

# 2007年新潟県中越沖地震の 強震動と震源断層モデル

2007年9月10日地震調査委員会提出資料

**入倉孝次郎（愛知工業大学地域防災センター）**

**協力:**

**宮腰 研(地域 地盤 環境研究所)**

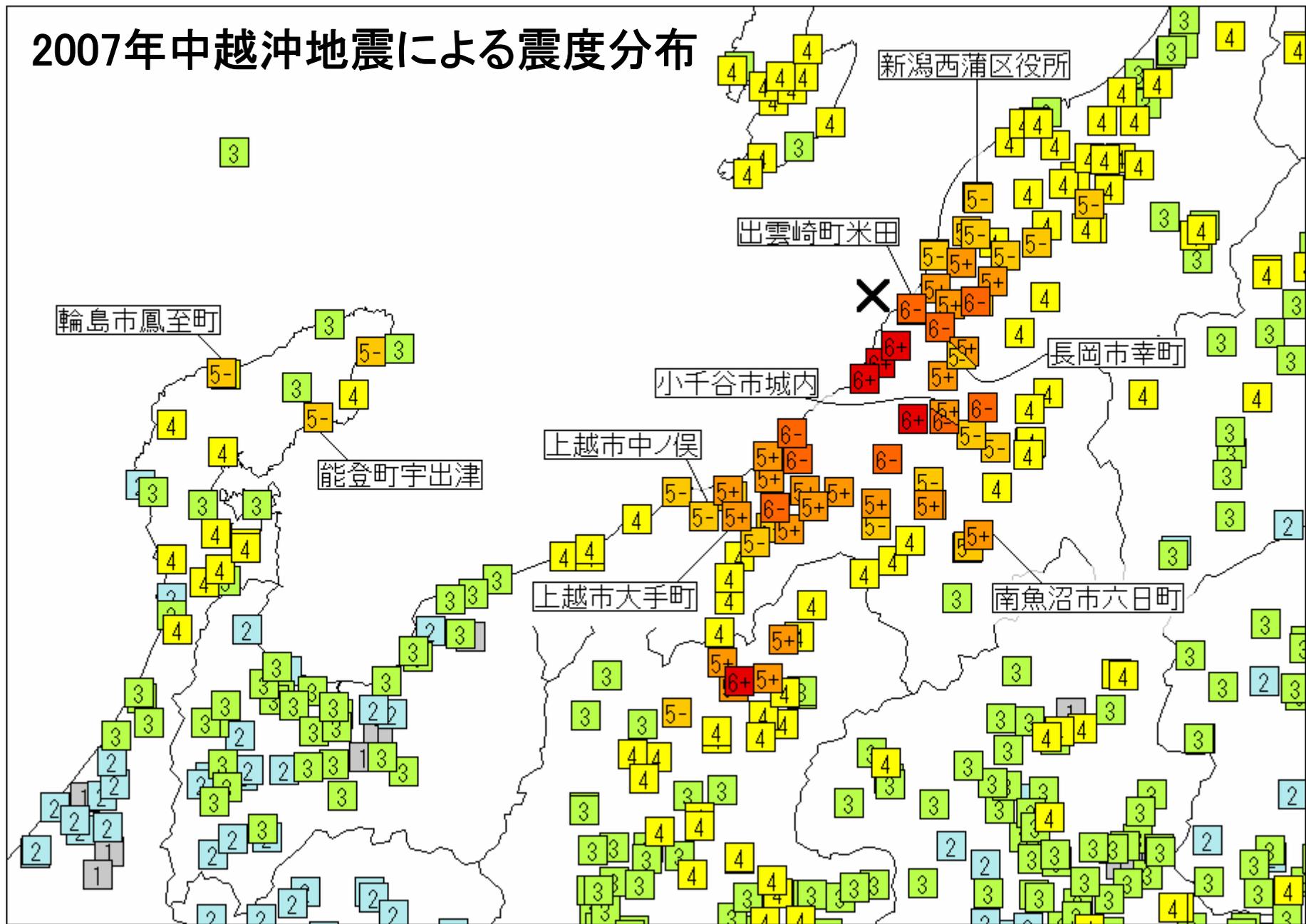
**倉橋 奨(愛知工業大学)**

1. 2007年中越沖地震の強震動の距離減衰
2. 強震動記録からみた震源モデル
3. 柏崎刈羽原子力発電所を襲った  
ディレクティビティ・パルス
4. まとめ

# 1. 2007年中越沖地震の強震動の距離減衰—震源で生成された強震動はこれまでの同規模地震(M 6.8気象庁)に比べて大きかったのか？

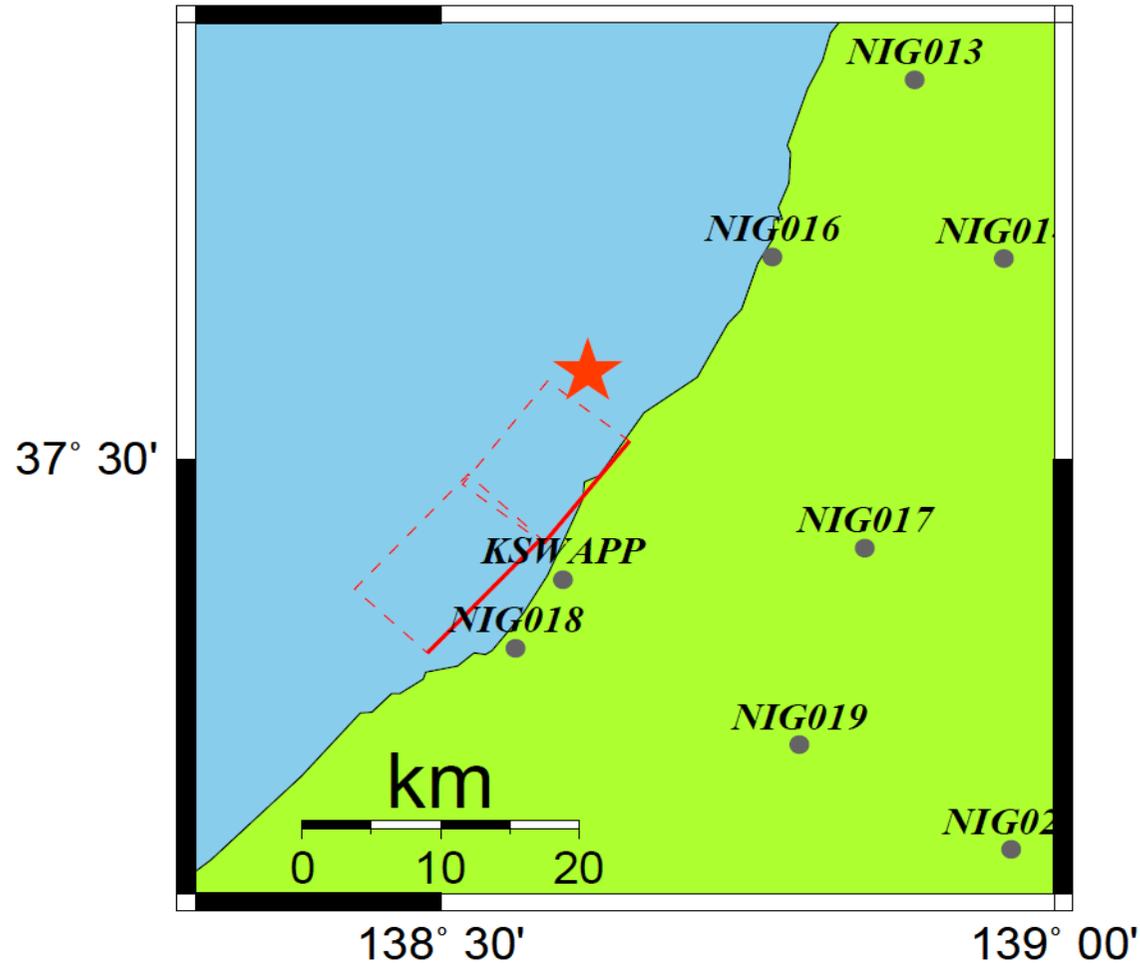
- 地表で観測された地震動の最大加速度(観測点の地盤分類なし)は経験的距離減衰式(司・翠川, 1999)にほぼ従っている。しかし、震源域近くの柏崎刈羽原発での地表の最大加速度は経験式に比べてやや大。
- 岩盤上で観測された地震動の最大加速度の経験的距離減衰式(Fukushima and Tanaka, 1990)と比べると、柏崎刈羽原発の岩盤地中で得られた最大加速度は極めて大きい。
- 岩盤での経験的関係式と観測データを適切に比較するには、岩盤地中記録から岩盤地表地震動の推定(いわゆる「はぎとり」解析)が必要。「はぎとり」解析による柏崎刈羽原発での岩盤の表面での地震動は観測値よりも大きくなる。
- 上記の解析結果から、この地震の強震動は全般的には従来の経験的距離減衰式とほぼ同レベルとなるが、柏崎刈羽原発の岩盤での観測記録は岩盤データの経験的距離減衰式に比べて顕著に大きい、ことがわかる。
- このことから、柏崎刈羽原発が破壊的な強震動を受けたことは震源断層の破壊メカニズムに強く影響していることが示唆される。

# 2007年中越沖地震による震度分布



(気象庁, 2007)

## 最大加速度の距離減衰式を作成するために 用いた震源断層モデル

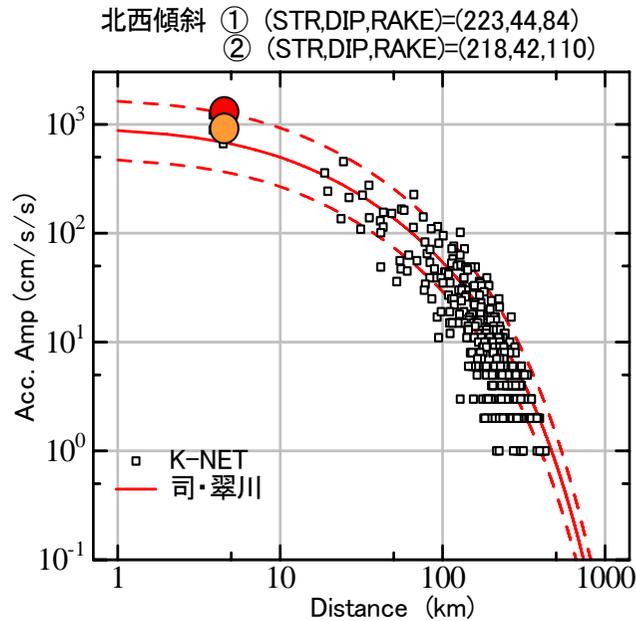


国土地理院により地殻変動データから推定された震源断層モデル(北西傾斜)

北東側セグメント 走向  $223^{\circ}$  , 傾斜角  $44^{\circ}$  , すべり角  $84^{\circ}$  , すべり量 1.47m

南西側セグメント 走向  $218^{\circ}$  , 傾斜角  $42^{\circ}$  , すべり角  $110^{\circ}$  , すべり量 1.39m

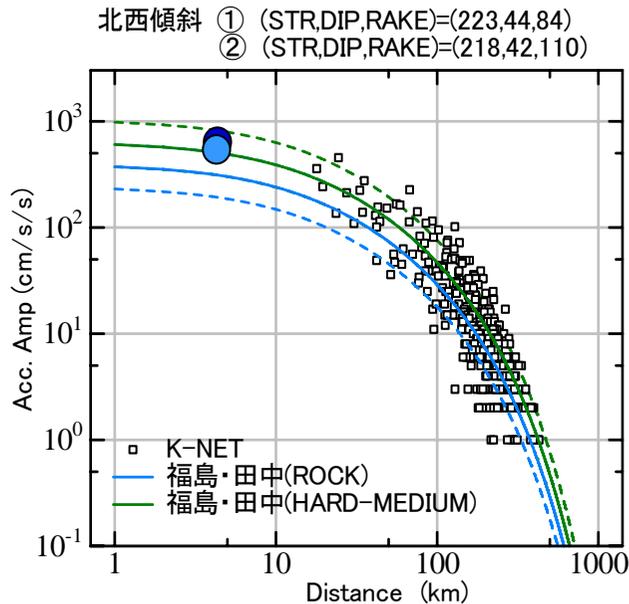
## 地表観測に対する最大加速度の距離減衰式との比較



司・翠川(1999)の最大加速度(地表)の距離減衰式と比較するために、観測値はNSとEW成分の大きい方の値をプロット。

- 1号機地震小屋地表 890gal
- 5号機地震小屋地表 1223gal

## 岩盤地表上の観測に対する距離減衰式との比較



青実線は岩盤(地表)観測の経験式、緑実線は中及び硬質地盤(地表)観測の経験式 (Fukushima and Tanaka, 1989)

- はK-NETの地表観測点(地盤分類なし)の記録
- 、● は柏崎刈羽原発の岩盤地中(500 m/s)記録

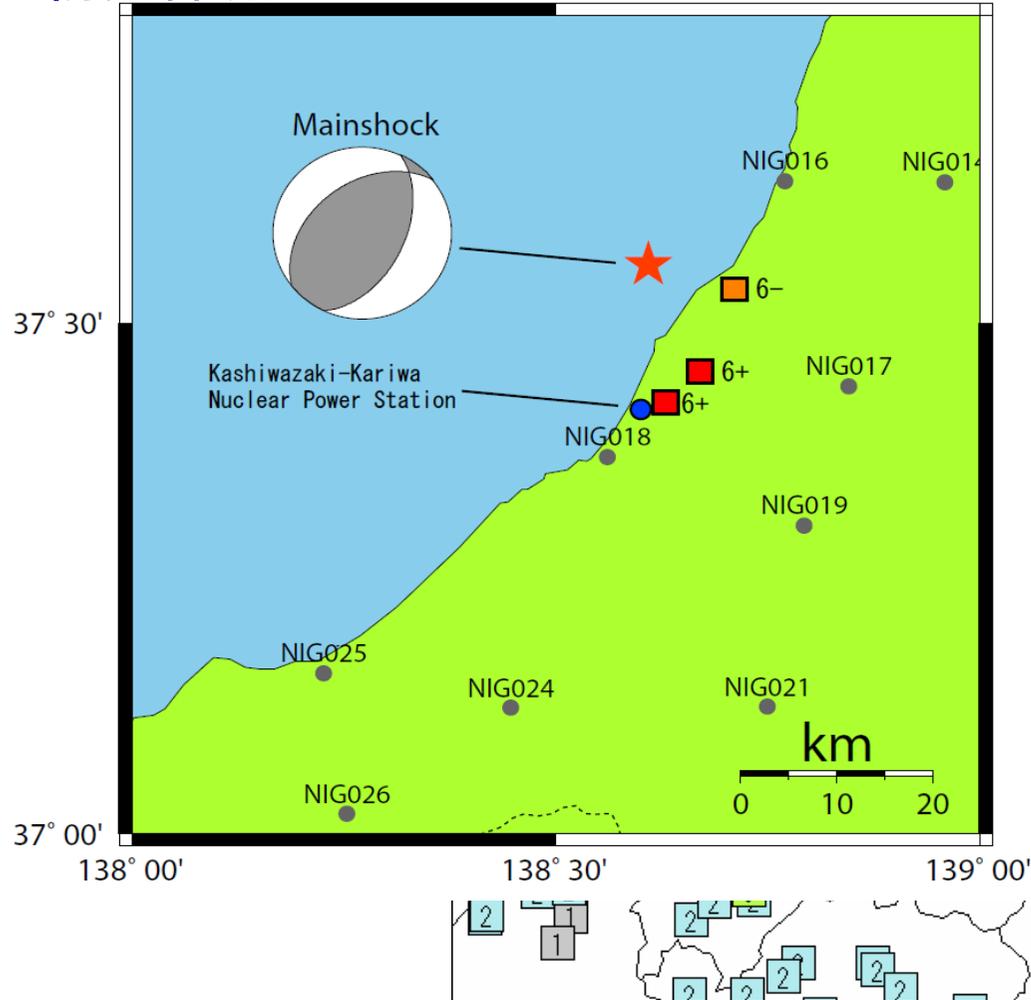
- 1号機基礎版上 680gal
- 2号機基礎版上 606gal

## 2. 強震動記録から推定される断層破壊過程

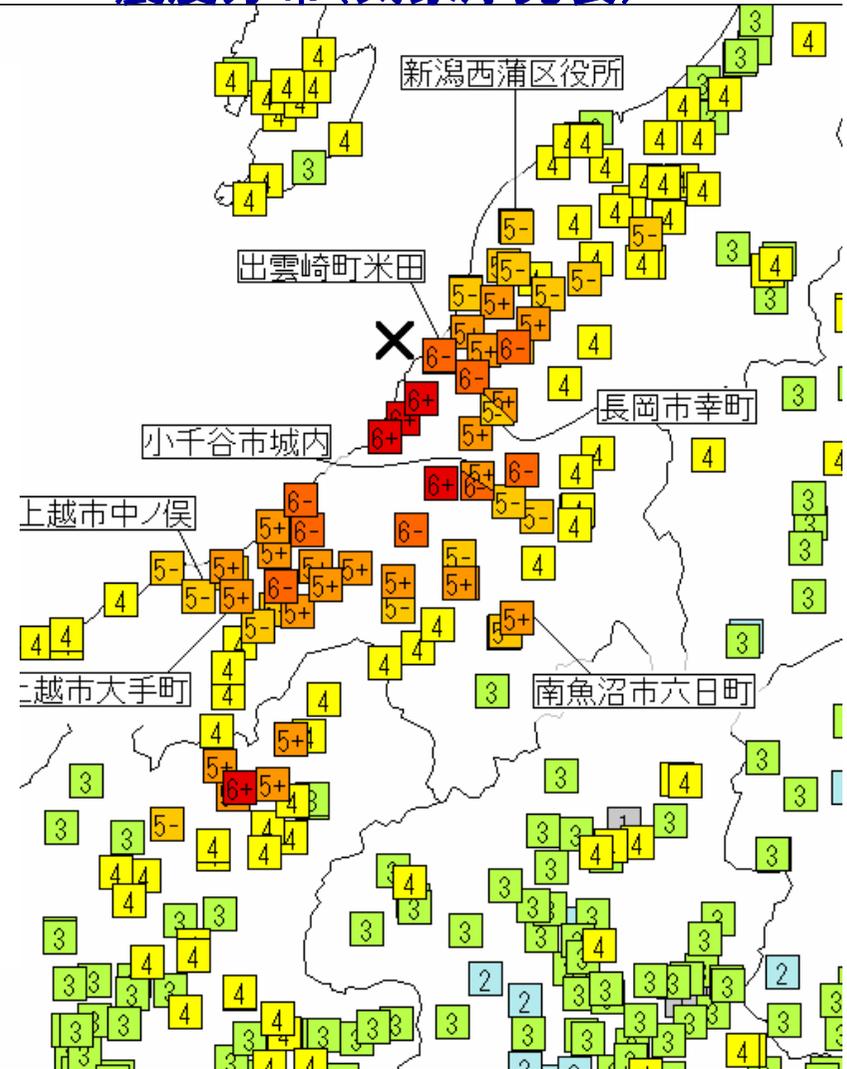
- 経験的グリーン関数法を用いて、フォーワード・モデリングによる震源断層モデルを検討する。
- 震源断層は南東傾斜か北西傾斜かの決着はついていないが、予備的解析の結果刈羽村から柏崎市にかけての沿岸地域の大きな強震動および強震動記録に顕著に見られるパルス波形を説明するためには、北西傾斜の震源断層の可能性が示唆された。
- しかしながら、佐渡側の強震動観測点における強震動記録を説明するためには、南東傾斜の分岐断層の存在の可能性も否定できない。
- ここでは、北西傾斜の震源断層を仮定して震源のモデル化を行った。その結果、3つのアスペリティをもつ特性化震源モデルを用いて、西山町、刈羽村、柏崎市など震源近傍域のみならず広域の強震動記録を再現できることがわかった。しかしながら、佐渡側の観測点の強震動は過小評価となる。
- 柏崎刈羽原発において顕著に大きい地震動が記録されたのは、柏崎沖約 7 km、深さ約 7 kmにあるアスペリティが海側から陸側に向かって破壊したため、柏崎刈羽原発の方向にディレクティビティ・パルスが生じたことによる、考えられる。

# 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)



# 遠地波形記録を用いた波形インバージョンによる断層破壊過程

走向、傾斜、すべり角 (218,63,85)

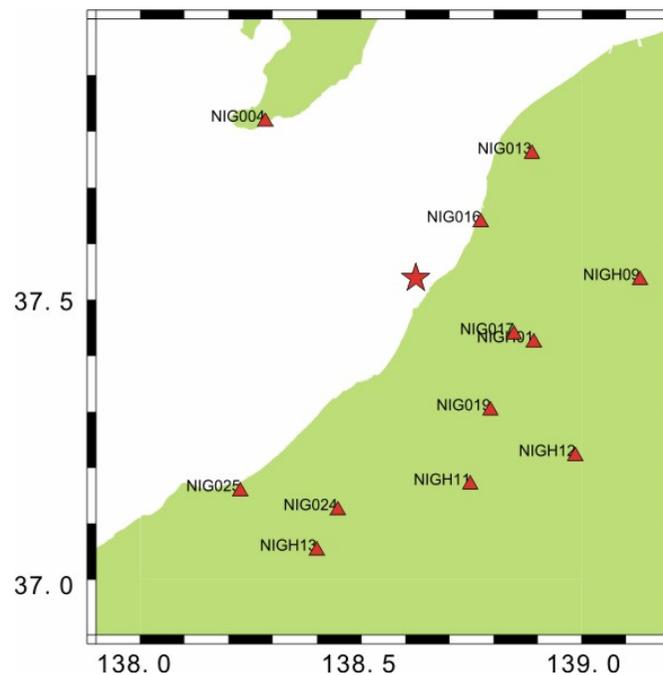
地震モーメント  $7.3 \times 10^{18}$  Nm

Mw 6.5

破壊継続時間 30 s

深さ 12 km

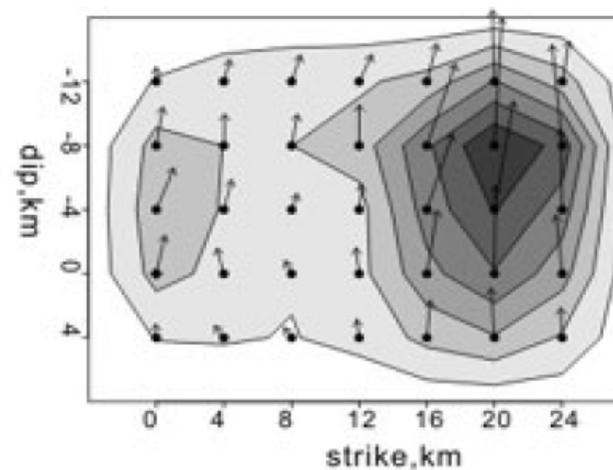
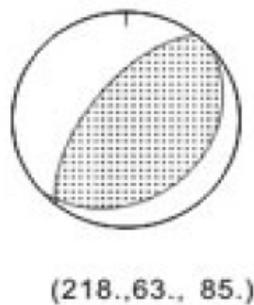
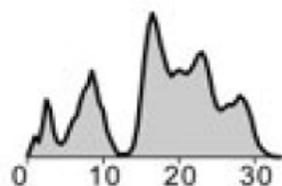
最大すべり量 0.9m



