

## 2007年新潟県中越沖地震（Mj6.8）の震源のモデル化と強震動シミュレーション

釜江 克宏

川辺 秀憲

2007年7月16日10時13分、新潟県中越沖でMj6.8の地震が発生し、最大震度6強を観測した。震度6強は震源域に近い新潟県刈羽村、柏崎市、内陸部の長岡市や震源から南西方向約90kmも離れた長野県飯綱町でも観測され、被害は刈羽村から柏崎市にかけての地域に集中した。今回の地震は震源域極近傍に立地していた東京電力株式会社の柏崎・刈羽原子力発電所（KK原子力発電所）を直撃し、敷地内で震度7が観測されるとともに、原子炉建屋の基礎版での観測地震動は、設計時に想定された地震動のレベルを最大で約2.5倍も上回った。その結果、火災や若干の放射性物質の漏洩など、原子力発電所における地震被害と言うことで国内のみならず世界中に大きな衝撃を与えた。ただし、現在のところ原子炉や建屋などの安全上重要な設備には重大な損傷等がなかったと報告されている。

原子力発電所の耐震設計審査指針は一昨年9月に改訂され（以下、新指針と言う。）、原子力安全委員会は行政庁に対して原子力事業者から既設の原子炉施設も含めて耐震安全性の評価の実施と報告を求めるよう指示した。新指針では、活断層を認定するための地形、地質、地盤調査の高度化、基準地震動策定手法の高度化（断層モデルに基づく手法）などが図られた。新潟県中越沖地震は原子力事業者が新指針に従った各種調査の実施やその結果に基づく基準地震動の策定、耐震安全性評価（バックチェック）の最中に起こった。現在進捗中のバックチェックでは、活断層の調査や認定の高度化や最新の知見に基づく断層モデルによる基準地震動の策定などが要求されているが、今回の地震はその新指針の考え方の重要性を強く示すものとなった。

新潟県中越沖地震では、地震直後から陸域、海域における大規模な調査が続けられており、震源断層の特定、活断層との関係、設計レベルを大きく上回った観測地震動の生成メカニズムの解明、原子力発電所への影響など、多面的な検討が進められている。当研究室では、地震発生直後から震源のモデル化やKK原子力発電所における観測記録の分析、再現など、強震動の生成メカニズムの解明に向けた研究を実施してきた。この地震は北西－南東方向に圧縮軸をもつ逆断層タイプであり、震源断層面の傾斜方向がようやく余震分布から南東傾斜が優勢と結論された（地震調査委員会）。また、震源断層の位置と形状が特定されたため、震源断層と海底断層との関係も産業技術総合研究所の調査などによって指摘された。

ここでは、余震分布から南東傾斜の震源断層面が特定されたことを受け、これまでの方法と同様、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る震源のモデル化を再度実施するとともに、KK原子力発電所で観測された強震動の生成メカニズムを解明するため、3次元地下構造モデルを用いた理論的地震動シミュレーションを行った。

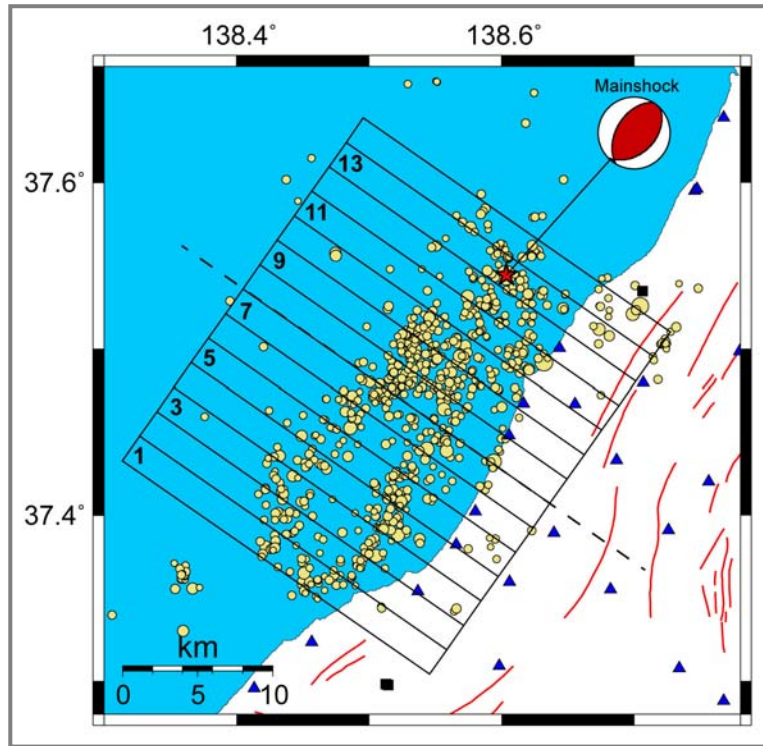
結果として、これまでと同様に3つのアスペリティによって観測地震動が説明可能であること、KK原子力発電所では褶曲構造による複雑な3次元地下構造による地震波のフォーカシングによって非常に強い地震動が襲ったことを示した。ただし、これらの結果は暫定的なもので、現在進められている詳細な地盤調査結果などを待って、より定量的な検討が必要である。

### 謝辞

ここでは（独）防災科学技術研究所によるK-NET、KiK-net及びF-net、並びに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、気象庁一元化処理による震源情報を使用させて頂きました。記して感謝の意を表します。

## 震源のモデル化と強震動シミュレーション

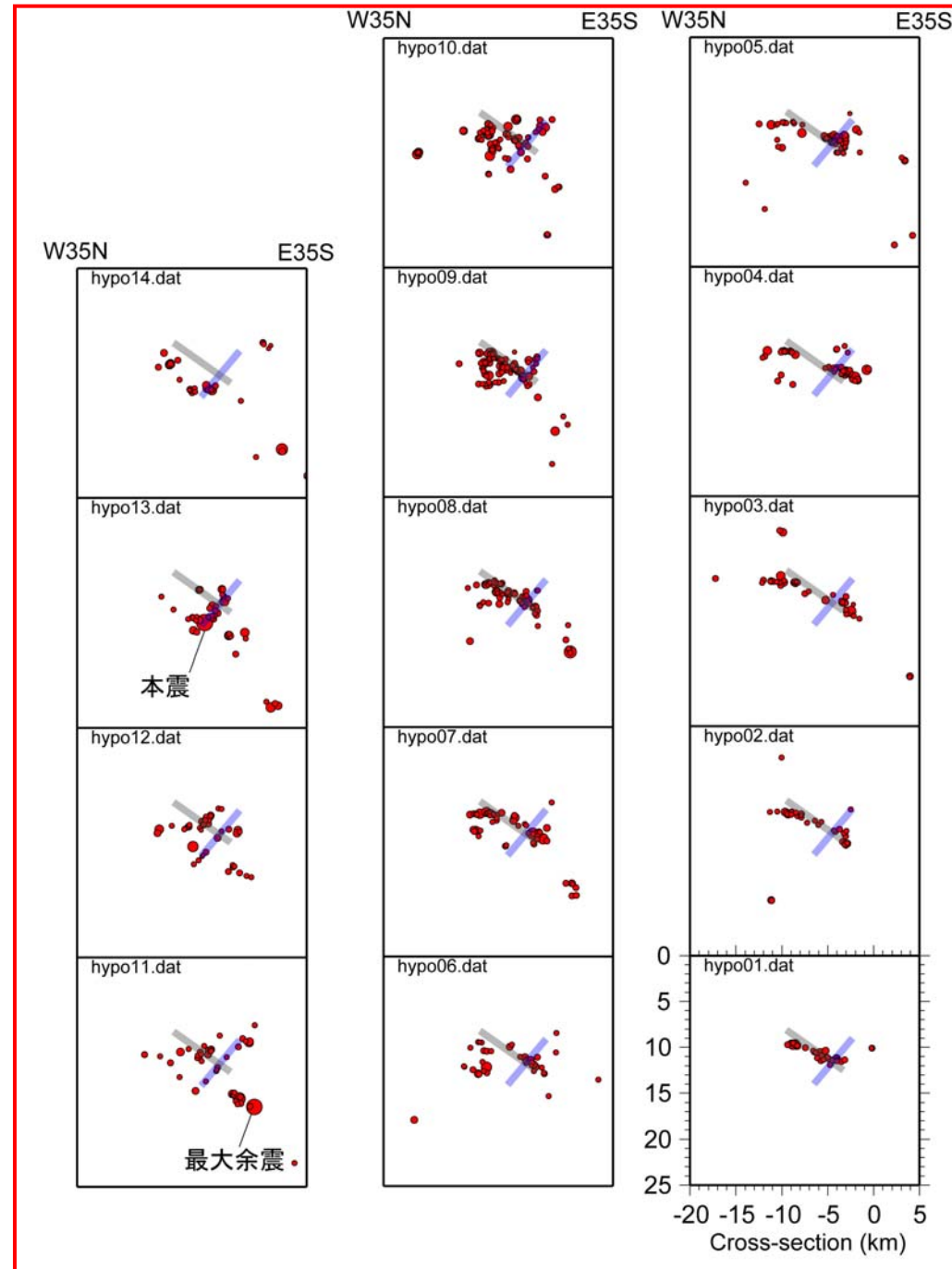
- 南東傾斜の深さの異なる2枚の断層面を仮定  
(最新の余震分布を参考)
- 経験的グリーン関数法によるフォワードモデリング
- 3次元地下構造モデルを用いた理論的シミュレーション  
(1次元理論シミュレーションとの比較など)



- 北西傾斜の断層面は走向方向に長さ約8kmの大きさ
- 南東傾斜の断層面は、北西部で深部にオフセットする

東京大学地震研究所

地震調査委員会資料



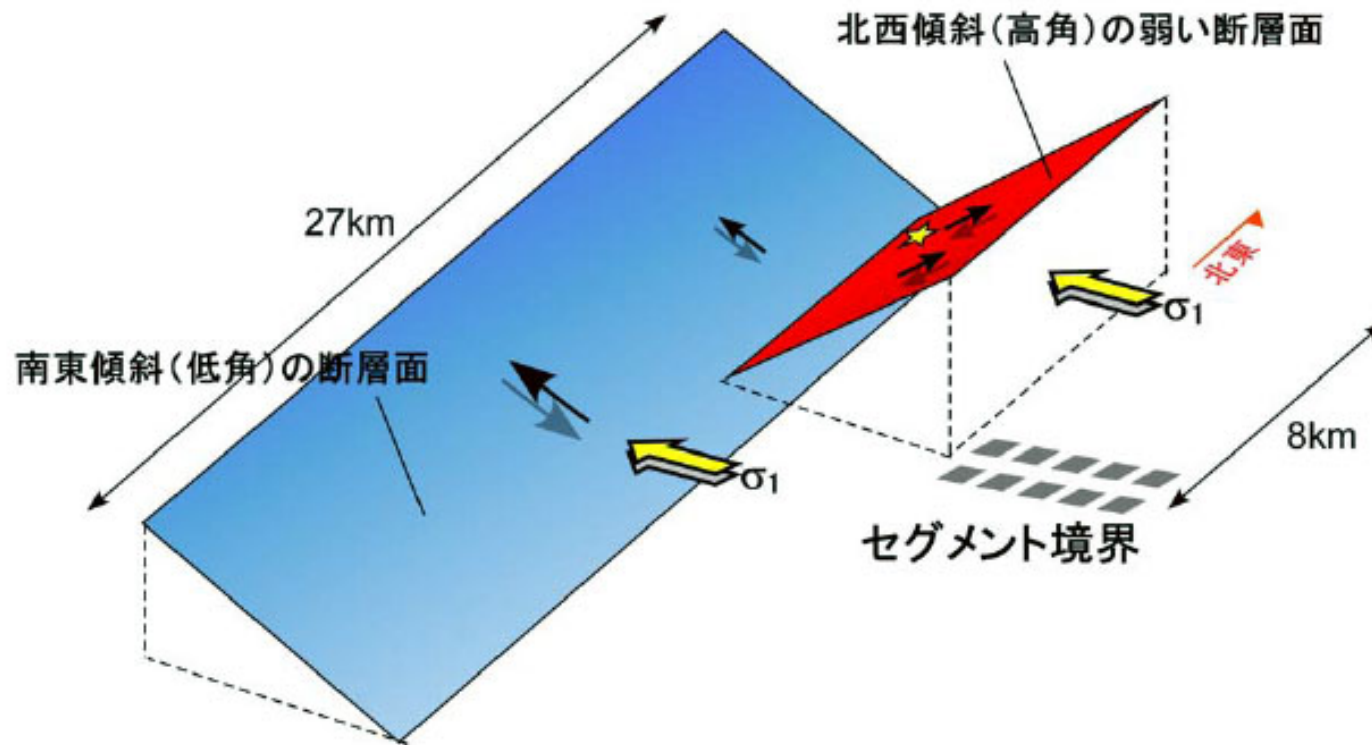


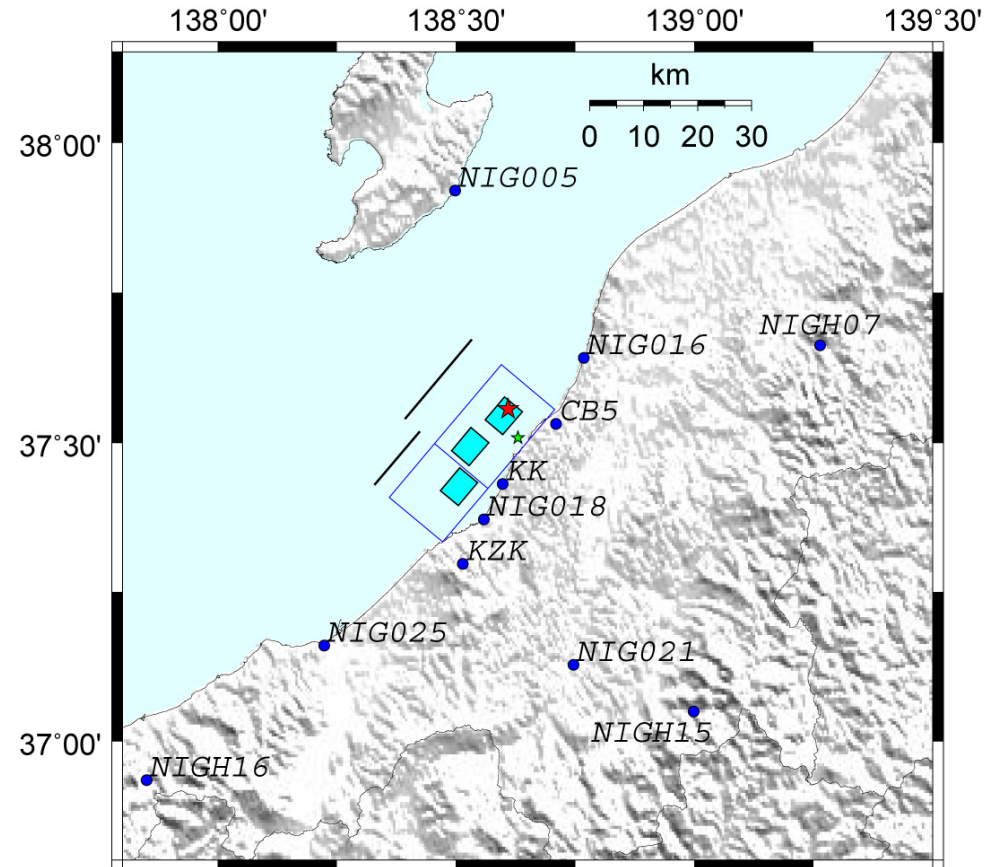
図4. 断層形状・位置関係を示す概念図.

# 震源のモデル化

経験的グリーン関数法(EGF)を用いた  
 フォワードモデリング

用いた余震の諸元と震源パラメータ

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)	$5.21 \times 10^{15}$
Focal Mechanism	187/54/70 39/41/115
Area (km <sup>2</sup> )	1.4 × 1.4
Stress drop (MPa)	4.6



- ★ 本震の震央      ● 観測点
- ★ 経験的グリーン関数として用いた余震の震央

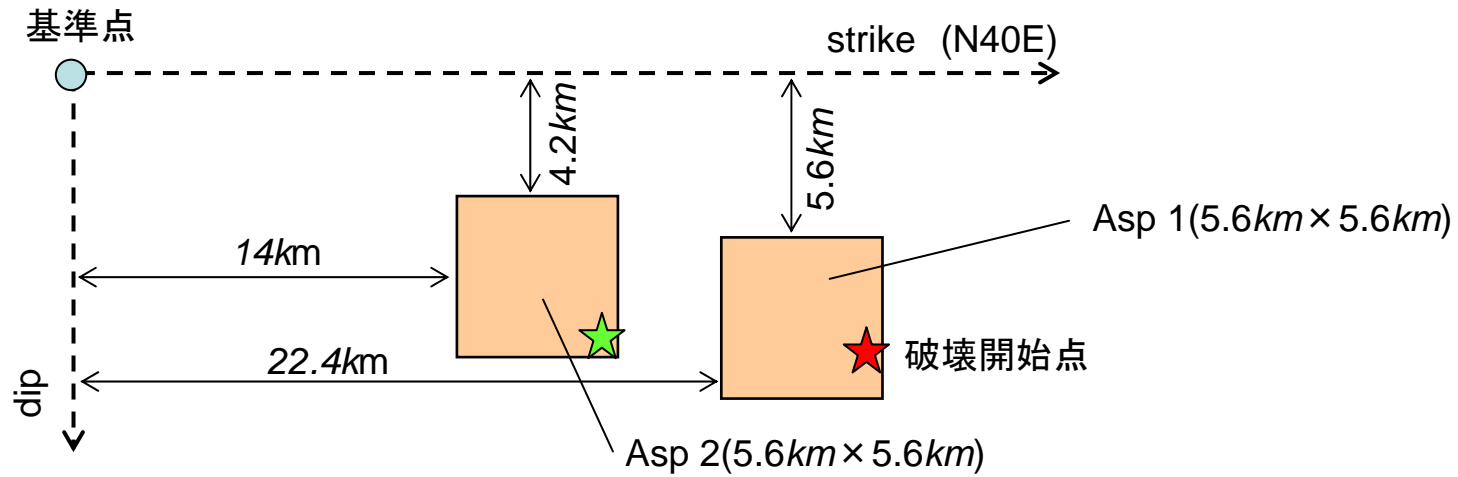
解析対象領域及び観測点位置

## アスペリティの震源パラメータ

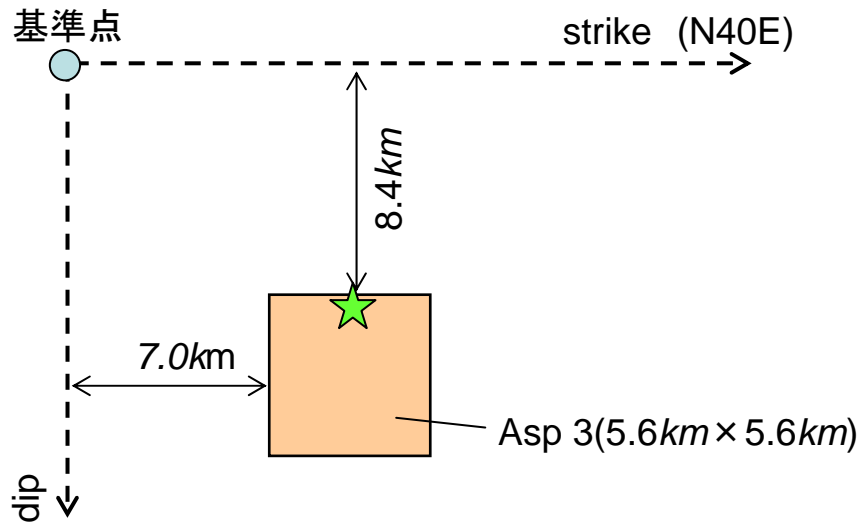
	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	S (km <sup>2</sup> )	$M_0$ (Nm)	$\Delta \sigma$ (MPa)
Asp 1	40	40	90	$5.6 \times 5.6$	$1.33 \times 10^{18}$	18.4
Asp 2	40	40	90	$5.6 \times 5.6$	$2.00 \times 10^{18}$	27.6
Asp 3	40	40	90	$5.6 \times 5.6$	$2.00 \times 10^{18}$	27.6

破壊速度: 2.7km/s

後の観測波形と合成波形の比較からAsp-3  
 の応力降下量はやや大きい: 今後の課題



(a) アスペリティ1、2



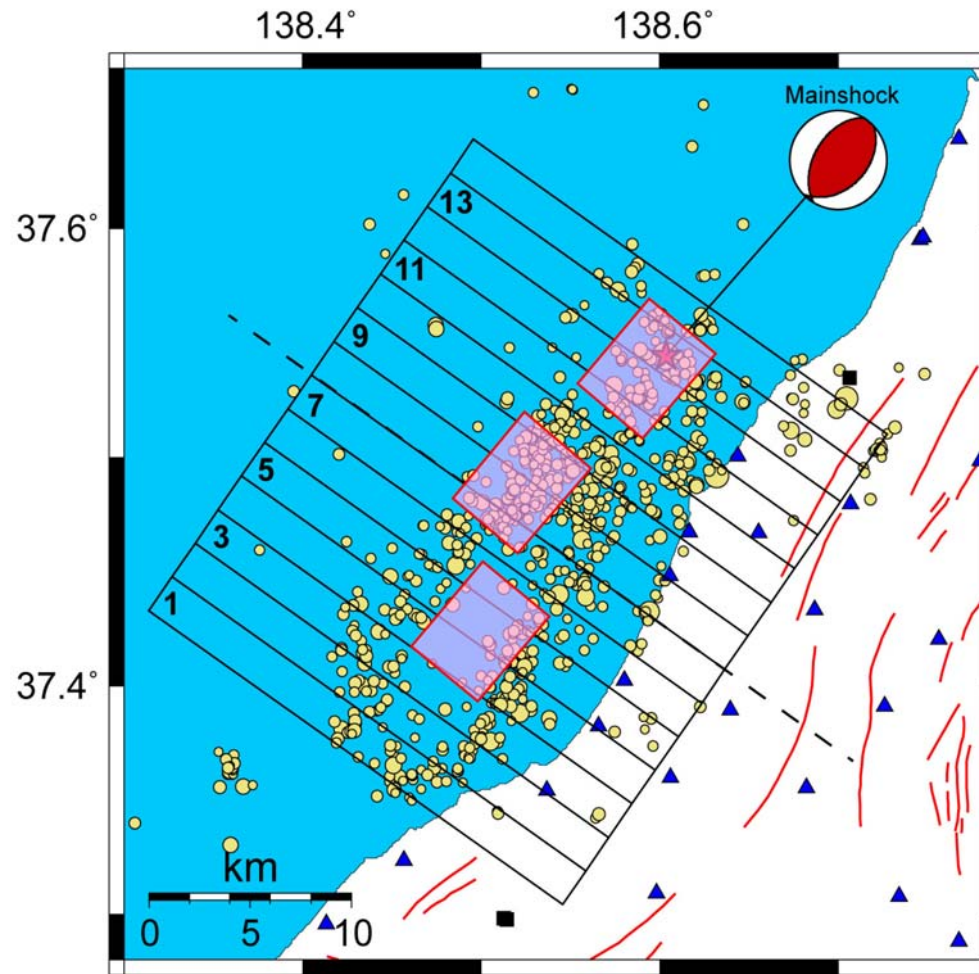
(b) アスペリティ3

基準点位置

	Lon. (°)	Lat. (°)	Depth (km)
Asp 1	138.360	37.409	6.0
Asp 2	138.360	37.409	6.0
Asp 3	138.360	37.409	3.0

地震調査委員会では南東傾斜の1枚の断層面と北西傾斜の弱い断層面が示されているが、ここでは、余震分布を参考に、北東側(a)と南西側(b)に深さの異なる2枚の南東傾斜の断層面を想定した。

