

柏崎刈羽原子力発電所 6号炉及び7号炉

地震関係のコメント回答

(敷地ごとに震源を特定して策定する地震動関連)

平成27年11月11日
東京電力株式会社



本日も説明する内容

		内容	説明概要	ページ
1	H27 10/2	観測記録に基づく補正係数の算定根拠、地下構造の増幅特性の反映方法や海域と陸域の地震の評価の違いについて整理して説明すること。	<ul style="list-style-type: none"> 観測記録に基づく補正係数の算定根拠についてご提示。 地下構造の増幅特性を踏まえ、陸域・海域で分けて評価を行うこと、さらに海域については荒浜側・大湊側に分け、陸域については荒浜側・大湊側共通で評価していることについて整理してご説明。 	4~21
2	H27 10/2	F-B断層による地震の震源モデルの設定について考え方を整理して説明すること。	<ul style="list-style-type: none"> 設定根拠となるデータ及び「中越沖地震拡張モデル」と「強震動予測シビモデル」の位置付けを整理し、長岡平野西縁断層帯における考え方との対比等を含め、考え方についてご説明。 	23~62
3	H27 10/2	F-B断層の断層モデルを用いた地震動評価において、第3アスベリティの補正係数については、その妥当性を改めて確認し、説明性を向上するよう検討すること。	<ul style="list-style-type: none"> 統計的グリーン関数法を用いた試検討内容、中小地震の観測記録を用いた検討結果を踏まえ、再設定した補正係数を考慮した場合の地震動評価結果についてご説明。 	63~75
4	H27 10/2	入倉・三宅(2001)、Murotani et al.(2010)及び壇ほか(2015)を用いた M_0 の評価について大小関係が確認できるように説明すること。	<ul style="list-style-type: none"> 断層幅15kmと設定した場合の壇ほか(2015)によるS-M_0関係と入倉・三宅(2001)及びMurotani et al.(2010)による設定値を図示してご説明。 	84
5	H27 10/2	Fujii and Matsu'ura(2000)を参考に、逆断層の内陸地殻内地震に対してパラメータを試算できないか検討すること。	<ul style="list-style-type: none"> 文献の内容を確認し、逆断層として取り入れられているのはプレート間地震であることから、逆断層の内陸地殻内地震に対して試算することは適切でないことをご説明。 	85
6	H27 10/2	佐渡島南方～魚津断層帯までの連動について位置づけを整理し、資料構成を見直すこと。	<ul style="list-style-type: none"> 資料構成の見直し結果等についてご説明。 	87~94

目次

1. 応答スペクトルに基づく地震動評価に関するご指摘について・・・ P. 3
2. F-B断層による地震の地震動評価に関するご指摘について・・・ P.22
3. 長岡平野西縁断層帯による地震の地震動評価に関する
ご指摘について・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ P.76
4. 海域の連動について・・・・・・・・・・・・・・・・ P.86
5. 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動について・・・・・・・・ P.95

1. 応答スペクトルに基づく地震動評価に関するご指摘について
2. F-B断層による地震の地震動評価に関するご指摘について
3. 長岡平野西縁断層帯による地震の地震動評価に関するご指摘について
4. 海域の連動について
5. 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動について

		内容	説明概要	ページ
1	H27 10/2	観測記録に基づく補正係数の算定根拠，地下構造の増幅特性の反映方法や海域と陸域の地震の評価の違いについて整理して説明すること。	<ul style="list-style-type: none"> • 観測記録に基づく補正係数の算定根拠についてご提示。 • 地下構造の増幅特性を踏まえ，陸域・海域で分けて評価を行うこと，さらに海域については荒浜側・大湊側に分け，陸域については荒浜側・大湊側共通で評価していることについて整理してご説明。 	4~21

検討概要

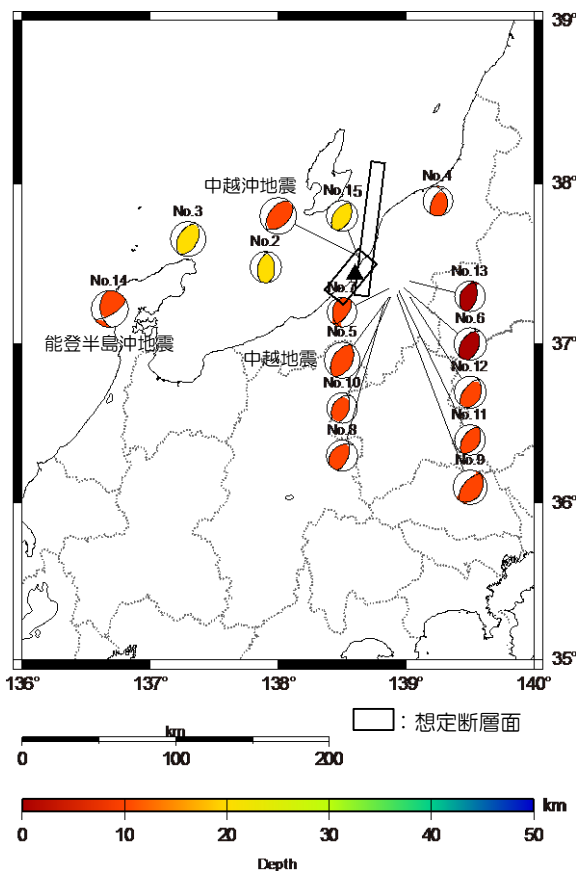
- 海域の地震、陸域の地震の検討用地震の応答スペクトルに基づく地震動評価は、以下の特徴を踏まえ、いずれもNoda et al.(2002)の方法を用いて評価を実施。
 - 解放基盤表面における水平および鉛直方向の地震動評価が可能であること。
 - 震源の拡がりを考慮できること。
 - 観測記録に基づく補正係数を考慮することにより、震源特性および地震波の伝播特性を的確に反映可能であること。
- なお、観測記録に基づく補正係数は、検討用地震と発生様式等が同じ地震の観測記録から推定した解放基盤表面における地震動（以下、「解放基盤波」）とNoda et al.(2002)による応答スペクトルの比を用いて設定。
- しかしながら、「地震観測記録の取得状況」の相違及び敷地における地震波の増幅特性に関する検討によって明らかとなった「海域・陸域の地震での増幅特性」の相違があることから、評価の内容においても違いがある。
 - ここでは、これらの情報を整理したうえで、応答スペクトルに基づく地震動評価の内容を取り纏め、説明性を向上することを目的に検討。

地震観測記録の取得状況

観測記録に基づく補正係数の算定に適用可能な地震の発生状況

- 以下の観点で補正係数の算定に用いることが適切と考えられる地震を選定
 - ① 想定する地震と同一方向の地震（ただし、海域の地震は数が少なく、参考のため抽出）
 - ② Noda et al.(2002)のデータ範囲に該当する地震
マグニチュードM=5.5~7.0, 等価震源距離(Xeq)=28~202km

地震の諸元



No.	年月日	時間	地震名・震央地名	震源位置		地震規模	震源深さ(km)	記録取得状況		
				経度(°)	緯度(°)			鉛直アレイ		1~7号 原子炉 建屋
								荒浜	大湊	
2	1987.03.24	21:49	OFF S NIIGATA PREF	137° 54.20'	37° 28.90'	5.9	21.6	○	○	—
3	1993.02.07	22:27	OFF NOTO PENINSULA	137° 17.80'	37° 39.40'	6.6	24.8	○	○	—
4	1995.04.01	12:49	NE NIIGATA PREF	139° 14.88'	37° 53.47'	5.6	16.16	★	★	—
5	2004.10.23	17:56	中越地震 MID NIIGATA PREF	138° 52.00'	37° 17.60'	6.8	13.08	—	★	—
6	2004.10.23	18:03	MID NIIGATA PREF	138° 59.00'	37° 21.20'	6.3	9.38	—	★	—
7	2004.10.23	18:07	MID NIIGATA PREF	138° 51.90'	37° 20.90'	5.7	14.9	—	★	—
8	2004.10.23	18:11	MID NIIGATA PREF	138° 49.80'	37° 15.20'	6.0	11.52	—	★	—
9	2004.10.23	18:34	MID NIIGATA PREF	138° 55.80'	37° 18.40'	6.5	14.17	—	★	—
10	2004.10.23	19:45	MID NIIGATA PREF	138° 52.57'	37° 17.74'	5.7	12.35	★	★	—
11	2004.10.25	06:04	MID NIIGATA PREF	138° 56.81'	37° 19.80'	5.8	15.2	★	★	—
12	2004.10.27	10:40	MID NIIGATA PREF	139° 02.00'	37° 17.51'	6.1	11.6	★	★	—
13	2004.11.08	11:15	MID NIIGATA PREF	139° 01.92'	37° 23.76'	5.9	0	★	★	—
14	2007.03.25	09:41	能登半島沖地震 OFF NOTO PENINSULA	139° 41.10'	37° 13.20'	6.9	11	○	○	○
—	2007.07.16	10:13	中越沖地震 OFF S NIIGATA PREF	138° 36.54'	37° 33.42'	6.8	16.8	—	—	★
15	2007.07.16	15:37	OFF S NIIGATA PREF	138° 38.60'	37° 30.20'	5.8	11	○	○	○

【★】：陸域の地震の観測記録を複数取得できているためそれらを活用して評価
 【★】：海域の地震の記録数が少なく、中越沖地震の観測記録が複数号機の基礎版上で取得できているためそれらを活用して評価
 【○】：記録を取得 , 【—】：記録が得られていない

敷地における地震波の増幅特性に関する検討結果の反映事項

中小地震の分析により確認された特性

	中小地震の分析により確認された特性			記録取得状況 反映事項
	震央分布	荒浜側	大湊側	
海域	<p>凡例(実線:NS, 点線:EW) No.1 No.2 No.3 No.4 平均</p>	<p>■ 荒浜側, 大湊側とも, 耐専スペクトルとの比率が1を上回る傾向。 ■ 荒浜側と大湊側で耐専スペクトルとの比率に違いがあり, 荒浜側の方が大きい。</p>		<ul style="list-style-type: none"> 荒浜側と大湊側で比率に著しい違いがあるため分けて評価 海域の地震の記録数が少なく, 中越沖地震の観測記録が複数号機の基礎版上で取得できているためそれらを活用して評価
陸域	<p>注) 平均はNo.1~No.6地震を用いて算定</p>	<p>■ 荒浜側, 大湊側とも, 耐専スペクトルとの比率が1秒より短い周期帯で1を下回る傾向。 ■ 荒浜側と大湊側で耐専スペクトルとの比率に違いが見られない。</p>		<ul style="list-style-type: none"> 荒浜側と大湊側で比率に違いがみられないため共通に評価 複数号機の基礎版上では取得できていないが, 陸域の地震の観測記録を複数取得できているためそれらを活用して評価

検討対象地震 ・ M5.5以上 ・ 震源距離200km以内
 ・ 解放基盤に近い地盤系観測点で観測されており, 最大加速度値が1Gal程度以上
 ・ 1号機地盤系及び5号機地盤系で共通に記録が得られている地震

※ 耐専スペクトル: Noda et al.(2002)に基づく応答スペクトル

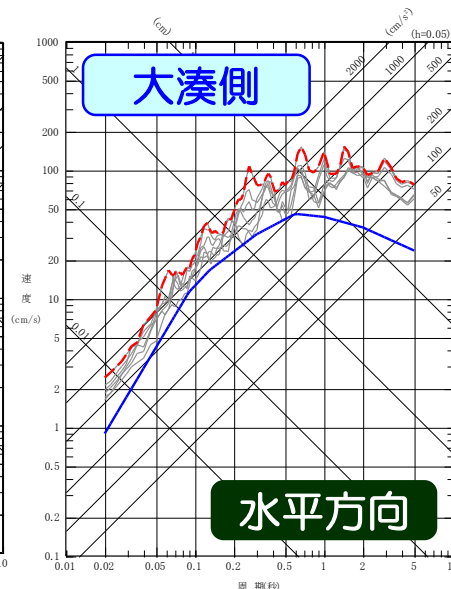
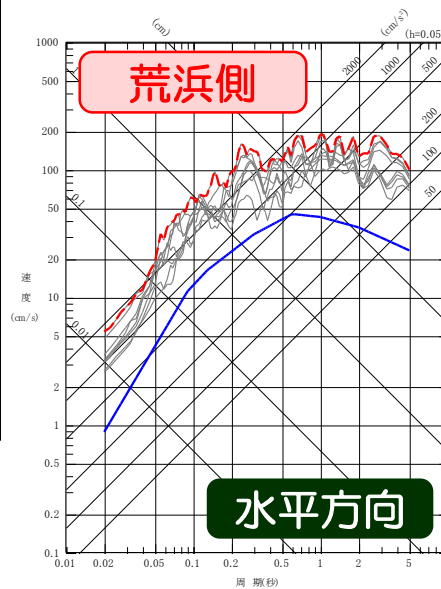
詳細については, 第266回審査会合 資料1参照

a. F-B断層による地震

b. 長岡平野西縁断層帯による地震

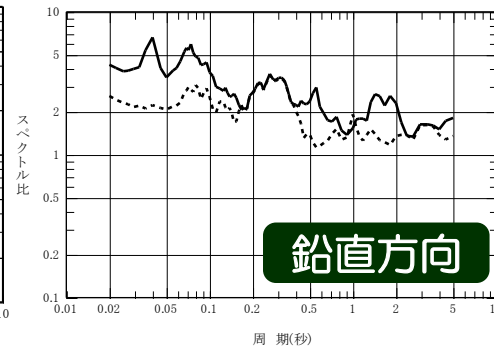
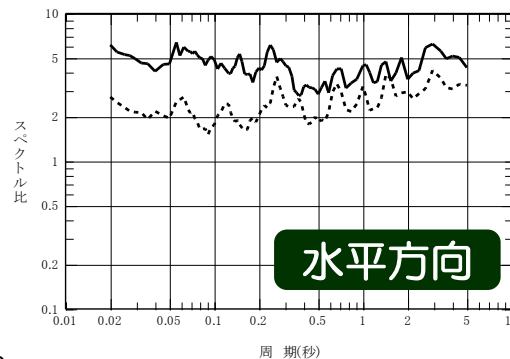
評価手法と観測記録に基づく補正係数

- 評価手法は、Noda et al.(2002)による手法を採用。
- 地震規模は、中越沖地震の知見を踏まえて設定。
- 地震波の伝播特性を反映するために用いる観測記録に基づく補正係数は、中越沖地震における荒浜側（1～4号機側）と大湊側（5～7号機側）の原子炉建屋基礎版上の観測記録から推定した解放基盤波（灰色線）をそれぞれ安全側に包絡した応答スペクトル（赤線）とNoda et al.(2002)による応答スペクトル（青線）の比として設定。



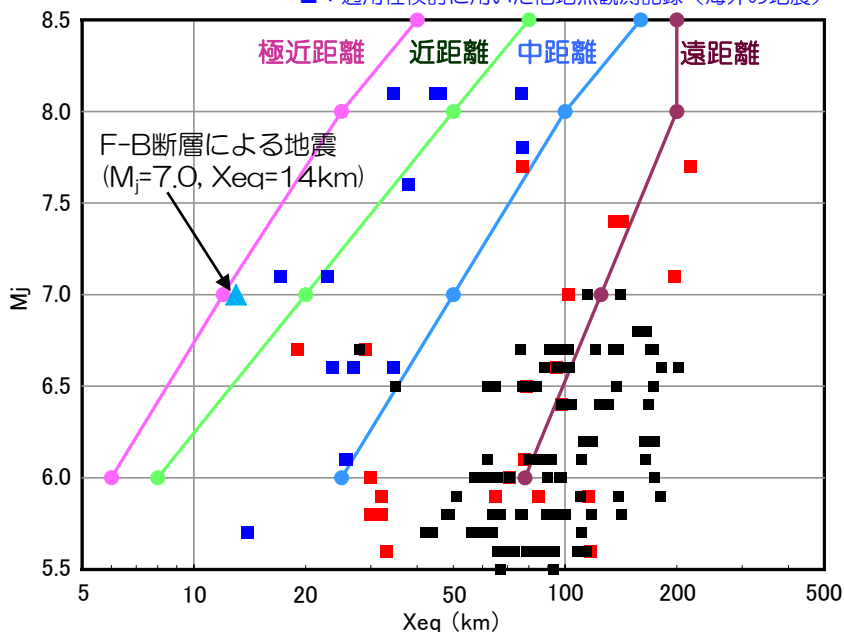
赤線
青線

— 荒浜側（1～4号機側）
- - - 大湊側（5～7号機側）



観測記録に基づく補正係数

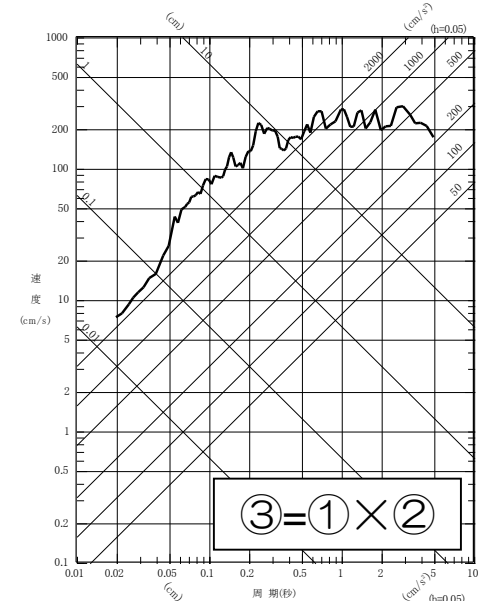
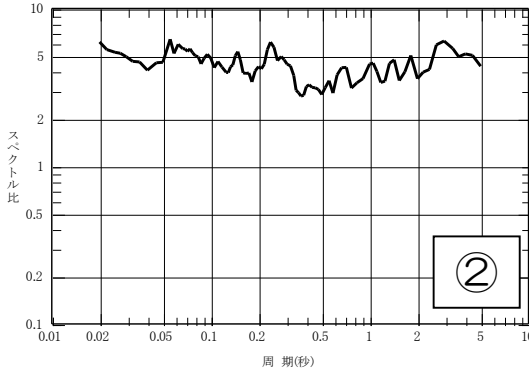
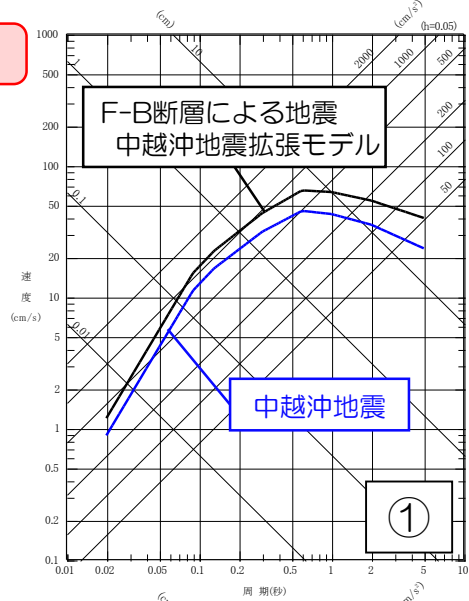
- : 回帰式の作成に用いた観測記録
- : 適用性検討に用いた他地点観測記録（国内の地震）
- : 適用性検討に用いた他地点観測記録（海外の地震）



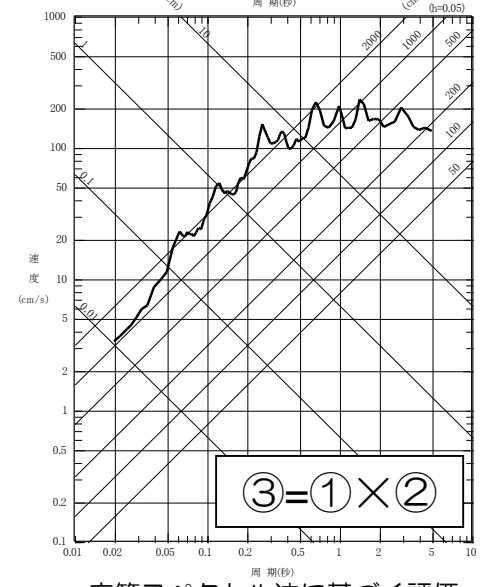
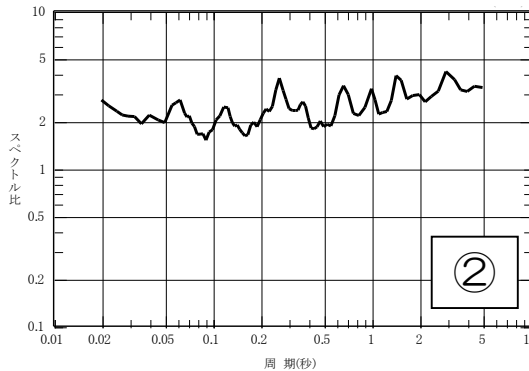
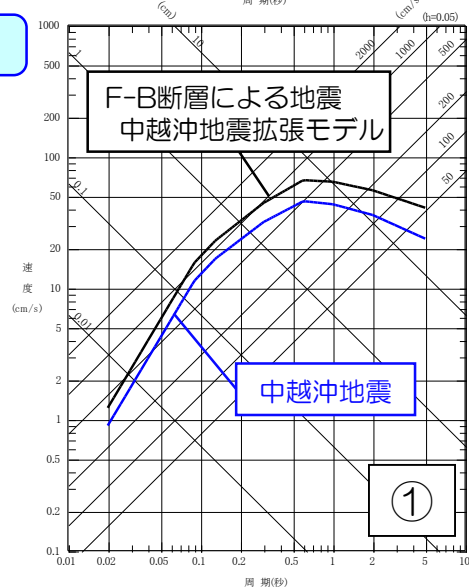
原子力安全委員会(2009)「応答スペクトルに基づく地震動評価」に関する専門家との意見交換会、資料第1-1号より抜粋（一部加筆・修正）

補正係数を用いた評価

荒浜側



大湊側



観測記録に基づく補正係数

注) 水平動の結果。鉛直動も同様の方法で算定。

※F-B断層による地震については、中越沖地震の知見を踏まえたうえで、36kmに拡張したモデル（中越沖地震拡張モデル）で代表させる。

Noda et al.(2002)による評価

応答スペクトル法に基づく評価
F-B断層による地震 (M7.0, Xeq=13km)

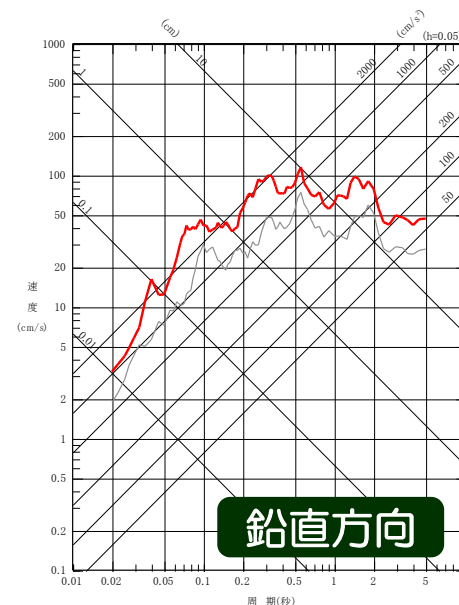
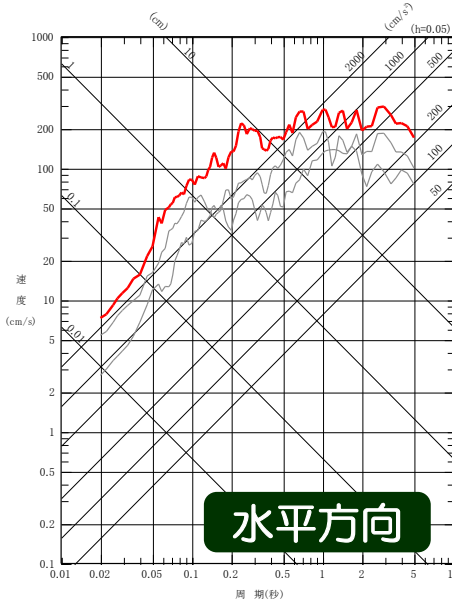
地震動評価結果

荒浜側

- F-B断層による地震(M7.0, Xeq=13km)
- 【参考】中越沖地震解放基盤波(1号機)



F-B断層による地震の評価結果を
基準地震動Ss-1として策定

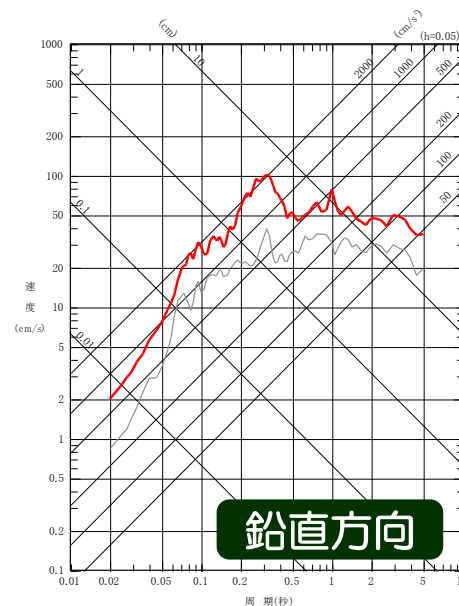
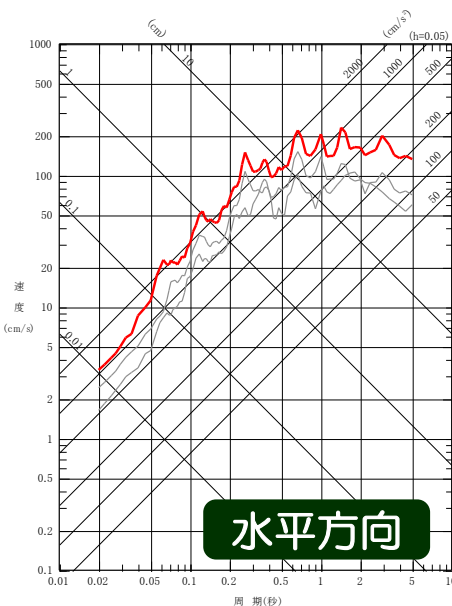


大湊側

- F-B断層による地震(M7.0, Xeq=13km)
- 【参考】中越沖地震解放基盤波(5号機)



F-B断層による地震の評価結果を
基準地震動Ss-1として策定



a. F-B断層による地震

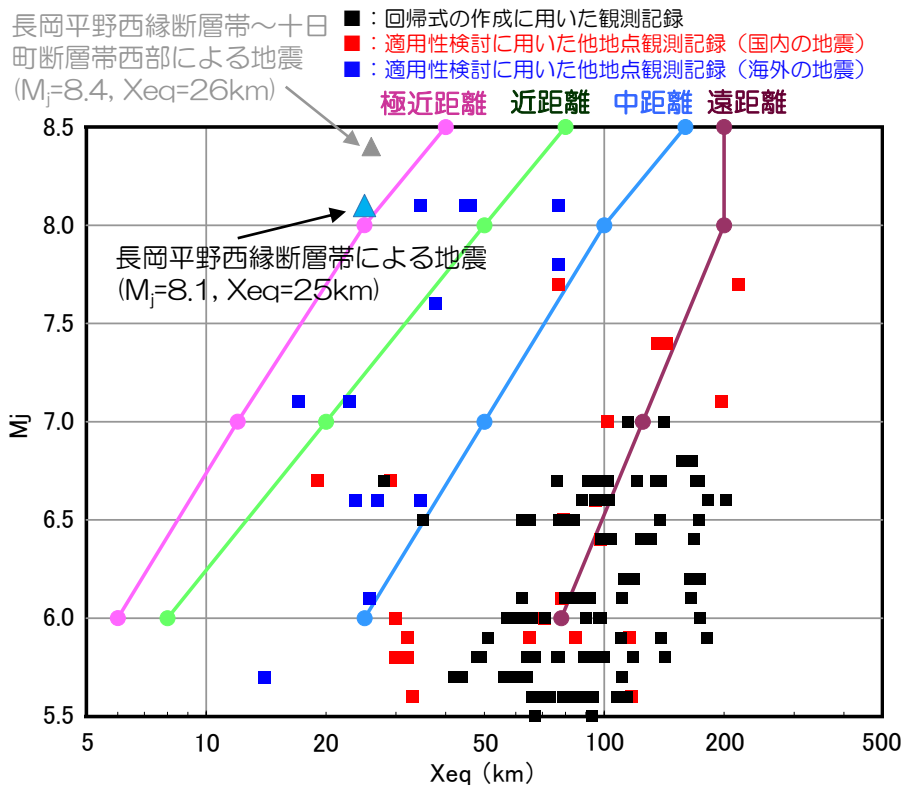
b. 長岡平野西縁断層帯による地震

評価手法と地震規模

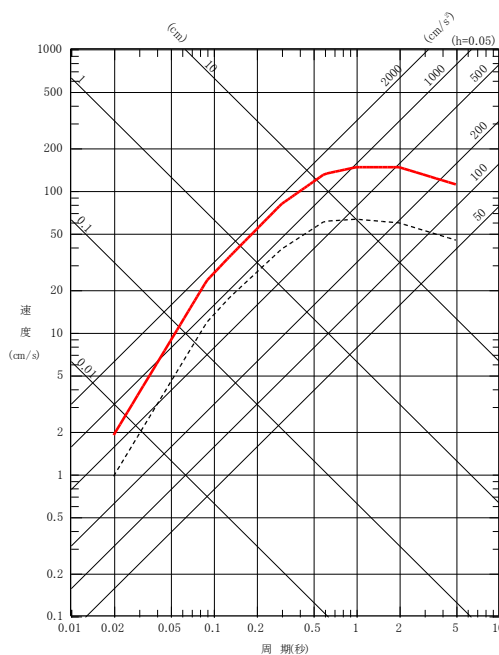
- 評価手法は、Noda et al.(2002)による手法を採用。
- 未だ発生していない長岡平野西縁断層帯による地震の地震規模については、安全側の評価となるように松田式から算定。

長岡平野西縁断層帯 断層長さ L: 91km
断層幅 W: 15km
断層面積 S: 1,365km²

手法	内容	適用した際の規模M
大竹ほか(2002)	$\log L = 0.67M - 3.07$	7.5
中越沖地震を踏まえた地震規模	$M = 6.8 + (2/1.2)(\log(S/540))$	7.5
松田(1975)	$\log L = 0.6M - 2.9$	8.1



原子力安全委員会(2009)「応答スペクトルに基づく地震動評価」に関する専門家との意見交換会、資料第1-1号より抜粋(一部加筆・修正)



----- M7.5, X_{eq}=25km
 ———— M8.1, X_{eq}=25km

■ 松田式から算定される地震規模を採用することで、十分な保守性を確保。

規模設定の影響確認 (観測記録に基づく補正係数を考慮せずに算定)

観測記録に基づく補正係数

- 地震波の伝播特性を反映するために、観測記録に基づく補正係数を考慮し、想定する地震と同一方向の陸域（中越地域）で発生した地震の解放基盤波とNoda et al.(2002)による応答スペクトルの比として設定。
- 敷地における地震波の増幅特性に関する検討により、共通に得られている地震観測記録によると、陸域から到来する地震波については、荒浜側と大湊側で増幅特性に違いがみられないため、荒浜側・大湊側で得られた記録を用いて共通の補正係数を評価。
- 海域の地震と比較して、陸域の地震に対しては、敷地において地震観測記録が複数得られていることから、日本電気協会(2008)を参考に、平均的な諸特性を考慮することを基本と考える。
- なお、補正係数の下限を1とし、短周期側の地震動レベルを嵩上げすることにより、応力降下量の不確かさに相当するケースを考慮。

1.2.3.2 経験的な方法

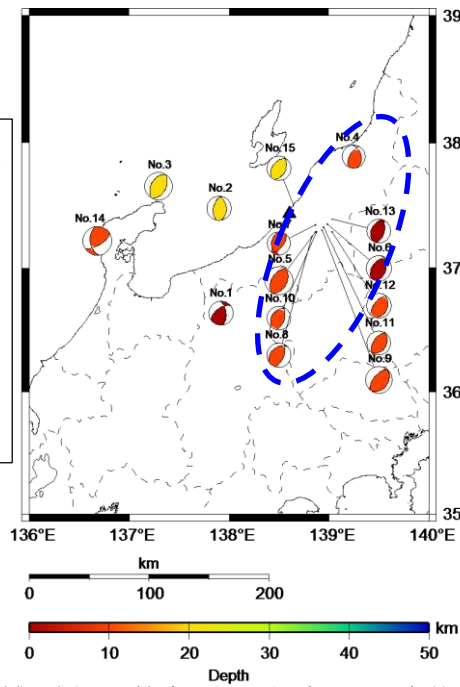
距離減衰式に基づいた経験的な方法により地震動を評価する場合は、用いる距離減衰式の特徴や適用性を考慮しなければならない。特に、敷地において地震観測記録が多数得られている場合には、その平均的な諸特性を考慮することとする。

以下に示す手法は、原子力発電所の立地に適している解放基盤相当における地盤特性が明らかな観測点のデータを回帰分析した距離減衰式に基づいており、地盤の特性に応じた地震動の応答スペクトルをより精度良く算定することができる。

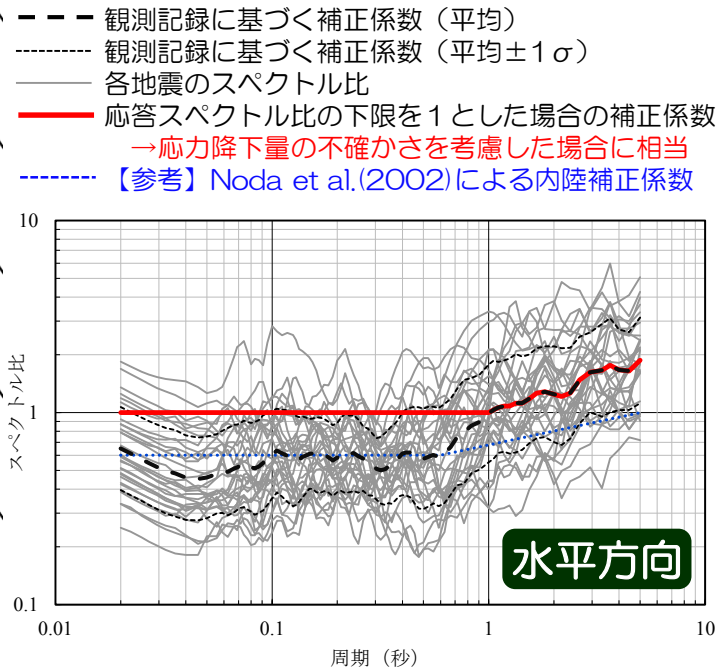
(1) 解放基盤表面における周期 0.02 秒から 5 秒の地震動の応答スペクトル

水平・鉛直地震動の応答スペクトルは、マグニチュード M と等価震源距離 X_{eq} 、解放基盤表面の弾性波速度、地震基盤から表層の卓越周期を用いて以下のように得られる。水平地震動応答スペクトルの考え方を図 1.2.3.2-1 に示す。

日本電気協会(2008)より抜粋
(一部加筆・修正)



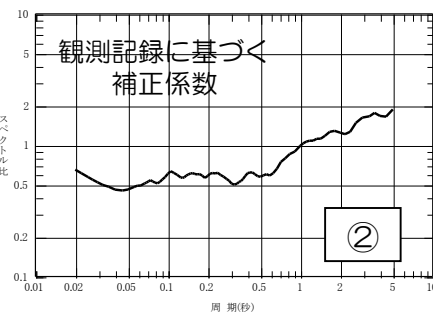
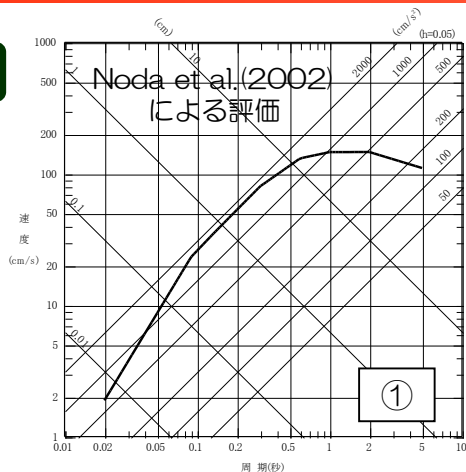
補正係数の算定に用いた地震の震央分布



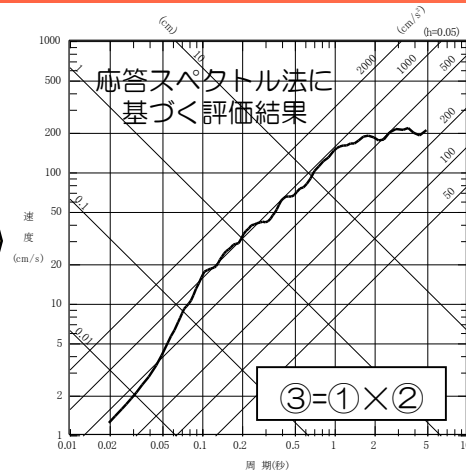
観測記録に基づく補正係数 (荒浜側, 大湊側で共通)

補正係数を用いた評価と地震動評価結果

算定フロー



※基本震源モデルの例。
その他のモデルも同様に算定。



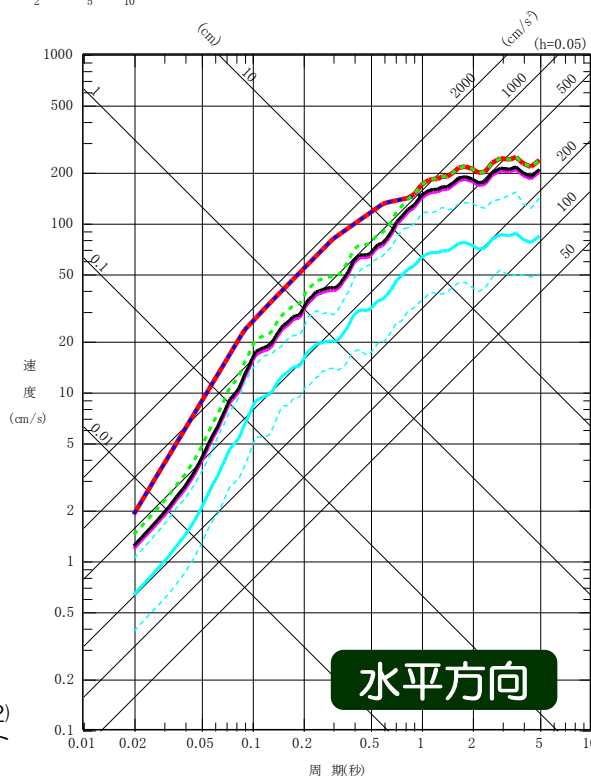
地震動評価結果

- No.1: 長岡平野西縁断層帯
- No.3: アスペリティ位置の不確かさ考慮
- - - No.5: 応力降下量の不確かさ考慮
- - - No.6: 断層傾斜角の不確かさ考慮
- 基準地震動Ss-3H
- 中越沖地震を踏まえた地震規模及び観測記録に基づく補正係数(平均)を考慮したケース
- - - 中越沖地震を踏まえた地震規模及び観測記録に基づく補正係数(平均±1σ)を考慮したケース

※凡例のNo.は検討ケースの一覧表による。

なお、破壊開始点(No.2)、破壊伝播速度(No.4)の不確かさについては、応答スペクトルに基づく手法で評価することができないため断層モデルによる評価で影響を把握する。また、運動を考慮したケース(No.7~9)は、Noda et al.(2002)の適用範囲外であるため断層モデルによる評価を行う。

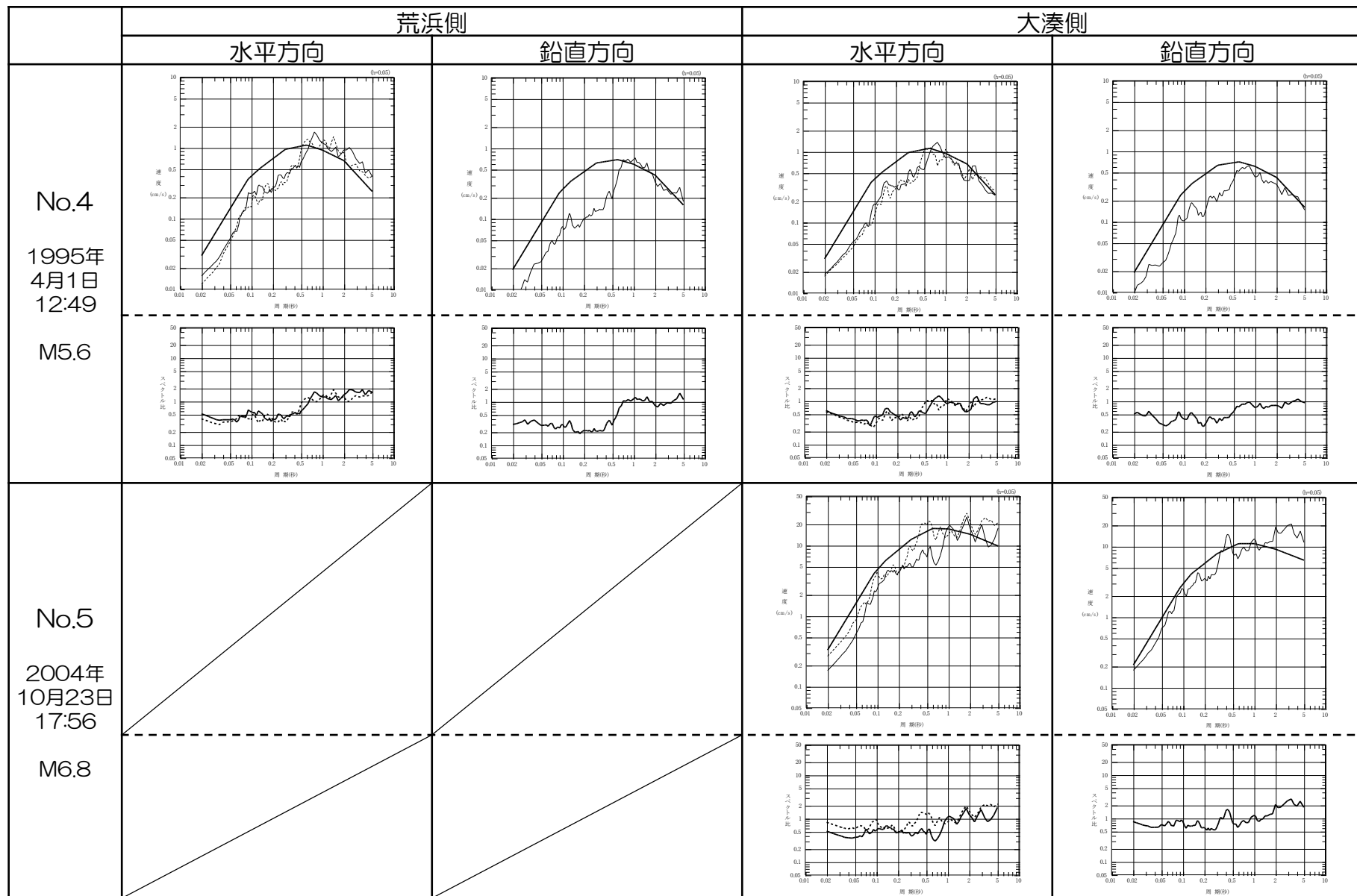
鉛直方向は、補正係数の傾向を確認のうえ、Noda et al.(2002)による鉛直方向と水平方向の比を参考に水平方向の応答スペクトルの2/3倍としている。



- 観測記録に基づく補正係数のばらつきに対しては、地震規模の設定、さらには短周期レベルを嵩上げすることにより保守性を確保している。
- 短周期側では、応力降下量の不確かさ、長周期側では、断層傾斜角の不確かさの影響が大きい。

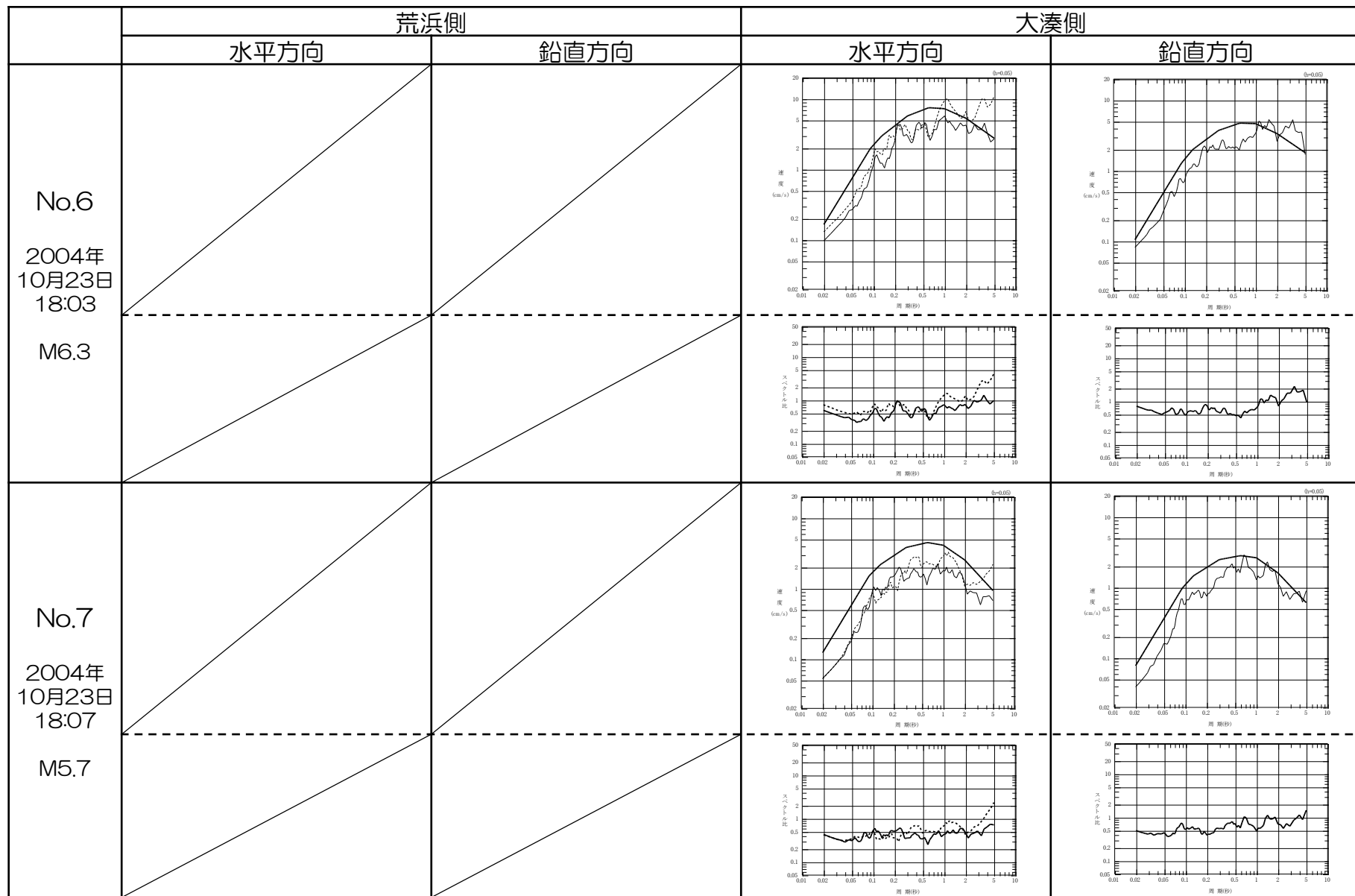
⇒ No.5及びNo.6を包絡して設定した応答スペクトルを基準地震動Ss-3として策定

【参考1】陸域の観測記録に基づく補正係数 各地震の算定結果



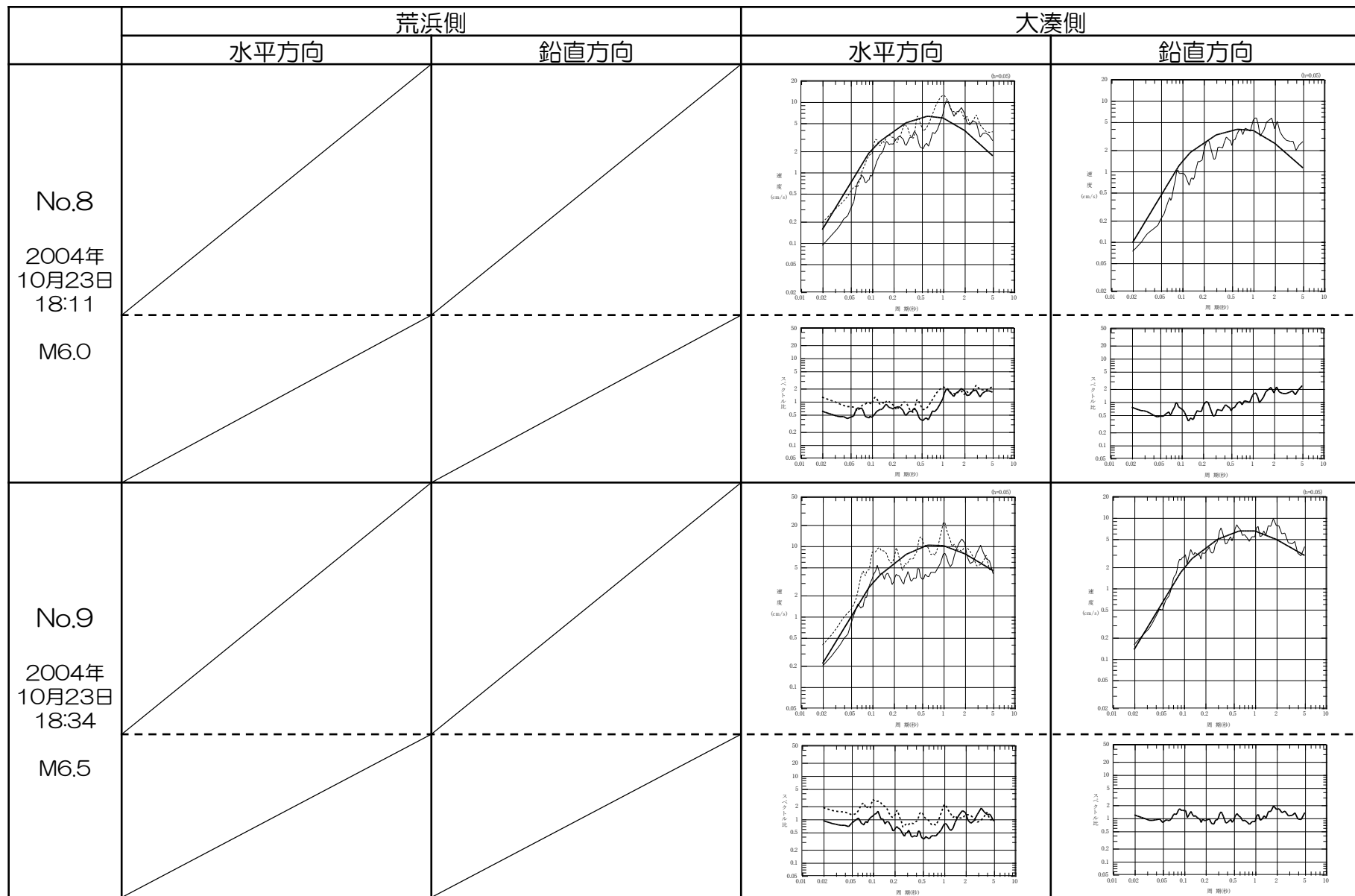
上段：解放基盤波（細線）とNoda et al.(2002)による応答スペクトル（実線：NS,UD, 点線：EW） 下段：応答スペクトル比（実線：NS,UD, 点線：EW）