Niigata-oki 07/07/16

1.0 1.0 .5517

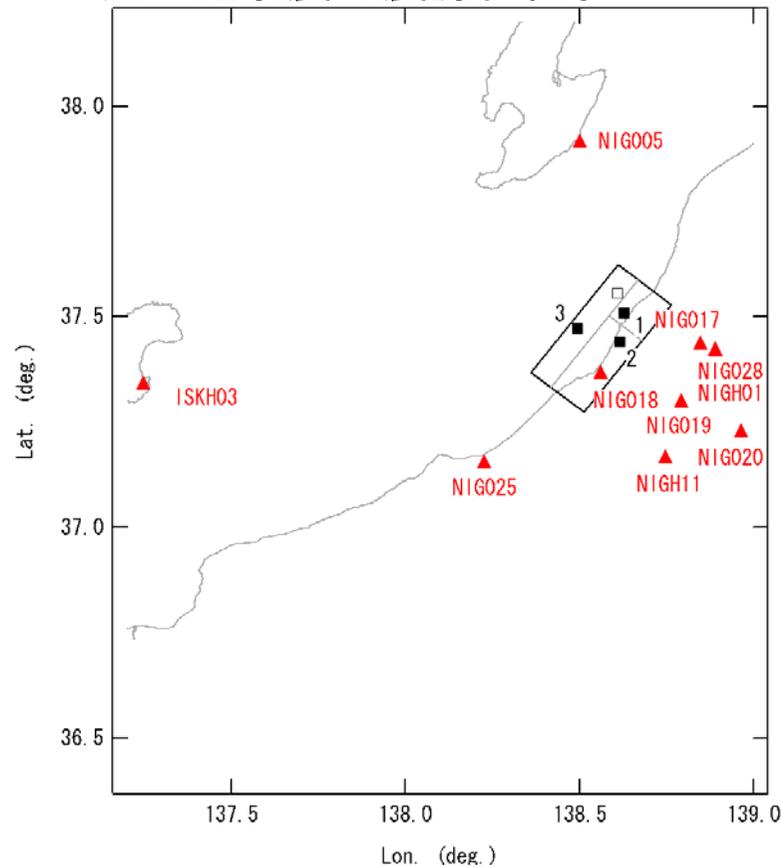
Mo = .729E+19 Nm Mw = 6.51



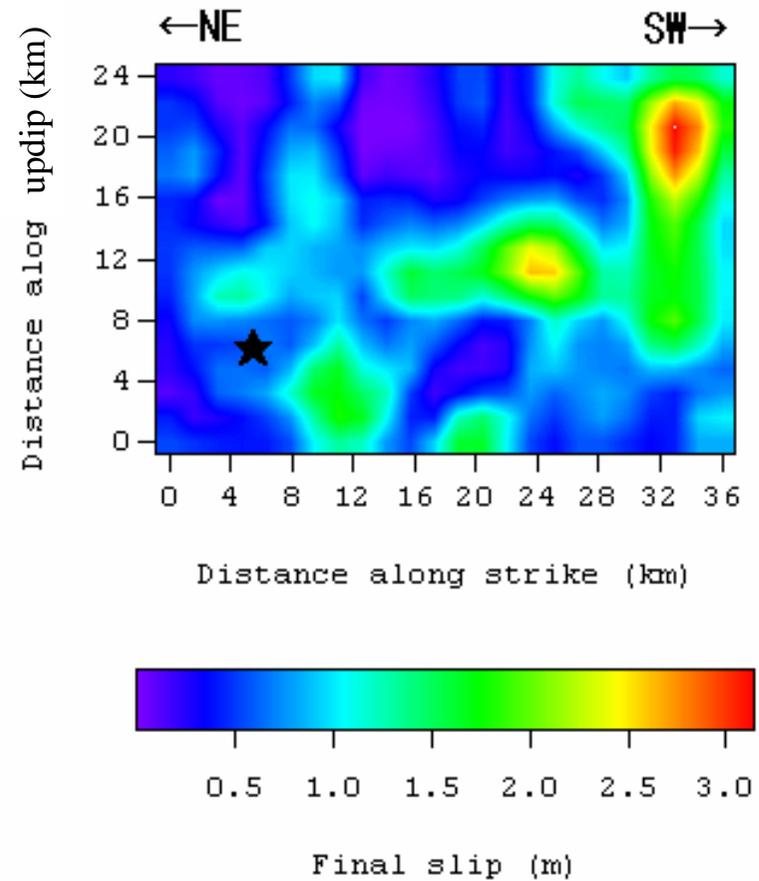
山中(2007)による

## 経験的グリーン関数を用いた波形インバージョンによる断層破壊過程

断層面と観測点の位置。  
黒丸は経験的グリーン関数として  
用いた余震の震源位置。



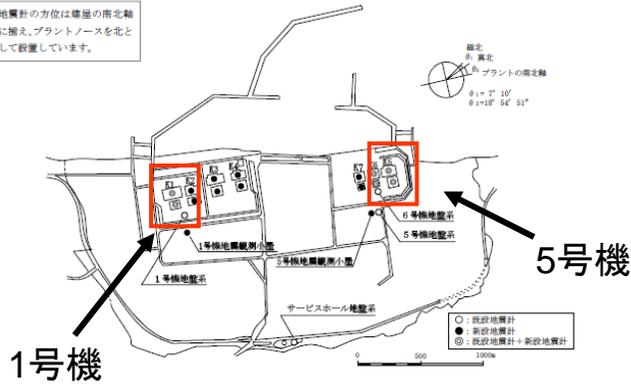
最終すべり量分布。  
★は破壊開始点。



野津(2007)による。

# 震源域近傍の観測点（柏崎刈羽原発） における本震の 加速度記録

地震計の方位は建屋の南北軸  
に揃え、プラントノースを北と  
して設置しています。

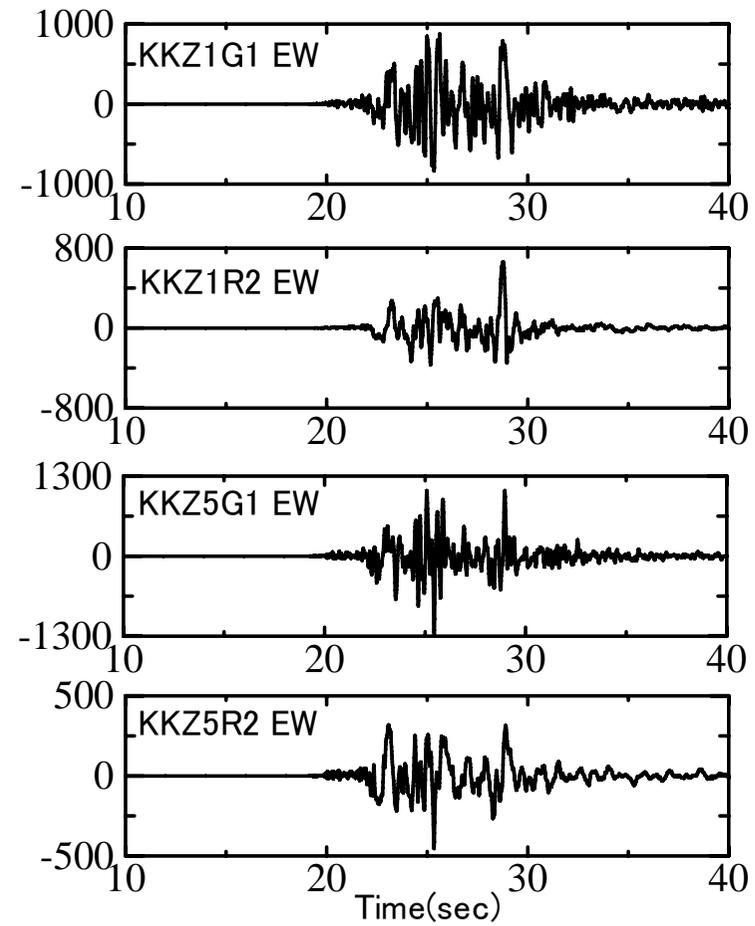
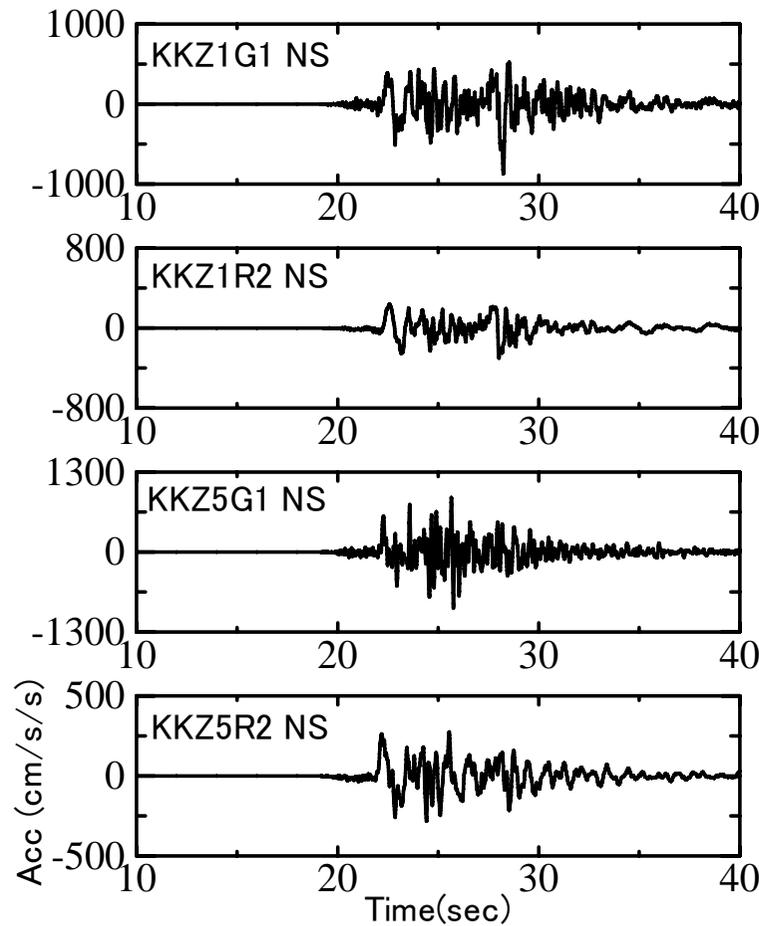


KKZ1G1:1号機地震小屋(地表)

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)



## アスペリティの数とそれらの位置の推定

- 近地地震記録や強震動記録の波形インバージョン結果などから、この地震の震源断層は2つないし3つのアスペリティをもつと推定される。
- 震源域に近い柏崎刈羽原発では、岩盤地中の水平アレイ(南北に近い)観測がなされており、そこでの本震及び余震の波形記録からアスペリティの位置が推定される。

### 本震の波形記録:

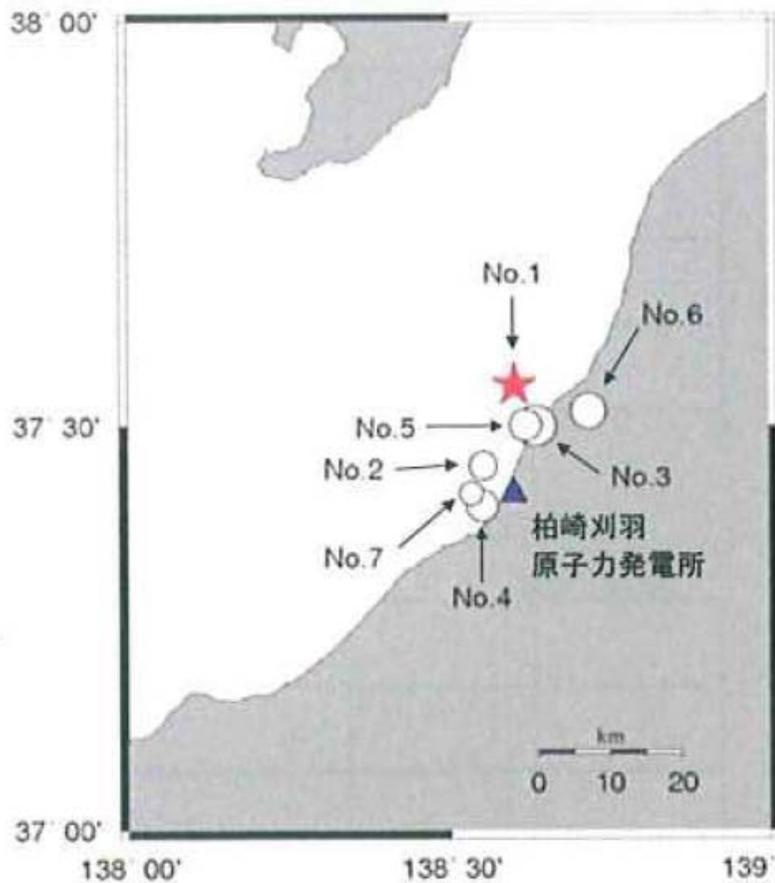
岩盤地中の記録に、3つのパルス波がみられ、とくに第1パルスと第3パルスが顕著。第1パルス波が震源近傍に位置するAsp1から(北西方向)の波と考えると、第3パルス波は逆方向(南西方向)からの波となっている。

第1パルス波の振幅はどの観測点でもほぼ同じであるが、第3パルス波は南側の観測点で顕著に大きく、北側に行くほど減衰している。

### 余震の波形記録:

本震の震源近くで生じた余震の波形は一般に北側の観測点で振幅がやや大きい傾向があるが、柏崎刈羽よりも南側に生じた余震の波形は南側の観測点で北側よりも顕著に大きく、本震の第3パルスとよく似た性質を示す。

これらの解析結果から、第1パルス波を出したAsp1が本震の震源近くにあったとすると、第3パルス波を出したAsp3は柏崎刈羽よりも南側で極めて近いところにあったと推定される。



No.	発震日時	震源地	北緯	東経	地震規模 M	震源 深さ H (km)
1	2007/07/16 10:13 本震	新潟県上中越沖	37° 33.4′	138° 36.5′	6.8	17
2	2007/07/16 11:00	新潟県上中越沖	37° 27.4′	138° 33.9′	3.7	22
3	2007/07/16 15:37 最大余震	新潟県上中越沖	37° 30.2′	138° 38.6′	5.8	23
4	2007/07/16 17:42	新潟県上中越沖	37° 24.8′	138° 33.4′	4.2	19
5	2007/07/16 21:08	新潟県上中越沖	37° 30.5′	138° 37.7′	4.4	20
6	2007/07/25 06:52	新潟県中越地方	37° 31.9′	138° 43.2′	4.8	24
7	2007/08/04 00:16	新潟県上中越沖	37° 25.2′	138° 32.2′	3.2	18

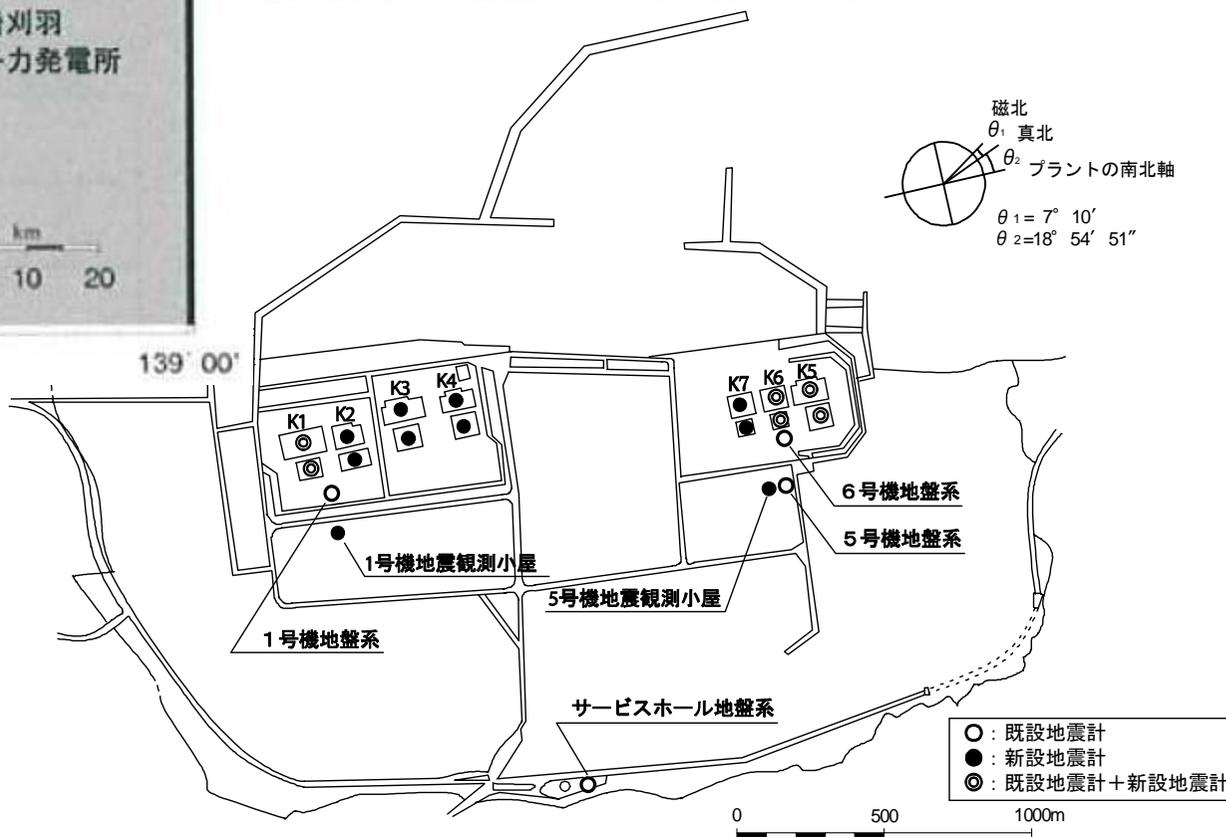
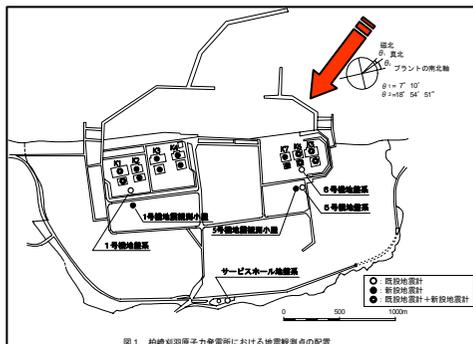
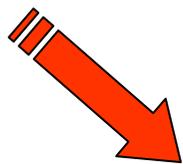


図1 柏崎刈羽原子力発電所における地震観測点の配置

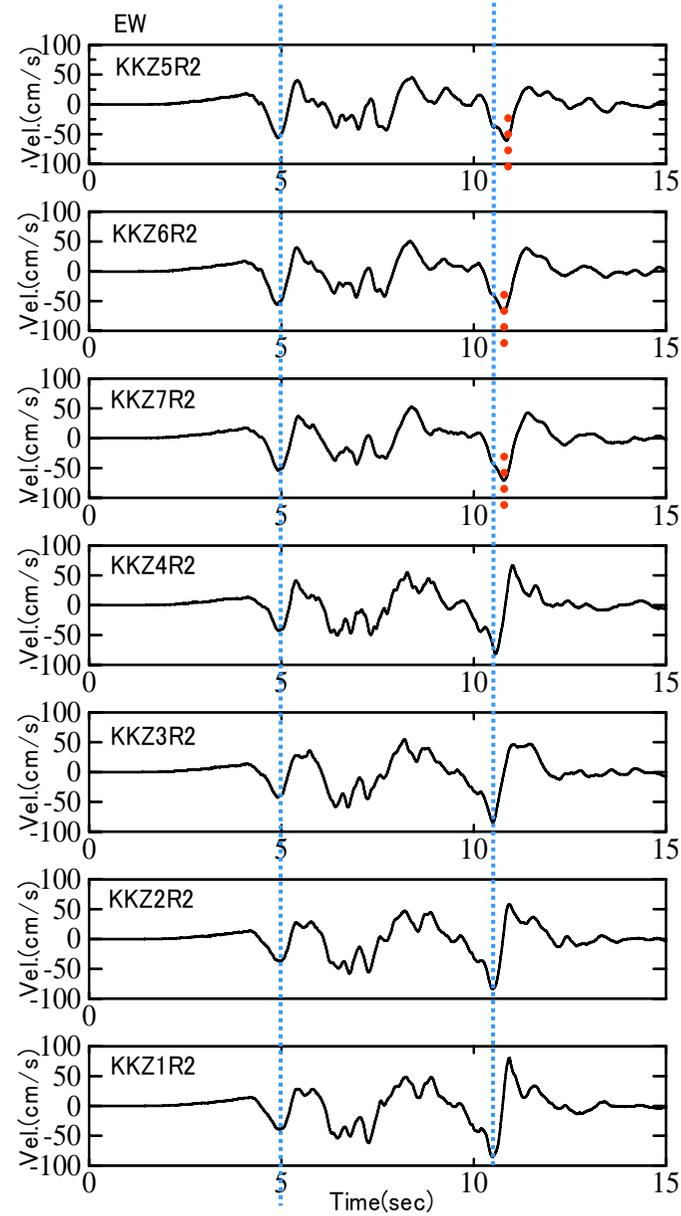
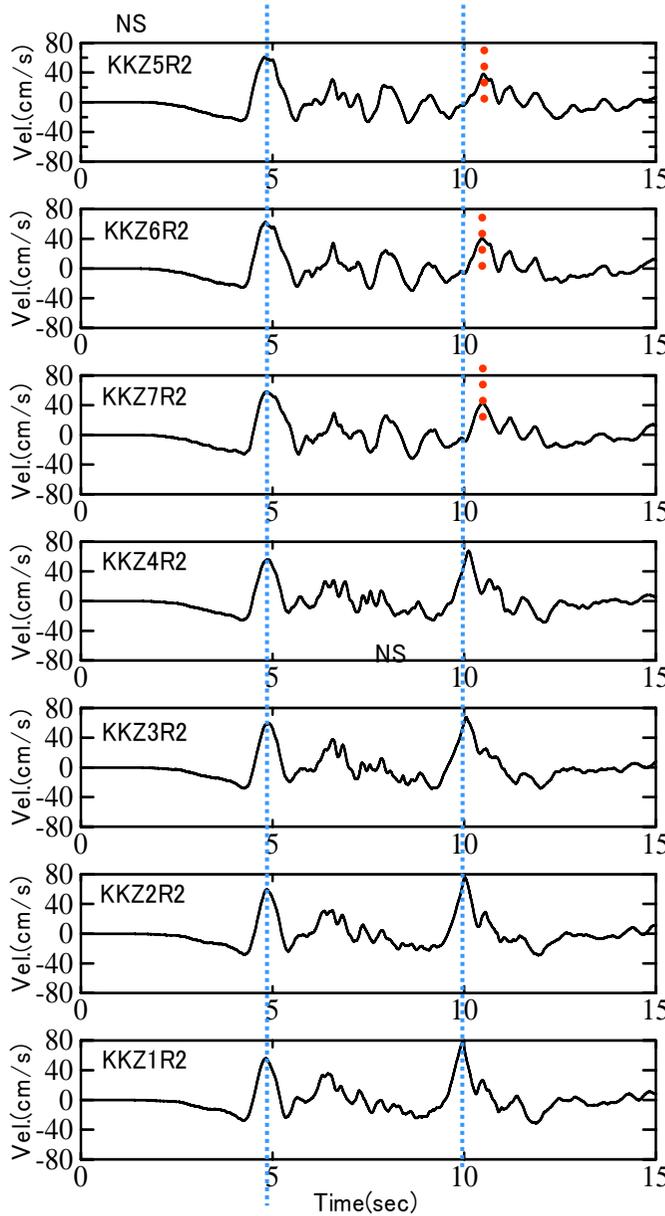