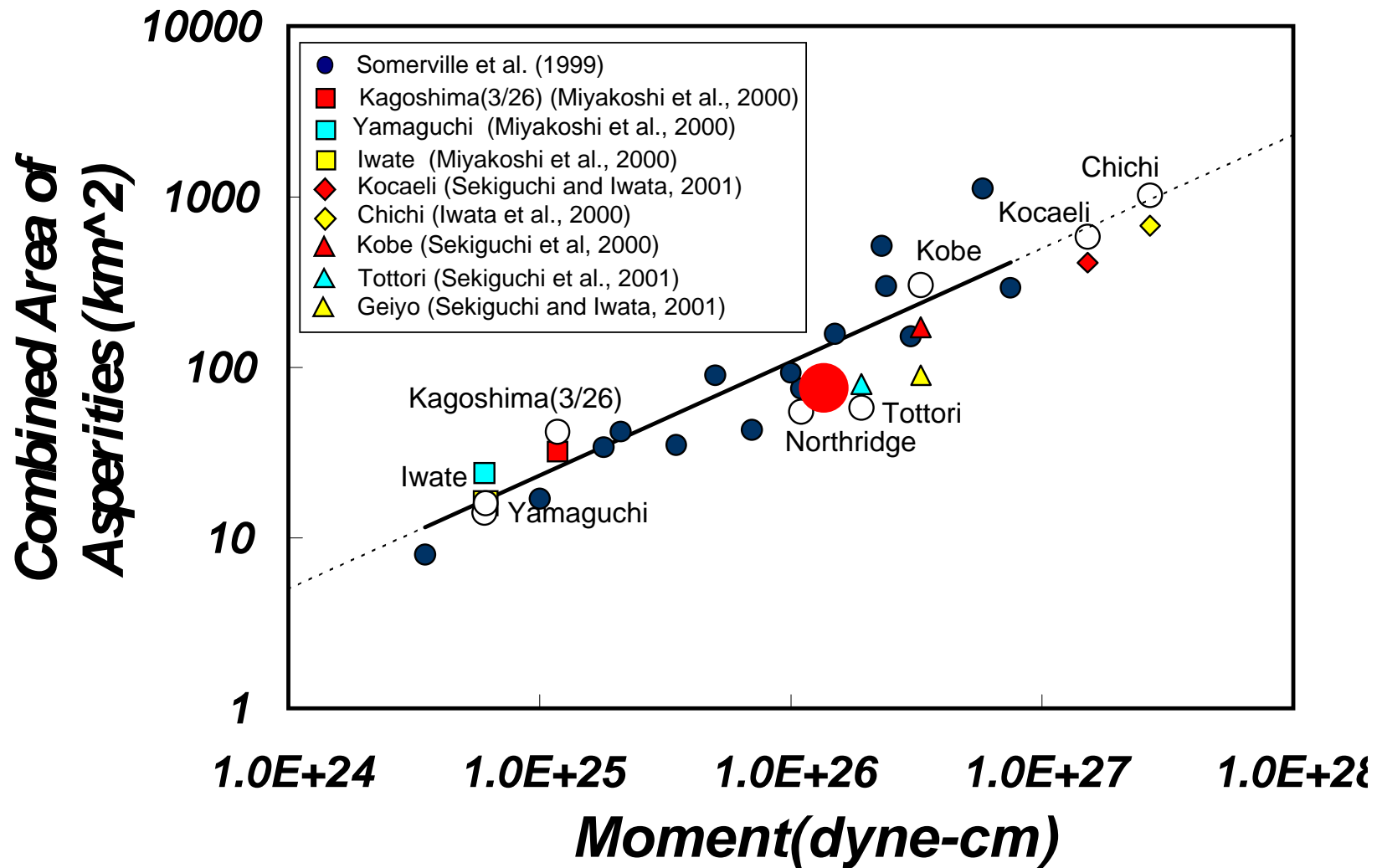
2007年新潟県中越沖地震の3つのアスペリティからなる震源モデル



## 余震分布とアスペリティの位置との関係

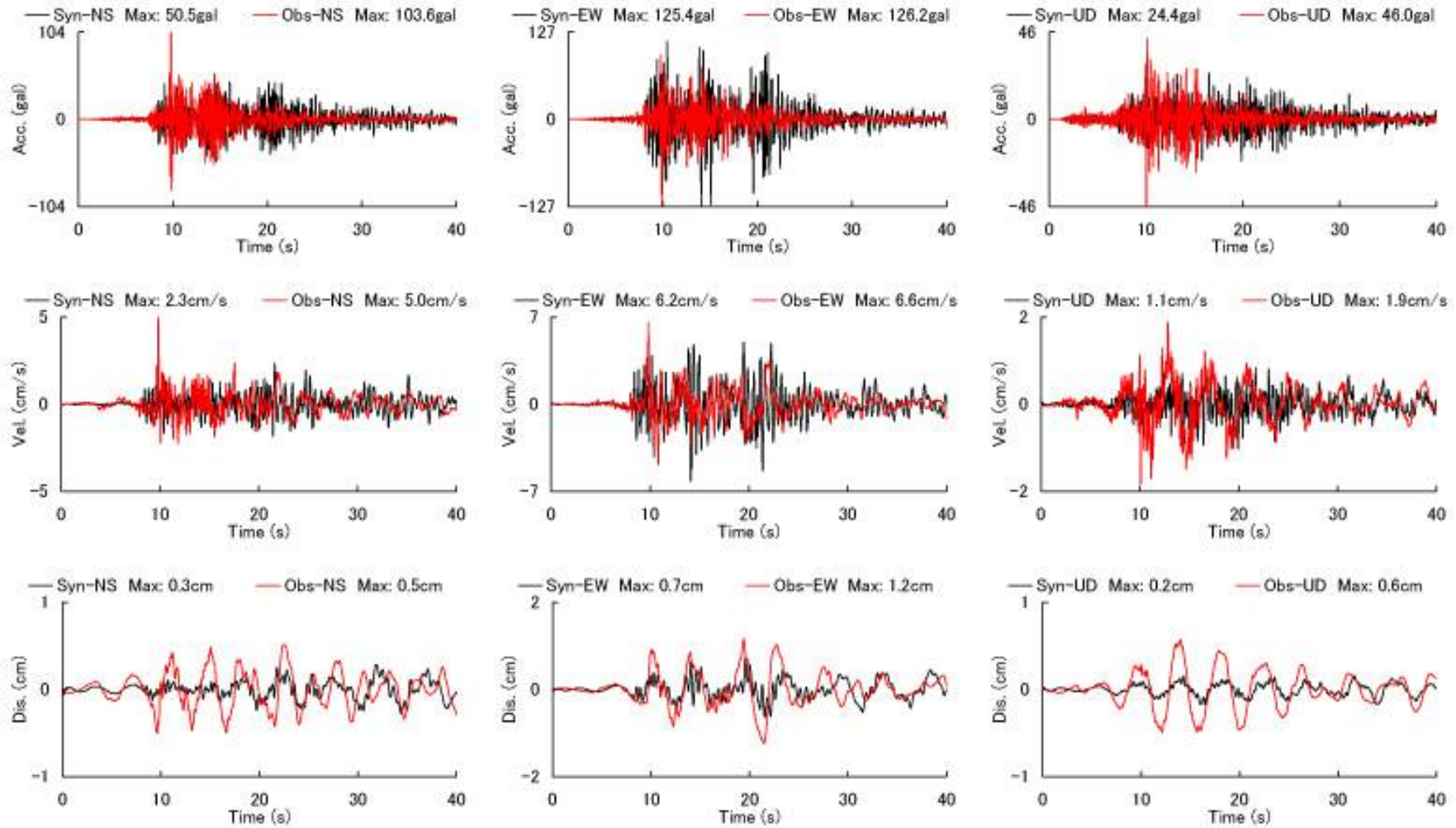
地震調査委員会資料に加筆

# 全アスペリティの大きさと地震規模との関係



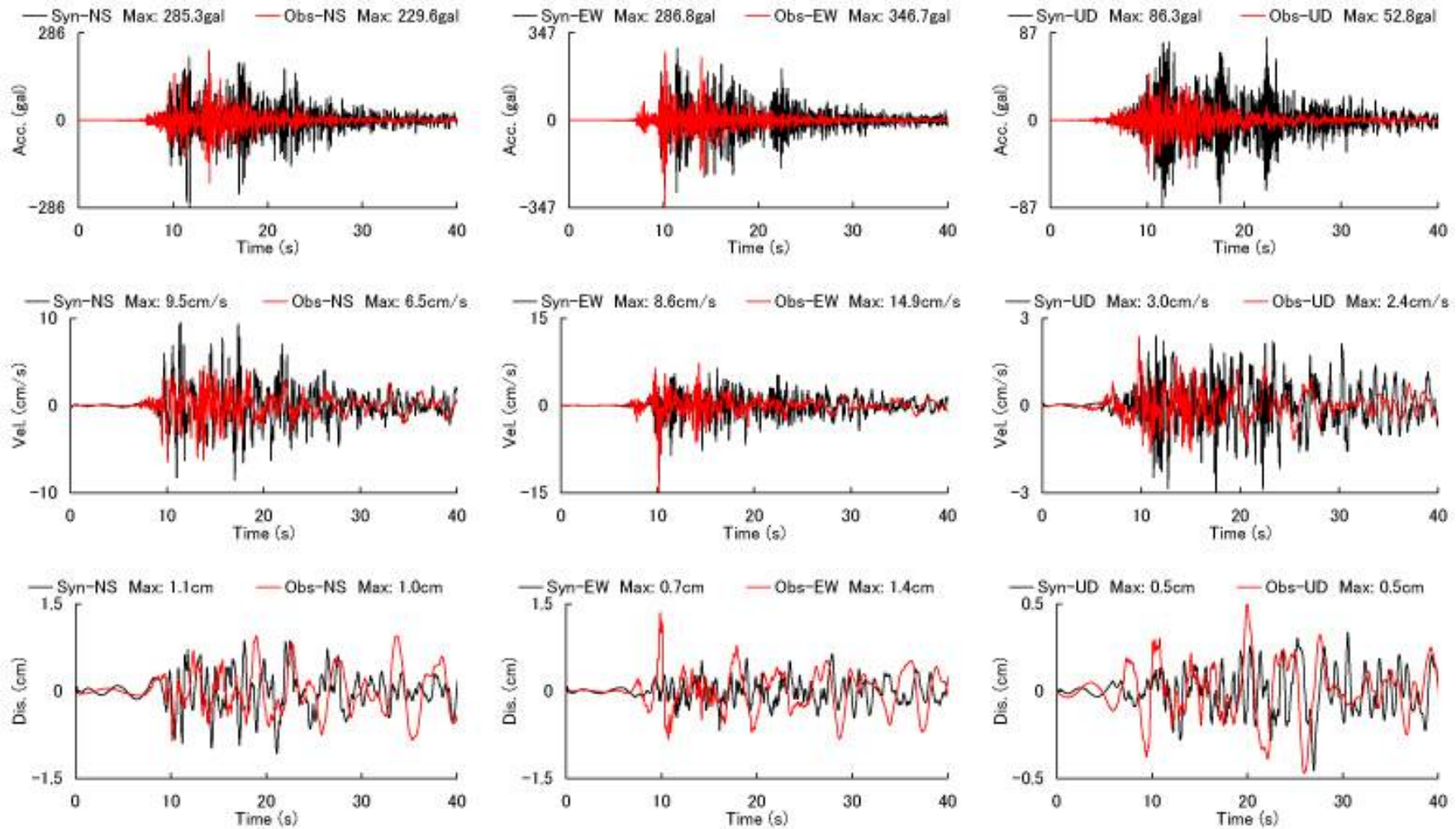


## NIG005



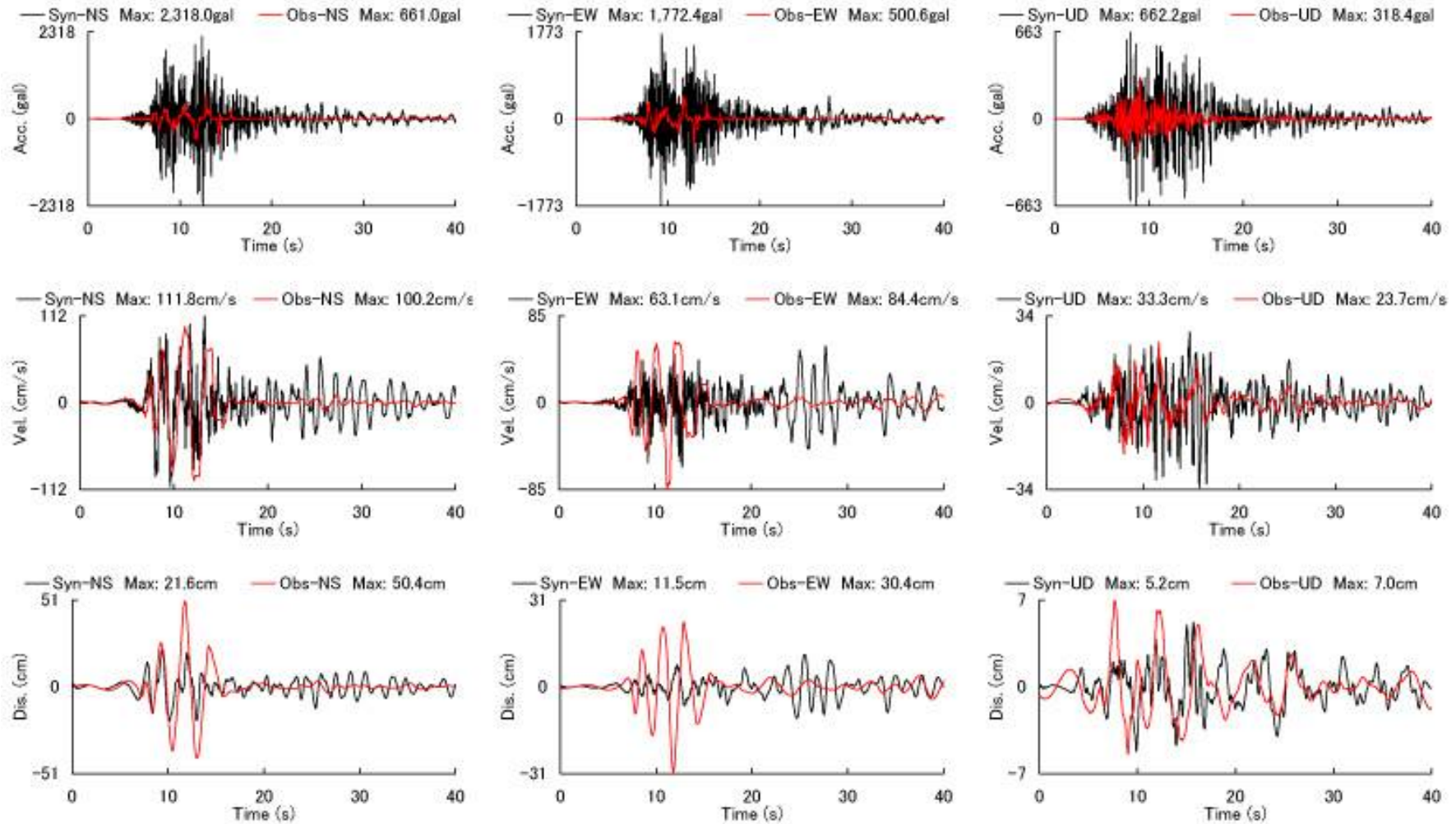
観測波形と合成波形の比較 (K-NET: NIG005)

# NIG016



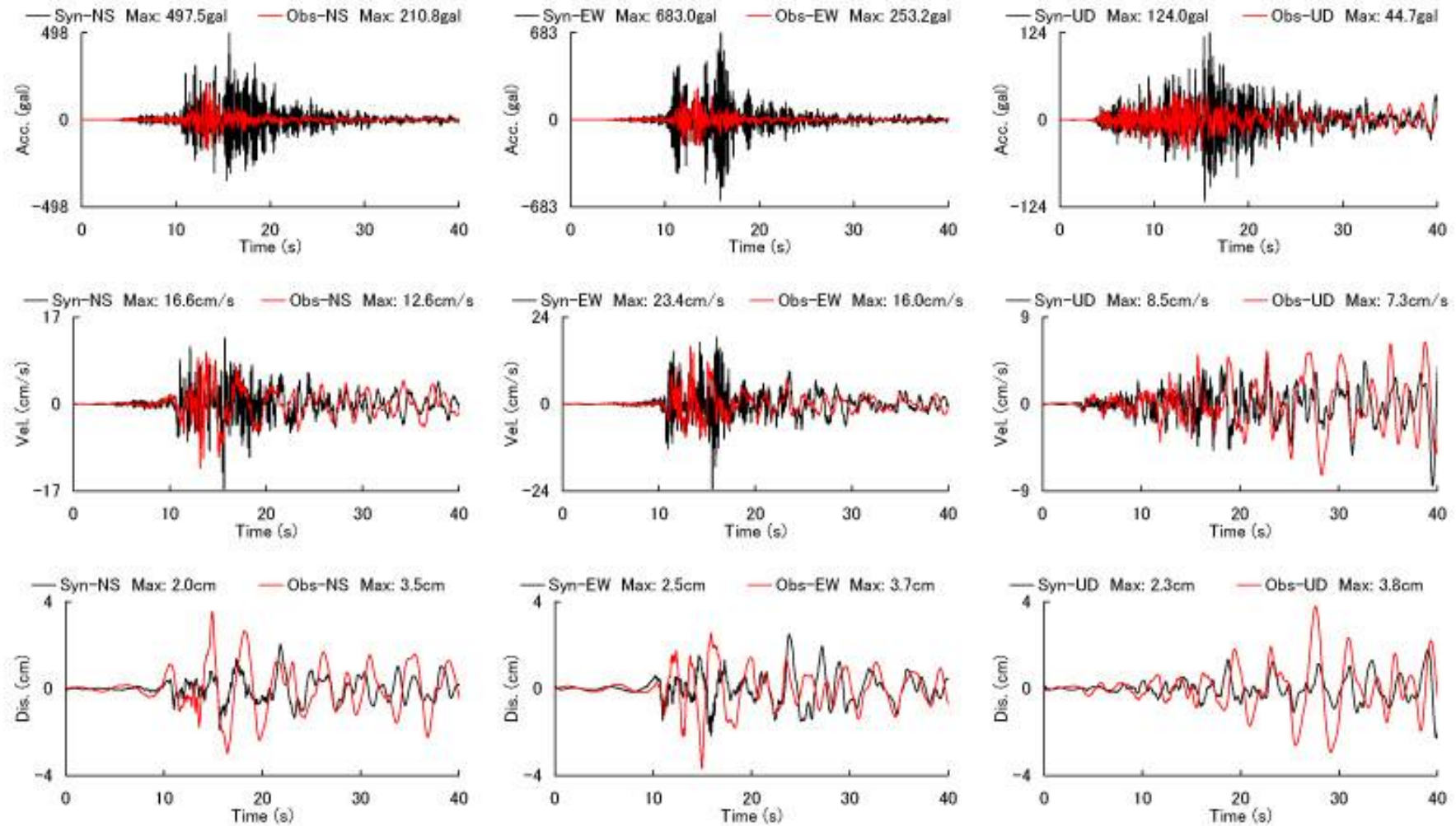
観測波形と合成波形の比較 (K-NET: NIG016)

# NIG018



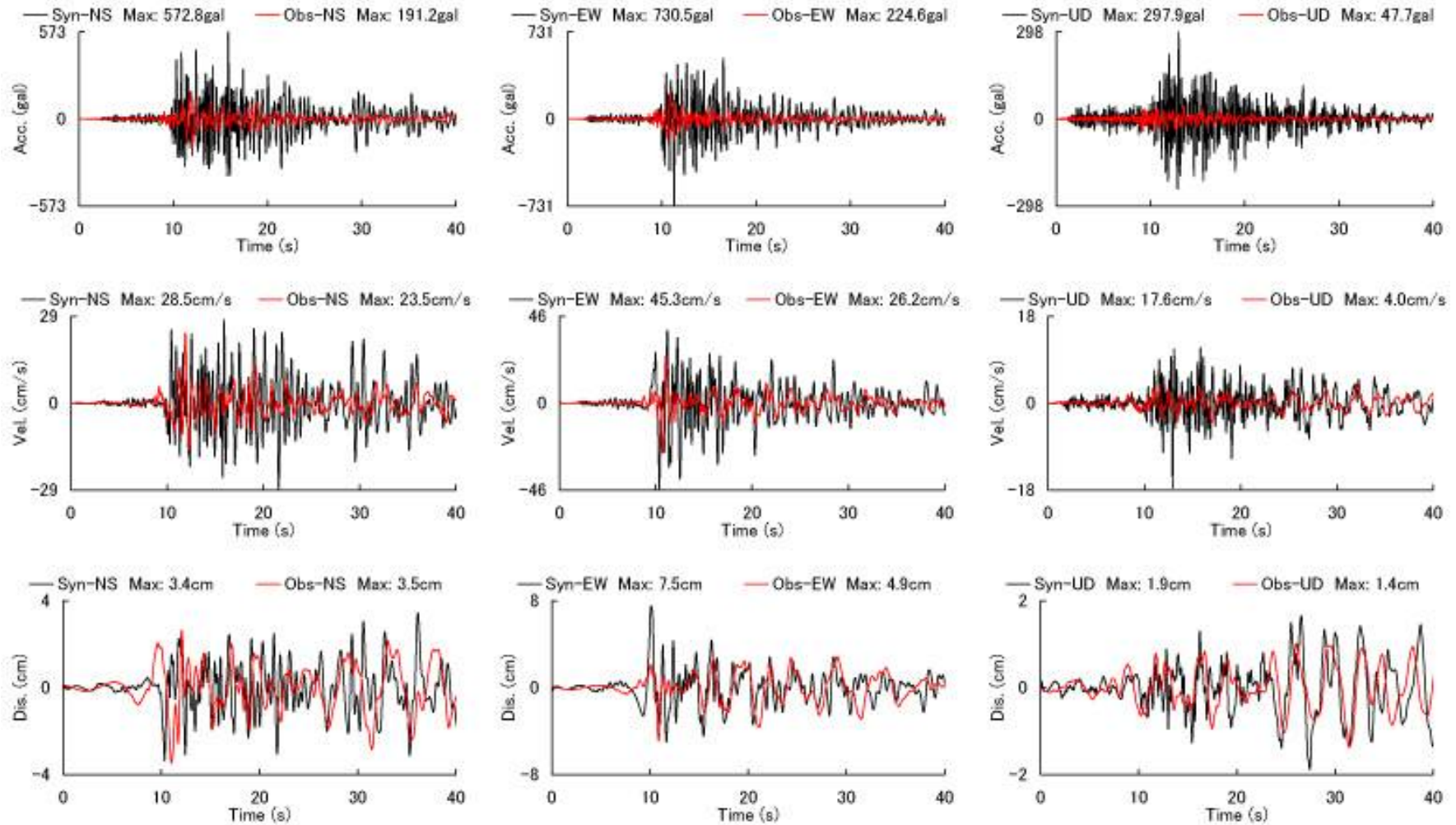
観測波形と合成波形の比較 (K-NET: NIG018)

