

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

**No.1323**      June 2016

疑似点震源モデルのスラブ内地震への適用性に関する検討  
—2005年千葉県中部の地震を例に—

長坂 陽介  
野津 厚

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,  
Port and Aviation Technology, Japan

## 目 次

要 旨 .....	3
1. はじめに .....	4
2. 強震動シミュレーションの方法.....	4
2.1 疑似点震源モデルの概要 .....	4
2.2 対象地点 .....	6
2.3 2005年千葉県中部の地震を対象とする疑似点震源モデルの作成 .....	6
3. 計算結果と誤差要因分析 .....	7
3.1 加速度フーリエスペクトルと速度波形 .....	7
3.2 地震動指標を用いた計算結果の傾向の把握.....	7
3.3 誤差要因分析1：遠方での過小評価 .....	7
3.4 誤差要因分析2：局所的な過小評価 .....	13
4. まとめ .....	17
参考文献 .....	17
付録 .....	18

# **Strong Ground Motion Simulation with Pseudo Point-source Model -Application to the 2005 Central Chiba Intraslab Earthquake-**

**Yosuke NAGASAKA\***

**Atsushi NOZU\*\***

## **Synopsis**

The Central Disaster Management Council (2013) suggested that we need to take measures for an intraslab earthquake occurring inside the Philippine Sea Plate ( $M_w7.3$ ) below the Tokyo metropolitan area. However, there is no established method to determine design ground motions for intraslab earthquakes in the technical standard for Japanese ports. In this study, we conducted strong ground motion simulation with the pseudo point-source model for the 2005 Central Chiba intraslab earthquake ( $M_j6.0$ ) and the results were analyzed in an effort to establish a method of determining design ground motions for intraslab earthquakes. The 2005 Central Chiba earthquake is the biggest intraslab earthquake that occurred just beneath the Tokyo metropolitan area since the establishment of nationwide dense strong motion networks. Therefore, this earthquake has been considered suitable for the validation of strong motion simulation by engineering seismologists in Japan. The pseudo point-source model is a relatively new source model for strong ground motion simulation which was proposed by Nozu (2012). The model has been applied to some subduction and shallow crustal earthquakes and resulted in good agreement with observations. However, it has never been applied to intraslab earthquakes occurring below the Tokyo metropolitan area. In this study, strong ground motion simulation was conducted for strong-motion stations and the results were compared with observations in terms of velocity time history, Fourier spectrum and PSI values. In general, the simulation results showed excellent agreement with the observations, indicating that the pseudo point-source model is promising for the simulation of strong ground motions for intraslab earthquakes. In some area, however, discrepancies were found between the simulation and observation. One of them is the underestimation of high frequencies at large distance, which is presumably due to the use of a Q value that is not specific to the target area. Another discrepancy was the underestimation of intermediate frequencies in the west of the epicenter, which was presumably caused by the rupture directivity effect, which is not considered in the current version of the pseudo point-source model.

**Key Words:** Strong ground motion simulation, pseudo point-source model, intraslab earthquake, Tokyo metropolitan area

---

\* Research Engineer, Engineering Seismology Group, Earthquake Disaster Prevention Engineering Department

\*\* Director, Earthquake Disaster Prevention Engineering Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5058 Fax : +81-46-844-0839 e-mail:nagasaka-y@pari.go.jp

# 疑似点震源モデルのスラブ内地震への適用性に関する検討

## -2005年千葉県中部の地震を例に-

長坂 陽介\*・野津 厚\*\*

### 要 旨

中央防災会議・首都直下地震対策検討ワーキンググループの報告（平成 25 年 12 月）によると、首都圏で防災・減災対策の対象とすべき地震の 1 つとしてフィリピン海プレート内のスラブ内地震 ( $M_w7.3$ ) が挙げられている。しかし、『港湾の施設の技術上の基準・同解説』には、スラブ内地震を対象とした場合の照査用地震動の設定方法に関する規定が無いのが現状である。そこで、本研究では、スラブ内地震を対象とした場合の照査用地震動の設定方法の確立に寄与することを目的として、2005 年千葉県中部のスラブ内地震 ( $M_j6.0$ ) を対象とし、疑似点震源モデルによる強震動シミュレーションを行い、結果の分析を行った。2005 年千葉県中部の地震は、比較的最近起きた首都直下のスラブ内地震では最大であり、観測記録も多数残されていることから首都直下地震を対象とした強震動シミュレーション手法の格好の検証対象と考えられている。一方、疑似点震源モデルは新しい震源モデルであり、スラブ内地震にも適用性が期待されるが、首都直下のスラブ内地震への適用例はない。本研究の強震動シミュレーションでは首都圏に高密度に配置された強震観測地点を対象とし、速度波形、加速度フーリエスペクトル、速度 PSI 値について計算結果と観測結果との比較を行うとともに、誤差の定量的な評価も行った。その結果、全体として、疑似点震源モデルを用いた強震動シミュレーションは観測記録を非常に良く再現しており、スラブ内地震を対象とした強震動シミュレーション手法として有望であることが分かった。ただし一部の地点では誤差が見られたため、その傾向を分析し誤差要因について検討を行った。その結果、遠方での高周波成分の過小評価は伝播経路での減衰特性 (Q 値) の与え方に原因があること、震央の西側で見られた中間周波数帯域の過小評価は、現状の疑似点震源モデルで考慮していない震源断層の破壊伝播効果によるものであることが推察された。特に震源断層の破壊伝播効果を疑似点震源モデルにどのように取り入れていくかは今後の重要な検討課題となる。

**キーワード：**強震動シミュレーション、疑似点震源モデル、スラブ内地震、首都直下地震

---

\* 地震防災研究領域 地震動研究グループ 研究官

\*\* 地震防災研究領域長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所  
電話：046-844-5058 Fax：046-844-0839 e-mail:nagasaka-y@pari.go.jp

## 1. はじめに

関東地方南部は北米プレート、フィリピン海プレート、太平洋プレートの3つが重なり合う複雑な地下構造となっており、歴史的にも大地震が繰り返し発生している地域の1つである(図-1.1)。図-1.2は首都直下で東から西へ太平洋プレートが沈み込み、その上に南から北へフィリピン海プレートが潜り込む様子を示している。ここでは発生する地震のタイプも様々であり、陸側プレート内部で発生する内陸地殻内地震(図-1.2の①)、プレート境界で発生するプレート境界型地震(図-1.2の②、④、⑥)、そして海側プレートの内部で発生するスラブ内地震(図-1.2の③、⑤)がある。中央防災会議・首都直下地震対策検討ワーキンググループの最終報告(平成25年12月)では、これらの様々なタイプの中でも特に首都圏で防災・減災対策の対象とすべき地震の1つとして $M_w7.3$ のフィリピン海プレート内で発生するスラブ内地震(図



図-1.1 関東周辺のプレート境界(中央防災会議・首都直下地震対策検討ワーキンググループ(2013)を参考に作成)

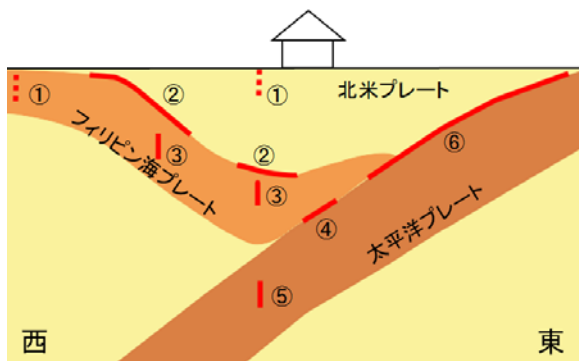


図-1.2 南関東地域で発生する地震のタイプ(中央防災会議・首都直下地震対策検討ワーキンググループ(2013)を参考に作成)

-1.2の③)を挙げている。

スラブ内地震は内陸地殻内地震やプレート境界地震とは異なるタイプの地震であるが、『港湾の施設の技術上の基準・同解説』には、スラブ内地震を対象とした場合の照査用地震動の設定方法に関する規定が無いのが現状である。

そこで、本研究ではスラブ内地震を対象とした場合の照査用地震動の設定方法の確立に寄与することを目的として、2005年7月23日の千葉県中部のスラブ内地震( $M_j6.0$ )を対象とし、疑似点震源モデルによる強震動シミュレーションを行い、結果の分析を行うこととした。

2005年千葉県中部の地震は、K-NET, KiK-net(Aoi et al., 2004; Okada et al., 2004), SK-net(鷹野他, 2005)をはじめとする密な強震観測網の導入以降に首都直下で発生したスラブ内地震としては最大のものである。また、観測記録も多数残されていることから首都直下地震を対象とした強震動シミュレーション手法の格好の検証対象と考えられている。日本建築学会を中心に実施されたベンチマークテスト(例えば田邊他, 2014)でも本地震が取り上げられており、そこでは各研究者により開発された種々の強震動シミュレーション手法の検証が進められている。

本研究では疑似点震源モデルを用いた強震動シミュレーションを行ったが、疑似点震源モデルは野津(2012)により提案された新しい震源モデルである。既存の震源モデル(例えば野津・菅野, 2008)よりも単純化され、パラメータ数の少ない震源モデルとなっているが、2011年東北地方太平洋沖地震への適用例ではSPGAモデル(野津・若井, 2012; 野津他, 2012)と同程度に観測記録を説明できることが示されている。そこでスラブ内地震への適用性も期待されるが、これまでのところ疑似点震源モデルを首都直下のスラブ内地震に適用した事例はない。また、疑似点震源モデルは新しいモデルでありモデル自体の課題抽出も必要である。そこで、本研究では、スラブ内地震の強震動シミュレーションへの疑似点震源モデルの適用性を調べ、課題抽出を行うことを目的とした。

## 2. 強震動シミュレーションの方法

### 2.1 疑似点震源モデルの概要

疑似点震源モデルは、従来の震源モデルと同程度の強震動の再現性を確保しつつ、モデルを単純化しパラメータ数を少なくすることを意図した強震動シミュレーションのための震源モデルである。

疑似点震源モデルについて説明する前に、比較のためにまず現在広く用いられている特性化震源モデル（例えば野津・菅野，2008）について簡単に説明する。これは現在の『港湾の施設の技術上の基準・同解説』にも記述されているモデルである。図-2.1に特性化震源モデルの概念図を示す。このモデルでは断層面上に強震動を生成するサブイベント（アスペリティや強震動生成領域と呼ばれることもある）を仮定する。サブイベントは通常矩形であり、図-2.1ではL×Wの大きさとなっている。サブイベントは縦横に小断層(subfault)に分割されている。地震動を計算する際は、まず、それぞれの小断層で発生する小地震による地震動を計算し、それらを重ね合わせることで対象地点での合成波形を得る。この重ね合わせによりサブイベント内の破壊の進行による影響を考慮することができる。

一方、疑似点震源モデルでは強震動を発生させるサブイベントを断層面上に置くことは従来の方法と同じである。異なるのは個々のサブイベントについて破壊の時空間的な広がりをも明示的には考慮せずに、サブイベント全体としてオメガスクエアモデル（Aki and Richards, 2002）に従う震源スペクトルを生成すると考えることである。疑似点震源モデルを図-2.1に対応させて示すと図-2.2のようになる。一般に特性化震源モデルでも各小断層での震源スペクトルとしてオメガスクエアモデルを仮定して

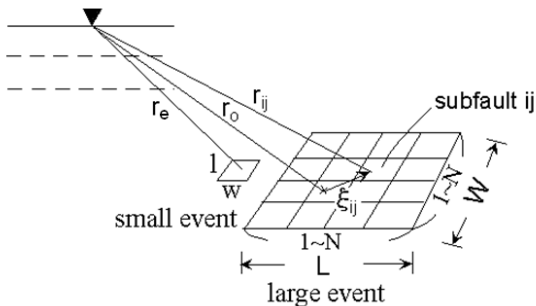


図-2.1 従来の震源モデルの概念図

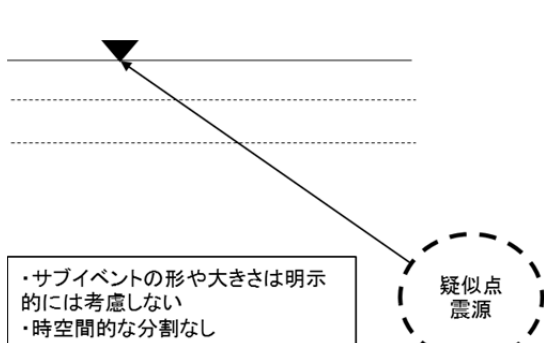


図-2.2 疑似点震源モデルの概念図

おり、その意味で疑似点震源モデルは特性化震源モデルの分割数を1としたものとみなすことができる。

疑似点震源モデルを用いた強震動シミュレーションでは、震源のほかに伝播経路と堆積層による増幅の影響（サイト増幅特性）を評価する必要がある（図-2.3）。疑似点震源モデルを用いた波形合成では、まず対象地点での加速度のフーリエ変換 $A(f)$ を式(1)より求め、これをフーリエ逆変換することにより加速度時刻歴を得る。サブイベントが複数ある場合はそれらを重ね合わせるが、本検討では1つである。

$$A(f) = S(f)P(f)G(f)O(f)/|O(f)|_p \quad (1)$$

ここで、 $S(f)$ は震源特性、 $P(f)$ は伝播経路特性、 $G(f)$ はサイト増幅特性、 $O(f)$ は過去の中小地震記録のフーリエ変換、 $|O(f)|_p$ はその絶対値にバンド幅 0.05Hz の Parzen ウィンドウを適用したものである。

震源特性  $S(f)$ 、伝播経路特性  $P(f)$ 、サイト増幅特性  $G(f)$  の各要素は、図-2.3 に示したように、震源での地震波の発生、岩盤内での地震波の減衰、堆積層での増幅という異なる物理過程にそれぞれ対応し、この3つにより対象地点でのフーリエスペクトル（フーリエ変換の絶対値）がほぼ決定される。

$O(f)/|O(f)|_p$  は絶対値 1 に細かいリップルが乗った複素数であり、従ってフーリエスペクトルにはほとんど寄与せず主に時刻歴波形の形（パルスや後続波の様子等）を決定する要素である。位相特性には各地点での中小地震記録によるものをそのまま用いるが、これは規模の異なる地震が同じ位相特性を示すことを仮定することになる。実際にこの方法が良い再現性を示すことが過去に報告されている（野津，2012）。ここでは疑似点震源モデルの予測問題への適用性を検証することが目的であるため、2005 年以前に発生した地震の中から位相特性の評価に

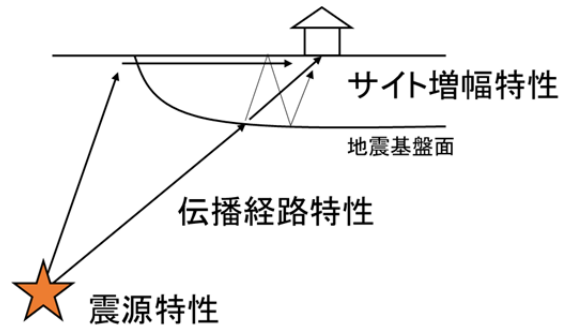


図-2.3 強震動を決める3つの要素

用いる地震を選択した。分母にのみ Parzen ウィンドウを適用しスムージングするのは、細かいリップルを残すことで時刻歴波形の因果性を満足するためである（野津・菅野, 2008）。

次に各要素の具体的な評価法を述べる。震源特性  $S(f)$  は式(2) (Boore, 1983) より求める。

$$S(f) = R_{0\phi} \cdot PRTITN \cdot FS \cdot \frac{M_0}{4\pi\rho V_s^3} \cdot \frac{(2\pi f)^2}{1 + (f/f_c)^2} \quad (2)$$

ここで、 $R_{0\phi}$ はラディエーション係数、 $PRTITN$  は地震動のエネルギーが水平方向の2成分に分散する効果を表す係数で、本検討では等方的な 0.71 とした。FS は自由表面の増幅効果(=2.0)、 $M_0$  は地震モーメント、 $\rho$ 、 $V_s$  はそれぞれ震源域における媒質の密度と S 波速度、 $f$  は周波数、 $f_c$  はコーナー周波数である。

伝播経路特性  $P(f)$ は式(3) (Boore, 1983) より求める。

$$P(f) = \frac{1}{r} \exp\left(-\frac{\pi f r}{QV_s}\right) \quad (3)$$

ここで、 $r$  は震源距離、 $Q$  は伝播経路の Q 値である。

サイト増幅特性  $G(f)$ は地震観測記録に基づいて評価された経験的サイト増幅特性を用いることを原則とする。本検討では、K-NET および KiK-net (Aoi et al., 2004; Okada et al., 2004) 観測点では野津・長尾(2005)によるものを用い、SK-net 観測点 (鷹野他, 2005) では野津・長尾 (2005) をベースとして中小地震記録のフーリエスペクトル比により補正したものを用いた。また、サイト増幅特性の精度が確保されている周波数帯が 0.2-10Hz のため、本検討も 0.2-10Hz を対象として検討を進める。

以上が疑似点震源モデルを用いた強震動シミュレーションの概要である。疑似点震源モデルでは特性化震源モデルでは必要であったサブイベント内部の破壊の進展を表現するパラメータ（サブイベントの大きさ、破壊伝播速度、分割数、ライズタイム等）が不要であり、その単純化されていると言えるが、破壊伝播効果を現状では考慮していないことになる。

## 2.2 対象地点

2005年千葉県中部の地震では多くの地震記録が得られており、それを最大限利用するためにまずは広域の

K-NET, KiK-net観測点を対象とした。計算対象地点を図-2.4に示す。地点数は178地点である。なお、他にも首都圏で高密度なSK-net観測点を対象とした計算も行っており、これについては3.4で述べる。

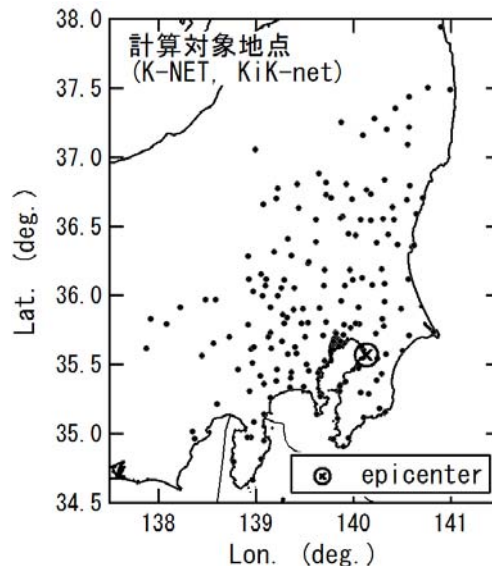


図-2.4 計算対象地点(K-NET, KiK-net)

## 2.3 2005年千葉県中部の地震を対象とする疑似点震源モデルの作成

本検討で作成した疑似点震源モデルのパラメータ一覧を表-2.1に示す。表-2.1において、震源東経・北緯から S 波速度までは、出典は異なるがすべて早川 (2014) が震源メカニズム決定に用いたモデルであり一貫性のある設定となっている。Q 値は千葉県中部の地震を対象としたベンチマークテスト (例えば田邊他, 2014) で用いられた  $Q=100f^{0.7}$  を用いた。この値は様々な地域を対象とした既往研究の平均的な結果として中央防災会議・東海地

表-2.1 疑似点震源モデルのパラメータ一覧

震源東経	140°8.31'	気象庁
震源北緯	35°34.90'	
震源深さ	68 km	F-net
走向、傾斜、すべり角	179°, 18°, 82° 8°, 72°, 93°	早川(2014)
地震モーメント	9.39×10 <sup>17</sup> Nm	
密度	3.4 g/cm <sup>3</sup>	地震調査研究推進本部(2012)
S波速度	4.6 km/s	
Q値	100×f <sup>0.7</sup>	中央防災会議・東海地震に関する専門調査会(2001)
ラディエーション係数	平均値 (=0.63)	
コーナー周波数	0.75 Hz	
位相O(f)に用いる地震	2004/08/06 03:23の地震	

震に関する専門調査会（2001）が求めたものであり、必ずしも首都直下で発生するスラブ内地震に対して最適化された値ではなく、この点については後に議論する。ラディエーション係数は全方向に対する平均値(=0.63)を用いた。ラディエーション係数については、理論的な値と上述の平均値との中間的な値を採用することで観測をより良く再現できる可能性があるが、モデル化手法が確立されていないため本検討では平均値とした。コーナー周波数は計算結果と観測結果がより多くの観測点で調和的となるよう試行錯誤により決定した。

位相特性の評価に用いる地震、すなわち式(1)の  $O(f)/O(f)_p$  の評価に用いる地震は、2005年千葉県中部の地震の近くで発生した2004年8月6日の地震(M<sub>J</sub>4.6)とした。

### 3. 計算結果と誤差要因分析

#### 3.1 加速度フーリエスペクトルと速度波形

以上より強震動シミュレーションを行った結果として、まず加速度フーリエスペクトル（以降フーリエスペクトルとする）と速度波形(0.2-2Hz)を観測記録と比較する。計算対象地点が多いため地点を選んで観測点地図と共に示すこととし、図-3.1に結果を示す地点の位置を、図-3.2にK-NET、KiK-netのフーリエスペクトルと速度波形例を示した。遠方については後に考察するためここでは比較的震央近くの19地点の結果を示す。

フーリエスペクトルは観測、計算結果両方にバンド幅0.05HzのParzenウィンドウを適用している。また、速度波形は加速度波形に0.2-2Hzのバンドパスフィルタをかけて周波数領域で積分したものである。このバンドパスフィルタにより港湾構造物への影響が大きい周波数帯のみ取り出している。

図-3.2より、各地点において計算結果が観測記録をよく再現していることが分かる。つまり、2005年千葉県中部のスラブ内地震については震源パラメータやサイト増幅特性を適切に設定することによって疑似点震源モデルにより観測記録が精度良く再現できることが分かった。

#### 3.2 地震動指標を用いた計算結果の傾向の把握

次に計算対象全地点について計算結果の傾向を調べるために、フーリエスペクトル誤差と速度 PSI 比（計算/観測）を計算し、その分布を調べた。フーリエスペクトル誤差は式(4)により定義した。これにより0.2-10Hzの広範囲での観測との違いが分かる。

フーリエスペクトル誤差

$$= \int_{0.2\text{Hz}}^{10\text{Hz}} (\log_{10} FS_{\text{syn}} - \log_{10} FS_{\text{obs}})^2 d(\log f) \quad (4)$$

速度 PSI 値はバンドパスフィルタをかけない速度波形から計算することが多いが、本研究では0.2-2Hzの速度波形を用いて計算し、計算結果と観測結果の比をとることで構造物にとって重要な周波数帯での過大・過小評価の傾向とその程度の把握を行った。PSI 値は港湾の施設の地震による残留変位と相関がある地震動指標であることが知られている（野津・井合，2001）。

フーリエスペクトル誤差の分布を図-3.3に、PSI比（計算/観測）の分布を図-3.4にそれぞれ示した。図-3.3より、フーリエスペクトル誤差は震央からの方位によらず遠方ほど大きいことが分かった。しかし、図-3.4のPSI比の分布では遠方地点は過小評価気味であるが近傍地点との違いはそれほど顕著ではなく両者の傾向に違いが見られた。PSI比は地点ごとのばらつきはあるがおおむね1に近い値となっていることから全体的な再現性は良好であると言える。これらの結果については次節以降で必要に応じて言及する。

#### 3.3 誤差要因分析1：遠方での過小評価

図-3.3で見られた遠方でのフーリエスペクトル誤差について原因を調べるため、例として群馬、栃木県内の4地点でのフーリエスペクトルの計算結果を観測結果と比較したものを図-3.5に示した。

図-3.5より、計算結果と観測記録は約1Hzから乖離が始まり高周波数ほど誤差が大きくなる傾向が共通していることが分かった。PSI 値は0.2-2Hzの速度波形で計算しているため高周波数での誤差が反映されておらず、遠方での誤差が顕著ではなかった（図-3.4）。フーリエスペクトル誤差の特徴をまとめると、①遠方で顕著、②震央からの方位にはよらない、③1Hz程度から過小評価がはじまり高周波数ほど差が大きい、となる。

この原因としては、まず方位によらず震源距離に依存していることから伝播経路特性（式(3)）が影響していると考えられる。本検討では震源距離に依存する要素は伝播経路特性のみであり、震源特性、サイト増幅特性は震源距離に依存しない。さらに、高周波数ほど誤差が大きくなることから伝播経路のQ値（式(3)のQ）が原因であると考えられる。

Q値は地震波の非弾性的な減衰（熱エネルギーへの変化や散乱による減衰）の程度を表すパラメータである。

Q値の影響は項  $\exp(-\pi fr/QV_s)$  として表される。ここで  $fr/V_s$



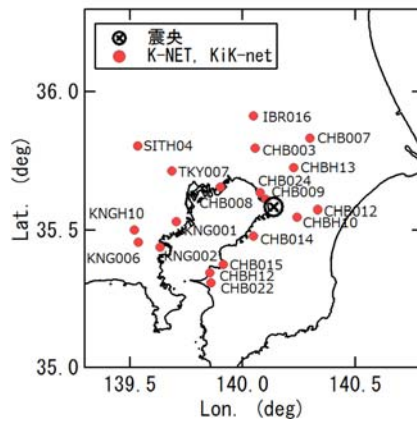


図-3.1 結果表示地点 (K-NET, KiK-net)

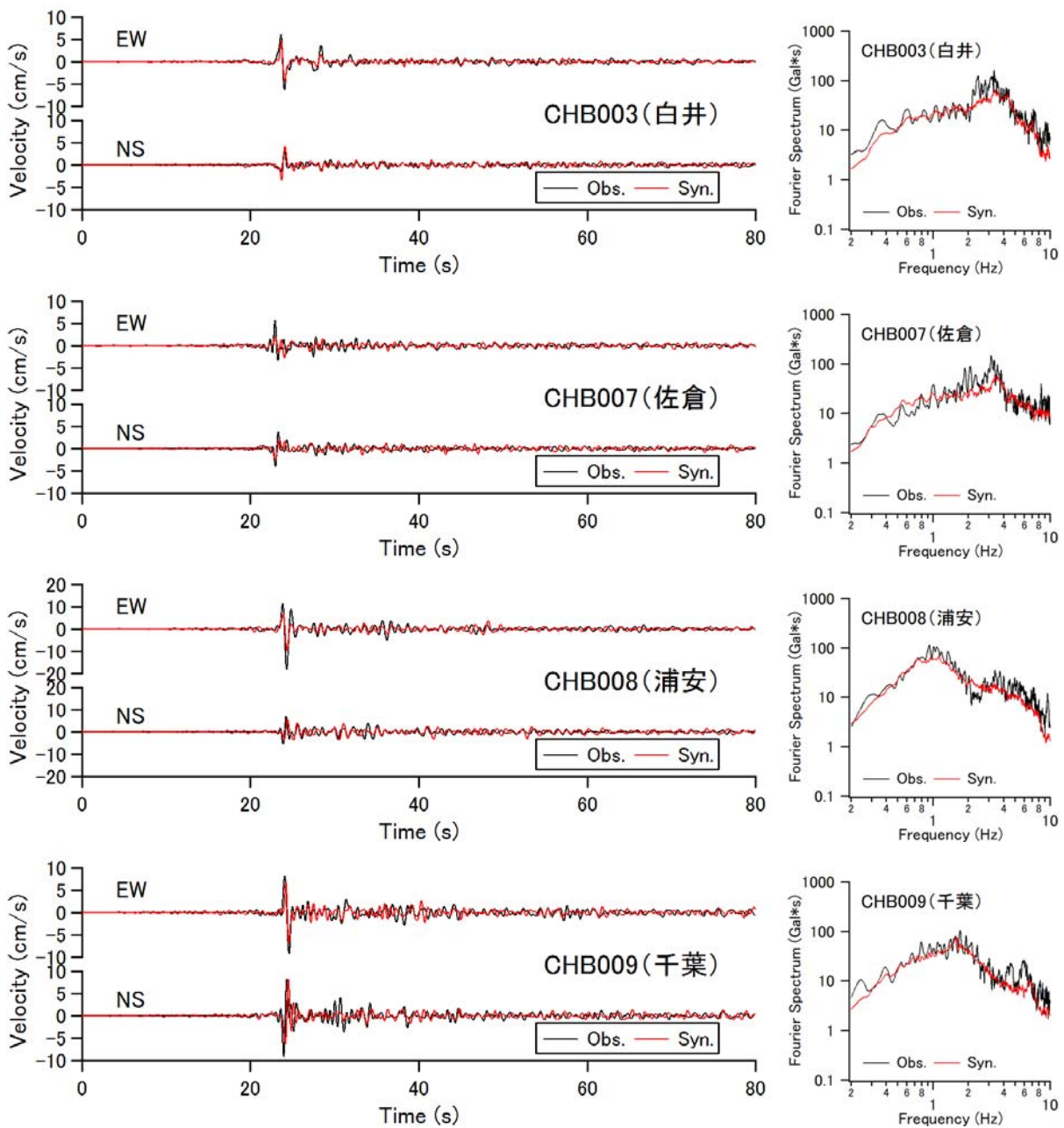


図-3.2 速度波形 (0.2-2Hz) (左) とフーリエスペクトル (右)

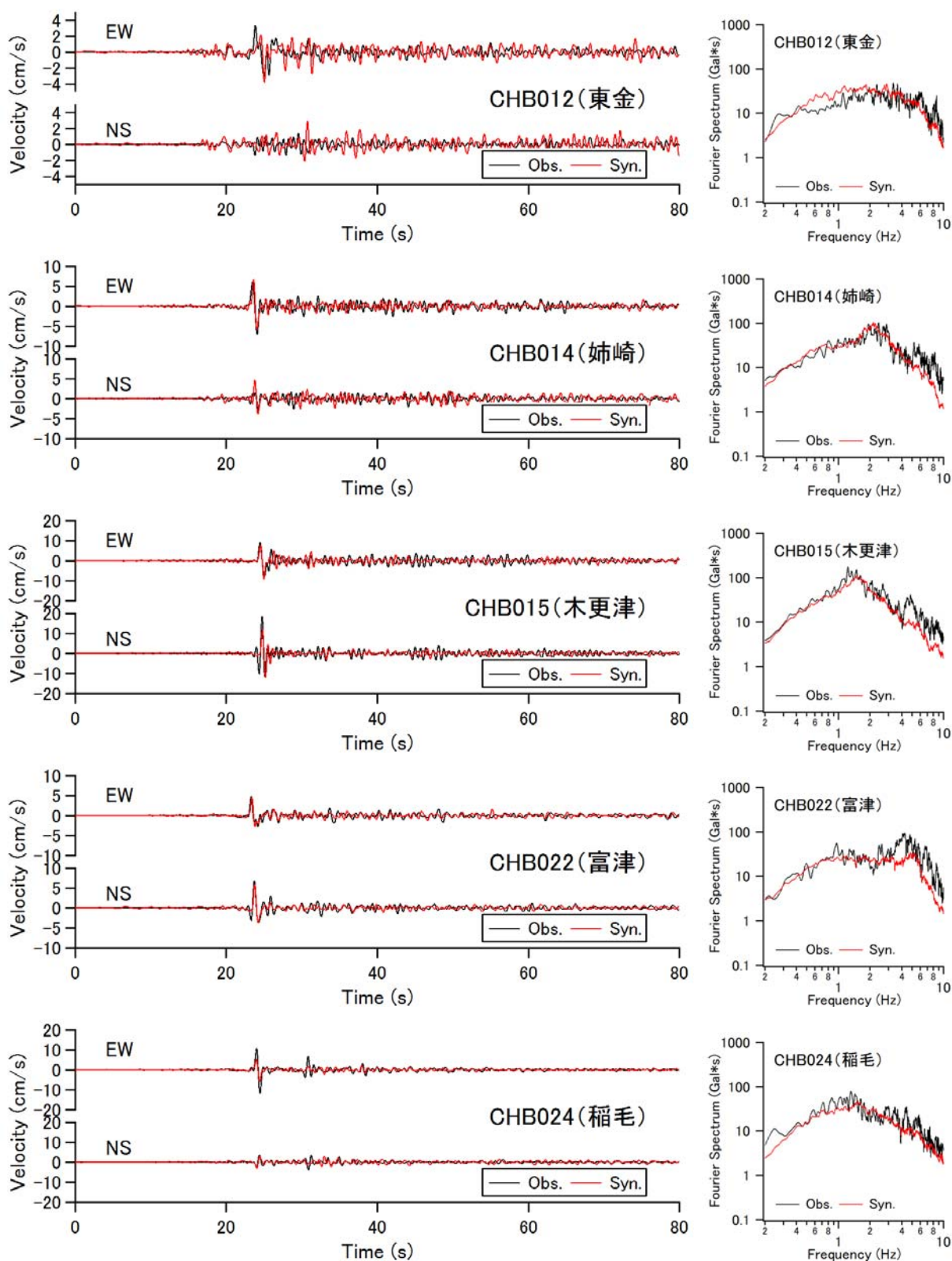


図-3.2 速度波形 (0.2-2Hz) (左) とフーリエスペクトル (右)

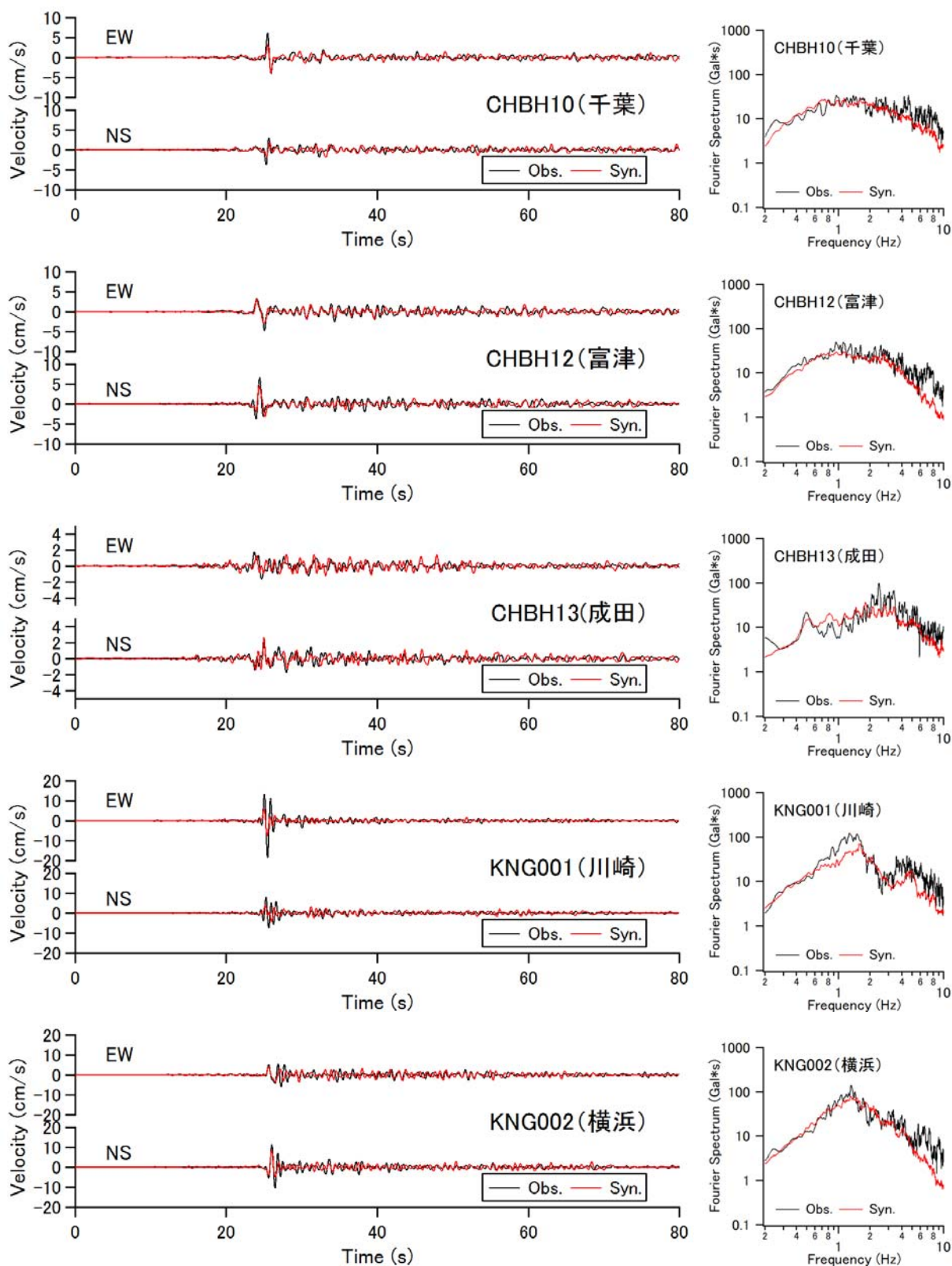


図-3.2 速度波形 (0.2-2Hz) (左) とフーリエスペクトル (右)

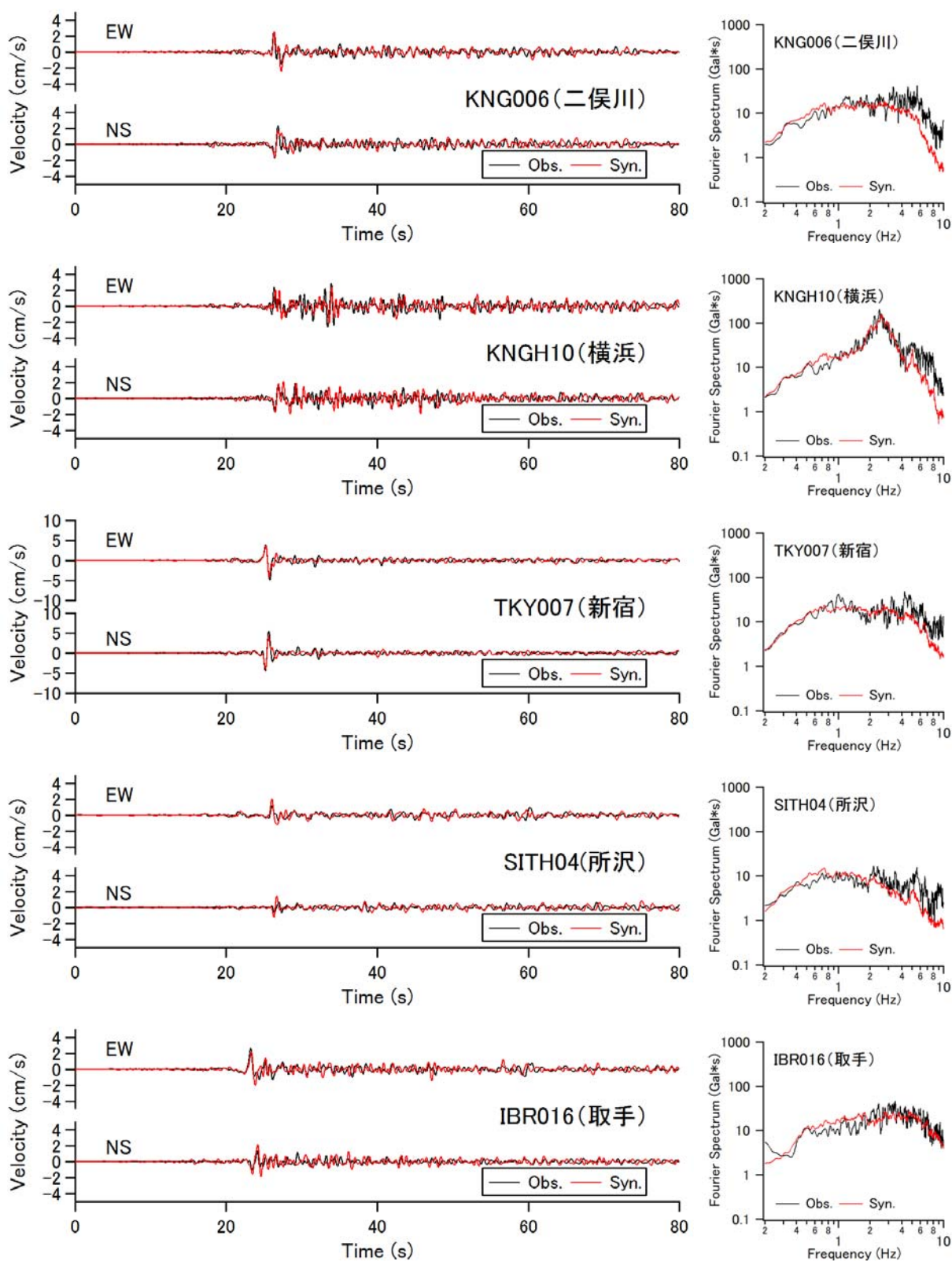


図-3.2 速度波形 (0.2-2Hz) (左) とフーリエスペクトル (右)

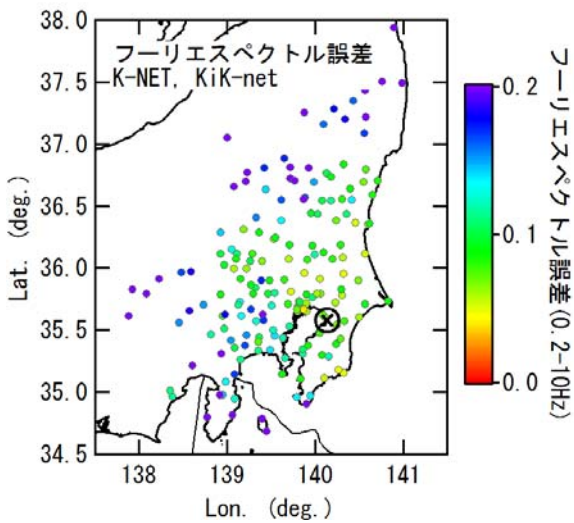


図-3.3 フーリエスペクトル誤差 (0.2-10Hz) の分布

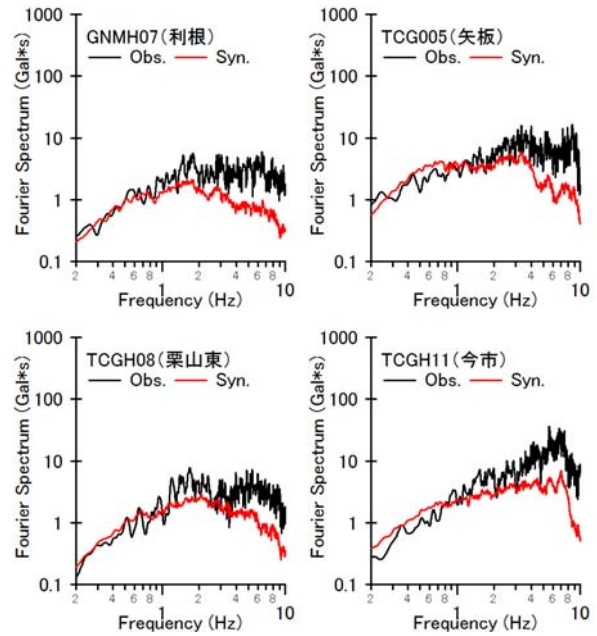


図-3.5 遠方地点の計算結果例

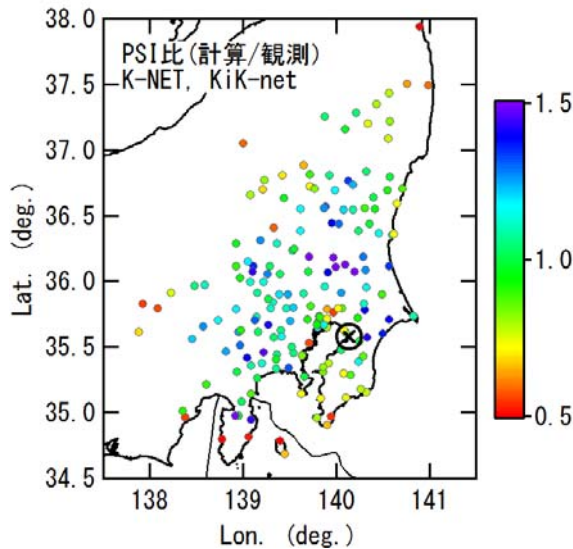


図-3.4 PSI比 (計算/観測) の分布

は、震源から対象地点まで距離  $r$  進む間の地震波のサイクル数であるから、 $Q$  値は1サイクルごとにどの程度地震波が減衰するかを表すパラメータと解釈できる ( $Q$  値が大きいほど減衰は小さい)。

$Q$  値の推定は多くの研究者によって行われており、1つの性質として周波数に依存することが知られている。多くの場合2つの定数  $A$ ,  $B$  を用いて  $Q=A \times f^B$  と表される。定数  $A$ ,  $B$  の値は地域ごとに異なり、本検討では  $Q=100 \times f^{0.7}$  とした。この値は様々な地域を対象とした既往研究の平均的な結果として中央防災会議・東海地震に関する専門調査会 (2001) が求めたものであり、必ずしも首都直下で発生するスラブ内地震に対して最適化された値ではない。

従って、誤差の原因としてはまず採用した  $Q$  値が南関東のスラブ内地震に対して最適なものではなかったことが考えられる。また、実際は地域によって  $Q$  値が異なるのに計算では広範囲にわたって同一の  $Q$  値を使用したこともあげられる。さらに、対象地震が深いスラブ内地震であるため、特に遠方の地点では  $Q$  値の大きい (減衰の小さい) 海洋性プレート内を地震波が長く伝播した後に地表に伝わっている可能性があり、実際に遠方では計算結果よりも観測結果の方が大きくなっている。

対応策はいくつか考えられ、1つは既往研究等を参考に  $Q$  値が同じとみなせる範囲でのみ計算を行うことが挙げられる。他には、対象地点によって  $Q$  値を変えることも考えられ、例えば海洋性プレート内を伝播して遠方に伝わる地震動を考慮するために遠方での  $Q$  値を大きくするなど考えられる。

本検討では、予測問題における簡便さを失わないことを念頭におき、 $Q$  値を一樣としたまま結果を改善することを考え、広域における再現性を改善するために  $Q$  値を  $Q=110 \times f^{1.0}$  と設定し直して計算を行った。

ここでの  $Q$  値の変更は、 $Q=A \times f^B$  の  $A: 100 \rightarrow 110$ ,  $B: 0.7 \rightarrow 1.0$  としている。この意図は、まず  $B$  を  $0.7$  から  $1.0$  とすることで高周波数での  $Q$  値の上昇 (つまり減衰の減少) の程度を指数的に大きくしている。これにより図-3.5で高周波数になるほど過小評価の程度が大きくなっていた傾向が改善されると考えた。また、 $A$  を  $100$  から  $110$  に変更することで全周波数にわたり  $Q$  値が大きくなり (減衰が小さく) なり、計算結果のフーリエスペクトルが全周波数にわた

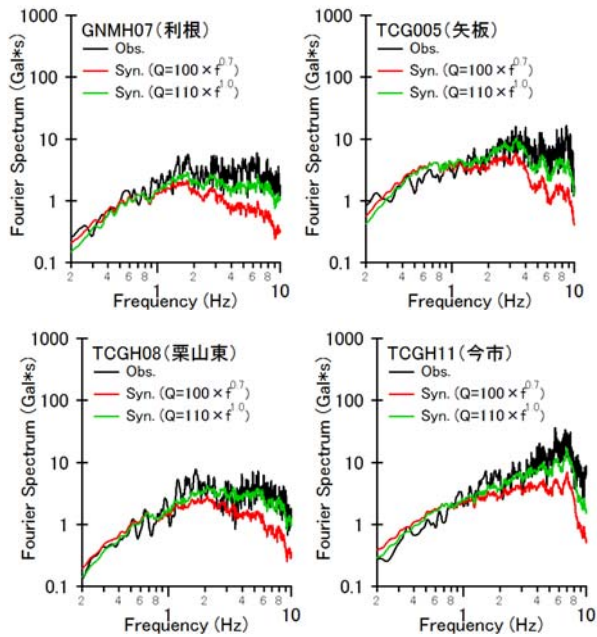


図-3.6 Q値の変更による遠方の過小評価の改善

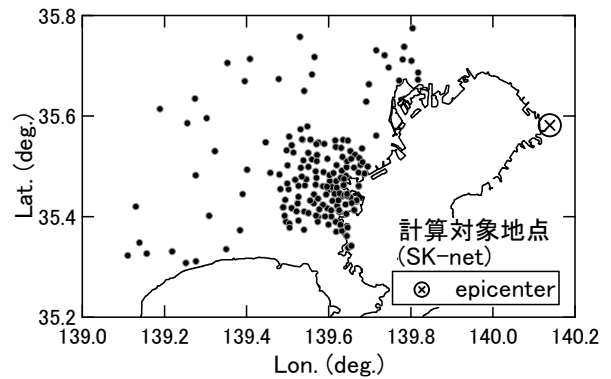


図-3.9 計算対象地点(SK-net)

りわずかに大きくなり、これにより全体的な再現性が向上すると考えた。

$Q=110 \times f^{1.0}$  による結果を図-3.5 に重ねると図-3.6 のようになる。緑色が新しい Q 値による計算結果であり、意図した通りに遠方の観測点での高周波数側の精度が改善されている。Q 値を変えて遠方での誤差を打ち消すと逆に震源近傍での再現性が落ちることが懸念されるが、式(3)より震源距離が大きいほど Q 値の影響が大きい。Q 値変更後のフーリエスペクトル誤差の分布を示すと図-3.7 のようになり、全体的に改善されていることが分かる。さらに図-3.8 には Q 値変更前後の震源距離とフーリエスペクトル誤差の関係を示したが、震源距離とともに増大していた誤差(黒)が大幅に減少しており(赤)、震源距離が小さい地点でも若干改善傾向にあることが分かる。

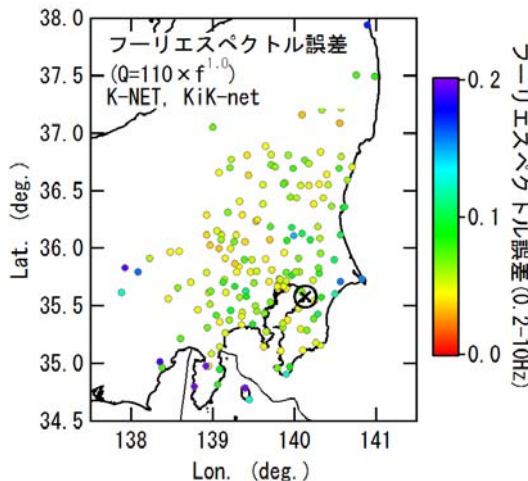


図-3.7 フーリエスペクトル誤差の分布( $Q=110 \times f^{1.0}$ )

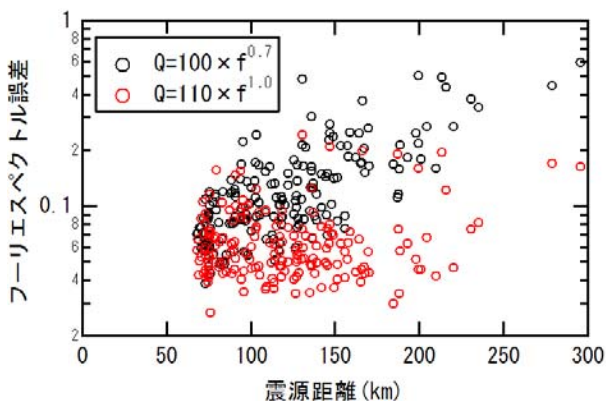


図-3.8 フーリエスペクトル誤差と震源距離の関係

### 3.4 誤差要因分析2：局所的な過小評価

港湾の施設の技術上の基準では、L2 地震動として複数のシナリオを考えて対象地点に最も影響の大きい地震動を採用することになっている。その結果、結局は対象地点近くで発生する地震動が L2 地震動として選択されることが多い。そのため、相対的な重要度は遠方よりも震源近くの方が高い。

そこで、震源付近における誤差要因についてより詳細に調べるため、首都圏で K-NET, KiK-net より高密度な強震観測網である SK-net (首都圏強震動総合ネットワーク) の観測地点を対象に追加計算を行うこととした。SK-net の計算対象地点を図-3.9 に示す。全 175 地点で、横浜市が 134 地点と特に高密度である。SK-net 観測点のサイト増幅特性は野津・長尾 (2005) では評価されていないため、近傍 K-NET, KiK-net のサイト増幅特性に中小地震記録のフーリエスペクトル比をかけることで新たに評価したものを用いた。それ以外のパラメーターは表

-2.1と同じとした。

まず基本的な再現性の確認のために、いくつかの地点についてフーリエスペクトルと速度波形の観測との比較を示す。図-3.10に結果を示す地点の地図を、図-3.11にフーリエスペクトルと速度波形の比較を示した。フーリエスペクトルは高周波数で全体的に過小評価気味であるが、港湾構造物への影響が大きい2Hz以下の帯域では観測記録をよく再現できていることが分かる。

次にPSI比(計算/観測)を計算し、図-3.12に分布を色で示した。領域内にあるK-NET, KiK-net地点も併せて示している。

図-3.12より、川崎周辺でPSI比が過小評価となる地点が局所的に現れることが分かった。K-NET, KiK-netの結果のみを示した図-3.4を見ると東京湾西岸に1点だけ過小評価地点(橙色)があるが、それがK-NET川崎(KNG001)である。KNG001のフーリエスペクトルと速度波の計算結果(図-3.2)を見ると、フーリエスペクトルでは約0.6-2Hzで計算結果が小さく、速度波形ではパルス部分が再現できていないことが分かる。また、KNG001以外にもこの一帯の過小評価地点は同様の傾向であることを確認している。過小評価の生じている範囲は狭いが、港湾構造物への影響が大きい周波数帯域で生じている誤差であるため、その原因究明は重要である。

このような局所的な誤差の原因としては①ラディエーション係数に平均値を用いたこと、②異常震域、③サイト増幅特性のばらつき、④破壊伝播効果等が考えられる。

①のラディエーション係数については低周波数ほど理論的な挙動を示すことが知られているため、もし本検討で平均的なラディエーション係数を用いたことが過小評価の原因であれば、誤差は低周波数ほど大きくなるはずであり、本検討の特徴と食い違う。

②の異常震域については東京湾を震央とするスラブ内地震で現れることが知られており(例えば中村他, 2007)、震央西側で東側より震度が大きくなると言われている。その原因は千葉県北部から茨城県南部の深さ20~60kmに存在する高減衰(=低Q値)地帯であるとされており、確かに図-3.4では震央東側で過大評価地点が見られる。しかし、前節でも説明したようにQ値の影響を受けやすいのは主に高周波数帯であるため、Q値の局所的な大小によって中間周波数帯域(0.6-2Hz)での過小評価を説明することはできない。

③のサイト増幅特性のばらつきについては、KNG001地点のサイト増幅特性は33個の記録の平均として求められており、この中には首都直下で発生した中小のスラブ内地震も多数含まれていることから、KNG001地点等

の過小評価をサイト増幅特性のばらつきによって説明す

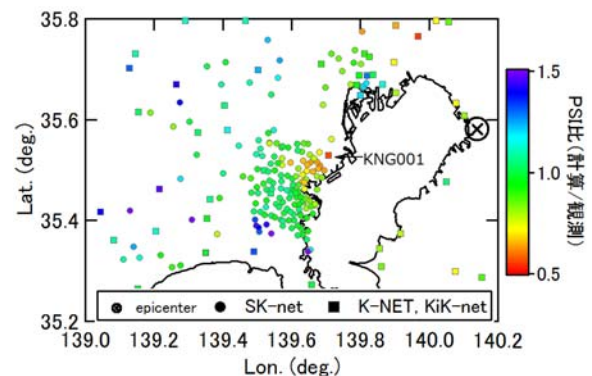


図-3.12 SK-net観測点のPSI比の分布

ることは難しい。

本稿では、④の破壊伝播効果が川崎周辺の過小評価の原因となりうることを示す。破壊伝播効果とは、震源断層での破壊の進行に伴って断層面上の各部分から発生する地震波が重なり合うことによる効果であり、特に破壊の進行方向では地震波がコヒーレントに重なり合うことで振幅が増大する。これは破壊伝播速度とS波速度が近いために起きる現象でありフォワードディレクティブティと呼ばれる。逆に破壊進行と逆方向では断層面各部からの地震波が間隔を空けて重なり合うため、破壊進行方向と比べて周期が長く、振幅が小さい波形となる。これはバックワードディレクティブティと呼ばれる。これらの概念図を図-3.13に示した。

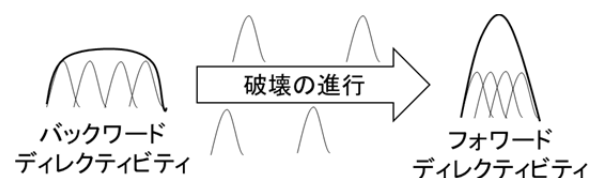


図-3.13 時間領域での破壊伝播効果のイメージ

疑似点震源モデルでは破壊伝播効果を考慮せずに各サブイベント全体として1つのスペクトルを与えているため、破壊進行方向では計算結果が観測よりも小さくなる可能性がある。2005年千葉県中部の地震にあてはめて考えると、実際の破壊が川崎方面に向かっていけば、破壊伝播効果により川崎周辺の地震動は増幅されるので、疑似点震源モデルの結果は過小評価となりうる。

また、過小評価が中間周波数帯域(0.6-2Hz)で生じているという事実も破壊伝播効果の理論と定性的に整合する。理論的には、破壊伝播効果は周波数領域では震源特性(式(2))におけるコーナー周波数 $f_c$ の方向による変化

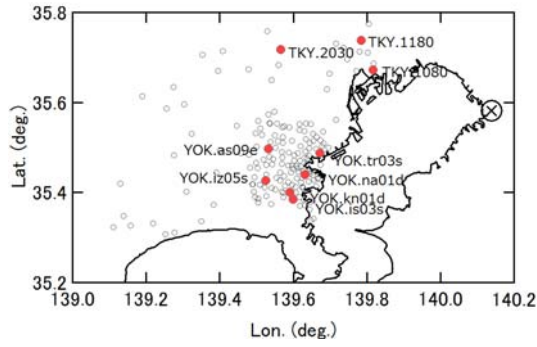


図-3.10 結果表示地点 (SK-net)

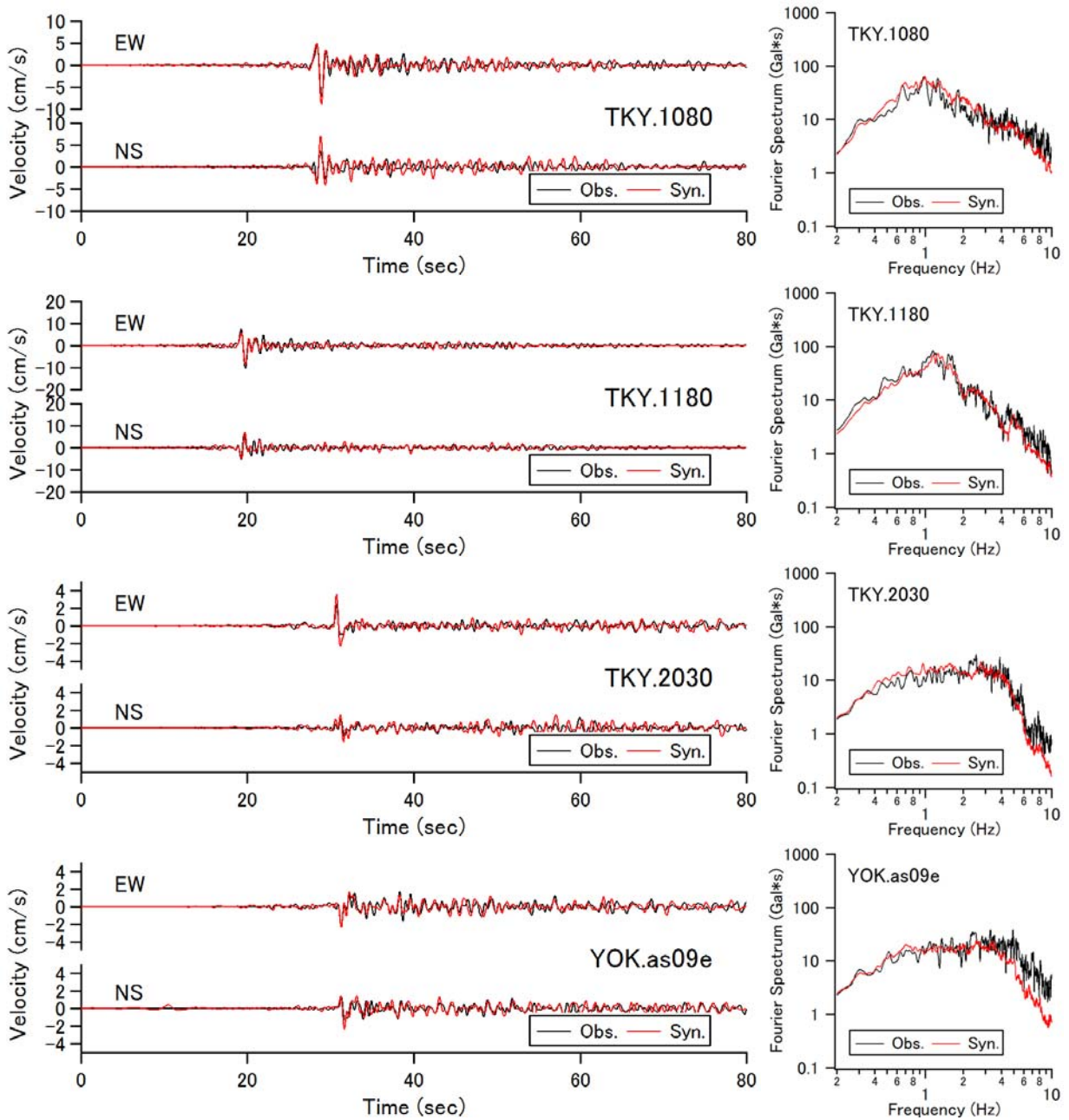


図-3.11 SK-netでの速度波形 (0.2-2Hz) (左) とフーリエスペクトル (右)



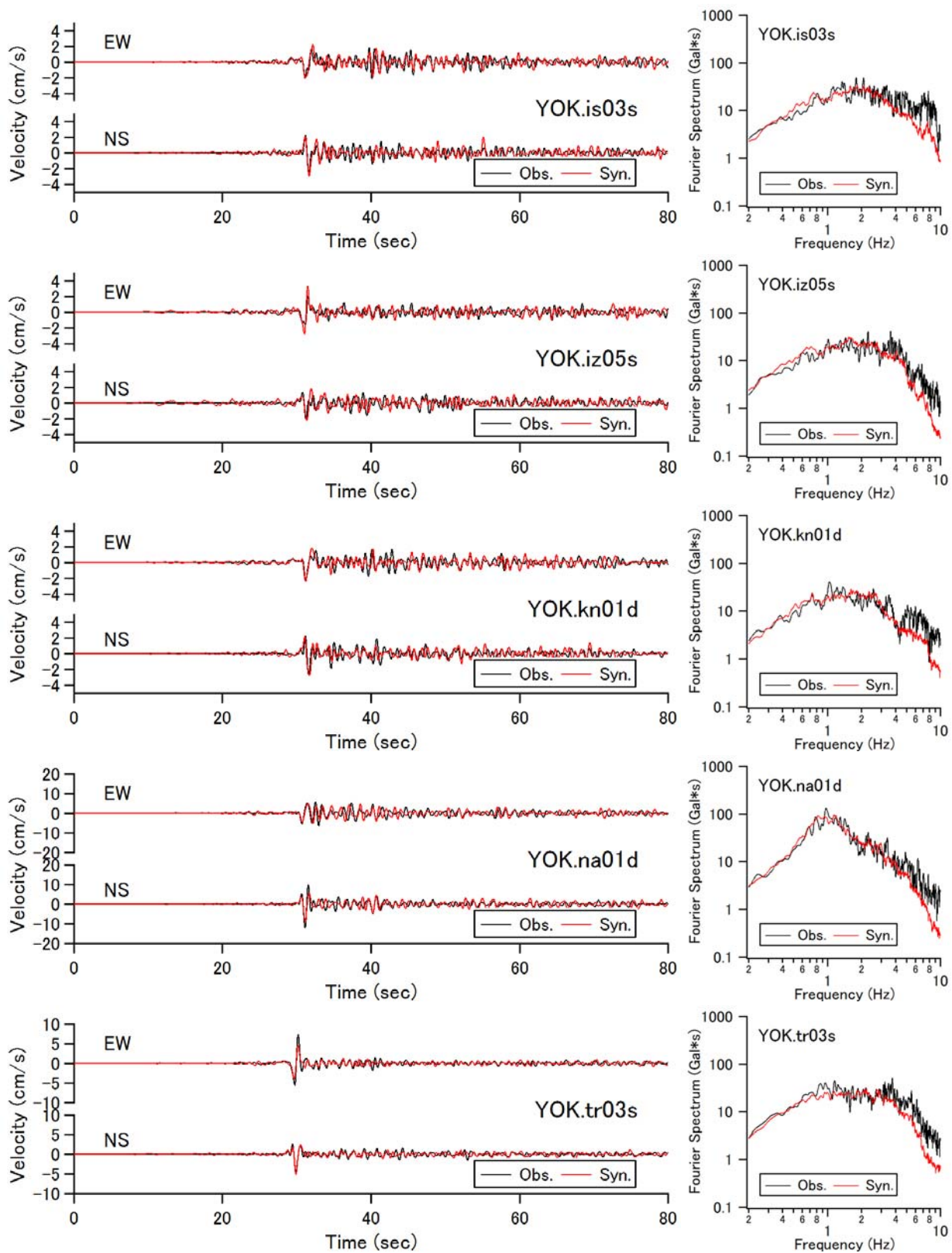


図-3.11 SK-net での速度波形 (0.2-2Hz) (左) とフーリエスペクトル (右)

となって表れる。破壊進行方向ではコーナー周波数が大きくなり ( $f_c^+$ とする), 破壊進行と逆方向ではコーナー周波数が小さくなる ( $f_c^-$ とする)。さらに, ある周波数 ( $f_1$ とする) を超えると破壊進行による地震波の重ね合わせがコヒーレントではなくランダムとみなせると考えられ, 破壊伝播効果も消えると考えられる。

一方, 疑似点震源モデルではすべての方向に同一のコーナー周波数を与える。従って, 理論的には破壊進行方向では疑似点震源モデルの結果はコーナー周波数  $f_c$  付近から  $f_1$  程度まで過小評価となると考えられる。これらを図示すると図-3.14 のようになる。これは, 川崎方面に破壊が進行したとすれば, 0.6-2Hz で過小評価となる川崎周辺の過小評価の傾向と一致している。過小評価が始まる 0.6Hz はコーナー周波数 0.75Hz と近くなっている。

このように, 川崎周辺での過小評価の原因としては④の破壊伝播効果が最も有力である。これまでに 2005 年千葉県中部の地震の震源過程を詳細に調べた研究はないため, 破壊伝播効果の検証にはこの点を詳細に調べることが有効であると考えられる。

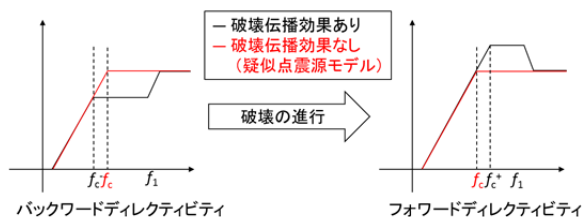


図-3.14 周波数領域での破壊伝播効果のイメージ

#### 4. まとめ

2005 年 7 月 23 日に発生した千葉県中部のスラブ内地震を対象に疑似点震源モデルを用いた強震動シミュレーションを行った。計算結果はフーリエスペクトルや速度波形などの点で観測記録をよく再現しており, 疑似点震源モデルがスラブ内地震に対して有効なモデルであることが分かった。

また, 一部の地点で見られた誤差について分析を行い以下の知見を得た。遠方で高周波数ほど過小評価となる傾向が見られたが, これは伝播経路の Q 値の影響である可能性が高く, Q 値を適切に再設定することによって改善される。Q 値による誤差は主に構造物への影響が小さい高周波数に表れるが, 広い領域や遠方を対象とする場合は Q 値に注意する必要がある。

一方, 震央の西側で見られた局所的な過小評価は構造

物への影響が大きい周波数帯域で生じているため, 耐震設計上問題となり得る。この原因は破壊伝播効果を考慮していないためである可能性があり, 破壊伝播効果を疑似点震源モデルに取り入れることが今後の重要な課題となる。

疑似点震源モデルのスラブ内地震への適用に係るその他の課題としては以下が挙げられる。①より規模の大きなスラブ内地震への適用性 (1993 年釧路沖地震, 2001 年芸予地震, 2011 年 4 月の東北地方太平洋沖地震の余震, 1987 年千葉県東方沖地震など), ②最適なラディエーション係数の設定法。これらの課題にも順次取り組んでいきたいと考えている。

(2016 年 1 月 25 日受付)

#### 謝辞

本研究では, K-NET, KiK-net, SK-net, UR・戸田建設の強震観測記録を利用させていただきました。一部の図の作成には GMT(Wessel and Smith, 1998)を用いました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 瀬戸 一幸・三宅弘恵 (2005) : 2005 年千葉県北西部の地震 —震源メカニズム・強震動—, <http://taro.eri.u-tokyo.ac.jp/saigai/chiba/>, 2016 年 1 月 22 日閲覧。
- 地震調査研究推進本部 (2012) : 全国 1 時地下構造モデル, [http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12\\_choshuki/choshuki2012\\_a2.pdf](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/choshuki2012_a2.pdf), 2016 年 1 月 22 日閲覧。
- 鷹野澄, 瀬戸 一幸, 工藤一嘉, 古村孝志, 山中佳子, 卜部卓, 土井恵治 (2005) : 首都圏強震動総合ネットワーク SK-net, 記念シンポジウム「日本の強震観測 50 年」—歴史と展望—講演集, 防災科学技術研究所資料, No.264, pp.119-122.
- 田邊朗仁・久田嘉章・野畑有秀・山本優・眞鍋俊平・長坂陽介 (2014) : 首都直下地震を対象にした強震動予測手法に関するベンチマークテスト その 1 : 2005 年千葉県北西部地震を対象とした統計的手法と観測記録との比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.307-308.
- 中央防災会議事務局 (2001) : 中央防災会議東海地震に関する専門調査会 (第 8 回) 説明資料, <http://www.bousai.go.jp/jishin/tokai/senmon/8/pdf/siryoku.pdf>, 2016 年 1 月 22 日閲覧。
- 中央防災会議・首都直下地震対策検討ワーキンググループ (2013) : 首都直下地震の被害想定と対策について (最終報告), <http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/tais>

aku\_wg/pdf/syuto\_wg\_report.pdf, 2016年1月22日閲覧.

長尾毅・平松和也・平井俊之・野津厚 (2006): 高松港における被害地震の震度再現に関する研究, 海洋開発論文集, Vol.22, pp.505-510.

中村亮一・植竹富一・佐竹健治・遠田晋次・宇佐美龍夫・島崎邦彦・渡辺健 (2007): 関東地域の三次元減衰構造・異常震域とそれに基づく1855年安政江戸地震の震源深さの推定, 歴史地震, 第22号, pp.101-107.

野津厚・井合進 (2001): 岸壁の即時被害推定に用いる震動指標に関する一考察, 第28回関東支部技術研究発表会講演概要集, 土木学会関東支部, pp.18-19.

野津厚・長尾毅 (2005): スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト増幅特性, 港湾空港技術研究所資料, No.1112.

野津厚・菅野高弘 (2008): 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法—因果性と多重非線形効果に着目した改良—, 港湾空港技術研究所資料, No.1173.

野津厚・山田雅行・長尾毅・入倉孝次郎 (2012): 海溝型巨大地震における強震動パルスの生成とその生成域のスケーリング, 日本地震工学会論文集, Vol.12, No.4 (特集号), pp.209-228.

野津厚 (2012): 強震動を対象とした海溝型巨大地震の震源モデルをより単純化する試み—疑似点震源モデルによる2011年東北地方太平洋沖地震の強震動シミュレーション—, 地震2, Vol.65, pp.45-67.

野津厚, 若井淳 (2012): 強震動を対象とした2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデル, 港湾空港技術研究所報告, Vol.51, No.1, pp.23-53.

早川崇 (2014): 2005年7月23日の千葉県中部の地震 ( $M_j6.0$ )の点震源モデル, 日本地震工学シンポジウム講演論文集, GO15-Fri-7.

理論地震動研究解編 (1994): 地震動 その合成と波形処理, 鹿島出版会.

若井淳・野津厚 (2013): 2011年東北地方太平洋沖地震の際に見られた表層地盤の非線形挙動の概略的傾向, 港湾空港技術研究所資料, No.1272.

Aki K. and P. G. Richards (2002): Quantitative Seismology, Second Edition, University Science Books.

Aoi, S., Kunugi, T., and Fujiwara, H. (2004): Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, Vol.4, No.3, pp.65-74.

Boore, D.M. (1983): Stochastic simulation of high-frequency

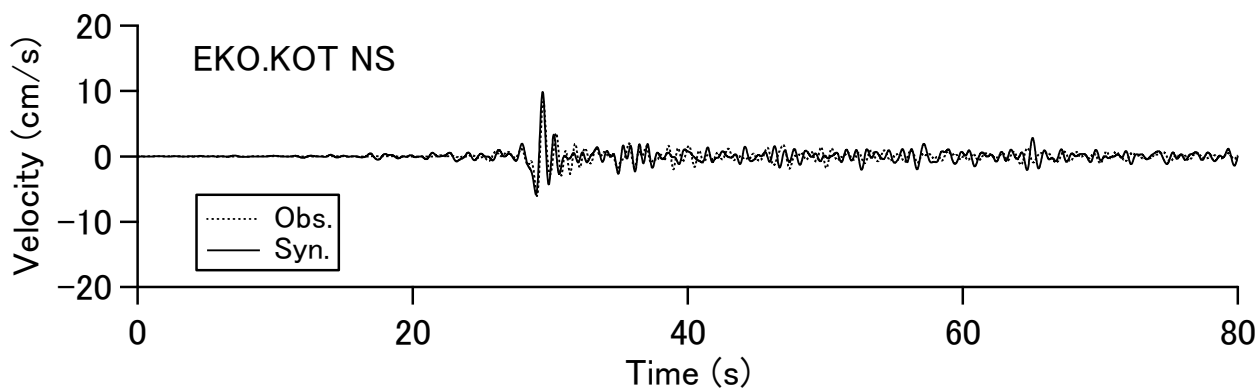
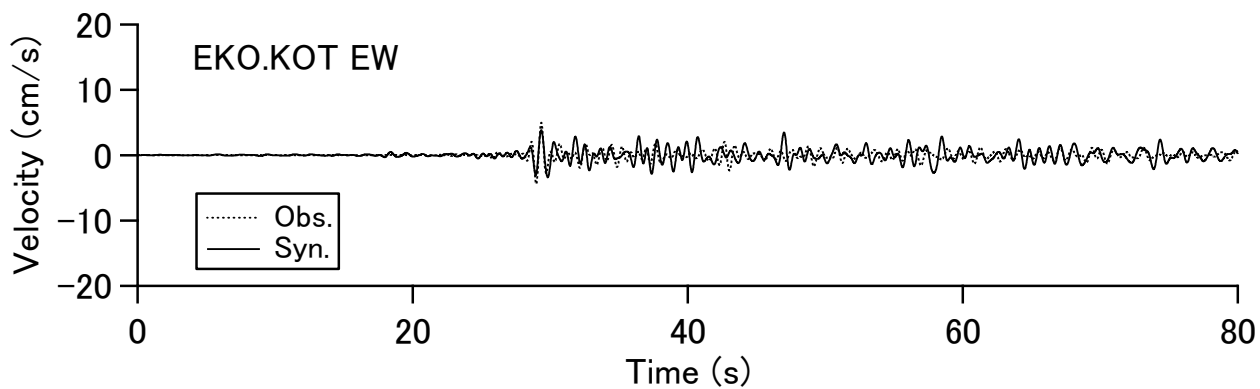
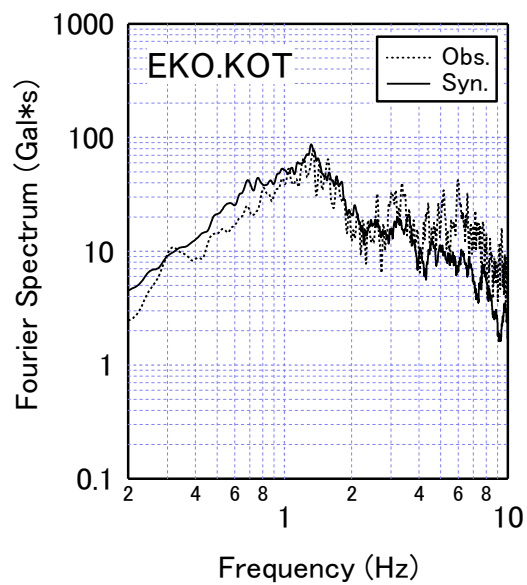
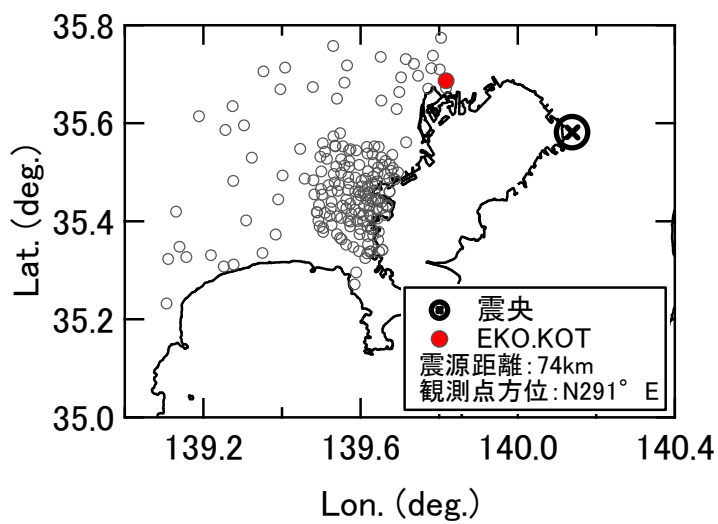
ground motions based on seismological models of the radiated spectra, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.73, pp.1865-1894.

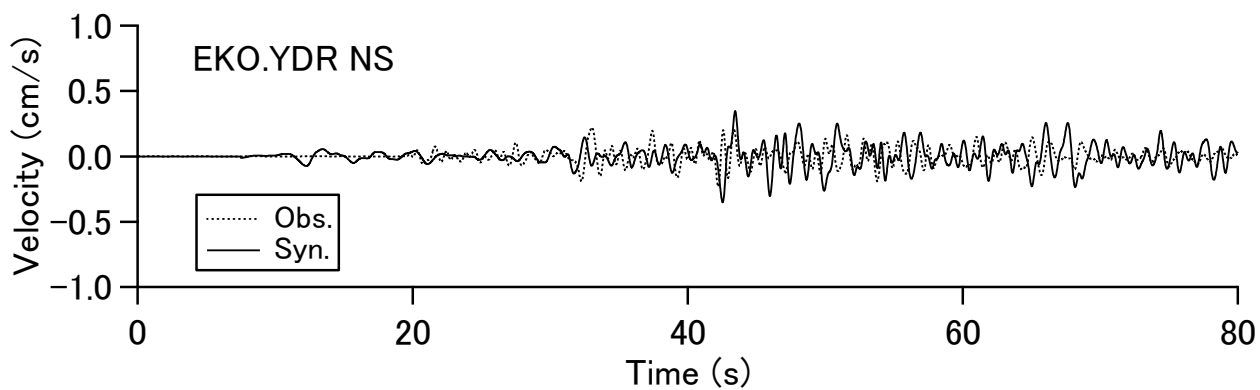
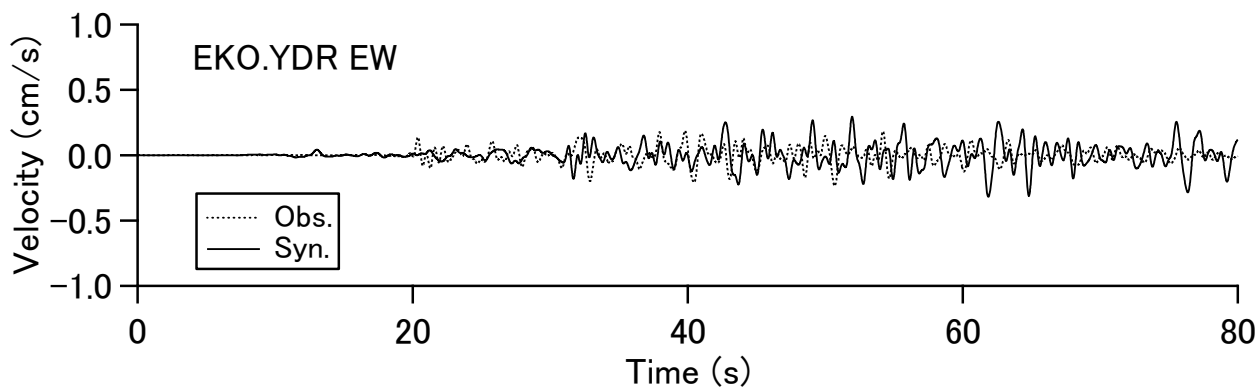
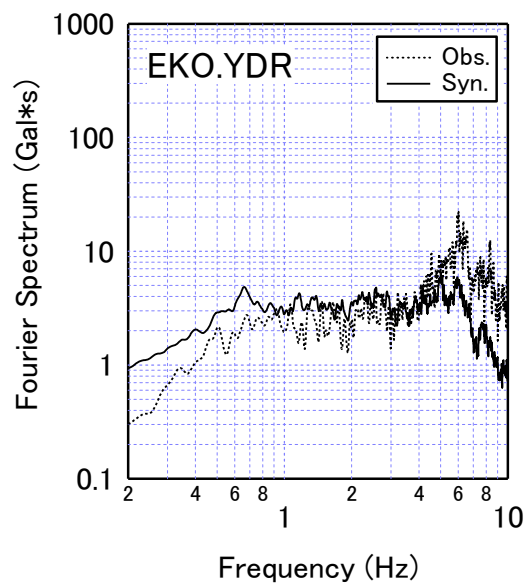
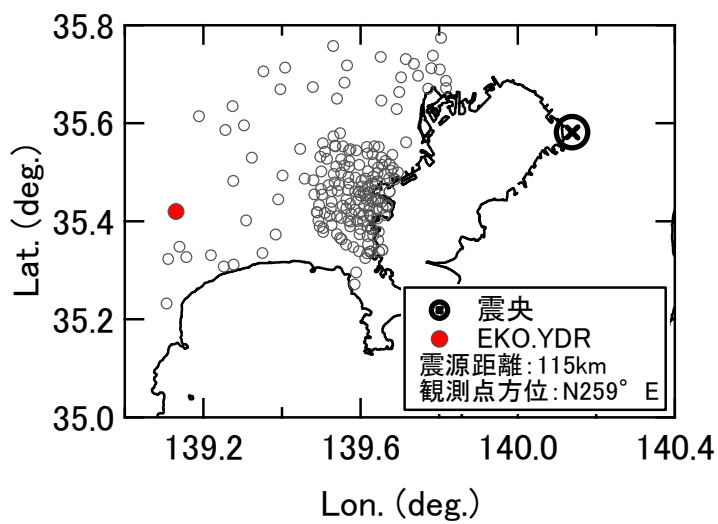
Okada, Y., Kasahara, K., Hori, S., Obara, K., Sekiguchi, S., Fujiwara, H. and Yamamoto, A. (2004): Recent progress of seismic observation networks in Japan -Hi-net, F-net, K-Net, and KiK-net-, Earth Planets Space, Vol.56, pp.xv-xxviii.

