

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

入倉孝次郎（愛知工業大学地域防災センター）・
香川敬生・宮腰 研（地域 地盤 環境研究所）・
倉橋 奨（愛知工業大学）

要旨

本研究は、海底地震計の観測結果を基に再決定された余震分布により、中越沖地震を引き起こした震源断層が南東傾斜であった可能性が高いという結果を受けて、今回地震の強震動を引き起こした震源断層モデルの推定を行い、柏崎刈羽原子力発電所が大きな強震動に襲われた原因について検討を行ったものである。今回の地震の震源断層は3つのアスペリティからなる。これらの3つのアスペリティ (Asp1、Asp 2、Asp3) からの地震動が柏崎刈羽原発の強震動に見られる3つの顕著なパルスに対応している。柏崎刈羽原発はAsp3の地震波放射特性の腹方向に位置し、Asp3から発生された地震波が震源特性と伝播経路の複合したフォーカシング効果と厚い堆積層による増幅効果により柏崎刈羽原発に大きな強震動を生成したと考えられる。

これまでの研究の経緯

今回の地震は海域に起こったため、地震観測や地殻変動観測が震源域の東側に遍在していた。そのため、余震の決定精度が悪く余震分布による震源断層面の決定が困難で、またGPSやSARなどの地殻変動データからもユニークな断層面解が得られず、これまで震源断層が南東傾斜か北西傾斜か特定されなかった。強震動と距離減衰の関係は全般的にはこれまでの標準的な距離減衰式に一致するが、震源断層に近い柏崎刈羽原発で記録された強震動は経験式から推定される地震動よりも顕著に大きかった。我々は、震源断層が北西傾斜と仮定すると、破壊が海側から陸側に進行するため、柏崎刈羽の地震動は破壊進行方向に生じるデレクティビティ効果により顕著に大きくなった可能性を指摘した。しかしながら、科学技術振興調整費「新潟県中越沖地震に関する緊急調査研究」(東京大学地震研究所など)で海底地震計による余震観測により再決定された余震分布は震源断層が南東傾斜であった可能性を強く示唆しており、北西傾斜の震源断層を仮定した上記の考えは再検討する必要がある。震源断層が南東傾斜とすると、柏崎刈羽は震源断層における破壊の進行方向にならず、デレクティビティ効果の影響は小さいと考えられる。そこで、本研究では、南東傾斜の震源断層によりなぜ柏崎刈羽が大きな強震動に襲われたかについて改めて検討を行った。

検討すべき課題

1. 2007年中越沖地震の特徴
2. 強震動は大きかったのか？
3. 経験的グリーン関数法を用いた震源断層のモデル化
4. 理論的グリーン関数法による断層モデルの検証
5. 柏崎刈羽原子力発電所の強震動の生成メカニズム
6. まとめおよび今後の課題

1. 2007年新潟県中越沖地震の特徴－1

概況

- 2007年新潟県中越沖地震は7月16日に新潟県上中越沖の深さ約10 kmで起こった。
- この地震の気象庁マグニチュードは6.8、遠地地震データのインバージョンから推定されたモーメント・マグニチュードは約6.6であった。
- 震度の大きいところ(震度6強)は、震源の南東の海岸沿いの新潟県刈羽村から柏崎市にかけての地域に集中。刈羽村と柏崎市の間に位置する柏崎刈羽原発の地表観測点では震度7(相当値)が記録された。
それ以外にやや内陸の長岡市・および震源から南西方向約90 km離れた長野県飯綱町でも震度6強が記録された。
- 本震の発生機構は北西—南東方向に圧力軸をもつ逆断層型であった。

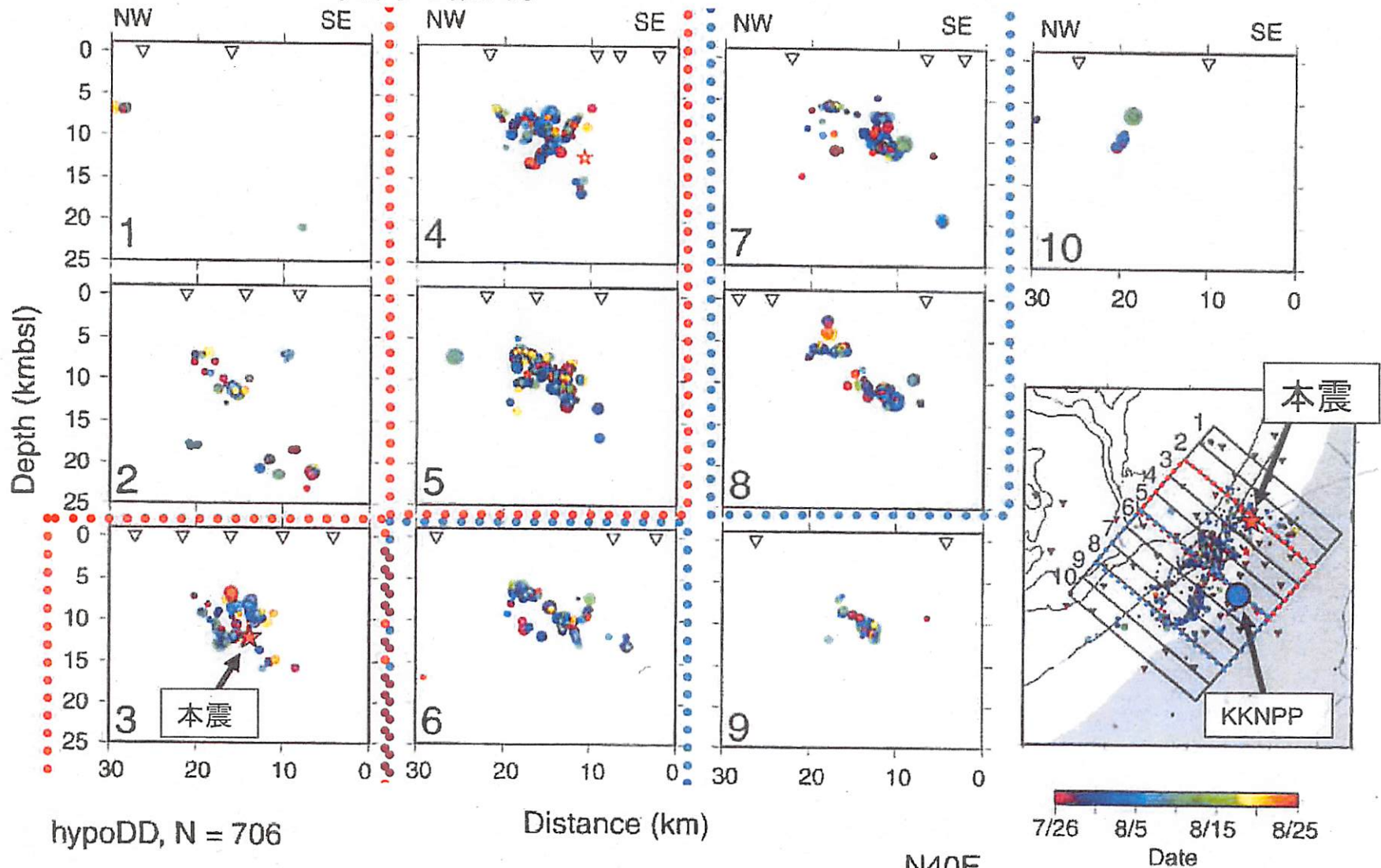
2007年新潟県中越沖地震の特徴-2

この地震の発生域の地質学のおよび地球物理学的特徴

- この地震はプレート境界と考えられている日本海東縁部の延長に位置し、活褶曲構造調査(岡村, 2002)やGPS観測によって日本海西岸・新潟から南西方向に延びるひずみ集中帯の中で起こった(鷺谷, 2007)。
- このひずみ集中帯では歴史的に繰り返し大地震が起こっているが、2004年新潟県中越地震と2007年新潟県中越沖地震は200年以上地震が起こっていない地震空白域に起こった(鷺谷, 2007)。
- 余震分布は、海底地震計による余震観測に基づき推定された地下構造モデルを用いて再決定の結果、南東傾斜の断層の存在を示唆(東京大学地震研, 2007)。
- 地殻変動データからは、破壊の始まりの北部では北西傾斜の断層、破壊の終端の南部では南東傾斜の断層、の可能性もあるとしている(国土地理院, 2007)。

余震分布

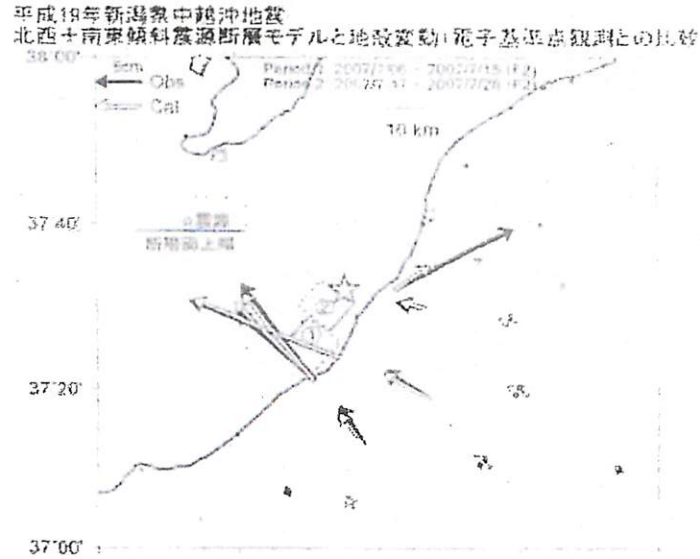
余震分布は、北側(赤の囲い)は南側(青色の囲い)に比べてやや高角の傾向。



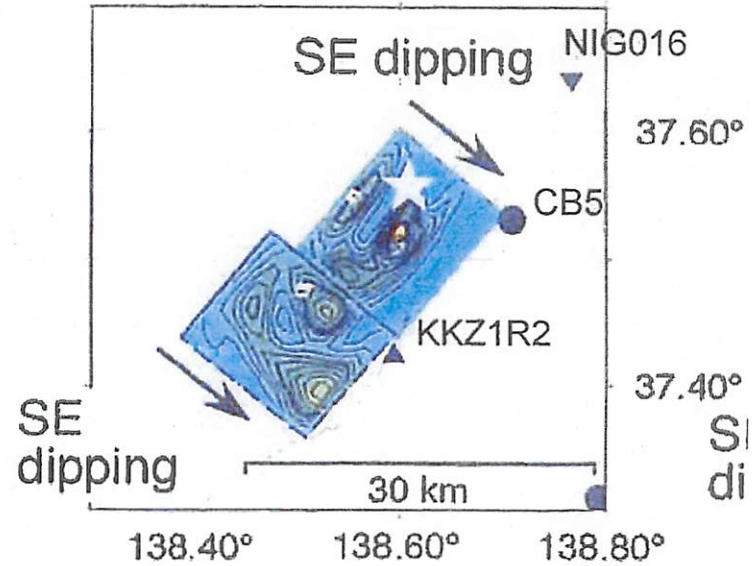
第175回地震調査委員会(2007年11月12日)における
東大地震研提出資料 に加筆

震源断層モデル

地殻変動データから推定された震源断層モデルの例(国土地理院, 2007)



強震動データから推定された震源断層モデルの例(堀川, 2007)



堀川(2007)に加筆

	北東側の断層	南西側の断層
	北西傾斜	南東傾斜
長さ×幅(km)	7.7×10.3	10.0×9.7
走向	220	40
傾斜角	33	28
すべり角	124	89

	北東側の断層	南西側の断層
	北西傾斜	南東傾斜
長さ×幅(km)	14×20	12×17
走向	40	40
傾斜角	55	35
すべり角	90	90

2. 強震動は大きかったのか？

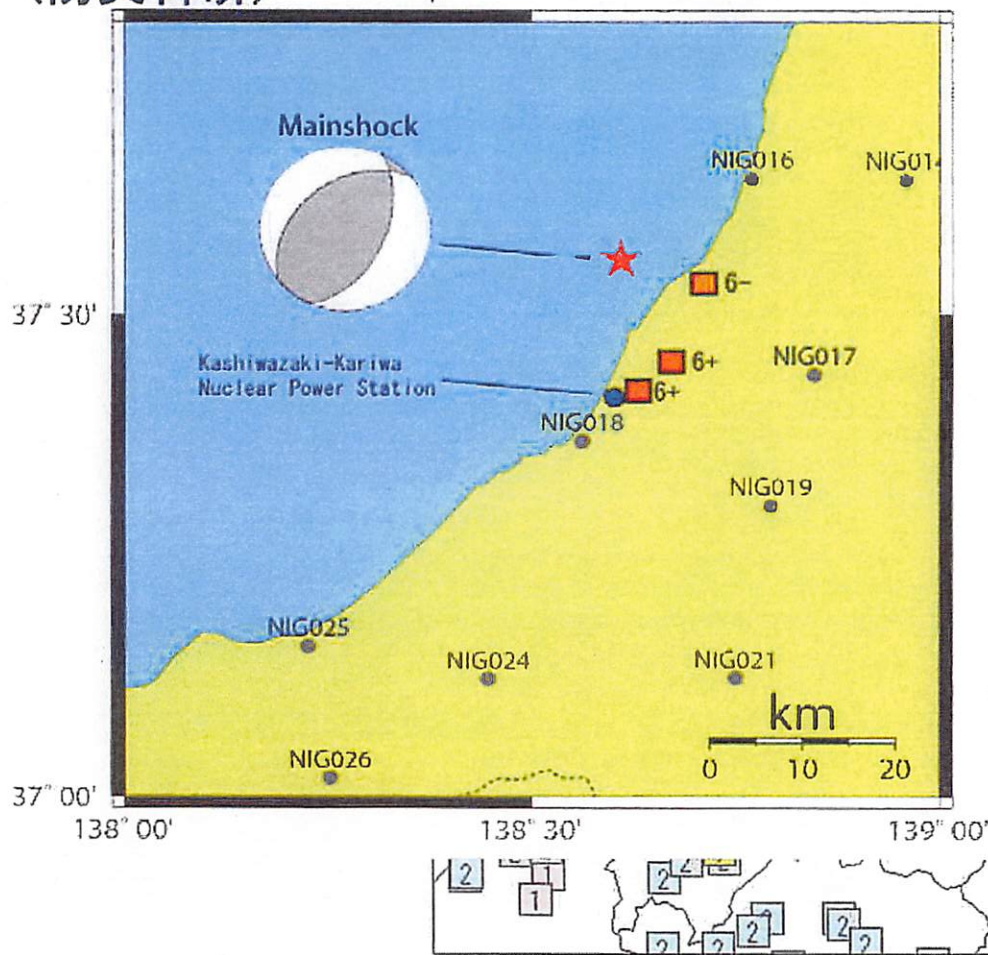
- 地表で観測された地震動の最大加速度は経験的距離減衰式(司・翠川, 1999)にほぼ従っている。しかし、震源域近くの柏崎刈羽原発での地表の最大加速度は経験式に比べて大きい。
- 岩盤上で観測された地震動の最大加速度の経験的距離減衰式(Fukushima and Tanaka, 1989)と比べると、柏崎刈羽原発の岩盤地中で得られた最大加速度は極めて大きい。

考えられる原因

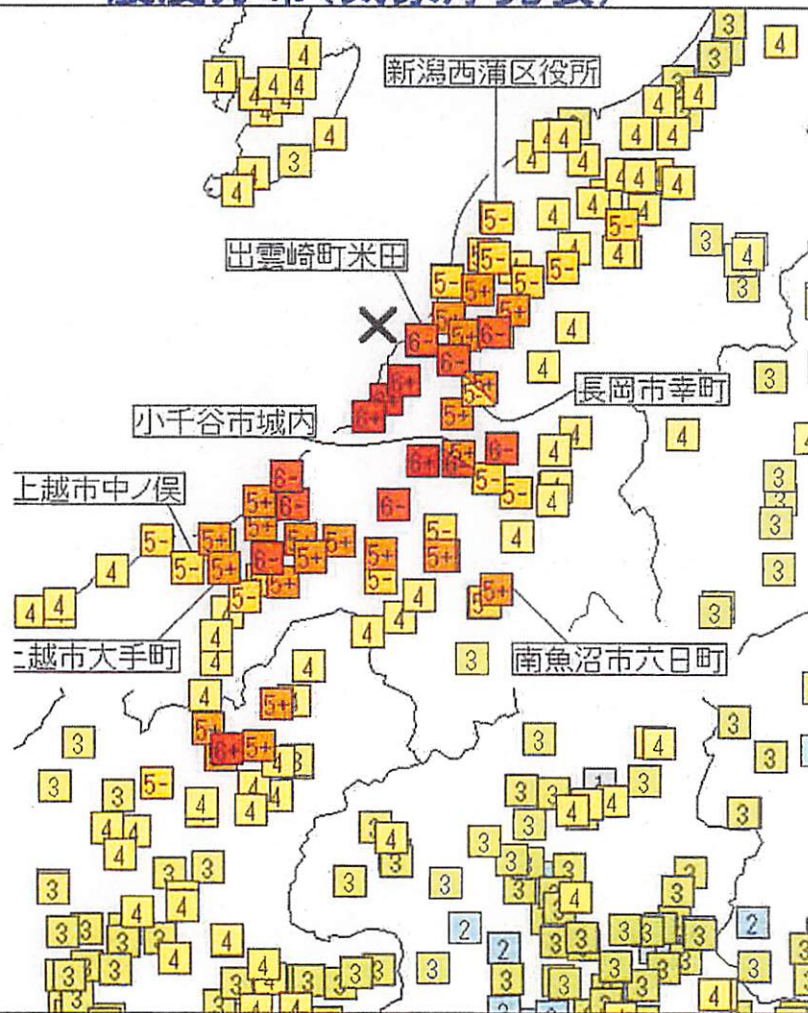
1. 敷地近傍の地盤の増幅効果による
2. 破壊の放射特性・指向性効果など震源の性質による
3. フォーカシングなど伝播経路の性質による