## NIG021



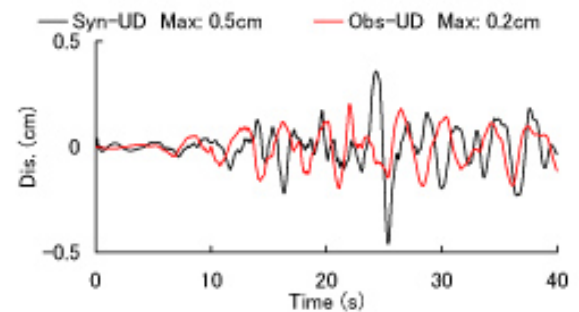
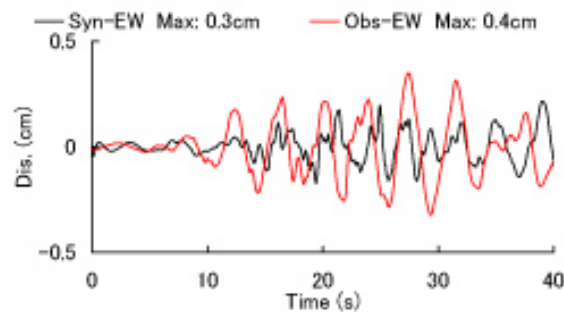
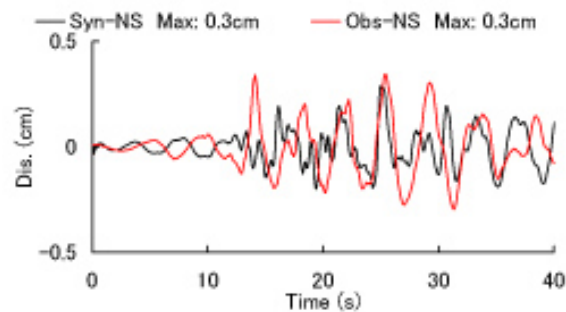
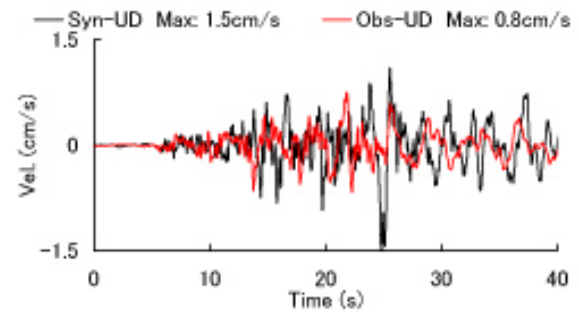
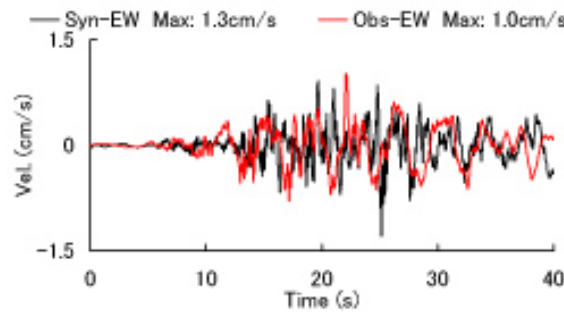
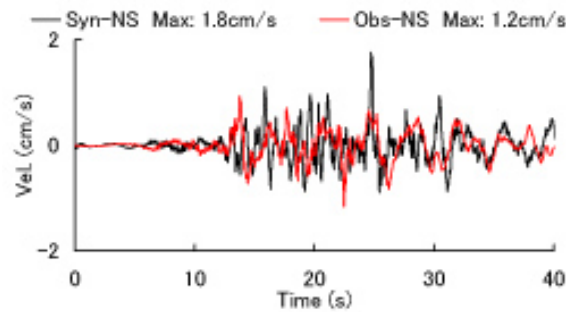
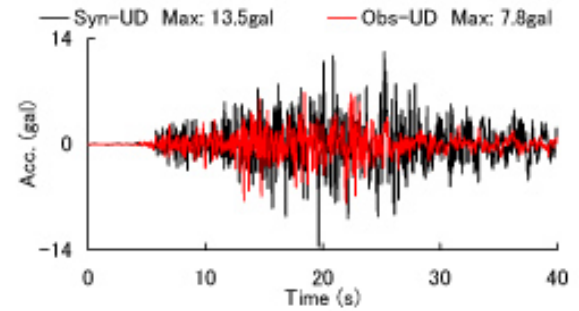
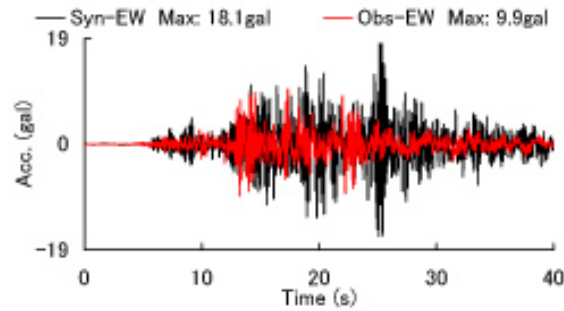
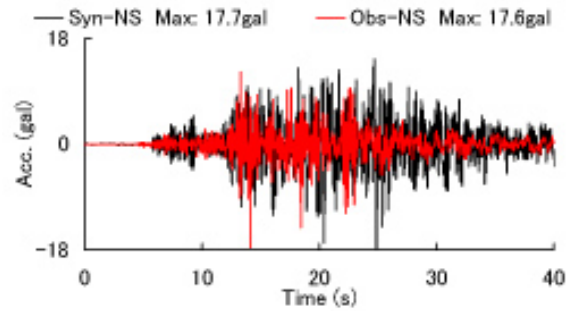
観測波形と合成波形の比較 (K-NET: NIG021)

## NIG025



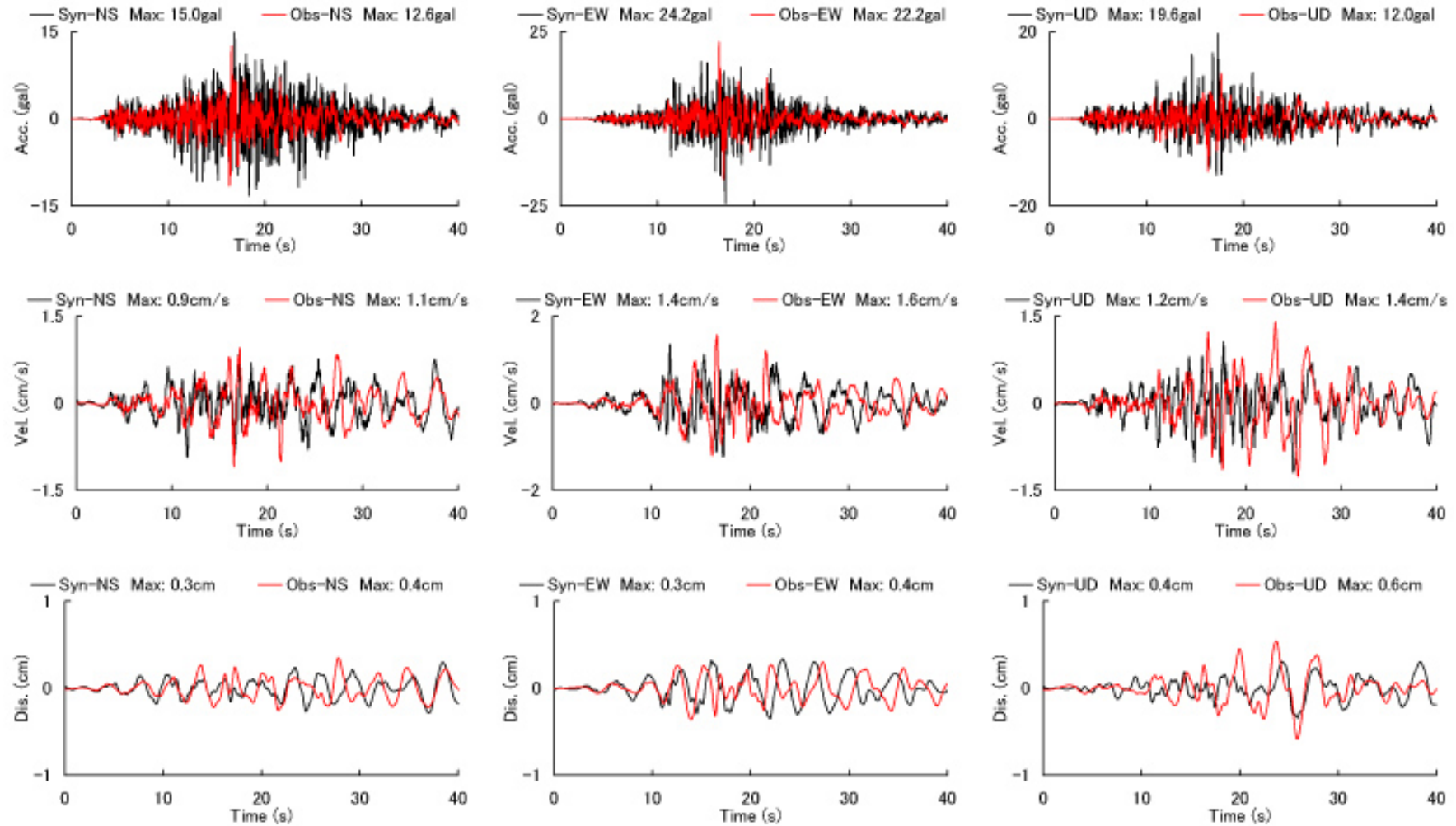
観測波形と合成波形の比較 (K-NET: NIG025)

# NIGH07



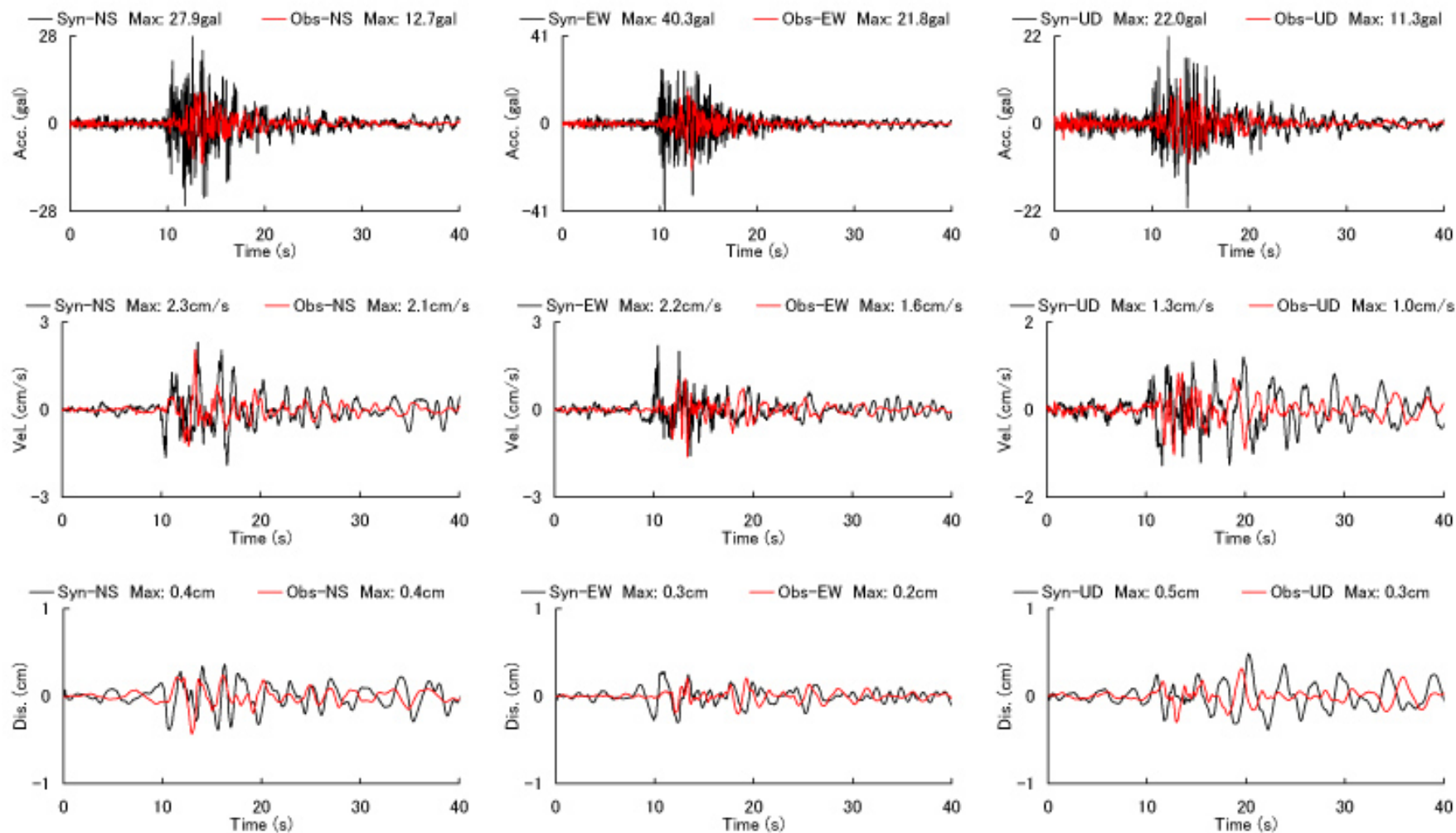
観測波形と合成波形の比較 (KiK-net: NIGH07)

## NIGH15



観測波形と合成波形の比較 (KiK-net: NIGH15)

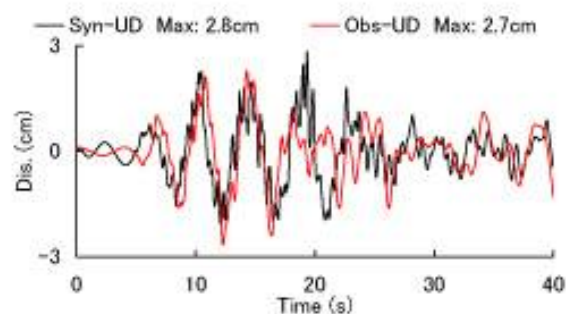
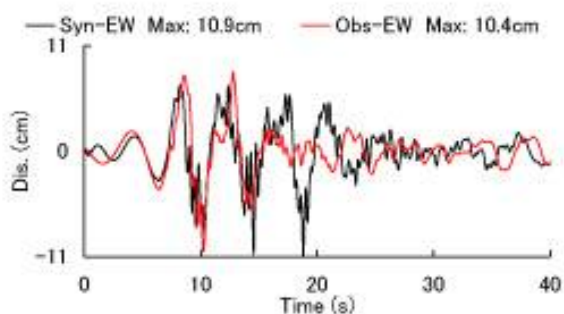
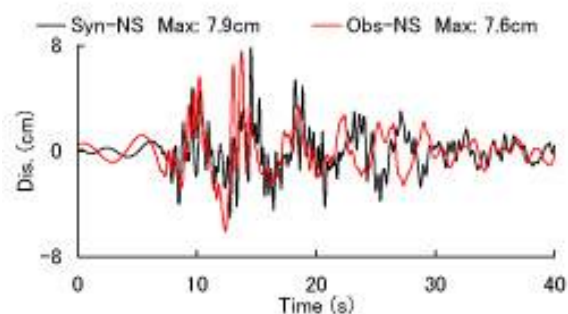
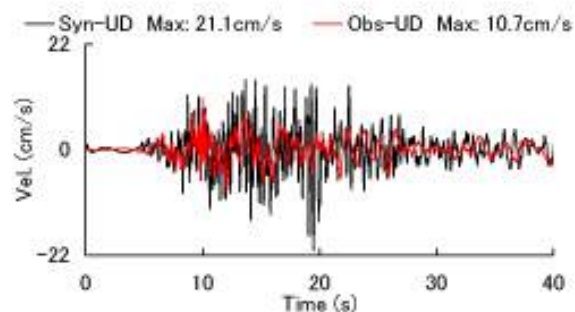
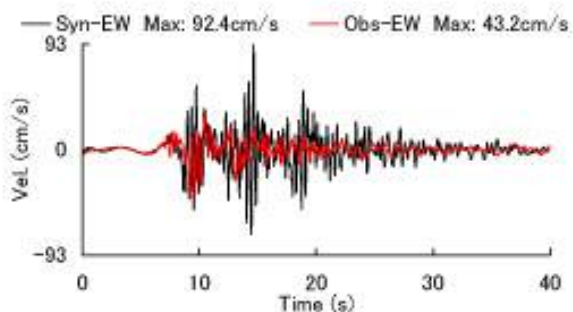
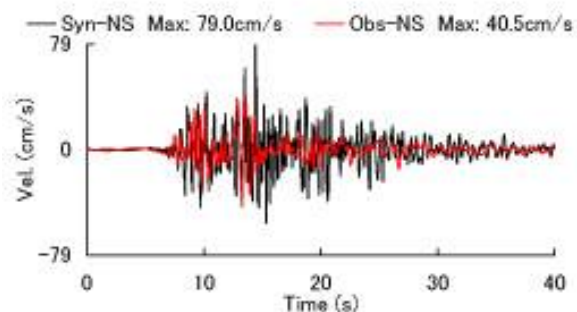
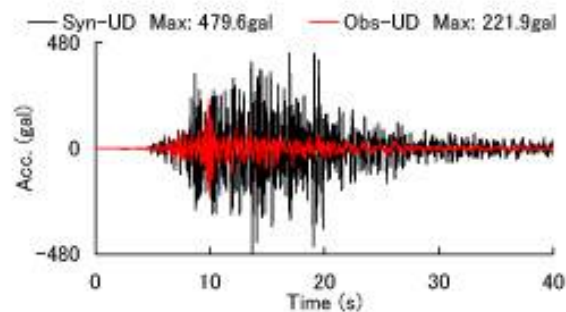
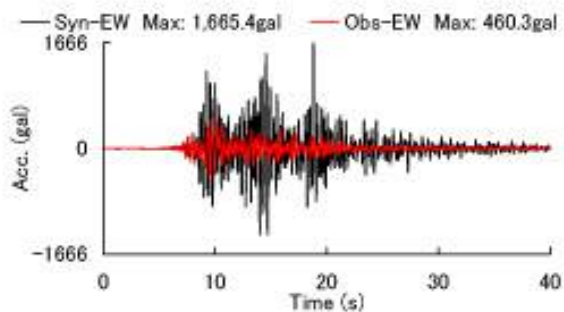
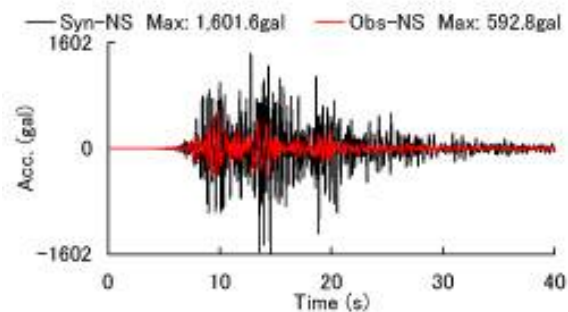
## NIGH16



観測波形と合成波形の比較 (KiK-net: NIGH16)

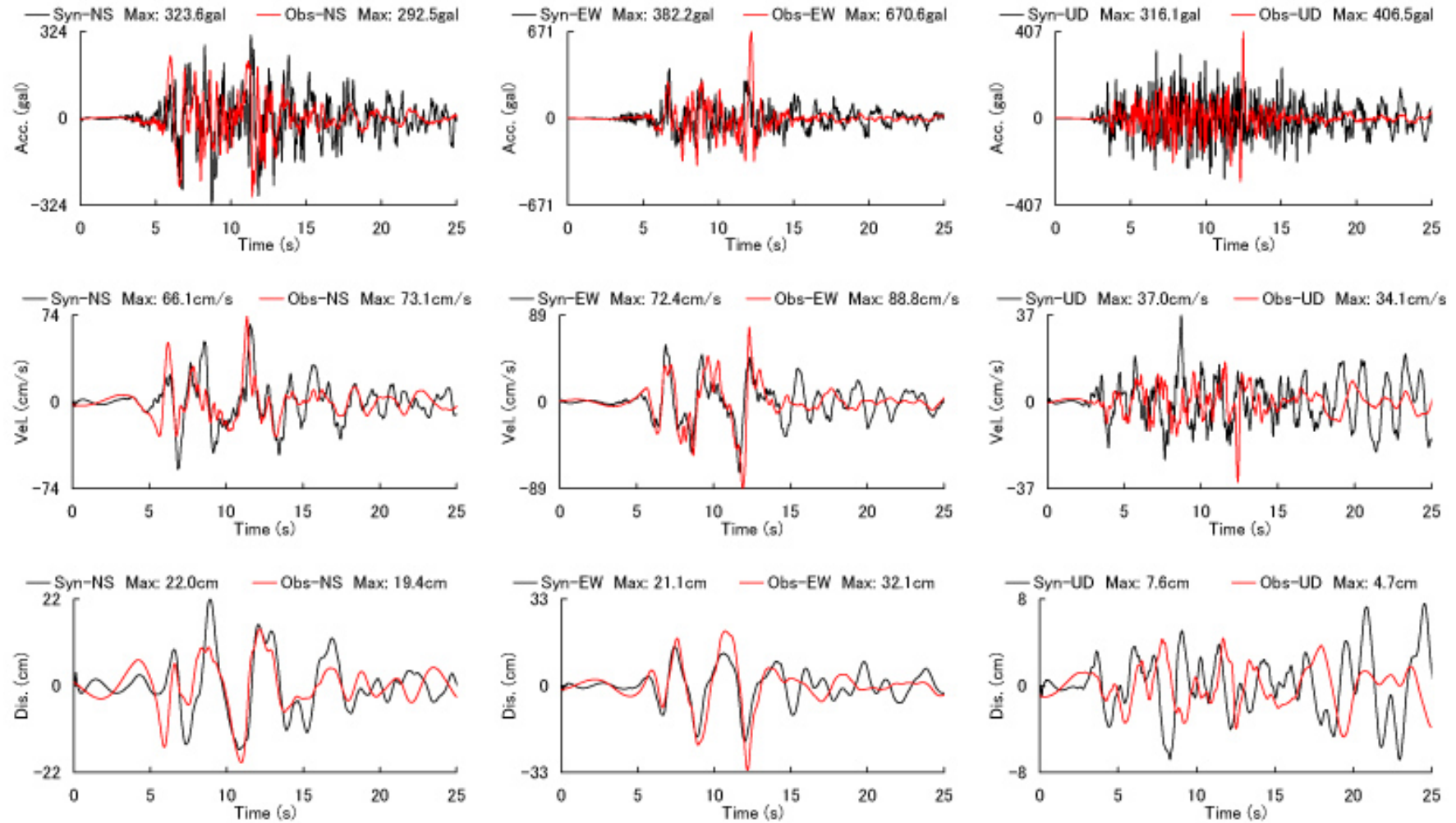


## CB5



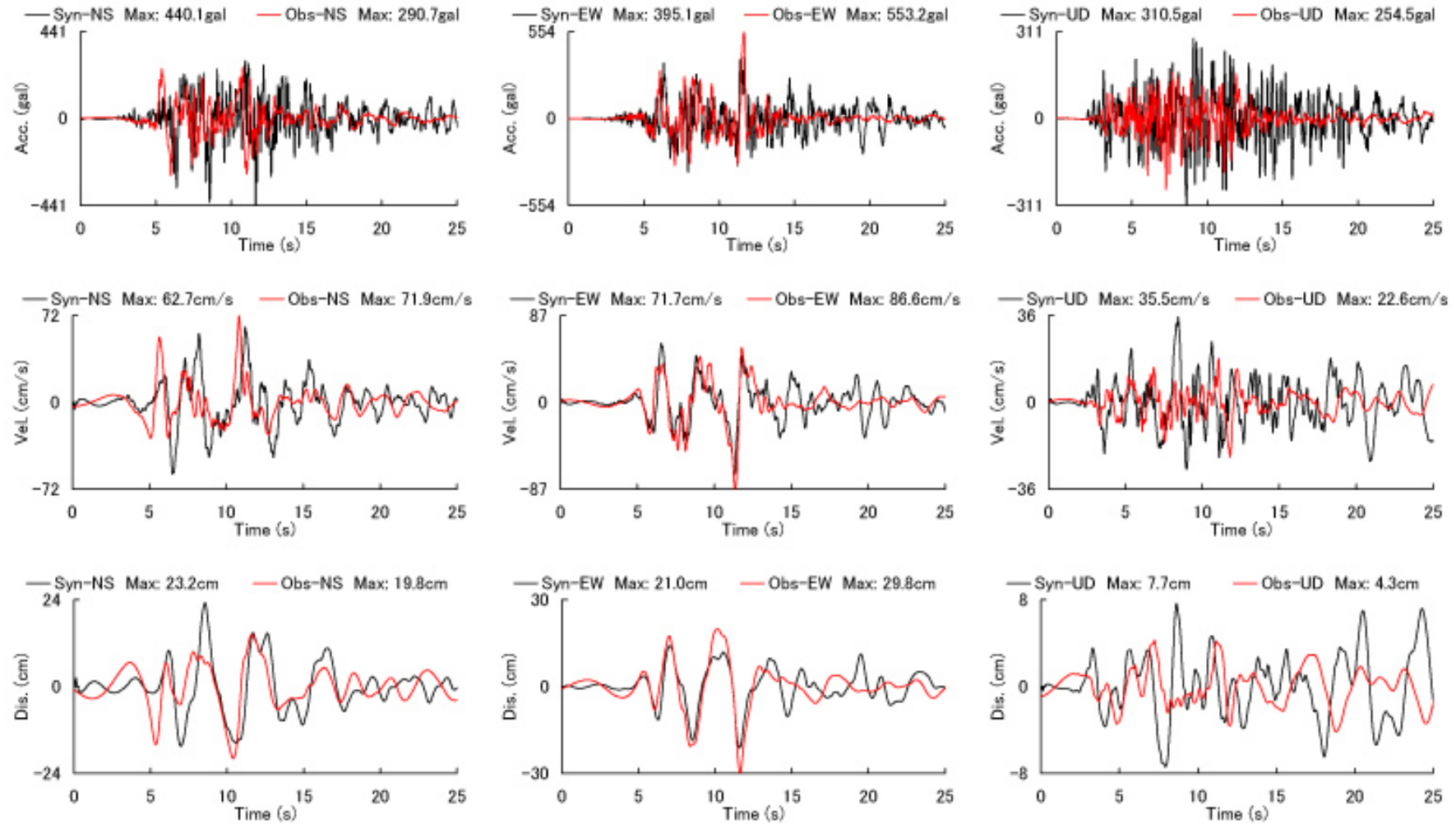
観測波形と合成波形の比較 (JMA: CB5)