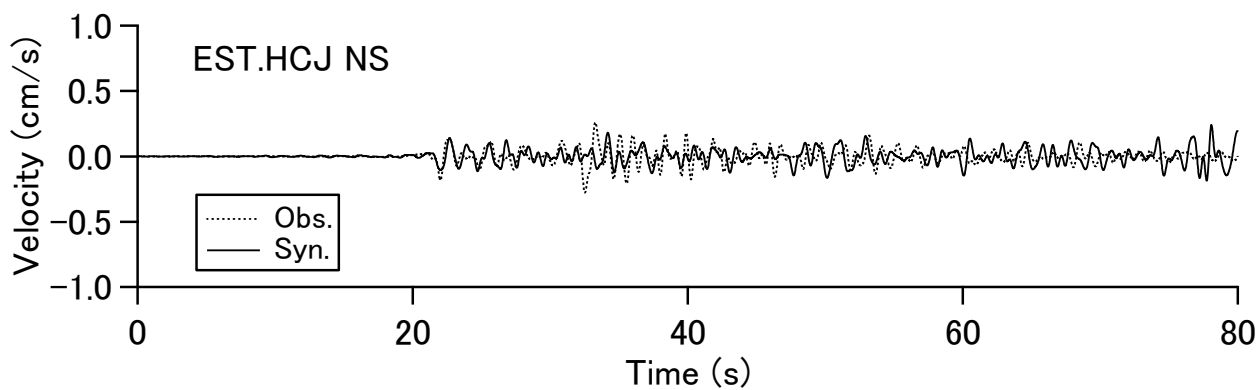
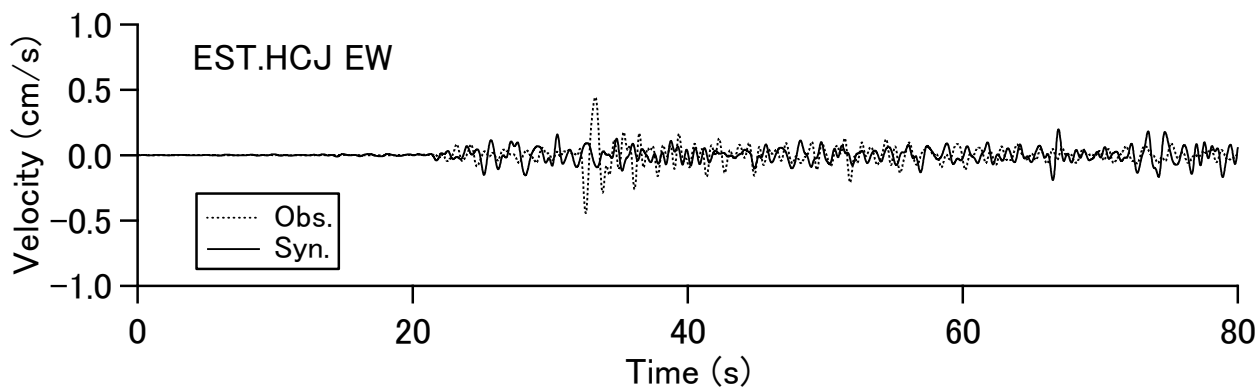
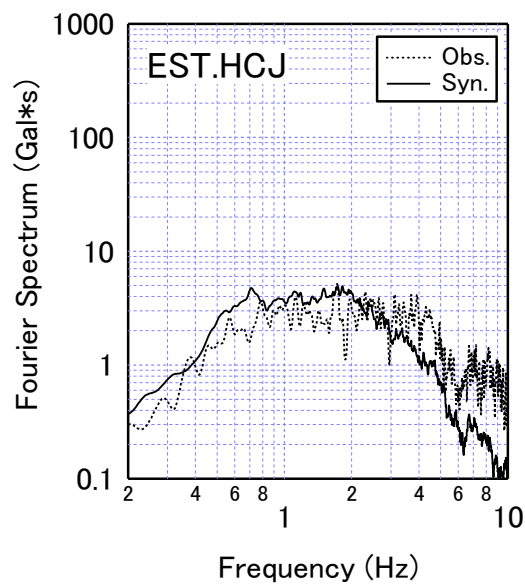
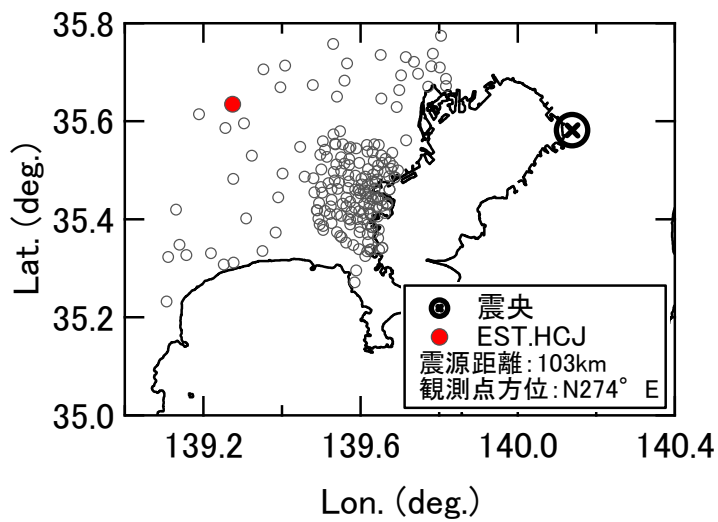
Wessel, P. and W. H. F. Smith (1998): New improved version of the Generic Mapping Tools released, EOS Trans, Vol.79, p.579.

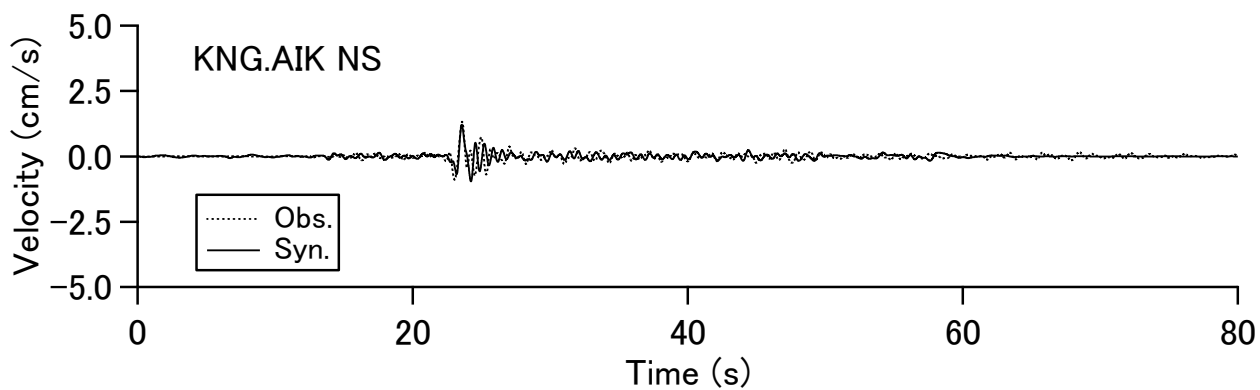
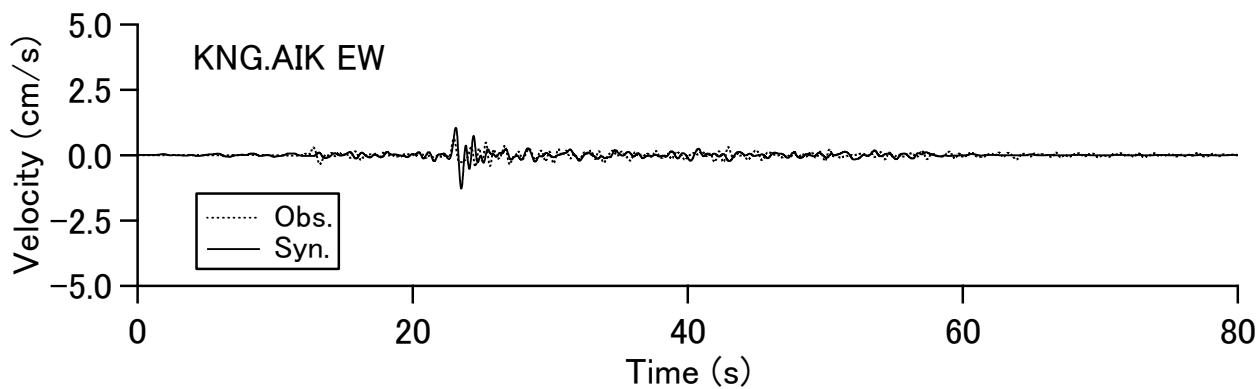
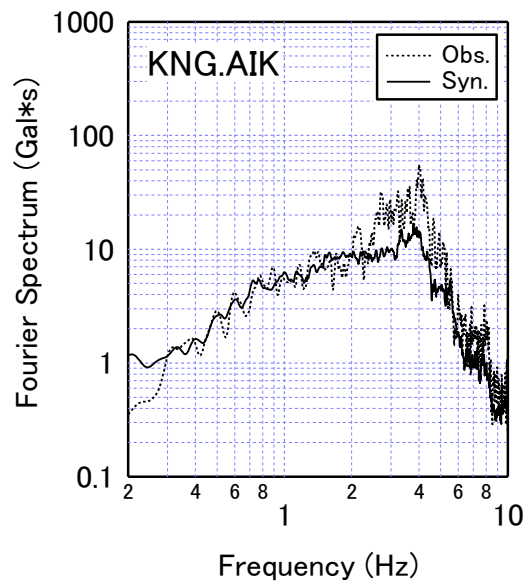
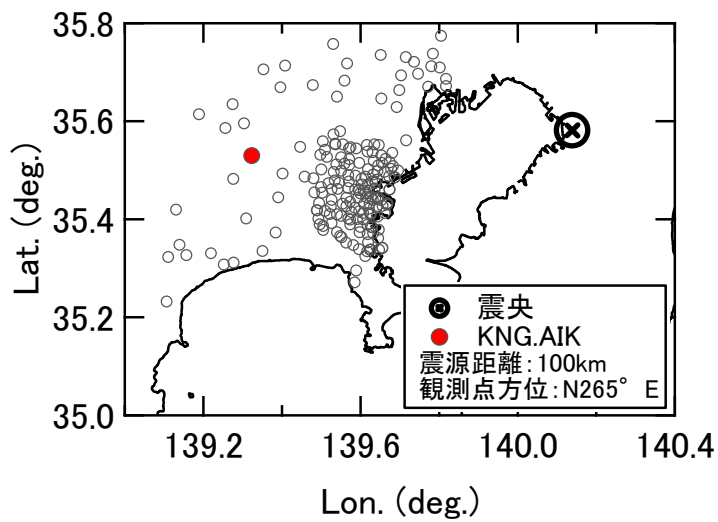
## 付録 SK-net観測点の計算結果一覧

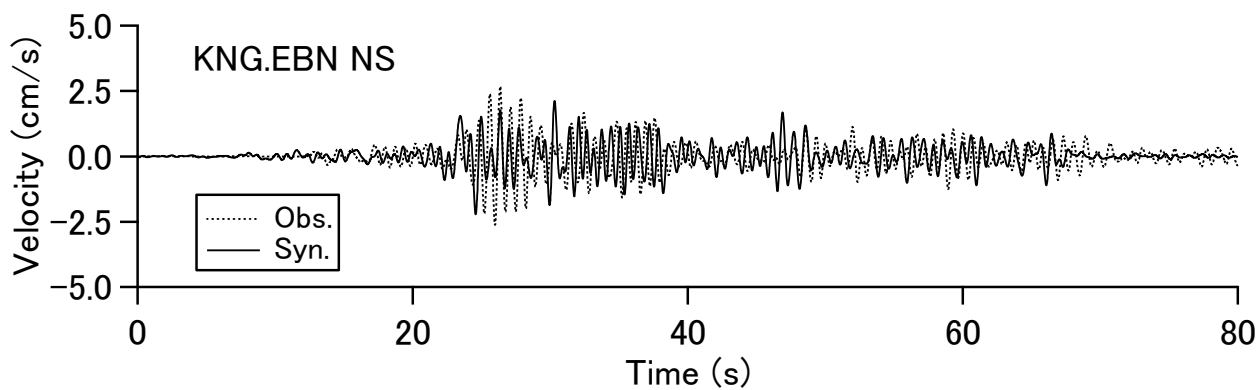
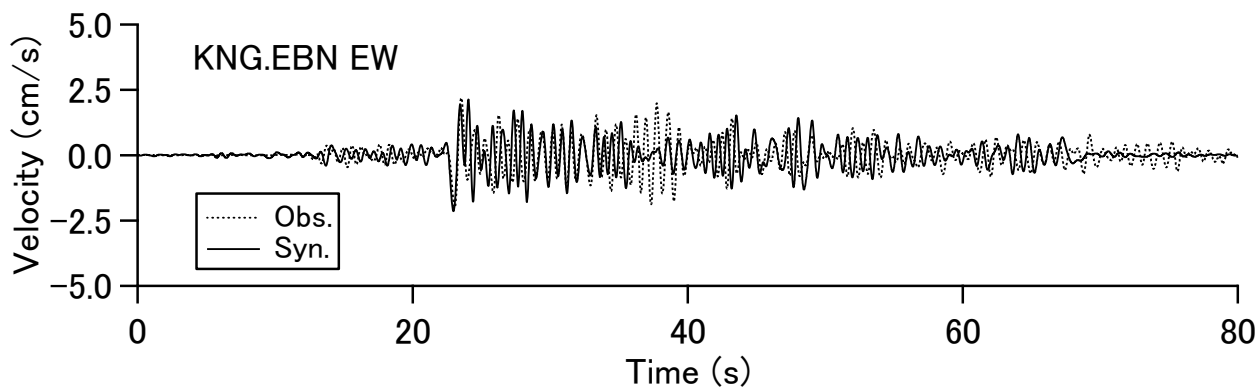
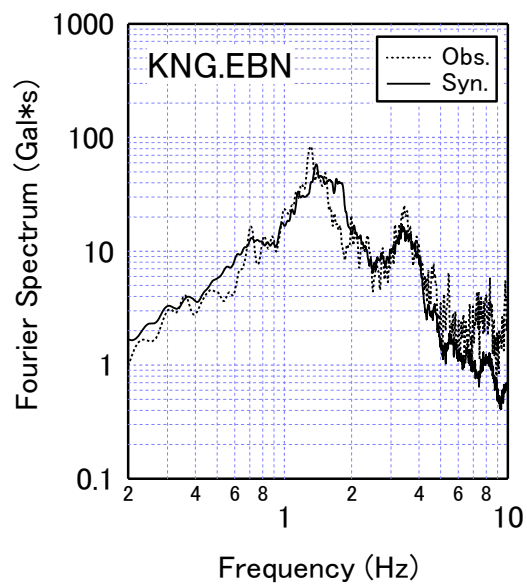
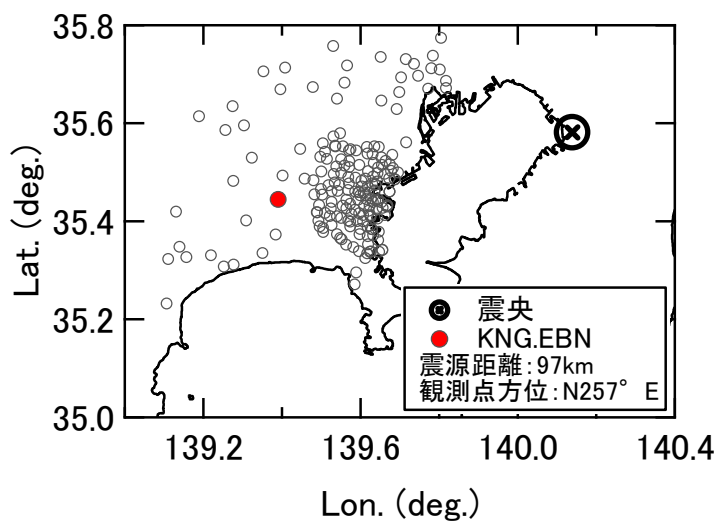
SK-net観測点での計算結果は高密度かつ震央近くの計算結果という意味で資料として価値がある。地点数が多いため本文では地点を絞ったが、付録として次ページより対象全地点のフーリエスペクトルと速度波形 (0.2-2Hz) の計算結果と観測記録との比較を示すこととした。本文中図-3.11と重複する地点も示している。



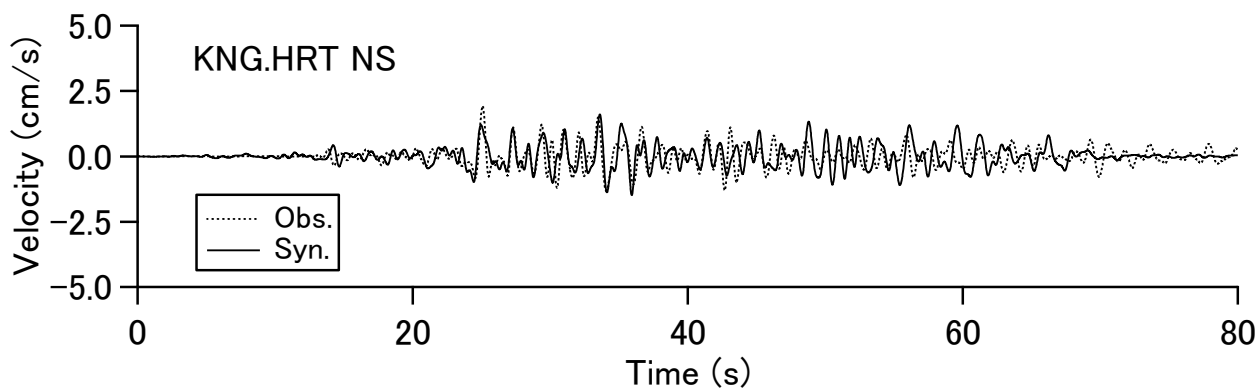
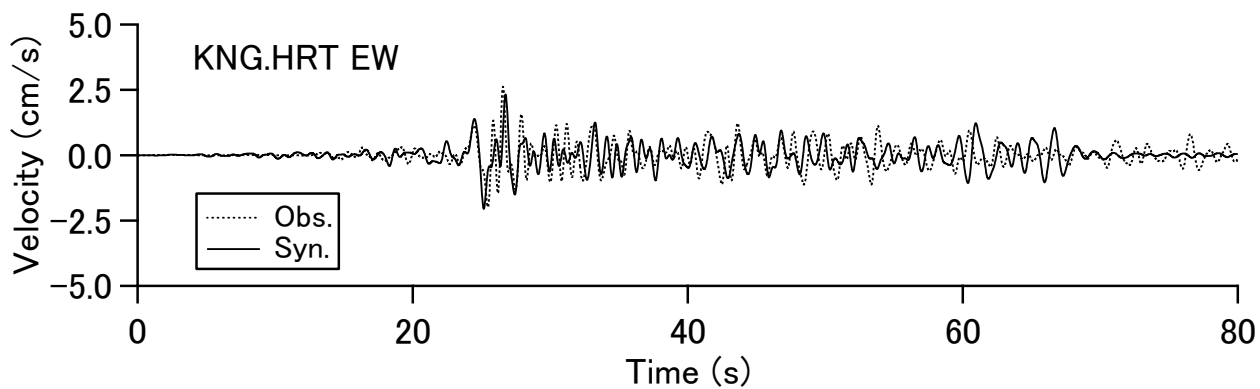
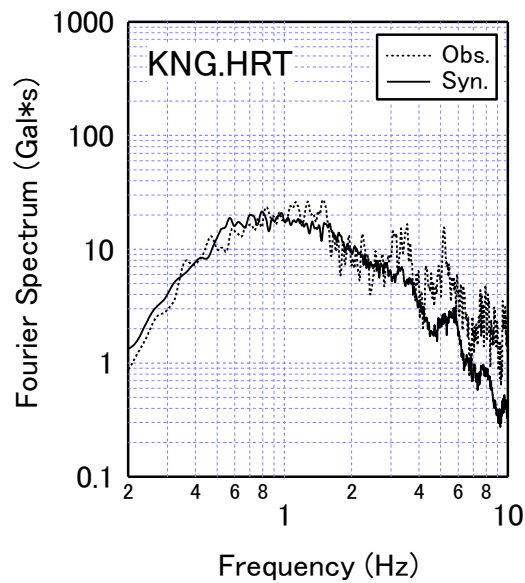
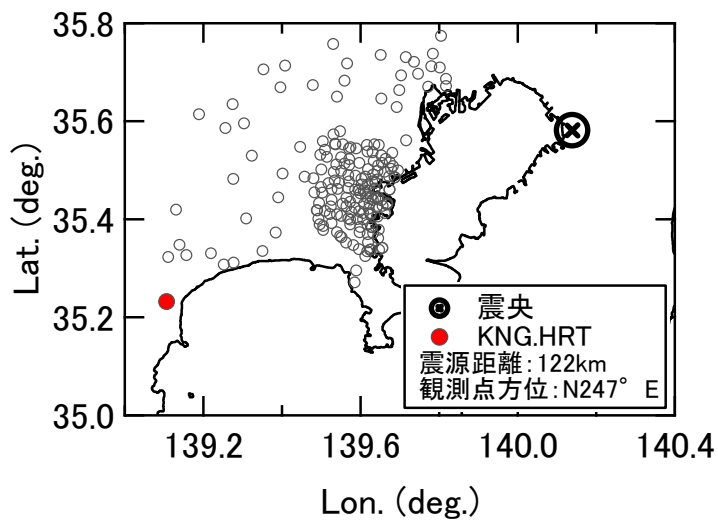


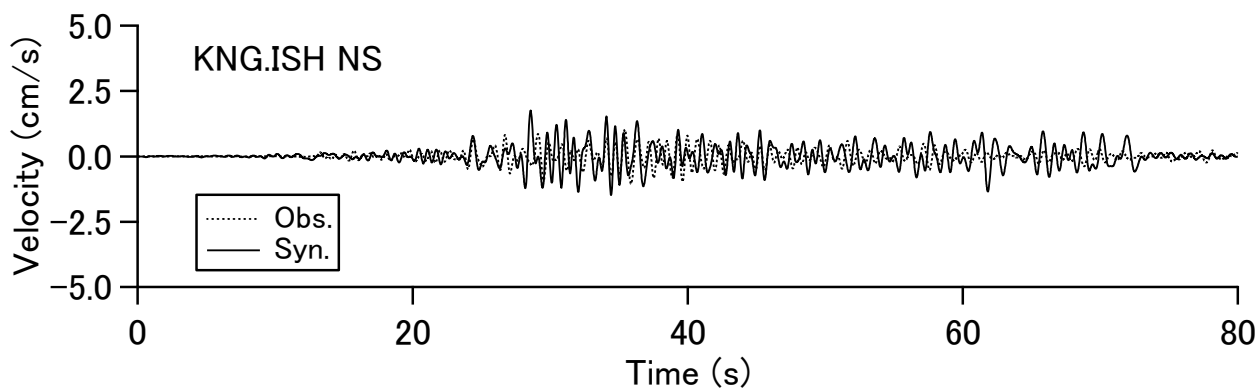
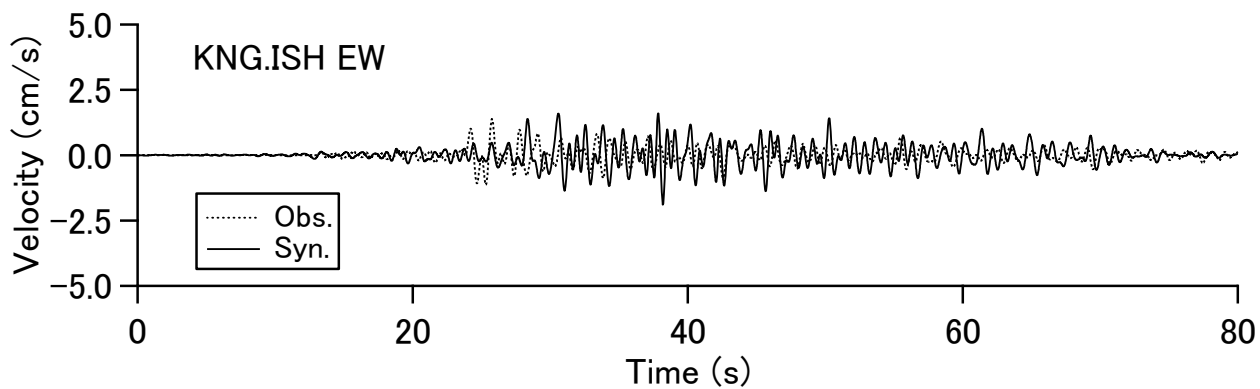
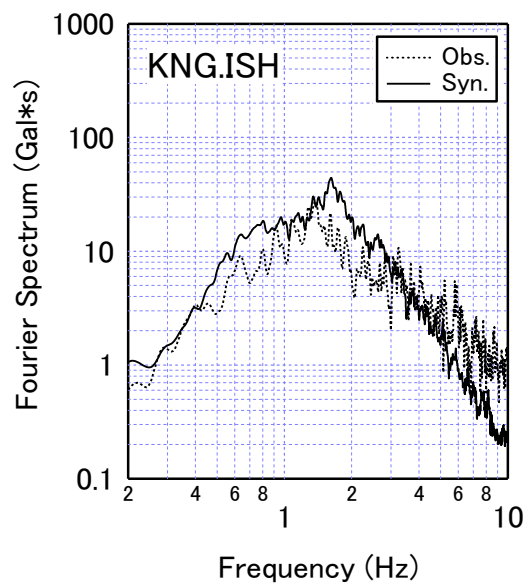
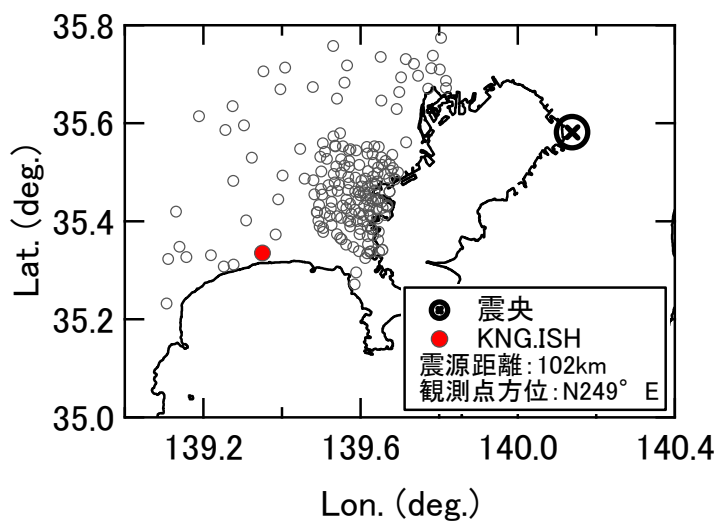


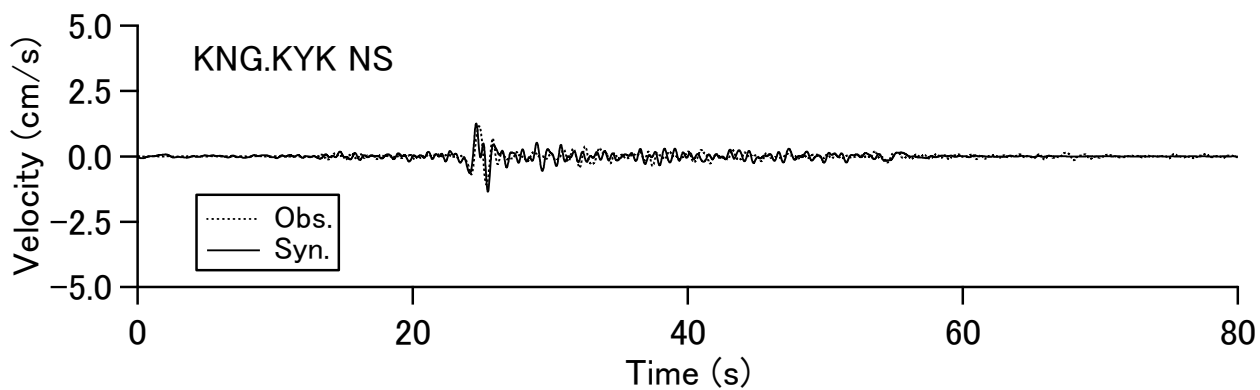
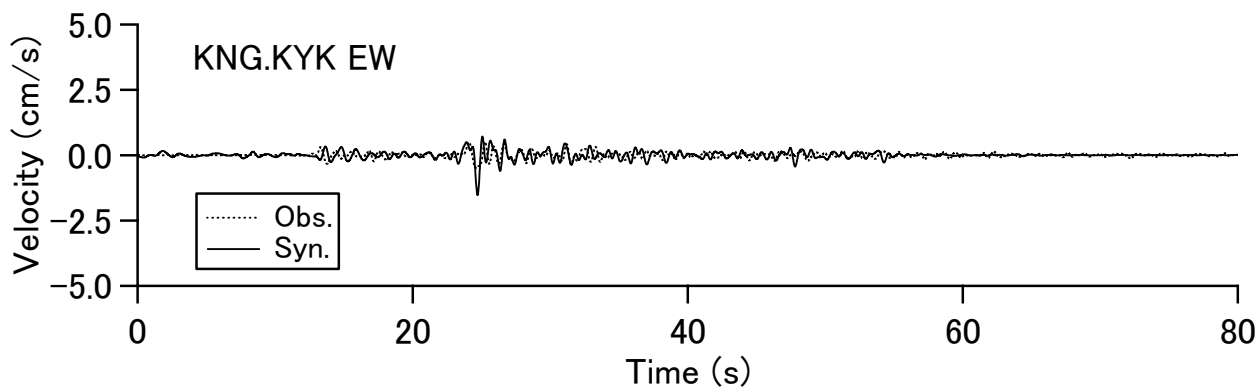
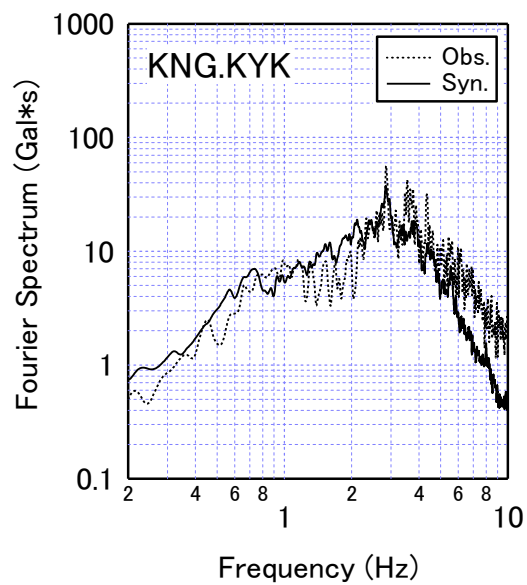
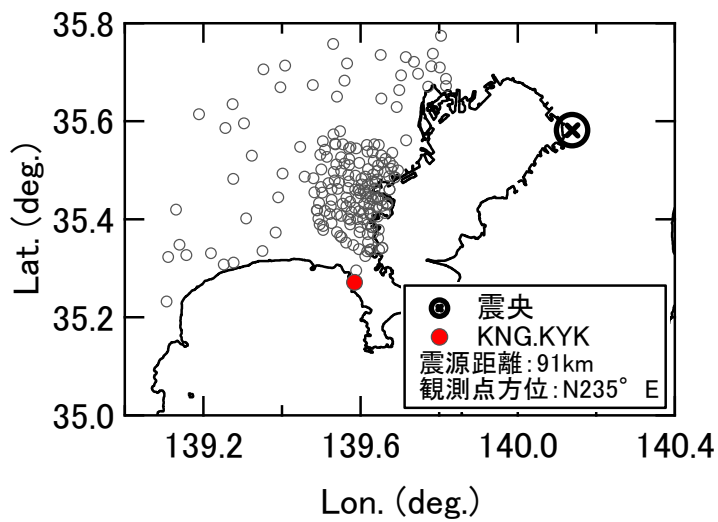


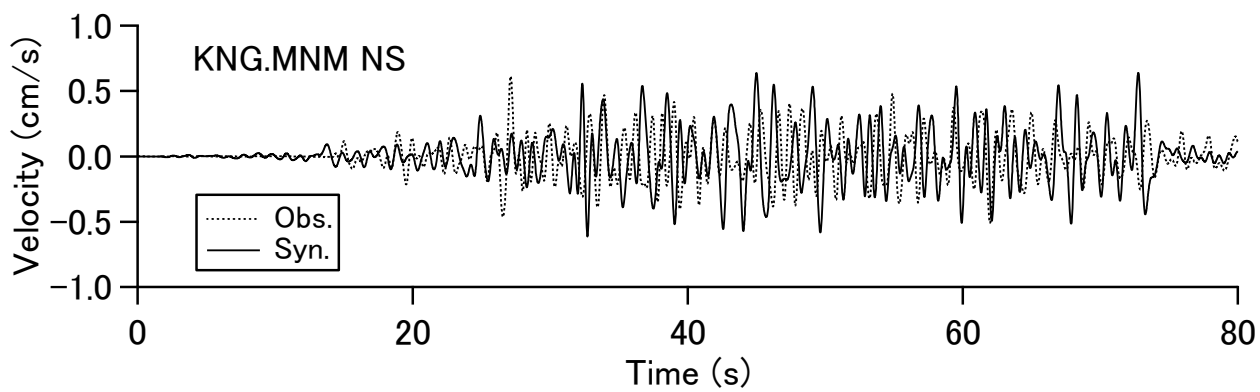
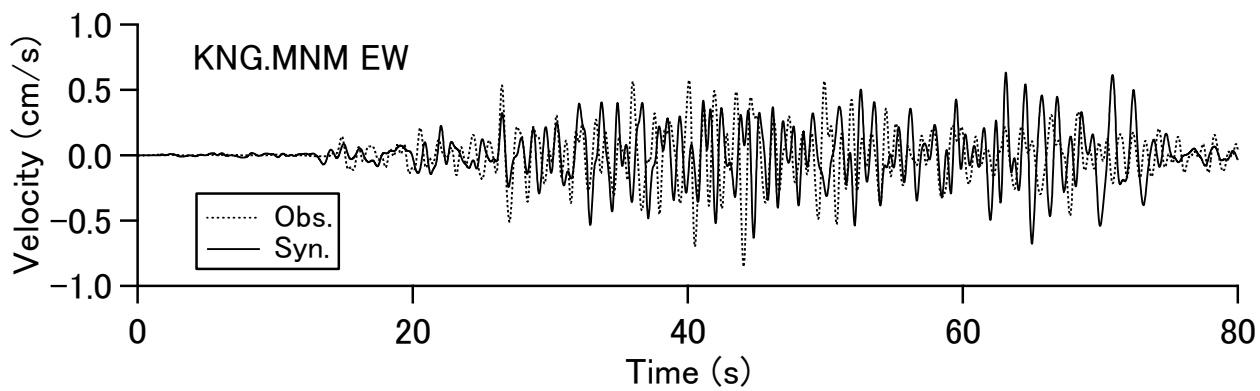
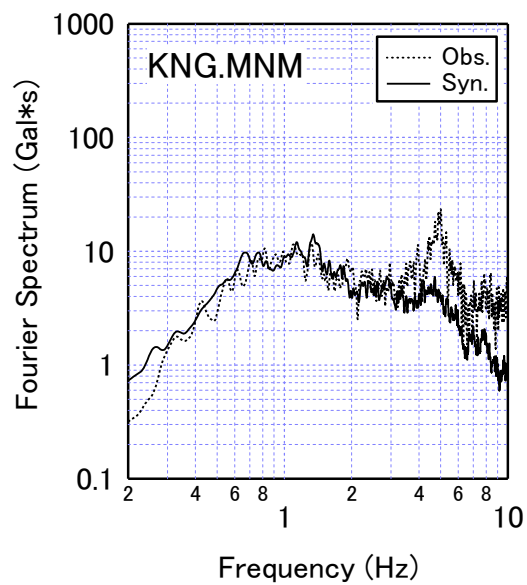
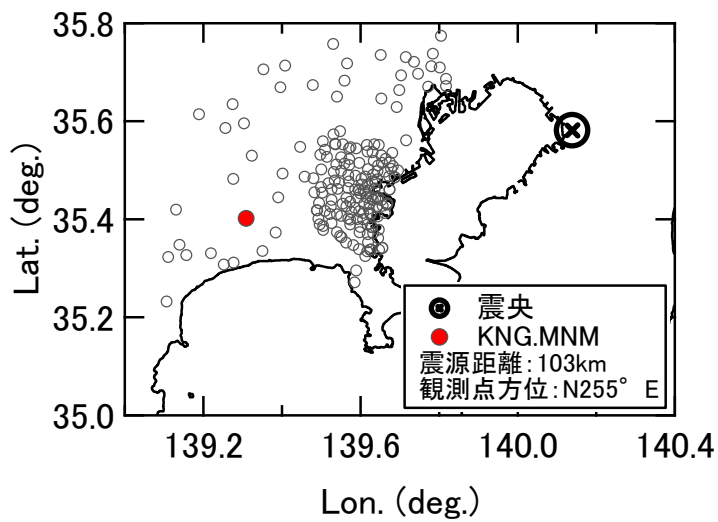


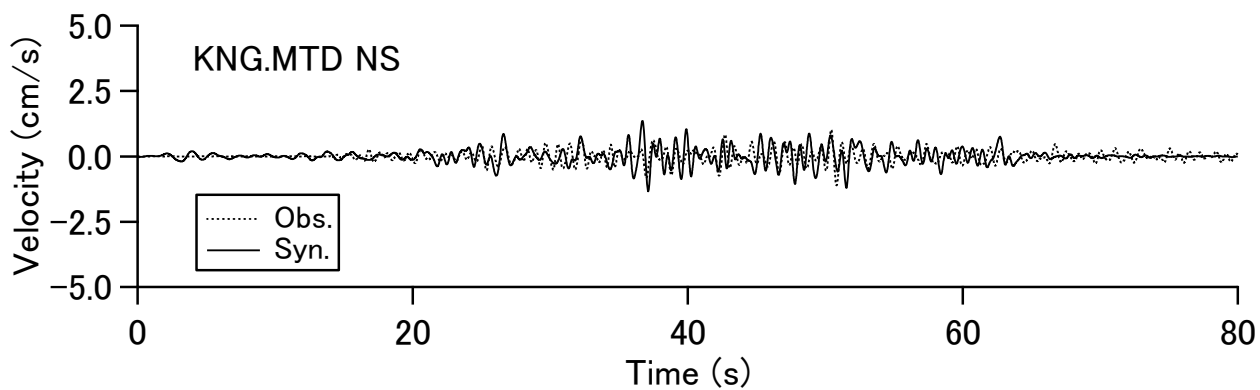
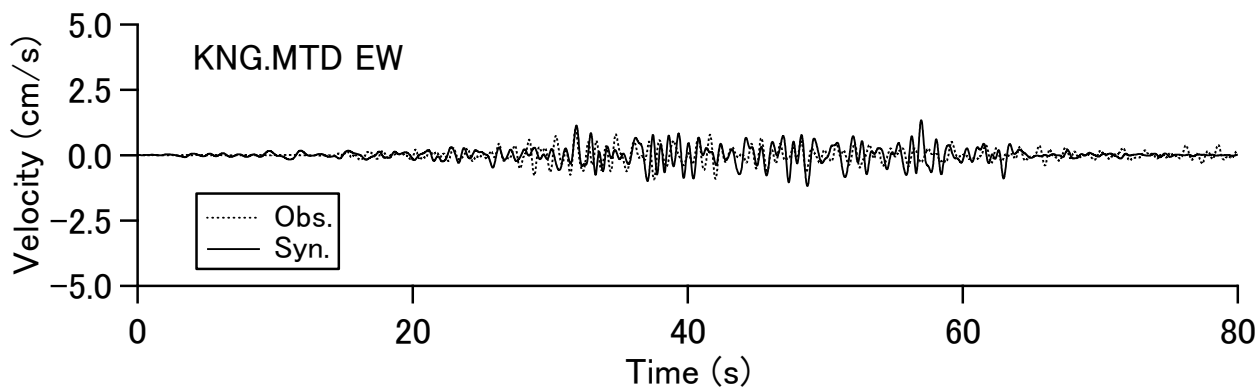
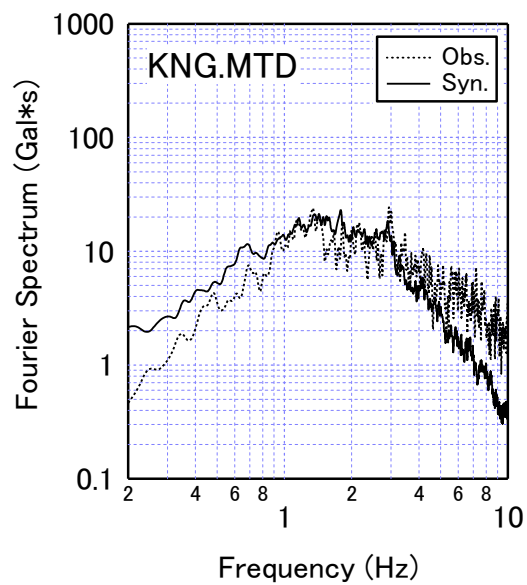
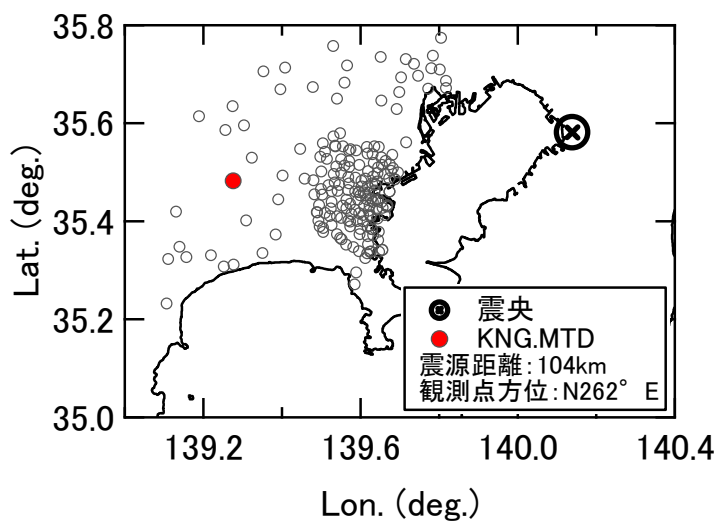


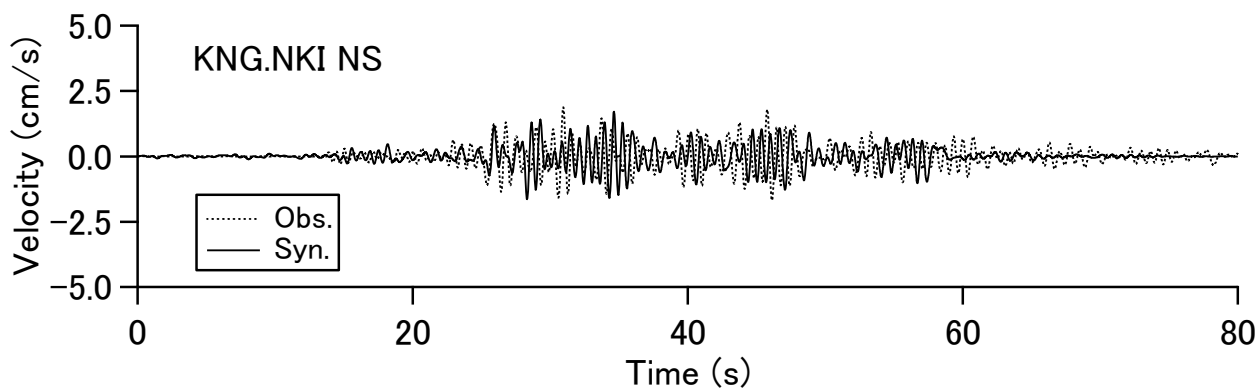
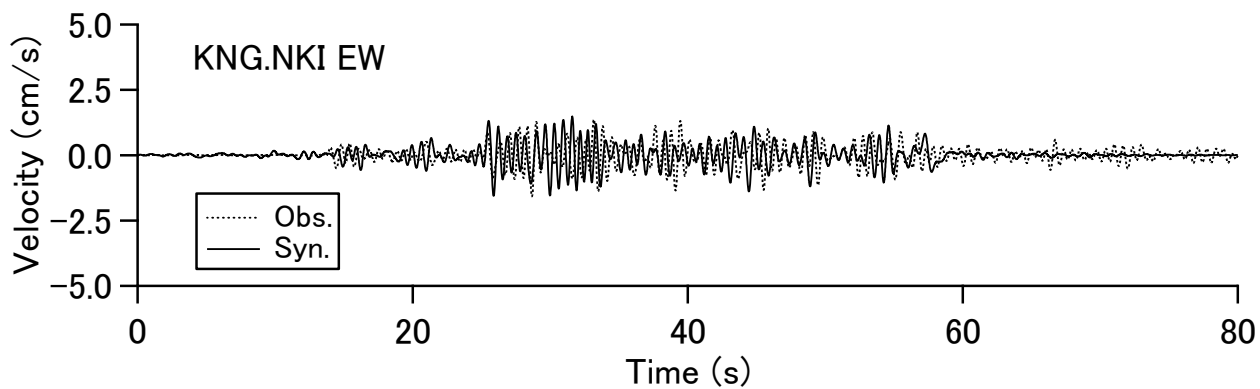
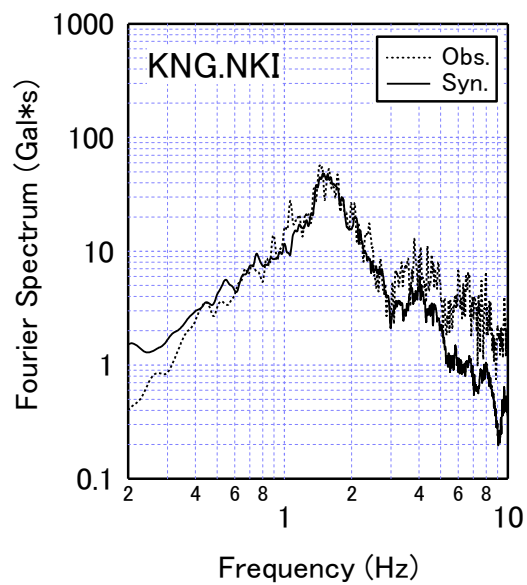
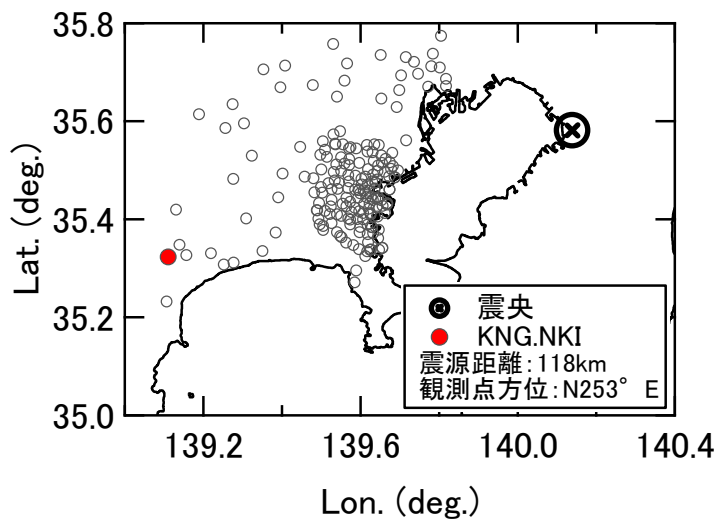


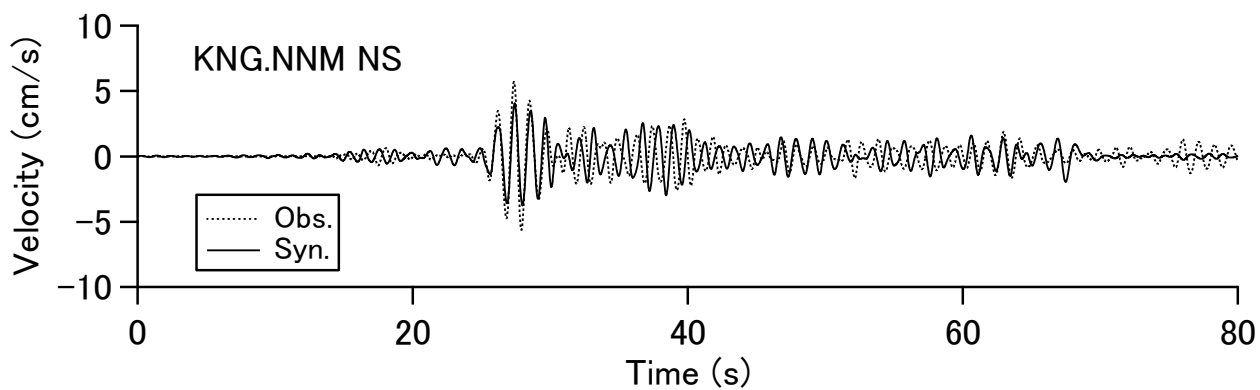
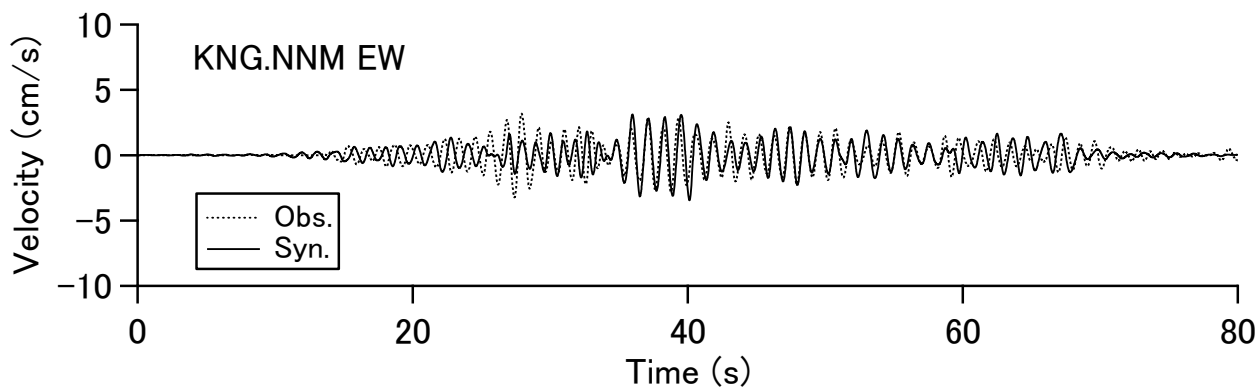
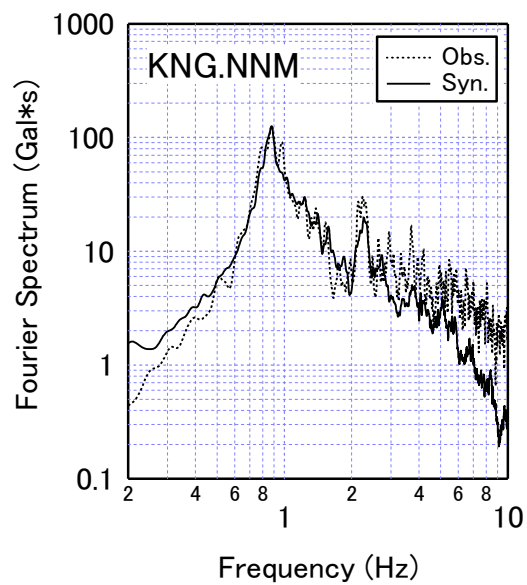
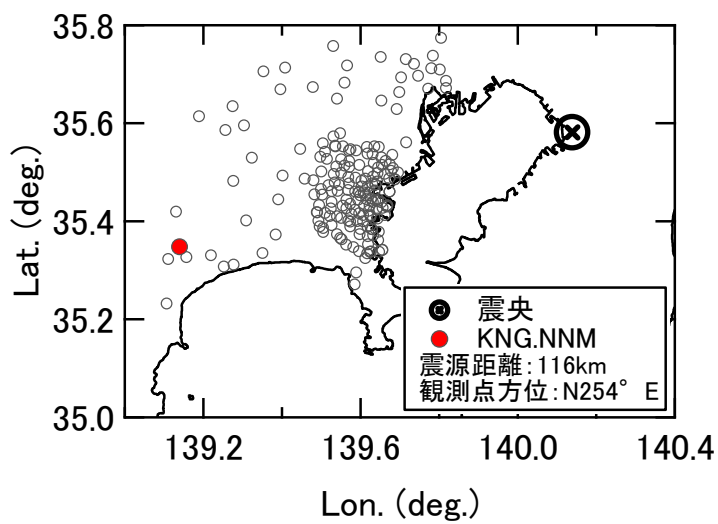


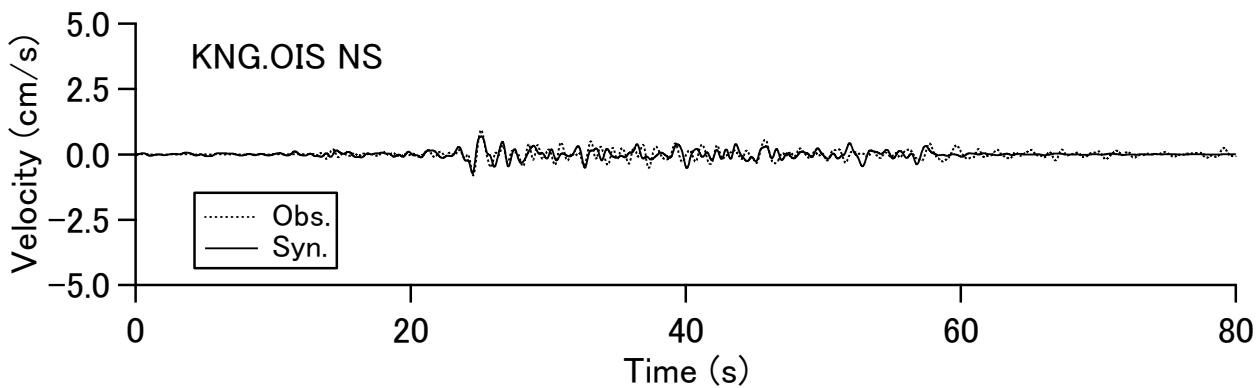
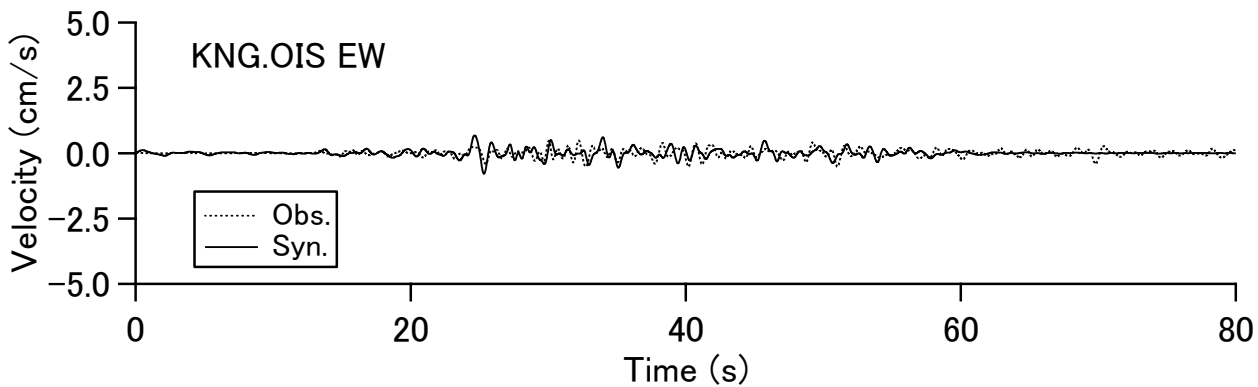
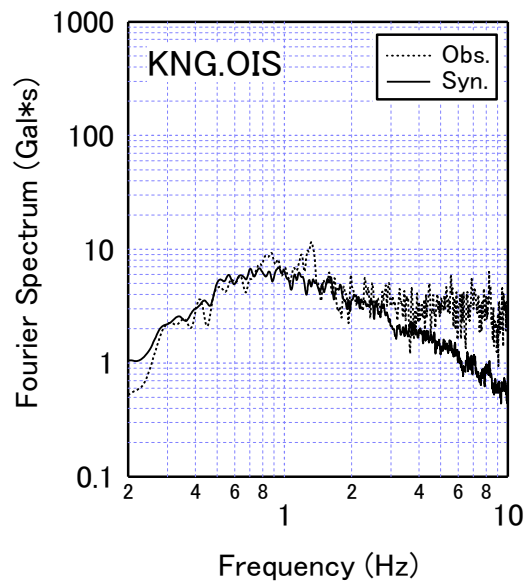
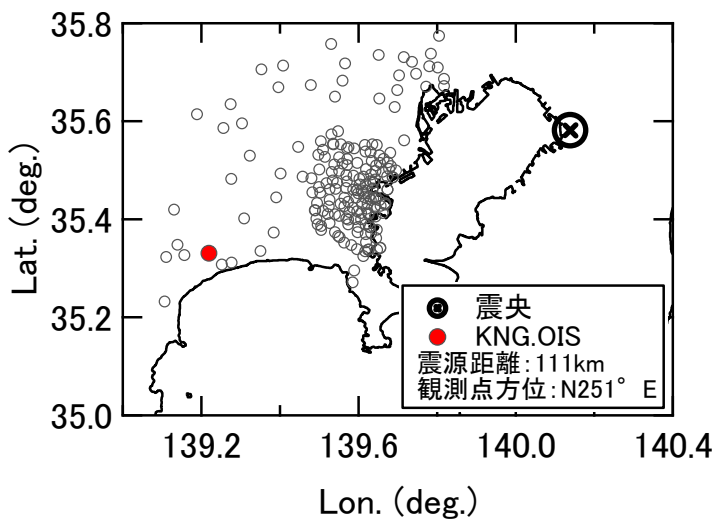




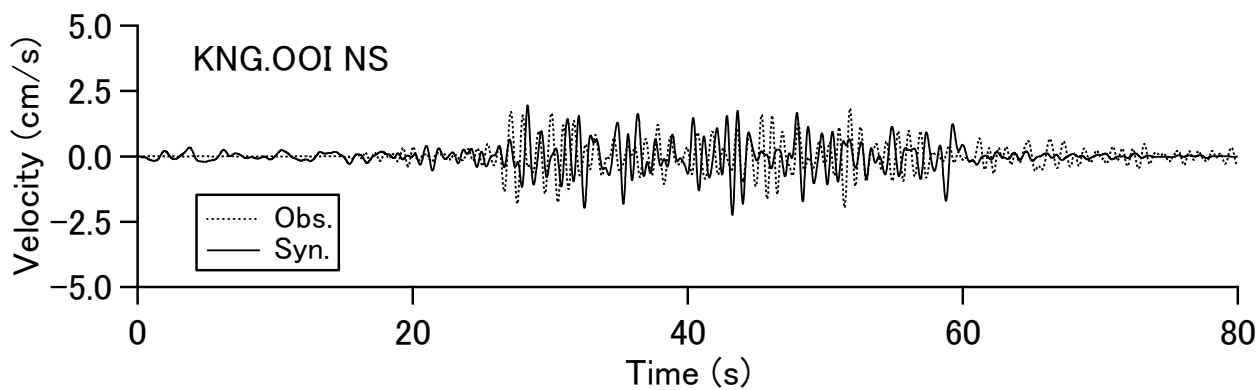
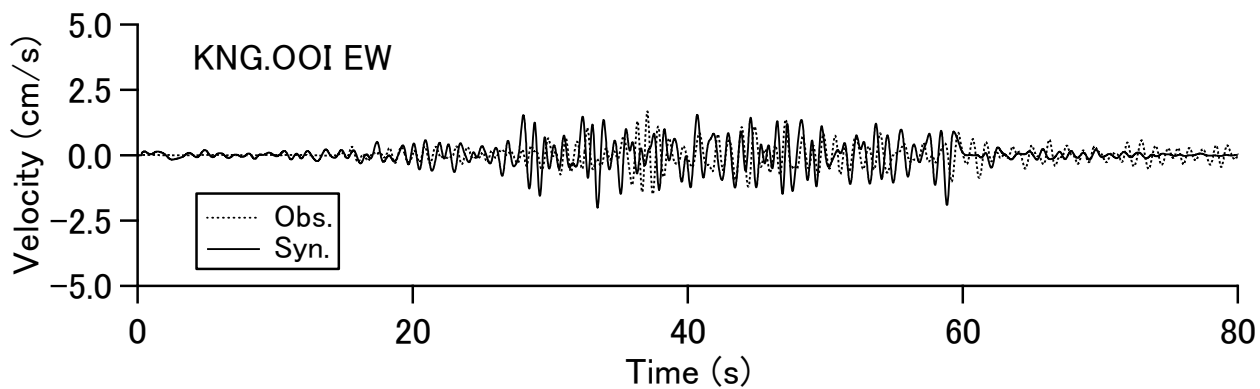
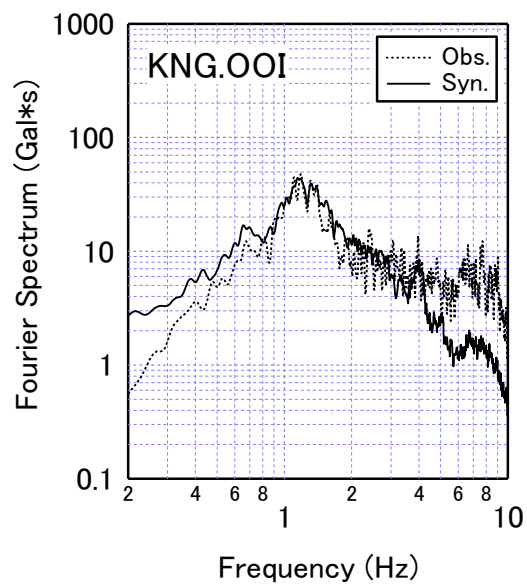
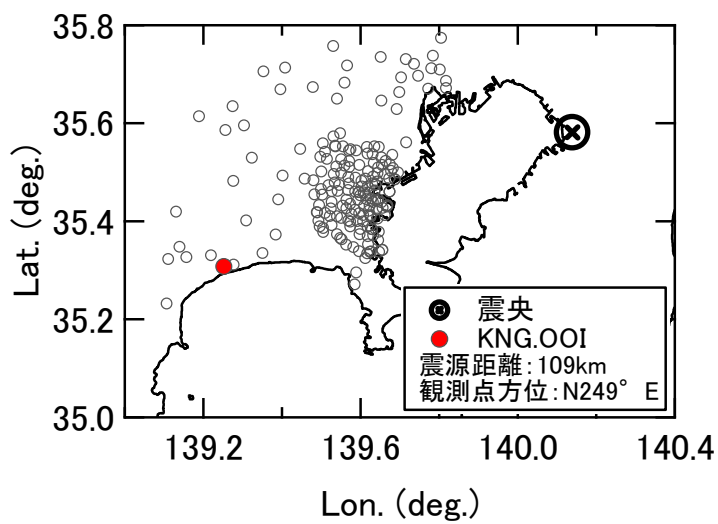


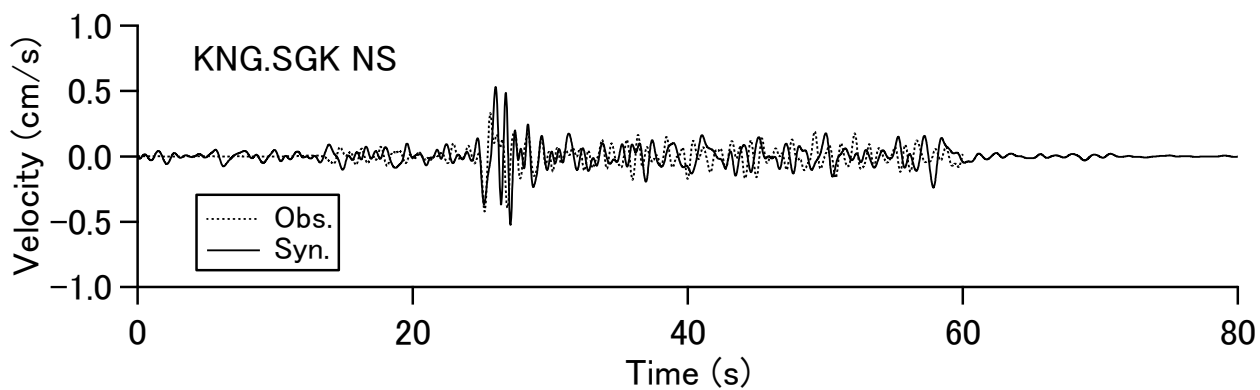
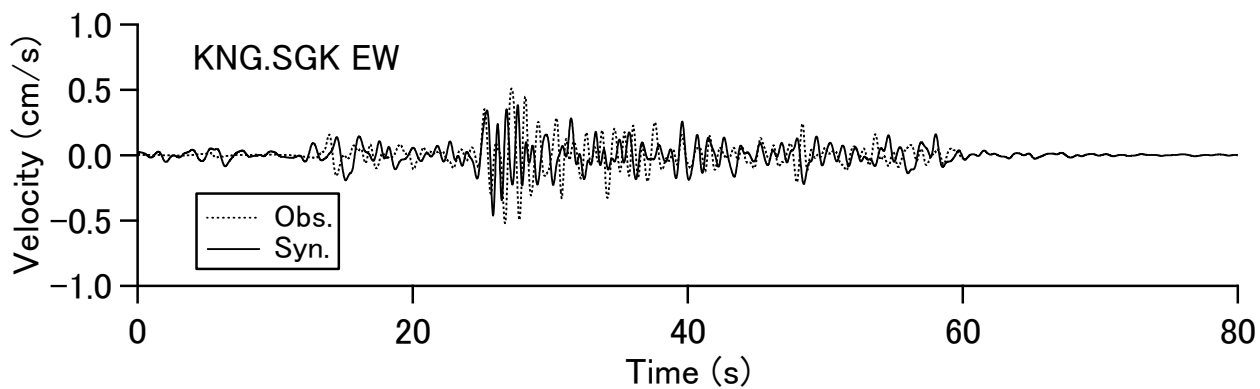
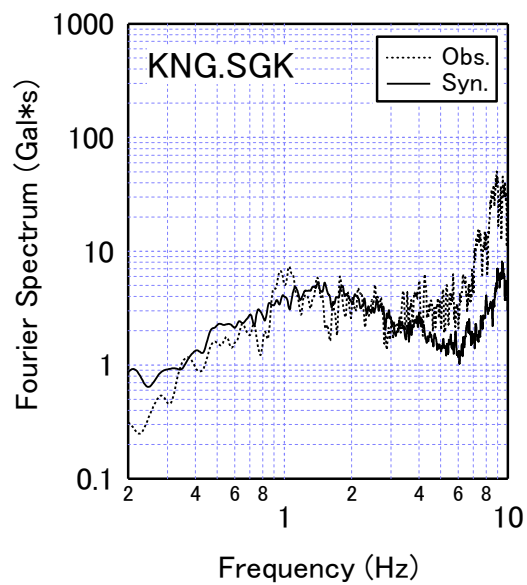
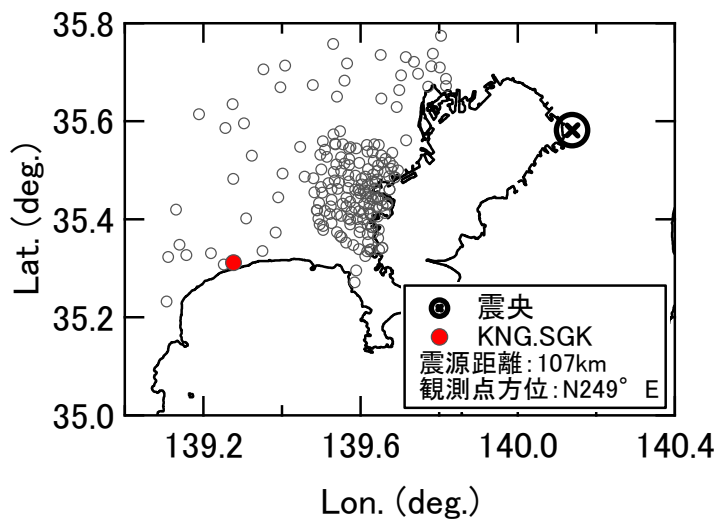


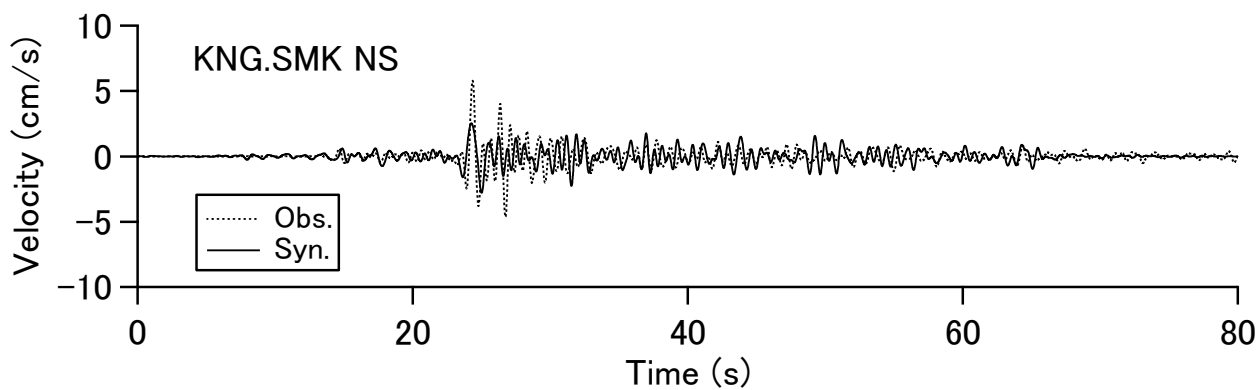
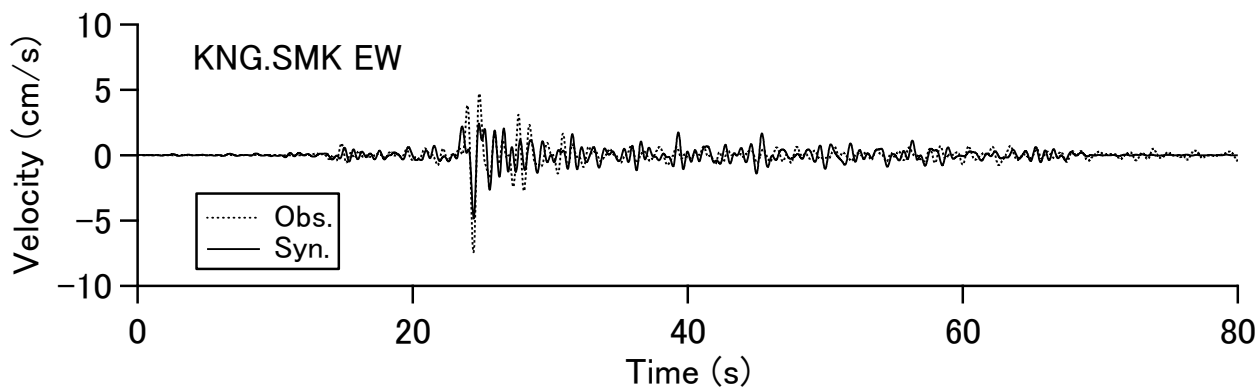
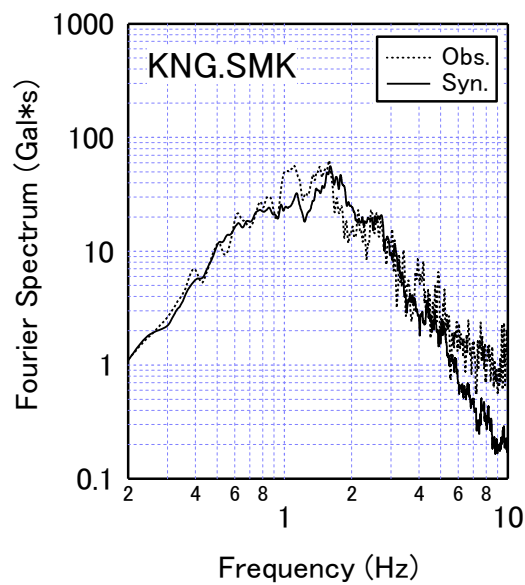
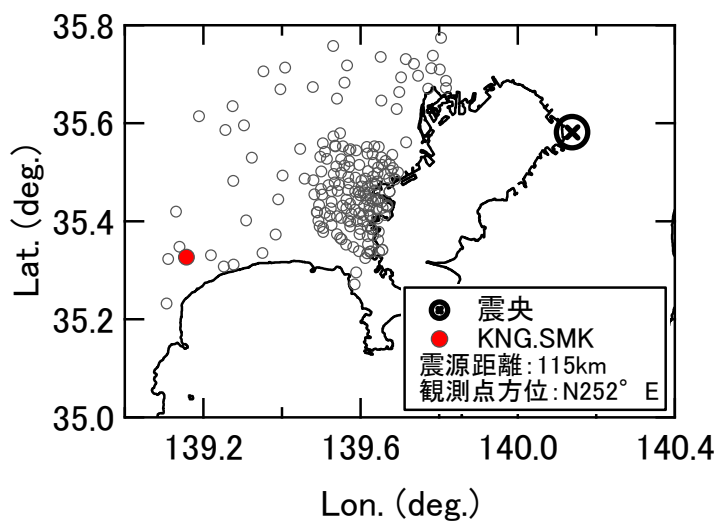


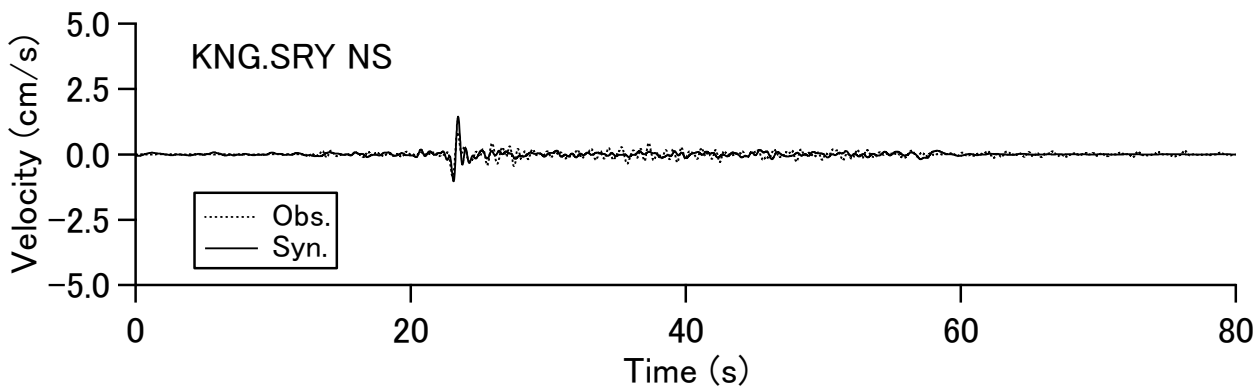
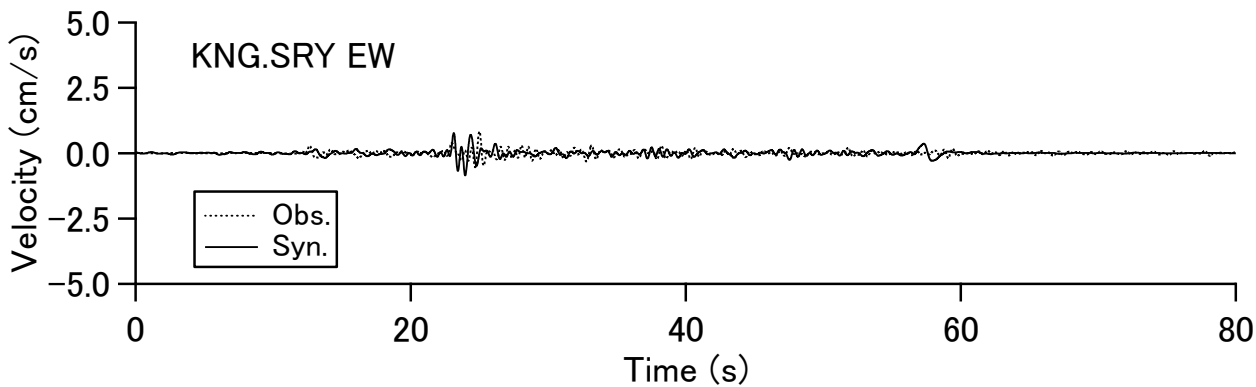
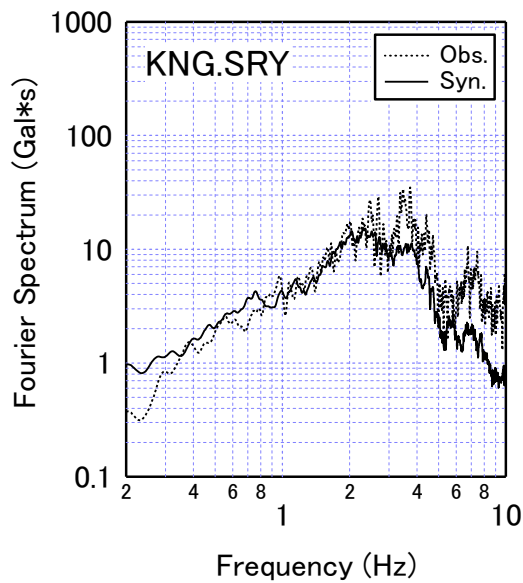
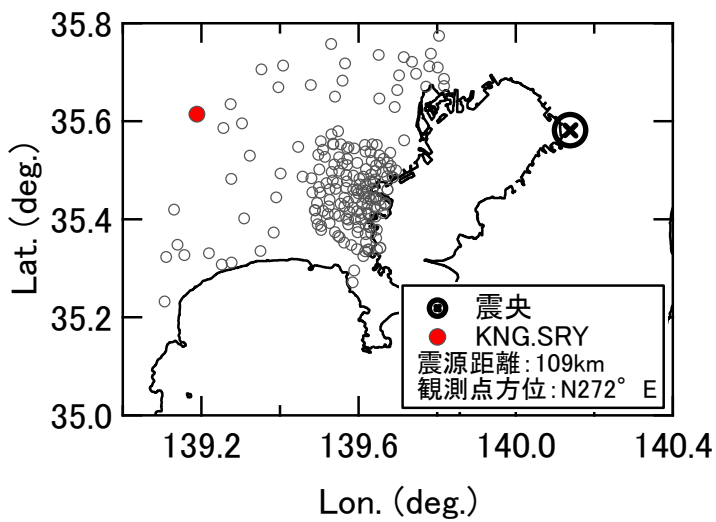


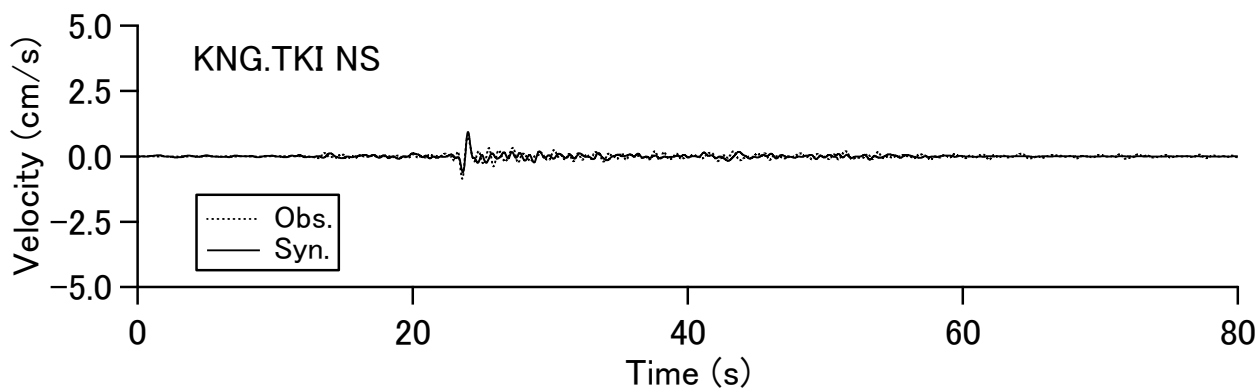
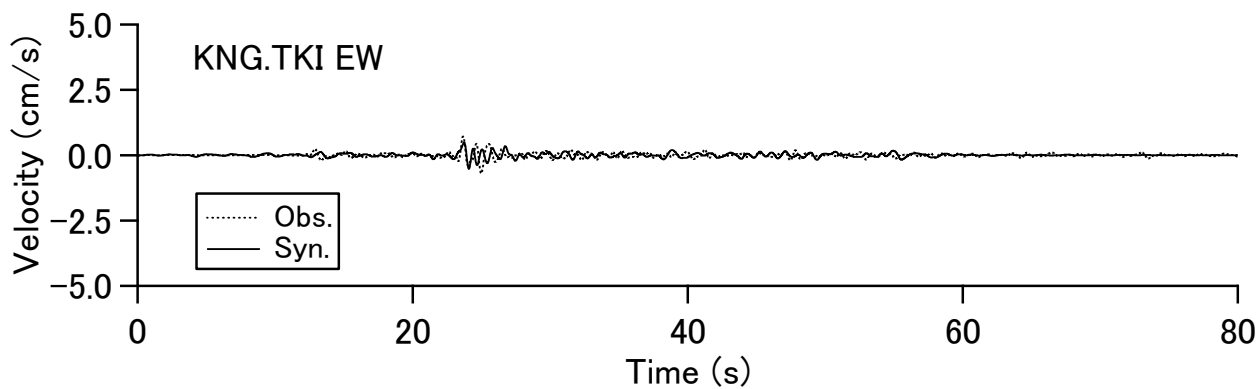
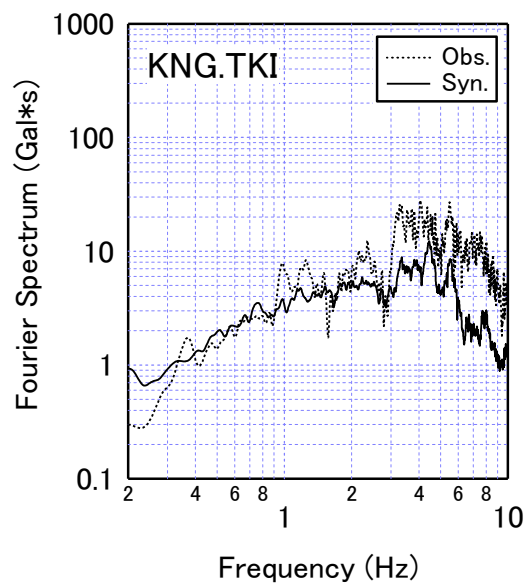
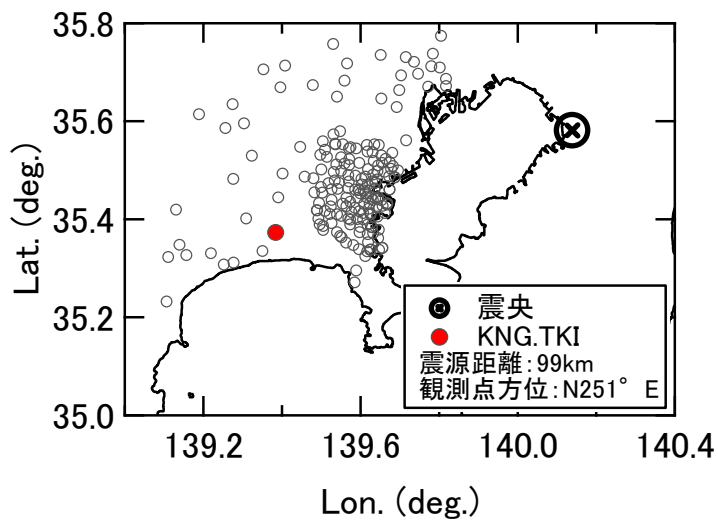


