

# 平成19年新潟県中越沖地震の強震動の特徴

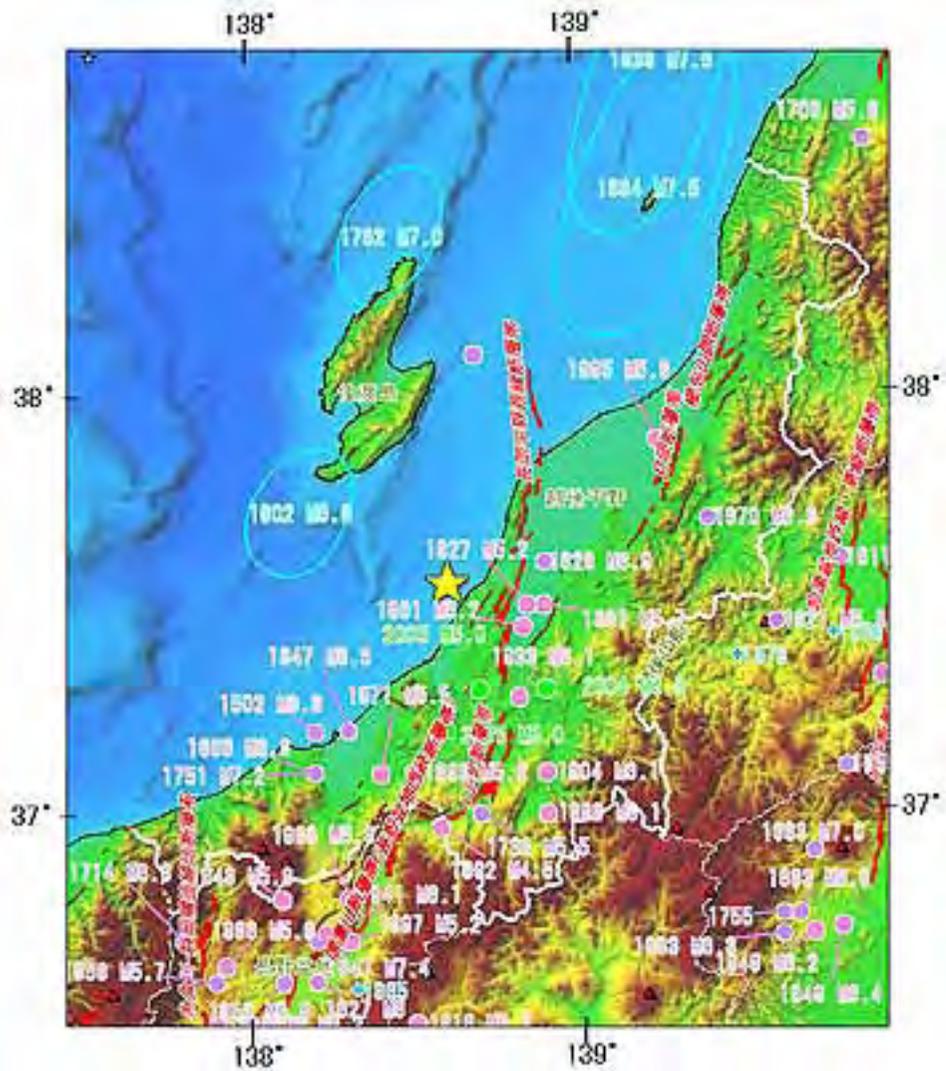
—原子力発電所サイトを襲ったと思われる

強震動とは？—

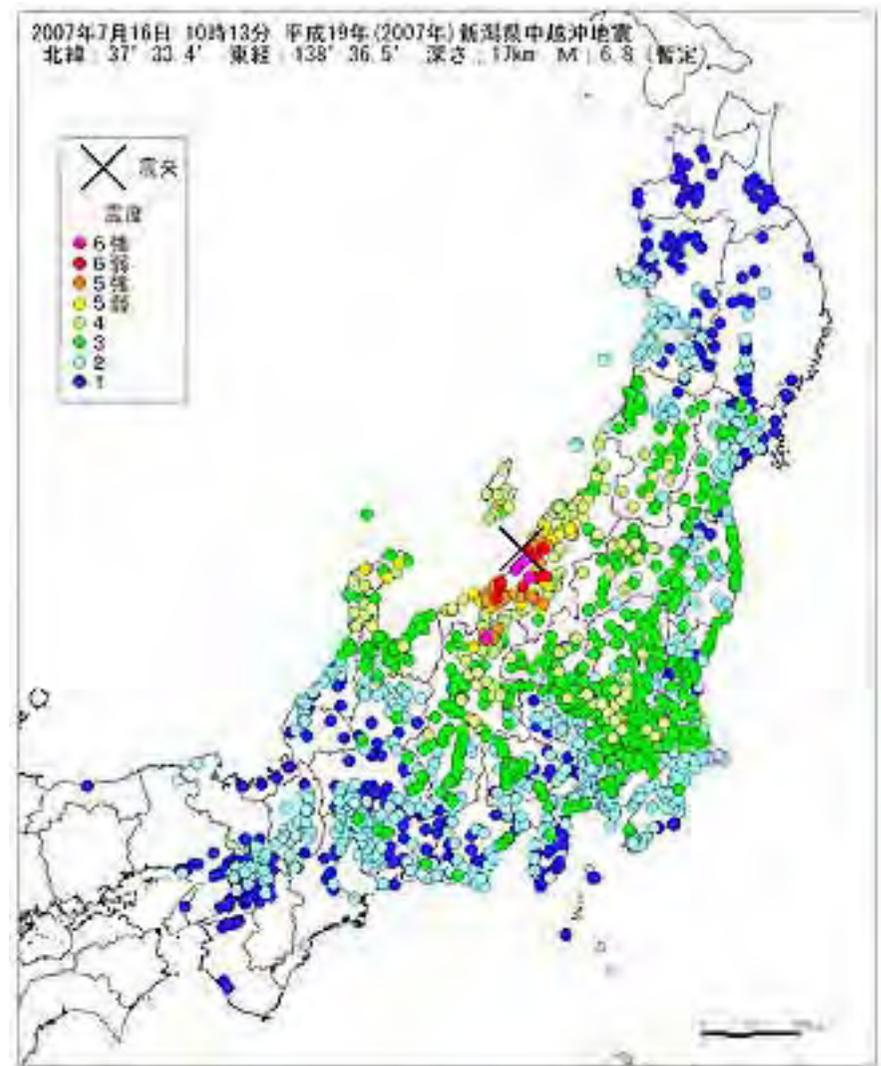
京都大学原子炉実験所

安全原子力システム研究センター

釜江克宏



今回の地震の震央と過去の地震の震央及び周辺活断層



今回の地震の震度分布

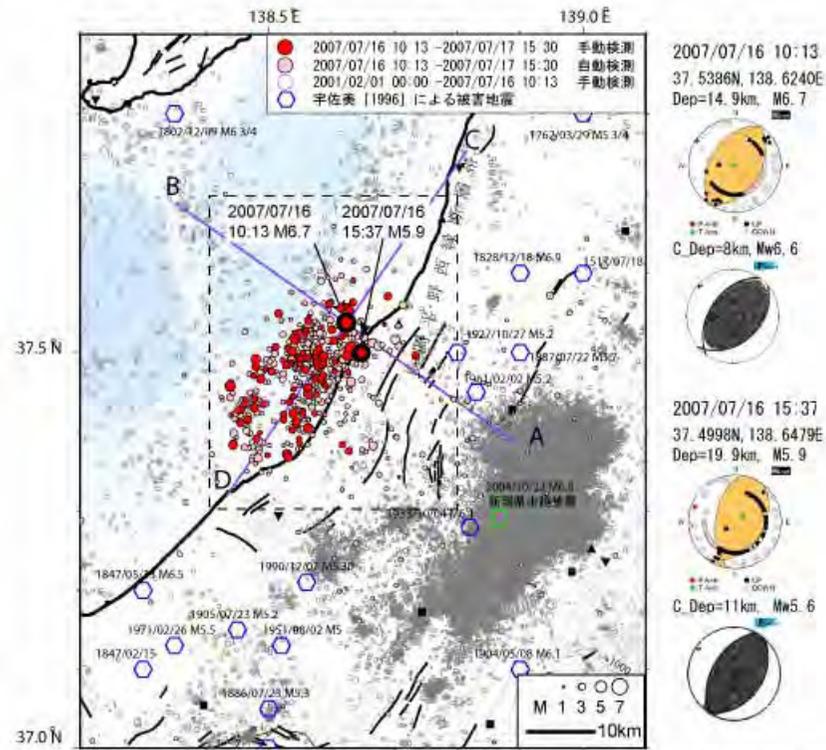


図1 震央分布図。中越沖地震の本震発生から翌17日15時30分までの防災科学技術BI-net 手動検測震源および自動検測震源を赤丸および桃色丸印でそれぞれ示す。灰色丸印は、2001年2月から本震発生までの手動検測震源を表す。また、宇佐美(1996)による被害地震の震央を青色六角印で併せて示す。

図2 本震および最大余震のBI-net初動解およびBI-net CMT解。

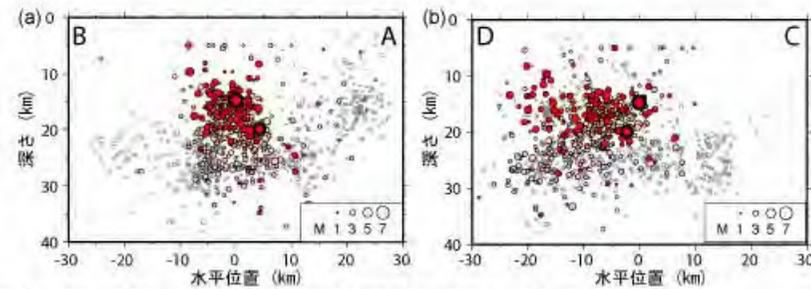
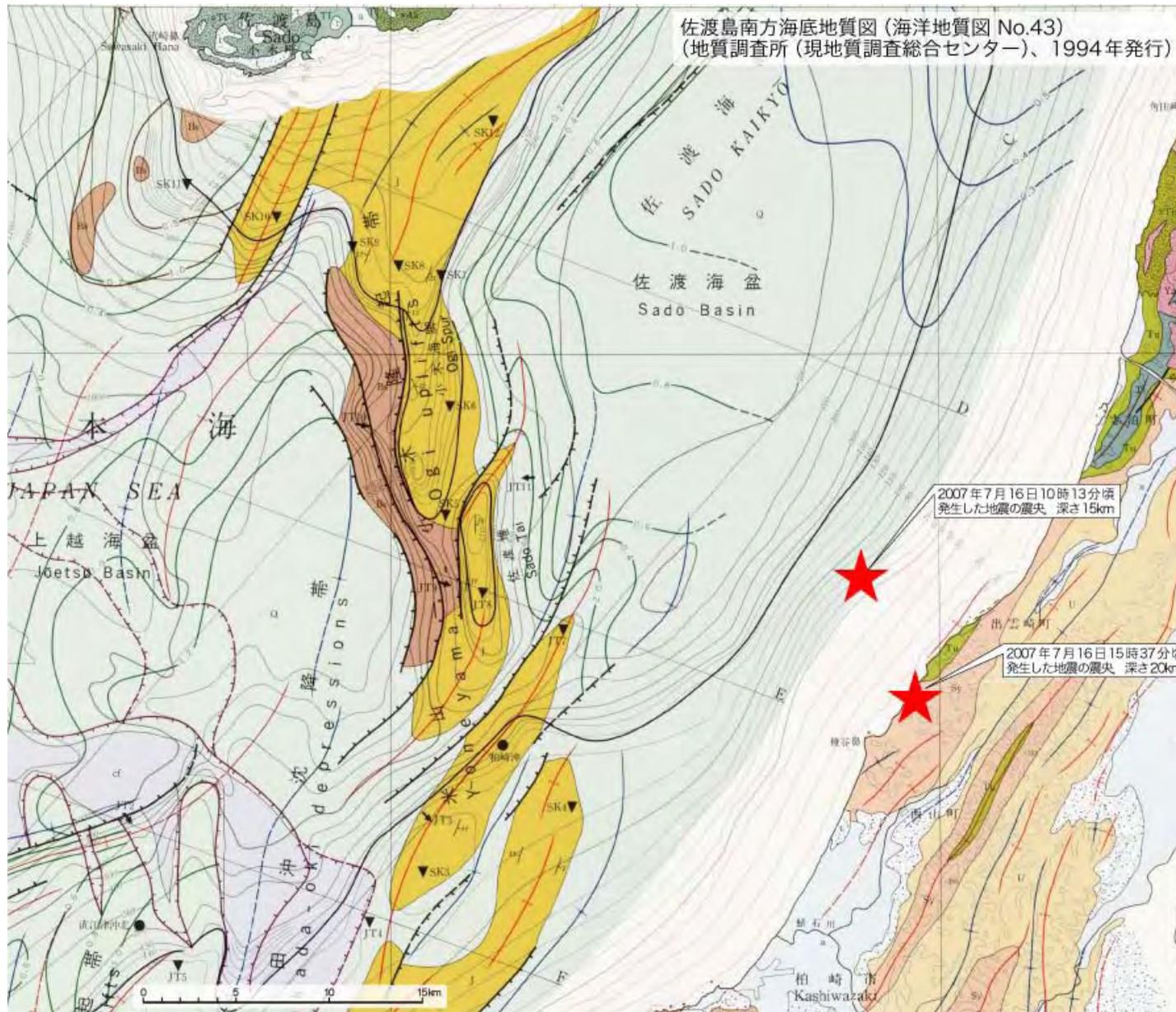
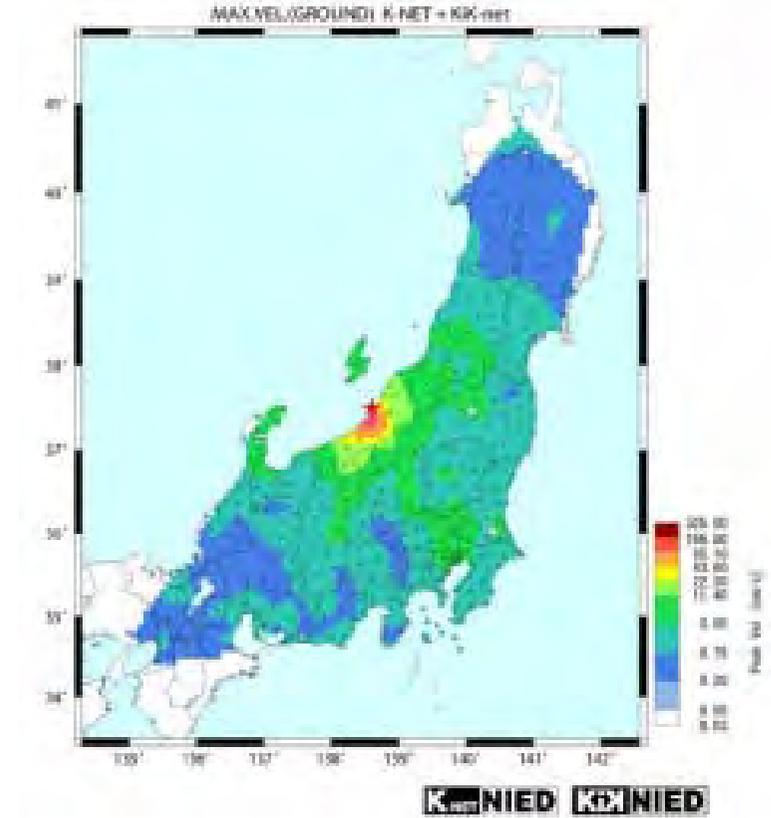
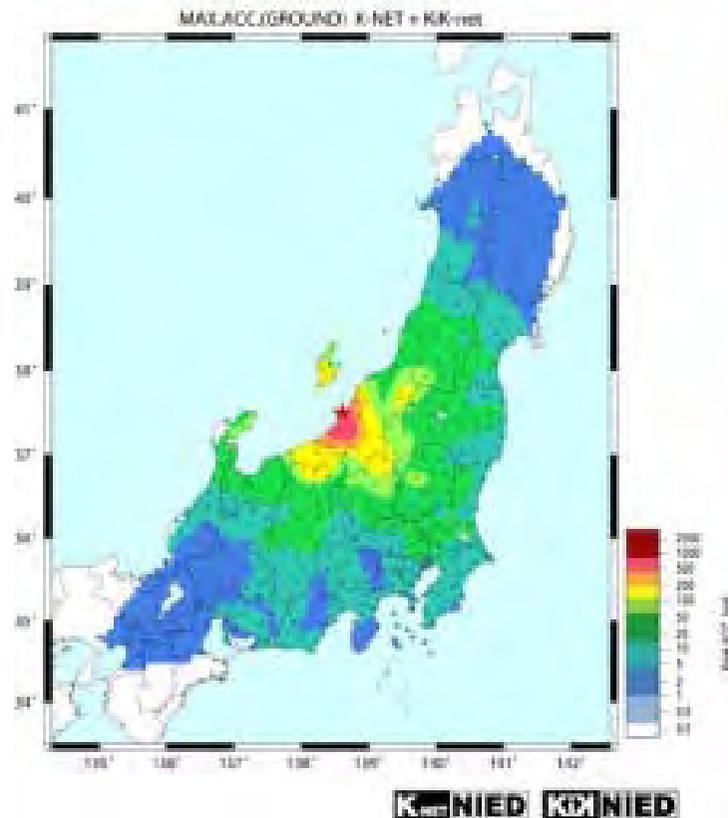


図3 (a) A-B鉛直断面、(b) C-D鉛直断面における震源の深さ分布。シンボルは図1に同じ。鉛直断面の位置は図1中に示す。

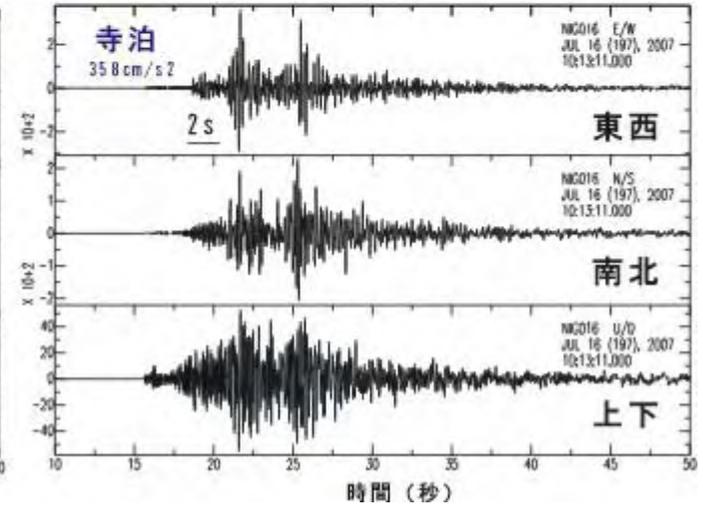
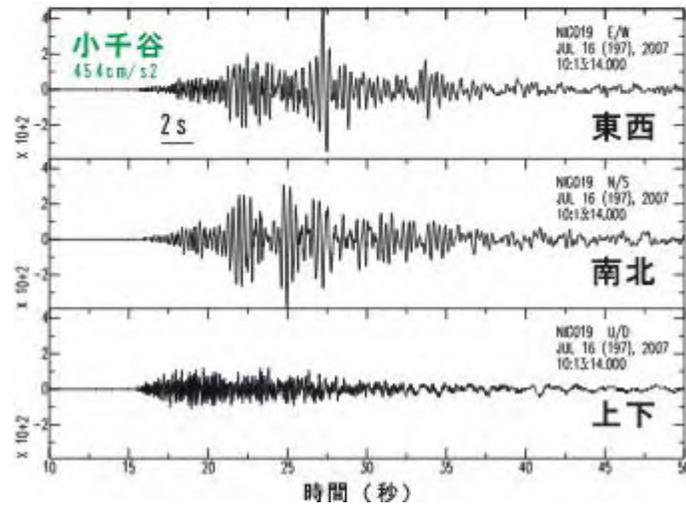
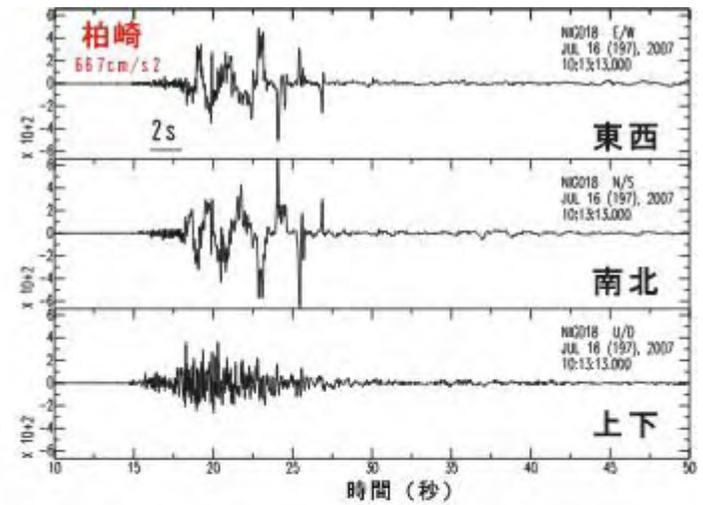
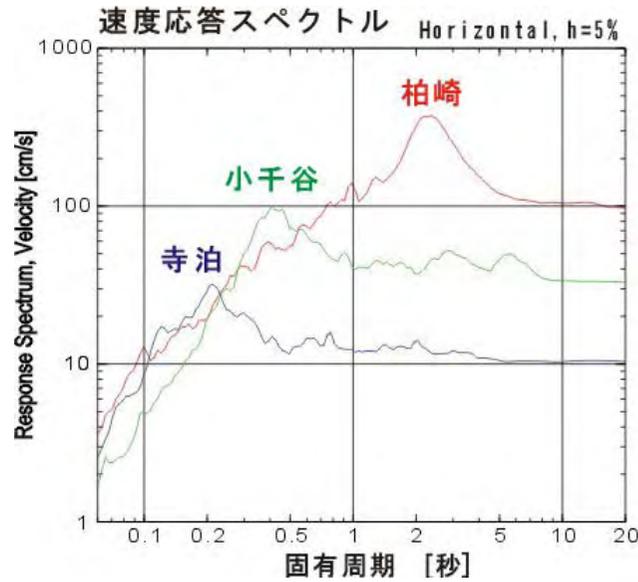
2007/07/18 作成