2007年中越沖地震の震源メカニズムと震度分布

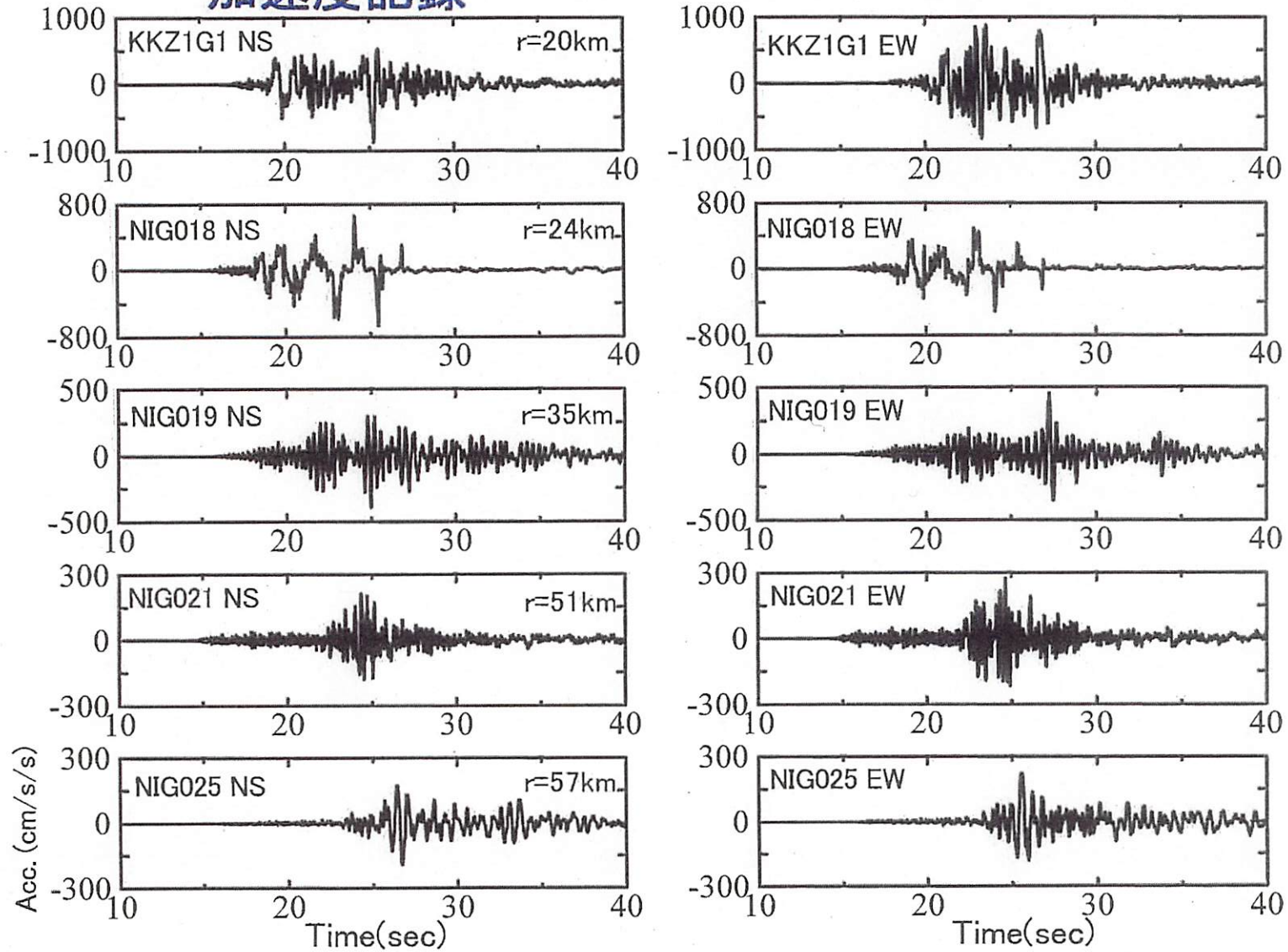
震源メカニズムと震源近傍の強震動観測点
(防災科研)



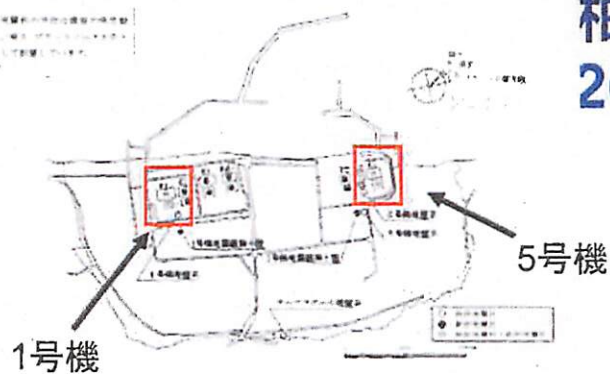
震度分布(気象庁発表)



震源近傍で観測された2007年中越沖地震の 加速度記録



柏崎刈羽原子力発電所で観測された 2007年中越沖地震の加速度記録

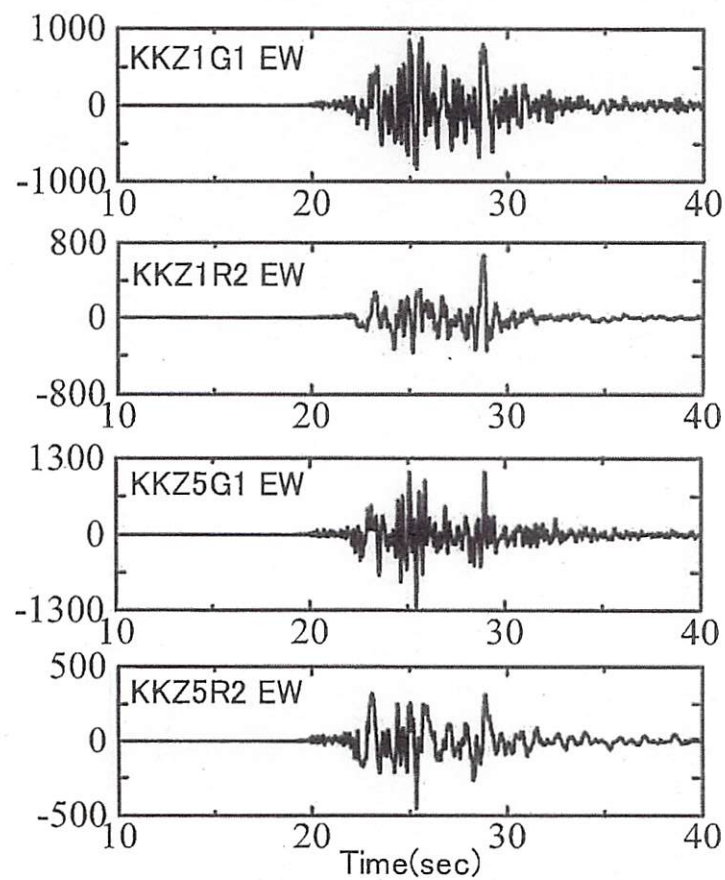
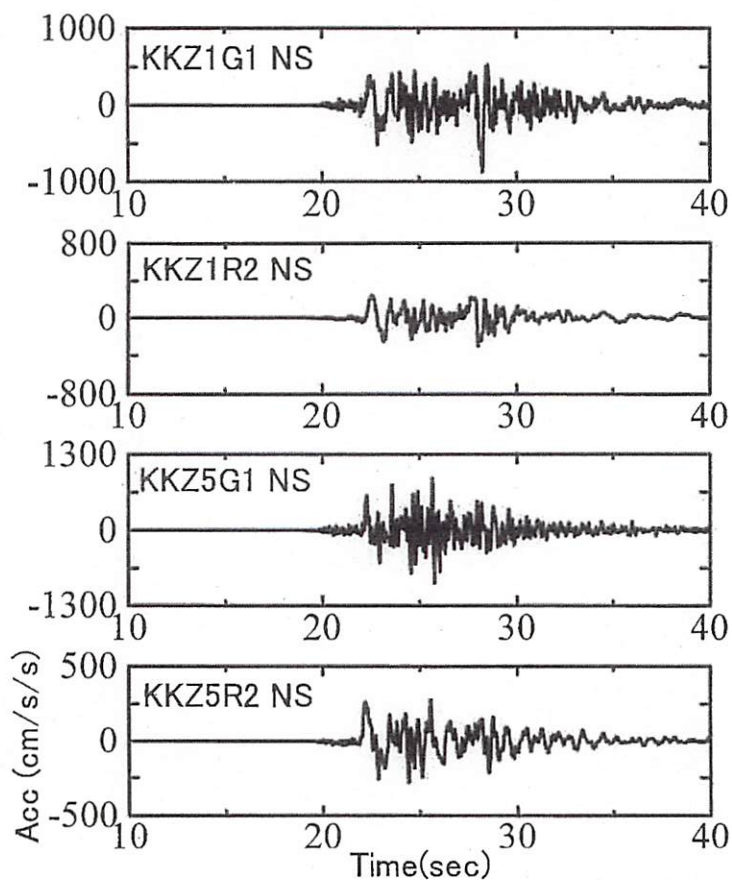


KKZ1G1: 1号機地震小屋(地表)

KKZ1R2: 1号機基礎マット上(地中)

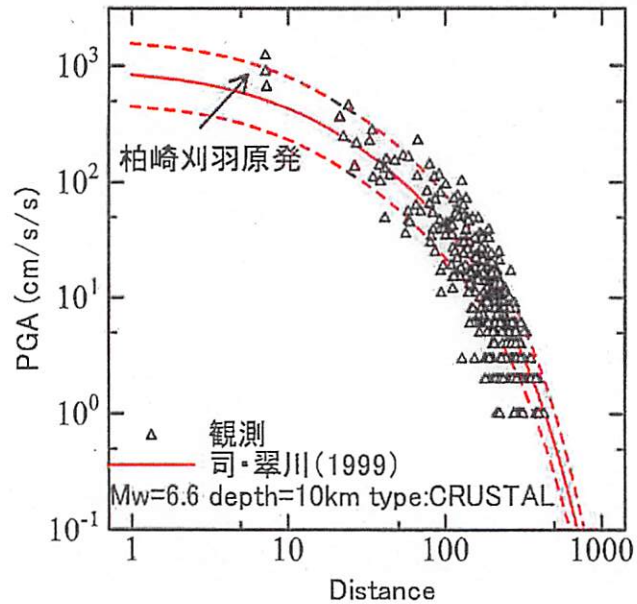
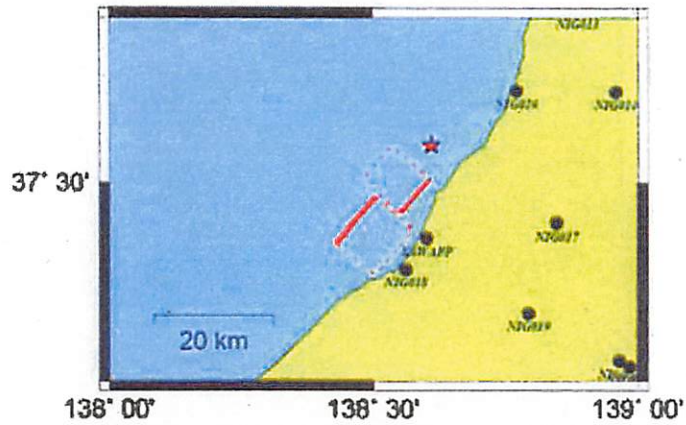
KKZ5G1: 5号機地震小屋(地表)

KKZ5R2: 5号機基礎マット上(地中)

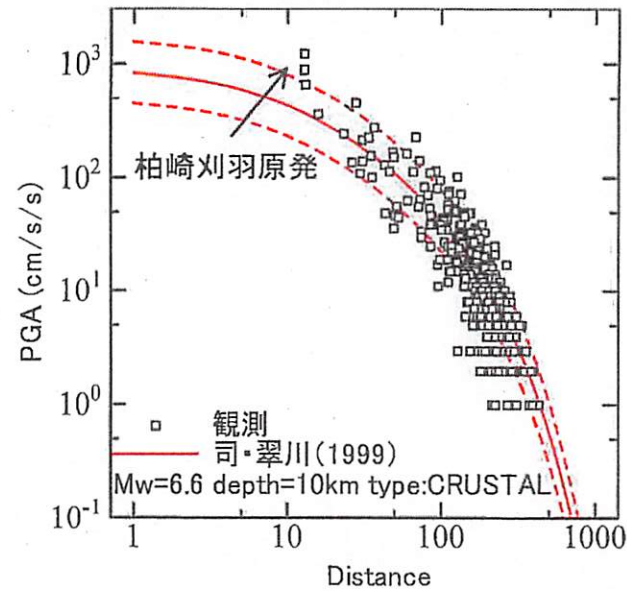
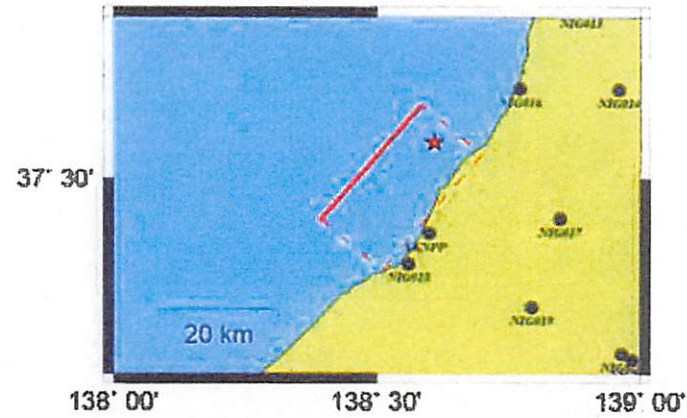


最大加速度(地表観測)の距離減衰

震源断層として国土地理院モデルを設定



震源断層として堀川モデルを参考に設定
 走向:40°, 傾斜角:45



地表で観測された最大加速度は全般的に標準的距離減衰式(司・翠川, 1999)によく一致しているが、震源断層に近い柏崎刈羽原発(断層最短距離約10km)では経験式に比べ大きい。

経験的サイト特性の評価—その1：方法—

観測地震動 $F(t)$ は、時間領域で考えると震源特性、伝播経路特性とサイト特性のコンボリューションで表現できる。一方、周波数領域では、積で表現される。

Time Domain

Frequency Domain

$$F_i(t) = S_i(t) * P_i(t) * G(t) \quad \Longrightarrow \quad F_i(f) = S_i(f) \cdot P_i(f) \cdot G(f)$$

震源特性 Boore(1983)

$$S_i(f) = Mo_i \frac{R_{\theta\phi} F_S P_{RTTN}}{4\pi\rho V_S^3} \frac{2\pi f}{1 + (f/f_{ci})^2}$$

伝播経路特性：幾何減衰(1/R)と周波数依存Q(f)で表わされる。

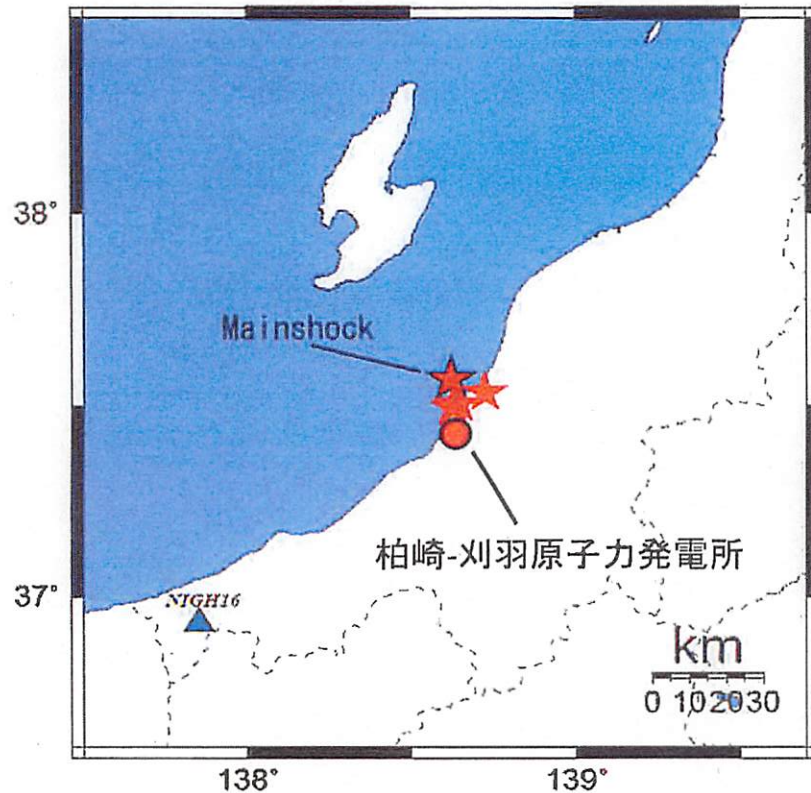
$$P_i(f) = \frac{1}{R_i} \exp\left(\frac{-\pi R_i f}{Q(f) V_S}\right)$$

地震ごとの観測記録から、震源特性と伝播経路特性を除することで、地震ごとのサイト特性を評価することができる。この操作をいくつかの地震で行い、それらの幾何平均をその地点のサイト特性と評価する。

$$|G(f)| = \frac{|F_i(f)|}{S_i(f) P_i(f)}$$

$$G(f) = \sum_{i=1}^N \frac{G_i(f)}{N}$$

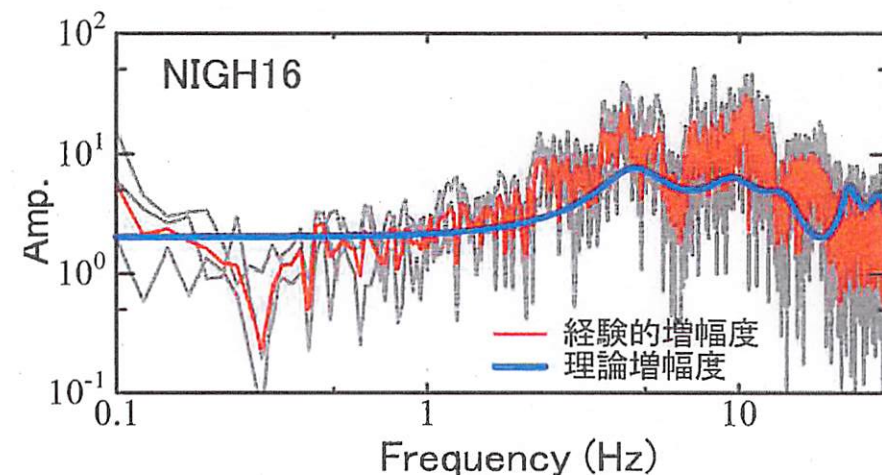
経験的サイト特性の評価—その2：推定の例(NIGH16地点)



使用した地震(ここでは、柏崎刈羽原発サイトの公表記録と同じ地震を用いるため、地震数が3個と少ない。)

震源スペクトルを評価する際に必要な M_0 はF-netを用いた。コーナー周波数は、観測スペクトルから目視で読み取った。その際、硬質地盤上であるNIGH16地点の記録を用いた。

