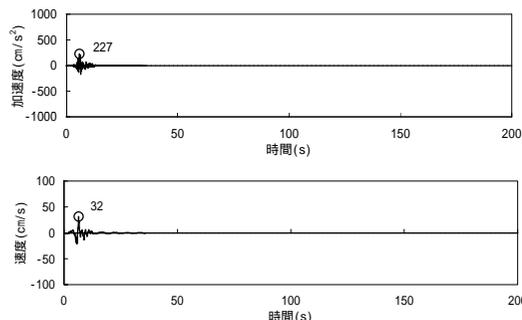
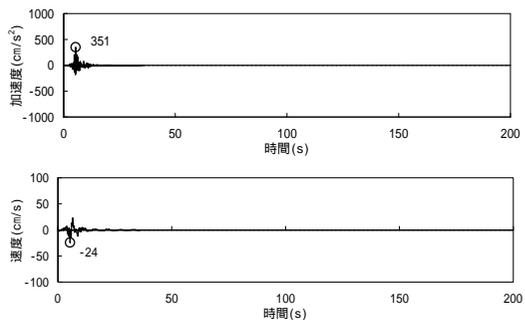
上段: 加速度時刻歴波形  
下段: 速度時刻歴波形



破壊開始点2



破壊開始点3



NS成分

EW成分

UD成分