## 最大加速度・最大速度分布



(独)防災科学技術研究所



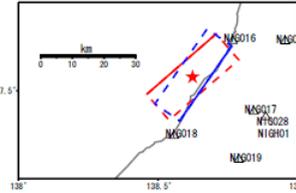
本震時の観測波形例 (K-NET)

(独)防災科学技術研究所

Fault-1: strike= 49, dip=42, length= 29.1, width= 14.6, top depth= 10.0  
Fault-2: strike=215, dip=49, length= 29.1, width= 14.6, top depth= 9.4

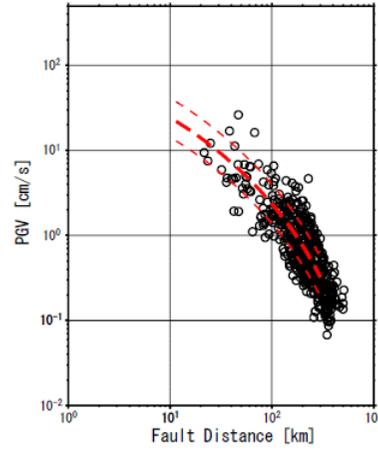
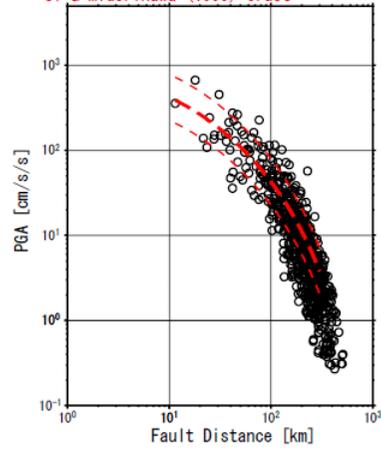
## 距離減衰

F-net暫定解をもと  
にした仮定断層面

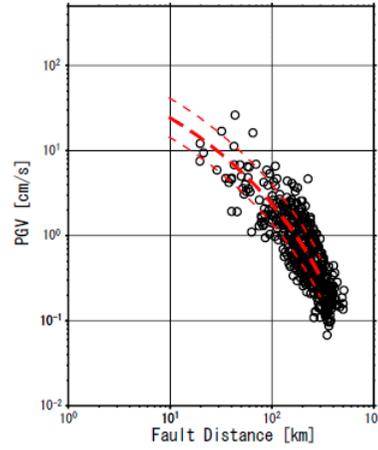
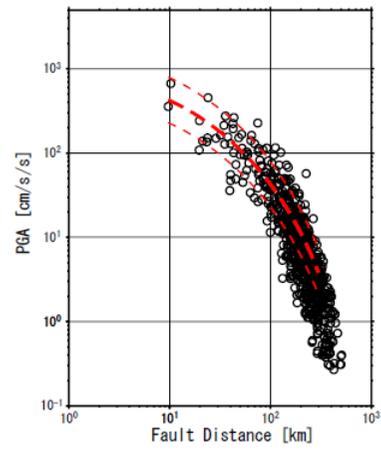


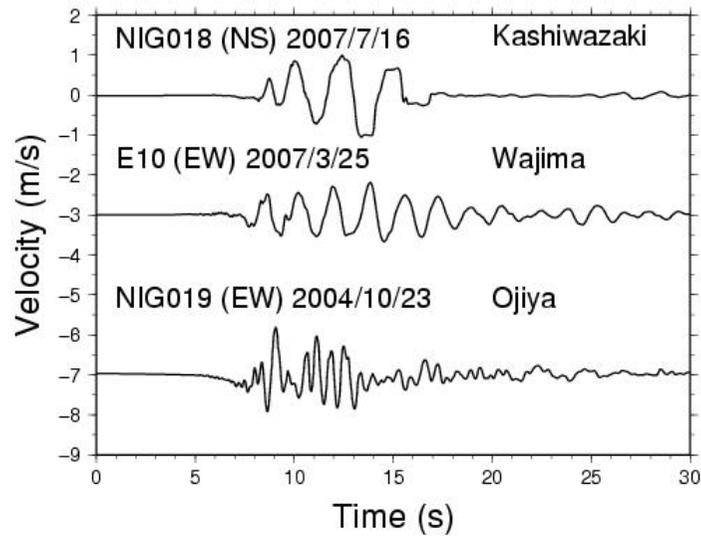
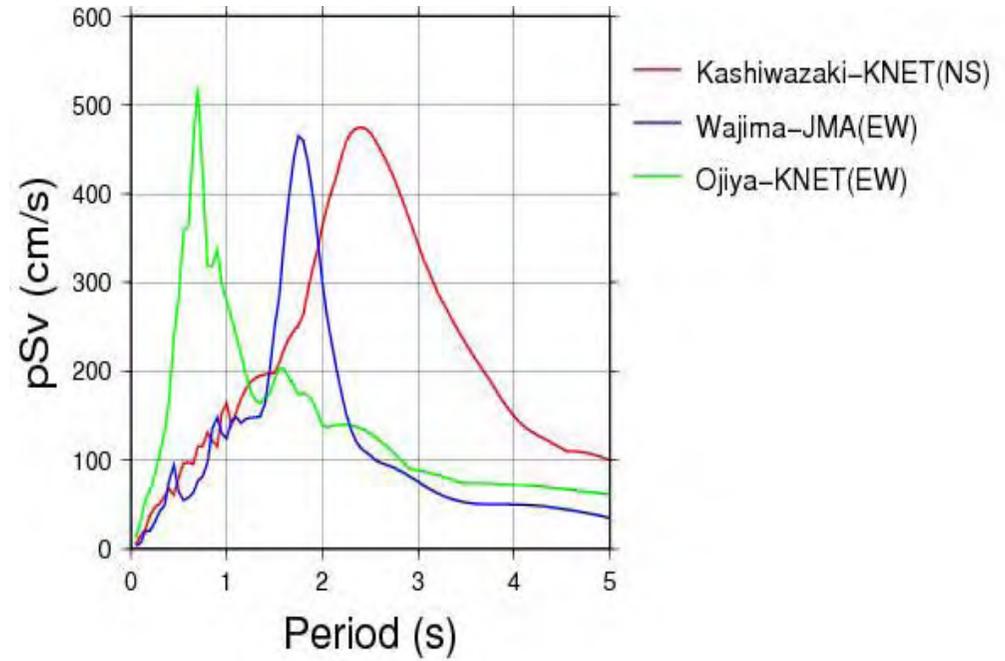
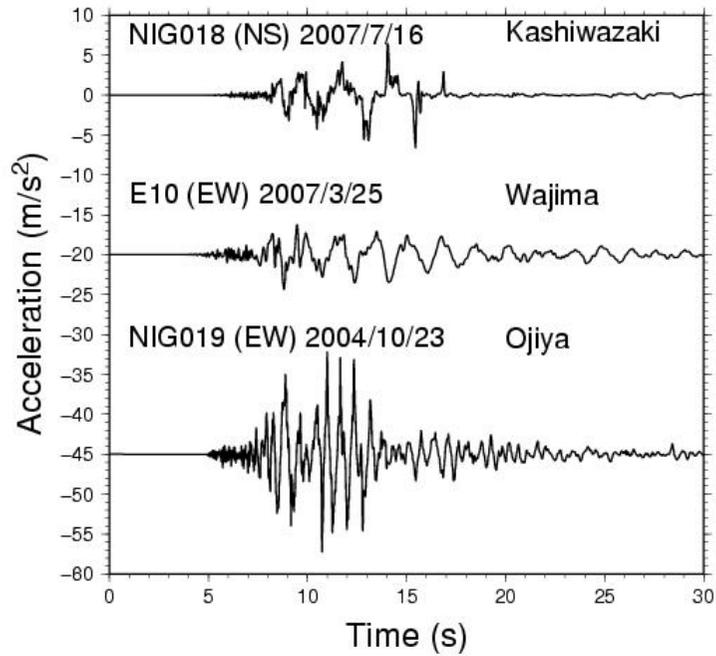
南東傾斜の断層面 (赤線) を仮定した場合

2007/07/16 10:13 Mw=6.6 (F-net), H=14.9km (Hi-net)  
Si & Midorikawa (1999) crust



北西傾斜の断層面 (青線) を仮定した場合



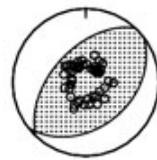
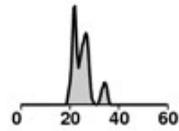


京都大学防災研究所  
強震動地震学分野

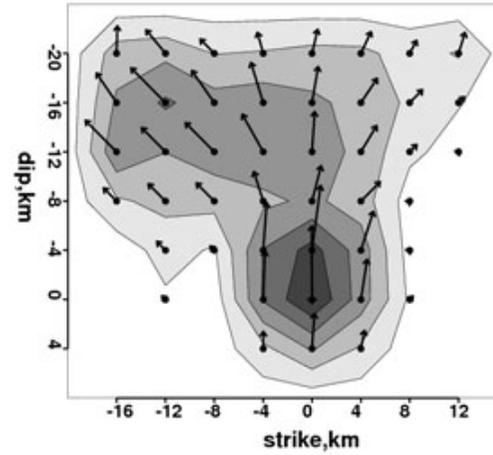
# Niigata-Chuetsu-Oki 07/07/16

Mo = .839E+19 Nm Mw = 6.55

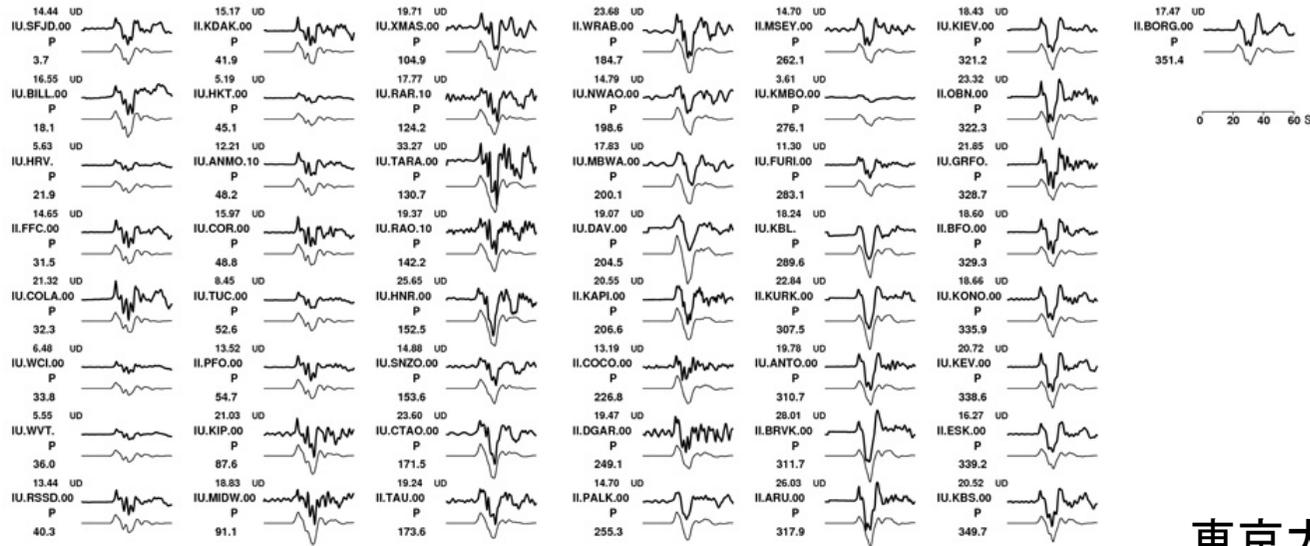
H = 16.0km var. = .4065



( 52.,38., 97.)



## Niigata-Chuetsu-Oki 07/07/16

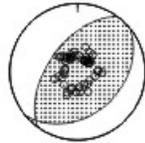
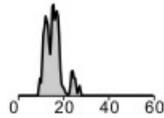
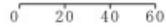


東京大学地震研究所

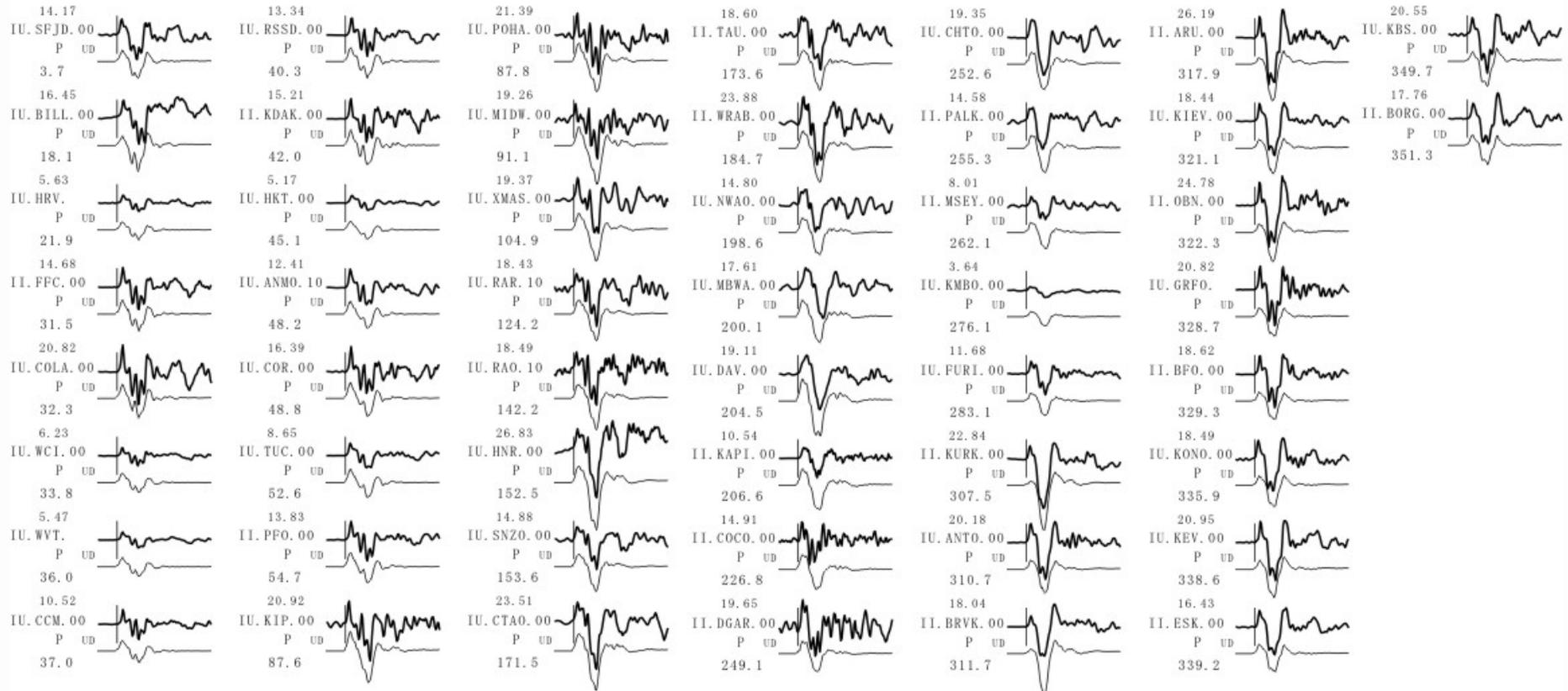
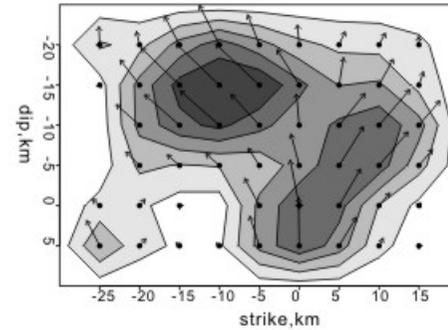
# Niigata 07/07/16

Mo = 0.103E+20 Nm Mw = 6.61

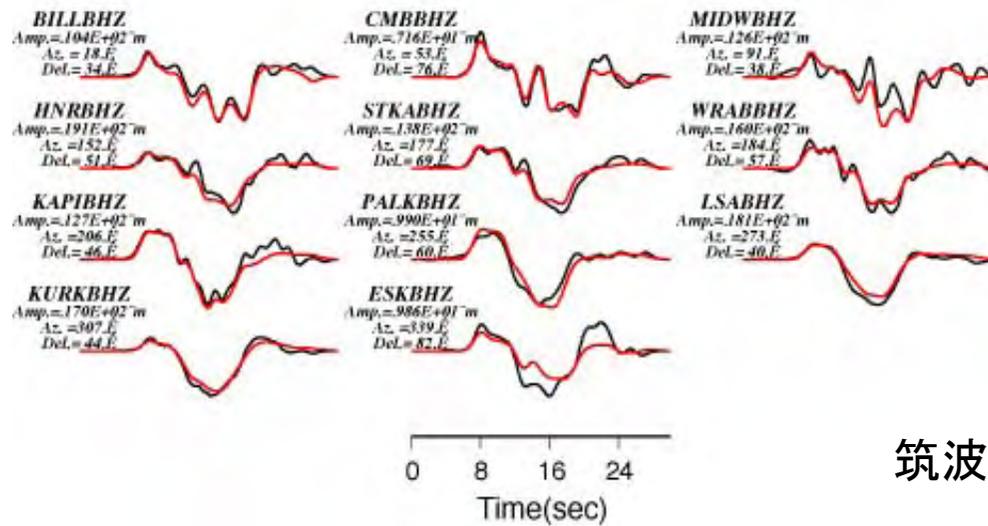
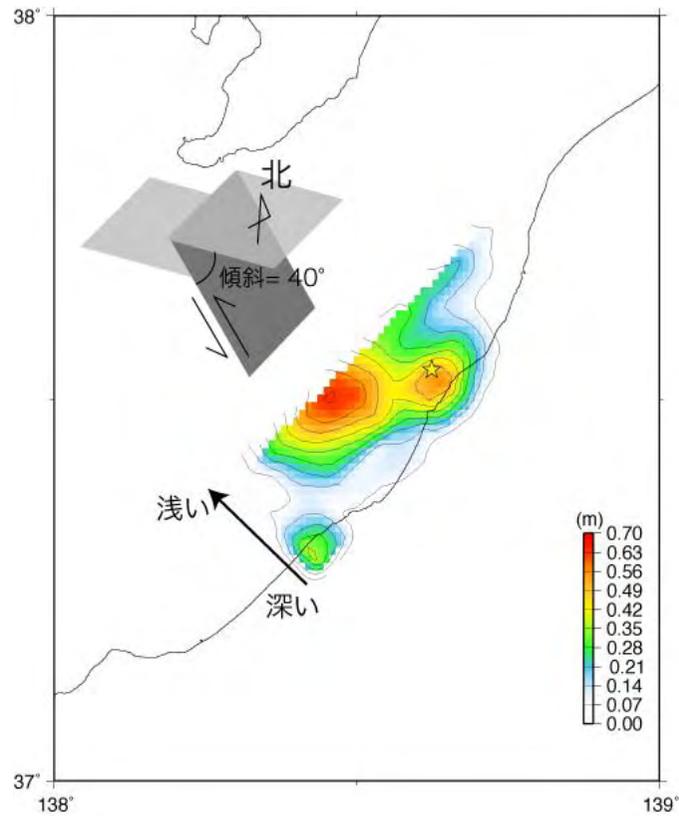
H = 16.0km var. = 0.4216



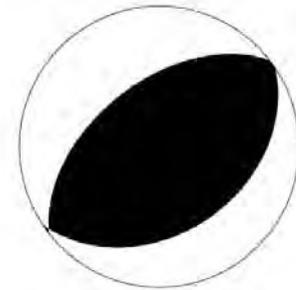
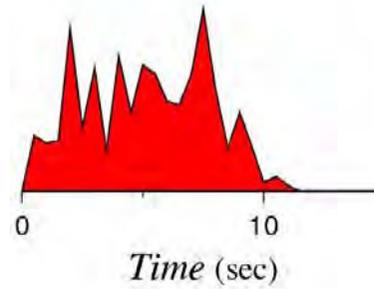
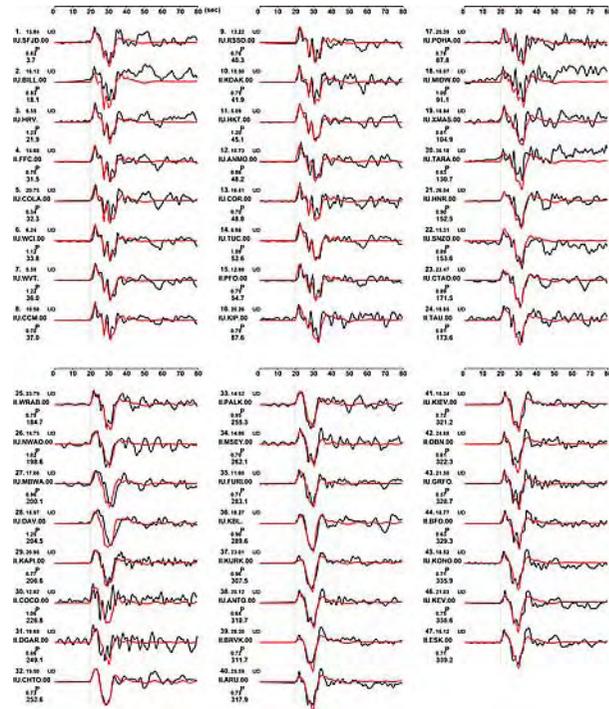
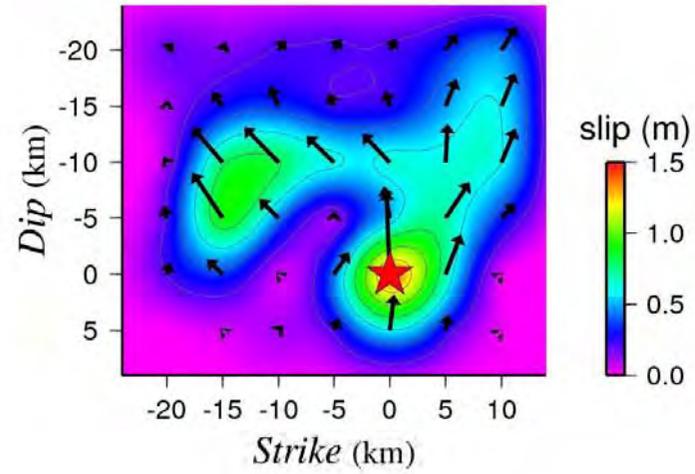
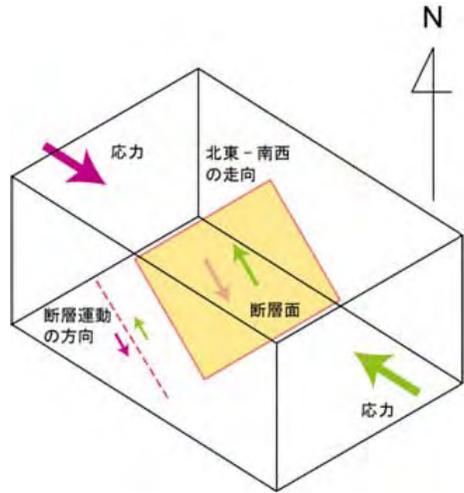
(50..36., 101.)