# No. 1 07/07/16 10:13 本震 速度波形

5号機方向  
地震波の到来方向



1号機方向



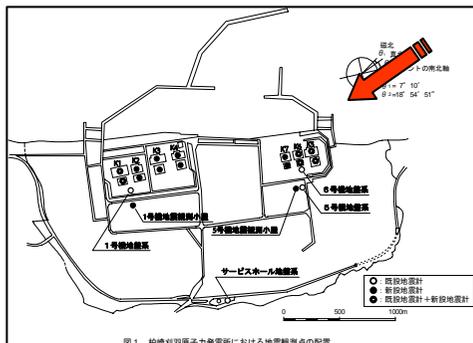
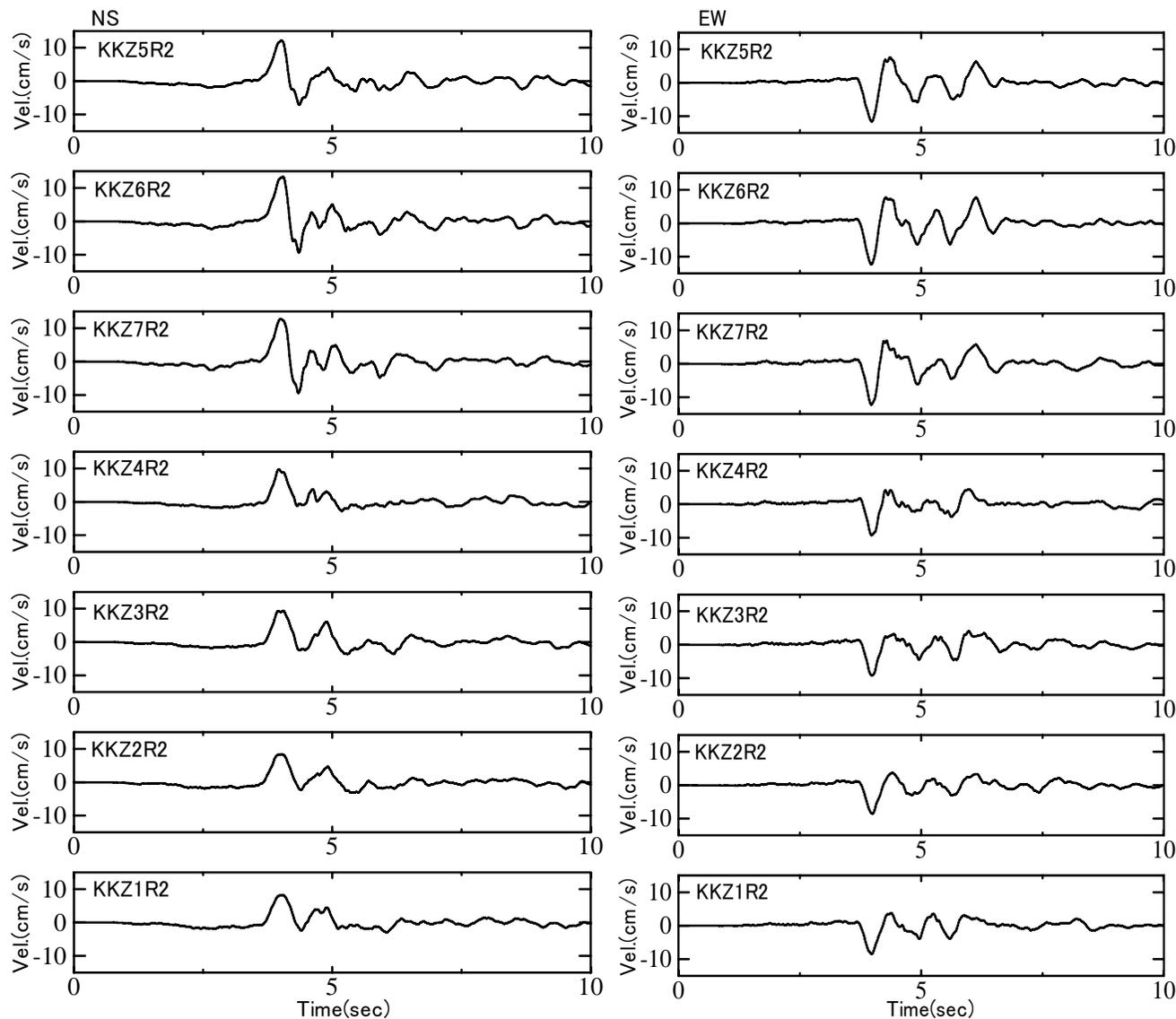
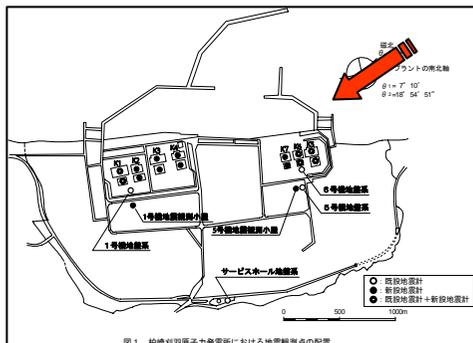


図1 柏崎刈羽原子力発電所における地震観測点の配置

## No. 3 07/07/16 15:37 最大余震 速度波形

5号機方向  
地震波の到来方向  
1号機方向



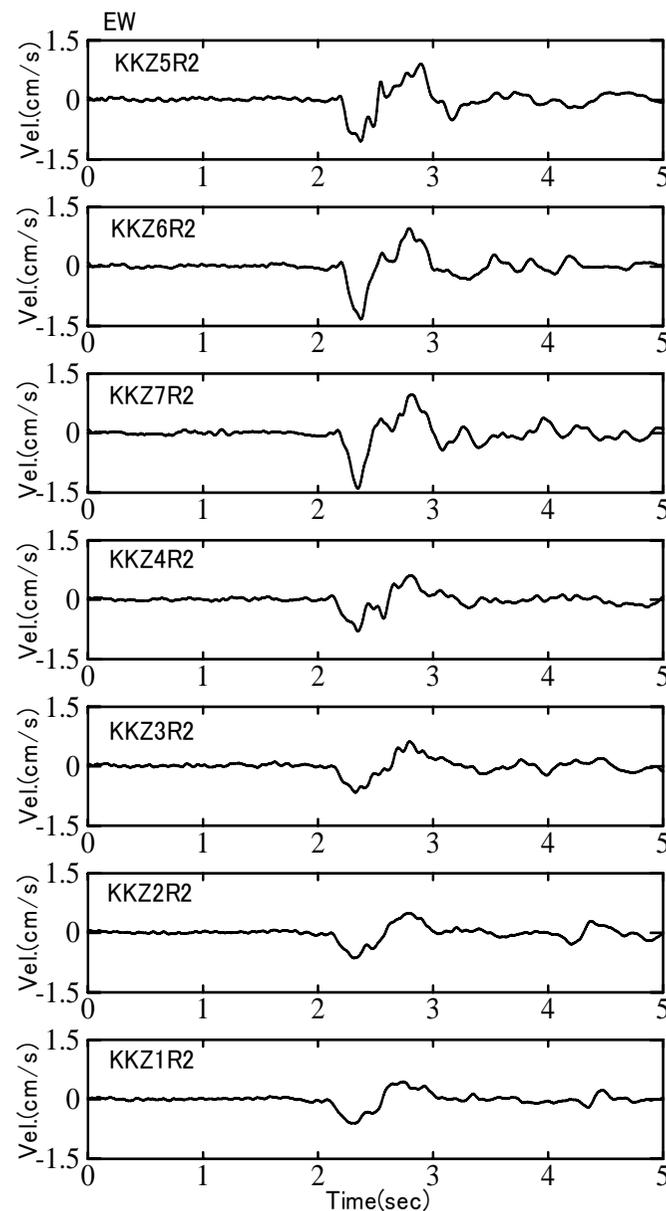
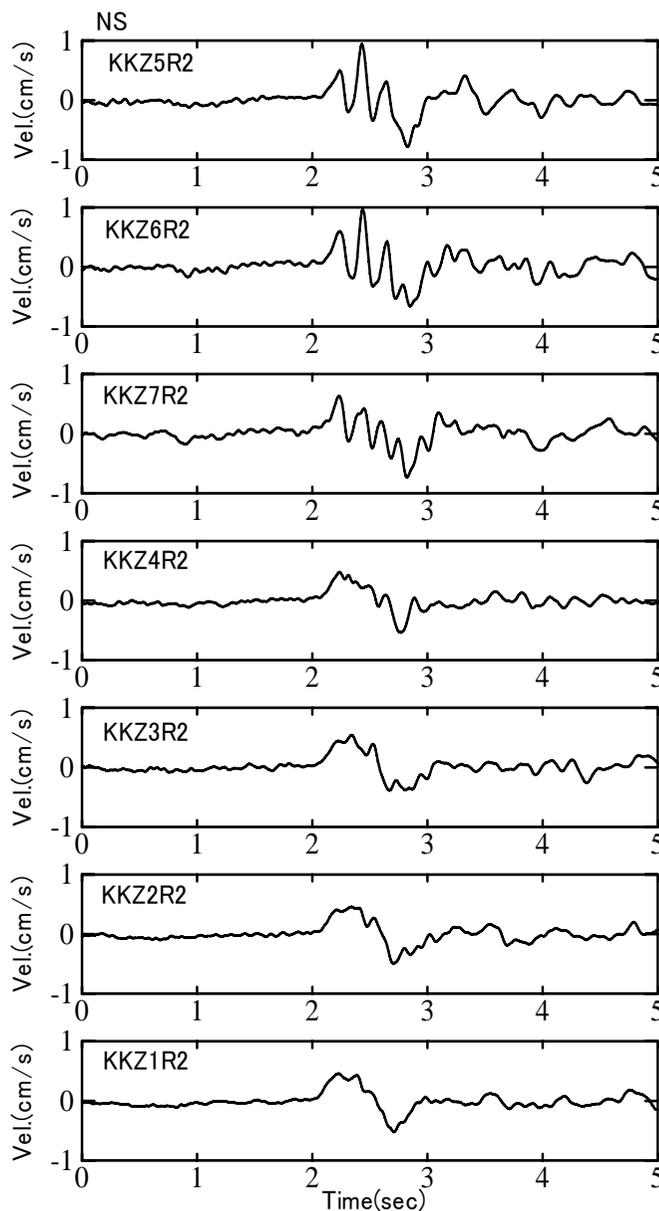


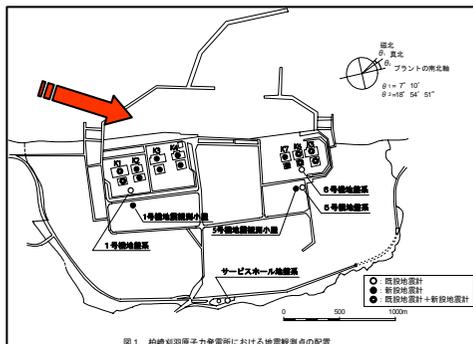
# No. 5 07/07/16 21:08 速度波形

地震波の到来方向

5号機方向

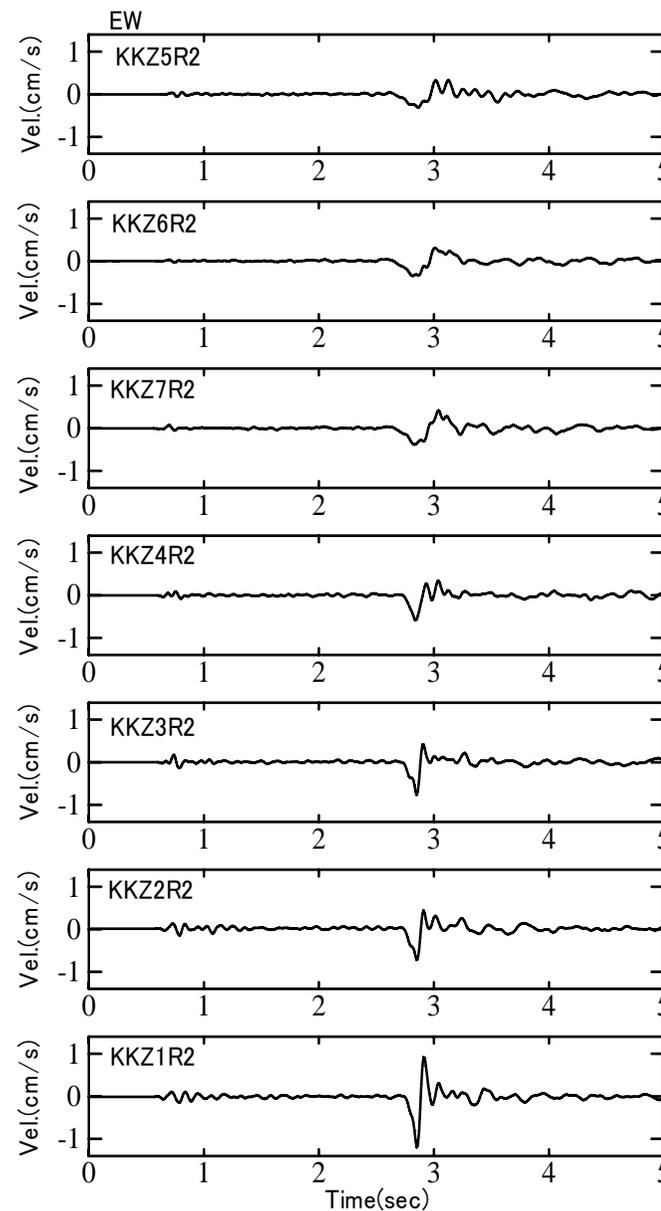
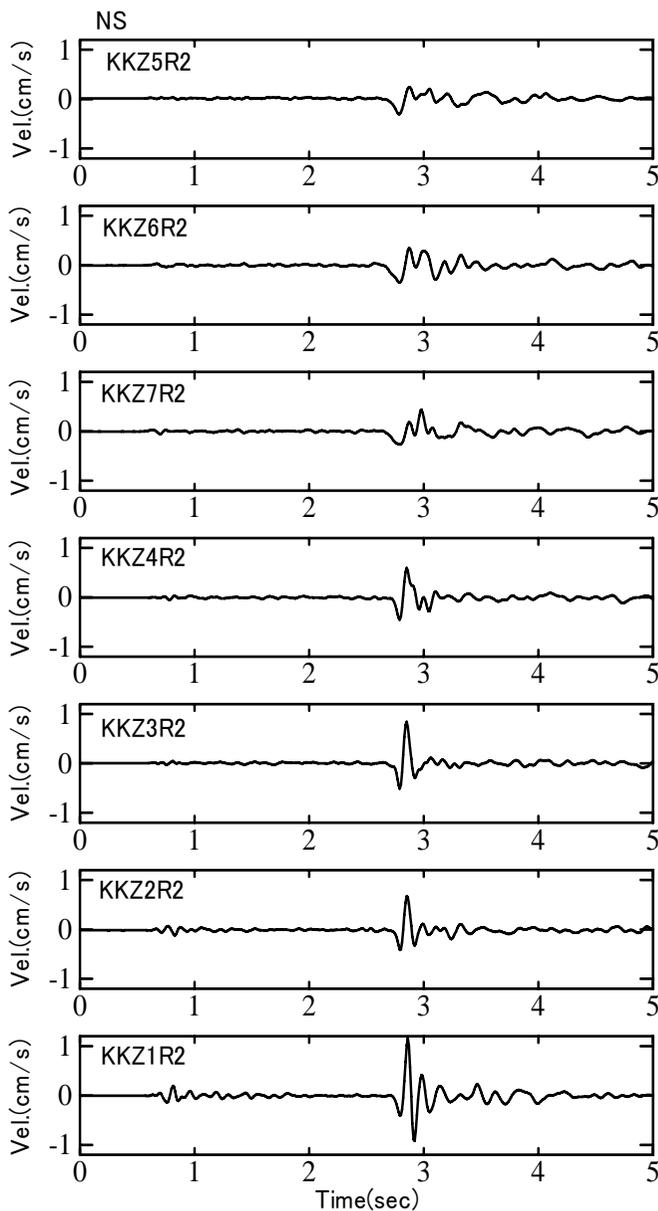
1号機方向