【参考1】陸域の観測記録に基づく補正係数 各地震の算定結果



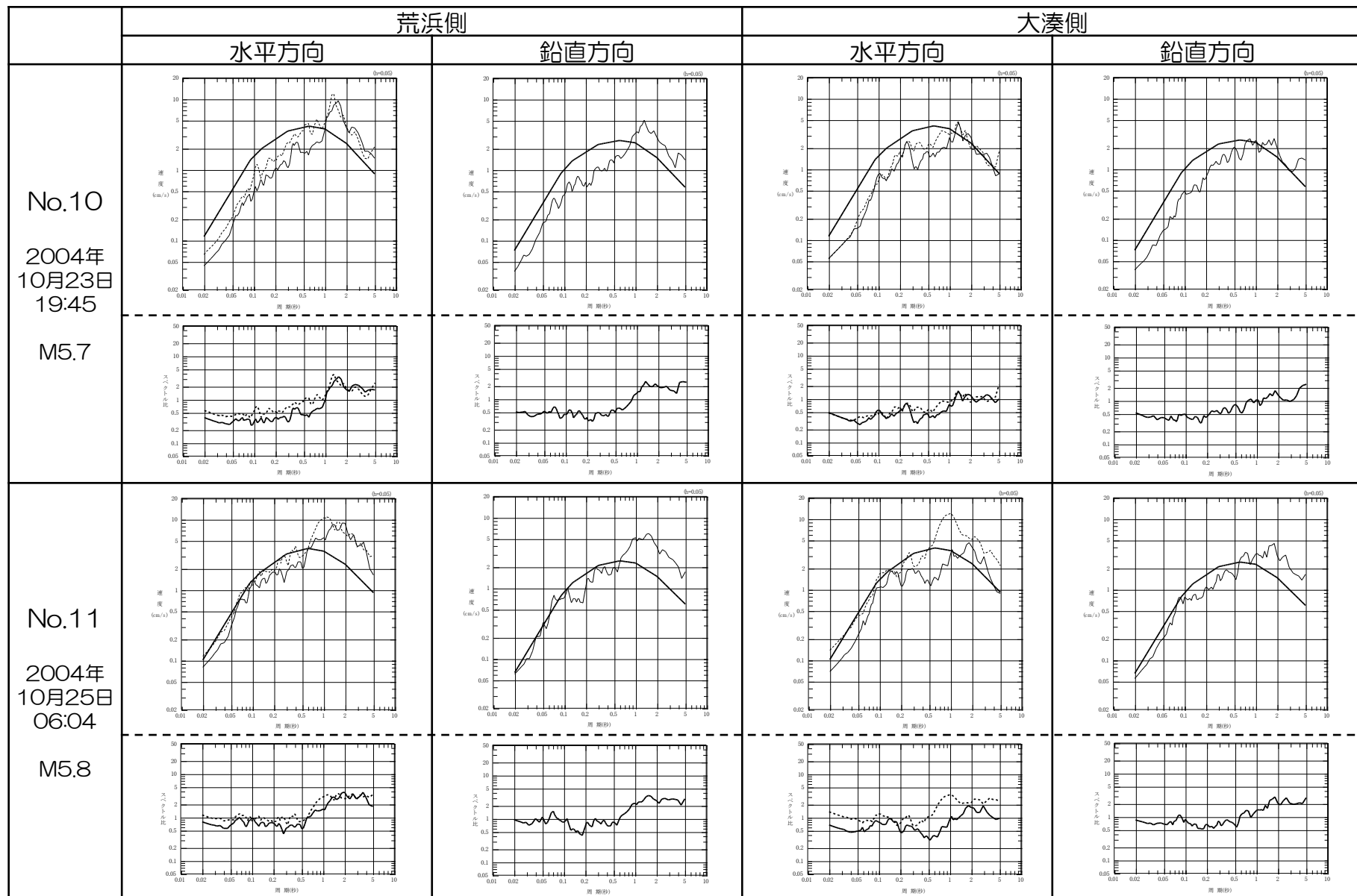
上段：解放基盤波（細線）とNoda et al.(2002)による応答スペクトル（実線：NS,UD, 点線：EW） 下段：応答スペクトル比（実線：NS,UD, 点線：EW）

【参考1】陸域の観測記録に基づく補正係数 各地震の算定結果



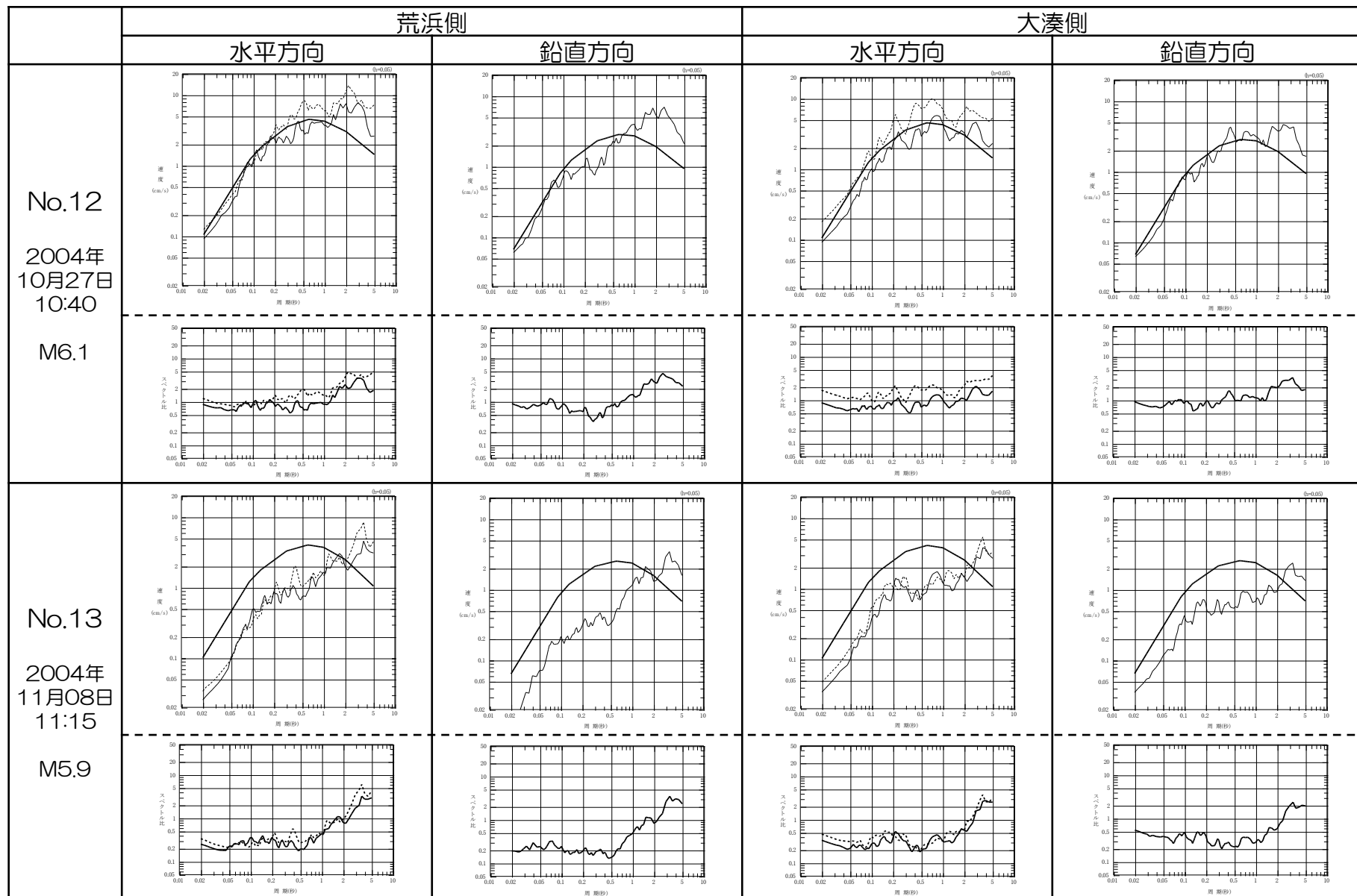
上段：解放基盤波（細線）とNoda et al.(2002)による応答スペクトル（実線：NS,UD, 点線：EW） 下段：応答スペクトル比（実線：NS,UD, 点線：EW）

【参考1】陸域の観測記録に基づく補正係数 各地震の算定結果



上段：解放基盤波（細線）とNoda et al.(2002)による応答スペクトル（実線：NS,UD, 点線：EW） 下段：応答スペクトル比（実線：NS,UD, 点線：EW）

【参考1】陸域の観測記録に基づく補正係数 各地震の算定結果



上段：解放基盤波（細線）とNoda et al.(2002)による応答スペクトル（実線：NS,UD, 点線：EW） 下段：応答スペクトル比（実線：NS,UD, 点線：EW）

【参考2】鉛直方向の評価について

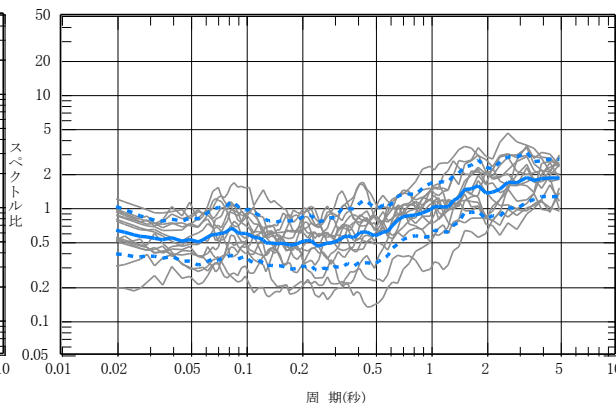
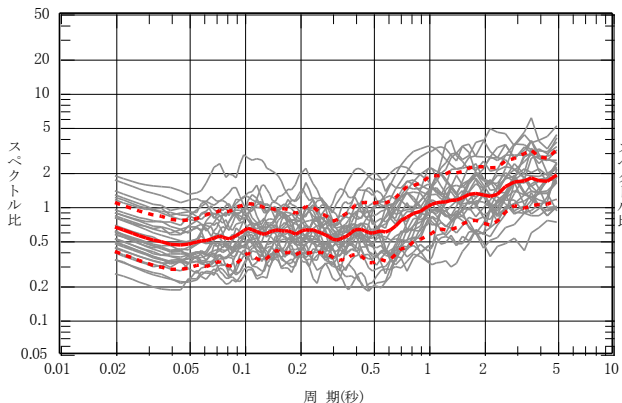
■ 従来の評価においては、Noda et al.(2002)による鉛直方向と水平方向の比を参考に、水平方向の応答スペクトルの2/3として評価を実施。（水平方向と鉛直方向において観測記録に基づく補正係数に顕著な相違がないことが前提であった。）

■ 得られた観測記録を用い、水平方向及び鉛直方向の観測記録に基づく補正係数を評価した結果、以下の事項を確認し、従来の評価が妥当であることを確認。

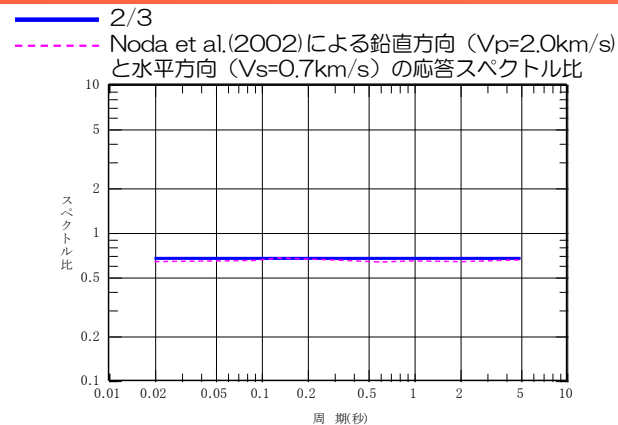
- ① 水平方向と鉛直方向において観測記録に基づく補正係数に顕著な相違がないこと。
- ② 鉛直方向の観測記録に基づく補正係数を用いた評価結果は、従来の水平方向の2/3とした場合とほぼ同じ地震動レベルであること。

— 水平方向の観測記録に基づく補正係数（平均）
 - - - 水平方向の観測記録に基づく補正係数（平均±1σ）
 — 各地震の応答スペクトル比

— 鉛直方向の観測記録に基づく補正係数（平均）
 - - - 鉛直方向の観測記録に基づく補正係数（平均±1σ）
 — 各地震の応答スペクトル比

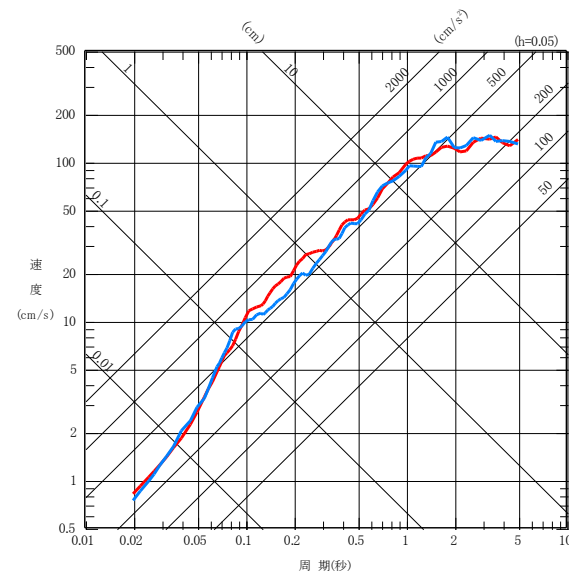


観測記録に基づく補正係数（左：水平方向，右：鉛直方向）



Noda et al.(2002)による鉛直方向と水平方向の応答スペクトル比

— 水平方向の2/3とした評価結果（従来評価）
 — 鉛直方向の補正係数を用いた評価結果



水平方向の2/3とした場合と鉛直方向の補正係数を用いた評価結果の比較
 (長岡平野西縁断層帯による地震, M8.1, Xeq=25km)

【参考3】 中越沖地震を踏まえた地震規模の設定

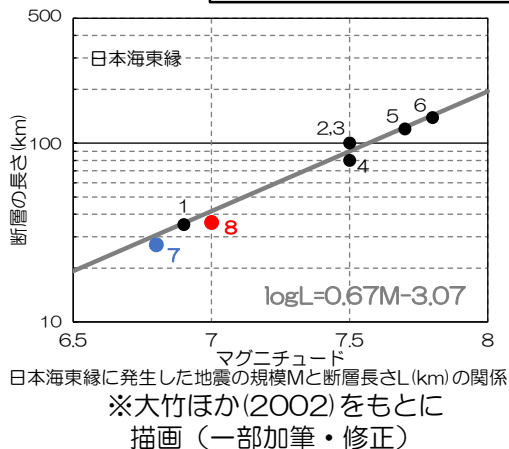
- 中越沖地震が既に発生している地震であることを踏まえ、中越沖地震の物理量を保持するよう、スケーリング則に従いマグニチュードを評価する。
- 具体的には、断層幅が飽和した場合の「地震モーメント(M_0)と断層面積(S)に関するスケーリング則」(①式)、及び「地震モーメントと M_j の関係を与える武村(1998)式」(②式)に基づき、マグニチュードを評価する。

$$M_0 \propto S^2 \dots \text{①式}$$

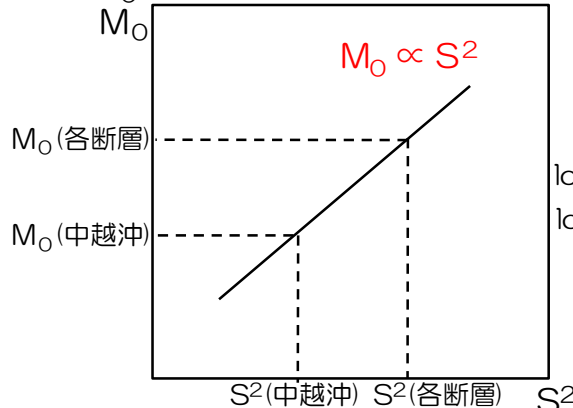
$$\log M_0 = 1.2 M_j + 10.7 \dots \text{②式}$$

- 中越沖地震の面積は以下とする。
27km × 20km = 540km²

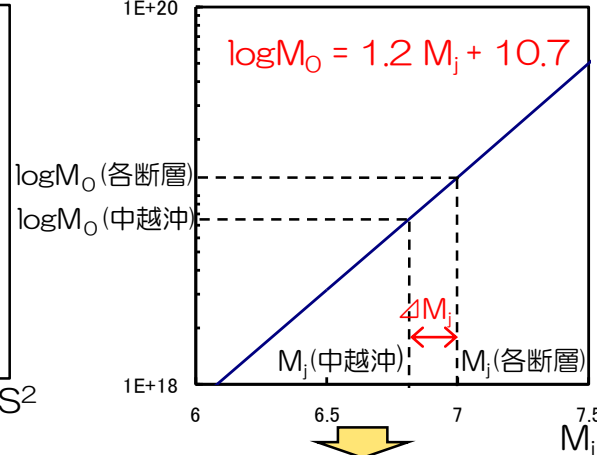
- 既往の文献における、 M_j と断層長さの関係に着目。
- 中越沖地震の周辺で発生した地震のマグニチュード M_j と断層長さの関係には相関性が認められ、中越沖地震の「断層長さ27km：マグニチュード M_j 6.8」は、既往地震の傾向とよく整合。



M_0 とSのスケリング(断層幅飽和の場合)



$\log M_0$ 武村(1998)



$$\frac{M_0(\text{各断層})}{M_0(\text{中越沖})} = \left\{ \frac{S(\text{各断層})}{S(\text{中越沖})} \right\}^2$$

$$\Delta M_j = \left\{ \frac{1}{1.2} \right\} \left\{ \text{Log} \left(\frac{M_0(\text{各断層})}{M_0(\text{中越沖})} \right) \right\}$$

$$\Delta M_j = \left\{ \frac{2}{1.2} \right\} \left\{ \text{Log} \left(\frac{S(\text{各断層})}{S(\text{中越沖})} \right) \right\}$$

各断層による地震の M_j
= $M_j(\text{中越沖: } 6.8) + \Delta M_j$
※例 F-B断層(36km)の時
 $M_j = 6.8 + 0.2 = 7.0$

No.	地震	M	L(km)	出典
1	1828年越後三条地震	6.9	約35	宇佐美(1996)
2	1833年庄内沖地震	7.5	100	相田(1989)
3	1940年積丹半島沖地震	7.5	100	Satake(1986)
4	1964年新潟地震	7.5	80	Abe(1975)
5	1983年日本海中部地震	7.7	120	Sato(1985)
6	1993年北海道南西沖地震	7.8	139	Tanioka et al. (1995)
7	2007年新潟県中越沖地震	6.8	27	各機関公表値
8	F-B断層による地震	7.0	36	設定値

1. 応答スペクトルに基づく地震動評価に関するご指摘について
2. F-B断層による地震の地震動評価に関するご指摘について
3. 長岡平野西縁断層帯による地震の地震動評価に関するご指摘について
4. 海域の連動について
5. 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動について

		内容	説明概要	ページ
2	H27 10/2	F-B断層による地震の震源モデルの設定について考え方を整理して説明すること。	<ul style="list-style-type: none"> • 設定根拠となるデータ及び「中越沖地震拡張モデル」と「強震動予測シビモデル」の位置付けを整理し、長岡平野西縁断層帯における考え方との対比等を含め、考え方についてご説明。 	23~62
3	H27 10/2	F-B断層の断層モデルを用いた地震動評価において、第3アスペリティの補正係数については、その妥当性を改めて確認し、説明性を向上するよう検討すること。	<ul style="list-style-type: none"> • 統計的グリーン関数法を用いた試検討内容、中小地震の観測記録を用いた検討結果を踏まえ、再設定した補正係数を考慮した場合の地震動評価結果についてご説明。 	63~75

(1) F-B断層による地震の震源モデルの設定に関する検討

① 震源モデルの設定

- a. 強震動予測レシピモデル
- b. 中越沖地震アスペリティモデル・中越沖地震拡張モデル
- c. まとめ

② 長岡平野西縁断層帯による地震との対比

③ 整理結果を踏まえた活断層の諸元表

(2) 第3アスペリティの補正係数に関する検討

検討概要

- F-B断層による地震に関しては、「強震動予測レシピモデル」, 「中越沖地震アスペリティモデル」及び「中越沖地震拡張モデル」を設定し検討を実施。
- これらは、拠り所とするデータ, 設定の考え方及びパラメータが異なり, それらが混在する表記となっていたことから, ここでは説明性を向上するために, 以下について整理して取り纏める。
 - ①震源モデルの設定
 - ②長岡平野西縁断層帯による地震との対比
 - ③整理結果を踏まえた活断層の諸元表

モデル名	目的・概要	根拠データ
強震動予測レシピモデル	<ul style="list-style-type: none"> ・地質調査結果, 強震動予測レシピから標準的に想定される地震動ハルの評価 ・中越沖地震で得られた知見等による各不確かさの影響を把握 	地質調査結果 <ul style="list-style-type: none"> ・断層長さ36km ・断層傾斜角は, 明瞭に反射記録を解釈できる範囲では, 中～高角度
中越沖地震アスペリティモデル	<ul style="list-style-type: none"> ・中越沖地震で得られた知見を最大限に活用 ・中越沖地震の震源インバージョン結果をもとに設定した特性化震源モデル。(中越沖地震と同程度の規模の地震を想定) 	中越沖地震の知見・震源モデル <ul style="list-style-type: none"> ・断層長さ27km ・断層傾斜角35° ・震源インバージョン結果 (アスペリティ位置, 破壊伝播速度, 応力降下量)
中越沖地震拡張モデル	<ul style="list-style-type: none"> ・地質調査結果で得られた断層長さ36kmの情報をもとに中越沖地震アスペリティモデルを拡張して設定。 ・中越沖地震で得られた知見を最大限に活用したうえで, 断層長さの不確かさを考慮することで中越沖地震の規模を超える地震を想定。 	地質調査結果 <ul style="list-style-type: none"> ・断層長さ36km 中越沖地震の知見・震源モデル <ul style="list-style-type: none"> ・断層傾斜角35° ・震源インバージョン結果 (アスペリティ位置, 破壊伝播速度, 応力降下量)

(1) F-B断層による地震の震源モデルの設定に関する検討

① 震源モデルの設定

a. 強震動予測レシピモデル

b. 中越沖地震アスペリティモデル・中越沖地震拡張モデル

c. まとめ

② 長岡平野西縁断層帯による地震との対比

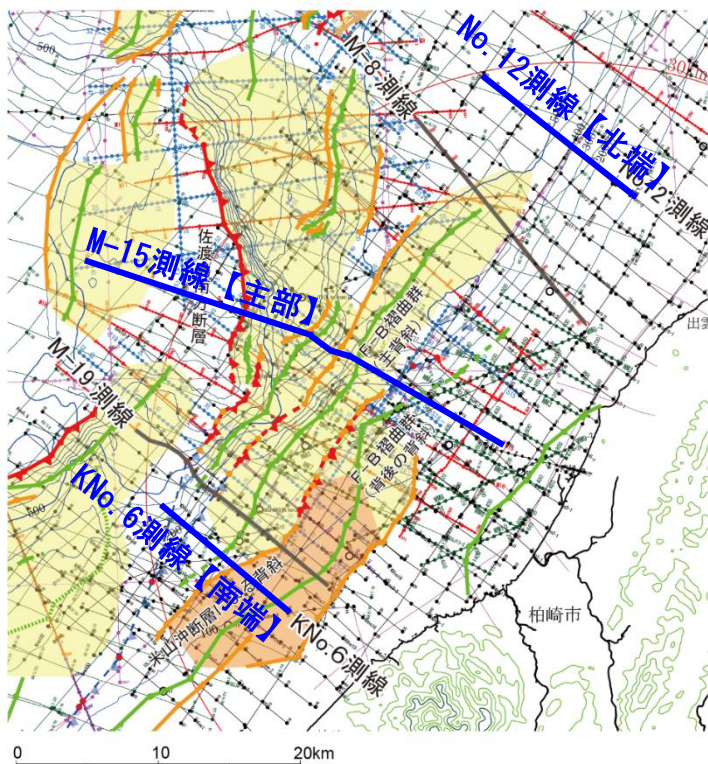
③ 整理結果を踏まえた活断層の諸元表

(2) 第3アスペリティの補正係数に関する検討

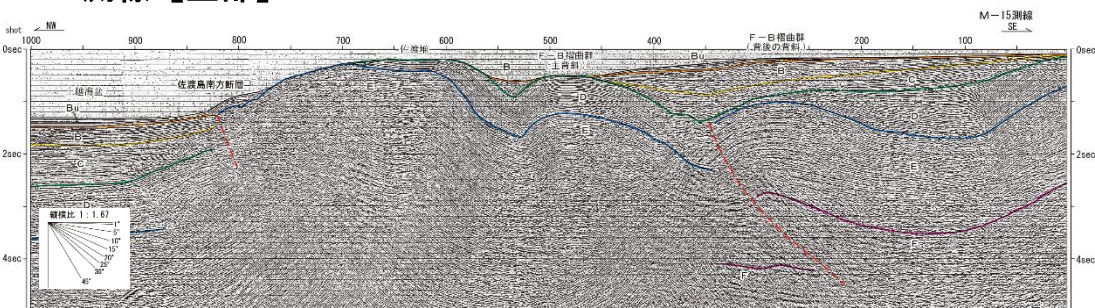
a. 強震動予測レシピモデル 【地質調査結果】断層長さに関する情報

【評価】

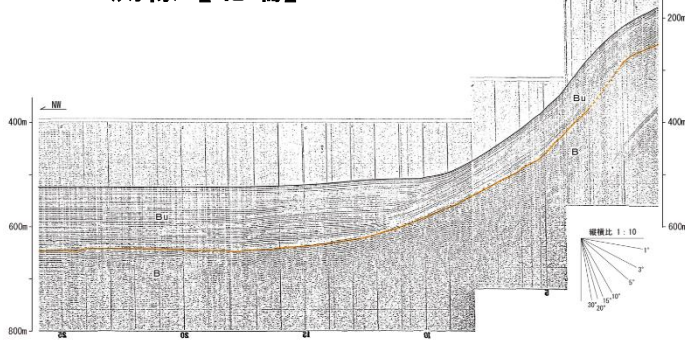
- F-B褶曲群の主背斜については、その西翼に南東傾斜の逆断層が推定され、また、最終氷期の侵食面にも変形が認められ、後期更新世以降の活動が認められることから、活褶曲と判断される。
- その活動的な区間は、M-8測線区間からM-19測線までの約27kmであるが、安全評価上、不確かさの考慮として、Bu層の基底面の高まりが認められなくなるNo.12測線から大陸棚の海底地形と伏在背斜との対応が認められなくなるKNo.6測線までの約36kmと評価する。



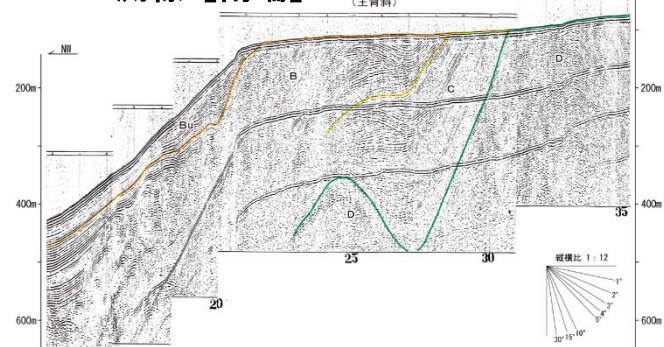
M-15測線【主部】



No.12測線【北端】



KNo.6測線【南端】



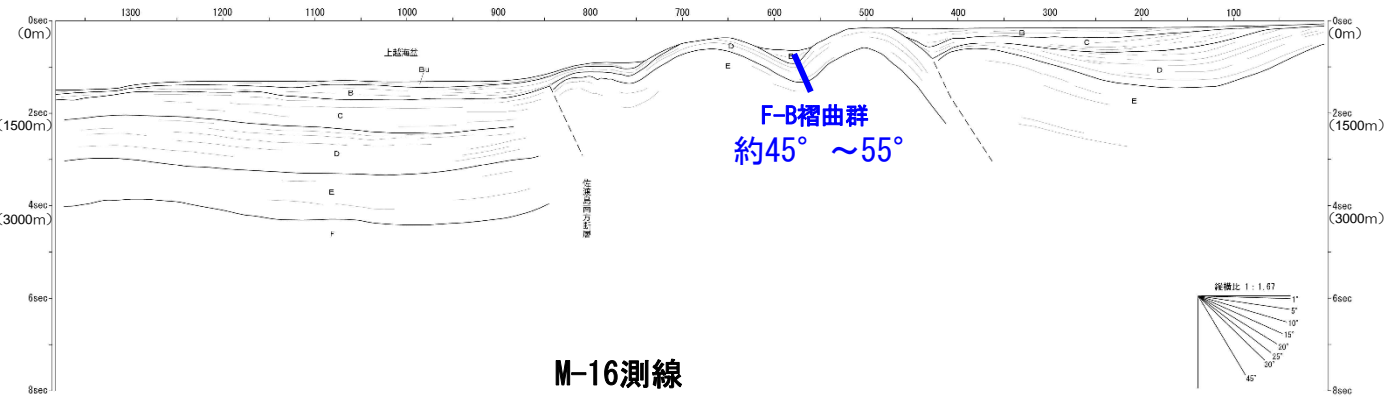
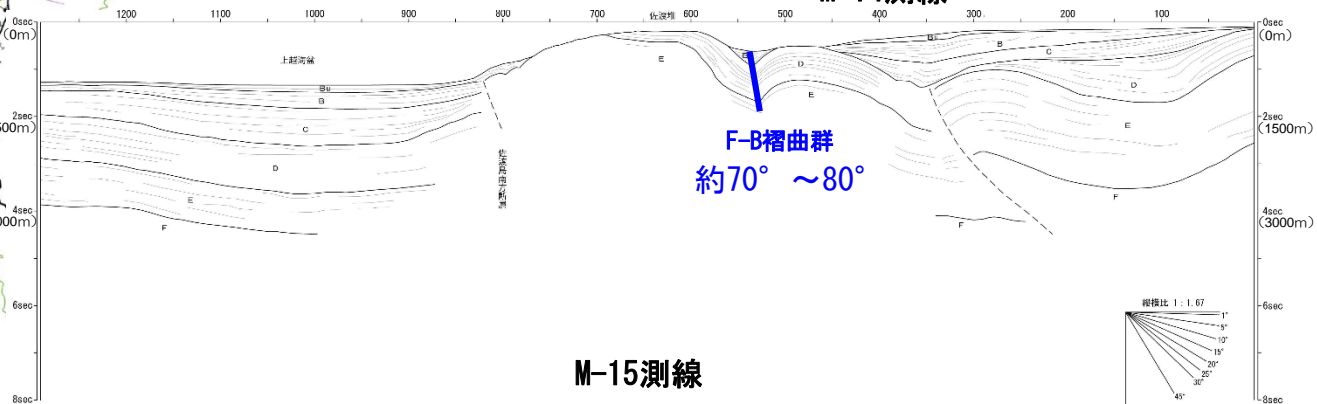
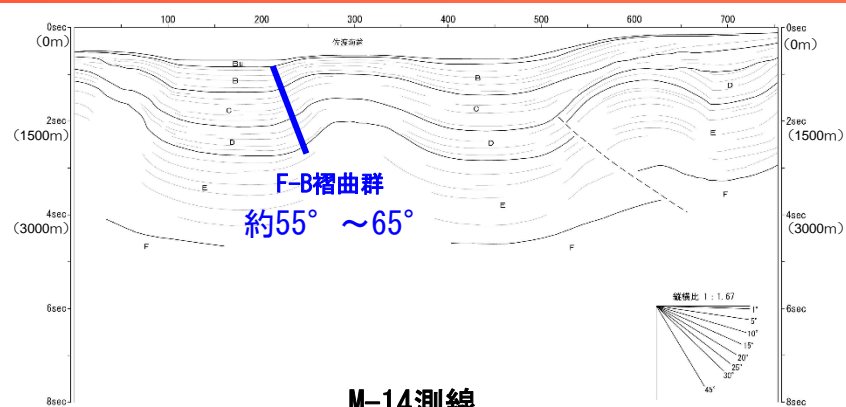
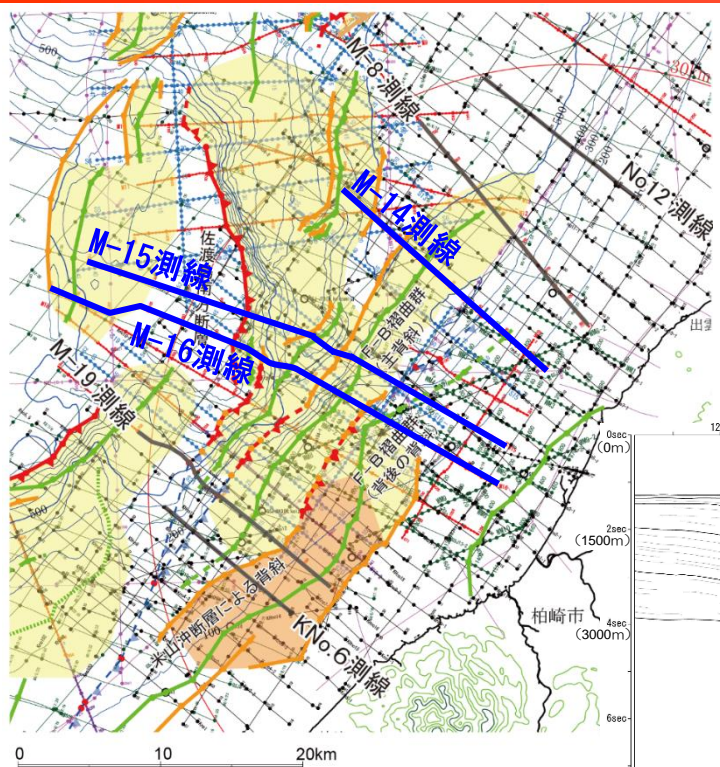
凡例

- 逆断層
- 伏在逆断層
- 古い逆断層
- 背斜軸
- 伏在背斜軸
- 向斜軸
- 活背斜
- 地下に北西傾斜の逆断層が推定される活背斜
- 活褶曲



第248回審査会合
資料2-3 P27一部修正

a. 強震動予測レシピモデル 【地質調査結果】断層傾斜角に関する情報



■ 海上音波探査結果によると、明瞭に反射記録を解釈できる範囲では、F-B褶曲群の傾斜角は中～高角度と判断される。

(注) 深度はP波速度を1500m/秒 (一定) とした場合の値

a. 強震動予測レシピモデル

【不確かさを考慮する断層パラメータの設定根拠】

- 地質調査結果に基づき強震動予測レシピを用いて設定した強震動予測レシピモデルにおいて、下表の不確かさを考慮し、その影響を把握する。
- したがって、中越沖地震で得られた知見等による各不確かさは重畳させず、個々に考慮する。

パラメータ	基本ケース (No.1)	不確かさの考え方
①断層長さ及び連動	地質調査結果における地層の累積変形が認められる範囲である長さ36kmとして設定。	地質調査結果等から、さらに長さを延長あるいは連動を考慮する必要性はないものと考えられる。
②アスペリティの位置	強震動予測レシピを参考に、断層中央に均等配置。	断層中央に集約して配置。(No.2)
③破壊伝播速度	強震動予測レシピに基づきGeller(1976)より設定(0.72×Vs(3.4km/s)より2.4km/s)。	中越沖地震の震源インバージョン結果によると一部のアスペリティで最大3.1km/sの破壊伝播速度が求められていることから、一部のアスペリティに3.1km/sを設定。(No.3)
④応力降下量	強震動予測レシピに基づき設定(15.6MPa)。	中越沖地震の知見を反映し、強震動予測レシピに基づく値の1.5倍(23.4MPa)を南西側・北西側両方のアスペリティに設定。(No.4)
⑤断層傾斜角	海上音波探査結果、強震動予測レシピを参考に、逆断層において一般的に想定される45°と設定。	地震本部(2008)による中越沖地震の余震分布を参考に35°と設定。(No.5)

※()内はそれぞれの不確かさを考慮して設定したモデルNo.を示す。

a. 強震動予測レシピモデル ③破壊伝播速度の不確かさについて

2004中越地震, 2007年中越沖地震の破壊伝播速度と不確かさの考え方

2004年中越地震

■ 破壊伝播速度は、震源のS波速度 (V_s) に対して平均で0.66倍程度であり、一般的な値である。

	文献	手法	モデル	検討に用いた観測点数	a.破壊伝播速度 (km/s)	b.震源S波速度 (km/s)	比 a/b
①	Kamae et al.(2005)	経験的G関数法	特性化モデル	5	2	3.5	0.57
②	神原ほか(2006)	経験的G関数法	特性化モデル	19	2.45	3.4	0.72
③	佐藤ほか(2007)	経験的G関数法	特性化モデル	7	2.43	3.47	0.70
④	坂井・野津(2011)	経験的サト増幅・位相特性を考慮した統計的G関数法	特性化モデル	16	2.8	3.5	0.80
⑤	青井ほか(2005)	波形イバ-ゾ法	すべり分布	7	2	3.4*	0.59
⑥	Honda et al.(2005)	波形イバ-ゾ法	すべり分布	10	2.2	3.28	0.67
⑦	野津(2005)	波形イバ-ゾ法	すべり分布	13	2.5	3.5	0.71
⑧	Hikima and Koketsu(2005)	波形イバ-ゾ法	すべり分布	11	-	-	-
⑨	芝(2006)	経験的G関数法を用いた震源イバ-ゾ法	地震 τ - ρ 密度分布	9	-	-	-
⑩	Asano and Iwata(2009)	波形イバ-ゾ法	すべり分布	21	1.9	3.46	0.55

*文献中に記載がないため仮定

2007年中越沖地震

■ 破壊伝播速度は、断層面全体としては一般的な値であるが、アパリティ部で震源のS波速度 (V_s) に対し、やや大きい値も求められている。

	文献	手法	モデル	傾斜	検討に用いた観測点数	a.破壊伝播速度 (km/s)	b.震源S波速度 (km/s)	比 a/b
①	入倉ほか(2008)	経験的G関数法	特性化モデル	南東	6(3)	2.7	3.4	0.79
②	Kamae and Kawabe(2008)	経験的G関数法	特性化モデル	南東	22(12)	2.7	3.5	0.77
③	芝(2008)	全体 Asp	経験的G関数法を用いた震源イバ-ゾ法	地震 τ - ρ 密度分布 特性化モデル	南東	2.3	3.4	0.68
						3.1, 2.8, 2.5	3.4	0.91, 0.82, 0.74
④	山本・竹中(2009)	経験的G関数法	特性化モデル	南東+北西	10(2)	2.7, 2.8, 2.8	3.4	0.79, 0.82, 0.82
⑤	野津(2010)	経験的サト増幅・位相特性を考慮した強震波形計算手法	特性化モデル	南東	10(8)	3	3.5	0.86
⑥	Aoi et al.(2008)	波形イバ-ゾ法	すべり分布	南東	14	2.1	3.4	0.62
⑦	引間・瀬野(2008)	ゾイバ-ゾ法	すべり分布	南東	近地11(2) 遠地29 測地41	-	-	-
⑧	Honda and Aoi(2009)	アルバツクフゾイバ-ゾ法	すべり分布	南東	12(10)	2.45	3.4	0.72
⑨	Nakamura et al.(2009)	波形イバ-ゾ法	すべり分布	南東+北西	約50	-	-	-
⑩	Miyake et al.(2010)	波形イバ-ゾ法	すべり分布	南東	34	2.6	3.4	0.76

() 内は敷地内の観測点数

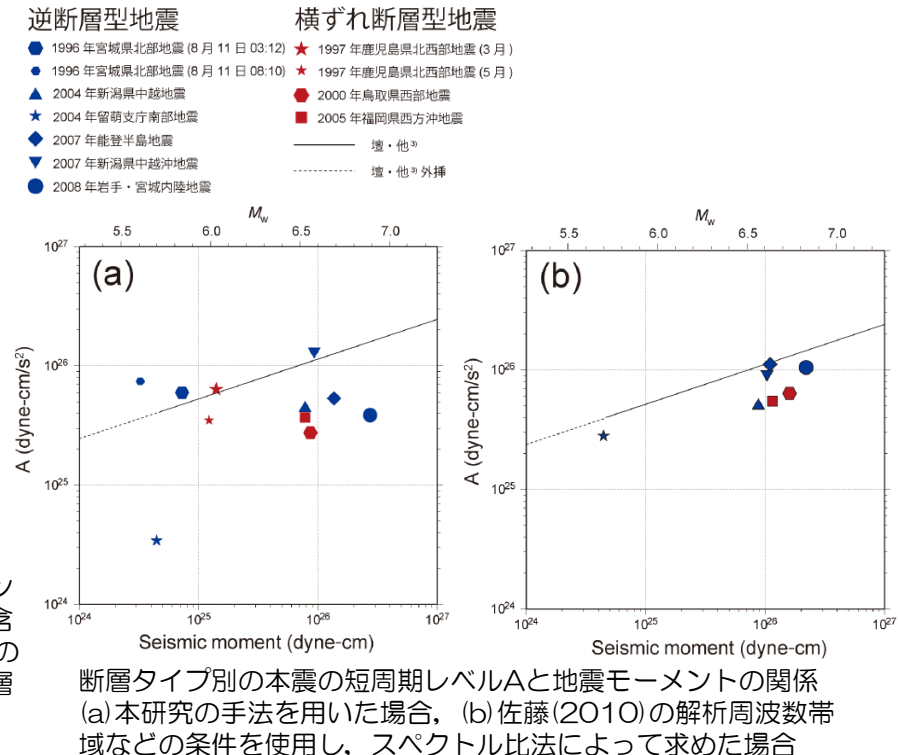
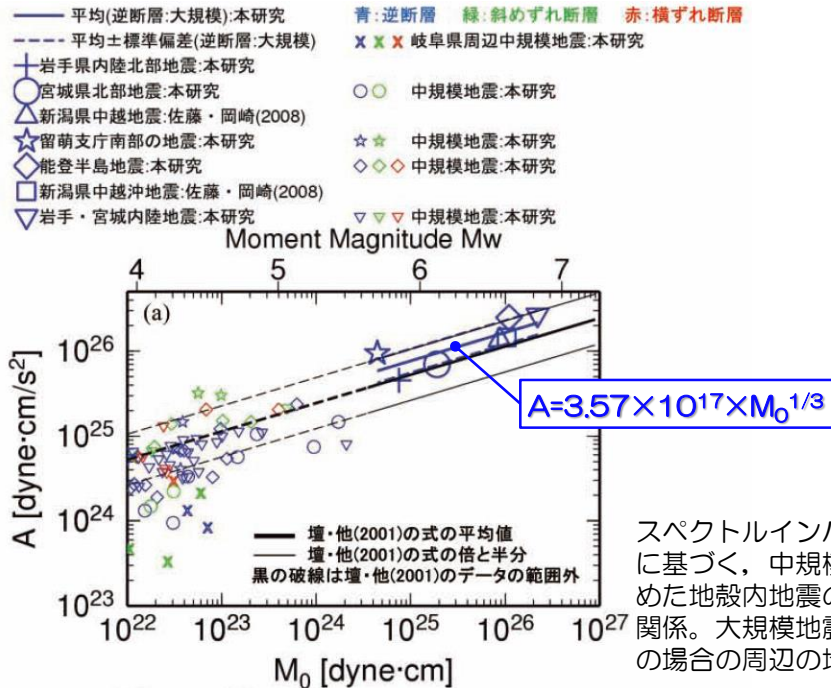
- 破壊伝播速度については、強震動予測レシピを参考にGeller(1976)をもとに設定。
- ただし、2007年中越沖地震の知見を踏まえ、破壊伝播速度の不確かさを考慮する。

a. 強震動予測レシピモデル

④応力降下量の不確かさについて

- 佐藤(2010)では、日本の大規模地殻内地震の震源近傍の強震記録を用いて、同一条件下でスペクトルインバージョンを実施し、逆断層と横ずれ断層の違いを考慮した地震モーメント M_0 と短周期レベルAのスケーリング則を導出。
- 得られた経験式に基づくAは、逆断層では壇ほか(2001)の内陸地殻内地震に対する式($A(\text{dyne}\cdot\text{cm}/\text{s}^2)=2.46\times 10^{17}\times M_0(\text{dyne}\cdot\text{cm})^{1/3}$)の1.45倍と評価している。

- 一方、染井ほか(2010)では、地殻内地震の震源スケーリング及び応力降下量を推定し、ひずみ集中帯内外の地震の震源特性(応力降下量)の相違点を調べている。
- この中で、佐藤(2010)が指摘する横ずれ断層と逆断層との違いは明瞭ではなく、解析手法の違いによるモデルパラメータの推定値の違いについて、比較検討が必要であると指摘している。



佐藤(2010)より抜粋(一部加筆・修正)

染井ほか(2010)より抜粋(一部加筆・修正)

a. 強震動予測レシピモデル

④応力降下量の不確かさについて

■ 構造計画研究所(2010)では、過去の内陸地殻内地震の特性化震源モデルから換算した短周期レベルを断層タイプ別に整理し、以下のとおり評価している。

断層タイプ(横ずれ, 縦ずれ)別の短周期レベル

・断層タイプ別の短周期レベルについては以下の回帰式が得られた。

$$A(\text{dyne}\cdot\text{cm}/\text{s}^2) = 2.71 \times 10^{17} \times M_0(\text{dyne}\cdot\text{cm})^{1/3} \quad \text{横ずれ}$$

$$A(\text{dyne}\cdot\text{cm}/\text{s}^2) = 2.77 \times 10^{17} \times M_0(\text{dyne}\cdot\text{cm})^{1/3} \quad \text{縦ずれ}$$

・断層タイプ別の短周期レベルには明確な違いは見られなかったが、逆断層の短周期レベルが若干大きい。この傾向は佐藤(2010)による結果と調和的であるが、数値的には大きく異なるので、今後の検討課題になる。

地域別の短周期レベル

・地域別の短周期レベルについては、今回のデータセットでは次のような傾向がみられた。

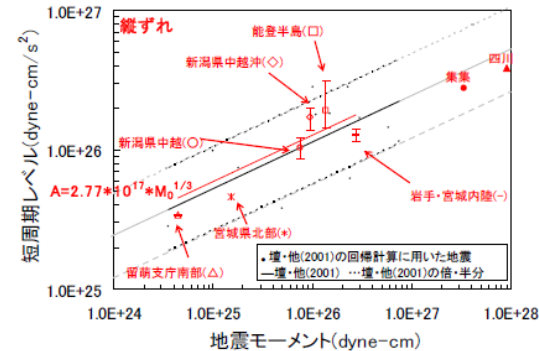
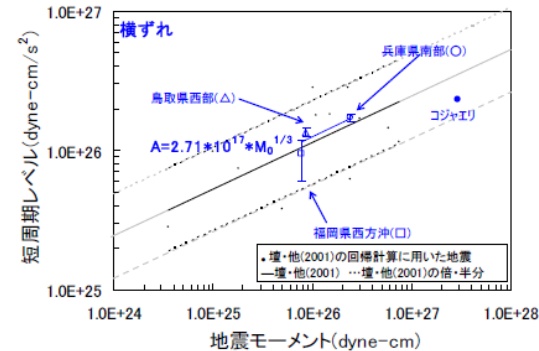
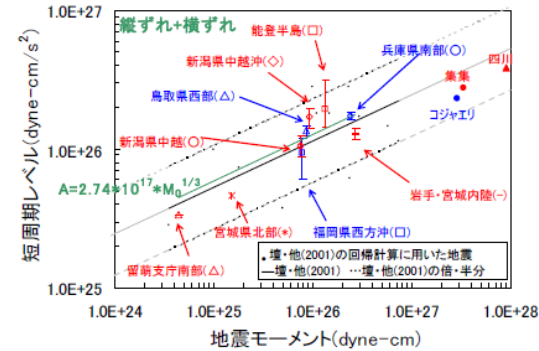
3) 北陸地方(新潟県中越地震, 能登半島地震, 新潟県中越沖地震)は平均的な短周期レベルと同程度か若干高い。

・但し、データ数が少ないため、今後データ数を増やして検討を行う必要がある。

回帰分析結果(地震モーメントと短周期レベルの関係)

		回帰分析結果 $A[\text{dyne}\cdot\text{cm}/\text{s}^2]$ $M_0[\text{dyne}\cdot\text{cm}]$	壇・他(2001) に対する比	図番号
全地震		$A = 2.74 \times 10^{17} \times (M_0)^{1/3}$	1.12	図 3-2上段
断層タイプ	横ずれ	$A = 2.71 \times 10^{17} \times (M_0)^{1/3}$	1.10	図 3-2中段
	縦ずれ	$A = 2.77 \times 10^{17} \times (M_0)^{1/3}$	1.13	図 3-2下段
地域性	北海道	$A = 2.06 \times 10^{17} \times (M_0)^{1/3}$	0.84	
	東北	$A = 1.96 \times 10^{17} \times (M_0)^{1/3}$	0.80	
	北陸	$A = 3.40 \times 10^{17} \times (M_0)^{1/3}$	1.38	
	近畿	$A = 2.76 \times 10^{17} \times (M_0)^{1/3}$	1.12	
	中国	$A = 3.06 \times 10^{17} \times (M_0)^{1/3}$	1.24	
	九州	$A = 2.22 \times 10^{17} \times (M_0)^{1/3}$	0.90	
(参考)	壇・他(2001)	$A = 2.46 \times 10^{17} \times (M_0)^{1/3}$		

■ 今後もデータ数を増やして検討を行う必要性など課題はあるものの、これまでに得られている知見を整理すると、応力降下量の不確かさとして強震動予測レシピの1.5倍までを考慮することは妥当であると考えられる。



地震モーメントと短周期レベルの関係
構造計画研究所(2010)より抜粋
(一部加筆・修正)

a. 強震動予測レシピモデル

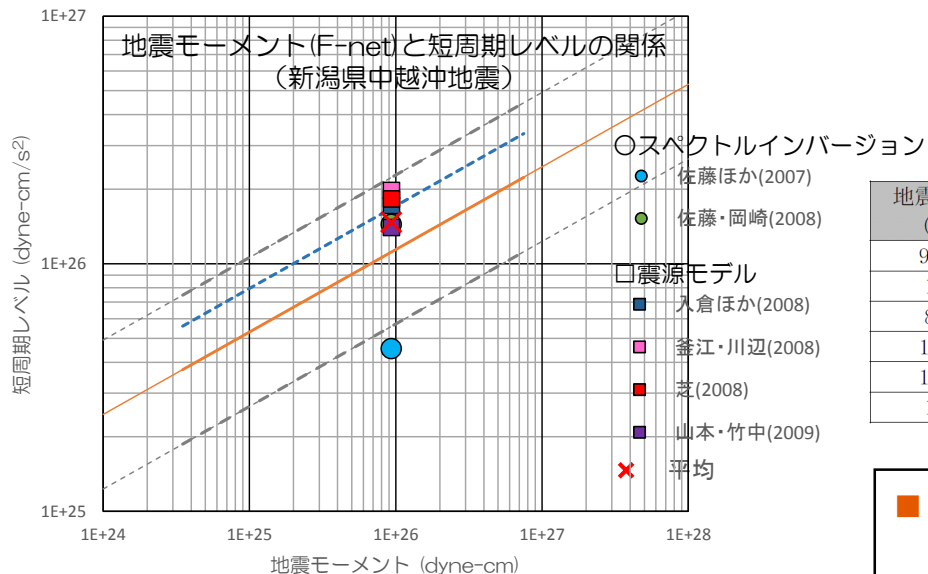
④応力降下量の不確かさについて 2007年新潟県中越沖地震

■ 構造計画研究所(2010)では、2000年以降に発生した国内の内陸地殻内地震に関するスペクトルインバージョンの結果及びフォワードモデリングで得られた特性化震源モデル等を収集し、2007年新潟県中越沖地震について、以下のとおり評価している。