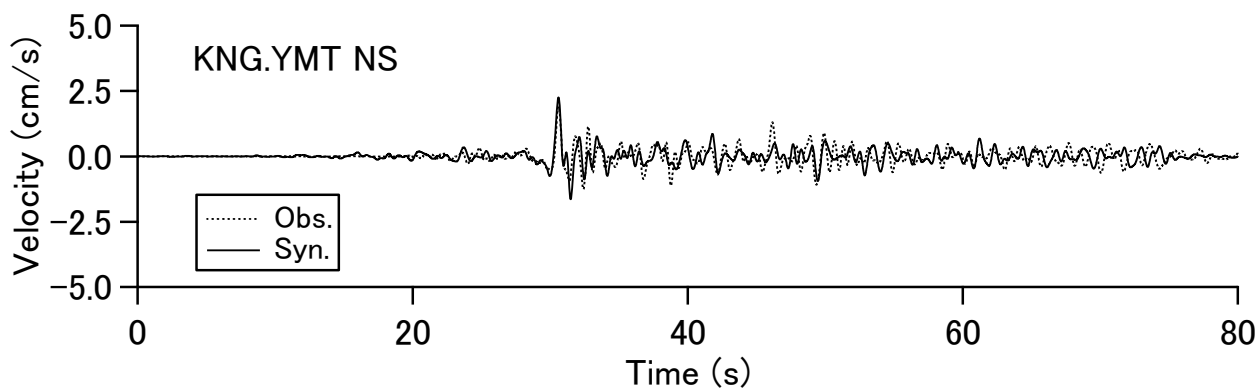
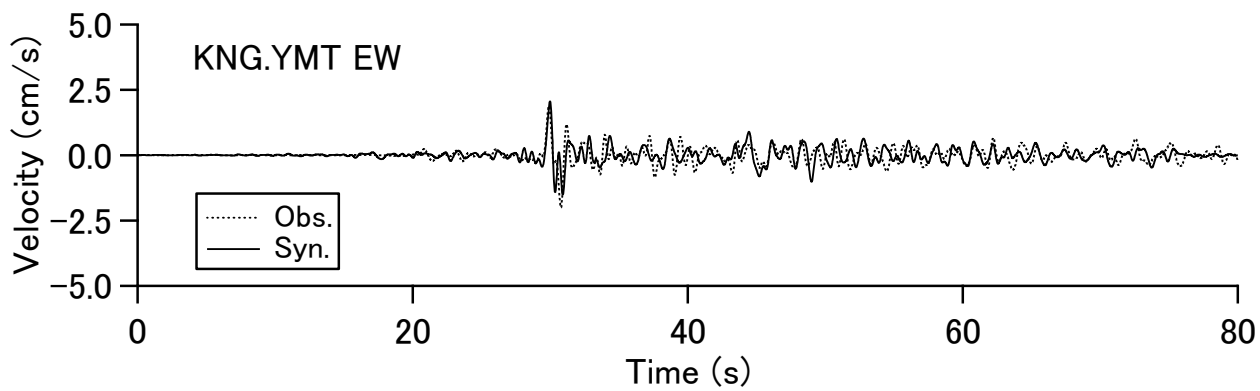
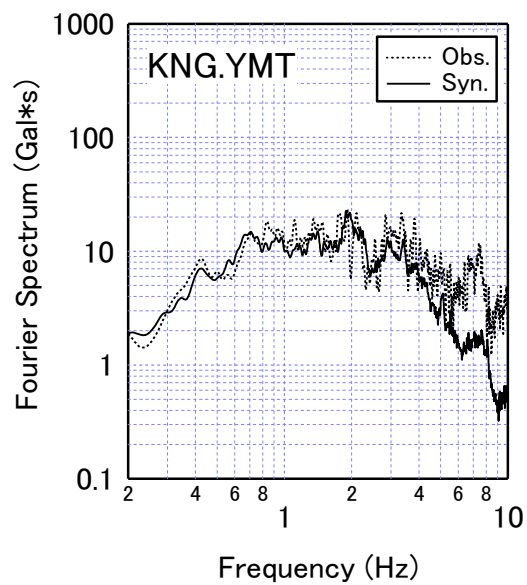
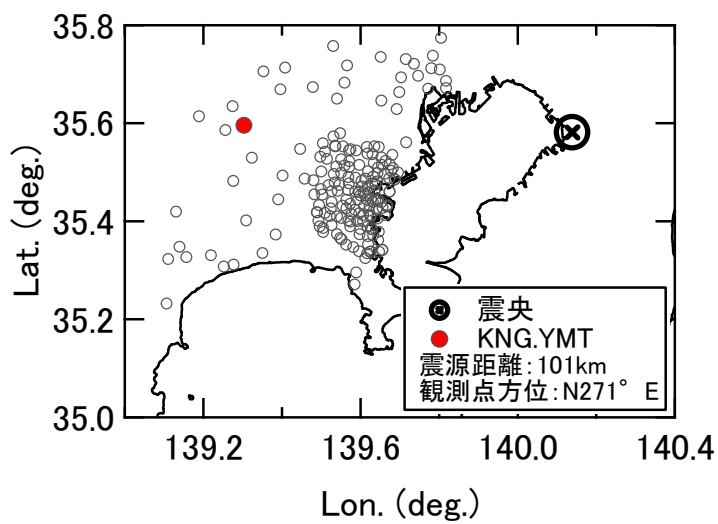


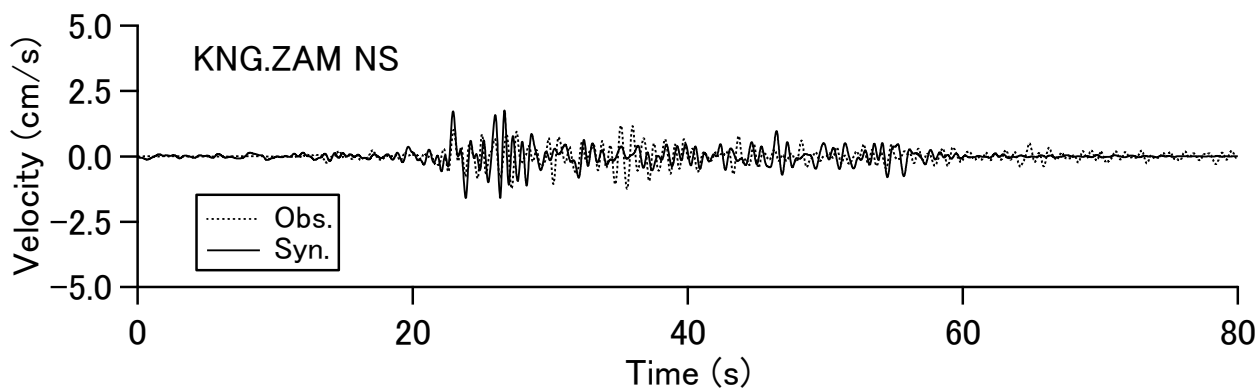
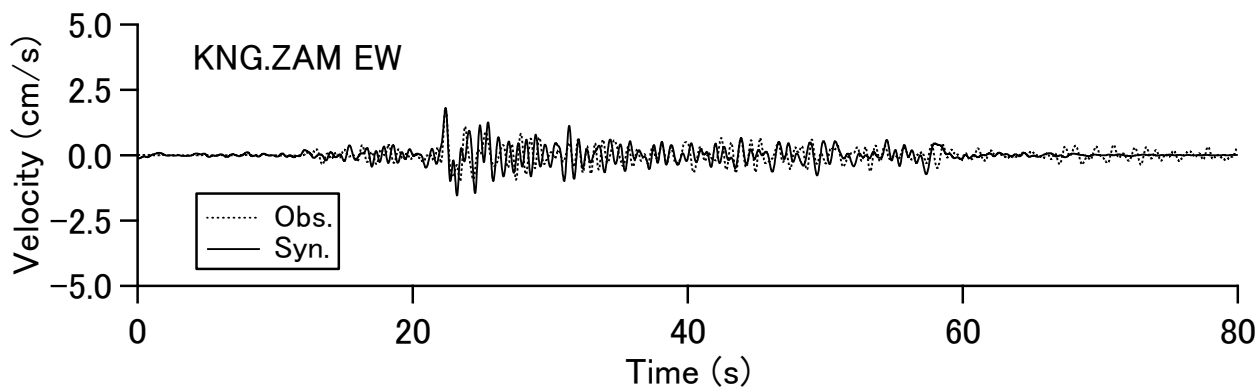
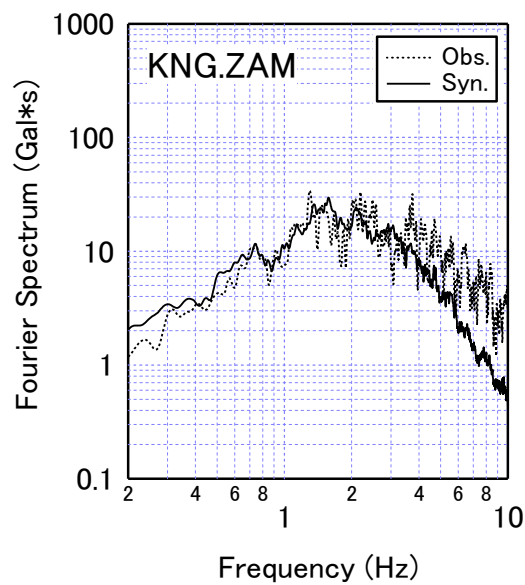
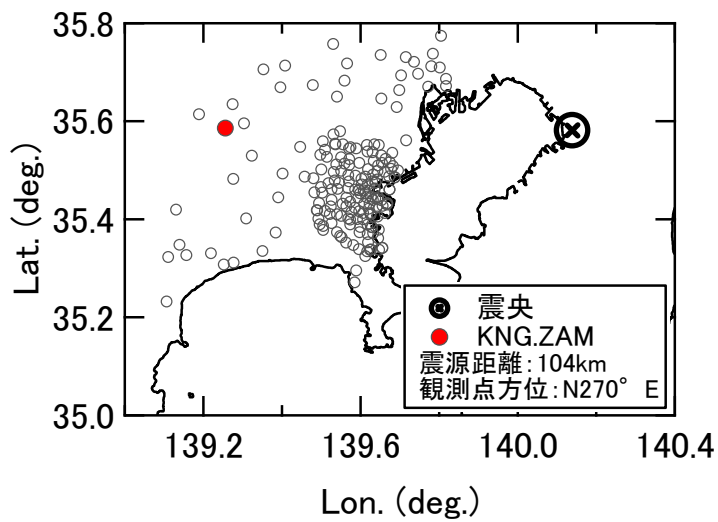


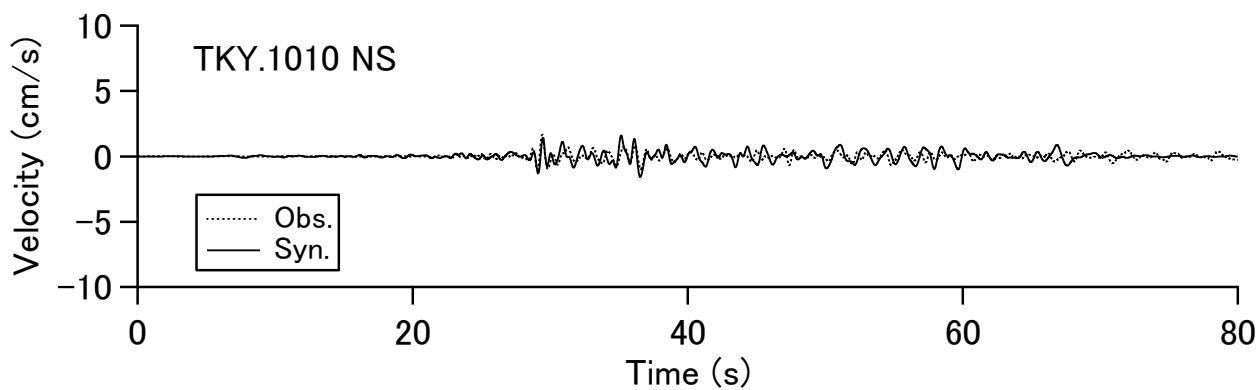
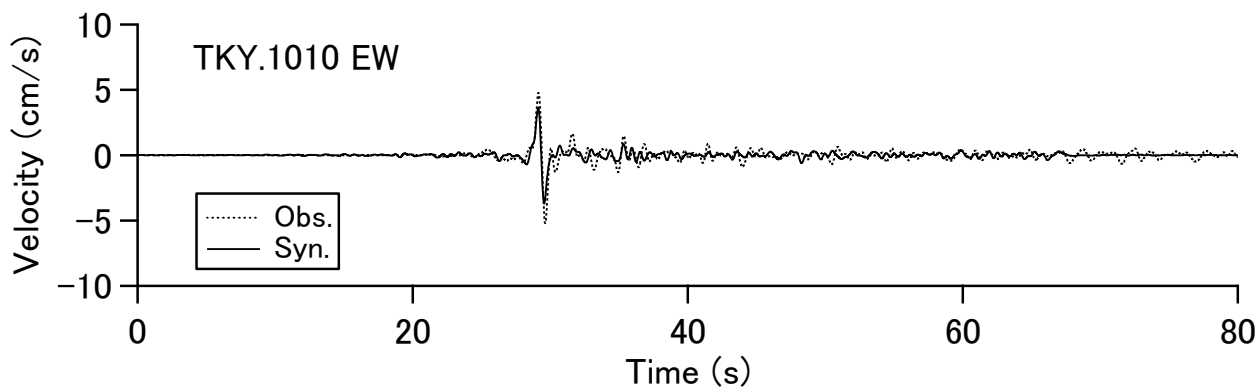
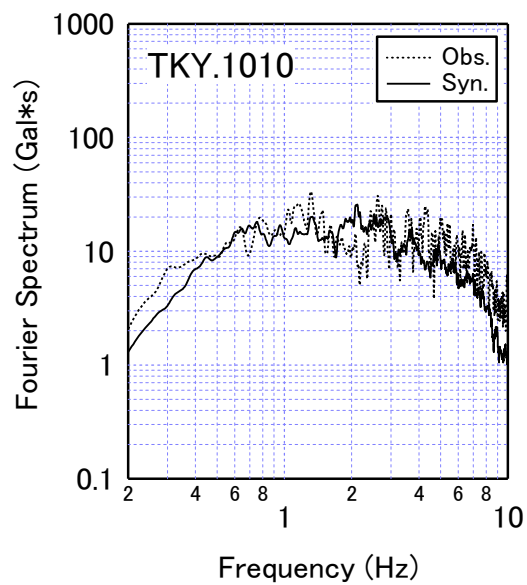
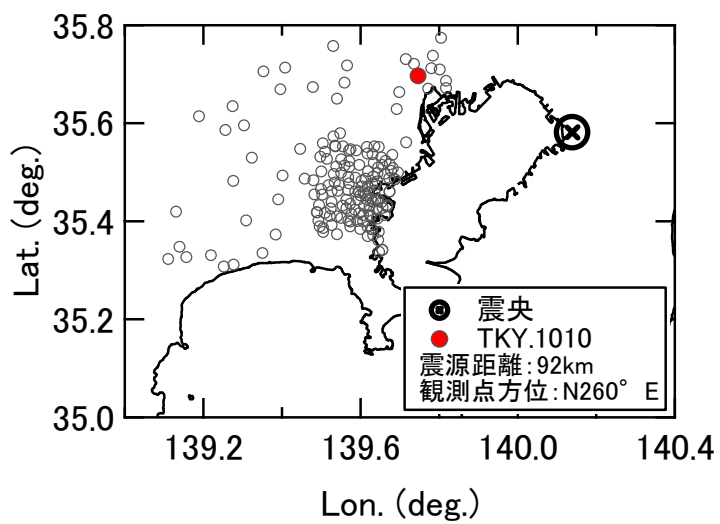




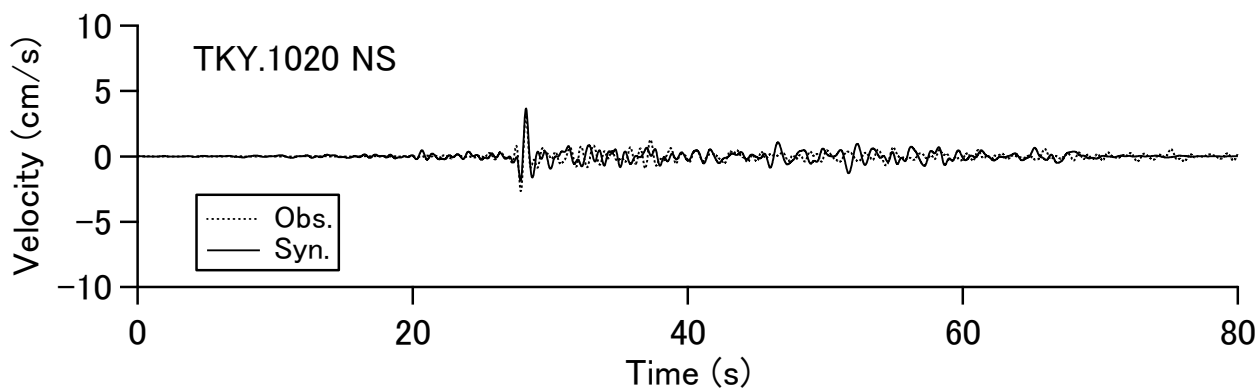
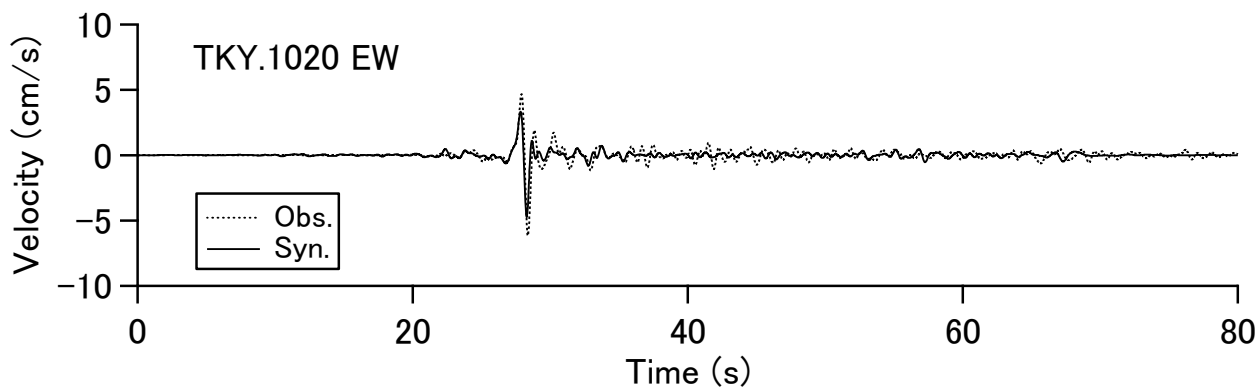
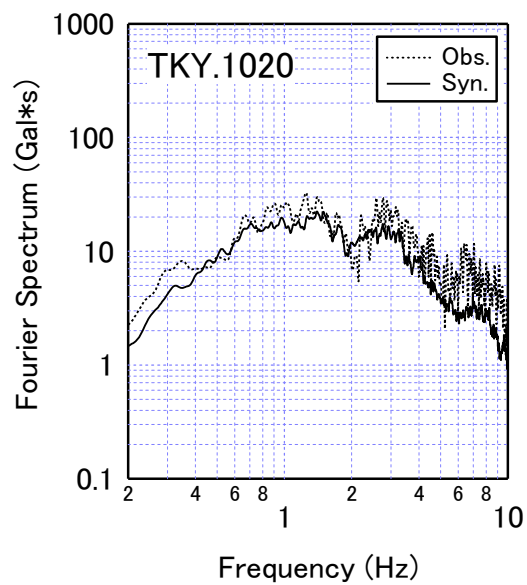
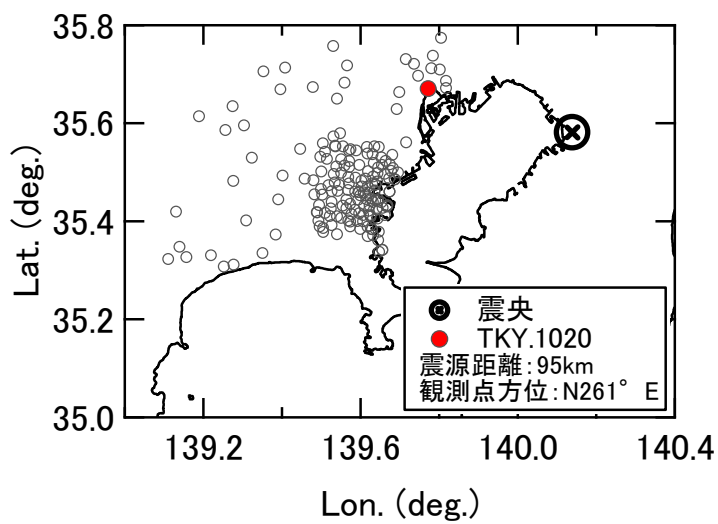


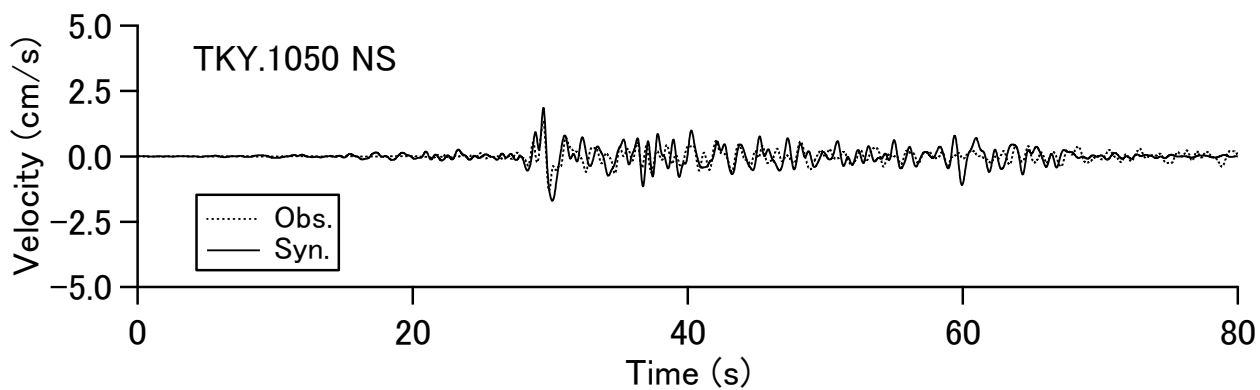
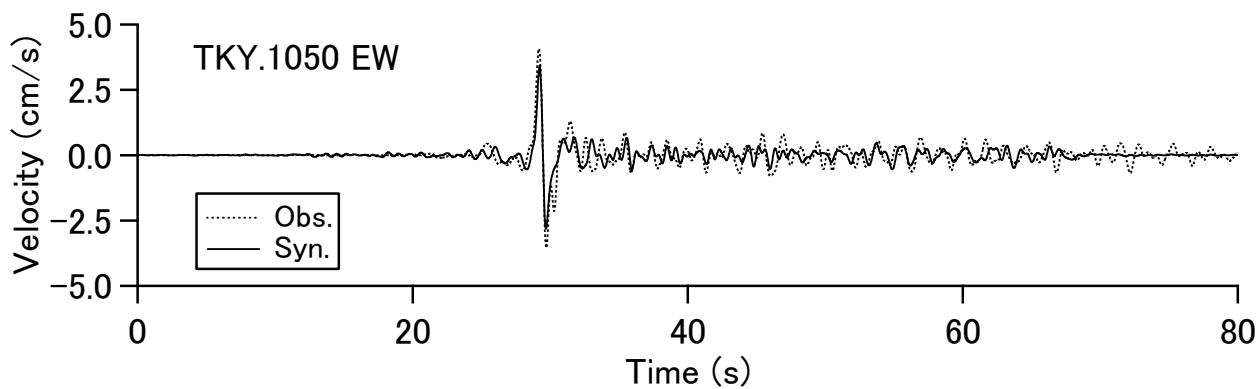
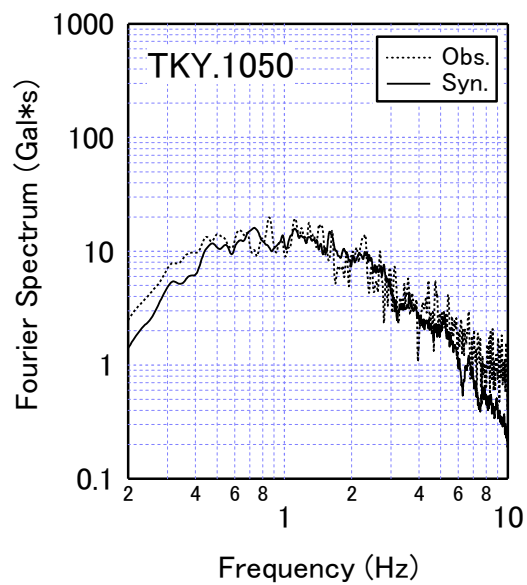
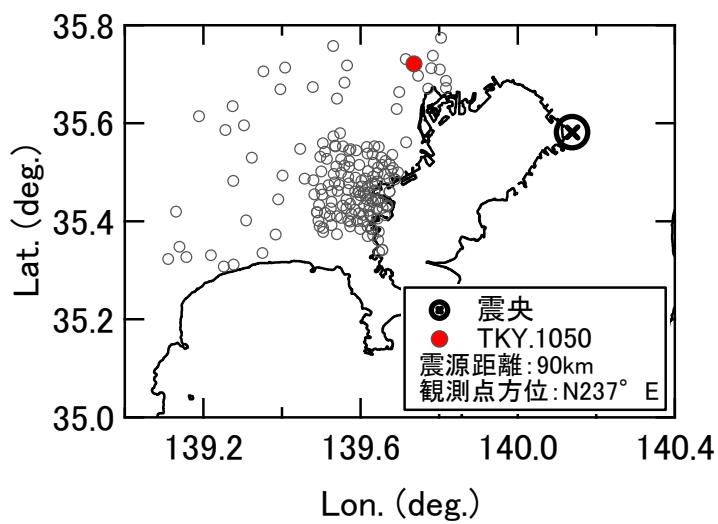


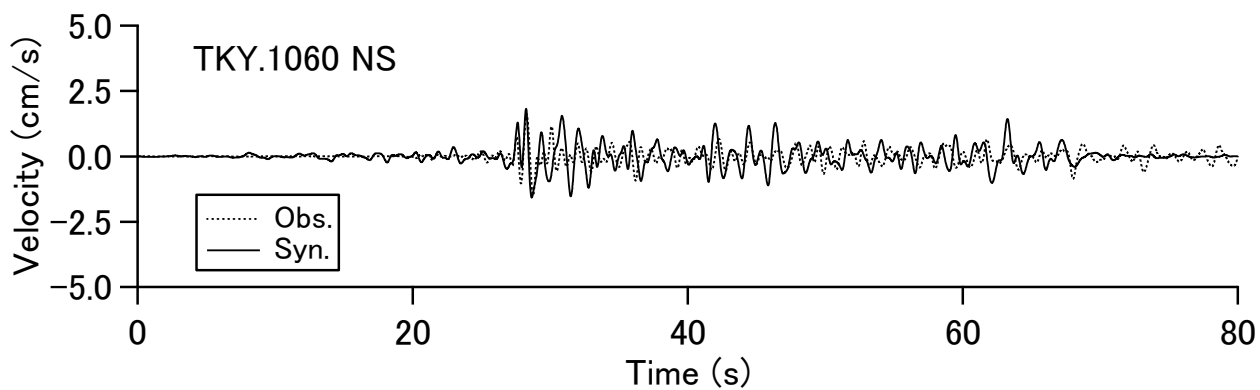
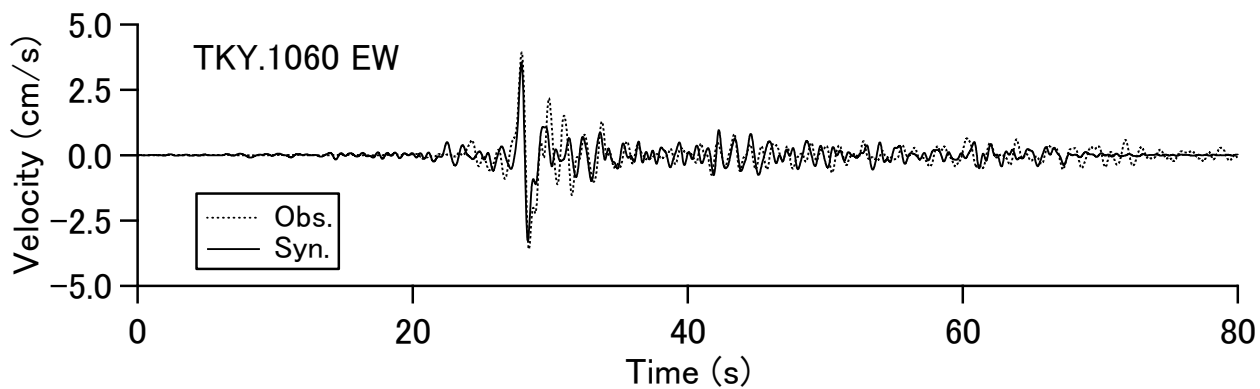
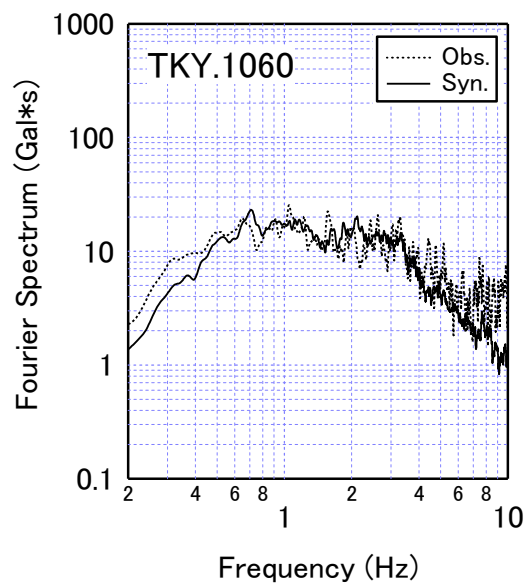
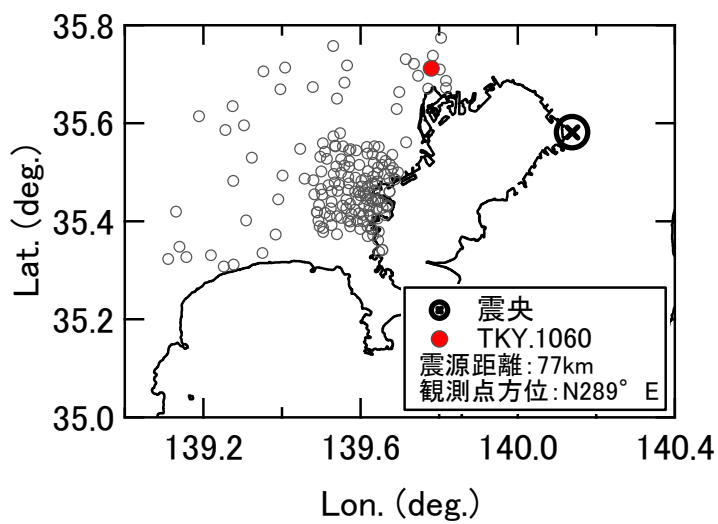


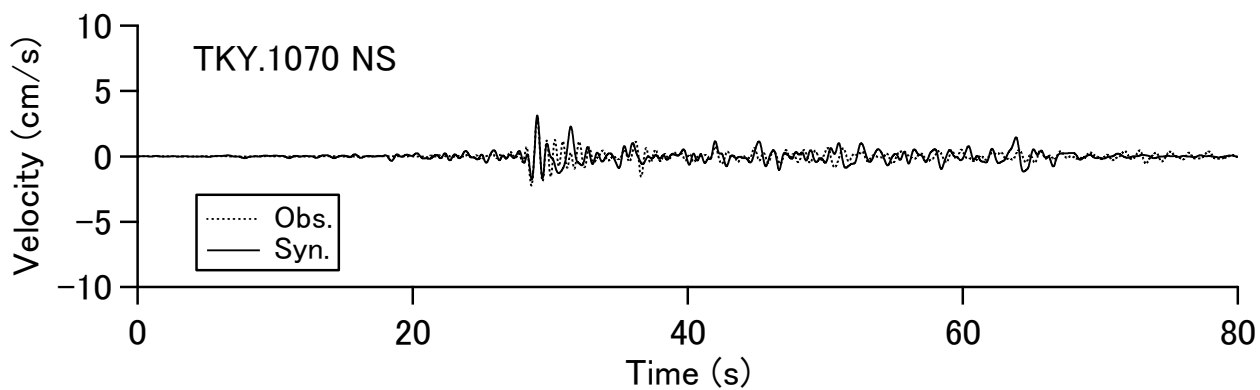
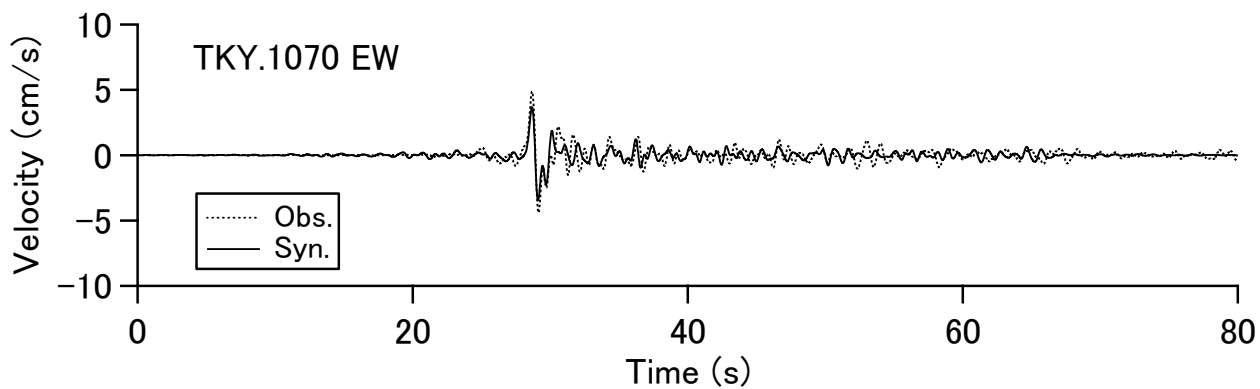
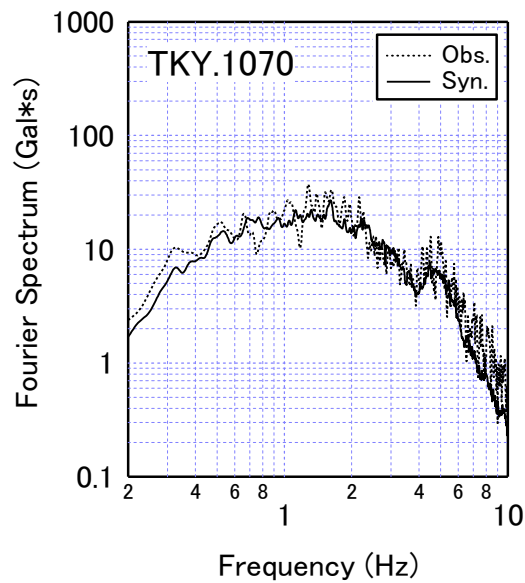
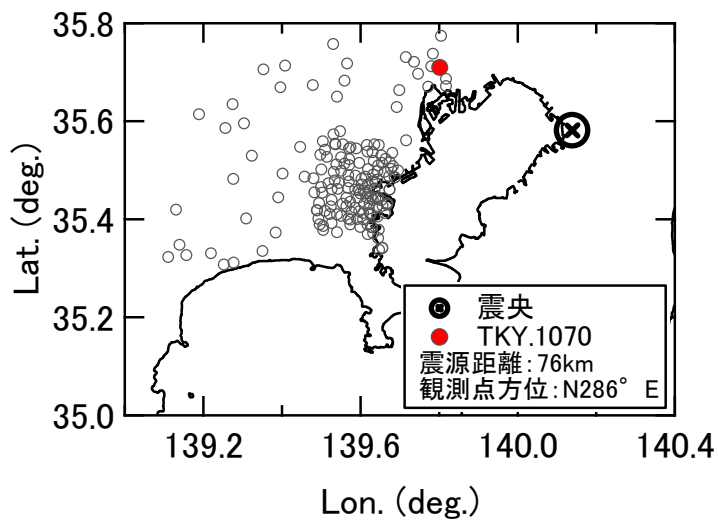


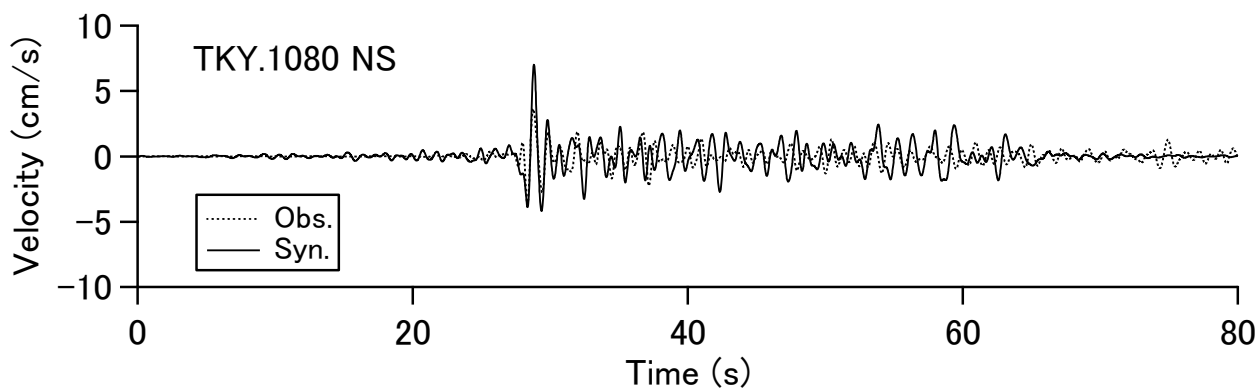
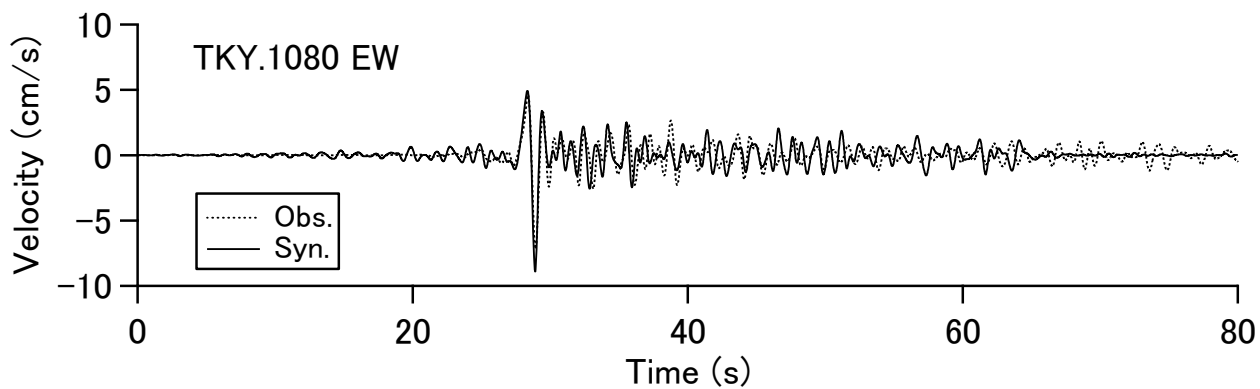
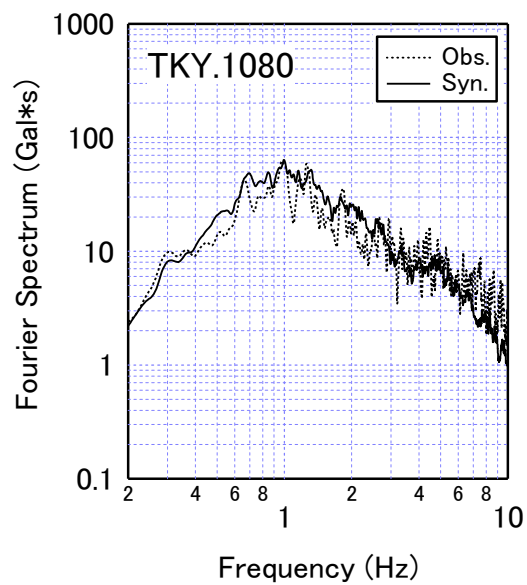
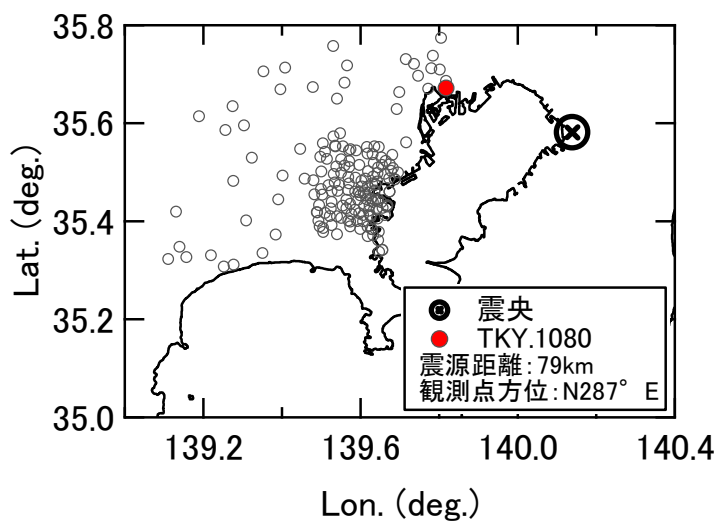


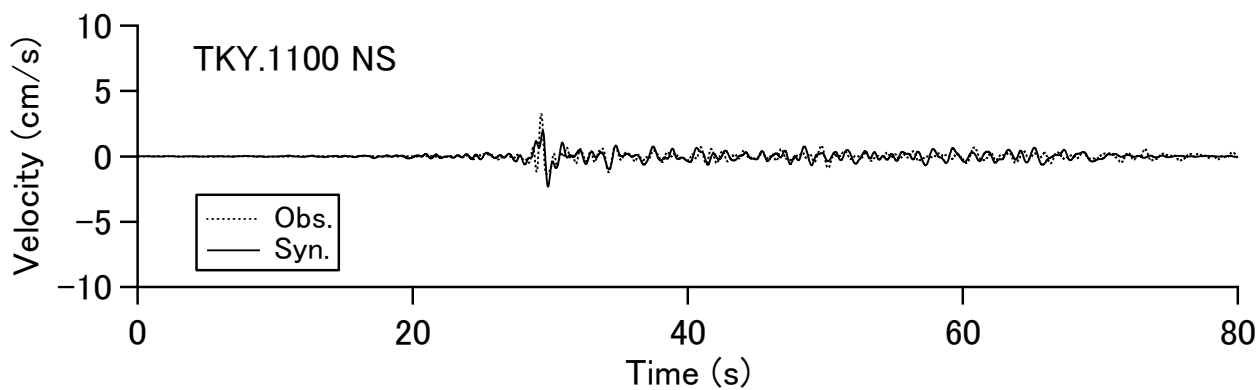
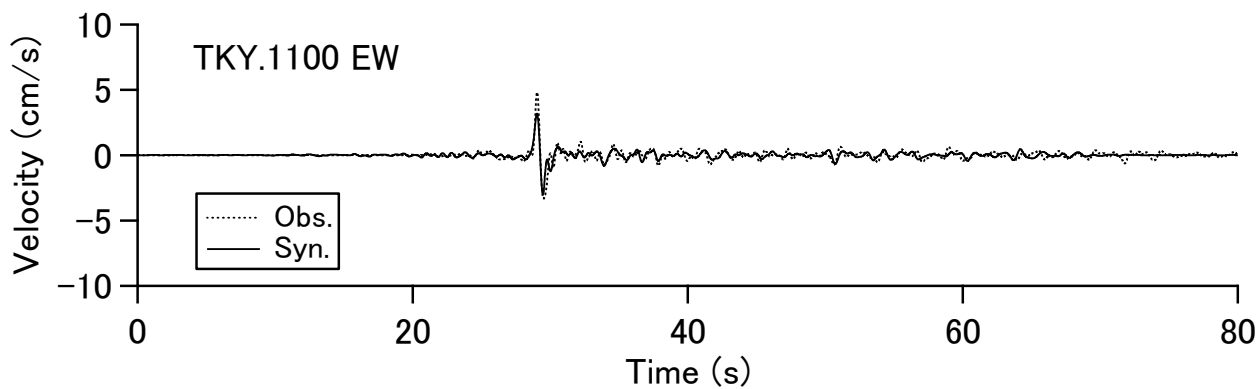
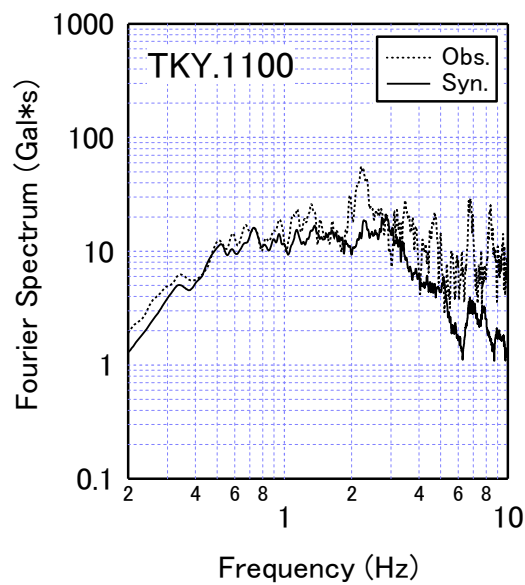
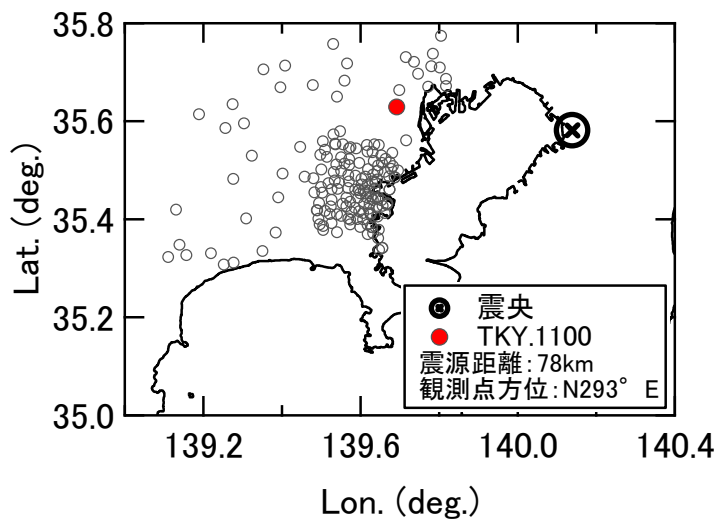


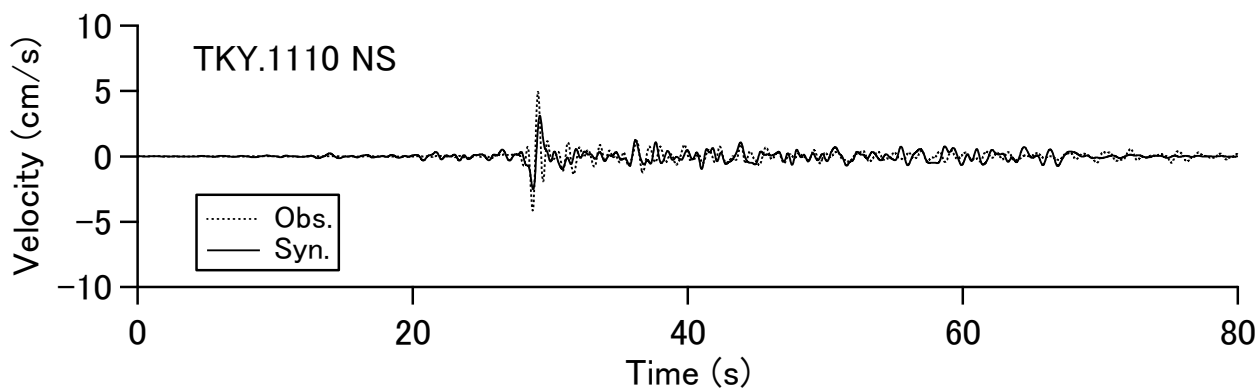
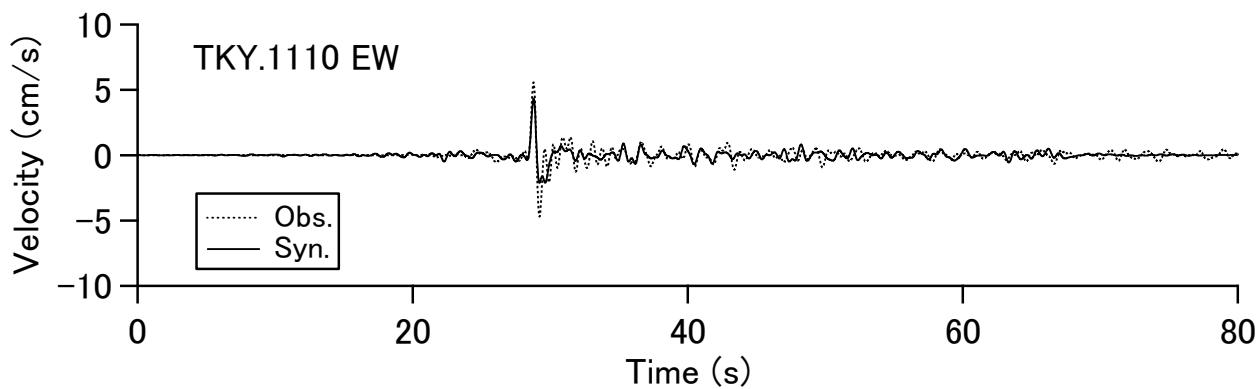
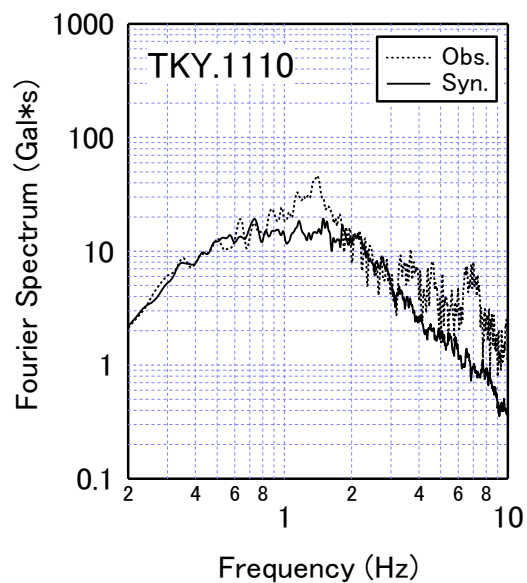
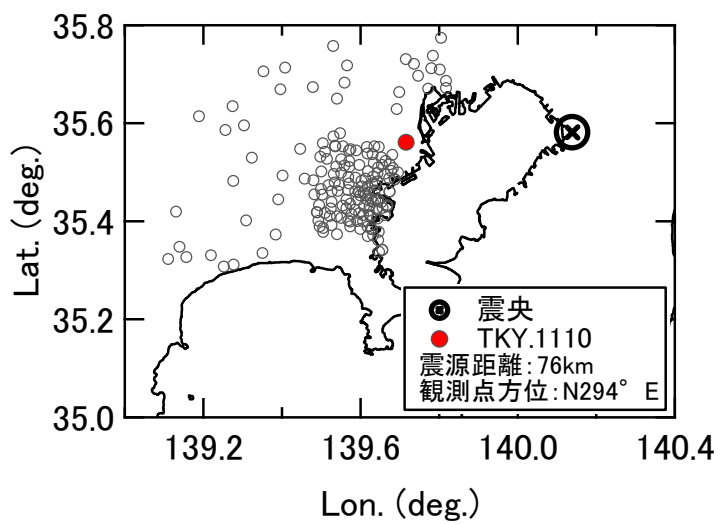


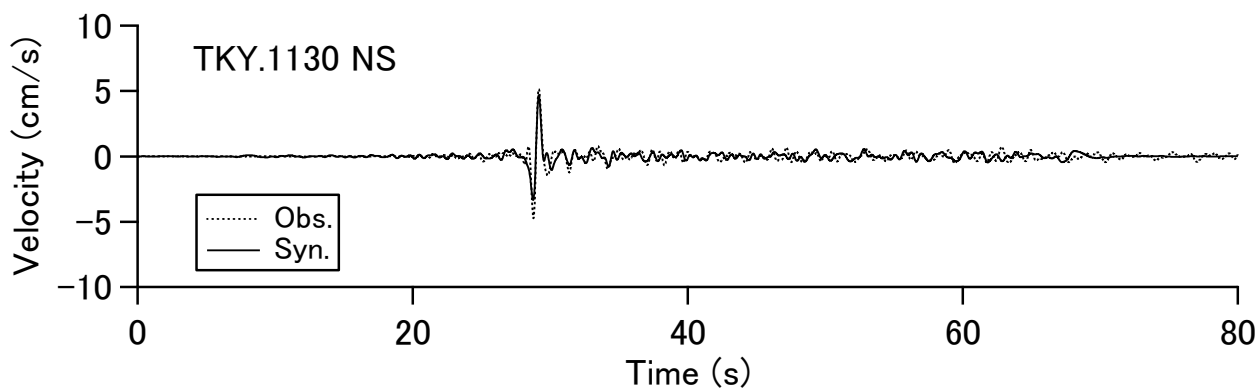
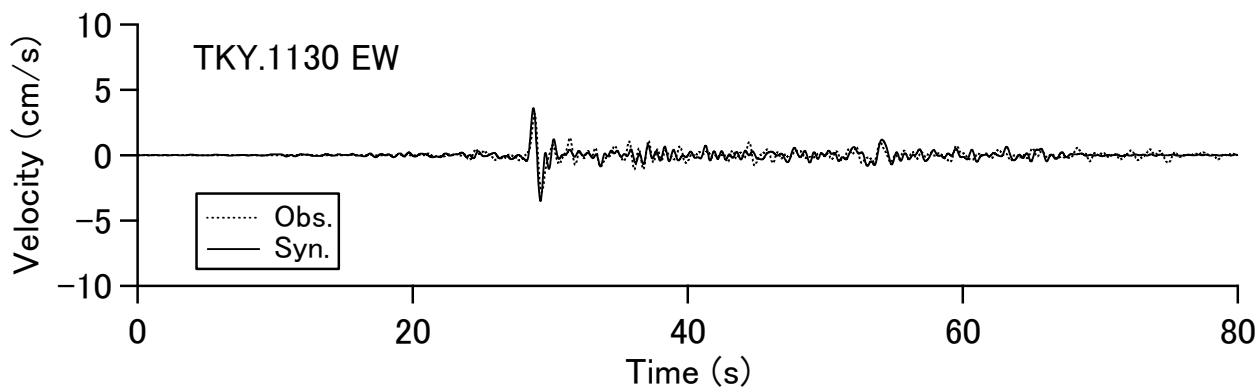
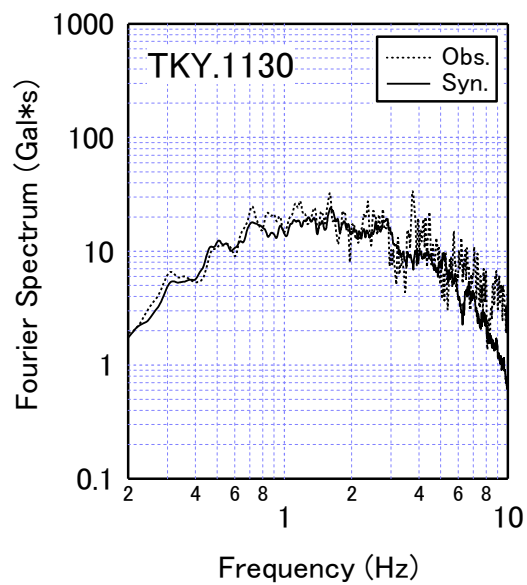
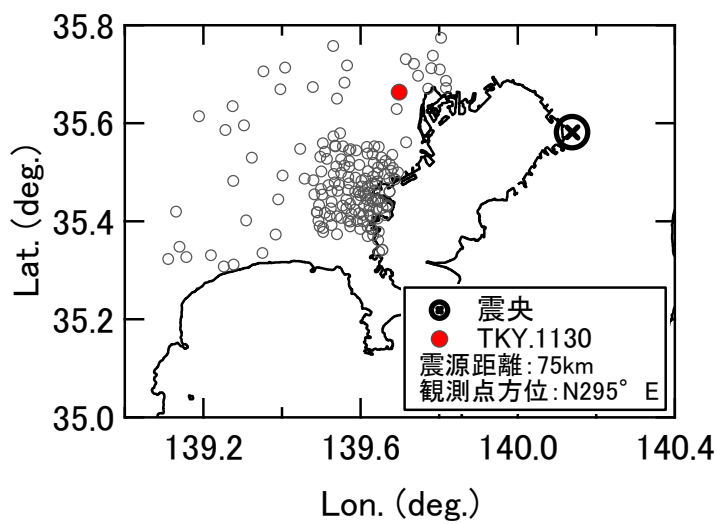




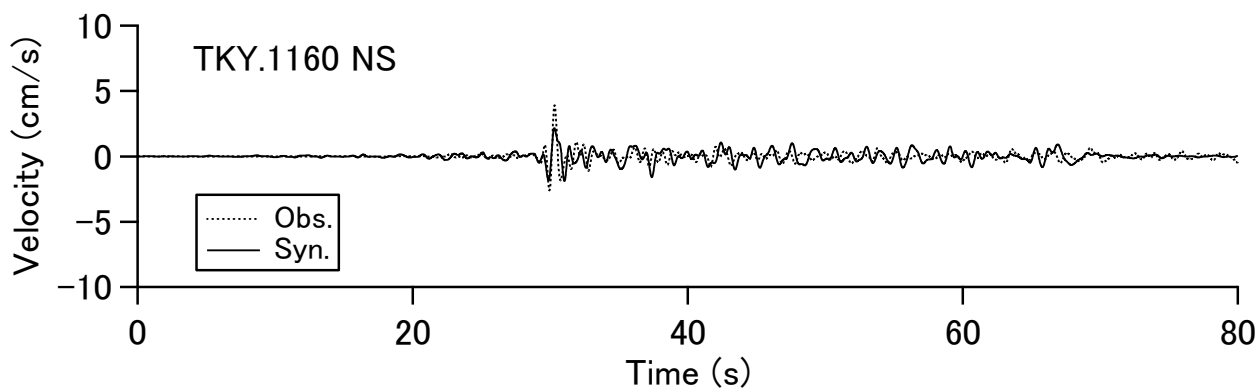
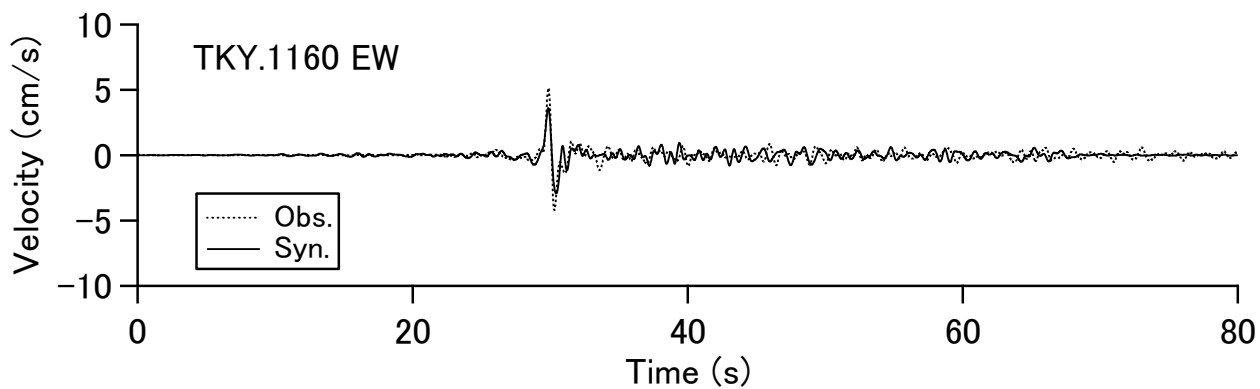
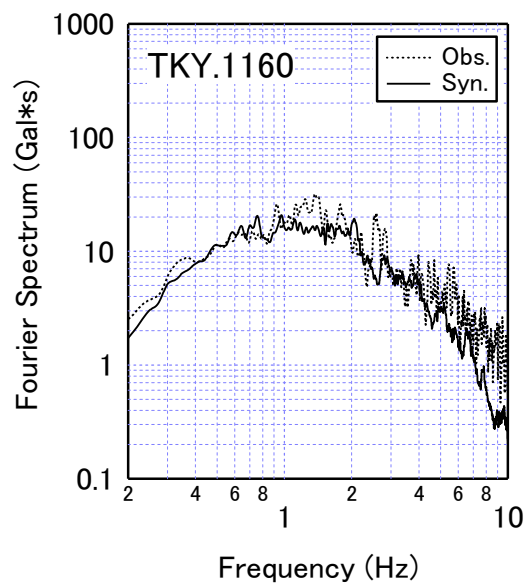
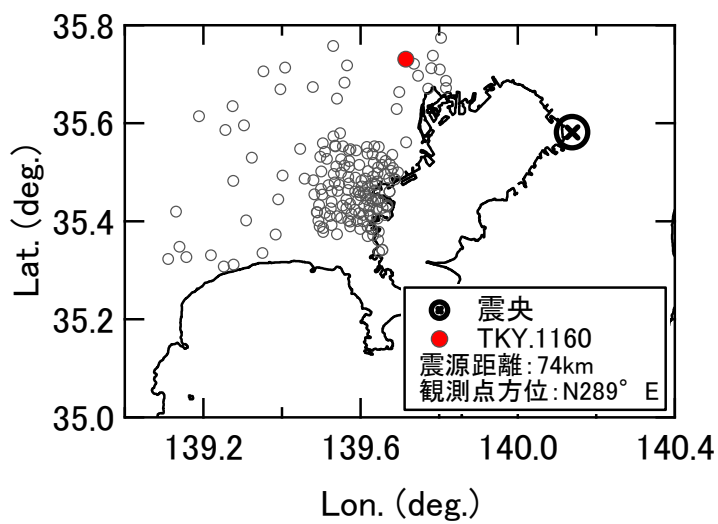


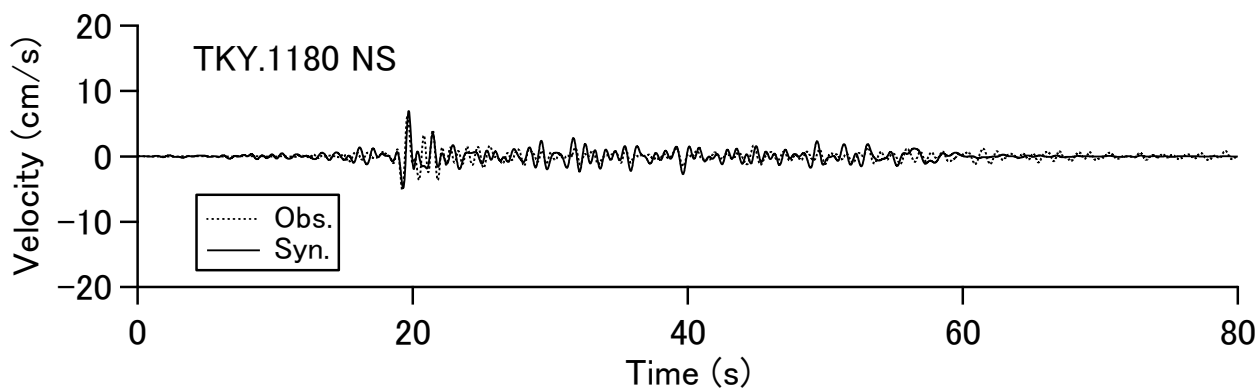
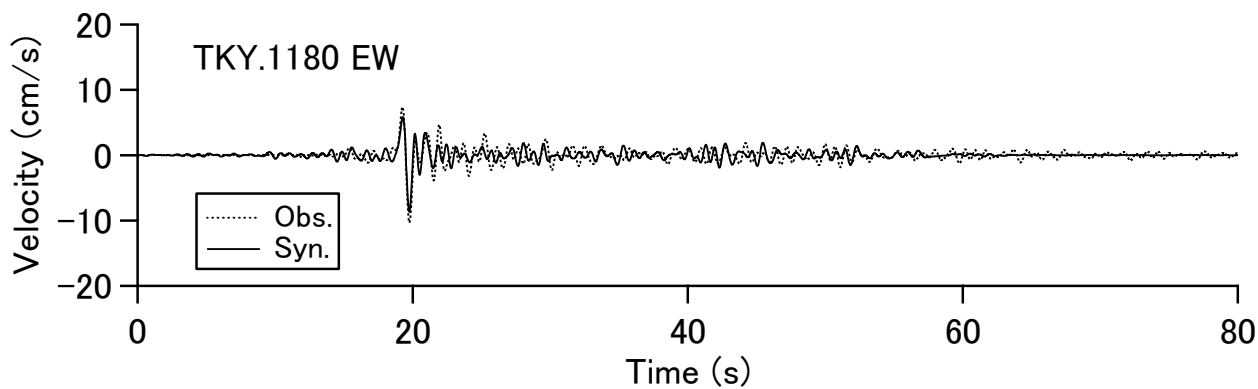
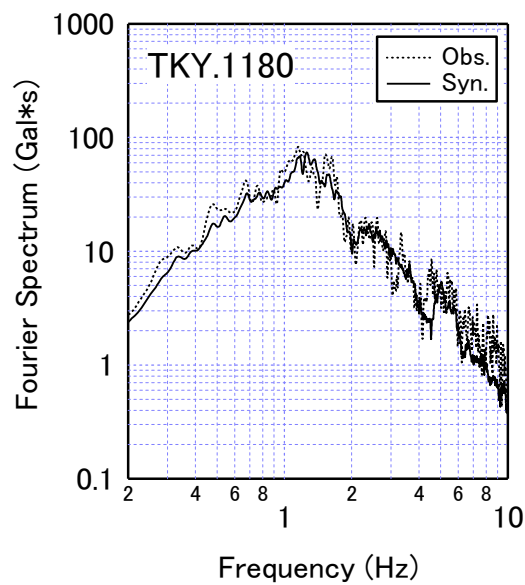
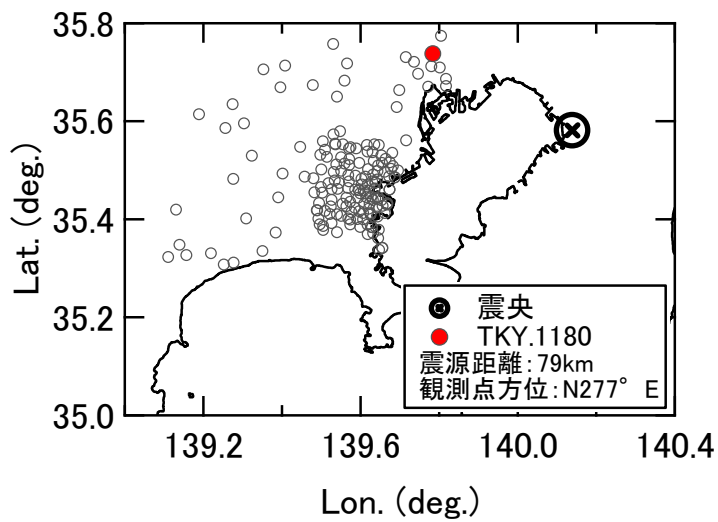


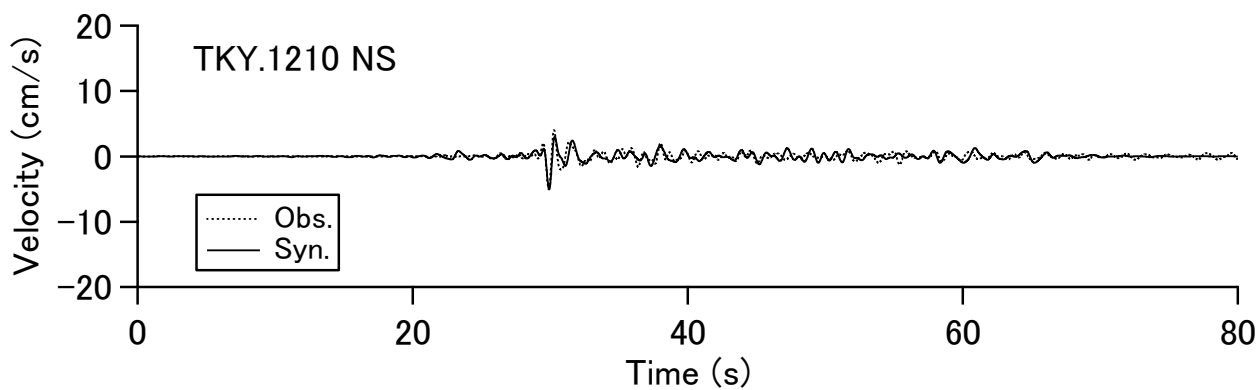
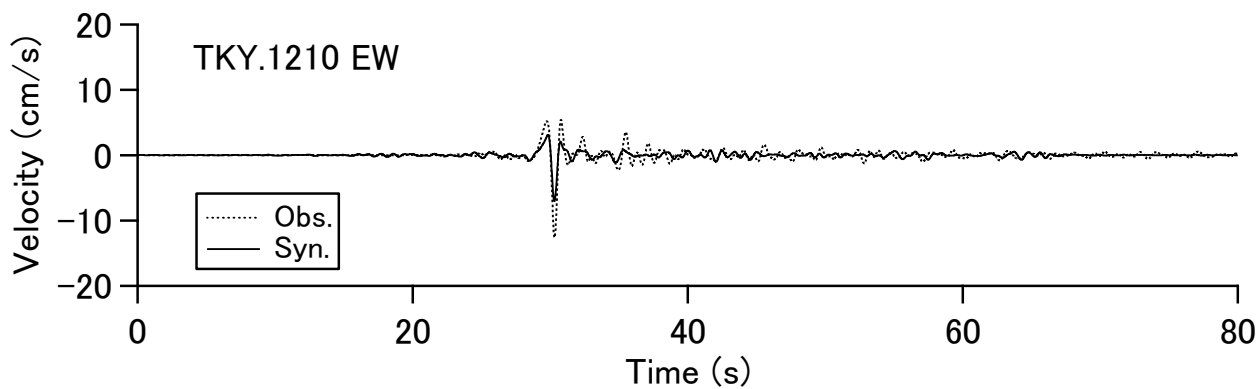
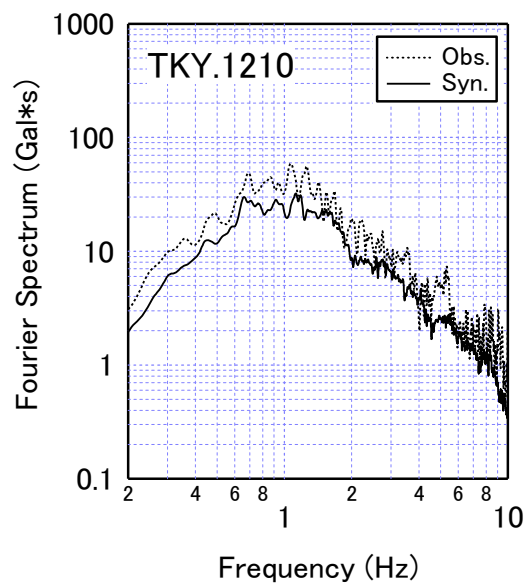
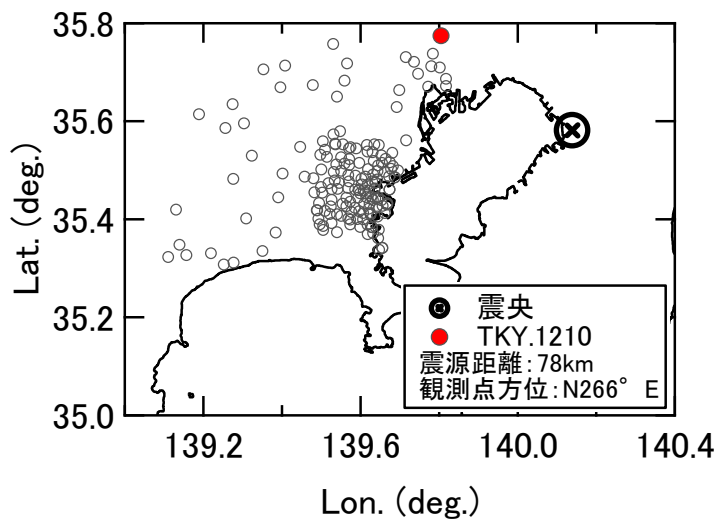


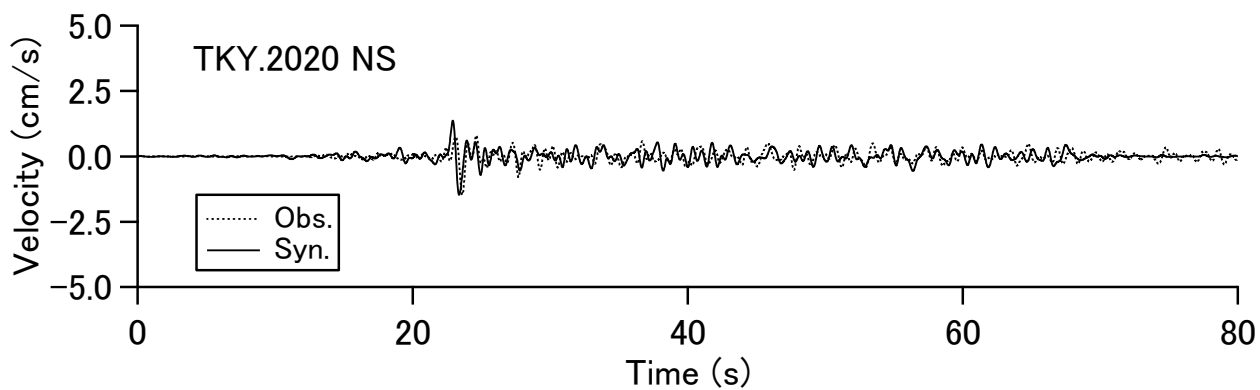
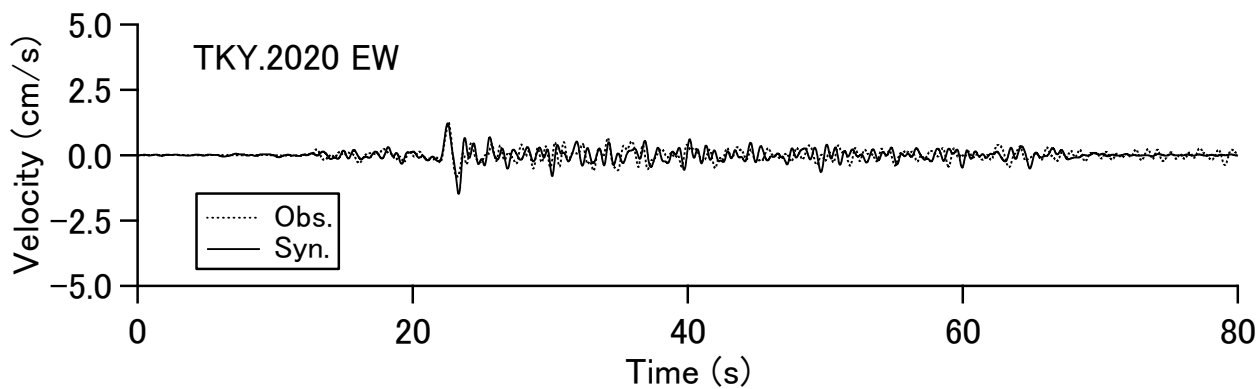
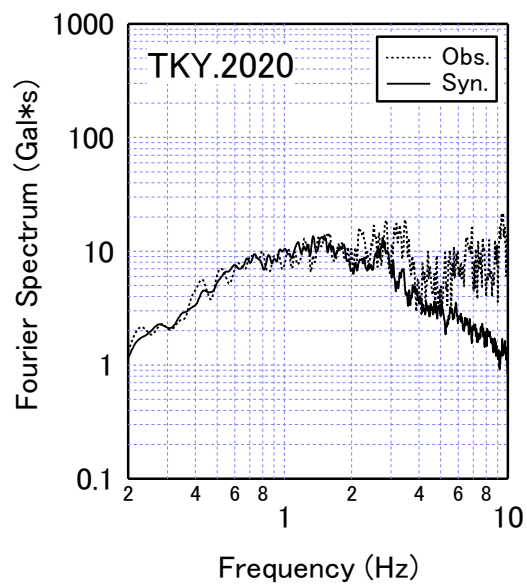
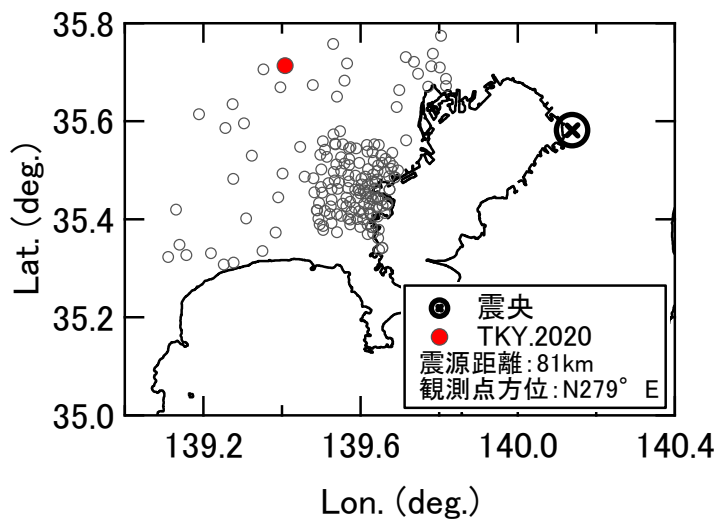


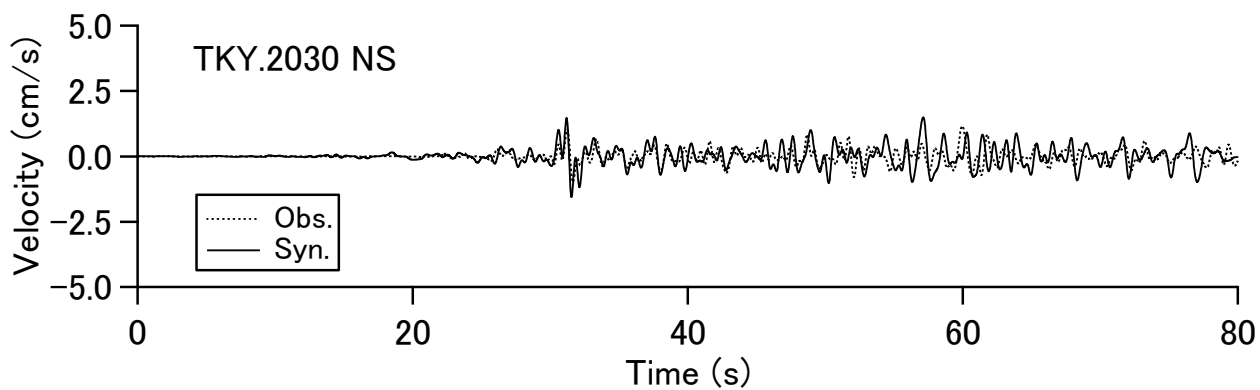
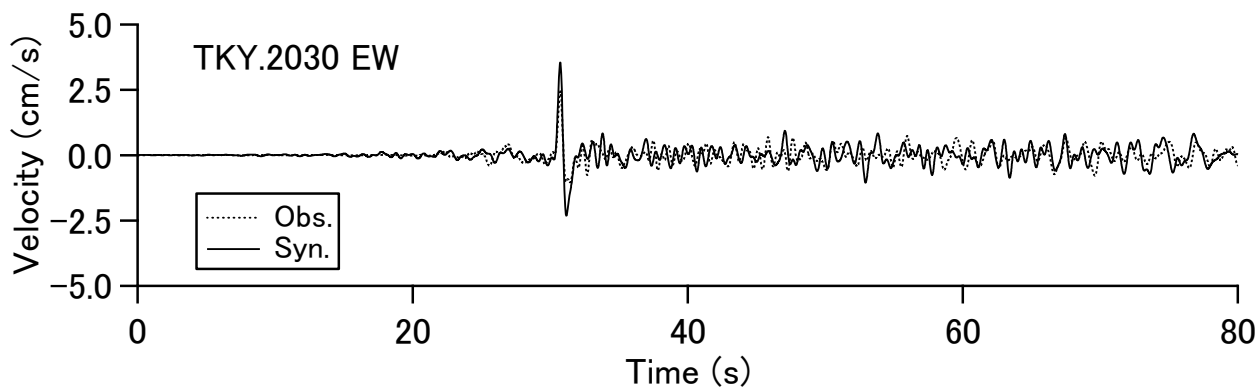
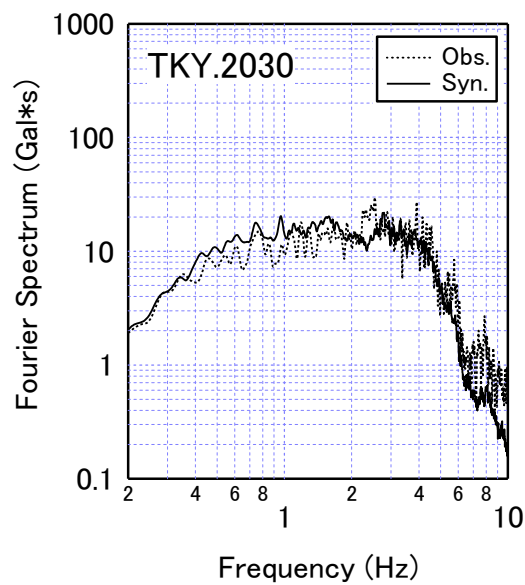
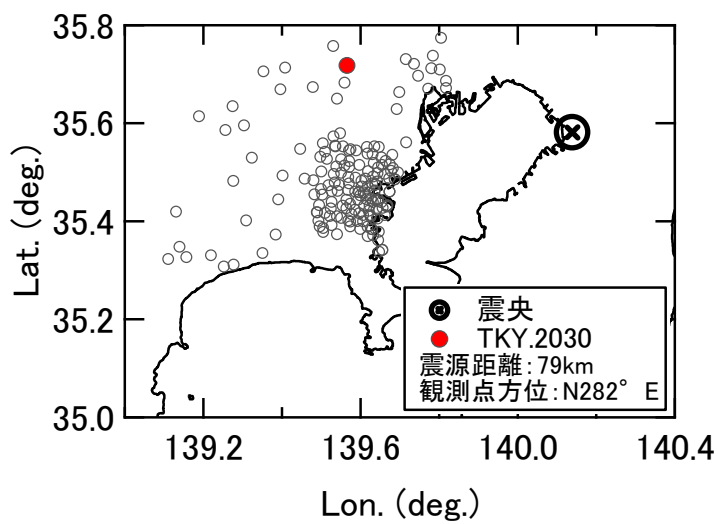