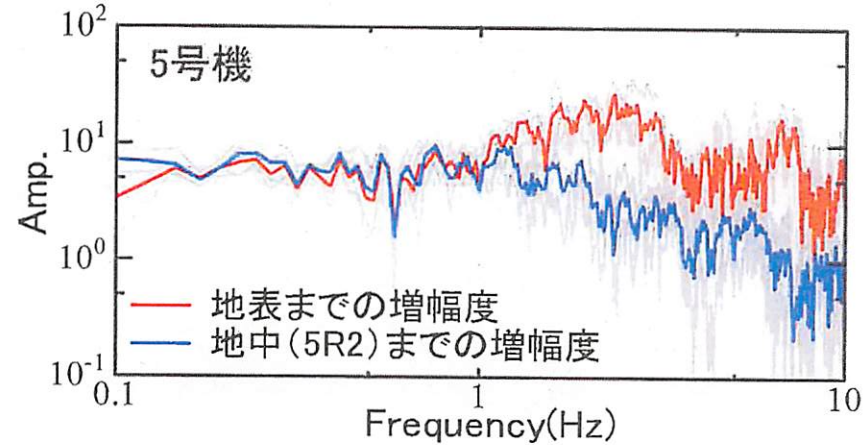
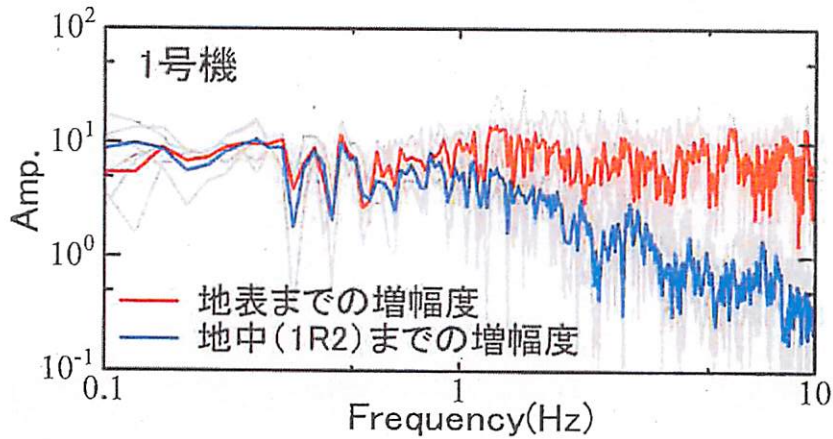
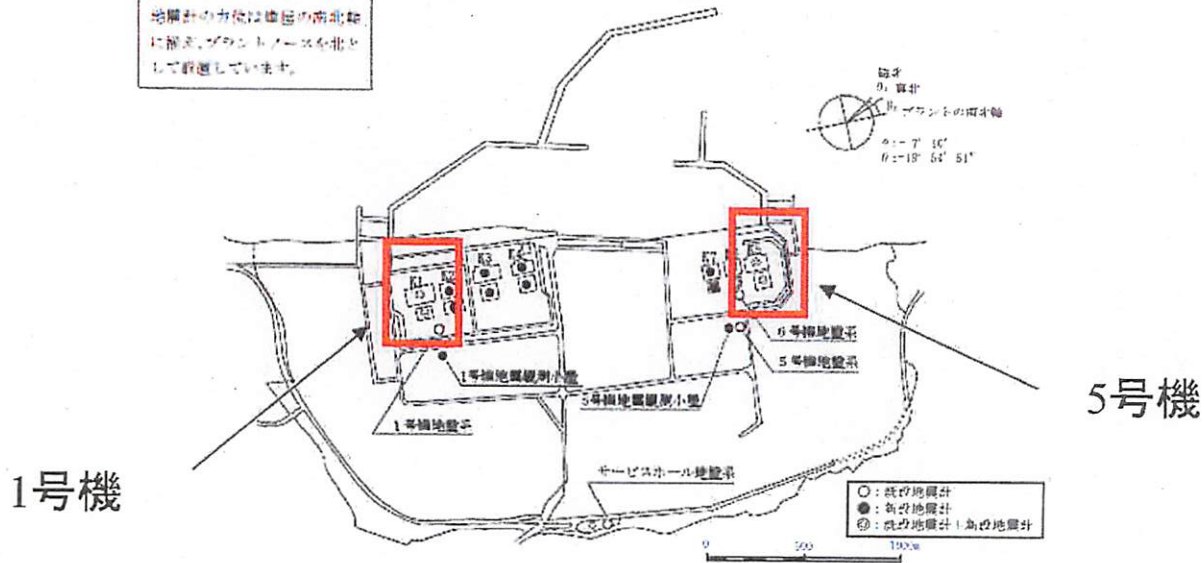
伝播経路の減衰を表すQ値は岩田らにより調査された結果($Q=76f^{0.64}$)を用いた。



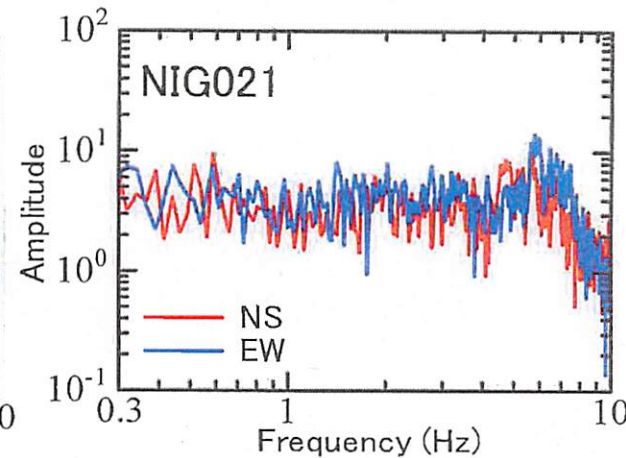
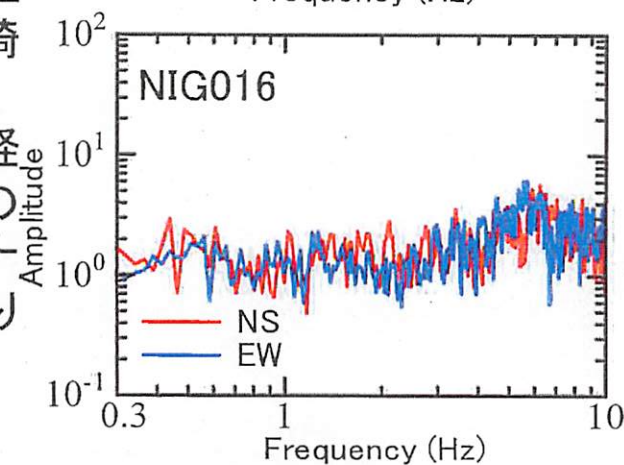
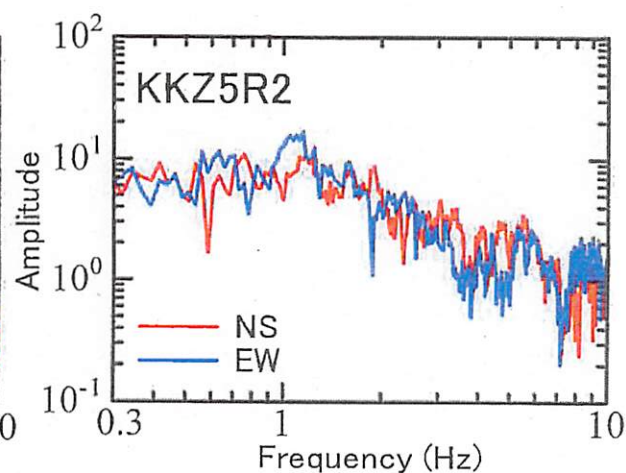
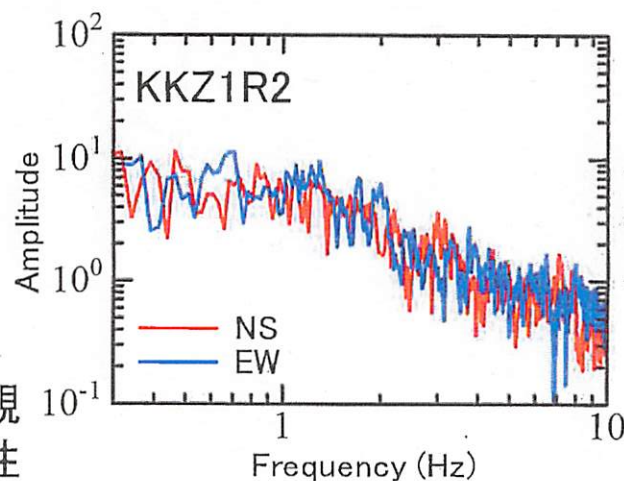
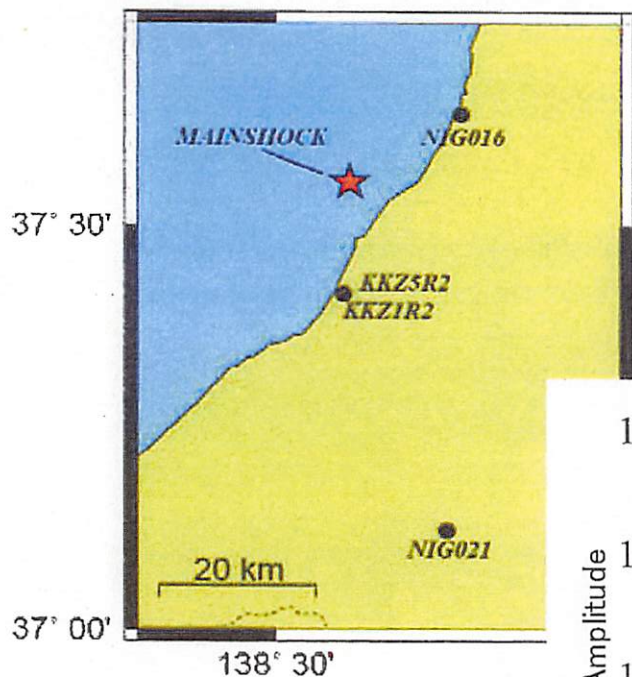
NIGH16における経験的増幅度と理論増幅度の比較

経験的サイト特性の評価—その3：柏崎刈羽原発—

地震計の方位は直前の南北軸
に照らし、プラットフォームを北を
して設置しています。



経験的サイト特性の評価—その4： 柏崎刈羽原発の地中基礎版(地中) と硬質地盤(地表)のサイト特性の 比較



一般に地中観測点は地表観測点に比べてサイト増幅特性は小さい。しかしながら、柏崎刈羽原子力発電所の1号機、5号機の基礎版(地中)の経験的サイト特性は硬質地盤のNIG016(寺泊)とNIG021(十日町)の経験的サイト特性よりも大きい。

柏崎刈羽原発の地震動がなぜ大きくなったのか？

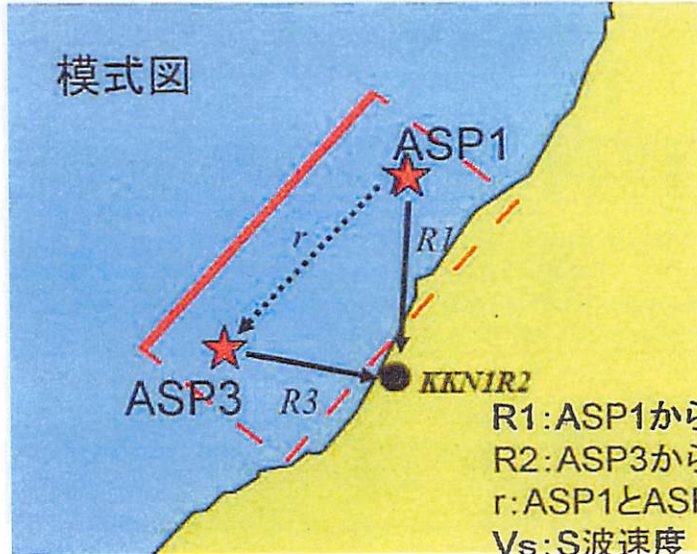
- 原因の1つは、柏崎刈羽付近では地震基盤から敷地までのサイト増幅特性が大きいことによる。
- 震源からの地震波放射特性・指向性効果およびフォーカシング効果の検討が必要。

3. 経験的グリーン関数法を用いた震源断層のモデル化

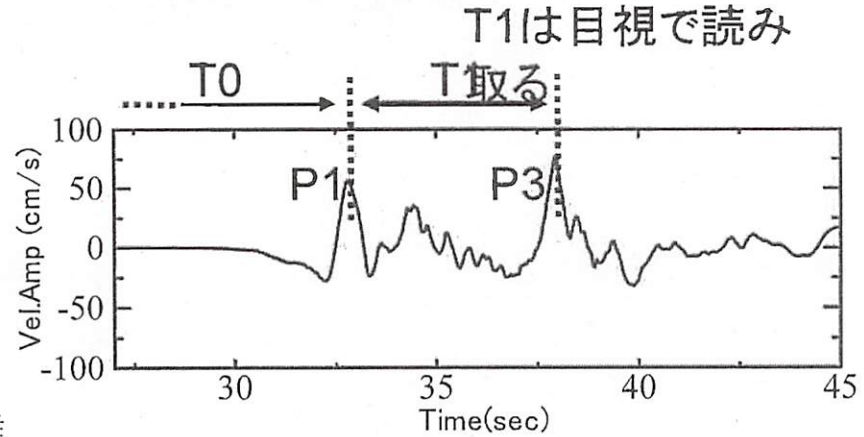
モデル化で考慮すべきこと

- 海底地震計による余震観測に基づき推定された地下構造モデルを用いて再決定された余震分布から、南東傾斜の震源断層の存在が明らかになった。
- 震源断層に近い沿岸域における強震動記録に3つの顕著なパルス波が見られることから、3つのアスペリティの存在の可能性がある。アスペリティ1は破壊の始まりに近い震源断層の北部、アスペリティ3は破壊の終端に近い南部、アスペリティ2はその中間に位置すると想定される。
- 震源断層の走行方向は余震分布から南西—北東方向。傾斜角は北側がやや高角で $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 、南側はやや低角で $25^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 。
- ここでは、柏崎刈羽に最も大きい地震動を生じたアスペリティ3に焦点を合わせた震源モデルを想定し、設定する。震源断層は1枚とし、余震分布より、走行は $N37^{\circ} E$ 、傾斜角は 30° とし、強震動の計算を試みる。

パルスの時間差からアスペリティの位置を推定



R1: ASP1からの震源距離
 R2: ASP3からの震源距離
 r: ASP1とASP3の距離
 Vs: S波速度
 Vr: 破壊速度



T0は破壊開始からの経過時間

1) 破壊開始からパルス1(P1)が到達する時間は式1)で示される。

2) パルス3(P3)は、破壊開始点(ASP1)からASP3に破壊速度 V_r で破壊が進行し、ASP3からS波速度 V_s でS波が伝播し観測点に到達する(式2))。

したがって、 T_1 と r と R_3 の関係により、ASP3の破壊開始点が推測できる。

いくつかの観測で同様の手法を適用すると、ASP3の位置は一意に決まる。しかしながら、今回はパルスの最大値間を T_1 としているため、推定される地点は破壊開始点との相対的な位置となる。

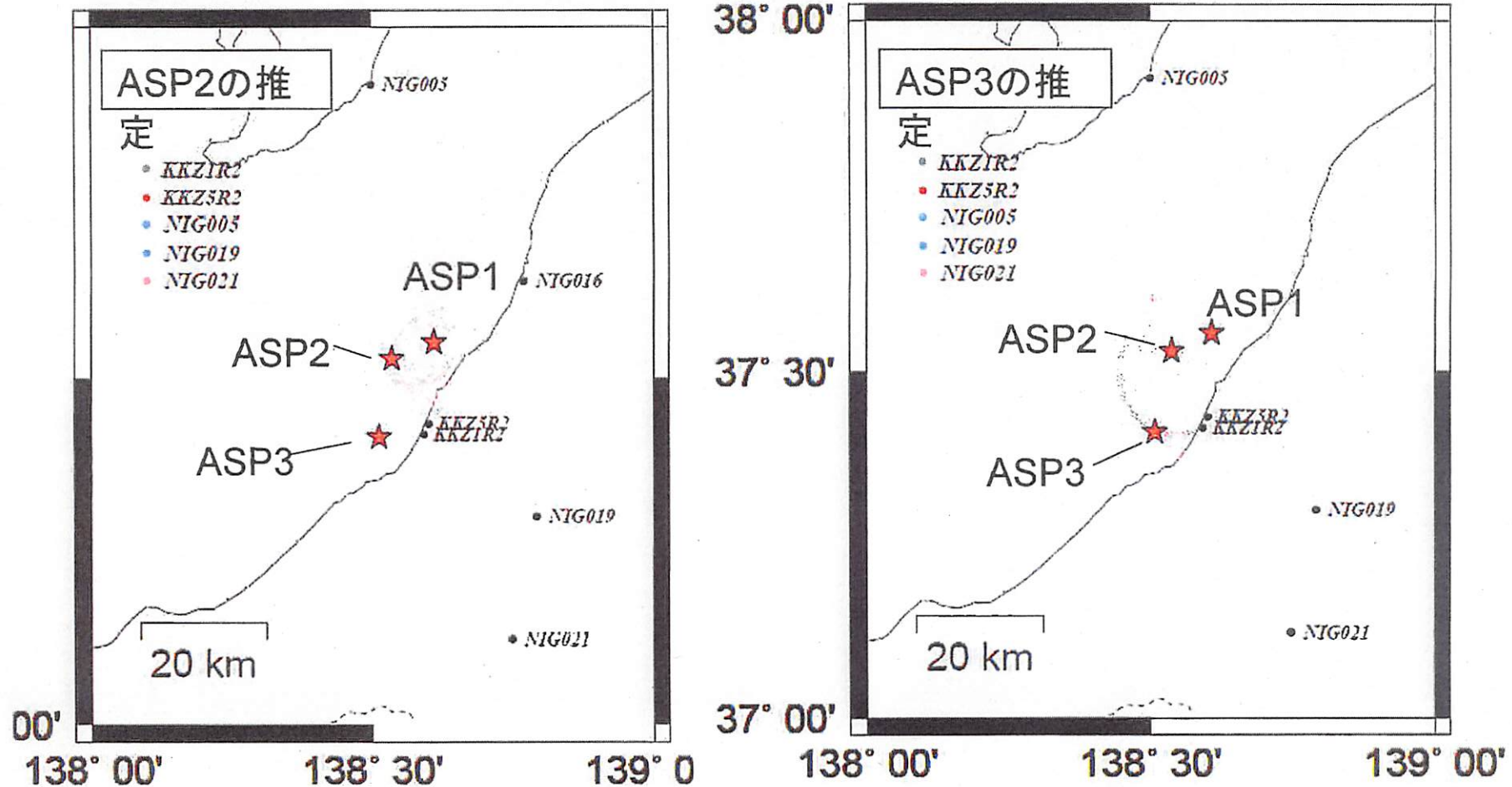
$$P1: \frac{R1}{Vs} = T0 \quad \text{式1)}$$

$$P3: \frac{r}{Vr} + \frac{R3}{Vs} = T0 + T1 \quad \text{式2)}$$

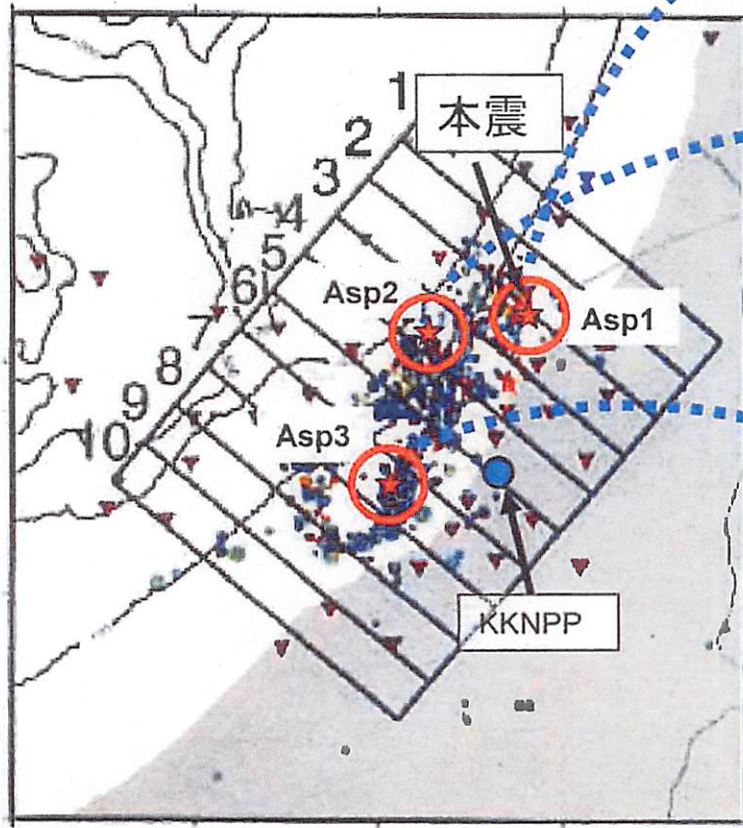
$$P3 - P1: \frac{r}{Vr} + \frac{R3}{Vs} - \frac{R1}{Vs} = T1 \quad \text{式3)}$$

観測されているパルスの時間差から各アスペリティの位置を推定した. 5つの観測点から推定される各アスペリティの位置は, ASP2は震源(ASP1)よりも南西方向で浅い場所, ASP3はASP2よりほぼ南方向で深い場所に推定された.