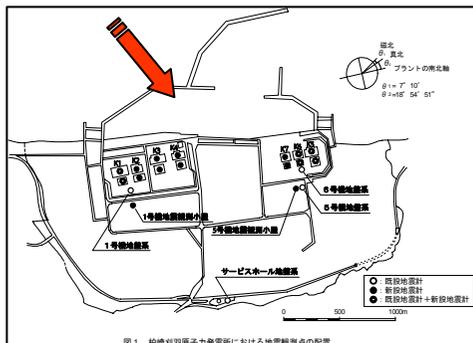




## No. 4 07/07/16 17:42 速度波形

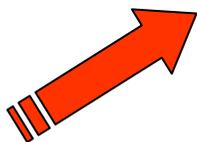
5号機方向  
↑  
地震波の到来方向  
↓  
1号機方向



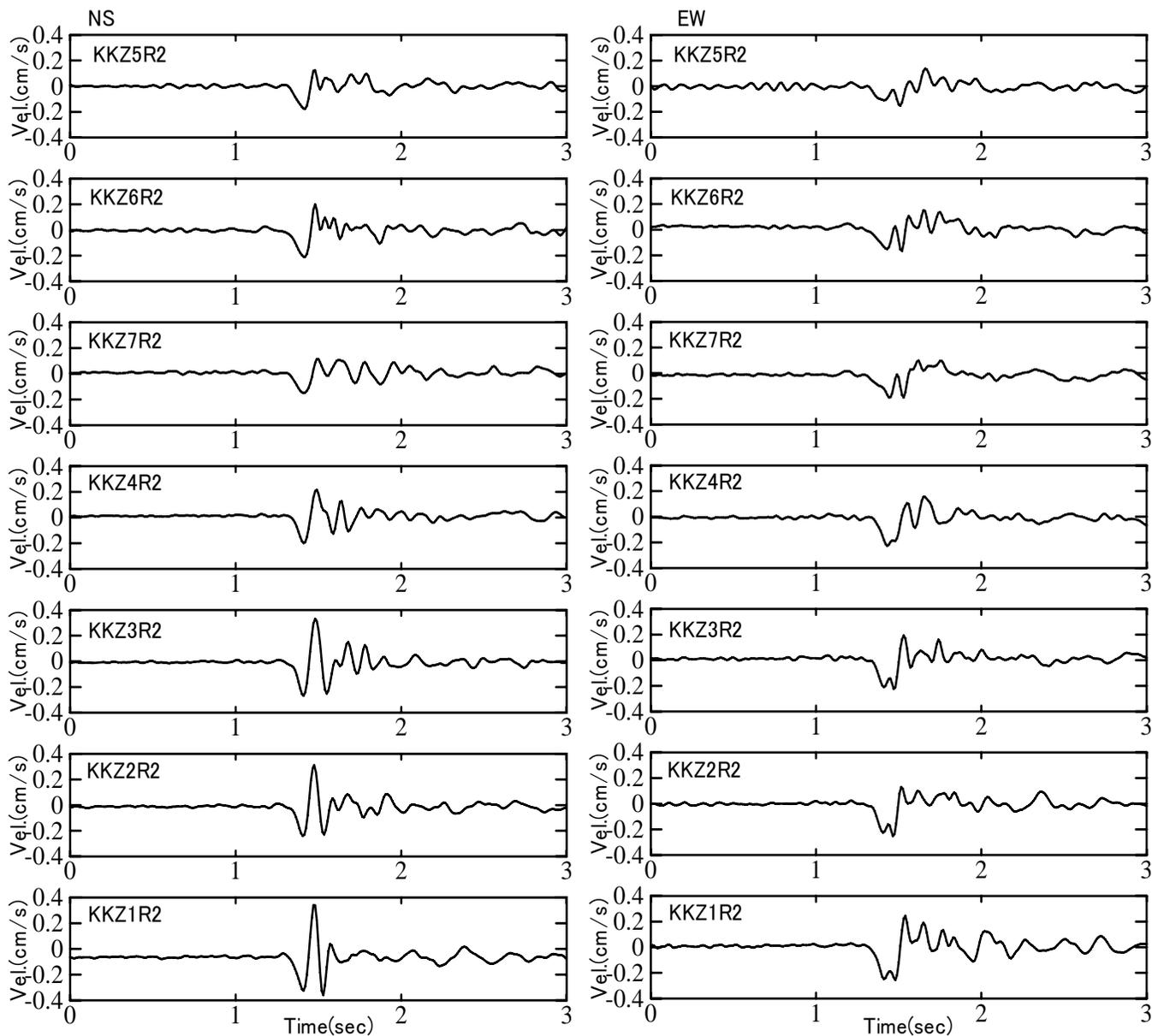


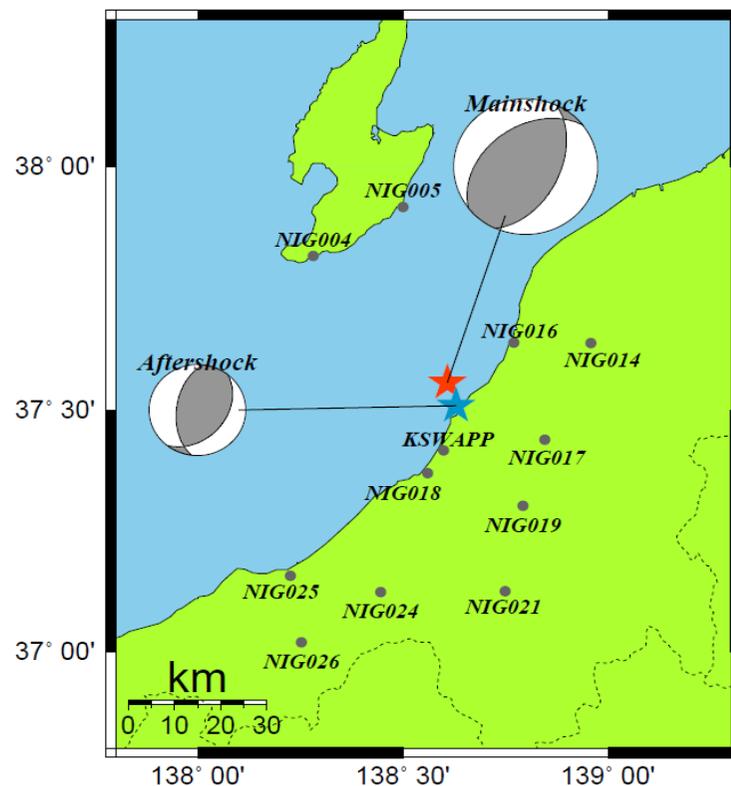
# No.7 07/08/04 00:16 速度波形

5号機方向  
地震波の到来方向



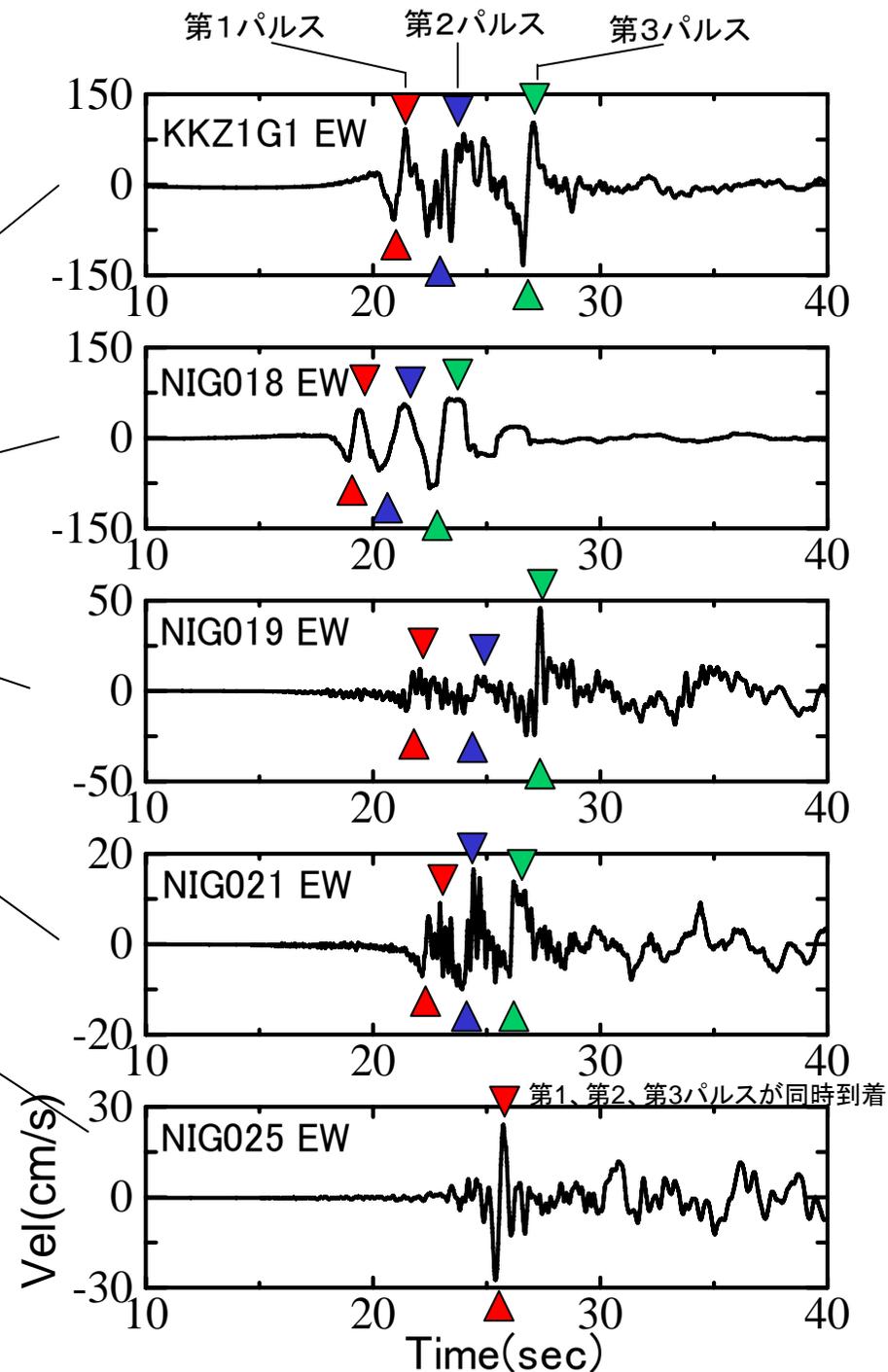
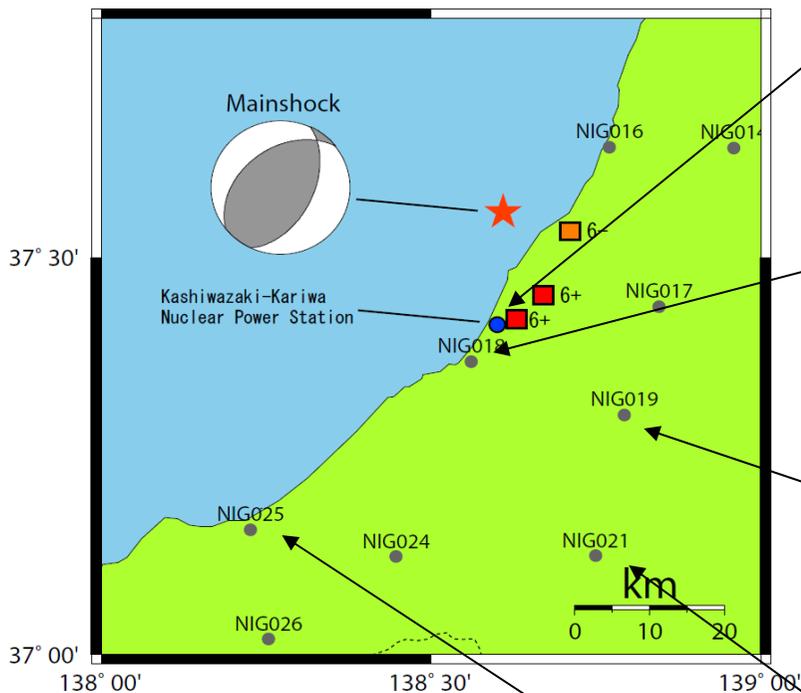
1号機方向





	本震	余震
発生日時	07/07/16 10:13	07/07/16 21:08
震源(気象庁)	37.557, 138.609	37.509, 138.630
震源深さ	12km (震研)	20.4km (気象庁)
Mw	6.6	4.4
Mo (F-net)	8.37E+18Nm	5.21E+15Nm
(str,dip,rake) (F-net)	25/223 51/42 72/111	187/39 54/41 70/115

## 本震 速度波形



本震の観測波形には、3つ程度のパルスが確認できる。

→アスペリティも3つ程度あると考えられる

# アスペリティの位置（破壊開始点）の推定

1. 破壊断面を仮定
2. 第1パルスと第2パルスおよび第3パルスの時間差を読み取りプロット
3. いくつかの地点で2.の操作を行い、重なったところが破壊開始点と考えられる

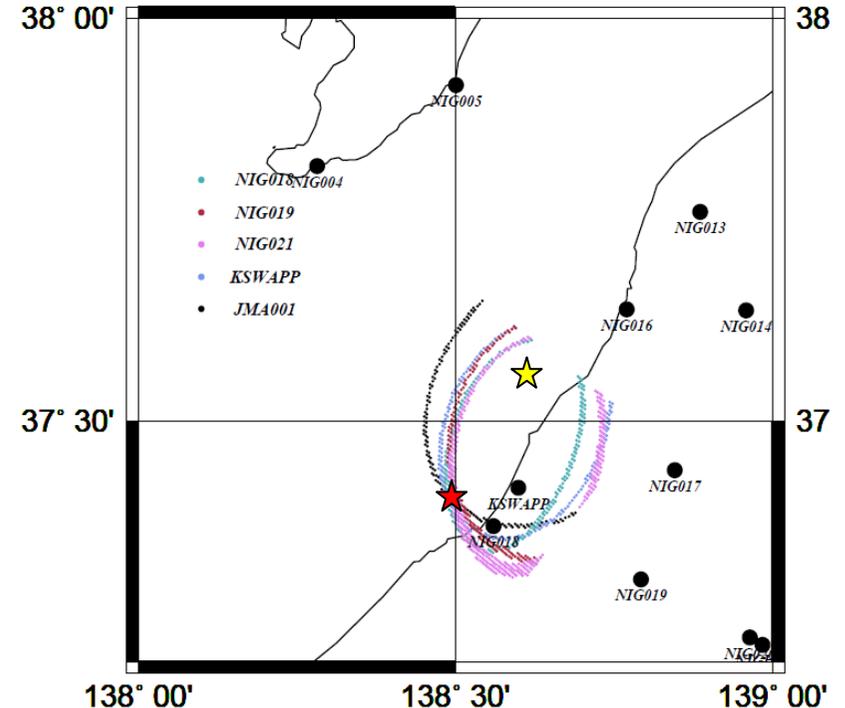
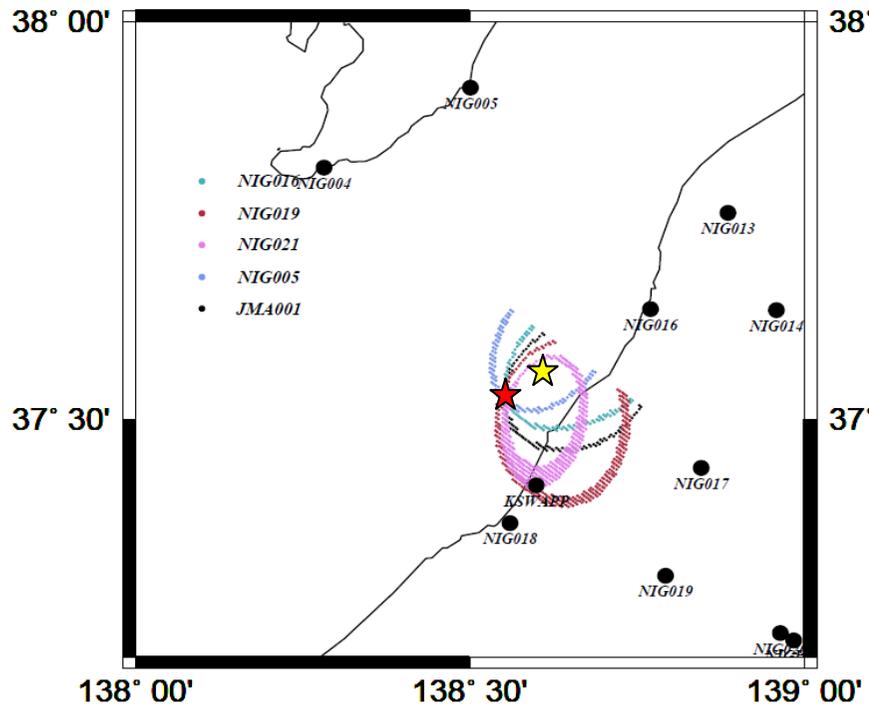
S波速度:3.4km/s, 破壊速度いくつかを仮定



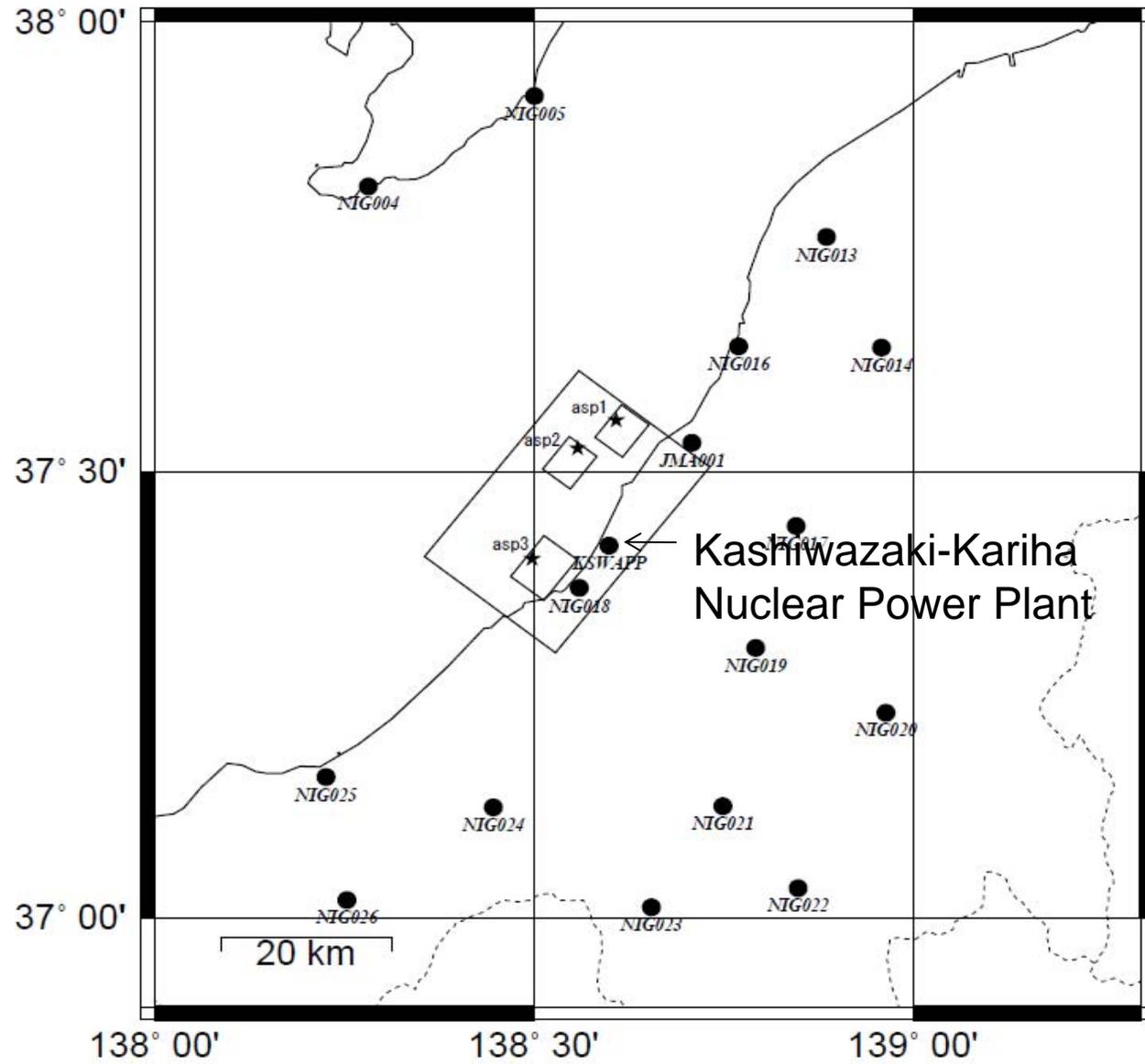
破壊速度2.8km/sが  
妥当と判断

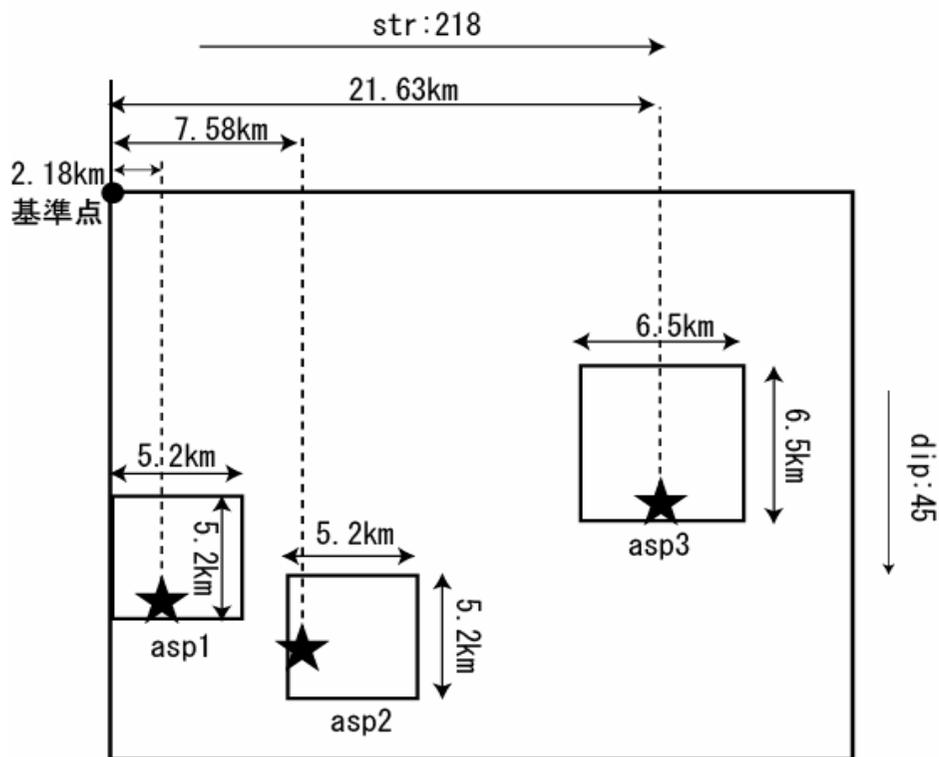
アスペリティ2

アスペリティ3



# 経験的グリーン関数法を用いて推定された震源断層モデル





破壊速度 2.8km/s

小断層 1.3 × 1.3Km

	破壊開始点	深度
Asp1	(2, 4)	12.0km
Asp2	(1, 3)	13.4km
Asp3	(3, 5)	9.2km

	Mo(Nm)	L(km) × W(km)	$\Delta\sigma$ (MPa)	risetime
Asp1	$8.7 \times 10^{17}$	5.2 × 5.2 (N:4 × 4)	15.1	0.5
Asp2	$9.0 \times 10^{17}$	5.2 × 5.2 (N:4 × 4)	15.6	0.6
Asp3	$1.5 \times 10^{18}$	6.5 × 6.5 (N:5 × 5)	13.3	0.6

走向	218
傾斜角	45
すべり角	90
基準点緯度	37.5045
経度	138.7301
深度	0km

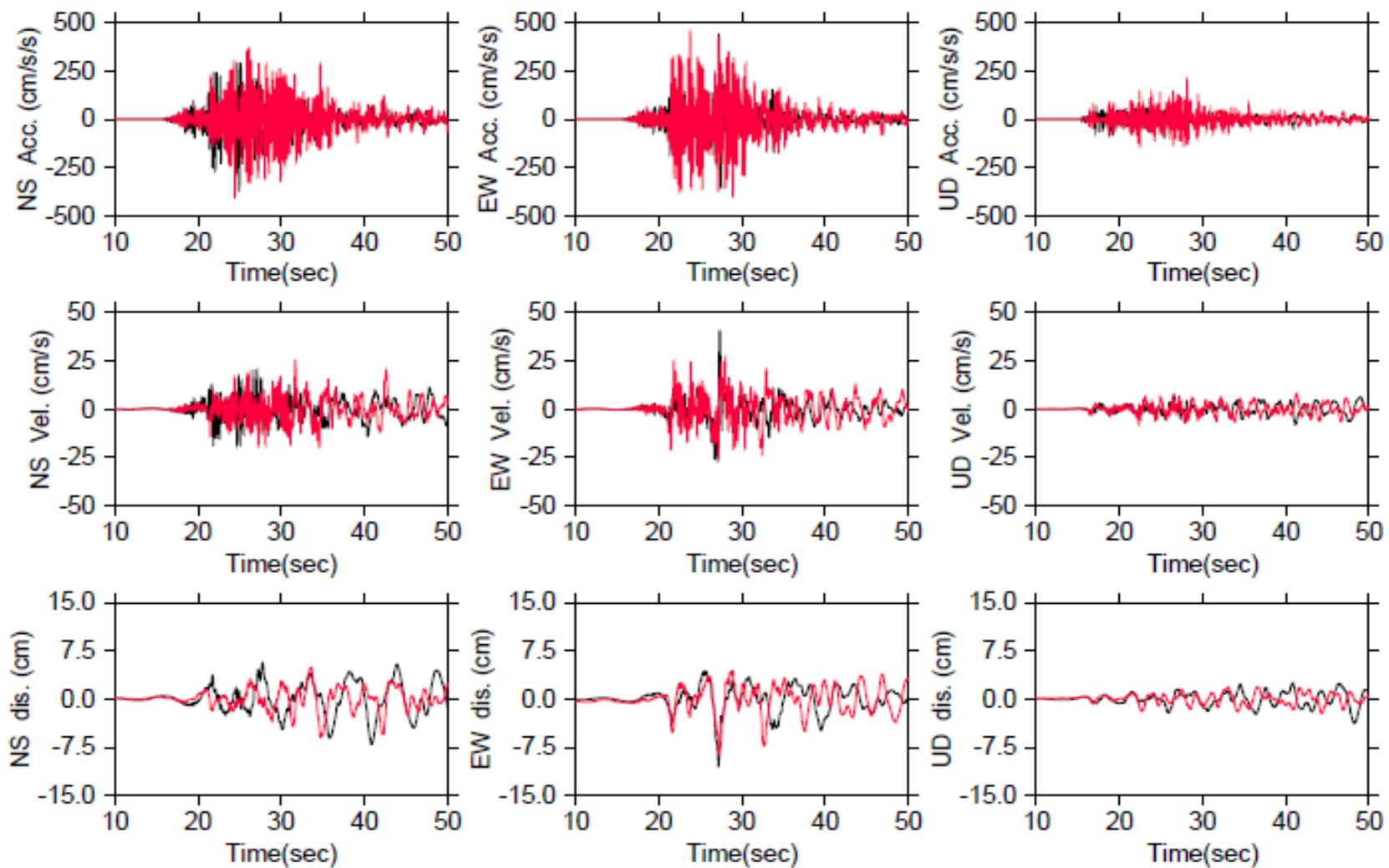
# K-NET NIG019(小千谷)