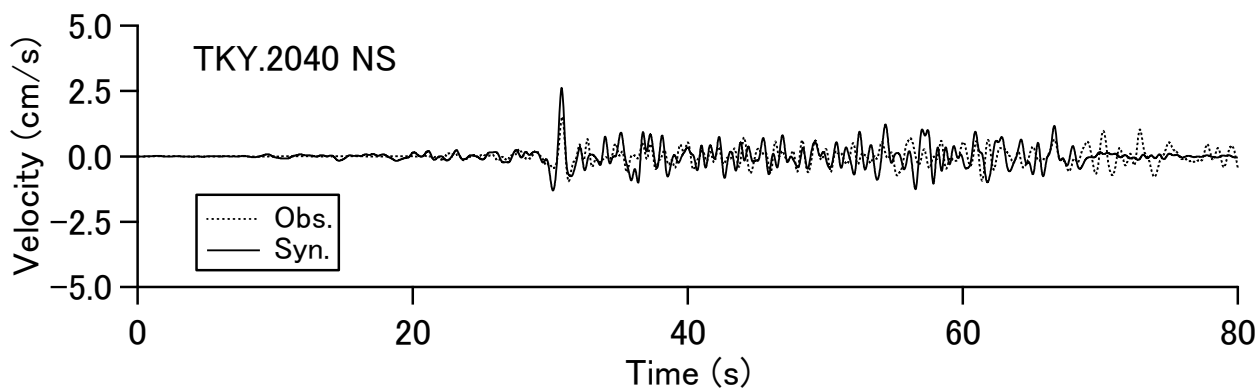
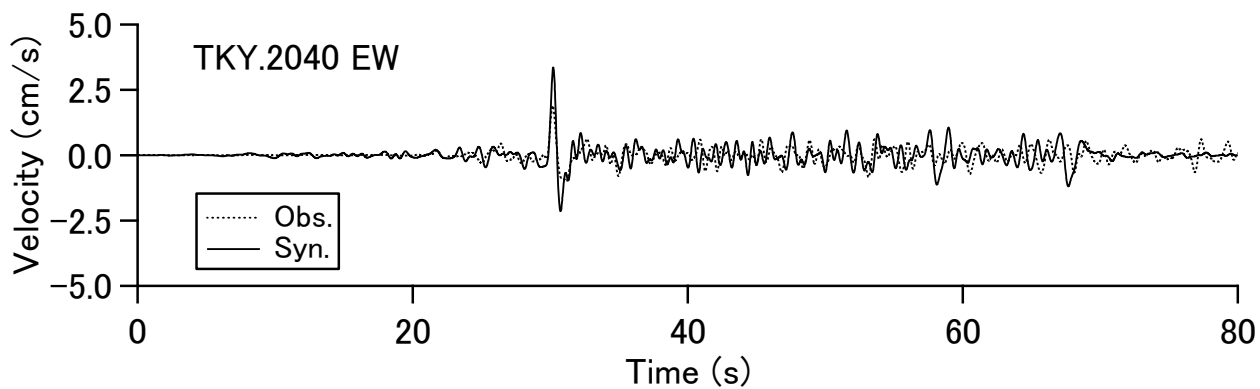
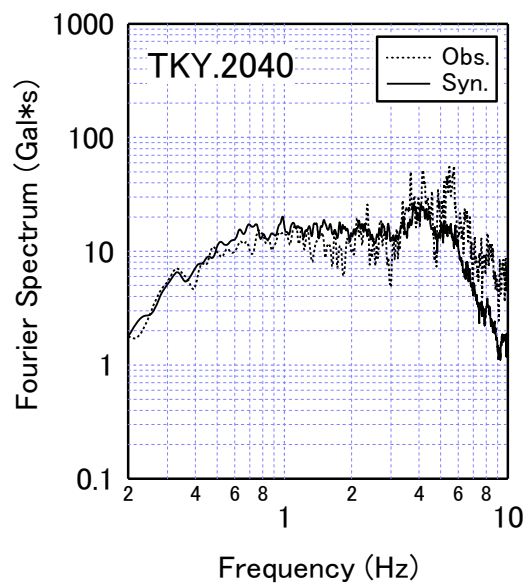
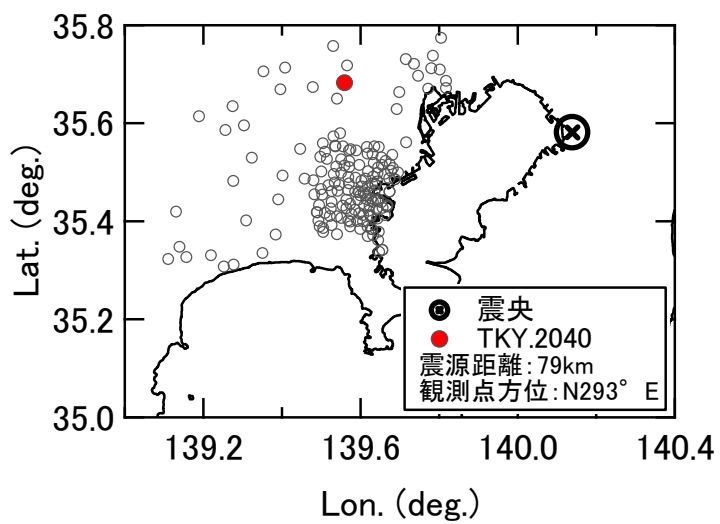


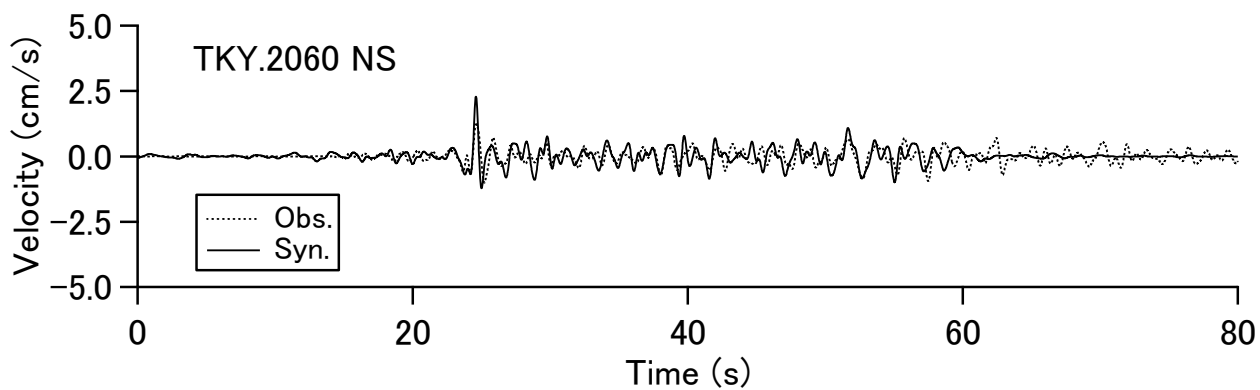
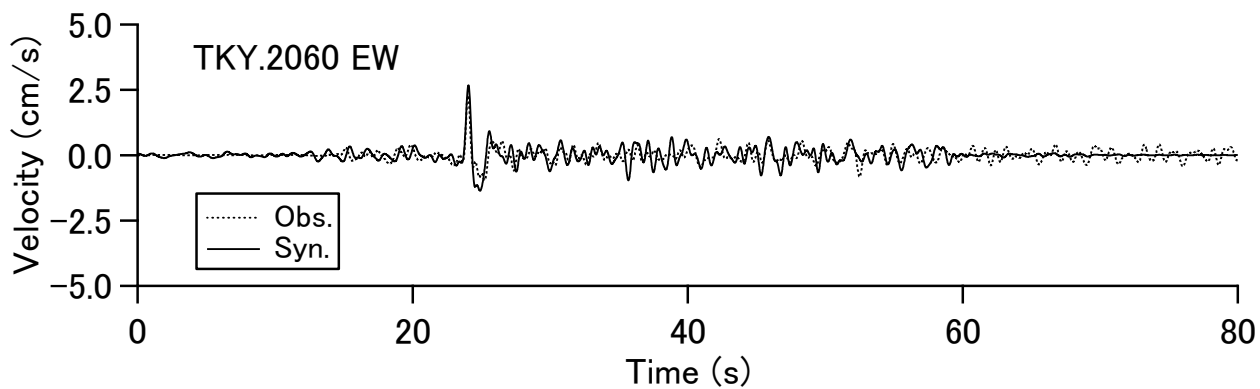
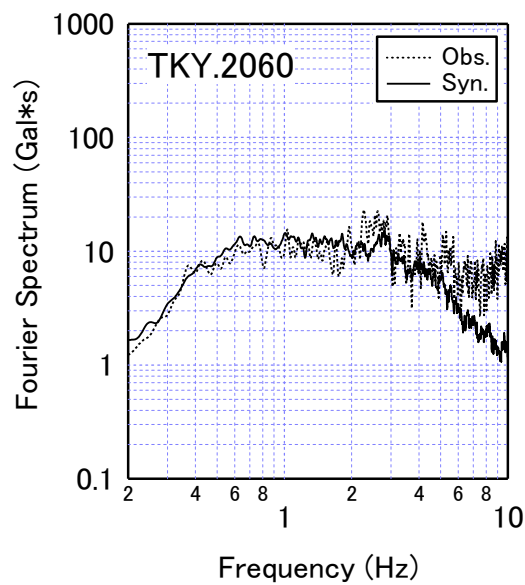
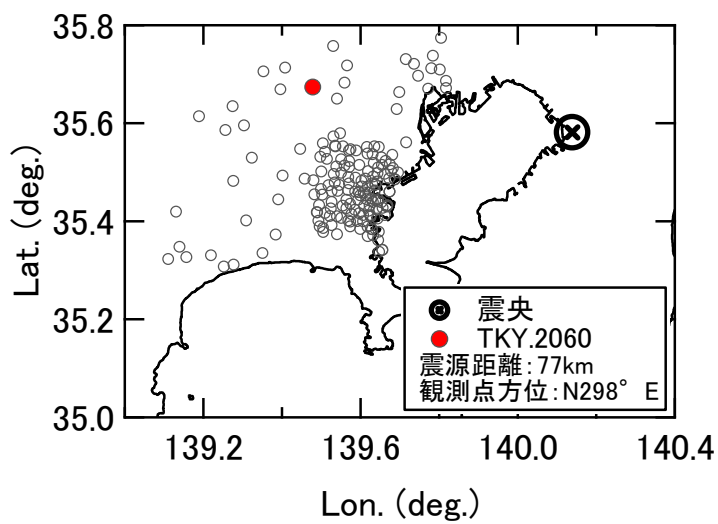


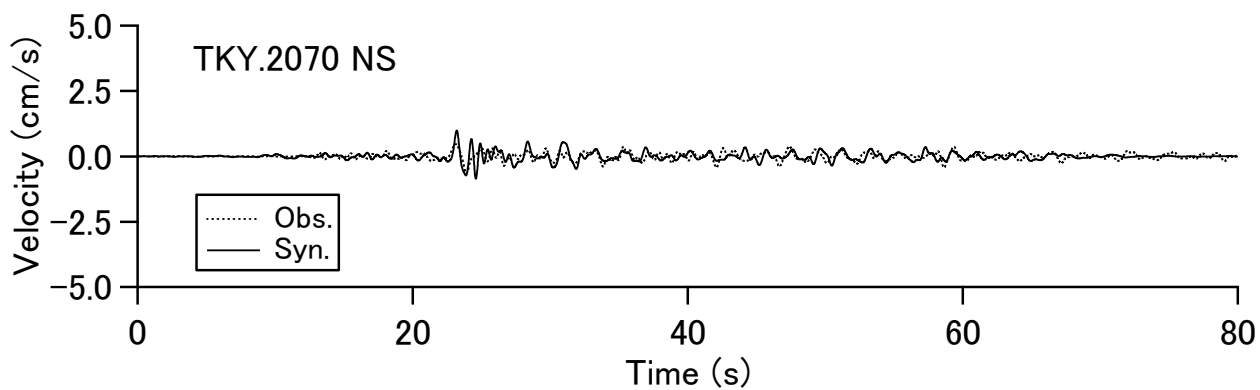
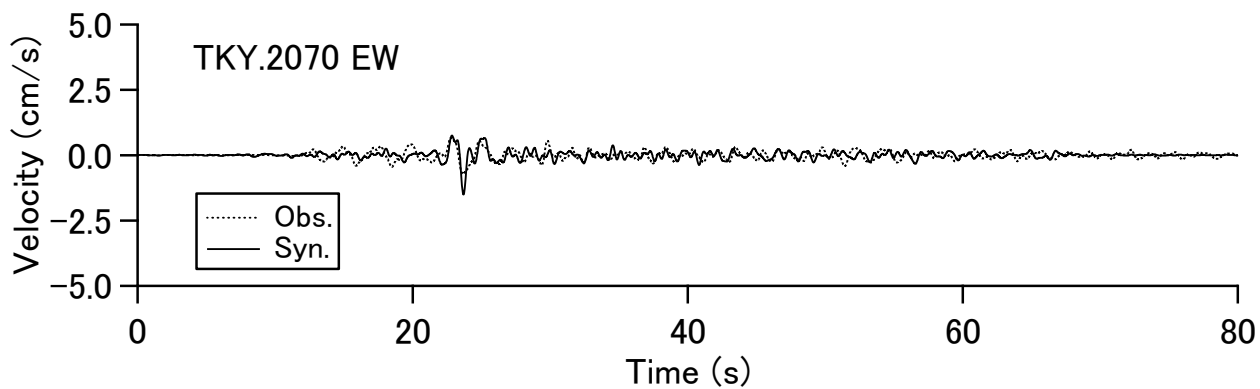
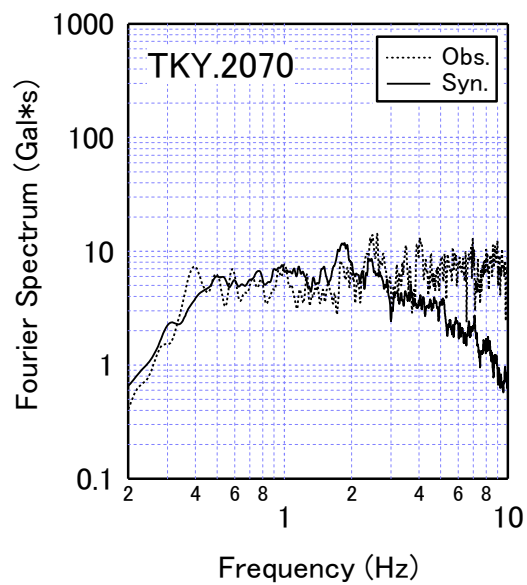
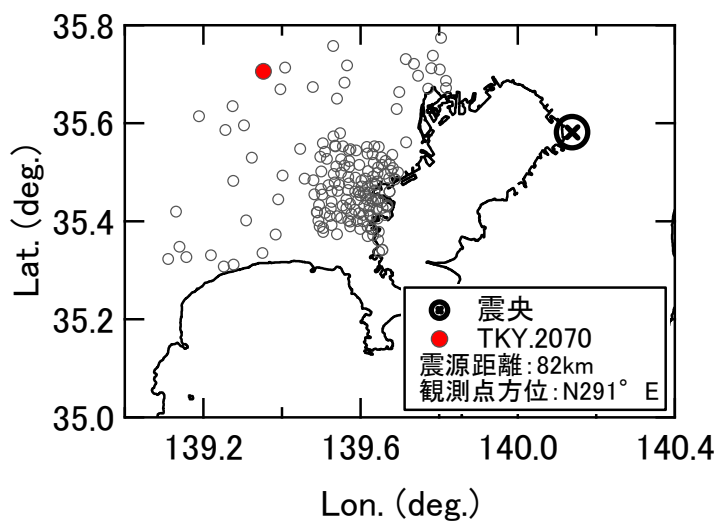




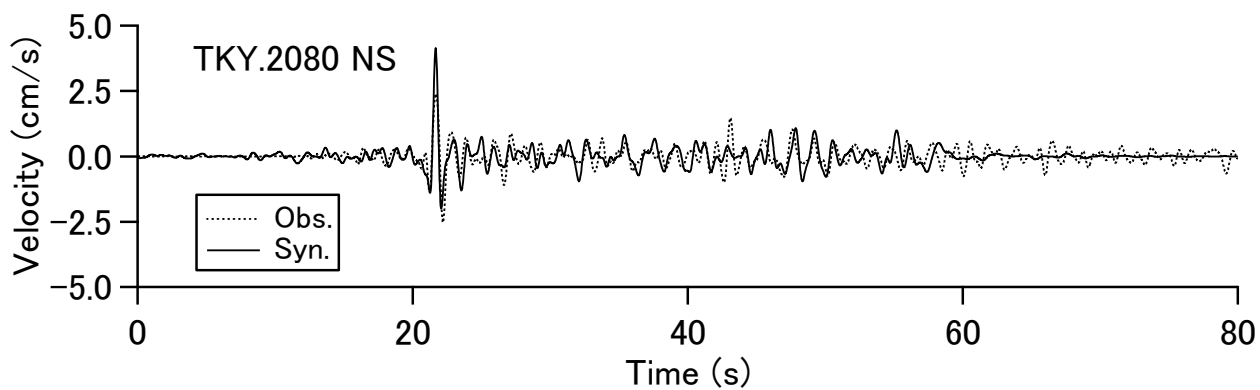
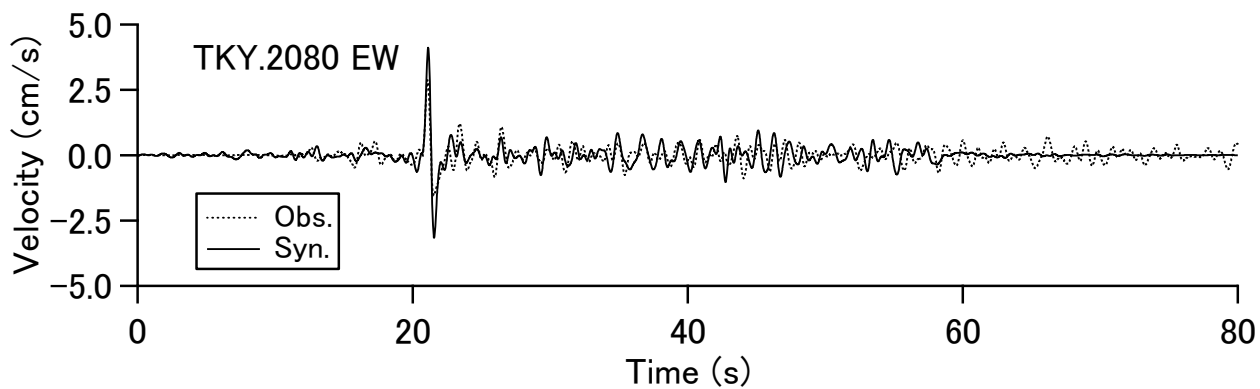
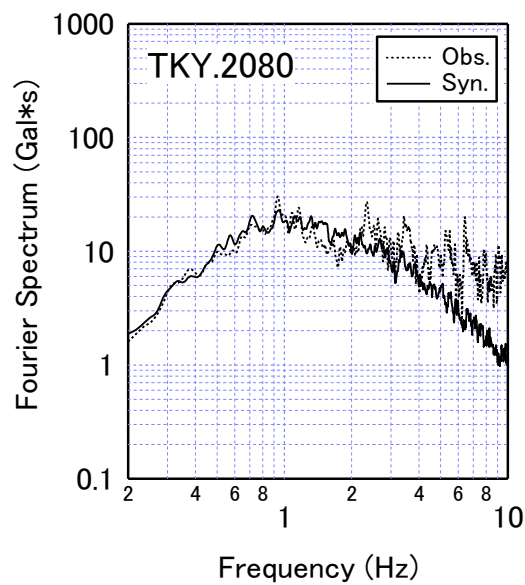
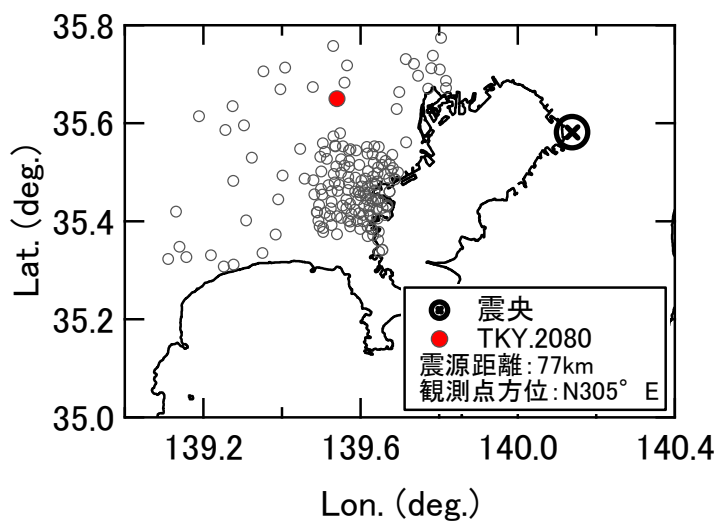


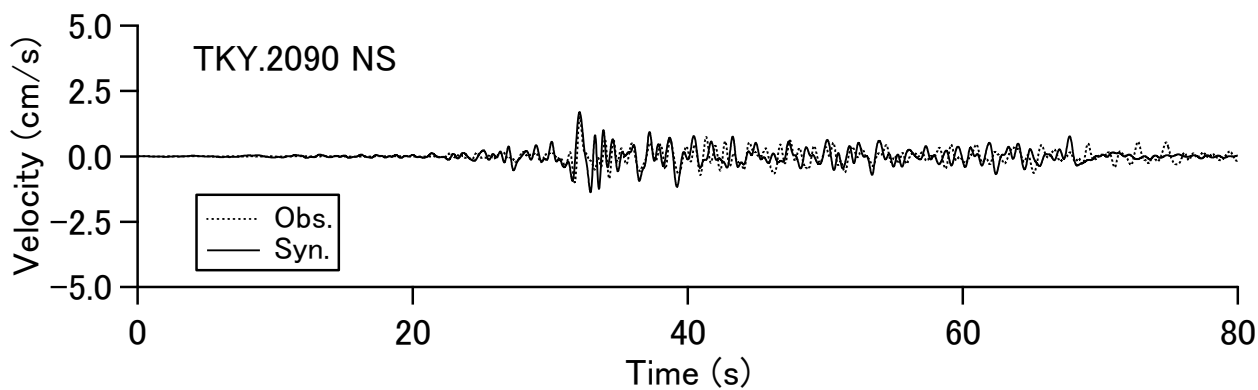
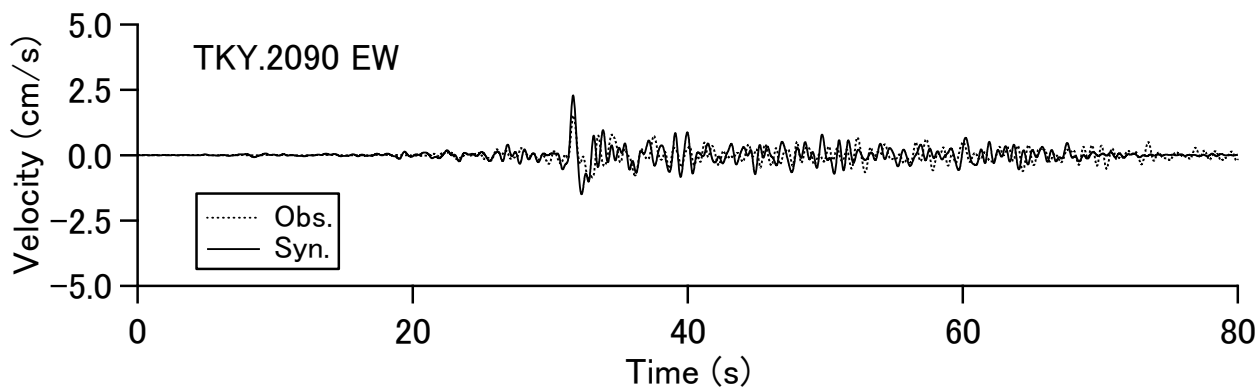
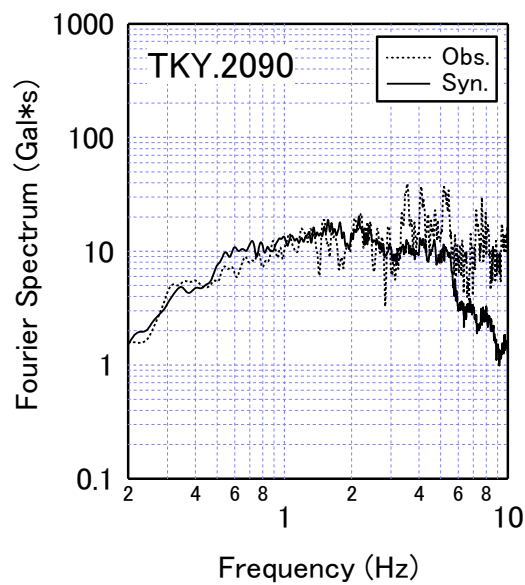
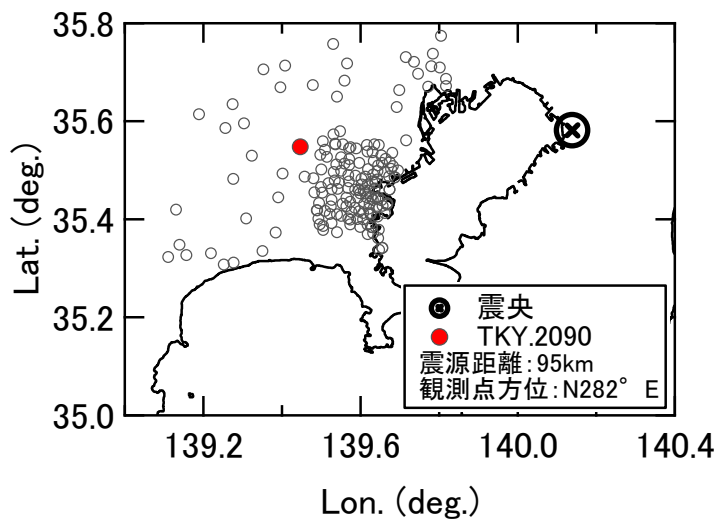


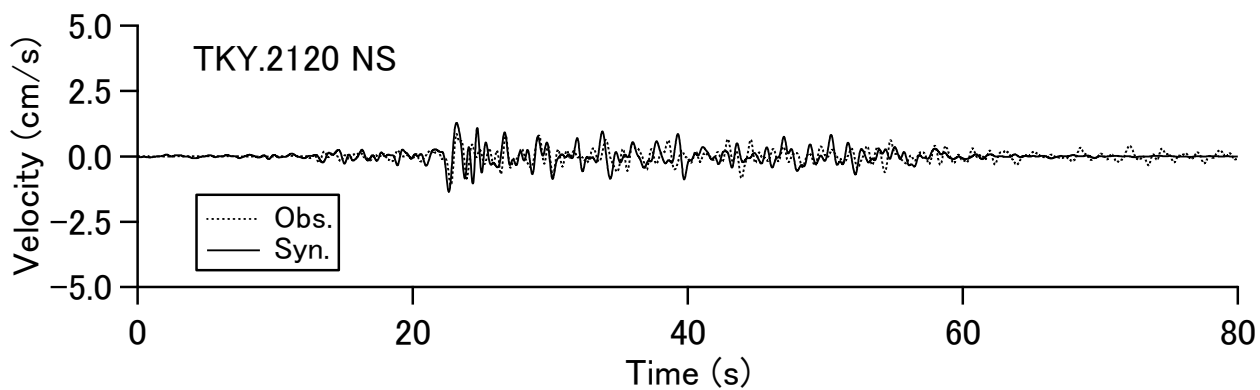
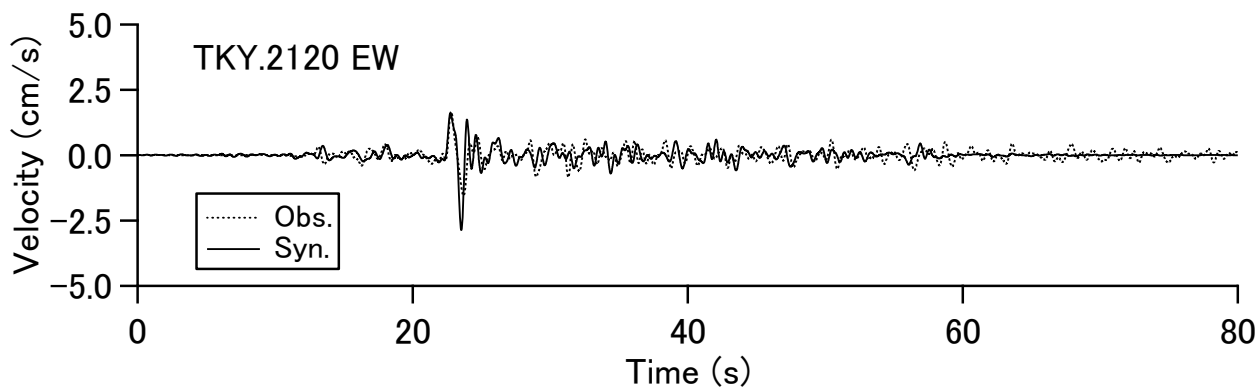
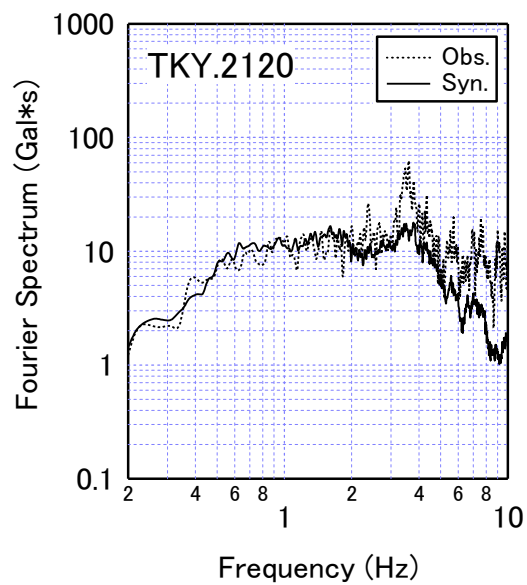
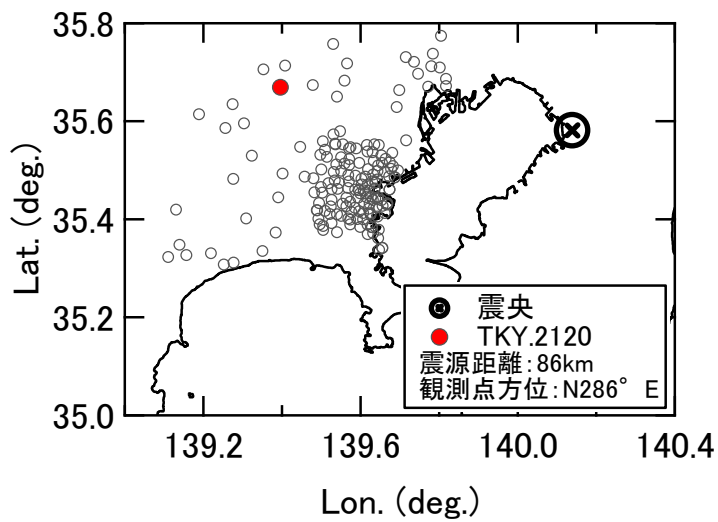


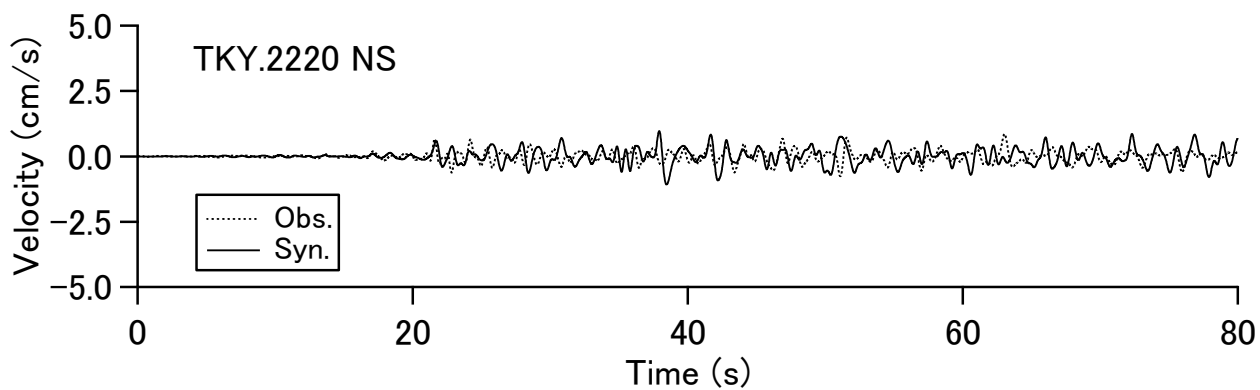
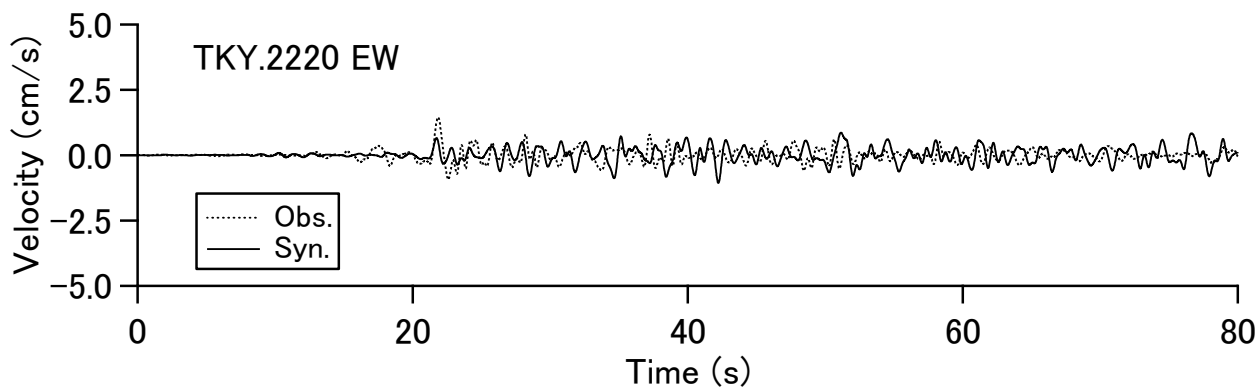
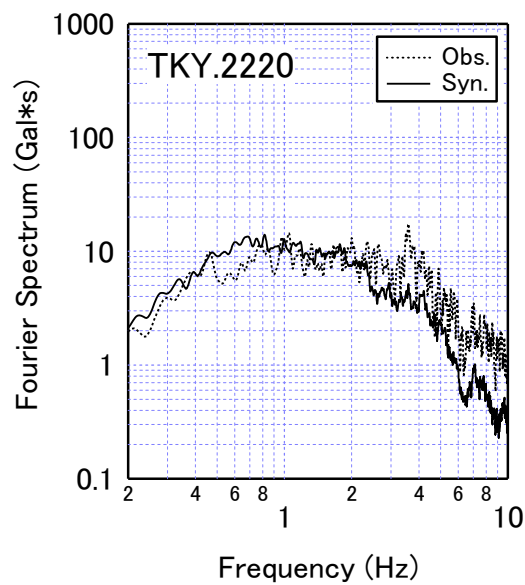
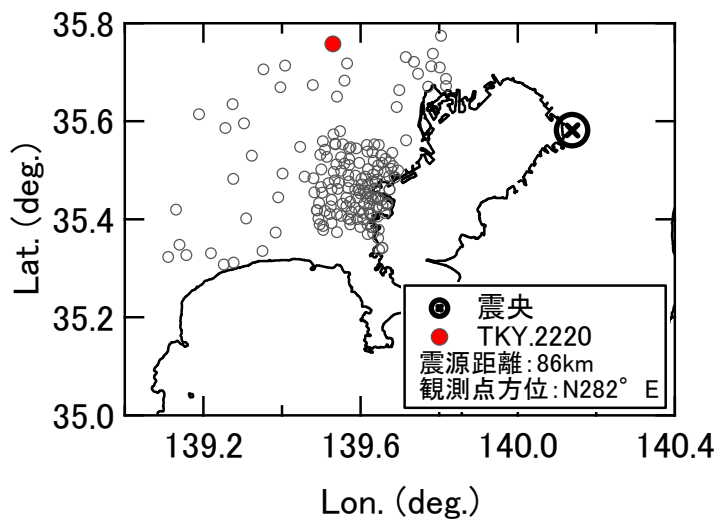


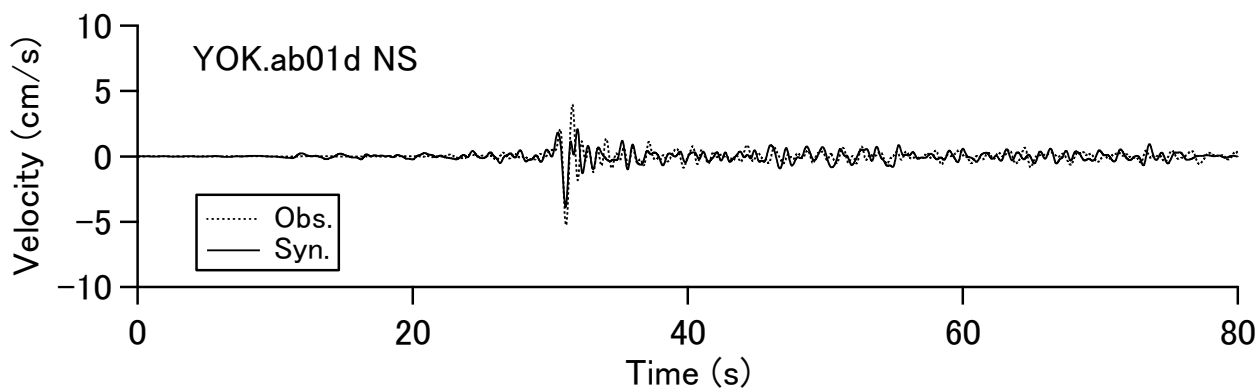
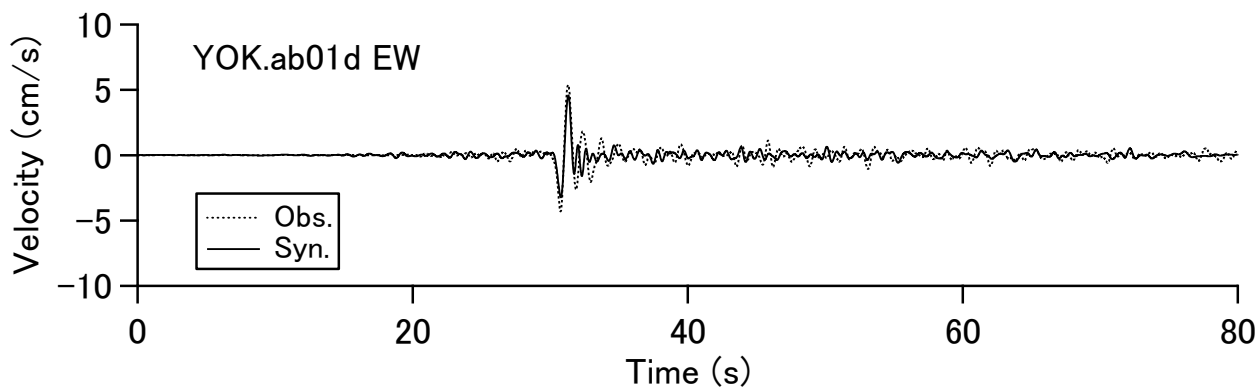
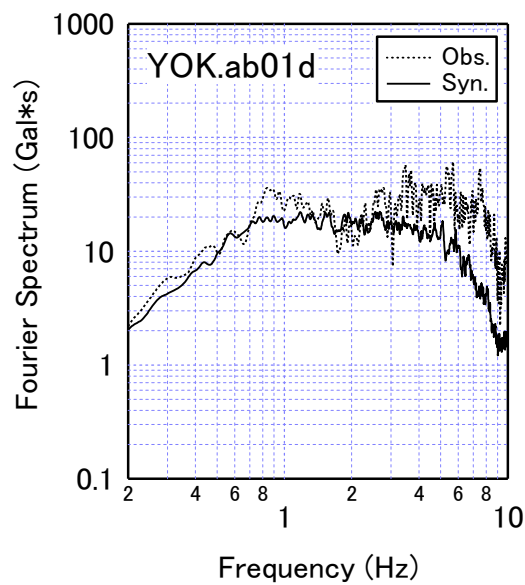
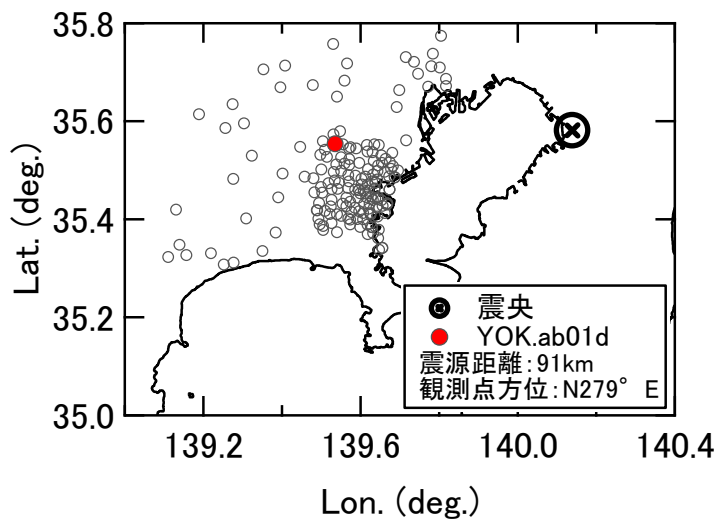


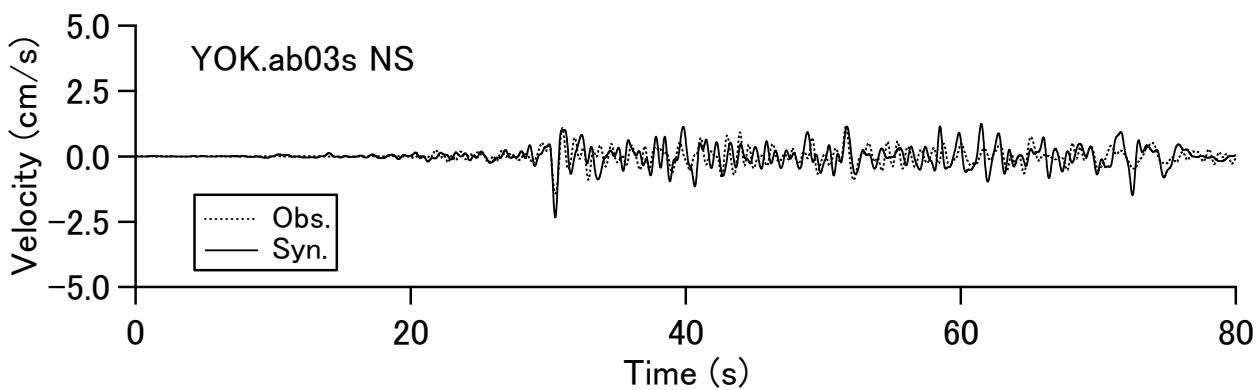
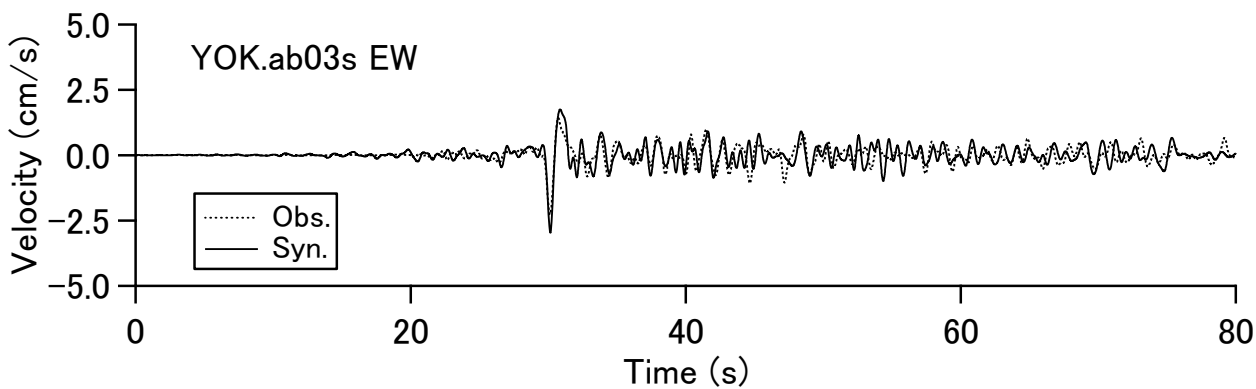
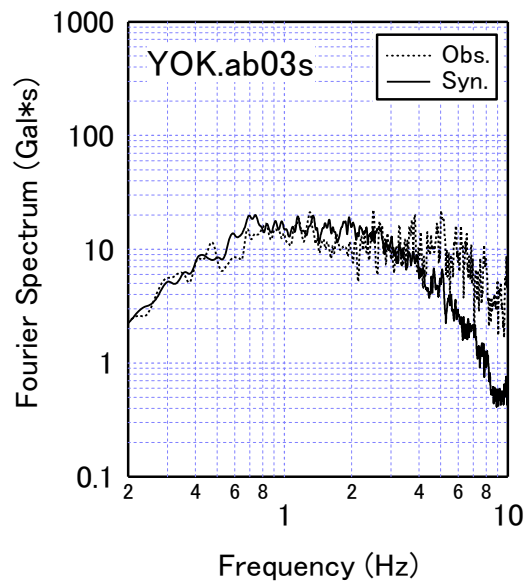
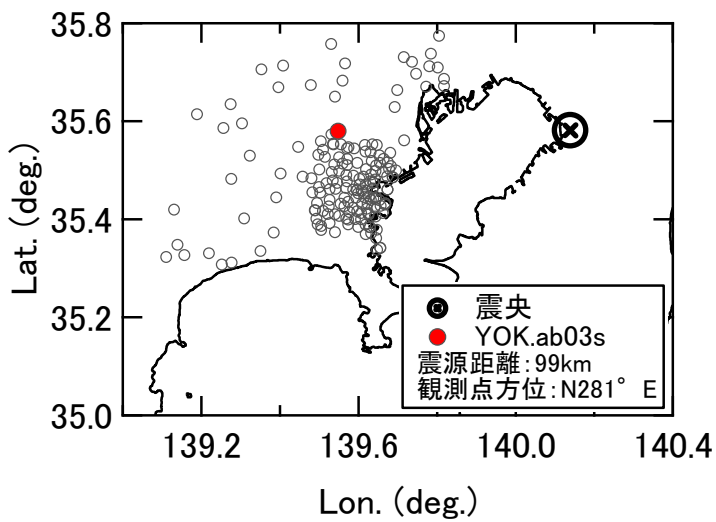


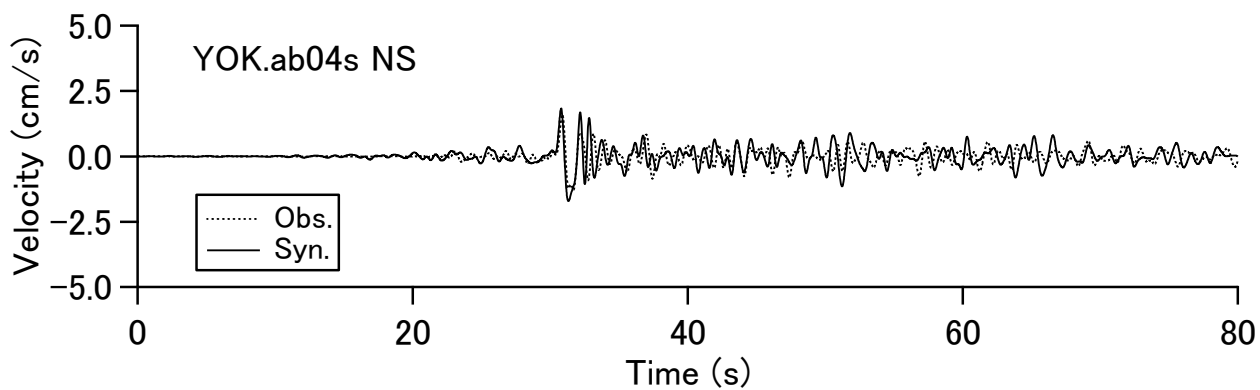
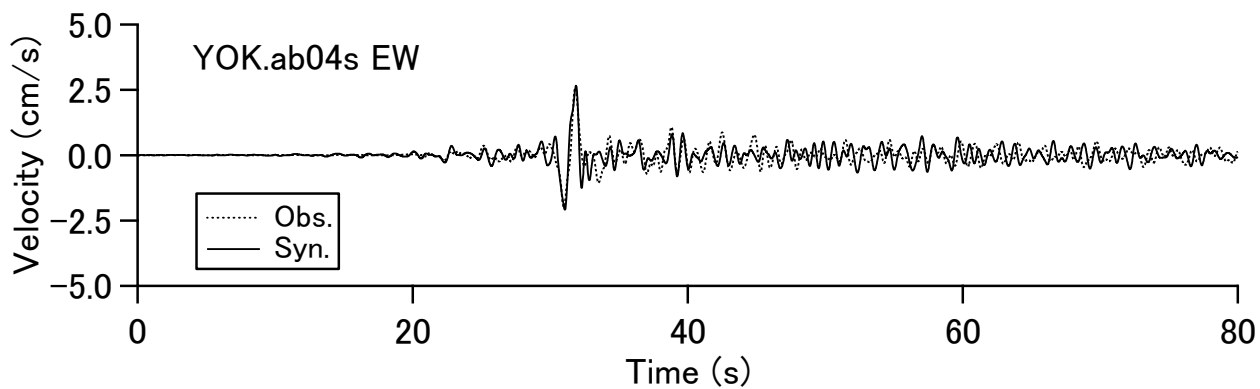
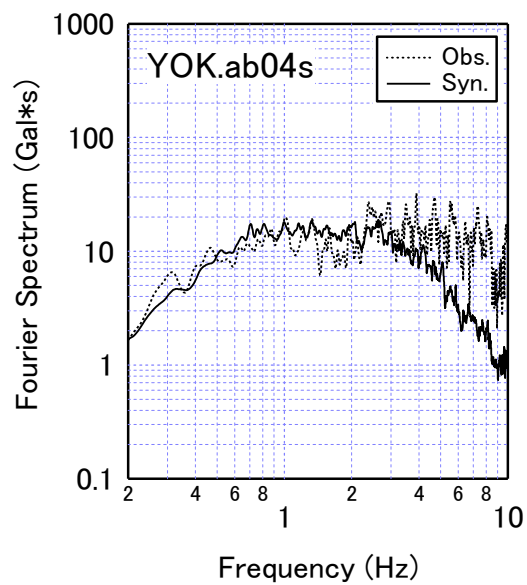
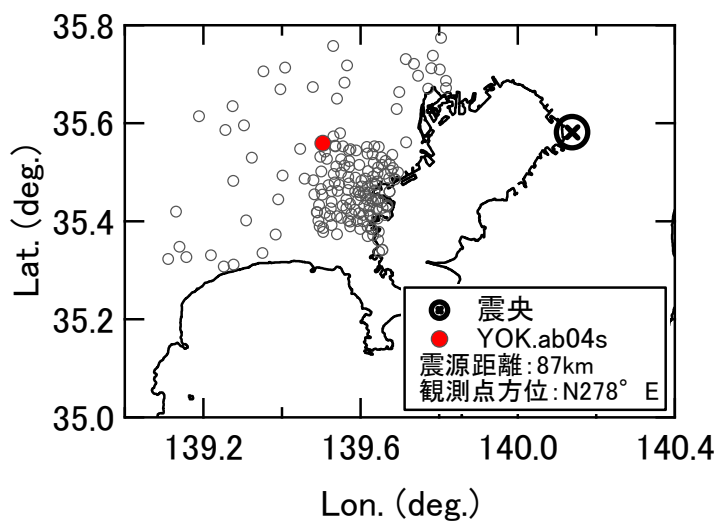


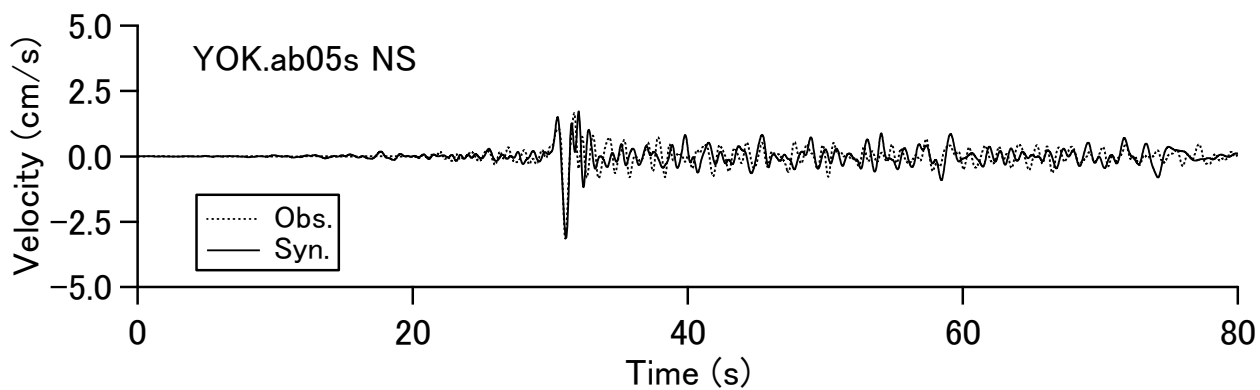
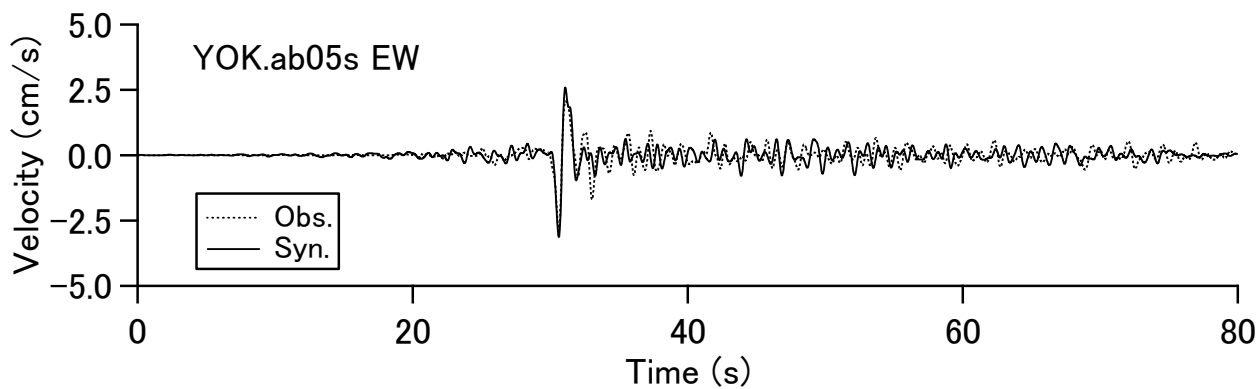
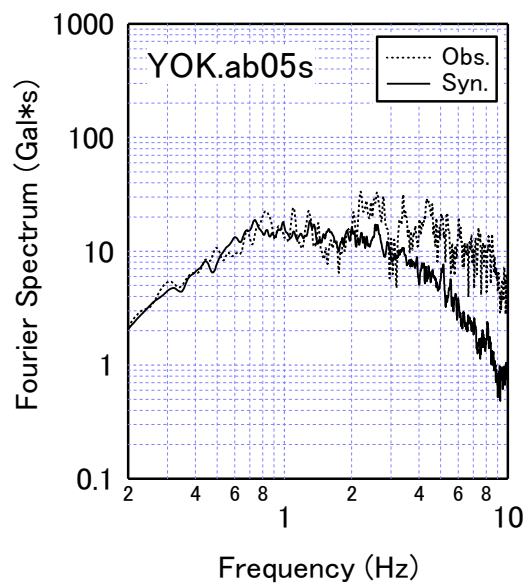
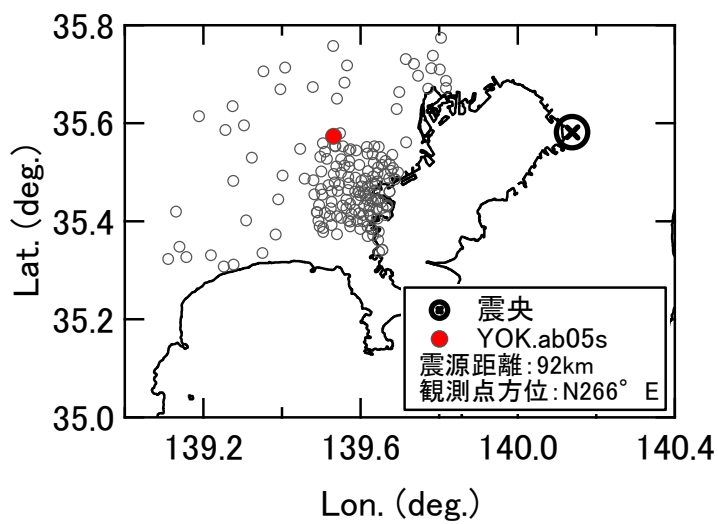




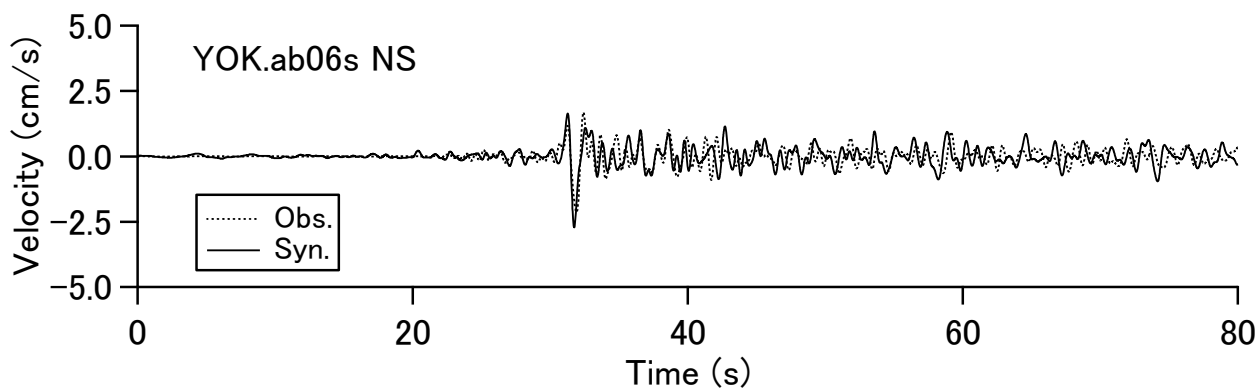
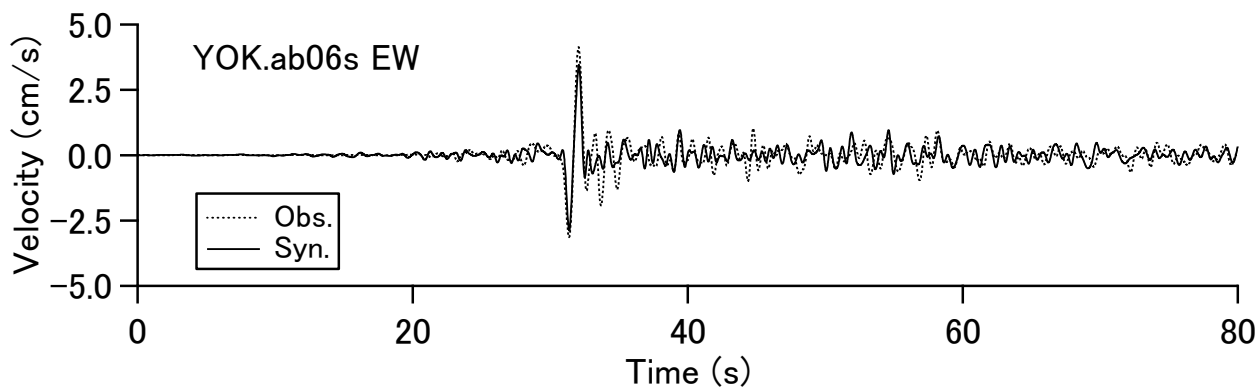
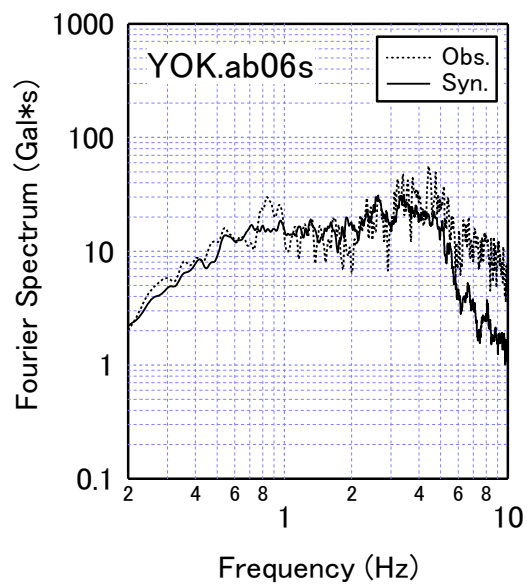
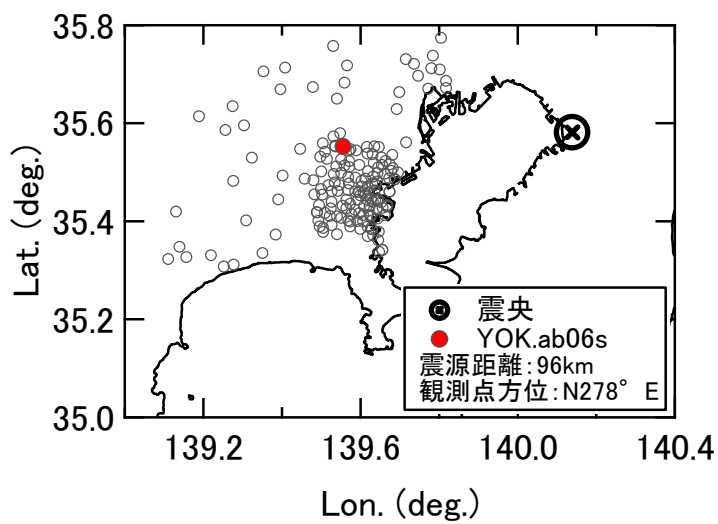


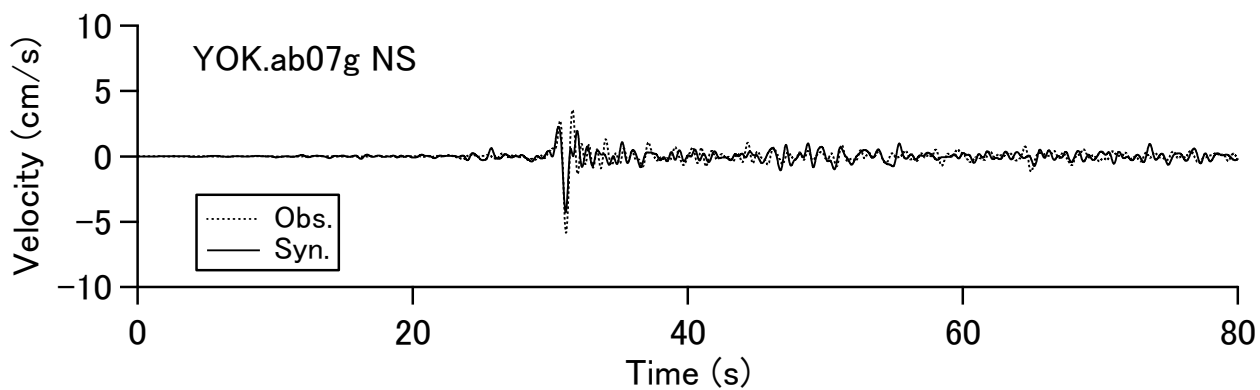
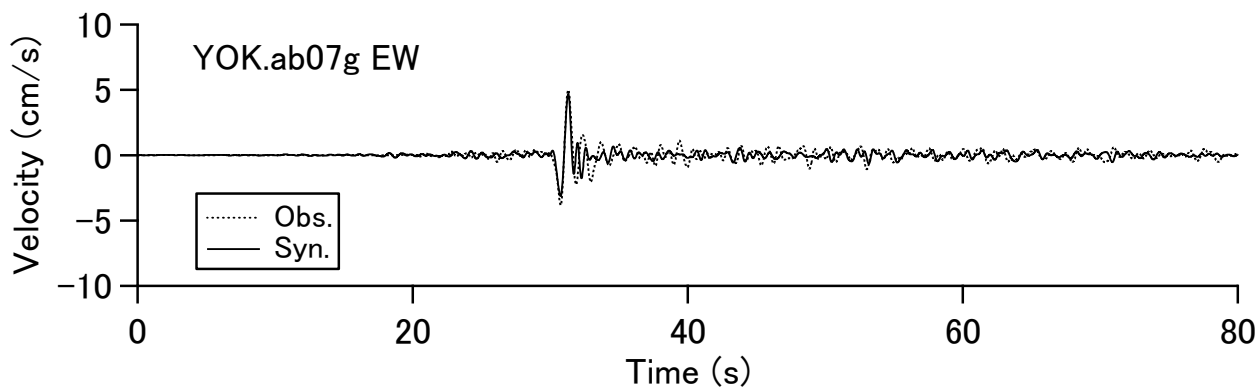
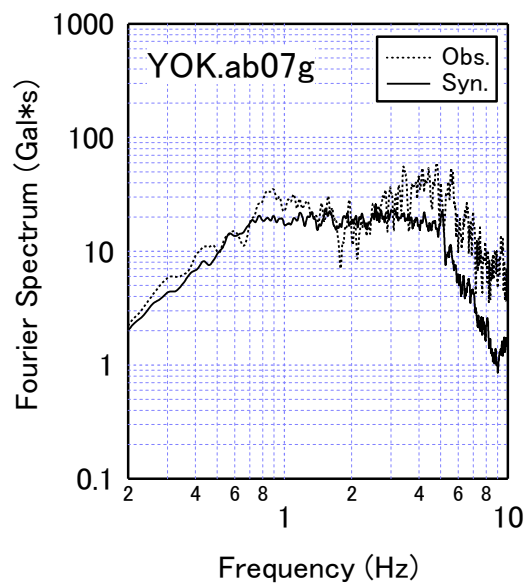
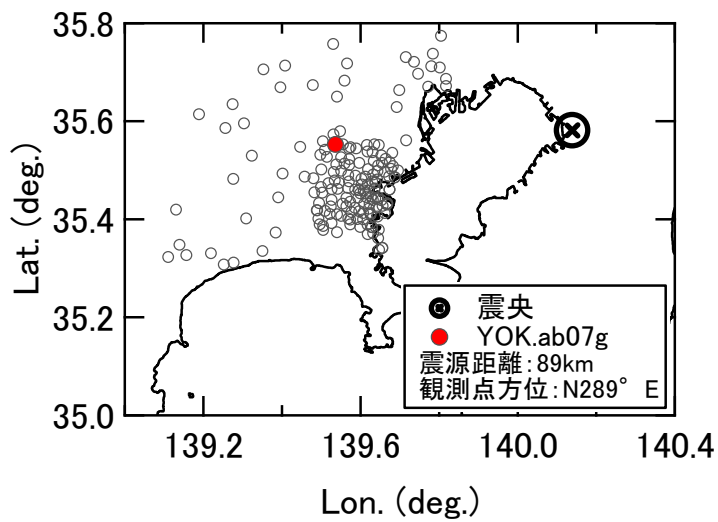


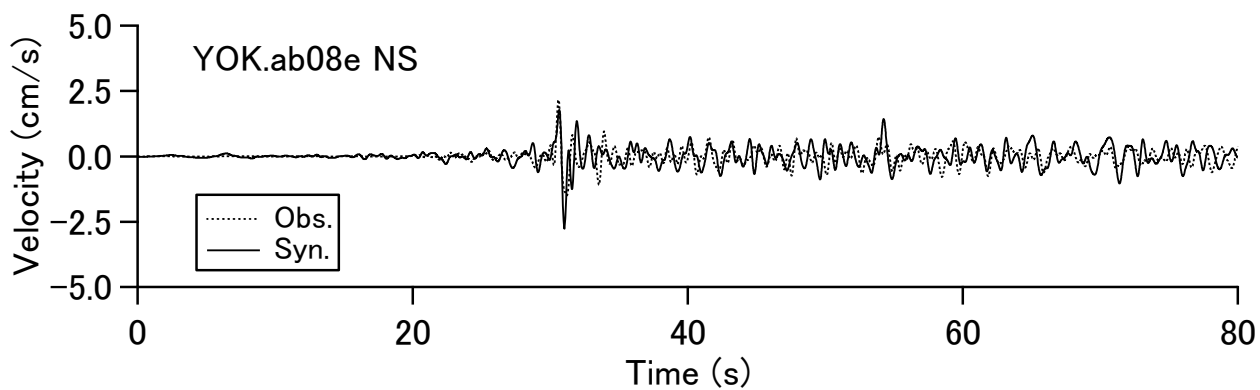
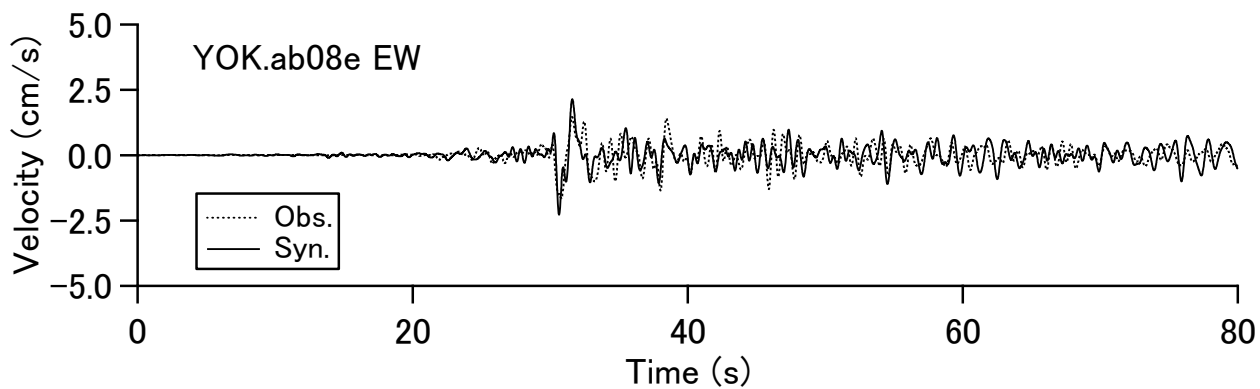
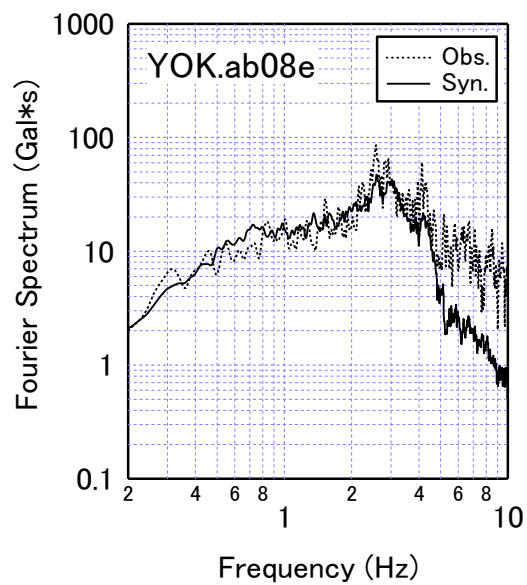
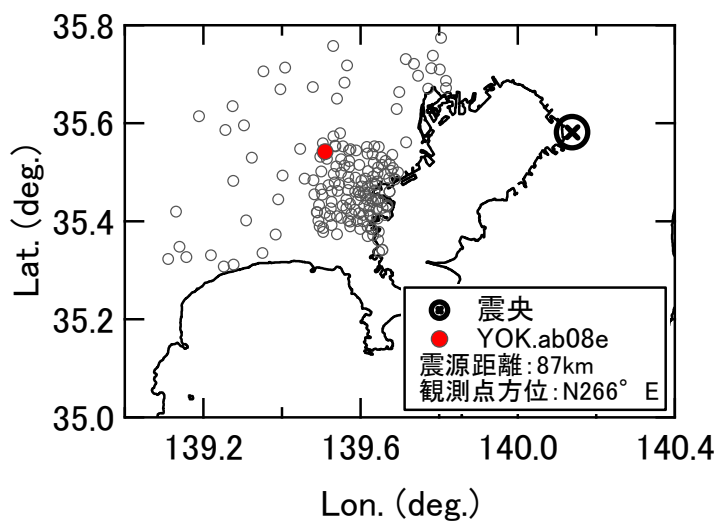


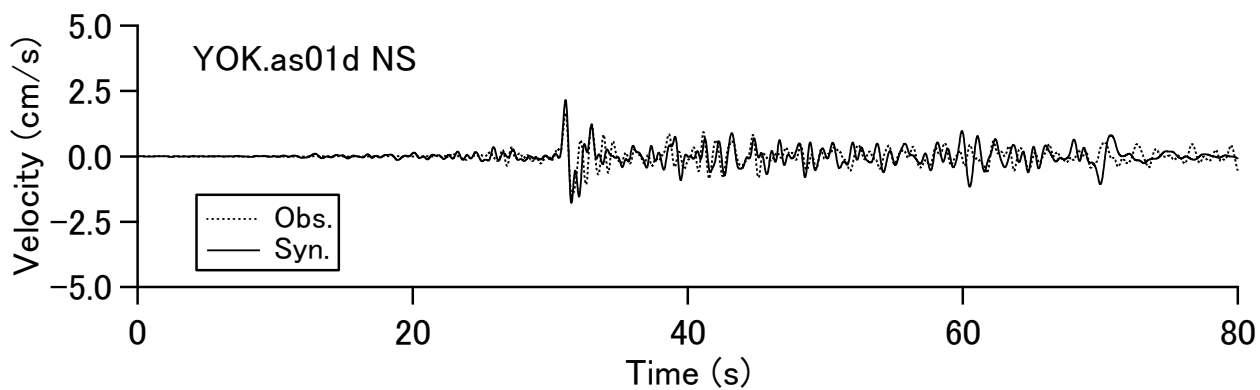
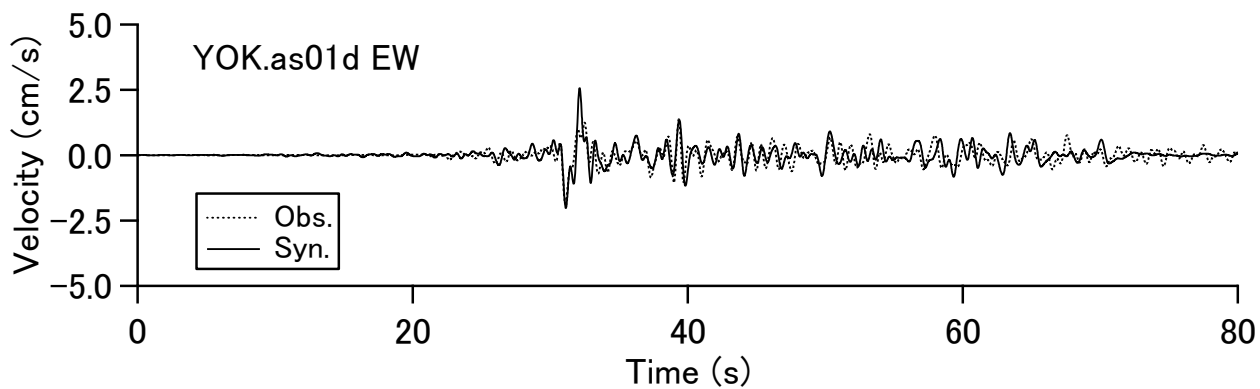
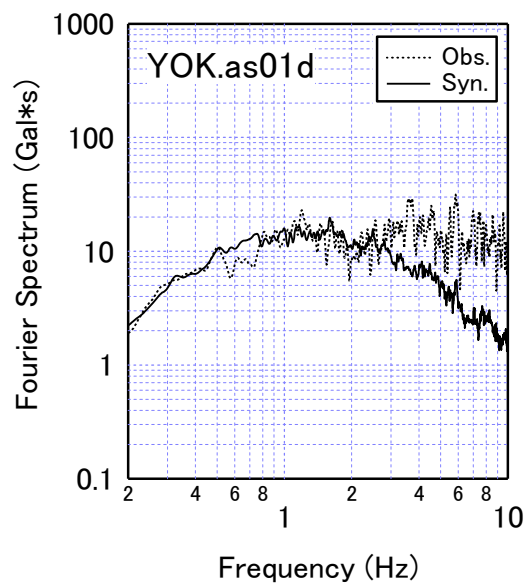
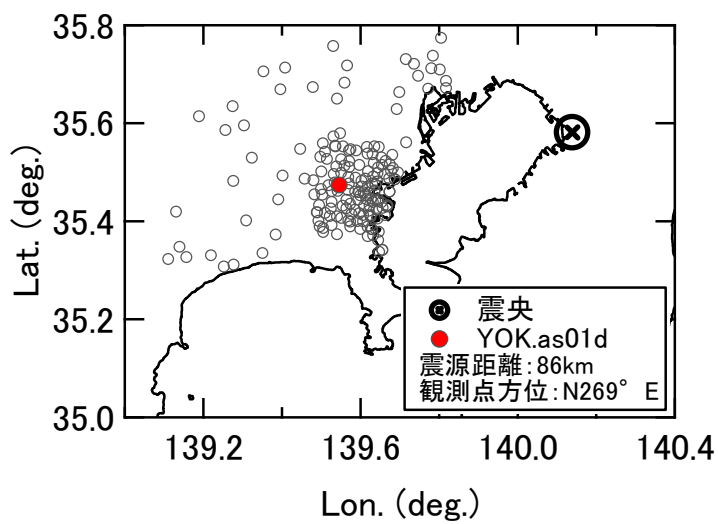


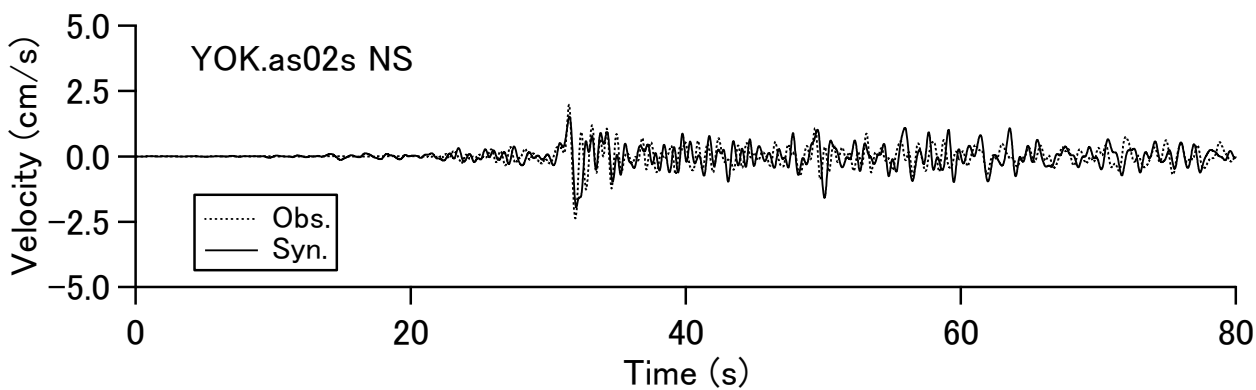
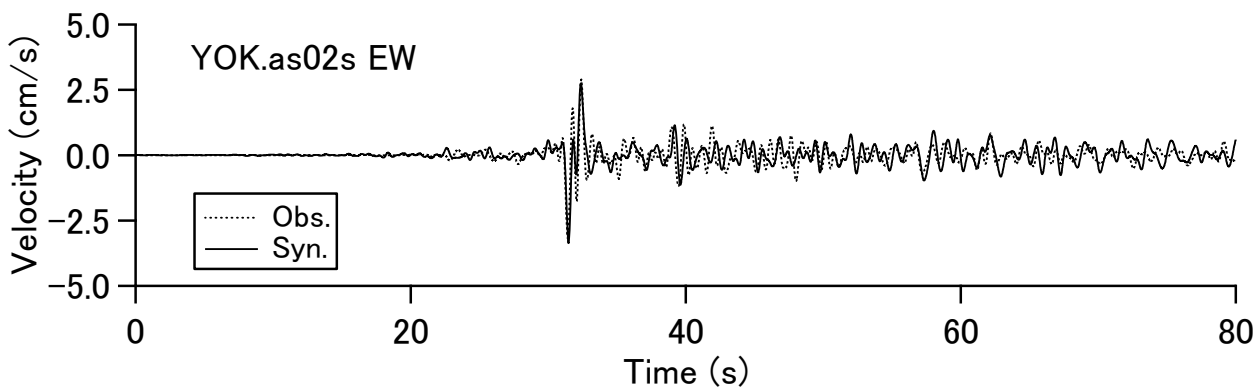
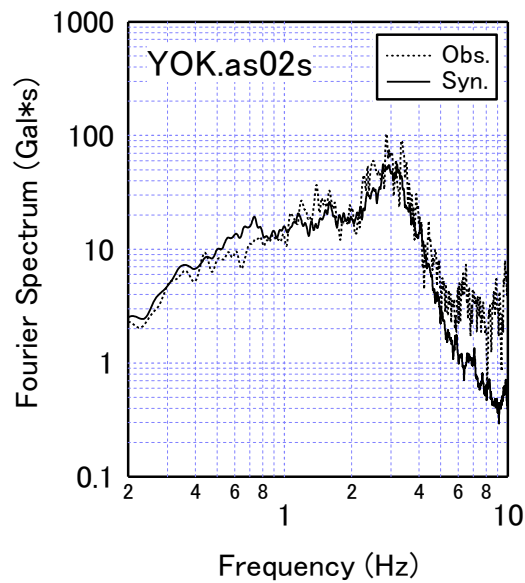
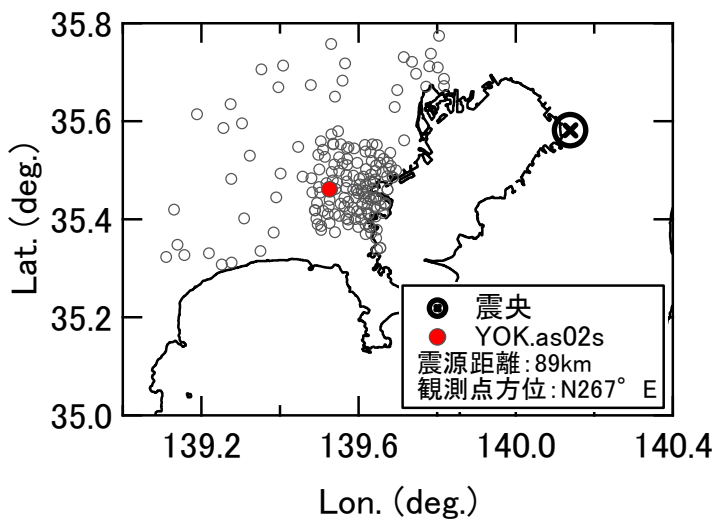