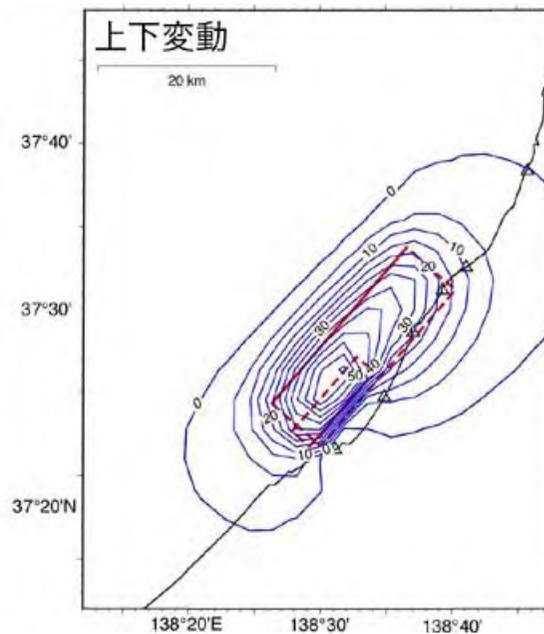
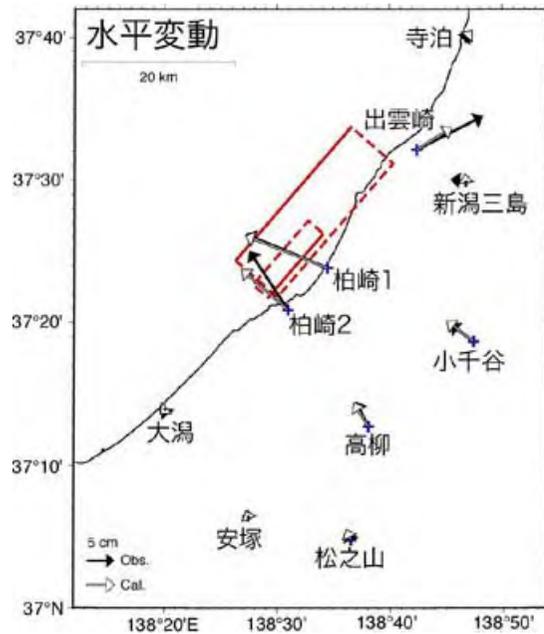
名古屋大学:山中モデル



筑波大学:八木モデル



海洋研究開発機構

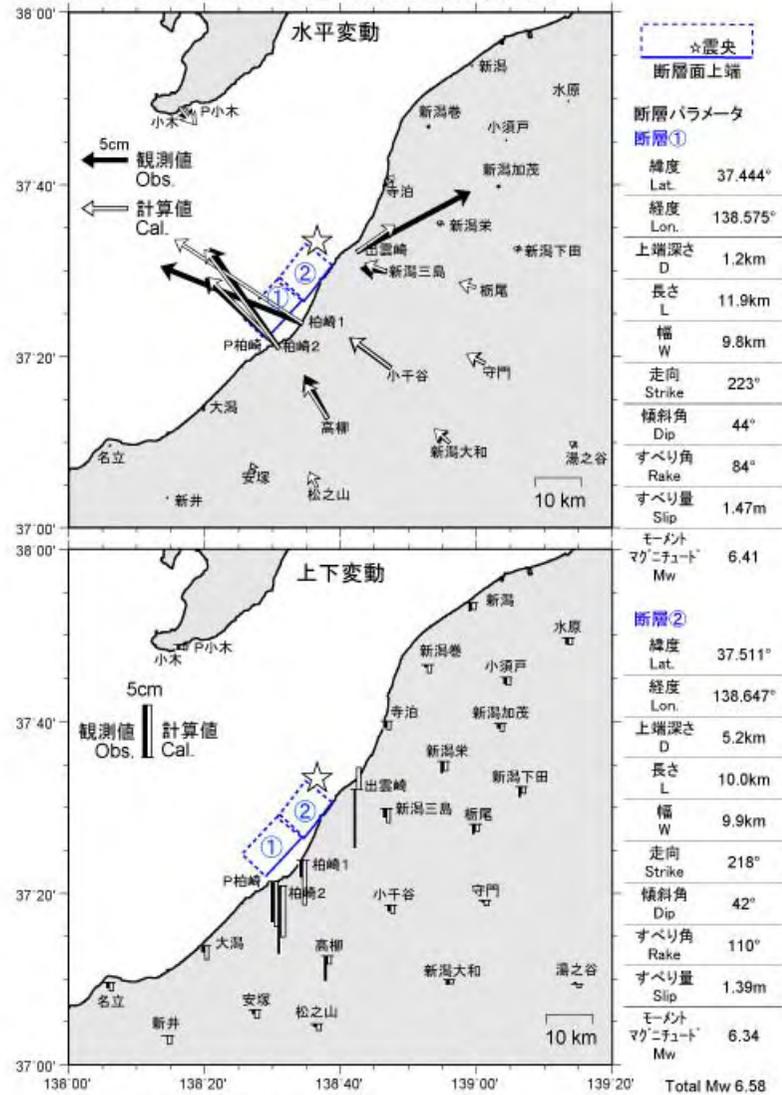


	主断層	分岐断層
走向(度)	41	221
傾斜角(度)	49	75
すべり角(度)	86	95
すべり量 (m)	1.5	0.7
長さ (km)	23	10
幅 (km)	11	10
断層上縁の深さ (km)	5	0.2

### 地殻変動データによる断層モデル

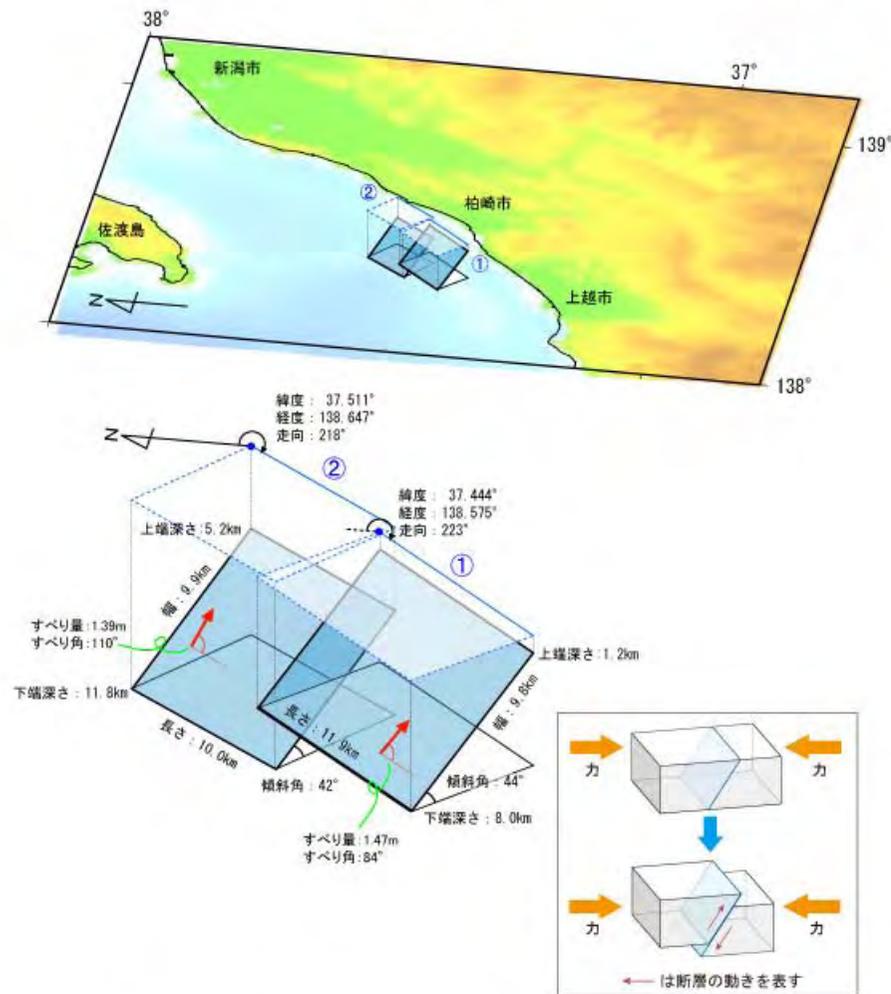
推定された断層モデルは2枚の断層面からなる。主たる断層面はUSGSのモーメントテンソル解で得られた南東傾斜の断層面で、余震分布の並びとも概ね調和的である。南西側では、この断層から、分岐する断層が陸側浅部に向かって延びているとした。その分岐断層の上端の深さは0.2 kmとした。パラメータの詳細は以下のとおり。

平成19年新潟県中越沖地震  
震源断層モデルと地殻変動(電子基準点観測との比較)



基準期間 Period 1: 2007/7/10 - 2007/7/15  
 比較期間 Period 2: 2007/7/17 - 2007/7/18  
 \* 「出雲崎」及び「柏崎2」では、傾斜による変位を補正している。

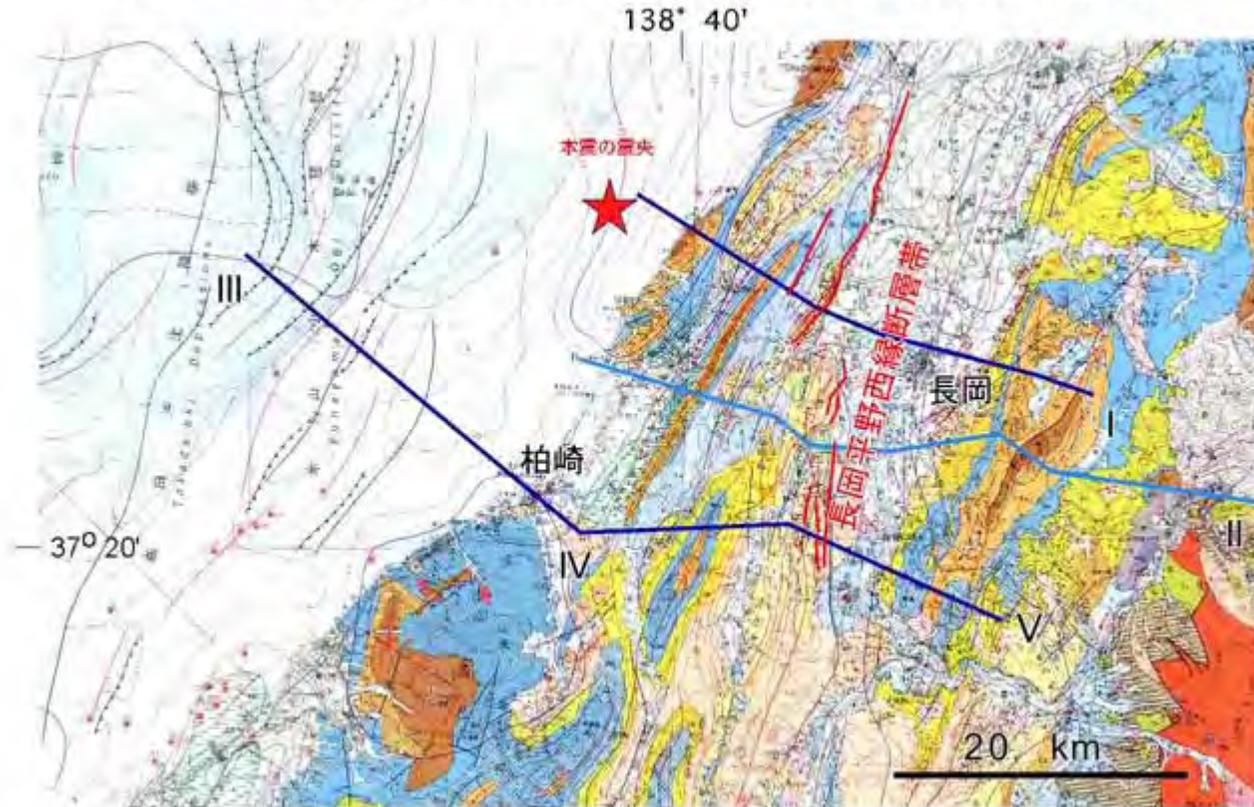
平成19年新潟県中越沖地震 震源断層モデルの概念図



断層パラメータ

	緯度	経度	上端深さ	長さ	幅	走向	傾斜角	すべり角	すべり量	モーメントマグニチュード
①	37.444°	138.575°	1.2km	11.9km	9.8km	223°	44°	84°	1.47m	6.41
②	37.511°	138.647°	5.2km	10.0km	9.9km	218°	42°	110°	1.39m	6.34

平成19年（2007年）新潟県中越沖地震震源域周辺の地質構造



地質図：新潟県（2000）。断面図I, III-V:「改訂版 日本の石油・天然ガス資源（1992）」。断面図II:新潟県（2000）。長岡平野西縁断層帯のトレースは地震調査研究推進本部（2004）

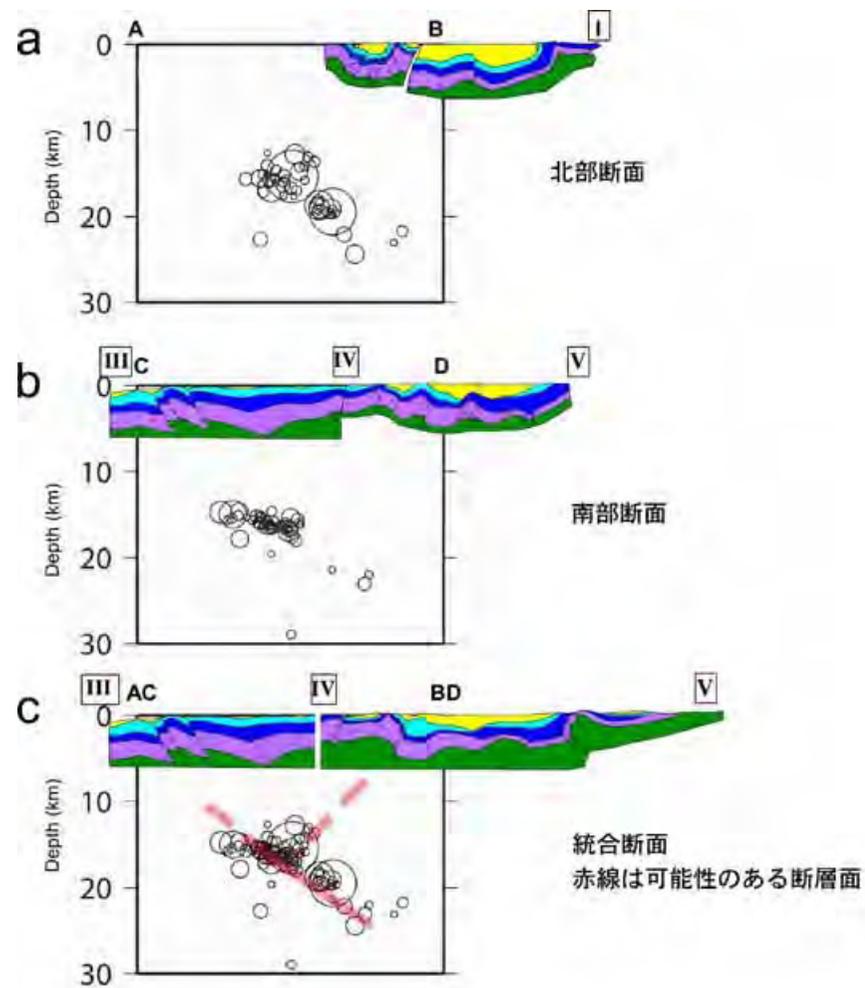


図3. 暫定余震分布と地質構造との関係. 余震分布は文献 [5] による。  
 a: 北部断面、b:南部断面、c:統合断面、断面線の位置は図1参照。震源分布は  
 N25° Eの方向に沿って南から見ている。地震は7月16日に既存の観測点で観測  
 されたもの [5] 。

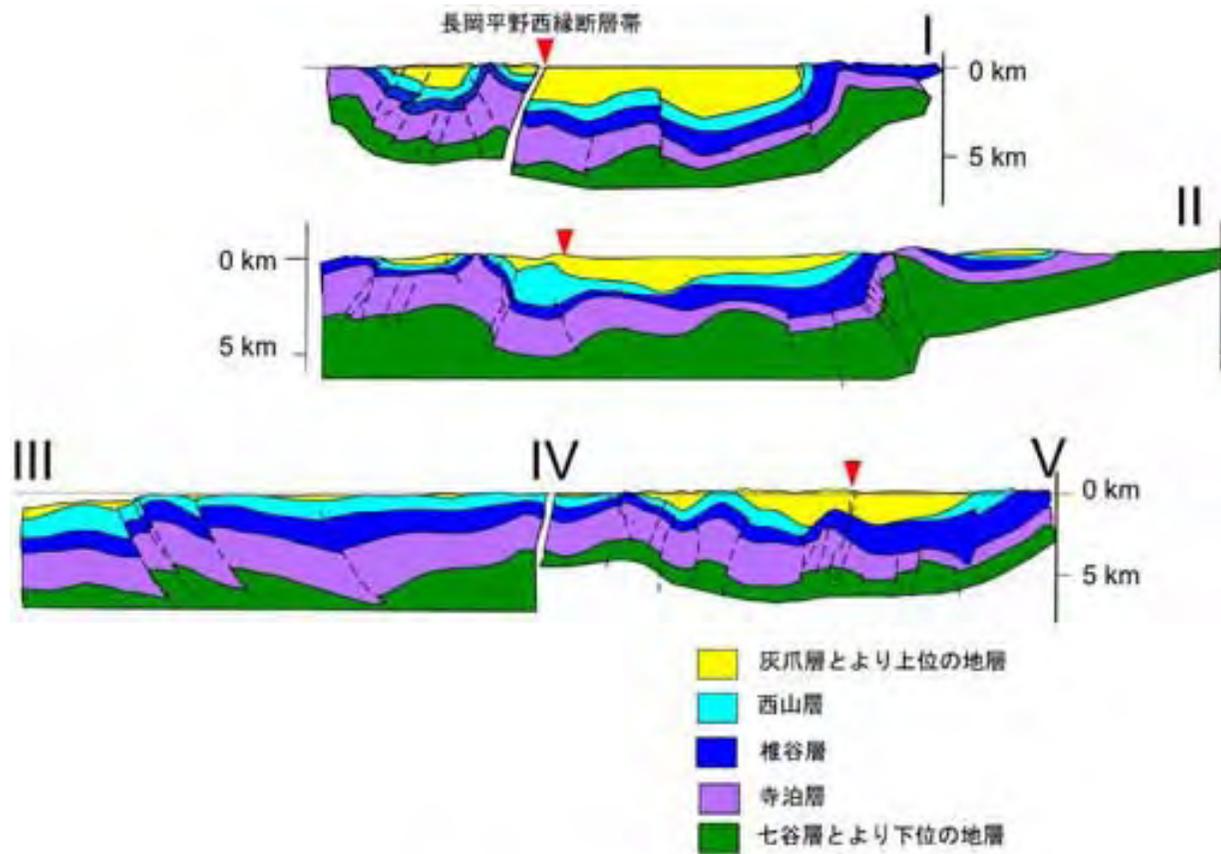


図2. 震源域周辺の地質断面図

断面線の位置は図1参照。I,III-Vは文献 [1] , IIIは文献 [2] による。

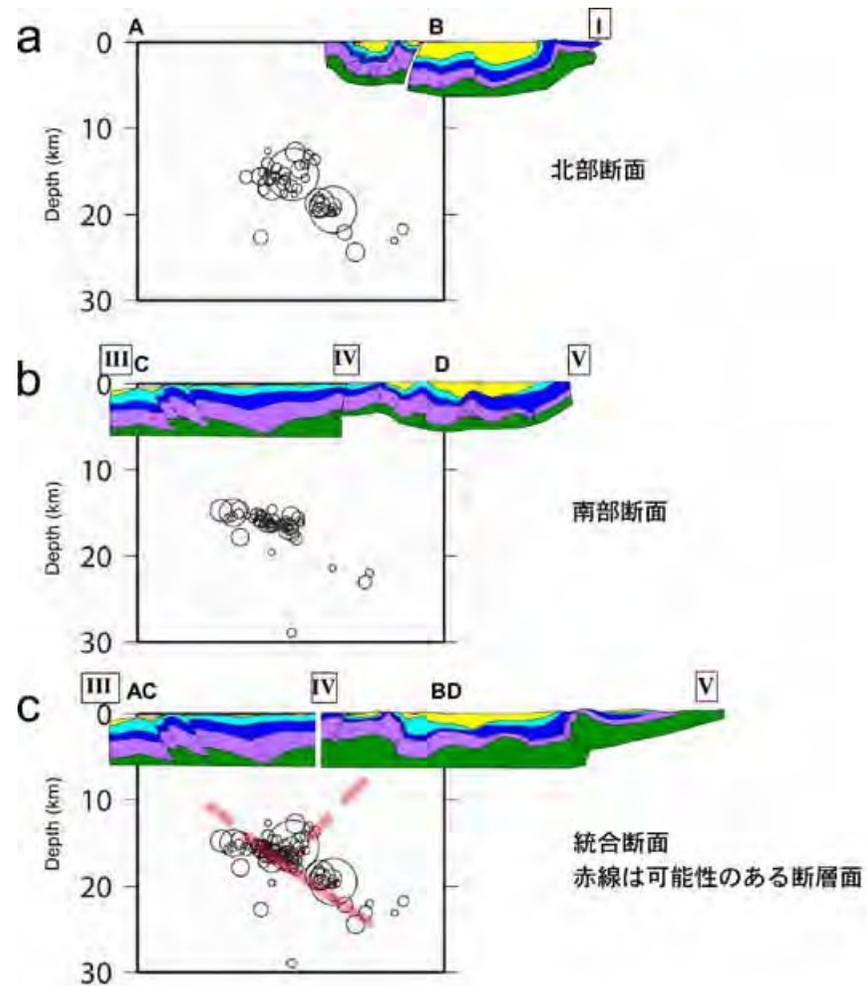
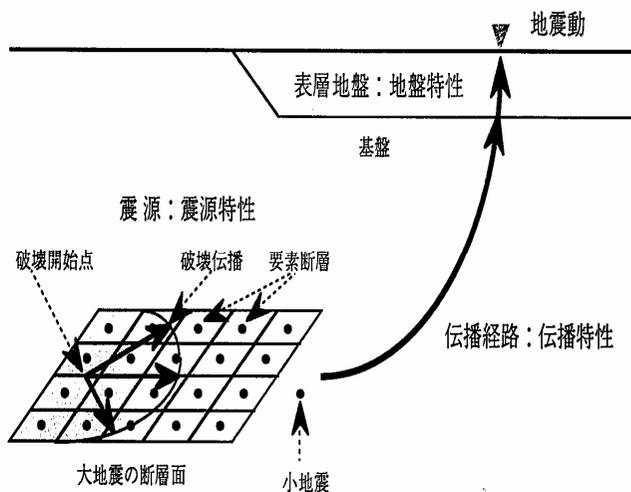