# KKZ1R2



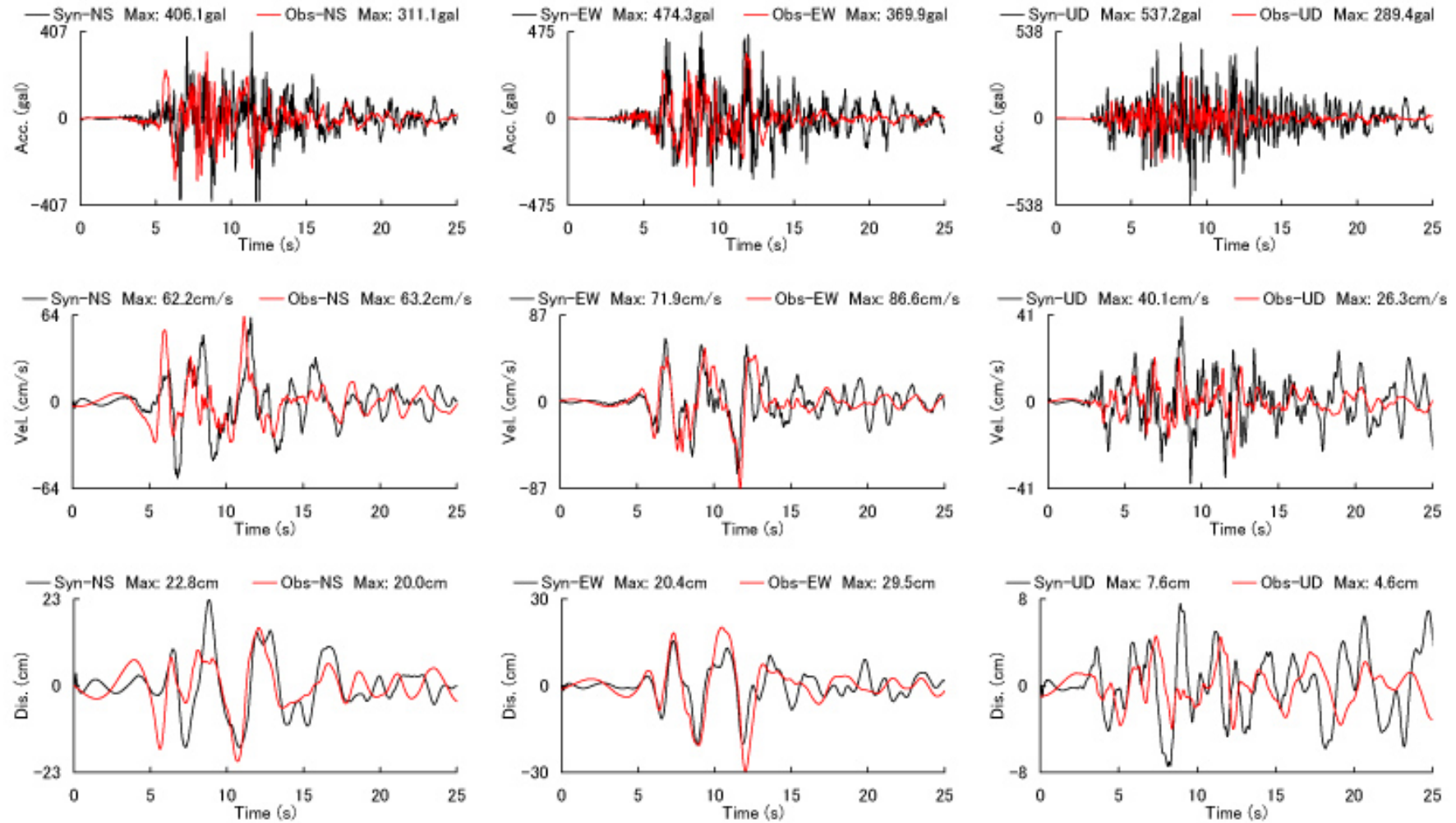
観測波形と合成波形の比較(KK原子力発電所: 1号機ベースマット)

## KKZ2R2



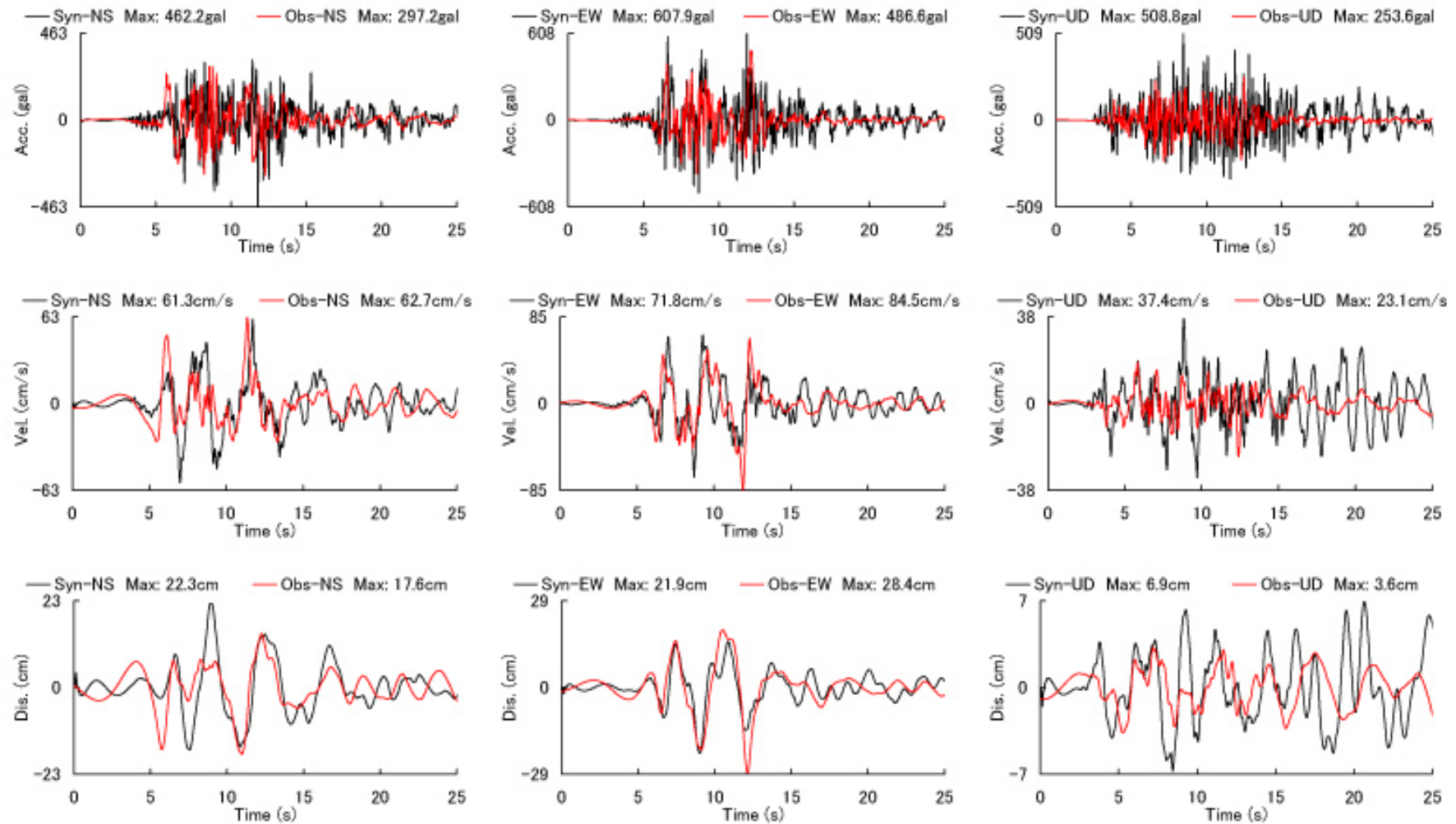
観測波形と合成波形の比較(KK原子力発電所: 2号機ベースマット)

## KKZ3R2



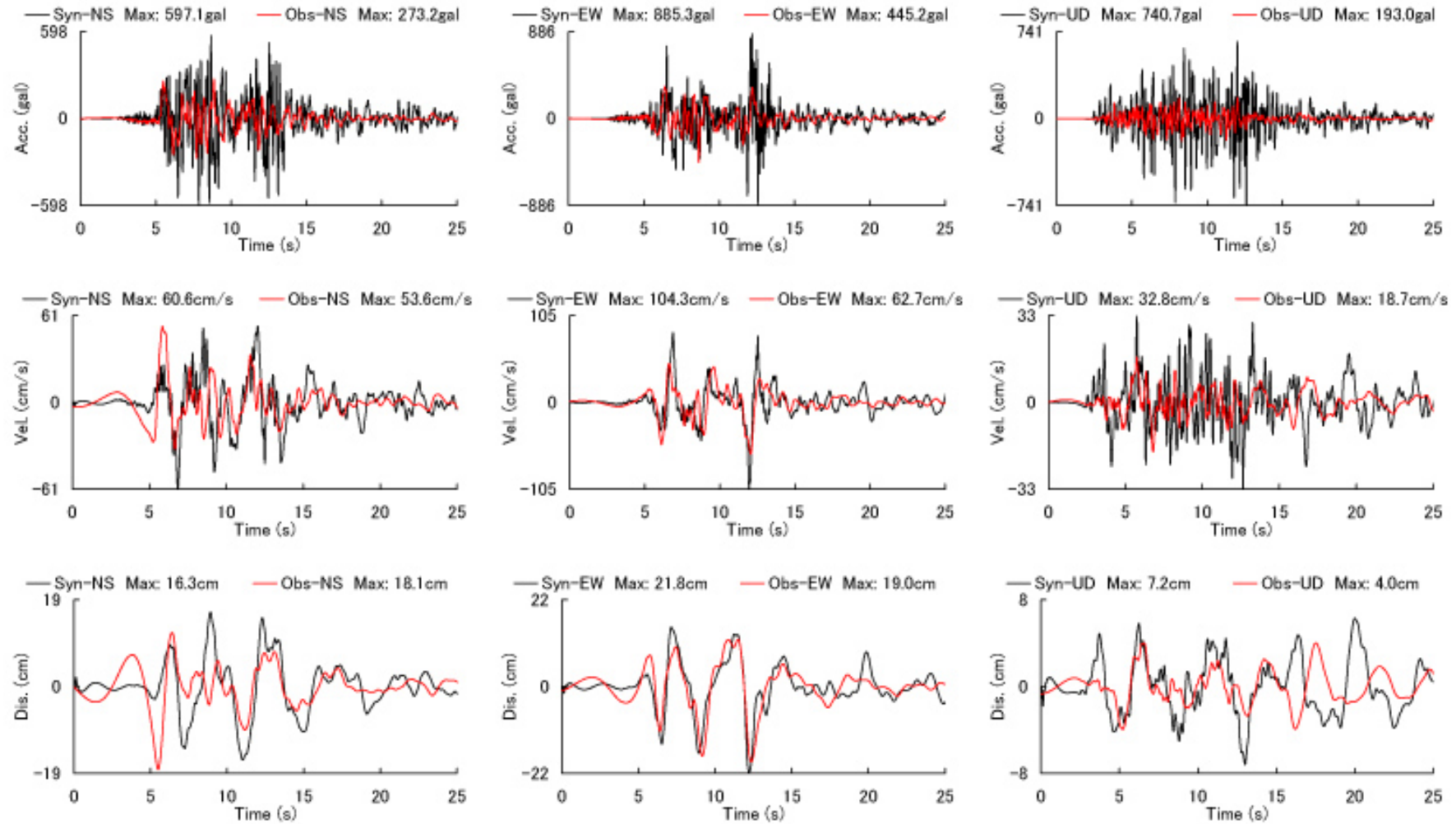
観測波形と合成波形の比較(KK原子力発電所: 3号機ベースマット)

## KKZ4R2



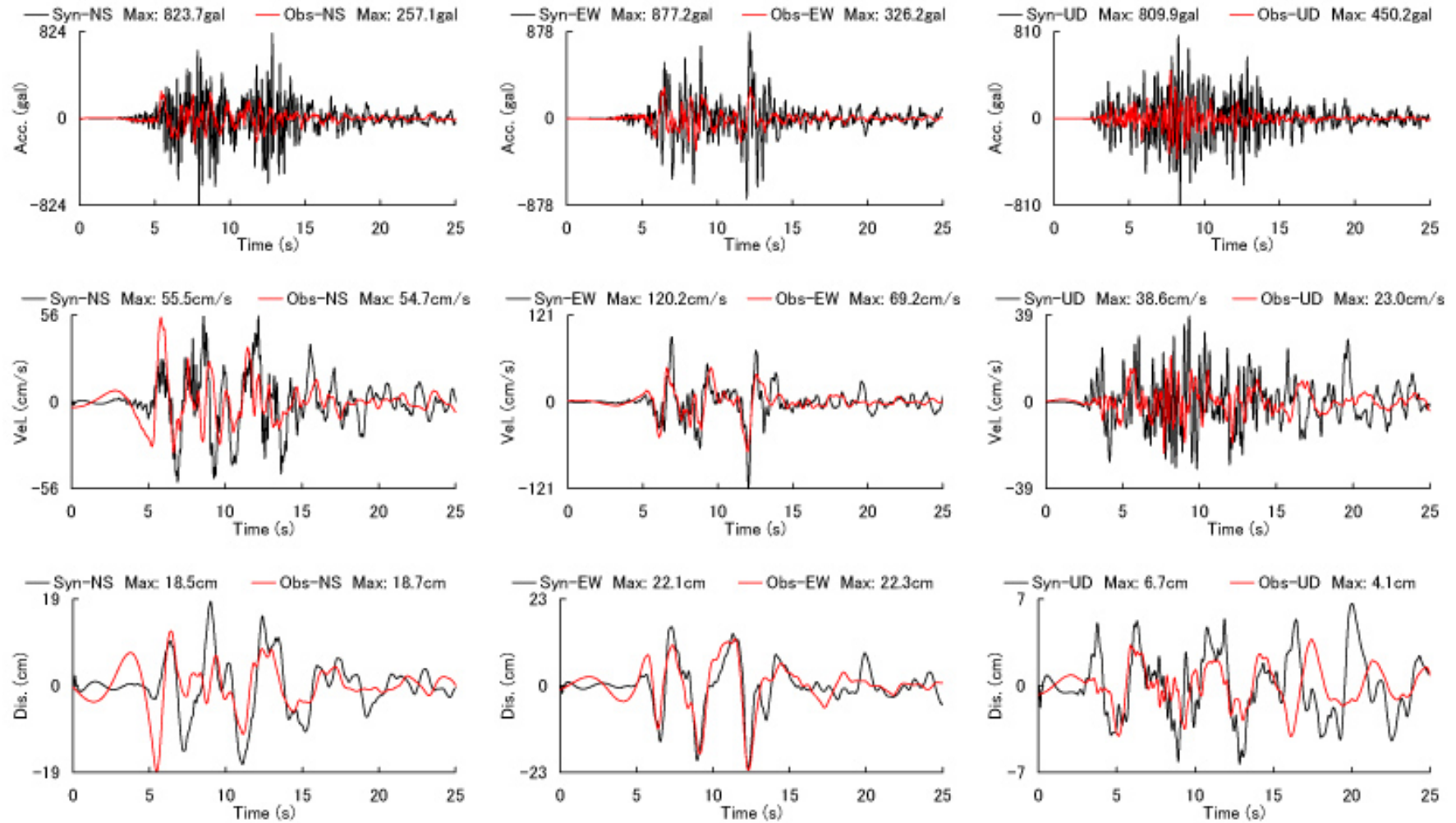
観測波形と合成波形の比較(KK原子力発電所: 4号機ベースマット)

# KKZ5R2



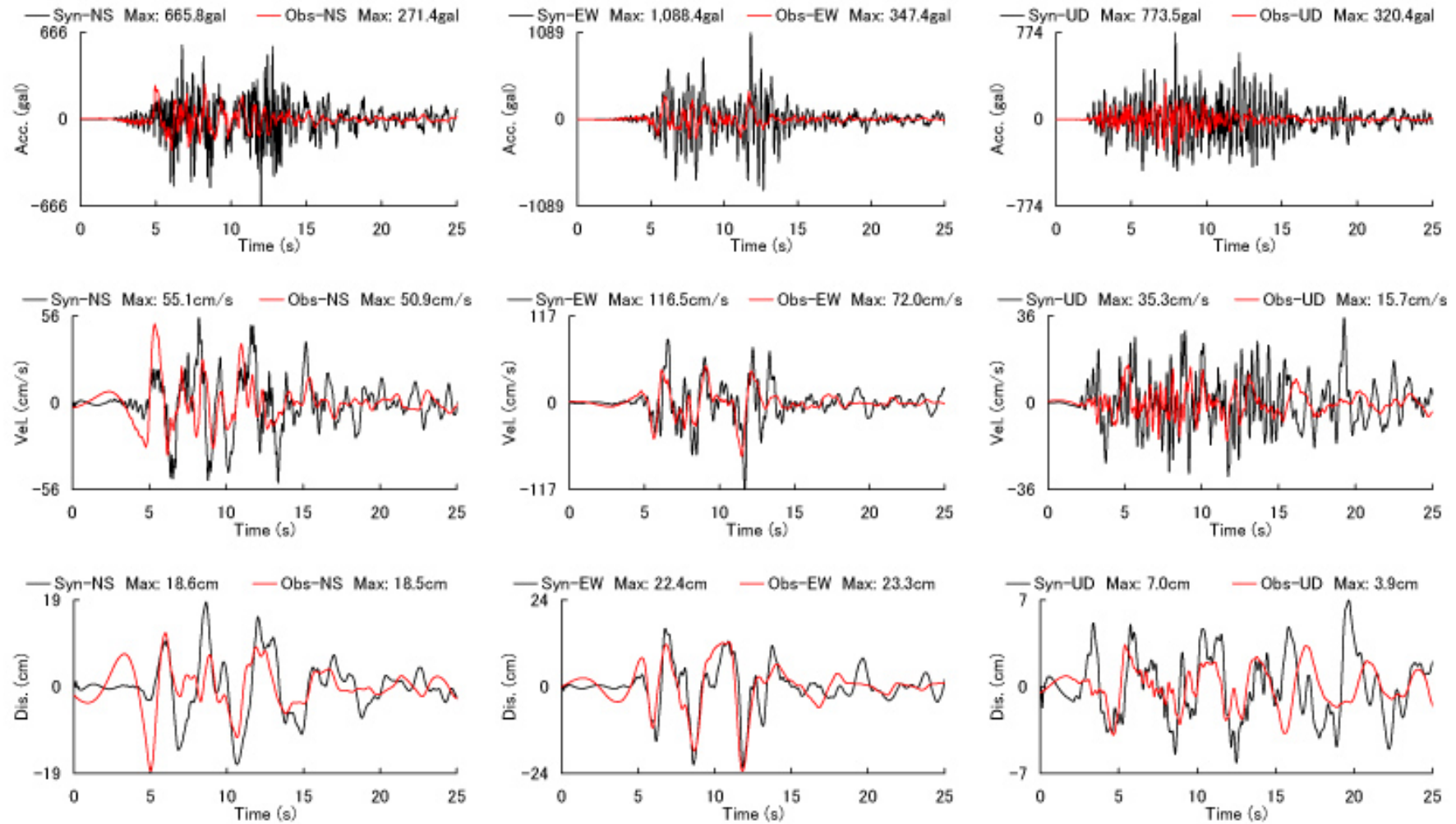
観測波形と合成波形の比較(KK原子力発電所: 5号機ベースマット)

## KKZ6R2



観測波形と合成波形の比較(KK原子力発電所: 6号機ベースマット)

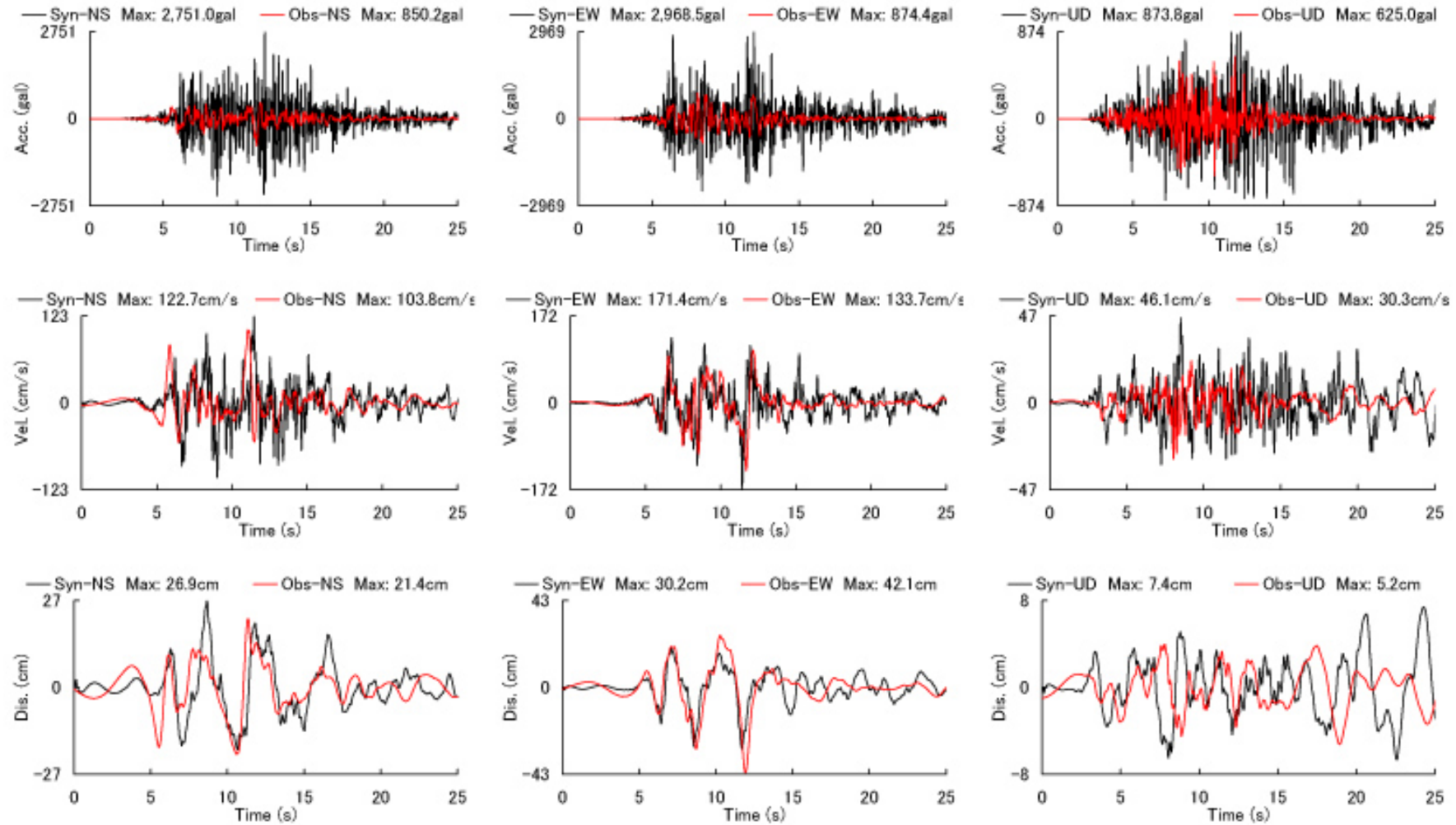
## KKZ7R2



観測波形と合成波形の比較 (KK原子力発電所: 7号機ベースマット)