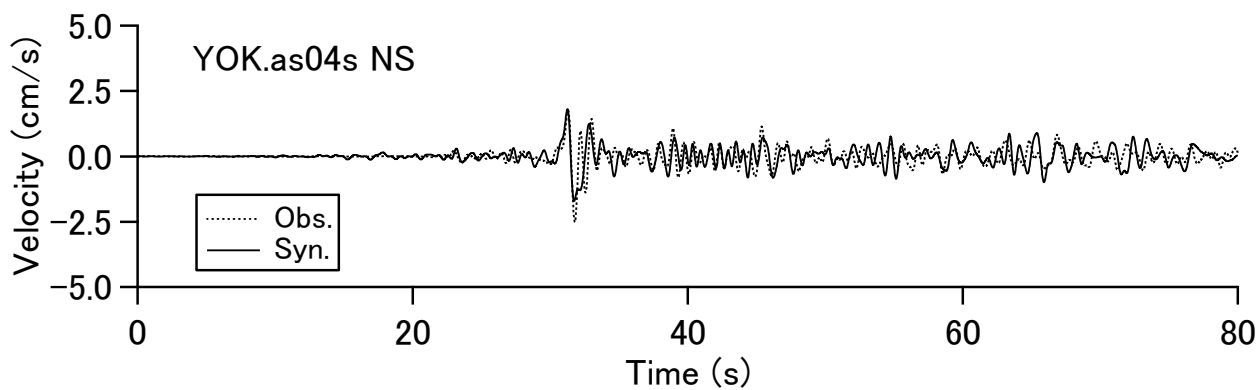
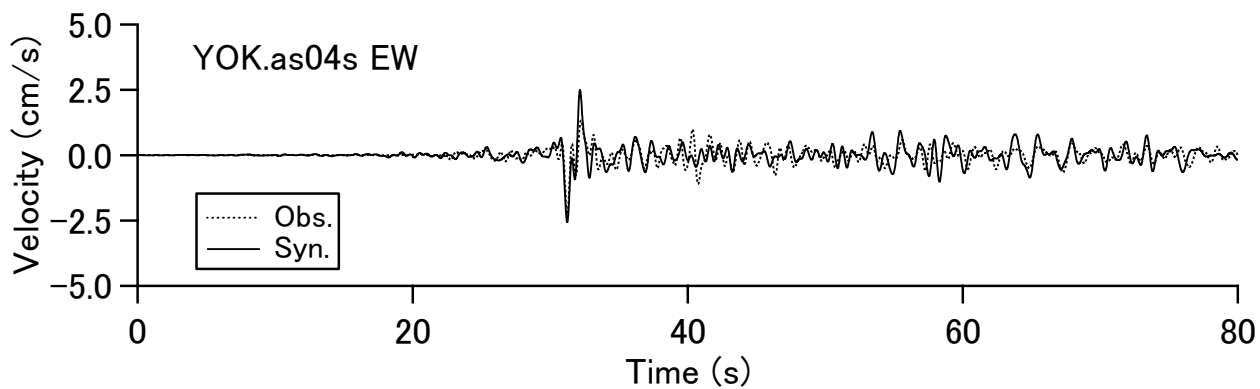
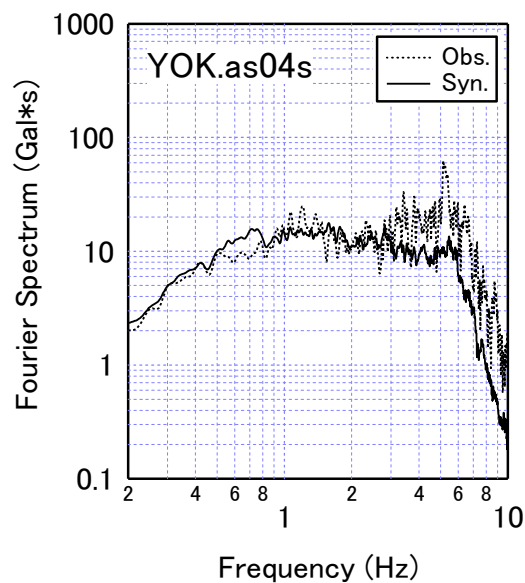
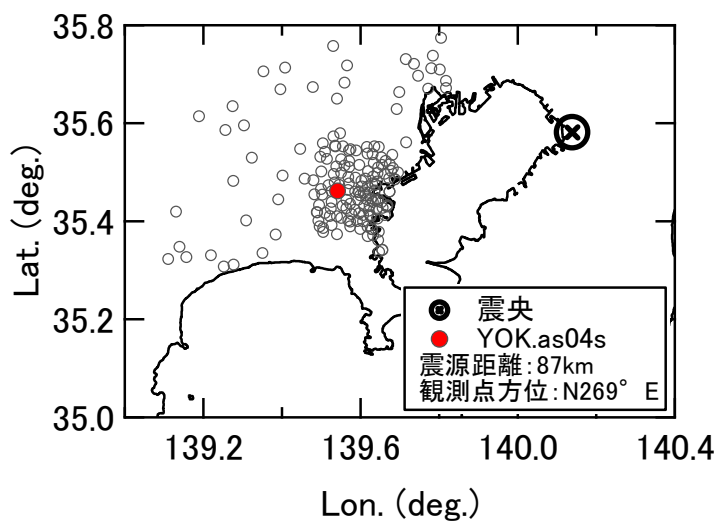


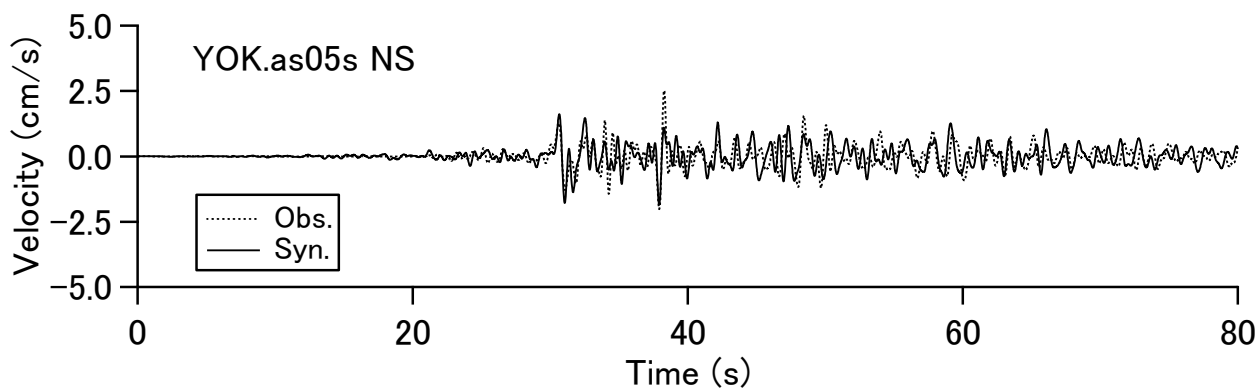
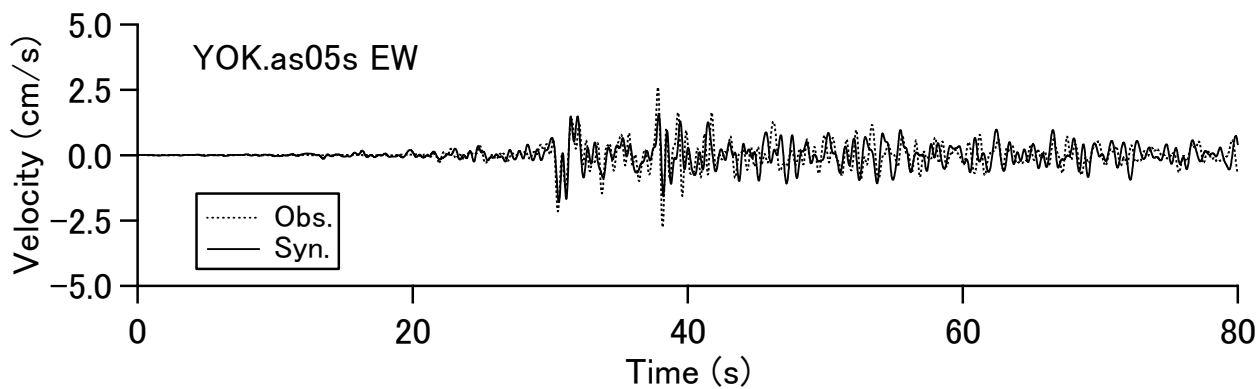
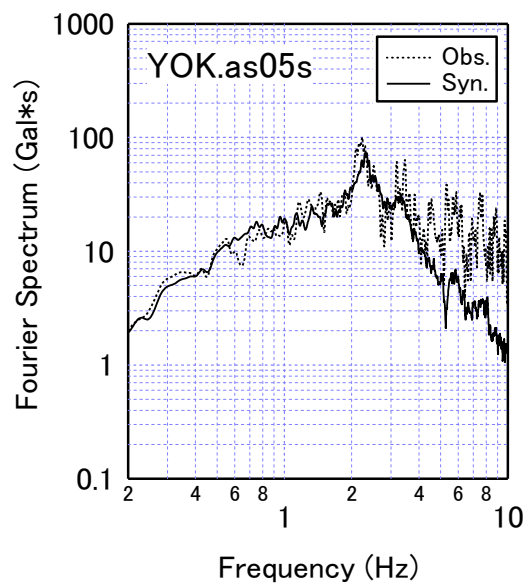
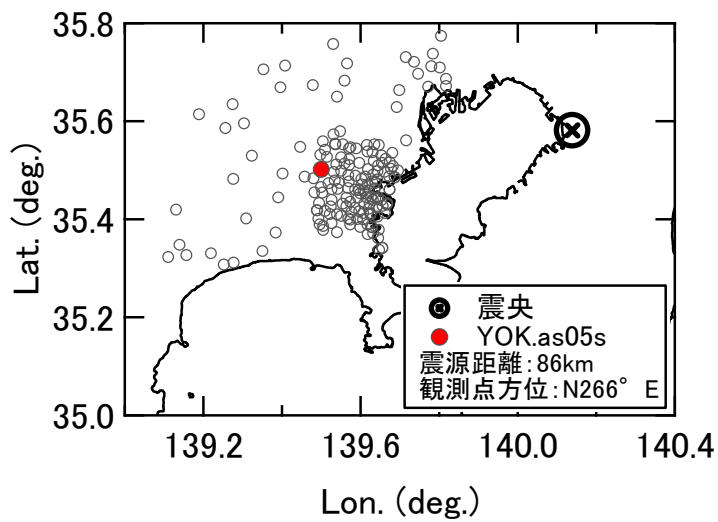


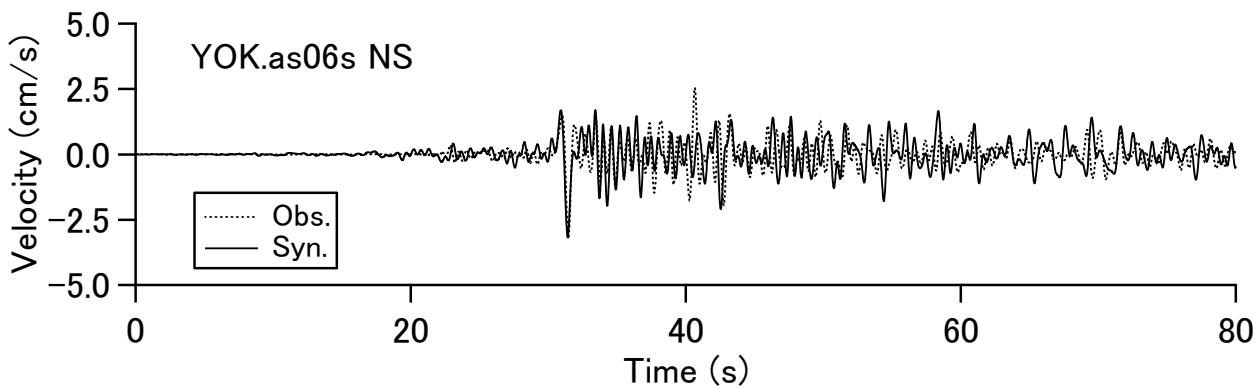
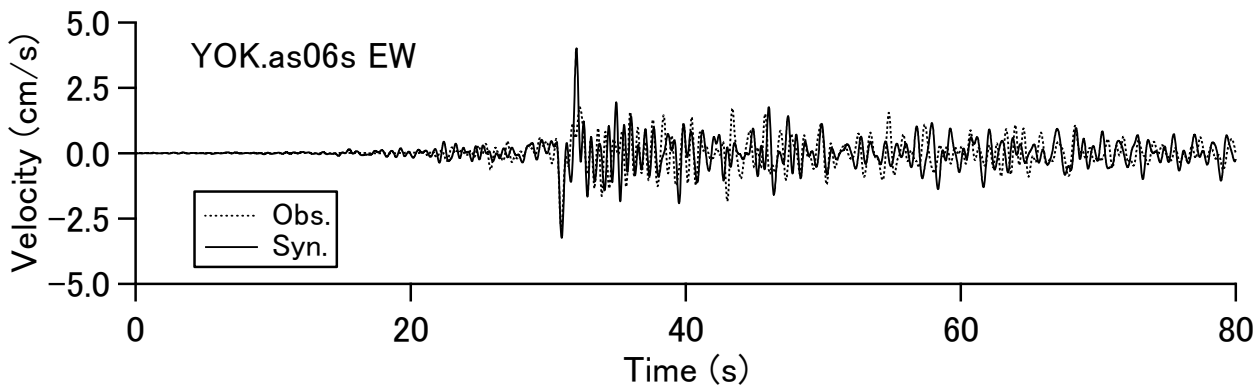
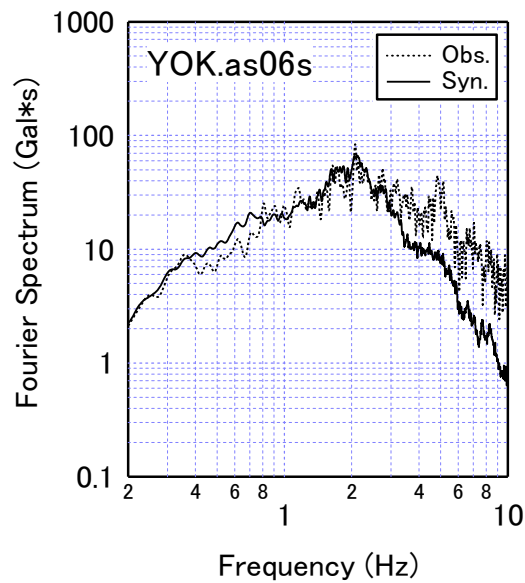
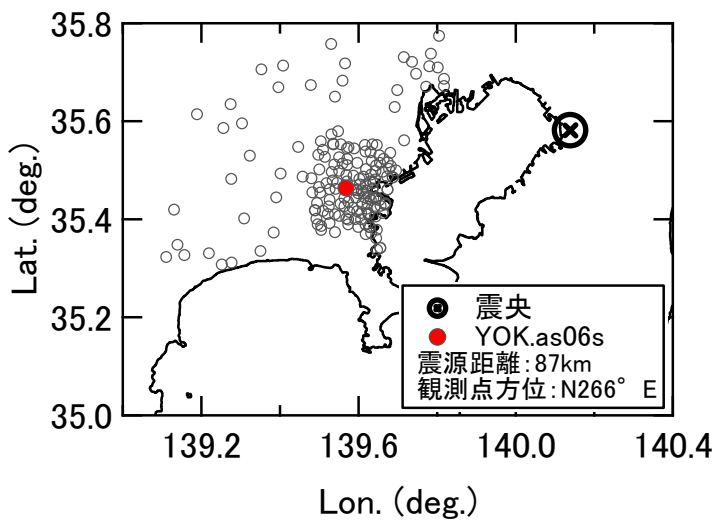




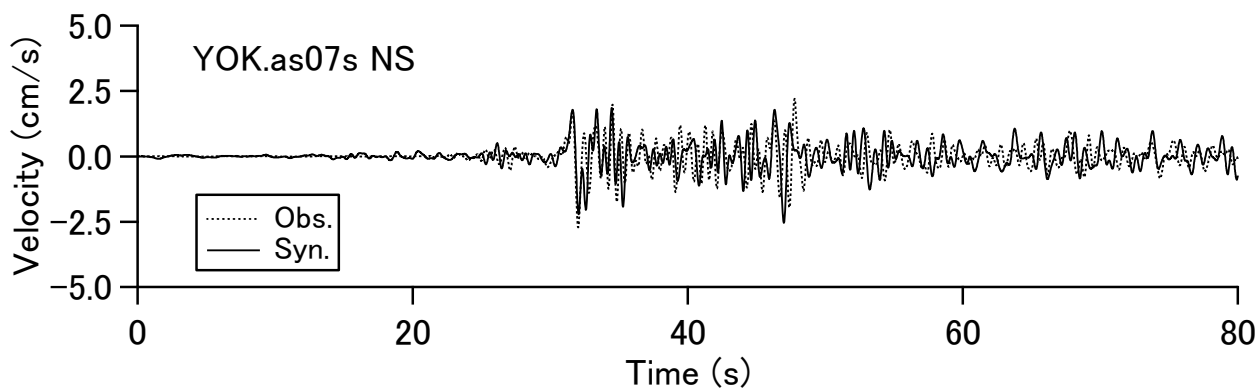
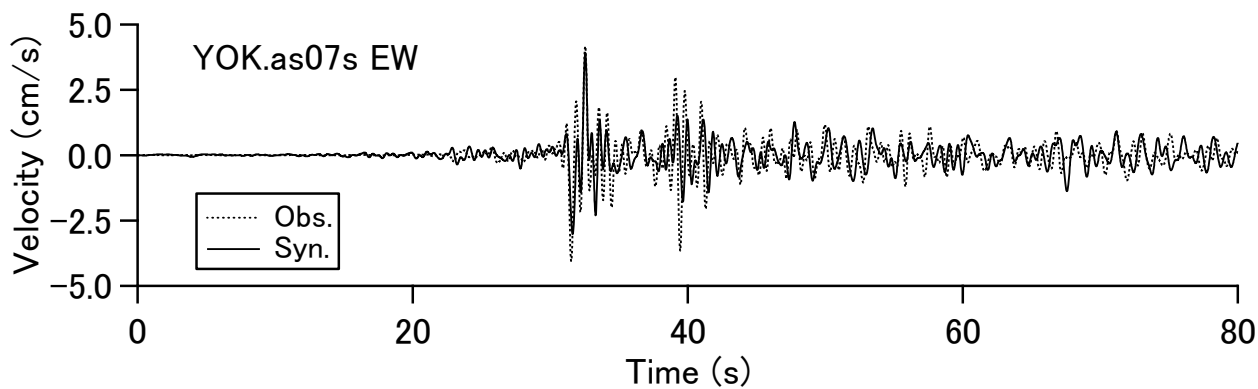
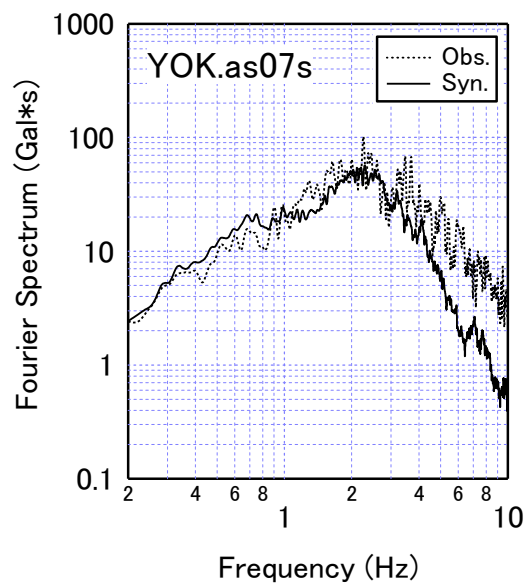
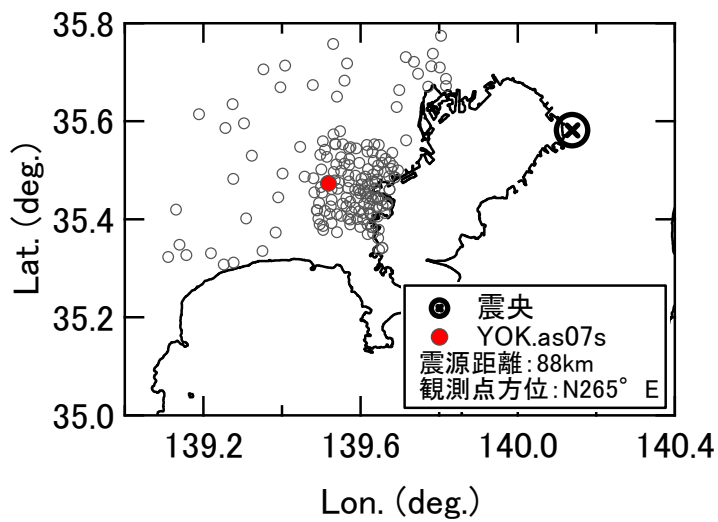


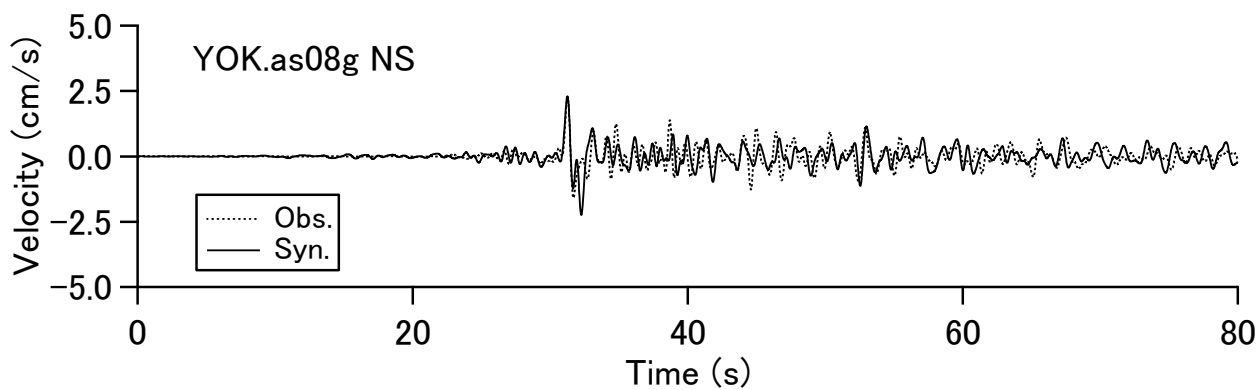
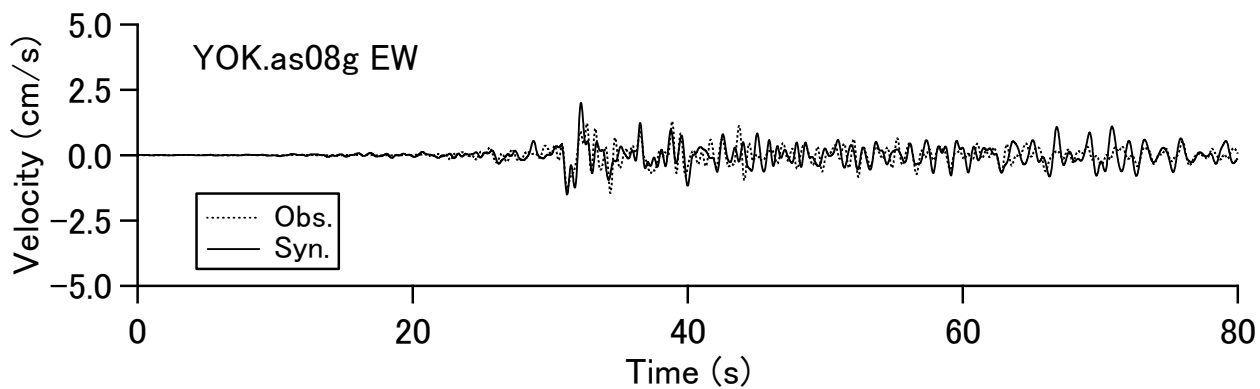
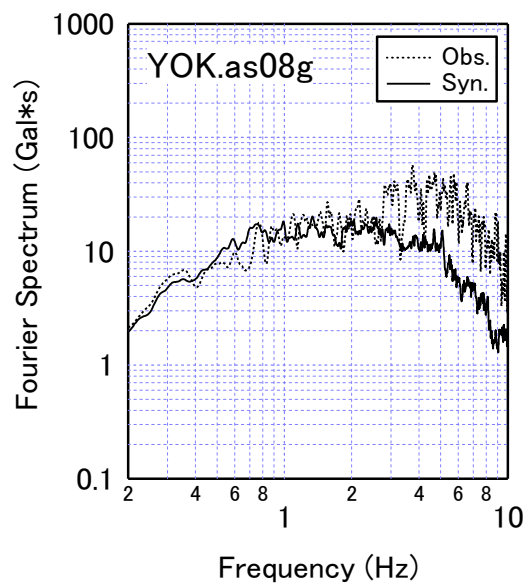
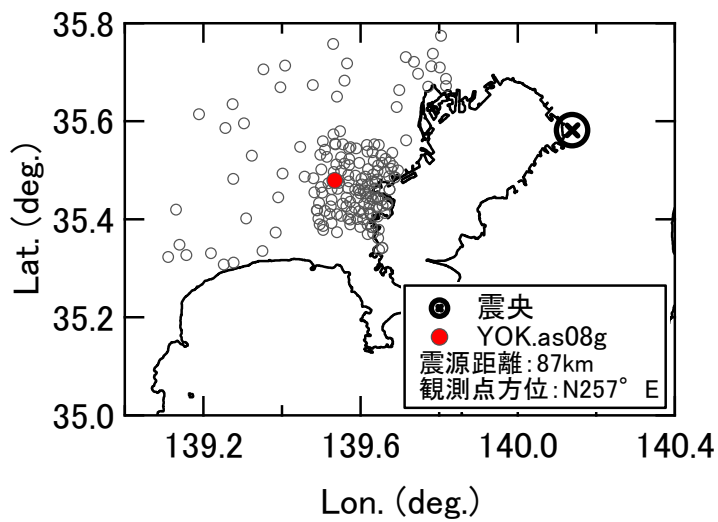


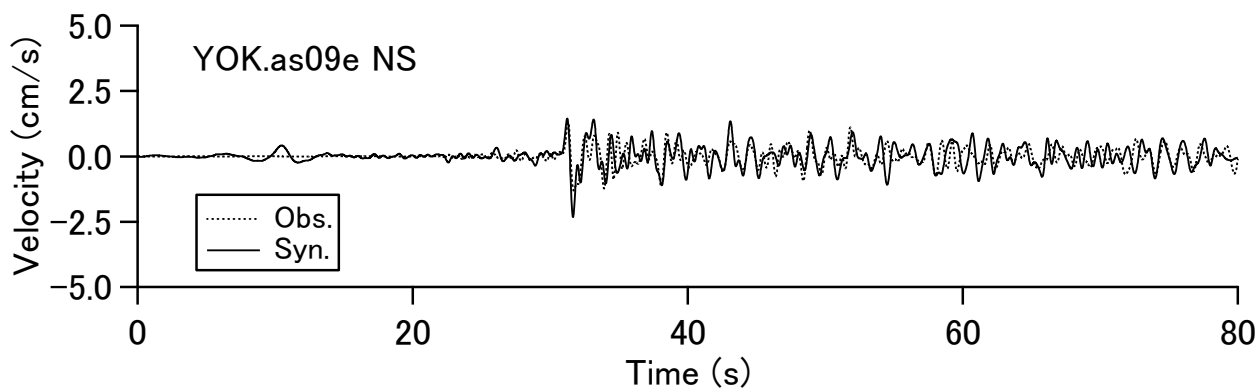
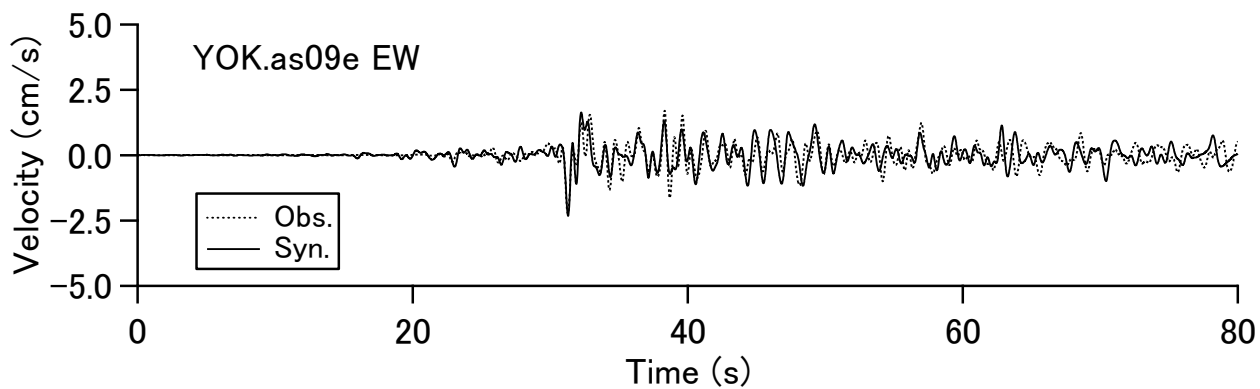
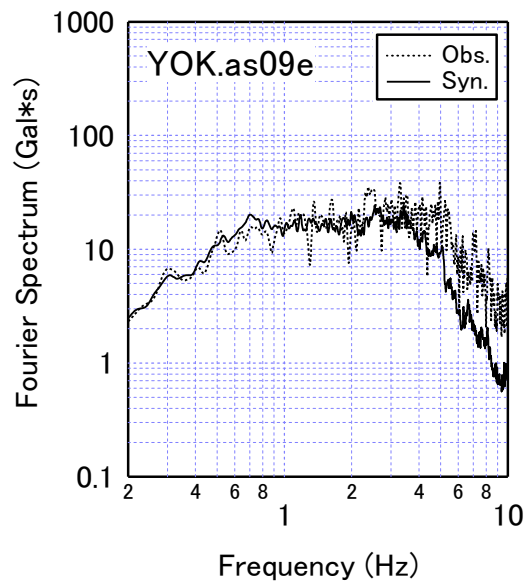
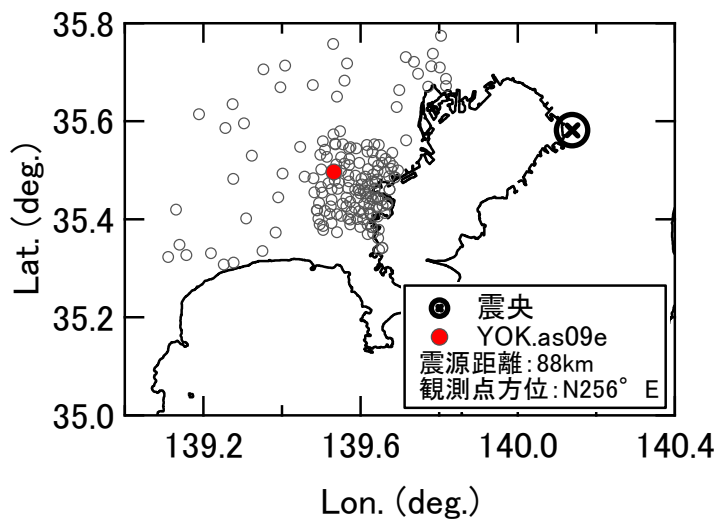


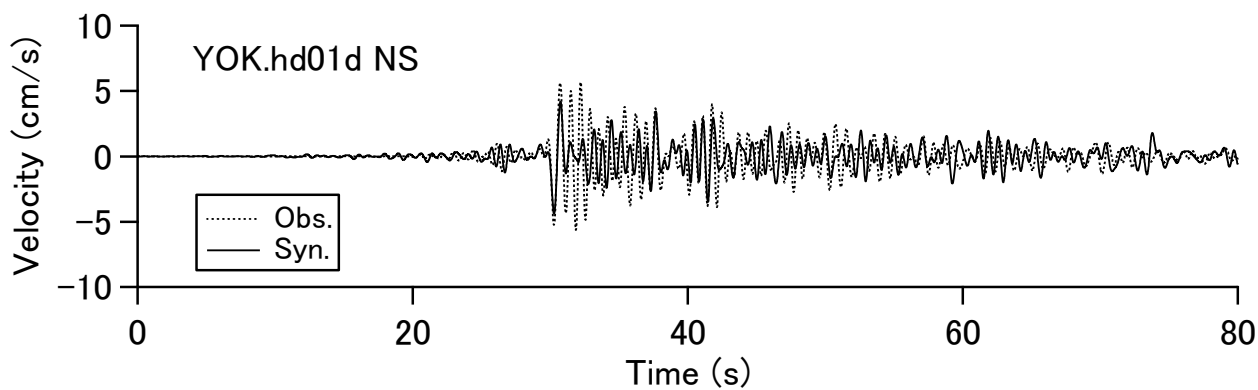
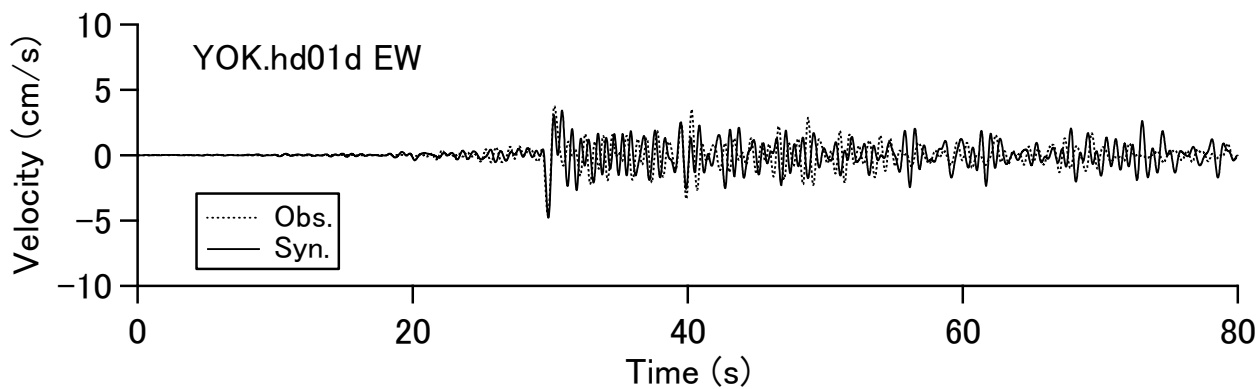
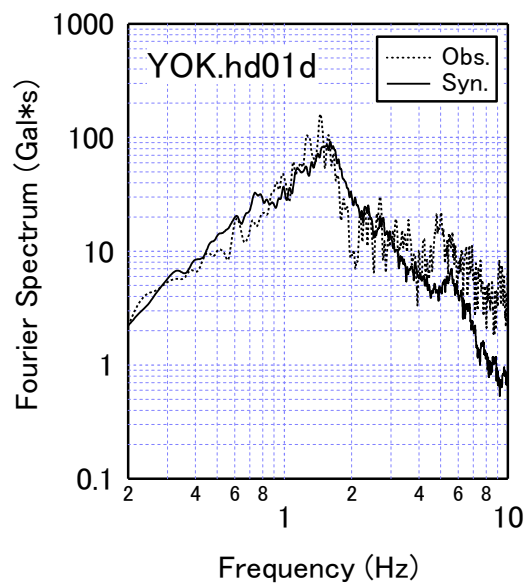
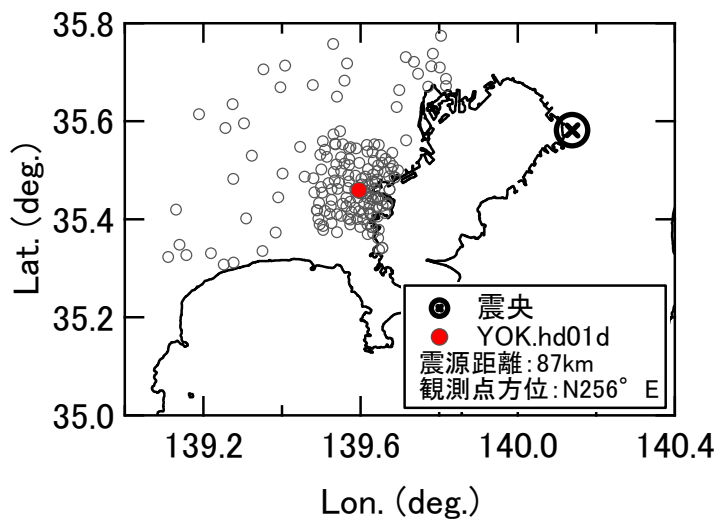


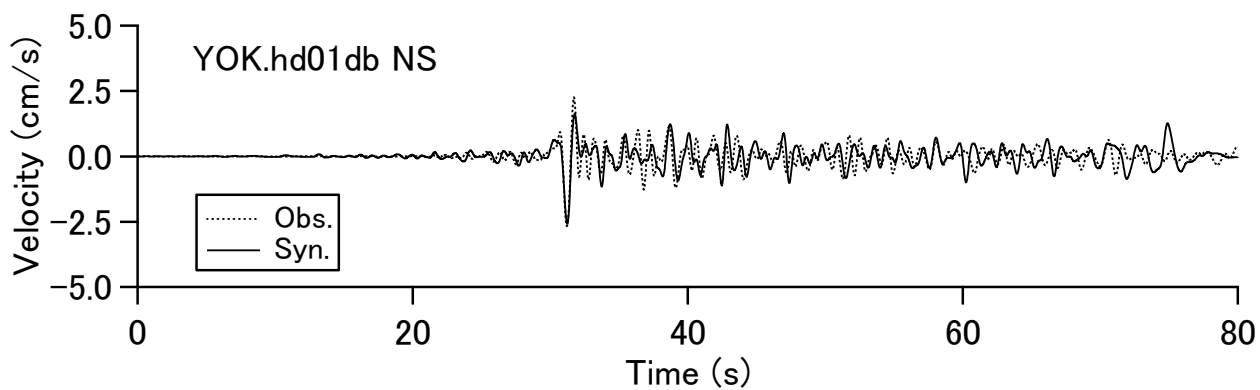
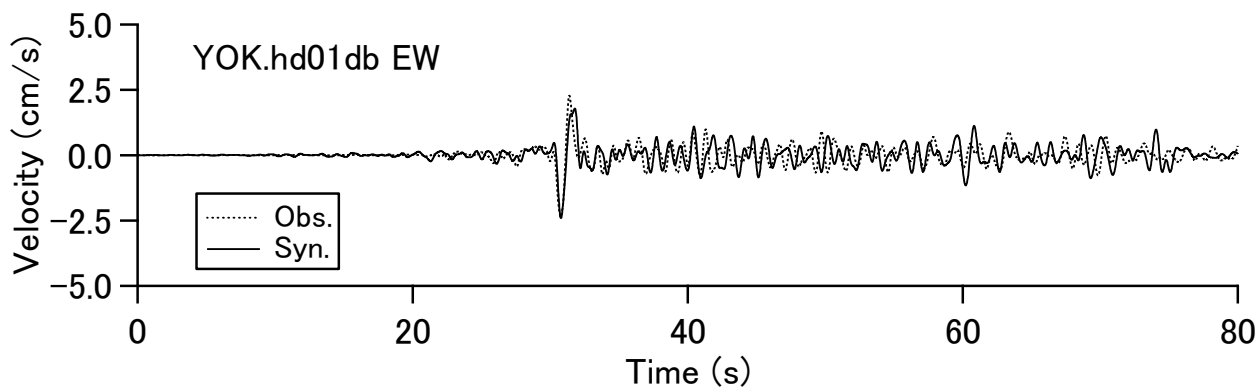
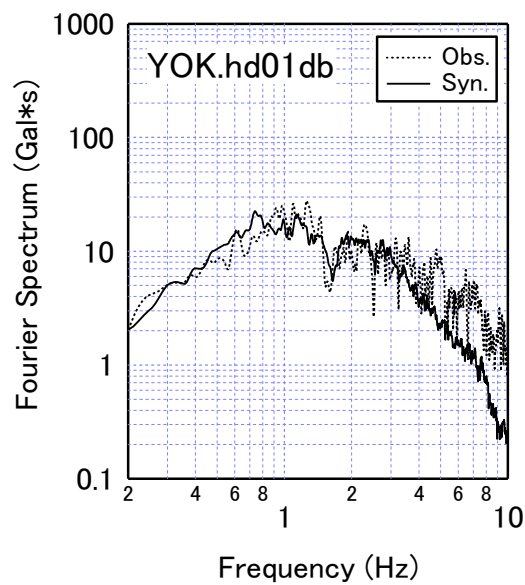
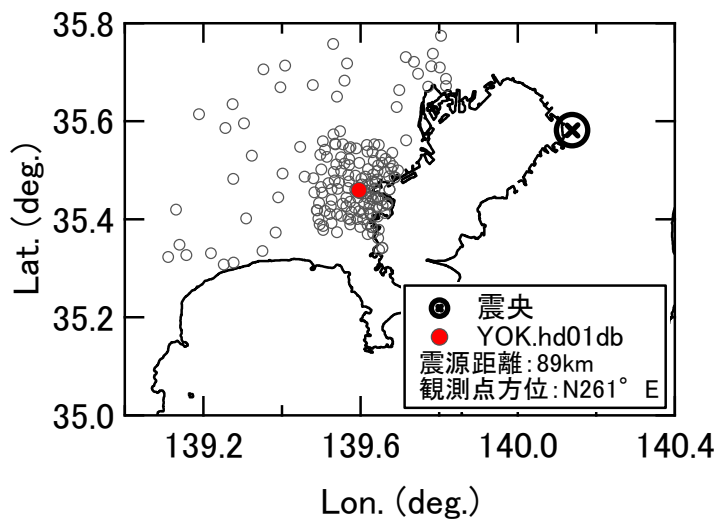


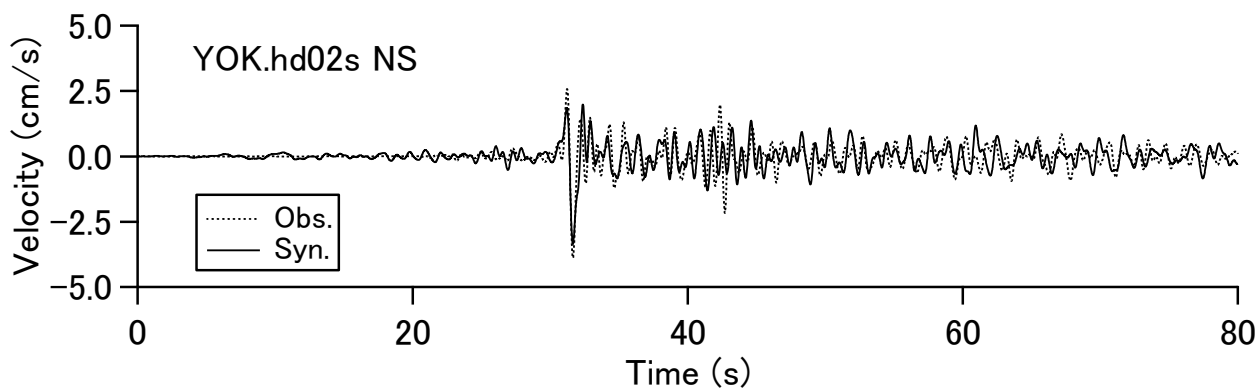
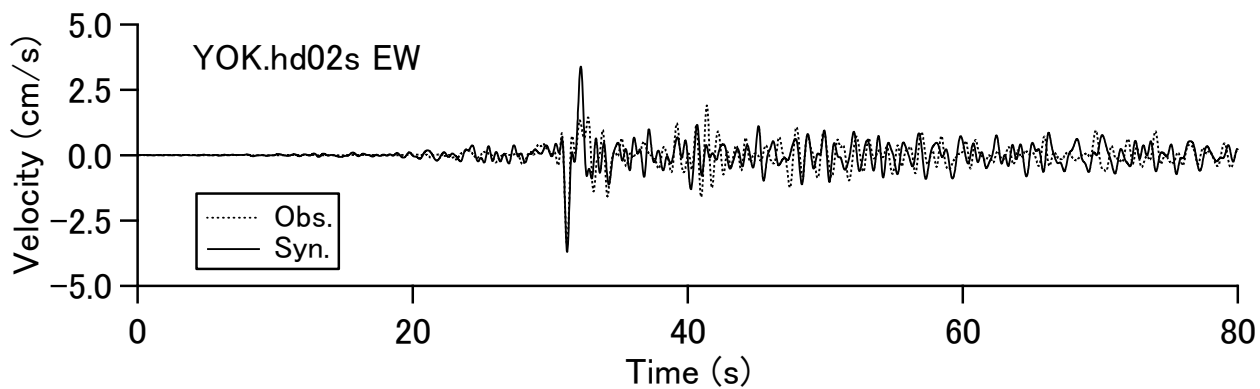
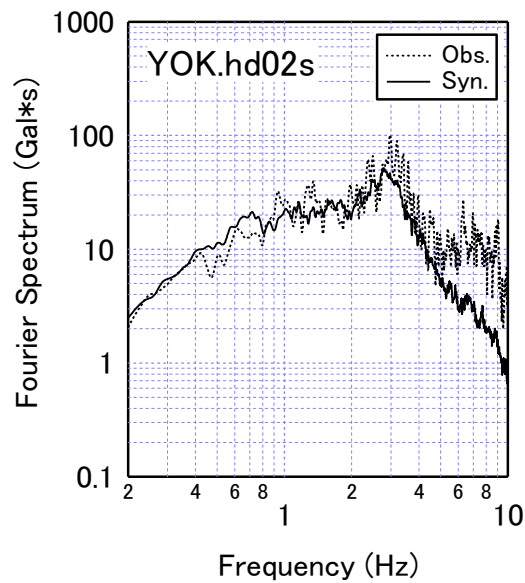
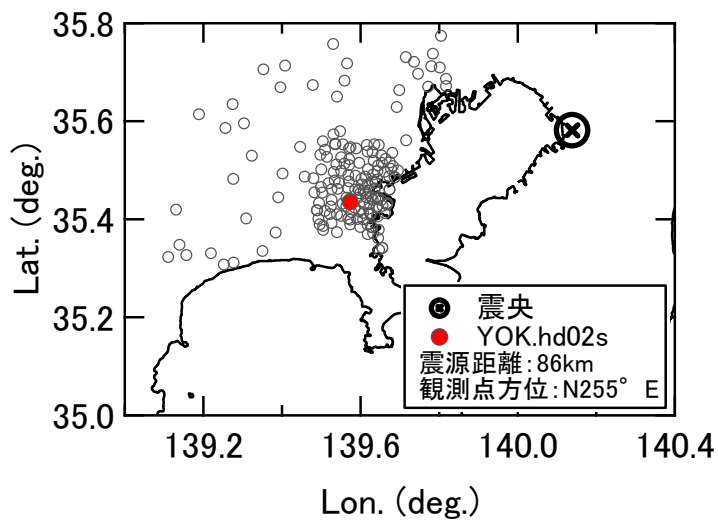


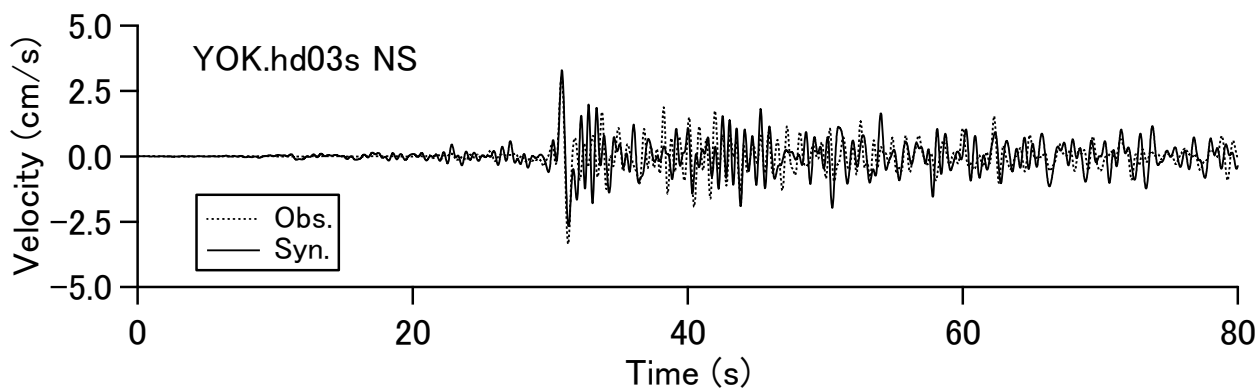
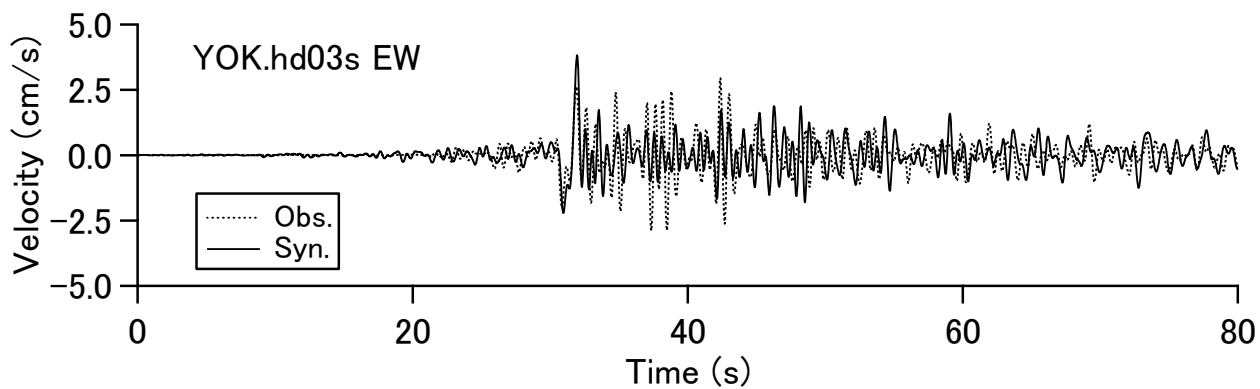
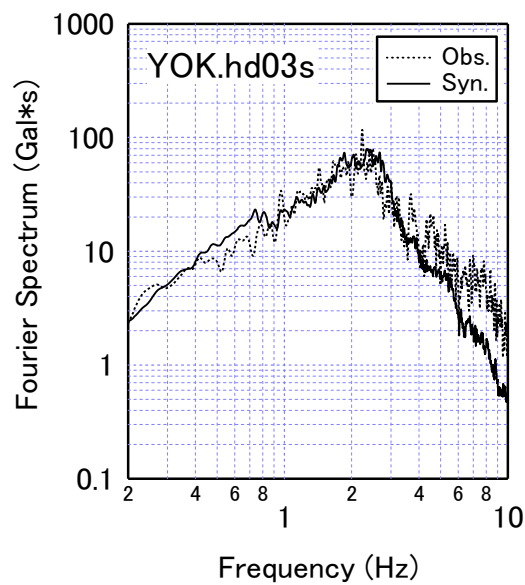
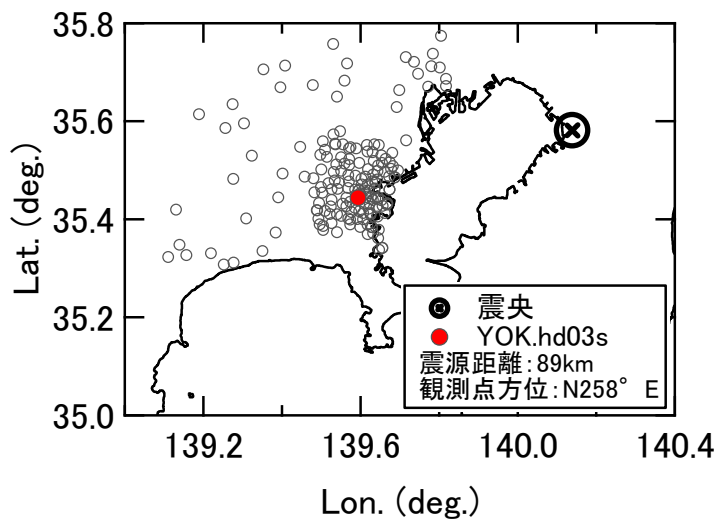


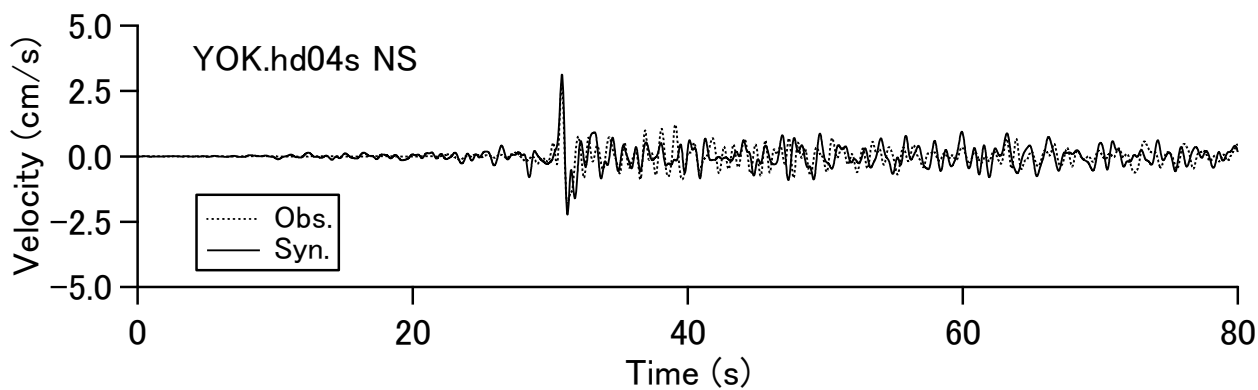
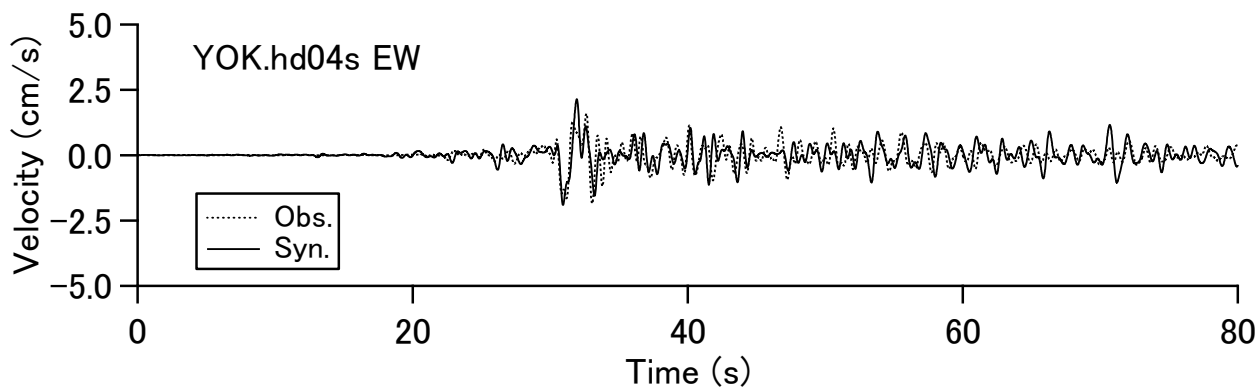
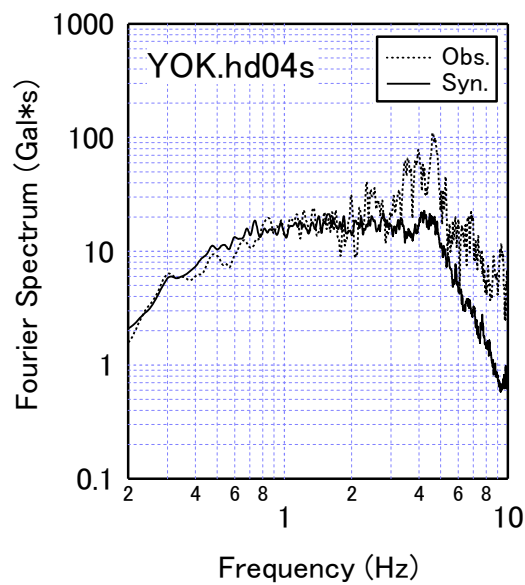
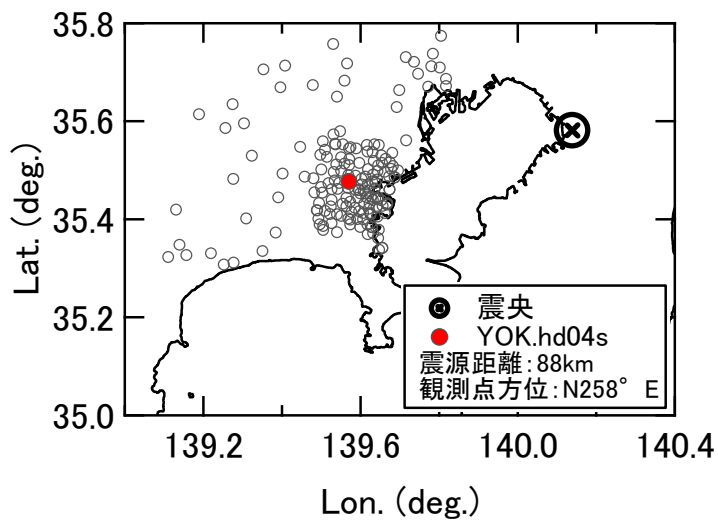




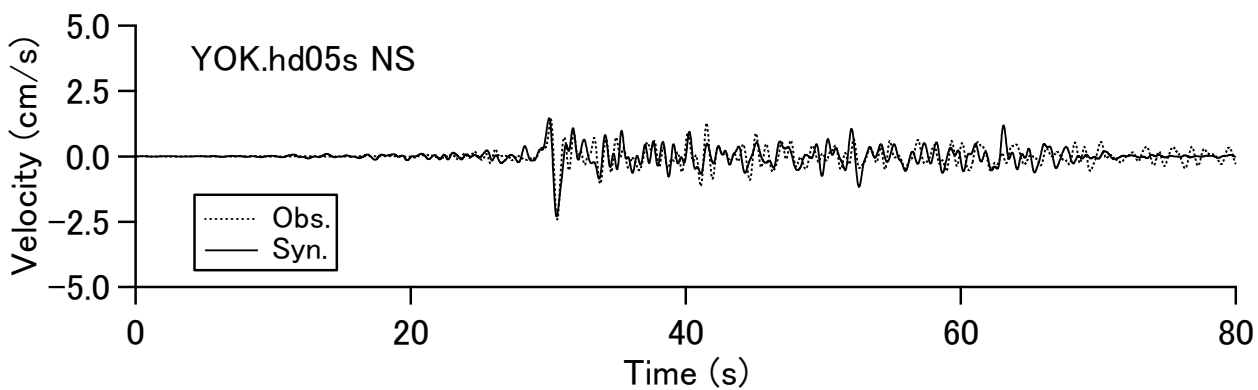
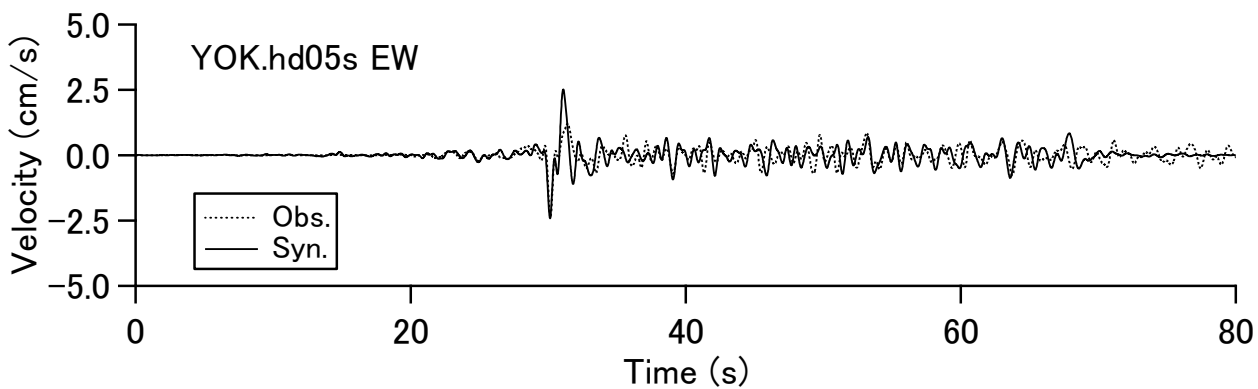
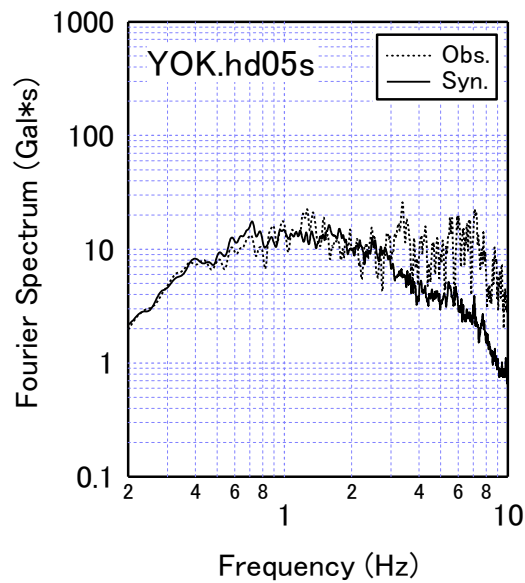
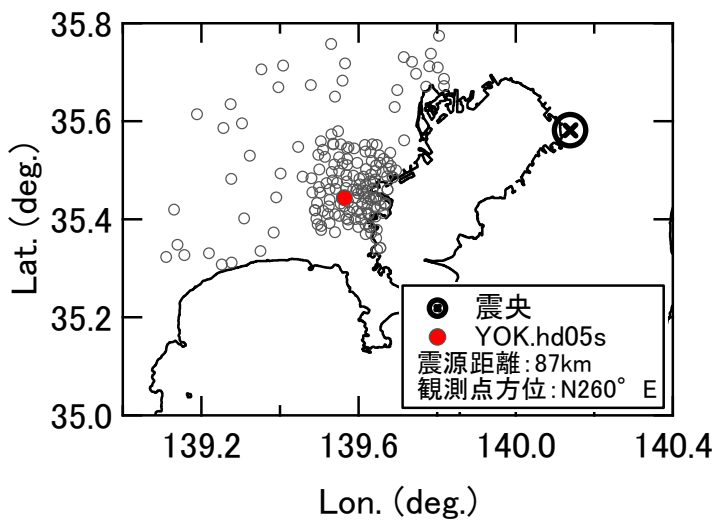


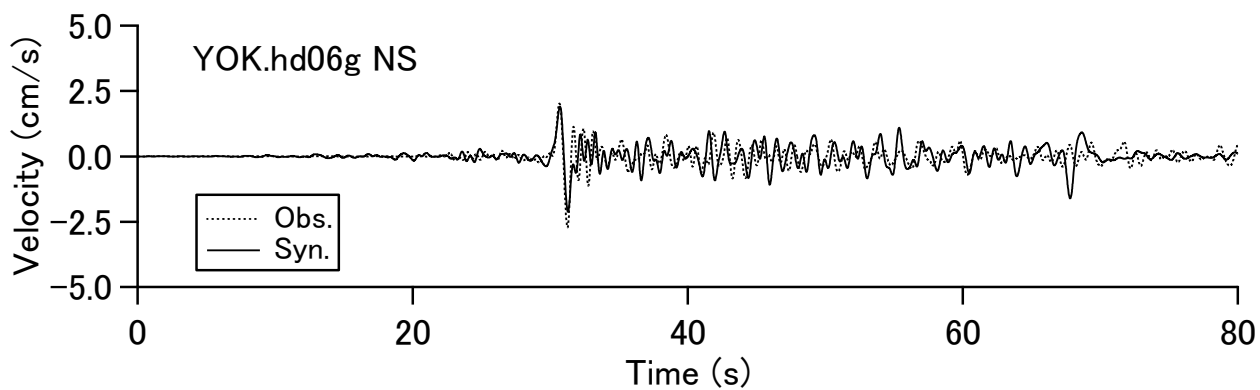
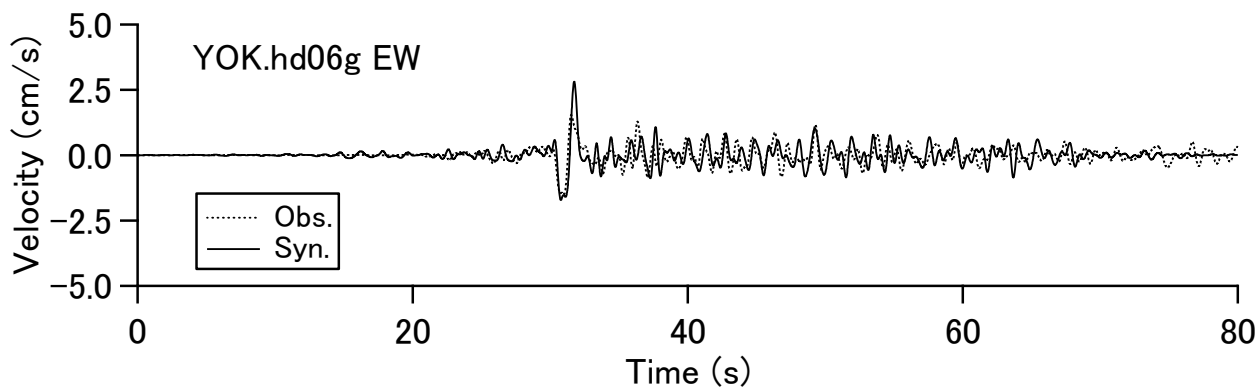
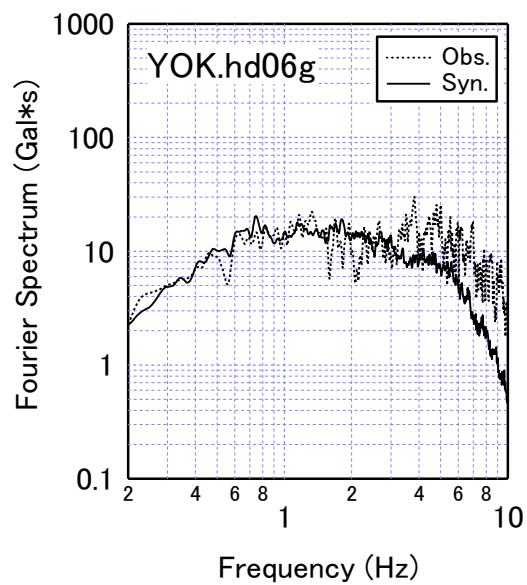
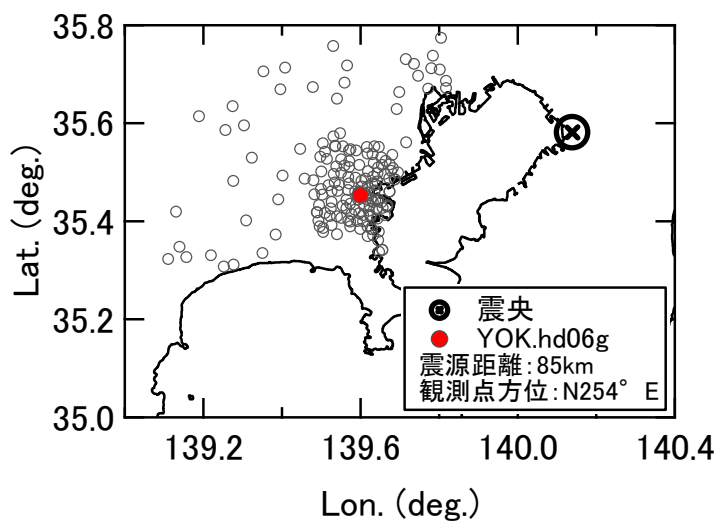


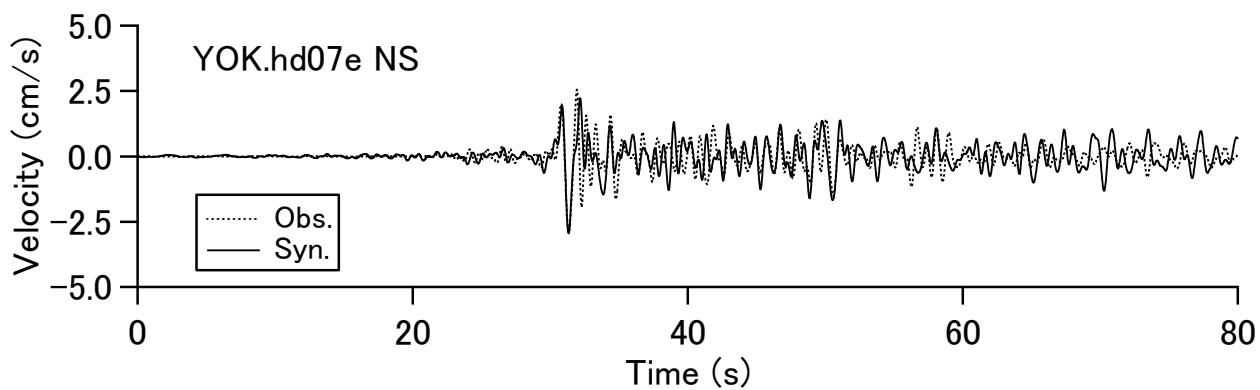
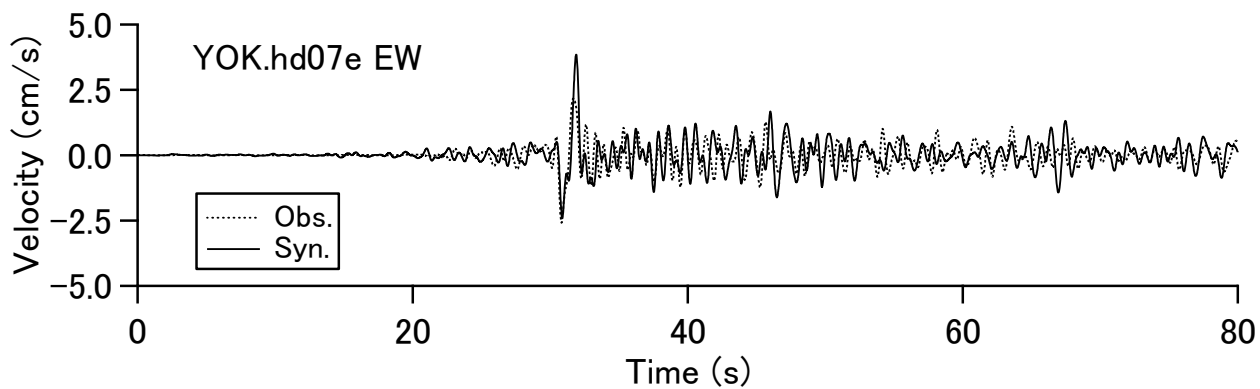
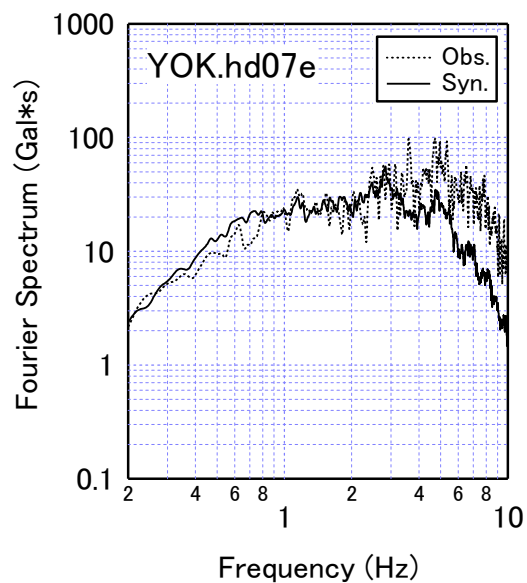
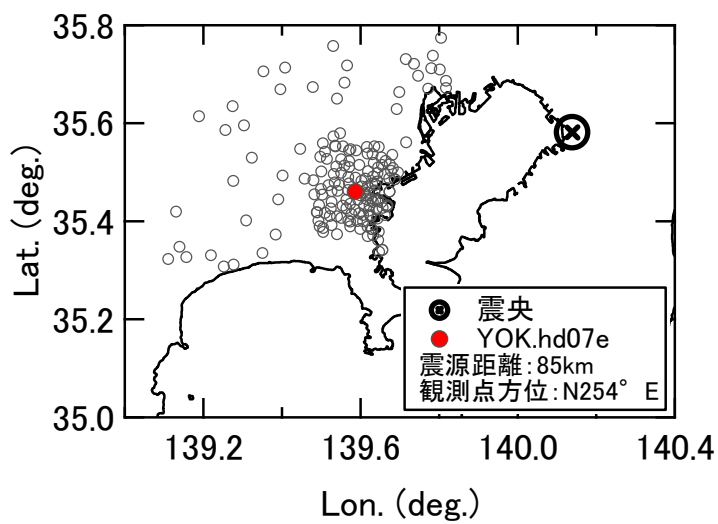


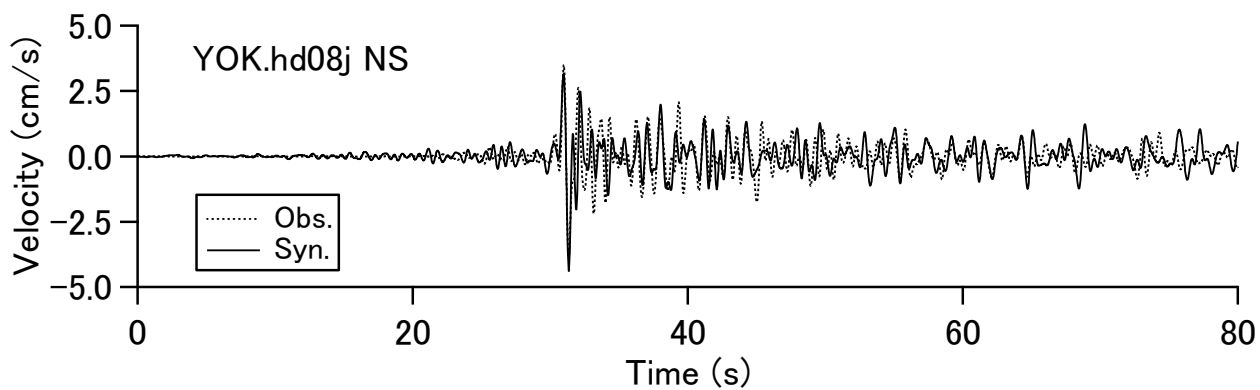
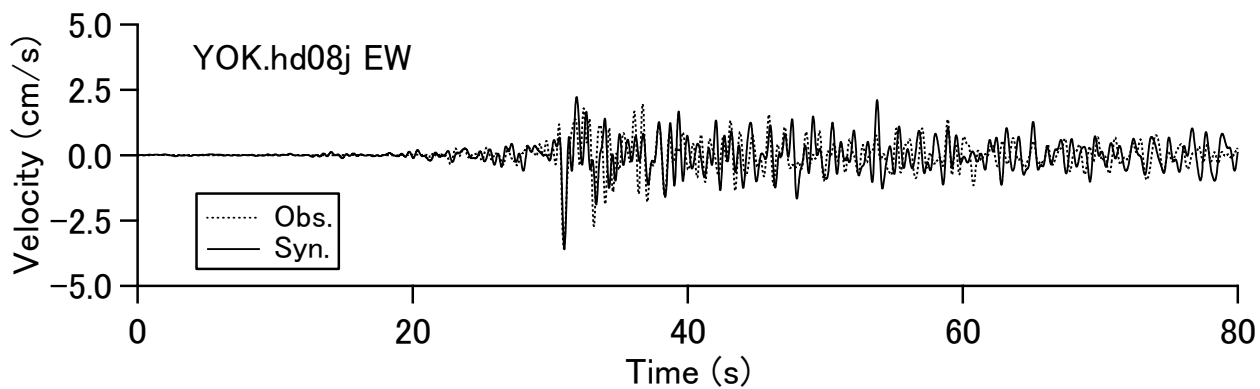
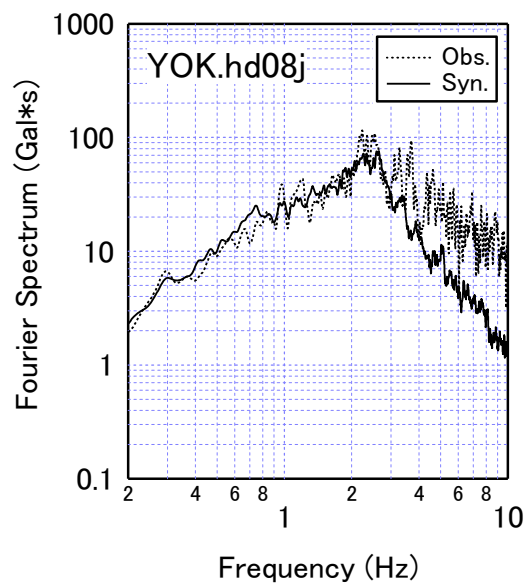
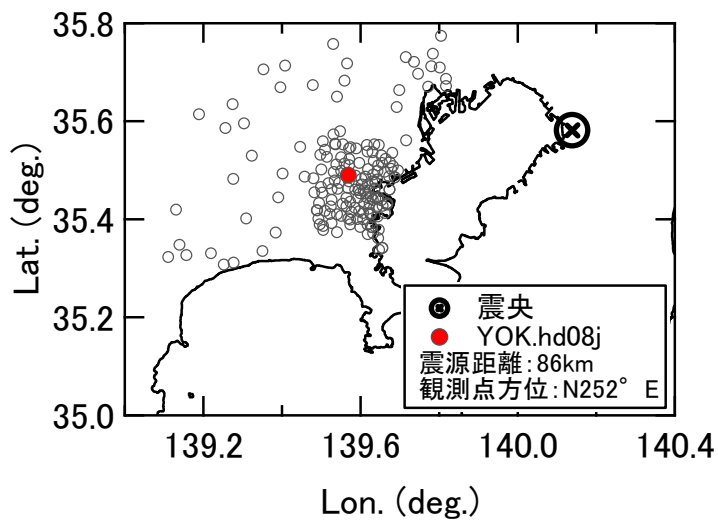


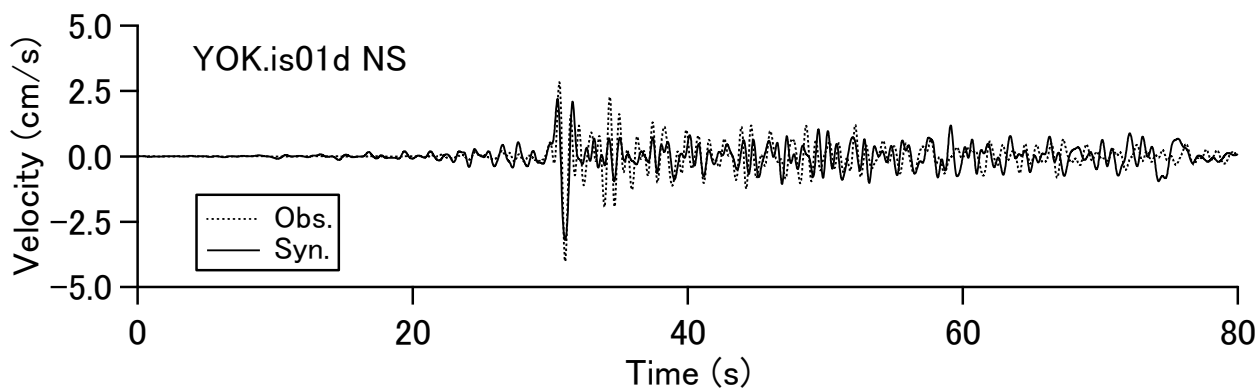
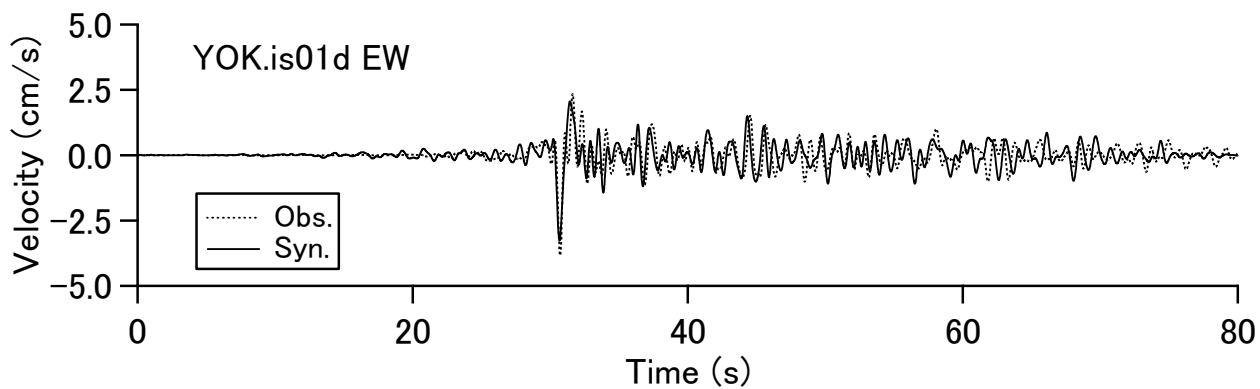
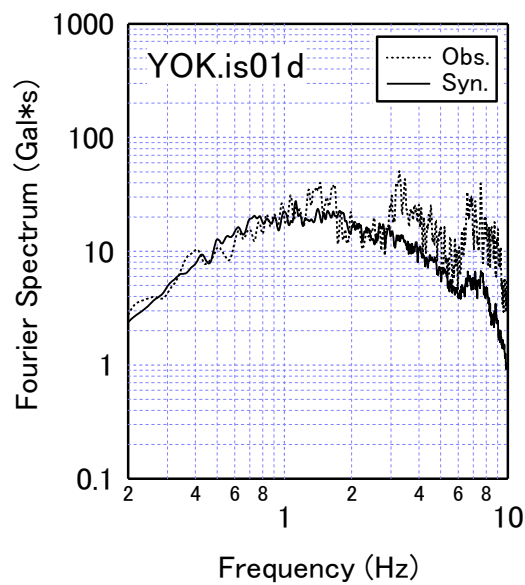
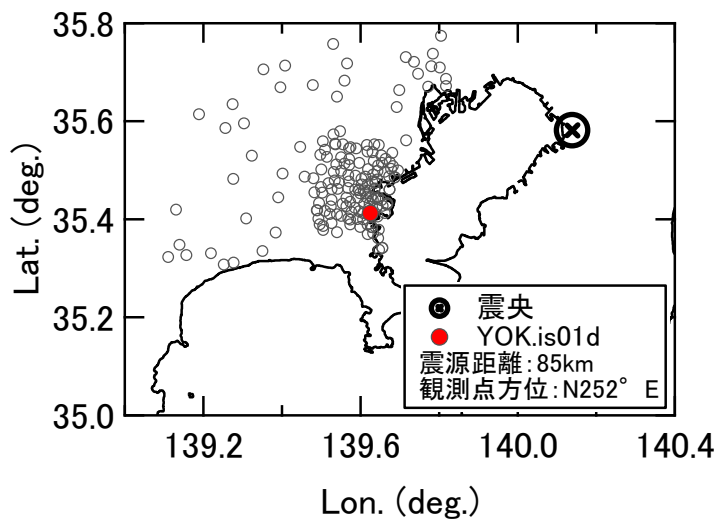