図3. 暫定余震分布と地質構造との関係。余震分布は文献 [5] による。  
 a: 北部断面、b: 南部断面、c: 統合断面、断面線の位置は図1参照。震源分布は  
 N25° Eの方向に沿って南から見ている。地震は7月16日に既存の観測点で観測  
 されたもの [5] 。

## 平成19年新潟県中越沖地震の震源のモデル化(暫定)

2007年7月16日10時13分に新潟県中越沖でMj6.8の地震が発生し、柏崎市やその周辺の地域では多くの被害が発生した。ここでは、防災科学技術研究所のK-NETの地震波形記録を用い、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って震源モデルの評価を行った。経験的グリーン関数としては2007年7月16日21時08分に発生した余震(Mj4.4)を用いた。記録は長周期側の精度を考え、0.2~10Hzのバンドパスフィルターをかけて用いた。

# Irikura(1986)、釜江・他(1991)による 経験的グリーン関数法



## 地震の相似則

$$\frac{L}{\ell} = \frac{W}{w} = \frac{D}{d} = N$$

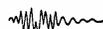
## 震源スペクトルの相似則 ( $\omega^{-2}$ モデル)

$$U(t) = c \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{r}{r_{ij}} F(t - t_{ij}) * u(t) \quad N = \left( \frac{M_{0t}}{cM_{0s}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$t_{ij} = \frac{r_{ij} - r_0}{\beta} + \frac{\xi_{ij}}{V_R} + \varepsilon_{ij}$$

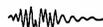
$$F(t) = \delta(t) + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{(N-1)n} \delta \left[ t - (k-1) \frac{\tau}{(N-1)n} \right]$$

要素地震の記録

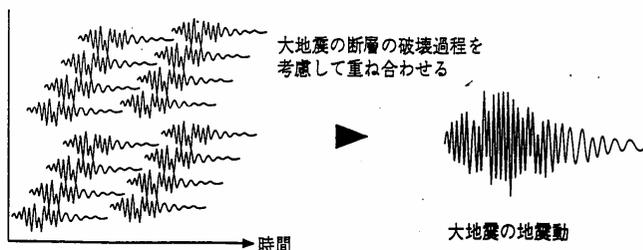


▼ 要素地震と大地震の要素断層の震源スペクトルの補正

大地震の要素断層からの地震波

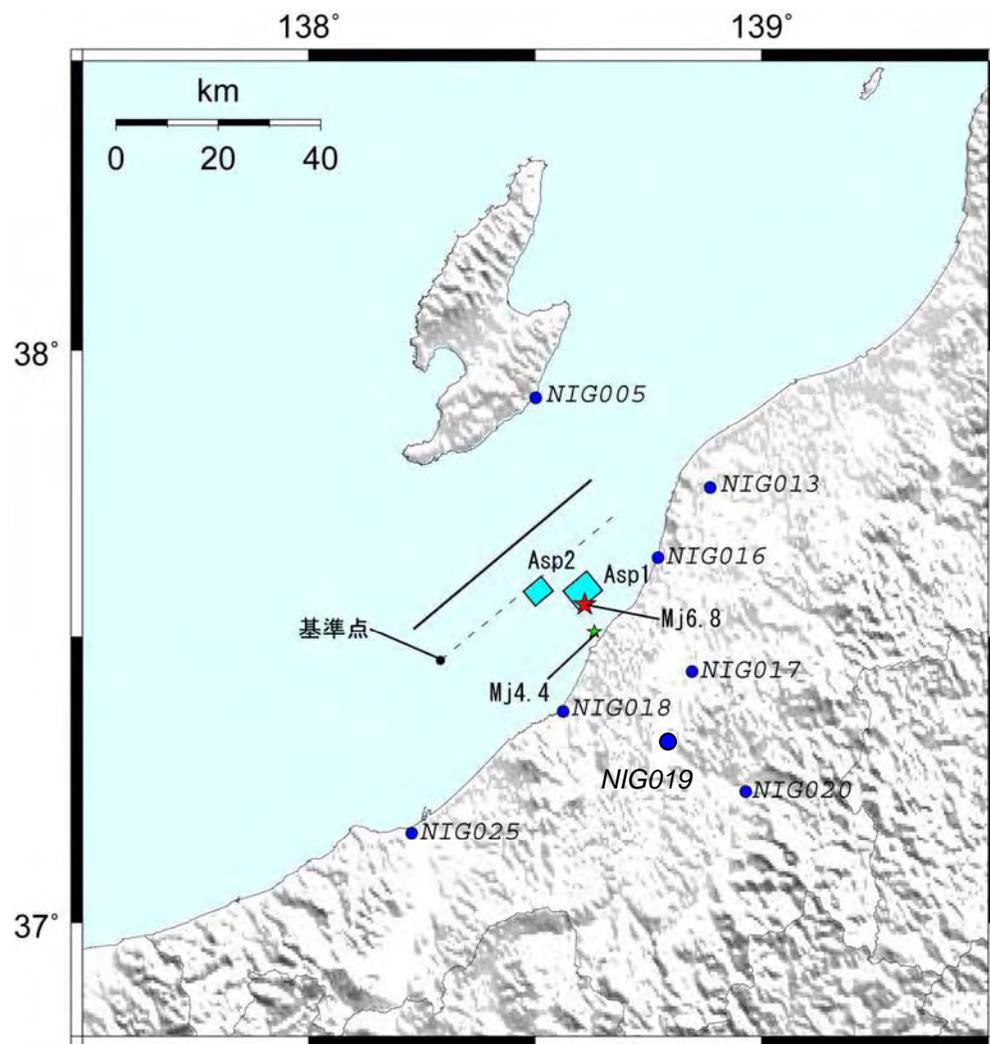


▼ 各要素断層からの地震波



## $u(t)$ (中・小地震記録)の補正

- 応力降下量の補正
- Q値による減衰の補正
- 震源放射特性の補正
- Fmaxの補正

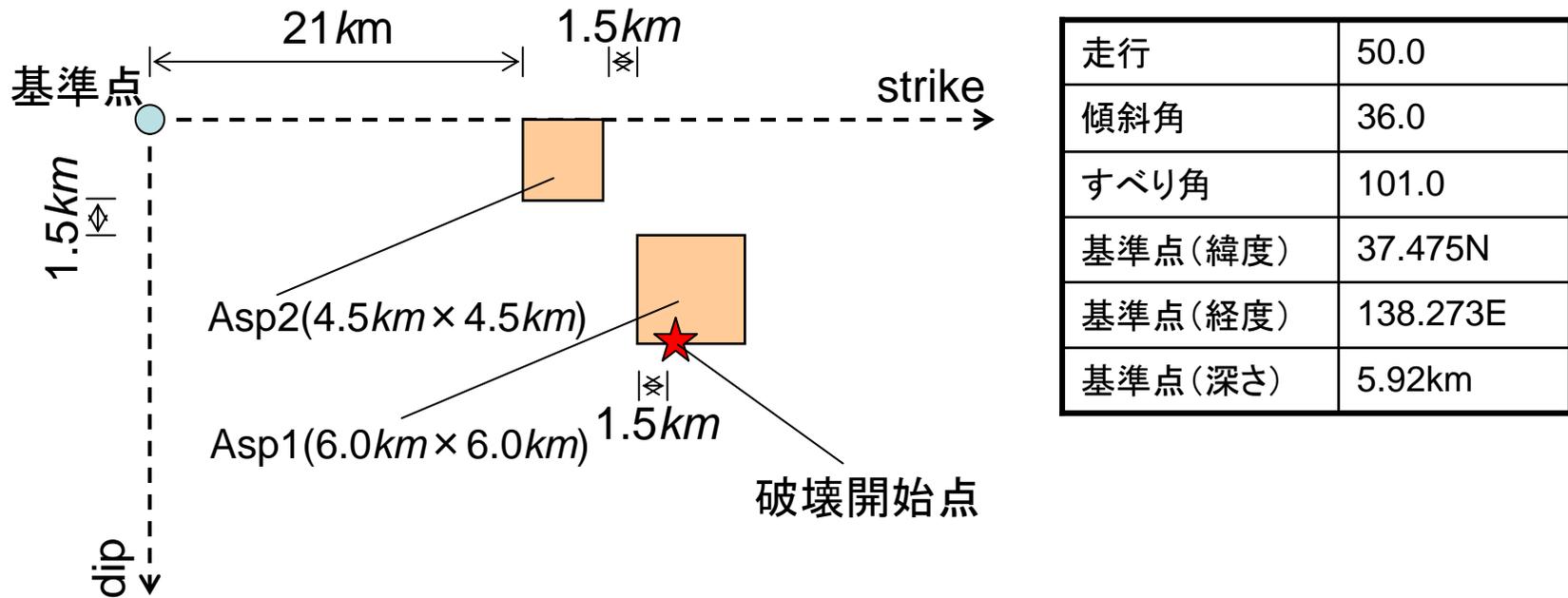


### 経験的グリーン関数として用いた余震

Origin Time (JST)	2007/7/16 21:08
Latitude (deg)	37.5
Longitude (deg)	138.6
Depth (km)	20.0
$M_{JMA}$	4.4
Seismic moment (Nm) *	$5.21 \times 10^{15}$
Focal Mechanism Solution* [Strike/Rake/Dip]	187/54/70 39/41/115

\* F-net

図1 平成19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観測点位置、及び平成19年新潟県中越沖地震の2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

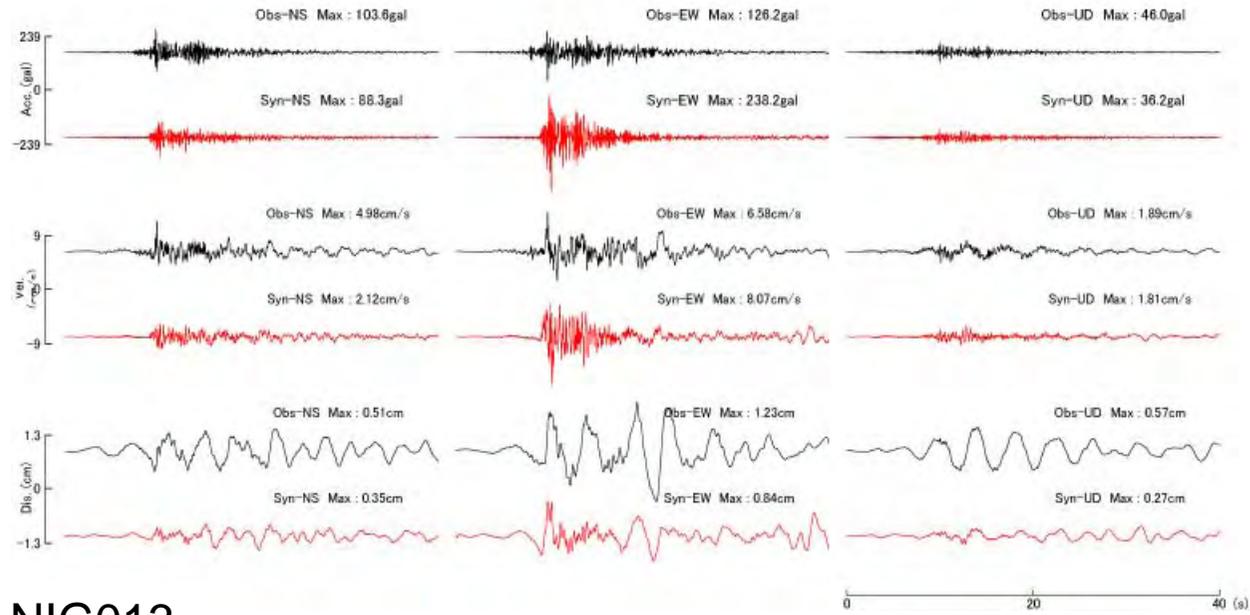


平成19年新潟県中越沖地震の2つのアスペリティからなる震源モデル(アスペリティのみ)

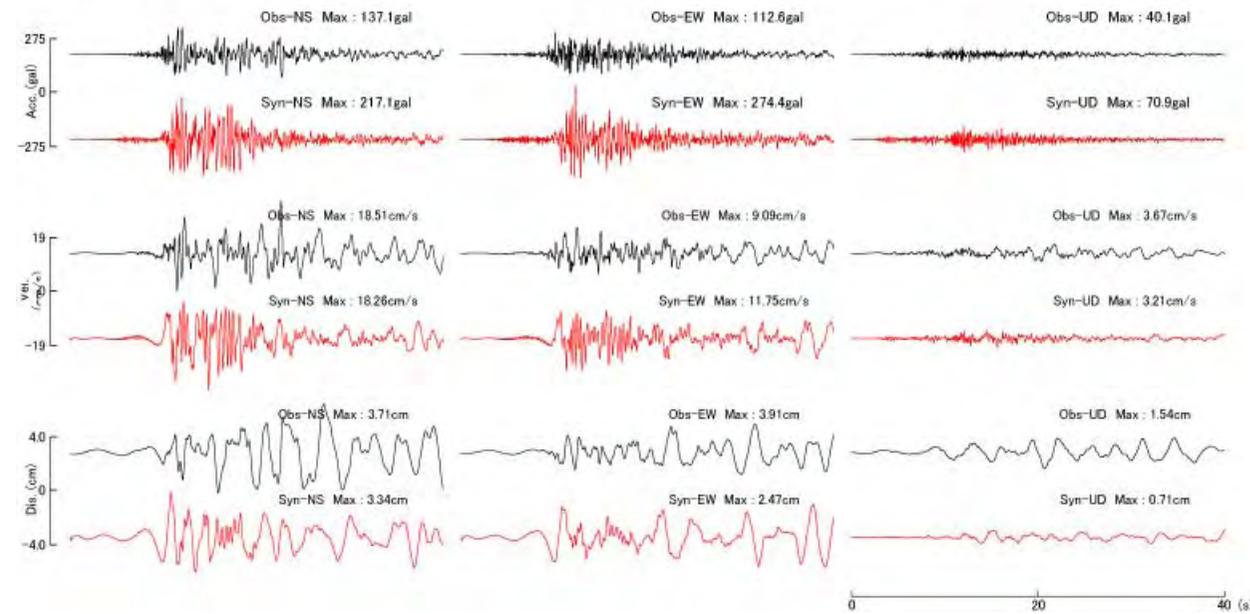
平成19年新潟県中越沖地震の震源パラメータ

	$M_0$ (Nm)	L(km) × W(km)	$\Delta \sigma$ (MPa)	$\tau$ (sec)
Asp1	$1.31 \times 10^{18}$	6.0 × 6.0	15.0	0.6
Asp2	$0.98 \times 10^{18}$	4.5 × 4.5	15.0	0.4

# NIG005

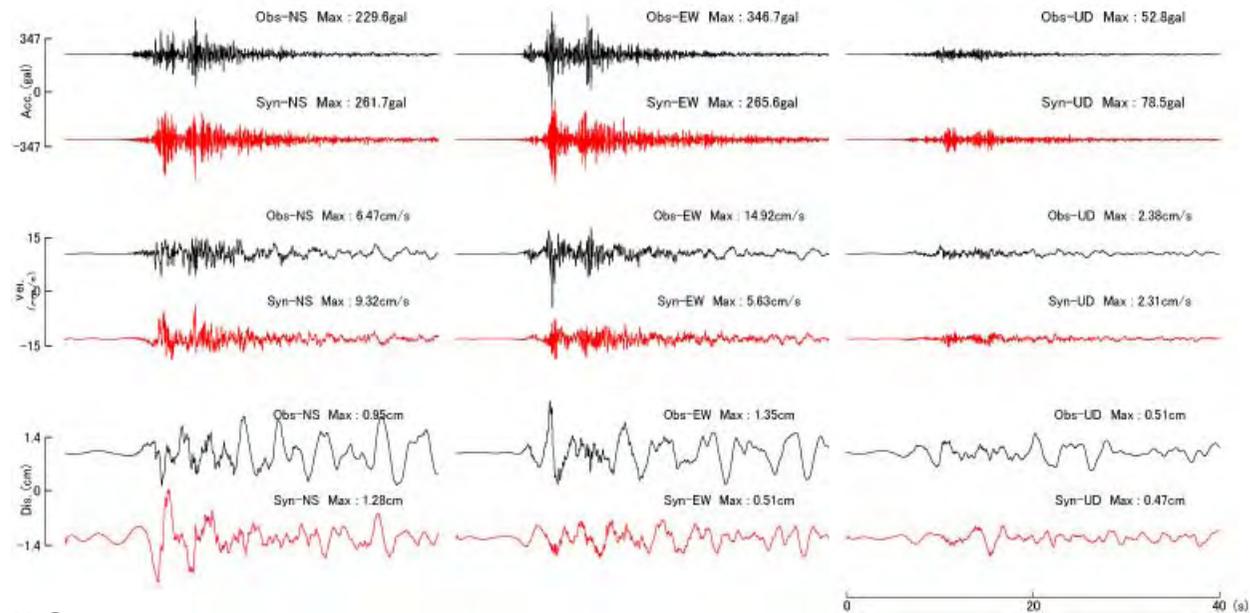


# NIG013

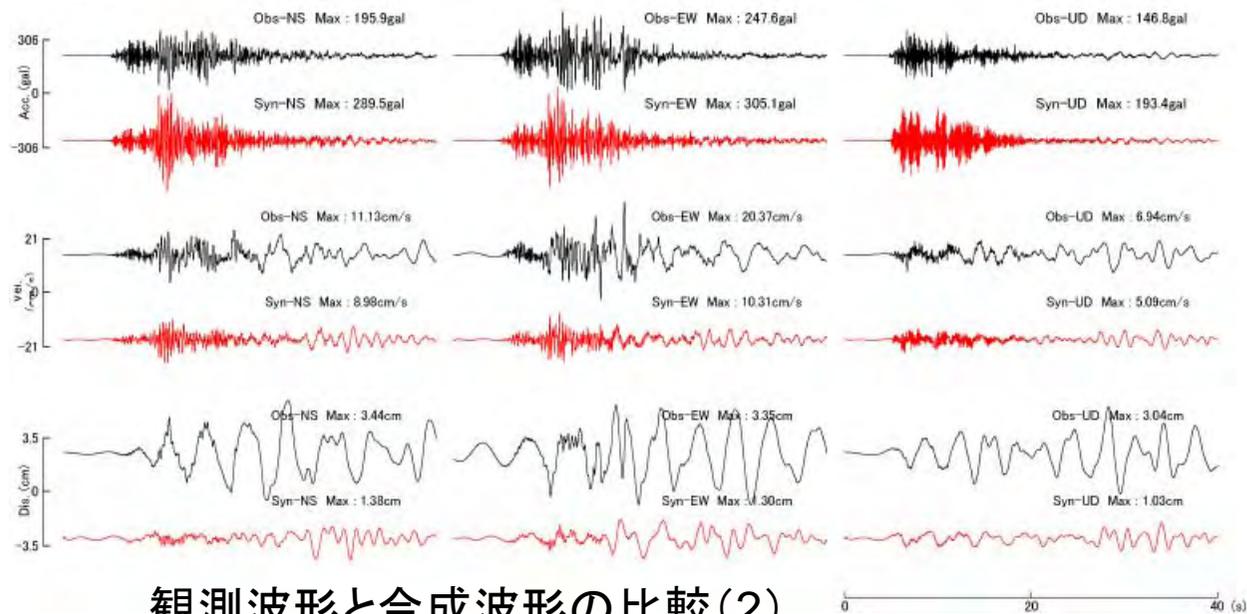


観測波形と合成波形の比較(1)