- ・ 壇ほか(2001)から期待される短周期レベルと比較すると、スペクトルインバージョンで得られた短周期レベルは大きな差がある。
- ・ 震源モデルから算定された短周期レベルは、壇ほか(2001)から期待される短周期レベルよりもやや大きめではあるが、倍・半分の中に入っている。

短周期レベル (新潟県中越沖地震)

手法	短周期レベル (dyne-cm/s ²)	文献名
スペクトル インバージョン	4.53×10^{25}	佐藤・他(2007)
	1.44×10^{26}	佐藤・岡崎(2008)
震源 モデル	1.72×10^{26}	入倉・他(2008)
	1.98×10^{26}	釜江・川辺(2008)
	1.83×10^{26}	芝(2008)
	1.40×10^{26}	山本・竹中(2009)



地震モーメント (新潟県中越沖地震)

地震モーメント (dyne-cm)	文献名	壇・他(2001)の式による短周期レベル (dyne-cm/s ²)
9.30×10^{25}	F-net	1.11×10^{26}
1.3×10^{26}	山中(2007b) (南東傾斜)<地震学ノート>	1.25×10^{26}
8.6×10^{25}	八木(2007b) (南傾斜)	1.09×10^{26}
1.62×10^{26}	青井・他(2007) (南東傾斜)<防災科研HP>	1.34×10^{26}
1.04×10^{26}	芝(2008)	1.16×10^{26}
1.2×10^{26}	Miyake et al. (2010) (南東傾斜)	1.21×10^{26}

■ 短周期レベルの評価手法によりばらつきは認められるものの、その平均は壇ほか(2001)の1.3倍程度であり、不確かさの考慮として、1.5倍を見込むことは妥当であると考えられる。

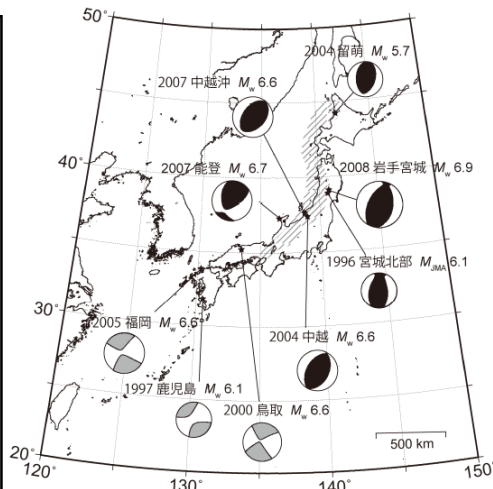
■ なお、短周期レベルの1.5倍は、地震モーメントM₀とアスペリティの面積が平均的な関係にある場合、アスペリティの応力降下量1.5倍に相当。

構造計画研究所(2010)をもとに描画
(一部加筆・修正)

a. 強震動予測レシピモデル

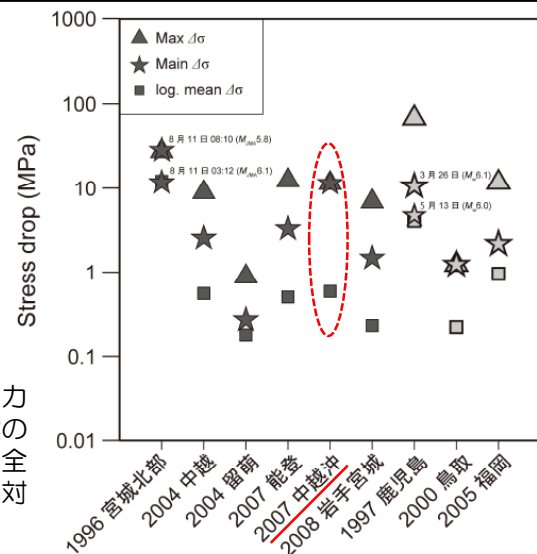
④ 応力降下量の不確かさについて 2007年新潟県中越沖地震

- 中越沖地震の特殊性と敷地周辺の地域性について、染井ほか(2010)の検討結果を用いて整理。
- 染井ほか(2010)では、M6-M7クラスの地殻内地震の本震、余震の地震系列の震源スケージングおよび応力降下量を推定し、地震系列間の比較を行い震源特性(応力降下量)の相違点を調べている。
- 本震と余震の比較、また、地震系列間の比較により地域性と特殊性が確認できるものと考えられる。



解析した9地震系列の本震震央位置と本震の震源メカニズム解。斜線部は、ひずみ集中帯のおよその分布を表す。メカニズム解について、黒色がひずみ集中帯内、灰色がひずみ集中帯外で発生した地震と分類する。

- 染井ほか(2010)では、S波 γ - δ に対する震源、時間減衰、サイト特性に関する観測方程式に基づき大小の地震の震源 γ - δ 比を算定、これに対してBrune(1970)の ω^{-2} 震源 γ - δ 比モデルに基づく震源 γ - δ 比関数をフィットさせることにより γ - δ 周波数 f_c を推定。
- 震源断層を円形クラックと仮定したうえで応力降下量 $\Delta\sigma$ を推定し、各地震系列で比較している。



※ここでの応力降下量は、観測記録からBrune(1970)の ω^{-2} 震源スベクトルモデルを仮定して求めた値

各地震系列の最大応力降下量(▲)、本震の応力降下量(★)、全地震の応力降下量の対数平均(■)

解析した地震系列の震源情報、地震数、地震規模範囲

Name of Earthquake	Origin Time (JST); Mainschock (yyyy/mm/dd, hh:mm)	Hypocenter Information	Number of Events	M_w Range
■ In the High Strain Zone				
1996 Miyagi-Hokubu	1996/08/11,03:12	JMA	5	4.3-6.1*
2004 Chuetsu	2004/10/23,17:56	11)	65	3.1-6.6
2004 Rumoi	2004/12/14,14:56	JMA	3	3.7-5.7
2007 Noto	2007/03/25,09:41	12)	35	3.4-6.7
2007 Chuetsu-oki	2007/07/16,10:13	JMA	14	3.5-6.6
2008 Iwate-Miyagi	2008/06/14,08:43	JMA*2	71	3.5-6.9
■ In the Others				
1997 Kagoshima	1997/03/26,17:31	JMA	20	3.6-6.1
2000 Tottori	2000/10/06,13:30	13)	39	3.2-6.6
2005 Fukuoka	2005/03/20,10:53	14)	39	3.3-6.6

*1 JMA magnitude (M_{JMA}) *2 Hypocenter information for the mainschock is from NIED⁽⁵⁾
 染井ほか(2010)より抜粋(一部加筆・修正)

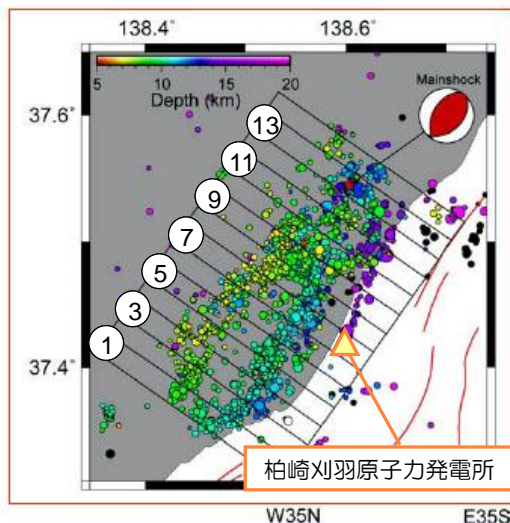


染井ほか(2010)によると、各地震系列の応力降下量の対数平均はほぼ同程度であり、地域性は認められない。一方、2007年中越沖の本震における応力降下量は、地震系列の中でも最大応力降下量に相当し、他の地震と比較してもやや大きい特徴があるものと考えられる。

a. 強震動予測レシピモデル

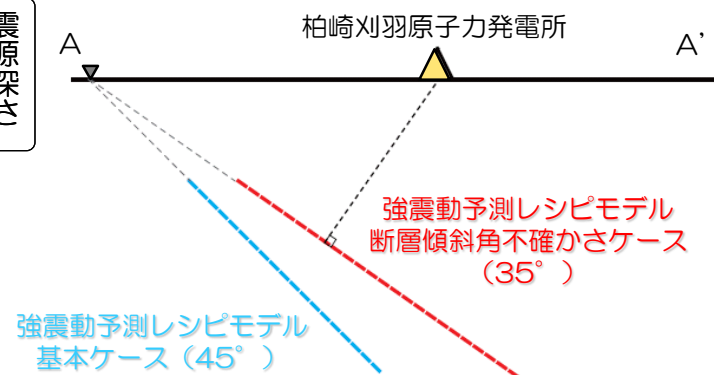
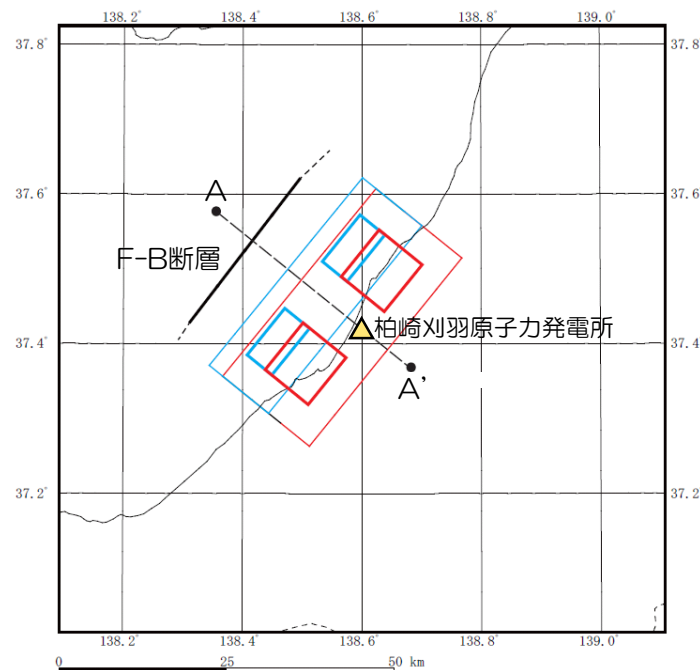
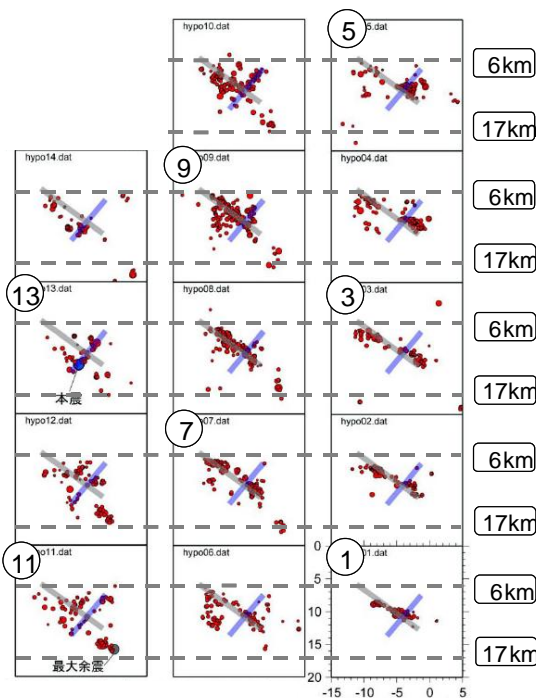
⑤断層傾斜角の不確かさについて

- 以下の点から基本ケースは、断層傾斜角を 45° と設定
 - a. 海上音波探査結果によると、明瞭に反射記録を解釈できる範囲では、F-B褶曲群の傾斜角は中～高角度と判断される。(P.27)
 - b. 強震動予測レシピでは、逆断層において一般的に想定される傾斜角は 45° 。
- なお、中越沖地震の余震分布を参考に、震源インバージョンで設定された断層傾斜角は 35° であることから、不確かさケースとして影響を把握する。



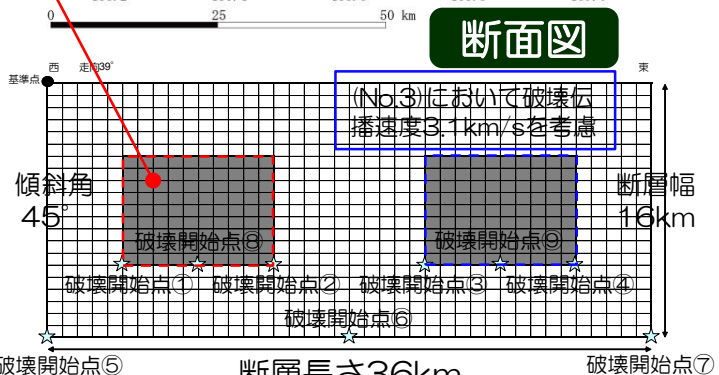
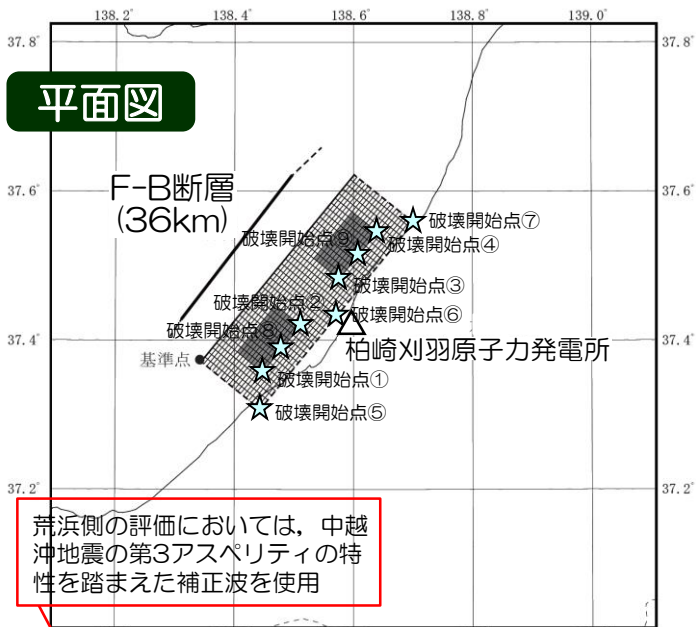
東京大学地震研究所資料（平成20年1月11日地震調査委員会）に加筆

地震本部(2008)より抜粋
(一部加筆・修正)



a. 強震動予測レシピモデル (その1)

強震動予測レシピモデル(No.1),
破壊伝播速度(No.3), 応力降下量
(No.4)の不確かさ考慮



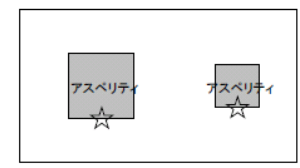
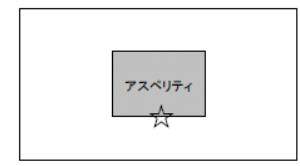
※破壊開始点⑤～⑨についてはNo.3で影響を確認した上で以降の評価では省略

項目		設定値
基準点	東経(°)	138.34
	北緯(°)	37.37
断層上端深さ(km)		6
断層長さ(km)		36.0
断層幅(km)		16.0
断層面積(km ²)		576
走向(°)		39
傾斜角(°)		45
S波速度(km/s)		3.4
破壊伝播速度(km/s)	レシピ	2.4
	不確かさ	3.1
地震モーメント(N・m)		1.9×10 ¹⁹
アスペリティ1	面積(km ²)	60
	地震モーメント(N・m)	3.9×10 ¹⁸
	平均すべり量(cm)	205
	応力降下量(MPa)	レシピ 15.6 1.5倍 23.4
アスペリティ2	面積(km ²)	60
	地震モーメント(N・m)	3.9×10 ¹⁸
	平均すべり量(cm)	205
	応力降下量(MPa)	レシピ 15.6 1.5倍 23.4
背景領域	面積(km ²)	456
	地震モーメント(N・m)	1.1×10 ¹⁹
	平均すべり量(cm)	76
	実効応力(MPa)	レシピ 2.8 1.5倍 4.2

- : 地質調査結果等に基づく
- : 強震動予測レシピに基づく
- : 中越沖地震の知見を反映し、一部のアスペリティに3.1km/sを考慮 (No.3で考慮)
- : 中越沖地震の知見を反映し、設定した応力降下量の1.5倍を考慮 (No.4で考慮)

■ 破壊開始点は、強震動予測レシピにおける記載等を踏まえ複数設定し、No.1において影響を確認したうえで、以降の評価ではアスペリティ下端の両端で代表させる。

破壊開始点については、平均的な地震動を推定することを目的とする場合で、活断層の形状等から破壊開始点を特定できない場合には、やや簡便化したパラメータ設定として、縦ずれ成分が卓越する場合には、アスペリティ中央下端を基本ケースとする。



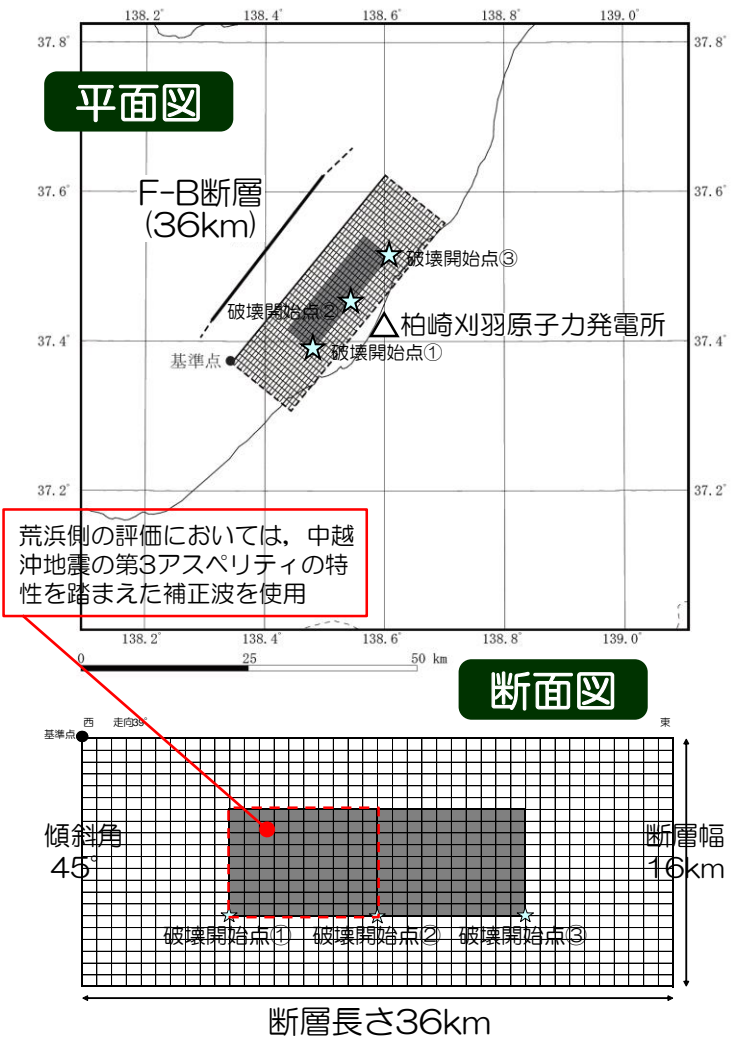
縦ずれ成分が卓越

破壊開始点 (☆) とアスペリティ位置の一例
地震本部(2009)より抜粋

■ 破壊伝播速度の不確かさについては、中越沖地震の震源インバージョン結果を参考に、ここでは北部のアスペリティに3.1km/sを仮定。

a. 強震動予測レシピモデル (その2)

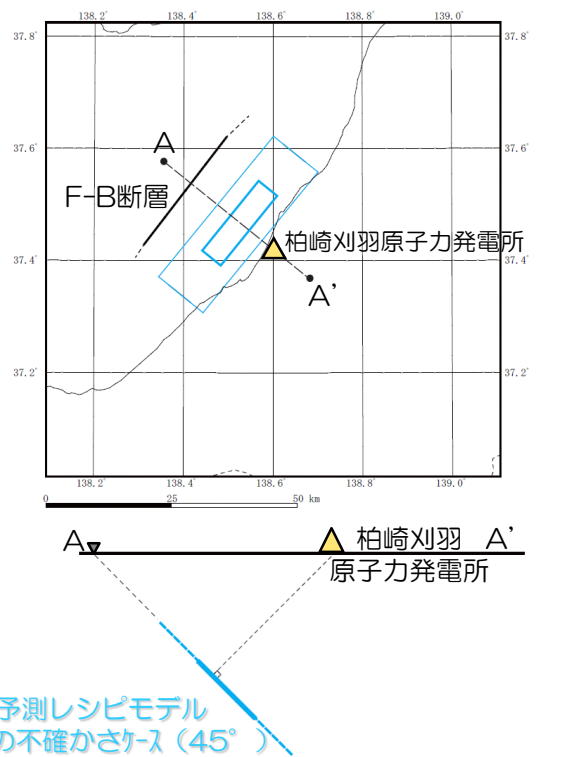
アスペリティ位置の不確かさ考慮(No.2)



項目		設定値
基準点	東経(°)	138.34
	北緯(°)	37.37
巨視的断層面	断層上端深さ(km)	6
	断層長さ(km)	36.0
	断層幅(km)	16.0
	断層面積(km ²)	576
	走向(°)	39
	傾斜角(°)	45
	S波速度(km/s)	3.4
アスペリティ1	破壊伝播速度(km/s)	2.4
	地震モーメント(N·m)	1.9×10 ¹⁹
	面積(km ²)	60
アスペリティ2	地震モーメント(N·m)	3.9×10 ¹⁸
	平均すべり量(cm)	205
	応力降下量(MPa)	15.6
背景領域	面積(km ²)	60
	地震モーメント(N·m)	3.9×10 ¹⁸
	平均すべり量(cm)	205
	応力降下量(MPa)	15.6
背景領域	面積(km ²)	456
	地震モーメント(N·m)	1.1×10 ¹⁹
	平均すべり量(cm)	76
実効応力(MPa)	2.8	

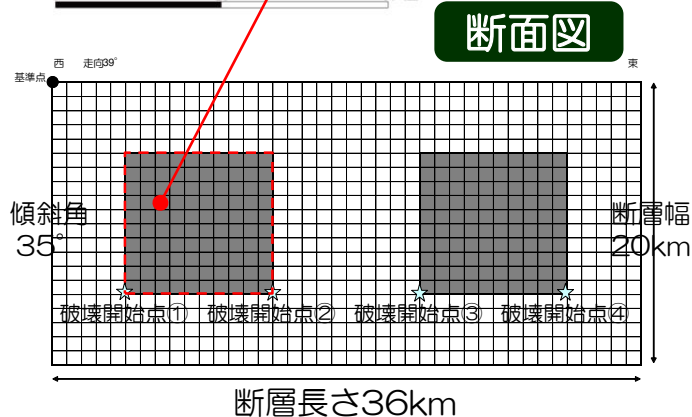
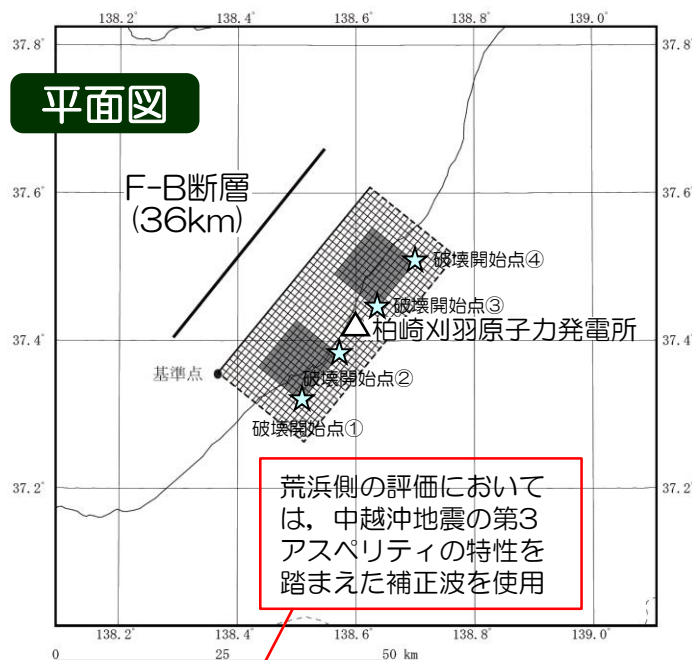
□ : 地質調査結果等に基づく
 □ : 強震動予測レシピに基づく

- 敷地からの距離が短くなる巨視的断層面への垂線は、断層幅方向において概ね中央となる。したがって、断層幅方向におけるアスペリティ位置は、敷地に最も近い位置となる中央と設定。
- 断層長さ方向においては、中越沖地震の際の知見を念頭に敷地の南西側、北西側の2つを基本とし、不確かさとして中央に集約したケースを設定。



a. 強震動予測レシピモデル (その3)

断層傾斜角の不確かさ考慮(No.5)



項目		設定値
基準点	東経(°)	138.37
	北緯(°)	37.36
巨視的断層面	断層上端深さ(km)	6
	断層長さ(km)	36.0
	断層幅(km)	20.0
	断層面積(km ²)	720
	走向(°)	39
	傾斜角(°)	35
	S波速度(km/s)	3.4
	破壊伝播速度(km/s)	2.4
	地震E-μJ(N·m)	2.9×10 ¹⁹
アスペリティ1	面積(km ²)	87
	地震E-μJ(N·m)	7.0×10 ¹⁸
	平均すべり量(cm)	257
	応力降下量(MPa)	15.0
アスペリティ2	面積(km ²)	87
	地震E-μJ(N·m)	7.0×10 ¹⁸
	平均すべり量(cm)	257
	応力降下量(MPa)	15.0
背景領域	面積(km ²)	546
	地震E-μJ(N·m)	1.5×10 ¹⁹
	平均すべり量(cm)	87
	実効応力(MPa)	2.4

- : 地質調査結果等に基づく
- : 強震動予測レシピに基づく
- : 中越沖地震の余震分布を参考に設定

(1) F-B断層による地震の震源モデルの設定に関する検討

① 震源モデルの設定

a. 強震動予測レシピモデル

b. 中越沖地震アスペリティモデル・中越沖地震拡張モデル

c. まとめ

② 長岡平野西縁断層帯による地震との対比

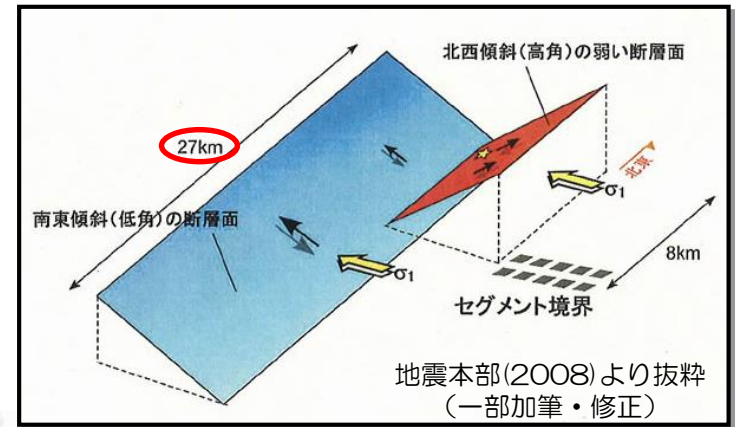
③ 整理結果を踏まえた活断層の諸元表

(2) 第3アスペリティの補正係数に関する検討

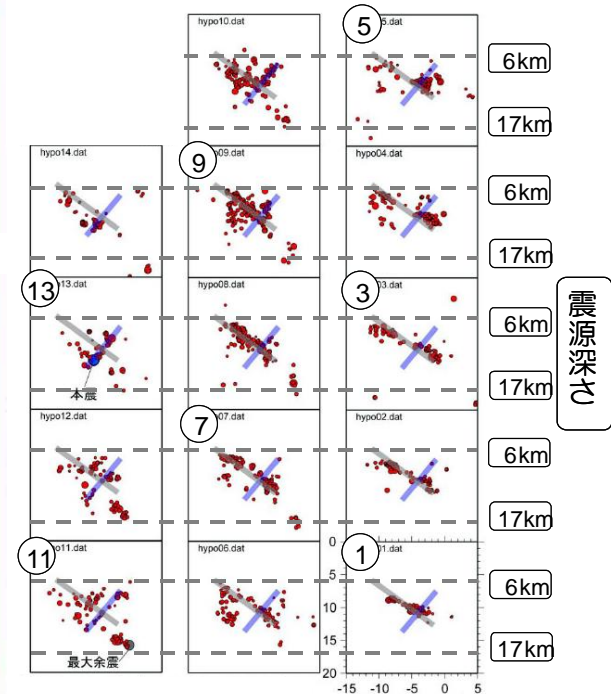
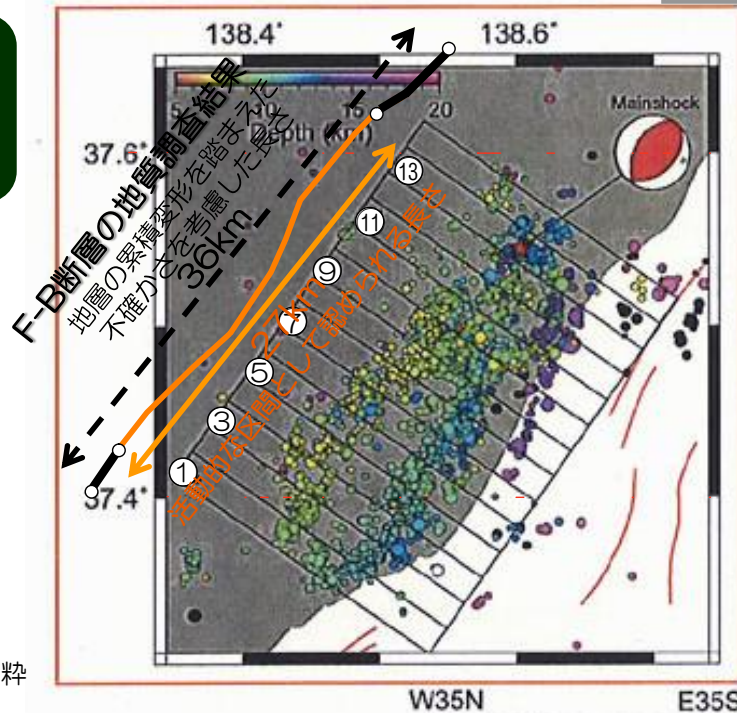
b. 中越沖地震のF-B断層・中越沖地震拡張断層 【中越沖地震の知見】中越沖地震の震源断層と余震分布

- 地質本部(2008)による中越沖地震の震源断層は、断層長さ27kmの南東傾斜の断層面である。
- 海域・陸域臨時地震観測に基づく精密余震分布(7月16日10時13分~8月29日)と、地質調査結果において、F-B断層の活動的な区間として認められたM-8測線からM-19測線までの約27kmは、よく対応している。
- 中越沖地震の余震分布を参考に、震源インバージョンで設定された断層傾斜角は 35° 。

地震本部による中越沖地震の震源断層



中越沖地震の余震分布 とF-B断層の地質調査 結果との関係



地震調査研究推進本部(以下、「地震本部」)(2008)より抜粋
(一部加筆・修正)

b. 中越沖地震の λ ・ μ モデル・中越沖地震拡張モデル

【中越沖地震の知見】2007年新潟県中越沖地震（震源モデル）

■ 中越沖地震に関して提案されている主な震源モデルを整理。

	文献	手法	モデル	傾斜	検討に用いた観測点数	a.破壊伝播速度(km/s)	b.震源S波速度(km/s)	比 a/b	
①	入倉ほか(2008)	経験的G関数法	特性化モデル	南東	6(3)	2.7	3.4	0.79	
②	Kamae and Kawabe(2008)	経験的G関数法	特性化モデル	南東	22(12)	2.7	3.5	0.77	
③	芝(2008)	全体	経験的G関数法を用いた震源 λ ・ μ 法	地震 τ - ρ 密度分布特性化モデル	南東	18(2)	2.3	3.4	0.68
		Asp				8(8)	3.1,2.8,2.5	3.4	0.91,0.82,0.74
④	山本・竹中(2009)	経験的G関数法	特性化モデル	南東+北西	10(2)	2.7,2.8,2.8	3.4	0.79,0.82,0.82	
⑤	野津(2010)	経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震波形計算手法	特性化モデル	南東	10(8)	3	3.5	0.86	
⑥	Aoi et al.(2008)	波形 λ ・ μ 法	すべり分布	南東	14	2.1	3.4	0.62	
⑦	引間・瀬戸(2008)	λ ・ μ 法	すべり分布	南東	近地11(2) 遠地29 測地41	-	-	-	
⑧	Honda and Aoi(2009)	λ ・ μ 法	すべり分布	南東	12(10)	2.45	3.4	0.72	
⑨	Nakamura et al.(2009)	波形 λ ・ μ 法	すべり分布	南東+北西	約50	-	-	-	
⑩	Miyake et al.(2010)	波形 λ ・ μ 法	すべり分布	南東	34	2.6	3.4	0.76	

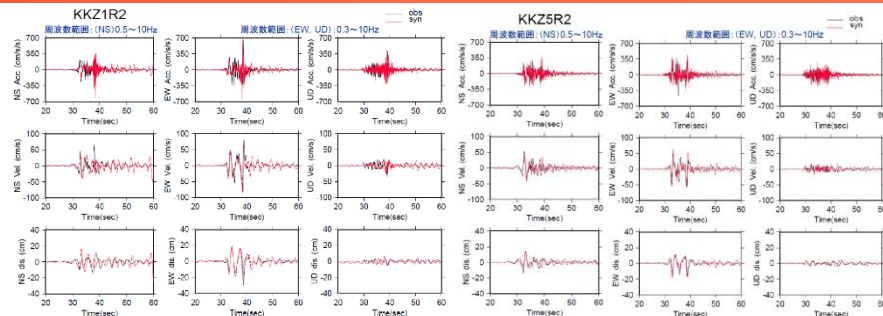
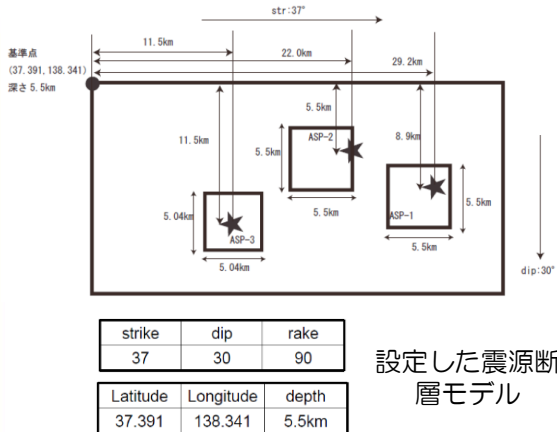
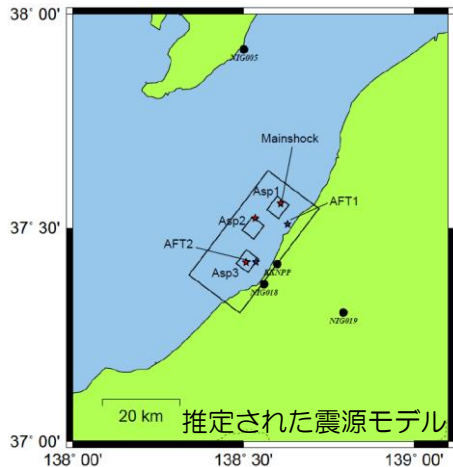
() 内は敷地内の観測点数

- 海底地震計の記録を用いて再決定された余震分布から、主断層面が南東傾斜であることが明らかとなった以降、主に南東傾斜とする特性化震源モデルが提案されている。
- 南東傾斜の主断層面に加え、震源域北東部の北西傾斜の断層面を考慮し、モデル化したものも存在するが、わずかである。これは、地震動評価上、北西傾斜の断層面の寄与が小さいためと考えられる。
- 地震動評価に用いる特性化震源モデルは、波形インバージョン法等によるすべり分布と比較的整合し、パラメータが明確となっている①、②及び③の特性化震源モデルにおいて、アスペリティ位置などに大きな相違が無いことを確認のうえ、ここでは③芝(2008)のモデルを用いて評価を行うこととした。

b. 中越沖地震へのリテラル・中越沖地震拡張モデル 【中越沖地震の知見】2007年新潟県中越沖地震（震源モデル）

①入倉ほか(2008)

経験的グリーン関数法を用いた震源断層のモデル化。



	Rupture start point	Depth (km)	Mo (Nm)
ASP1	(4,3)	10.0	1.69×10^{18}
ASP2	(5,2)	8.3	1.69×10^{18}
ASP3	(4,5)	11.3	1.02×10^{18}

	L (km) × W (km)	$\Delta\sigma$ (MPa)	Risetime (second)
ASP1	5.5 × 5.5 (N:5 × 5)	23.7	0.5
ASP2	5.5 × 5.5 (N:5 × 5)	23.7	0.5
ASP3	5.04 × 5.04 (N:9 × 9)	19.8	0.45

入倉ほか(2008)より抜粋 (一部加筆・修正)

②Kamae and Kawabe(2008)

経験的グリーン関数法によるフォワードモデリングにより震源断層面上のアスペリティの位置, 大きさ, 応力降下量を定量化。

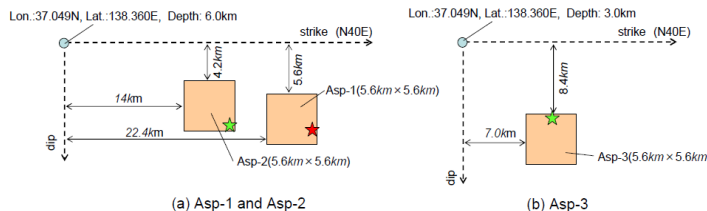
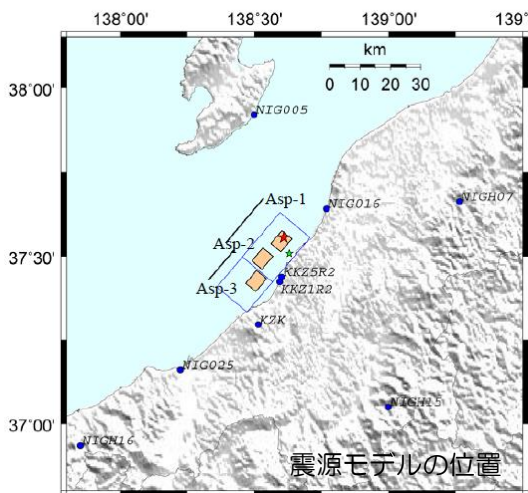


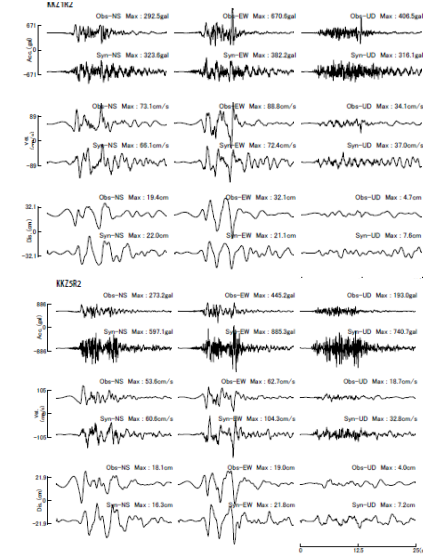
Figure 2 Source model of the Niigata Chuetsu-oki earthquake ($M_w=6.8$). The red star and green stars indicate the location of the epicenter (the rupture start point of Asp-1) and the rupture start points of Asp-2 and Asp-3, respectively.

震源モデル

Table 3 Source parameters of the Niigata Chuetsu-oki earthquake ($M_w=6.8$)

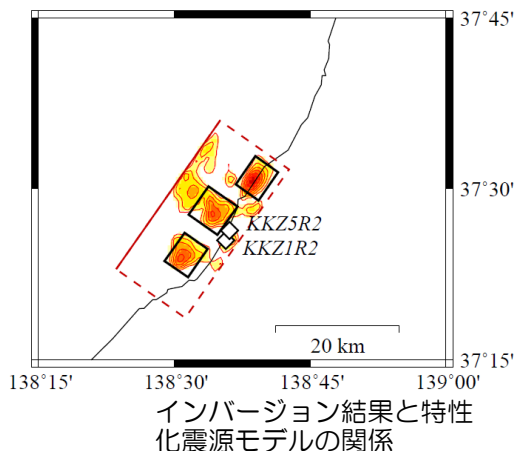
	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	S (km ²)	Mo (Nm)	$\Delta\sigma$ (MPa)
Asp-1	40	40	90	5.6×5.6	1.33×10^{18}	18.4
Asp-2	40	40	90	5.6×5.6	2.00×10^{18}	27.6
Asp-3	40	40	90	5.6×5.6	1.67×10^{18}	23.0

Kamae and Kawabe(2008)より抜粋 (一部加筆・修正)

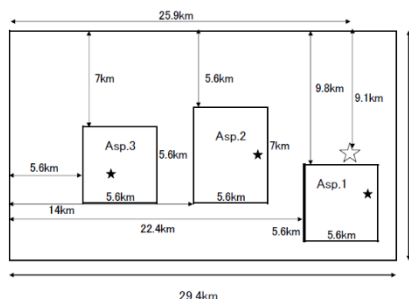


b. 中越沖地震へのリテラル・中越沖地震拡張モデル 【中越沖地震の知見】2007年新潟県中越沖地震（震源モデル）

③芝(2008)



海域臨時観測の記録に基づく余震分布から南東傾斜の本震断層面を仮定し、震源インバージョン解析を実施。また、求めたすべり分布に基づき特性化震源モデルを提案。

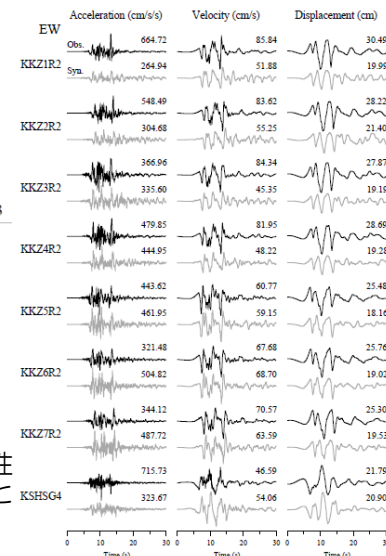


特性化震源モデルの諸元

	Whole Fault	Asp. 1	Asp. 2	Asp. 3
Length (km)	29.4 (23.8)	5.6	5.6	5.6
Width (km)	16.8	5.6	7.0	5.6
Moment (10^{18} Nm)	10.2	1.83	2.11	1.43
Effective Stress (MPa)		25.47	20.84	19.91
Rise Time (s)		0.4	0.4	0.5
Rupture Velocity (km/s)		3.1	2.8	2.5
Rupture Time Delay (s)		0.2	1.8	0.0

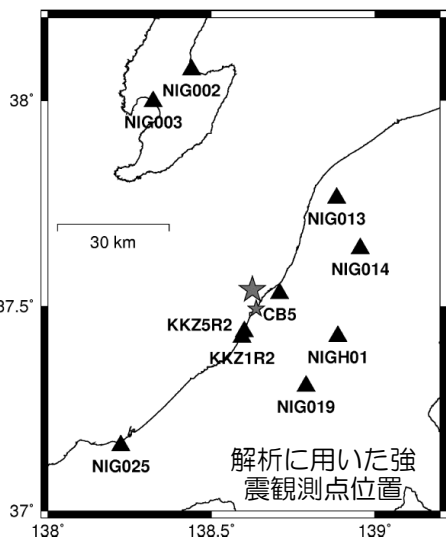
特性化震源モデルにおけるアスペリティの位置関係

柏崎サイト内の地点を対象とした、特性化震源モデルによる合成波形（灰色）と観測波形（黒）の比較（EW成分）



芝(2008)より抜粋（一部加筆・修正）

④山本・竹中(2009)



経験的グリーン関数法を用いたフォワードモデリングを行い、新潟県中越沖地震の震源モデルを推定。

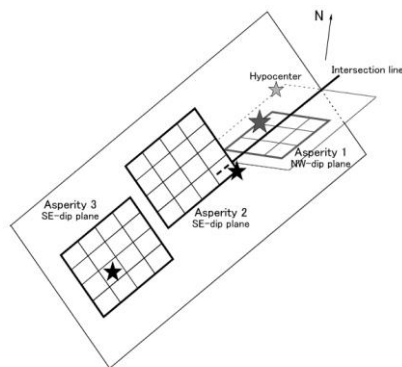


Fig. 5. Geometrical configuration of asperities. Asperity 1 is located on the NW-dipping plane including the hypocenter, while Asperities 2 and 3 are both located on the SE-dipping plane.

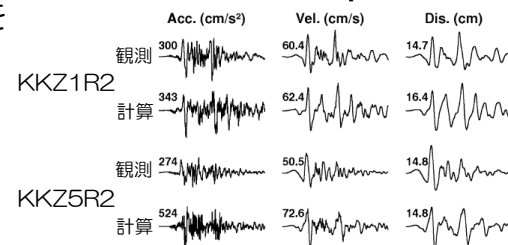
Table 3. Estimated source parameters of the three-asperity model.