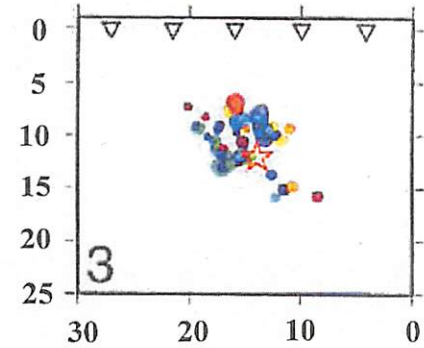
V_s は3.4km/s, V_r は2.7km/s, 断層メカニズムは走向:37° 傾斜角:35° における結果を示す.



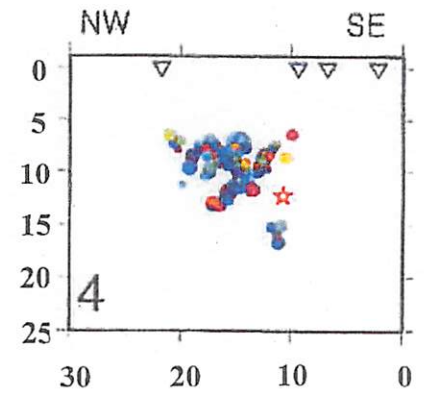
震源断層面の設定



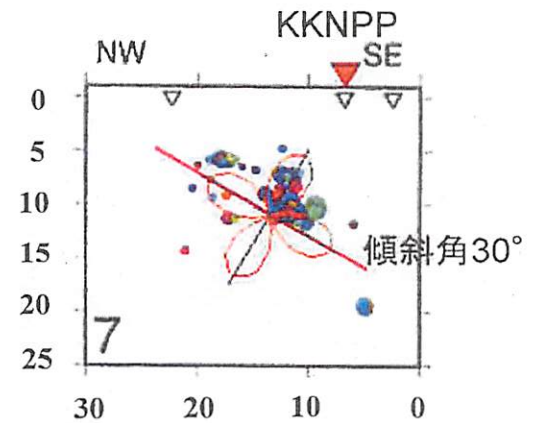
Asperity1付近
の余震分布



Asperity2付近
の余震分布

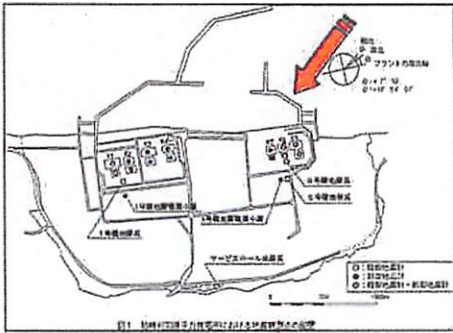


Asperity3付近
の余震分布



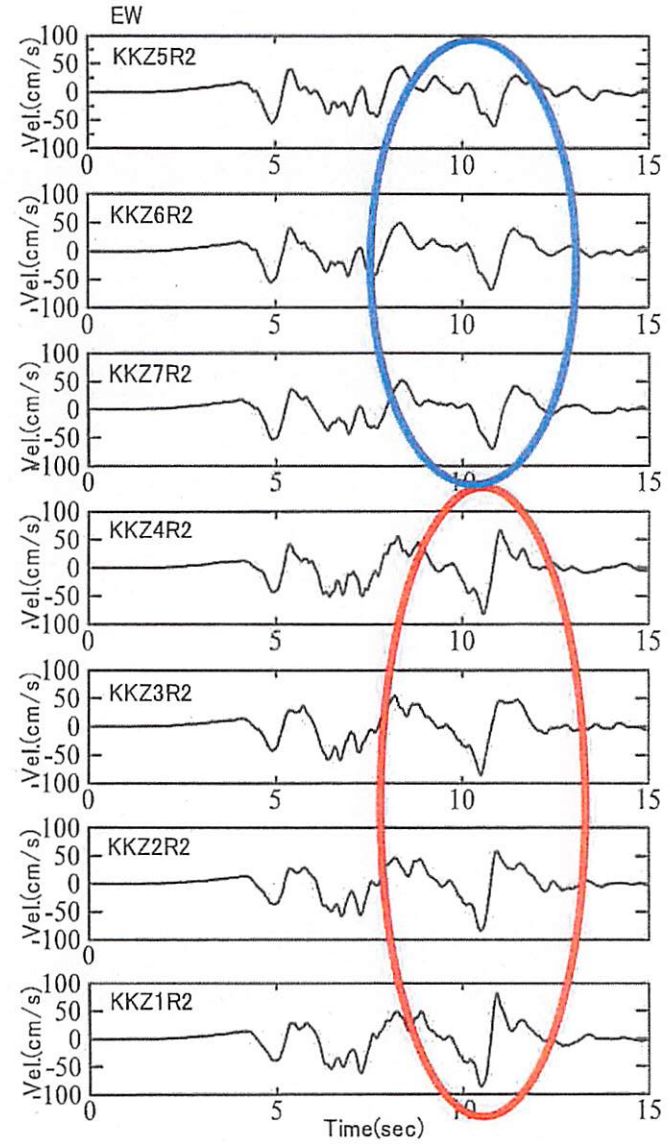
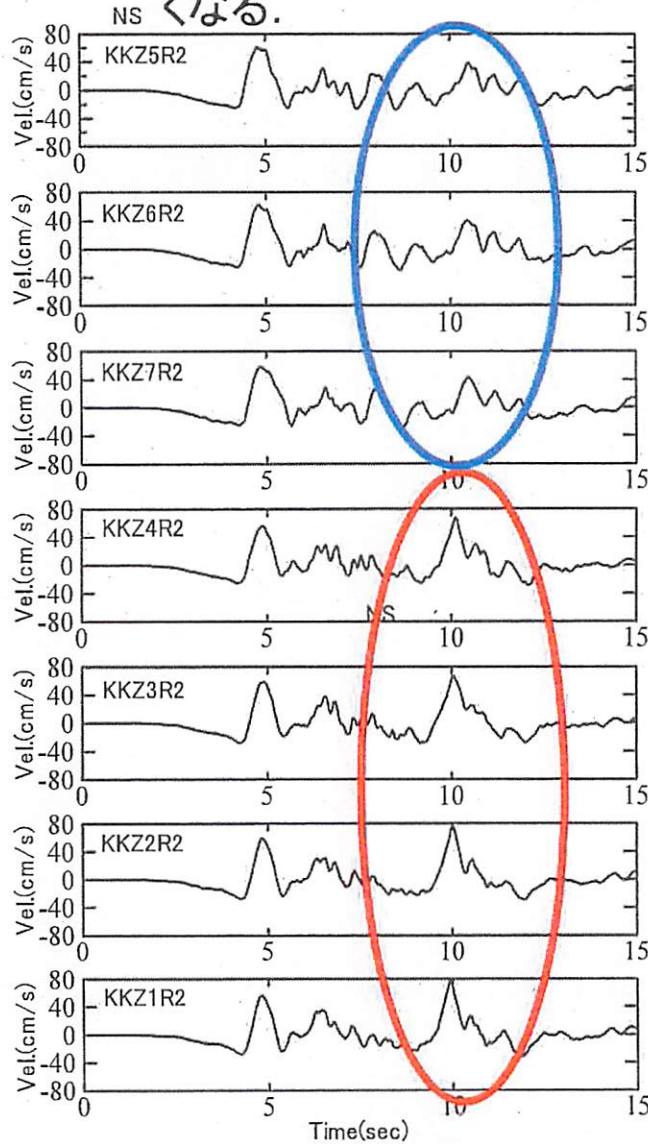
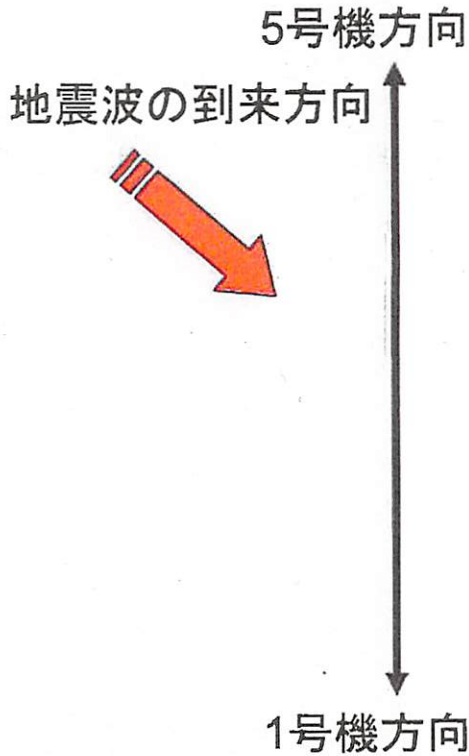
経験的グリーン関数として用いる余震記録の選定

- 経験的グリーン関数として用いる余震は、本震とほぼ同じ震源メカニズムと伝播経路特性をもっていることが望ましい。
- 想定される震源断層は3つのアスペリティを有しているので、各アスペリティに対応して適切な余震記録の選定が必要。
- 柏崎刈羽原発の7原子炉(北から南に、5号、6号、7号、4号、3号、2号、1号と配置されている)の基礎版上の本震記録には、3つのアスペリティから3つのパルス波が見られる。それぞれにパルス波と似た特徴をもつ余震記録を経験的グリーン関数として選定する。
- Asperity1の位置する方向(柏崎刈羽原発からみて北東方向)からの余震記録(2007年7月16日21:08, Mj 4.4)は5号機側が振幅が大きく1号機側が小さい。これは本震の記録に見られるAsperity1からパルス波の特徴に対応している。
- Asperity3の位置する方向(柏崎刈羽原発からみて南東方向)からの余震記録(2007年8月4日00:16, Mj 3.2)は1号機側が振幅が大きく5号機側が小さい。これは本震の記録に見られるAsperity3からパルス波の特徴に対応している。
- Asperity2はAsperity1と似た方向に位置している。
- 上記の考察から、Asperity1とAsperity2に対する経験的グリーン関数として2007年7月16日21:08, Mj 4.4の余震記録、Asperity3に対する経験的グリーン関数として2007年8月4日00:16, Mj 3.2の余震記録を用いる。



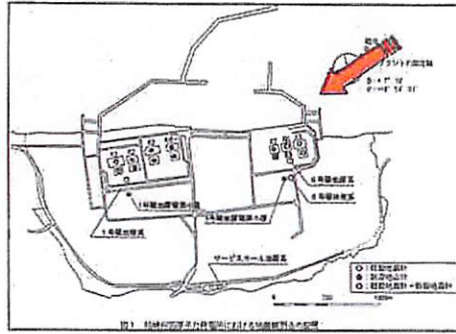
07/07/16 10:13 本震 速度波形

3つ目のパルスは5号機から1号機に向かい振幅が大きくなる。

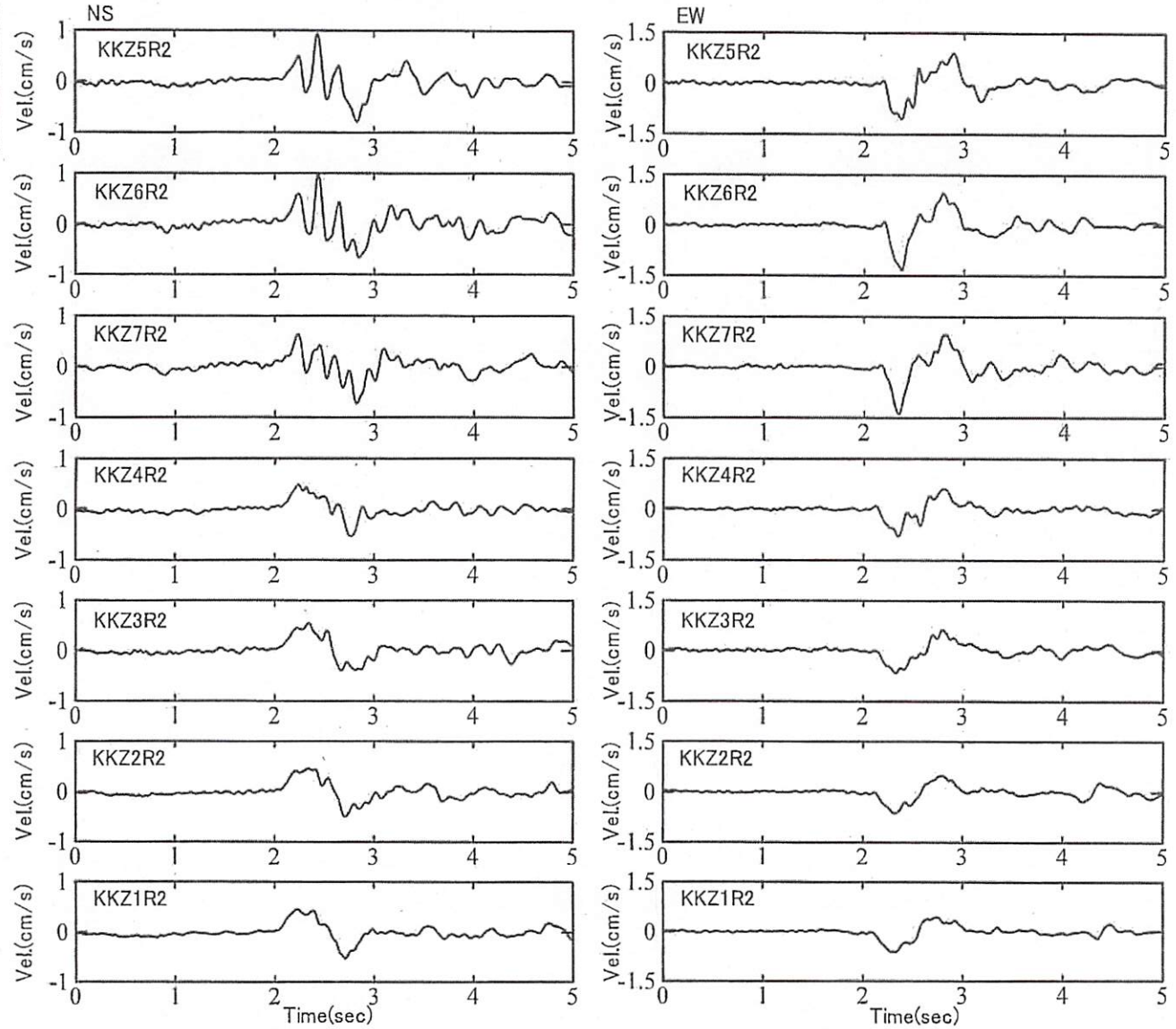


07/07/16 21:08 速度波形

1号機から5号機に向かい振幅が大きくなる。

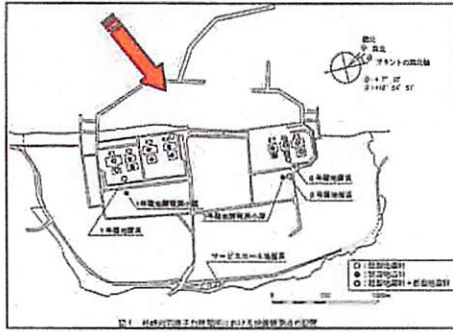


5号機方向
地震波の到来方向
1号機方向



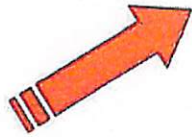
07/08/04 00:16 速度波形

5号機から1号機に向かい振幅が大きくなる。

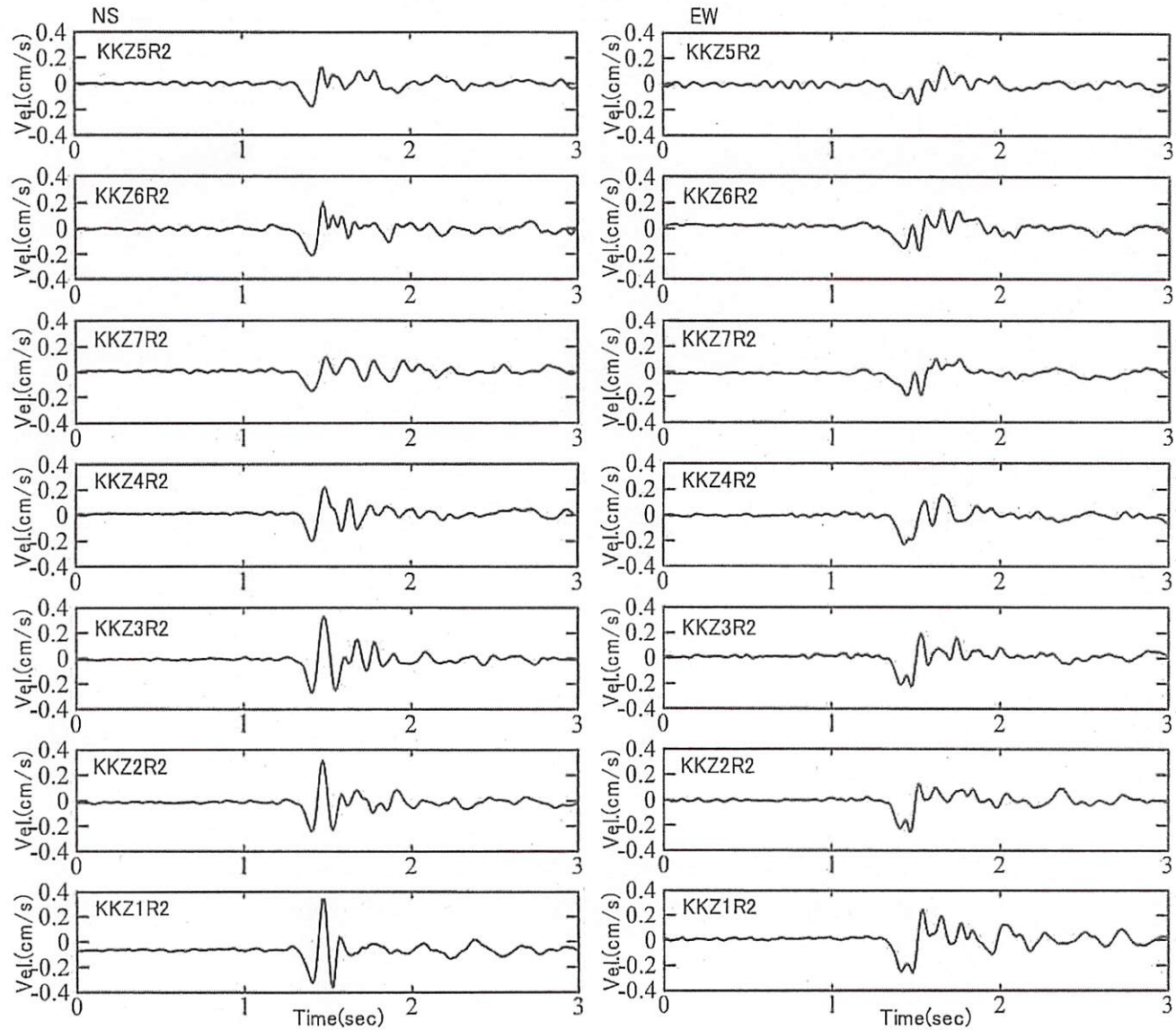


5号機方向

地震波の到来方向



1号機方向



経験的グリーン関数として用いる余震の震源パラメータの推定方法

余震の地震モーメント, 断層面積, 応力降下量は以下の方法で評価した.