NIG019

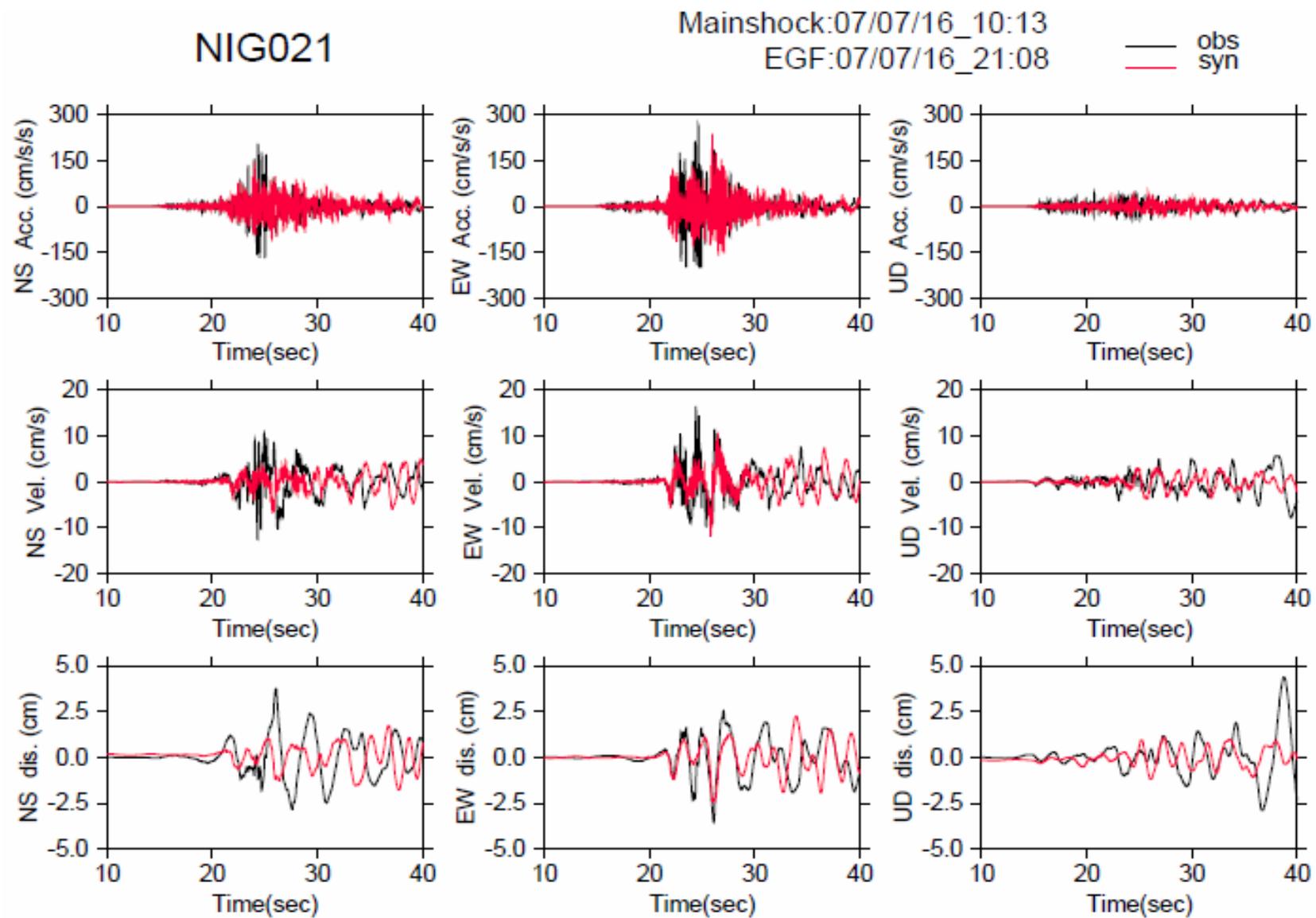
Mainshock:07/07/16\_10:13

EGF:07/07/16\_21:08

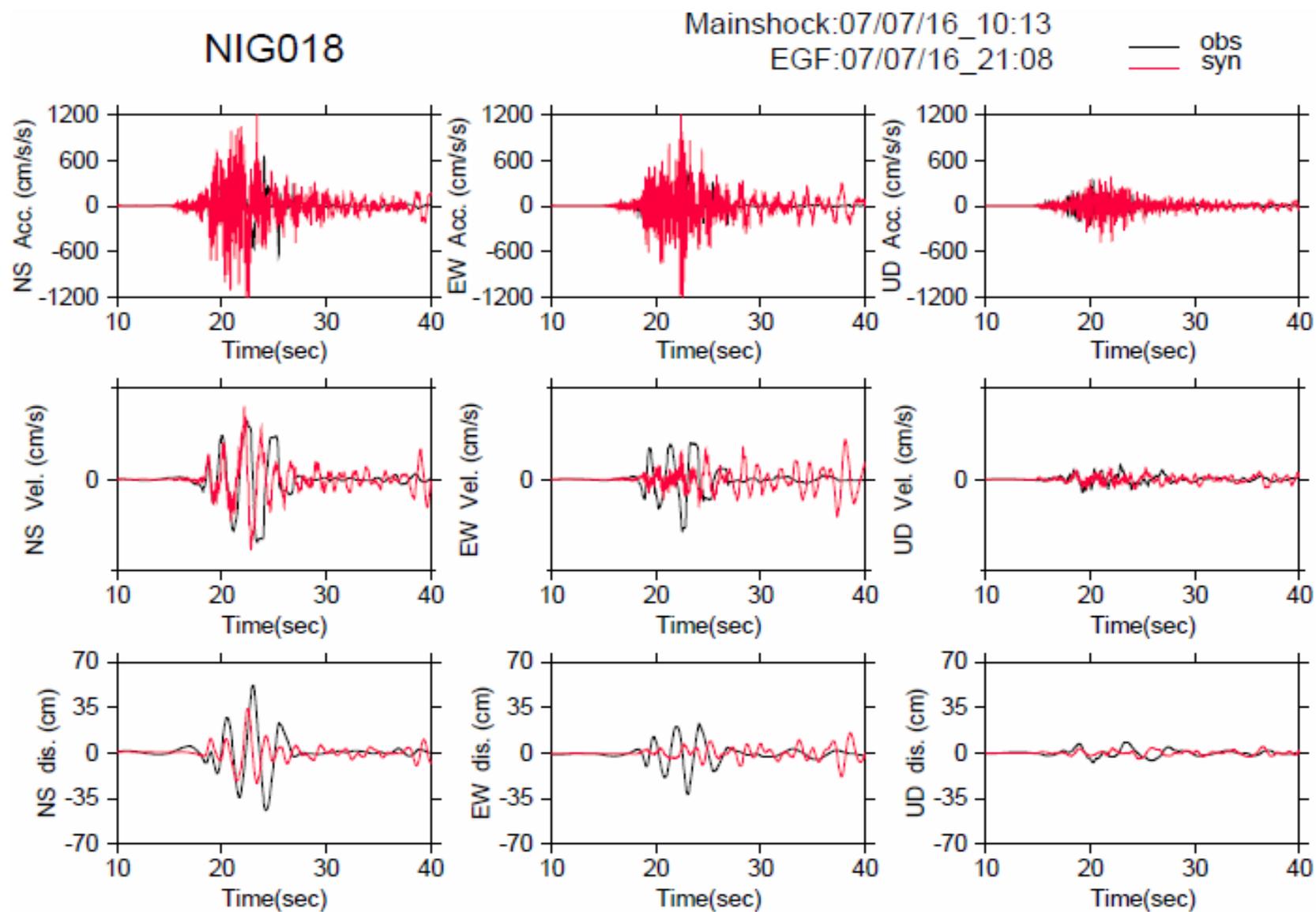
— obs  
— syn



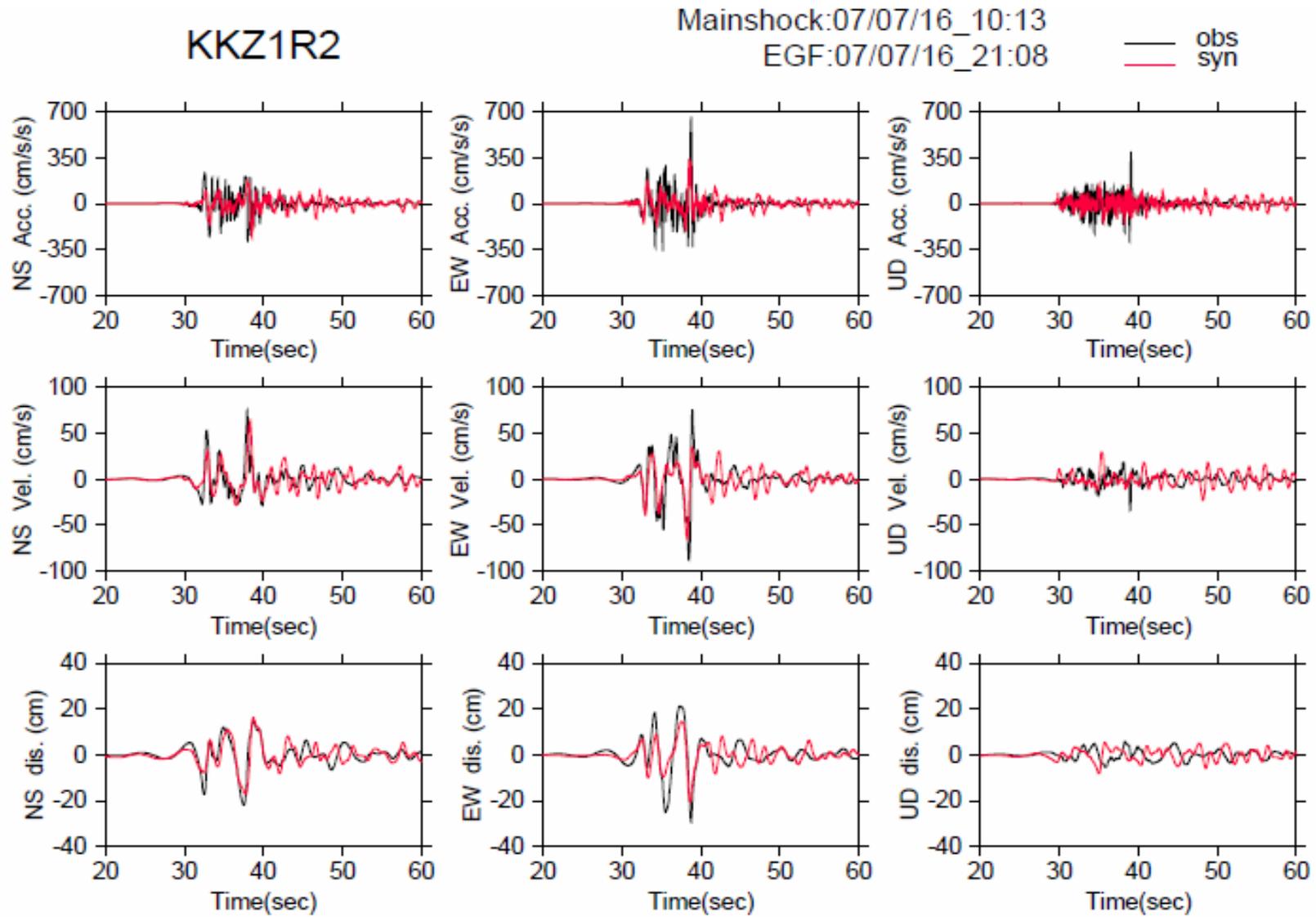
# K-NET NIG021(十日町)



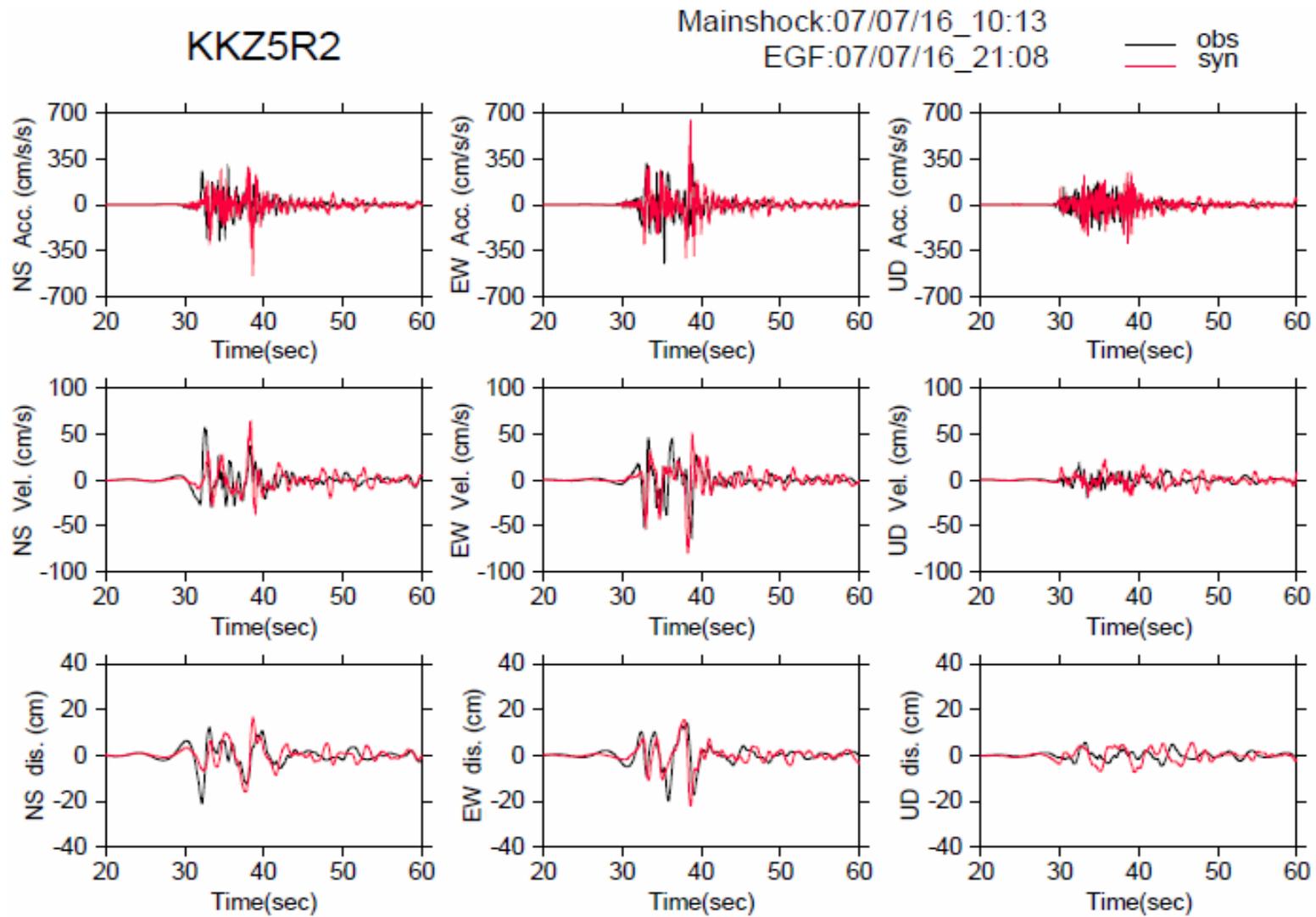
# K-NET NIG018(柏崎)



# 柏崎刈羽原子力発電所1号機地下5階(基礎版上)



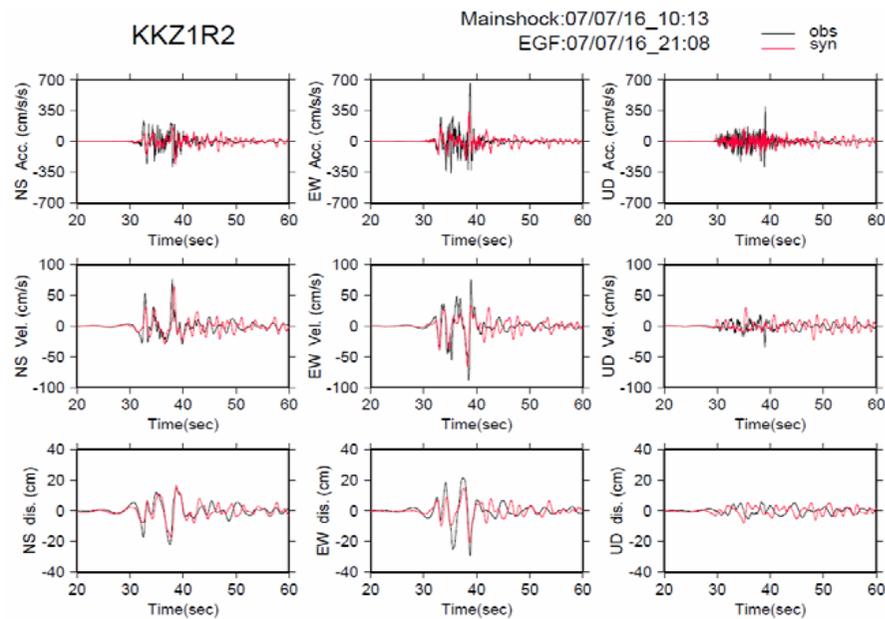
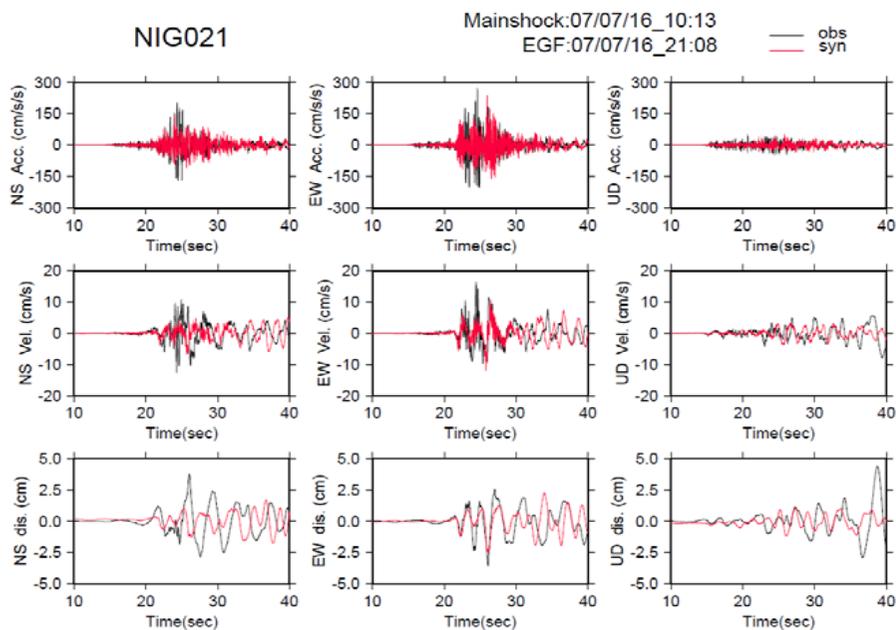
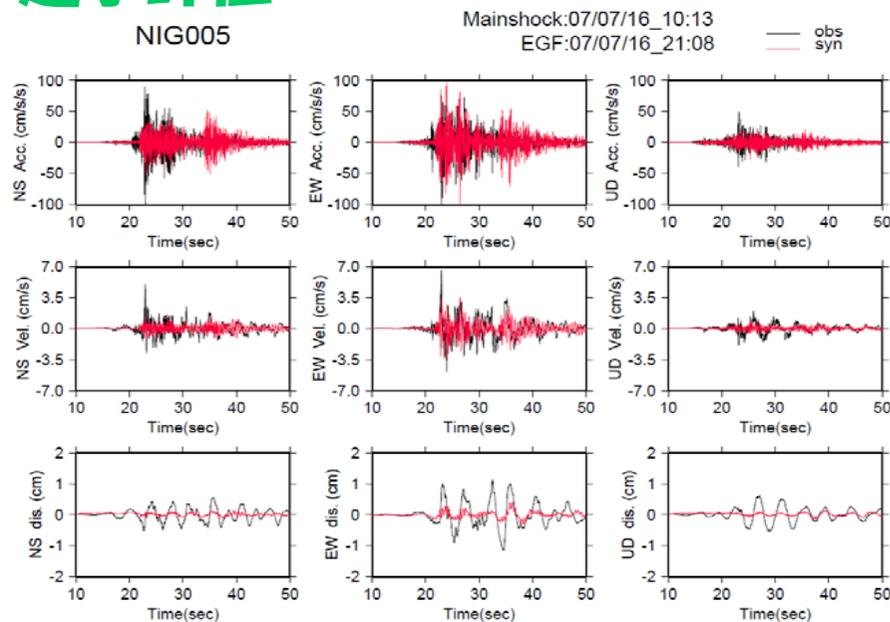
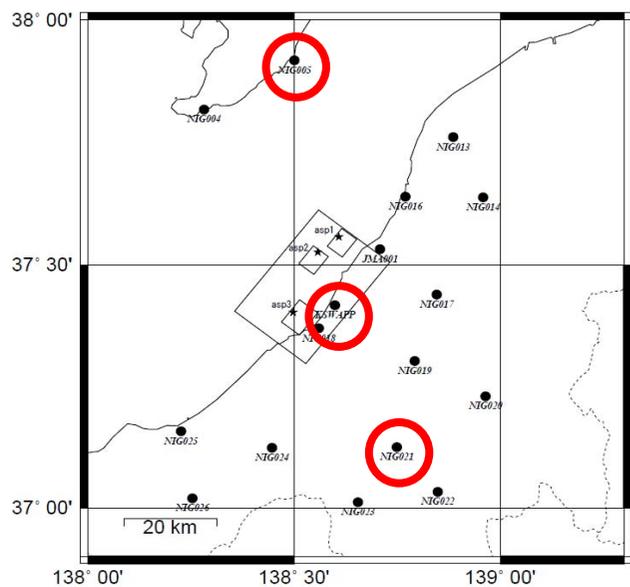
# 柏崎刈羽原子力発電所5号機地下4階(基礎版上)



# 震源モデル



# 佐渡島が過小評価



佐渡島方向を評価するためには南～北方向

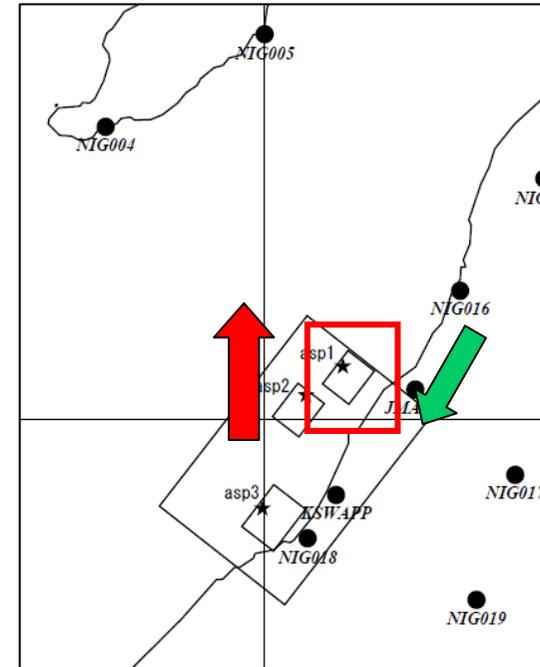


への破壊の進行が必要で、かつ、南東傾斜の方が  
整合的である

柏崎方向を評価するためには北東～南西方向

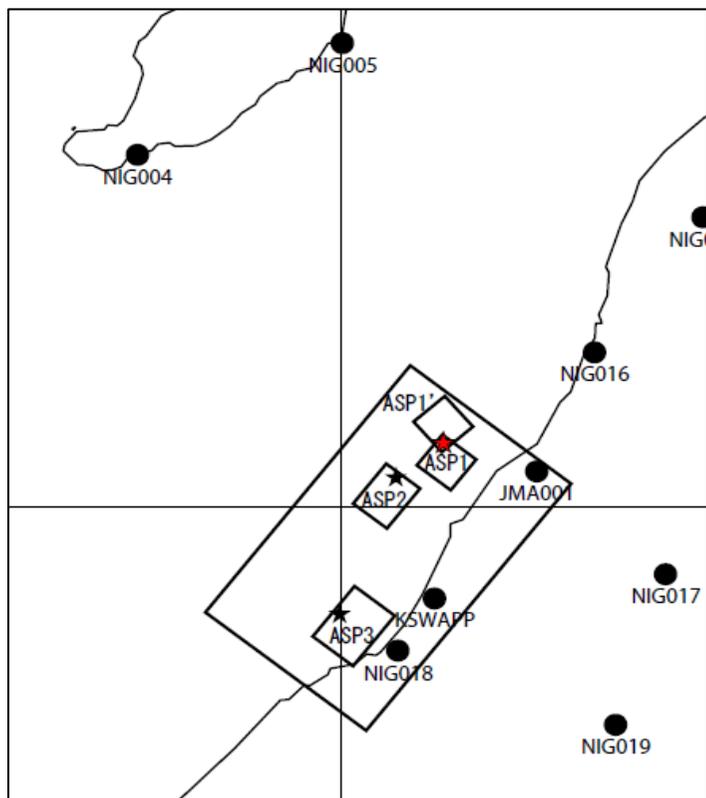


への破壊の進行が必要で、かつ、北西傾斜の方が  
整合的である



以上の考察から、佐渡島方向と柏崎方向の両方ともに整合的な合成波形を評価するためには、の北西傾斜、南東傾斜にかかわらず、1枚の断層面のみでは難しい。

したがって、これまでのAsp1(北西傾斜)に加えて、分岐断層(南東傾斜)を考慮した震源モデルを構築した。



破壊速度 2.8km/s 小断層 1.3×1.3Km

	破壊開始点	深度
Asp1	(2, 4)	12km
Asp2	(1, 3)	13.4km
Asp3	(3, 5)	9.2km

基準点から深さ方向への破壊開始点の距離

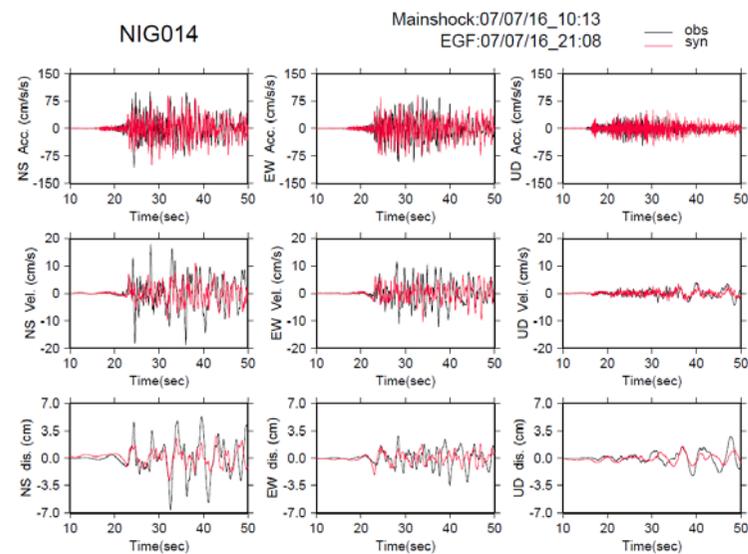
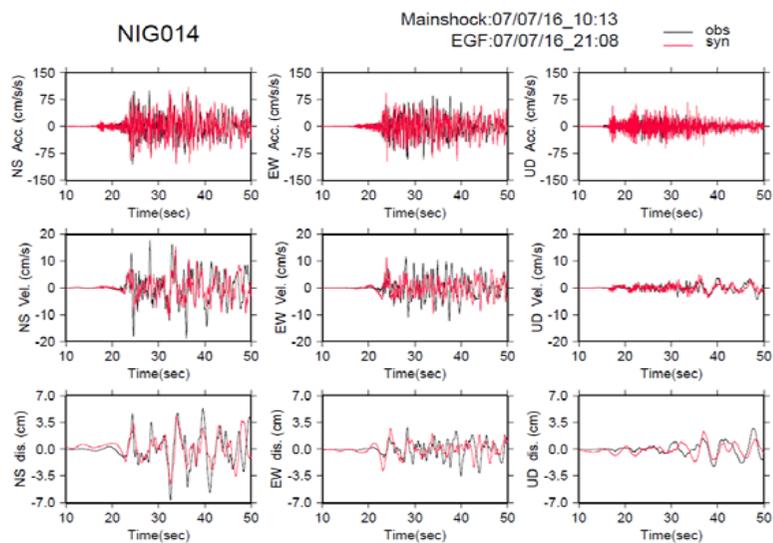
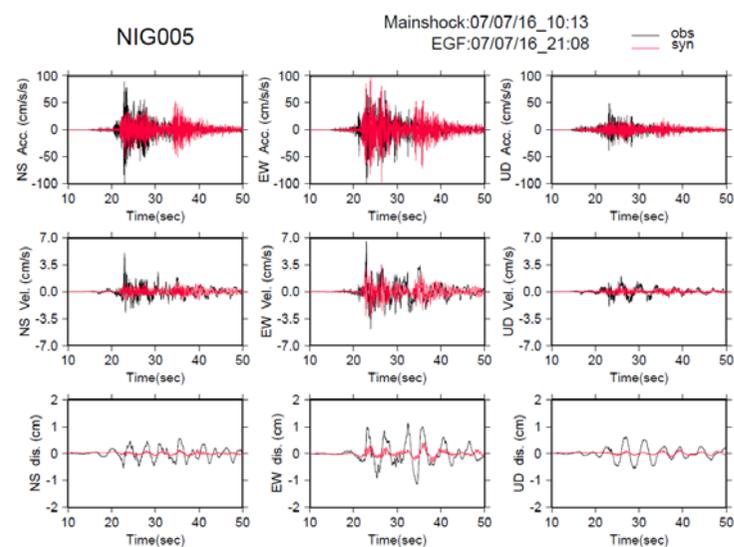
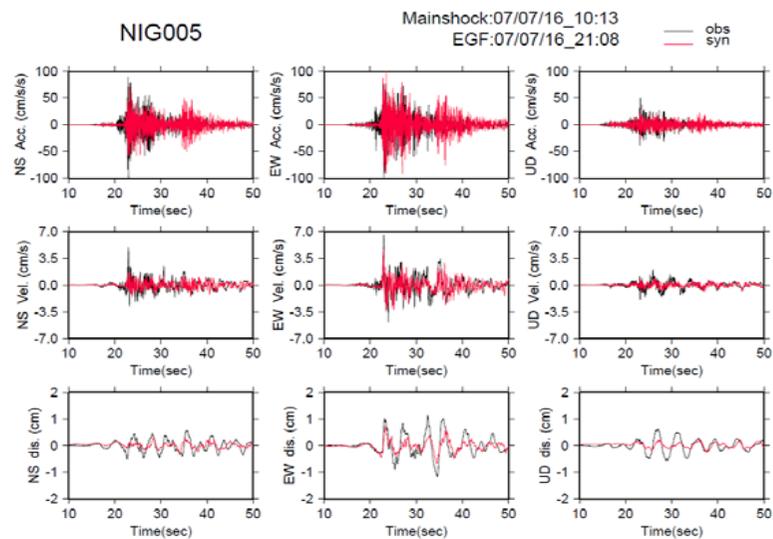
Asp1	16.97km
Asp2	18.95km
Asp3	13.01km