	Asperity 1	Asperity 2	Asperity 3
Length (km)	4.5	6.0	6.0
Width (km)	4.5	6.0	6.0
Seismic moment (Nm)	7.03×10^{17}	1.27×10^{18}	1.67×10^{18}
Stress drop (MPa)	19.5	14.8	19.5
Rupture velocity (km/s)	2.7	2.8	2.8
Rise time (s)	0.3	0.5	0.5
Rupture time (s)	0.0	2.3	5.9

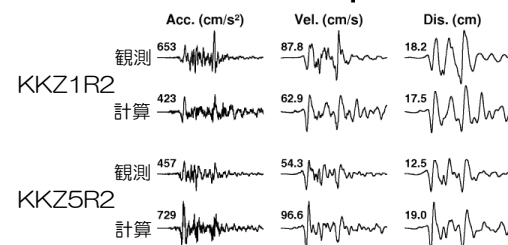
震源モデル

山本・竹中(2009)より抜粋（一部加筆・修正）

NS component



EW component



観測波形（上）と合成波形（下）の比較

b. 中越沖地震の $\Delta\sigma$ リテイデル・中越沖地震拡張モデル 【中越沖地震の知見】2007年新潟県中越沖地震（震源モデル）

⑤野津(2010)

経験的サイト増幅特性・位相特性を踏まえた強震波形計算手法を用いたフォワードモデリングによる特性化震源モデルの作成。

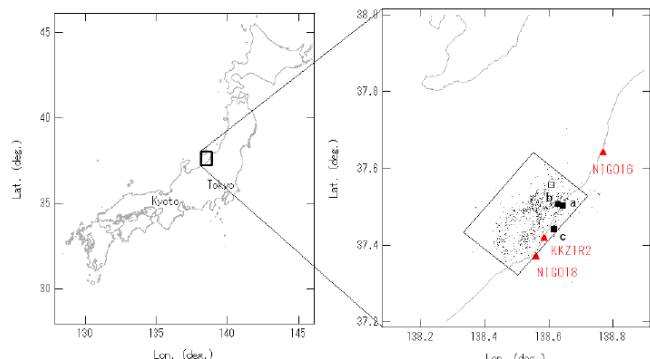
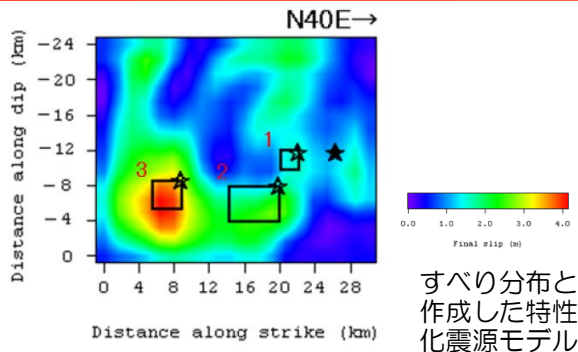


図-3 2007年新潟県中越沖地震の震源断層と本震の震央(□)、震源モデルの構築に用いた観測点(▲)、およびグリーン関数の位相を決めるために用いた中小地震(aは7/16 15:37, bは7/16 21:08, cは7/18 16:53)。

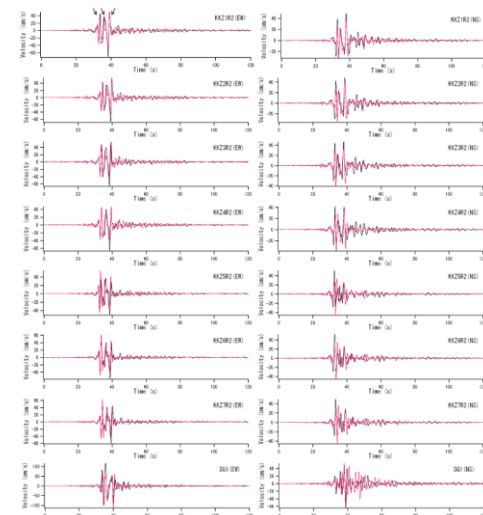


すべり分布と作成した特性化震源モデル

表-2 各アスペリティのパラメータ

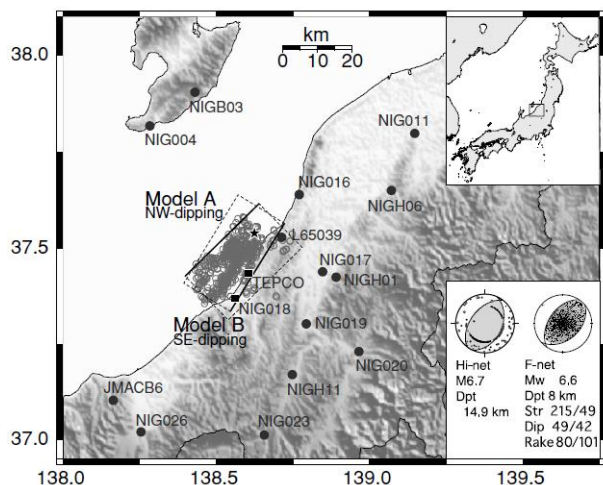
	アスペリティ1	アスペリティ2	アスペリティ3
面積(km ²)	4	24	9
地震モーメント(Nm)	4.0E+17	1.0E+18	1.0E+18
すべり量(m)	3.0	1.3	3.4
ライスタイム(s)	0.17	0.33	0.25
分割数	5×5×5	5×5×5	5×5×5
相対的な破壊時刻(s)	1.3	2.4	6.4
破壊伝播速度(km/s)	3.0	3.0	3.0
破壊伝播様式	同心円状	同心円状	同心円状

野津(2010)より抜粋(一部加筆・修正)



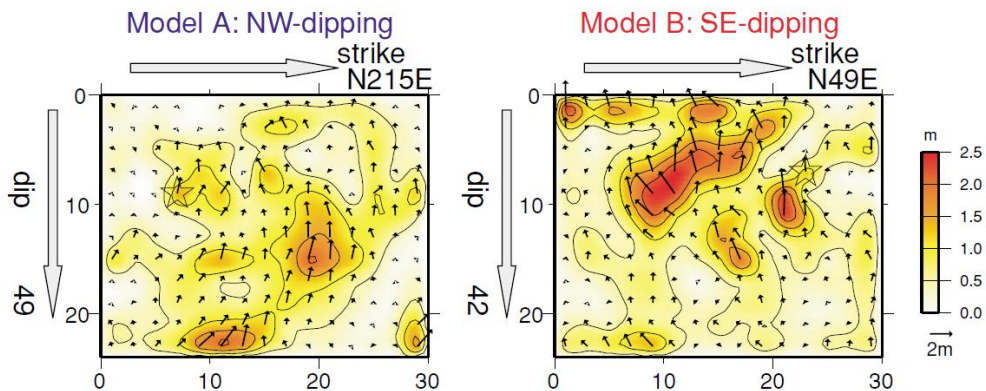
特性化震源モデルによる発電所の敷地における速度波形(0.2~1Hz)
(観測結果(黒), 計算結果(赤))

⑥Aoi et al.(2008)



インバージョン解析に用いた観測点配置図

線形波形インバージョン法により震源インバージョン解析を実施し、すべり分布を推定。



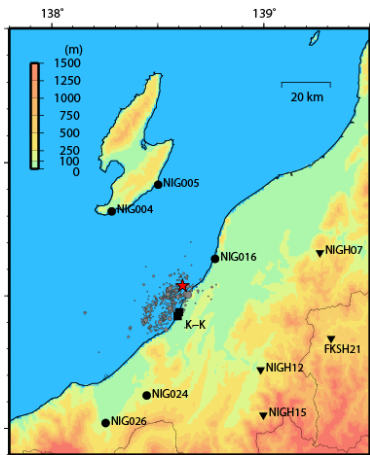
すべり分布図 (Model A: 北西傾斜, Model B: 南東傾斜)

Aoi et al.(2008)より抜粋(一部加筆・修正)

b. 中越沖地震へのリテラル・中越沖地震拡張モデル 【中越沖地震の知見】2007年新潟県中越沖地震（震源モデル）

⑦引間・瀬瀬(2008)

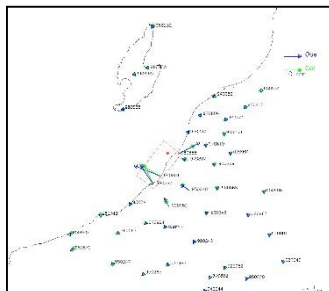
近地強震記録を基本に、測地データや遠地実体波を同時に利用するジョイントインバージョン法によりすべり分布を推定。



近地強震記録によるイノベーションに用いた観測点の位置

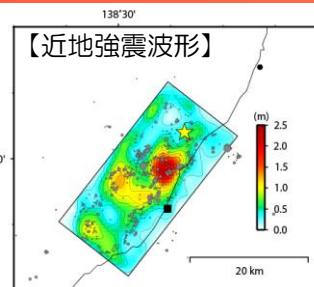


遠地実体波によるイノベーションに用いた観測点の位置

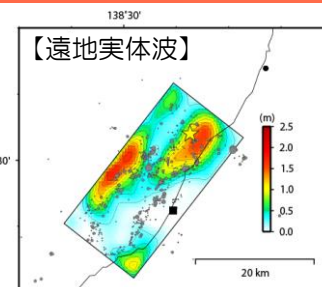


測地データによるイノベーションに用いた観測点の位置（観測値と計算値の比較）

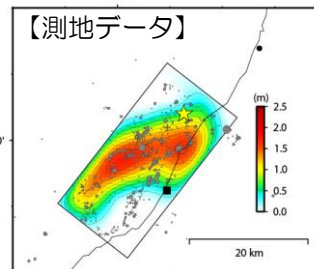
引間・瀬瀬(2008)より抜粋（一部加筆・修正）



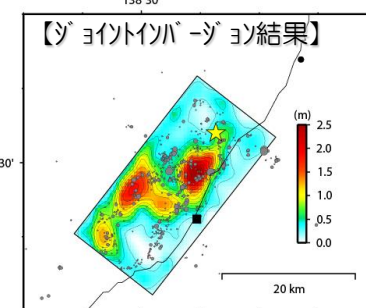
【近地強震波形】



【遠地実体波】



【測地データ】

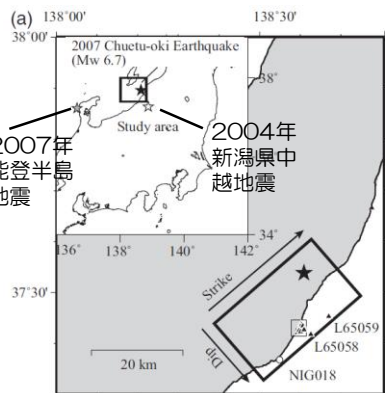


【ジョイントイノベーション結果】

推定されたすべり分布

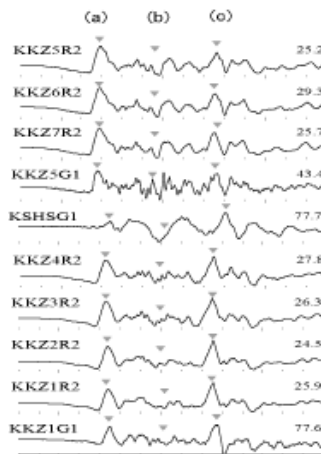
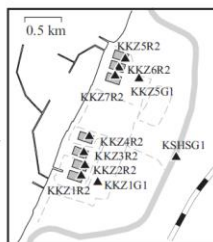
⑧Honda and Aoi(2009)

アレイバックプロジェクション法により、新潟県中越沖地震の震源過程・破壊伝播速度を推定。



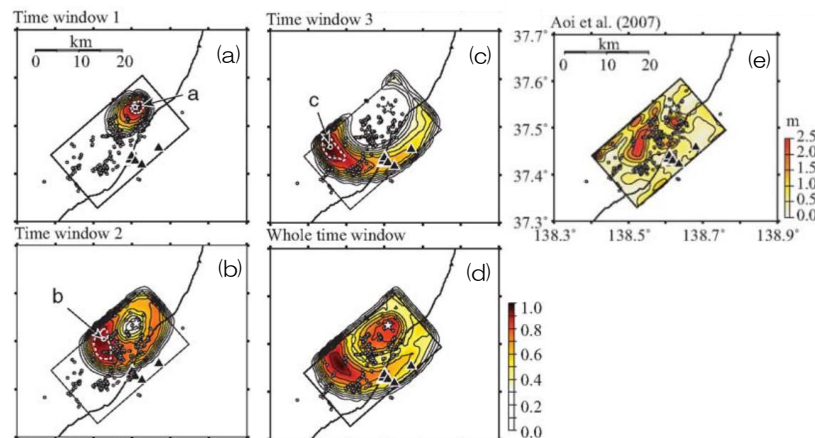
震源断層と観測点

震源及び柏崎刈羽原子力発電所内の観測点分布。太線の四角が仮定した断層面。▲が解析に使用した観測点。



発電所内の観測点で得られた地震波形（速度波形）

(a), (b) 及び (c) の三つパルス状の波が確認できる（各観測波形の対応する部分を△で示す）。



(a), (b) 及び (c) は左図の中の三つのパルス状の波の震源に対応する。(d) は波形全体を使った結果。(e) はAoi et al. (2007)の波形インバージョンの結果

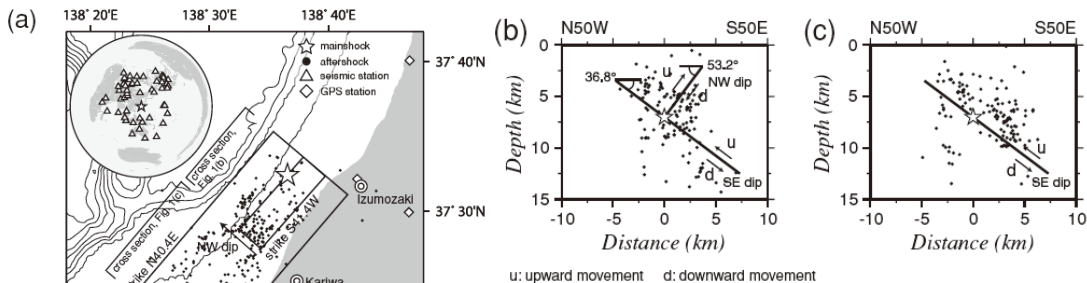
推定されたアスペリティ分布

Honda and Aoi(2009)より抜粋（一部加筆・修正）

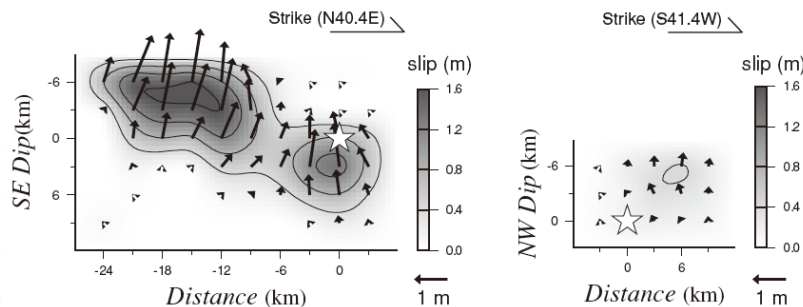
b. 中越沖地震の $\Delta\sigma$ モデル・中越沖地震拡張モデル 【中越沖地震の知見】2007年新潟県中越沖地震（震源モデル）

◎Nakamura et al.(2009)

遠地波形を用いた波形インバージョンによりすべり分布を評価。主に南東傾斜の断層面に沿ってエネルギーが解放されたとしている。



(a) ☆本震震央位置、●最大余震前までの余震分布
(b) 震源域北西部の断層概念図
(c) 震源域南東部の断層概念図



波形インバージョンから求めたすべり分布

Nakamura et al.(2009)より抜粋（一部加筆・修正）

◎Miyake et al.(2010)

波形インバージョンと経験的グリーン関数法を用いた検討にあわせ、P波初動とパルス1,3到着の時間差を用いた連係震源決定を行い、南東傾斜面の方が整合性がいいことを確認。

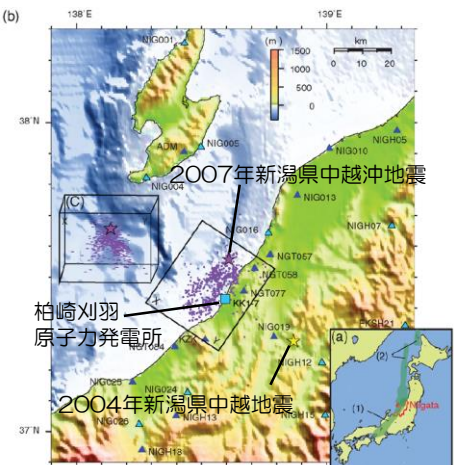


図1 (a)新潟県と(1)新潟-神戸および(2)日本海東縁ひずみ集中帯。(b)2007年新潟県中越沖地震の震央と12時間後までの余震分布。(c)本震と余震分布の三次元表示

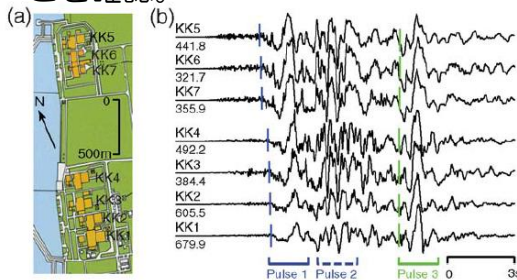


図2 (a) 柏崎刈羽原子力発電所内の配置。(b) 各原子炉の基礎マット上強震計による記録の記録セクション。|はパルス1,3の到着時刻の読み取り位置
Miyake et al.(2010)より抜粋
(一部加筆・修正)

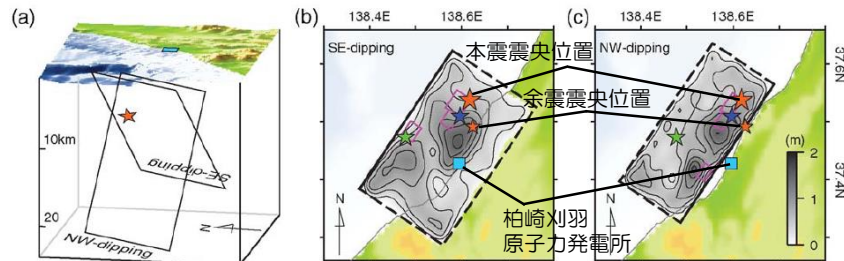


図3 (a) 南東及び北西傾斜面と震源★の三次元表示。(b) 南東傾斜面の場合のすべり分布。(c) 北西傾斜面の場合のすべり分布 (★第1, ★第3 $\Delta\sigma$ リテリの破壊開始点)

すべり分布のアスペリティ部分では余震の発生が少なく、すべり分布と余震分布の相補的な関係も明瞭

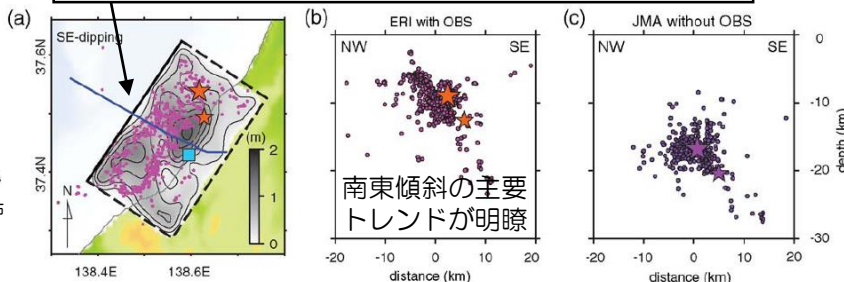


図4 (a) 海底地震計データを加えた震源再決定による余震分布。(b) 再決定された余震分布。(c) 気象庁一元化震源の場合。

b. 中越沖地震Asp[△]リティデル・中越沖地震拡張デル

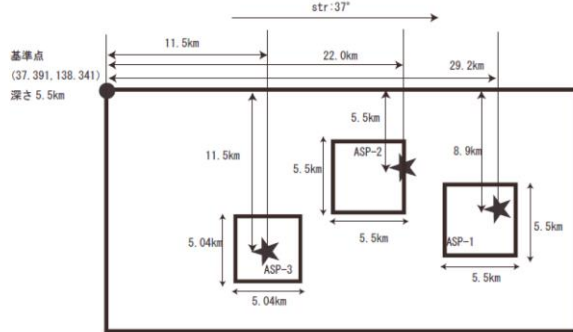
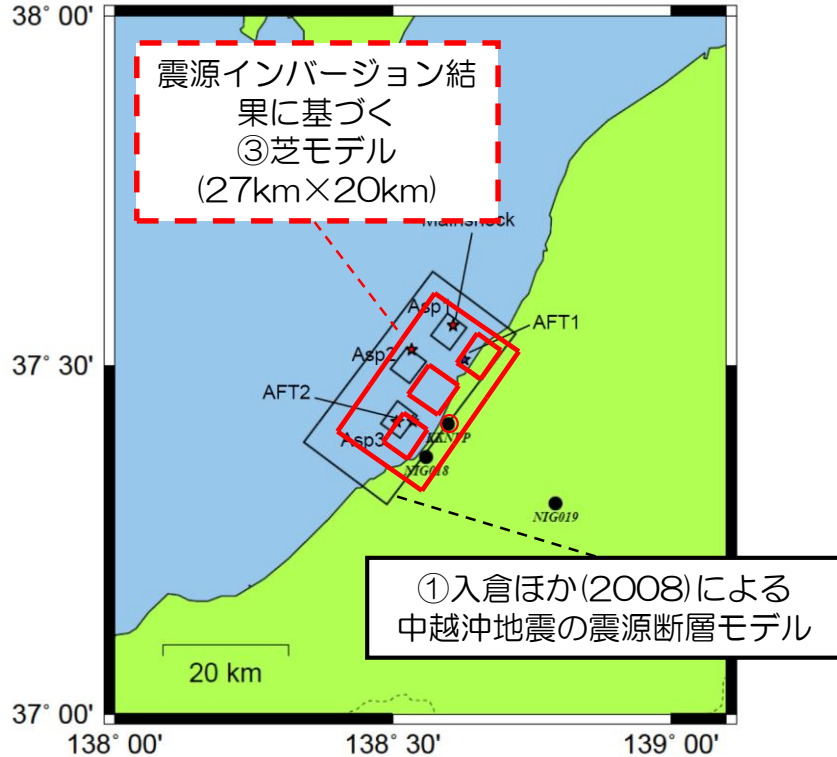
【中越沖地震の知見】2007年新潟県中越沖地震（①,②及び③デルの比較）

各モデルの概要と主な特性化震源パラメータ

	デル名		走向, 傾斜角	アスペリティ		応力降 下量 (MPa)	地震モーメント ($\times 10^{18}$ N·m)	破壊伝播 速度 (km/s)
				Asp [△] リティ 名	面積 (km ²)			
①入倉ほか (2008)	入倉 モデル	<ul style="list-style-type: none"> ■各観測点におけるパルス波の到達時間差からアスペリティ位置を推定 ■破壊伝播速度は一定 	37度, 30度	Asp1	5.5×5.5	23.7	1.69	2.7
				Asp2	5.5×5.5	23.7	1.69	
				Asp3	5.04×5.04	19.8	1.02	
②Kamae and Kawabe (2008)	釜江 モデル	<ul style="list-style-type: none"> ■フォワードモデリングによりアスペリティ位置を推定 ■深さの異なる2枚断層モデルを仮定 ■破壊伝播速度は一定 	40度, 40度	Asp1	5.6×5.6	18.4	1.33	2.7
				Asp2	5.6×5.6	27.6	2.00	
				Asp3	5.6×5.6	23.0	1.67	
③芝 (2008)	芝 モデル	<ul style="list-style-type: none"> ■震源インバージョン解析により求められたすべり分布を基準にアスペリティ位置を設定 ■破壊伝播速度もインバージョン結果を参考にアスペリティごとに設定 	35度, 35度	第1	5.6×5.6	25.5	1.83	3.1
				第2	5.6×7.0	20.8	2.11	2.8
				第3	5.6×5.6	19.9	1.43	2.5

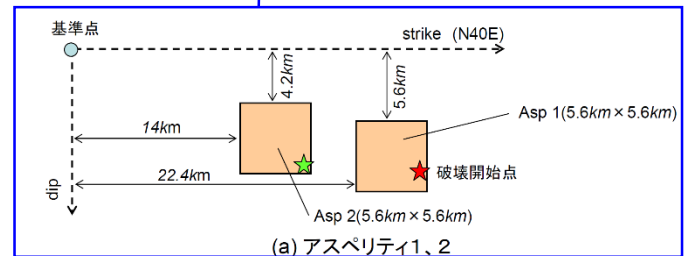
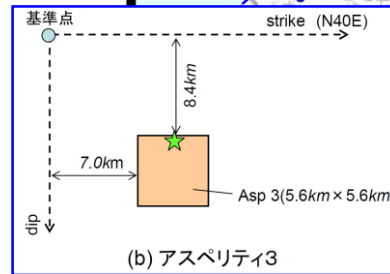
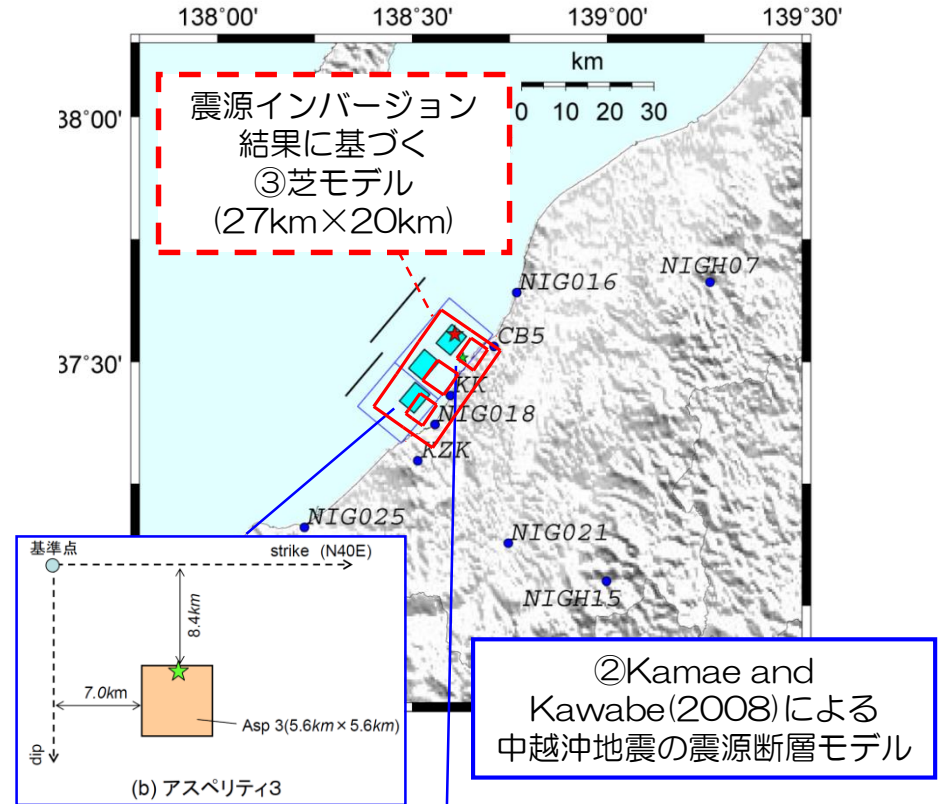
b. 中越沖地震へのリテラル・中越沖地震拡張モデル 【中越沖地震の知見】 2007年新潟県中越沖地震（①,②及び③モデルの比較）

①入倉モデルと③芝モデルの比較



入倉ほか(2008)
より抜粋
(一部加筆・修正)

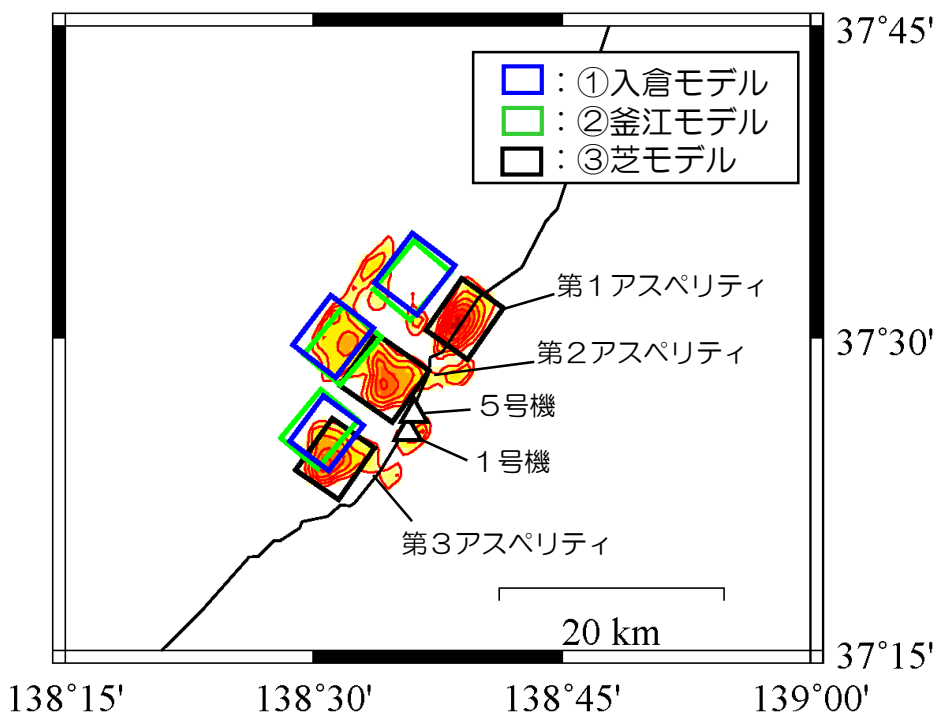
②釜江モデルと③芝モデルの比較



Kamae and Kawabe(2008)より抜粋 (一部加筆・修正)

b. 中越沖地震アスぺリティモデル・中越沖地震拡張モデル

【中越沖地震の知見】 2007年新潟県中越沖地震（①,②及び③モデルの比較）



□：各モデルのアスぺリティ
 コンターは震源インバージョンで推定されたすべり分布を表す

アスぺリティから1号機までの最短距離(km)

	第1アスぺリティ	第2アスぺリティ	第3アスぺリティ
①入倉モデル	15	13	13
②釜江モデル	16	14	12
③芝モデル	16	12	13

アスぺリティから5号機までの最短距離(km)

	第1アスぺリティ	第2アスぺリティ	第3アスぺリティ
①入倉モデル	14	13	13
②釜江モデル	15	14	12
③芝モデル	15	12	13

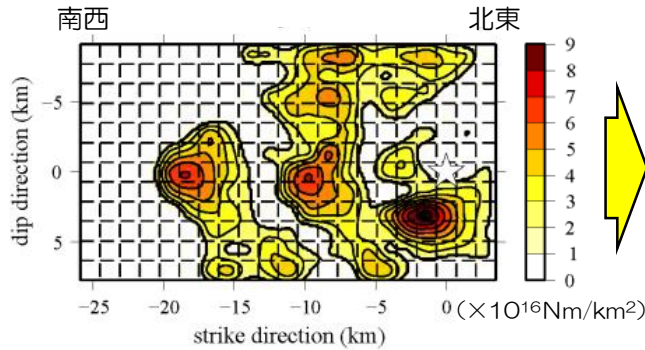
- 芝モデルのアスぺリティ位置は、入倉モデル、釜江モデルに比べてやや南東側に分布するが、アスぺリティ面積、モーメント、実効応力などの主要なパラメータは概ねよく一致している。
- また、アスぺリティから敷地までの最短距離は、モデル間の差異はほとんどないことがわかる。
- アスぺリティ位置が異なる理由としては、推定手法の違いや破壊伝播速度の相違などが考えられる。



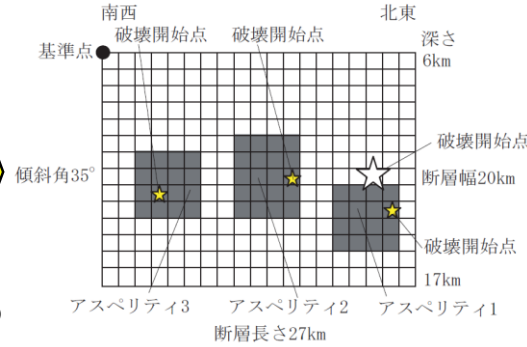
以上の整理結果を踏まえ、2007年新潟県中越沖地震については、芝(2008)による震源モデルを用いることとした。

b. 中越沖地震 $\Delta\sigma_a$ リテイデル・中越沖地震拡張モデル 【設定の考え方】

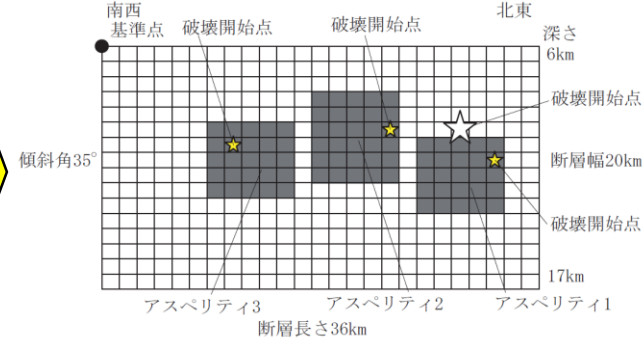
中越沖地震
震源インバージョン結果(M6.8)



①中越沖地震
アスペリティモデル(M6.8)

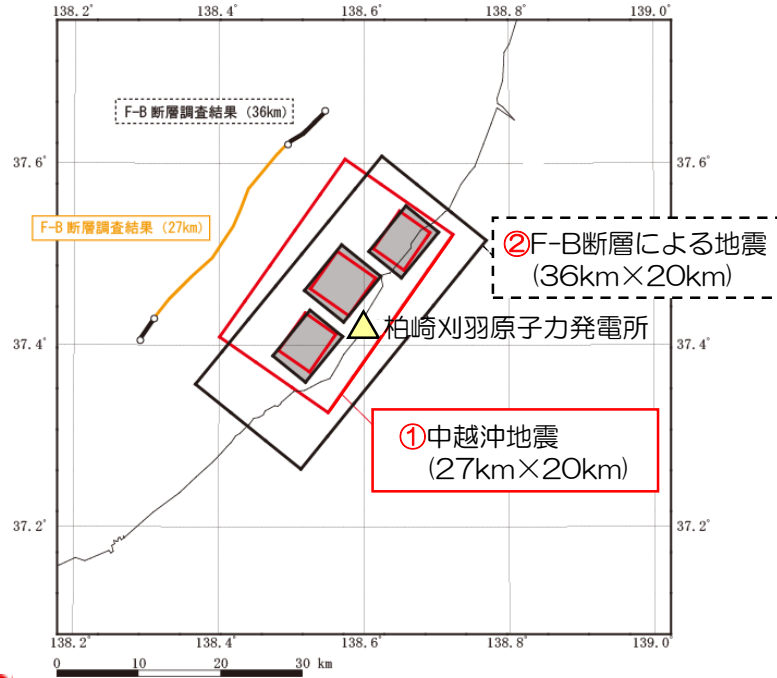


②F-B断層による地震
中越沖地震拡張モデル(M7.0)

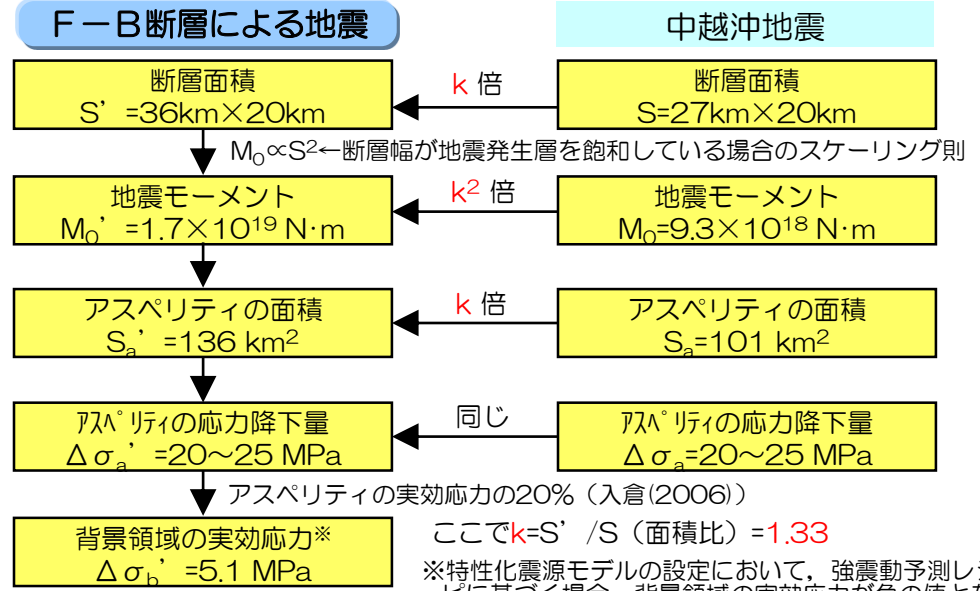


中越沖地震の震源インバージョン結果等を参考に、アスペリティモデルを構築。
(断層長さ27km×断層幅20km)

中越沖地震のアスペリティモデルを基本震源モデルとし、断層長さの不確かさを考慮して36km(M7.0)に拡張し、F-B断層の断層モデルを設定。

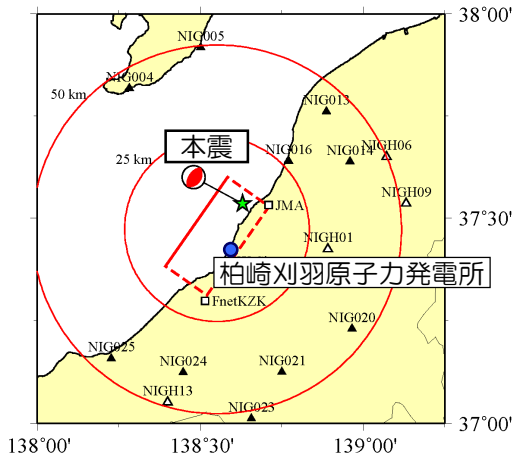


断層パラメータの設定手順



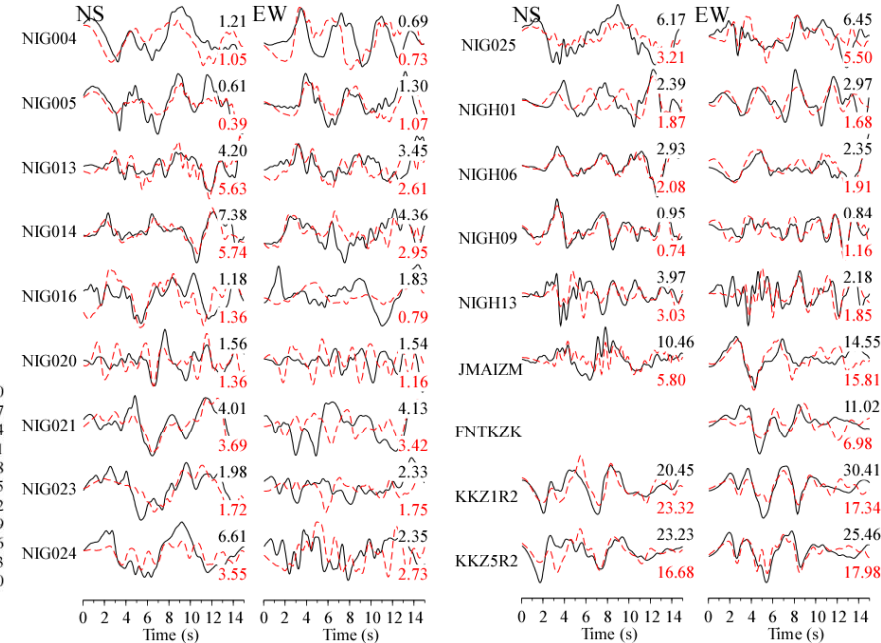
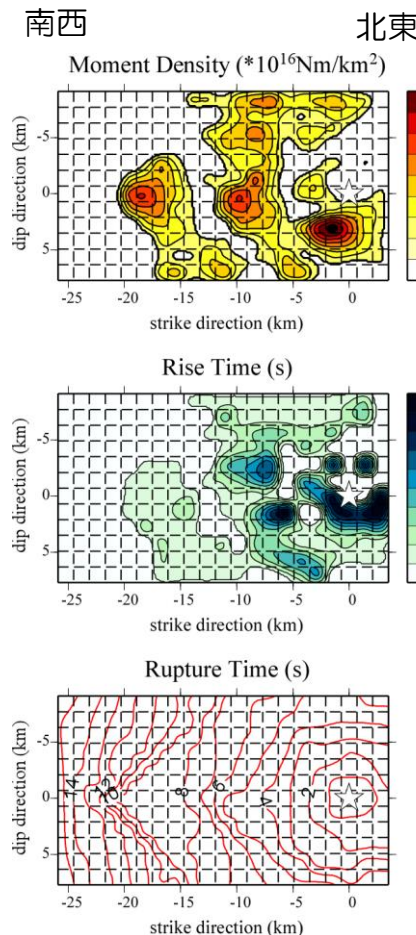
b. 中越沖地震へのリタイデル・中越沖地震拡張モデル 【中越沖地震 震源イメージング 芝(2008)】

- 震源イメージングでは、経験的グリーン関数法を用いた手法により、本震断層面上での地震モーメント密度分布、立ち上がり時間分布および破壊時刻の時空間分布を推定。
- イメージングの計算波形は、各観測点の観測波形の再現性が高いことを確認。



- 初期断層面
南東傾斜, 1枚断層
走向35度, 傾斜角35度*
- 解析に用いた観測点
○ 柏崎サイト: 2地点
(1・5号機の基礎版上)
○ OK-NET: 10地点
○ KiK-net: 4地点
○ JMA, F-net: 各1地点
- 対象波形
○ 解析周波数帯域0.1~2Hz
○ 変位波形
○ 水平2成分

*地震本部(2007, 2008)により公開された本震と余震の震源分布を参考に設定された値。



推定された震源モデルに基づく計算波形(赤線)と観測記録(黒線)の比較(解析周波数帯域0.1~2Hz, 変位波形)

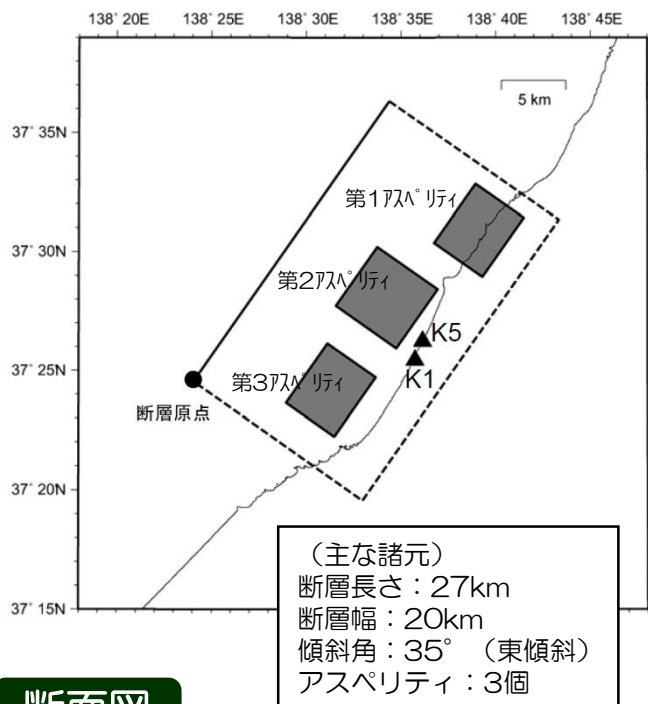
【参考: イメージング時の要素地震の選定理由】

- ① 中越沖地震ではM4程度以上の余震の発生頻度が低かった中で、本余震はM4.4である。
- ② 複数の観測点で良好な記録が得られている。

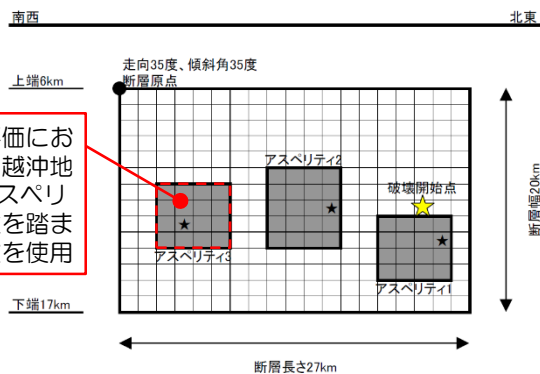
芝(2008)より抜粋(一部加筆・修正)

b. 中越沖地震アスペリティモデル・中越沖地震拡張モデル 【中越沖地震アスペリティモデル(M6.8)の震源モデルの設定】

平面図



断面図



■ 中越沖地震の震源インバージョン結果等を参考に、アスペリティモデルを構築。(断層長さ27km×断層幅20km)

断層パラメータ

項目		設定値	
巨視的断層面	基準点	東経(°)	138.40
		北緯(°)	37.41
	断層上端深さ(km)	6	
	断層長さ(km)	27.0	
	断層幅(km)	20.0	
	断層面積(km ²)	540	
	走向(°)	35	
	傾斜角(°)	35	
	破壊伝播形式	マルチホブ・セクター	
	S波速度(km/s)	3.4	
地震モーメント(N・m)	9.3×10 ¹⁸		
アスペリティ1	面積(km ²)	31	
	地震モーメント(N・m)	1.8×10 ¹⁸	
	平均すべり量(cm)	187	
	応力降下量(MPa)	25	
	破壊伝播速度(km/s)	3.1	
破壊時間遅れ(s)	0.2		

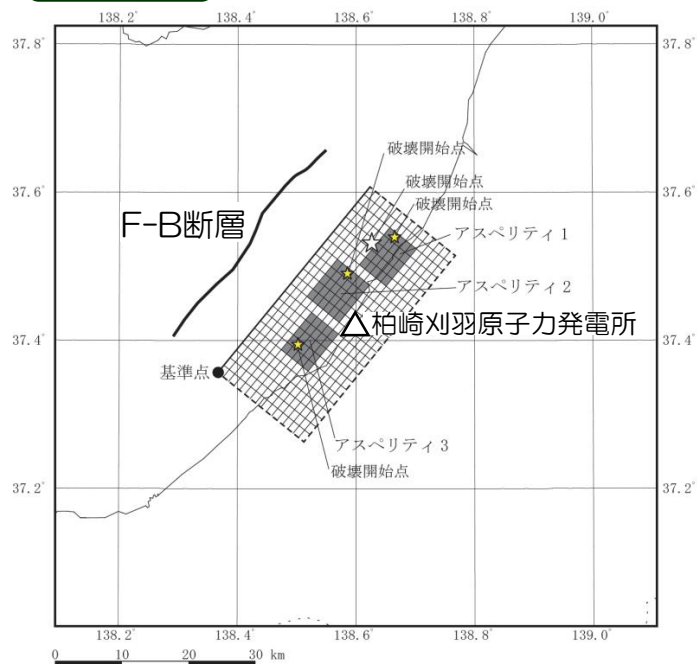
項目		設定値
アスペリティ2	面積(km ²)	39
	地震モーメント(N・m)	2.1×10 ¹⁸
	平均すべり量(cm)	173
	応力降下量(MPa)	21
	破壊伝播速度(km/s)	2.8
破壊時間遅れ(s)	1.8	
アスペリティ3	面積(km ²)	31
	地震モーメント(N・m)	1.4×10 ¹⁸
	平均すべり量(cm)	146
	応力降下量(MPa)	20
	破壊伝播速度(km/s)	2.5
破壊時間遅れ(s)	0.0	
背景領域	面積(km ²)	419
	地震モーメント(N・m)	3.9×10 ¹⁸
	平均すべり量(cm)	30
	実効応力(MPa)	5.1
破壊伝播速度(km/s)	2.3	

□ : 地質調査結果等に基づく

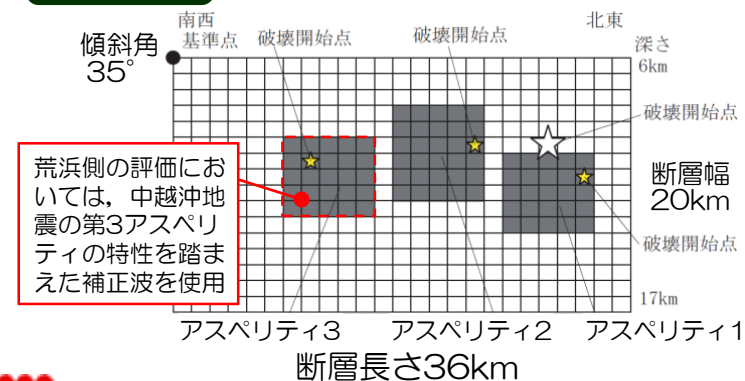
■ : 中越沖地震の震源インバージョン結果に基づく

b. 中越沖地震のAsperityモデル・中越沖地震拡張モデル 【中越沖地震拡張モデル(M7.0)の震源モデルの設定】

平面図



断面図



■ 中越沖地震のアスペリティモデルを断層長さの不確かさを考慮して36km(M7.0)に拡張し、F-B断層の断層モデルを設定。

断層パラメータ

項目		設定値	
巨視的断層面	基準点	東経(°)	138.37
		北緯(°)	37.36
	断層上端深さ(km)	6	
	断層長さ(km)	36.0	
	断層幅(km)	20.0	
	断層面積(km ²)	720	
	走向(°)	39	
	傾斜角(°)	35	
	破壊伝播形式	マルチバースター	
	S波速度(km/s)	3.4	
地震モーメント(N・m)	1.7×10 ¹⁹		
アスペリティ1	面積(km ²)	42	
	地震モーメント(N・m)	3.3×10 ¹⁸	
	平均すべり量(cm)	249	
	応力降下量(MPa)	25	
	破壊伝播速度(km/s)	3.1	
破壊時間遅れ(s)	0.2		

項目		設定値
アスペリティ2	面積(km ²)	52
	地震モーメント(N・m)	3.8×10 ¹⁸
	平均すべり量(cm)	230
	応力降下量(MPa)	21
	破壊伝播速度(km/s)	2.8
アスペリティ3	面積(km ²)	42
	地震モーメント(N・m)	2.5×10 ¹⁸
	平均すべり量(cm)	195
	応力降下量(MPa)	20
	破壊伝播速度(km/s)	2.5
背景領域	面積(km ²)	584
	地震モーメント(N・m)	7.0×10 ¹⁸
	平均すべり量(cm)	38
	実効応力(MPa)	5.1
	破壊伝播速度(km/s)	2.3

■ (緑色) : 地質調査結果等に基づく
■ (黄色) : 中越沖地震の震源パラメータの結果に基づく

■ 中越沖地震拡張モデルにおいては、背景領域の実効応力は入倉(2006)を参照し、アスペリティの応力降下量の20%と仮定。
■ アスペリティの応力降下量は、同じ値を設定していることから、背景領域の値も拡張前後で同じ値を設定。

(1) F-B断層による地震の震源モデルの設定に関する検討

① 震源モデルの設定

- a. 強震動予測レシピモデル
- b. 中越沖地震アスペリティモデル・中越沖地震拡張モデル
- c. まとめ

② 長岡平野西縁断層帯による地震との対比

③ 整理結果を踏まえた活断層の諸元表

(2) 第3アスペリティの補正係数に関する検討

c. まとめ

- 2007年新潟県中越沖地震の震源断層面は断層長さ27km, 断層傾斜角35°であり, 震源特性としては, 強震動予測レシピに基づき設定した値に不確かさを考慮した場合と同程度の特性を有していたものと考えられる。(中越沖地震 Δ °レシピモデル)
- 一方, 地質調査結果によると, F-B断層の断層長さは, 活動的な区間が約27km, 不確かさを考慮して約36kmと評価され, 明瞭に反射記録を解釈できる範囲では, 傾斜角は中~高角度と判断される。
- 以上を踏まえF-B断層については, 中越沖地震 Δ °レシピモデルを地質調査結果に基づき断層長さの不確かさを考慮した36kmに拡張した震源モデル(中越沖地震拡張モデル)を用い, 中越沖地震の規模を超える地震を考慮して評価を実施している。
- 併せて, 地質調査結果及び強震動予測 Δ °をもとに震源モデルを設定し(強震動予測 Δ °モデル), 中越沖地震の知見等を踏まえ, 震源パラメータの不確かさの影響を把握するための地震動評価を実施し, 中越沖地震拡張モデルによる評価結果と比較を実施。(第279回審査会合資料1 P.97~103)
- その結果, 中越沖地震拡張モデルによる評価結果が保守的となっていること, 実地震の知見を最大限に活用し信頼性が高いものとなっていることから, F-B断層による地震の地震動評価は, 中越沖地震拡張モデルによる評価で代表させるものとする。

No.	検討ケース	断層長さ	断層傾斜角	破壊開始点	Δ °レシピ位置	破壊伝播速度	応力降下量	【参考】短周期 Δ °
1	強震動予測レシピモデル	36km	45°	複数	2個 中央均等配置	0.72Vs	15.6MPa(強震動予測 Δ °)	$1.5 \times 10^{19} \text{N} \cdot \text{m/s}^2$
2	強震動予測レシピモデル (Δ °レシピ位置の不確かさ)	36km	45°	複数	1個 中央集約配置	0.72Vs	15.6MPa(強震動予測 Δ °)	$1.5 \times 10^{19} \text{N} \cdot \text{m/s}^2$
3	強震動予測レシピモデル (破壊伝播速度の不確かさ)	36km	45°	複数	2個 中央均等配置	3.1km/s	15.6MPa(強震動予測 Δ °)	$1.5 \times 10^{19} \text{N} \cdot \text{m/s}^2$
4	強震動予測レシピモデル (応力降下量の不確かさ)	36km	45°	複数	2個 中央均等配置	0.72Vs	23.4MPa(強震動予測 Δ ° $\times 1.5$ 倍)	$2.2 \times 10^{19} \text{N} \cdot \text{m/s}^2$
5	強震動予測レシピモデル (断層傾斜角の不確かさ)	36km	35°	複数	2個 中央均等配置	0.72Vs	15.0MPa(強震動予測 Δ °)	$1.7 \times 10^{19} \text{N} \cdot \text{m/s}^2$
6	中越沖地震拡張モデル	36km	35°	中越沖反映	敷地至近	2.5~3.1km/s	20~25MPa (強震動予測 Δ ° $\times 1.5$ 倍相当)	$2.3 \times 10^{19} \text{N} \cdot \text{m/s}^2$

■ : 不確かさを考慮するパラメータ

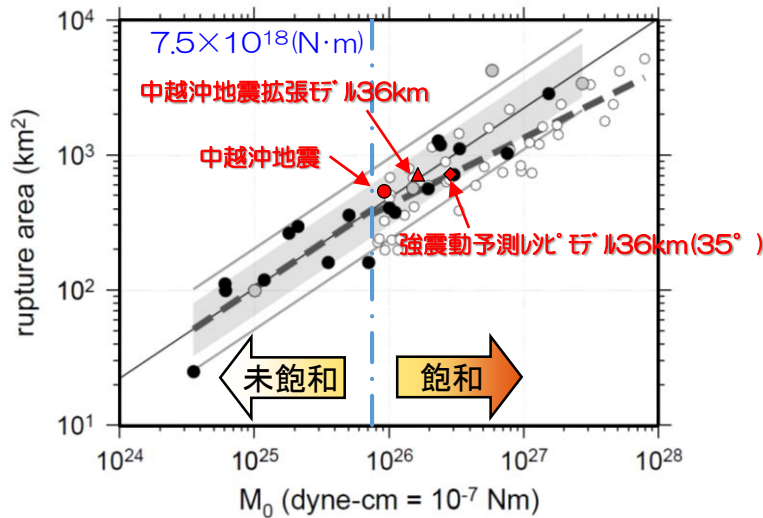
■ : 2007年新潟県中越沖地震により得られた情報を重視。

そのうち, 赤字は強震動予測 Δ °による一般的な設定に対して既に安全側となっているパラメータ

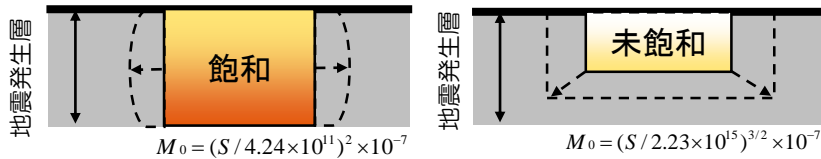
【参考1】各震源モデルと既往スケーリング則の比較

- 中越沖地震及び各震源モデルについて、内陸地殻内地震に関する既往のスケーリング則（地震モーメント M_0 と震源断層の面積 S の関係，地震モーメント M_0 と短周期レベル A の関係）との比較を行った。

地震モーメント M_0 と震源断層の面積 S

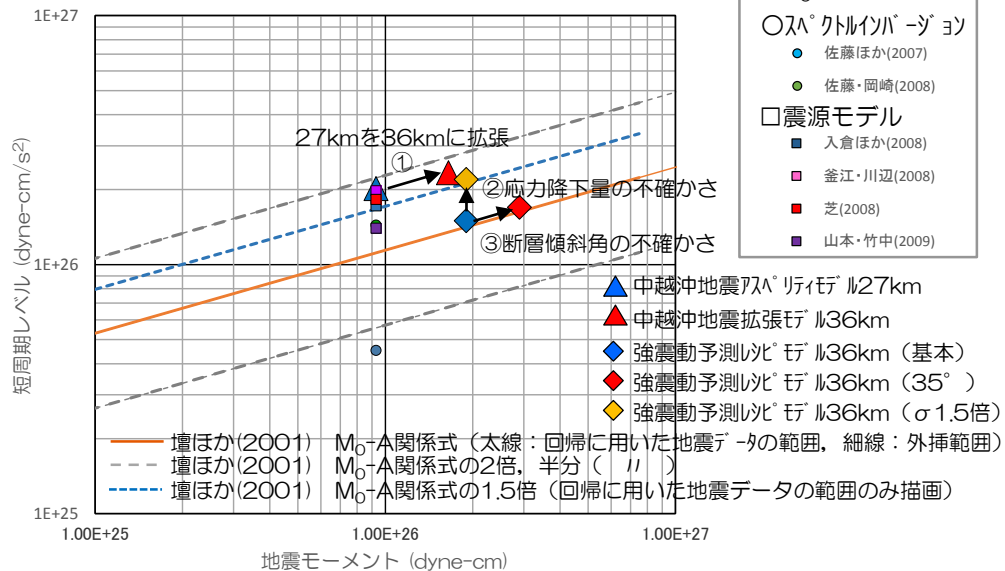


地震モーメントと断層面積の関係
(入倉・三宅(2001)に加筆)