1) 地震モーメントは, F-netの記録を用いる. ただし, F-NETの記録がない場合は, 震源変位スペクトルの低周波数領域の一定値を読み取り, 次式より算出した.

$$M_0 = \left(4\pi\rho\beta^3 / R_{\phi\theta} \right) \times \Omega \quad \text{ここで, } \Omega \text{ は震源変位フラットレベルを示す.}$$

2) 断層面積, 応力降下量は, 震源変位スペクトルのコーナー周波数を読み取り, その値から, 次式により算出した.

$$r = 0.37V_s / f_c$$

$$\Delta\sigma = \frac{7M_0}{16r^3}$$

r : 円形クラックモデルの半径

V_s : S波速度

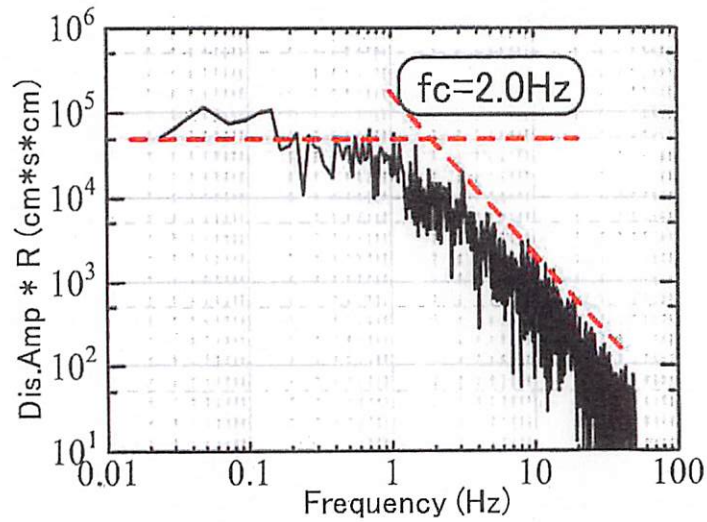
f_c : コーナー周波数

$\Delta\sigma$: 応力降下量

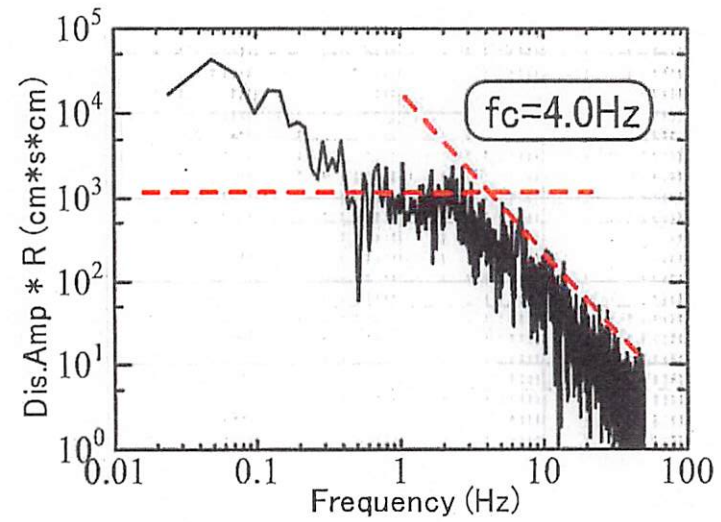
M_0 : 地震モーメント

余震のパラメータの評価

7月16日 21:08の余震

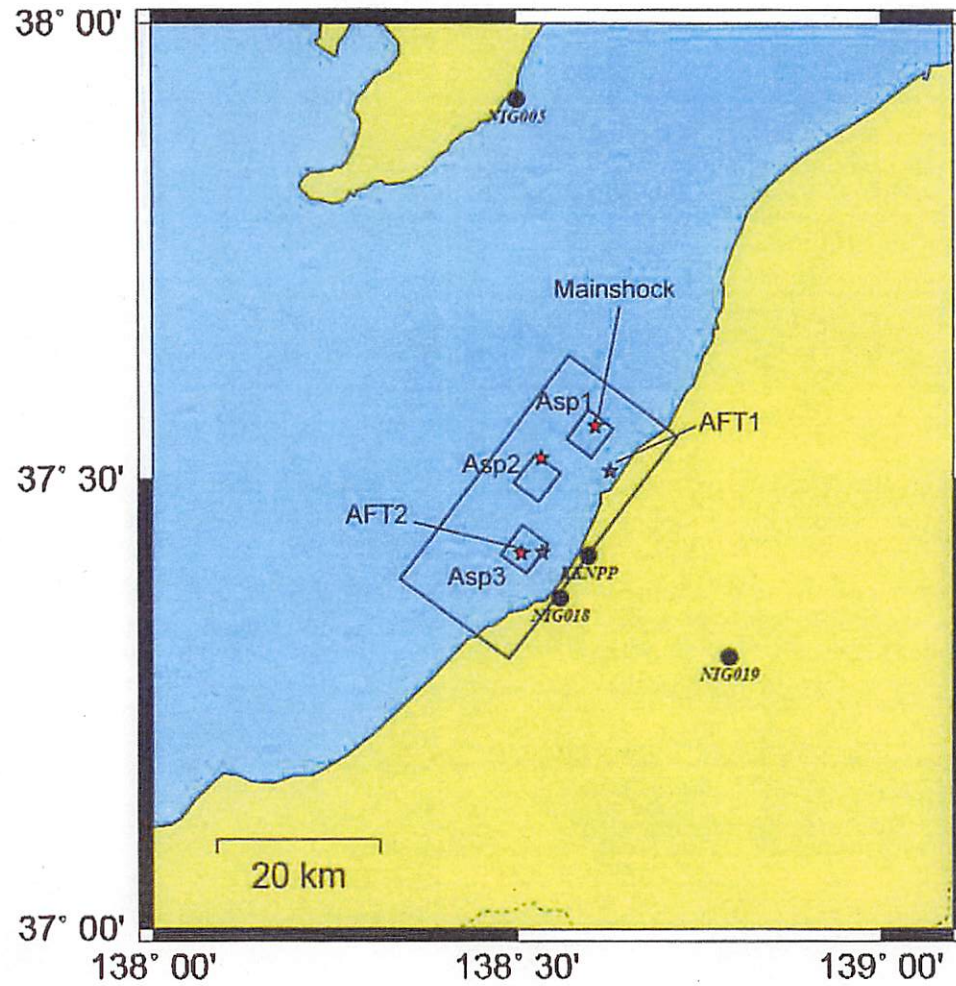


8月4日 00:16の余震



	7月16日21:08	8月4日00:16
地震モーメント	5.21E+15Nm (F-net)	1.56E+14Nm
コーナー周波数	2.0Hz	4.0Hz
応力降下量	9.1MPa	2.2MPa
断層面積	1.24km ²	0.31km ²

経験的グリーン関数法により推定された震源モデル

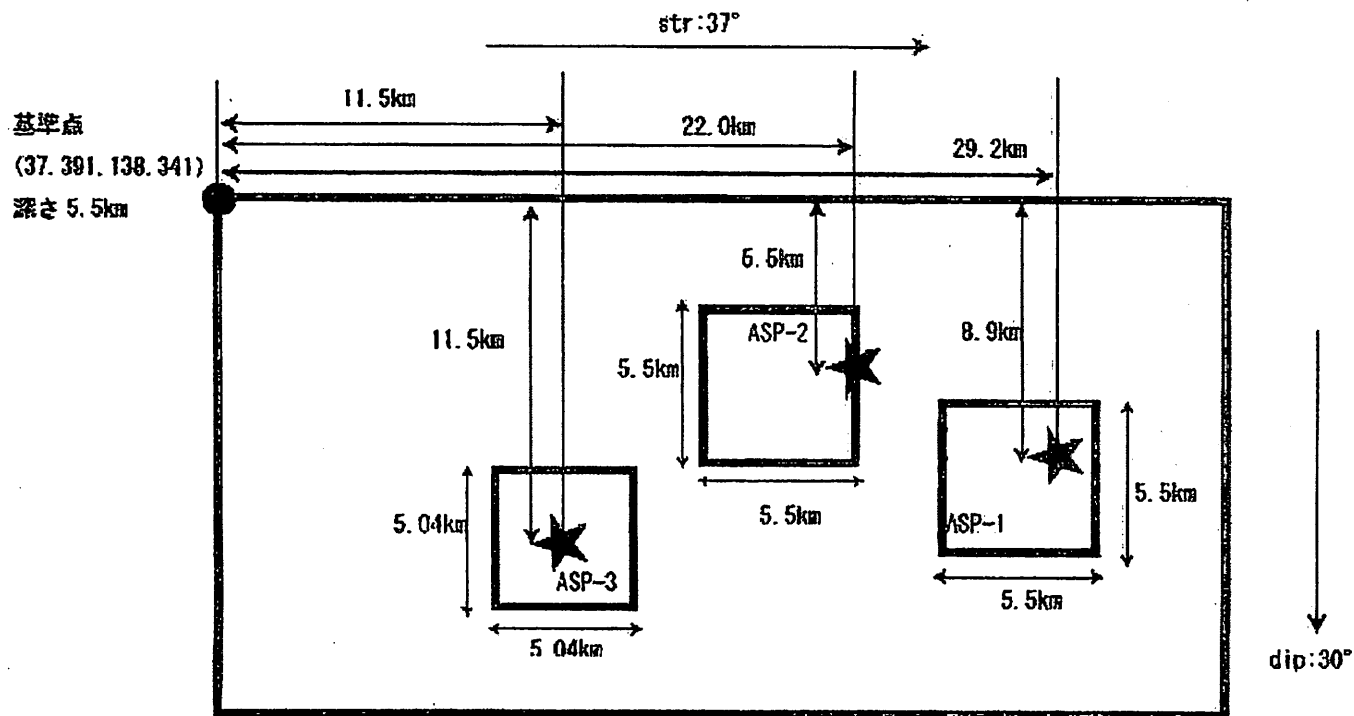


本震と余震の緒元

	Mainshock	Aftershock(AFT1)	Aftershock(AFT2)
Origin time	07/07/16 10:13	07/07/16 21:08	07/08/04 00:16
Hypocenter	37.557, 138.609	37.509, 138.630	37.420, 138.537
Depth	10km	13.6km	11.1km
Mw	6.6	4.4	-
Mo	8.37E+16Nm	5.21E+16Nm	1.56E+14Nm

設定した震源断層モデルの緒元

	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



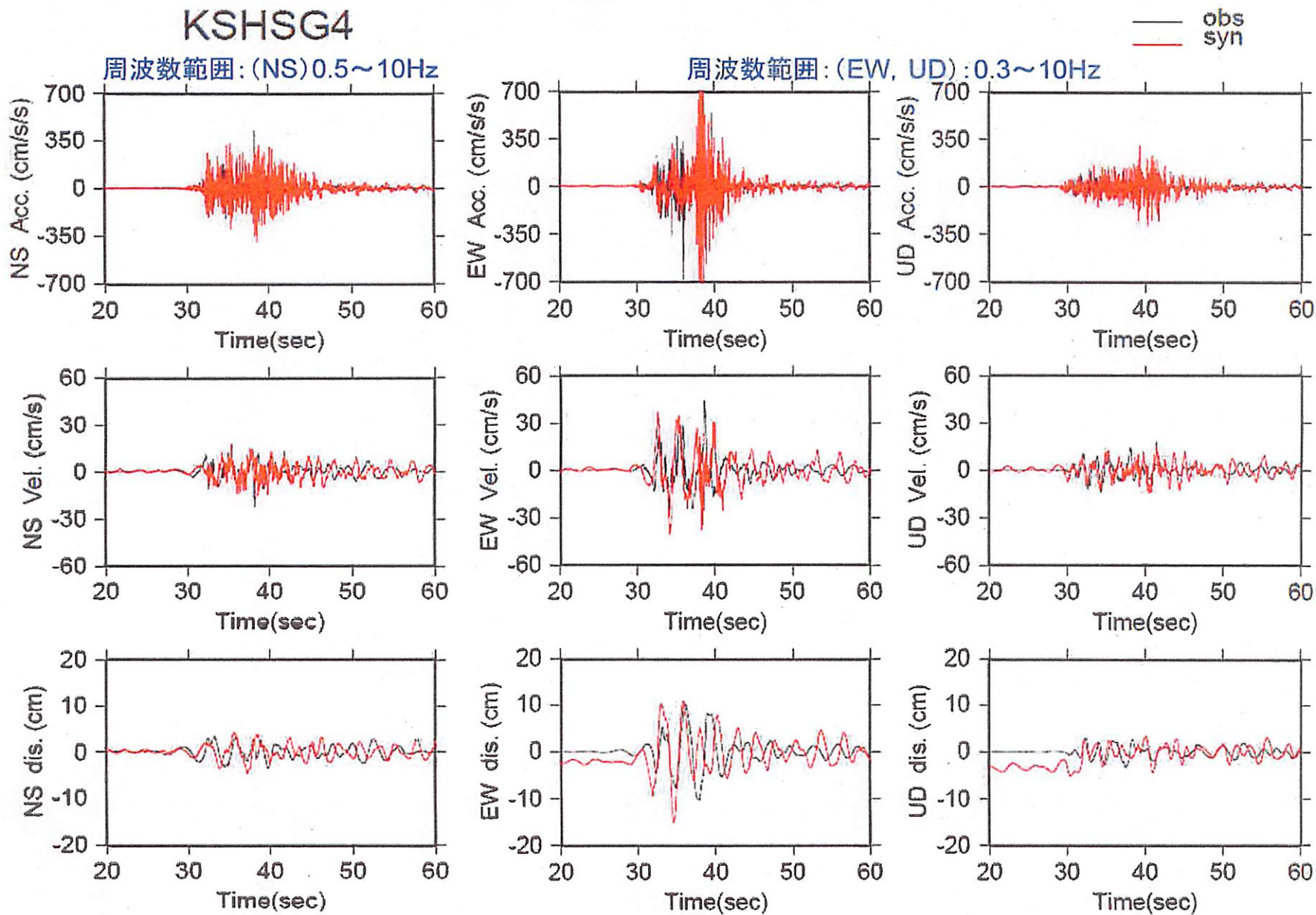
構築したモデルのメカニズム

strike	dip	rake
37	30	90

基準点

Latitude	Longitude	depth
37.391	138.341	5.5km

合成された強震動(赤)と観測記録(黒)との比較: KSHSG4(サービスホール最深観測点)

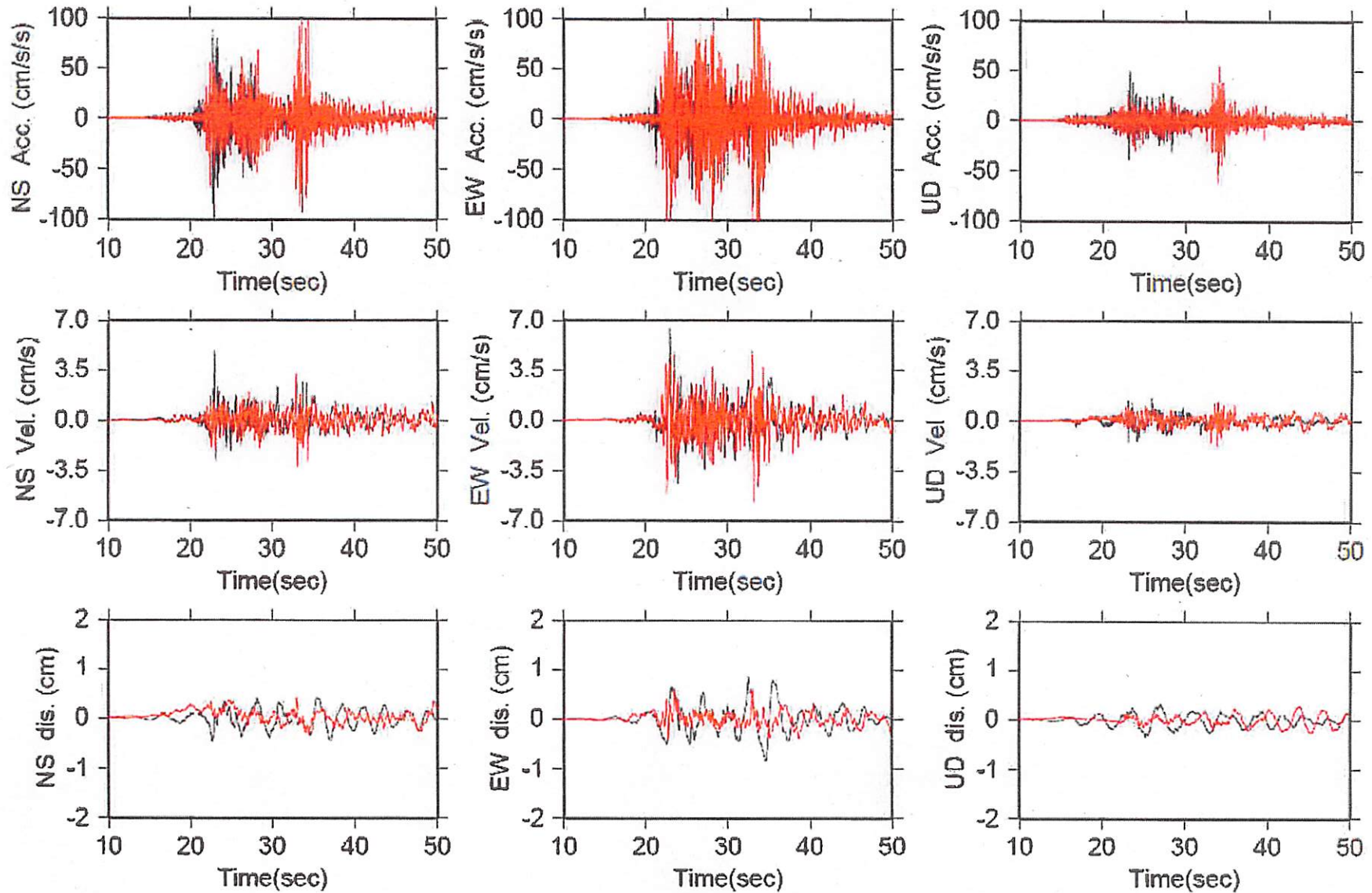


合成された強震動(赤)と観測記録(黒)との比較: NIG005(松ヶ崎)