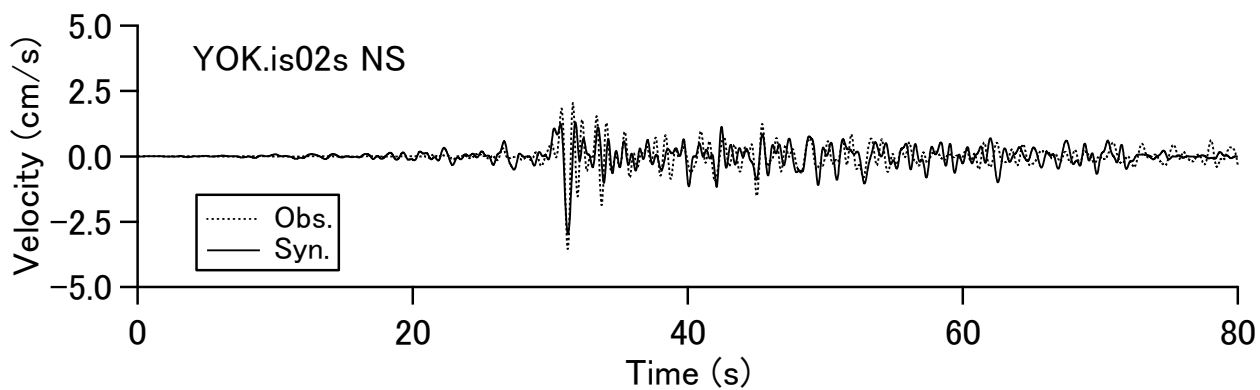
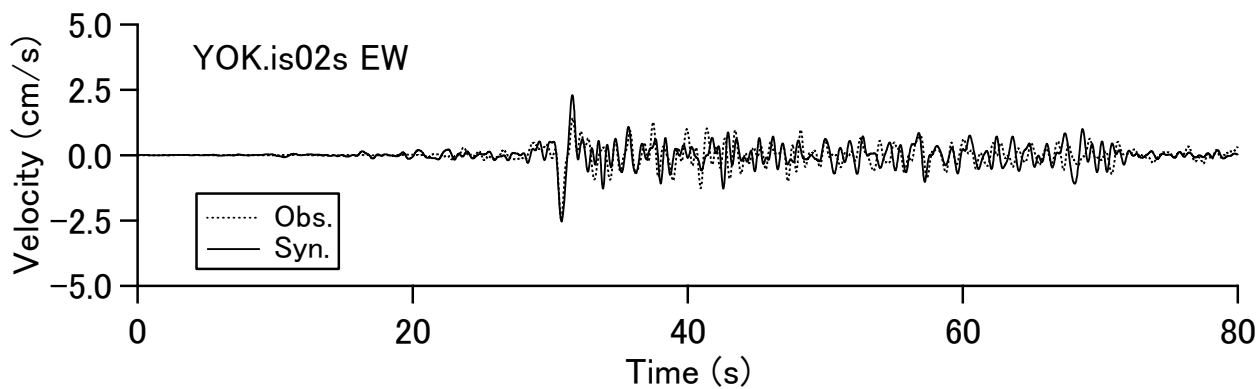
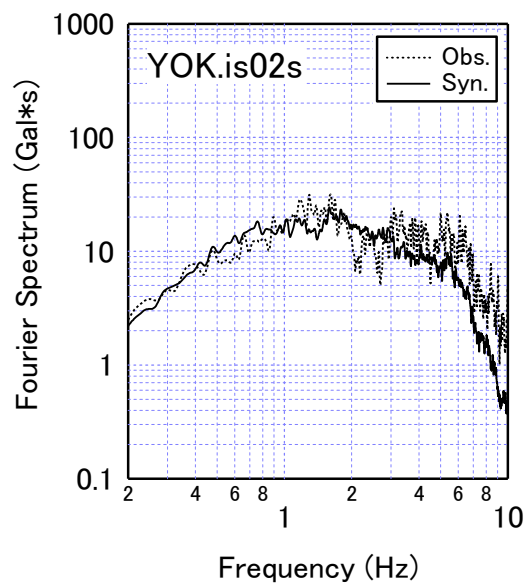
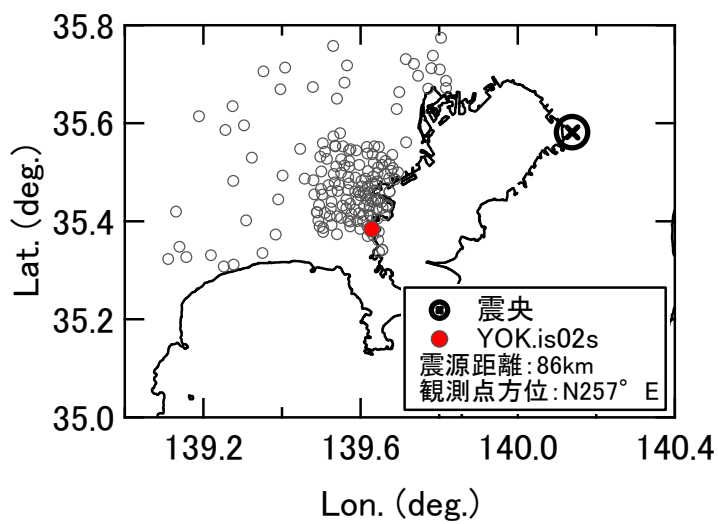


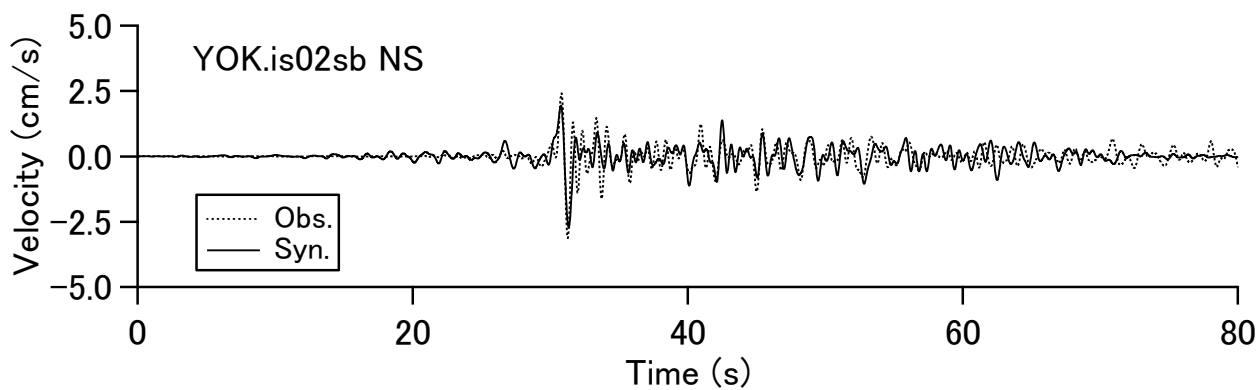
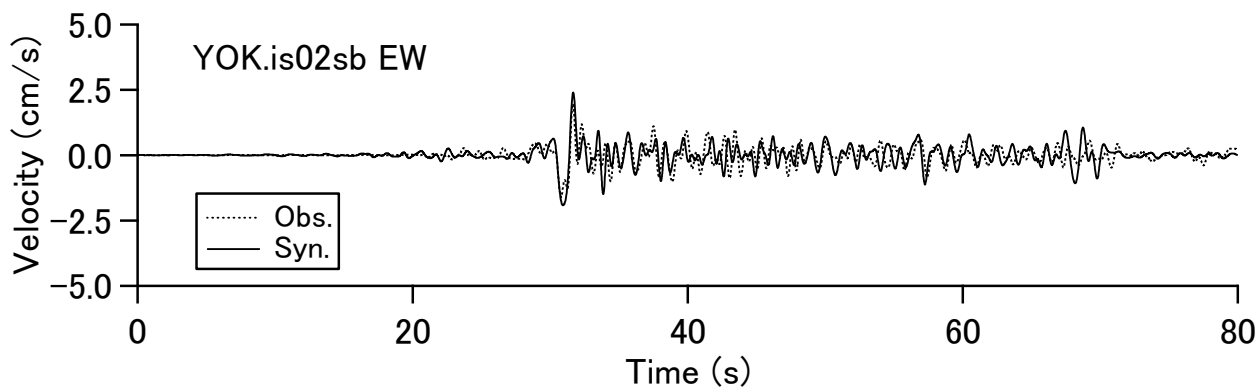
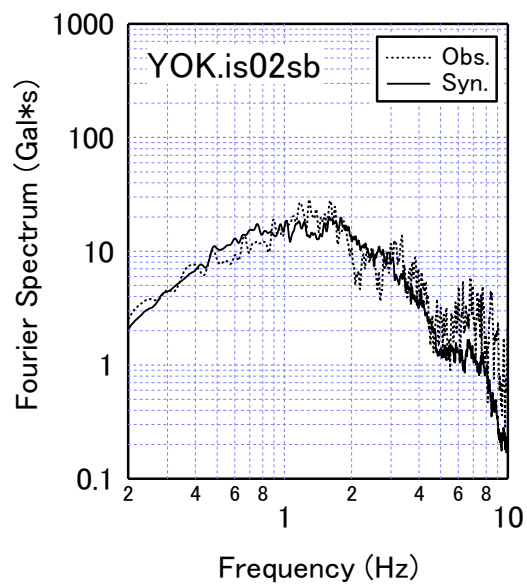
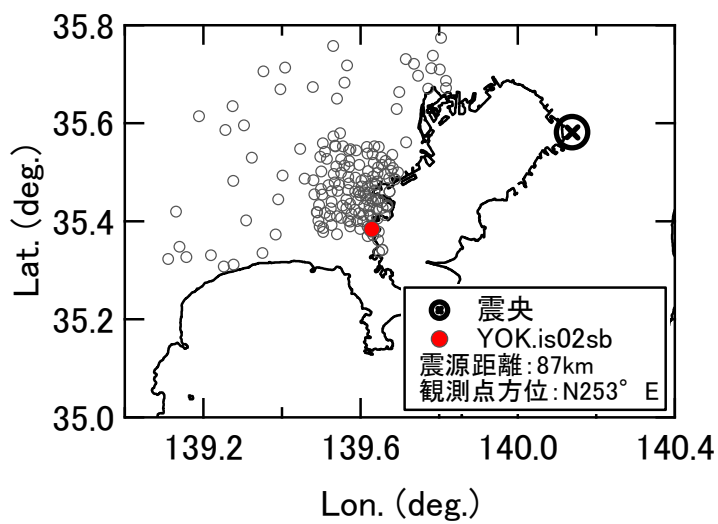


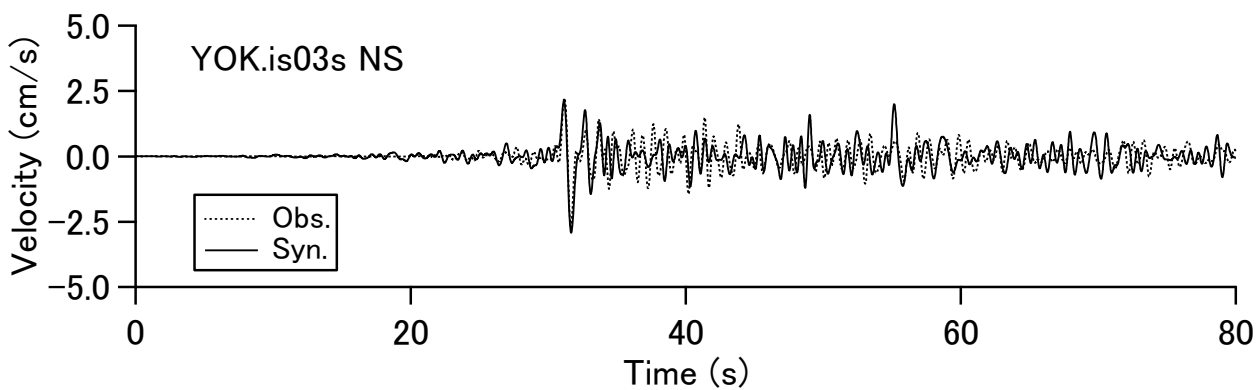
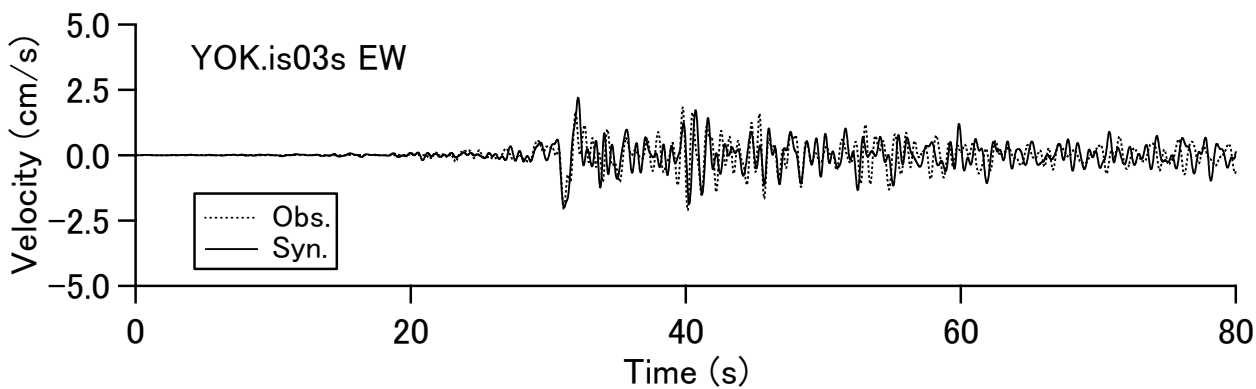
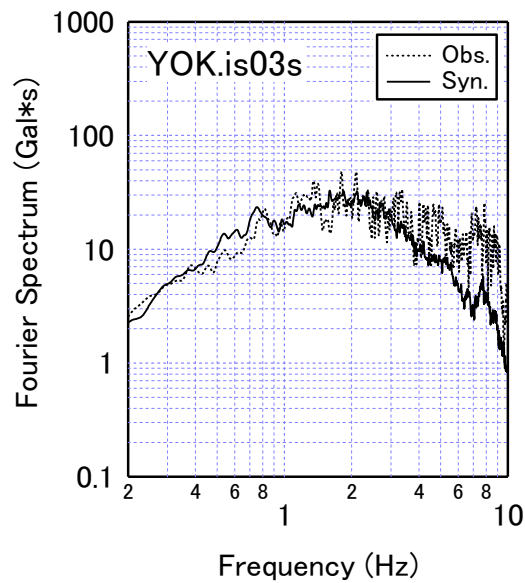
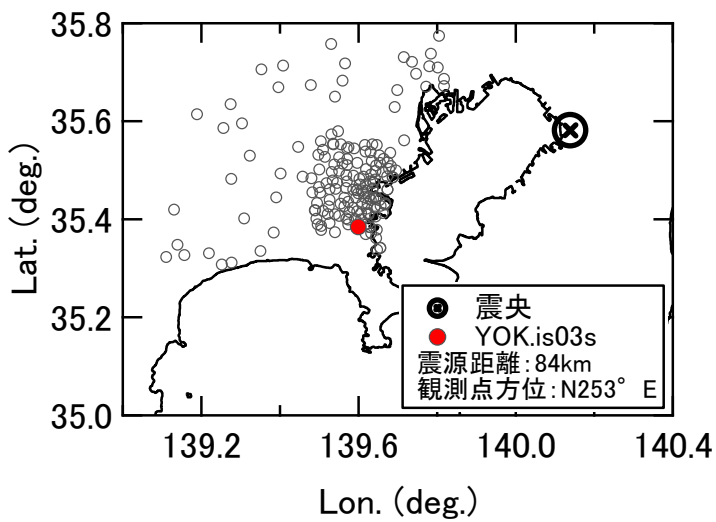




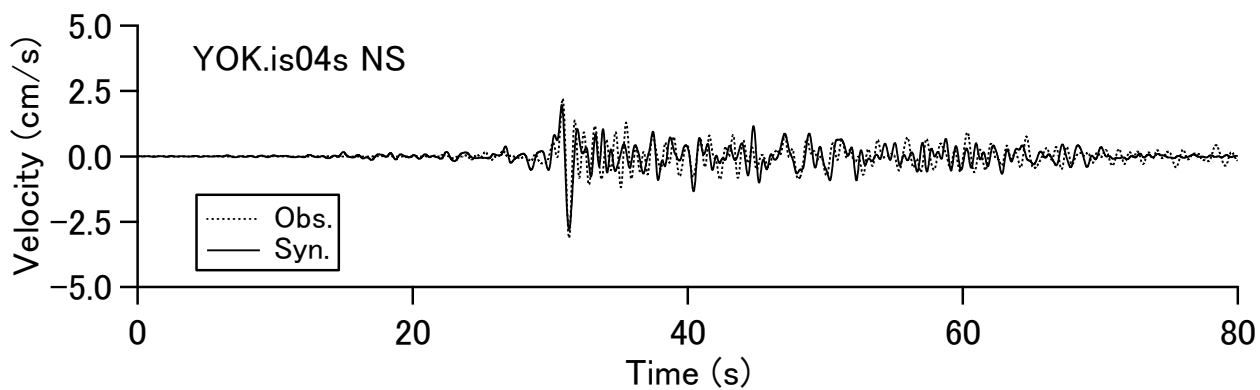
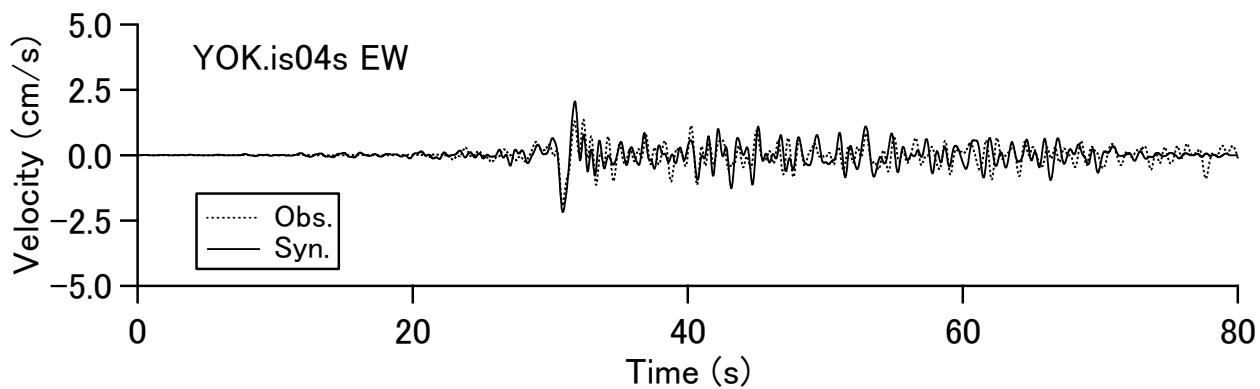
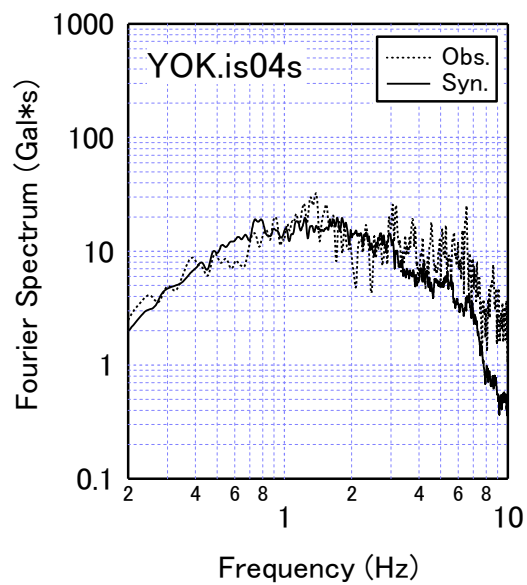
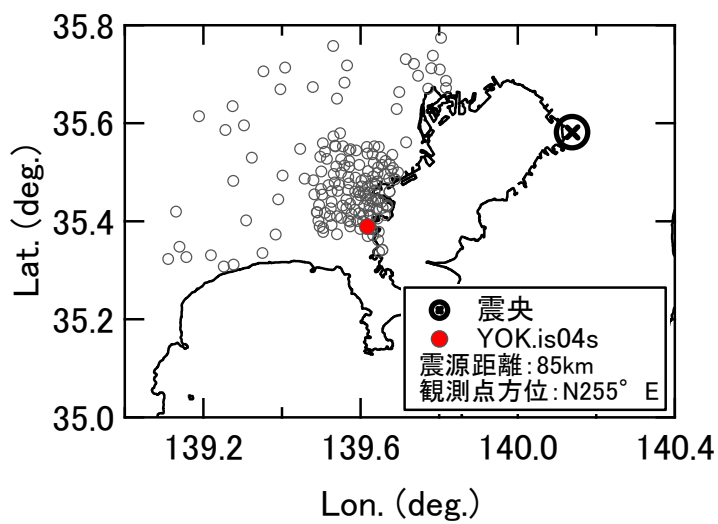


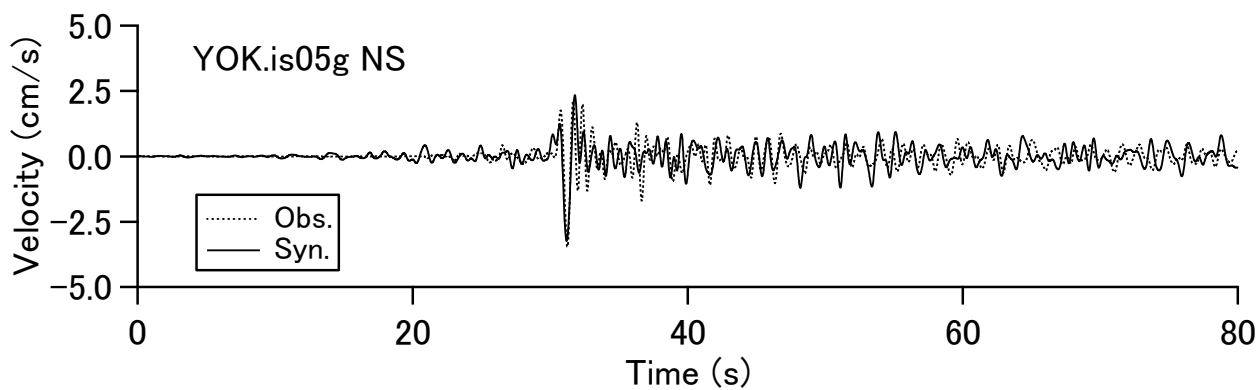
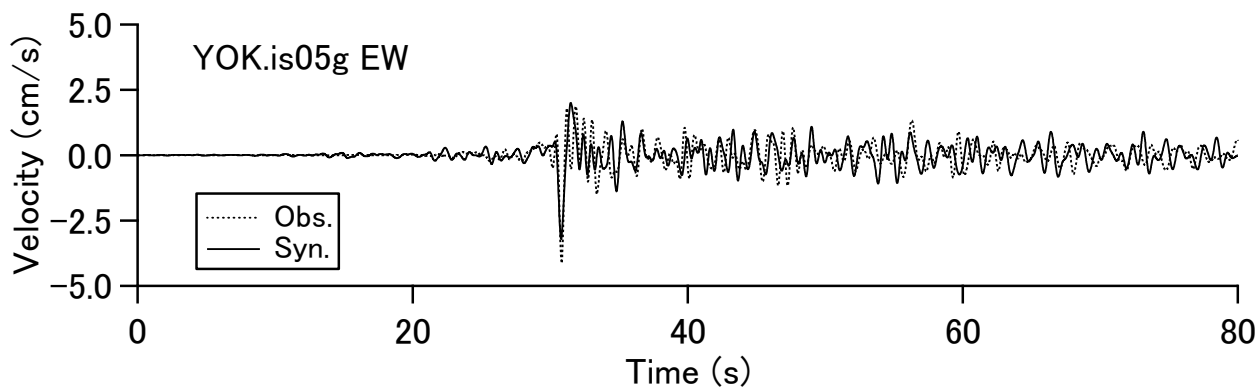
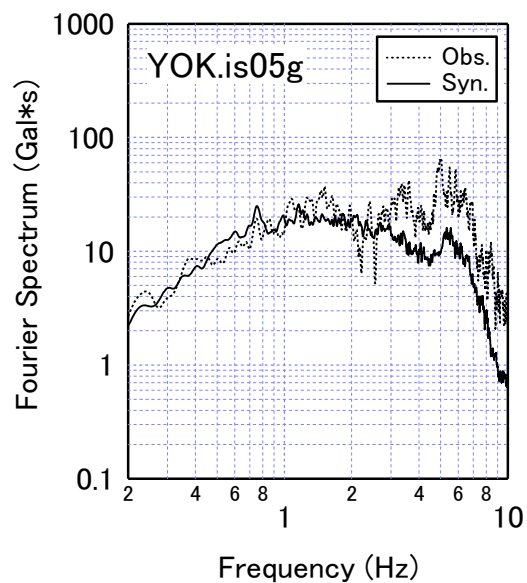
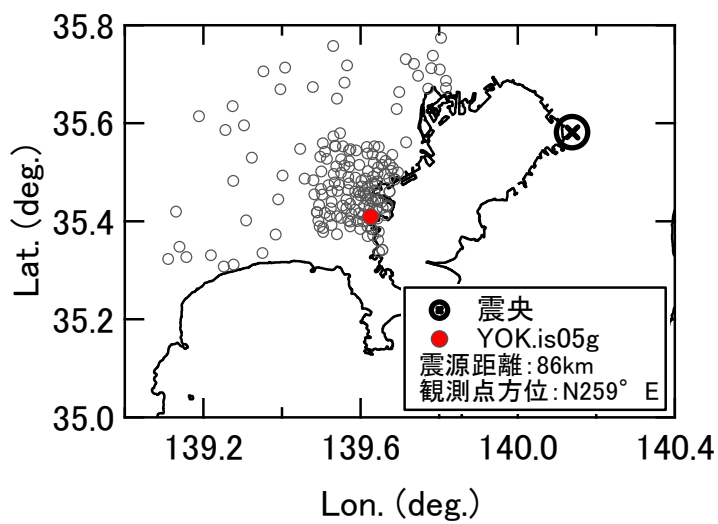


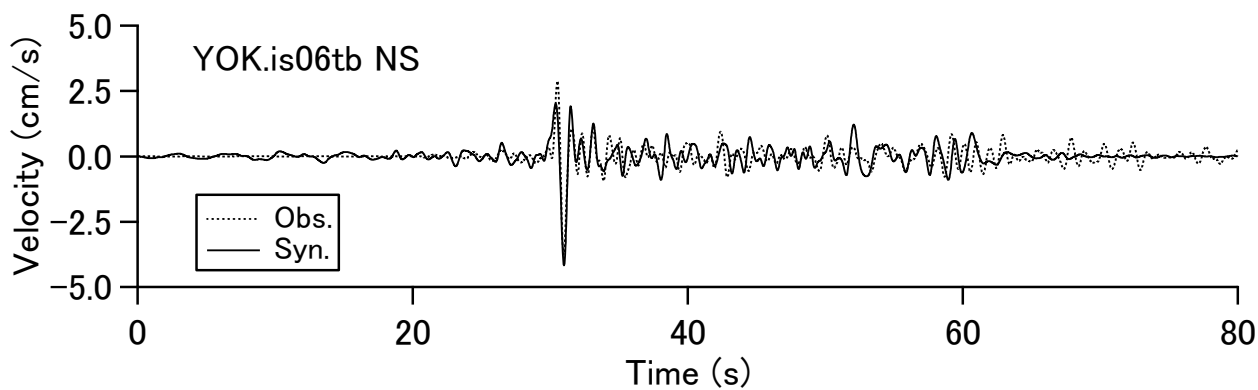
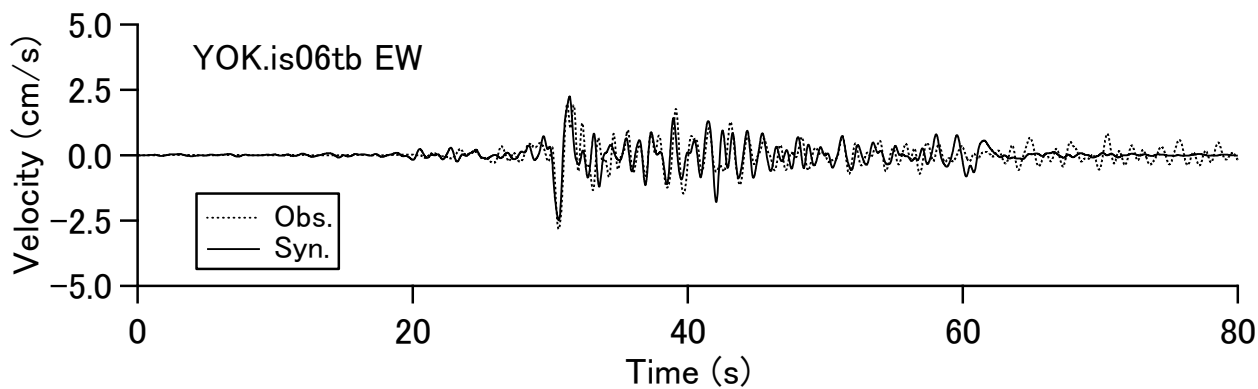
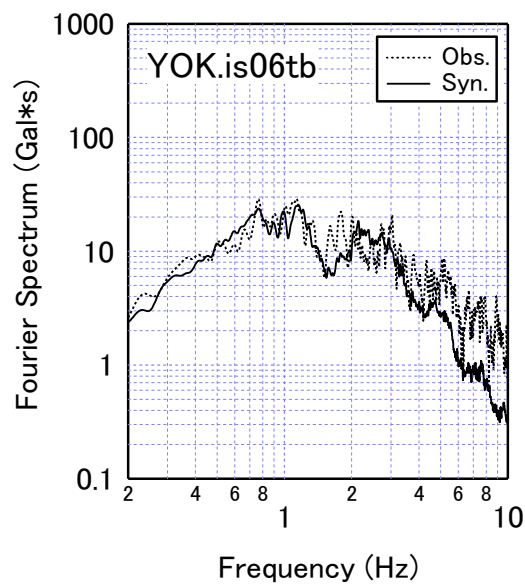
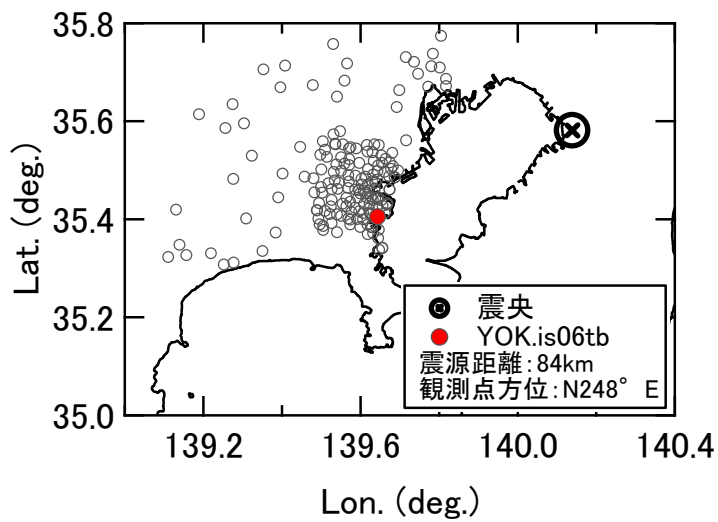


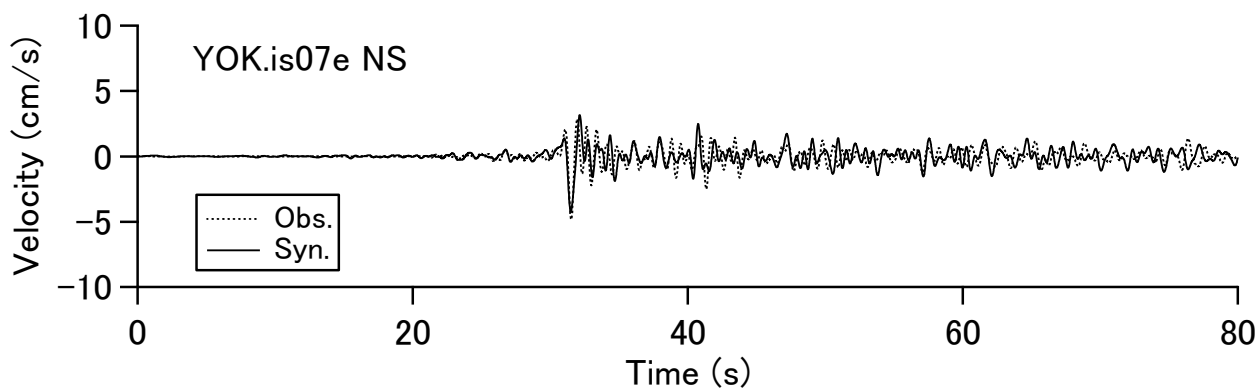
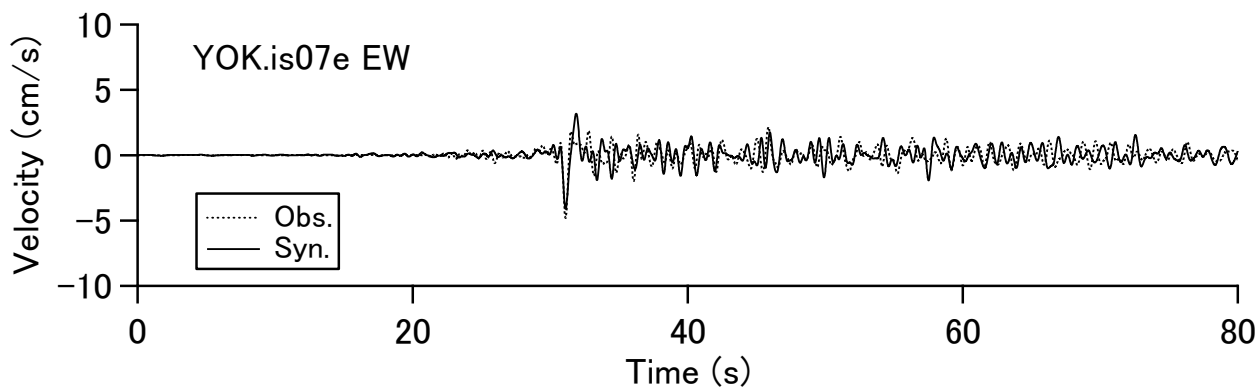
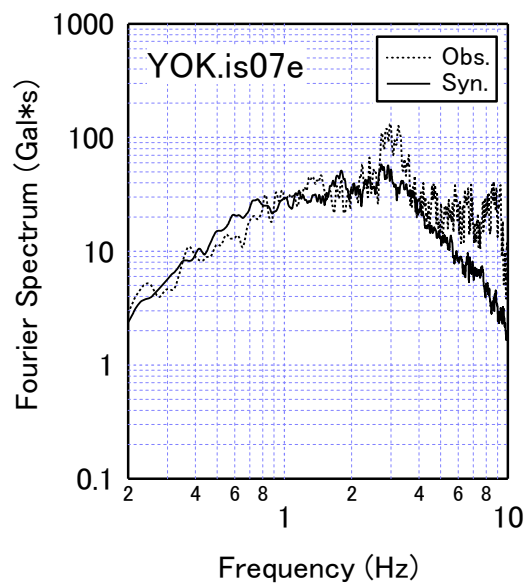
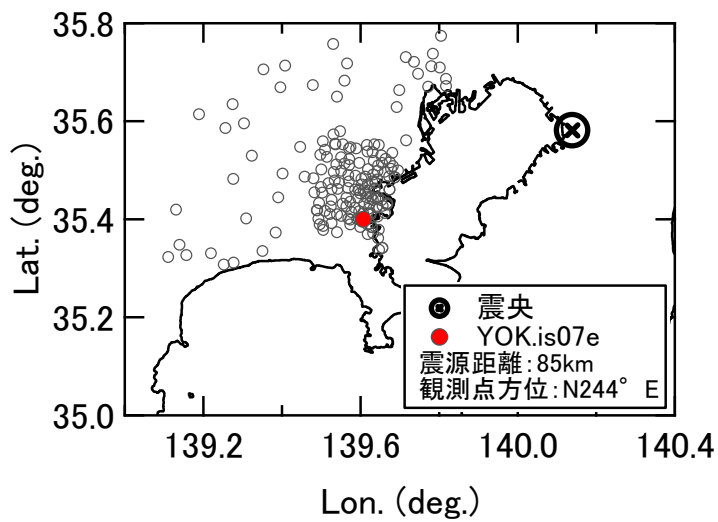


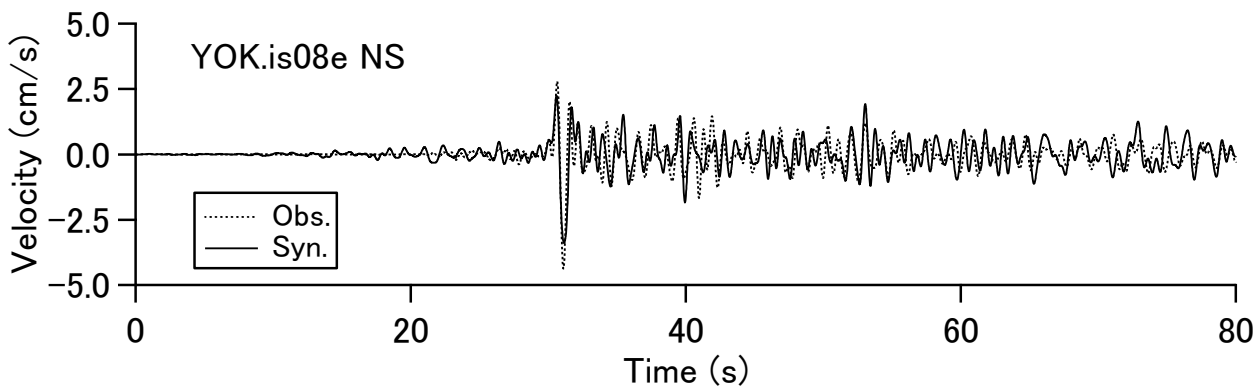
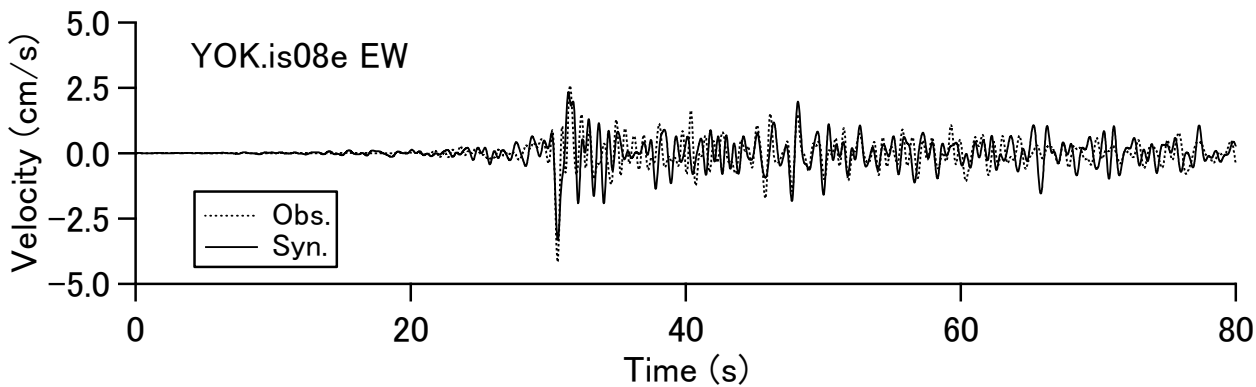
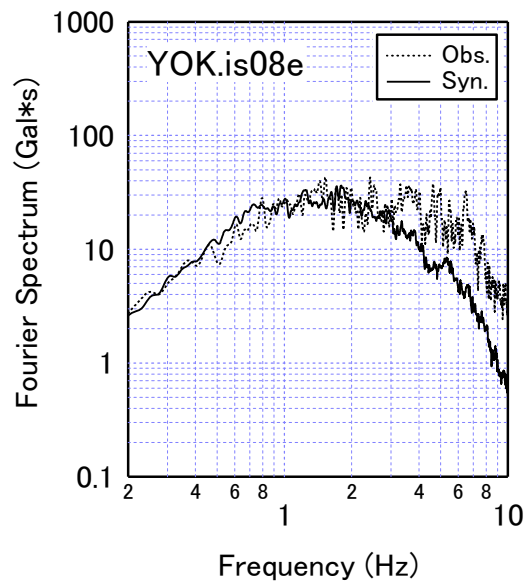
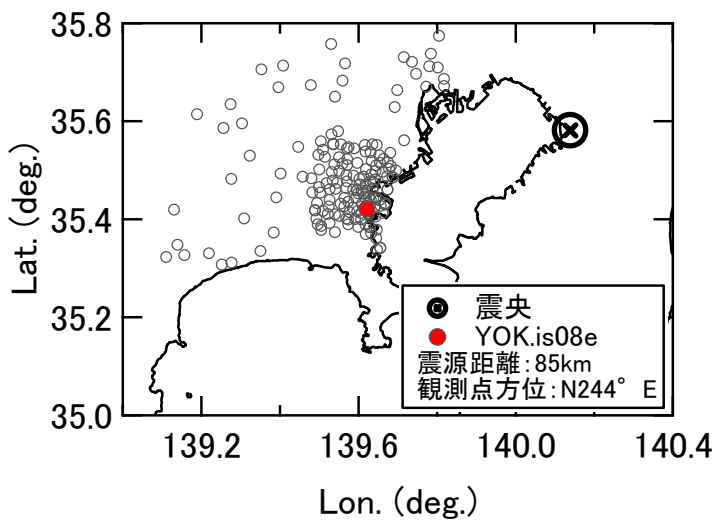


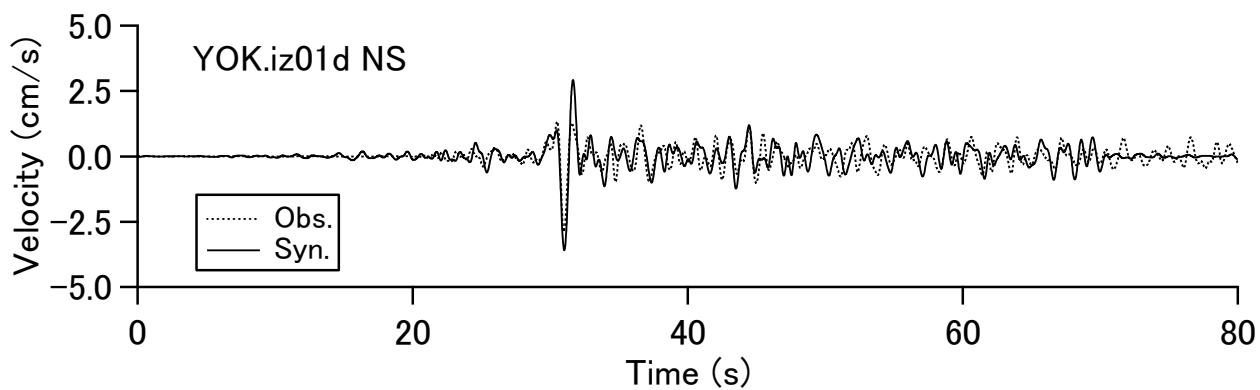
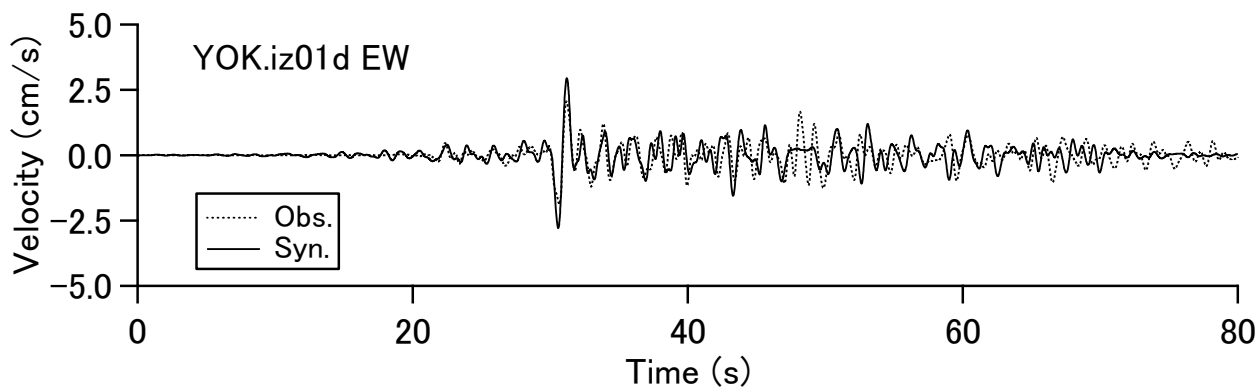
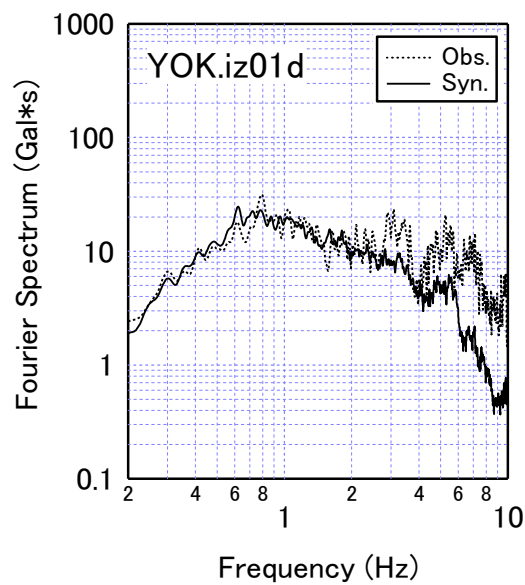
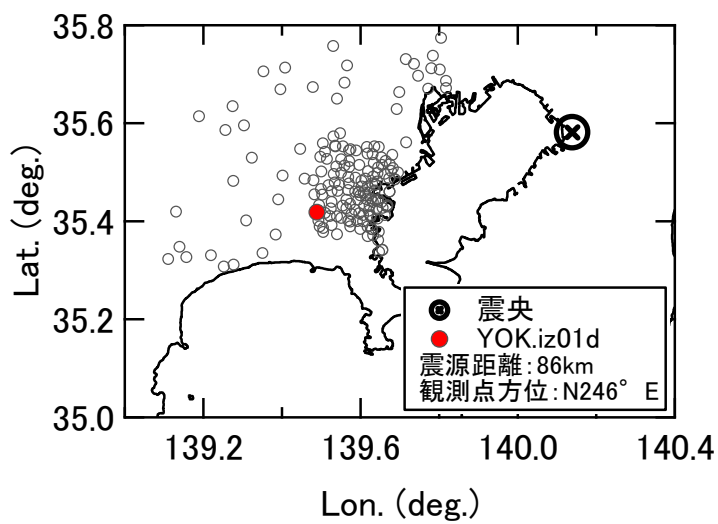


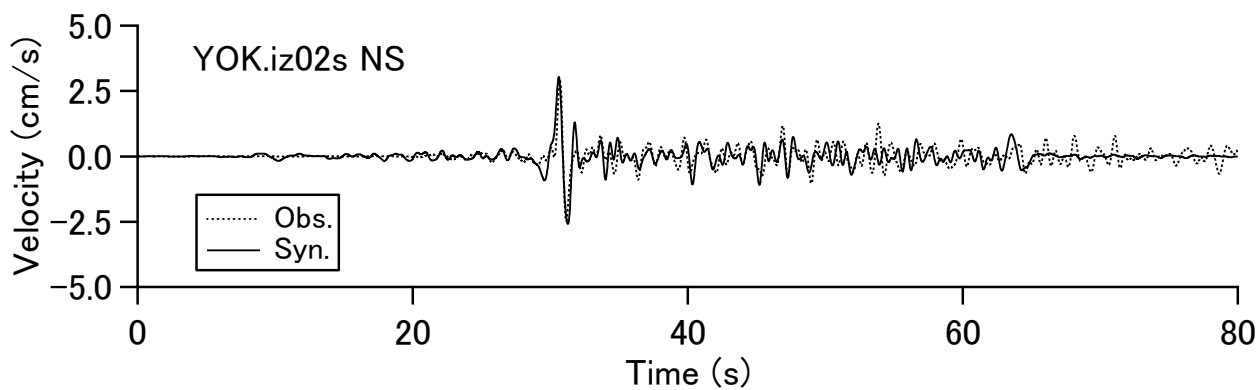
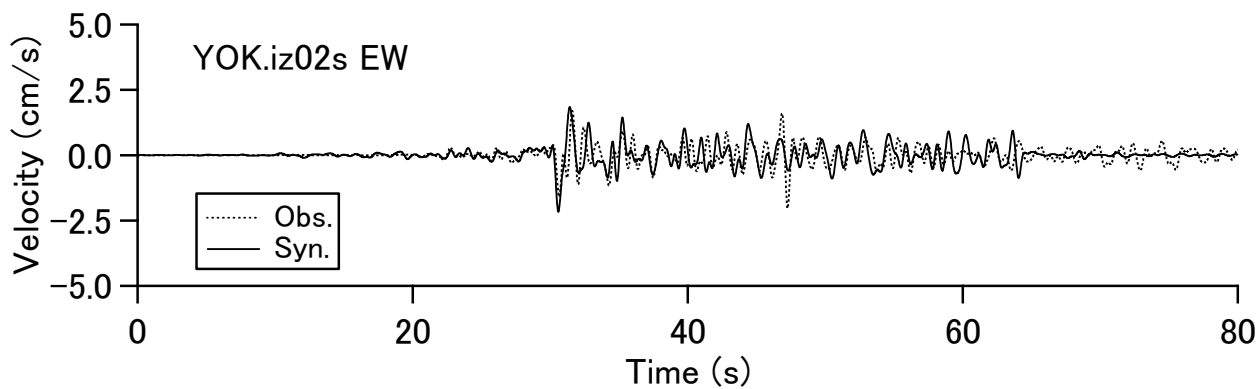
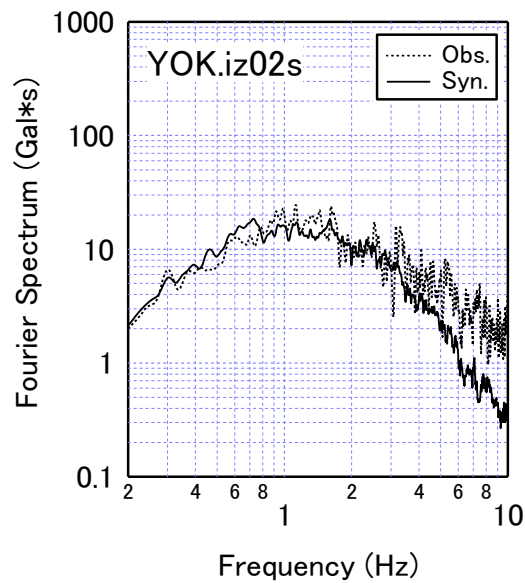
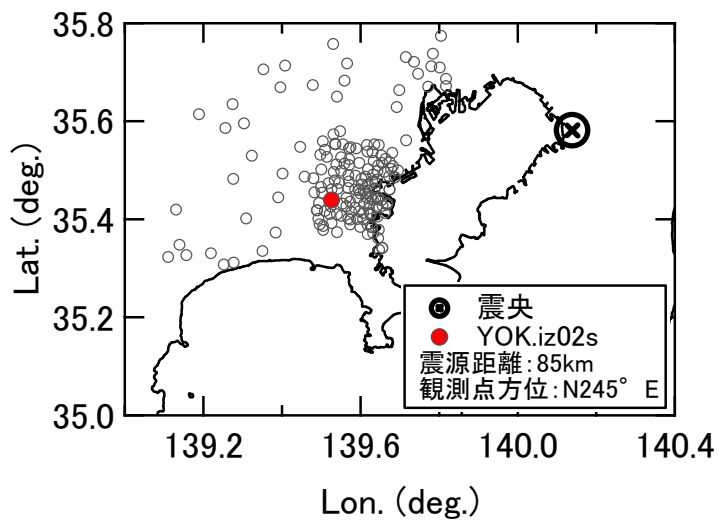


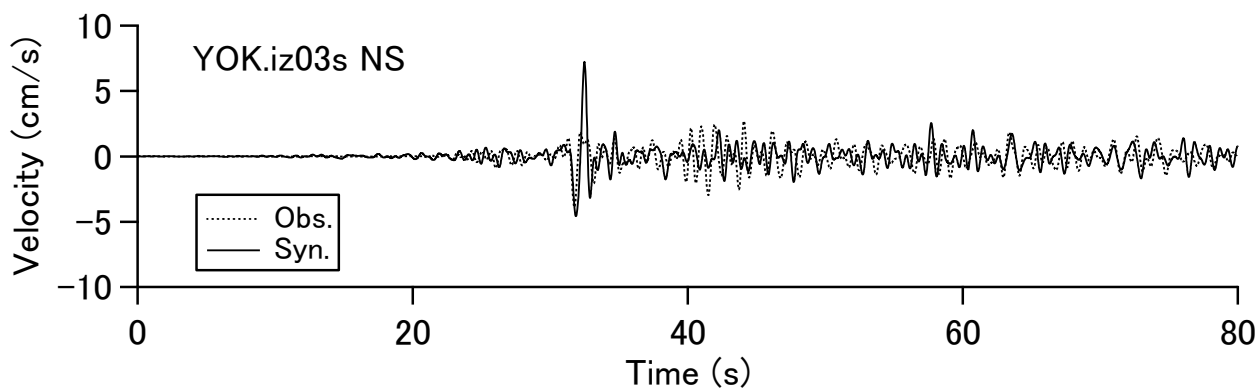
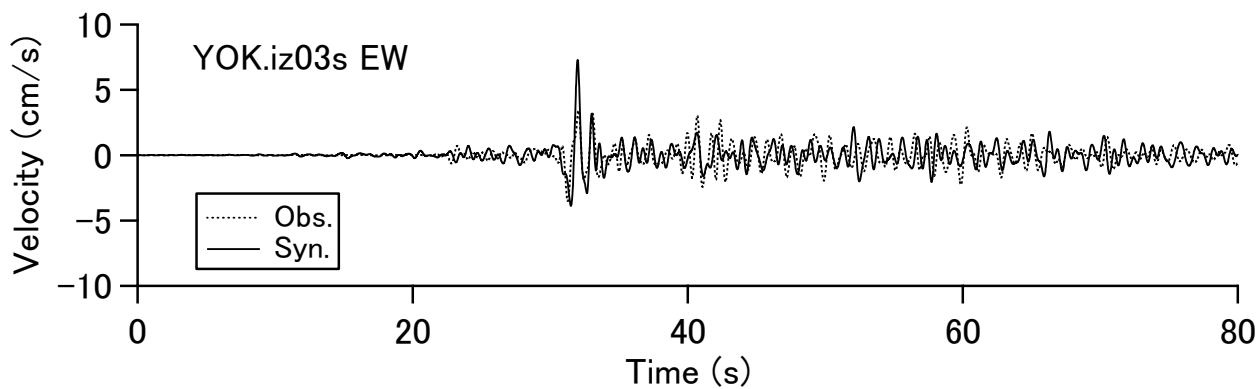
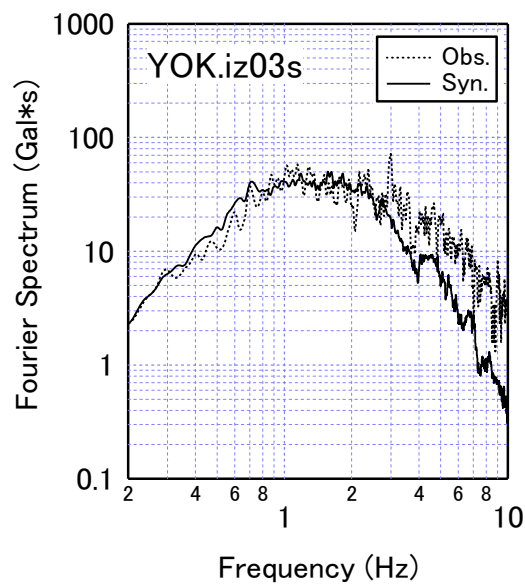
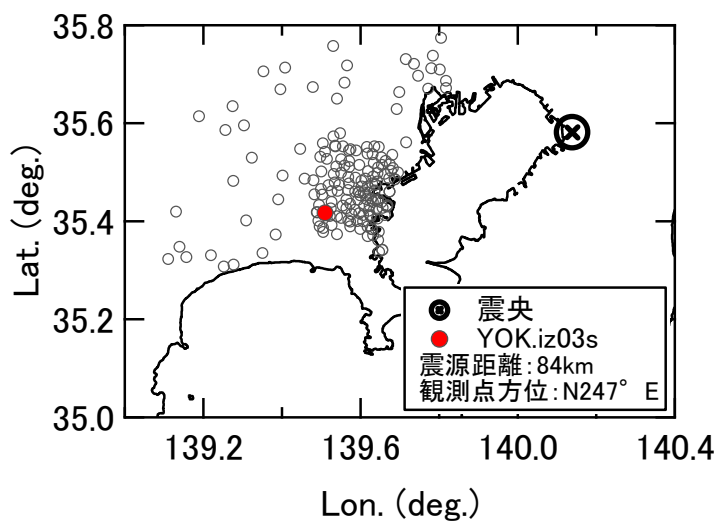




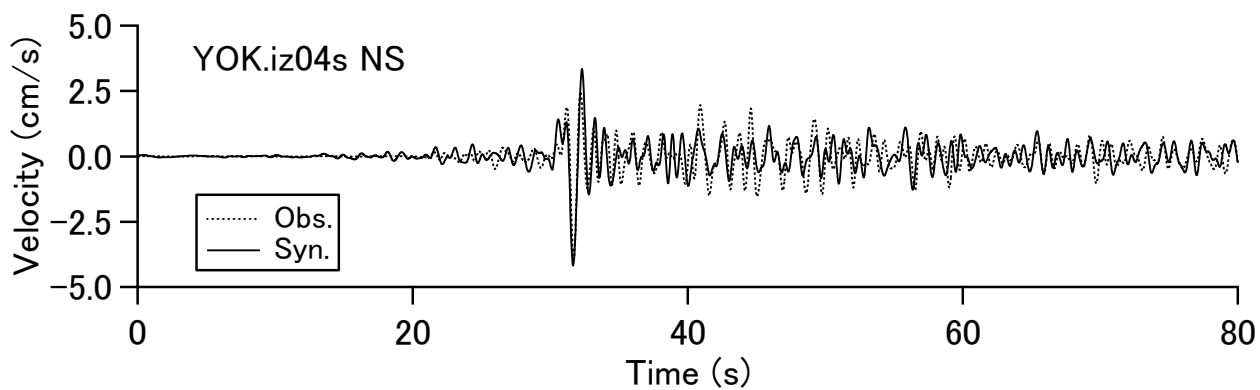
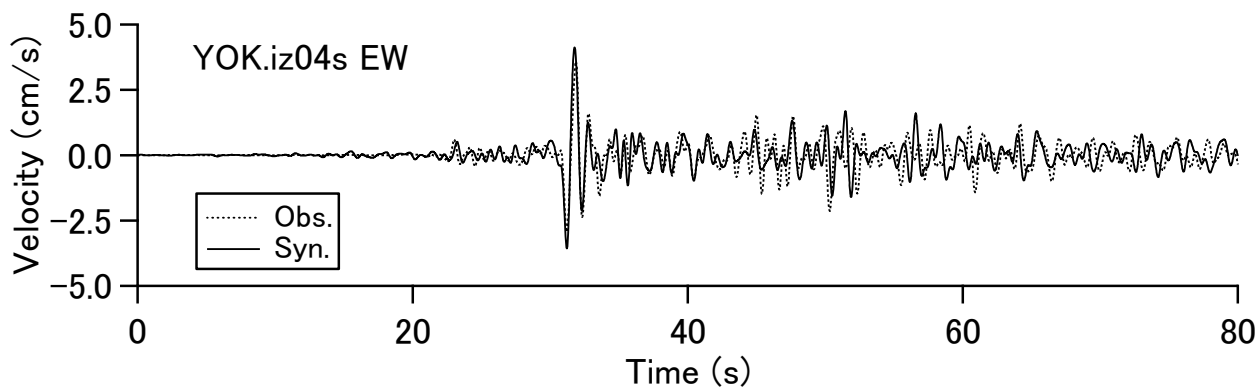
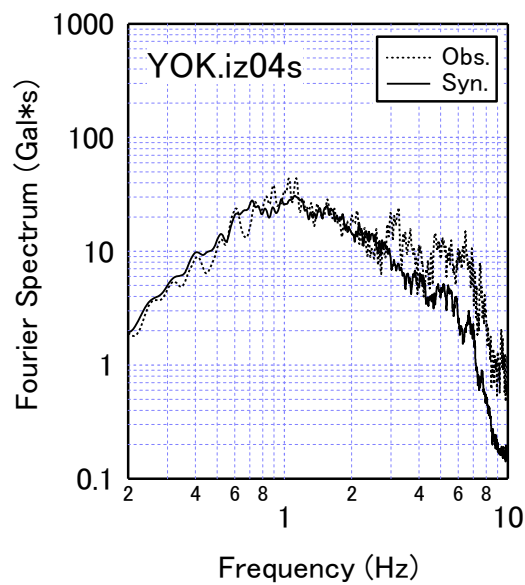
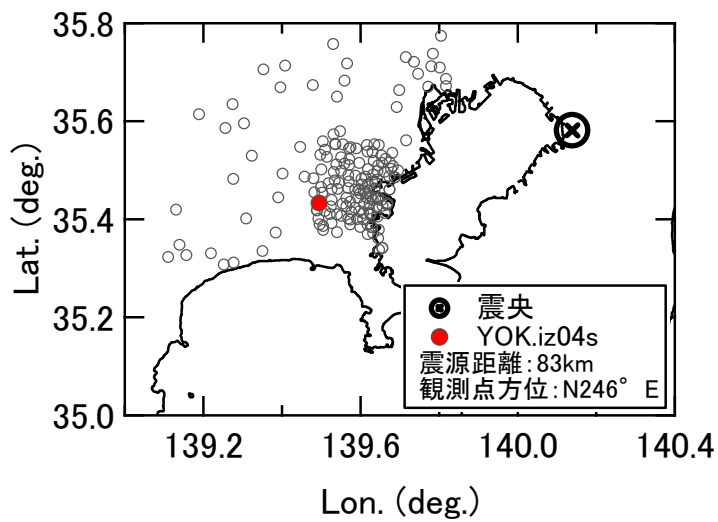


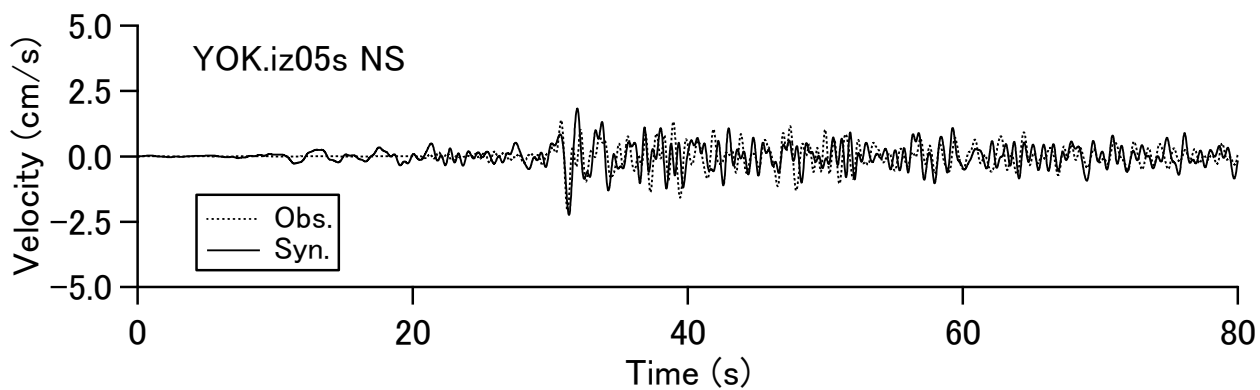
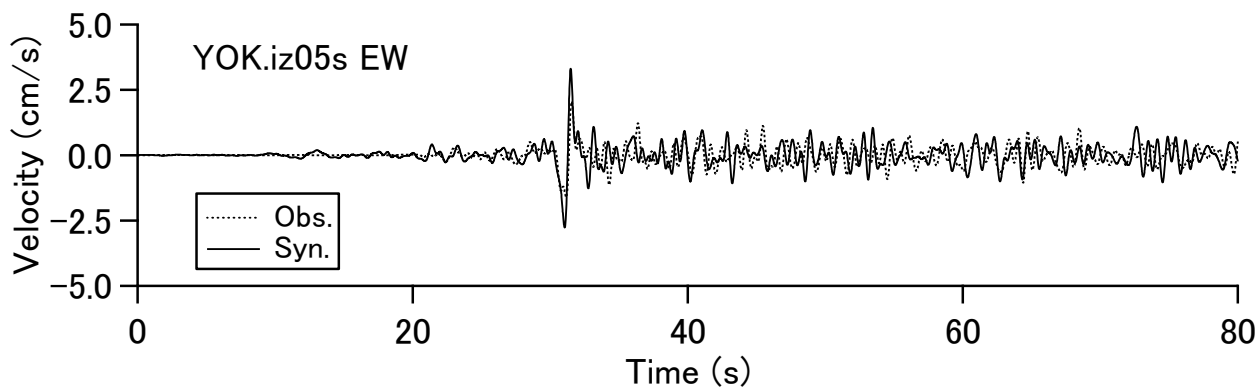
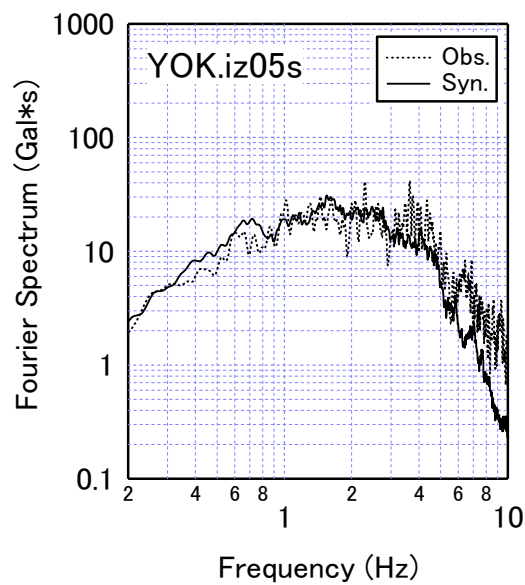
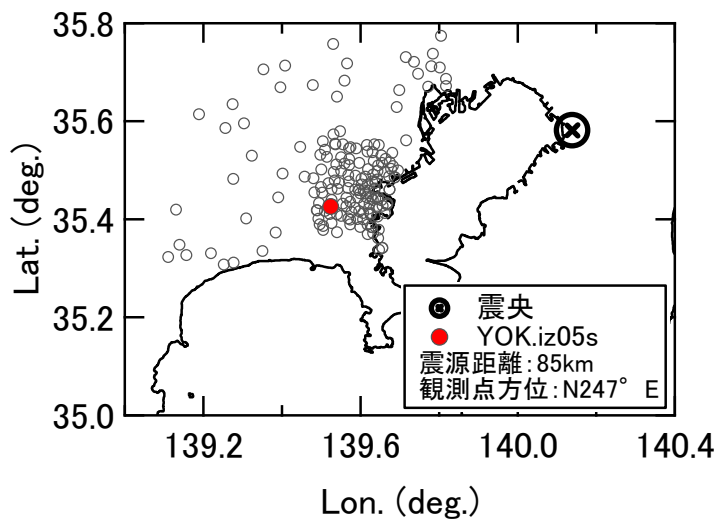


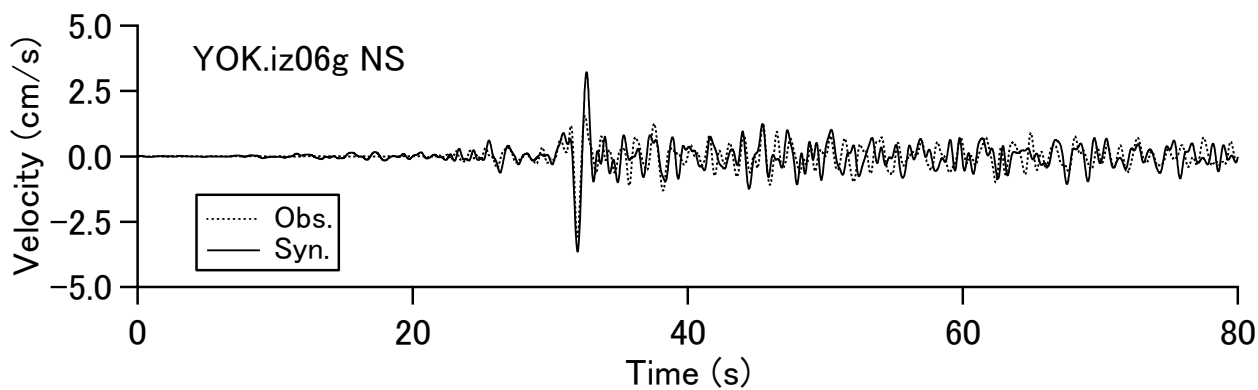
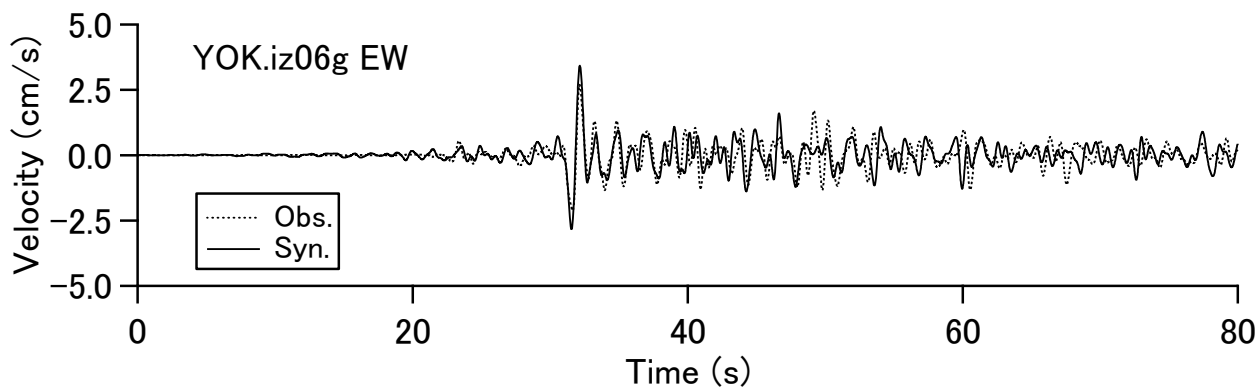
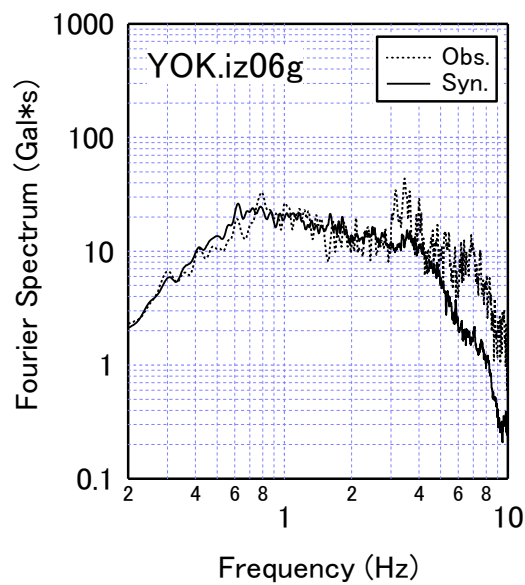
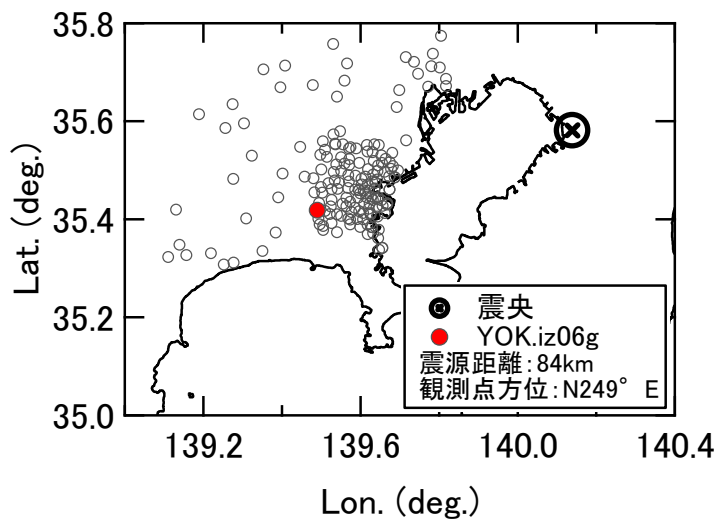


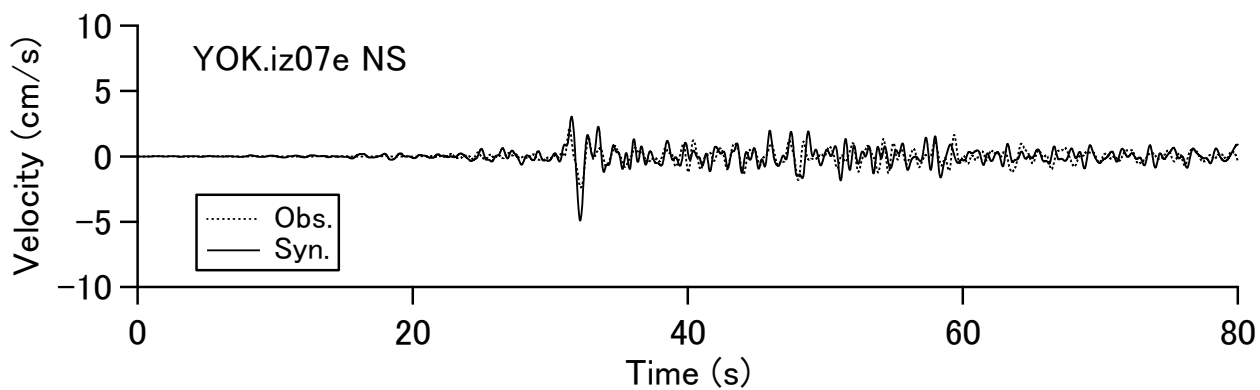
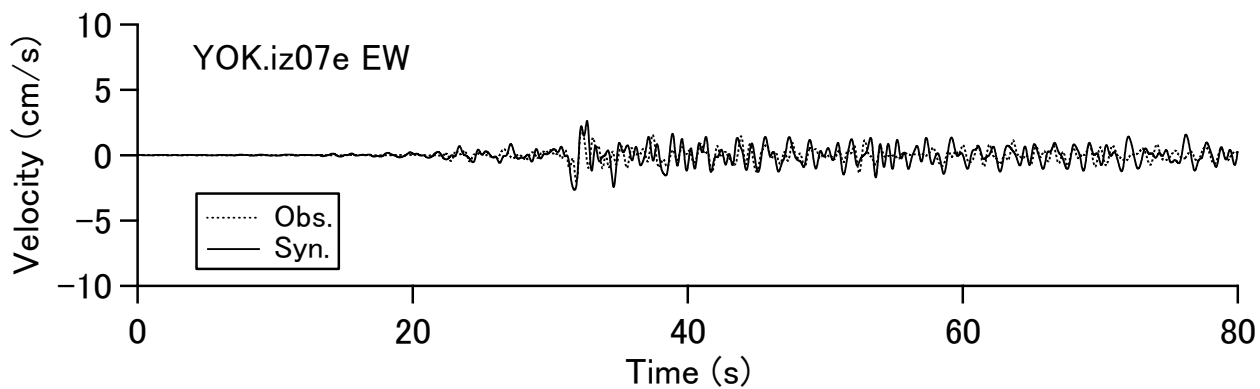
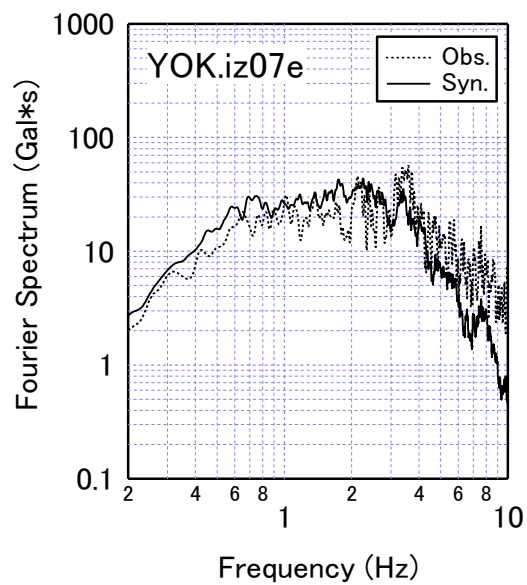
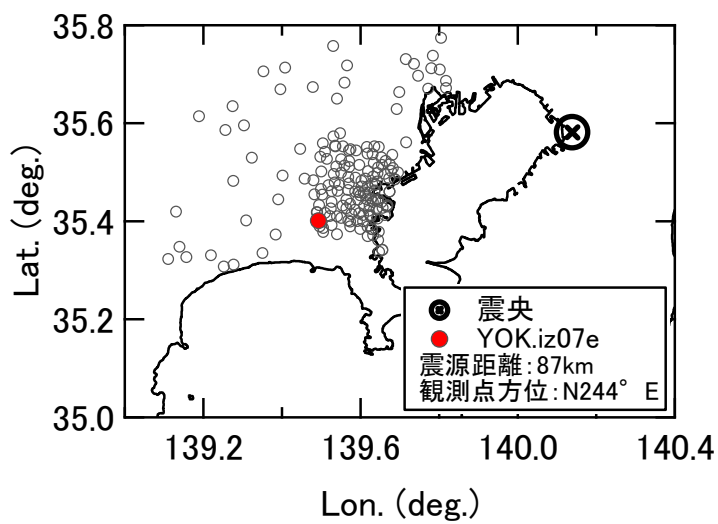


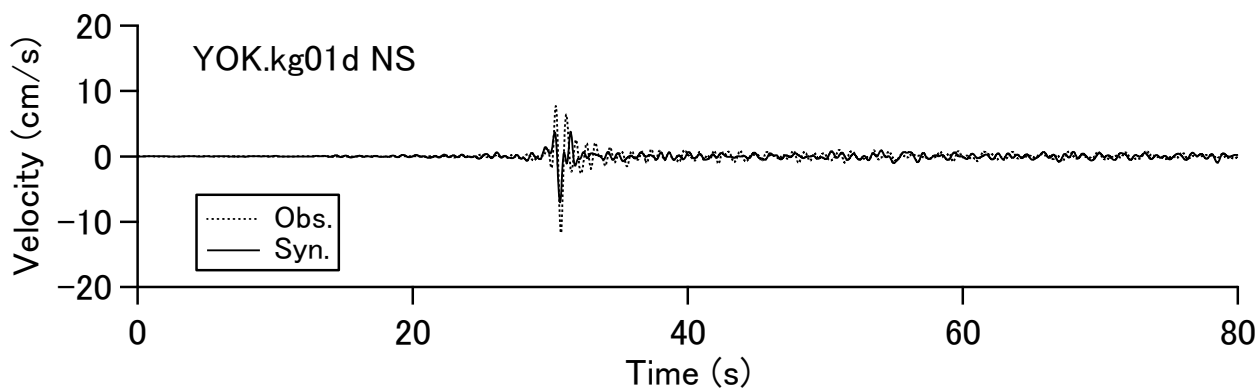
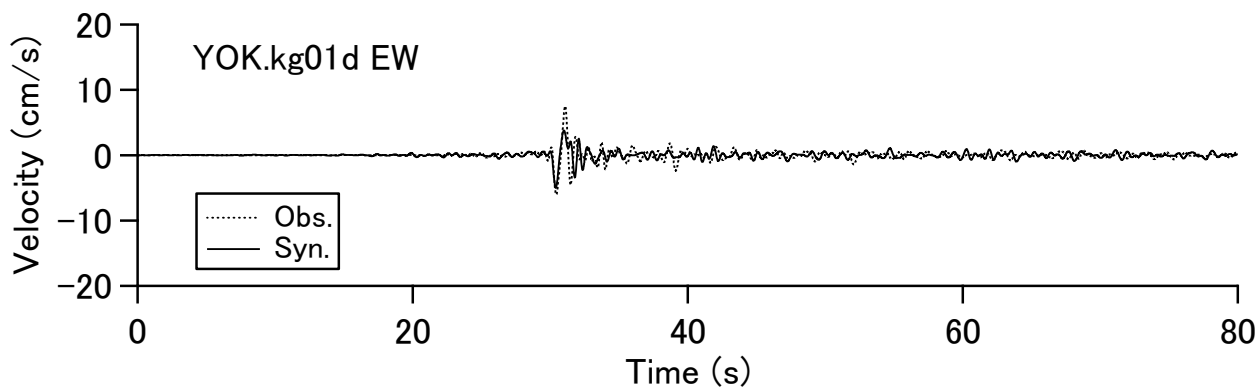
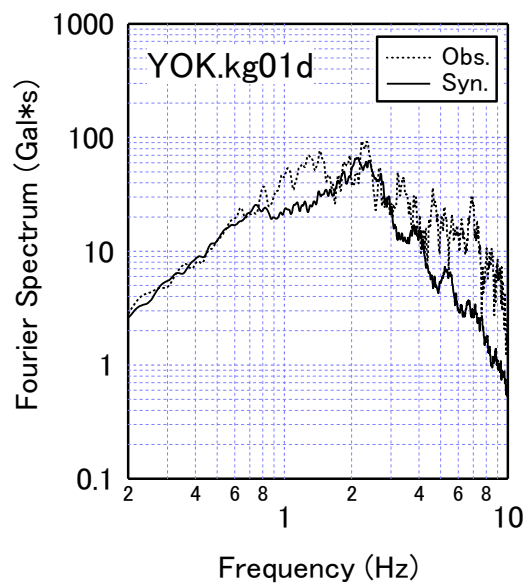
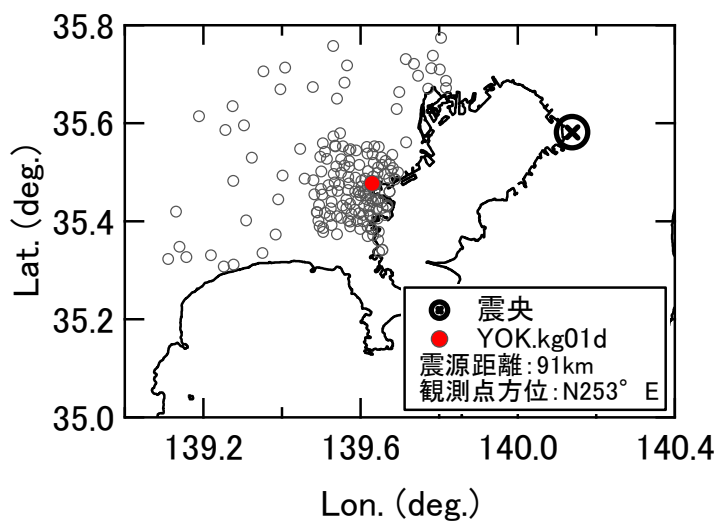