	Mo(Nm)	L(km) × W(km)	$\Delta\sigma$ (MPa)	risetime
Asp1	$6.5 \times 10^{17}$	3.9 × 5.2 (N:3 × 4)	15.1	0.5
Asp2	$9.0 \times 10^{17}$	5.2 × 5.2 (N:4 × 4)	15.6	0.6
Asp3	$1.5 \times 10^{18}$	6.5 × 6.5 (N:5 × 5)	13.3	0.6
Asp1'	$9.0 \times 10^{17}$	5.2 × 5.2 (N:4 × 4)	15.6	0.5

走向	218
傾斜角	45
すべり角	90
基準点緯度	37.5045
経度	138.7301
深度	0km

# 分岐断層モデル

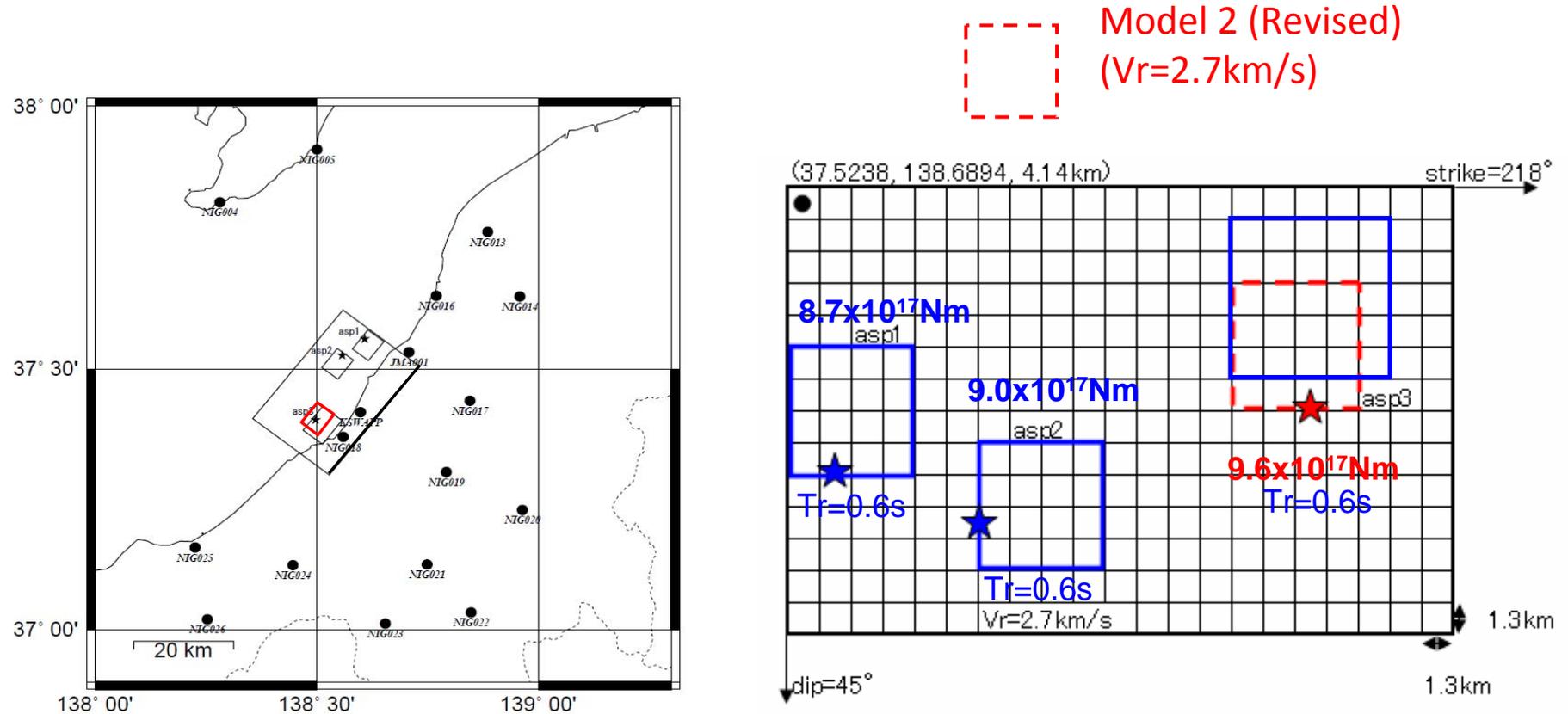
# Asp3つのモデル



### 3. 柏崎刈羽で観測されたディレクティビティー・パルス

- 経験的グリーン関数法を用いたフォーワード・モデリングにより、柏崎刈羽原発における強震動記録に顕著に見られる3つのパルス波は北西傾斜の震源断層上の3つのアスペリティによることが明らかになった。
- 強いパルス波は、各アスペリティでのすべり角と破壊進行方向に依存して決まる指向性効果により生成される。
- アスペリティからの地震動の生成に関して離散化波数法を用いた理論的波形シミュレーションにより検証を行う。

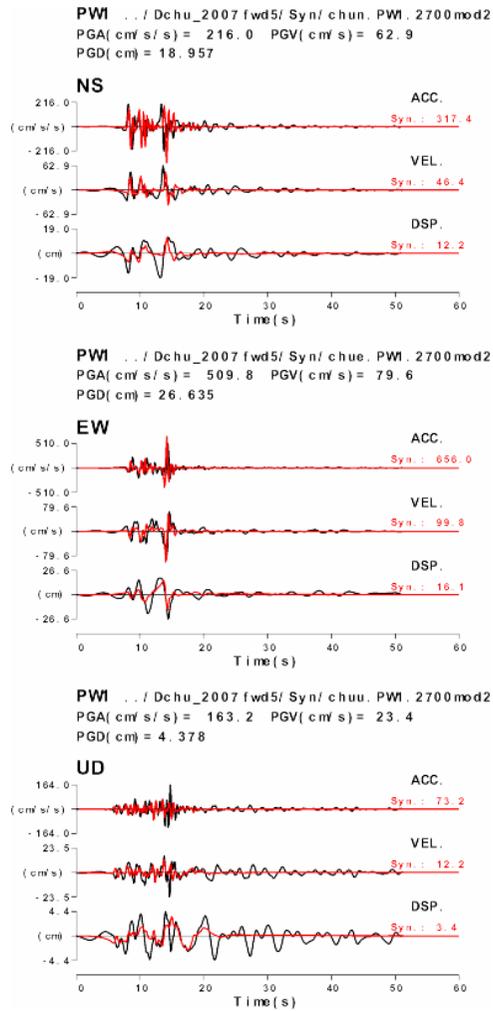
# 修正モデル(Model 2)



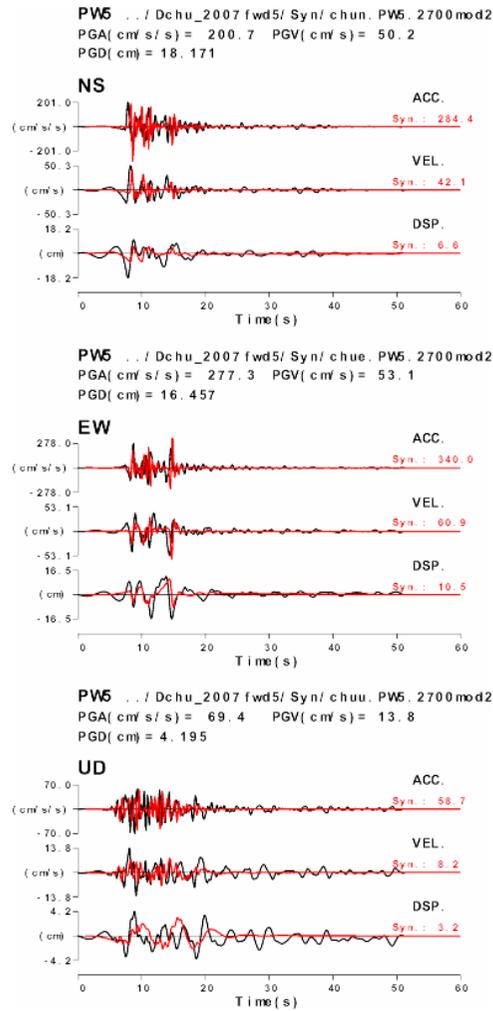
Model 2 (Revised): 理論的グリーン関数を用いて検証された改良モデル

# 修正モデルによる理論地震動

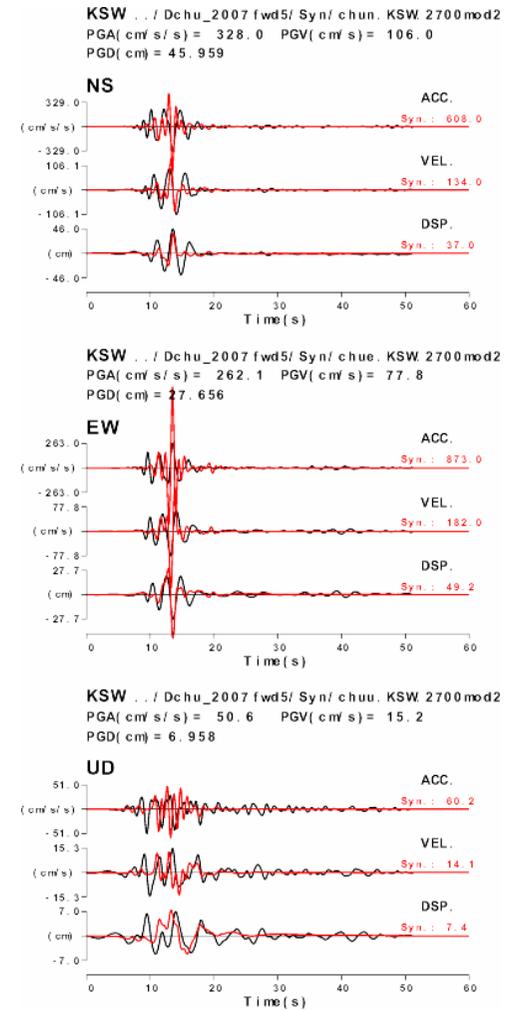
柏崎刈羽1号機



柏崎刈羽5号機



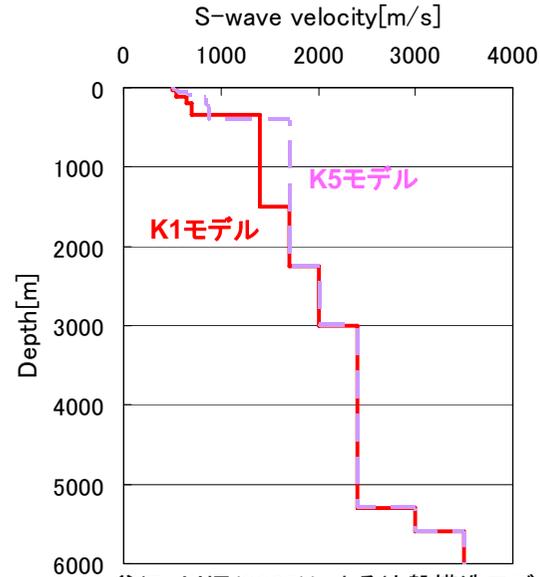
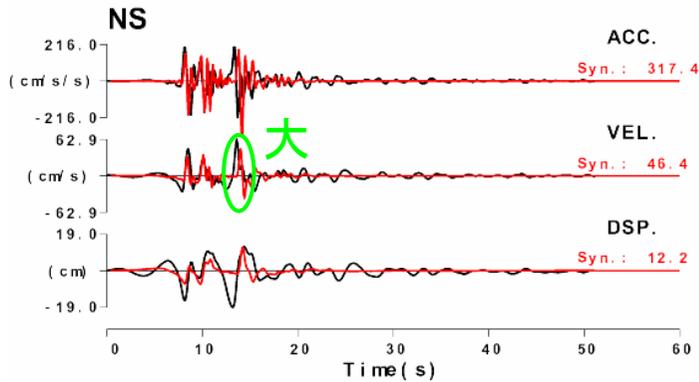
NIG018(柏崎)



# NS成分における1号機と2号機の振幅の違いについて

## 柏崎刈羽1号機(K1モデル)

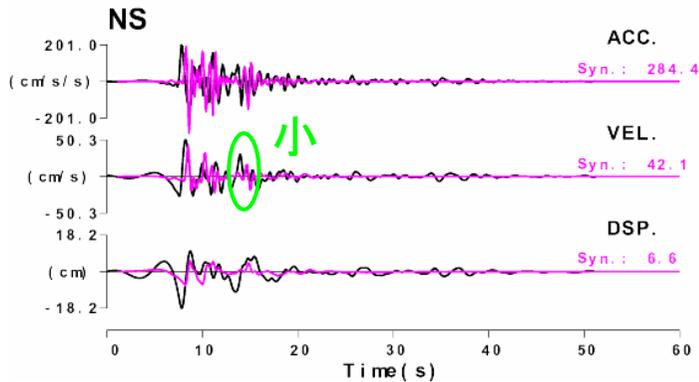
PW1 . . / Dchu\_2007 fwd5/ Syn/ chun. PW1. 2700 mod2  
 PGA( cm/s/s) = 216.0 PGV( cm/s) = 62.9  
 PGD( cm) = 18.957



釜江・川辺(2007)による地盤構造モデル

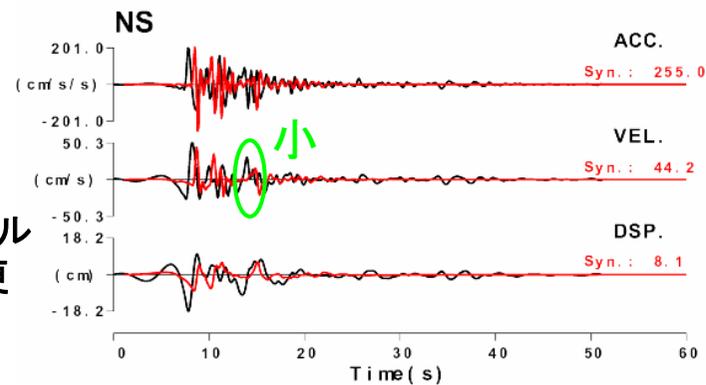
## 柏崎刈羽5号機(K5モデル)

PW5 . . / Dchu\_2007 fwd5/ Syn/ chun. PW5. 2700 mod2  
 PGA( cm/s/s) = 200.7 PGV( cm/s) = 50.2  
 PGD( cm) = 18.171



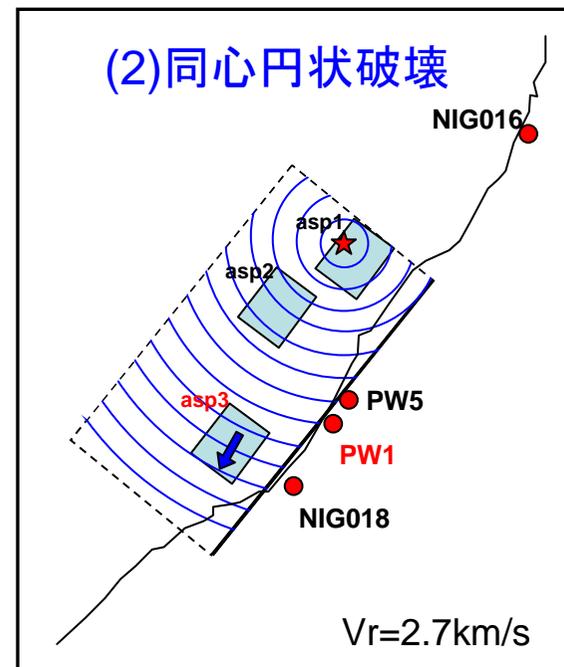
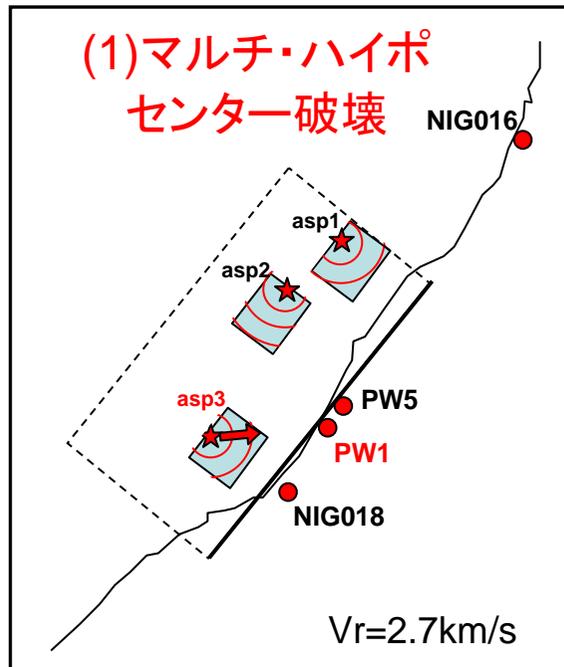
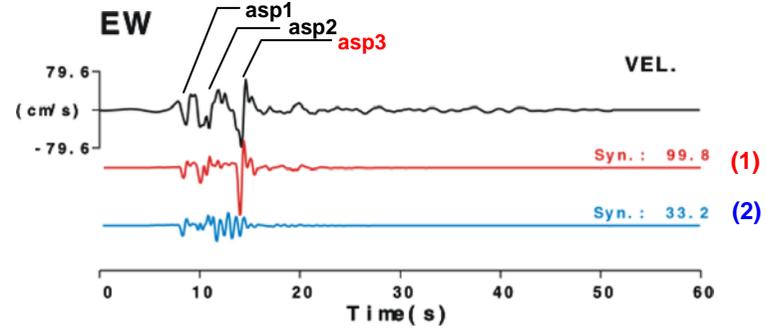
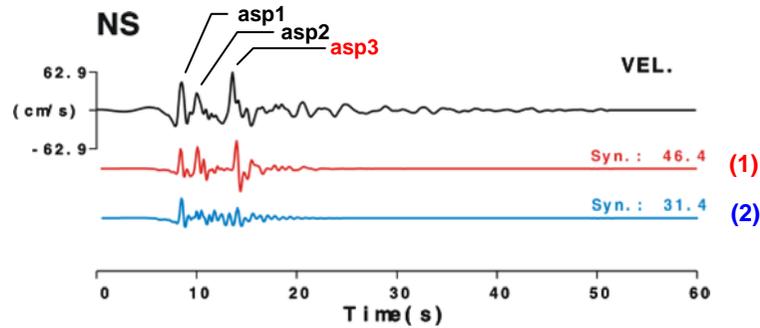
## 柏崎刈羽5号機(K1モデル)

DU5 . . / Dchu\_2007 fwd5/ Syn/ chun. DU5. 2700 mod2  
 PGA( cm/s/s) = 200.7 PGV( cm/s) = 50.2  
 PGD( cm) = 18.171