## NIG016

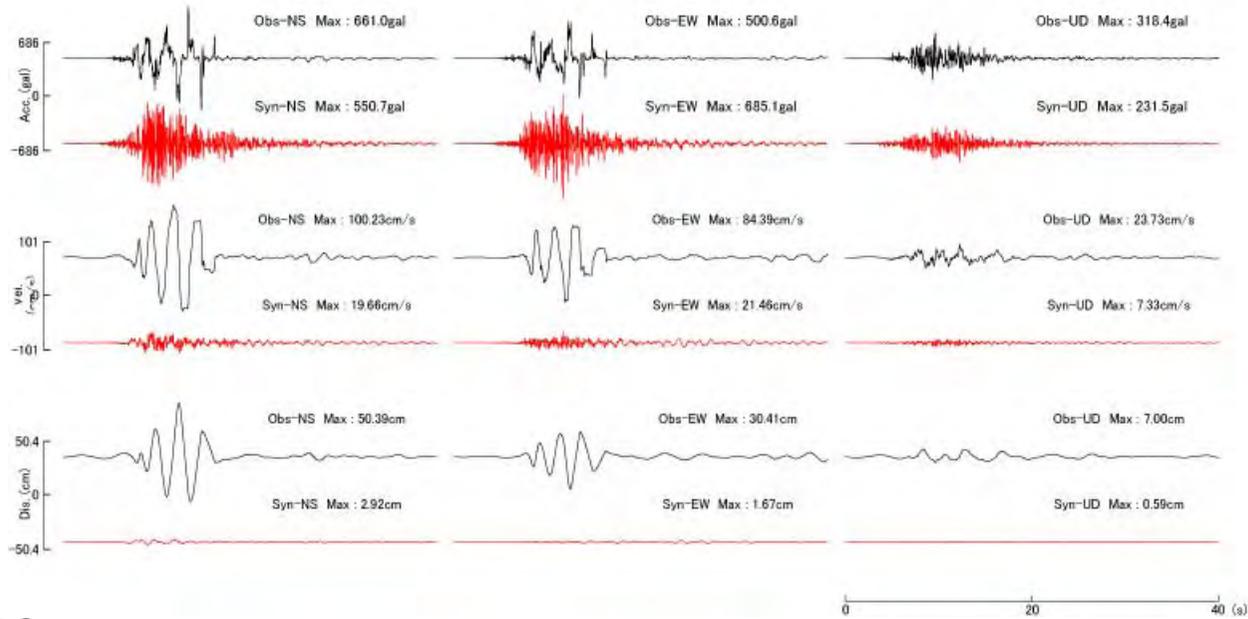


## NIG017

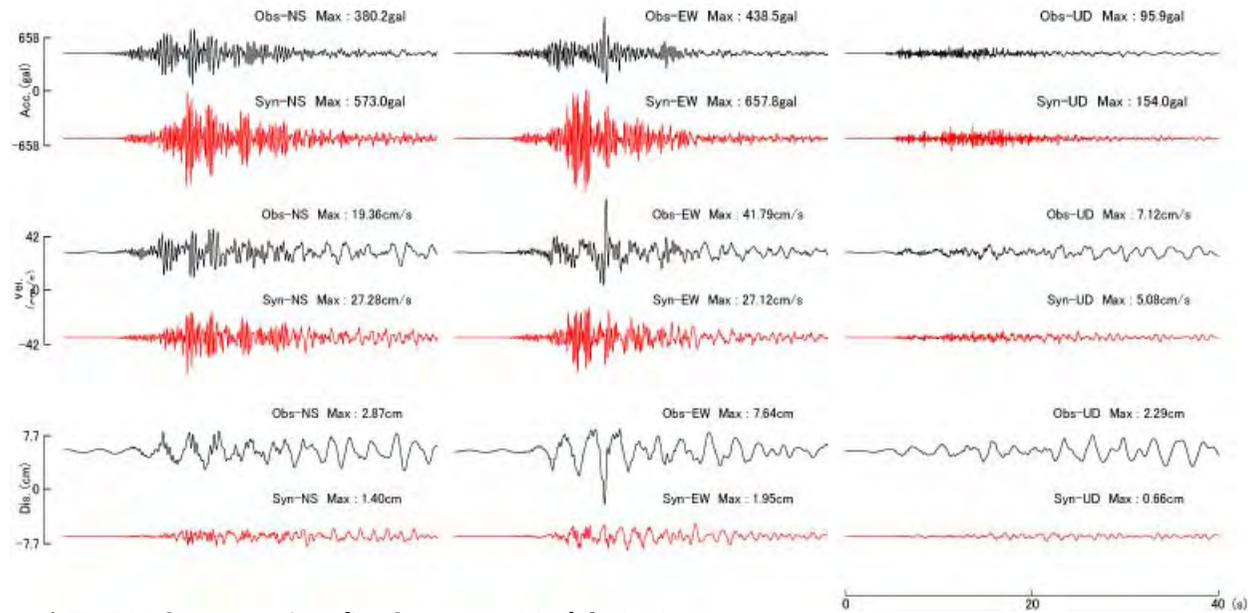


観測波形と合成波形の比較(2)

## NIG018

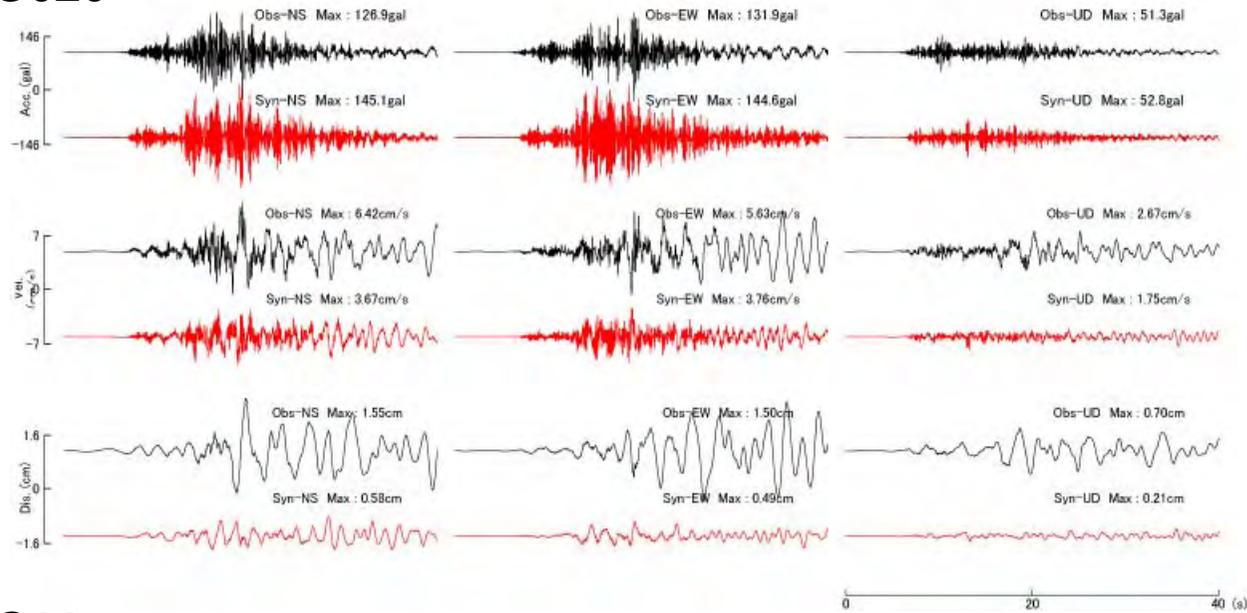


## NIG019

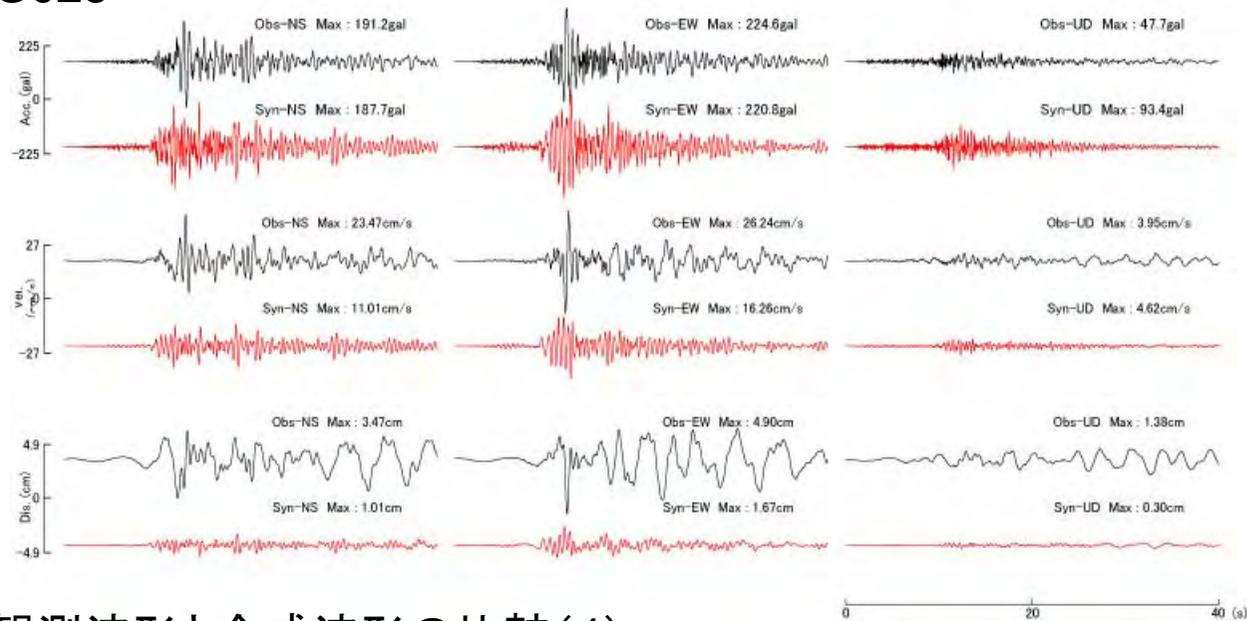


観測波形と合成波形の比較(3)

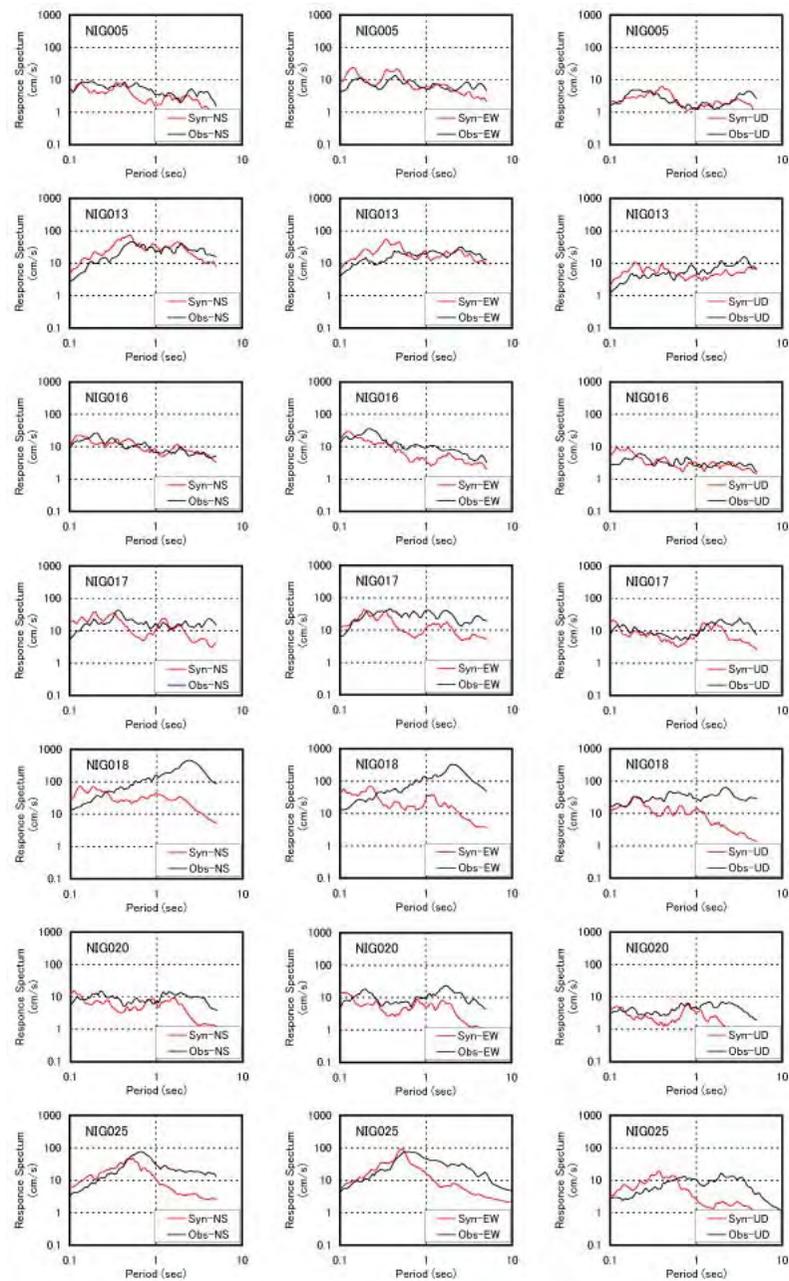
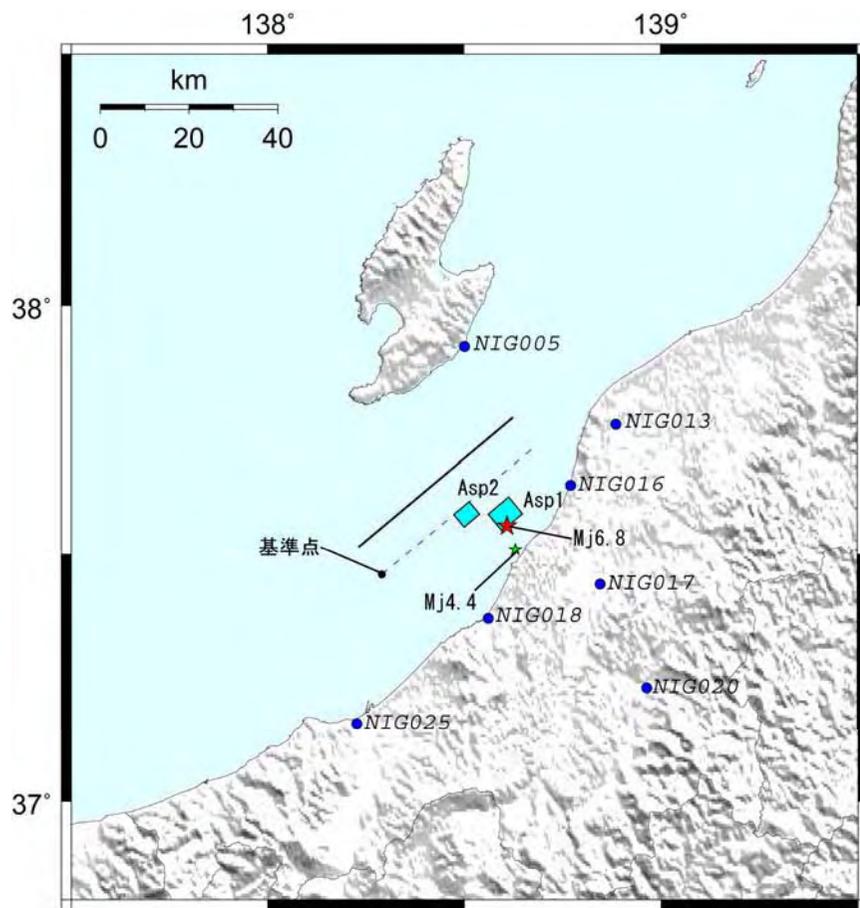
## NIG020



## NIG025



観測波形と合成波形の比較(4)



観測波形と合成波形の擬似速度応答スペクトルでの比較

## 暫定震源モデルに対する考察

合成波形と観測波形の比較から、今回評価したモデルによって加速度波形のエンベロープや最大振幅はほぼ再現されている。特に、NIG016に見られる2つのアスペリティからの波群は良好に再現させている。ただし、観測点によっては速度、変位において合成結果が過小評価となっていたり、後続波形の再現が悪い。この原因としては用いた余震と本震との震源放射特性の違いや、余震が深いことによる表面波の励起の違いが想像される。今後より浅い余震の記録を用いた検討や震源放射特性の影響を定量的に調べる必要がある。NIG018における本震時の記録には非常に強い非線形（液状化）の影響が見て取れ、ここで行った線形な合成はその影響を示唆している。

2つのアスペリティの応力降下量はこれまでの内陸地殻内地震の平均値に近く、この結果は既に防災科学技術研究所から公表されているように、K-NETを用いた距離減衰特性が既存の距離減衰式によっても説明可能であることと整合する。

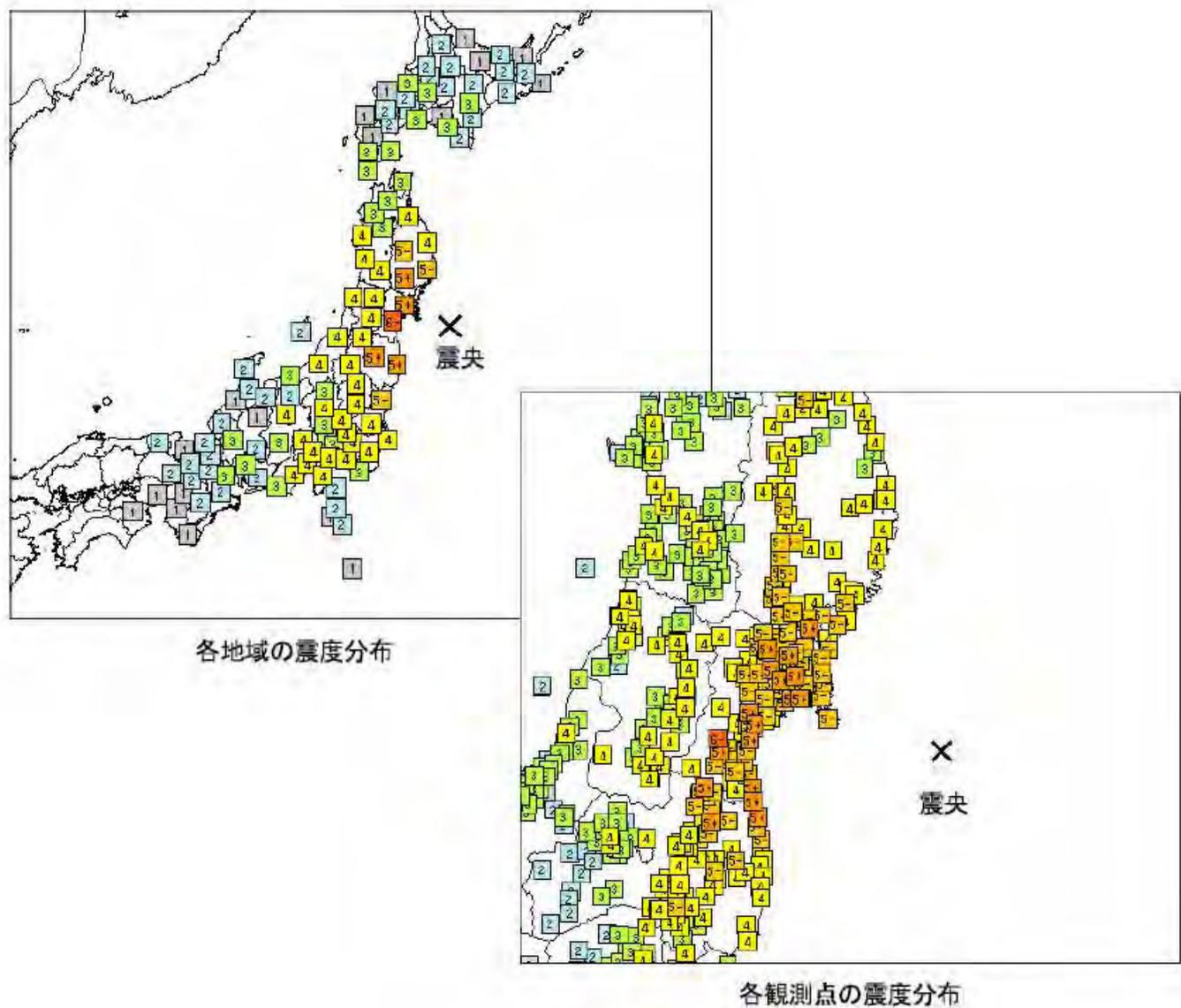
## 暫定震源モデルの課題

合成された波形及び擬似速度応答スペクトルの観測値との比較において、震源より北東側の観測点での一致度は良いが、南東、南西側の観測点での一致度は悪い。震源近傍のNIG018(柏崎)は震源を拘束するのに重要なサイトですが、強い非線形状態が示唆されており困難です。また、合成波形も観測波形に比較し、波形の後半部分の振幅が小さいようにも思えます。

考察で述べたように、この原因が震源放射特性によるものなのか、これらの観測点に加え、原発サイトも含め、柏崎近傍の強震動を説明するための3つ目のアスペリティが柏崎近傍に存在するのか、今後の検討が必要であり、重要である。