- 中越沖地震の $M_0=9.3 \times 10^{18} \text{N}\cdot\text{m}$ (F-net), $S=540 \text{km}^2$ 及び中越沖地震拡張モデルの $M_0=1.7 \times 10^{19} \text{N}\cdot\text{m}$, $S=720 \text{km}^2$ は既存のスケーリングと整合していると考えられる。

地震モーメント M_0 と短周期レベル A

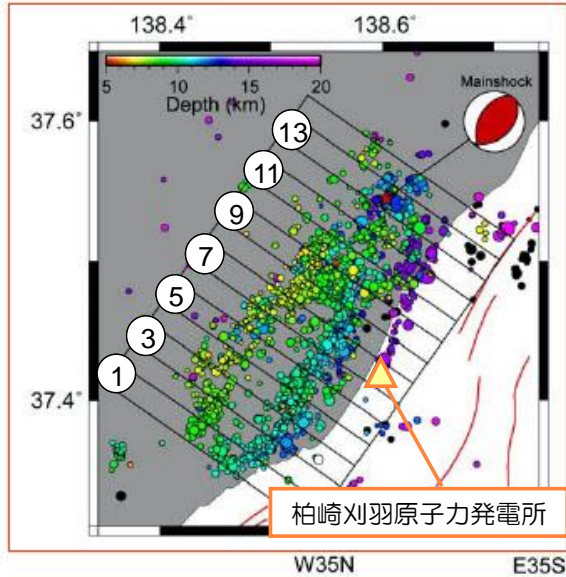


- 中越沖地震の M_0 (F-net) と A
- スケールパラメータ
 - 佐藤ほか(2007)
 - 佐藤・岡崎(2008)
- 震源モデル
- 入倉ほか(2008)
 - 釜江・川辺(2008)
 - 芝(2008)
 - 山本・竹中(2009)

- 既往のスケーリングを参考に、それぞれ適切にパラメータが設定されていることを確認。
- 中越沖地震については、 $S-M_0$ 関係のばらつきの範囲内ではあるものの、やや M_0 が小さい地震であったことから強震動予測モデルと比較して設定値が低くなっているものと考えられる。
- なお、中越沖地震拡張モデルと強震動予測モデルの応力降下量の不確かさを考慮したケースでは、同程度の短周期レベルが考慮されている。

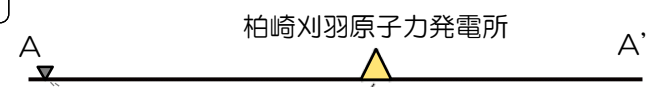
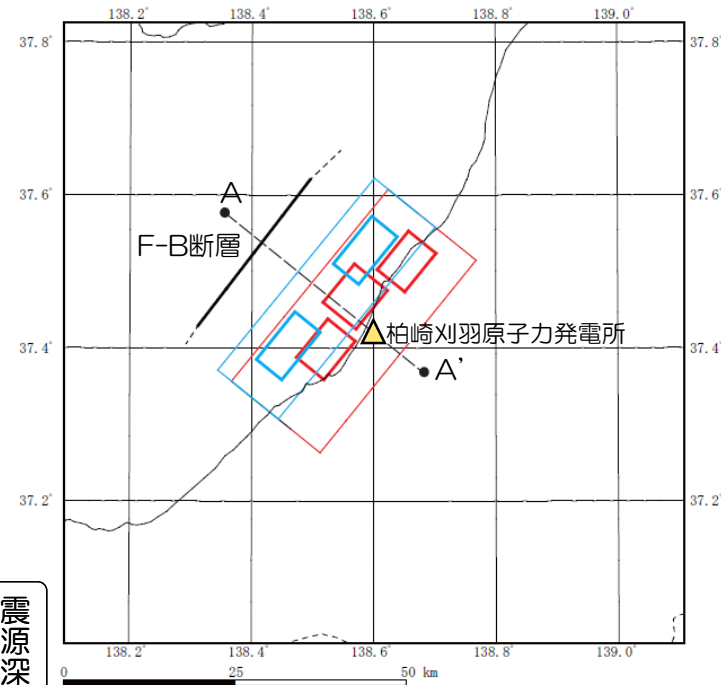
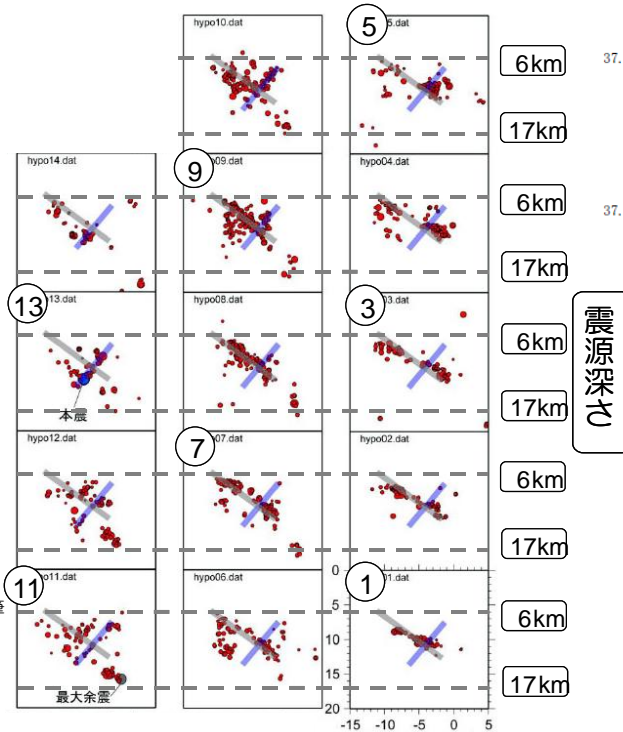
【参考2】 中越沖地震拡張モデルのアスペリティ位置について

- 中越沖地震の余震分布に基づき、震源インバージョンで設定された断層傾斜角は 35° ※。
- このとき、中越沖地震を反映して設定したアスペリティ位置は、敷地に最も近い位置となっている。



東京大学地震研究所資料（平成20年1月11日地震調査委員会）に加筆

地震本部(2008)より抜粋
(一部加筆・修正)



中越沖地震拡張モデル
(35°)

強震動予測レシモモデル
基本ケース (45°)

※芝(2008)において地震本部(2007, 2008)により公開された本震と余震の震源分布を参考に設定された値。

(1) F-B断層による地震の震源モデルの設定に関する検討

① 震源モデルの設定

- a. 強震動予測レシピモデル
- b. 中越沖地震アスペリティモデル・中越沖地震拡張モデル
- c. まとめ

② 長岡平野西縁断層帯による地震との対比

③ 整理結果を踏まえた活断層の諸元表

(2) 第3アスペリティの補正係数に関する検討

②長岡平野西縁断層帯による地震との対比

F-B断層による地震

【参考】長岡平野西縁断層帯による地震

中越沖地震による情報

- 断層長さ：27km
- 断層傾斜角：35°（余震分布）
- 震源インバージョン結果
 - アスペリティ位置
 - 破壊伝播速度（2.5～3.1km/s）
 - 応力降下量（レシピ1.5倍相当）

地質調査結果による情報

- 断層長さ：36km
- 断層傾斜角：中～高角度
（明瞭に反射記録を解釈できる範囲）

地質調査結果による情報

- 断層長さ：91km
- 断層傾斜角：50°

地質調査結果をもとに断層長さの不確かさを考慮し拡張
27km→36km

中越沖地震拡張モデル

強震動予測レシピモデル

強震動予測レシピモデル

中越沖地震の知見等を反映

- 不確かさの考慮（個々に考慮）
 - アスペリティ位置（中央集約）
 - 破壊伝播速度（3.1km/s）
 - 応力降下量（レシピ1.5倍）
 - 断層傾斜角（35°）

- 不確かさの考慮（個々に考慮）
 - アスペリティ位置（敷地寄せ）
 - 破壊伝播速度（3.1km/s）
 - 応力降下量（レシピ1.5倍）
 - 断層傾斜角（35°）

■ F-B断層による地震，長岡平野西縁断層帯による地震で，考え方に矛盾はないものと考えられる。

②長岡平野西縁断層帯による地震との対比

- 陸域の地震の検討用地震である長岡平野西縁断層帯による地震の検討ケースは次のとおりであり、F-B断層による地震と整合は図られている。
- 断層の傾斜角は、地質調査結果及び地震本部の評価結果を参考に50°を基本として設定し、不確かさとして35°を考慮。
- 地震発生層は、速度構造や微小地震分布等に基づき、上端深さ6km、下端深さ17kmと設定。
- 断層モデルの破壊開始点は、巨視的断層面端部、アスペリティ端部を複数設定し、影響を確認したうえで、原則、巨視面北端部に設定。
- アスペリティの位置は、断層中央上端を基本とし、不確かさとして切欠毎に敷地に寄せたケースを考慮。
- 破壊伝播速度は、震源のS波速度(V_s)の0.72倍を基本とし、中越沖地震の知見を踏まえ、敷地に近い片貝断層の部分を3.1km/sとしたケースを考慮。
- 応力降下量の不確かさは、中越沖地震の知見を踏まえ、強震動予測レシピの1.5倍の値を考慮。
- また、十日町断層帯西部との連動を考慮したケース(全長132km)を設定し、さらに、長岡平野西縁断層帯の評価において大きな影響があった応力降下量、断層傾斜角の不確かさをそれぞれ考慮。

No.	検討ケース	断層長さ	断層傾斜角	破壊開始点	アスペリティ位置	破壊伝播速度	応力降下量
0	(地質調査結果)片貝断層	16km	50°	—	—	—	—
1	長岡平野西縁断層帯	91km	50°	巨視面端部	中央上端	0.72Vs	強震動予測レシピ°
2	破壊開始点の不確かさ考慮	91km	50°	複数設定	中央上端	0.72Vs	強震動予測レシピ°
3	アスペリティ位置の不確かさ考慮	91km	50°	巨視面端部	切欠毎敷地寄せ	0.72Vs	強震動予測レシピ°
4	破壊伝播速度の不確かさ考慮	91km	50°	巨視面端部	中央上端	3.1km/s (片貝断層部)	強震動予測レシピ°
5	応力降下量の不確かさ考慮	91km	50°	巨視面端部	中央上端	0.72Vs	強震動予測レシピ° ×1.5倍
6	断層傾斜角の不確かさ考慮	91km	35°	巨視面端部	中央上端	0.72Vs	強震動予測レシピ°
7	十日町断層帯西部との連動考慮	132km	50°	巨視面端部	中央上端	0.72Vs	強震動予測レシピ°
8	十日町断層帯西部との連動考慮及び 応力降下量の不確かさ考慮	132km	50°	巨視面端部	中央上端	0.72Vs	強震動予測レシピ° ×1.5倍
9	十日町断層帯西部との連動考慮及び 断層傾斜角の不確かさ考慮	132km	35°	巨視面端部	中央上端	0.72Vs	強震動予測レシピ°

: 不確かさを考慮するパラメータ

(1) F-B断層による地震の震源モデルの設定に関する検討

① 震源モデルの設定

- a. 強震動予測レシピモデル
- b. 中越沖地震アスペリティモデル・中越沖地震拡張モデル
- c. まとめ

② 長岡平野西縁断層帯による地震との対比

③ 整理結果を踏まえた活断層の諸元表

(2) 第3アスペリティの補正係数に関する検討

③整理結果を踏まえた活断層の諸元表

- 地質調査結果及び長岡平野西縁断層帯に関する地震本部(2009)の検討状況を踏まえ、敷地周辺の震源として考慮する活断層を再整理した結果を表1に示す。
- なお、F-B断層について、中越沖地震の知見を踏まえたうえで、36kmに拡張して設定した震源モデルの諸元を表2に示す。



表1. 敷地周辺の震源として考慮する活断層の諸元

No.	活断層の名称	断層長さ(km)	地震規模※1	傾斜角(°)※2	断層幅(km)※3	Xeq(km)※4		備考
						荒浜	大湊	
1	佐渡島棚東縁断層	37	6.8	西55	15	55	53	佐渡島棚東縁撓曲に対応
2	F-B断層	36	6.8	東45	16	17	16	地質調査結果における断層長さの不確かさを考慮
3	佐渡島南方断層	29	6.8	東45	16	26	25	
4	F-D断層	30	6.8	東45	16	38	39	F-D褶曲群に対応
5	高田沖断層	25	6.8	東30	22	59	60	高田沖褶曲群に対応
6	米山沖断層	21	6.8	西50	15	25	26	
7	長岡平野西縁断層帯	91	7.5	西50	15	25	25	地震本部(2009)等を踏まえ、角田・弥彦～気比ノ宮～片貝断層の同時活動を考慮
8	十日町断層帯西部	33	6.8	西60	13	32	33	

- ※1: 地震規模は、中越沖地震の知見を踏まえて設定。
- ※2: 地質調査結果及び地震本部(2009)による長期評価を参考に設定。
- ※3: 断層幅は、地震発生層厚さ11km及び断層傾斜角に基づき、地震発生層を飽和するように設定。
- ※4: 等価震源距離(Xeq)は、強震動予測レシピに従い、断層の中心を基準として均等配置した断層面を用いて算定。
- ※: 敷地周辺に認められる孤立した短い活断層は、長岡平野西縁断層帯を構成する片貝断層と比較して等価震源距離(Xeq)が遠いことを確認。

表2. 中越沖地震を踏まえて設定したF-B断層の諸元

No.	活断層の名称	断層長さ(km)	地震規模※1	傾斜角(°)※2	断層幅(km)※3	Xeq(km)		備考
						荒浜	大湊	
2	F-B断層	36	7.0	東35	20	13	13	地質調査結果における断層長さの不確かさを考慮

- ※1: 地震規模は、中越沖地震の知見を踏まえて設定。
- ※2: 断層傾斜角は、中越沖地震の余震分布(地震本部(2007,2008))を参考に設定。
- ※3: 断層幅は、地震発生層厚さ11km及び断層傾斜角に基づき、地震発生層を飽和するように設定。

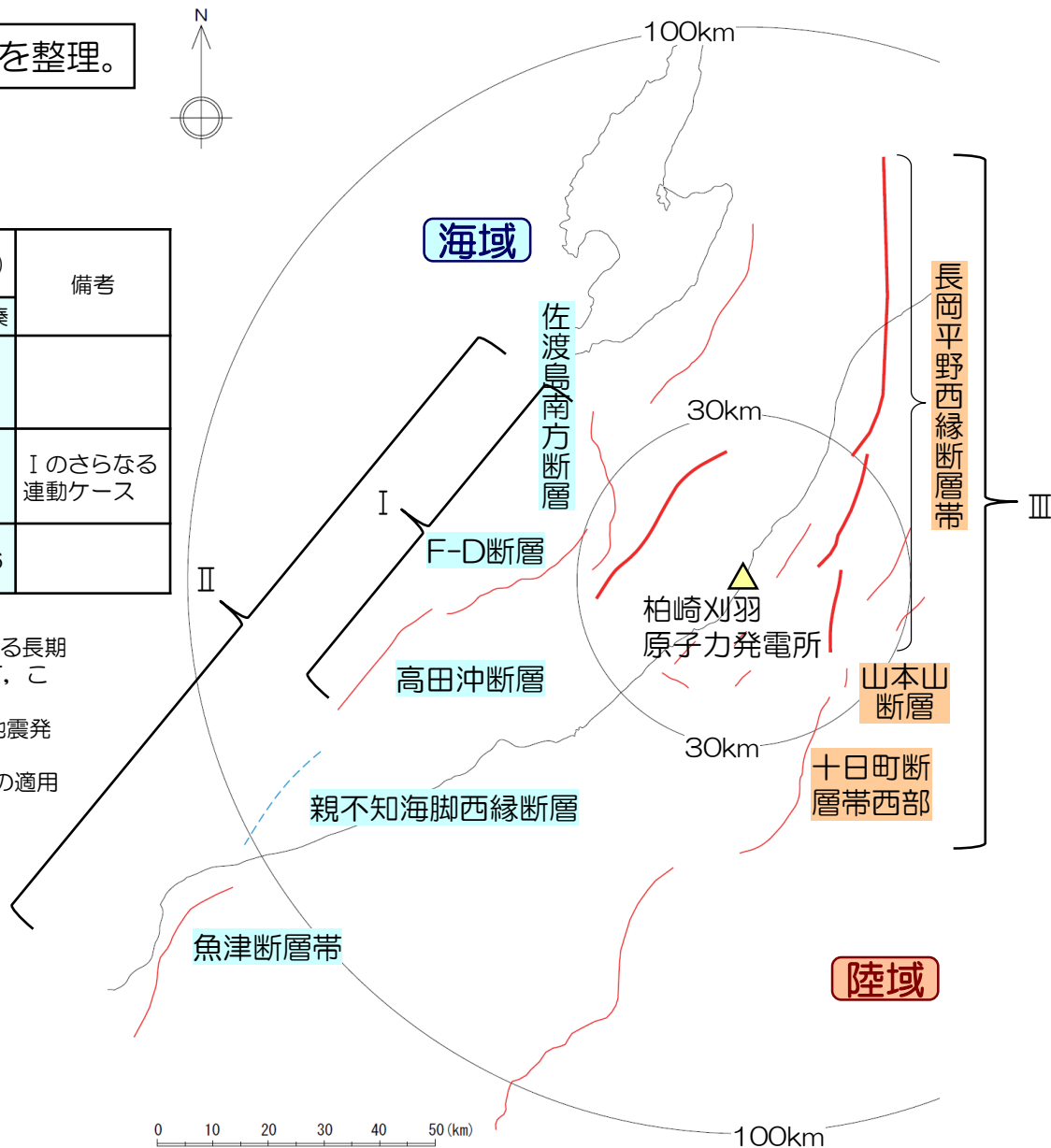
③整理結果を踏まえた活断層の諸元表

敷地周辺における連動を考慮する活断層を整理。

表1. 連動を考慮する震源モデルの諸元

	No.	活断層の名称	断層長さ (km)	地震規模 ※1	傾斜角 (°) ※2	断層幅 (km) ※3	Xeq(km)		備考
							荒浜	大湊	
海域	I	佐渡島南方～F-D～高田沖断層	84	7.6	東30～45	20	31	31	
	II	佐渡島南方～F-D～高田沖～親不知海脚西縁～魚津断層帯	156	-※4	東30～45	20	-	-	Iのさらなる連動ケース
陸域	III	長岡平野西縁断層帯～十日町断層帯西部	132	7.7	西50	15	26	26	

- ※1：地震規模は、中越沖地震の知見を踏まえて設定。
- ※2：断層の傾斜角について、地質調査結果、地震本部(2009)による長期評価等を参考に設定。(断層傾斜角に幅があるI、IIについて、ここでは中越沖地震の余震分布を参考に35°として設定)
- ※3：断層幅は、地震発生層厚さ11km及び断層傾斜角に基づき、地震発生層を飽和するように設定。
- ※4：参照している地震規模(最大M7.8)を超えているため評価手法の適用範囲外。



(1) F-B断層による地震の震源モデルの設定に関する検討

① 震源モデルの設定

a. 強震動予測レシピモデル

b. 中越沖地震アスペリティモデル・中越沖地震拡張モデル

c. まとめ

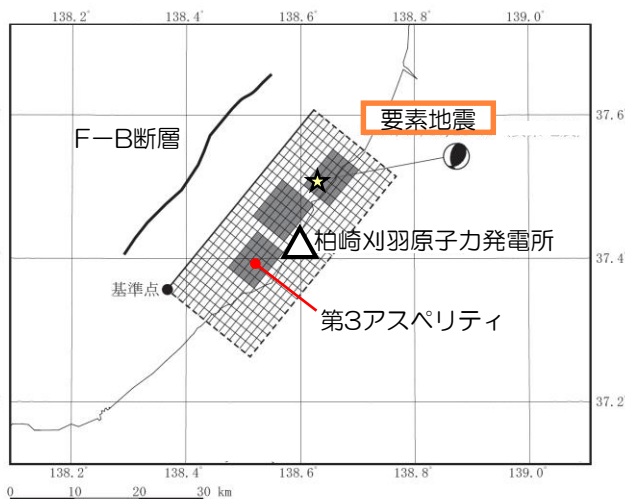
② 長岡平野西縁断層帯による地震との対比

③ 整理結果を踏まえた活断層の諸元表

(2) 第3アスペリティの補正係数に関する検討

検討概要

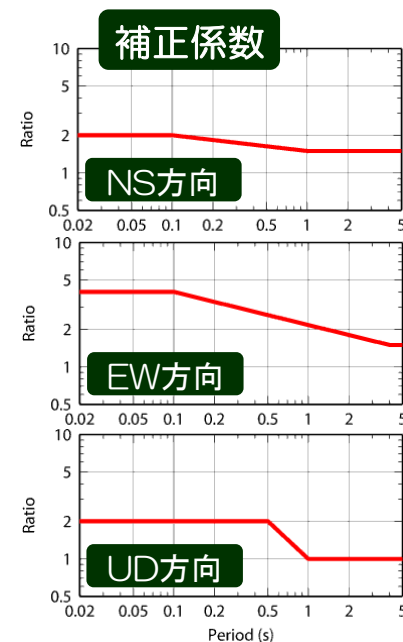
- これまで、F-B断層による地震の断層モデルを用いた地震動評価のうち、荒浜側の評価では、第3アスペリティ（以下、「Asp3」）に用いる要素地震は、中越沖地震におけるAsp3の特性を踏まえ、補正係数を考慮した補正波を使用。
- 補正係数の物理的な意味合いについて中小地震の観測記録を用い、第3Aspと要素地震の震源域である第1アスペリティ（以下、「Asp1」）の領域で起きる地震のサイト特性の比と解釈できることを検討（検討①）。
- ここでは、放射特性の影響が顕著に評価される統計的グリーン関数法のAsp3・Asp1のそれぞれの要素断層について、地震モーメント M_0 、応力降下量で基準化し、敷地における波形合成を行い、フーリエスペクトル比を求めることで放射特性の影響の確認を試みる（検討②）。
- さらに、検討①及び検討②の結果を考慮したうえで、改めて補正係数を設定し、地震動評価に与える影響について確認する。



要素地震の震央位置
(中越沖地震拡張モデルの断層モデル図にプロット)

要素地震の震源パラメータ

発生日時		2007/7/16 21:08	備考
マグニ チュード	M_j	4.4	気象庁
	M_w	4.4	F-net
震源 位置	東経(°)	138.63	気象庁
	北緯(°)	37.51	気象庁
震源深さ(km)		13.6	余震分布を踏まえ設定
走向(°)		187; 39	F-net
傾斜(°)		54; 41	F-net
すべり角(°)		70; 115	F-net
地震モーメント(N·m)		5.21×10^{15}	F-net
コーナー周波数(Hz)		1.65	Brune(1970)式
実効応力(MPa)		4.6	芝(2008)
Q値		$76 f^{0.74}$	岩田ほか(2005)



検討① 中小地震の観測記録を用いた検討

■ Asp3に適用する補正係数について解釈を加えるための検討を実施。

■ 荒浜側（1号機）におけるAsp1部で起きる地震によるサイト特性（ ${}_1K1$ ）に対するAsp3部で起きる地震によるサイト特性（ ${}_3K1$ ）の比を補正係数(1)式として仮定。

$$\frac{{}_3K1}{{}_1K1} = \frac{{}_3K1}{{}_3K5} \times \frac{{}_3K5}{{}_1K1} \quad \dots (1) \text{式}$$

ここで、左添え字はアスペリティ番号
K5は大湊側（5号機）を示す。

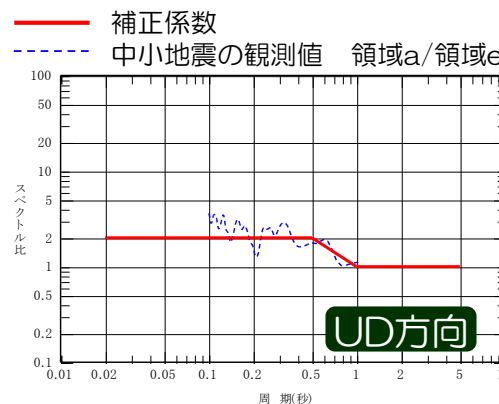
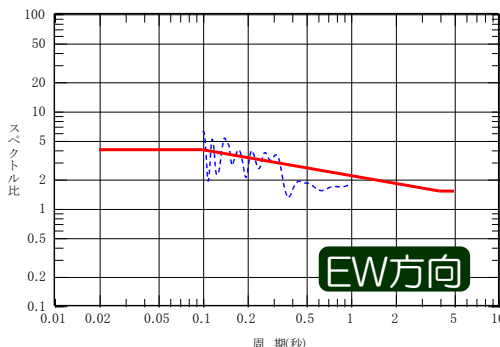
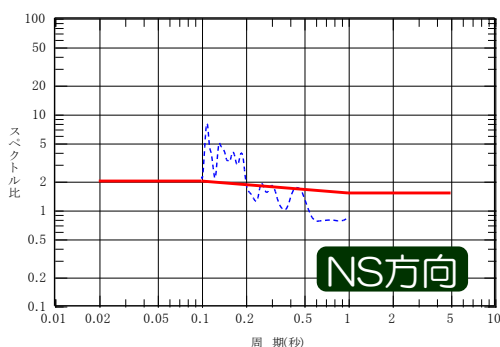
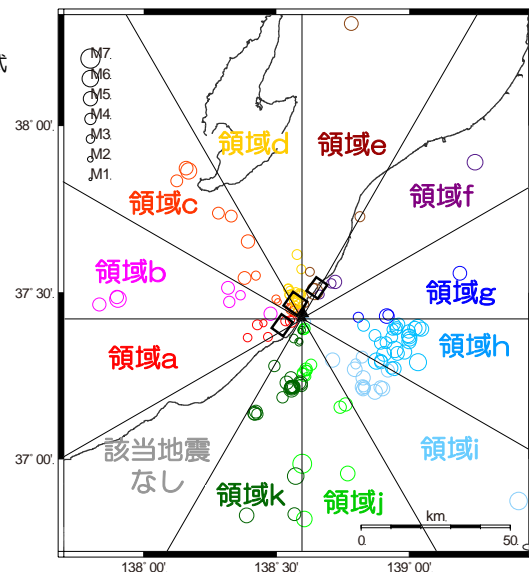
■ 大湊側（5号機）では、到来方向による伝播特性の差異が小さいことから ${}_3K5 \div {}_1K5$ と考え(1)式は(2)式となる。

$$\frac{{}_3K1}{{}_1K1} = \frac{{}_3K1}{{}_3K5} \times \frac{{}_1K5}{{}_1K1} \quad \dots (2) \text{式}$$

■ Asp1部、Asp3部のそれぞれの方位（領域e、領域a）から到来する中小地震の観測記録を用い、(2)式を(3)式に変形したうえで観測値を算定し、補正係数との対応を確認。

$$\frac{{}_3K1}{{}_1K1} = \frac{\text{領域a}}{\text{領域e}} \frac{K1/K5}{K1/K5} \quad \dots (3) \text{式}$$

※フーリエスペクトル振幅比により算定



補正係数と中小地震の観測記録から求めた観測値（領域a/領域e）の比較

■ 中小地震による観測値と補正係数は、同様の周期特性を示すことから、補正係数の主たる物理的な意味合いとしては、荒浜側におけるAsp1部で起きる地震によるサイト特性に対するAsp3部で起きる地震によるサイト特性の比と考えられる。

検討② SGFによる中越沖地震の震源特性（放射特性）の影響把握

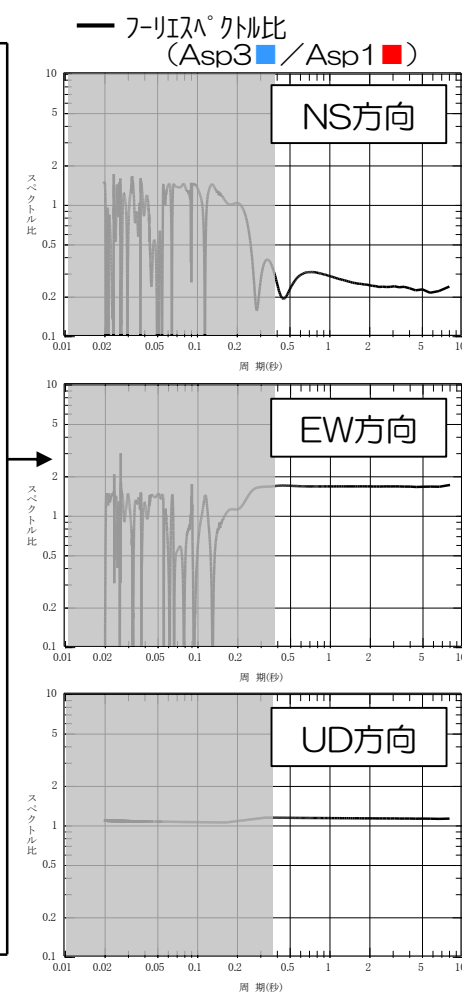
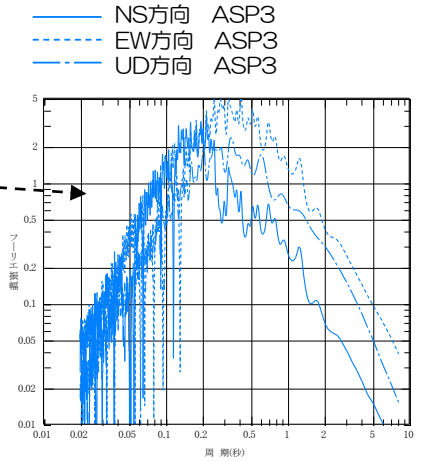
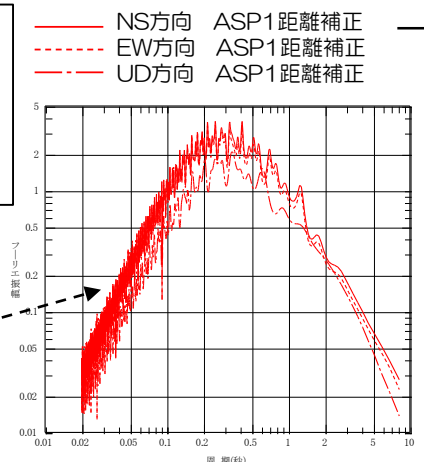
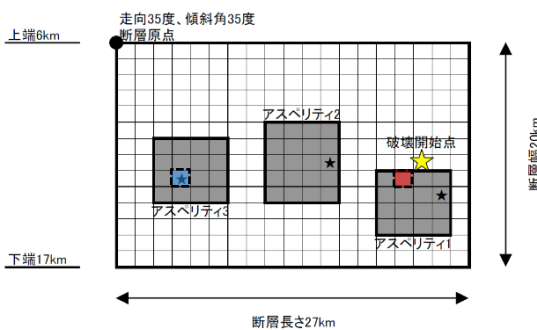
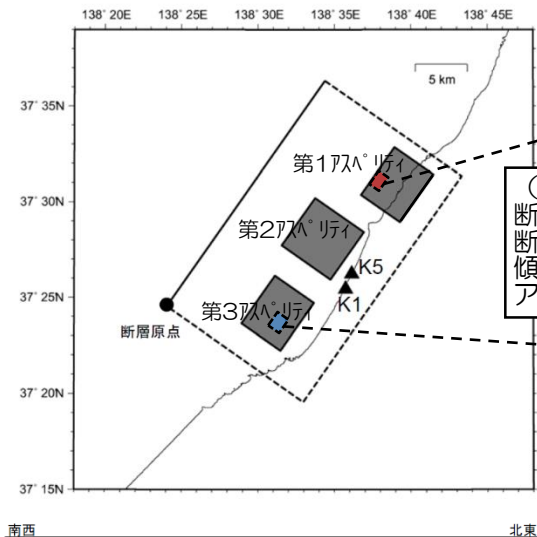
■ 1号機を対象に、Asp1部とAsp3部から到来する地震動について、統計的グリーン関数法により理論的な放射特性の違いによる相違を方向別にそれぞれ確認する。

※メッシュの地震モーメント M_0 と実効応力を、経験的グリーン関数法の要素地震のパラメータと同一とすることにより、放射特性の影響の把握を試みる。

(主な諸元)
 断層長さ: 27km
 断層幅: 20km
 傾斜角: 35° (東傾斜)
 アスベリティ: 3個

経験的グリーン関数法に用いる要素地震の震源パラメータ

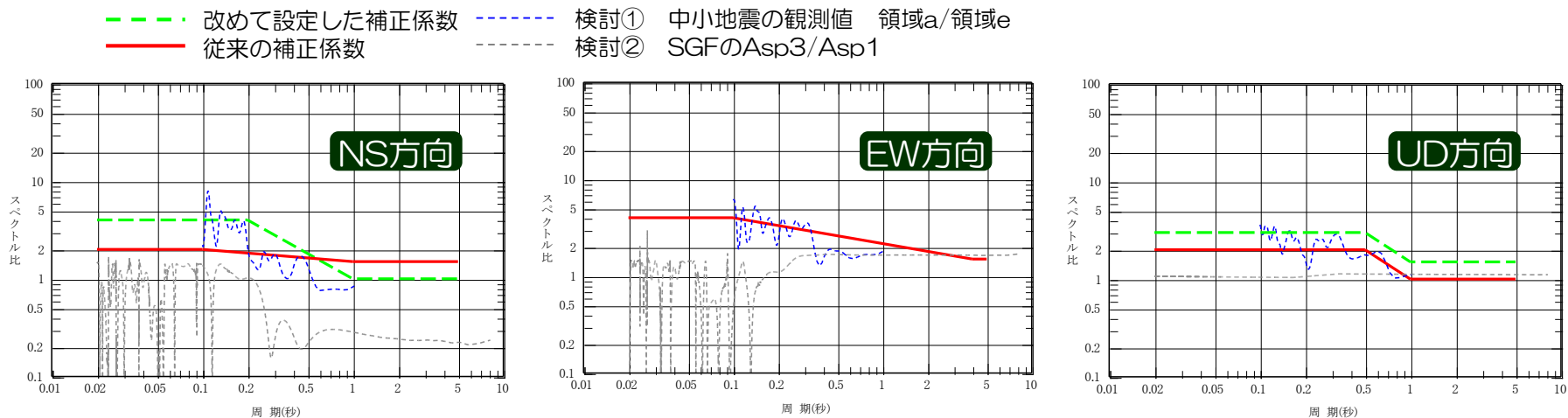
発生日時	2007/7/16 21:08
マグニチュード	M_j 4.4 M_w 4.4
震源位置	東経(°) 138.63 北緯(°) 37.51
震源深さ(km)	13.6
走向(°)	187:39
傾斜(°)	54:41
すべり角(°)	70:115
地震モーメント(N·m)	5.21×10^{15}
コーナー周波数(Hz)	1.65
実効応力(MPa)	4.6
Q値	$76 f^{0.74}$



- 震源距離の違いについては、 $1/X$ で補正。
- 震源の影響として長周期側の比率は以下の通り。
 NS: 約0.3倍, EW: 約1.5倍, UD: 約1.0倍

補正係数の再評価

- 従来の補正係数は、中越沖地震の解放基盤波のうち特徴的であったEW方向を重視し、再現性が向上するように設定。
- ここでは、中越沖地震後に実施した検討①、検討②の成果を踏まえ、NS方向・UD方向の補正係数を改めて設定し、地震動評価に与える影響について確認を行う。

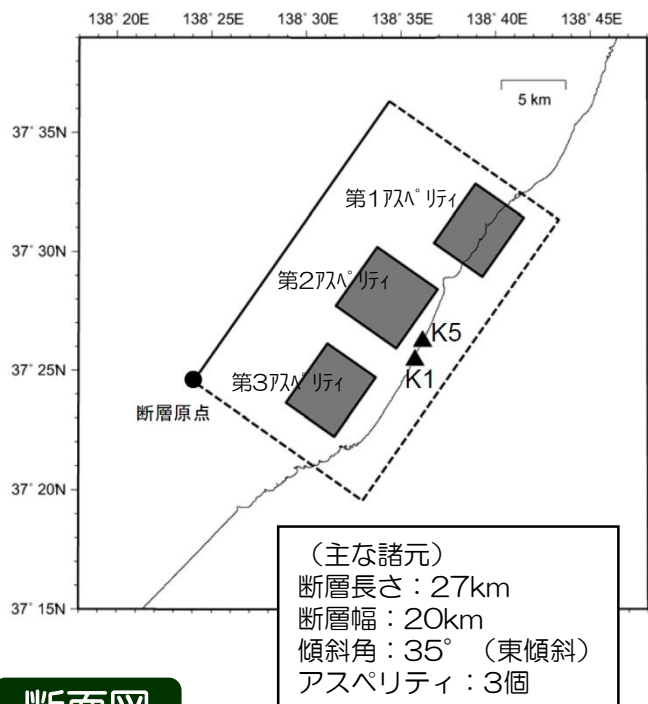


各検討結果と改めて設定した補正係数

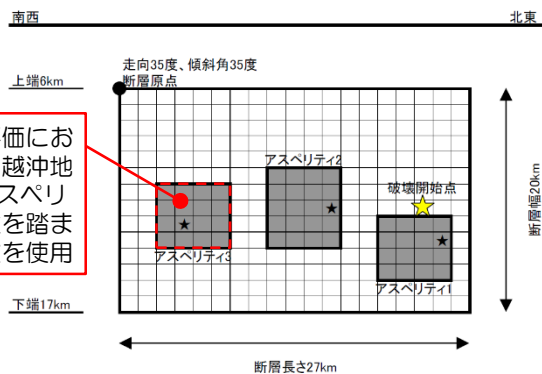
補正係数の影響確認

中越沖地震 中越沖地震アスペリティモデル(M6.8)

平面図



断面図



■ 中越沖地震の震源インバージョン結果等を参考に設定したアスペリティモデルを使用。(断層長さ27km×断層幅20km)

断層パラメータ

項目		設定値	
巨視的断層面	基準点	東経(°)	138.40
		北緯(°)	37.41
	断層上端深さ(km)	6	
	断層長さ(km)	27.0	
	断層幅(km)	20.0	
	断層面積(km ²)	540	
	走向(°)	35	
	傾斜角(°)	35	
	破壊伝播形式	マルチホブ・セクター	
	S波速度(km/s)	3.4	
地震モーメント(N·m)	9.3×10 ¹⁸		
アスペリティ1	面積(km ²)	31	
	地震モーメント(N·m)	1.8×10 ¹⁸	
	平均すべり量(cm)	187	
	応力降下量(MPa)	25	
	破壊伝播速度(km/s)	3.1	
破壊時間遅れ(s)	0.2		

項目		設定値
アスペリティ2	面積(km ²)	39
	地震モーメント(N·m)	2.1×10 ¹⁸
	平均すべり量(cm)	173
	応力降下量(MPa)	21
	破壊伝播速度(km/s)	2.8
破壊時間遅れ(s)	1.8	
アスペリティ3	面積(km ²)	31
	地震モーメント(N·m)	1.4×10 ¹⁸
	平均すべり量(cm)	146
	応力降下量(MPa)	20
	破壊伝播速度(km/s)	2.5
破壊時間遅れ(s)	0.0	
背景領域	面積(km ²)	419
	地震モーメント(N·m)	3.9×10 ¹⁸
	平均すべり量(cm)	30
	実効応力(MPa)	5.1
破壊伝播速度(km/s)	2.3	

□ : 地質調査結果等に基づく

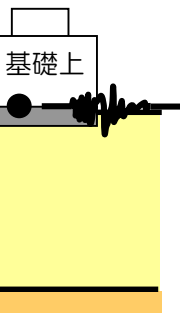
□ : 中越沖地震の震源インバージョン結果に基づく

補正係数の影響確認 中越沖地震の観測記録の再現性

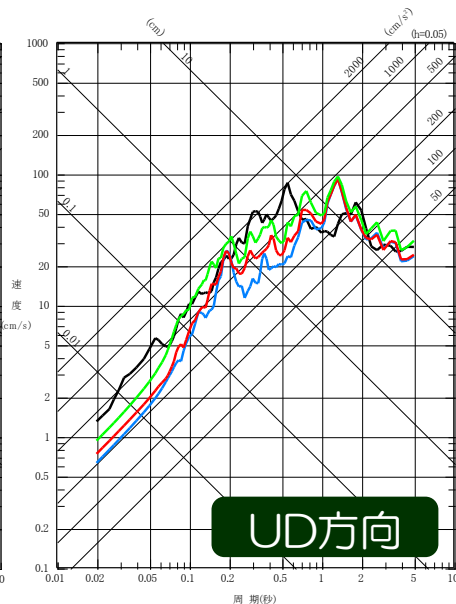
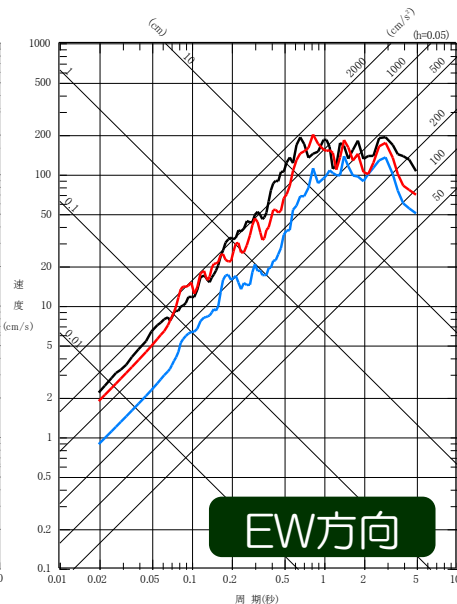
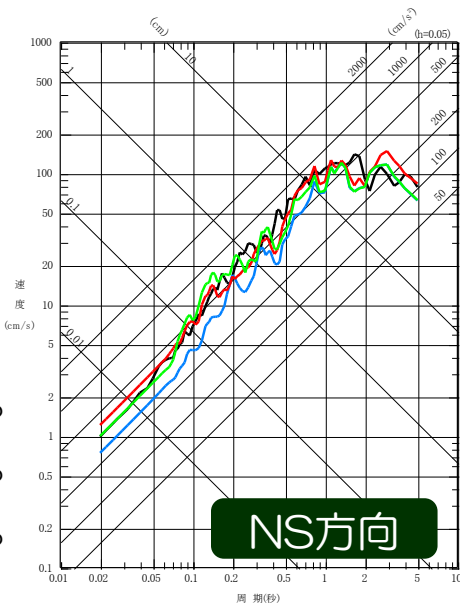
【原子炉建屋基礎版上】

■ 原子炉建屋基礎版上を評価点として、中越沖地震アスペリティモデルによるシミュレーション解析を実施。

1号機



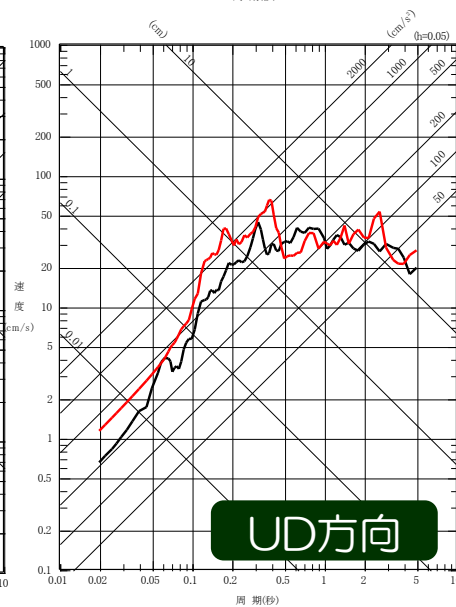
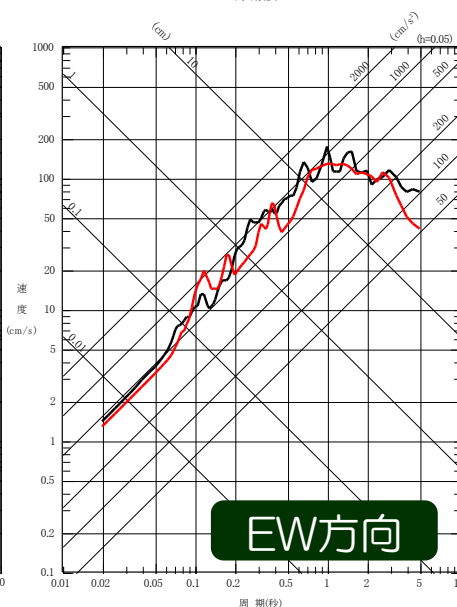
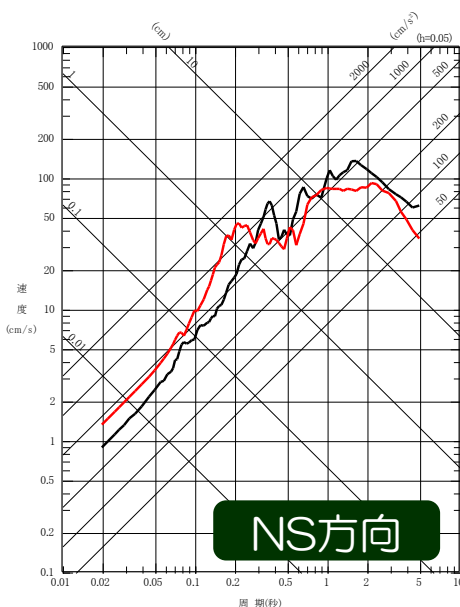
- 観測記録
- 断層モデルによる評価 (補正なし)
- 断層モデルによる評価 (従来補正)
- 断層モデルによる評価 (今回補正)



5号機

- 観測記録
- 断層モデルによる評価

■ 今回の補正係数によりNS方向・UD方向の観測記録の再現性がより改善することを確認。

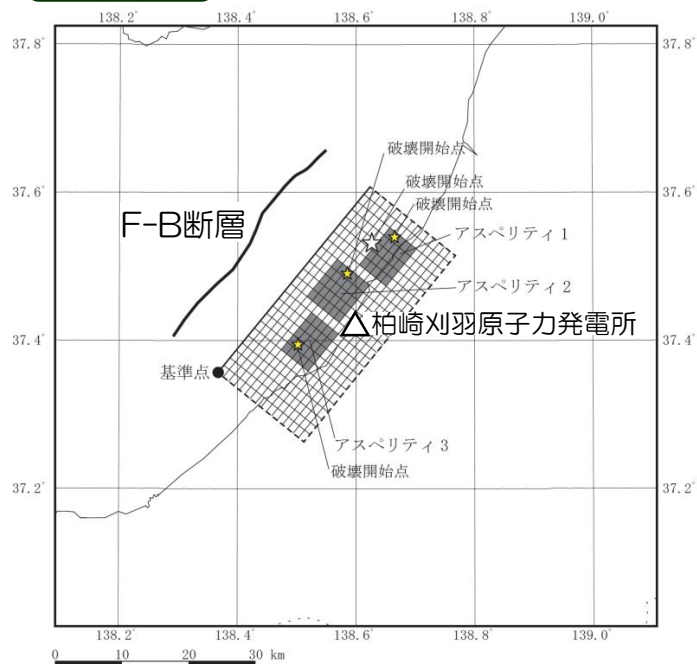


補正係数の影響確認

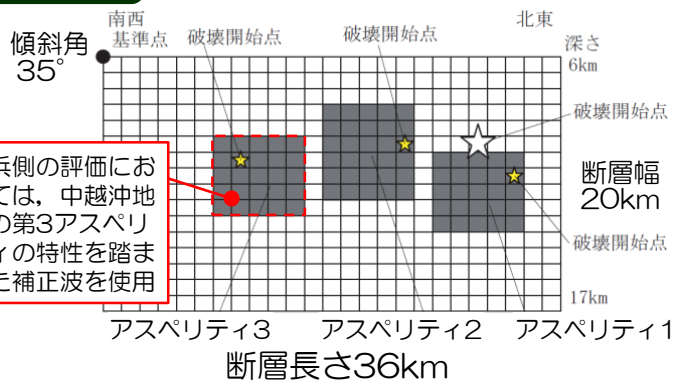
F-B断層による地震

中越沖地震拡張モデル(M7.0)

平面図



断面図



荒浜側の評価においては、中越沖地震の第3アスペリティの特性を踏まえた補正波を使用

■ 中越沖地震のアスペリティモデルを断層長さの不確かさを考慮して36km(M7.0)に拡張した中越沖地震拡張モデルによる地震動評価結果への影響について確認する。

断層パラメータ

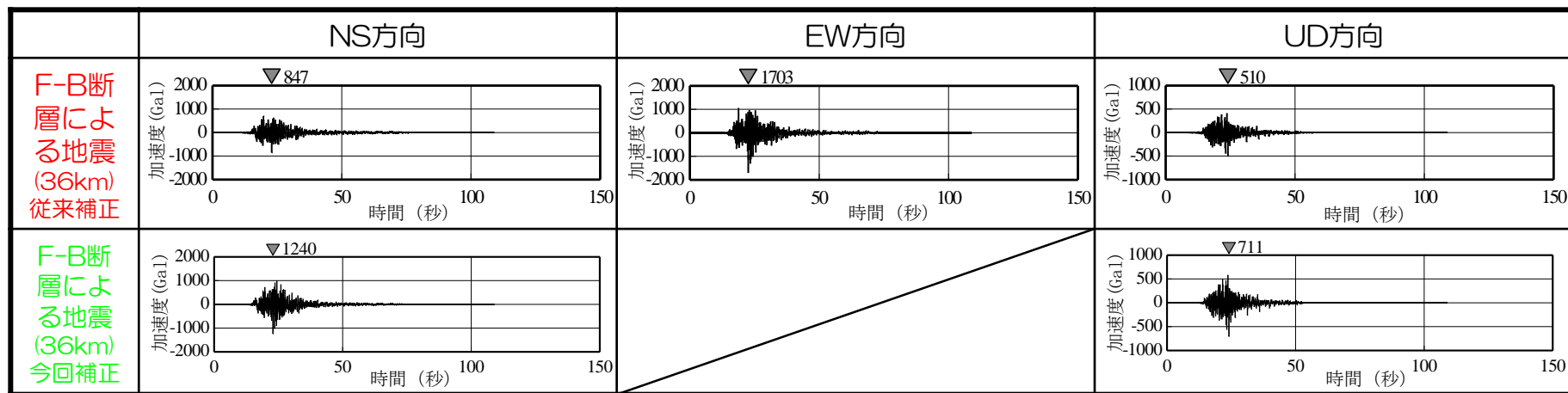
項目		設定値	
巨視的断層面	基準点	東経(°)	138.37
		北緯(°)	37.36
	断層上端深さ(km)	6	
	断層長さ(km)	36.0	
	断層幅(km)	20.0	
	断層面積(km ²)	720	
	走向(°)	39	
	傾斜角(°)	35	
	破壊伝播形式	マルチ体中心	
	地震モーメント(N・m)	1.7×10 ¹⁹	
アスペリティ2	面積(km ²)	52	
	地震モーメント(N・m)	3.8×10 ¹⁸	
	平均すべり量(cm)	230	
	応力降下量(MPa)	21	
アスペリティ3	面積(km ²)	42	
	地震モーメント(N・m)	2.5×10 ¹⁸	
	平均すべり量(cm)	195	
	応力降下量(MPa)	20	
背景領域	面積(km ²)	584	
	地震モーメント(N・m)	7.0×10 ¹⁸	
	平均すべり量(cm)	38	
	実効応力(MPa)	5.1	
アスペリティ1	面積(km ²)	42	
	地震モーメント(N・m)	3.3×10 ¹⁸	
	平均すべり量(cm)	249	
	応力降下量(MPa)	25	
アスペリティ1	破壊伝播速度(km/s)	3.1	
	破壊時間遅れ(s)	0.2	
背景領域	面積(km ²)	584	
	地震モーメント(N・m)	7.0×10 ¹⁸	
	平均すべり量(cm)	38	
	実効応力(MPa)	5.1	
背景領域	破壊伝播速度(km/s)	2.3	