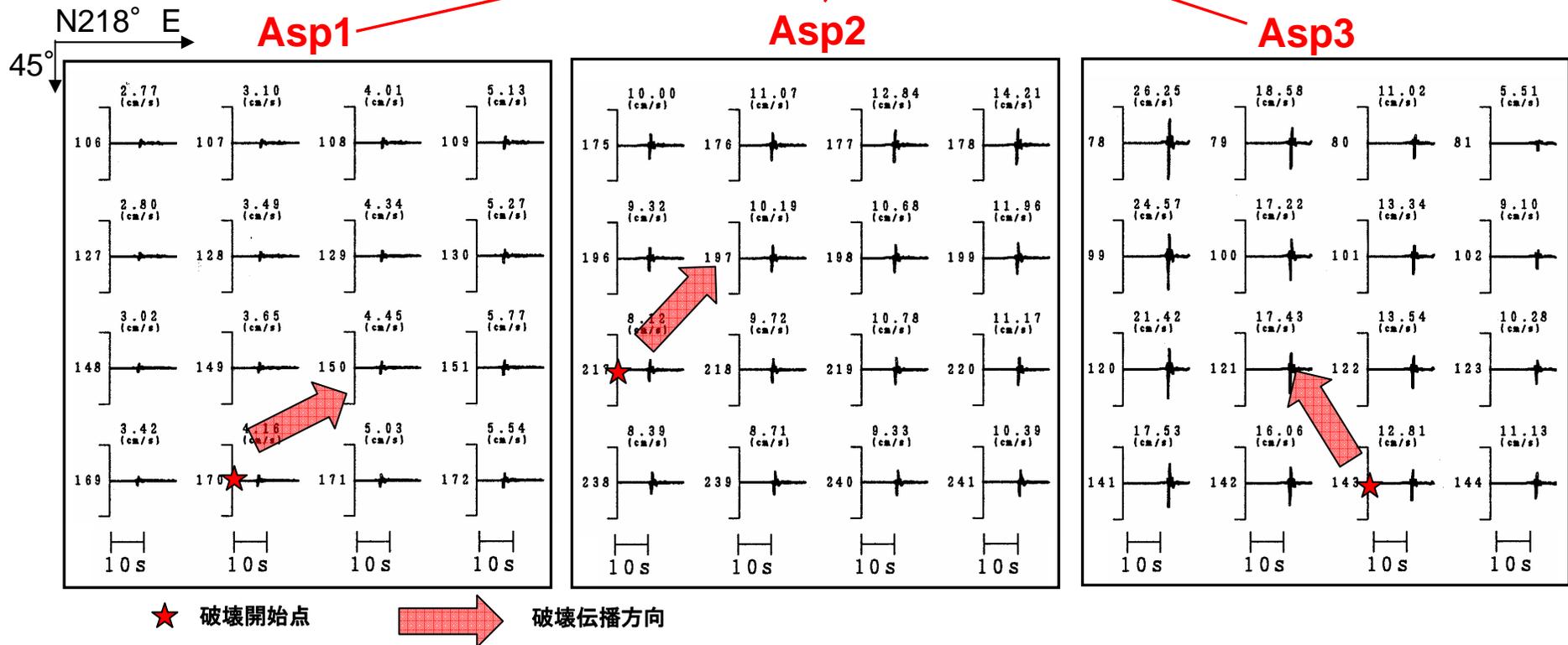
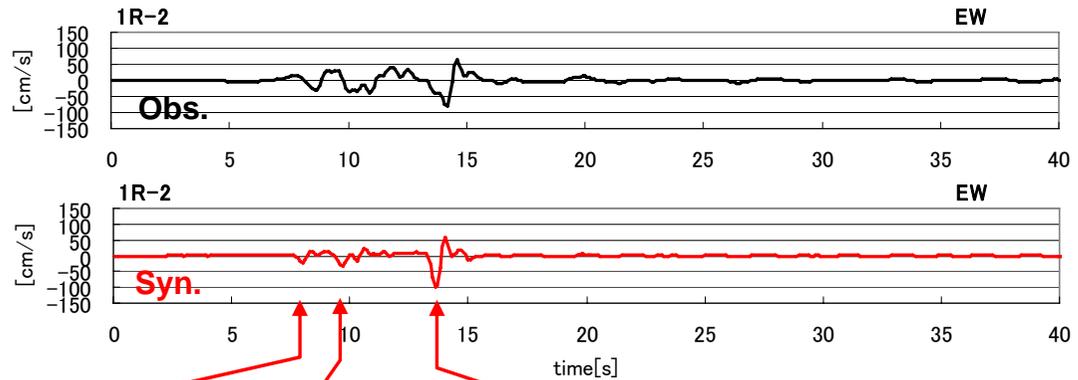
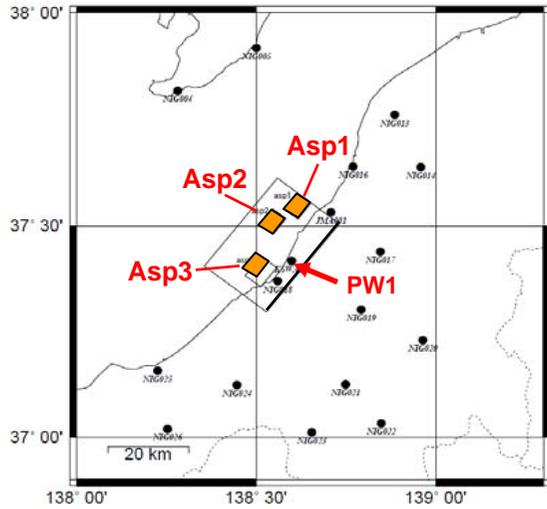


→  
 K1モデル  
 に変更

# 柏崎刈羽1号機(Unit1)への ディレクティビティ・パルス



# 柏崎刈羽1号機(Unit1)におけるディレクティブティ効果



## 理論的グリーン関数を用いた柏崎刈羽の強震動の検証結果

- ・震源域に近い柏崎刈羽で地震動が顕著に大きくなったのは、柏崎刈羽に近い震源断層面内にアスペリティの破壊が海側から陸側に向かって進行し、柏崎刈羽が強い指向性パルスに直撃されたため、と考えられる。
- rake angleは、1R2(1号機の基礎マット)では $90^\circ$  , 5R2(1号機の基礎マット)では $70^\circ$  が最適となる。ここでは $80^\circ$  を採用する。
- アスペリティ3からのディレクティビティ・パルスが1号機側で大きく5号機側で小さくなるのは、地盤構造の違いよりもアスペリティ3からの放射特性の影響の方が大きい。
- 断層面での破壊パターンは、破壊開始点から同心円状に広がるモデルよりも、各アスペリティごとに破壊開始点をもつ多重震源モデルの方が波形をよりよく説明できる。

# 2007年新潟県中越沖地震(Mj6.8) の震源のモデル化(第3報)

京都大学原子炉実験所  
釜江克宏・川辺秀憲

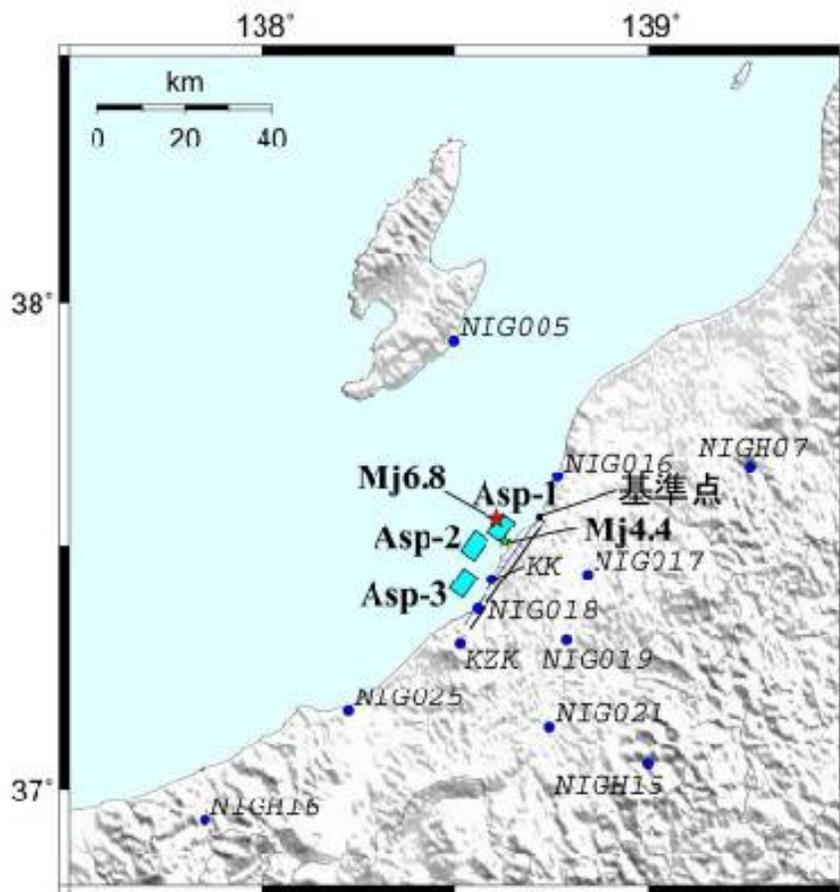


図1 2007年新潟県中越沖地震(Mj6.8)、経験的グリーン関数として用いた地震(Mj4.4)の震央位置、K-NET、KiK-net、F-net及びKK発電所観測点位置、並びに3つのアスペリティからなる震源モデル(アスペリティのみ)の位置

表1 経験的グリーン関数として用いた地震の諸元

Origin Time (JST)	2007/7/16 21:08
Latitude (deg)	37.509
Longitude (deg)	138.630
Depth (km)	20.4
$M_{JMA}$	4.4
Seismic moment (Nm) *	$5.21 \times 10^{16}$
Focal Mechanism Solution* [Strike/Rake/Dip]	187/54/70 39/41/115
Area (km <sup>2</sup> )	1.4 × 1.4
Stress Drop (MPa)	4.6

\* F-net

## 3つのアスペリティからなる震源モデル

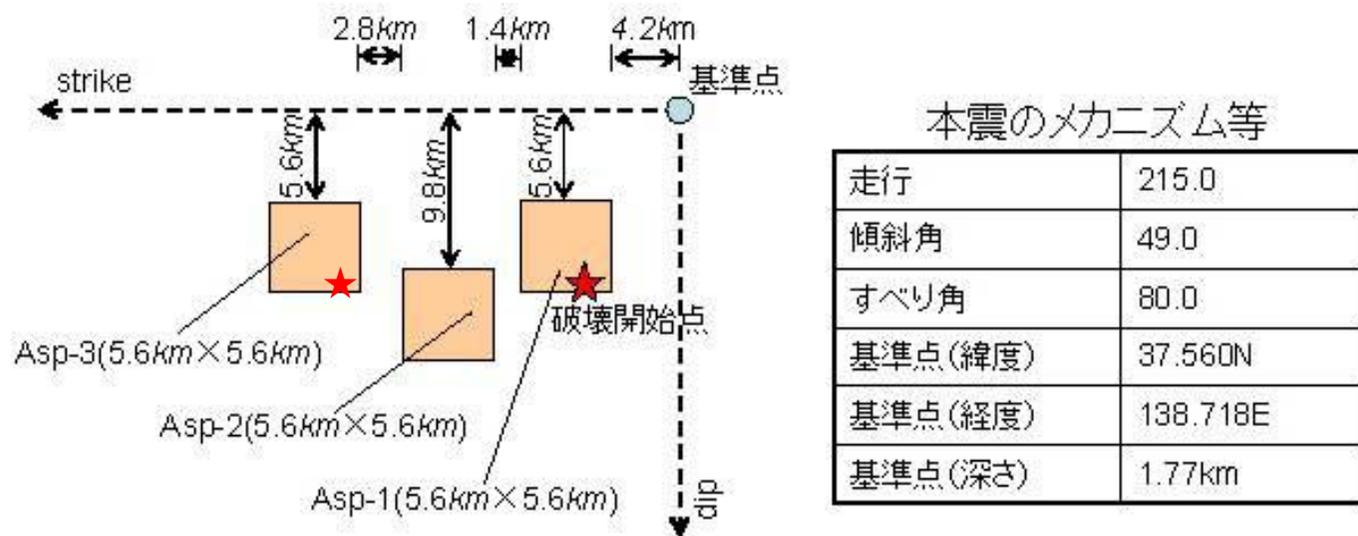


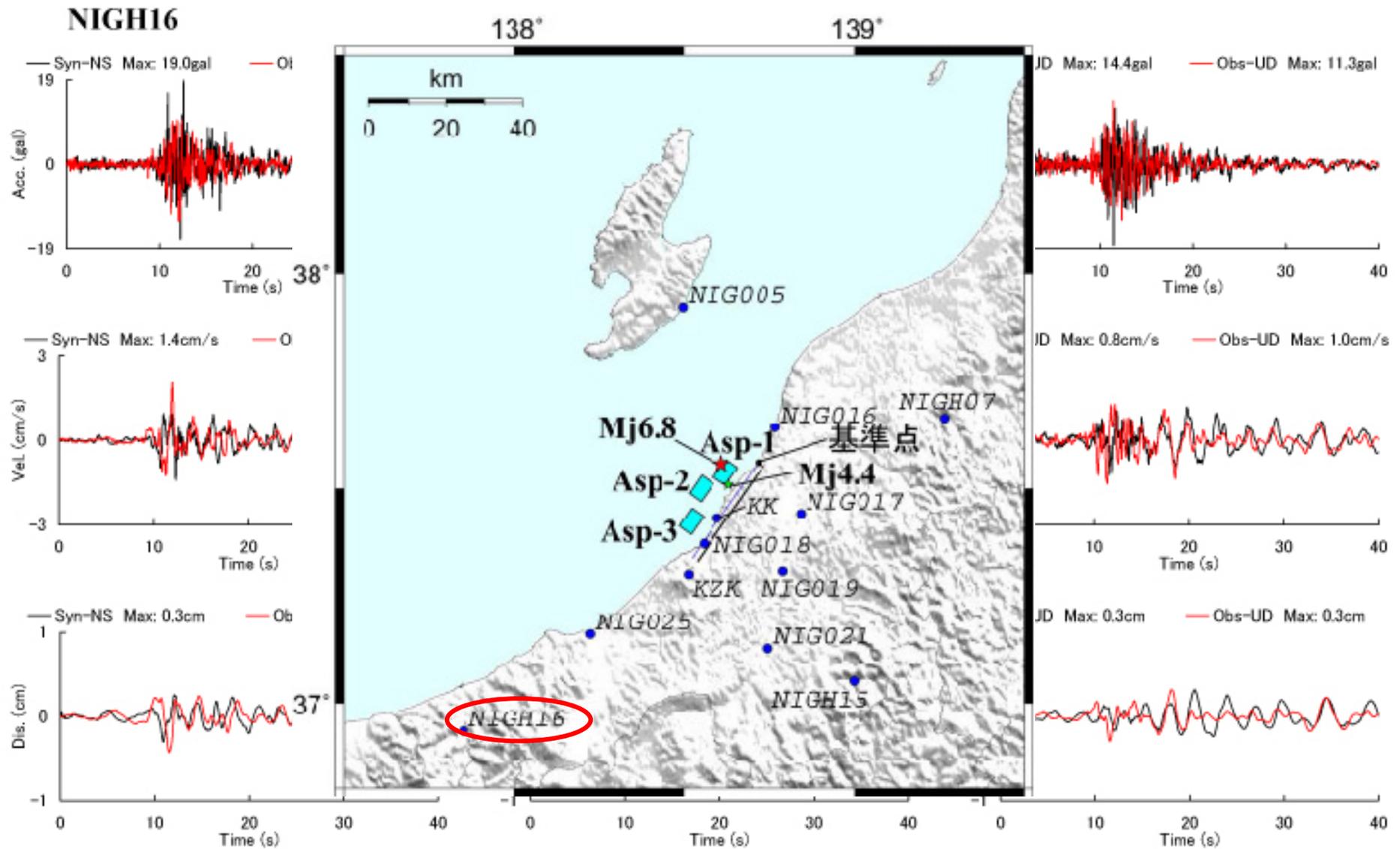
図2 2007年新潟県中越沖地震の3つのアスペリティからなる震源モデル

表2 2007年新潟県中越沖地震の震源パラメータ

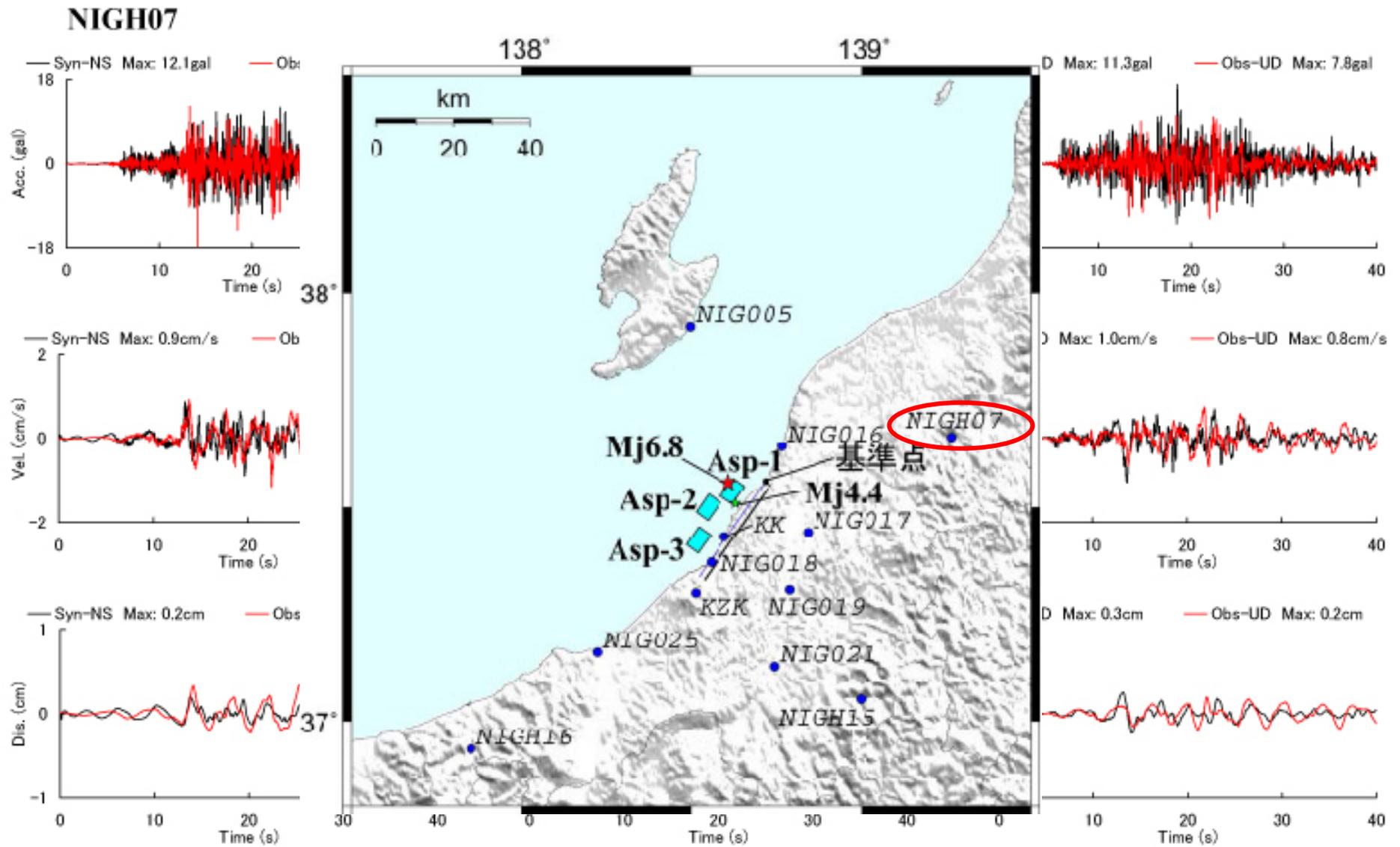
	$M_0$ (Nm)	L(km) × W(km)	$\Delta \sigma$ (MPa)	$\tau$ (sec)
Asp-1	$1.93 \times 10^{18}$	5.6 × 5.6	18.4	0.5
Asp-2	$1.50 \times 10^{18}$	5.6 × 5.6	20.7	0.5
Asp-3	$8.94 \times 10^{17}$	5.6 × 5.6	11.5	0.5

破壊速度: 2.7km/sec

## 震源パラメータ

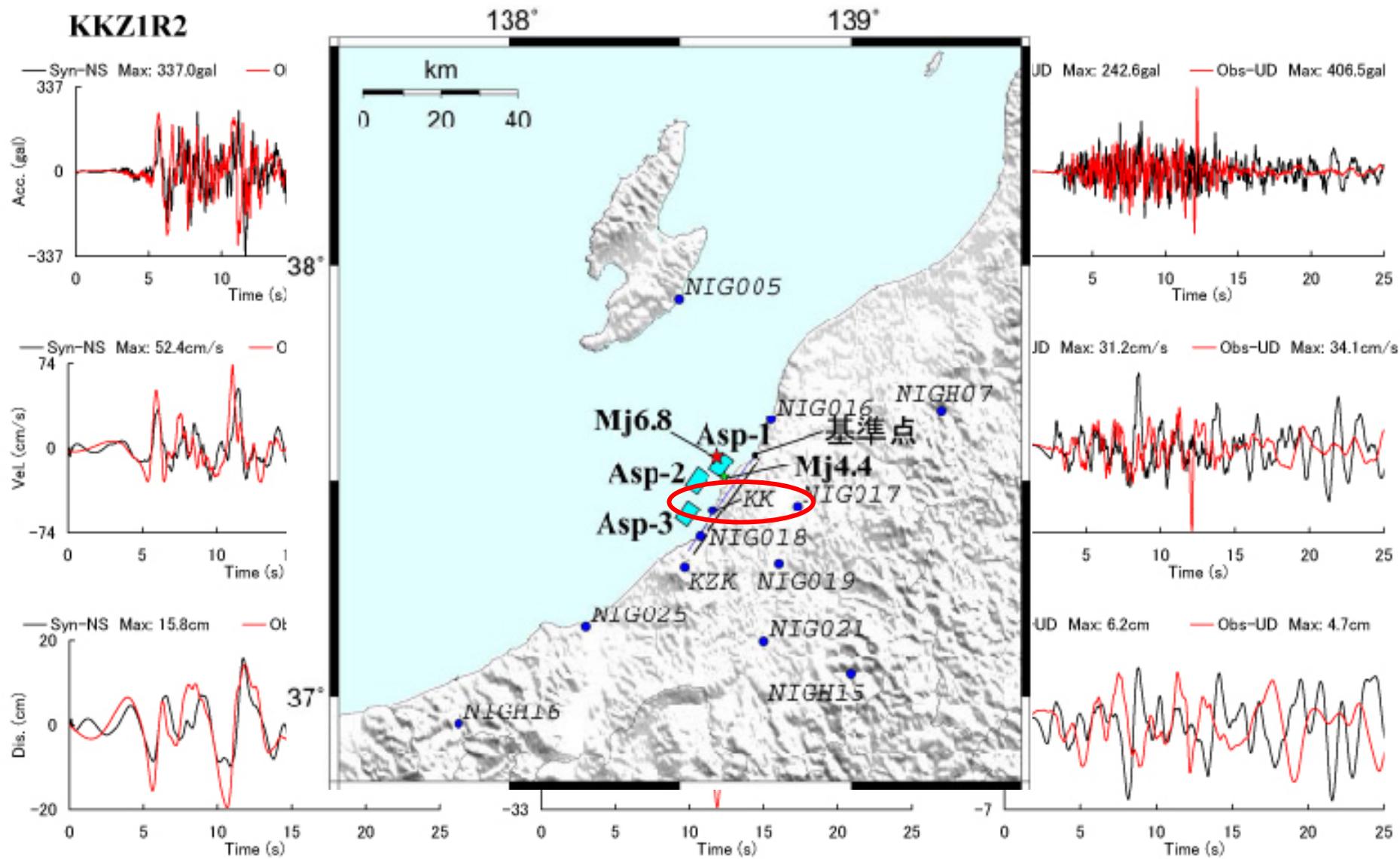


観測波形と合成波形の比較 (5)



観測波形と合成波形の比較 (3)