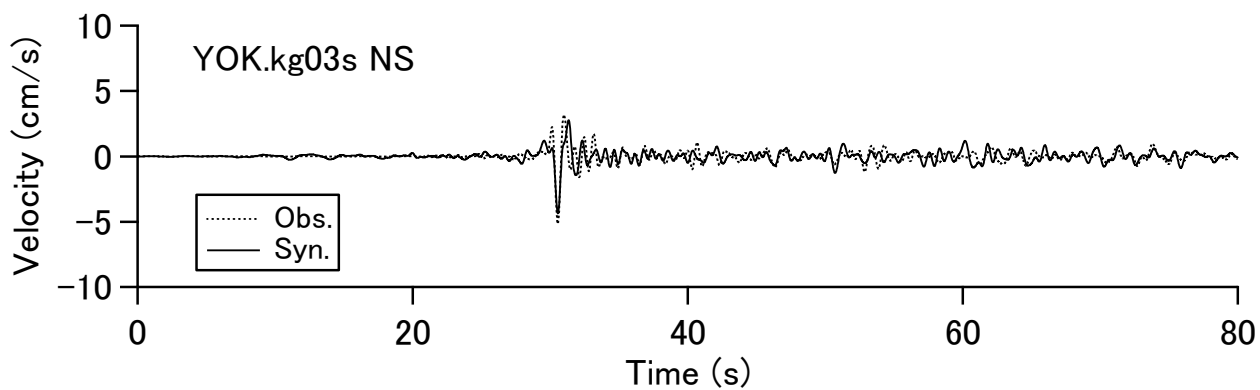
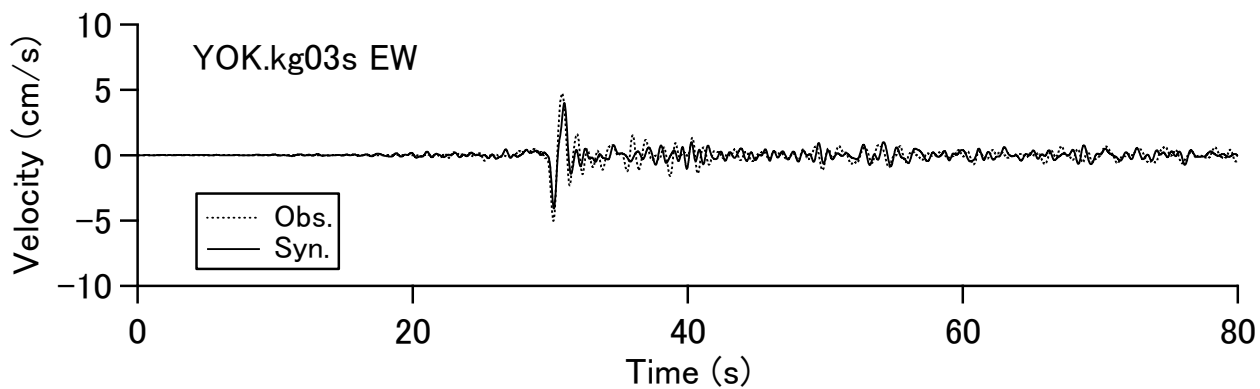
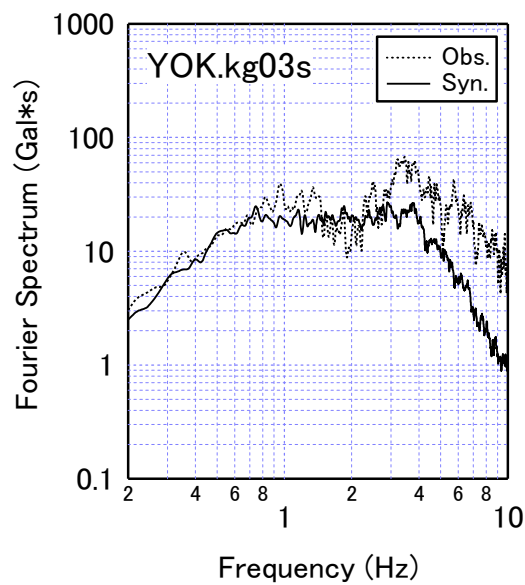
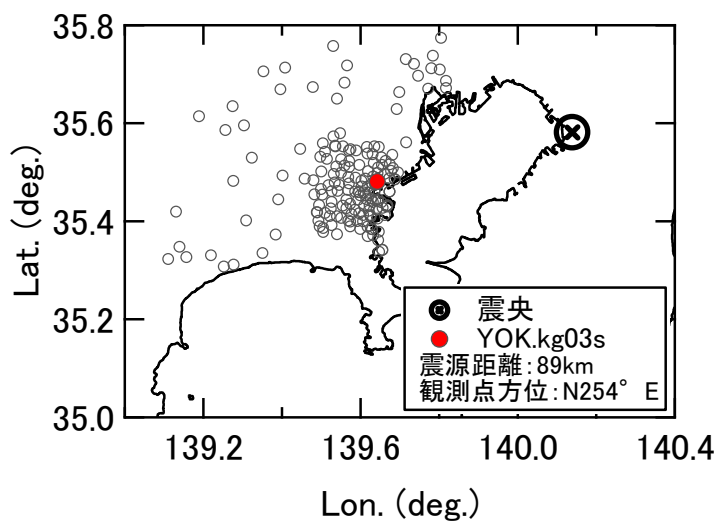


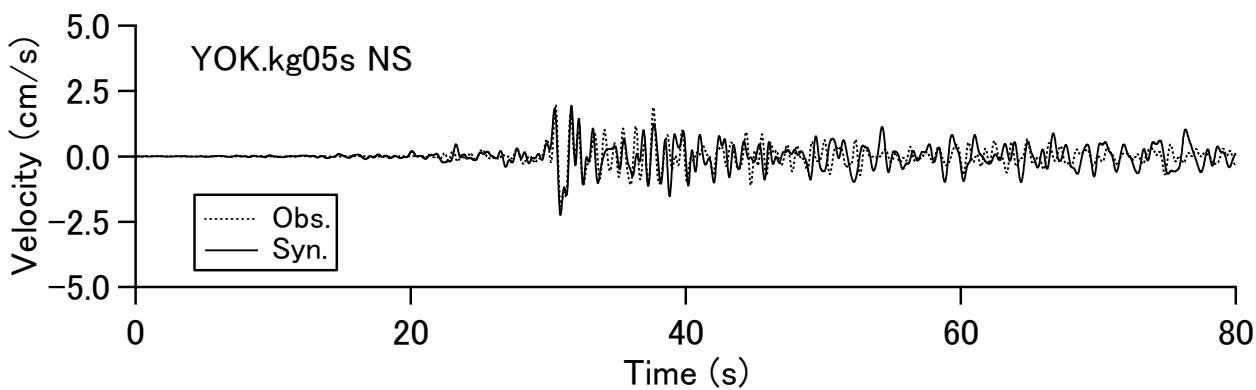
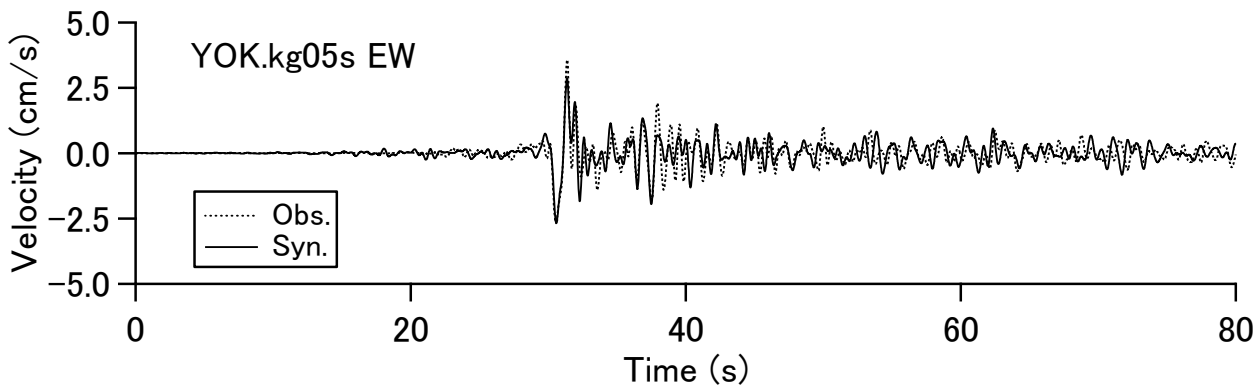
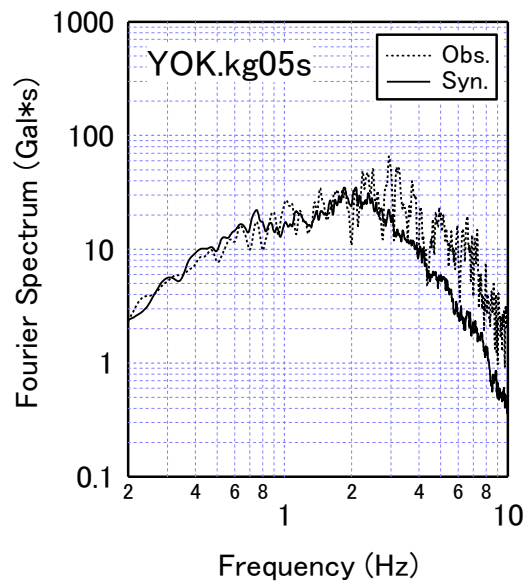
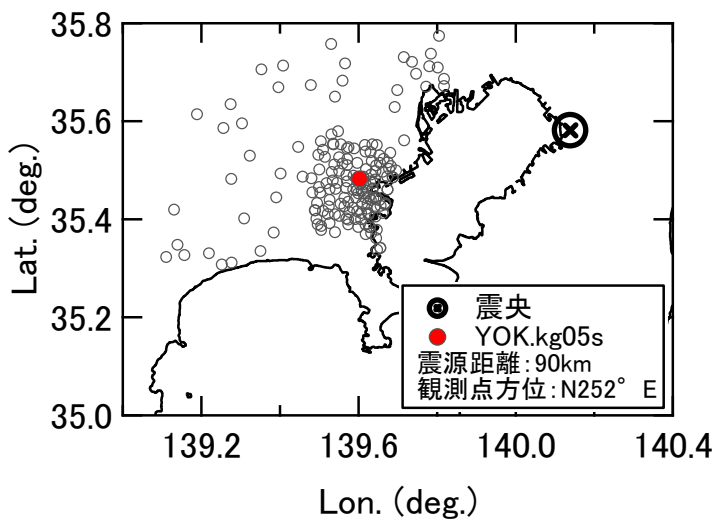


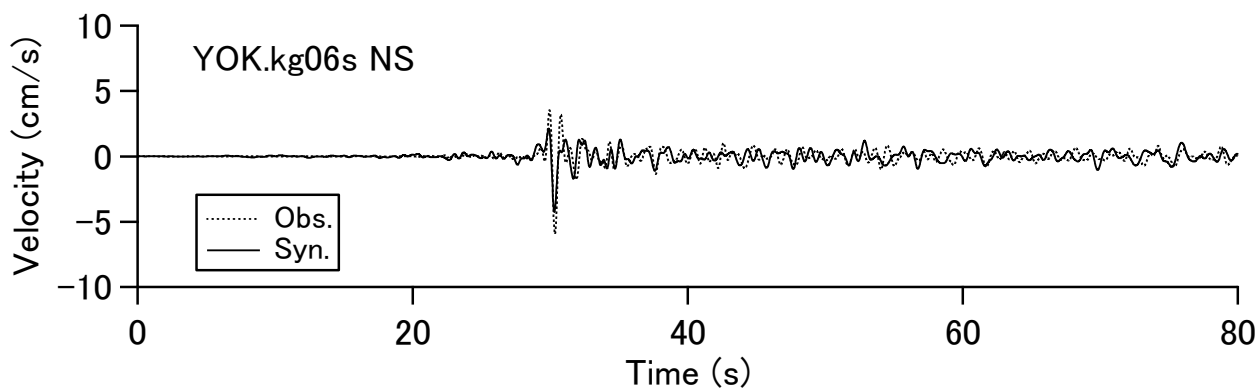
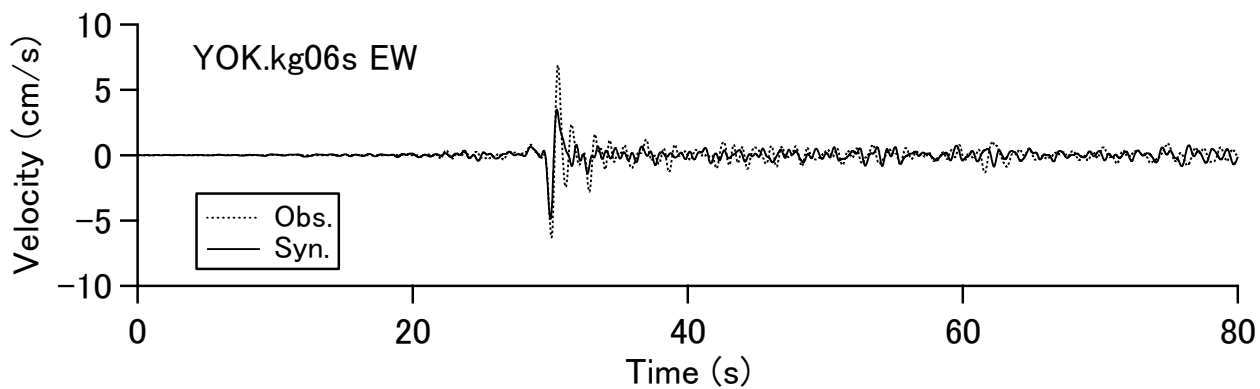
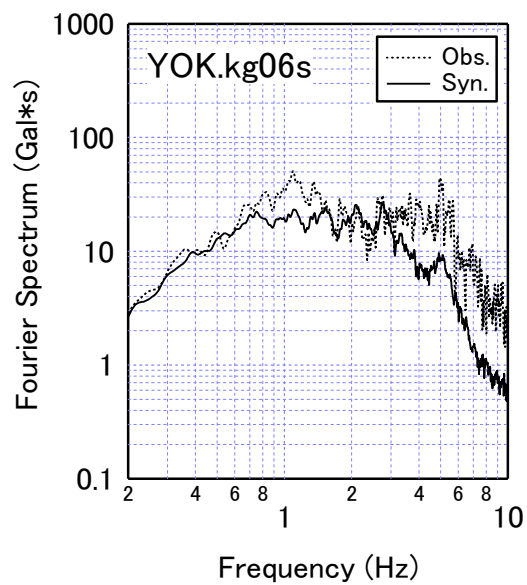
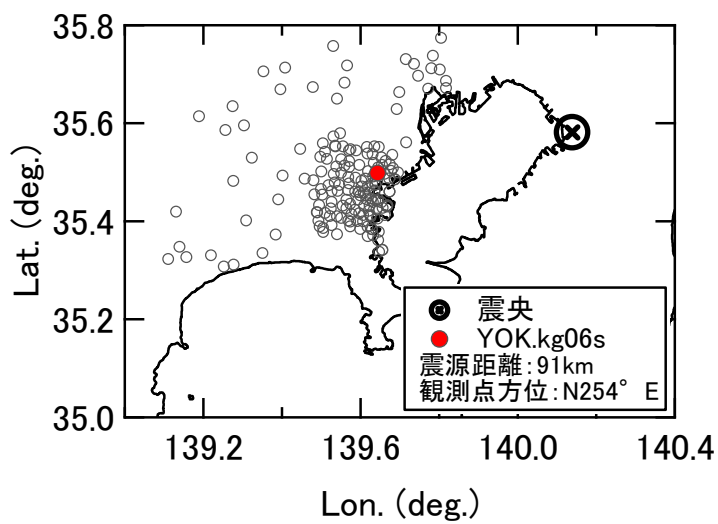




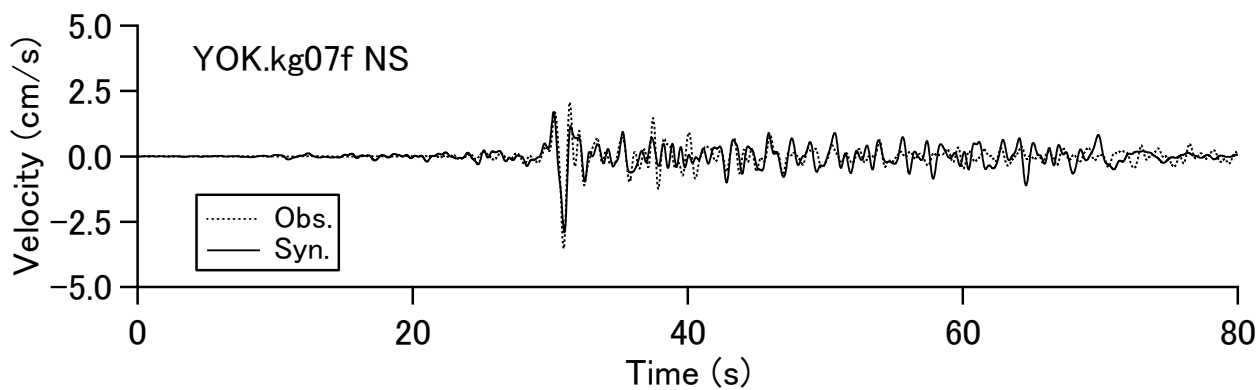
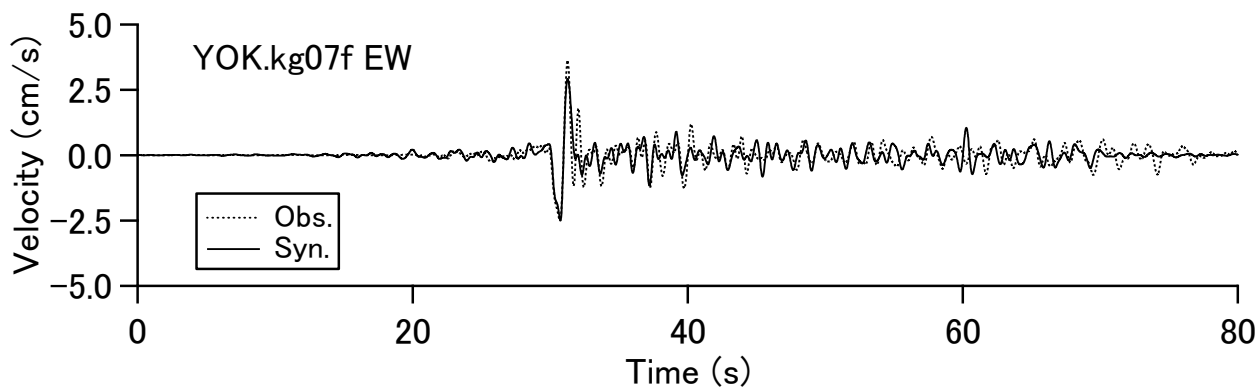
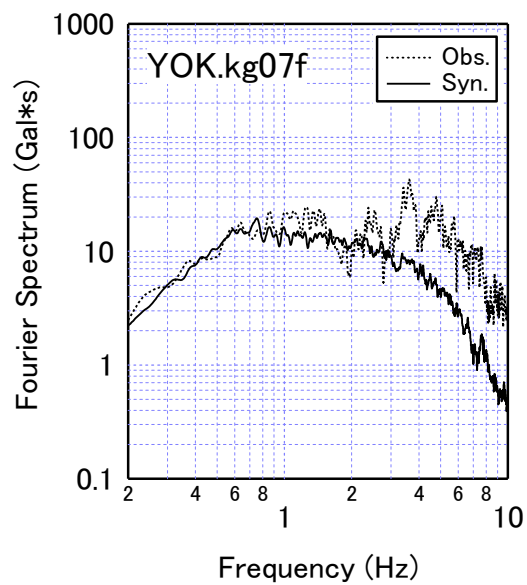
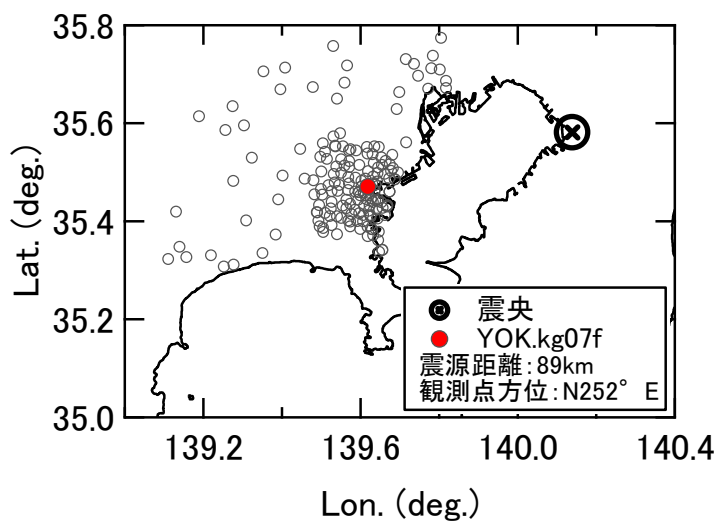


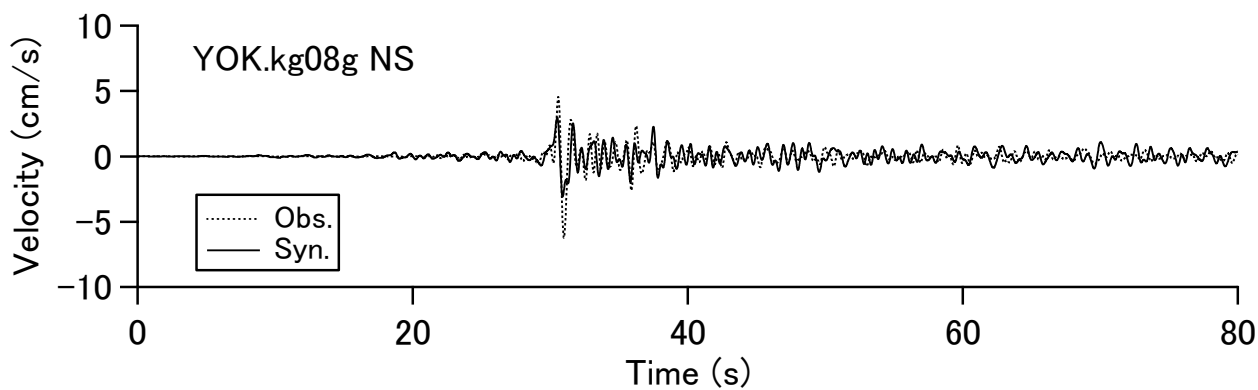
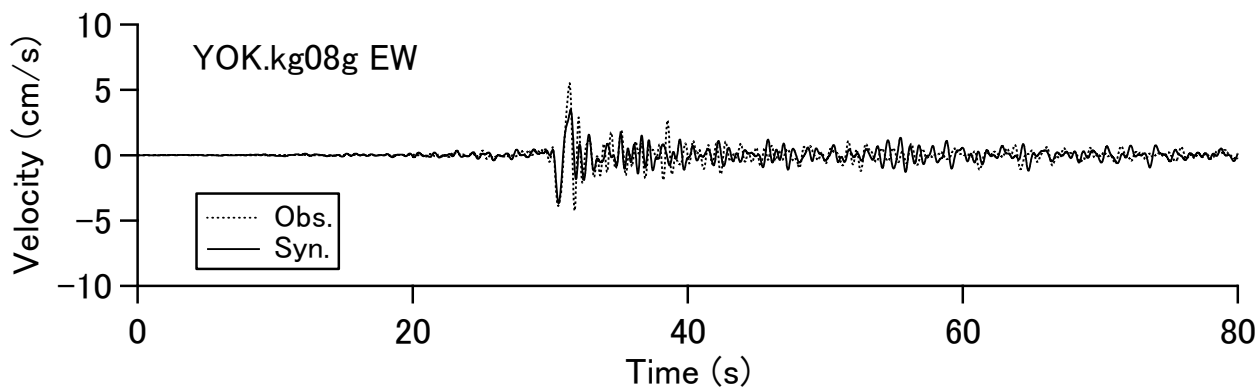
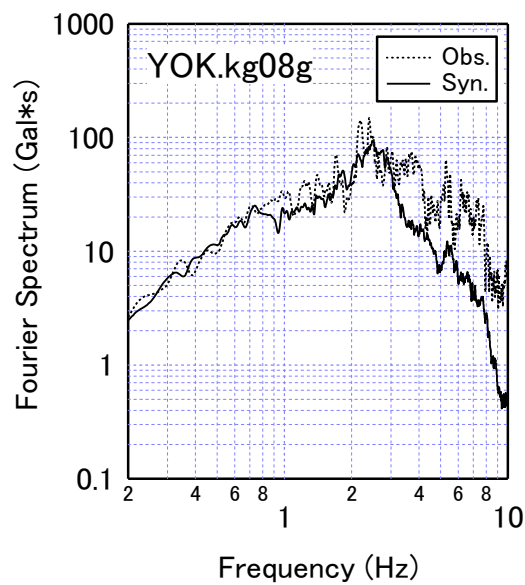
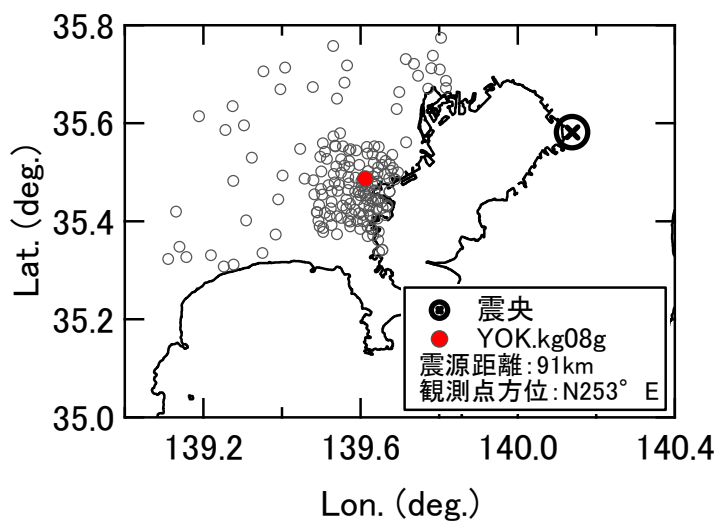


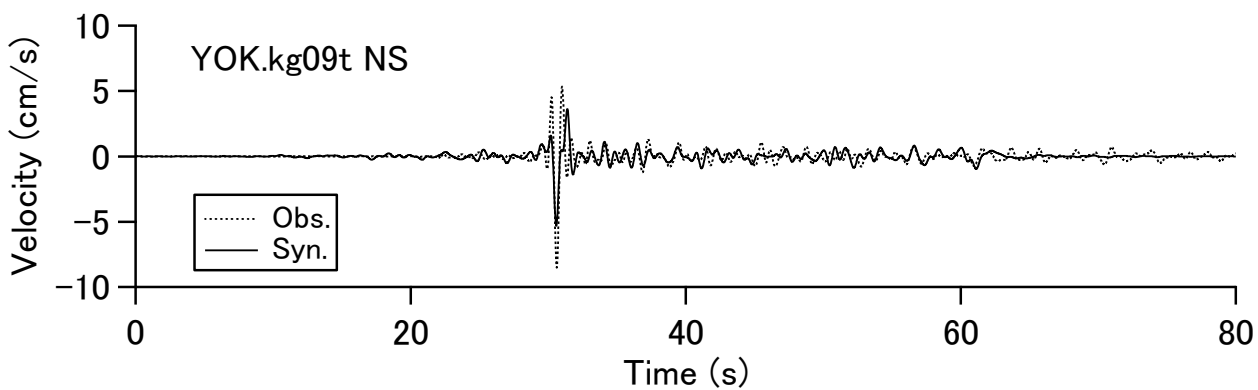
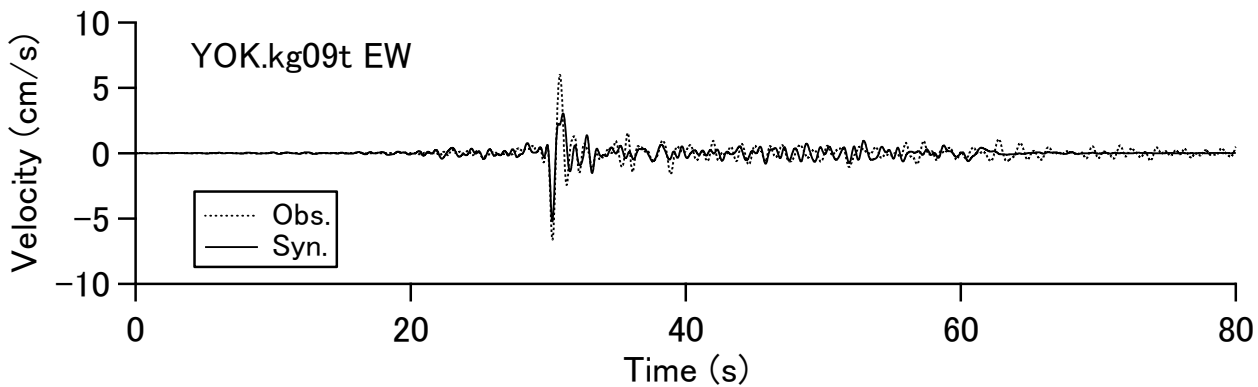
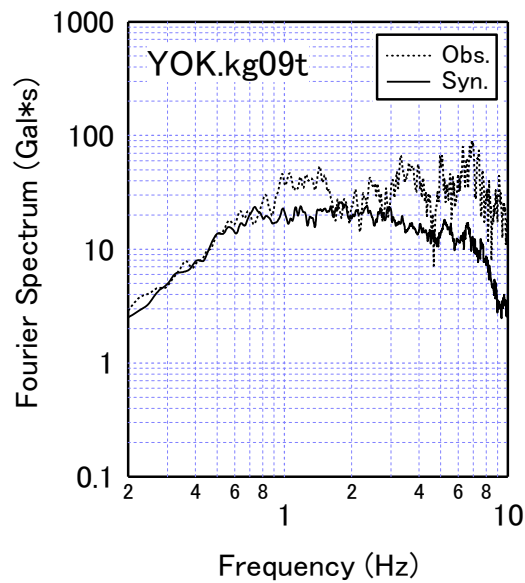
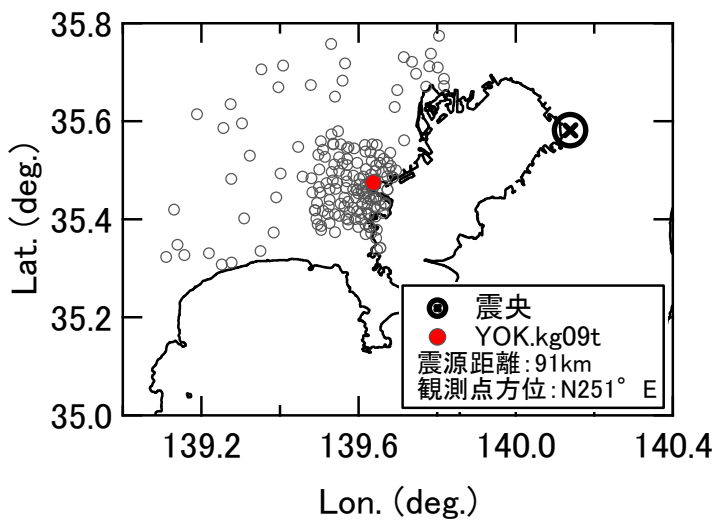


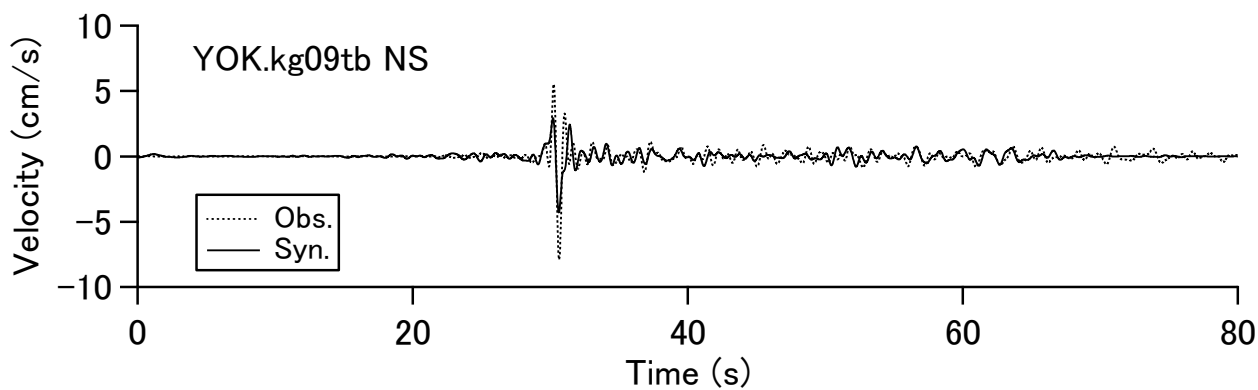
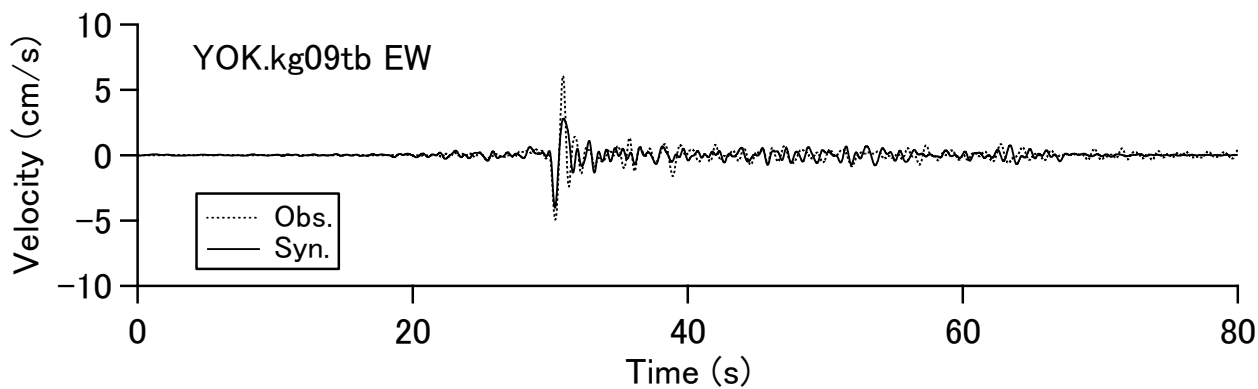
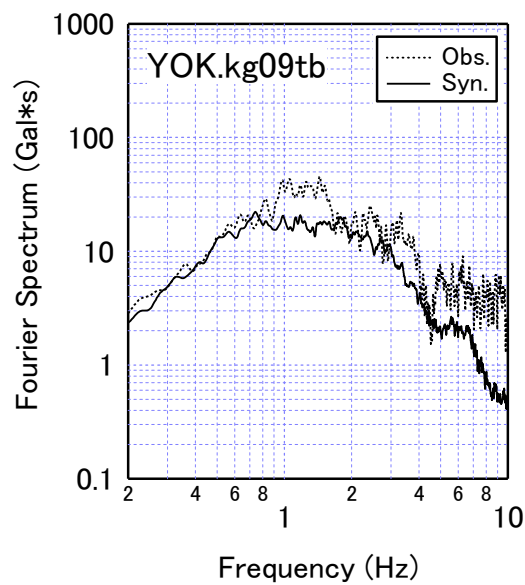
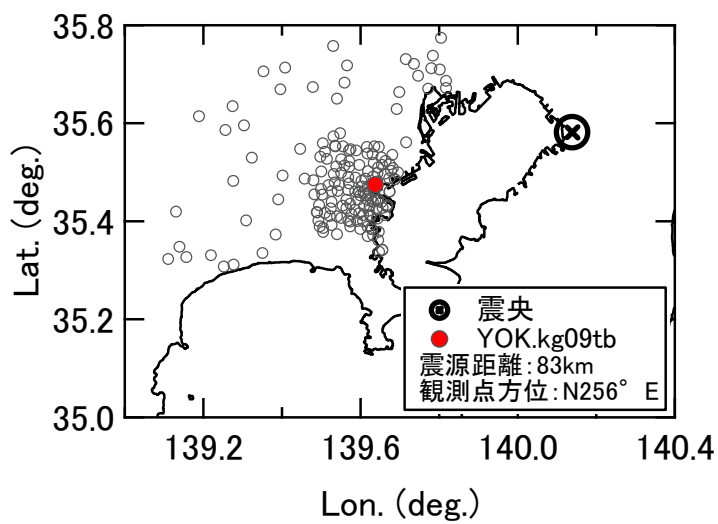


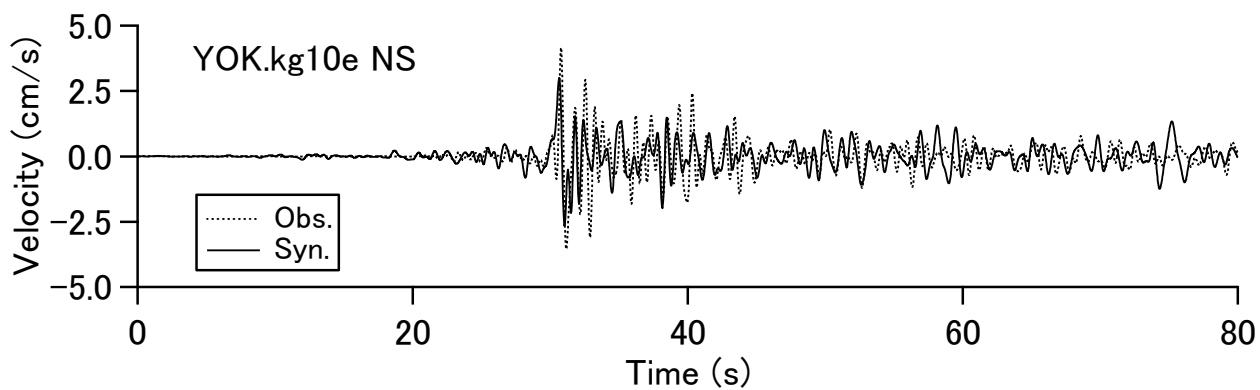
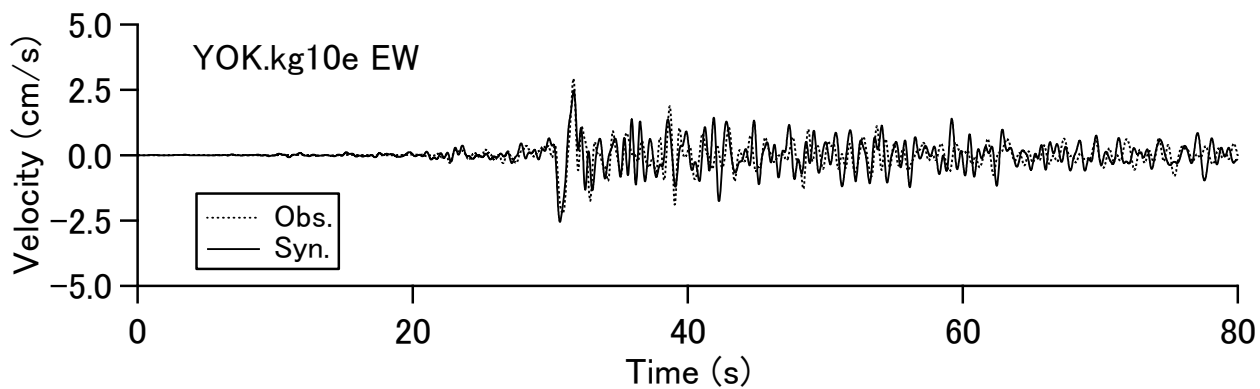
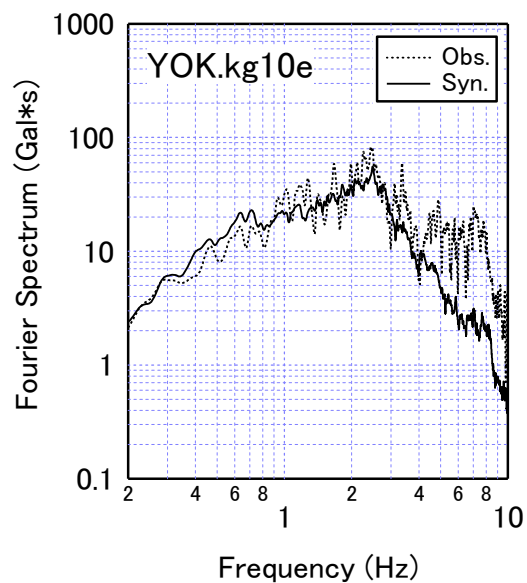
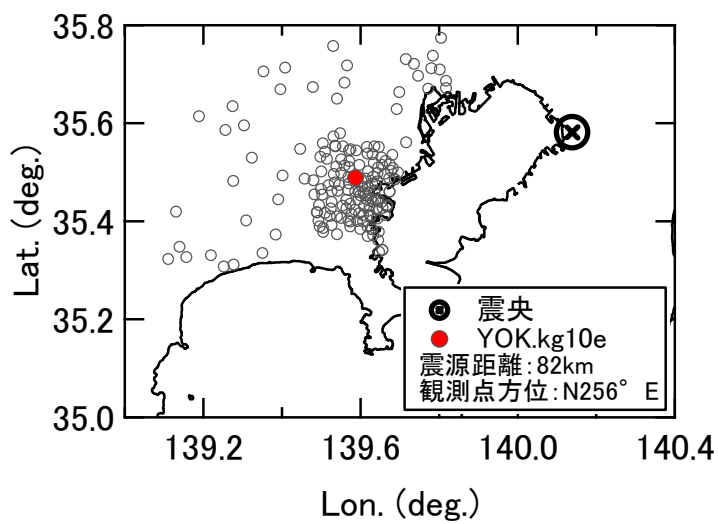


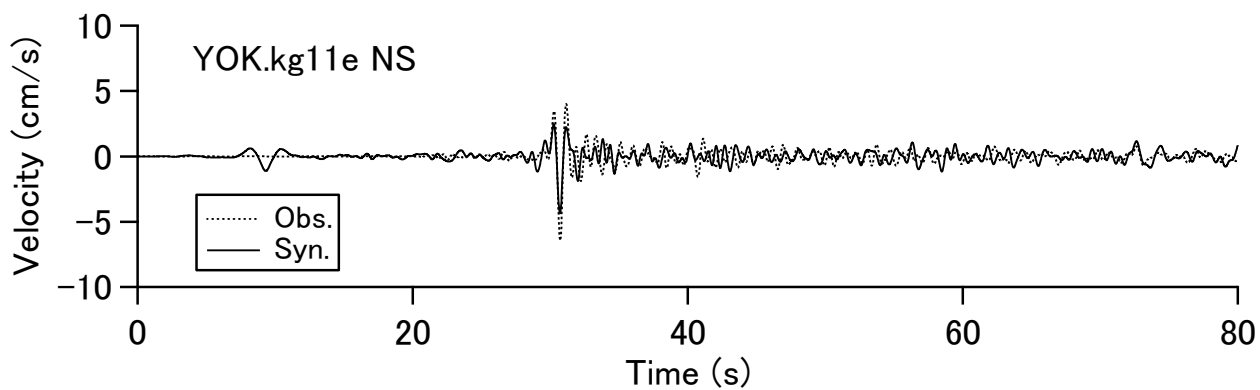
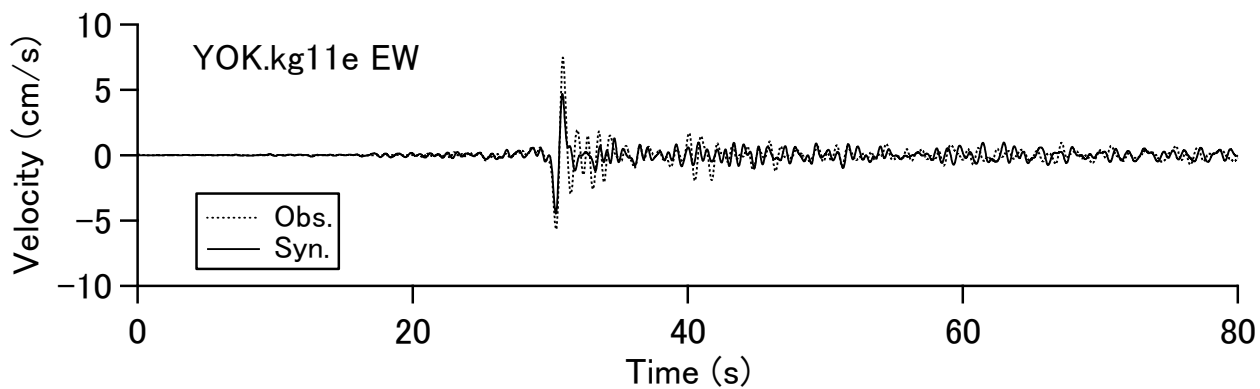
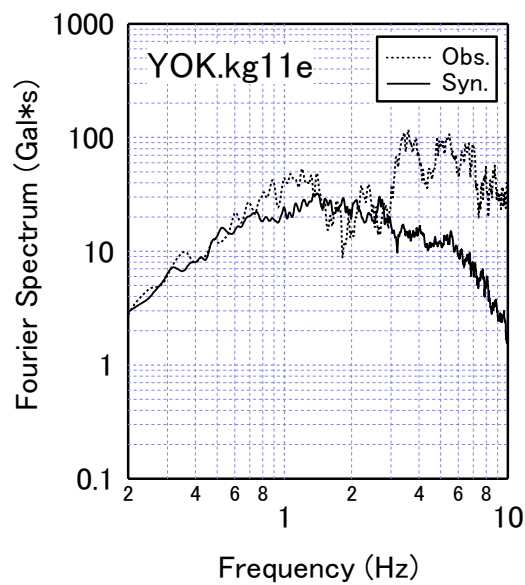
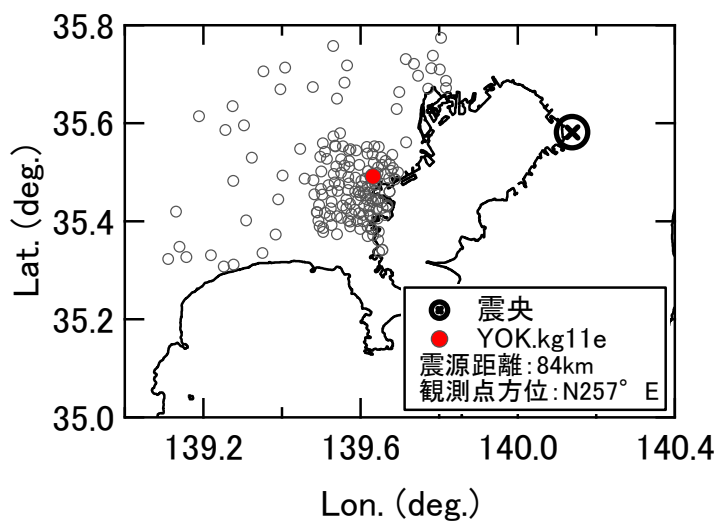


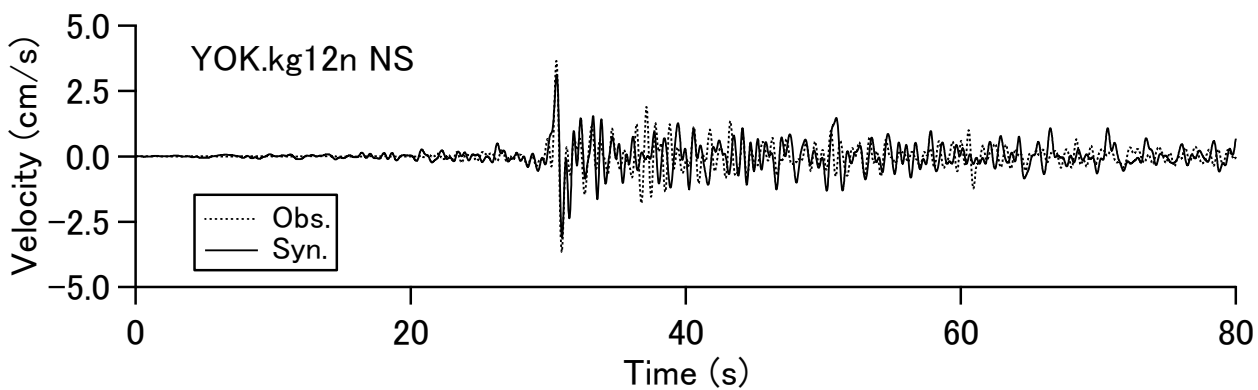
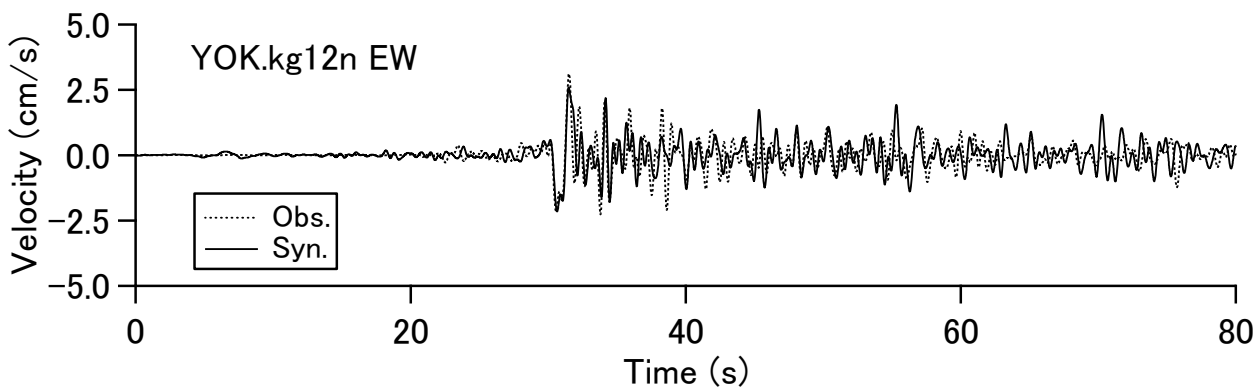
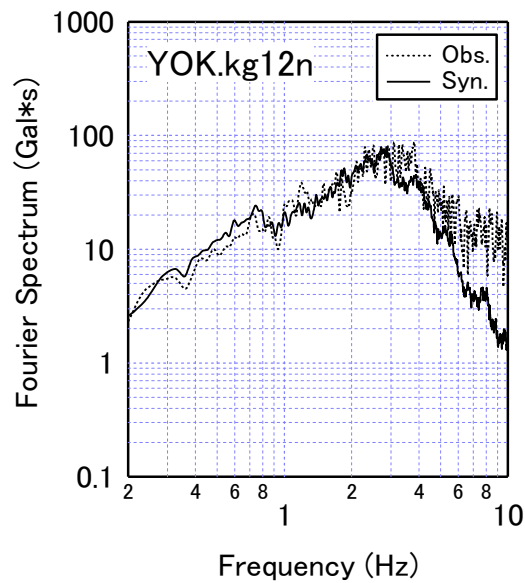
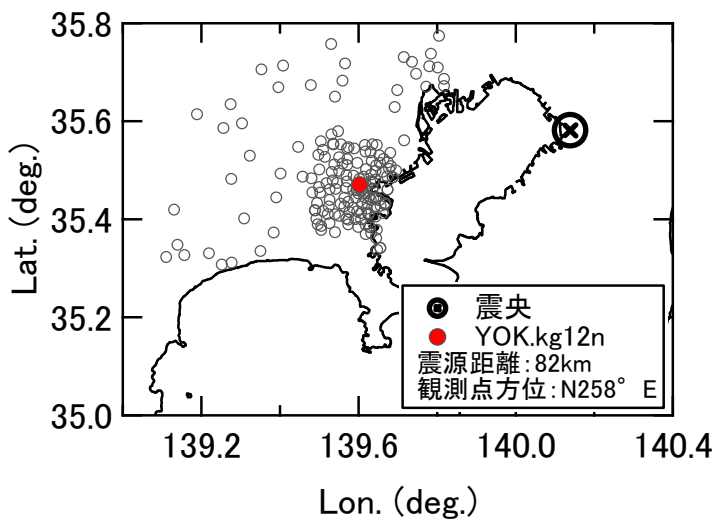


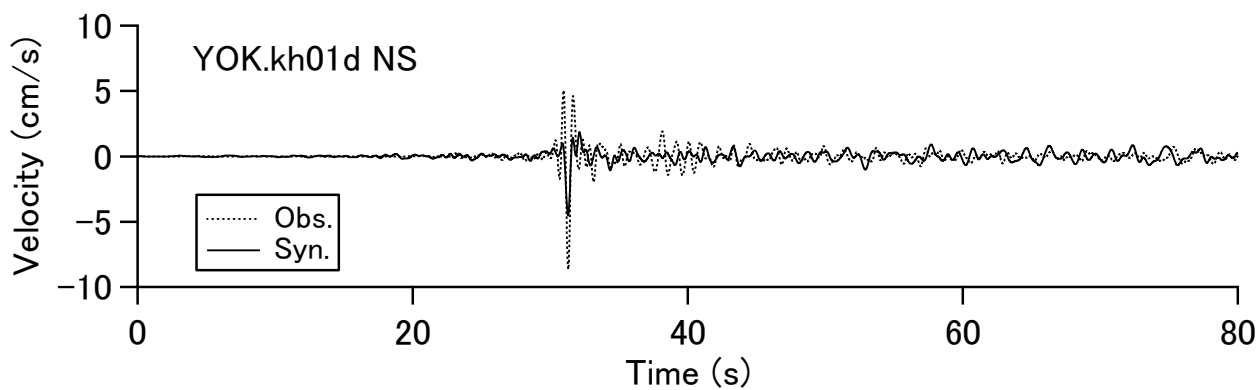
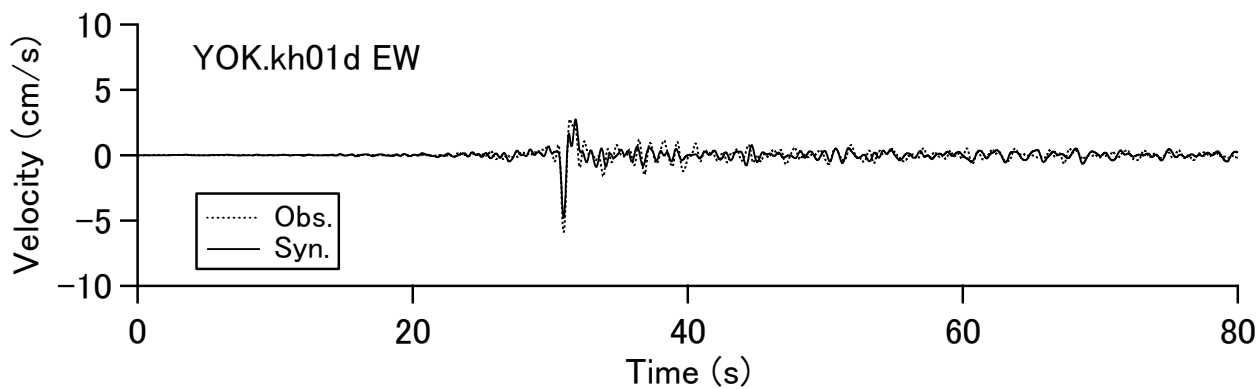
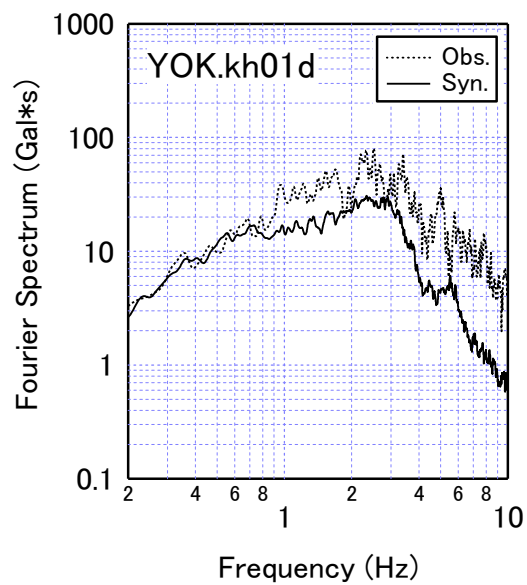
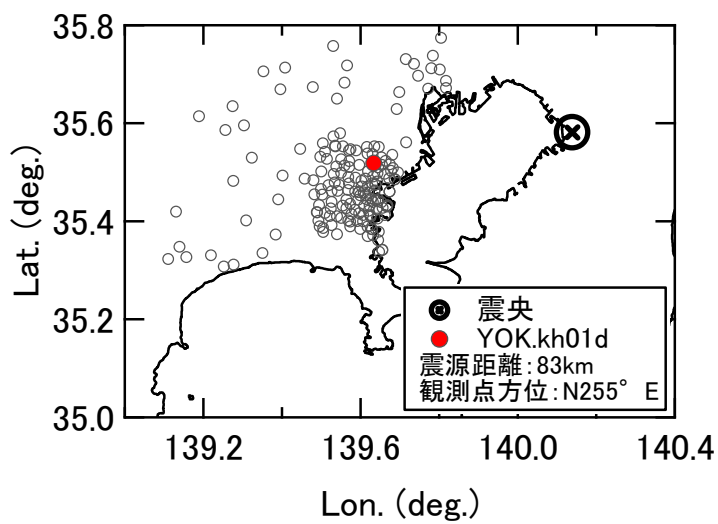




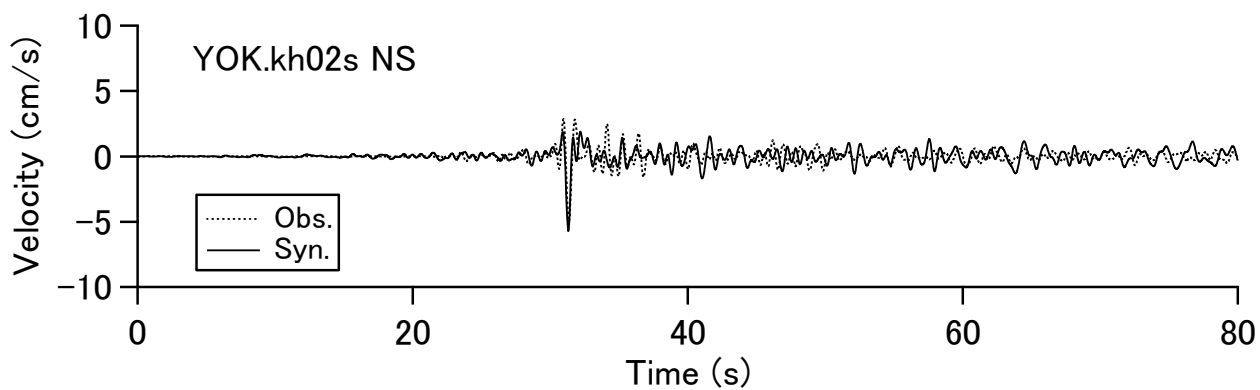
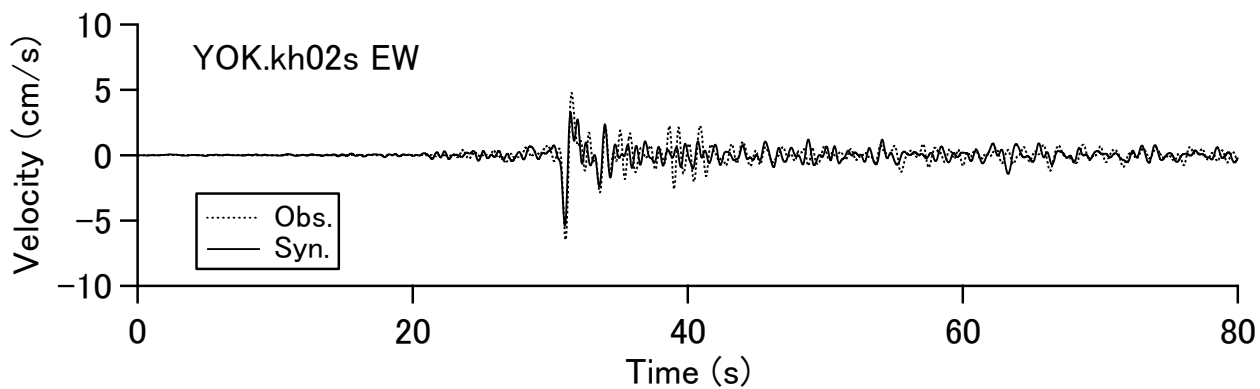
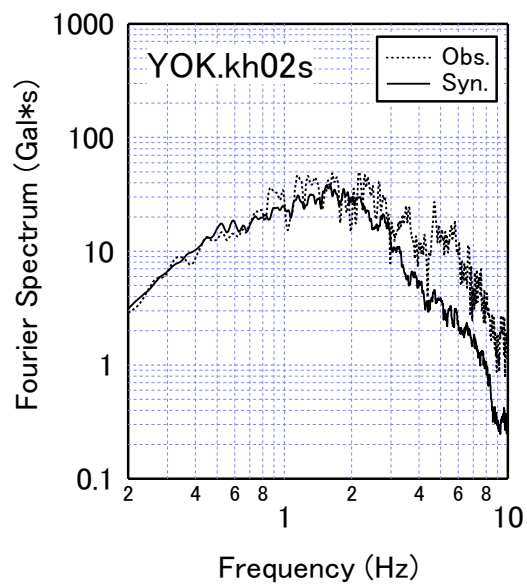
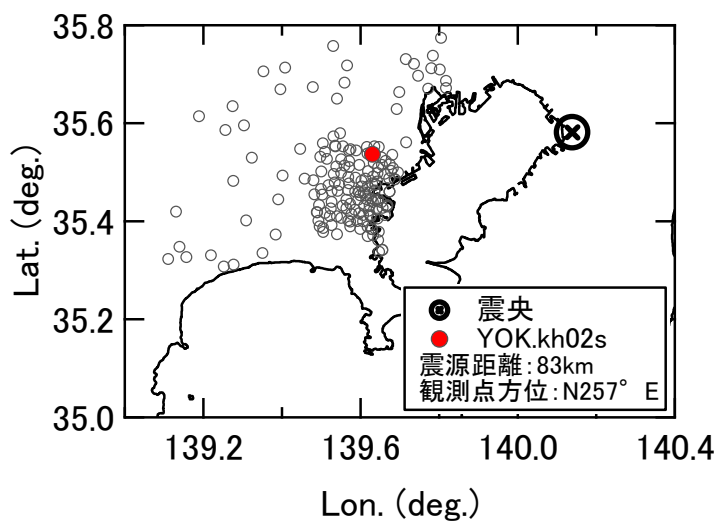


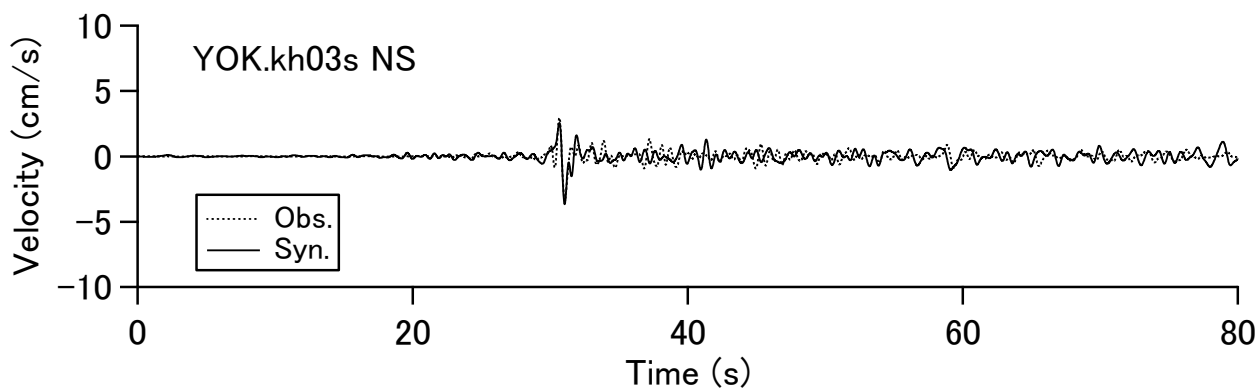
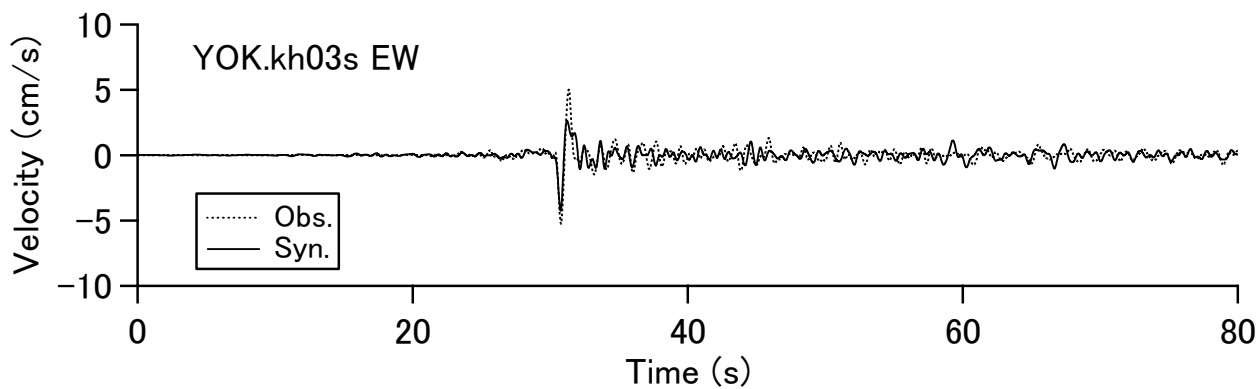
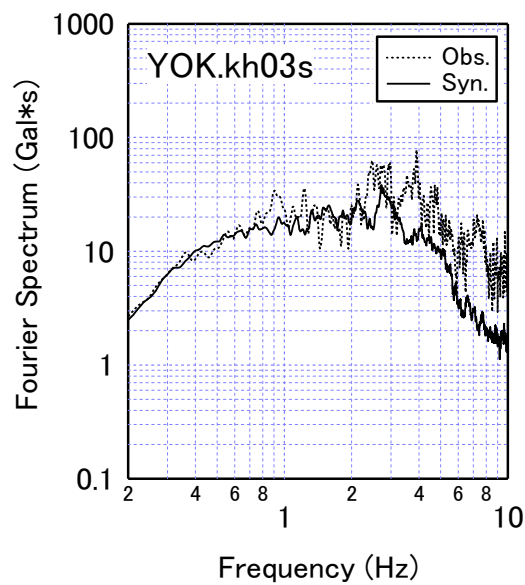
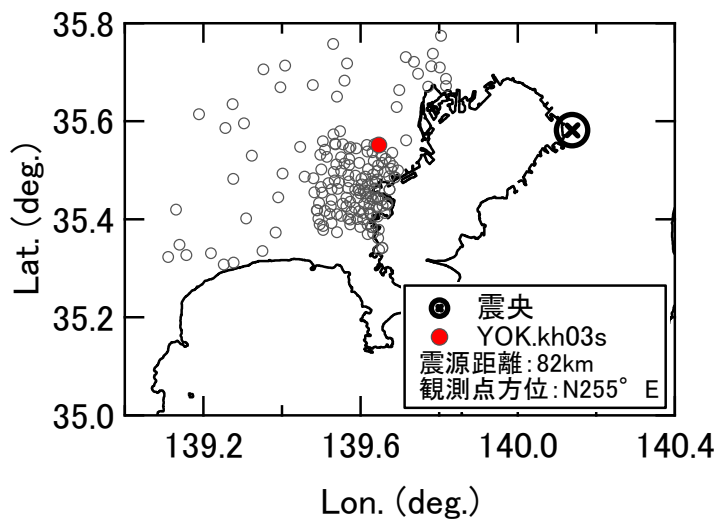


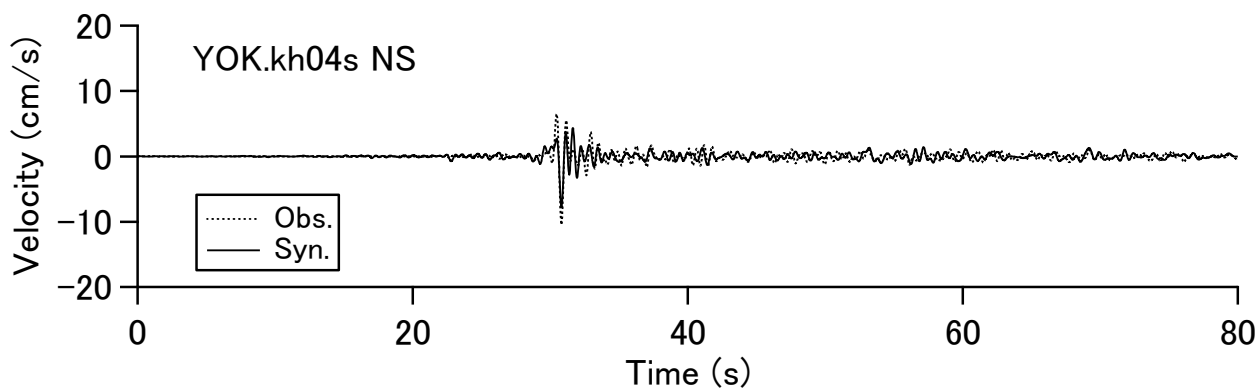
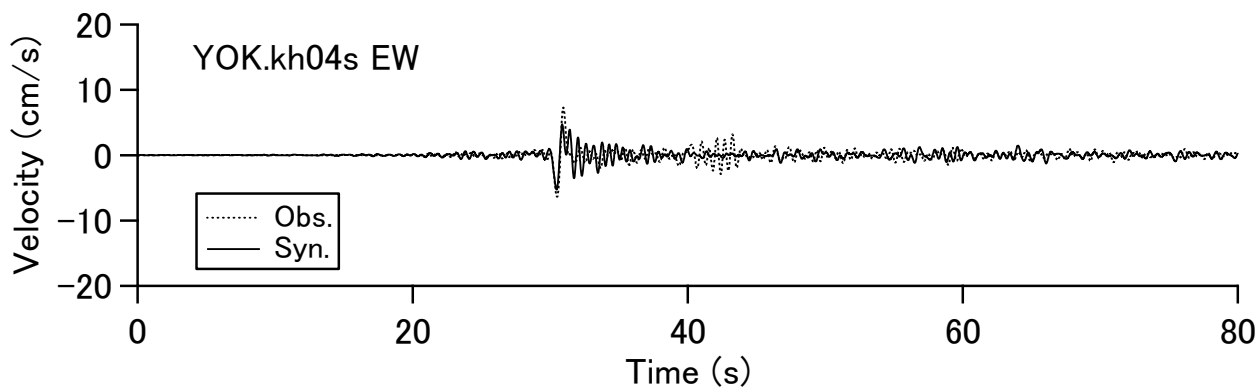
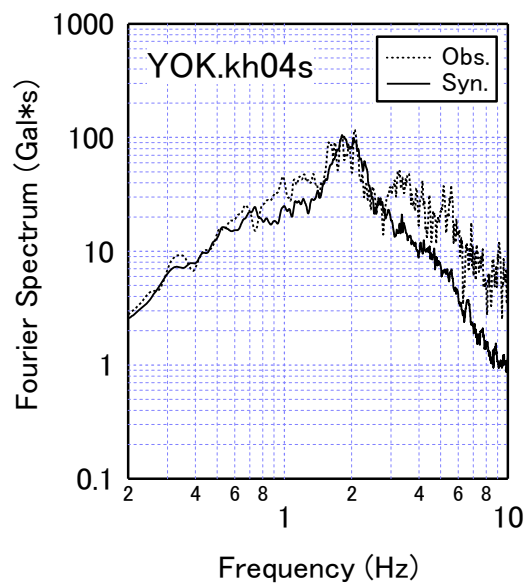
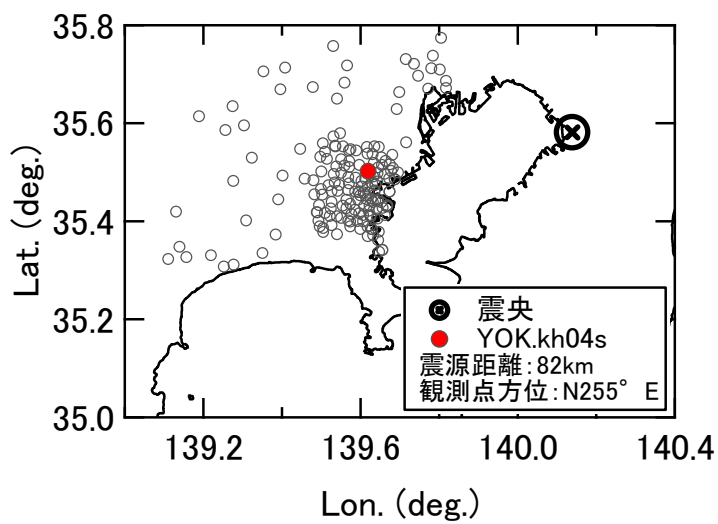


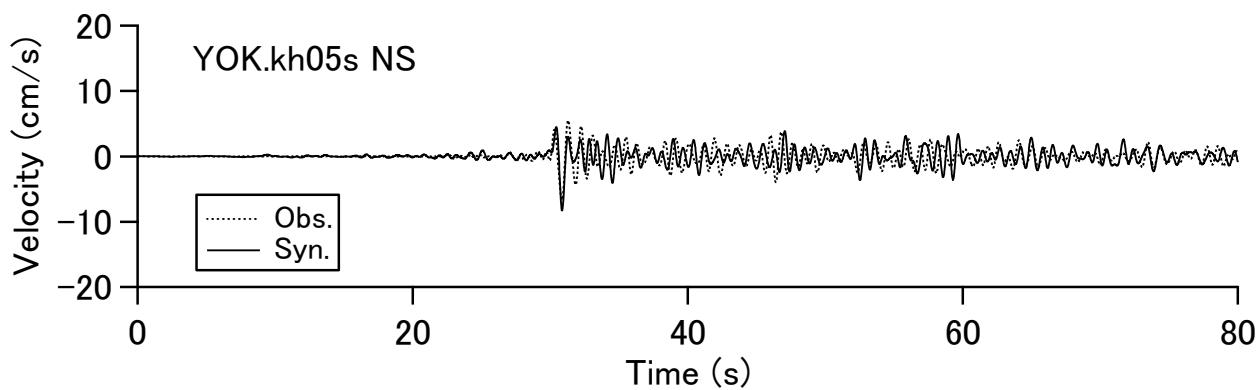
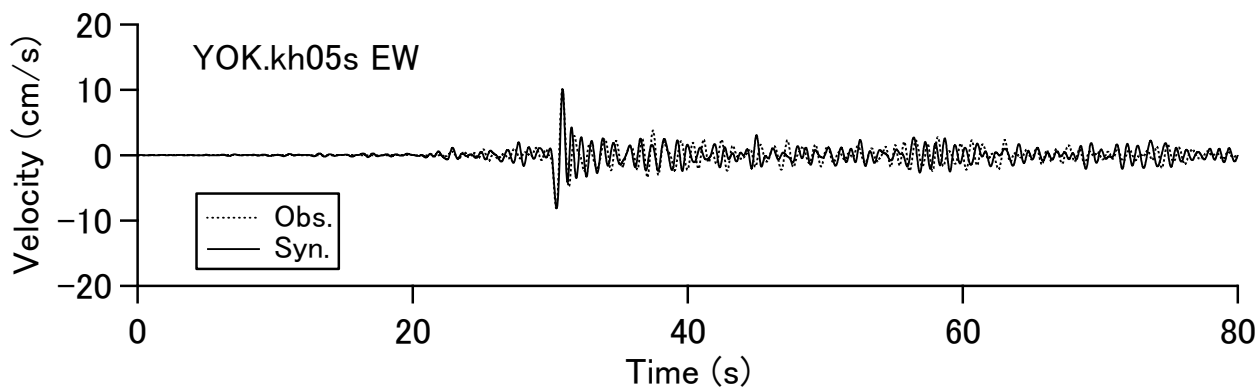
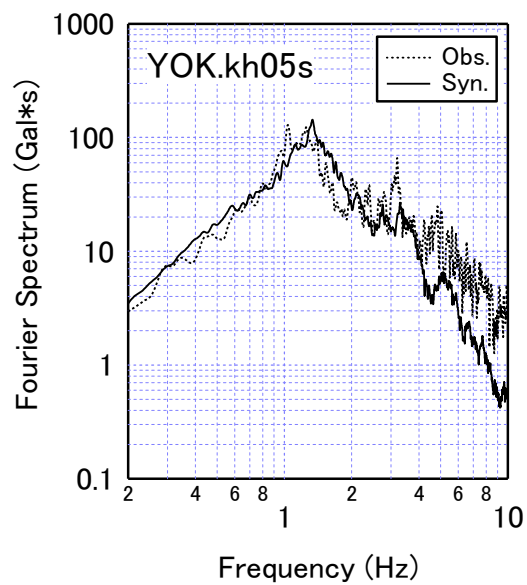
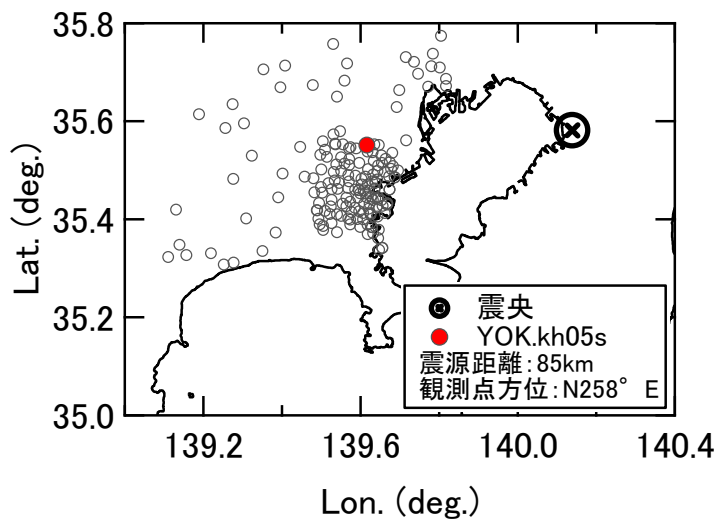


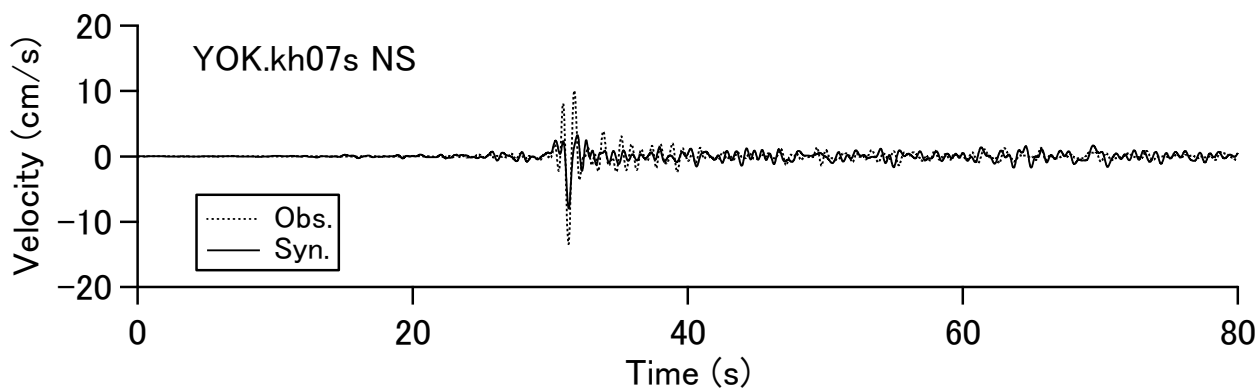
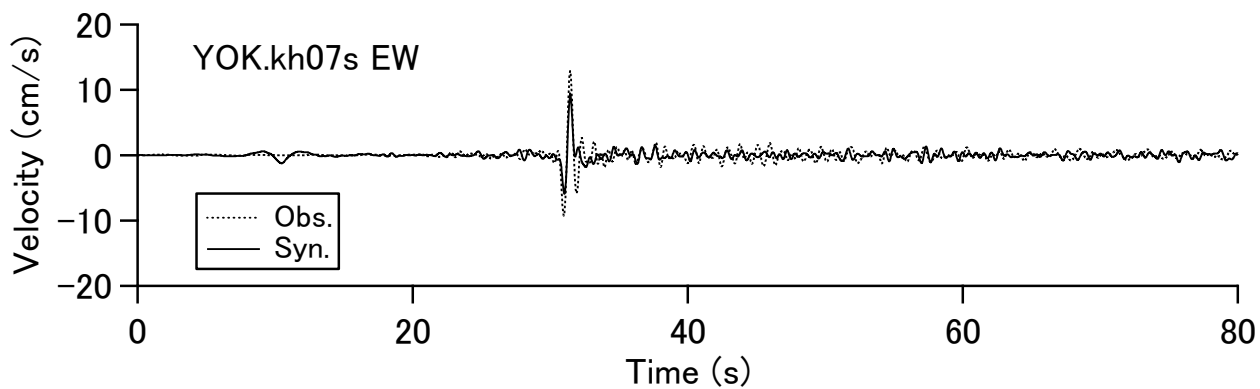
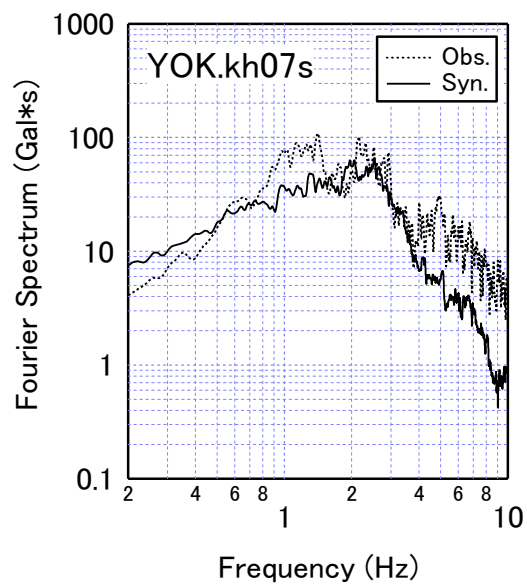
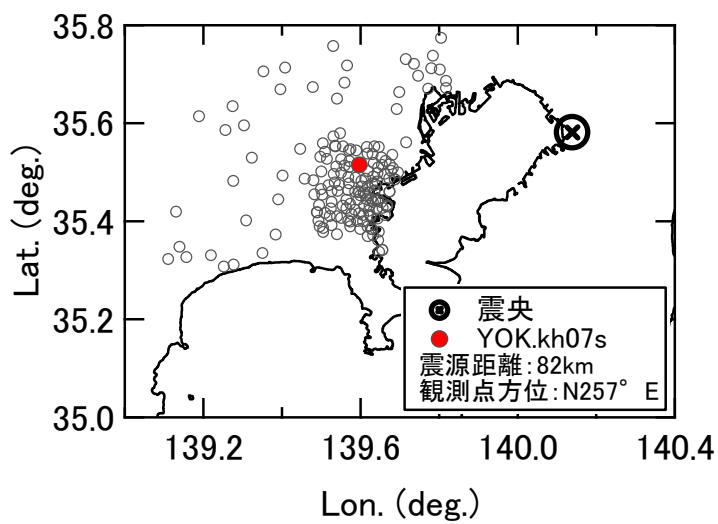