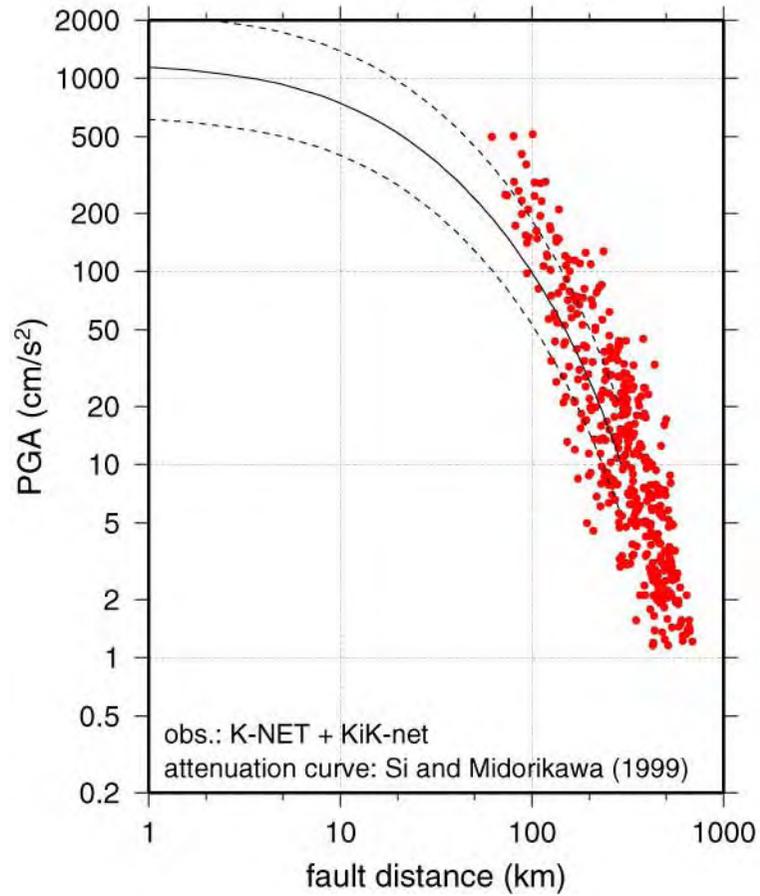
## 最近の大地震時の強震動との比較

- ・2005年宮城県沖地震(M7.2)  
(プレート境界地震)
- ・2007年能登半島地震(M6.9)  
(地殻内地震)

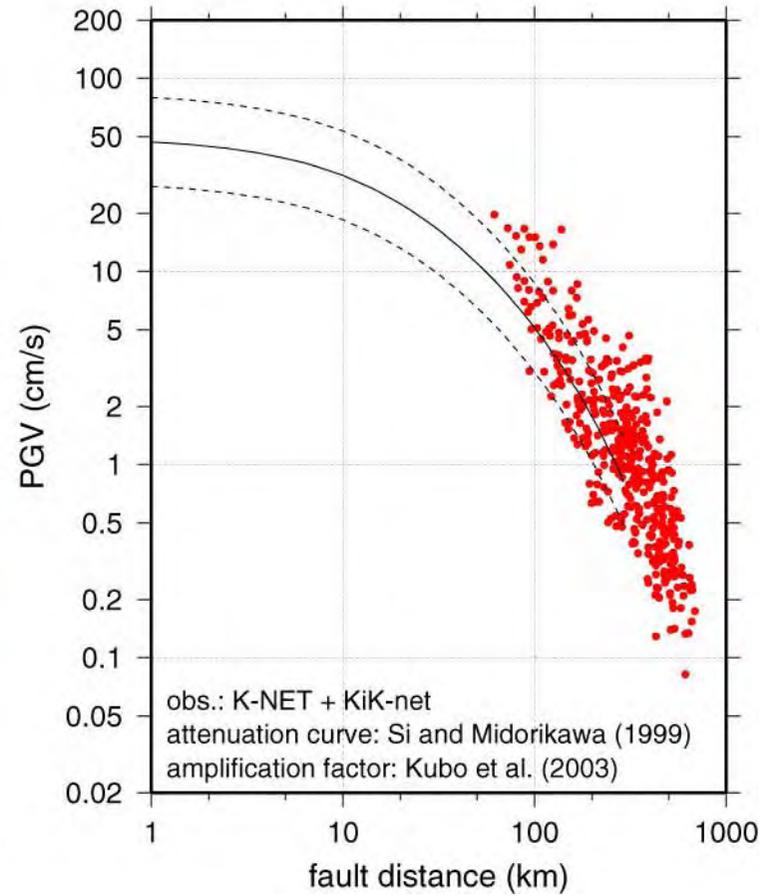


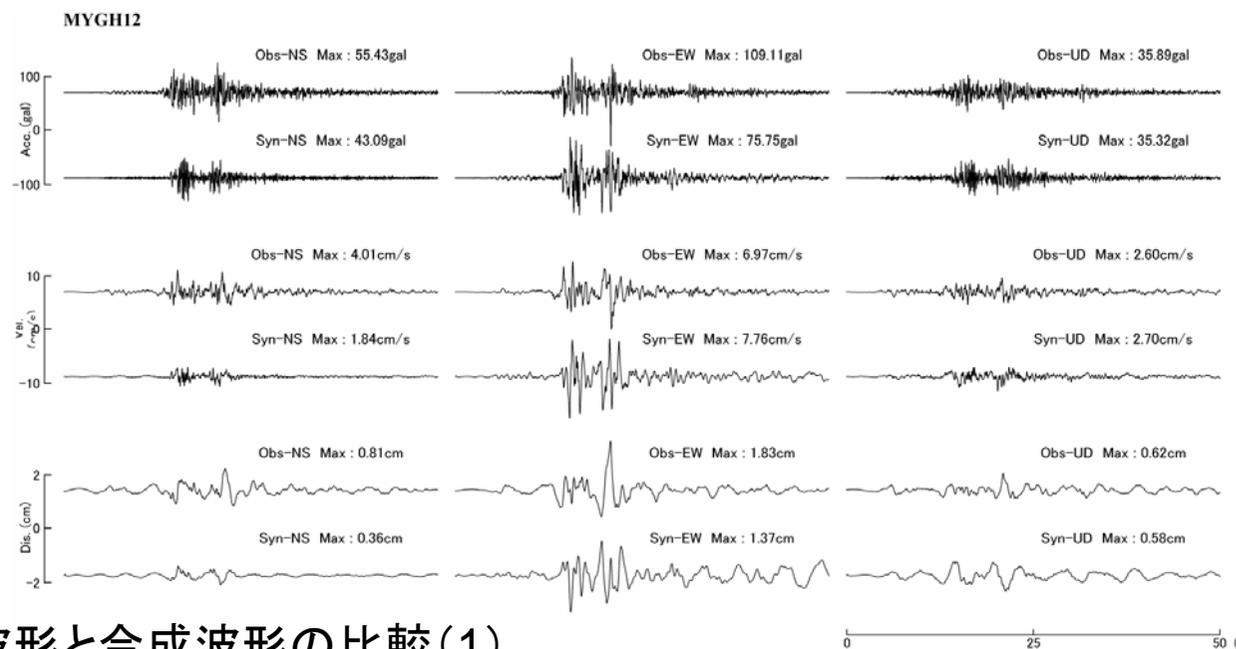
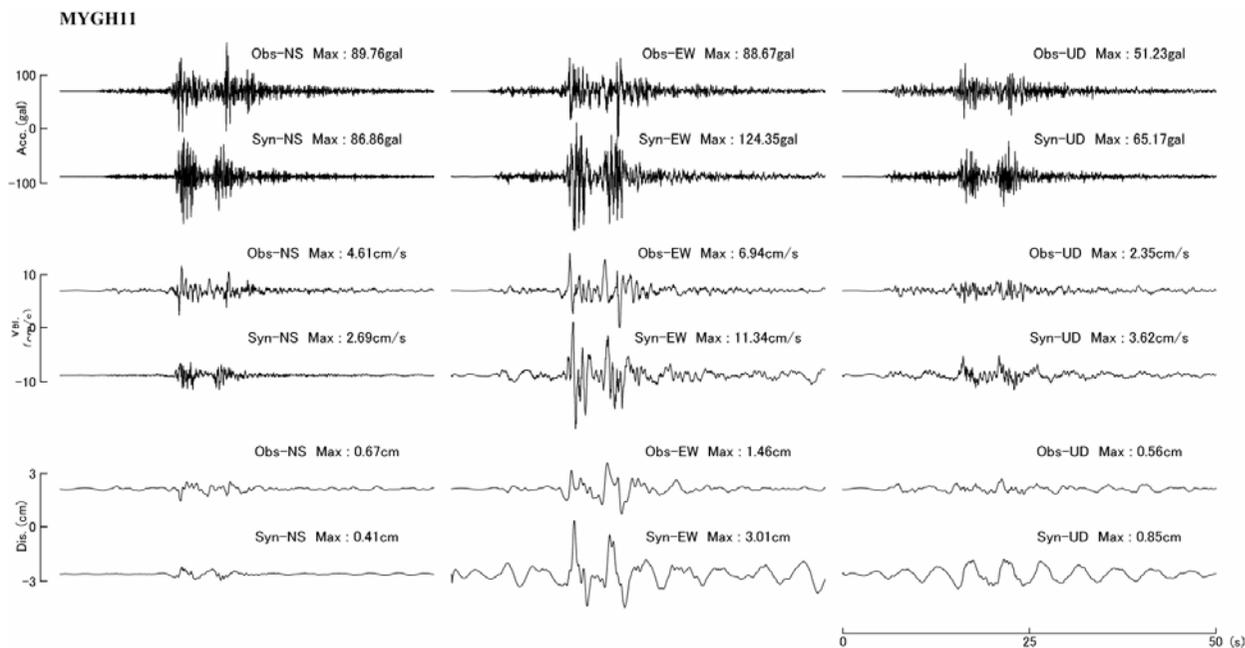
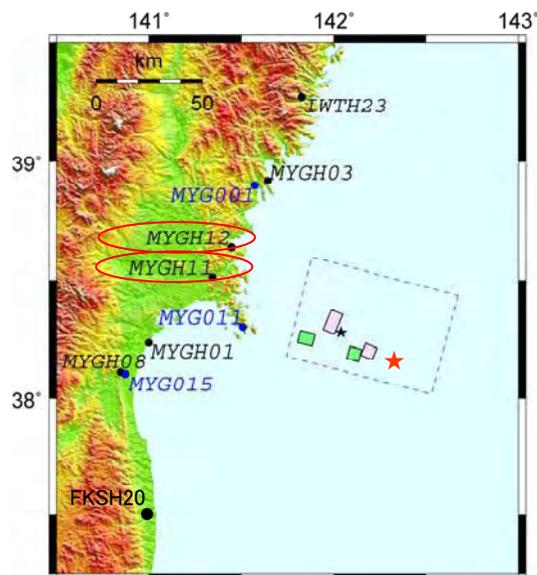
2005年宮城県沖地震(M7.2)時の震度分布

Mw 7.1, depth = 47 km, subduction

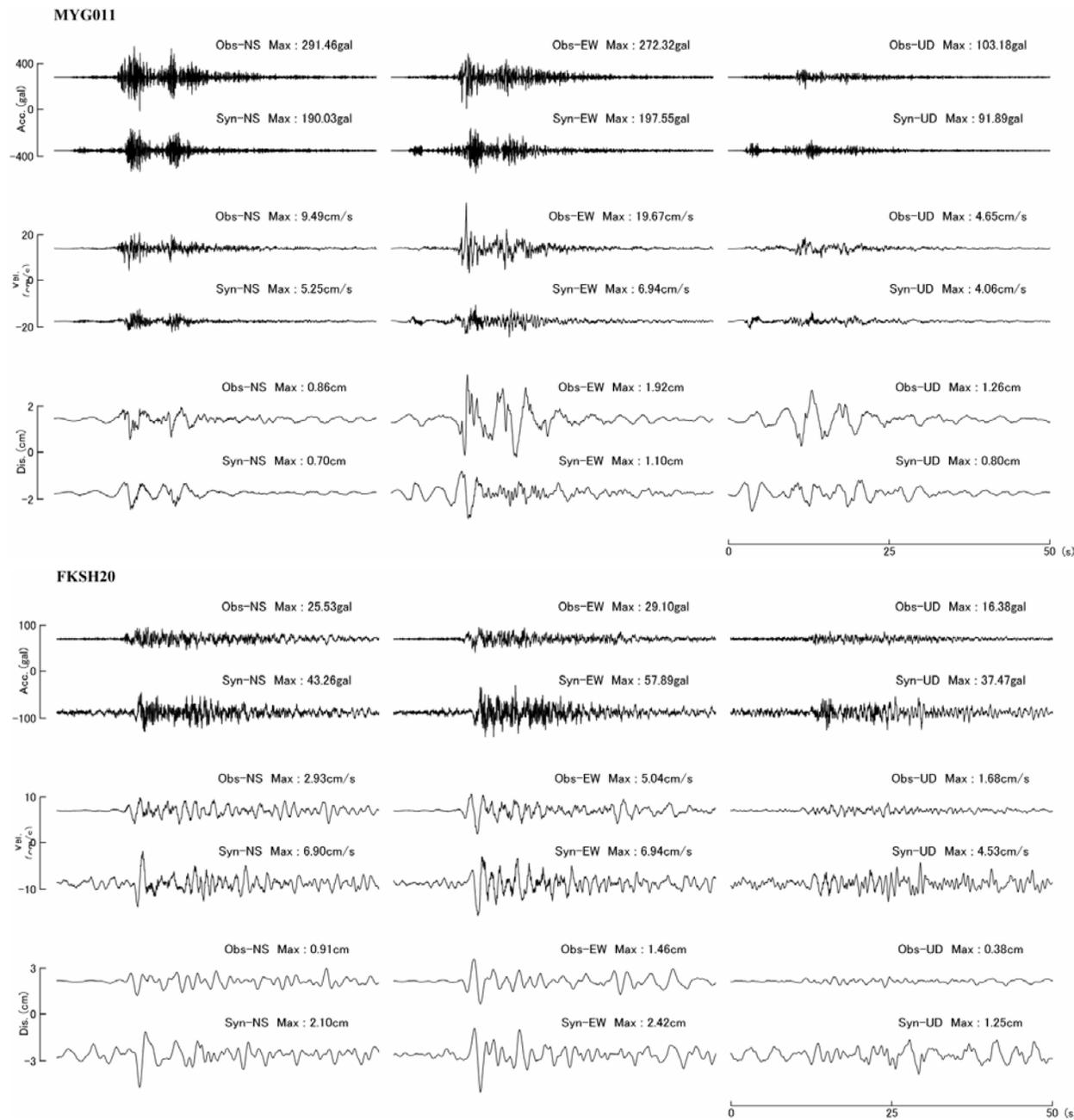
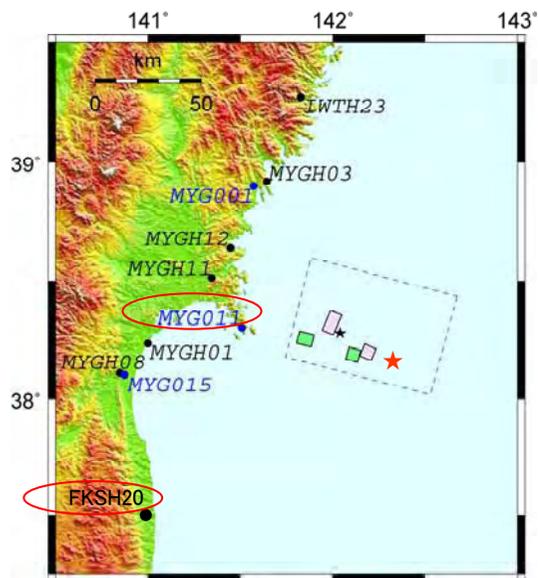


Mw 7.1, depth = 47 km, subduction



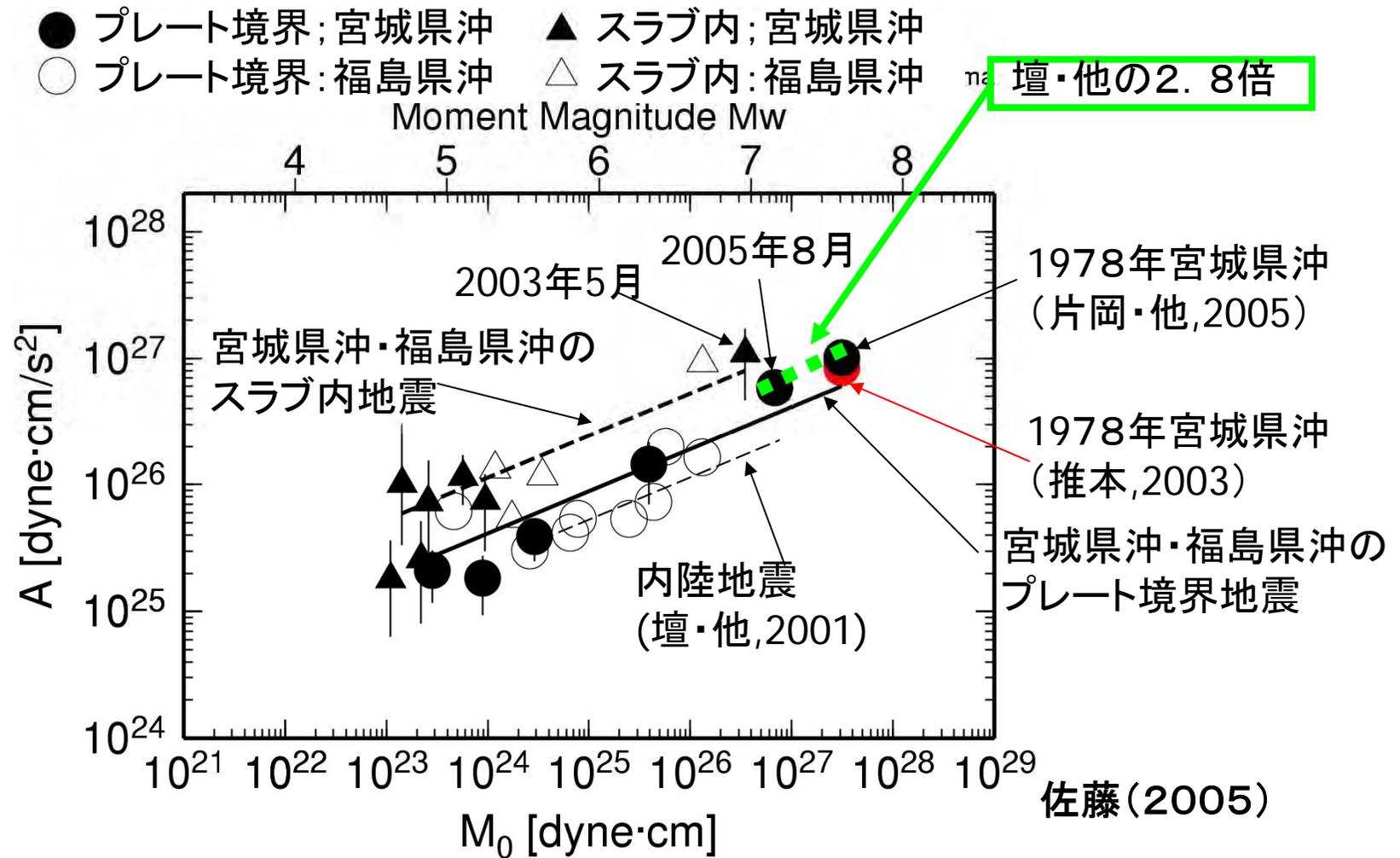


観測波形と合成波形の比較(1)

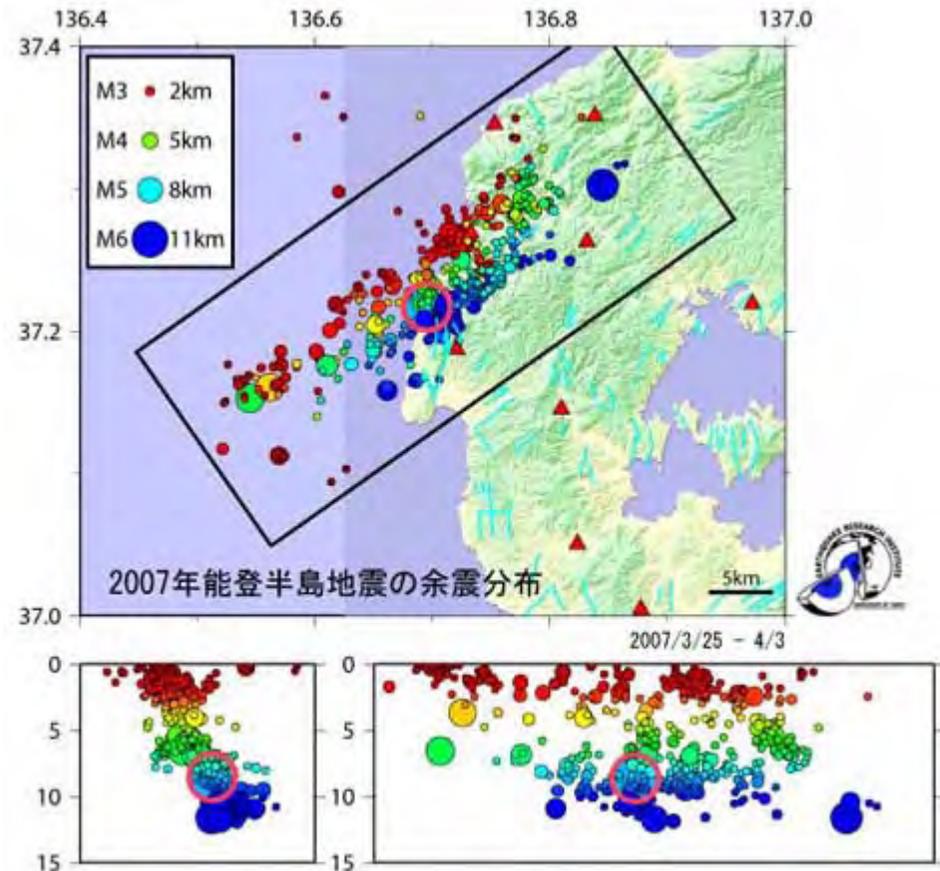
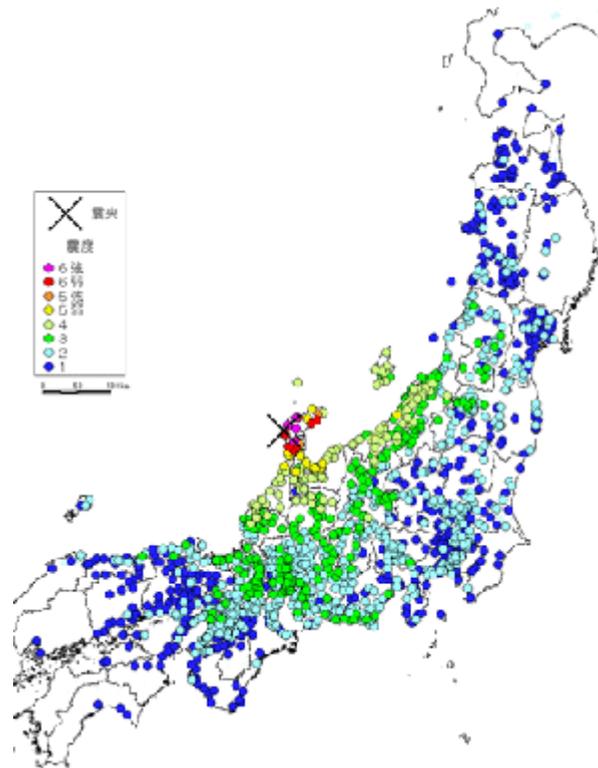