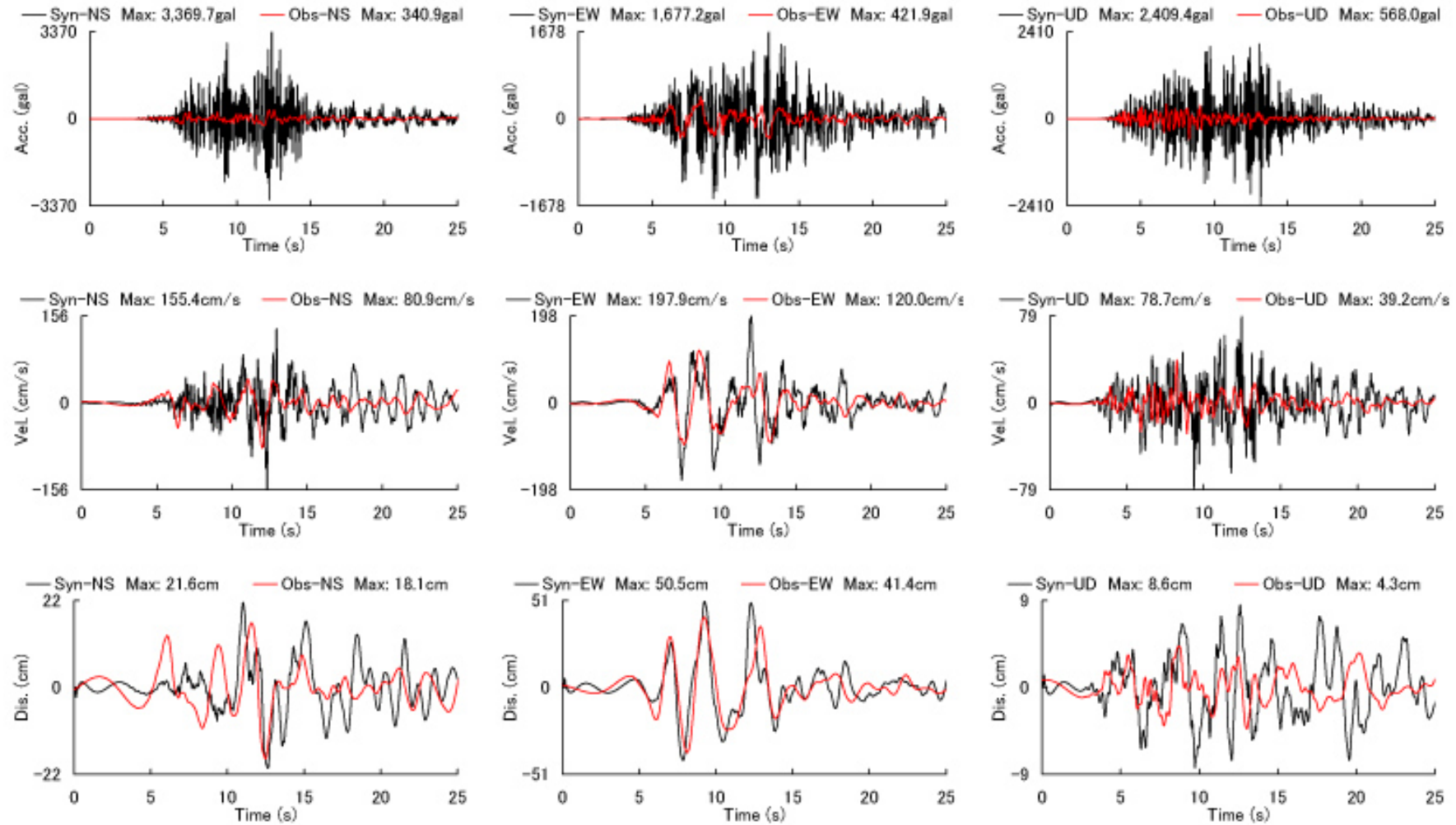


# KKZIG1



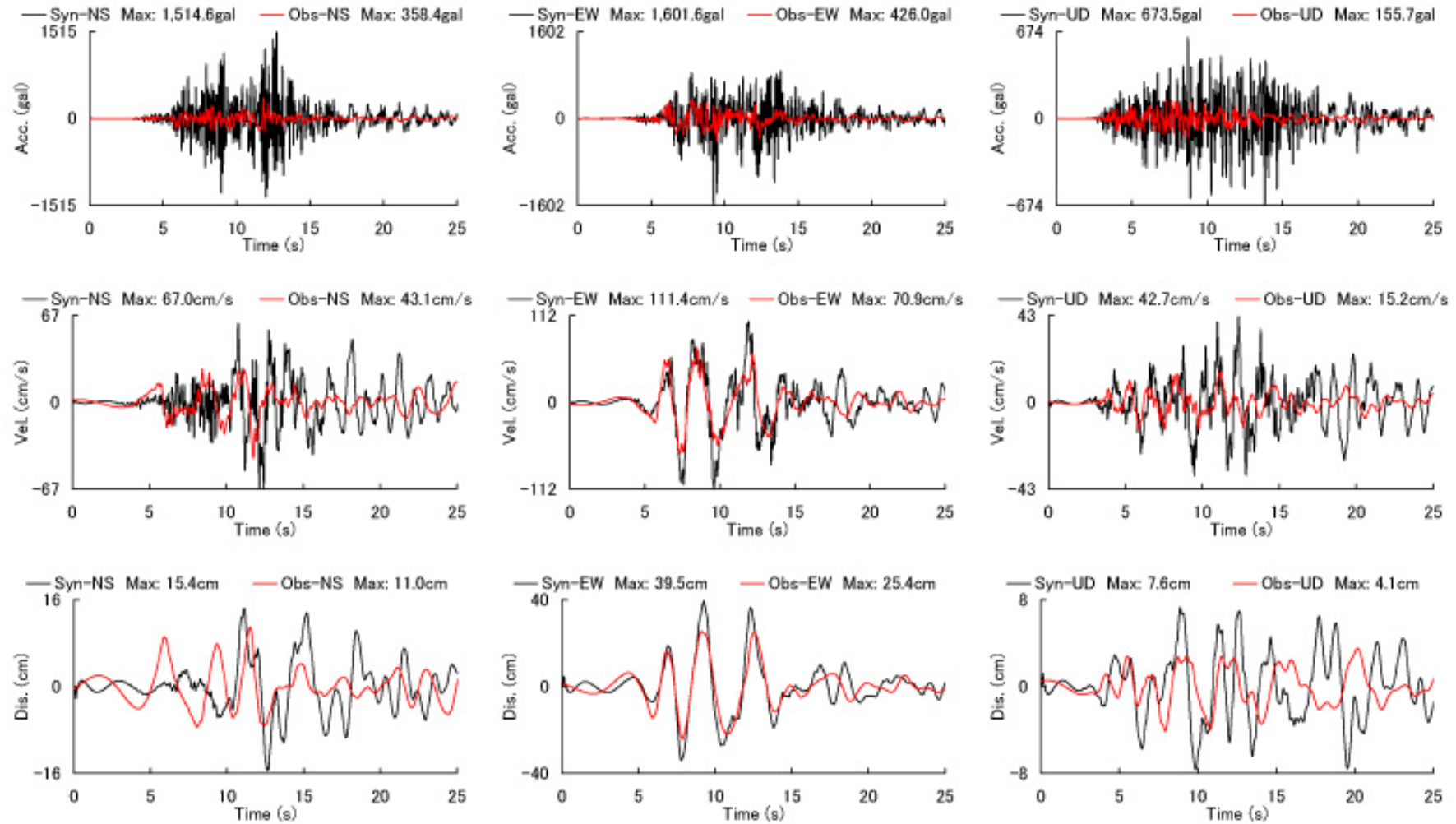
観測波形と合成波形の比較(KK原子力発電所 1号機観測小屋:地表面)

# KSHSG1



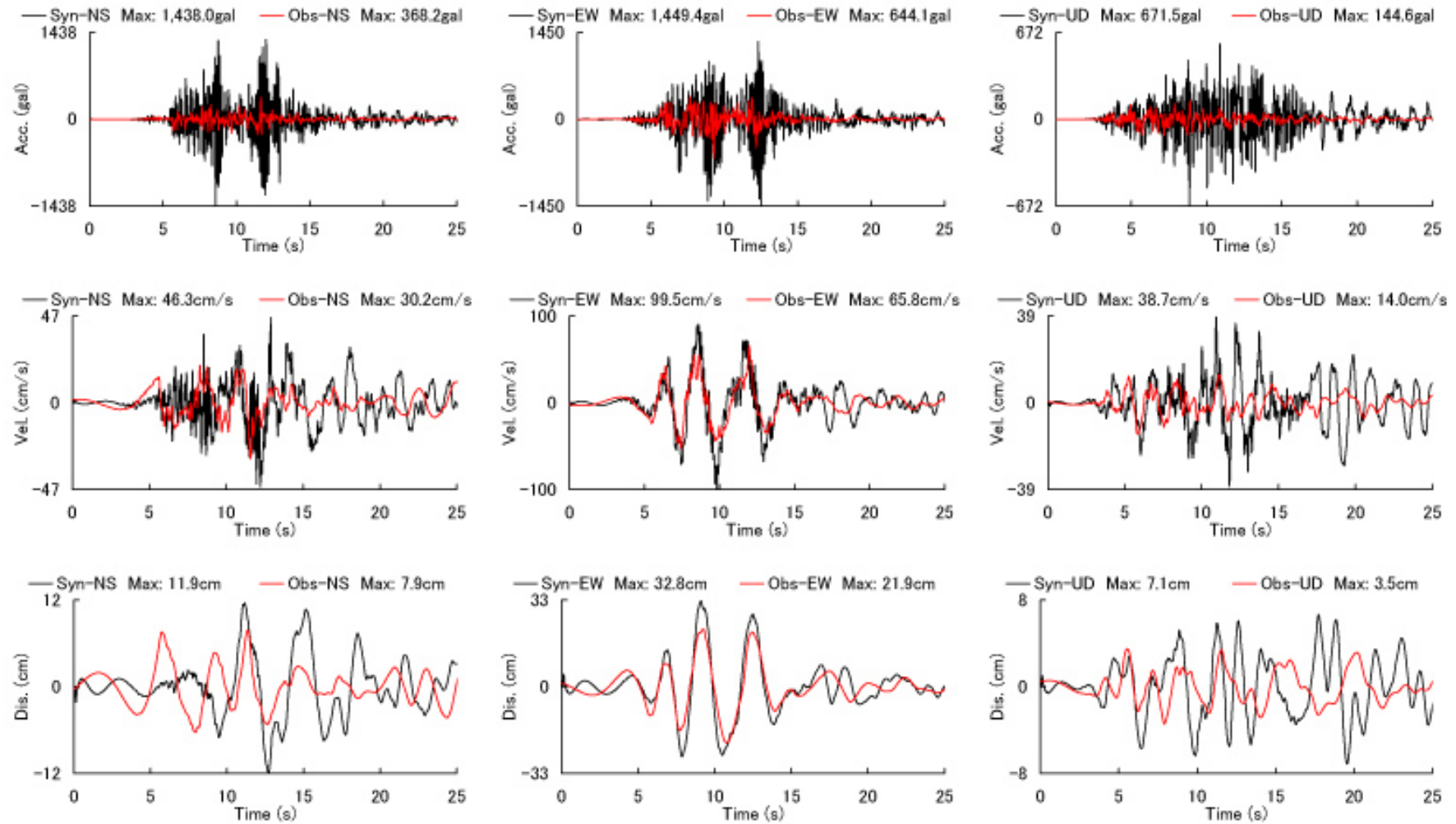
観測波形と合成波形の比較 (KK原子力発電所 サービスホールSG1)

## KSHSG2



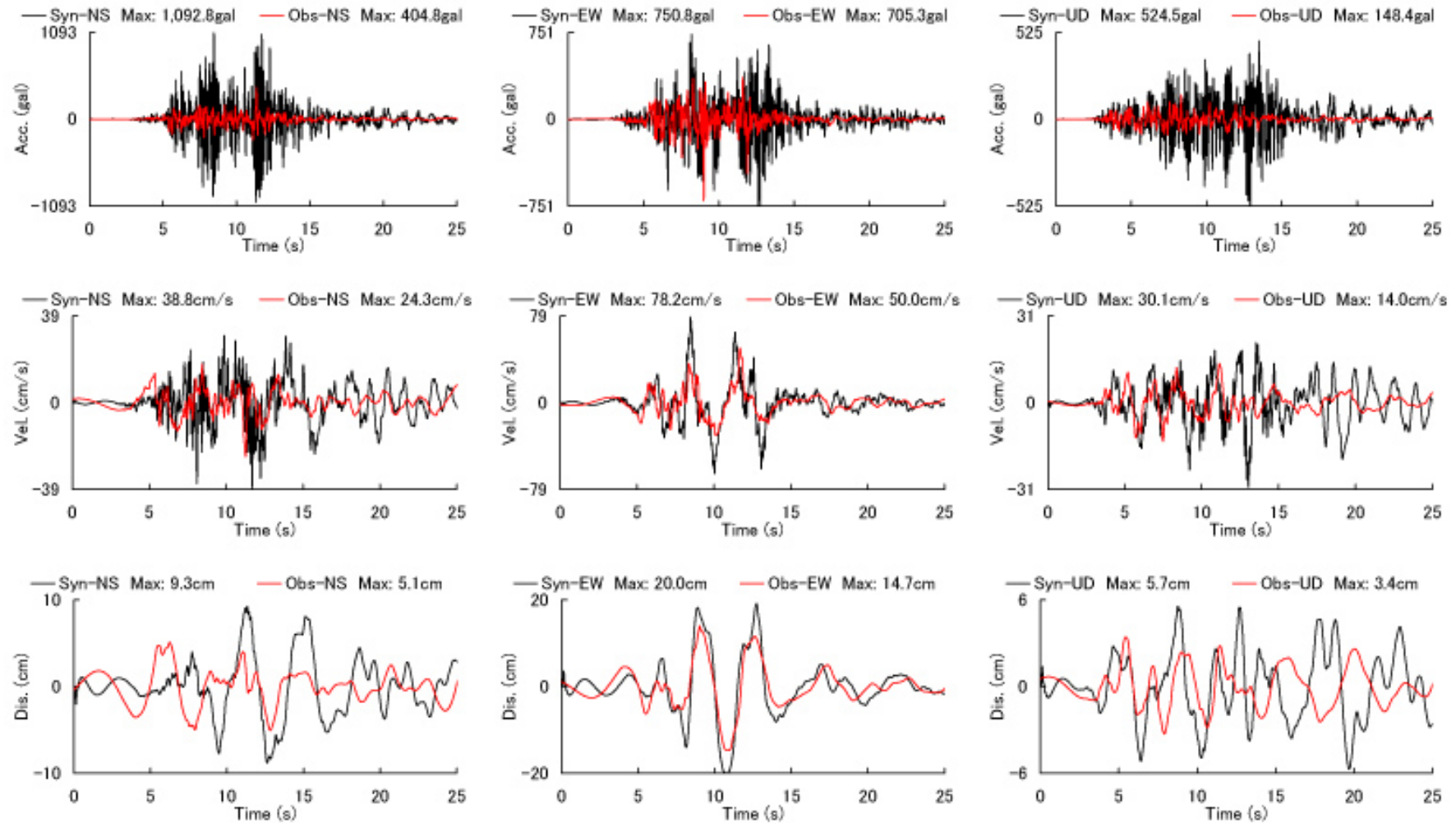
観測波形と合成波形の比較 (KK原子力発電所: サービスホールSG2)

### KSHSG3



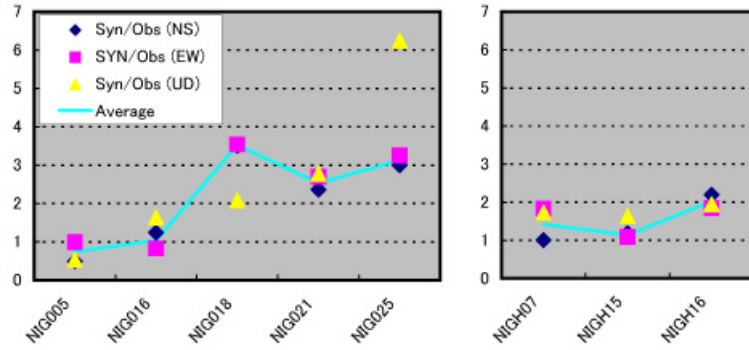
観測波形と合成波形の比較 (KK原子力発電所: サービスホールSG3)

## KSHSG4

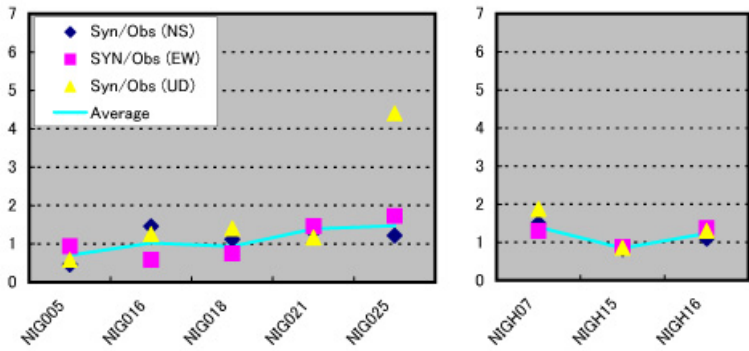


観測波形と合成波形の比較 (KK原子力発電所: サービスホールSG4)

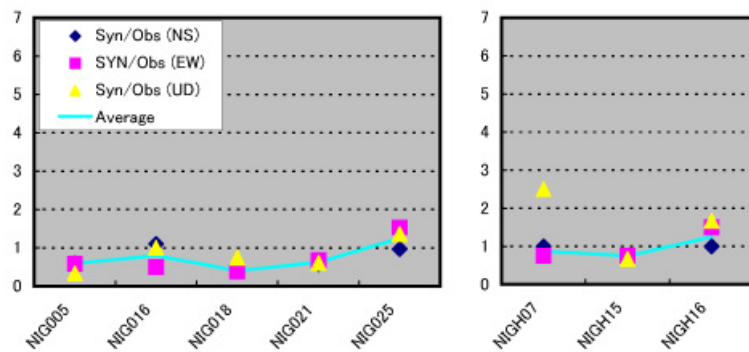
### 加速度



### 速度

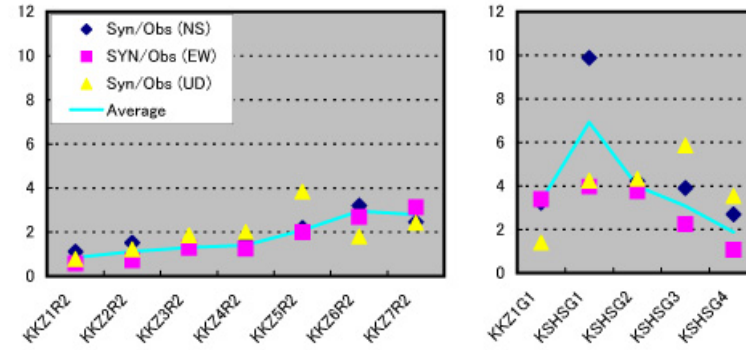


### 変位

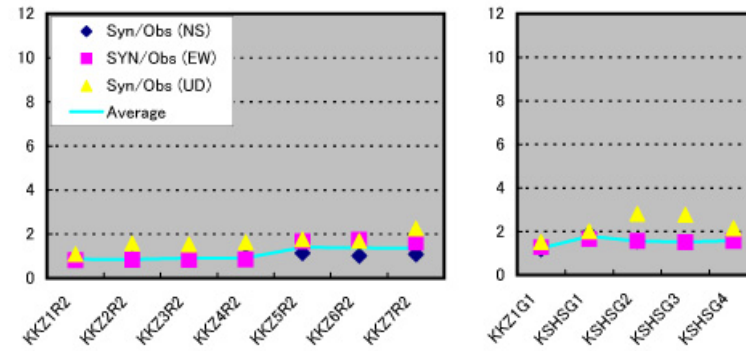


K-NET KiK-net

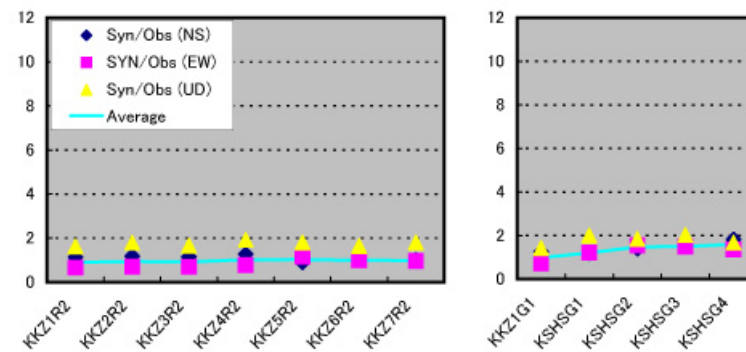
### 加速度



### 速度

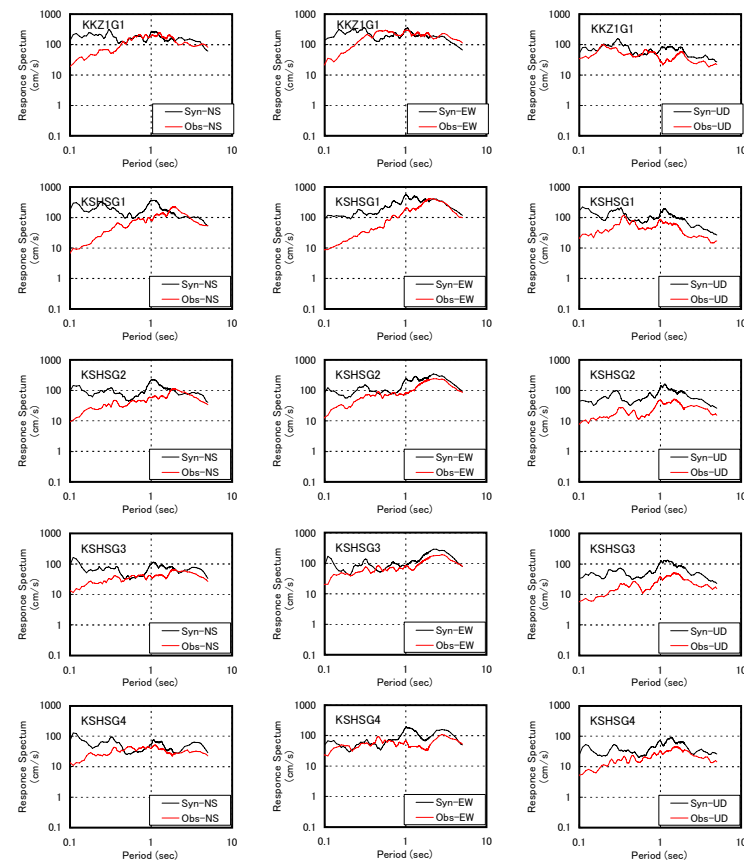
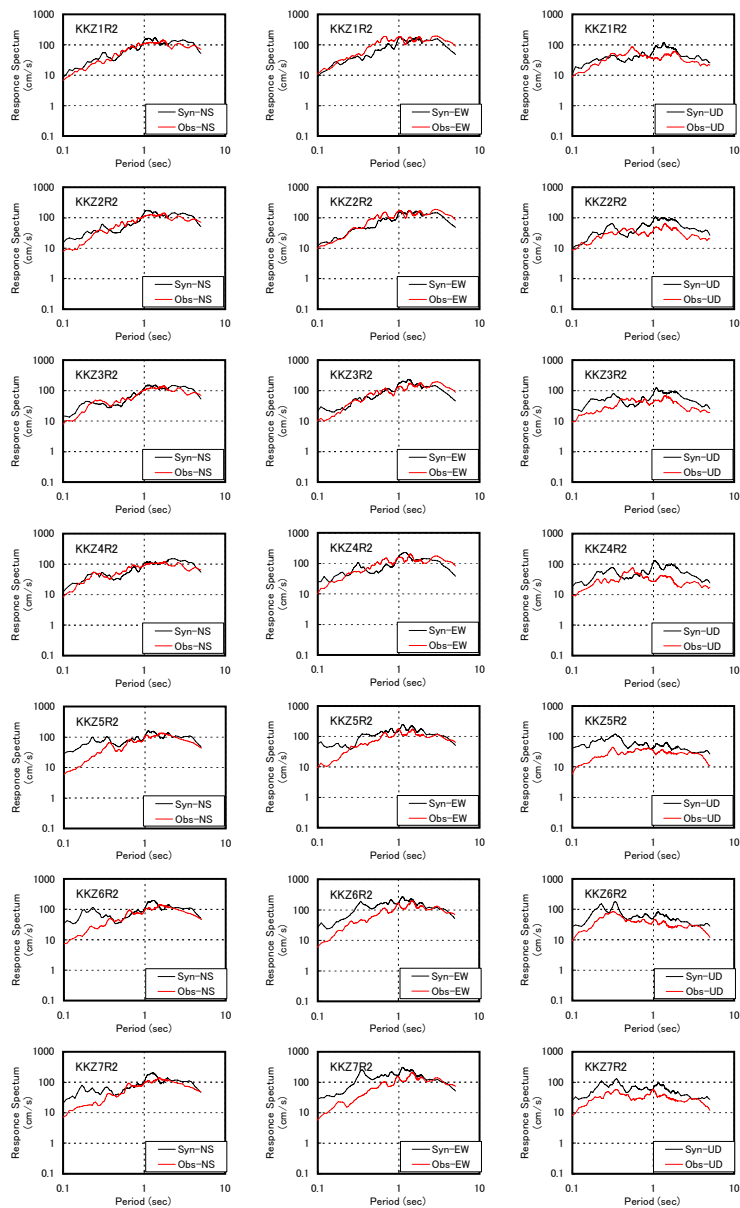