□ : 地質調査結果等に基づく

□ : 中越沖地震の震源インバージョン結果に基づく

補正係数の影響確認 F-B断層による地震 中越沖地震拡張モデル

【解放基盤表面】 従来評価 (Ss-2) との比較 荒浜側

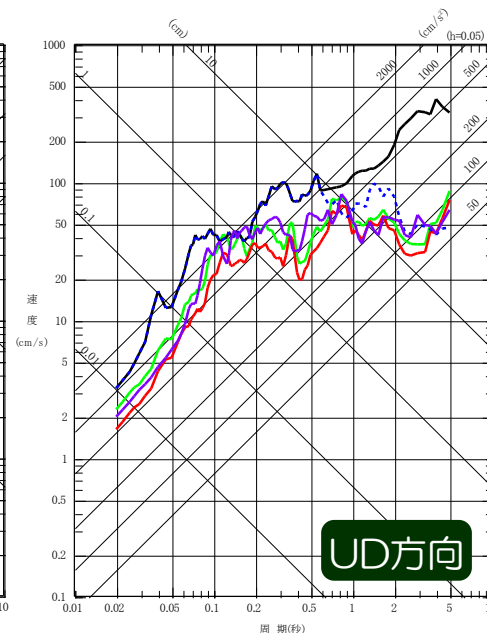
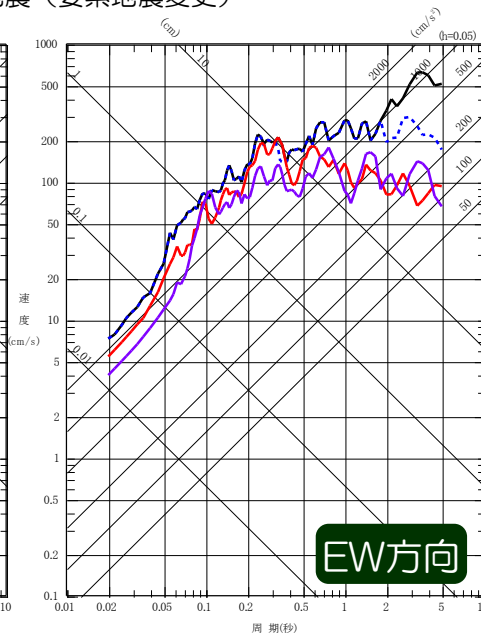
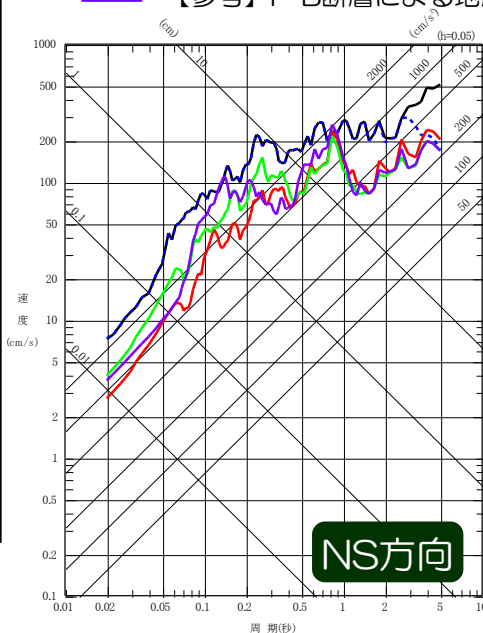


断層モデルを用いた手法による地震動評価

- F-B断層による地震 (従来補正)
- F-B断層による地震 (今回補正)
- 【参考】 F-B断層による地震 (要素地震変更)
- - - F-B断層による地震 応答スペクトルに基づく評価
- 【参考】 基準地震動Ssの包絡スペクトル

■ 改めて設定した補正係数を用いた評価結果について以下の事項を確認。

- ① 基準地震動Ssの包絡スペクトル及び基準地震動Ss-1を概ね下回ること。
- ② また、第3アスペリティの要素地震を変更したケースと同様な地震動レベルであること。

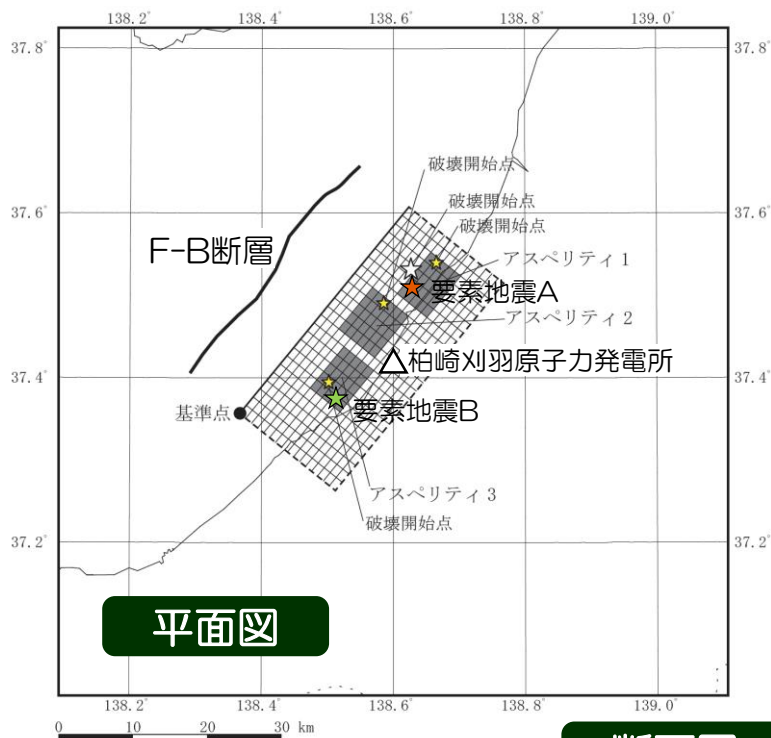


検討のまとめ

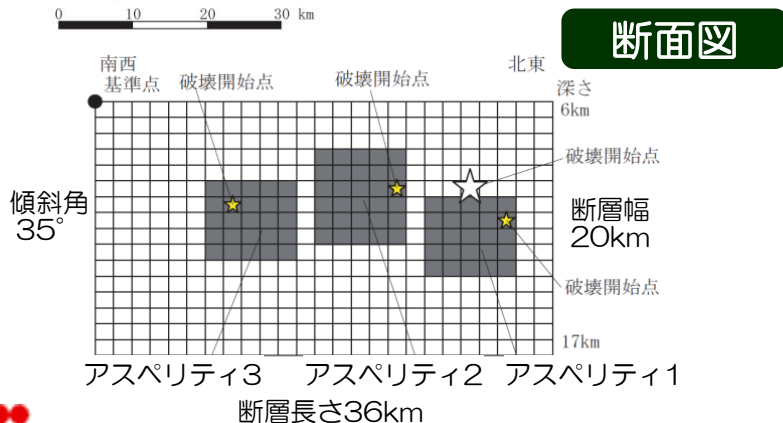
- これまで、F-B断層による地震の断層モデルを用いた地震動評価のうち、荒浜側の評価では、Asp3に用いる要素地震は、中越沖地震におけるAsp3の特性を踏まえ、補正係数を考慮した補正波を使用。
- 従来の補正係数は、中越沖地震の解放基盤波のうち特徴的であったEW方向を重視し、再現性が向上するように設定していたものの、説明性を向上する目的で以下の検討を実施。
 - 検討①：補正係数の物理的な意味合いについて中小地震の観測記録を用いた検討
⇒Asp3とAsp1の領域で起きる地震のサイト特性の比と解釈可能。
 - 検討②：統計的グリーン関数法を用いた放射特性に関する試検討
⇒Asp3とAsp1の要素断層の波形合成により放射特性の影響を確認。
- さらに、検討①及び検討②の結果を考慮したうえで、改めて補正係数を設定し、地震動評価に与える影響について確認。
- 中越沖地震アスペリティモデルによる原子炉建屋基礎版上におけるシミュレーション解析結果では、改めて設定した補正係数を用いた場合、NS方向・UD方向の観測記録の再現性がより改善されることを確認。したがって、NS方向・UD方向については、改めて設定した補正係数を採用することとする。
- なお、基準地震動S_s-2の策定ケースとなっているF-B断層による地震の中越沖地震拡張モデルにおいて、改めて設定した補正係数を採用した地震動評価結果は、基準地震動S_sの包絡スペクトル及び基準地震動S_s-1を概ね下回ることを確認。

【参考1】 F-B断層による地震 中越沖地震拡張モデル 第3アスペリティの要素地震を変更したケース

断層モデル



平面図



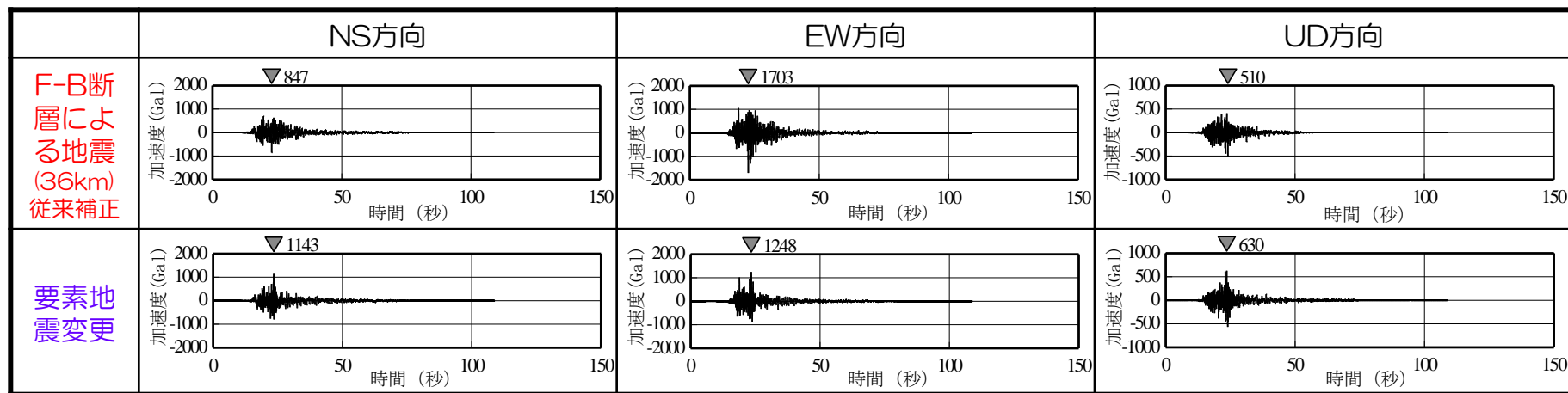
断面図

- 中越沖地震アスペリティモデルを用いたシミュレーション解析によると、UD方向については、要素地震を追加したケースが、中越沖地震の観測記録の再現性が高かったことから、中越沖地震拡張モデルに対し同要素地震を用いた断層モデルを用いた手法による地震動評価を実施。
- 第1・2アスペリティについては、要素地震A、第3アスペリティについては、要素地震Bを用いた経験的グリーン関数法により、解放基盤表面における地震動評価を実施。

要素地震の震源パラメータ

		要素地震A	要素地震B	備考
発生日時		2007/7/16 21:08	2007/8/3 11:01	気象庁
マグニ チュード	M_j	4.4	4.1	気象庁
	M_w	4.4	4.0	F-net
震源 位置	東経(°)	138.63	138.52	気象庁
	北緯(°)	37.51	37.38	気象庁
震源深さ(km)		13.6	20	気象庁
走向(°)		187 ; 39	59 ; 226	F-net
傾斜(°)		54 ; 41	48 ; 43	F-net
すべり角(°)		70 ; 115	99 ; 80	F-net
地震モーメント(N・m)		5.21×10^{15}	1.05×10^{15}	F-net
コーナー周波数(Hz)		1.65	1.64	Brune(1970)式
実効応力(MPa)		4.6	0.93	設定
Q値		$76 f^{0.74}$	$76 f^{0.74}$	岩田ほか(2005)

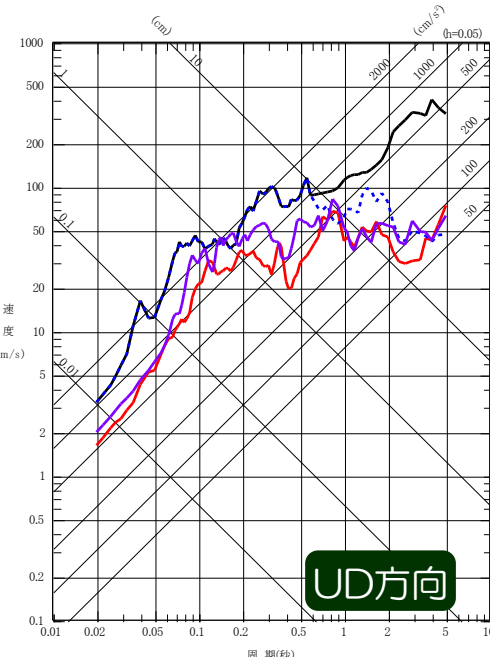
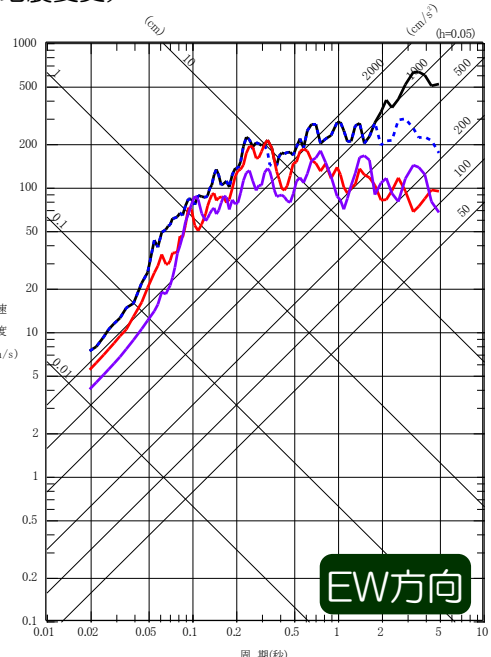
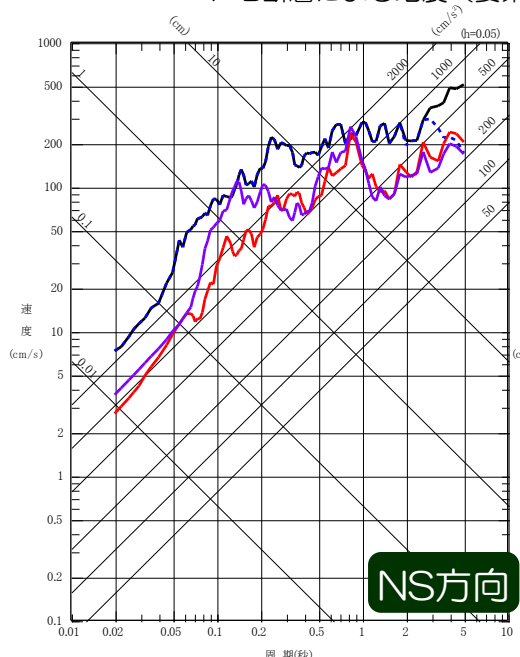
【参考1】 F-B断層による地震 第3アパ^oリ^oの要素地震を変更したケース 荒浜側【解放基盤表面】



断層モデルを用いた手法による地震動評価

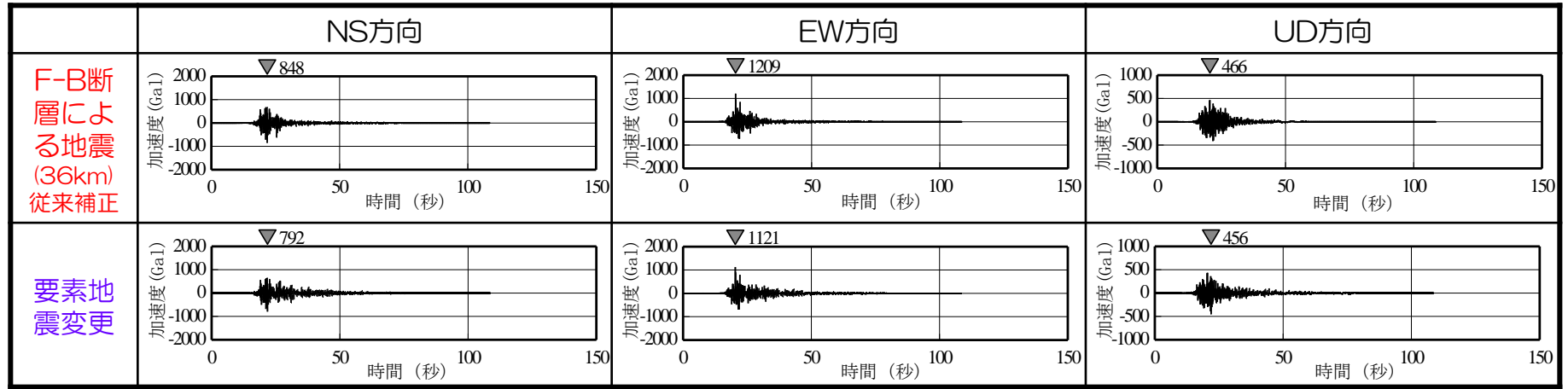
- F-B断層による地震 (従来補正)
- F-B断層による地震 (要素地震変更)
- - - F-B断層による地震 応答スペクトルに基づく評価
- 【参考】基準地震動Ssの包絡スペクトル

■ 評価結果は、UD方向の周期0.5秒付近の周期帯をはじめ、基準地震動Ssの包絡スペクトル及び基準地震動Ss-1を概ね下回ることを確認。



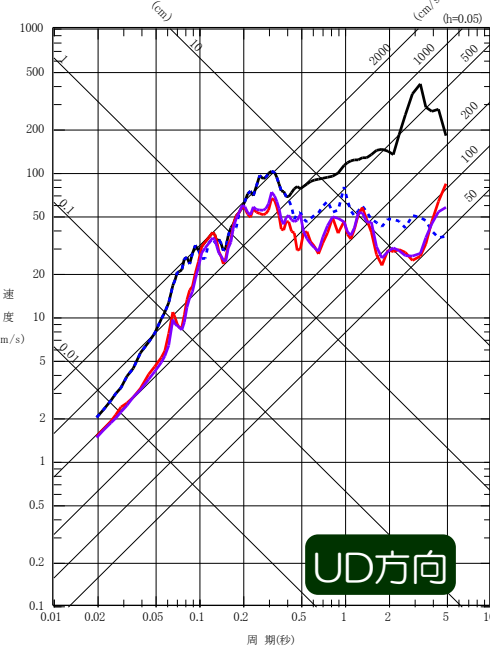
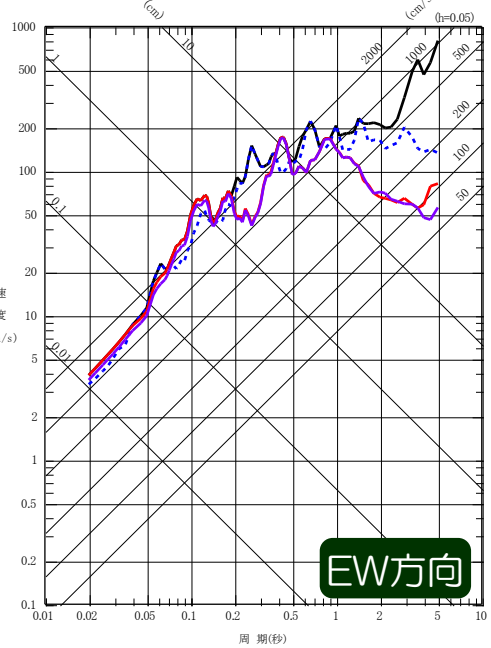
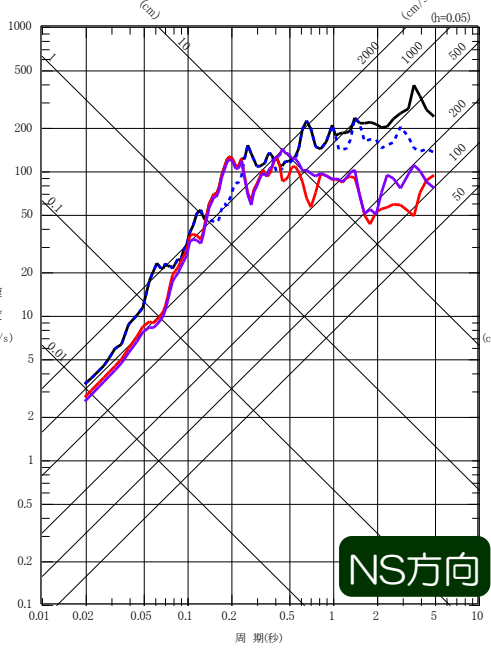
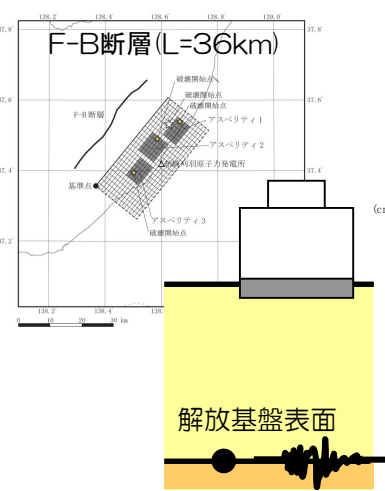
【参考1】F-B断層による地震 第3アパリティの要素地震を変更したケース

大湊側【解放基盤表面】



従来の評価結果と比較し、地震動レベルに大きな相違が無いことを確認。

断層モデルを用いた手法による地震動評価
 〓 F-B断層による地震 (従来補正) 〓 F-B断層による地震 応答スペクトルに基づく評価
 〓 F-B断層による地震 (要素地震変更) 〓 【参考】基準地震動Ssの包絡スペクトル



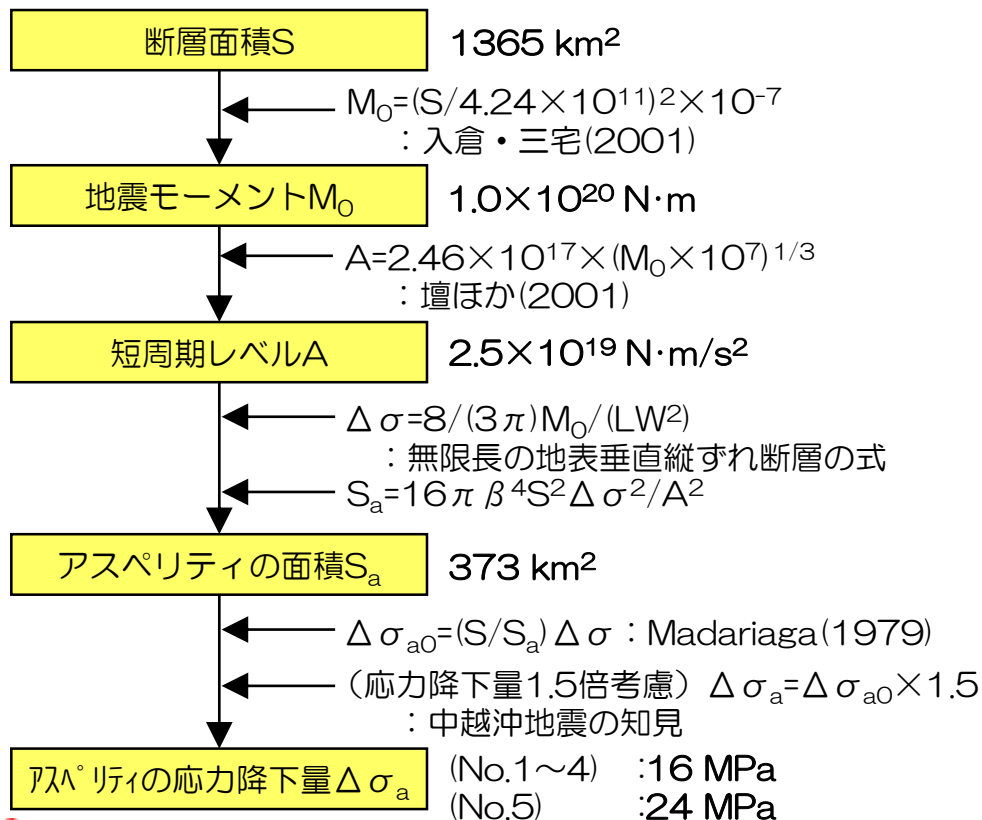
1. 応答スペクトルに基づく地震動評価に関するご指摘について
2. F-B断層による地震の地震動評価に関するご指摘について
3. 長岡平野西縁断層帯による地震の地震動評価に関するご指摘について
4. 海域の連動について
5. 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動について

		内容	説明概要	ページ
4	H27 10/2	入倉・三宅(2001), Murotani et al.(2010)及び壇ほか(2015)を用いた M_0 の評価について大小関係が確認できるように説明すること。	• 断層幅15kmと設定した場合の壇ほか(2015)によるS- M_0 関係と入倉・三宅(2001)及びMurotani et al.(2010)による設定値を図示してご説明。	84
5	H27 10/2	Fujii and Matsu'ura(2000)を参考に、逆断層の内陸地殻内地震に対してパラメータを試算できないか検討すること。	• 文献の内容を確認し、逆断層として取り入れられているのはプレート間地震であることから、逆断層の内陸地殻内地震に対して試算することは適切でないことをご説明。	85

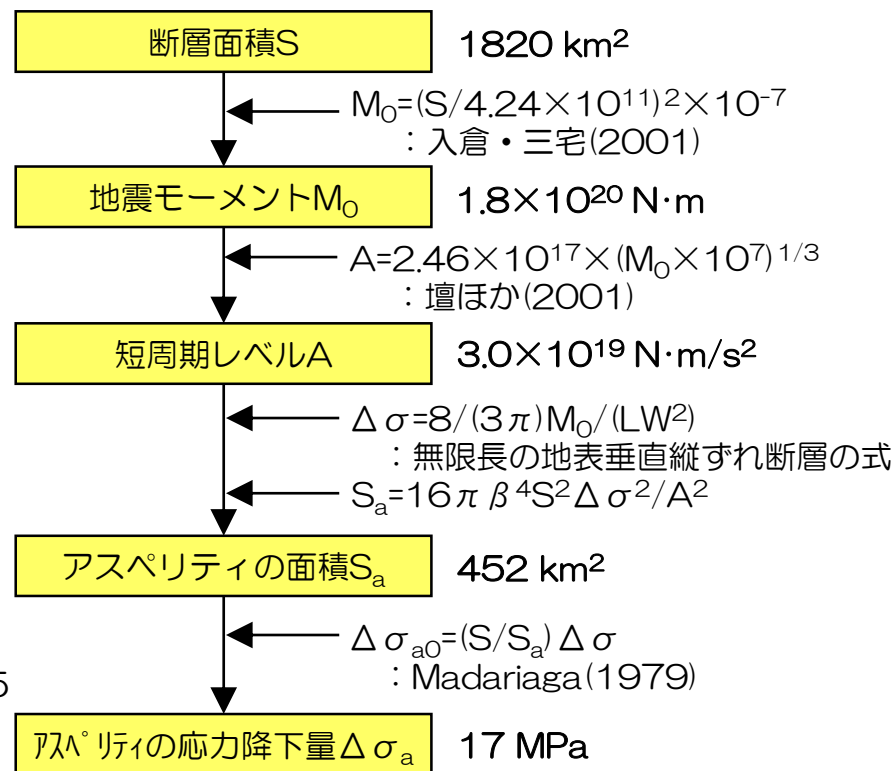
断層パラメータの設定フロー 長岡平野西縁断層帯

- 微視的断層パラメータは、地質調査結果、強震動予測レシピおよび以下の考え方に基づき設定。
 - ① 佐藤ほか(1989)による無限長の地表垂直縦ずれ断層の式により平均応力降下量を算定。
 - ② 応力降下量の不確かさを考慮したケースでは、中越沖地震の知見を踏まえ、強震動予測レシピから求められた値の1.5倍を考慮。

長岡平野西縁断層帯 (No.1), 破壊開始点 (No.2), アスぺリティ位置 (No.3), 破壊伝播速度 (No.4) 及び 応力降下量 (No.5) の不確かさ考慮



断層傾斜角の不確かさ考慮 (No.6)



断層パラメータの設定手法について

長岡平野西縁断層帯

- 長岡平野西縁断層帯は、断層長さが91kmの長大断層であり、強震動予測レシピでは、このような長大断層においては断層パラメータの設定に注意が必要であることが指摘されている。
- したがって、ここでは、複数の方法で主要なパラメータを設定し、モデルの妥当性・過小評価になっていないことを確認する。
 - ①アスペリティ面積比が既往の知見として知られる15%~27%を著しく超えないこと。
 - ②アスペリティの応力降下量が、他の方法と比較して著しく低い値となっていないこと。
- 設定方法を表1に示す。なお、方法1~方法4において、S-M₀の関係式は適用範囲に応じて入倉・三宅(2001)あるいはMurotani et al.(2010)を選択。

表1. 長大断層の断層パラメータの設定手法

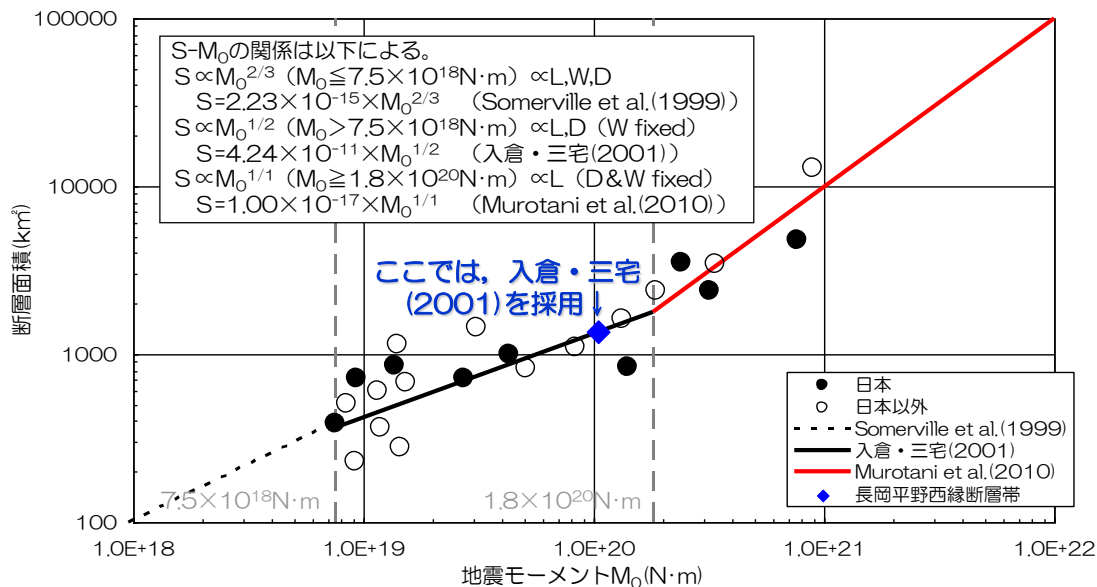
方法	方法1	方法1'	方法2	方法3	方法4	方法5
概要	無限長の地表垂直ずれ断層の式を用いた方法	平均応力降下量を一定値と仮定+長岡平野西縁断層帯で採用した値 (無限長の地表垂直ずれ断層の式より算定)	円形クラックの式(Eshelby(1957))を用いた方法	地震本部(2005)が山崎断層(横ずれ)の評価で用いた方法	中越沖地震の拡張	壇ほか(2015)による方法
備考				・長大な横ずれ断層の知見を用いた方法	・中越沖地震は、海域で発生した地震であることを踏まえ、海域の地震が対象 ・中越沖地震の知見である応力降下量1.5倍の効果を取り込んで設定するもの	・動力学的断層破壊シミュレーションによる平均動的応力降下量の近似式(入江ほか(2013))を用いた設定方法

断層パラメータの設定手法について

長岡平野西縁断層帯

■ 次のパラメータを設定し、その妥当性について検討。

- ①断層面積S
- ②地震モーメント M_0
- ③短周期レベルA
- ④断層全体の応力降下量 $\Delta\sigma$
- ⑤アスペリティの面積 S_a
- ⑥アスペリティの応力降下量 $\Delta\sigma_a$



用いる関係式は以下のとおり。

入倉・三宅(2001)：

$$M_0 = (S / 4.24 \times 10^{11})^2 \times 10^{-7} \quad \dots (1) \text{式}$$

壇ほか(2001)：

$$A = 2.46 \times 10^{17} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3} \quad \dots (2) \text{式}$$

Somerville et al.(1999)：

$$S_a = 0.22 S \quad \dots (3) \text{式}$$

無限長の地表垂直縦ずれ断層の式：

$$\Delta\sigma = 8 / (3\pi) M_0 / (LW^2) \quad \dots (4) \text{式}$$

円形クラックの式 (Eshelby(1957))：

$$\Delta\sigma = 7 / 16 \times M_0 / (S / \pi)^{1.5} \quad \dots (5) \text{式}$$

Fujii and Matsu'ura(2000)：

$$\Delta\sigma = 3.1 \text{MPa} \quad \dots (6) \text{式}$$

$$S_a = 16\pi\beta^4 S^2 \Delta\sigma^2 / A^2 \quad \dots (7) \text{式}$$

Madariaga(1979)：

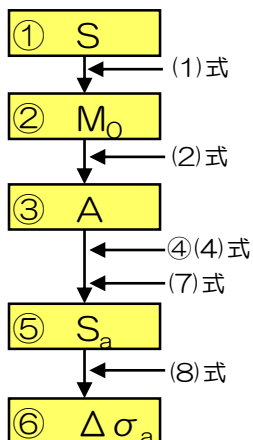
$$\Delta\sigma_a = (S / S_a) \Delta\sigma \quad \dots (8) \text{式}$$

壇ほか(2002)：

$$A = 4\pi (S_a / \pi)^{0.5} \Delta\sigma_a \beta^2 \quad \dots (9) \text{式}$$

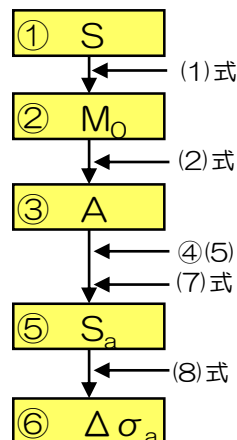
方法1

無限長の地表垂直縦ずれ断層の式を用いた方法



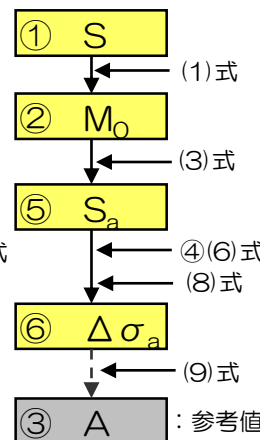
方法2

円形クラックの式を用いた方法



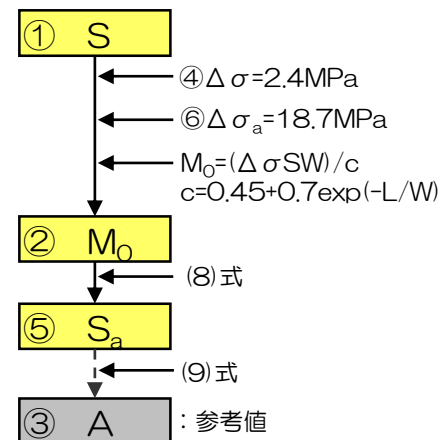
方法3

地震本部(2005)が山崎断層(横ずれ)の評価で用いた方法



方法5

壇ほか(2015)による方法



断層パラメータの設定手法について

長岡平野西縁断層帯

- 断層傾斜角50°を仮定し、それぞれの方法で設定したパラメータを下表に示す。
- アスペリティの応力降下量（他の方法と比較し、やや大きめあるいは同程度であること）及びアスペリティ面積比（15%～27%程度）から方法1を採用。

採用

パラメータ	単位	方法1	方法2	方法3	方法5
断層長さ L	km	91	91	91	91
断層幅 W	km	15	15	15	15
断層面積 S	km ²	1365	1365	1365	1365
地震モーメント M ₀	N・m	1.04×10 ²⁰	1.04×10 ²⁰	1.04×10 ²⁰	1.09×10 ²⁰
短周期レベル A	N・m/s ²	2.49×10 ¹⁹	2.49×10 ¹⁹	2.00×10 ¹⁹	2.03×10 ¹⁹
断層全体の応力降下量 Δσ	MPa	4.3	5.0	3.1	2.4
アスペリティの面積 S _a	km ²	373	506	300	175
アスペリティの応力降下量 Δσ _a	MPa	15.7	13.5	14.1	18.7
アスペリティ面積比 S _a /S		0.27	0.37	0.22	0.13

方法3の, Fujii and Matsu'ura(2000)による値は, 横ずれ断層を対象にいくつかの条件下で導出された $\Delta\sigma=3.1\text{MPa}$ を用いた結果であり, 縦ずれ断層である長岡平野西縁断層には適さないものと考えられる。念のために, 右の関係式から M_0 を求めると $1.69\times 10^{20}(\text{N}\cdot\text{m})$ となる。しかしながら, Fujii and Matsu'ura(2000)で使用されているデータは, 長岡平野西縁断層と同様の縦ずれの内陸地殻内地震のデータは含まれておらず, 適用することは妥当ではないものと考えられる。

※方法3と方法5の短周期レベルはアスペリティの値

$$M_0 = \{WL^2/(aL + b)\} \cdot \Delta\sigma$$

W: 断層幅 (km)

L: 断層長さ (km)

a, b: 構造依存のパラメータ (数値計算により与えられる)

内陸の長大な横ずれ断層に対する関係式としては, $W=15\text{km}$, $a=1.4\times 10^{-2}$, $b=1.0$ を仮定した上で, 収集した観測データに基づく回帰計算により, $\Delta\sigma=3.1(\text{MPa})$ を導出している。

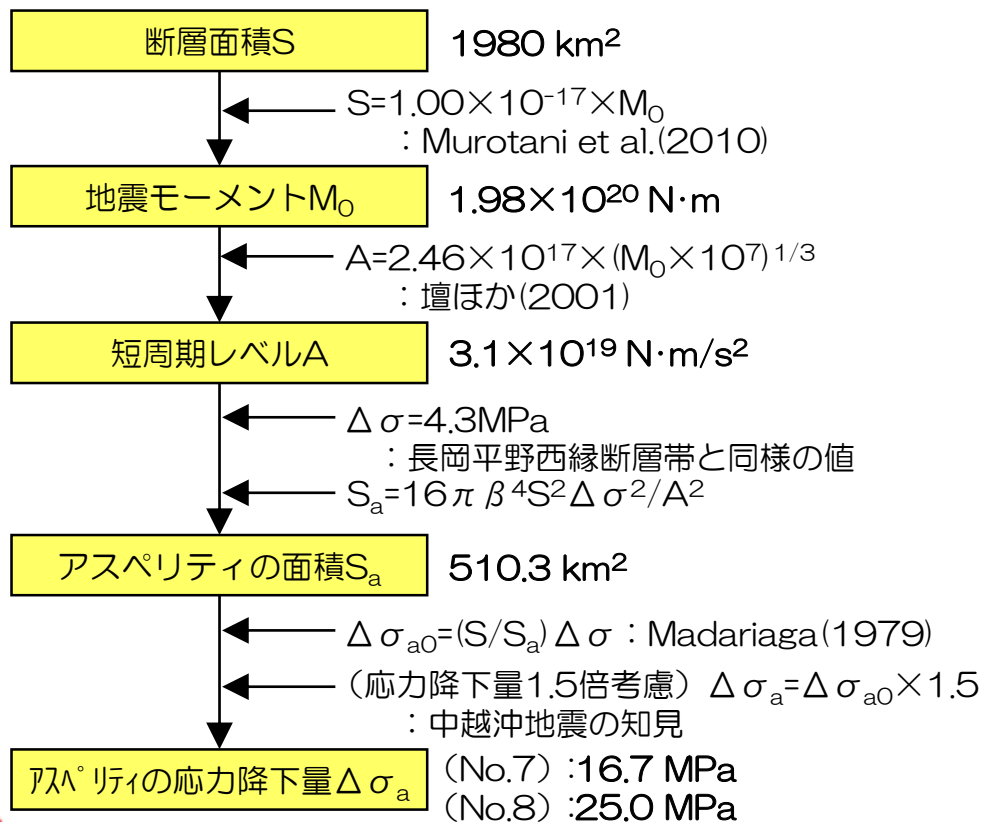
地震本部(2009)より抜粋 (一部加筆・修正)

断層パラメータの設定フロー

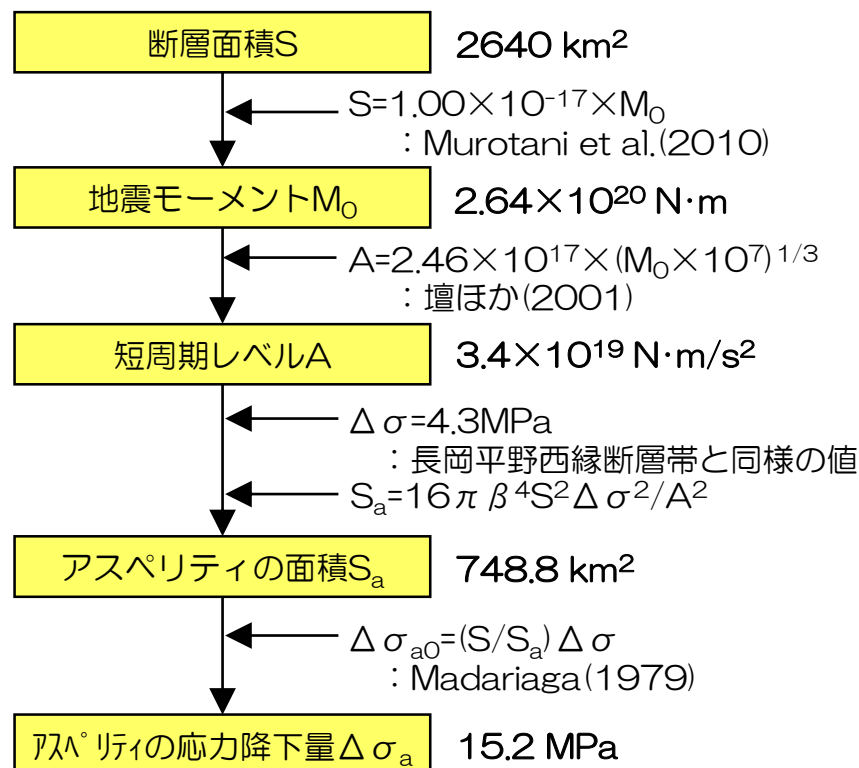
長岡平野西縁断層帯～十日町断層帯西部

- 微視的断層パラメータは、強震動予測レシピおよび以下の考え方にに基づき設定。
 - ① 長大断層を対象としているMurotani et al.(2010)のスケーリングを採用。
 - ② 地震本部の長大断層の評価と同様、平均応力降下量を一定値と仮定。長岡平野西縁断層帯の評価で採用した4.3MPaと設定。

連動(No.7)、連動及び応力降下量(No.8)の不確かさ考慮



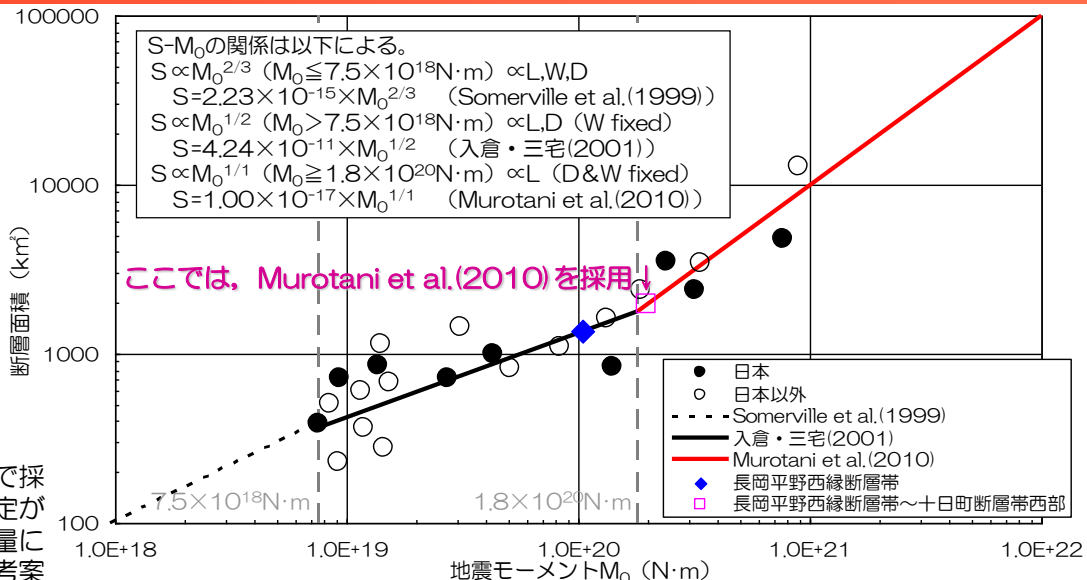
連動及び断層傾斜角の不確かさ考慮(No.9)



断層パラメータの設定手法について

長岡平野西縁断層帯～十日町断層帯西部

■ 長岡平野西縁断層帯～十日町断層帯西部は、断層長さが132kmの長大断層となるため、長岡平野西縁断層帯と同様、複数の方法で次のパラメータを設定し、その妥当性について検討。①断層面積S、②地震モーメント M_0 、③短周期レベルA、④断層全体の応力降下量 $\Delta\sigma$ 、⑤アスペリティの面積 S_a 、⑥アスペリティの応力降下量 $\Delta\sigma_a$



長岡平野西縁断層帯の評価で採用した方法1ではモデル設定が困難なため、平均応力降下量に④'式を用いる方法1'を考案

用いる関係式は以下のとおり。

入倉・三宅(2001):

$$M_0 = (S / 4.24 \times 10^{11})^2 \times 10^{-7} \quad \dots (1) \text{式}$$

壇ほか(2001):

$$A = 2.46 \times 10^{17} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3} \quad \dots (2) \text{式}$$

Somerville et al.(1999):

$$S_a = 0.22 S \quad \dots (3) \text{式}$$

無限長の地表垂直ずれ断層の式:

$$\Delta\sigma = 8 / (3\pi) M_0 / (LW^2) \quad \dots (4) \text{式}$$

円形クラックの式 (Eshelby(1957)):

$$\Delta\sigma = 7 / 16 \times M_0 / (S / \pi)^{1.5} \quad \dots (5) \text{式}$$

Fujii and Matsu'ura(2000):

$$\Delta\sigma = 3.1 \text{MPa} \quad \dots (6) \text{式}$$

$$S_a = 16\pi \beta^4 S^2 \Delta\sigma^2 / A^2 \quad \dots (7) \text{式}$$

Madariaga(1979):

$$\Delta\sigma_a = (S / S_a) \Delta\sigma \quad \dots (8) \text{式}$$

壇ほか(2002):

$$A = 4\pi (S_a / \pi)^{0.5} \Delta\sigma_a \beta^2 \quad \dots (9) \text{式}$$

Murotani et al.(2010)

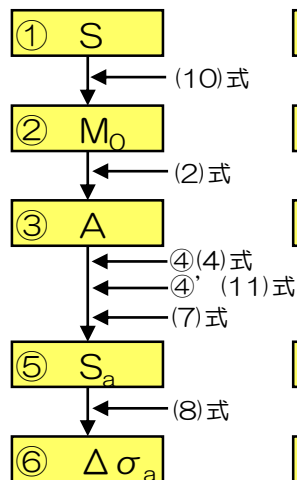
$$S = 1.00 \times 10^{-17} \times M_0^{1/1} \quad \dots (10) \text{式}$$

長岡平野西縁断層帯と同様の値

$$\Delta\sigma = 4.3 \text{MPa} \quad \dots (11) \text{式}$$

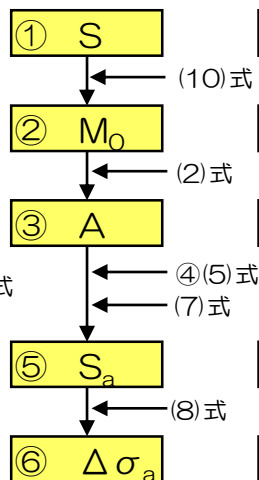
方法1,1'

長岡平野西縁断層帯と同様の平均応力降下量を用いた方法



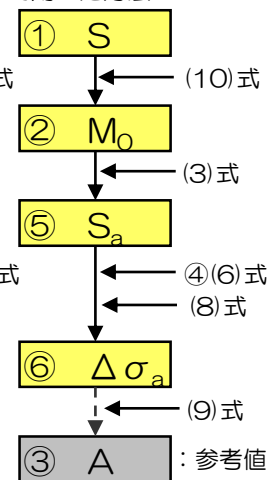
方法2

円形クラックの式を用いた方法



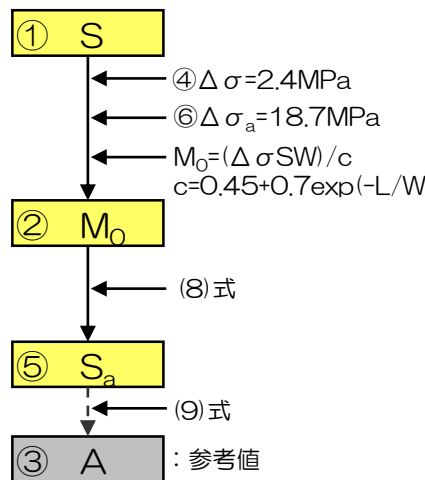
方法3

地震本部(2005)が山崎断層(横ずれ)の評価で用いた方法



方法5

壇ほか(2015)による方法



断層パラメータの設定手法について

長岡平野西縁断層帯～十日町断層帯西部

- 断層傾斜角50°を仮定し、それぞれの方法で設定したパラメータを下表に示す。
- アスペリティの応力降下量（他の方法と比較し、やや大きめあるいは同程度であること）及びアスペリティ面積比（15%～27%程度）から方法1'を採用。

パラメータ	単位	方法1	採用	方法2	方法3	方法5
			方法1'			
断層長さ L	km	132	132	132	132	132
断層幅 W	km	15	15	15	15	15
断層面積 S	km ²	1980	1980	1980	1980	1980
地震モーメント M ₀	N・m	1.98×10 ²⁰	1.98×10 ²⁰	1.98×10 ²⁰	1.98×10 ²⁰	1.58×10 ²⁰
短周期レベル A	N・m/s ²	3.09×10 ¹⁹	3.09×10 ¹⁹	3.09×10 ¹⁹	2.41×10 ¹⁹	2.44×10 ¹⁹
断層全体の応力降下量 Δσ	MPa	5.7	4.3	5.5	3.1	2.4
アスペリティの面積 S _a	km ²	884	510	827	436	254
アスペリティの応力降下量 Δσ _a	MPa	12.7	16.7	13.1	14.1	18.7
アスペリティ面積比 S _a /S		0.45	0.26	0.42	0.22	0.13

方法3の, Fujii and Matsu'ura(2000)による値は, 横ずれ断層を対象にいくつかの条件下で導出された $\Delta\sigma=3.1\text{MPa}$ を用いた結果であり, 縦ずれ断層である長岡平野西縁断層～十日町断層帯西部には適さないものと考えられる。

念のために, 右の関係式から M_0 を求めると $2.84\times 10^{20}(\text{N}\cdot\text{m})$ となる。しかしながら, Fujii and Matsu'ura(2000)で使用されているデータは, 長岡平野西縁断層～十日町断層帯西部と同様の縦ずれの内陸地殻内地震のデータは含まれておらず, 適用することは妥当ではないものと考えられる。