観測波形と合成波形の比較(2)

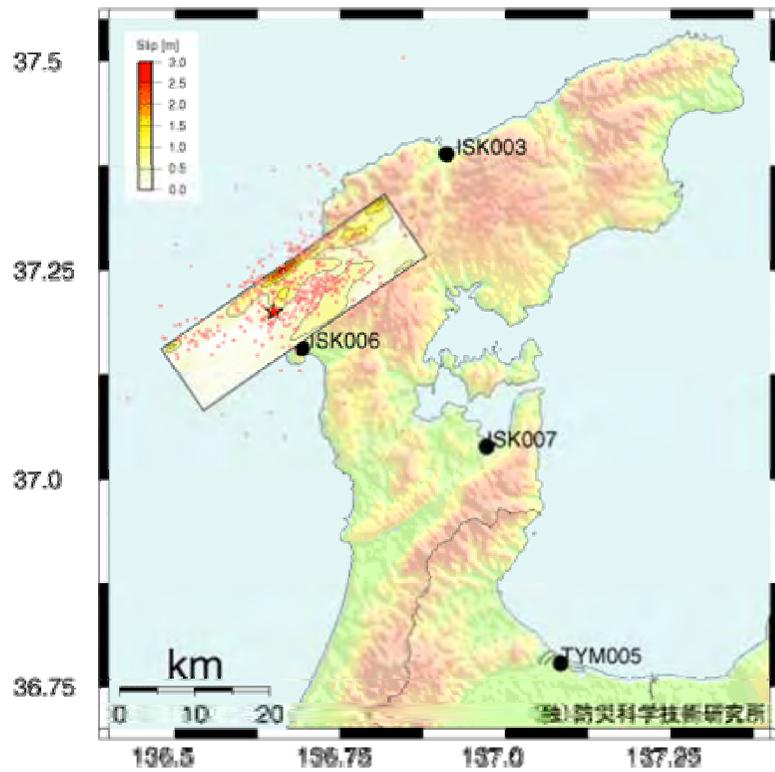
# 宮城県沖と福島県沖の地震の $M_0$ と短周期レベルAの関係



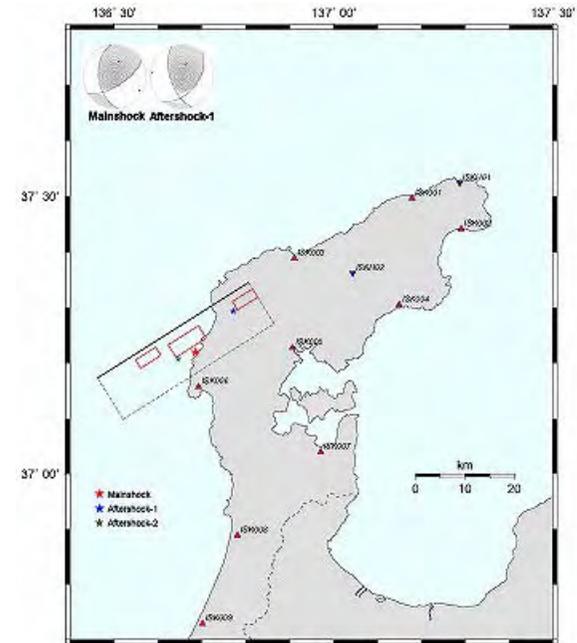
# 2007年能登半島地震(M6.9)



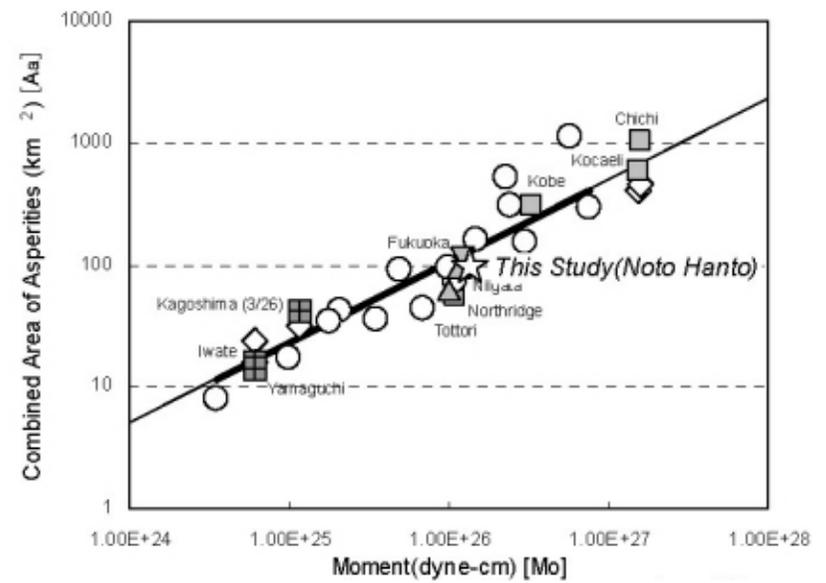
地震研究所、京都大学、防災科学技術研究所、気象庁  
および能登半島地震合同余震観測グループ、  
跡津川合同地震観測のデータを使用して求めた

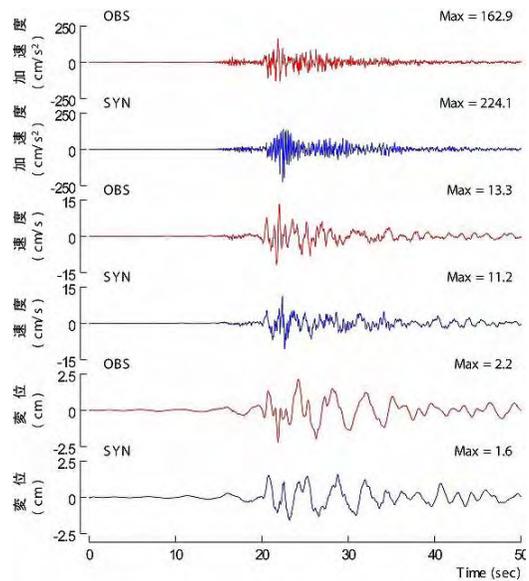


(独)防災科学技術研究所

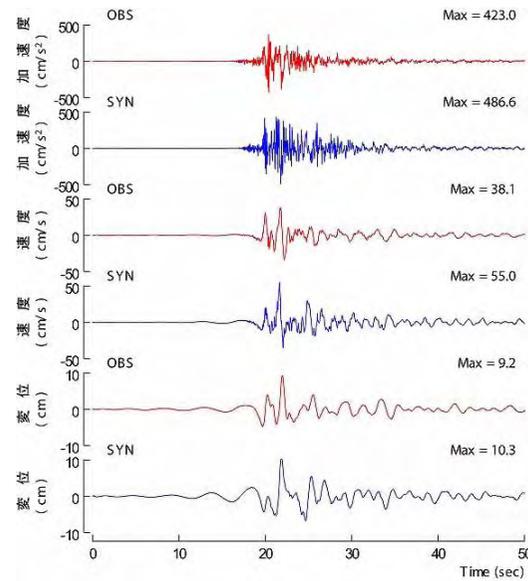


池田・釜江(2007)

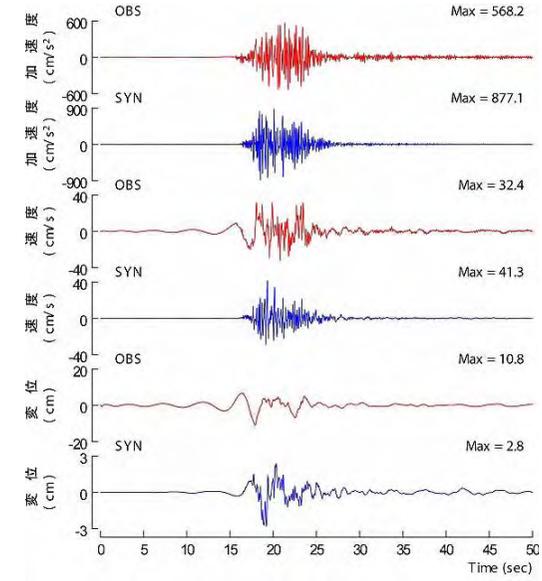




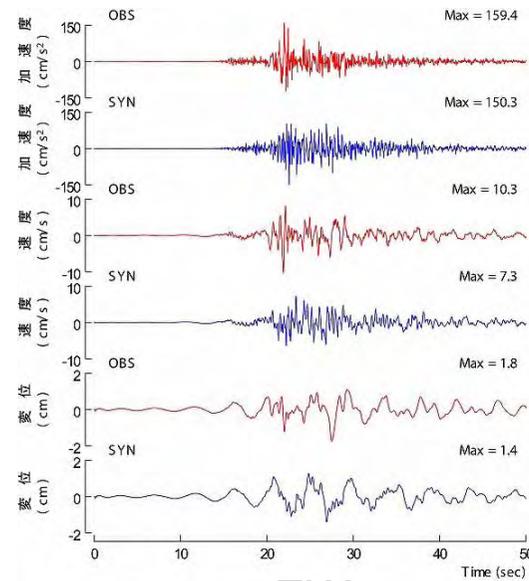
NS



NS

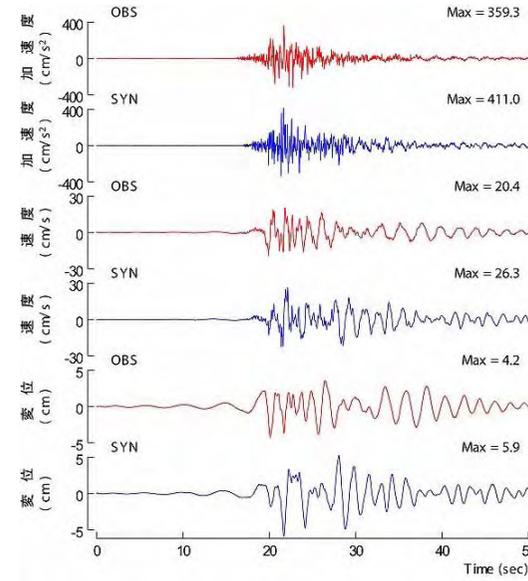


NS



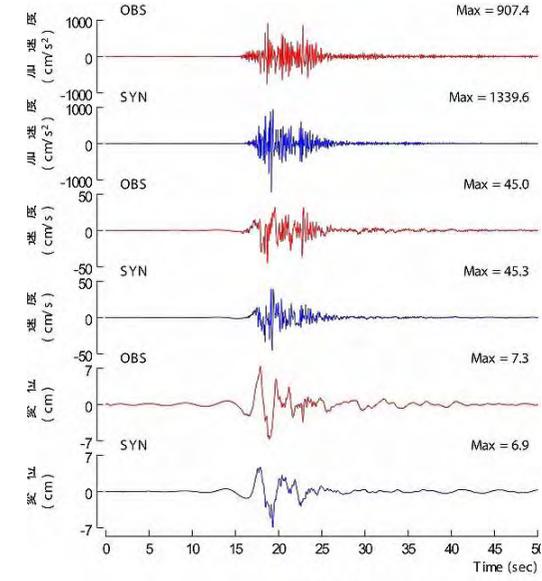
EW

ISK001



EW

ISK005

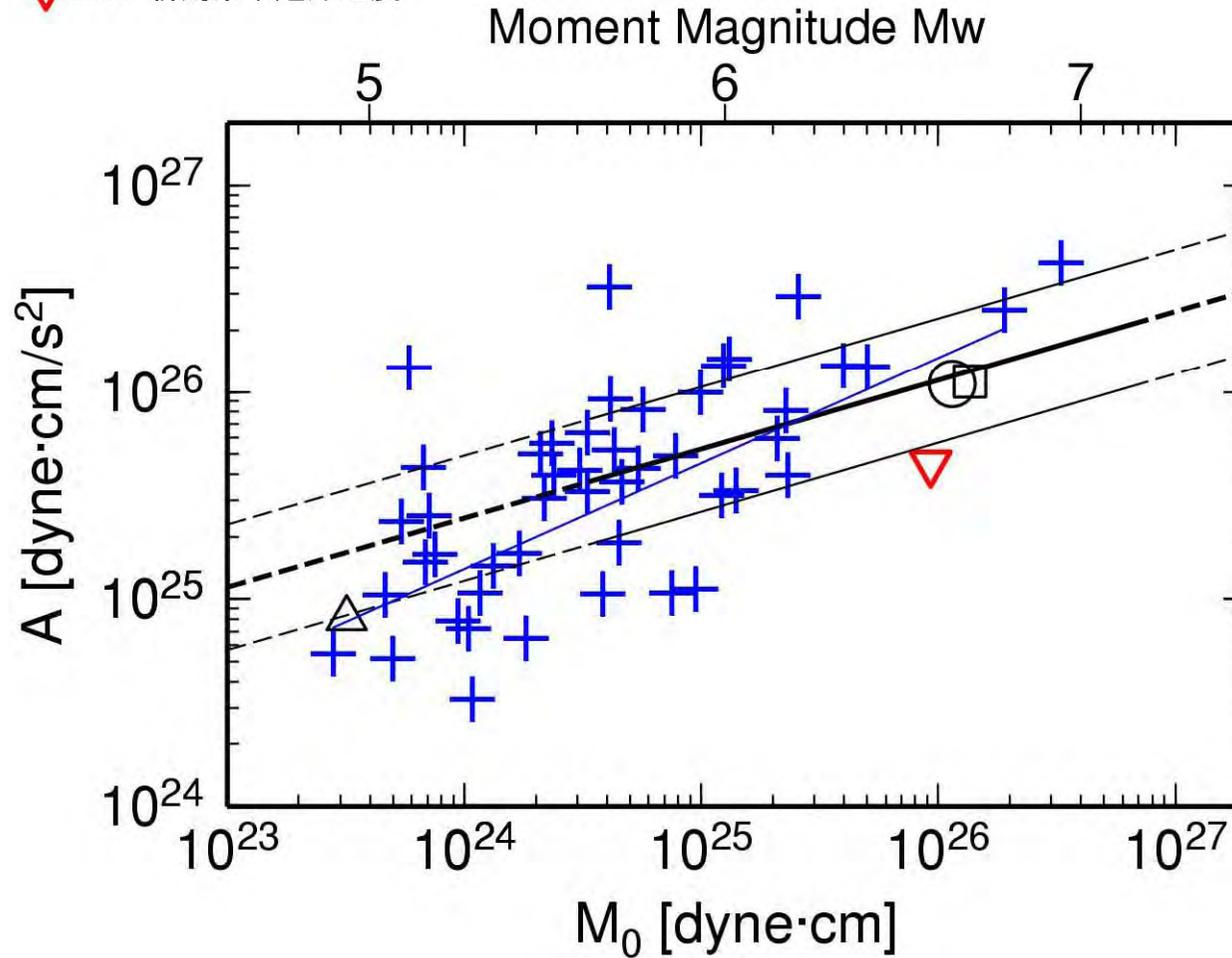


EW

ISK006

観測波形と合成波形の比較

- ✦ 日本全国の地殻内地震(片岡・他,2006)
- 2007 能登半島地震(佐藤,2007)
- 2005 福岡県西方沖地震(佐藤・川瀬,2006)
- △ 1998 宮城県南部地震(佐藤,2003)
- ▽ 2007 新潟県中越沖地震



最近の大地震時における強震動の短周期レベル      佐藤(私信)

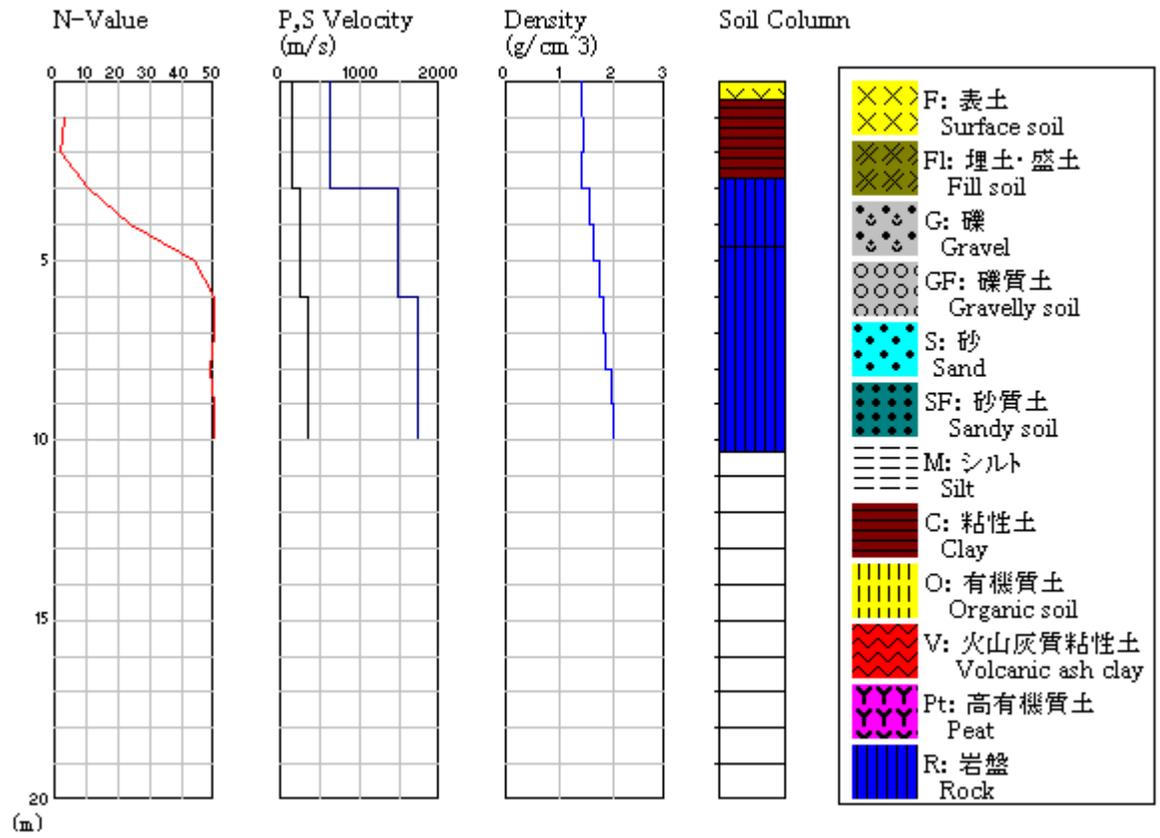
# 原子力発電所サイトを襲ったと思われる強震動とは？

現時点で推定されること

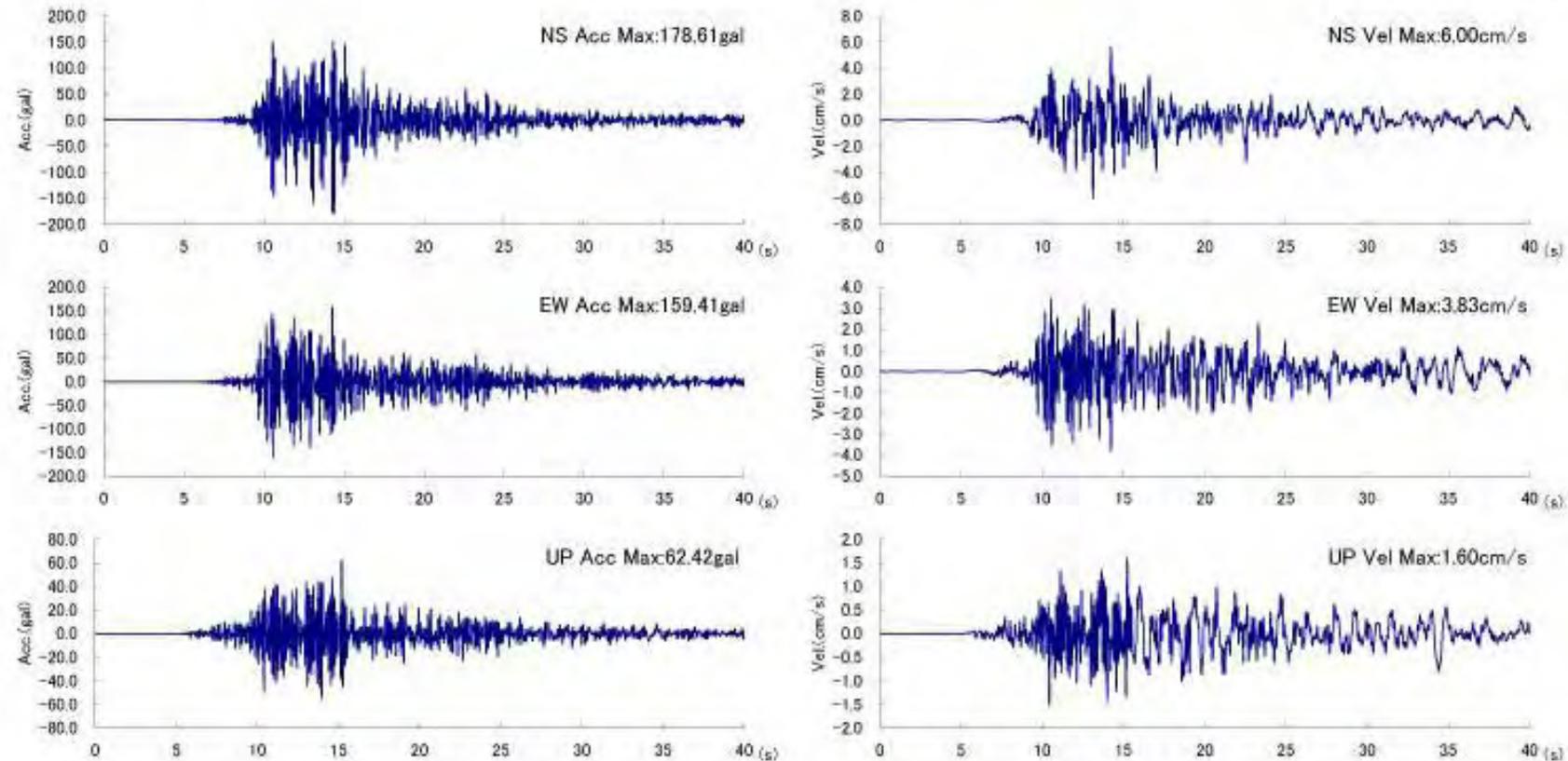
- ・2つのアスペリティを有する震源モデルでの震源南西側での合成結果の不一致。特にNIG018(柏崎)での波形の後半は過小評価。
- ・NIG016における余震の観測記録を使った原子力発電所サイトにおける波形合成結果はそれほど大きくなく、震度6強程度にはならない。
- ・地殻変動から推定された断層モデルでは、西落ちの逆断層となっている(南西側の震源)。