### 変位



KK原子力発電所

観測波形と合成波形の最大振幅の比(合成/観測)



1号機地震観測小屋

サービスホール(地表、地中3カ所)

1号機～7号機のベースマット上

擬似速度応答スペクトルでの比較

# 3次元地下構造モデルを用いた理論的シミュレーション (1次元理論シミュレーションとの比較など)

震源モデル: EGFによるフォワードモデリングによって評価したモデル

3次元地下構造 : JNES(2004)による。

## 3次元差分法の解析条件

計算領域: 44.4km × 60km × 19km

グリッド数: 444 × 600 × 200

グリッド間隔: 水平方向0.1km

鉛直方向0.05~0.2km

時間ステップ間隔: 0.005s

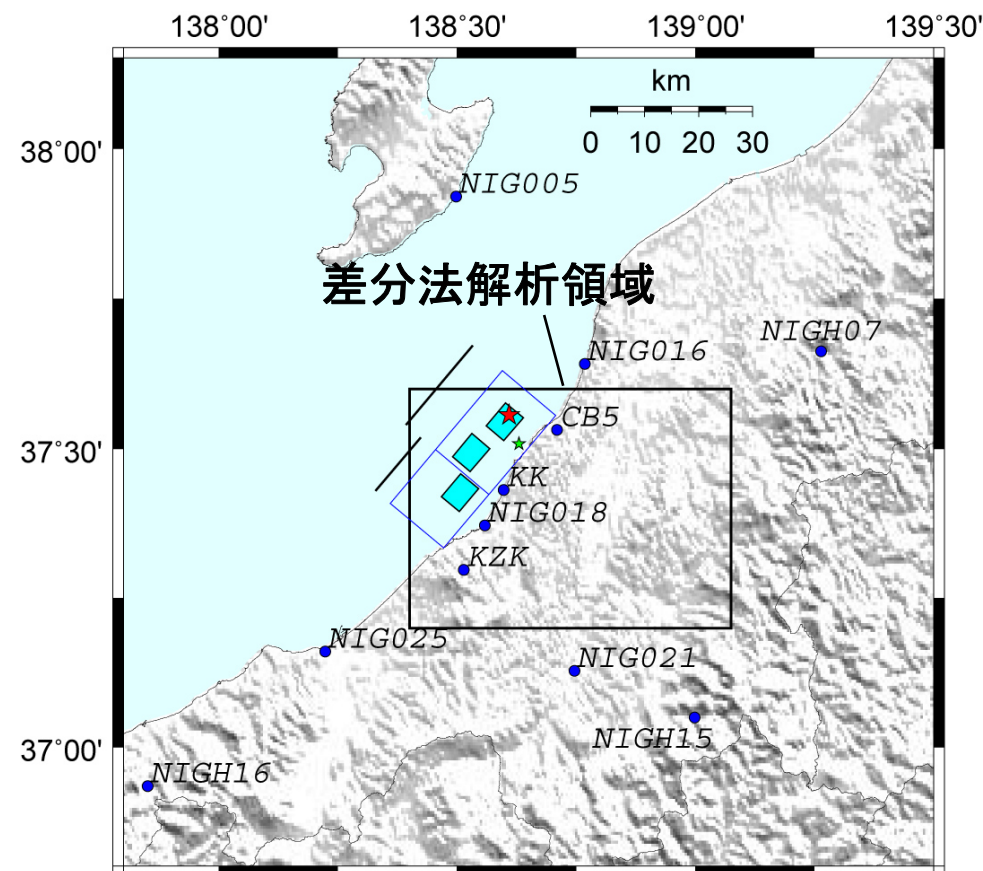
有効周波数: 1.6Hz以下

## アスペリティの震源パラメータ

	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	S (km <sup>2</sup> )	Mo (Nm)	Δσ (MPa)
Asp 1	40	40	90	5.6 × 5.6	1.33 × 10 <sup>18</sup>	18.4
Asp 2	40	40	90	5.6 × 5.6	2.00 × 10 <sup>18</sup>	27.6
Asp 3	40	40	90	5.6 × 5.6	1.67 × 10 <sup>18</sup>	23.0

破壊伝播速度: 2.7km/s

注) Asp-3の応力降下量はEGFの結果から見てやや大きすぎる。理論計算ではEGFで評価した値を5/6倍した値を用いた。





# 地下構造モデルの設定

3次元差分法の計算にはJNES(2004)を参照して作成した3次元地下構造モデルを用いて解析を行った。

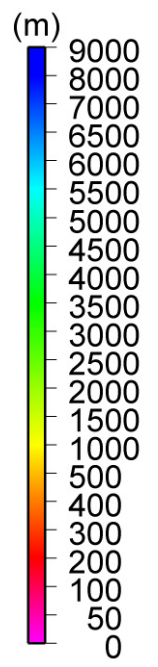
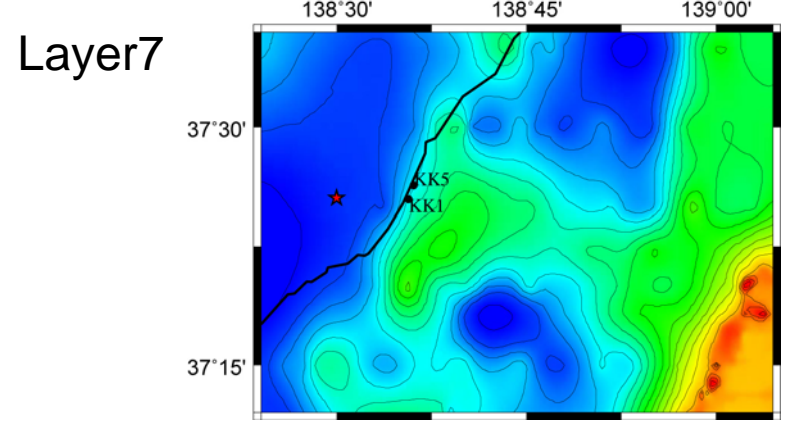
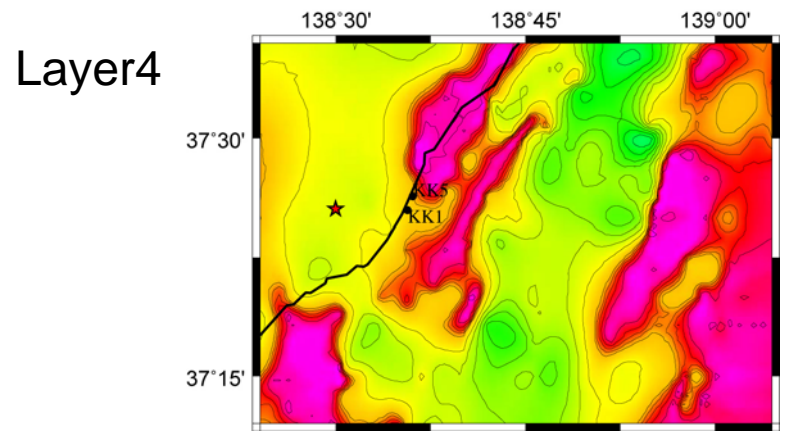
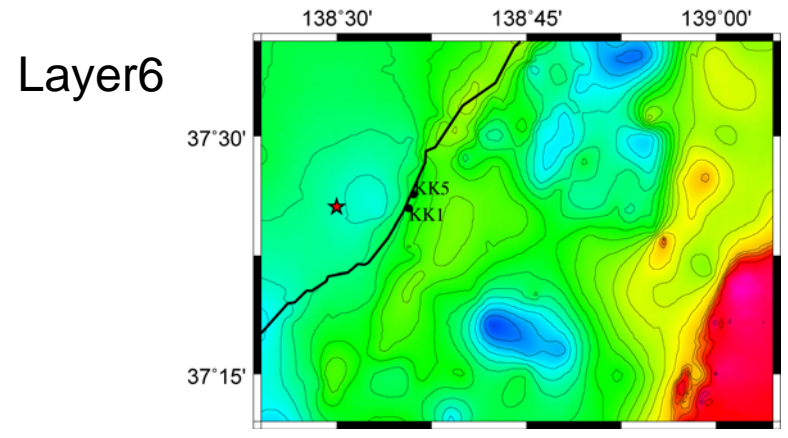
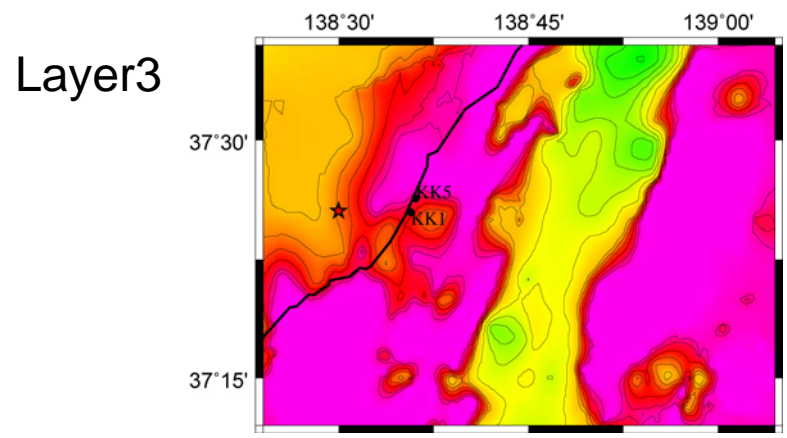
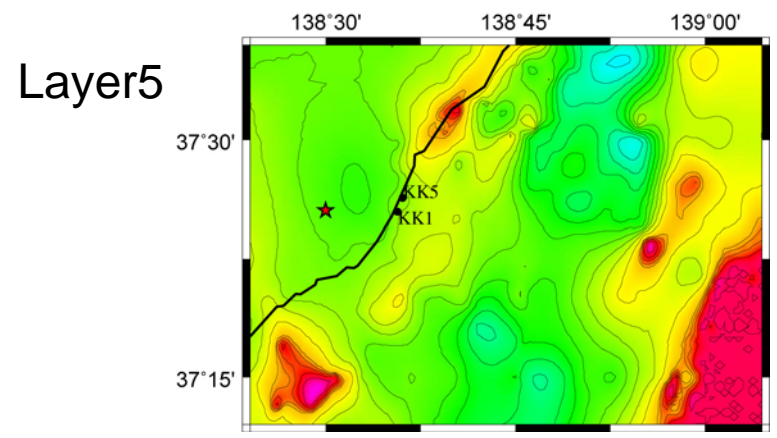
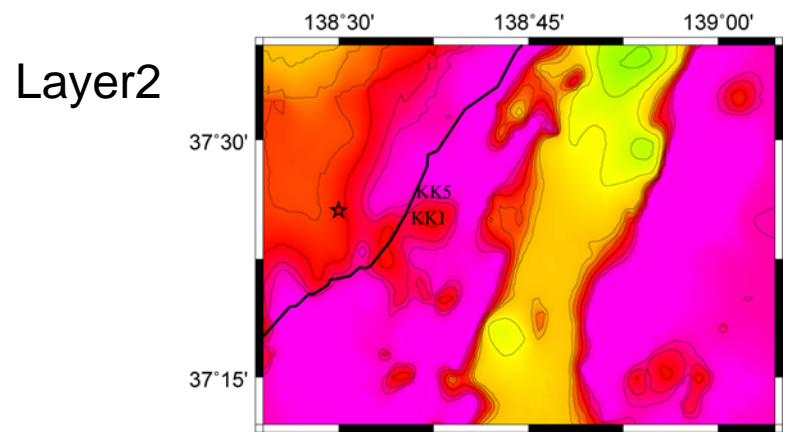
1次元の計算は、3次元地下構造モデルの1号機(KK1)直下の地下構造を水平成層構造と仮定して計算を行った。

### 地下構造モデルのパラメータ

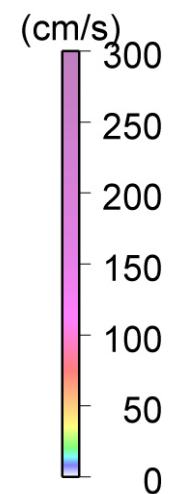
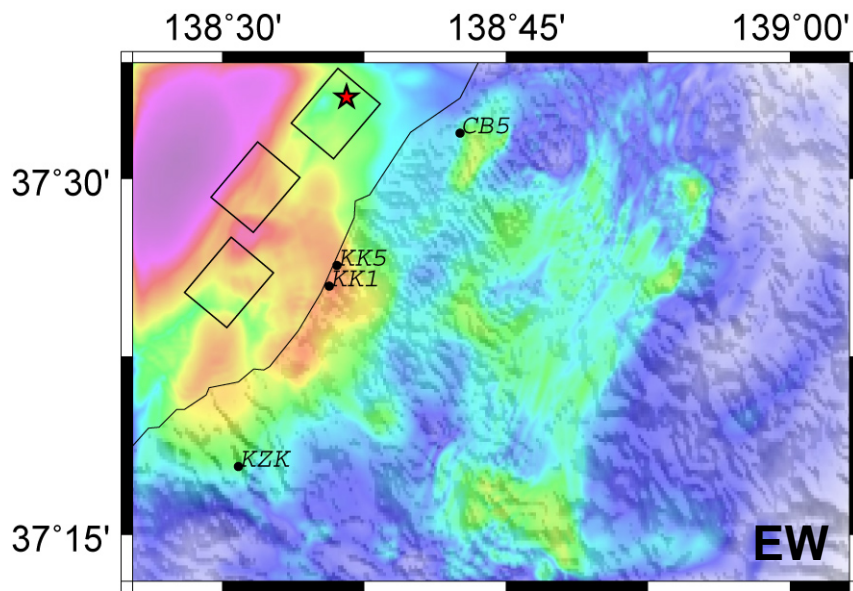
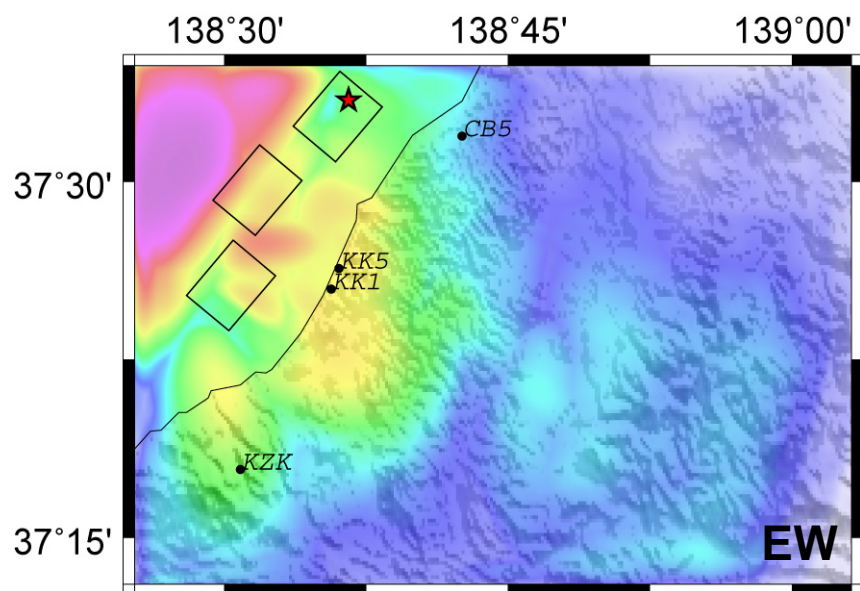
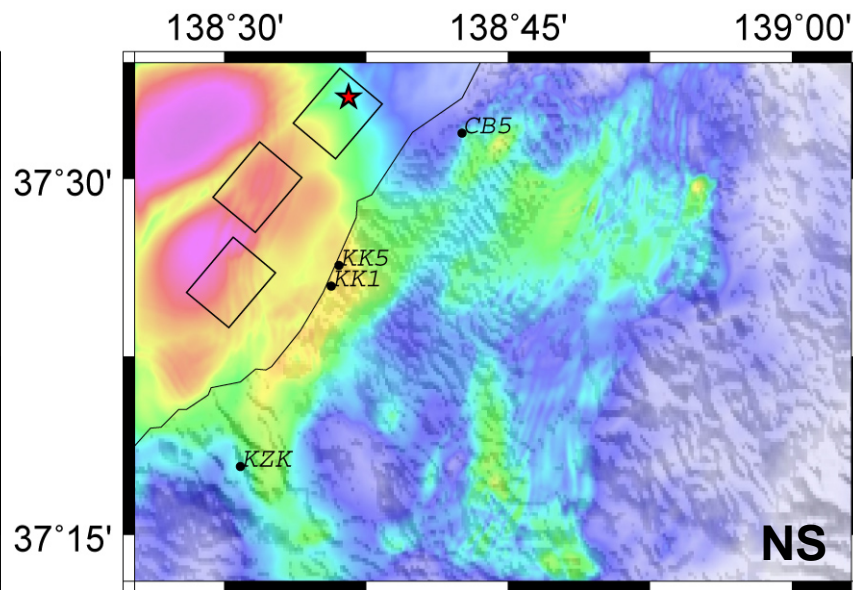
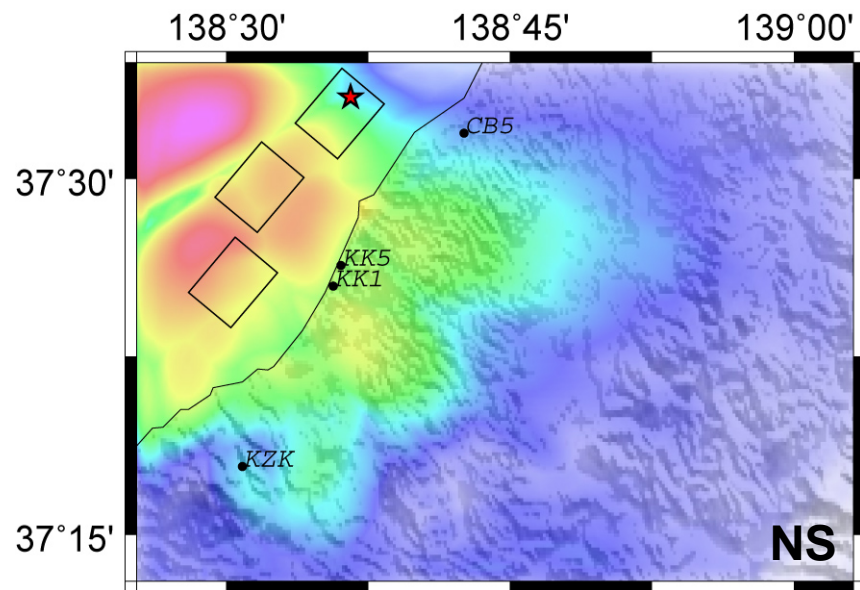
層名	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	S波速度 (km/s)	P波速度 (km/s)
Layer 1	2.05	0.80	2.20
Layer 2	2.20	1.30	2.90
Layer 3	2.25	1.40	3.10
Layer 4	2.35	1.70	3.70
Layer 5	2.40	2.00	4.10
Layer 6	2.50	2.40	4.70
Layer 7	2.65	3.00	5.50
Layer 8	2.70	3.50	5.80

### KK1地点直下の地下構造モデル

層名	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)
Layer 1	0	2.05	0.80	2.20
Layer 2	100	2.20	1.30	2.90
Layer 3	150	2.25	1.40	3.10
Layer 4	650	2.35	1.70	3.70
Layer 5	2150	2.40	2.00	4.10
Layer 6	3750	2.50	2.40	4.70
Layer 7	5500	2.65	3.00	5.50
Layer 8	5800	2.70	3.50	5.80



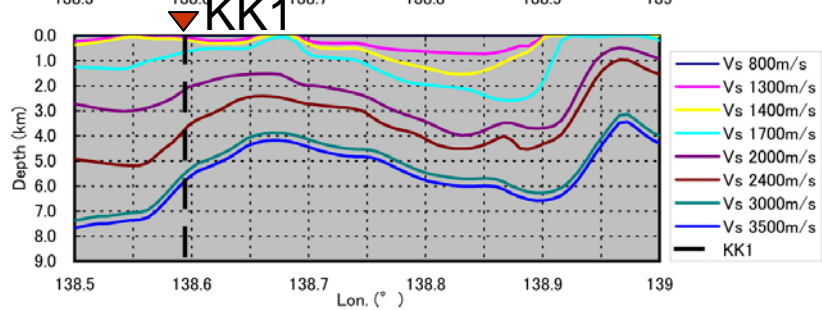
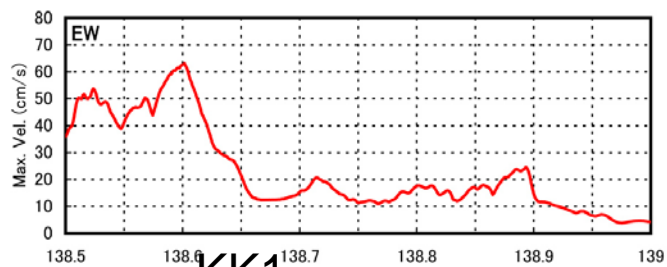
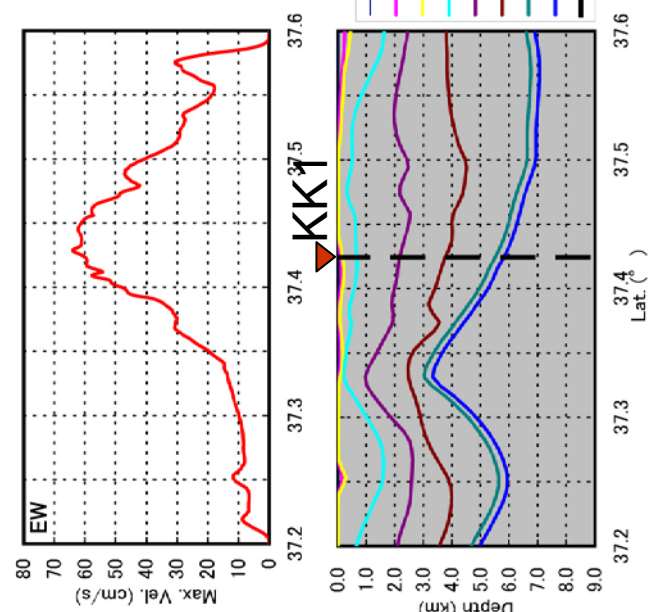
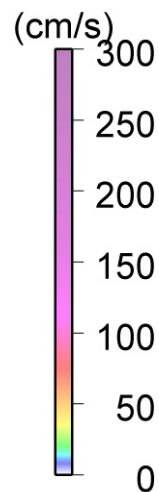
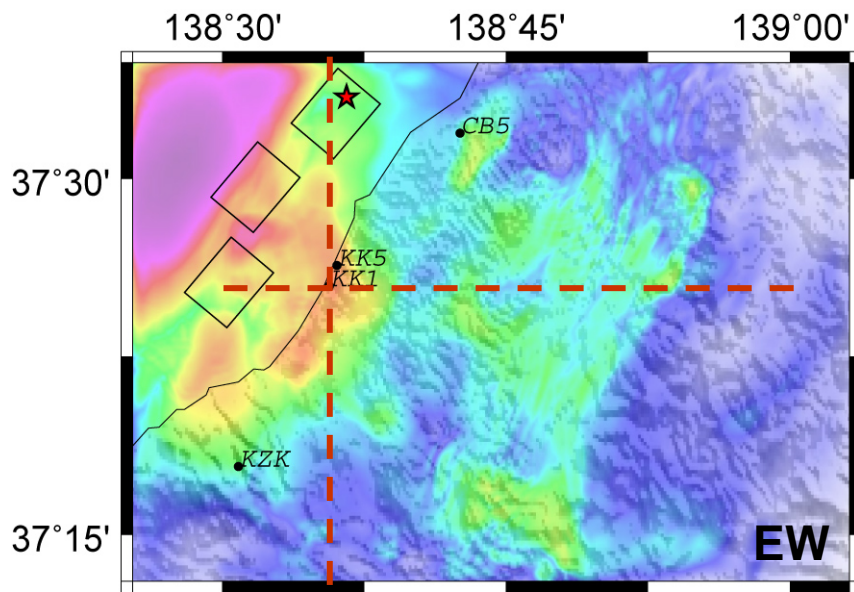
3次元地下構造モデルの各層上面深度 (JNES(2004)を参照)