※方法3と方法5の短周期レベルはアスペリティの値

$$M_0 = \{WL^2/(aL + b)\} \cdot \Delta\sigma$$

W: 断層幅 (km)

L: 断層長さ (km)

a, b: 構造依存のパラメータ (数値計算により与えられる)

内陸の長大な横ずれ断層に対する関係式としては, $W=15\text{km}$, $a=1.4\times 10^{-2}$, $b=1.0$ を仮定した上で, 収集した観測データに基づく回帰計算により, $\Delta\sigma=3.1(\text{MPa})$ を導出している。

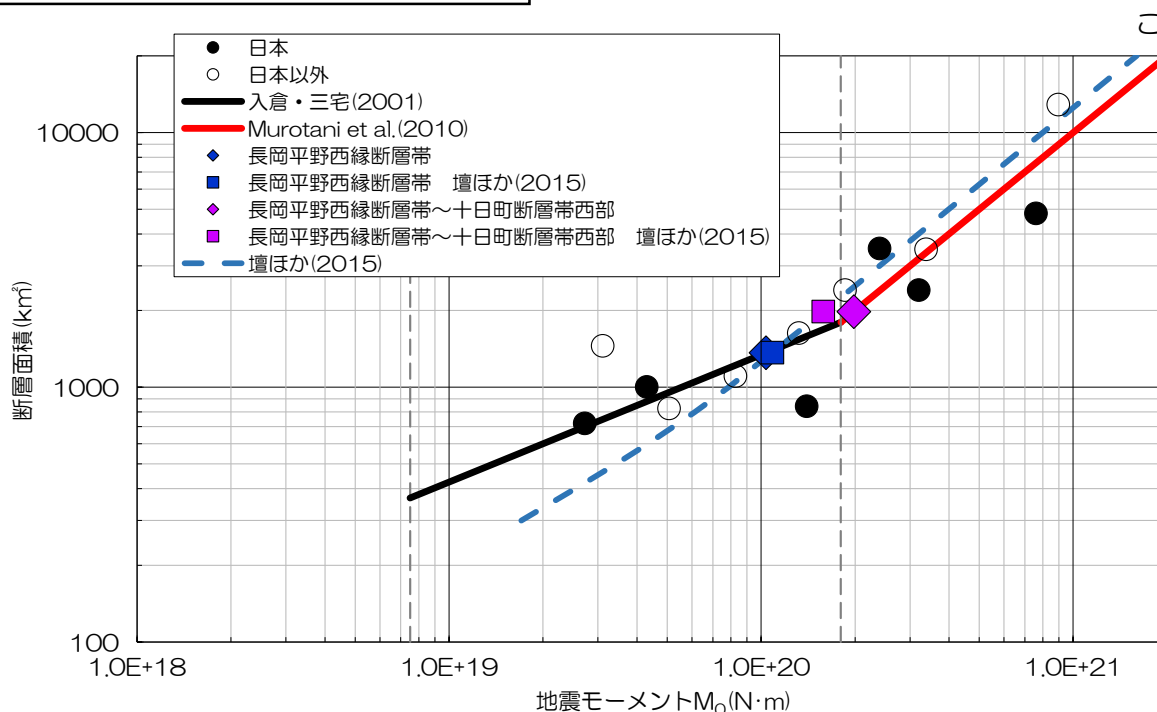
地震本部(2009)より抜粋 (一部加筆・修正)

【参考1】断層面積と地震モーメント M_0 の関係式について

- 長岡平野西縁断層帯，長岡平野西縁断層帯～十日町断層帯西部の断層面積と地震モーメントの関係について整理。
- 以下の図より，入倉・三宅(2001)とMurotani et al.(2010)の組み合わせと壇ほか(2015)のそれぞれのケースで大小関係が逆転することを確認。

各ケースで算定される地震モーメント(N・m)

関係式	長岡平野西縁断層帯 $S=1,365\text{km}^2$	長岡平野西縁断層帯～十日町断層帯西部 $S=1,980\text{km}^2$
①入倉・三宅(2001) $S=4.24 \times 10^{-11} \times M_0^{1/2}$ ($M_0 > 7.5 \times 10^{18} \text{N}\cdot\text{m}$)	1.04×10^{20}	2.18×10^{20}
②Murotani et al.(2010) $S=1.00 \times 10^{-17} \times M_0^{1/1}$ ($M_0 \geq 1.8 \times 10^{20} \text{N}\cdot\text{m}$)	1.37×10^{20}	1.98×10^{20}
③壇ほか(2015) $\Delta\sigma^\# = cM_0/S \cdot W$ $c=0.45+0.7\exp[-L/W]$	1.09×10^{20}	1.58×10^{20}



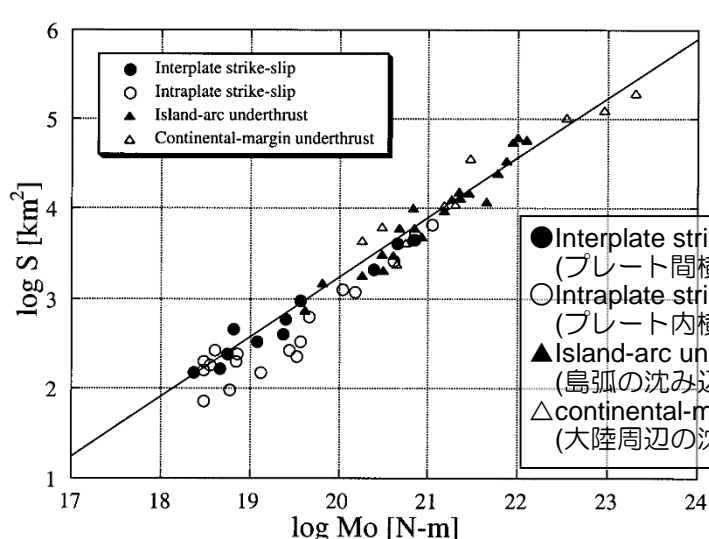
ここで， S : 断層面積
 M_0 : 地震モーメント
 $\Delta\sigma^\#$: 平均動的応力降下量(24bar)
 W : 断層幅
 L : 断層長さ

壇ほか(2015)については，
 以下の条件で描画
 ・断層幅 $W=15\text{km}$
 ・地震発生層下端深さ 17km
 ・地震発生層厚さ 11km

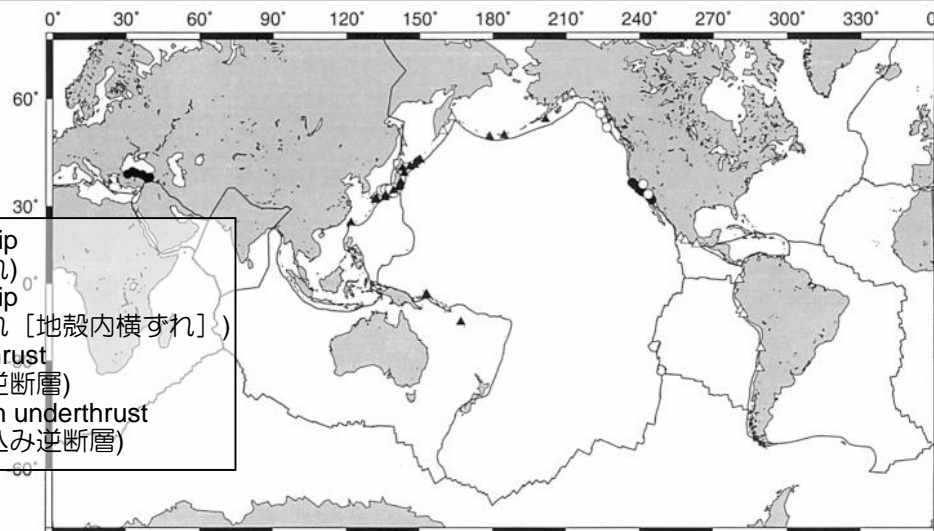
壇ほか(2015)をもとに描画 (一部加筆・修正)

【参考2】 Fujii and Matsu'ura (2000) の概要

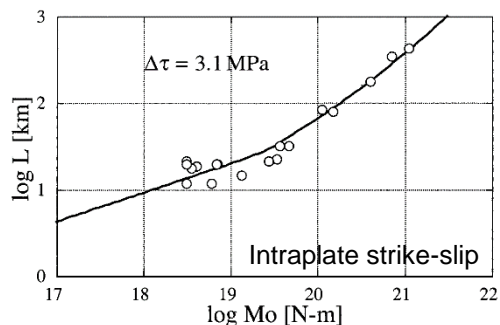
- Fujii and Matsu'ura(2000) (以下, 「F&M」) の検討では, 4つの地震タイプに分けて検討を実施。
- 方法3で採用される $\Delta\sigma=3.1\text{MPa}$ は” Intraplate strike-slip” のデータを使って決められた値である。
- F&Mには地殻内逆断層のデータは含まれておらず, 地殻内横ずれ断層と同様の検討を行うことはできない。



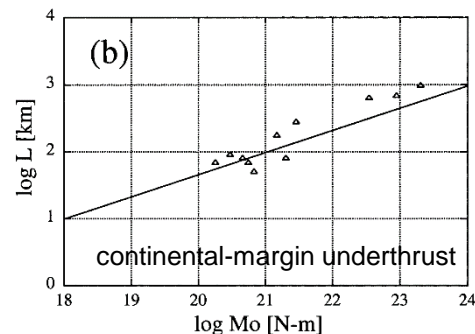
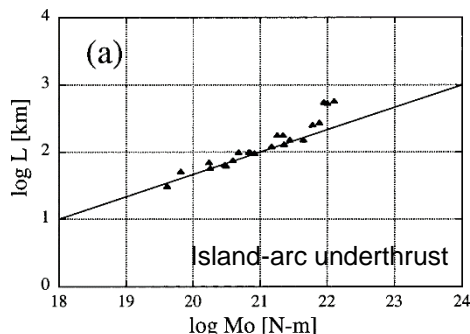
使用データの地震モーメント M_0 と面積 S の関係



使用データの発生場所と地震タイプ



地震モーメント M_0 と断層長さ L の関係



- strike-slipでは断層幅の飽和に伴う“折れ曲がり”が見られるが, underthrustでは見られない。
プレート間逆断層では地殻内地震のように断層幅が飽和しないためである。

図はFujii and Matsu'ura (2000) より引用

1. 応答スペクトルに基づく地震動評価に関するご指摘について
2. F-B断層による地震の地震動評価に関するご指摘について
3. 長岡平野西縁断層帯による地震の地震動評価に関するご指摘について
4. 海域の連動について
5. 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動について

		内容	説明概要	ページ
6	H27 10/2	佐渡島南方～魚津断層帯までの連動の検討に関して、資料構成を見直すこと。	・資料構成の見直し結果等についてご説明。	87～94

資料構成の見直しについて

■ 資料構成を以下のとおり見直すこととする。

1. 地震発生層の設定
2. 検討用地震の選定
 - 2.1 孤立した短い活断層
 - 2.2 副次的な断層等
 - 2.3 被害地震の選定
 - 2.4 検討用地震の選定
3. F-B断層による地震の地震動評価
 - 3.1 震源モデルの設定と不確かさの考え方
 - 3.2 応答スペクトルに基づく地震動評価
 - 3.3 断層モデルを用いた手法による地震動評価
 - 3.4 評価の妥当性に関する検討
4. 長岡平野西縁断層帯による地震の地震動評価
 - 4.1 震源モデルの設定と不確かさの考え方
 - 4.2 応答スペクトルに基づく地震動評価
 - 4.3 断層モデルを用いた手法による地震動評価
 - 4.4 評価の妥当性に関する検討
5. 基準地震動の策定
6. 佐渡島南方～魚津断層帯による地震の地震動評価

第279回審査会合 資料構成

1. 地震発生層の設定
2. 検討用地震の選定
 - 2.1 孤立した短い活断層
 - 2.2 副次的な断層等
 - 2.3 被害地震の選定
 - 2.4 検討用地震の選定
3. F-B断層による地震の地震動評価
 - 3.1 震源モデルの設定と不確かさの考え方
 - 3.2 応答スペクトルに基づく地震動評価
 - 3.3 断層モデルを用いた手法による地震動評価
 - 3.4 評価の妥当性に関する検討
4. 長岡平野西縁断層帯による地震の地震動評価
 - 4.1 震源モデルの設定と不確かさの考え方
 - 4.2 応答スペクトルに基づく地震動評価
 - 4.3 断層モデルを用いた手法による地震動評価
 - 4.4 評価の妥当性に関する検討
5. 佐渡島南方～魚津断層帯による地震の地震動評価
 - 5.1 震源モデルの設定
 - 5.2 断層モデルを用いた手法による地震動評価
 - 5.3 評価の妥当性に関する検討
6. 基準地震動の策定

見直し案

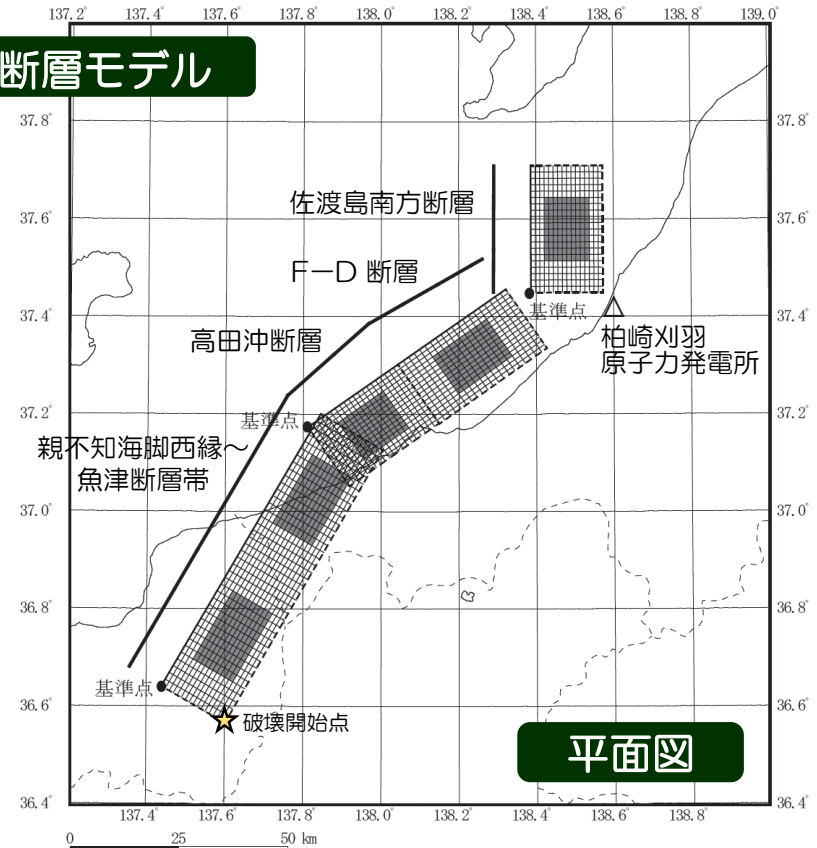
佐渡島南方～F-D～高田沖～親不知海脚西縁～魚津断層帯による地震

1. 震源モデルの設定

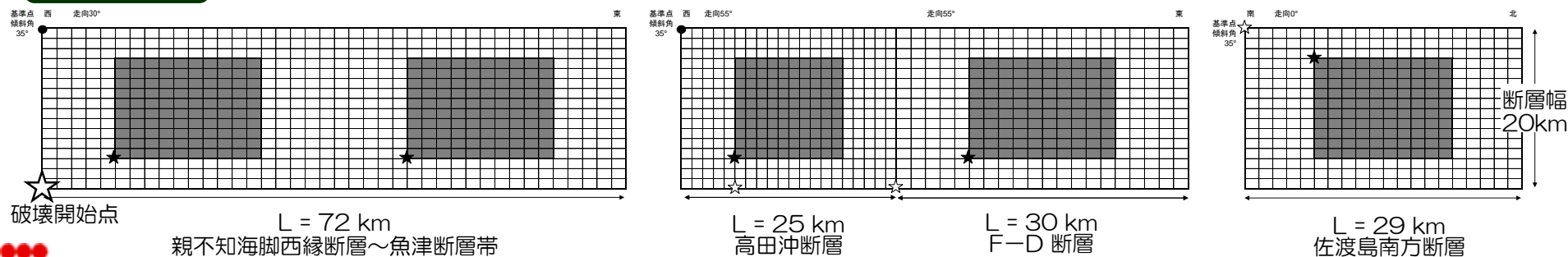
震源モデルの設定方針

- 佐渡島南方～F-D～高田沖～親不知海脚西縁～魚津断層帯までの連動を考慮したケース（断層長さ156km）を評価。
- 長大な断層であることから、パラメータについては長岡平野西縁断層帯～十日町断層帯西部と同様の手法により設定。
- 地震発生層は、速度構造や精密余震分布等に基づき、上端深さを6km、下端深さを17kmと設定。
- 断層傾斜角は、中越沖地震の余震分布を参考に一律35°と設定。
- 破壊開始点については、破壊が敷地に向かうよう巨視面南端に設定。

断層モデル



断面図

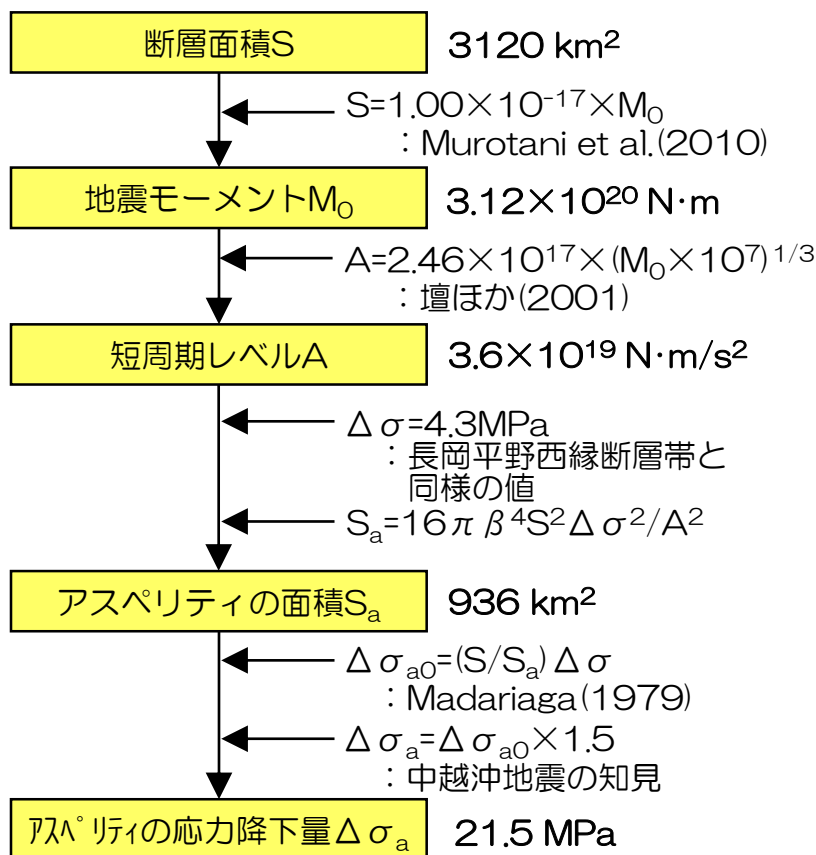


佐渡島南方～F-D～高田沖～親不知海脚西縁～魚津断層帯による地震

1. 震源モデルの設定 設定した断層パラメータ

■ 微視的断層パラメータは、著しく長大となることから、陸域の地震動評価で採用した方法と同様の考え方で設定した上で、応力降下量1.5倍を考慮。

設定フロー



断層パラメータ

項目		設定値					
		全体	佐渡島南方断層	F-D断層	高田沖断層	親不知～魚津断層帯	
基準点	東経(°)	—	138.39	137.81	137.44		
	北緯(°)	—	37.45	37.17	36.64		
巨視的断層面	断層上端深さ(km)		6				
	断層長さ(km)		156	29	30	25	72
	断層幅(km)		20				
	断層面積(km ²)		3120	580	600	500	1440
	走向(°)		—	0	55	30	
	傾斜角(°)		35				
	S波速度(km/s)		3.4				
	破壊伝播速度(km/s)		2.4				
	地震モーメント($\times 10^{19} \text{ N}\cdot\text{m}$)		31.2	5.80	6.00	5.00	14.4
	アスペリティ	面積(km ²)		936	174	180	150
地震モーメント($\times 10^{19} \text{ N}\cdot\text{m}$)		18.7	3.48	3.60	3.00	8.64	
平均すべり量(cm)		641					
応力降下量(MPa)		1.5倍	21.5				
背景領域	面積(km ²)		2184	406	420	350	1008
	地震モーメント($\times 10^{19} \text{ N}\cdot\text{m}$)		12.5	2.32	2.40	2.00	5.76
	平均すべり量(cm)		183				
	実効応力(MPa)	1.5倍	5.1	4.1	4.1	3.8	6.4

□: 地質調査結果等に基づく

□: 強震動予測レシビに基づく

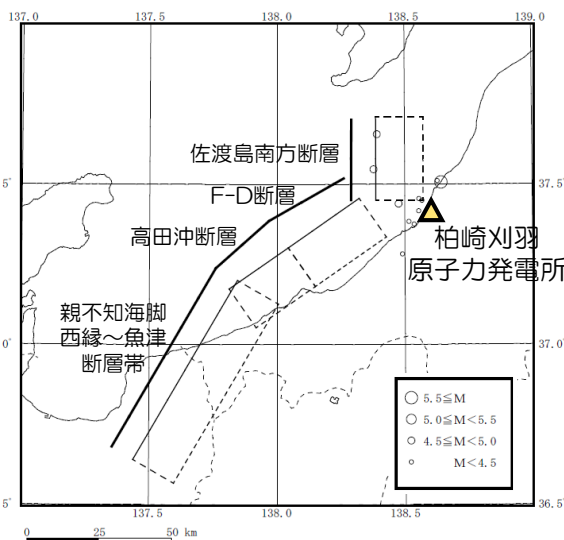
□: Murotani et al.(2010)に基づく

□: 中越沖地震の知見を反映し、設定した応力降下量の1.5倍を考慮

佐渡島南方～F-D～高田沖～親不知海脚西縁～魚津断層帯による地震

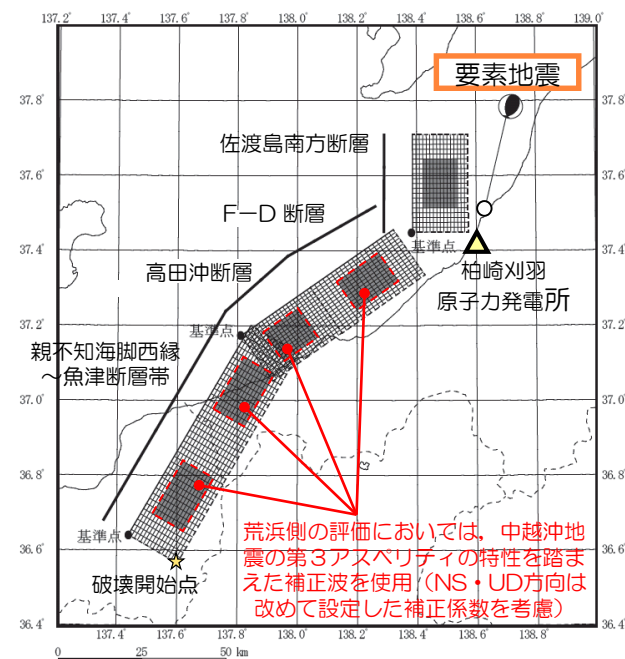
2. 断層モデルを用いた手法による地震動評価

- 想定した震源域で発生した中小地震を要素地震として経験的グリーン関数法で評価することにより、地震波の伝播特性を適切に反映する。
- 経験的グリーン関数法に用いる要素地震は、佐渡島南方断層の想定断層面周辺で発生した中越沖地震の余震を採用。F-D断層、高田沖断層、親不知海脚西縁～魚津断層帯の想定断層面上で発生した地震の記録が得られていないことから、佐渡島南方断層と同様の要素地震を採用。
- なお、荒浜側の評価では、F-D断層、高田沖断層、親不知海脚西縁～魚津断層帯に設定するアスペリティに割り当てる要素地震は、中越沖地震の第3アスペリティの特性を踏まえた補正波を用いる。



要素地震の震源パラメータ

発生日時	2007/7/16 21:08		備考
マグニチュード	M_j	4.4	気象庁
	M_w	4.4	F-net
震源位置	東経(°)	138.63	気象庁
	北緯(°)	37.51	気象庁
震源深さ(km)	13.6	余震分布を踏まえ設定	
走向(°)	187; 39	F-net	
傾斜(°)	54; 41	F-net	
すべり角(°)	70; 115	F-net	
地震モーメント(N・m)	5.21×10^{15}	F-net	
コーナー周波数(Hz)	1.65	Brune(1970)式	
実効応力(MPa)	4.6	芝(2008)	
Q値	$76 f^{-0.74}$	岩田ほか(2005)	



- 【整理条件】
- 地震規模M4以上
 - F-netでメカニズム解が求められているもの。
 - 震源の深さ0～30km
 - 荒浜側、大湊側で記録が得られているもの
 - 震源の見積もりを適切に行うために周辺観測点で記録が取得されているもの
 - 断層面の想定位置で生じているもの

想定断層面と地震の発生状況

佐渡島南方～F-D～高田沖～親不知海脚西縁～魚津断層帯による地震

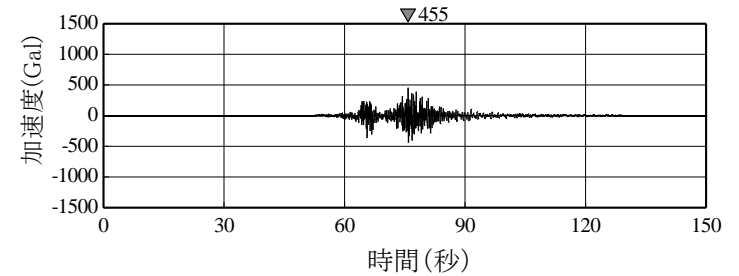
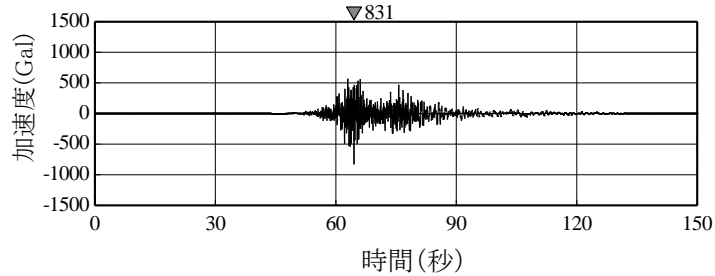
2. 断層モデルを用いた手法による地震動評価 地震動評価結果

加速度時刻歴波形

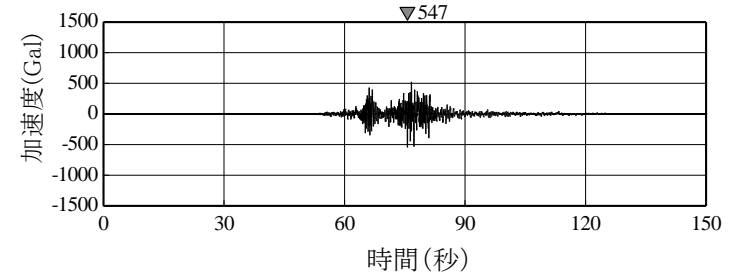
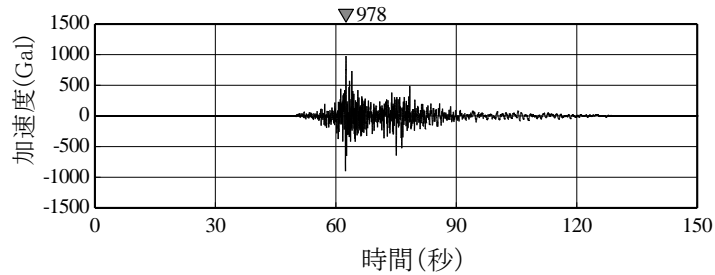
荒浜側

大湊側

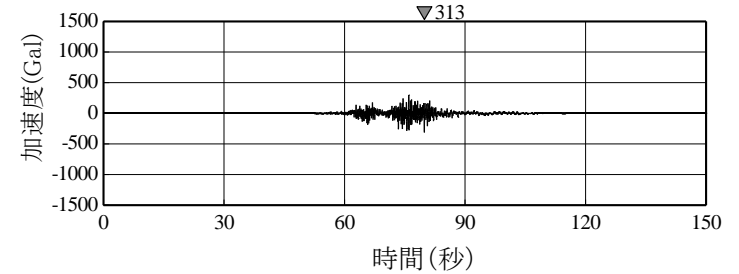
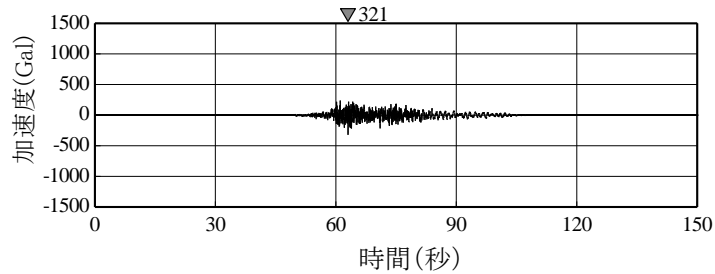
NS
方向



EW
方向



UD
方向



佐渡島南方～F-D～高田沖～親不知海脚西縁～魚津断層帯による地震

2. 断層モデルを用いた手法による地震動評価 地震動評価結果

擬似速度応答スペクトル

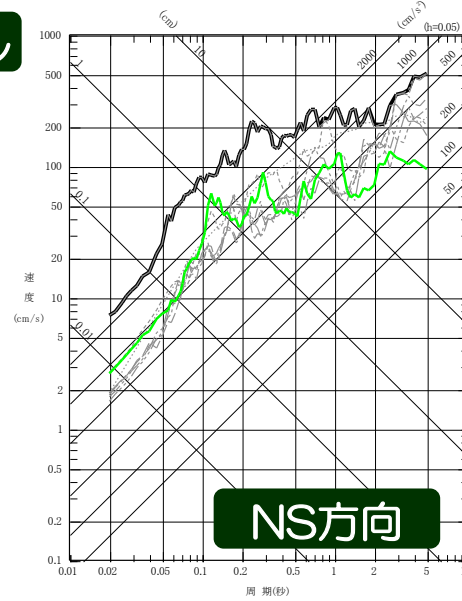
荒浜側

■ 佐渡島南方～F-D～高田沖～親不知海脚西縁～魚津断層帯による地震の地震動評価結果は、基準地震動を著しく超過する地震動レベルでは無く、敷地における基準地震動の策定に大きな影響を与えるものではないと考えられる。

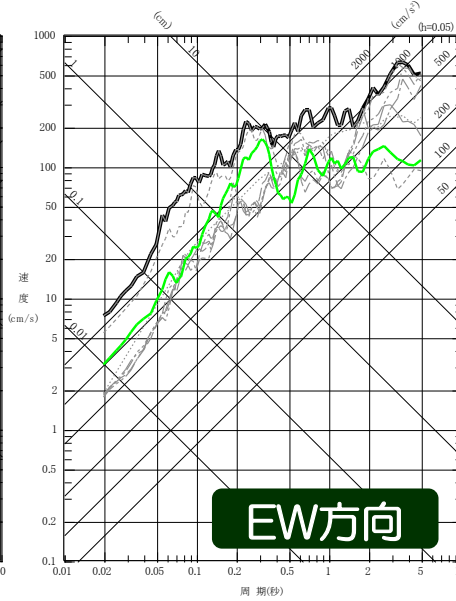
大湊側

- 基準地震動Ssの包絡スペクトル※1
- 基準地震動Ss-1
- 基準地震動Ss-2※2
- 基準地震動Ss-3
- .-.- 基準地震動Ss-4
- 基準地震動Ss-5
- 基準地震動Ss-6
- 基準地震動Ss-7
- 佐渡島南方～魚津断層帯による地震

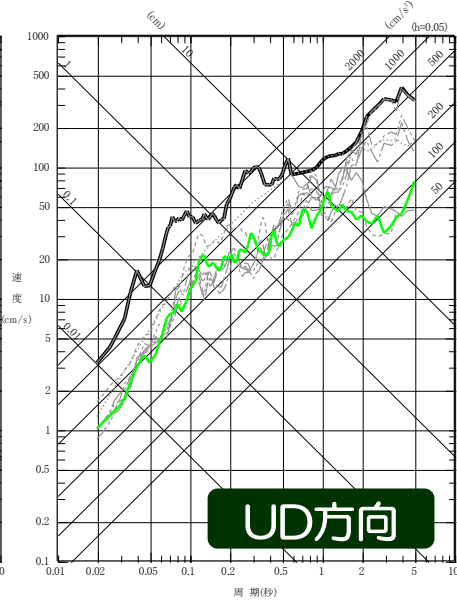
※1 基準地震動Ssの包絡スペクトル：基準地震動Ss-1～Ss-7の各周期の最大値をとった応答スペクトル（荒浜側のSs-2については変更前のスペクトルで設定）
 ※2 荒浜側の基準地震動Ss-2のNS方向・UD方向については変更前を表記



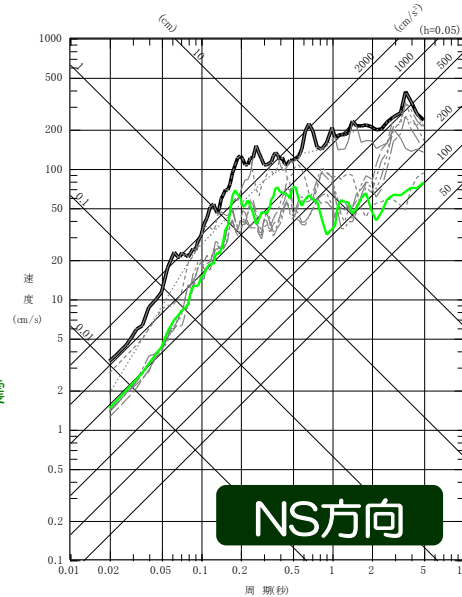
NS方向



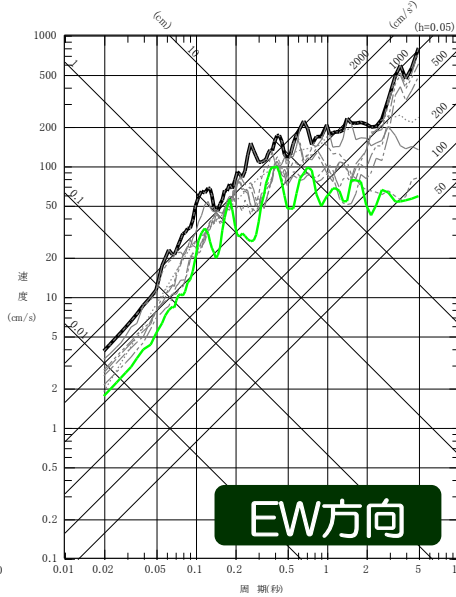
EW方向



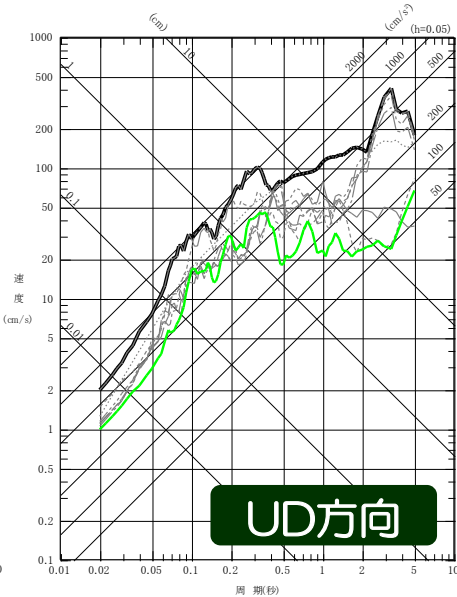
UD方向



NS方向



EW方向



UD方向

佐渡島南方～F-D～高田沖～親不知海脚西縁～魚津断層帯による地震

3. 評価の妥当性に関する検討

■ 佐渡島南方～F-D～高田沖～親不知海脚西縁～魚津断層帯による地震の荒浜側に対する地震動評価は、安全評価上、中越沖地震の第3アスペリティの特性を踏まえた補正係数を考慮して実施しているため、ここでは補正係数の妥当性について検討を実施。

■ これまで、中越沖地震の第3アスペリティの特性を解釈するため以下の検討を実施。

① 荒浜側（1号機）におけるアスペリティ1 (Asp1) 部で起きる地震によるサイト特性($1K1$)に対するアスペリティ3 (Asp3) 部で起きる地震によるサイト特性($3K1$)の比を補正係数(1)式として仮定。

$$\frac{3K1}{1K1} = \frac{3K1}{3K5} \times \frac{3K5}{1K1} \dots (1) \text{式}$$

ここで、左添え字はアスペリティ番号
K5は大湊側（5号機）を示す。

② 大湊側（5号機）では、到来方向による伝播特性の差異が小さいことから $3K5 \doteq 1K5$ と考え(1)式は(2)式となる。

$$\frac{3K1}{1K1} = \frac{3K1}{3K5} \times \frac{1K5}{1K1} \dots (2) \text{式}$$

③ Asp1部、Asp3部のそれぞれの方角（領域e, 領域a）から到来する中小地震の観測記録を用い、(2)式を(3)式に変形したうえで観測値を算定し、補正係数との対応を確認。

$$\frac{3K1}{1K1} = \frac{\text{領域a } K1/K5}{\text{領域e } K1/K5} \dots (3) \text{式}$$

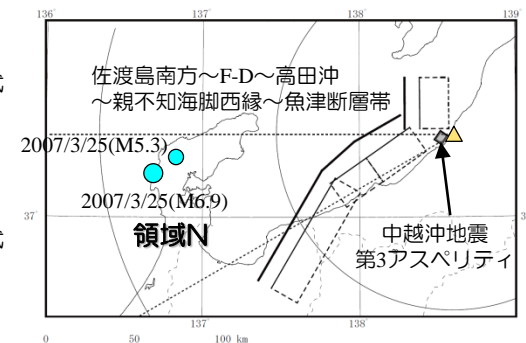
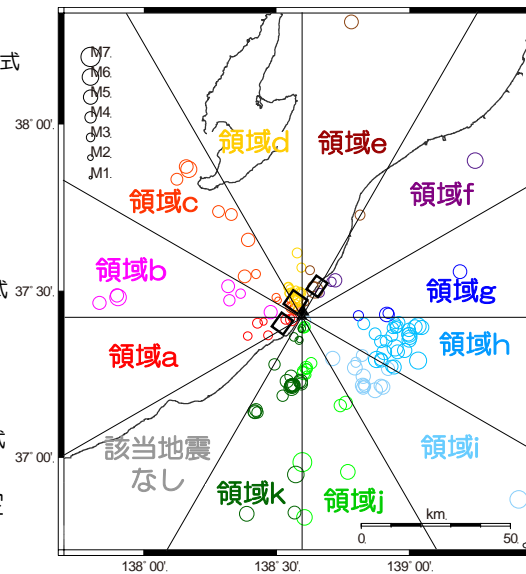
※フーリエスペクトル振幅比により算定

■ 想定する地震の断層面においては、検討可能な地震記録が観測されていないが、敷地の西～南西方向から到来する能登半島で発生した2地震（領域N）を対象に、観測値を算定し、Asp3部（領域a）を対象とした観測値と比較を行う。

$$\frac{3K1}{1K1} = \frac{\text{領域a } K1/K5}{\text{領域e } K1/K5} \dots (3) \text{式}$$

↑ ↓ 比較

$$\frac{\text{領域N } K1/K5}{\text{領域e } K1/K5} \dots (4) \text{式}$$

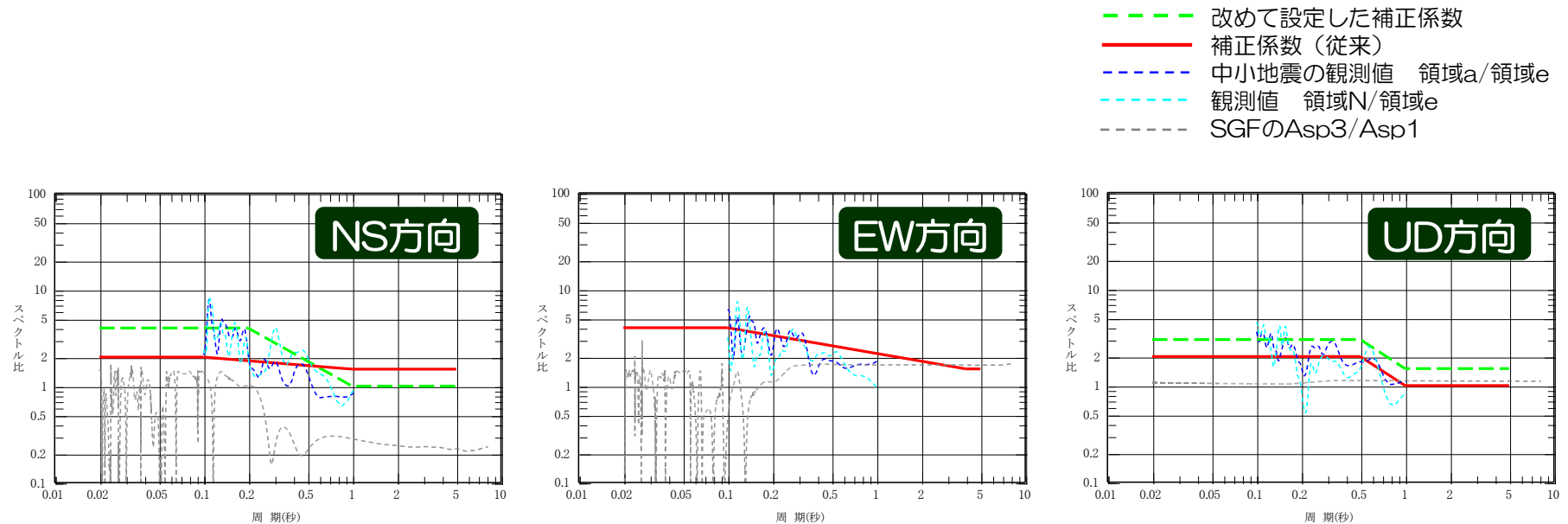


※フーリエスペクトル振幅比により算定

佐渡島南方～F-D～高田沖～親不知海脚西縁～魚津断層帯による地震

3. 評価の妥当性に関する検討

- 領域a/領域eと領域N/領域eの観測値を比較。
- 観測値は概ね同程度であり、設定した補正係数は、佐渡島南方～F-D～高田沖～親不知海脚西縁～魚津断層帯による地震の評価に対しても適切なものと考えられる。



補正係数と中小地震の観測記録から求めた観測値の比較

1. 応答スペクトルに基づく地震動評価に関するご指摘について
2. F-B断層による地震の地震動評価に関するご指摘について
3. 長岡平野西縁断層帯による地震の地震動評価に関するご指摘について
4. 海域の連動について
5. 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動について

敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

- 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動として「F-B断層による地震」, 「長岡平野西縁断層帯による地震」の応答スペクトルに基づく地震動評価及び断層モデルを用いた手法による地震動評価の結果を踏まえて基準地震動Ss-1~7を策定。(震源を特定せず策定する地震動については別途審議)
- 検討を踏まえ, F-B断層による地震の断層モデルを用いた手法による地震動評価結果に基づき策定していたSs-2のNS方向・UD方向を見直し(P97,98に変更前後を比較)
- 策定した基準地震動の加速度時刻歴波形及び擬似速度応答スペクトルをP.99~106に示す。

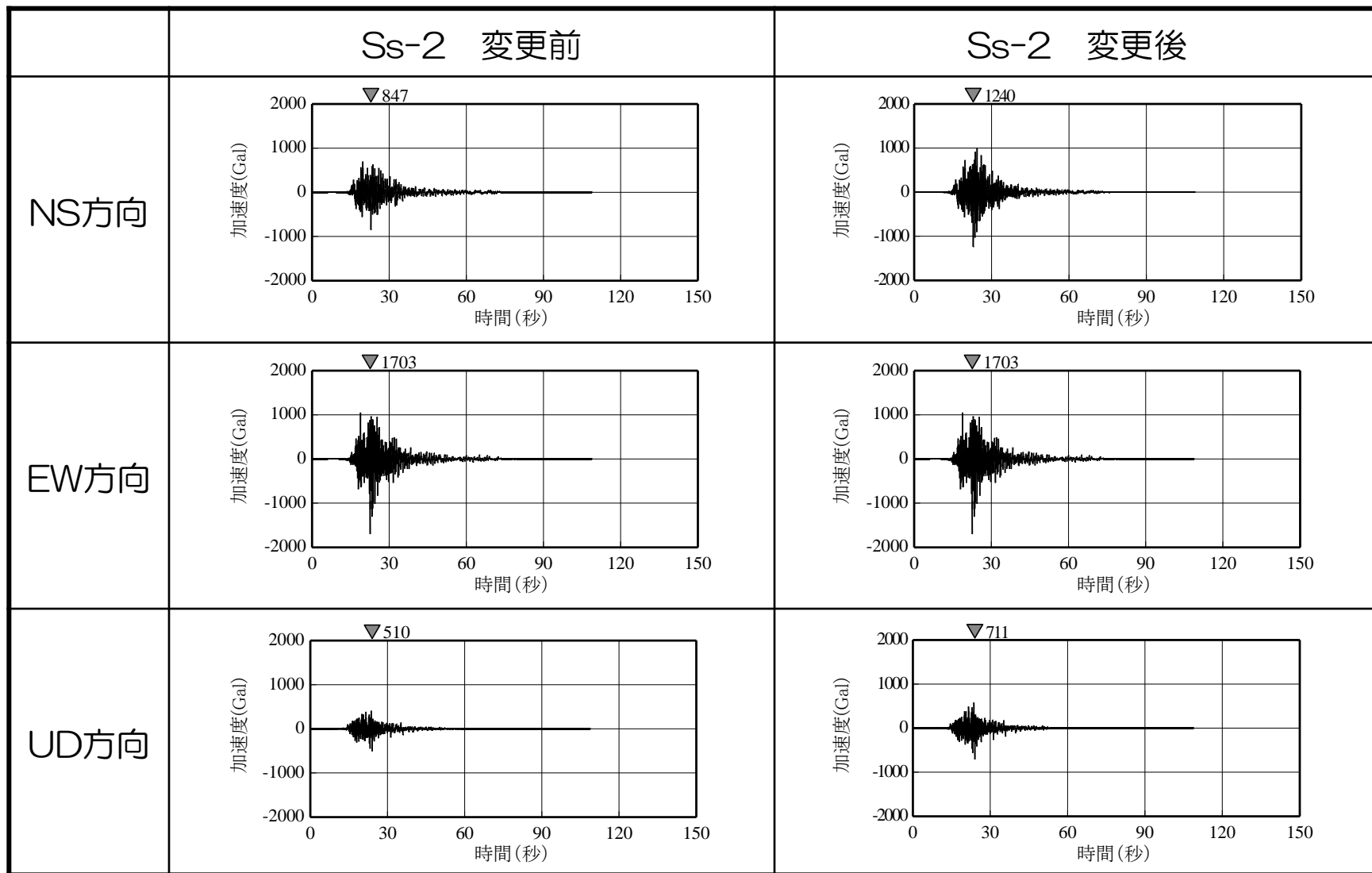
【敷地ごとに震源を特定して策定する地震動による基準地震動の最大加速度値】

基準地震動	検討用地震		最大加速度値 (Gal)							
			荒浜側			大湊側				
			NS方向	EW方向	UD方向	NS方向	EW方向	UD方向		
Ss-1	F-B断層による地震	応答スペクトルに基づく地震動評価		2300		1050	1050		650	
Ss-2		断層モデルを用いた手法による地震動評価		1240*	1703	711*	848	1209	466	
Ss-3	長岡平野西縁断層帯による地震	応答スペクトルに基づく地震動評価	応力降下量1.5倍及び断層傾斜角35° ケースを包絡		600		400	600		400
Ss-4		断層モデルを用いた手法による地震動評価	応力降下量1.5倍		589	574	314	428	826	332
Ss-5			断層傾斜角35°		553	554	266	426	664	346
Ss-6			連動+応力降下量1.5倍		510	583	313	434	864	361
Ss-7			連動+断層傾斜角35°		570	557	319	389	780	349

※：検討を踏まえ, NS方向847gal, UD方向510galから見直しを実施

変更概要 加速度時刻歴波形

荒浜側



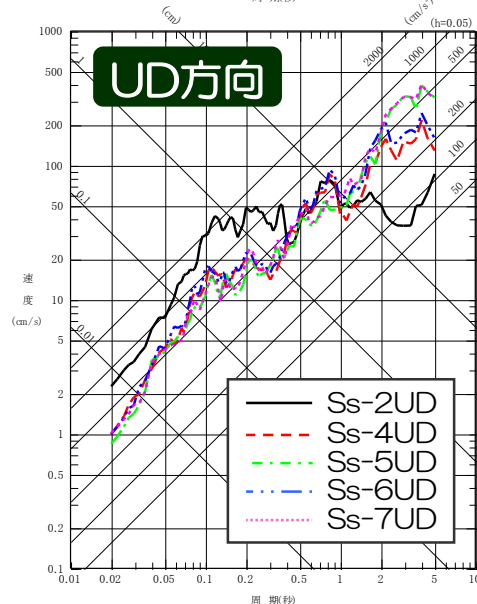
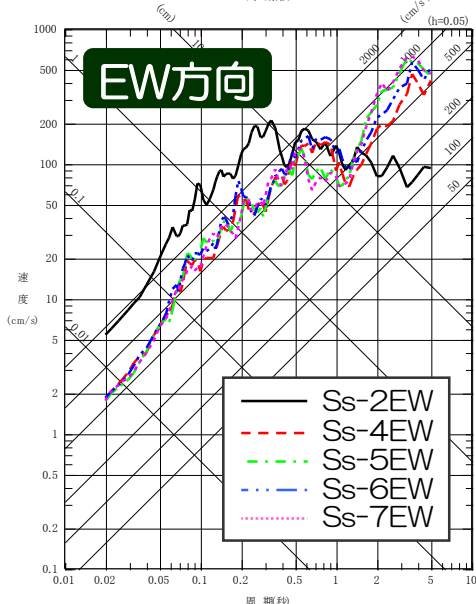
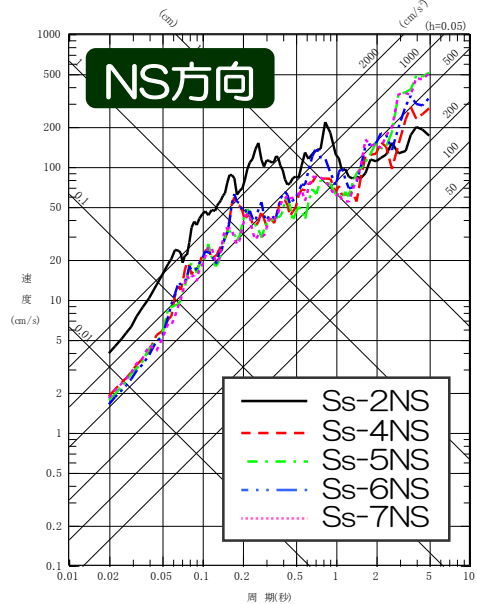
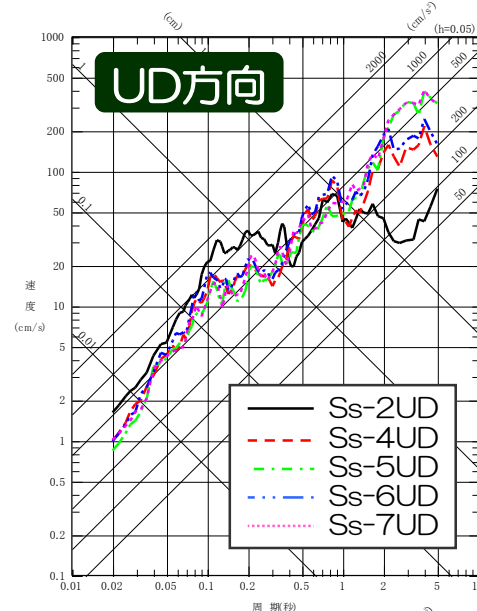
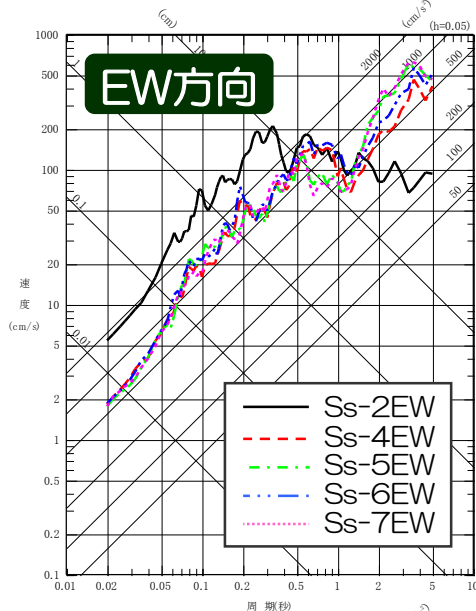
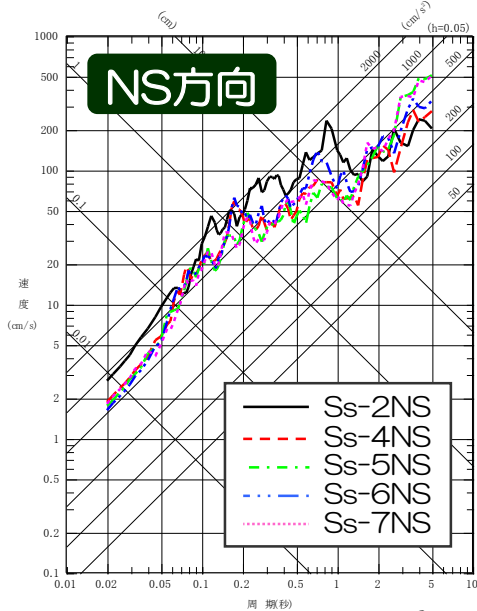
変更概要 擬似速度応答スペクトル