NIG005

周波数範囲: 0.3~10Hz

— obs
— syn

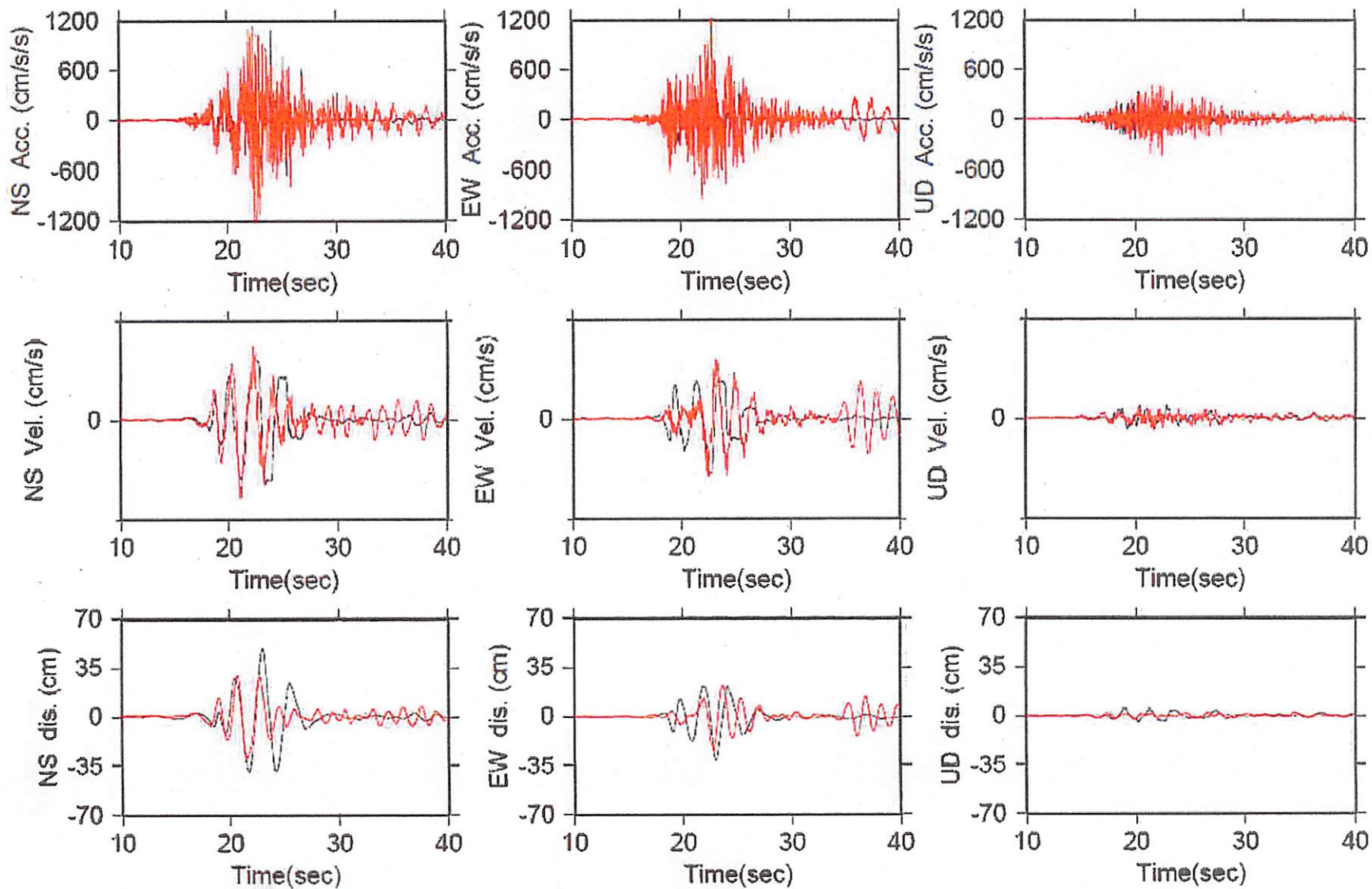


合成された強震動(赤)と観測記録(黒)との比較: NIG018(柏崎)

周波数範囲: 0.3~10Hz

NIG018

— obs
— syn

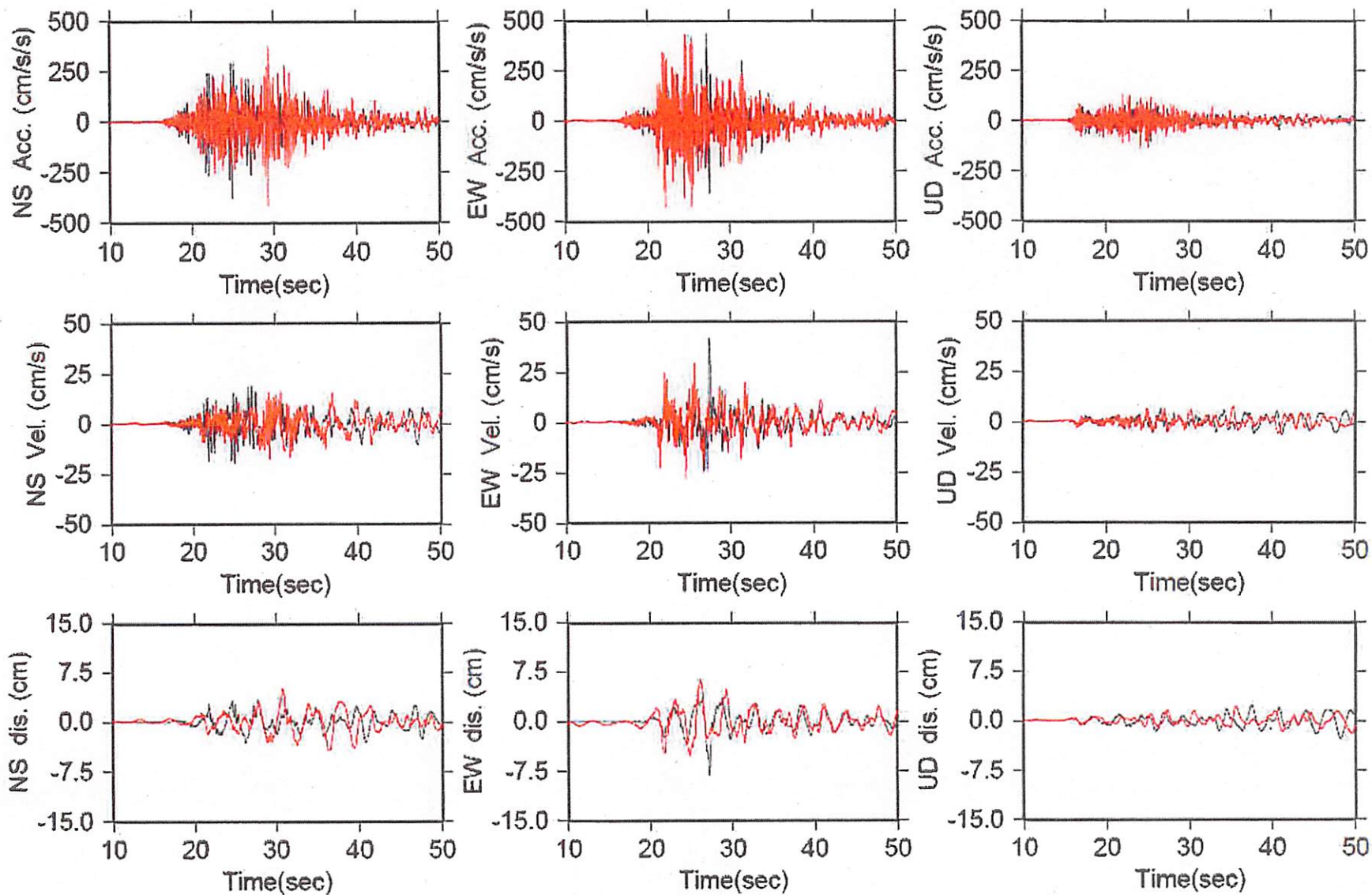


合成された強震動(赤)と観測記録(黒)との比較: NIG019(小千谷)

NIG019

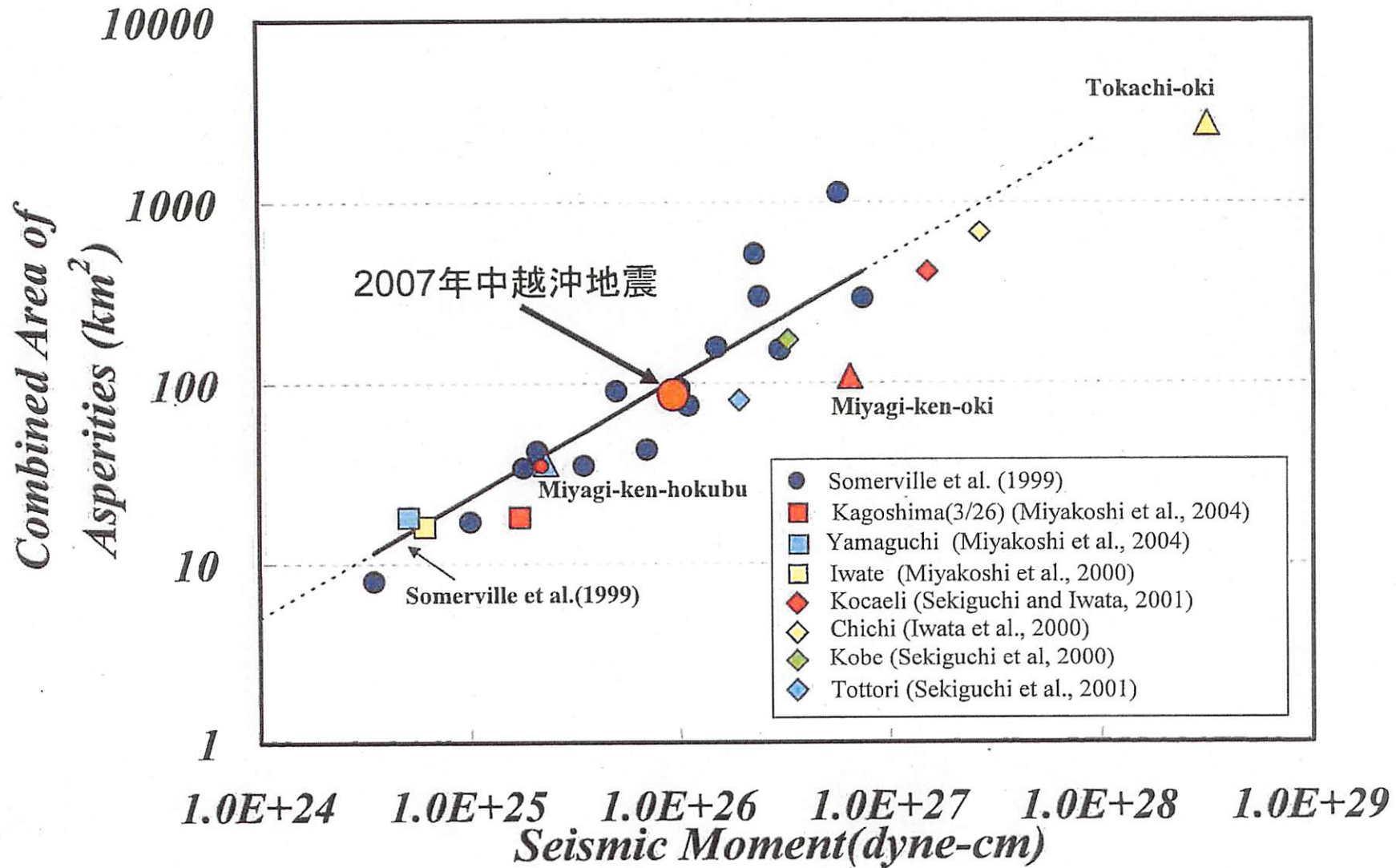
周波数範囲: 0.3~10Hz

— obs
— syn



アスペリティの総面積と地震モーメントの関係

宮腰(2003)に加筆



この関係は2007年中越沖地震が平均的地震であることを示している。

経験的グリーン関数法を用いて推定される震源断層モデル

- 3つのアスペリティからなる震源断層モデルにより合成された地震動は観測記録とよく一致する。
- とくに、柏崎刈羽原発の1号機および5号機の基礎版上の記録に見られる3つのパルス波がこの震源断層モデルで再現される。
- アスペリティの応力降下量は20~24MPaで、最近の他の地震のアスペリティの応力降下量に比べてやや大きめである。これは、地表断層を伴わない地震の傾向に対応する。
- この地震のアスペリティ総面積と地震モーメントの関係はこれまでの経験関係式とほぼ一致している。

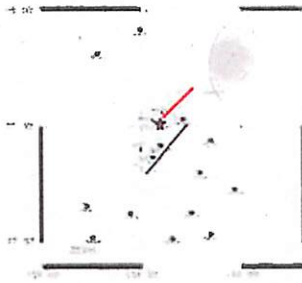
3. 理論的グリーン関数を用いた震源断層モデルの検証

離散化波数法(Bouchon, 1979)による理論的グリーン関数を用いて、3つのアスペリティからの理論地震動と観測記録を比較し、経験的グリーン関数法による震源断層モデルの検証を行う。

- 理論的グリーン関数を計算するために必要な地下構造モデルは、いくつかの余震について計算波形と観測記録の比較を行い、最適化を行う。
- 3つのアスペリティについて、理論的グリーン関数による計算波形と観測記録との比較により、アスペリティの位置および破壊開始点などのパラメータの再決定を行う。

地盤構造モデルおよび余震記録を用いた検証

2007/07/16, 21:08
Mj=4.4



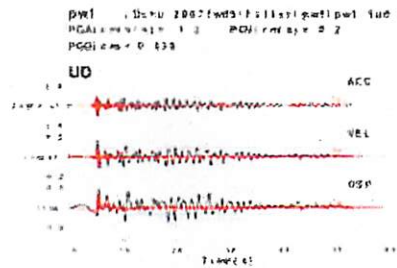
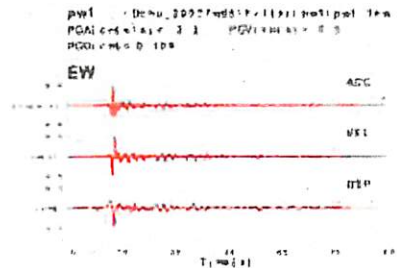
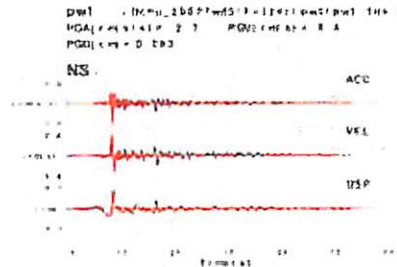
震源位置(JMA)	
緯度	37.509°
経度	138.630°
深さ	20.4km → 15.4km

震源メカニズム(F-net)	
Mo	5.21+E15Nm
strike	187°
dip	54° → 67°
rake	70°

※ KKZ1R2, KKZ5R2の地盤構造モデルは釜江・川辺(2007)を参照。

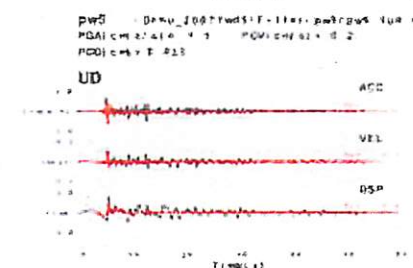
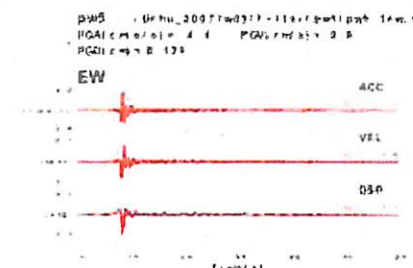
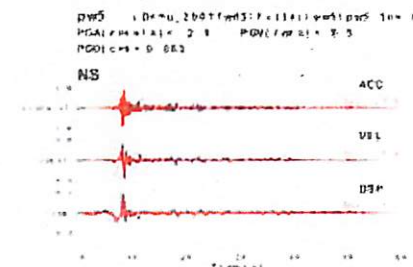
KKZ1R2(1号機基礎版上)

深さ(m)	PW1			
	層厚(m)	Vs(m/s)	Vp(m/s)	ρ (kg/m ³)
28	28	500	1800	1850
109	81	540	1750	1800
191	82	650	1800	2050
350	159	700	1850	2100
1500	1150	1400	3100	2250
2250	750	1700	3700	2350
3000	750	2000	4100	2400
5300	2300	2400	4700	2500
5600	300	3000	5500	2650
		3500	5800	2700



KKZ5R2(5号機基礎版上)

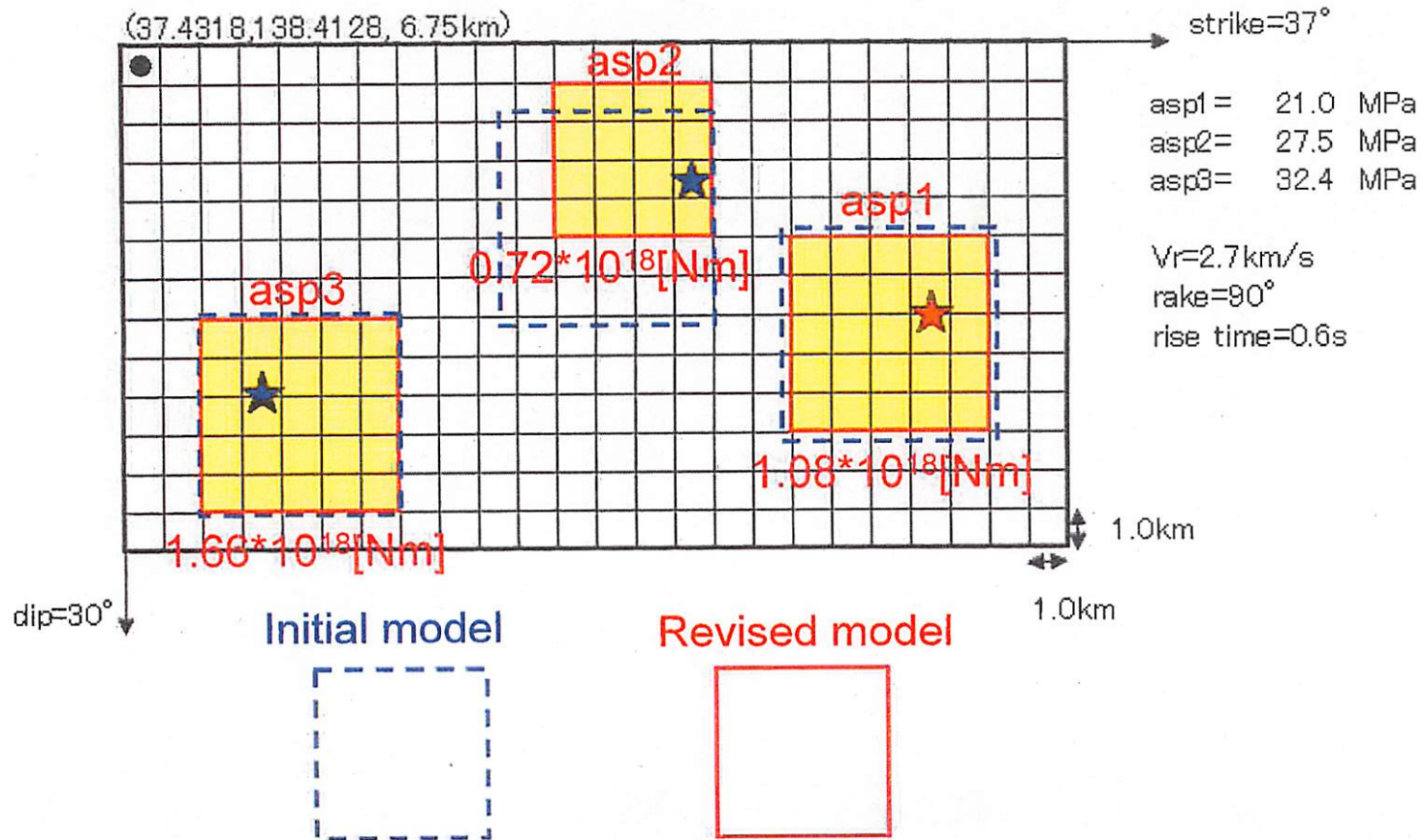
深さ(m)	PW5			
	層厚(m)	Vs(m/s)	Vp(m/s)	ρ (kg/m ³)
9	9	500	1730	1850
42	33	540	1750	1800
65	23	550	1780	1900
96	31	660	1930	1950
125	29	770	2000	2000
207	82	840	2020	2050
242	35	860	2120	2100
400	158	870	2290	2100
2250	1850	1700	3700	2350
3000	750	2000	4100	2400
5300	2300	2400	4700	2500
5600	300	3000	5500	2650
		3500	5800	2700