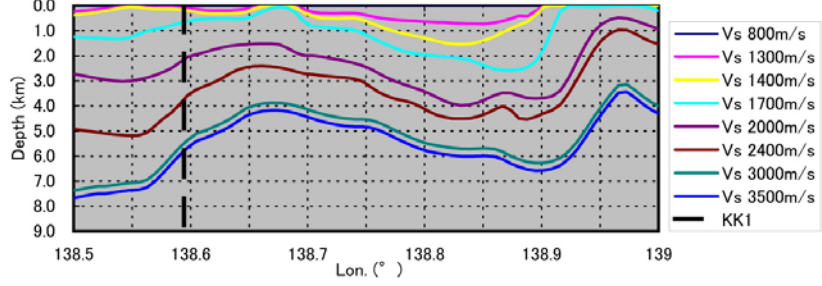
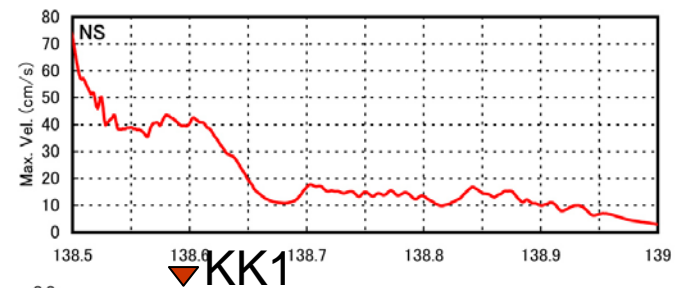
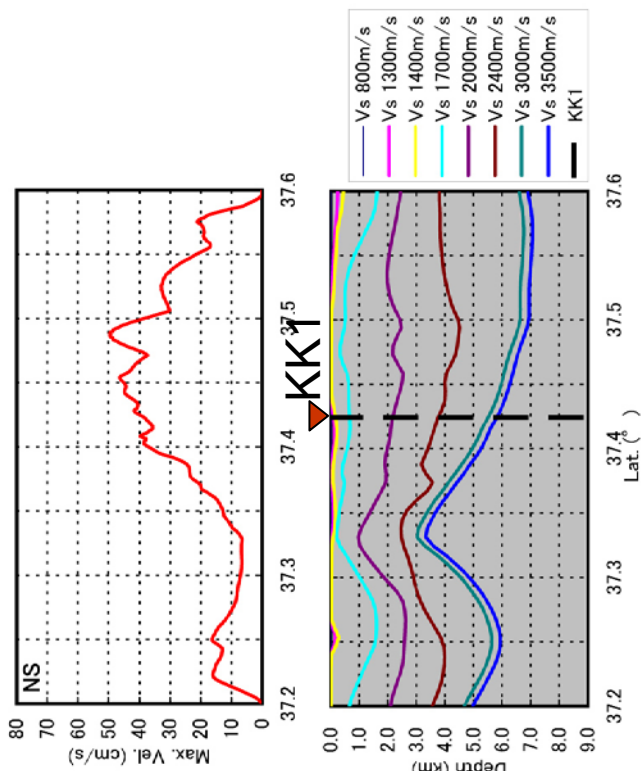
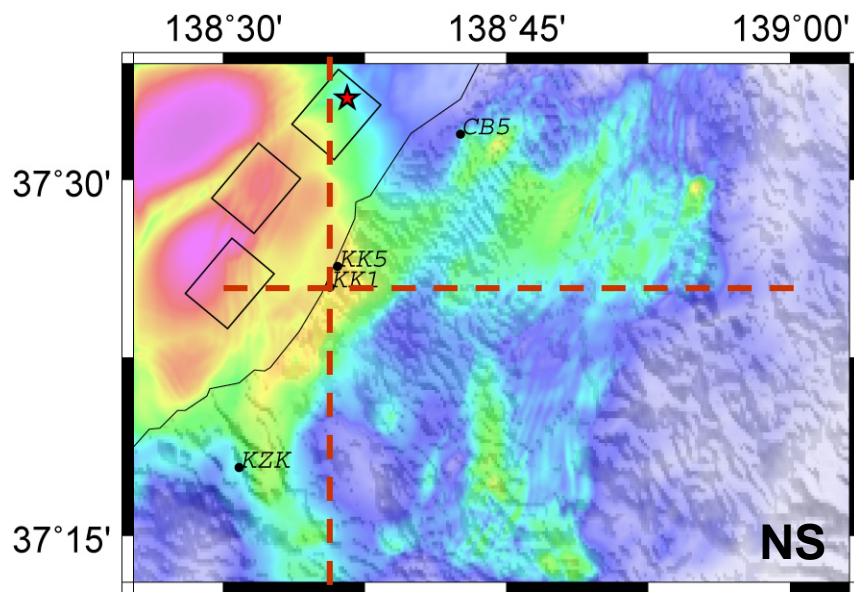
(a) 1次元水平成層構造モデル  
(KK1サイトの地下構造)

(b) 3次元構造モデル

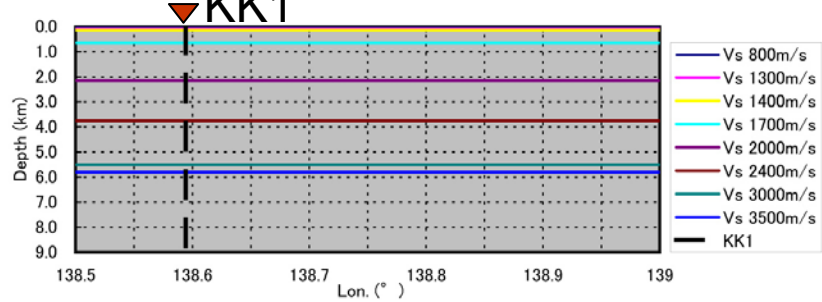
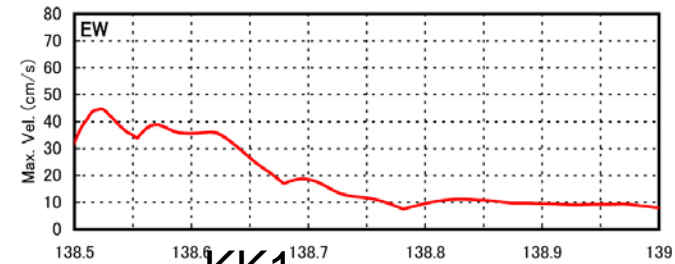
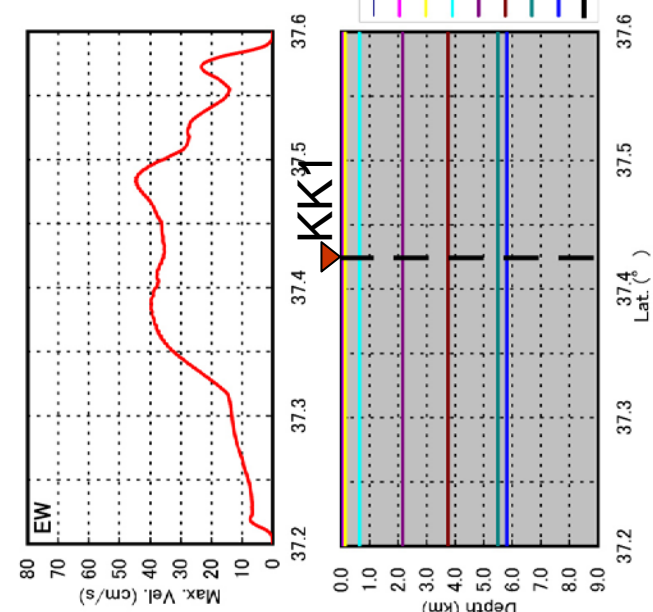
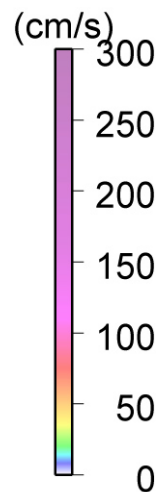
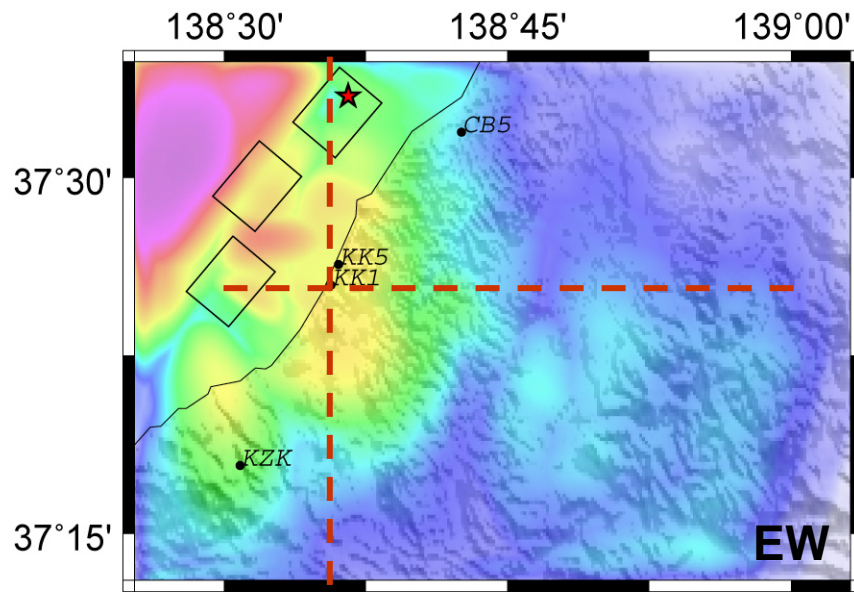
最大速度振幅分布 (Filter:0.05-1.6Hz)



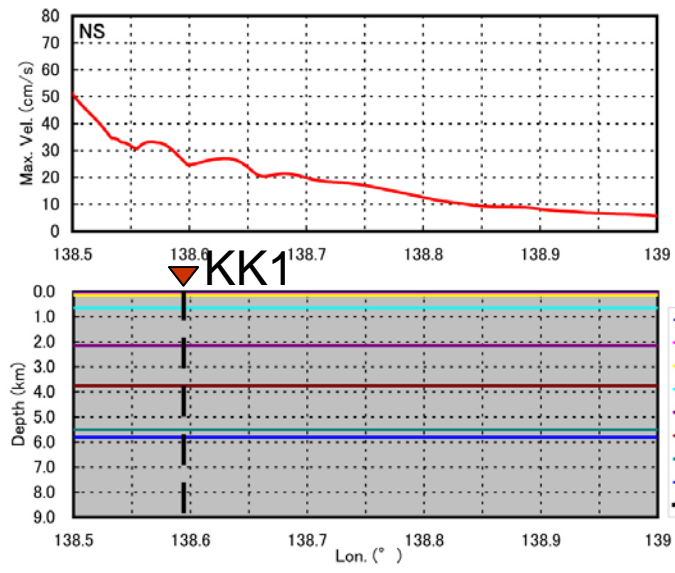
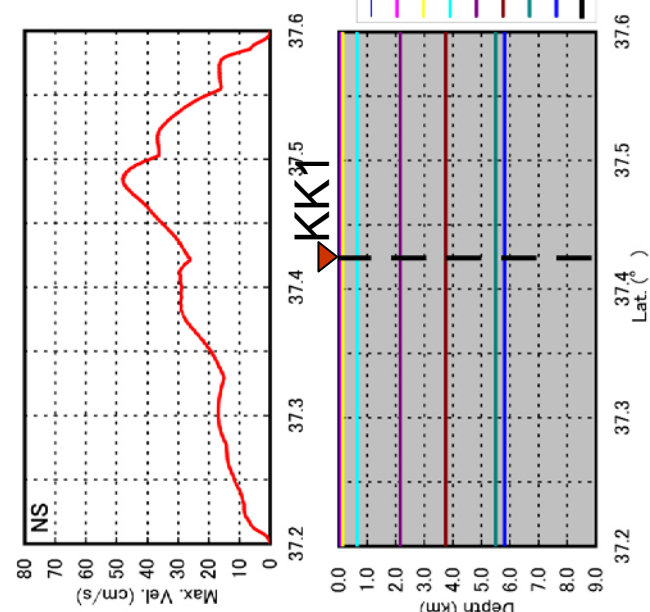
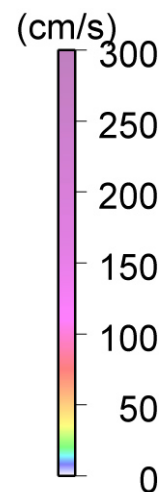
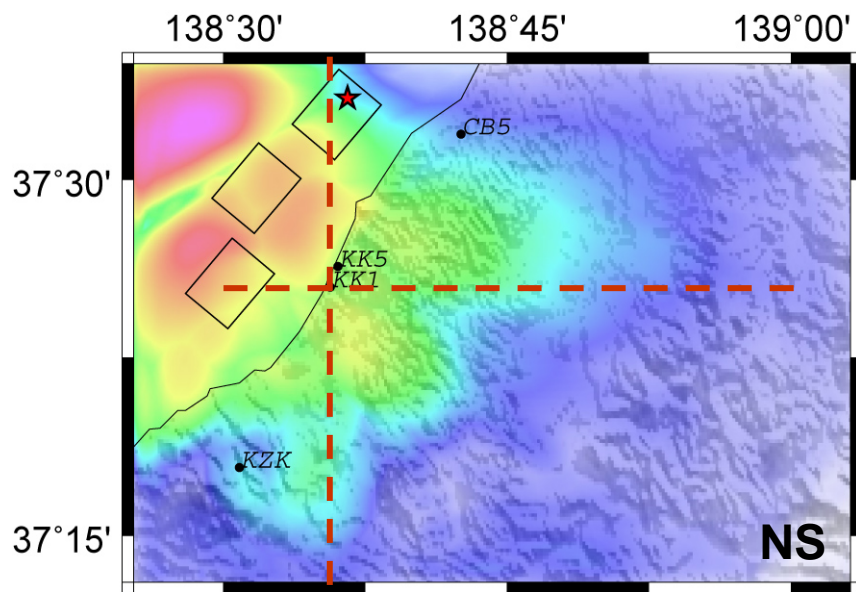
地下構造のKK1を通る断面と最大速度の比較(EW)



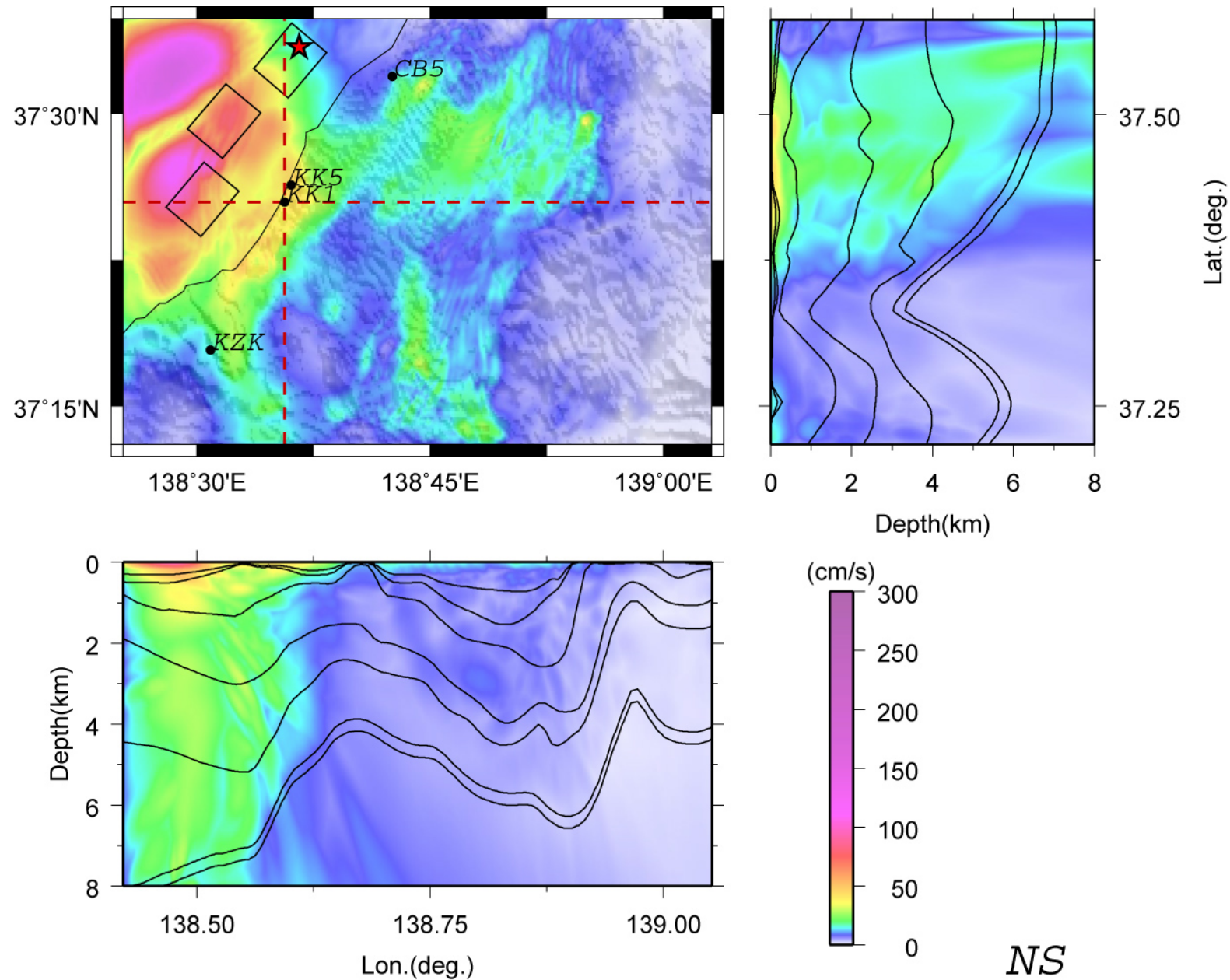
地下構造のKK1を通る断面と最大速度の比較(NS)



水平成層の地下構造モデルの断面と最大速度の比較(EW)

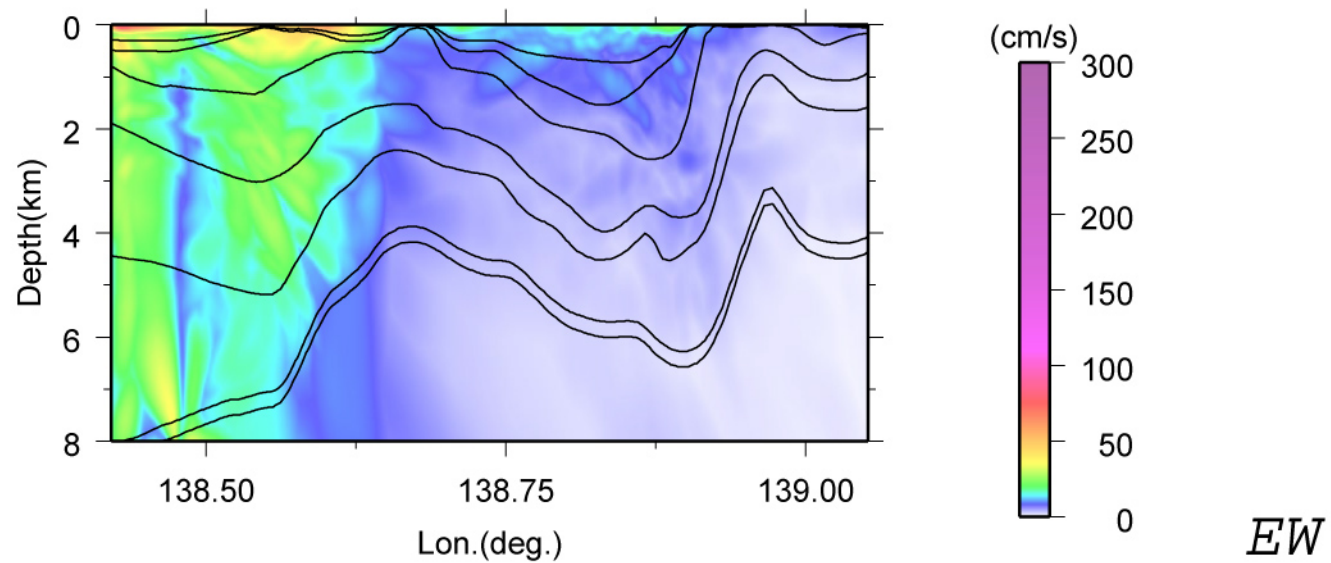
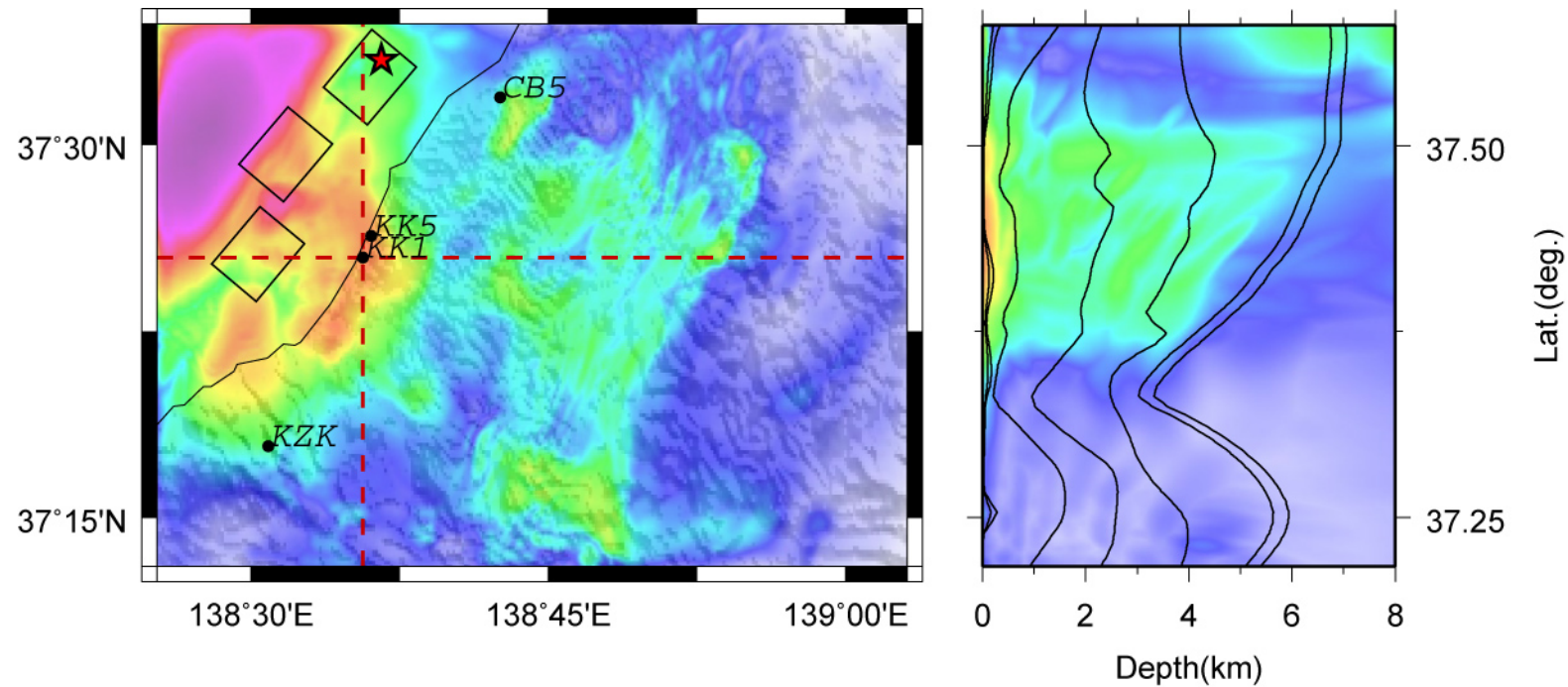