このような結果から推定される震源モデルと原子力発電所サイトでの強震動としては、

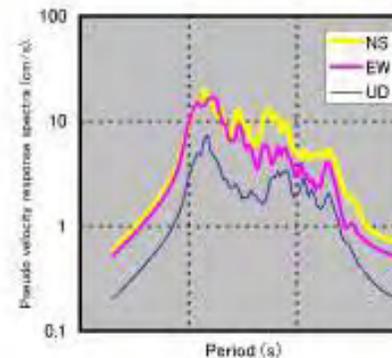
- ・震源より南西にもう1つのアスペリティが存在し、その位置がサイトに近く、非常に強い地震動を生成した可能性がある。



K-NETのNIG016(寺泊)の地盤

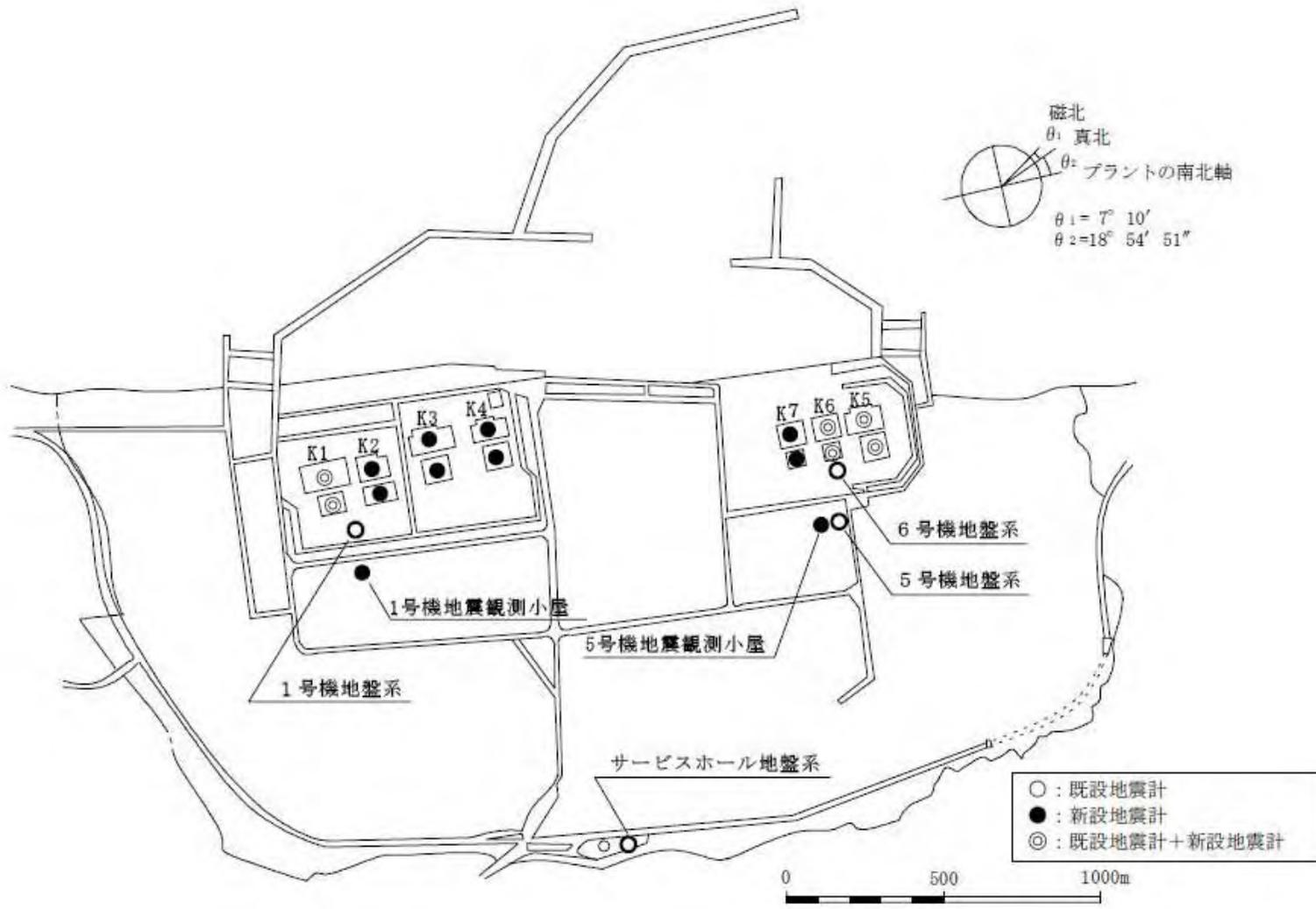


NIG016における余震記録を用いた2つのアスペリティモデルに基づく原子力発電所サイトにおける本震合成波形



### 注意

NIG016と原子力発電所サイトでの地盤構造の違いは無視、また、両サイトにおける余震の震源過程による違いも無視している。→ 原子力発電所での本震再現波形ではない。



原子力発電所における地震観測点

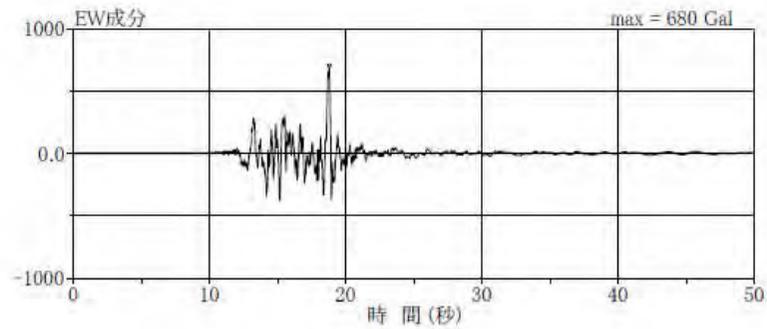


図 2-1 1号機原子炉建屋基礎版上の加速度時刻歴波形(東西方向)

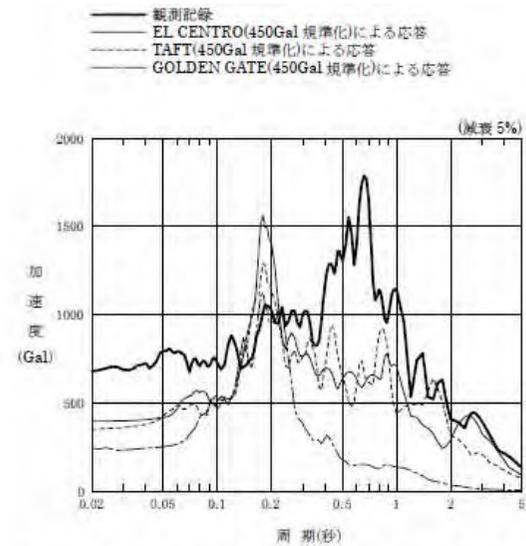


図 3-1 1号機原子炉建屋基礎版上の加速度応答スペクトル(東西方向)

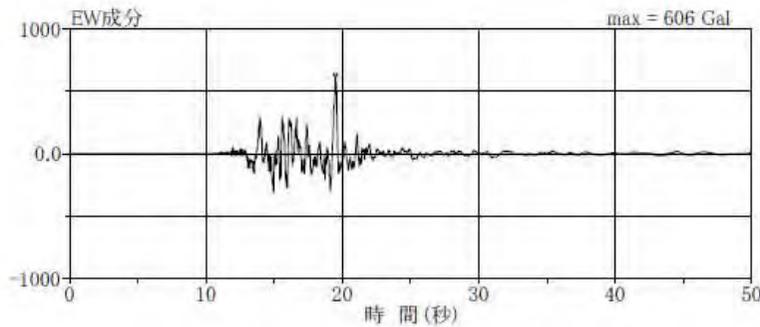


図 2-2 2号機原子炉建屋基礎版上の加速度時刻歴波形(東西方向)

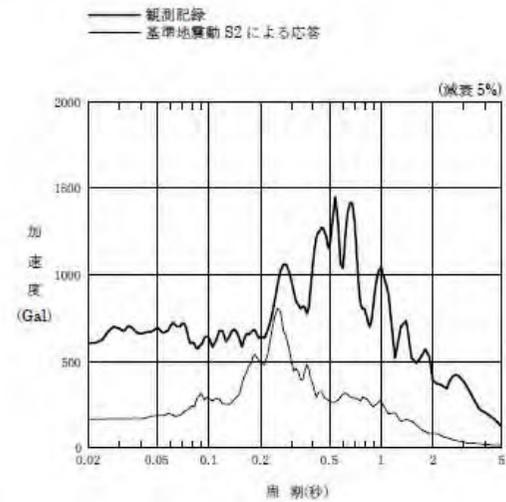


図 3-2 2号機原子炉建屋基礎版上の加速度応答スペクトル(東西方向)

## 原子力発電所における地震観測結果(1)

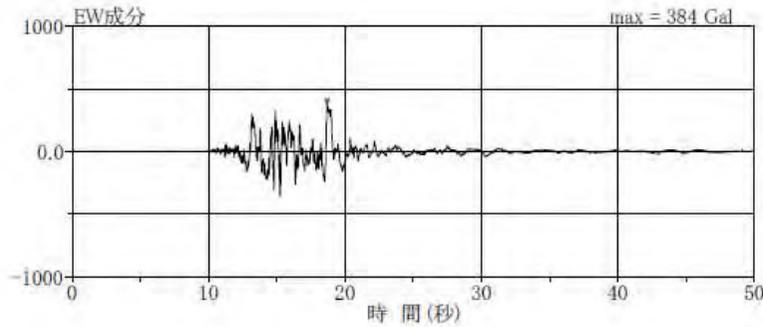


図 2-3 3号機原子炉建屋基礎版上の加速度時刻歴波形(東西方向)

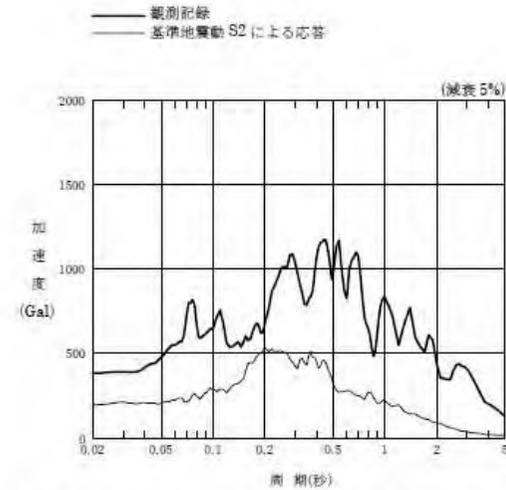


図 3-3 3号機原子炉建屋基礎版上の加速度応答スペクトル(東西方向)

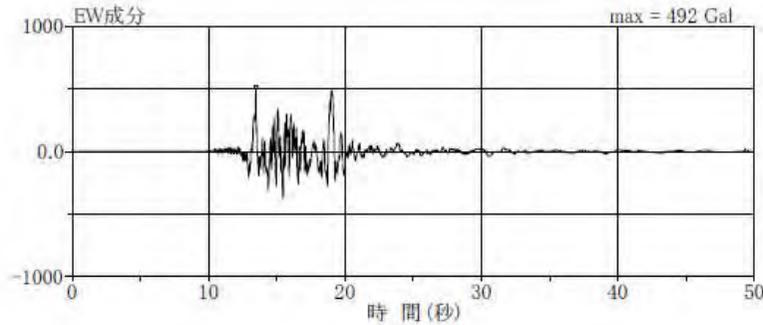


図 2-4 4号機原子炉建屋基礎版上の加速度時刻歴波形(東西方向)

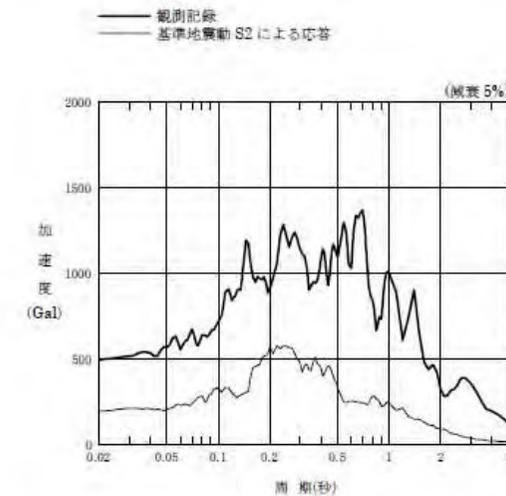


図 3-4 4号機原子炉建屋基礎版上の加速度応答スペクトル(東西方向)

## 原子力発電所における地震観測結果(2)

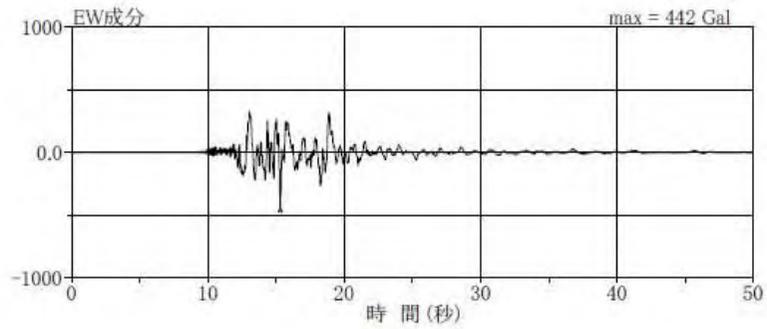


図 2-5 5号機原子炉建屋基礎版上の加速度時刻歴波形(東西方向)

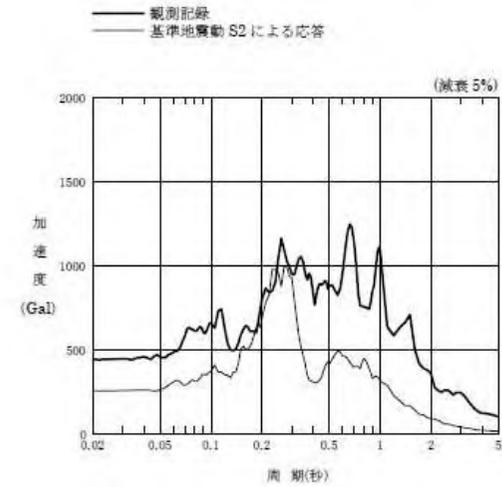


図 3-5 5号機原子炉建屋基礎版上の加速度応答スペクトル(東西方向)

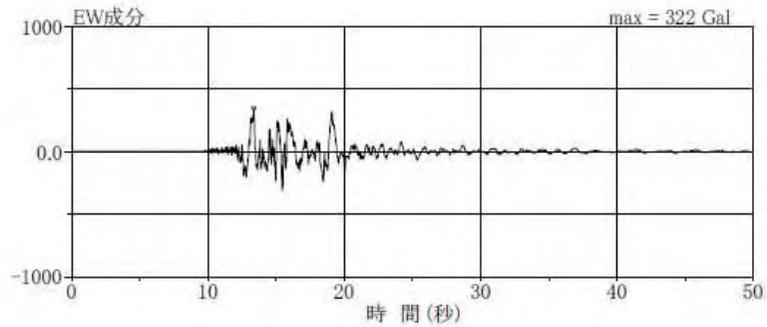


図 2-6 6号機原子炉建屋基礎版上の加速度時刻歴波形(東西方向)

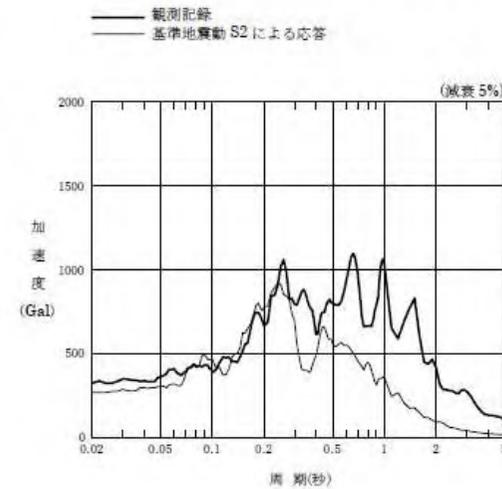


図 3-6 6号機原子炉建屋基礎版上の加速度応答スペクトル(東西方向)

### 原子力発電所における地震観測結果(3)

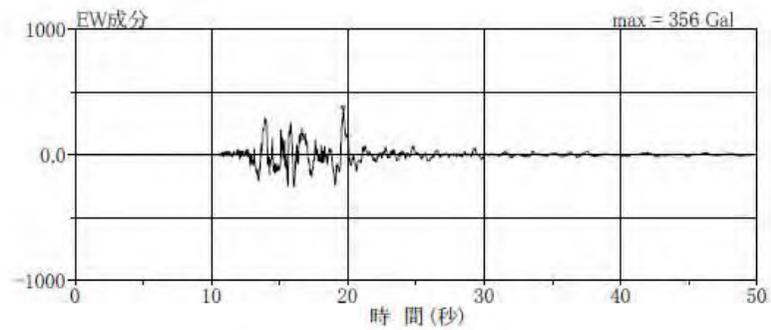


図 2-7 7号機原子炉建屋基礎版上の加速度時刻歴波形(東西方向)

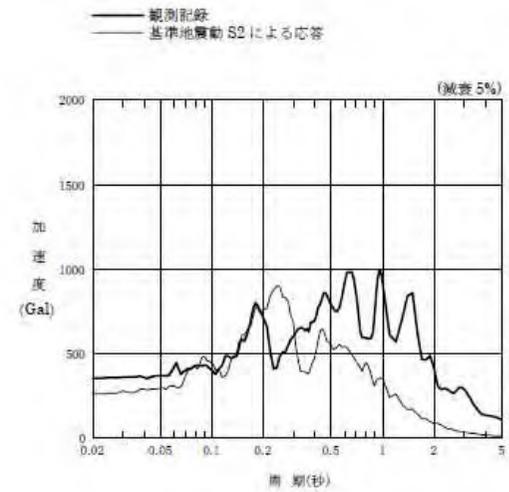
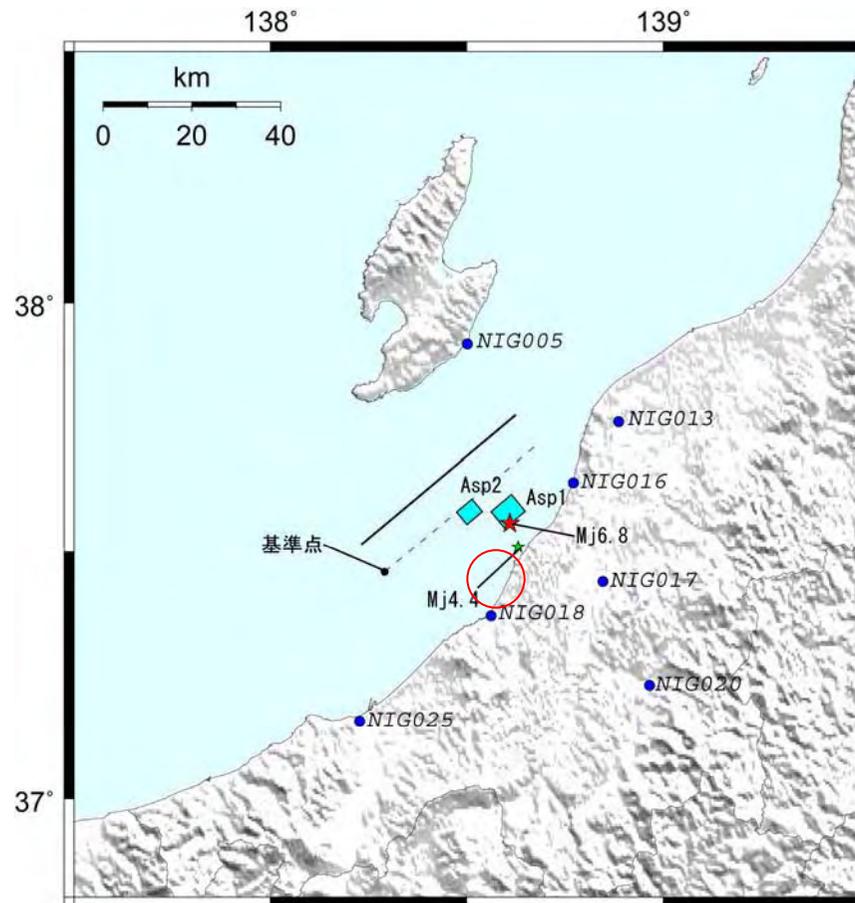


図 3-7 7号機原子炉建屋基礎版上の加速度応答スペクトル(東西方向)

## 原子力発電所における地震観測結果(4)



原子力発電所で観測された最大加速度の大きさやNIG018(柏崎)での波形合成結果の過小評価、さらには震源南西方向の観測点での過小評価から○近傍にさらなるアスペリティの存在が示唆される。