0 0 1 0 1 2 2 0 0 1 1 VEL

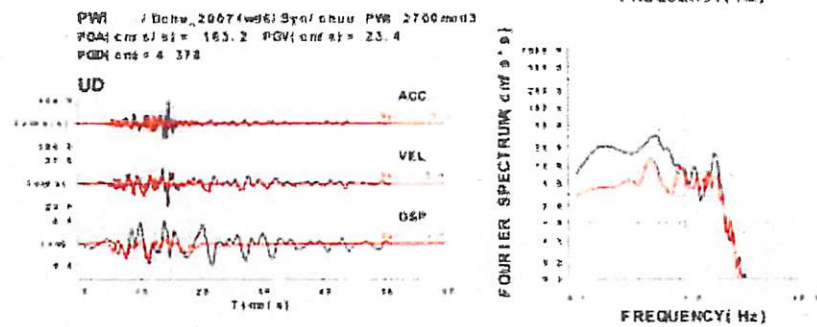
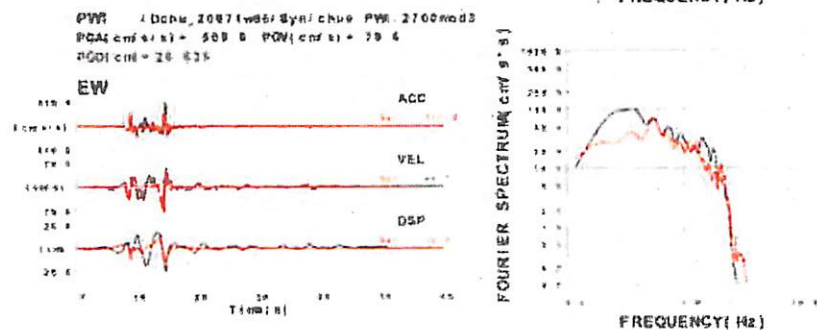
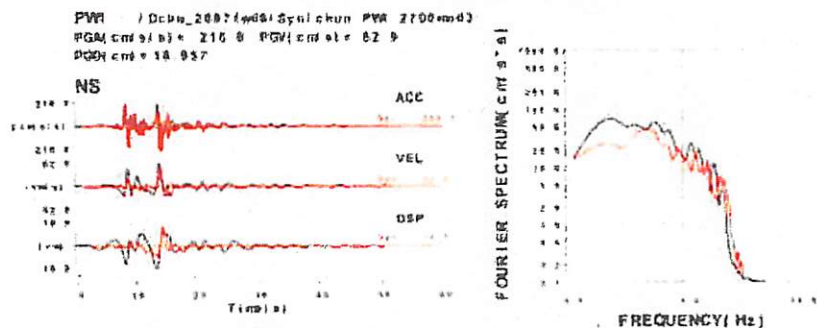
0 0 1 0 1 2 2 0 0 1 1 VEL

震源モデルの改良とそのパラメータ



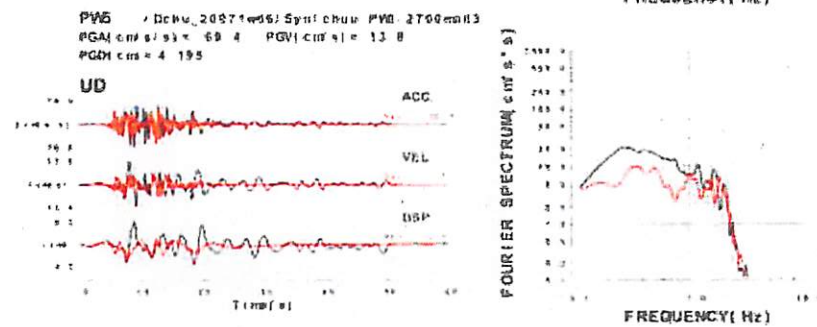
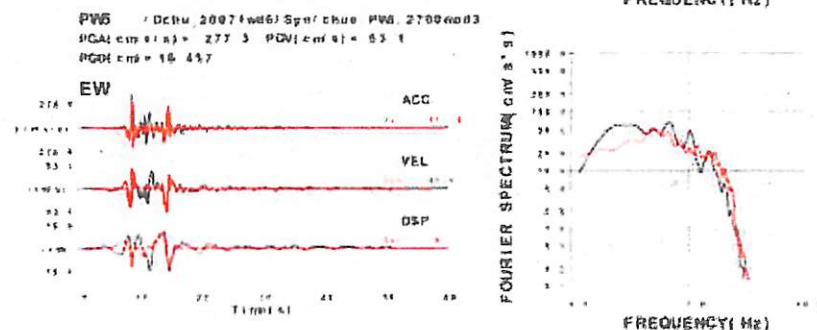
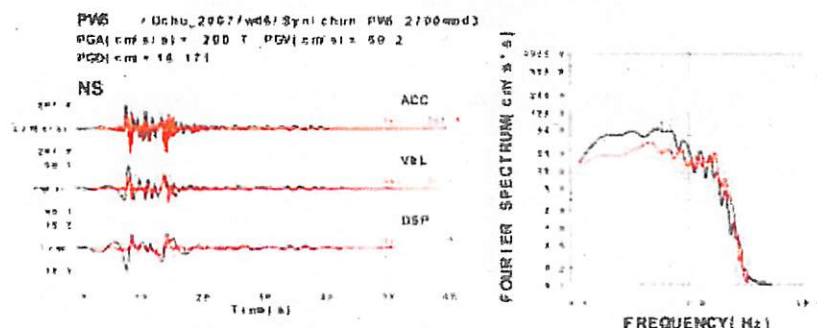
計算された地震動(赤)と観測記録(黒)の比較: (1) 柏崎刈羽原発1号機および5号機基礎版上

KKZ1R2(1号機基礎版上)



0.5 P (0.2 ~ 2.5Hz) VEL

KKZ5R2(5号機基礎版上)



0.5 P (0.2 ~ 2.5Hz) VEL

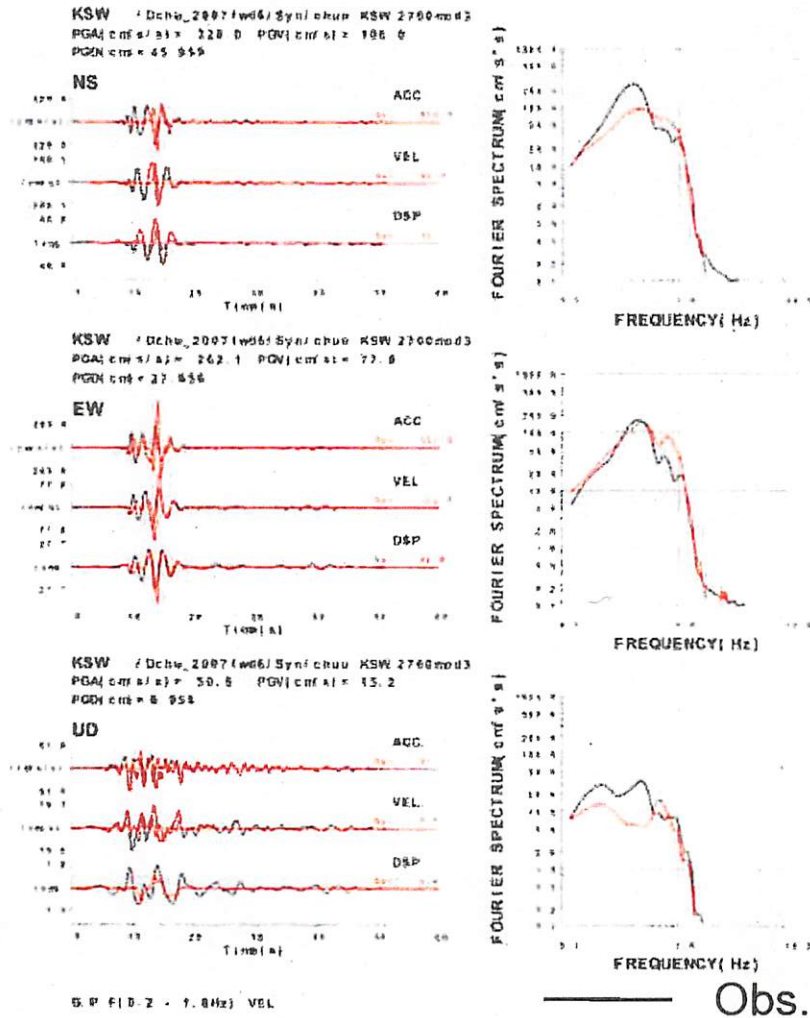
— Obs.

— Syn.

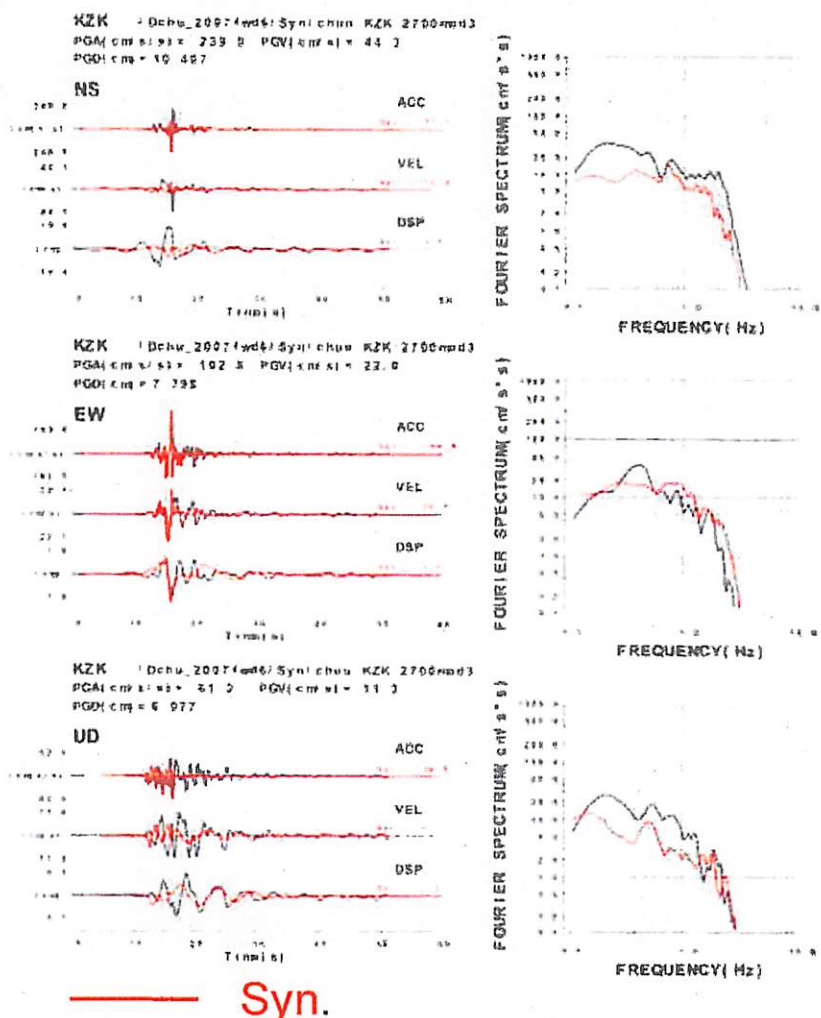
計算された地震動(赤)と観測記録(黒)の比較: (2) NIG018(K-NET柏崎)およびF-net柏崎

NIG018(K-NET柏崎)

F-net 柏崎(NS成分に不具合あり)



※1)地盤構造モデルは後藤・他(2007)を参考に作成



※2) 地盤構造モデルはJNES(2004)を参考に作成

理論的グリーン関数を用いた震源断層モデルの検証結果

- 理論的グリーン関数を用いたシミュレーションと観測記録の比較で、3つのアスペリティからなる震源断層モデルの有効性が検証された。
- とくに、アスペリティ3から柏崎刈羽原発1号機および5号機におけるシミュレーションの速度波形は観測波形によく一致する。
- アスペリティ3の破壊開始はアスペリティ内部に設定したとき、シミュレーション波形が観測波形に一致する。
- 各アスペリティの応力降下量は経験的グリーン関数法によるものに比べてやや大きい。しかしながら、シミュレーション波形の振幅レベルは計算に用いた速度構造に依存するので、さらなる検討が必要とされる。

4. 柏崎刈羽原子力発電所の強震動の生成メカニズム

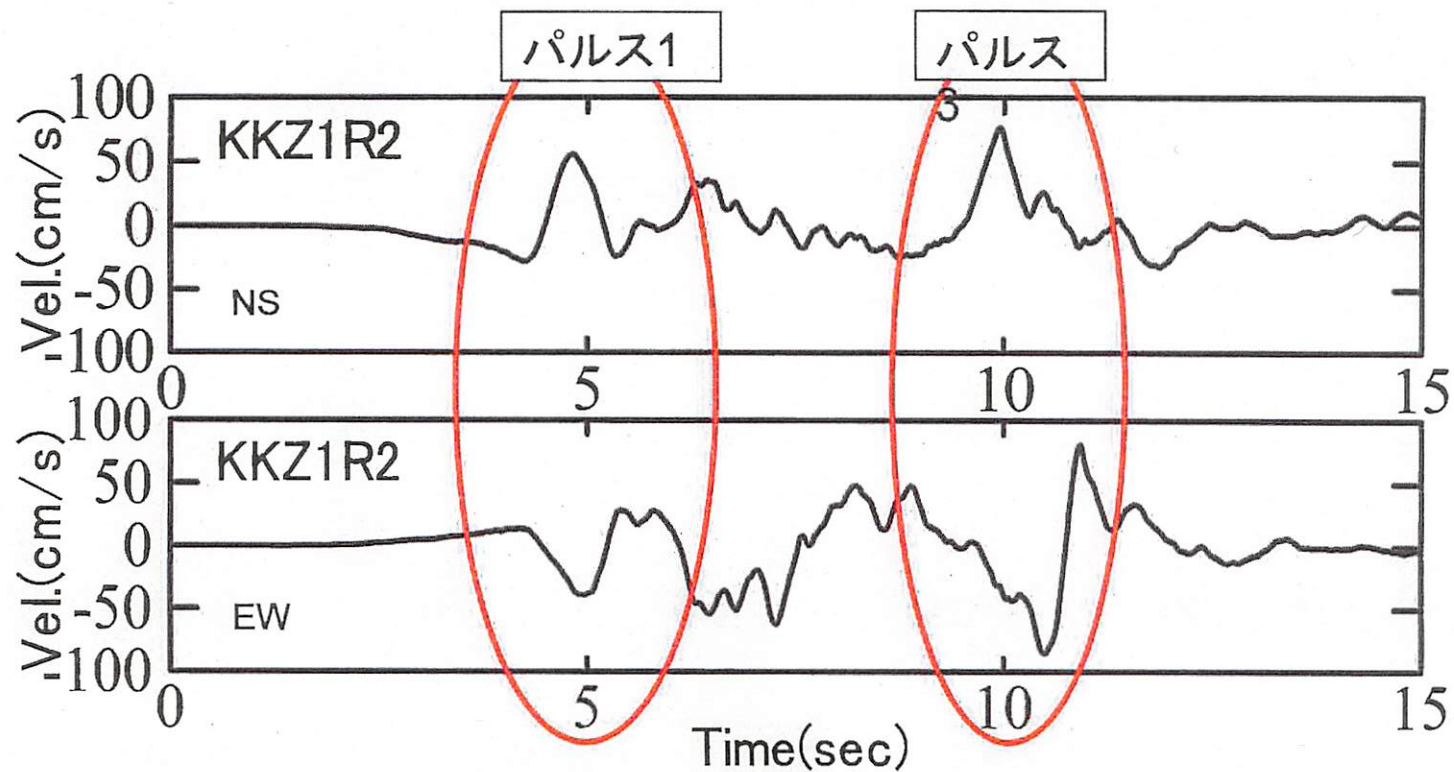
- アスぺリティ1から柏崎刈羽への地震動はNS成分がEW成分が大きい。一方アスぺリティ3からの地震動はEW成分がNS成分よりも大きい。これらの地震動特性はアスぺリティの走行、傾斜角、およびすべり角による放射特性に依存する。
- アスぺリティでのすべりメカニズムを与えて、柏崎刈羽原発への放射特性を計算する。
- アスぺリティからの放射特性は、完全無限媒質中に点震源を設定した場合、および平行層構造モデルに面震源を設定した場合、に対して評価。
- アスぺリティの破壊開始点を変えた場合のシミュレーション波形への影響について検証。