水平成層の地下構造モデルの断面と最大速度の比較(NS)

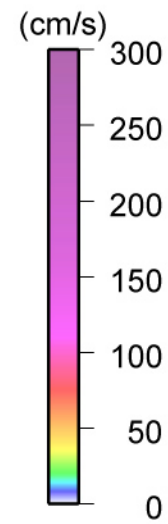
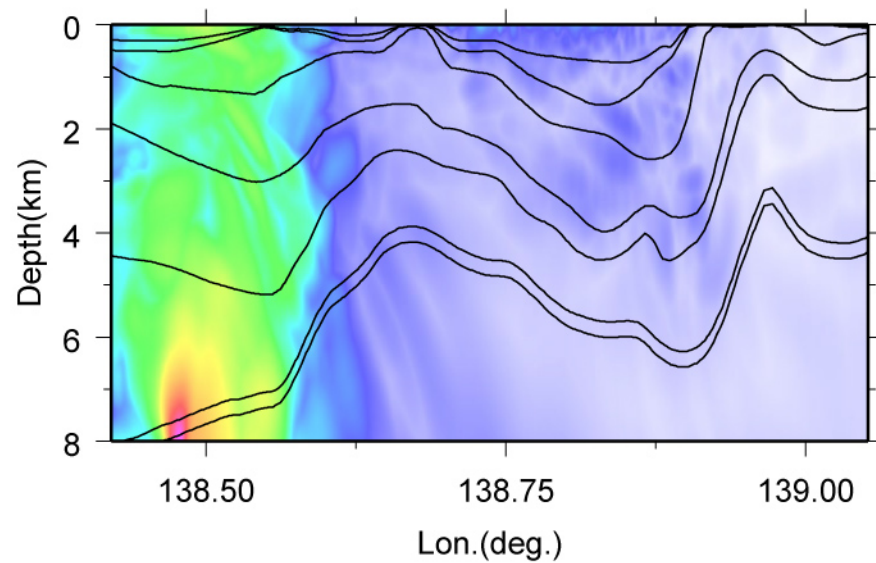
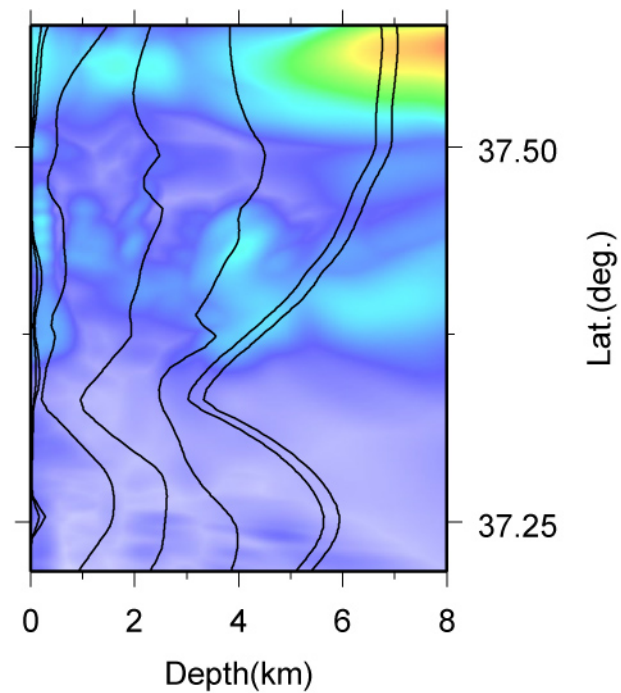
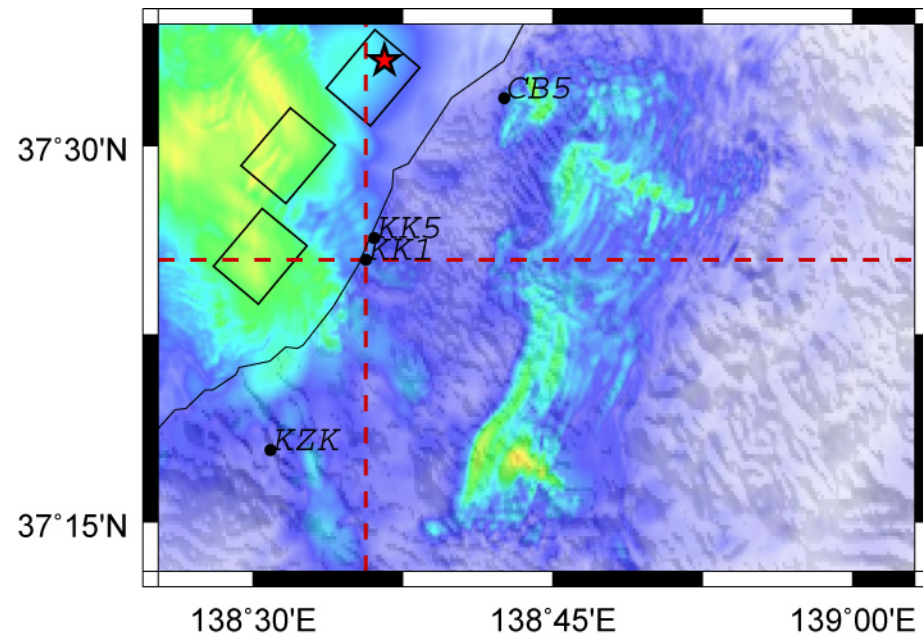


NS成分の最大速度分布



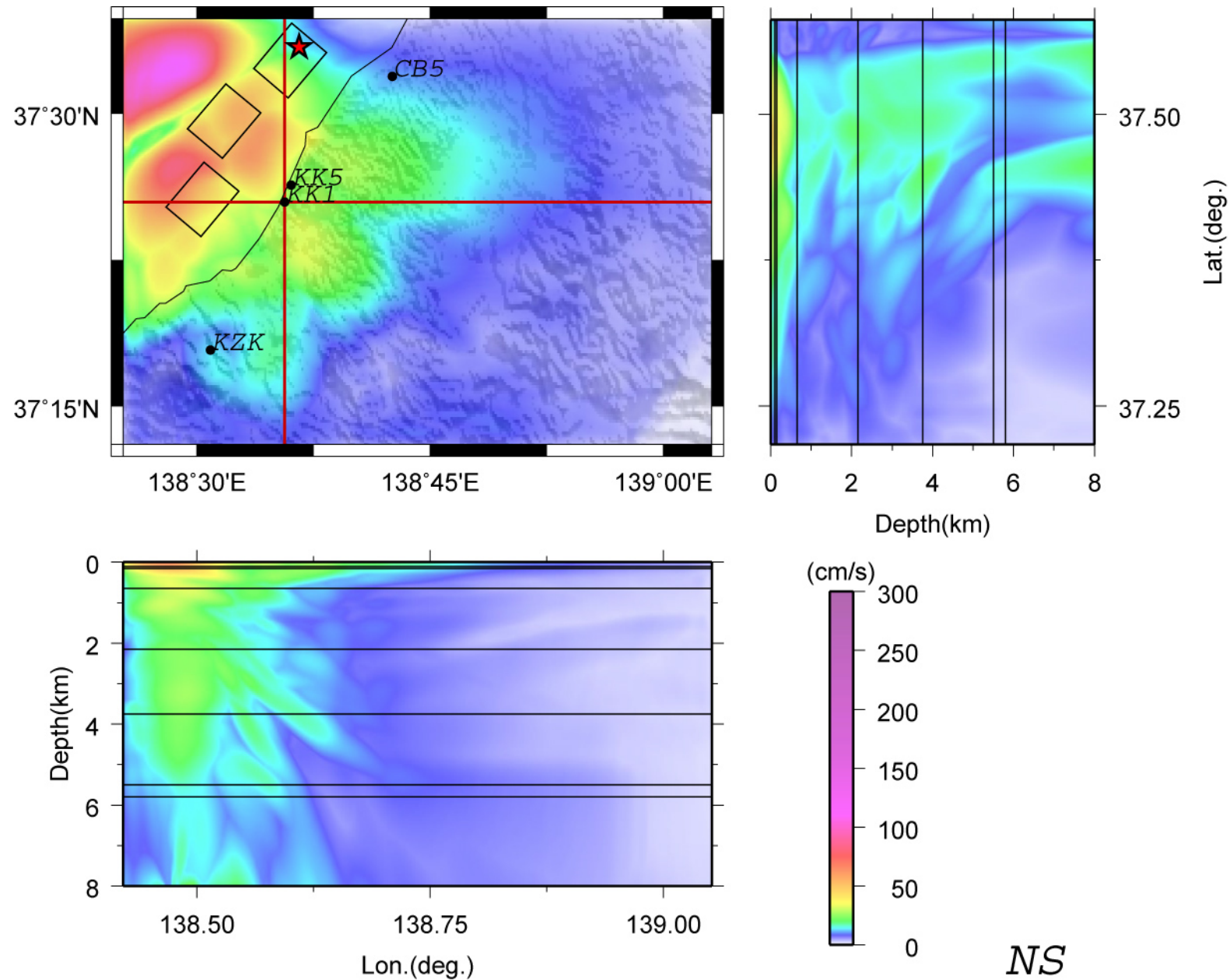


EW成分の最大速度分布



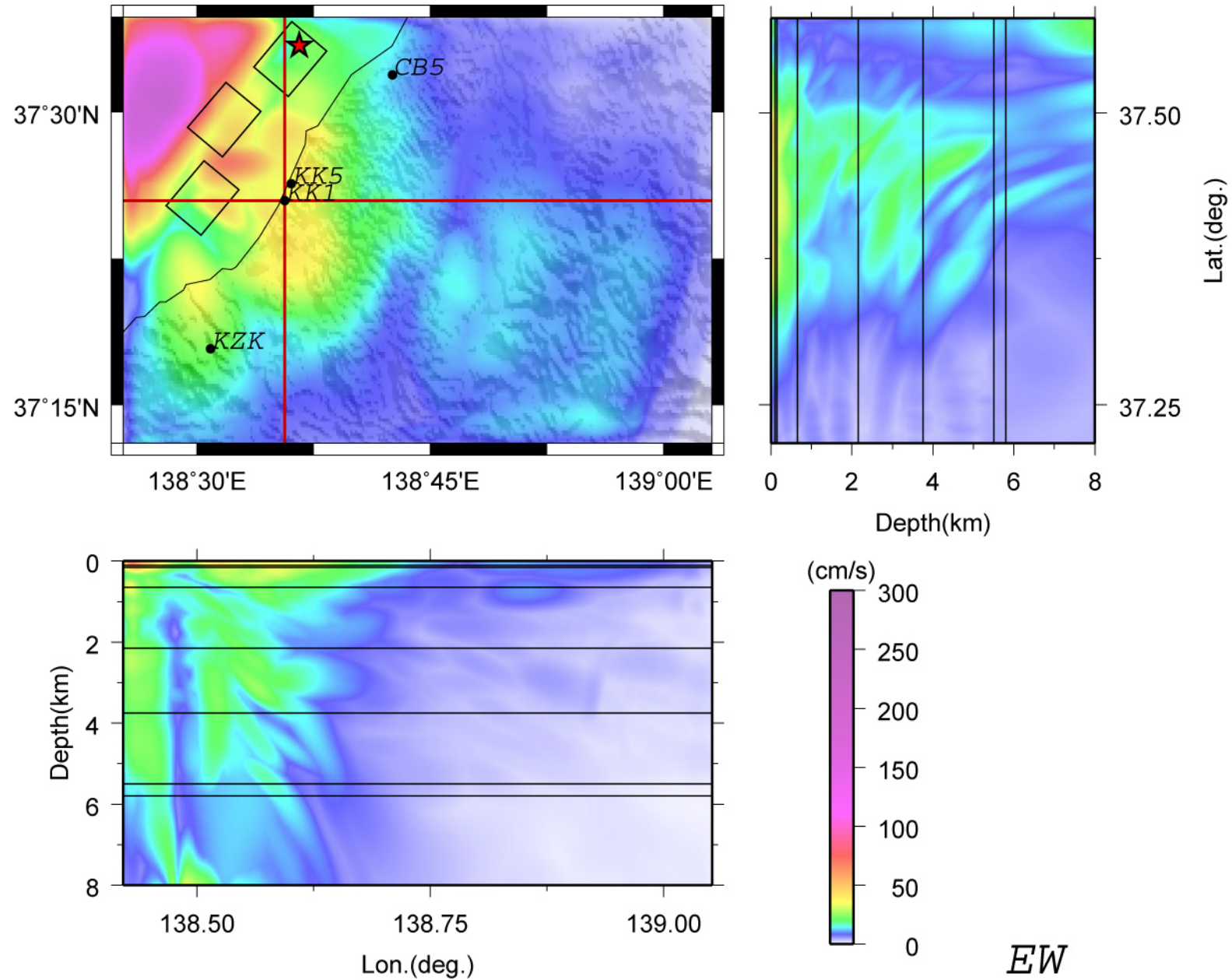
*UD*

UD成分の最大速度分布

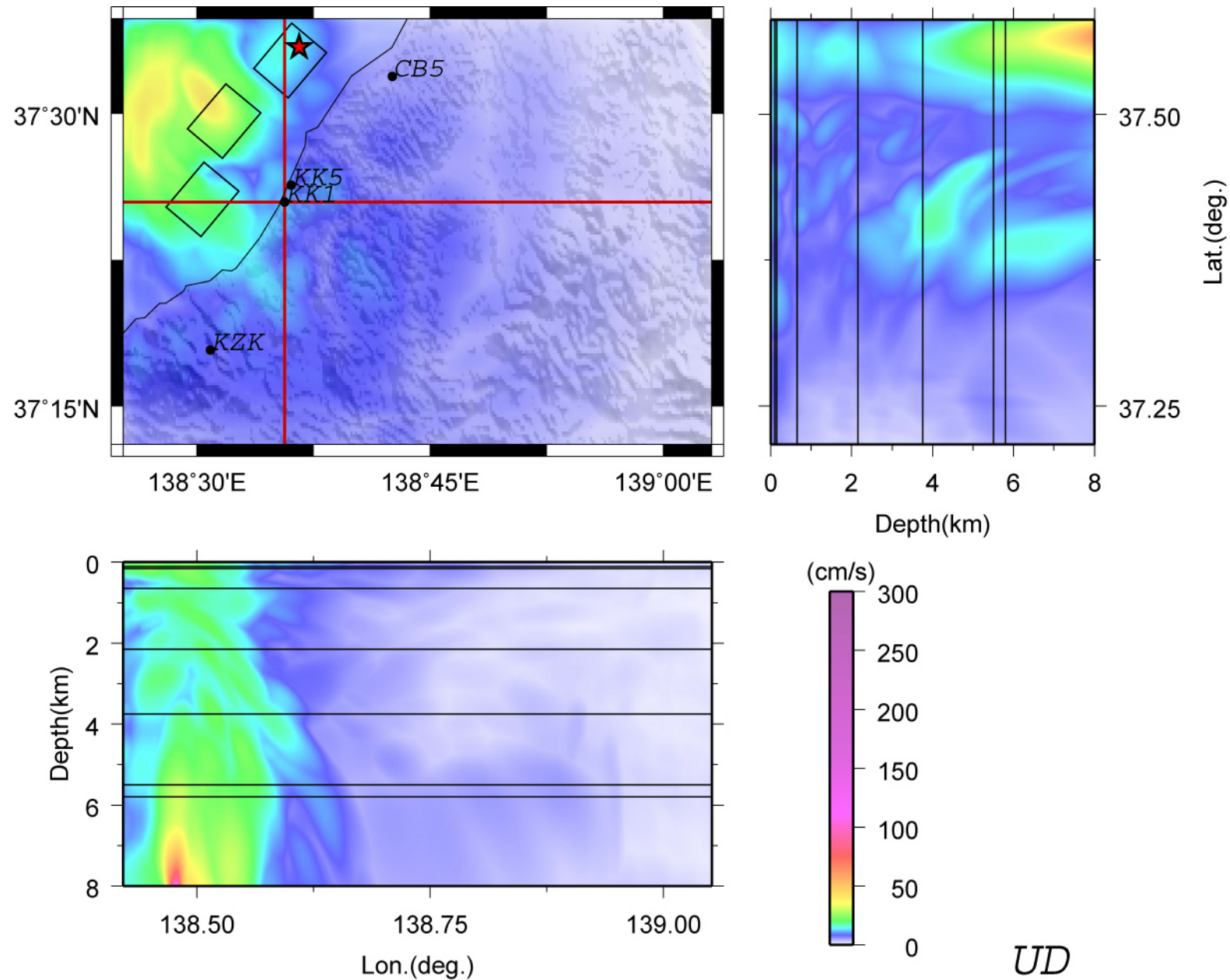


UD成分の最大速度分布(地下構造モデル:水平成層構造)

*NS*

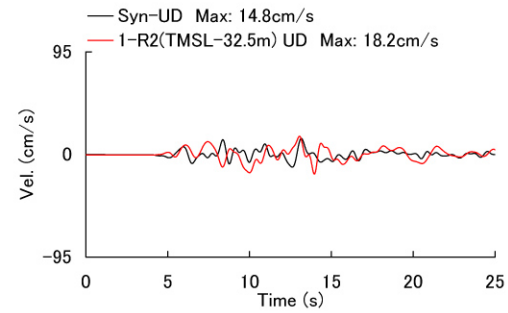
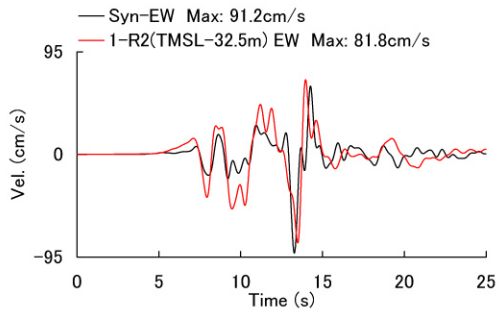
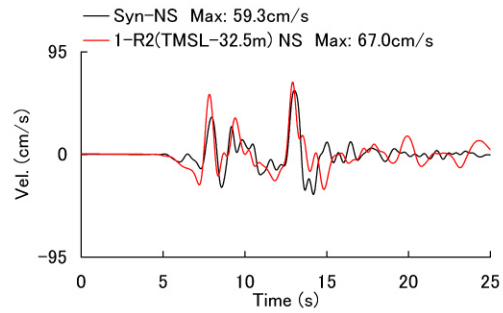


EW成分の最大速度分布(地下構造モデル:水平成層構造)

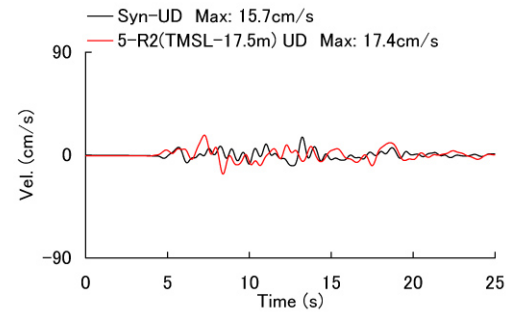
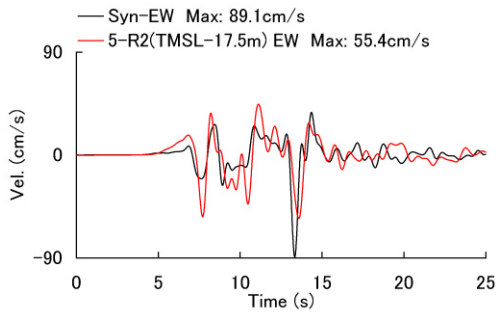
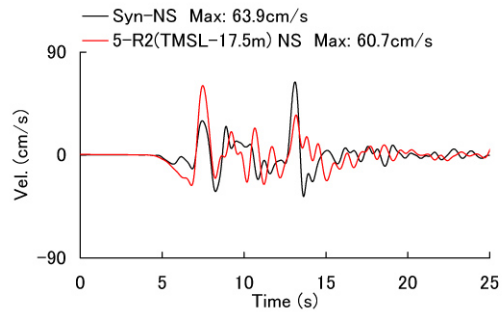


UD成分の最大速度分布(地下構造モデル:水平成層構造)

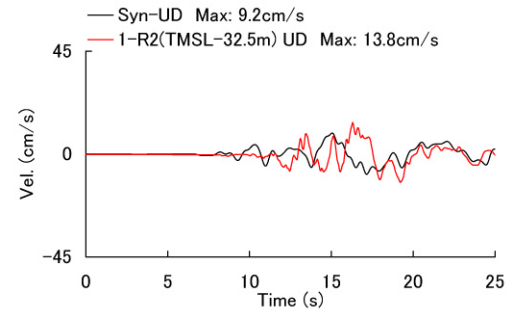
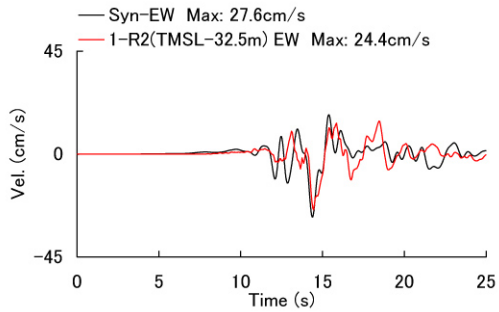
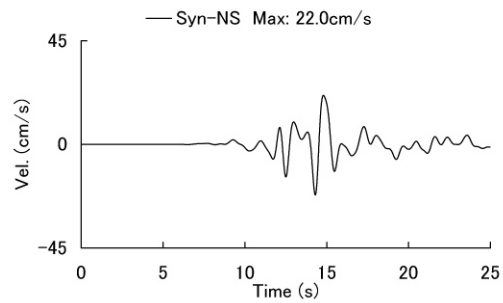
## KKZ1R2



## KKZ5R2



## KZK



(Filter: 0.05-1.6Hz)

観測波形と差分法による計算波形の比較 (計算波形は振幅を1.5倍)

## まとめと今後の課題

- 余震分布に基づく南東傾斜の断層面を仮定し、経験的グリーン関数法を用いたフォワードモデリングによって、3つのアスペリティからなる震源モデルを提案した。
- 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よりやや大きい。定量化については、伝播経路の影響を考慮するため、余震の震源位置なども考え、また理論的シミュレーション結果なども参考に検討したい。
- JNES(2004)による3次元地下構造モデルを用いて理論的シミュレーションを行い、原子力発電所サイトを襲った強震動は複雑な3次元地下構造による影響が大きいことが示唆された。
- 今後、基礎版での観測記録の再現や解放基盤面での地震動評価に実施するためには、3次元地下構造モデルの高精度化、原子力発電所サイトにおける地盤構造(深部、浅部)の調査結果が待たれる。