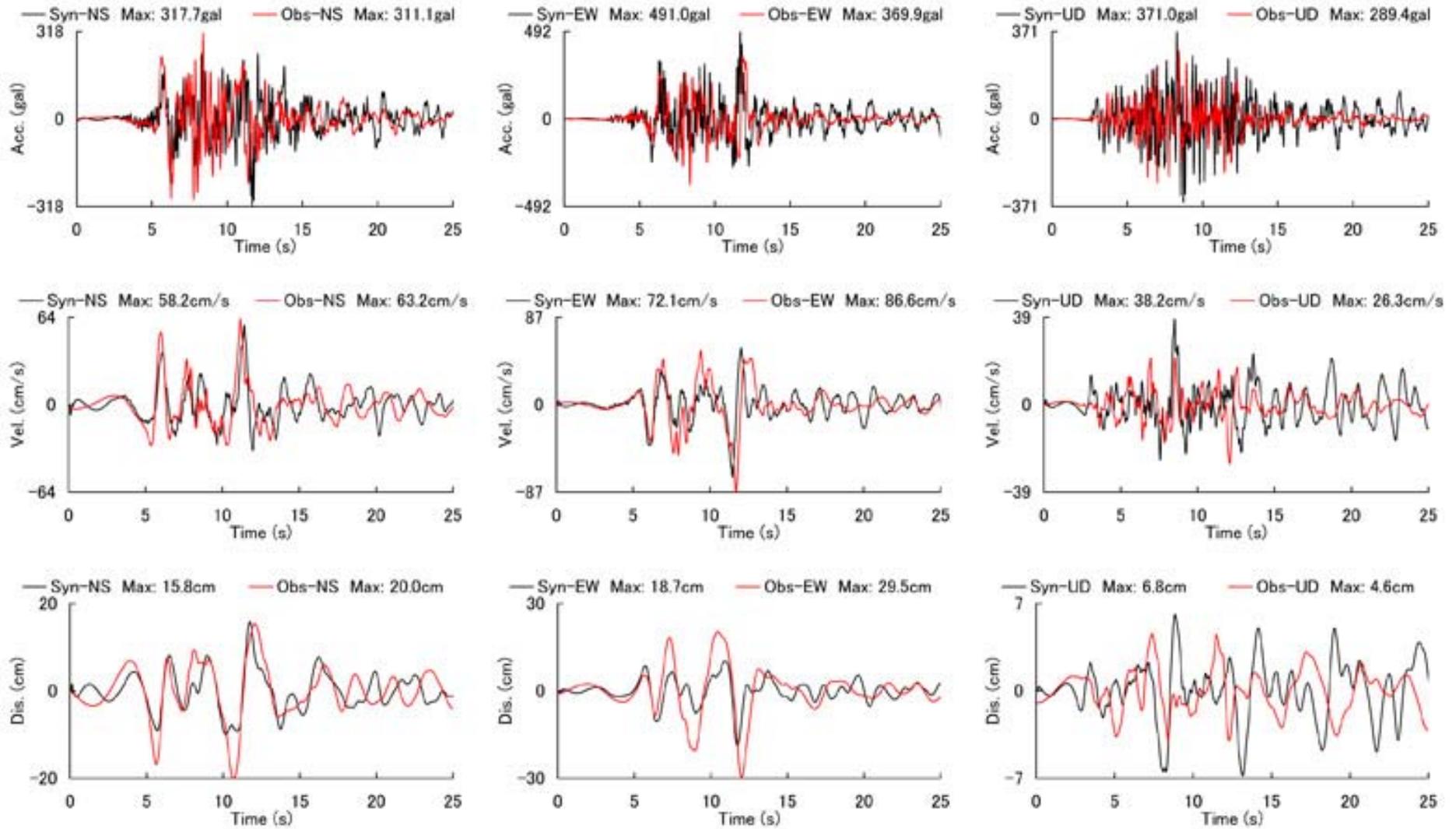




観測波形と合成波形の比較 (10)

1号機ベースマット上

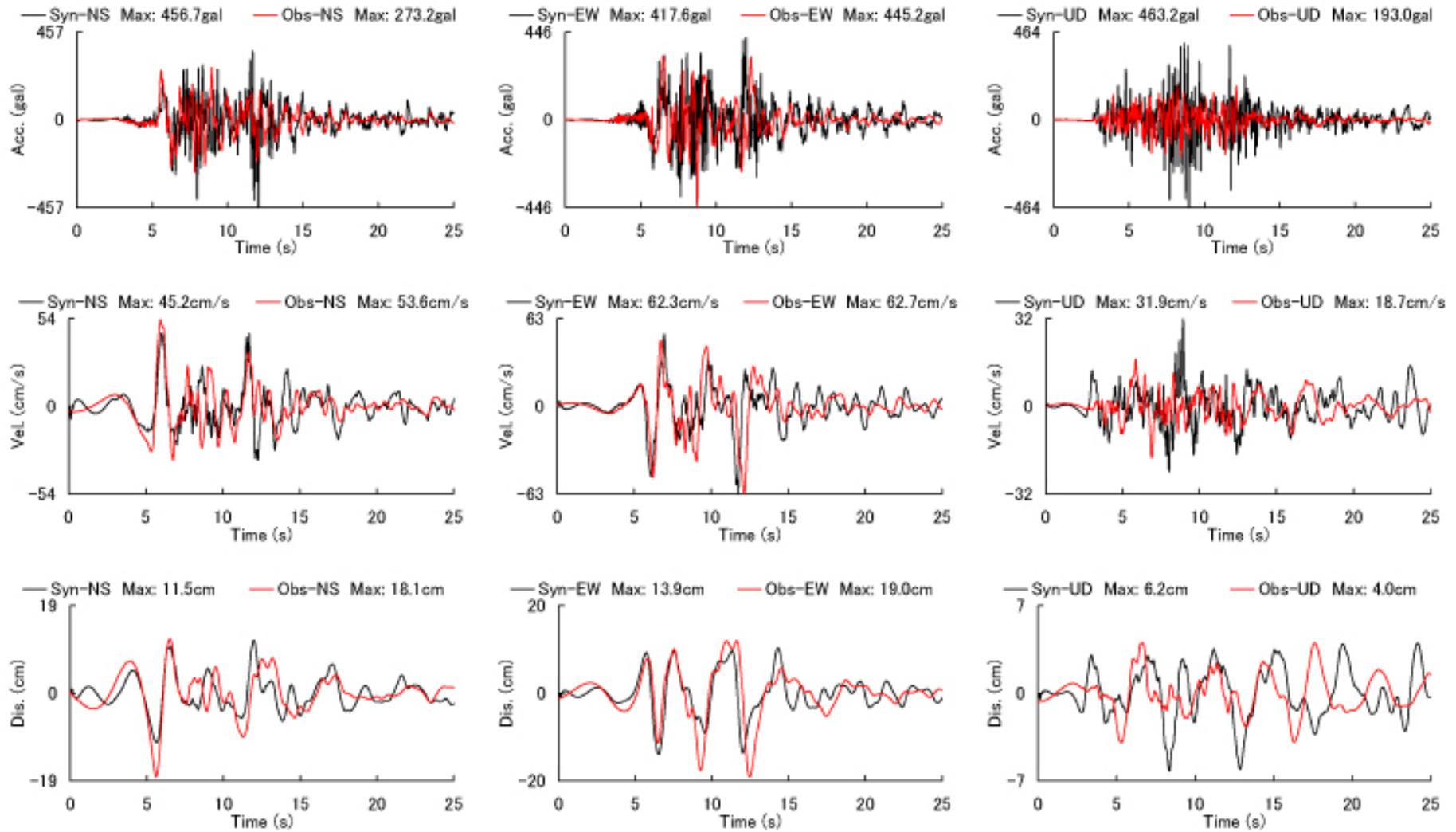
## KKZ3R2



観測波形と合成波形の比較 (12)

3号機ベースマット上

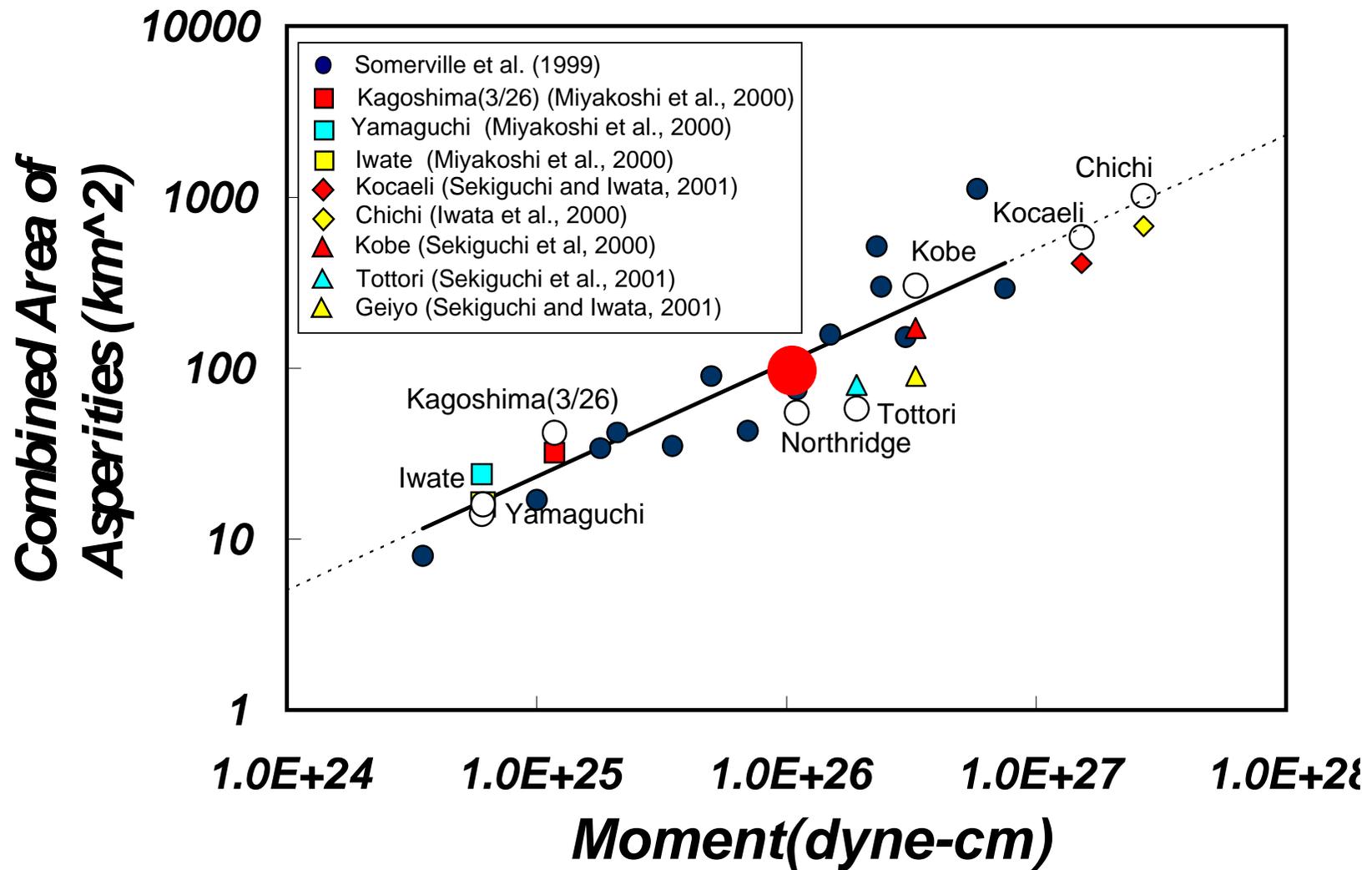
# KKZ5R2



観測波形と合成波形の比較 (14)

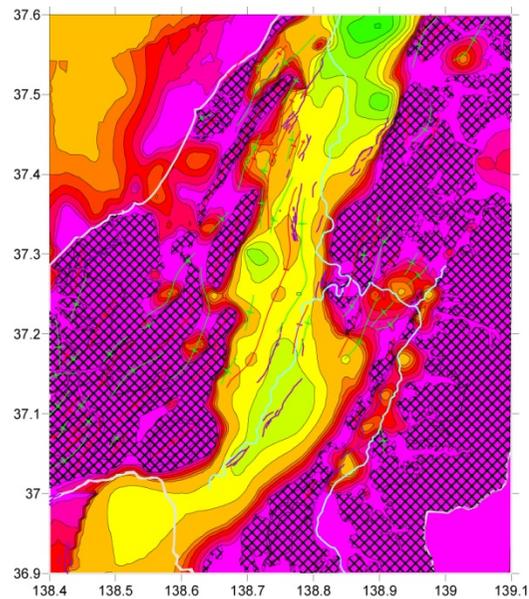
5号機ベースマット上

# 全アスペリティの大きさと地震規模との関係

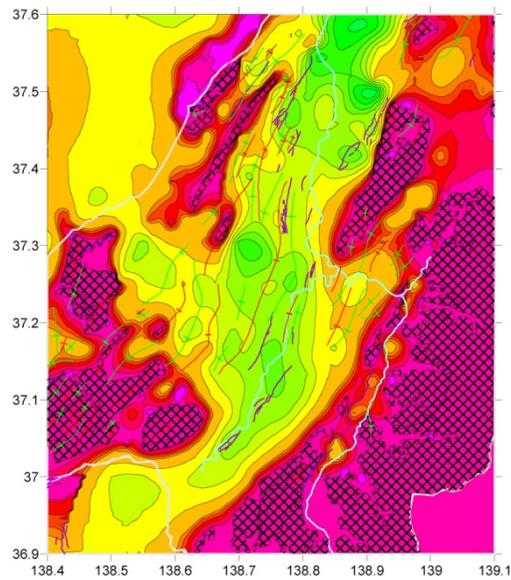


# 震源モデルを用いた本震記録の 理論的シミュレーション

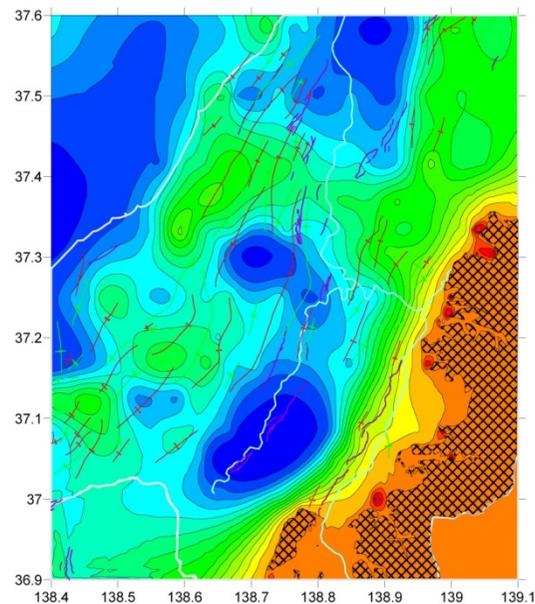
- ・1号機、5号機のベースマット位置
- ・F-net(柏崎)観測点



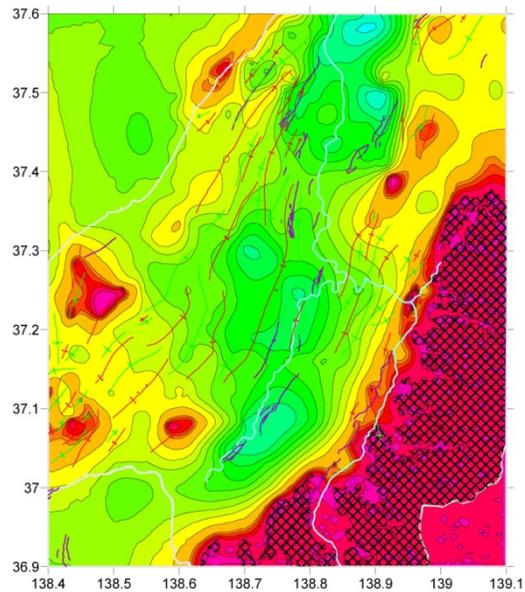
Vs1.4km/s層上面深度（西山層）



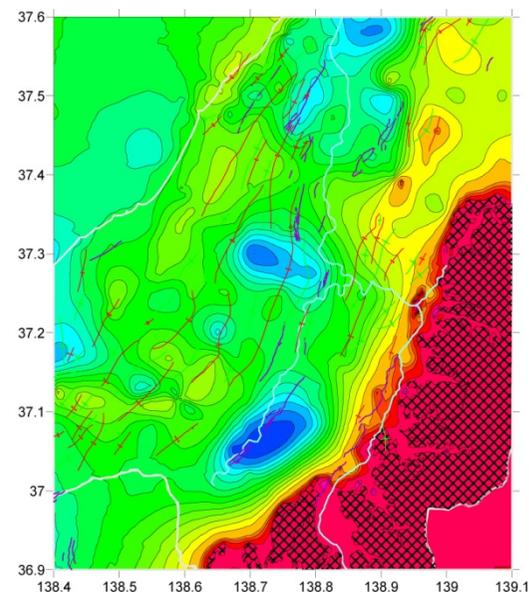
Vs1.7km/s層上面深度（椎谷層+上部寺泊層）



Vs3.0km/s層上面深度（基盤岩類）



Vs1.8km/s層上面深度（下部寺泊層）



Vs2.4km/s層上面深度（七谷層+グリーンタフ）

JNES(2005)

表3 離散化波数法の計算に使用した地下構造モデル

(a) KK発電所 1号機原子炉建屋地下5階

層上面深さ (m)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	S波速度 (km/s)	P波速度 (km/s)
0	1.85	0.50	1.60
28	1.90	0.54	1.75
109	2.05	0.65	1.80
191	2.10	0.70	1.85
350	2.25	1.40	3.10
1500	2.35	1.70	3.70
2250	2.40	2.00	4.10
3000	2.50	2.40	4.70
5300	2.65	3.00	5.50
5600	2.70	3.50	5.80

KK発電所1号機

(b) KK発電所 5号機原子炉建屋地下4階

層上面深さ (m)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	S波速度 (km/s)	P波速度 (km/s)
0	1.85	0.50	1.73
9	1.90	0.54	1.75
42	1.90	0.55	1.78
65	1.95	0.66	1.93
96	2.00	0.77	2.00
125	2.05	0.84	2.02
207	2.10	0.86	2.12
242	2.10	0.87	2.29
400	2.35	1.70	3.70
2250	2.40	2.00	4.10
3000	2.50	2.40	4.70
5300	2.65	3.00	5.50
5600	2.70	3.50	5.80

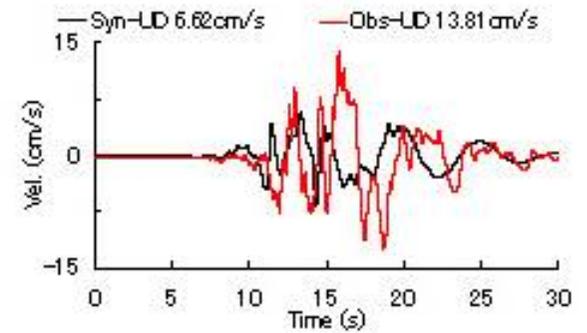
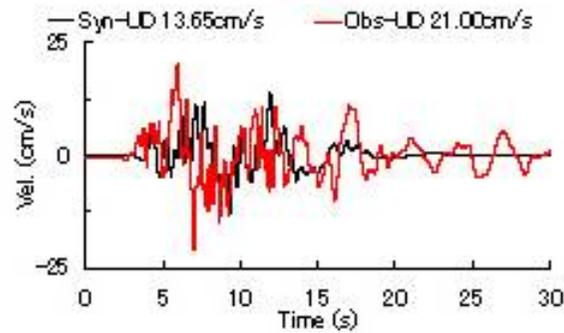
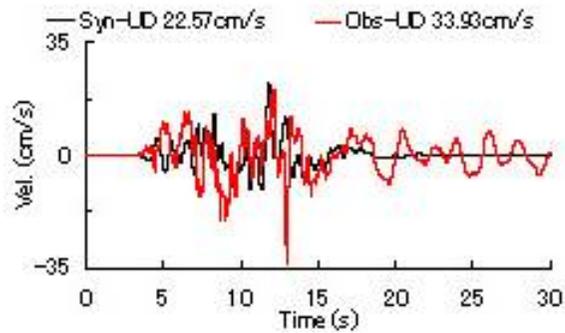
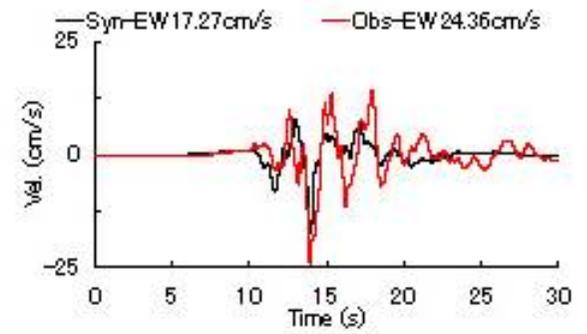
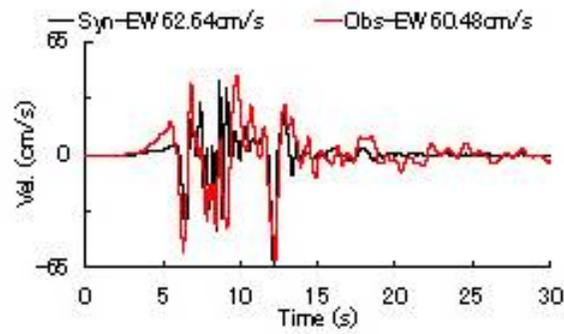
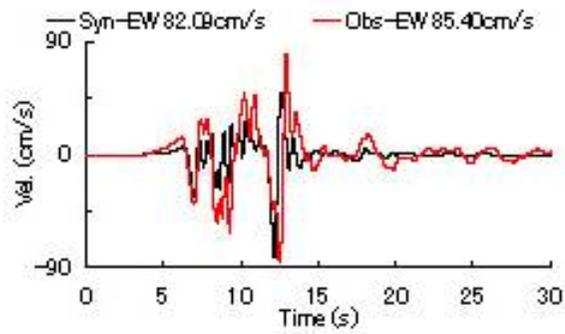
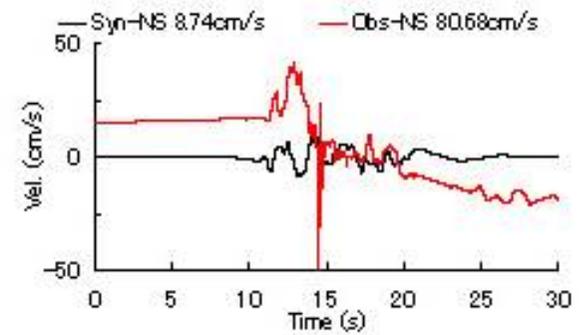
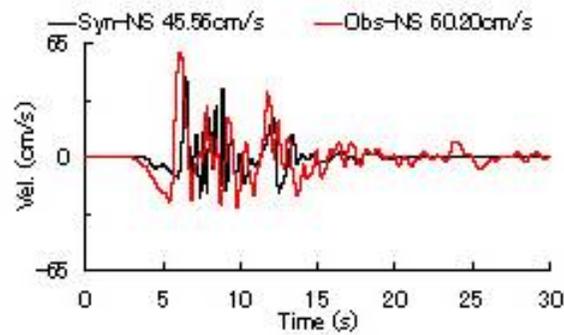
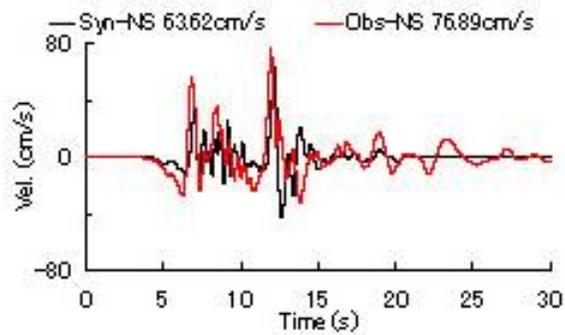
KK発電所5号機

(c) F-net KZK(柏崎)

層上面深さ (m)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	S波速度 (km/s)	P波速度 (km/s)
0	2.25	1.40	3.10
1000	2.35	1.70	3.70
1100	2.35	1.70	3.70
1800	2.40	2.00	4.10
3700	2.50	2.40	4.70
5500	2.50	2.40	4.70
5600	2.65	3.00	5.50
5700	2.70	3.50	5.80

F-net柏崎(KZK)





(a) KK発電所 1号機原子炉建屋地下5階

(b) KK発電所 5号機原子炉建屋地下4階

(c) F-net KZK(柏崎)

KK発電所及びF-net柏崎(KZK)における波数積分法  
による理論的シミュレーション結果と観測記録の比較

## 釜江・川辺(2007)による研究のまとめ

今回の地震の断層面としてはKK発電所での観測記録などから西落ちが有力であるとの判断の下、また震源南西方向に位置するF-net柏崎(KZK)も含めた経験的グリーン関数法を用いた震源のフォワードモデリングを行った。さらに、KK原子力発電所における本震データや地盤情報の公開を受け、理論的シミュレーションを行った。結果として、西落ちの断層面上に3つのアスペリティを有する震源モデルを提案した。ただし、3つのアスペリティの震源パラメータ(応力降下量や地震モーメント)については、これまでの内陸地殻内地震の結果とほぼ整合する結果を得た。今後よりKK発電所の余震の公開を待って、震源モデルの有効性を検証する必要がある。

京都大学原子炉実験所釜江研究室ホームページ参照

## 謝辞

ここでは(独)防災科学技術研究所によるK-NETの観測記録を使用させていただきました。また、東京電力株式会社による柏崎・刈羽原子力発電所の観測記録を使用させていただきました。ここに記して感謝いたします。