荒浜側

断層モデルを用いた手法による地震動評価による基準地震動

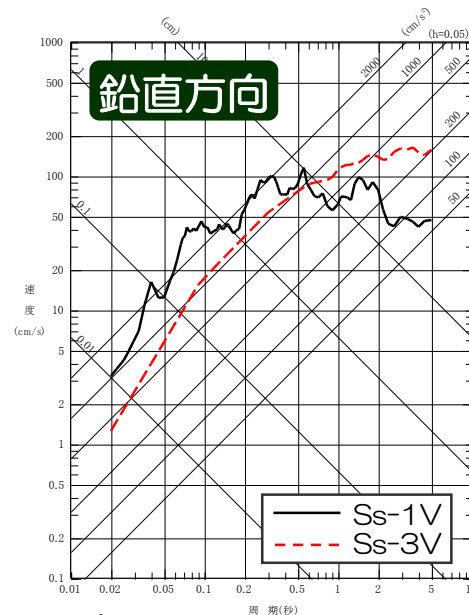
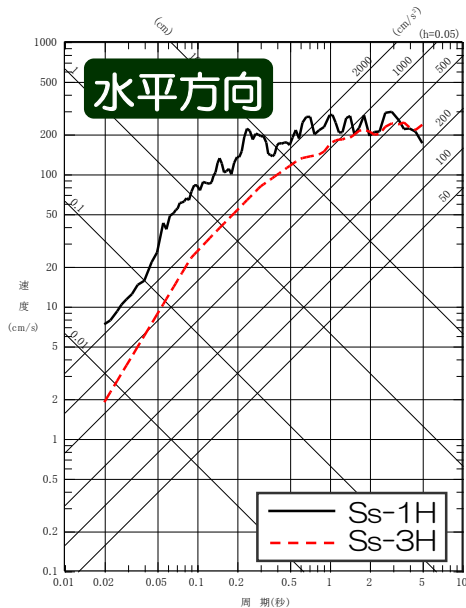
Ss-2変更前

Ss-2変更後

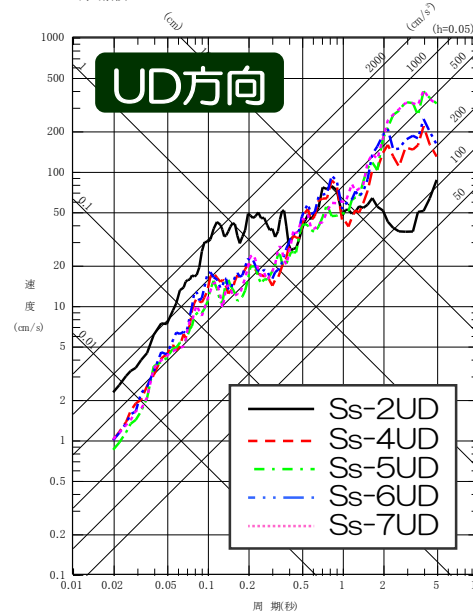
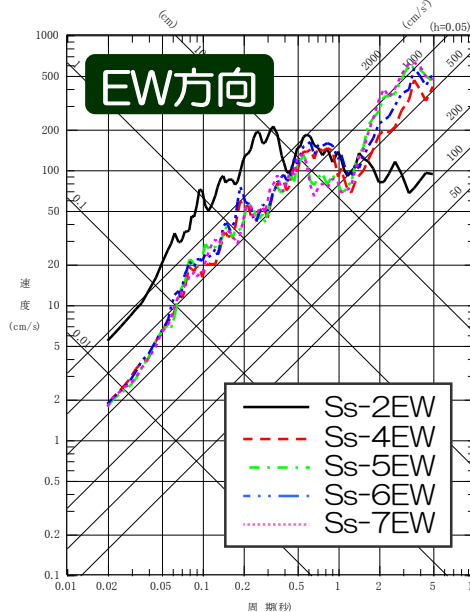
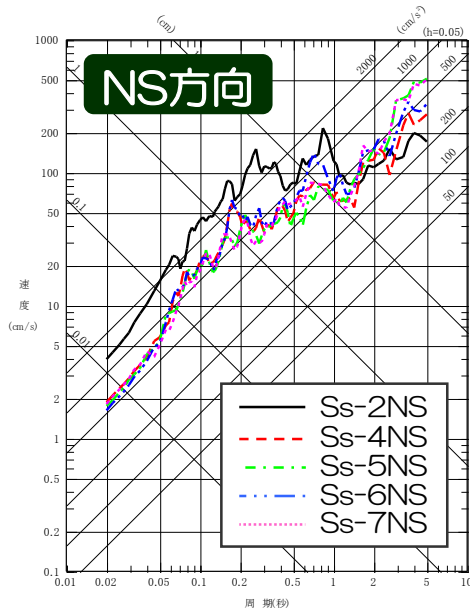


敷地ごとに震源を特定して策定する地震動 基準地震動の策定 擬似速度応答スペクトル（荒浜側）

応答スペクトルに基づく地震動評価による基準地震動



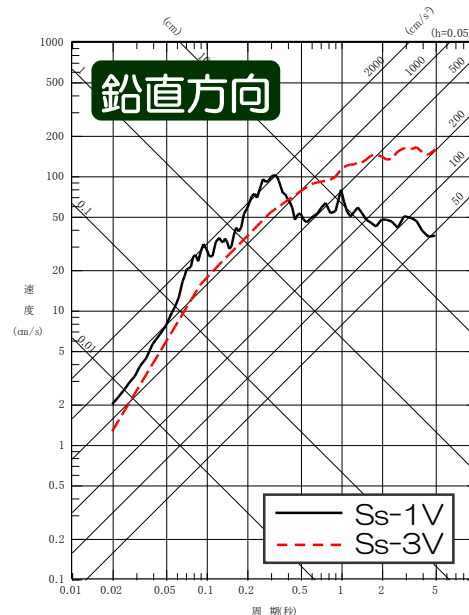
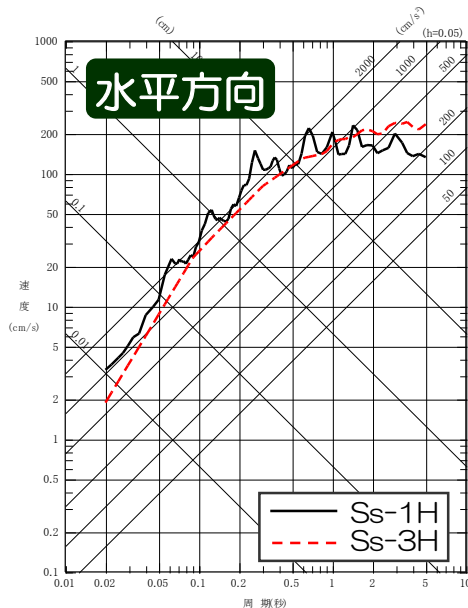
断層モデルを用いた手法による地震動評価による基準地震動



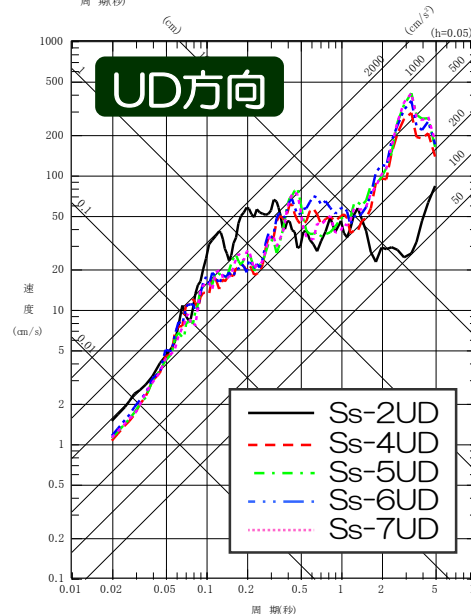
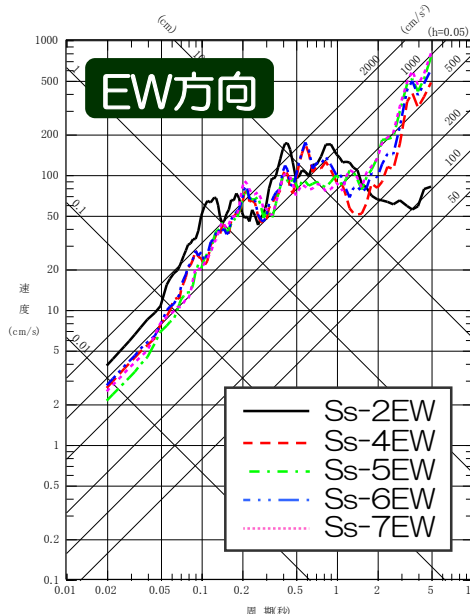
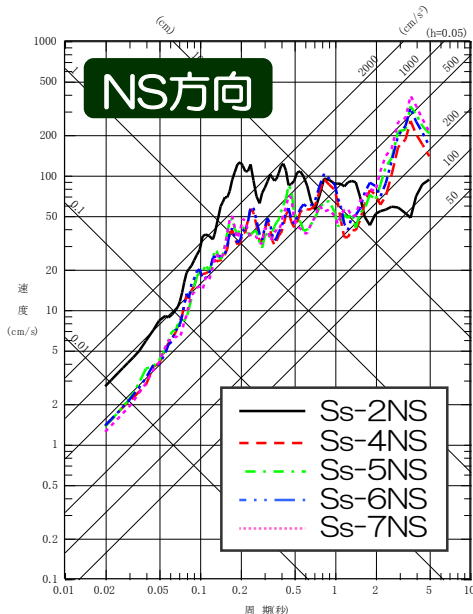
敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

基準地震動の策定 擬似速度応答スペクトル（大湊側）

応答スペクトルに基づく地震動評価による基準地震動



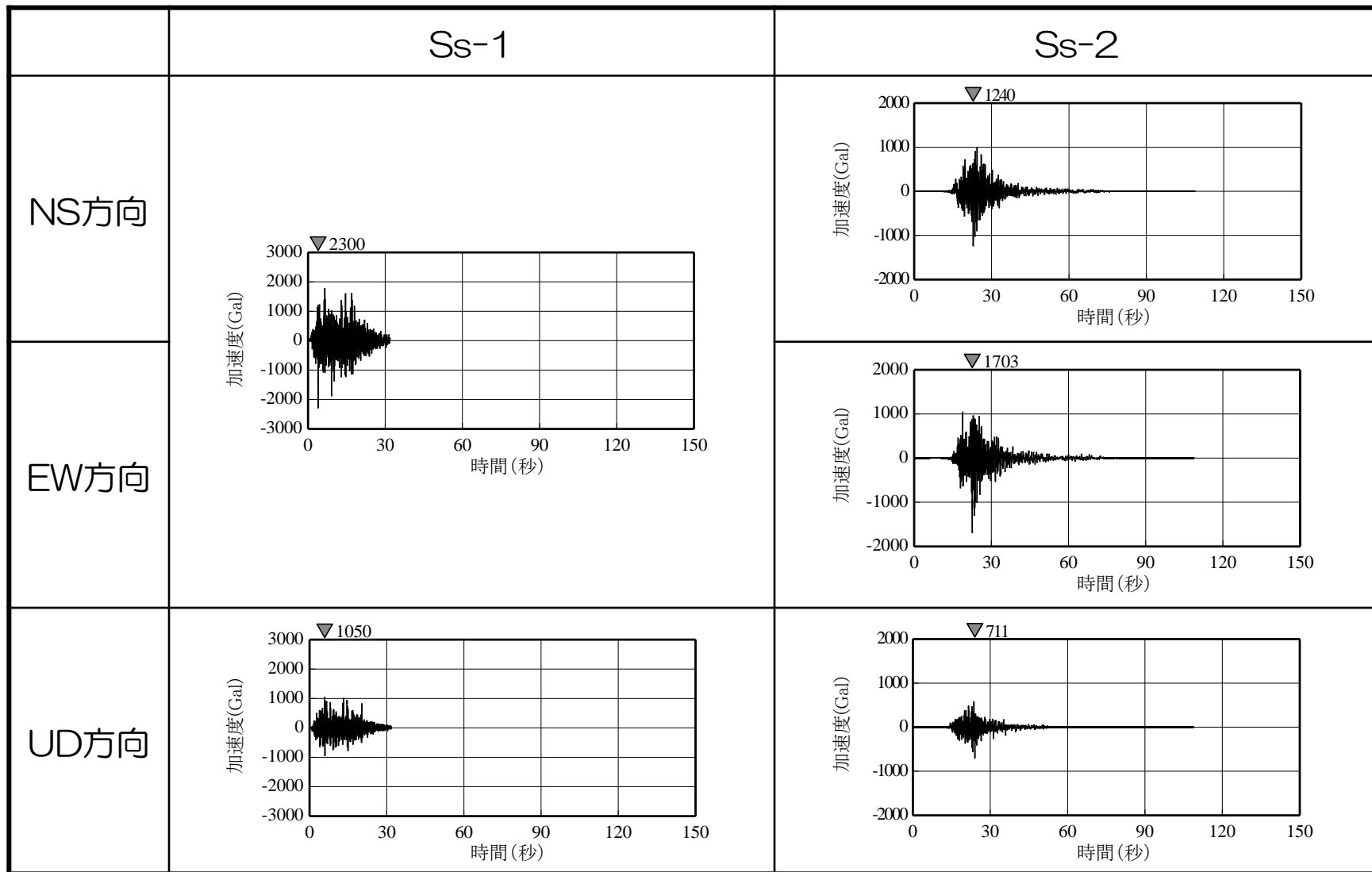
断層モデルを用いた手法による地震動評価による基準地震動



敷地ごとに震源を特定して策定する地震動 基準地震動の策定 加速度時刻歴波形 その1

荒浜側

基準地震動Ss-1, 2の加速度時刻歴波形

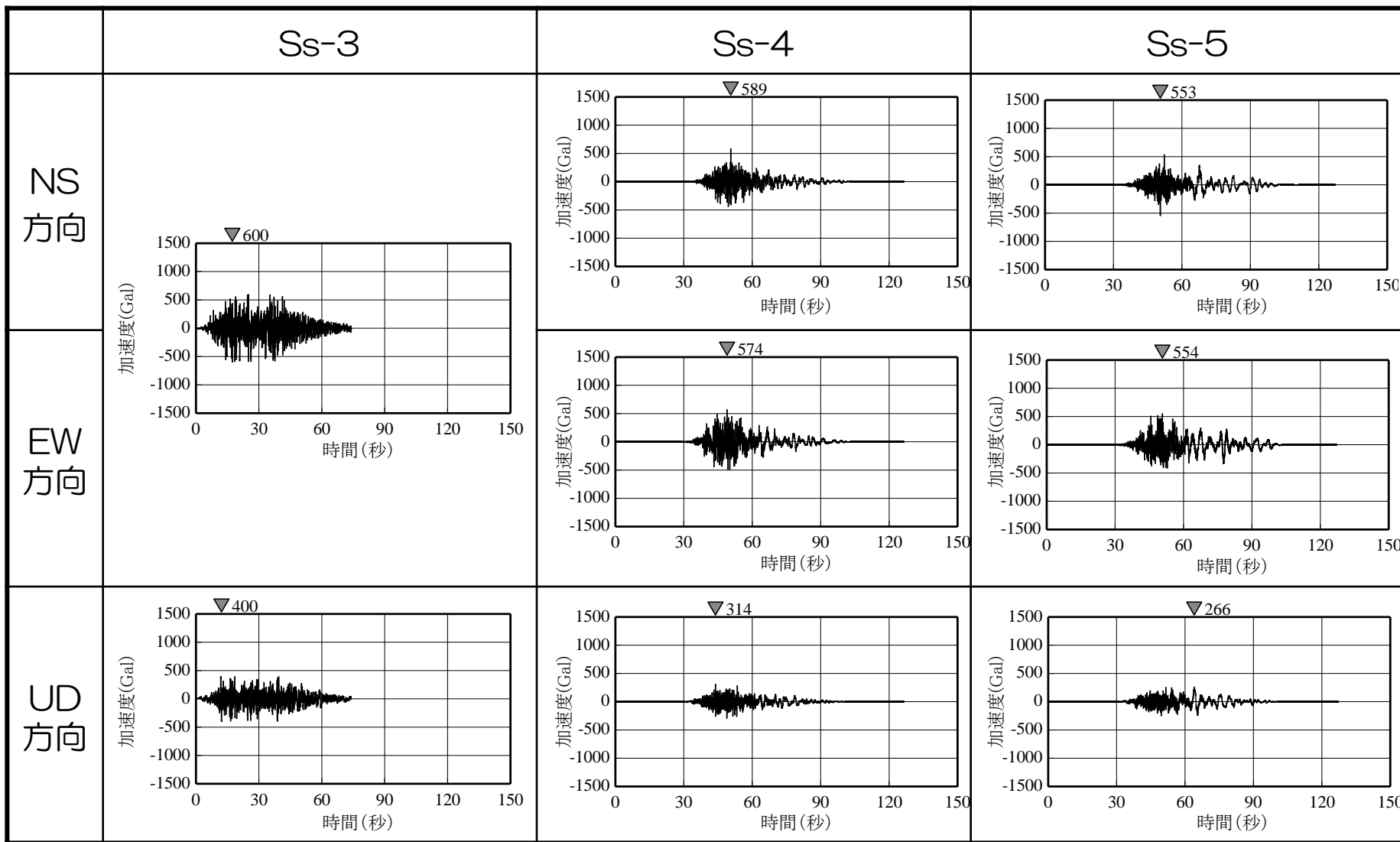


敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

基準地震動の策定 加速度時刻歴波形 その2

荒浜側

基準地震動Ss-3, 4, 5の加速度時刻歴波形

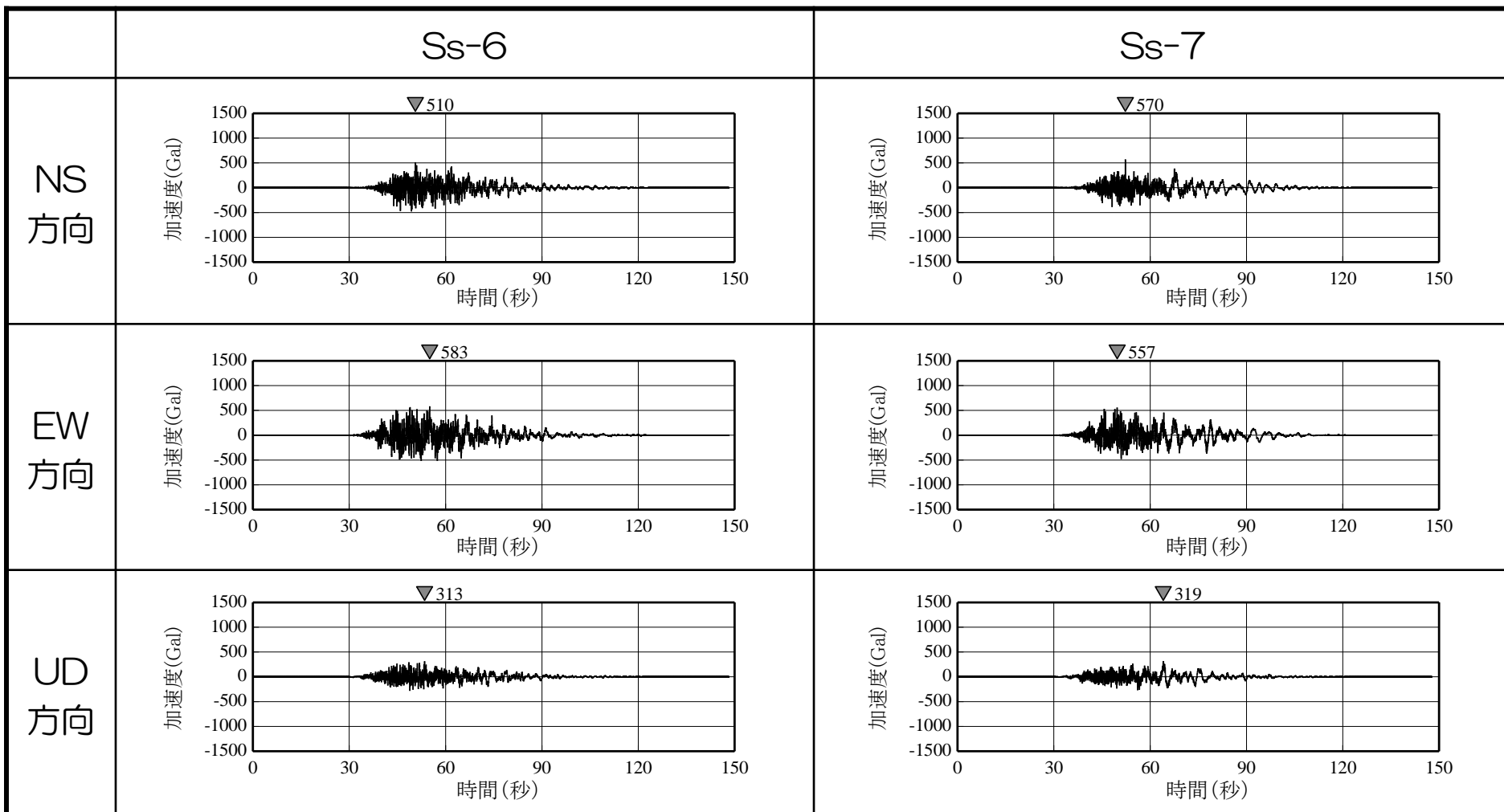


敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

基準地震動の策定 加速度時刻歴波形 その3

荒浜側

基準地震動Ss-6, 7の加速度時刻歴波形

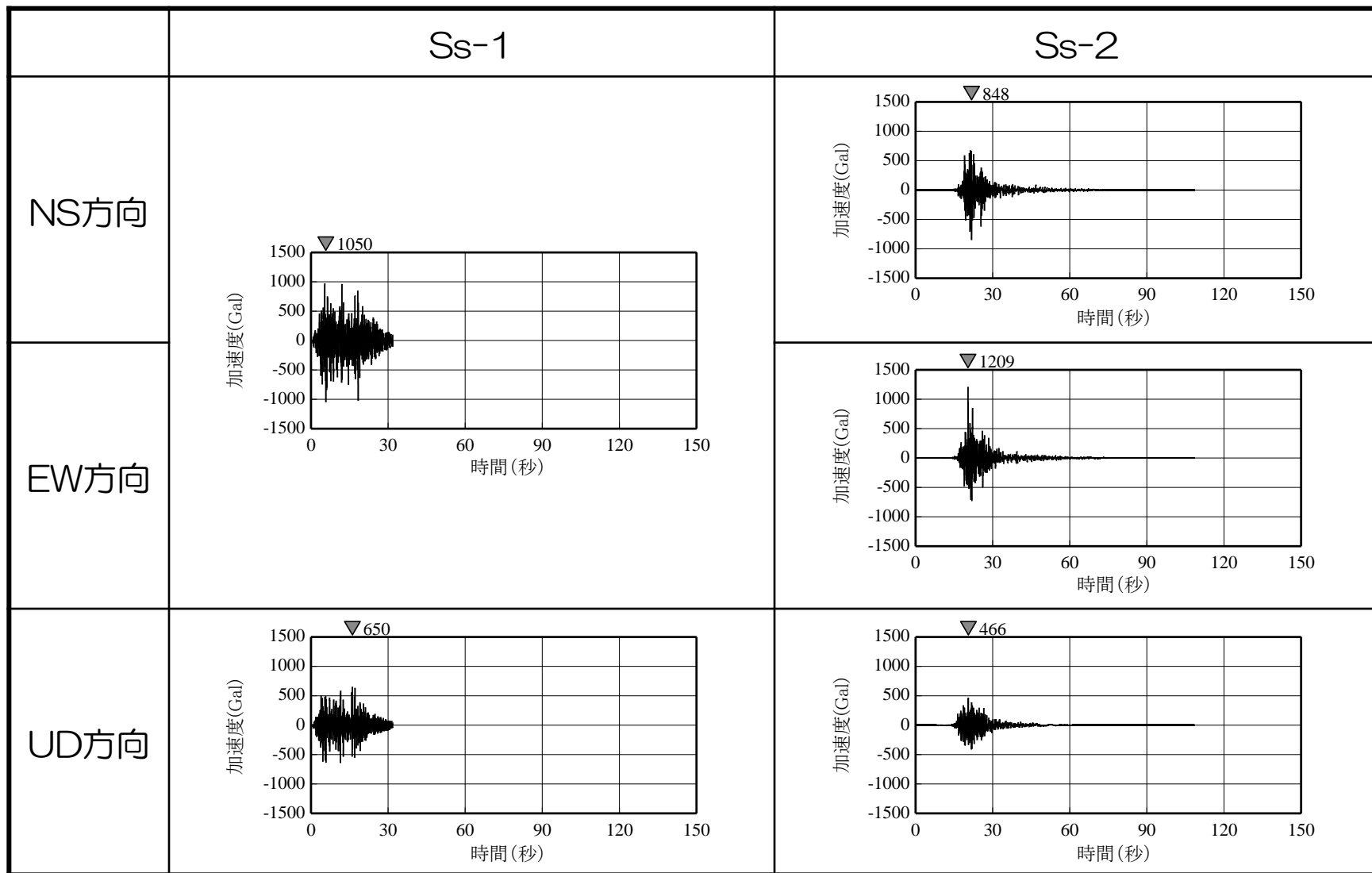


敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

基準地震動の策定 加速度時刻歴波形 その4

大湊側

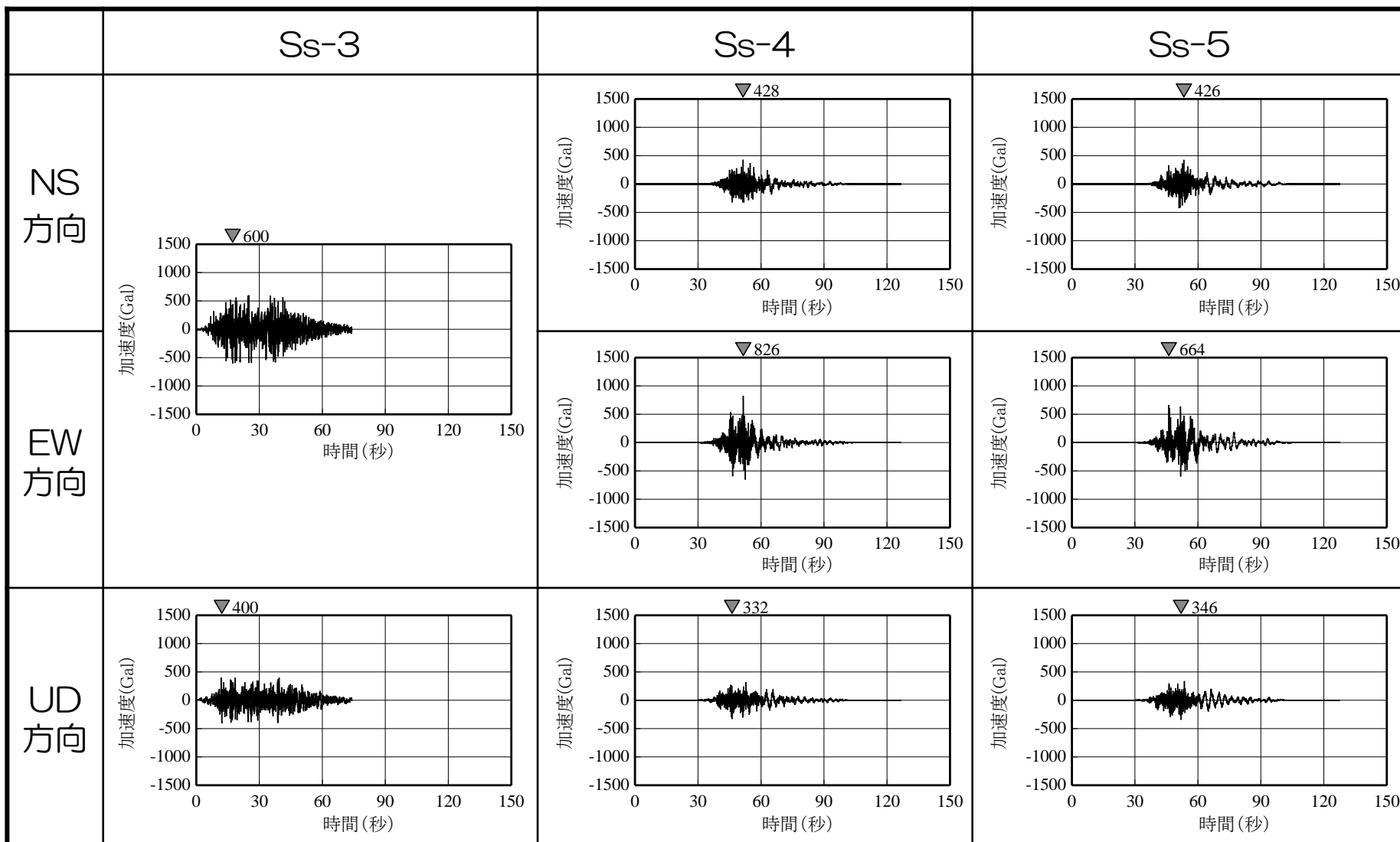
基準地震動Ss-1, 2の加速度時刻歴波形



敷地ごとに震源を特定して策定する地震動 基準地震動の策定 加速度時刻歴波形 その5

大湊側

基準地震動Ss-3, 4, 5の加速度時刻歴波形

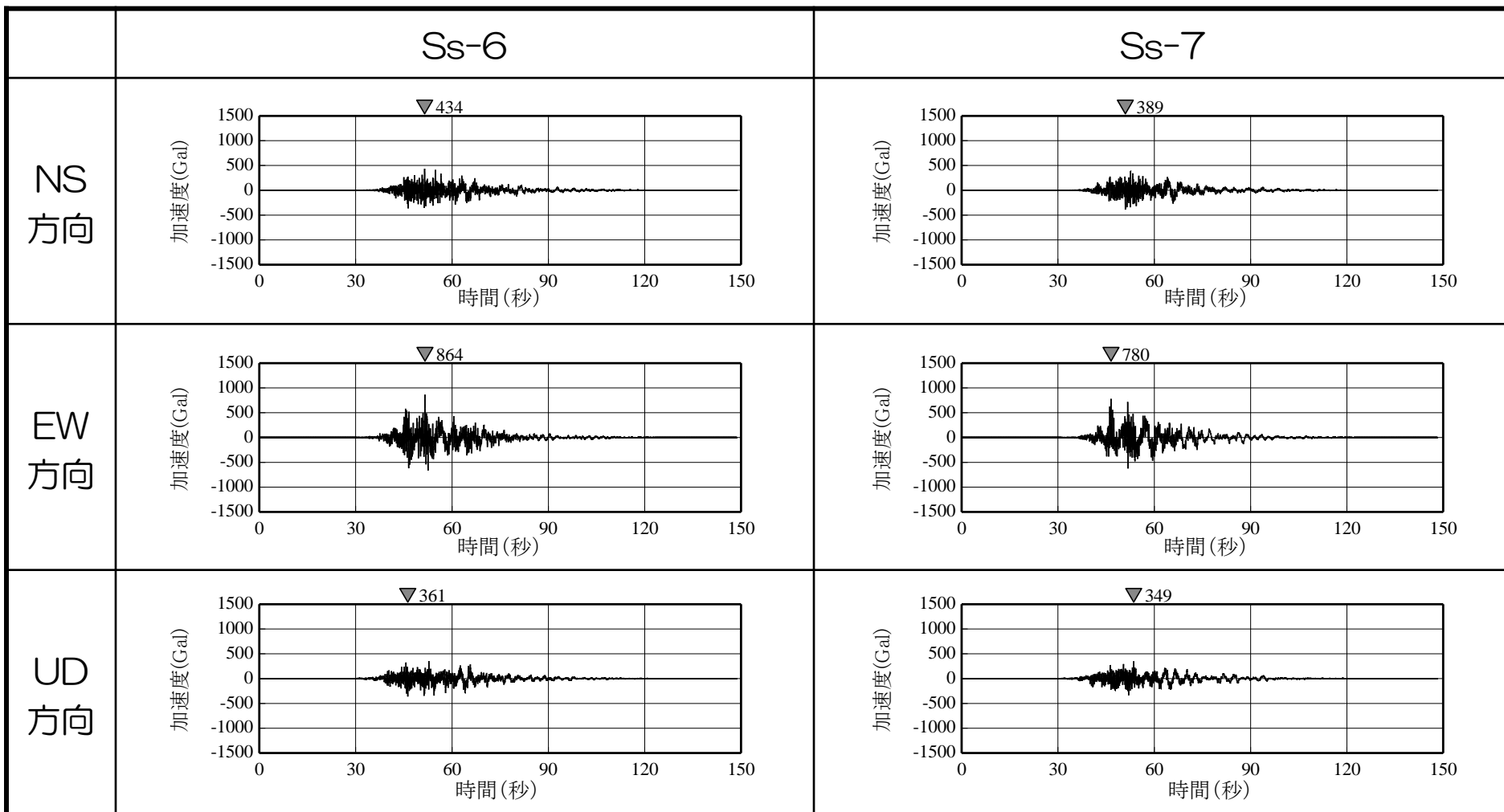


敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

基準地震動の策定 加速度時刻歴波形 その6

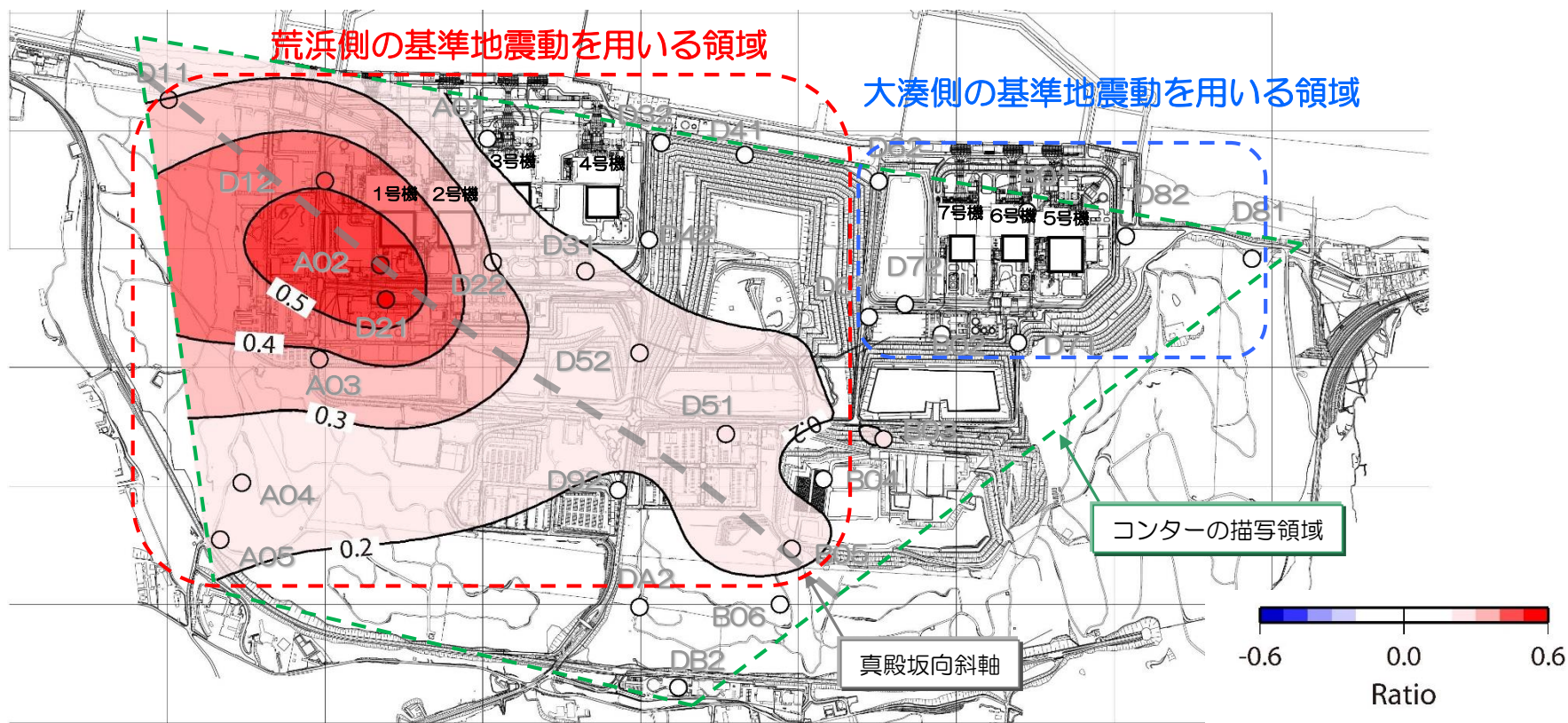
大湊側

基準地震動Ss-6, 7の加速度時刻歴波形



施設の耐震安全性評価に用いる基準地震動について

- 水平アレイ観測記録から、南西から到来する地震波の増幅特性は敷地内において異なることが確認される。
- そのため、施設の耐震安全性評価に用いる基準地震動は、原則として以下の方針とする。
 - 地震波の著しい増幅が認められた領域を含む赤点線部は、荒浜側の基準地震動を用いる。
 - その他の青点線部の領域は、大湊側の基準地震動を用いる。
 - なお、現状、判断にあたり十分なデータが得られていない領域については、周辺の地盤調査結果や地震観測記録等を参照し、必要に応じて追加で地震観測を実施するなど検討したうえで、適切な基準地震動を用いる。



参考文献

- Abe, K. (1975) : Re-examination of the fault model for the Niigata earthquake of 1964, JPE, 23
- Aoi, S., H. Sekiguchi, N. Morikawa, and T. Kunugi (2008) : Source process of the 2007 Niigata-ken Chuetsu-oki earthquake derived from near-fault strong motion data, Earth, Planets and Space, Vol.60
- Asano, K., and T. Iwata (2009) : Source Rupture Process of the 2004 Chuetsu, Mid-Niigata Prefecture, Japan, Earthquake Inferred from Waveform Inversion with Dense Strong-Motion Data, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.99
- Eshelby, J. D. (1957) : The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, Proceedings of the Royal Society, A241
- Fujii, Y., and M. Matsu'ura (2000) : Regional Difference in Scaling Laws for Large Earthquakes and its Tectonic Implication, Pure and Applied Geophysics, 157
- Geller, R.J. (1976) : Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.66
- Hikima, K., and K. Koketsu (2005) : Rupture processes of the 2004 Chuetsu (mid-Niigata prefecture) earthquake, Japan : A series of events in a complex fault system, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL.32
- Honda, R., and S. Aoi (2009) : Array Back-Projection Imaging of the 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake Striking the World' s Largest Nuclear Power Plant, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.99
- Honda, R., S. Aoi, N. Morikawa, H. Sekiguchi, T. Kunugi, and H. Fujiwara (2005) : Ground motion and rupture process of the 2004 Mid Niigata Prefecture earthquake obtained from strong motion data of K-NET and KiK-net, Earth, Planets and Space, Vol.57
- Kamae, K., and H. Kawabe (2008) : SOURCE MODELING AND STRONG GROUND MOTION SIMULATION OF THE 2007 NIIGATAKEN CHUETSU-OKI EARTHQUAKE (Mj=6.8) IN JAPAN, The 14th World Conference on Earthquake Engineering
- Kamae, K., T. Ikeda, and S. Miwa (2005) : Source model composed of asperities for the 2004 Mid Niigata Prefecture, Japan, earthquake (MJMA=6.8) by the forward modeling using the empirical Green' s function method, Earth, Planets and Space, Vol.57
- Madariaga (1979) : On the relation between seismic moment and stress drop in the presence of stress and strength heterogeneity, Journal of Geophysical Research, Vol.84
- Miyake, H., K. Koketsu, K. Hikima, M. Shinohara, and T. Kanazawa (2010) : Source Fault of the 2007 Chuetsu-oki, Japan, Earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.100
- Murotani, S., S. Matsushima, T. Azuma, K. Irikura, S. Kitagawa (2010) : Scaling relations of earthquakes on inland active mega-fault systems, 2010 AGU Fall Meeting, S51A-1911.
- Nakamura, T., Y. Ishihara, Y. Yamanaka, and Y. Kaneda (2009) : Source process for complex fault system of the 2007 Chuetsu-oki, Niigata, Japan, earthquake, Earth, Planets and Space, Vol.61
- Noda, S., K. Yashiro, K. Takahashi, M. Takemura, S. Ohno, M. Tohdo, and T. Watanabe (2002) : RESPONSE SPECTRA FOR DESIGN PURPOSE OF STIFF STRUCTURES ON ROCK SITES, OECD-NEA Workshop on the Relations between Seismological DATA and Seismic Engineering, Oct.16-18, Istanbul
- Satake, K. (1986) : Re-examination of the 1940 Shakotan-Oki earthquake and the fault parameters of the earthquakes along the eastern margin of the Japan Sea, PEPI, 43
- Sato, T. (1985) : Rupture characteristics of the 1983 Nihonkai-Chubu (Japan Sea) earthquake as inferred from strong motion accelerograms, JPE, 33
- Somerville, P. G., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith, and A. Kowada (1999) : Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, Seismological Research Letters, 70.
- Tanioka, Y., K. Satake, and L. Ruff (1995) : Total analysis of the 1993 Hokkaido Nansei-oki earthquake using seismic wave, tsunami, and geodetic data, GRL, 22
- 相田勇 (1989) : 天保四年の庄内地震による津波に関する数値実験, 「続古地震—実像と虚像」萩原尊禮編, 東京大学出版会
- 青井真, 関口春子, 森川信行, 功刀卓, 白坂光行 (2007) : 近地地震動記録による2007年新潟県中越沖地震の震源インバージョン (暫定版), http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/topics/chuetsuoki20070716/inversion/ksw_ver070816_NIED Inv.pdf (2010年3月27日参照)
- 青井真, 本多亮, 森川信之, 関口春子, 功刀卓, 藤原広行 (2005) : 2004年新潟県中越地震 (10月23日17時56分) の地震動と震源過程, 地震予知連絡

参考文献

- ・入江紀嘉, 壇一男, 烏田晴彦, 加瀬祐子(2013): 長大断層を対象とした逆断層型内陸地震の動的応力降下量の算定式の検討, 日本地震工学会第10回年次大会梗概集
- ・入倉孝次郎(2006): 強震動地震学の発展の歴史とレシビへの展開, 第34回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会
- ・入倉孝次郎, 香川敬生, 宮腰研, 倉橋奨(2008): 2007年新潟県中越沖地震の強震動—なぜ柏崎刈羽原子力発電所は想定以上の破壊的強震動に襲われたのか?—2008年03月19日再修正版, http://www.kojiro-irikura.jp/pdf/cyuetsu_080319.pdf
- ・入倉孝次郎, 三宅弘恵(2001): シナリオ地震の強震動評価, 地学雑誌, 110
- ・宇佐美龍夫(1996): 新編日本被害地震総覧 [増補改訂版], 東京大学出版会
- ・大竹政和, 平朝彦, 太田陽子(2002): 日本海東縁の活断層と地震テクトニクス, 東京大学出版会
- ・釜江克宏・川辺秀憲(2008): 2007年新潟県中越沖地震(M_j6.8)の震源のモデル化と強震動シミュレーション, http://www.rr.i.kyoto-u.ac.jp/iishin/eq/niigata_chuetsuoki_5/chuetsuoki_20080307.pdf (2010年3月27日参照)
- ・神原浩, 松島信一, 早川崇, 福喜多輝(2006): 2004年新潟県中越地震の余震観測記録に基づく本震時の震源域の強震動推定, 清水建設研究報告 第83号
- ・気象庁: 地震年報2011年版, 地震・火山月報ほか
- ・原子力安全委員会(2009): 「応答スペクトルに基づく地震動評価」に関する専門家との意見交換会, 資料第1-1号 耐専スペクトルの概要(1999年時点での内容), <http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/senmon/shidai/ohyoiken/1/siryo-1.pdf>
- ・原子力安全委員会(2009): 原子力安全委員会 地震動解析技術等作業会合 平成21年9月18日 資料第1号, <https://www.nsr.go.jp/archive/nsc/senmon/shidai/kaisekigijutu/kaisekigijutu22/siryo1.pdf>
- ・構造計画研究所(2010): 内陸地殻内地震における短周期レベルの地域的な整理・分析業務, 原子力安全委員会平成21年度業務委託報告書
- ・坂井公俊, 野津厚(2011): 2004年新潟県中越地震の特性化震源モデルと経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動シミュレーション, 日本地震工学会論文集, 第11巻
- ・佐藤智美(2010): 逆断層と横ずれ断層の違いを考慮した日本の地殻内地震の短周期レベルのスケーリング則, 日本建築学会構造系論文集, 第651号
- ・佐藤智美, 岡崎敦(2008): 2007年新潟県中越沖地震と2004年新潟県中越地震の短周期レベル及びアスペリティ総面積のスケーリング, 2008年度日本地震学会講演予稿集
- ・佐藤智美, 壇一男, 岡崎敦, 羽田浩二(2007): 若狭湾周辺の地殻内地震の記録を用いたスペクトルパワースペクトル解析, 2007年度日本地震学会講演予稿集
- ・佐藤智美, 土方勝一郎, 植竹富一, 徳光亮一, 壇一男(2007): 広帯域震源インバージョンによる2004年新潟県中越地震の大加速度に関する研究(その2) 中・短周期震源インバージョン, 日本建築学会大会学術講演梗概集
- ・佐藤良輔 編著(1989): 日本の地震断層パラメータ・ハンドブック, 鹿島出版会
- ・地震調査研究推進本部(2004): 長岡平野西縁断層帯の長期評価について, 地震調査委員会資料
- ・地震調査研究推進本部(2005): 山崎断層帯の地震を想定した強震動評価について, 地震調査委員会資料
- ・地震調査研究推進本部(2007): 2007年10月の地震活動の評価
- ・地震調査研究推進本部(2008): 平成19年(2007年)新潟県中越沖地震の評価, 地震調査委員会資料
- ・地震調査研究推進本部(2009): 「全国地震動予測地図」報告書
- ・芝良昭(2006): 2004年新潟県中越地震の震源過程の解明—広帯域震源インバージョンの適用—, 電力中央研究所報告, 研究報告: N05023
- ・芝良昭(2008): 2007年新潟県中越沖地震の震源過程の解明と広帯域強震動評価, 電力中央研究所報告, 研究報告: N08007
- ・社団法人 日本電気協会 原子力規格委員会(2008): 原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG4601-2008)
- ・染井一寛, 浅野公之, 岩田知孝(2010): ひずみ集中帯内外で発生した地殻内地震系列間の震源特性の比較, 第13回日本地震工学シンポジウム
- ・第248回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合 資料2-3 柏崎刈羽原子力発電所6号炉及び7号炉 敷地周辺海域の地質・地質構造について <http://www.nsr.go.jp/data/000114306.pdf>
- ・第266回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合 資料1 柏崎刈羽原子力発電所6号炉及び7号炉 敷地における地震波の増幅特性について <http://www.nsr.go.jp/data/000119766.pdf>
- ・第279回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合 資料1 柏崎刈羽原子力発電所6号炉及び7号炉 基準地震動の策定について コメント回答 <http://www.nsr.go.jp/data/000124919.pdf>
- ・武村雅之(1998): 日本列島における地殻内地震のスケーリング則—地震断層の影響および地震被害との関連—, 地震 第2輯 第51巻
- ・壇一男, 入江紀嘉, 具典淑, 島津奈緒末, 烏田晴彦(2015): 長大な逆断層による内陸地震の断層モデルのパラメータの設定方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第80巻, 第707号
- ・壇一男, 佐藤俊明, 入倉孝次郎(2002): 応答スペクトルに基づく強震動予測のための震源モデルの特性化手法, 第11回日本地震工学シンポジウム

参考文献

- ・ 壇一男, 渡辺基史, 佐藤俊明, 石井透(2001): 断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, 第545号
- ・ 独立行政法人 防災科学技術研究所: 広帯域地震観測網(F-net), <http://www.fnet.bosai.go.jp/>
- ・ 引間和人, 瀧澤一起(2008): 波形記録と測地データを用いた2007年新潟県中越沖地震の震源過程解析, 日本地球惑星科学連合大会予稿集
- ・ 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
- ・ 野津厚(2005): 2004年新潟県中越地震の震源モデル — 経験的グリーン関数を用いた波形インバージョン —, 地震 第2輯 第58巻
- ・ 野津厚(2010): 非破壊伝播方向におけるやや短周期パルスへの特性化震源モデルの適用に関する研究—2007年新潟県中越沖地震を例に一, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.66
- ・ 八木勇次(2007b): 2007年7月16日新潟県上越沖の地震の震源過程(改訂 ver.2), <http://www.geol.tsukuba.ac.jp/~yagi-y/EQ/2007niigata/index.html> (2010年3月27日参照)
- ・ 山中佳子(2007b): NGY 地震学ノートNo.2a :2007年7月16日新潟県中越沖地震(M6.8)(遠地解析改訂版+近地解析), http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/2007/NGY2a.html (2010年3月29日参照)
- ・ 山本容維, 竹中博士(2009): 経験的グリーン関数法を用いた2007年新潟県中越沖地震の震源のモデル化, 地震 第2輯 第62巻