アスペリティ1とアスペリティ3からKKNPPへの放射特性 その1

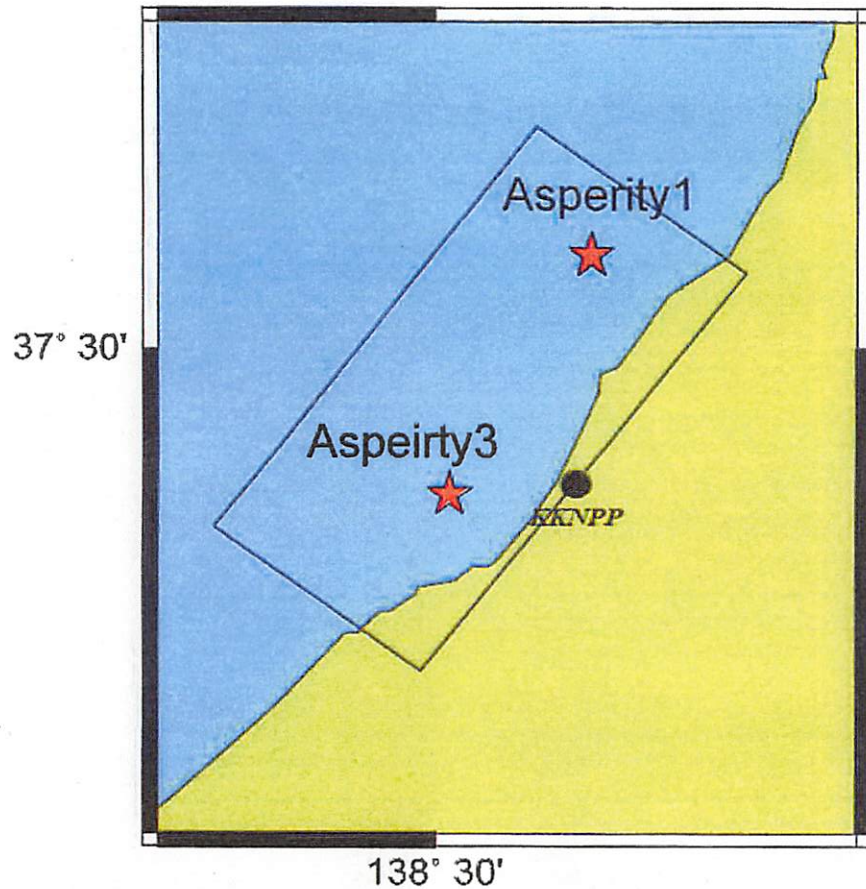
-KKNPPの1号機基礎マットの観測記録-

下図にKKNPPの1号機基礎マットの速度波形を示す。

- ・アスペリティ1によるパルス1のNS成分とEW成分の振幅関係は、NS成分が若干大きい。
- ・アスペリティ3によるパルス3は、EW成分の方が若干大きい。



アスペリティ1とアスペリティ3からKKNPPへの放射特性 その2



アスペリティ1と3とKKNPPとの位置関係

推定したアスペリティ1とアスペリティ3からKKNPPへの放射特性と観測波形との比較により、アスペリティ1と3の位置および傾斜角の検討を行った。

アスペリティ1とKKNPPとの位置関係は、震央距離:14.8km, 方位角185°

アスペリティ3とKKNPPとは震央距離7.6km, 方位角:80.4° である。

震源メカニズムは

STR:37° DIP:30° RAKE:90°

とする。

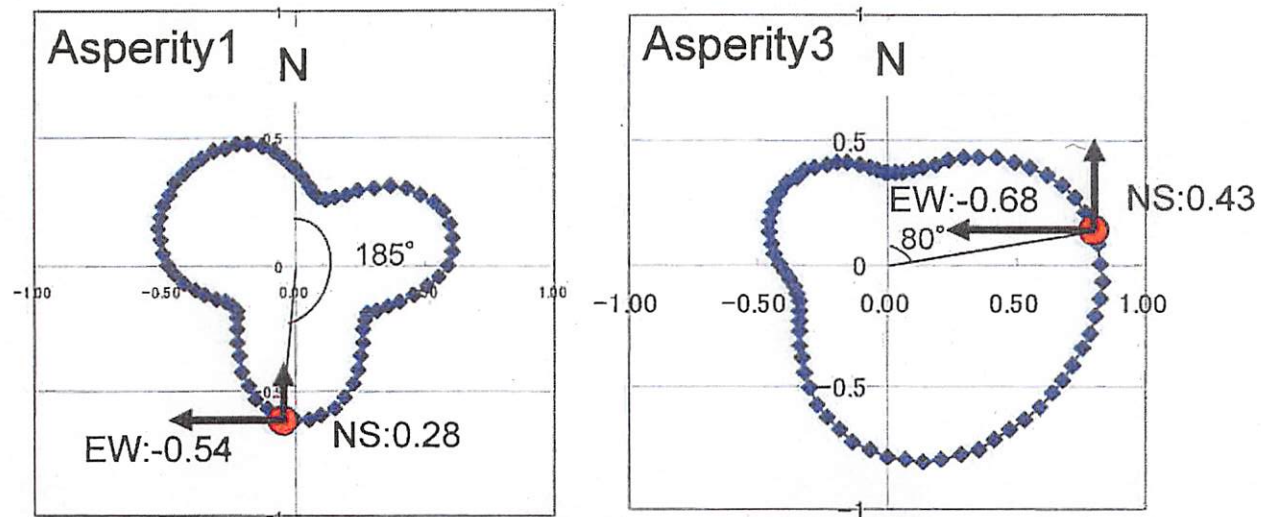
	Asperity1	Aspeirty3
震央距離	14.8km	7.6km
方位角	185.0°	80.4°
深度	11.5km	10.0km

方位角は震源からKKNPPに対する北から時計周りの角度

アスペリティ1とアスペリティ3からKKNPPへの放射特性 その3

下図は、完全無現媒質を仮定したとき、震源から観測方向(グラフ上が北)への放射特性を示す。(プロット点は、NSとEW成分のベクトル合成)。赤点はKKNPPへの観測方向を示しており、矢印はその地点におけるNSとEW方向の放射特性を示している。

- ・Asperity1からKKNPPへの放射特性は、NS成分は0.28, EW成分は-0.54であった。この結果は、観測記録のNS成分とEW成分の振幅の関係と逆である。
- ・Asperity3からKKNPPへの放射特性は、NS成分は0.43, EW成分は-0.68であり、観測記録の振幅の関係と整合的である。



アスペリティ1とアスペリティ3から方位角方向への放射特性(グラフ上が北)

方位角は、震源から対象地点に対する北から時計回りの角度を示す。

アスペリティ1とアスペリティ3からKKNPPへの放射特性 その4

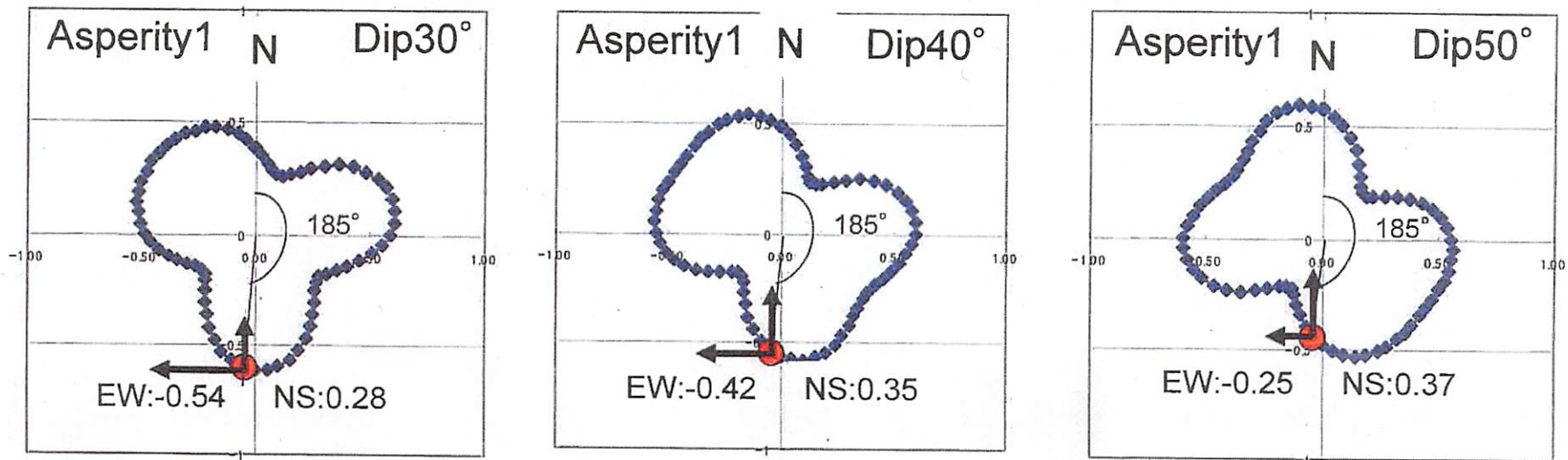
Str: 37° dip: 30° rake: 90° の断層面における放射特性を計算した結果, アスペリティ1からKKNPPへの放射特性は, 観測記録のNS成分とEW成分の振幅の関係と整合しない.

国土地理院や堀川モデルは, 北東側と南西側の断層面の傾斜角を変えてモデル化しており, どちらのモデルも傾斜角は, 北東側の方が大きい. (国土地理院, 堀川はdip: 55° としている.)

そこで, アスペリティ1の傾斜角を 30° , 40° , 50° に変化させて放射特性を計算した.

- その結果, 傾斜角を大きくするほど, NS成分が大きくなりEW成分が小さくなる傾向にある.

- したがって, 放射特性と観測記録との関係では, 北東側の断層面の傾斜角は, 南西側よりも大きいと考えられる.

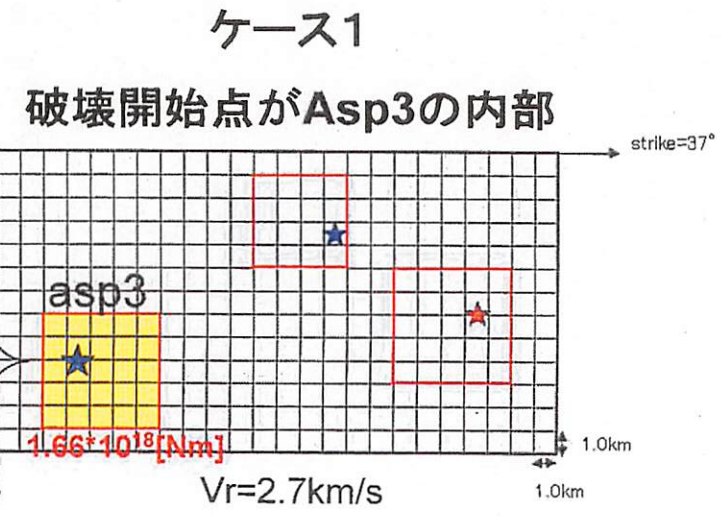
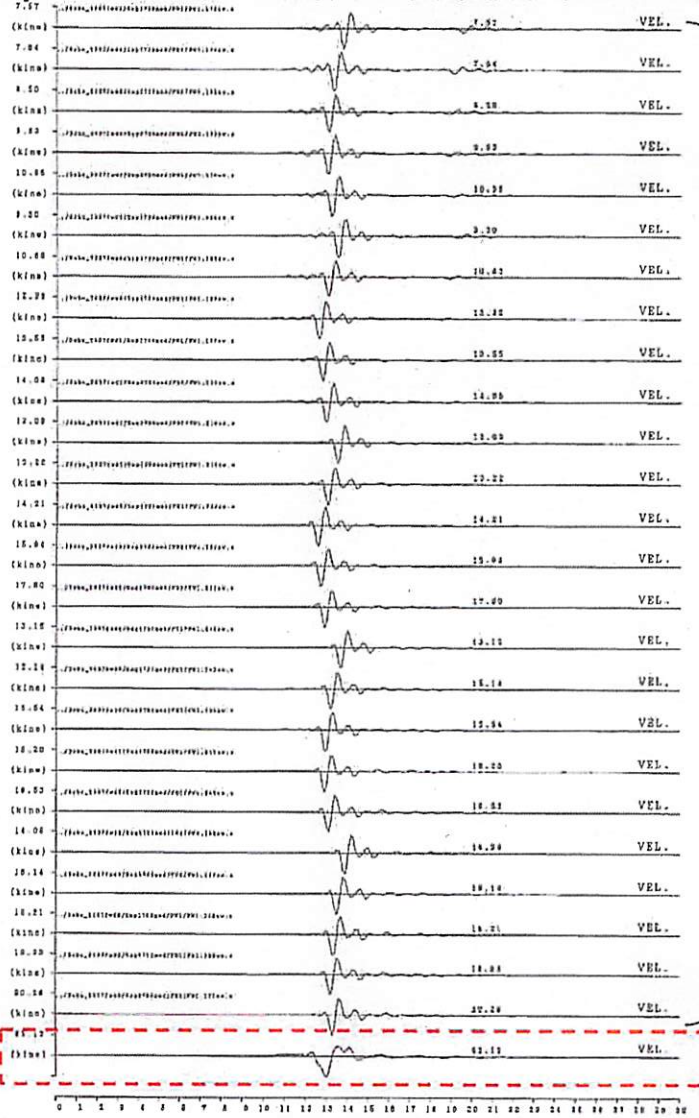


傾斜角を変化させた場合のAsperity1からKKNPPへの放射特性

大振幅の地震動生成のメカニズム(平行構造を仮定した理論計算)

その1:破壊開始点をアスペリティ内部に設定

Asp3における各小断層での要素波形(KKZ1R2(1号機基礎版上)への寄与



Asp3内の各要素波形のピークの位相が一致することで大振幅を生成。

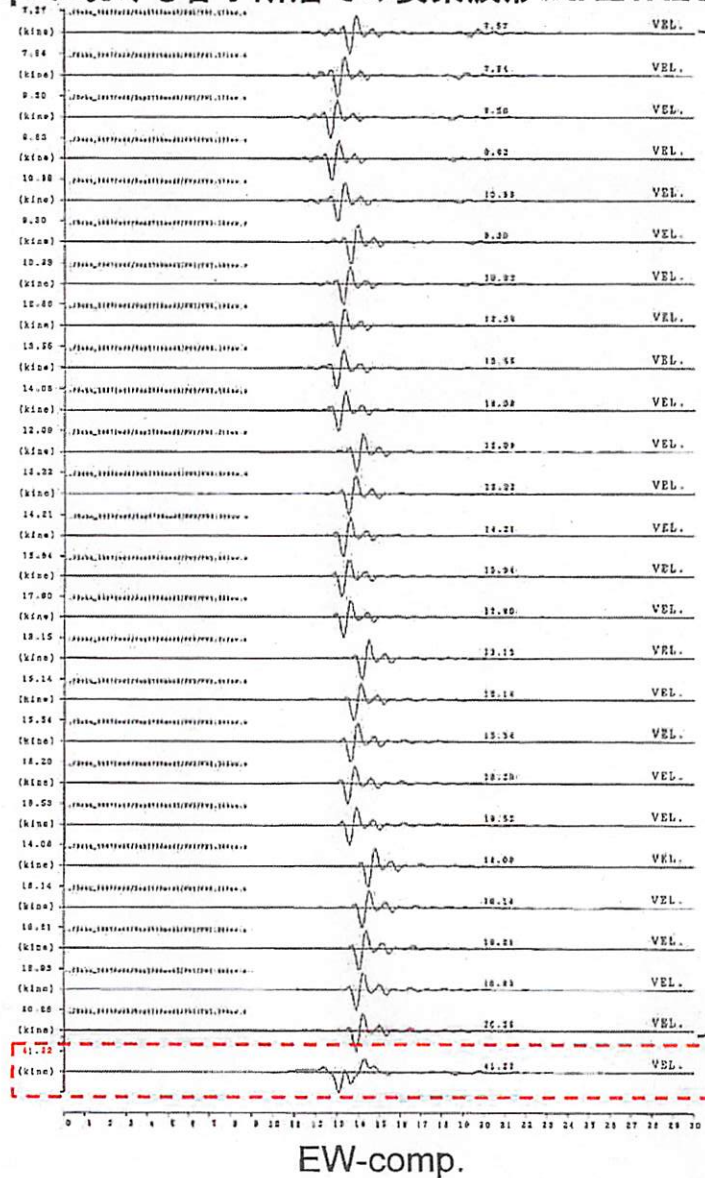
合成速度波形(Vmax=63.1cm/s)

EW-comp.

大振幅の地震動生成のメカニズム(平行構造を仮定した理論計算)

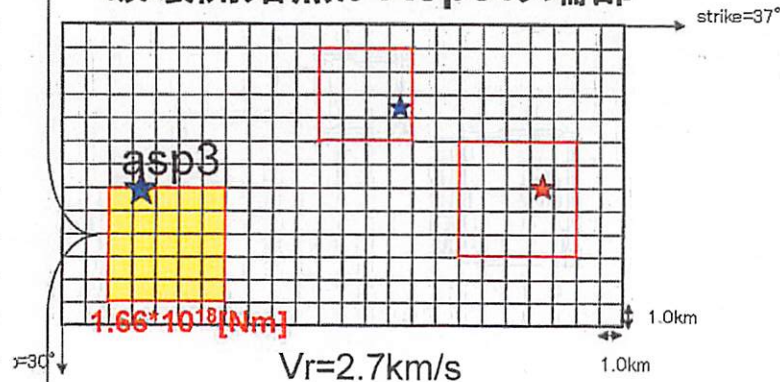
その1:破壊開始点をアスペリティ内部に設定

Asp3における各小断層での要素波形:KKZ1R2UT1(1号機基礎版上)への寄与



ケース2

破壊開始点がAsp3の端部



ピークの位相がずれて大振幅にならない。

合成速度波形(Vmax=41.2cm/s)

柏崎刈羽原子力発電所の強震動

- 走行N37E、傾斜角30度の1枚の震源断層を設定したとき、アスペリティ3の位置は柏崎刈羽に対する放射特性が最大の方向に当たる。
- 柏崎刈羽でのパルス1の特徴を説明するにはアスペリティ1の傾斜角を50度程度の高角とする必要がある。
- アスペリティ3からの柏崎刈羽原発の1号機の観測記録を説明するには、アスペリティの破壊開始の位置をアスペリティの外縁ではなくアスペリティの内部に設定する必要がある。これは必ずしも破壊開始点がアスペリティの内部にあるわけではなく、震源特性と伝播経路特性の複合的効果としてフォーカシング効果のモデル化に対応するものと考えられる。

5. まとめと今後の課題 —その1—

1. 2007年新潟県中越沖地震を引き起こした震源断層は、OBS(海底地震計)の結果に基づく余震分布の再決定から、南西から北東方向の走行で南東傾斜の断層が有力視されている。地殻変動データ、津波データについても上記のモデルで矛盾しない結果が得られる。
2. 強震動の最大値の距離減衰関係は全般的にはこれまでの距離減衰式によく一致するが、震源断層に近い柏崎刈羽原発の強震動は経験式よりも顕著に大きい。
3. 震源近傍の強震動記録から推定される震源断層モデルは、3つのアスペリティを有している。柏崎刈羽原発で観測された3つのパルス波は3つのアスペリティから地震動に対応している。

まとめと今後の課題 ーその2ー

4. 柏崎刈羽原発の観測記録がこれまでの経験的關係に比べて大きくなったのは以下の原因があげられる。
 - あ. 柏崎刈羽原発付近の地震基盤から地表や地中観測点までの増幅特性は、他の硬質地盤の増幅特性に比べて顕著に大きい。
 - い. アスペリティ3の位置は柏崎刈羽に対する放射特性が最大となる方向に当たる。
 - う. 柏崎刈羽原発の1号機の地表および基礎版における強いパルス波は、アスペリティ3の破壊過程と伝播経路の波動伝播の複合的効果によるフォーカシングにより形成された可能性がある。
5. 柏崎刈羽原発における強いパルス波の生成をより詳細に解明するには、震源域から対象サイトに至る伝播経路の3次元地下構造の調査が必要とされる。

謝 辞

本報告では独立行政法人防災科学研究所のK-NETおよびKik-Netによる強震動観測記録を使用させていただきました。

2007年新潟県中越沖地震に関する調査研究については各関係機関が文部科学省地震調査委員会で発表した資料を使用させていただきました。

関係機関および関係者の皆様に深く感謝します。