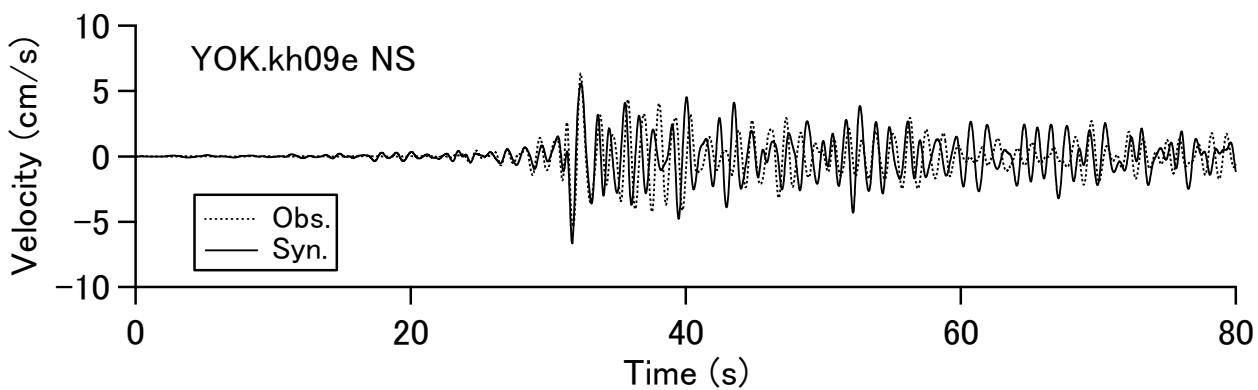
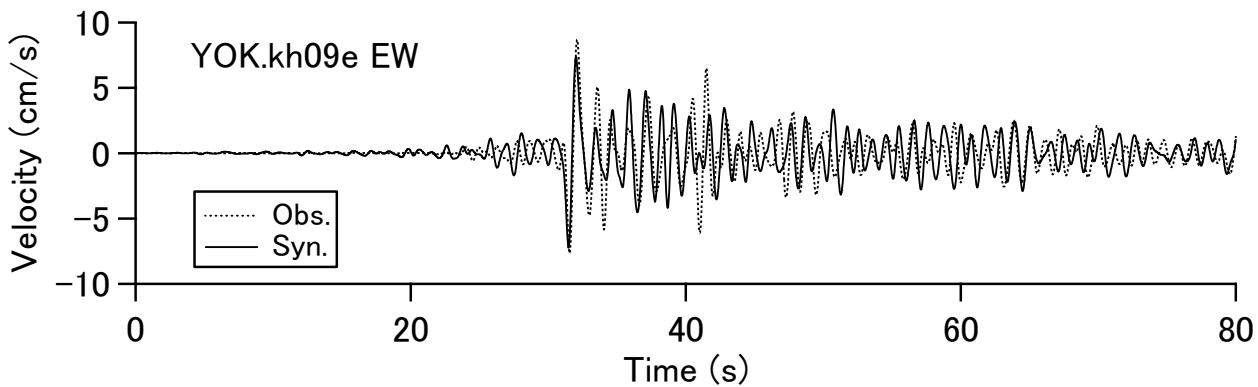
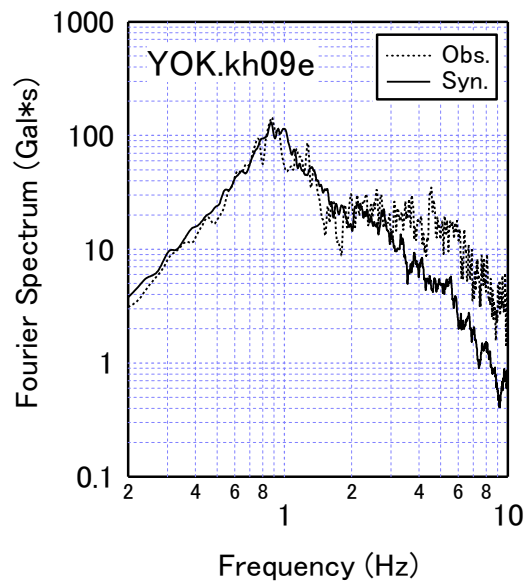
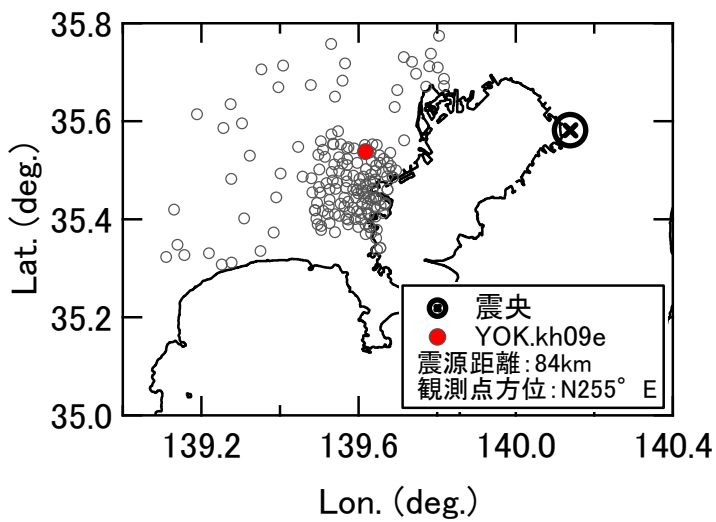


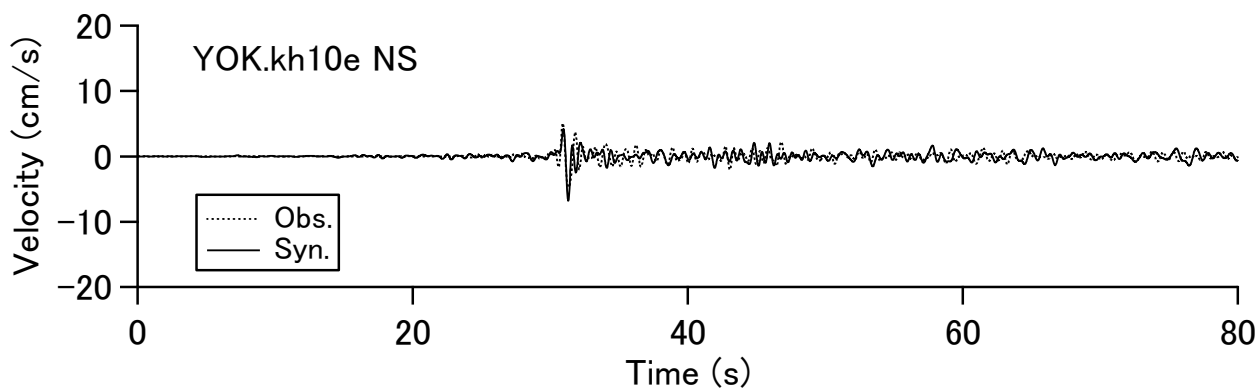
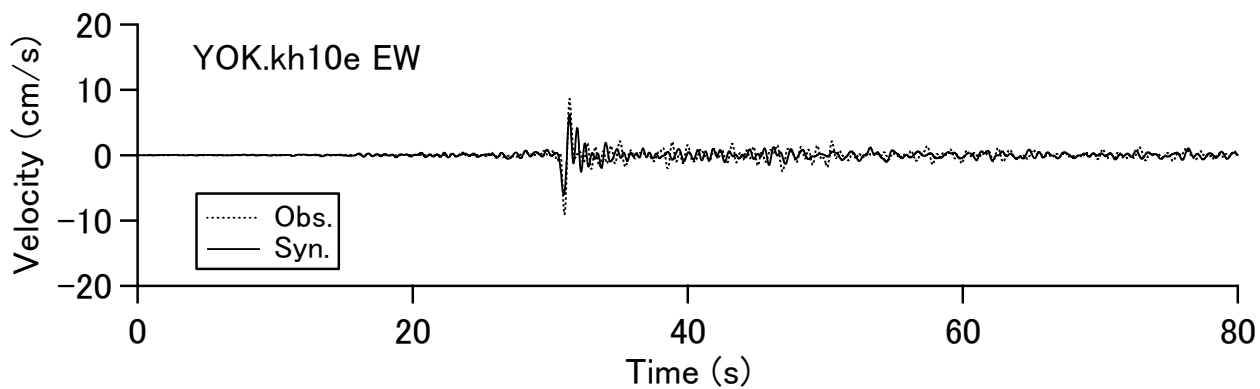
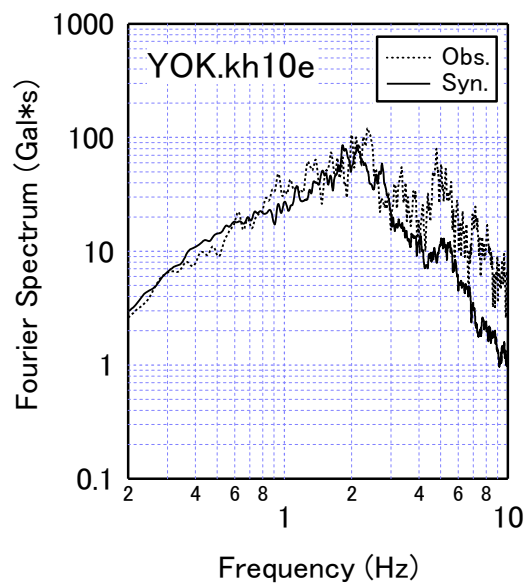
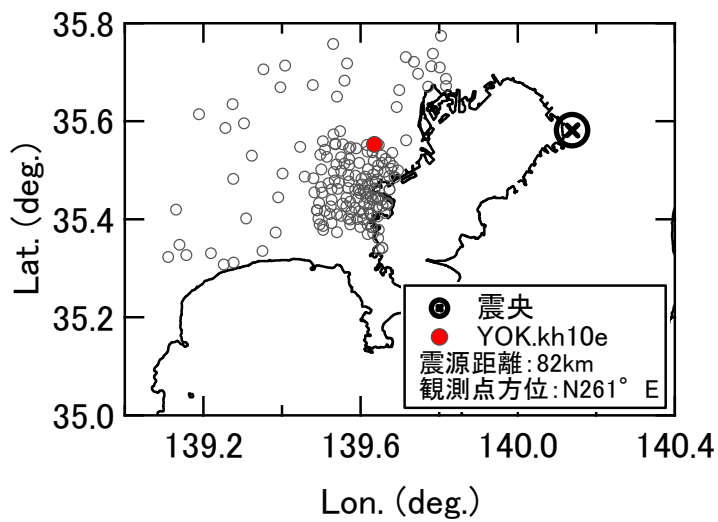


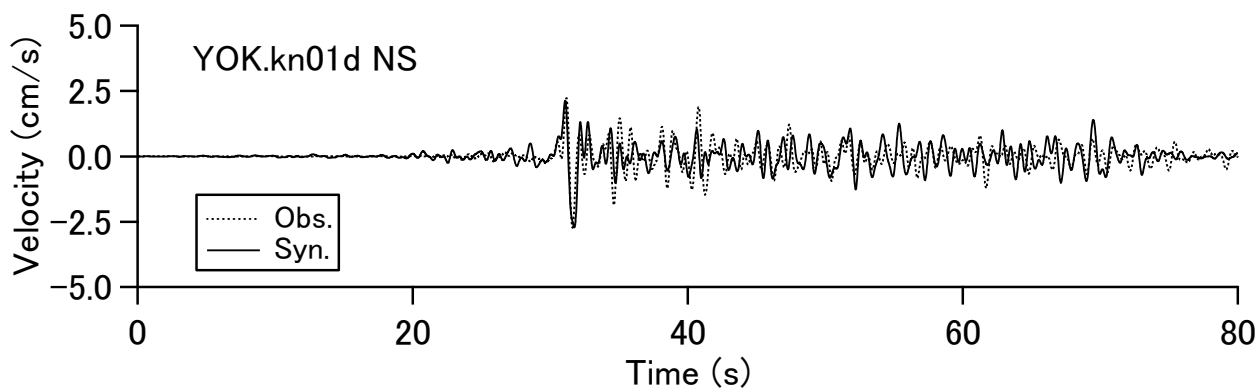
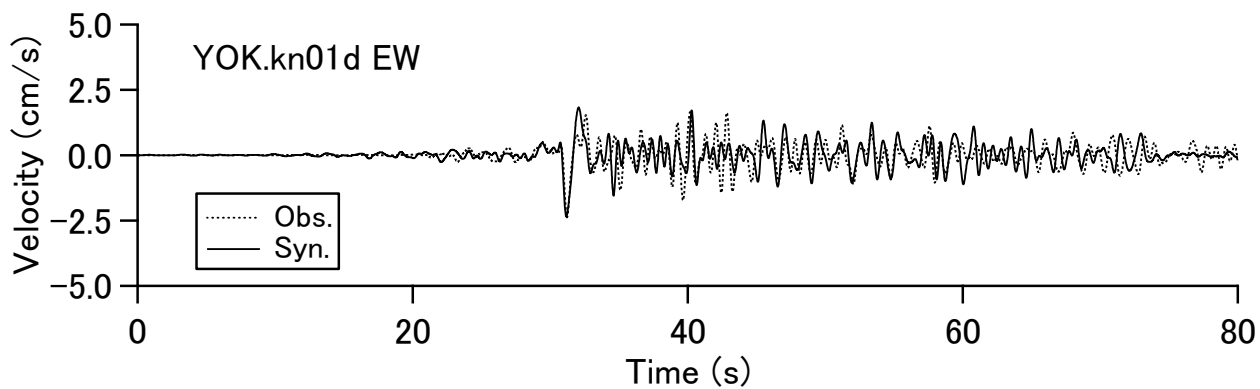
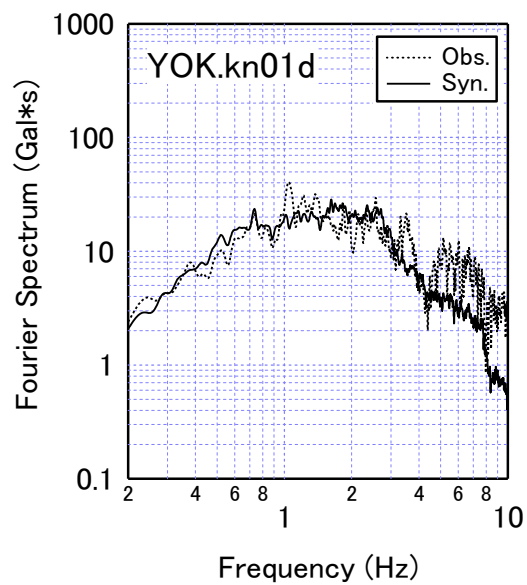
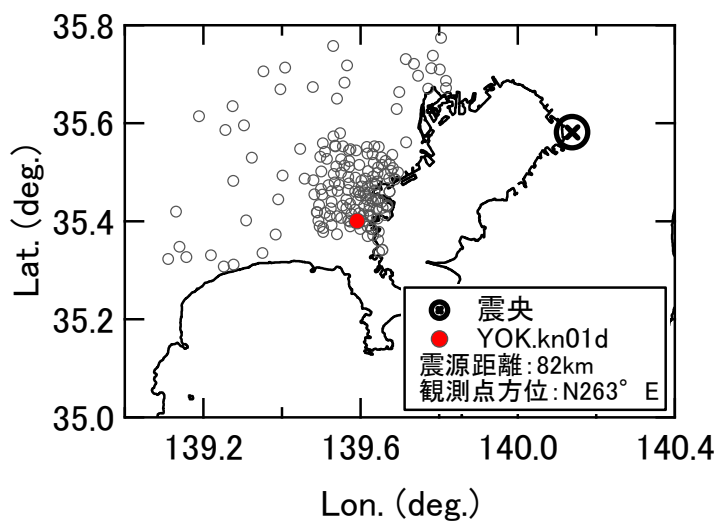




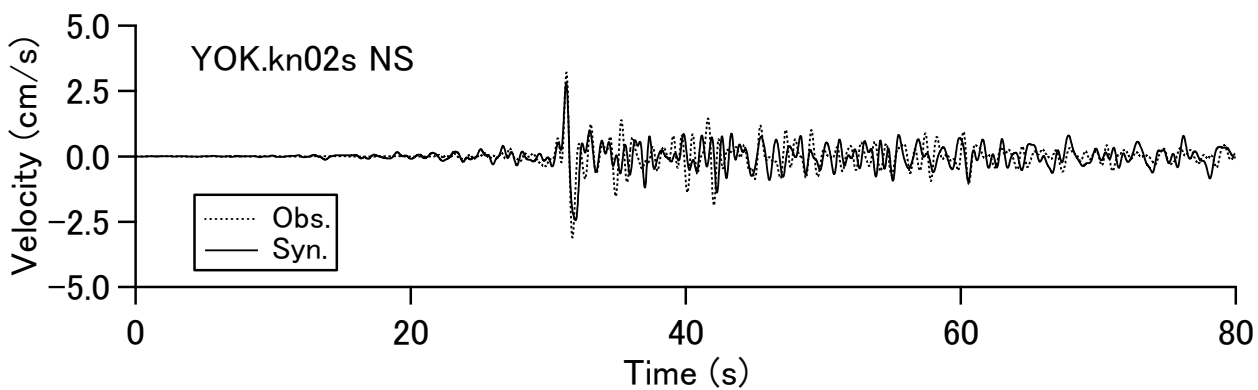
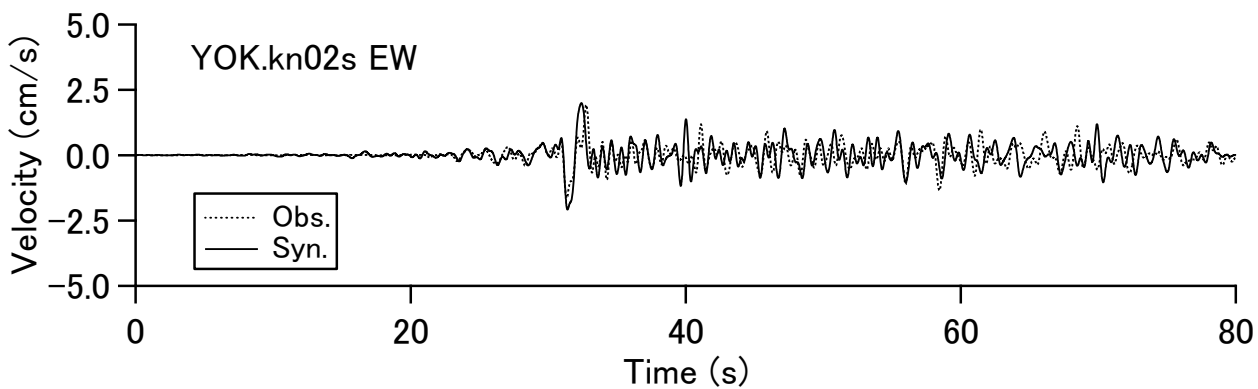
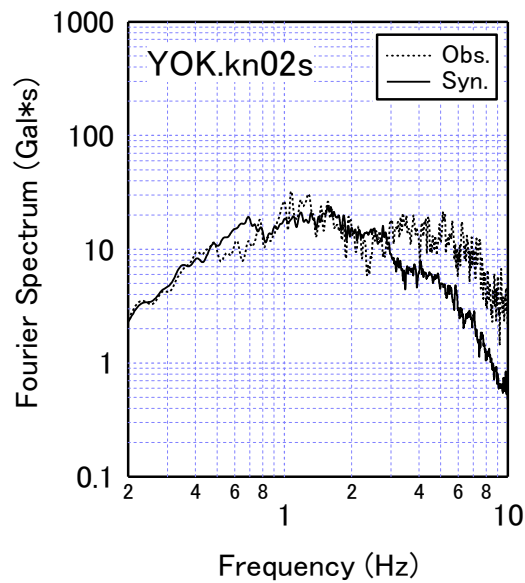
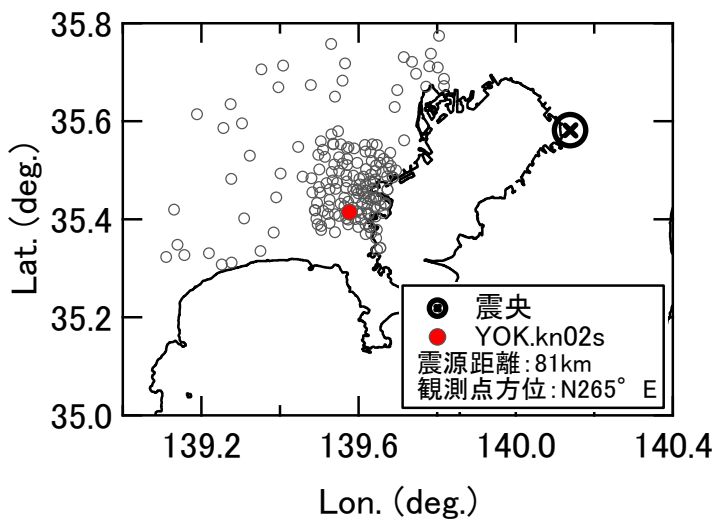


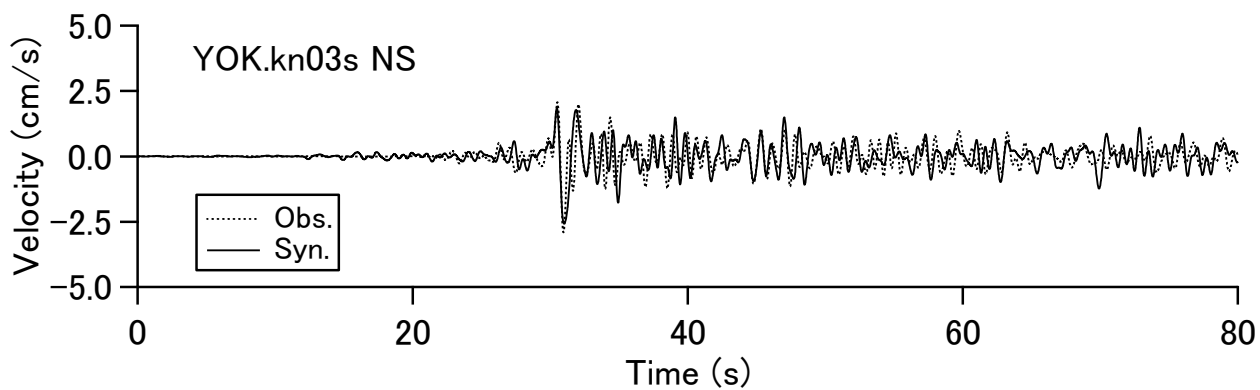
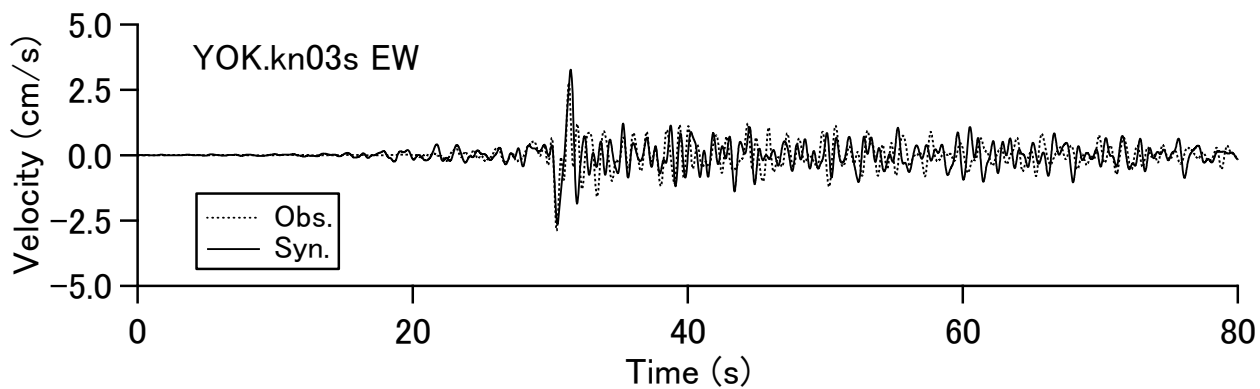
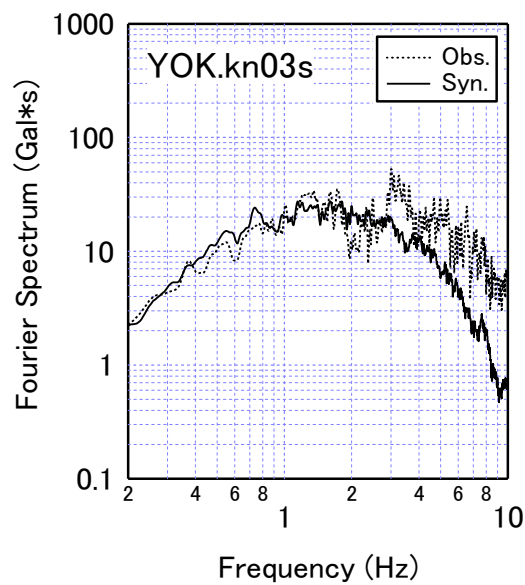
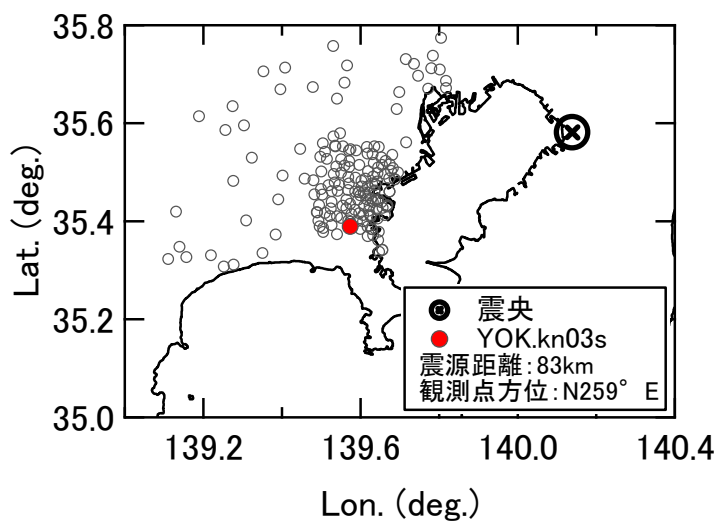


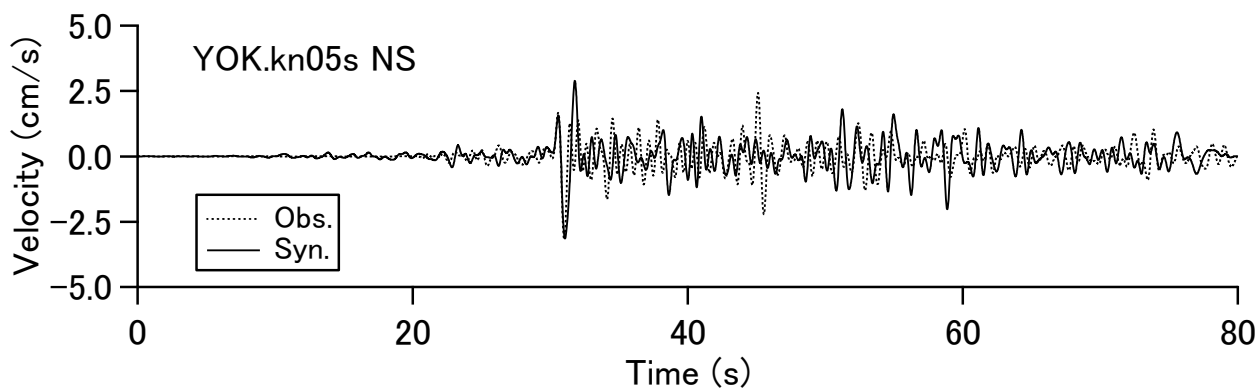
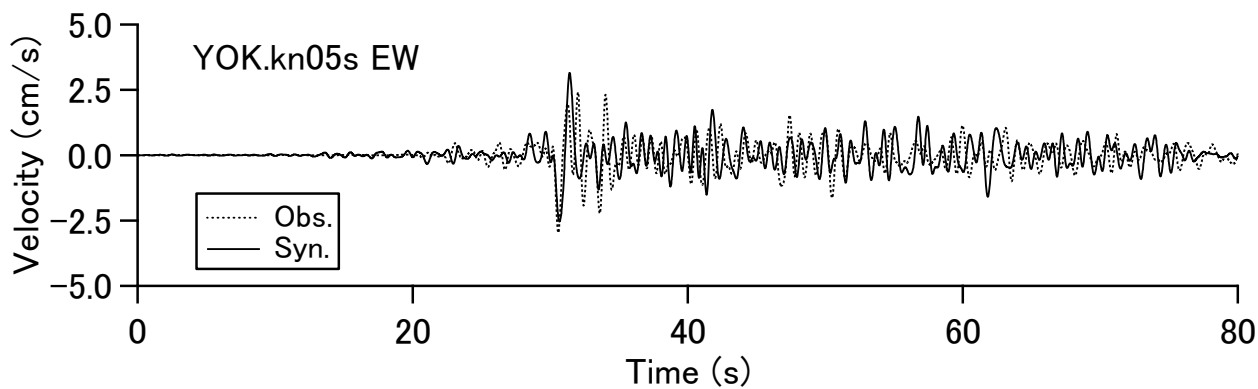
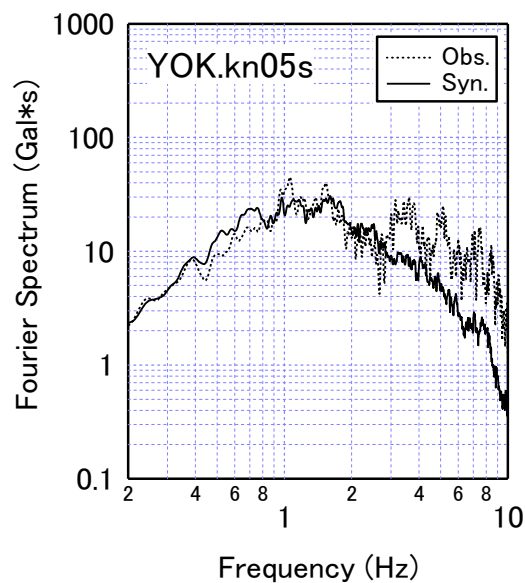
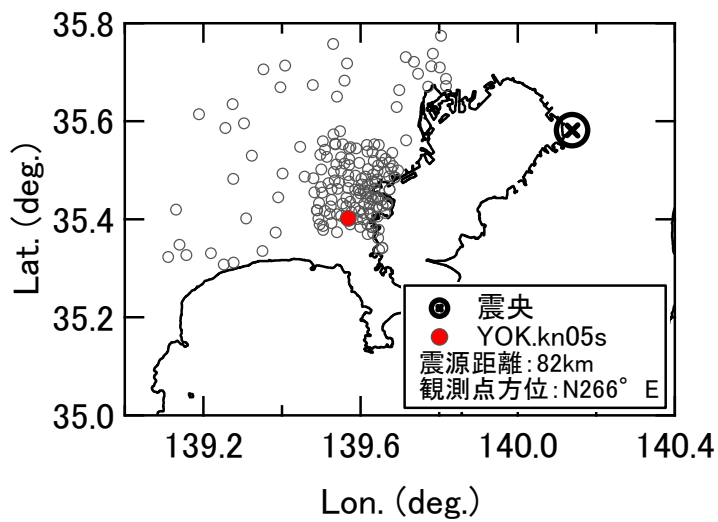


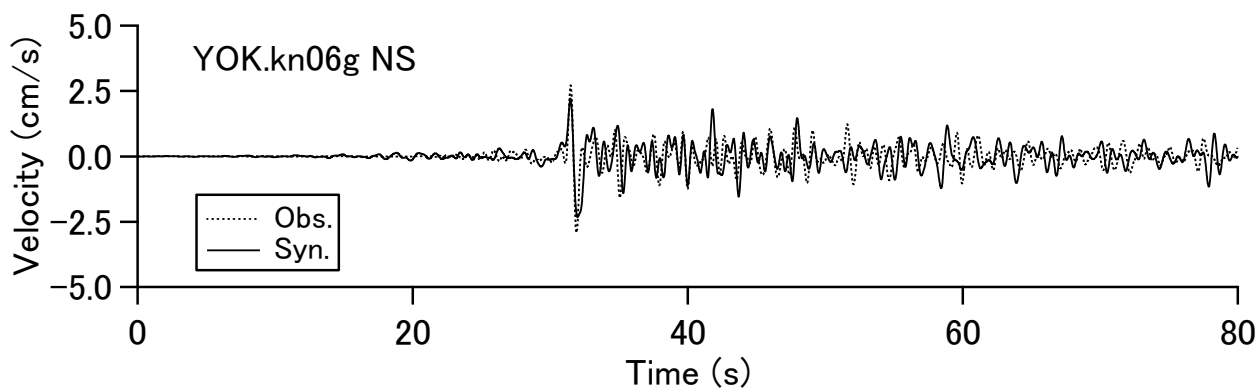
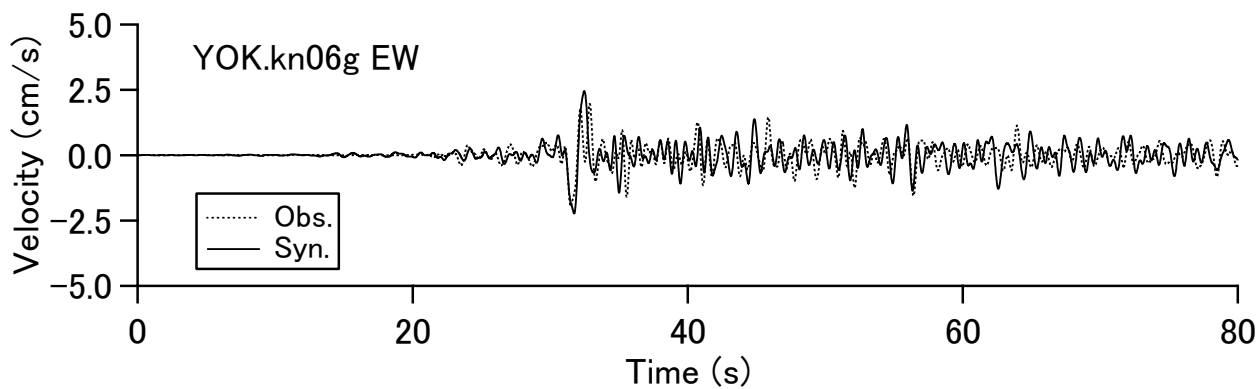
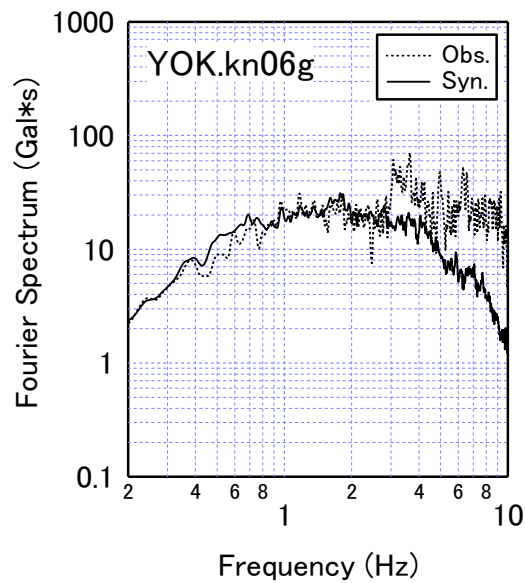
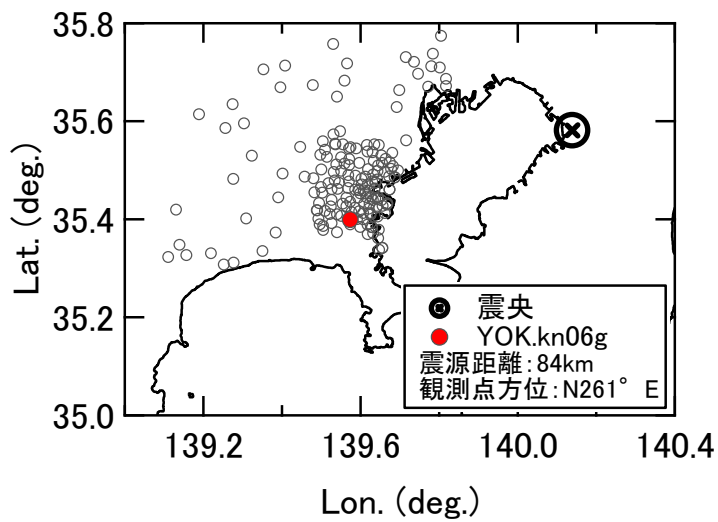


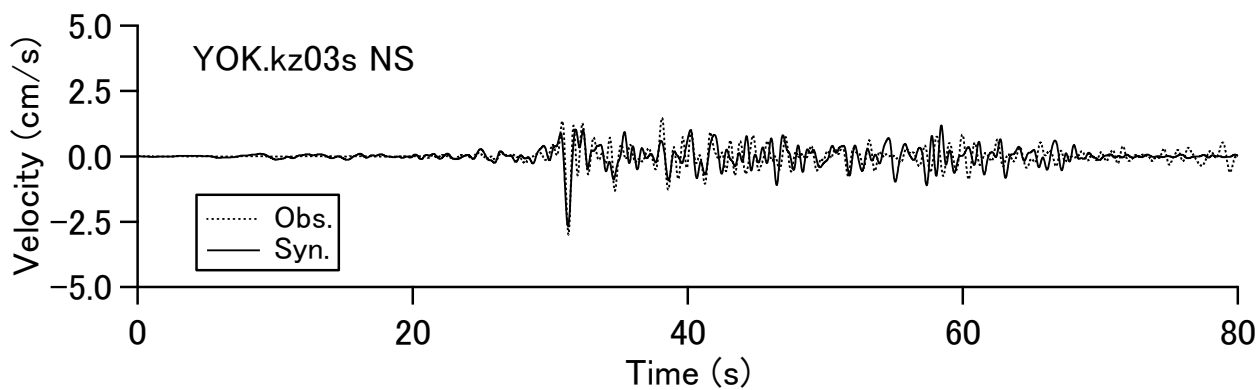
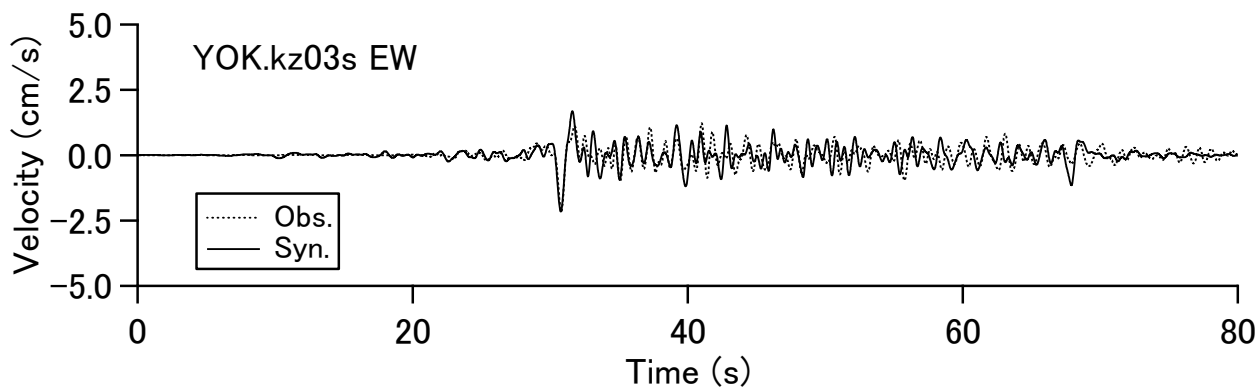
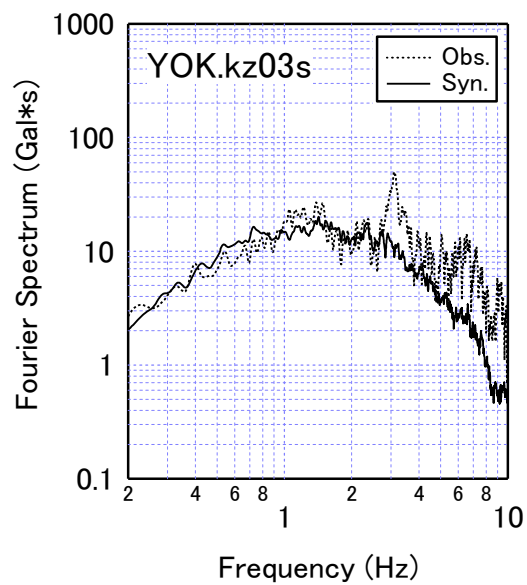
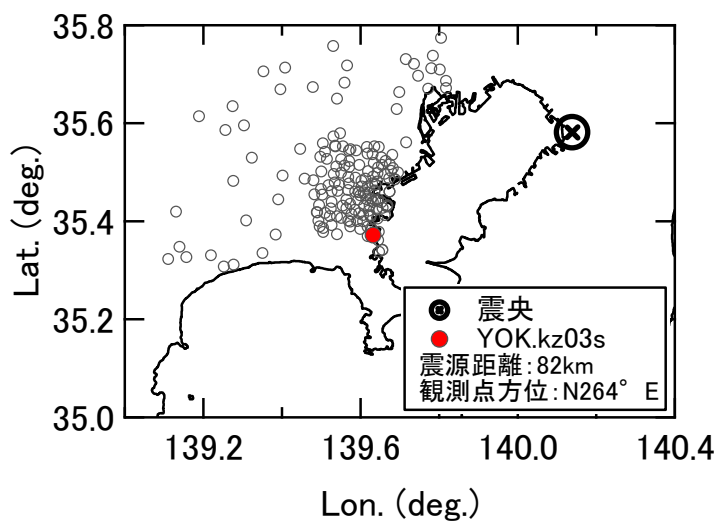


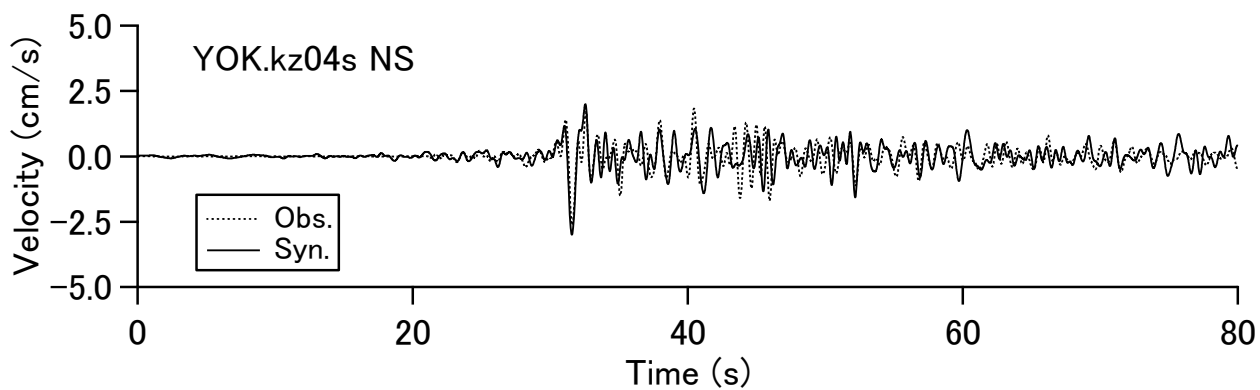
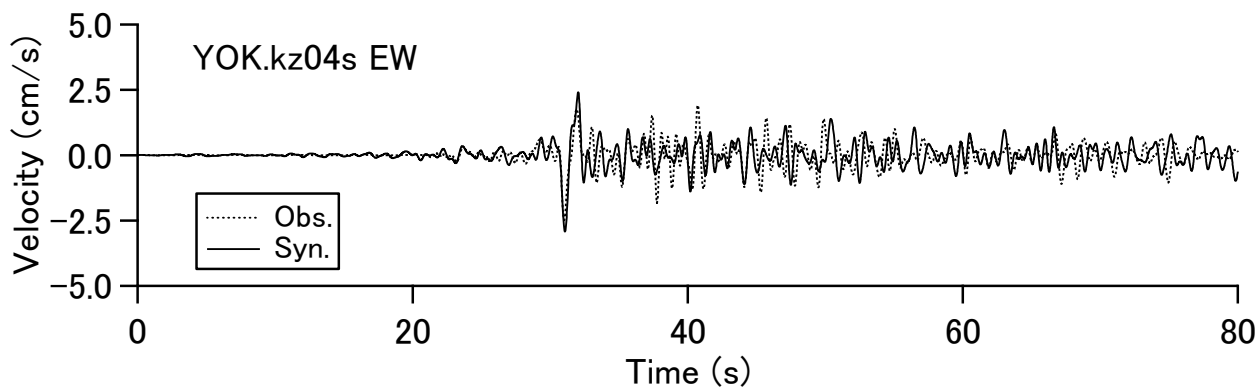
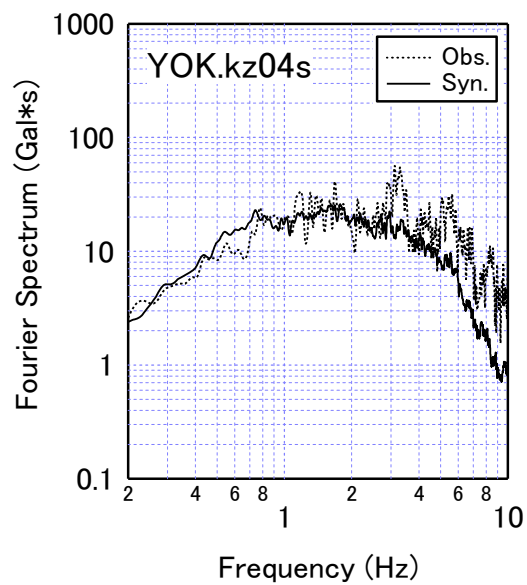
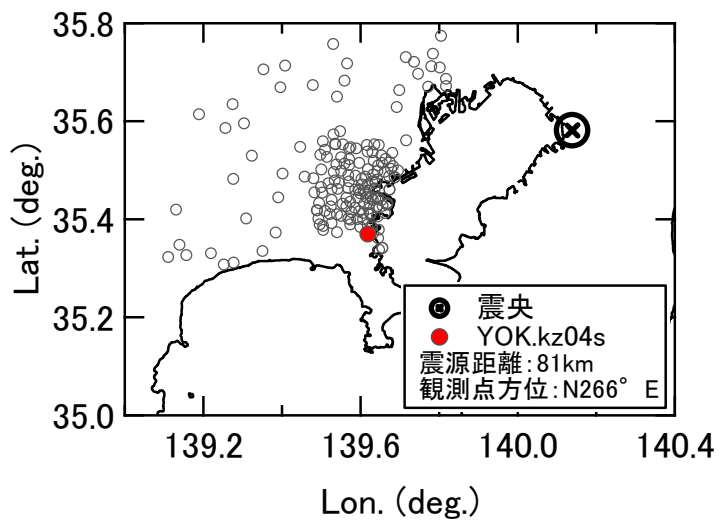


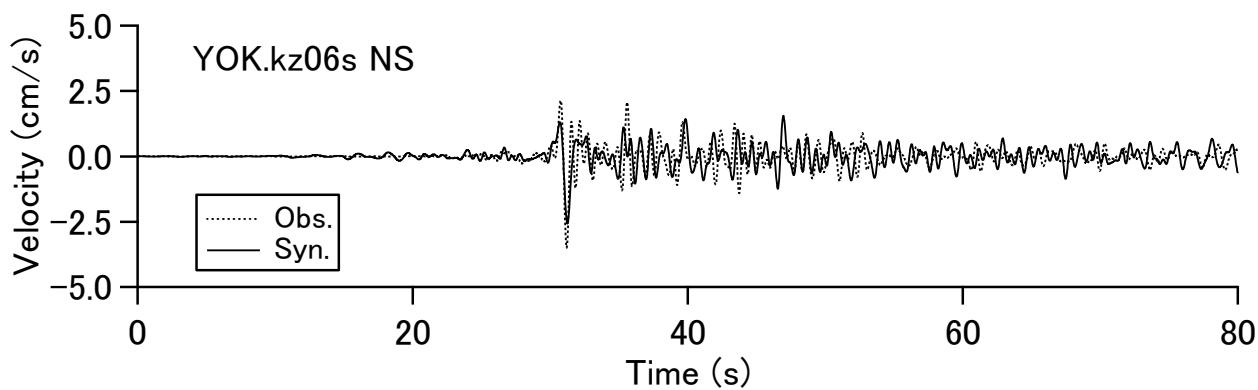
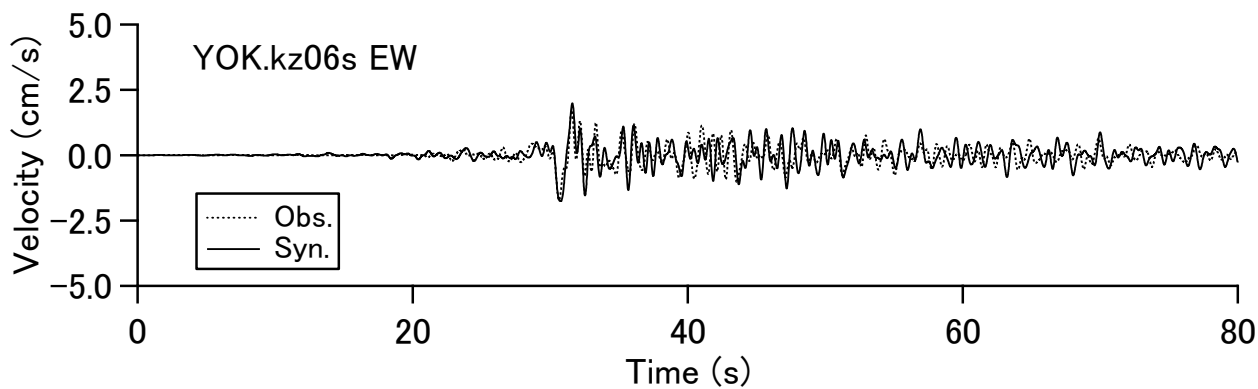
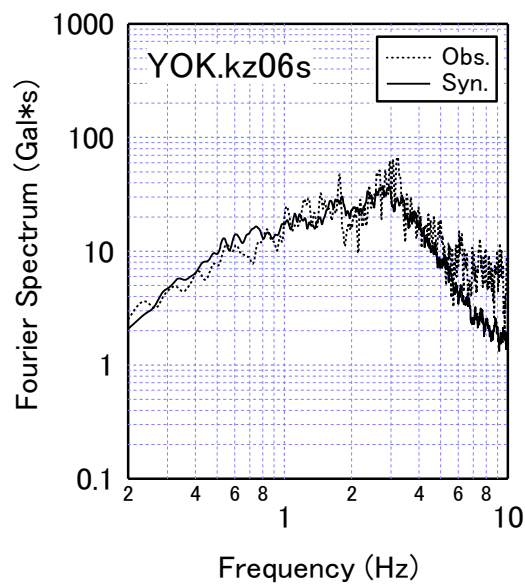
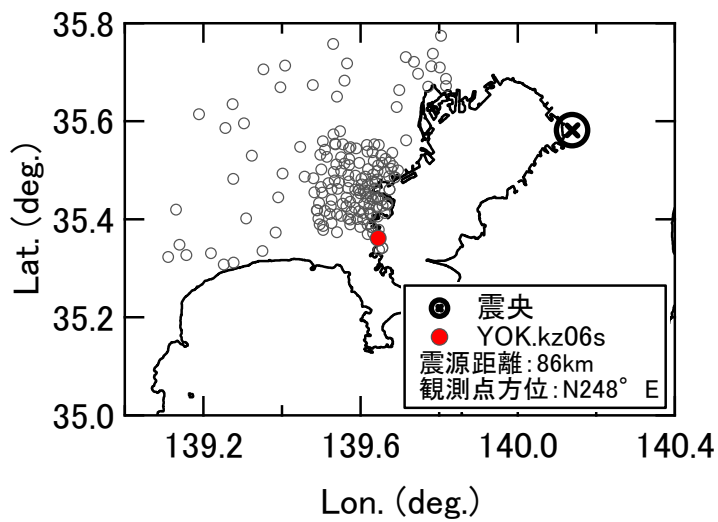


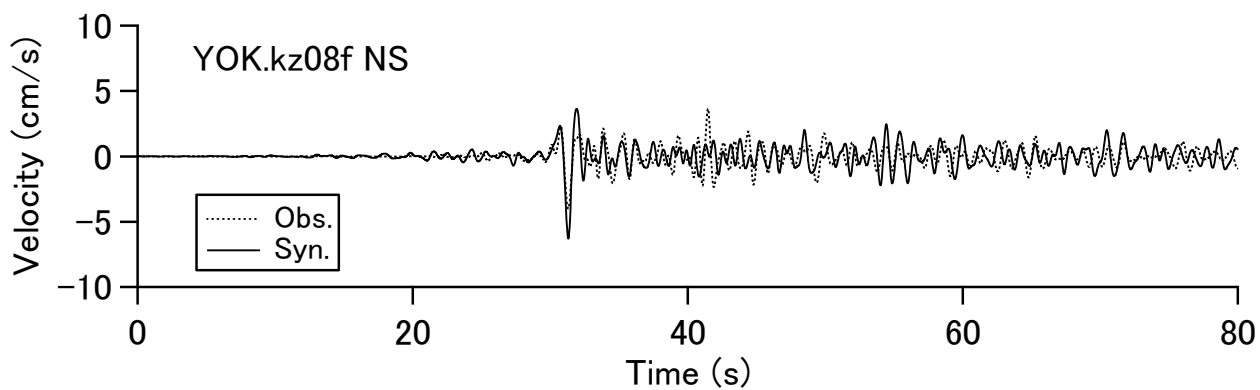
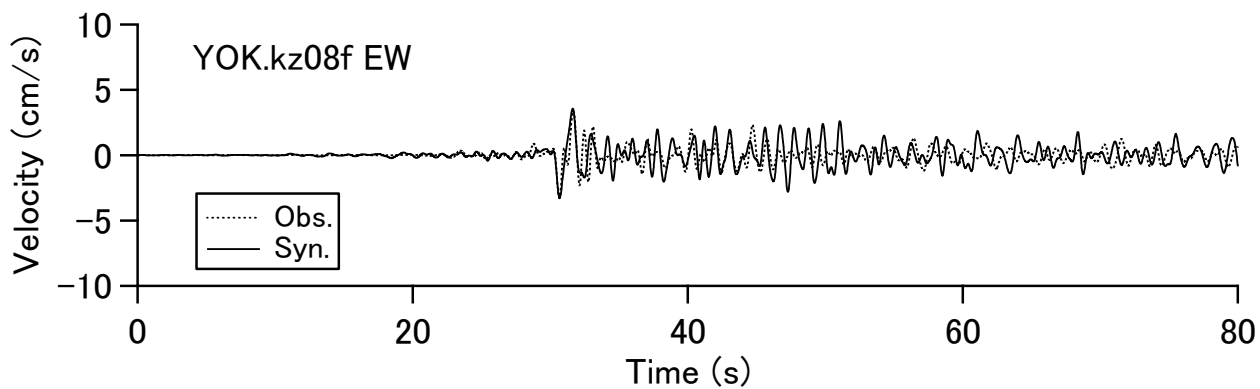
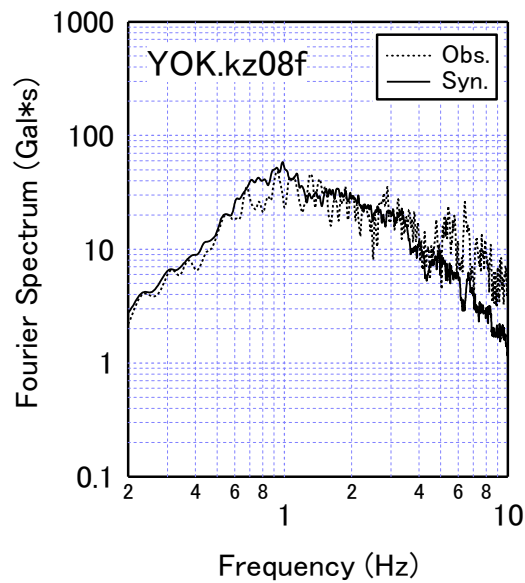
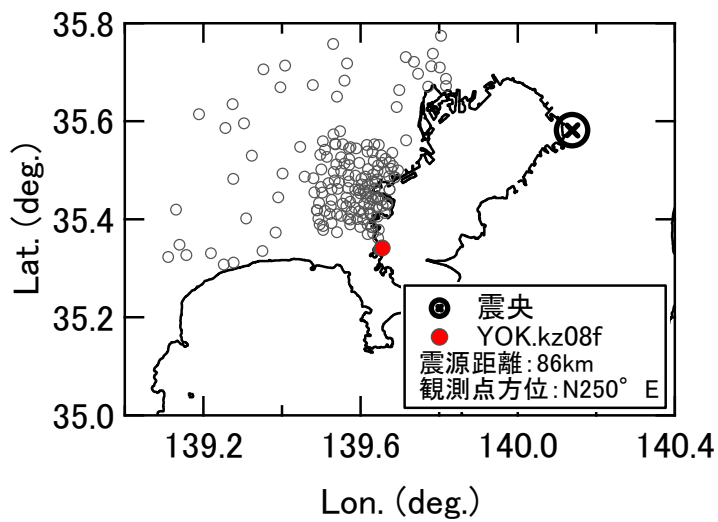




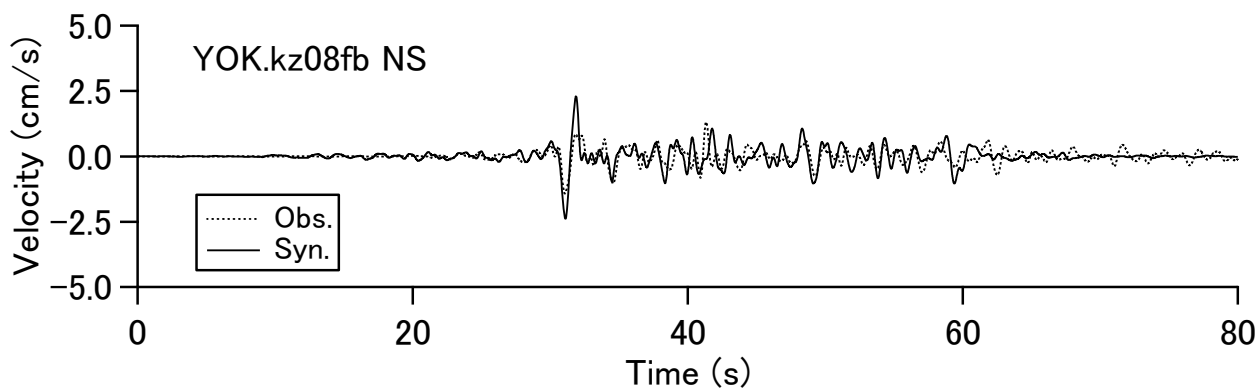
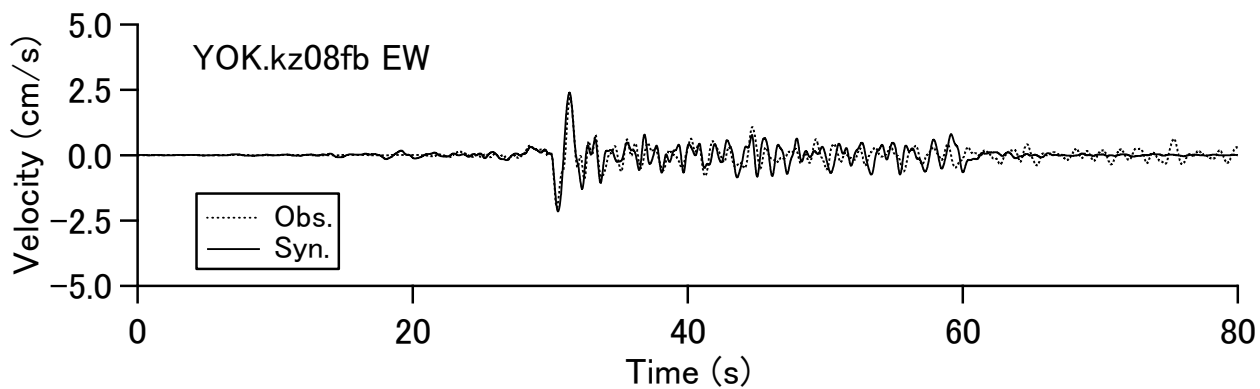
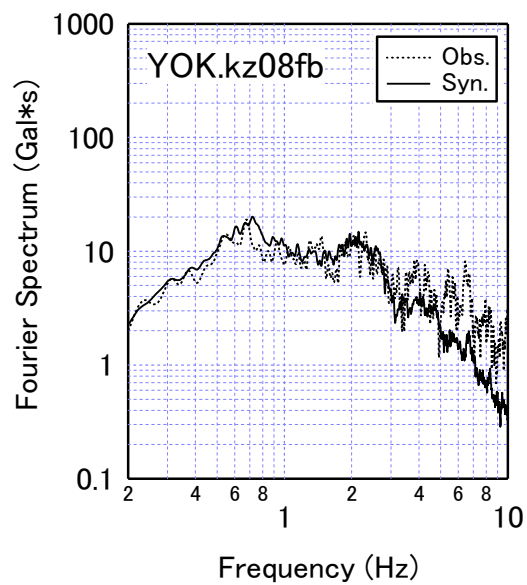
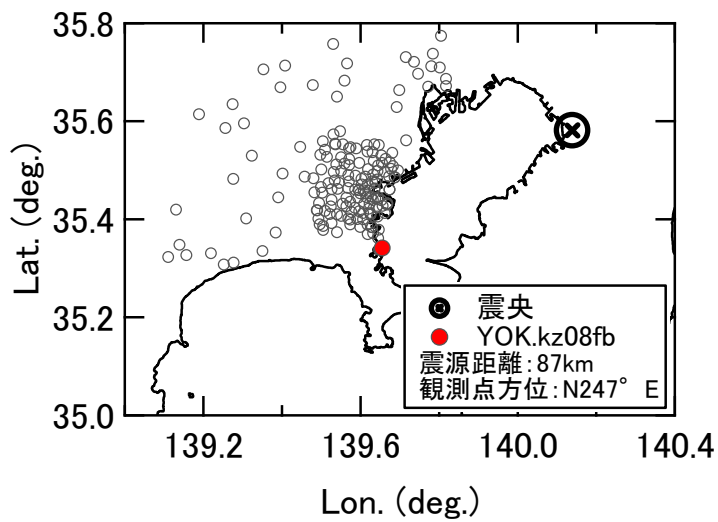


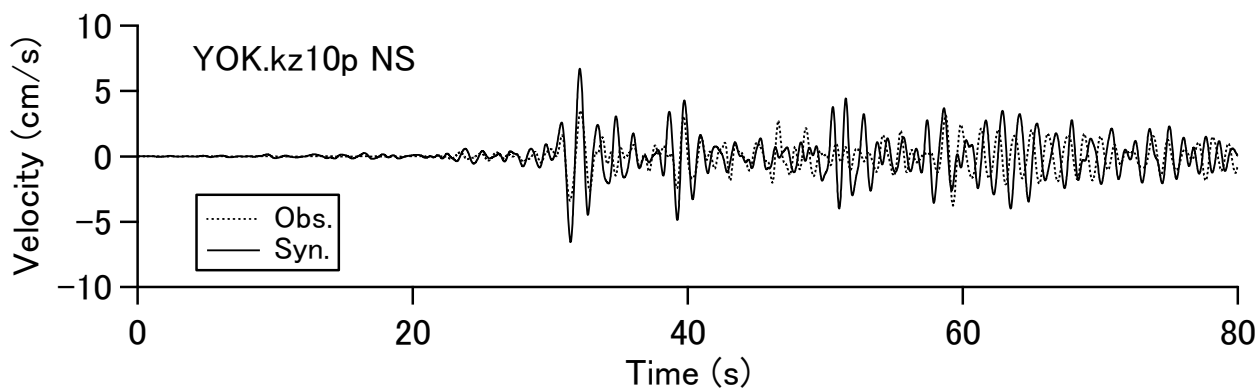
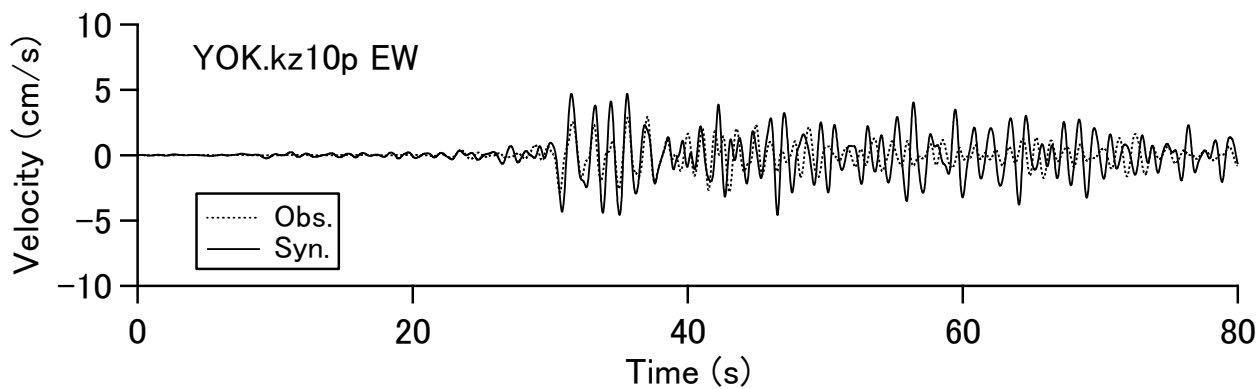
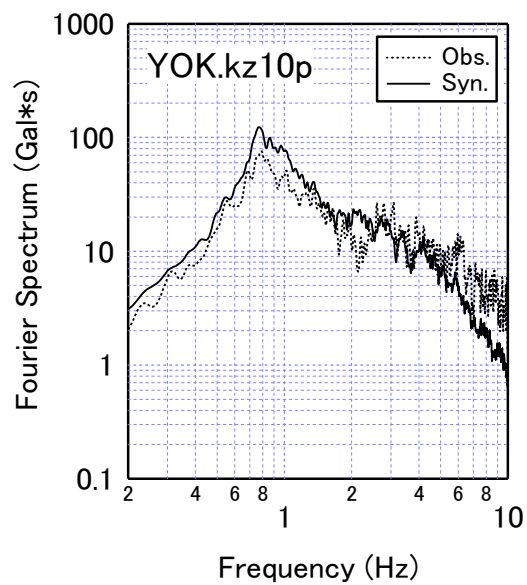
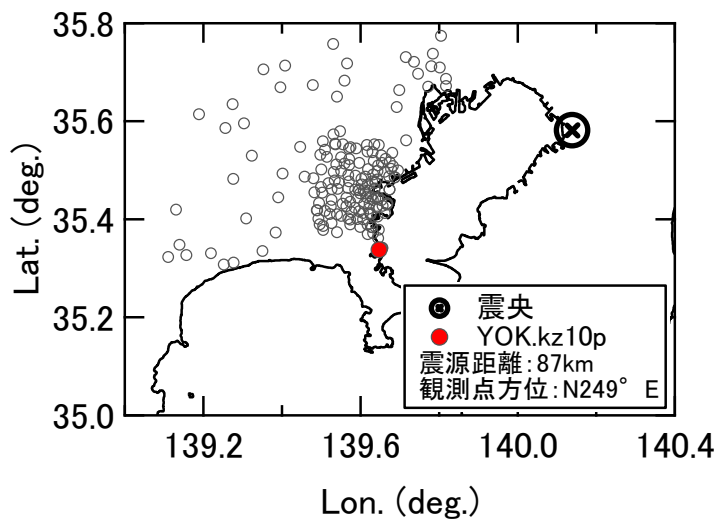


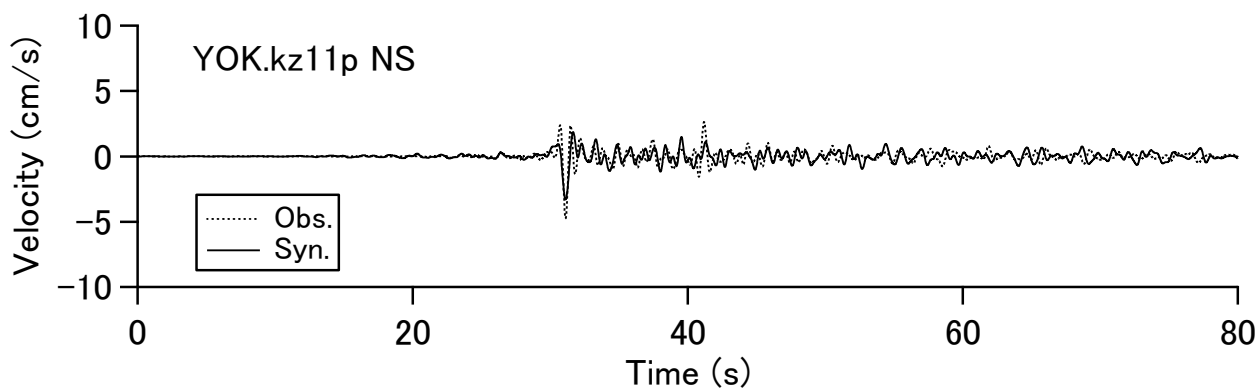
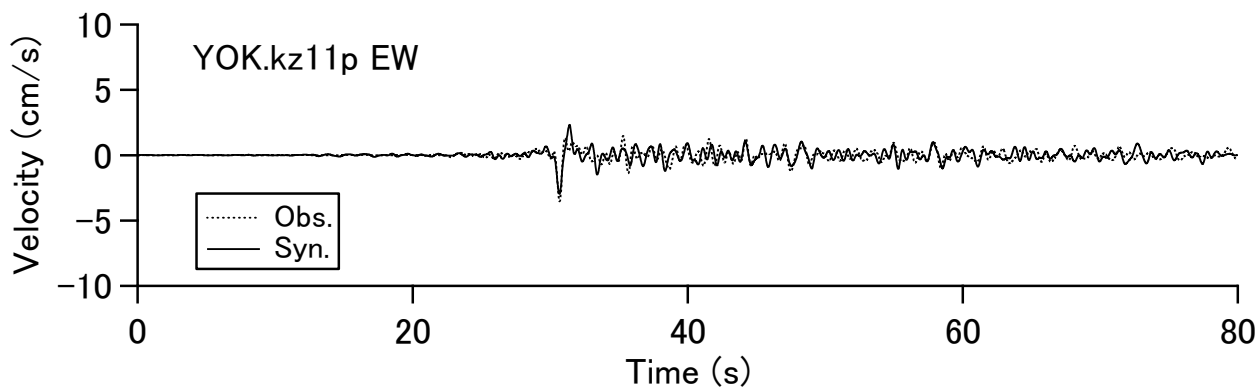
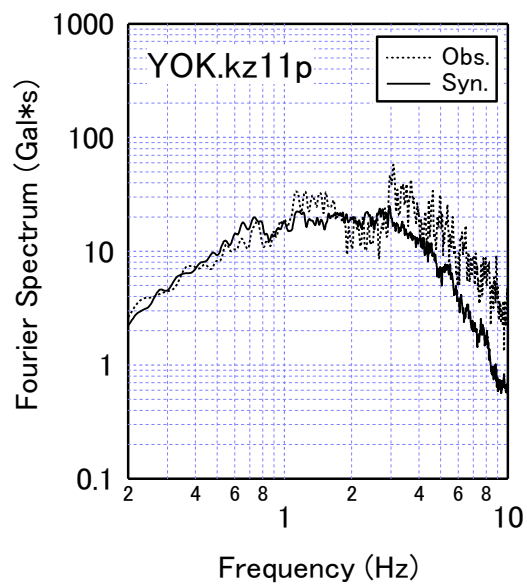
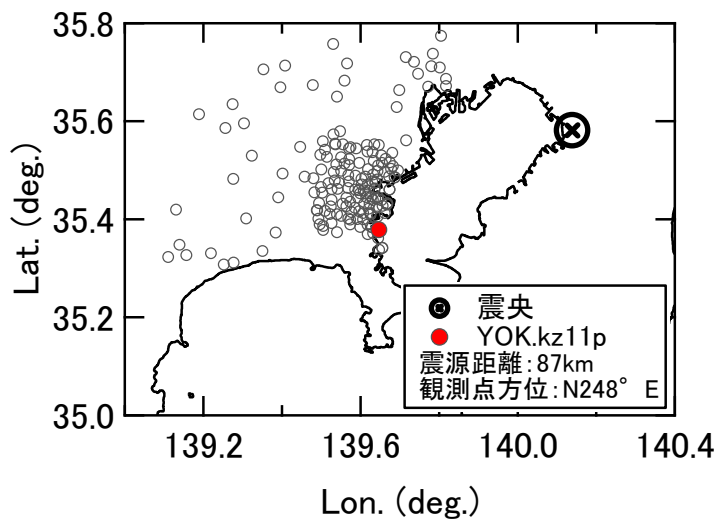


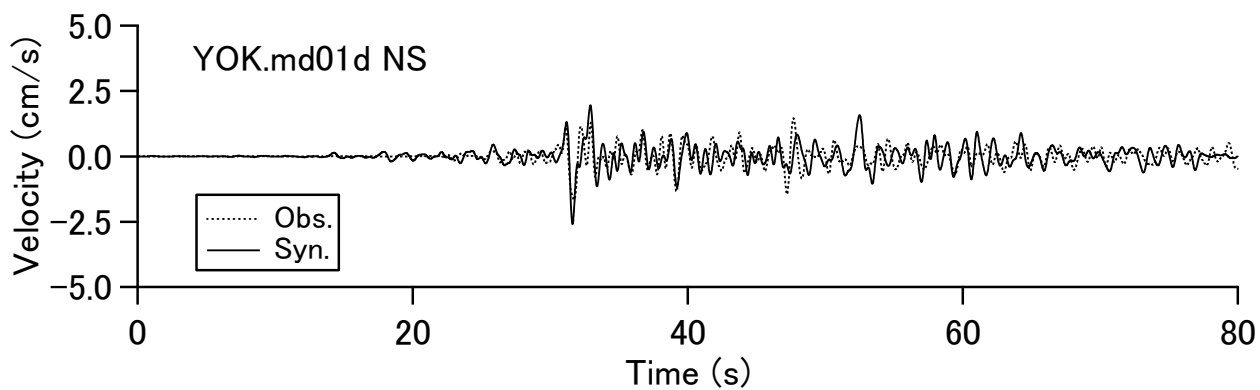
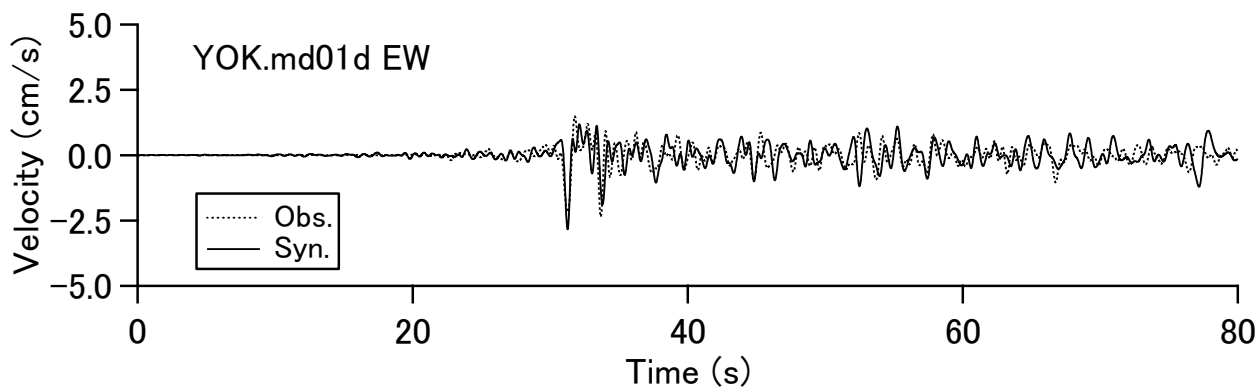
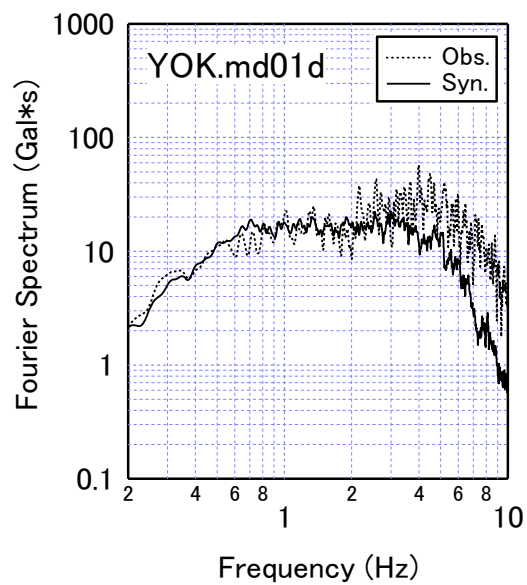
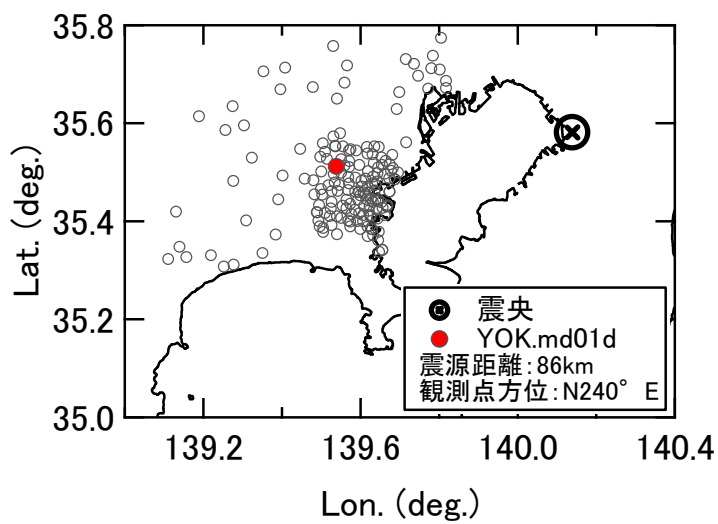


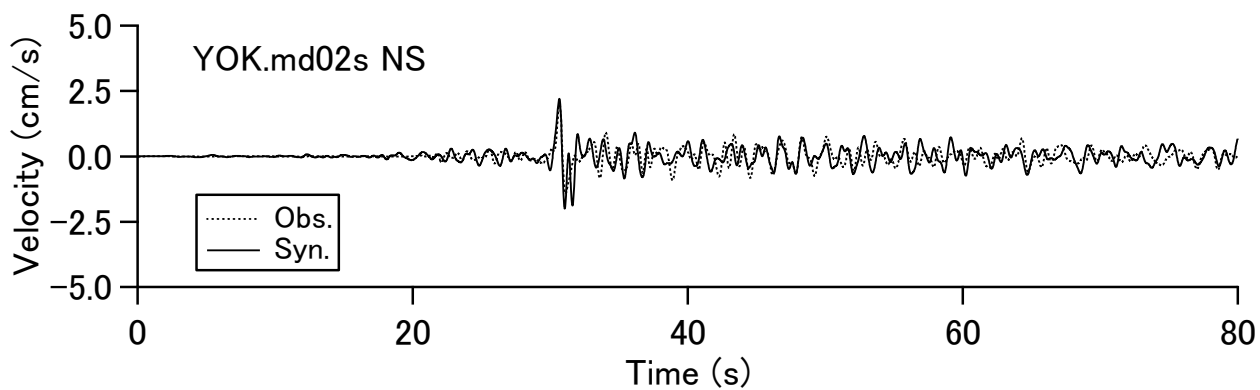
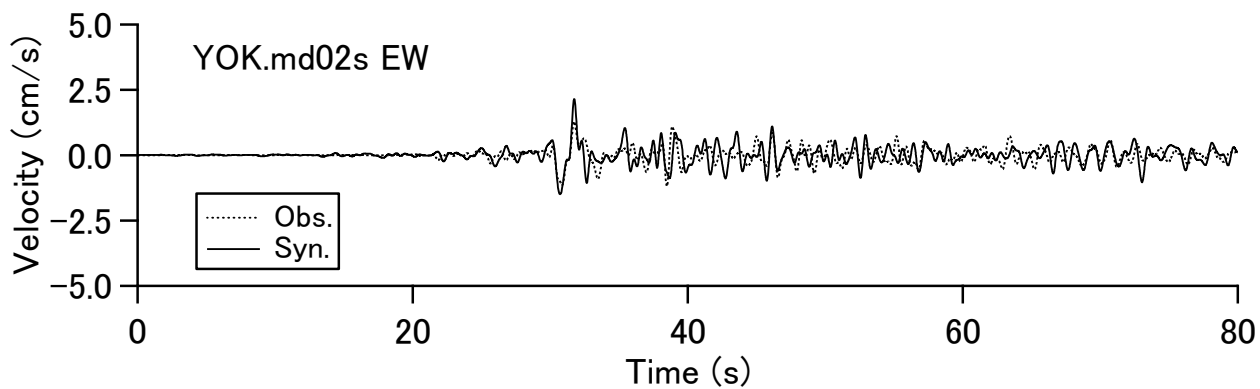
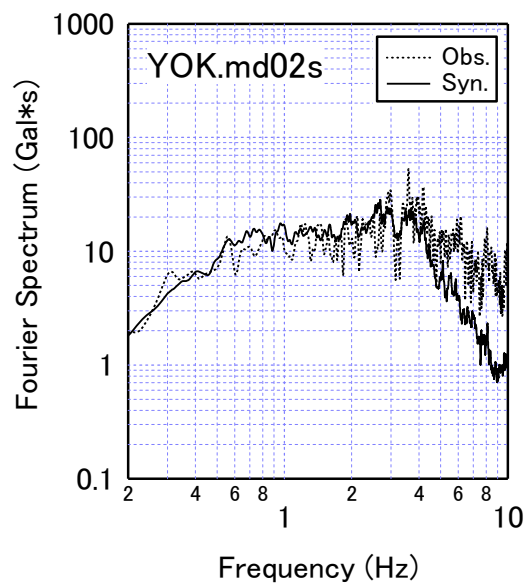
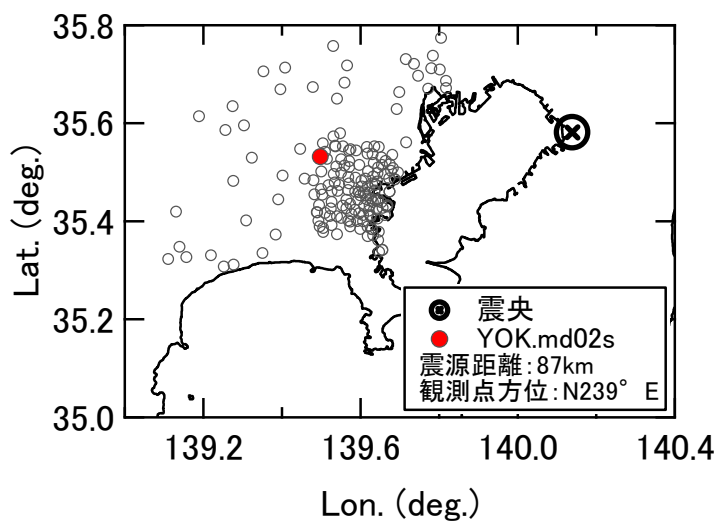


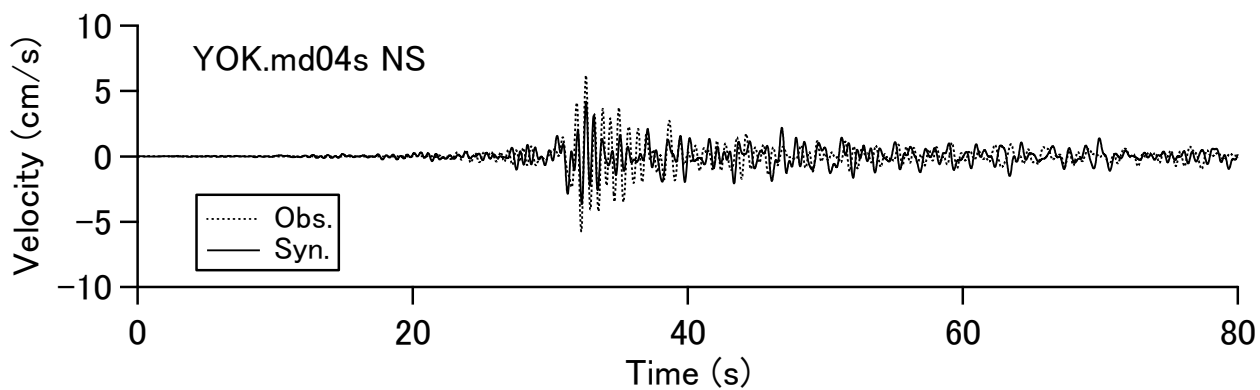
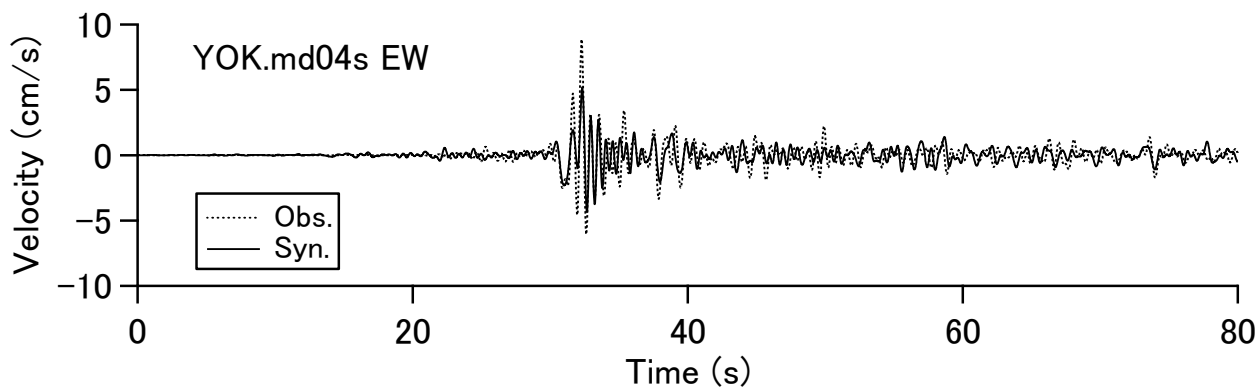
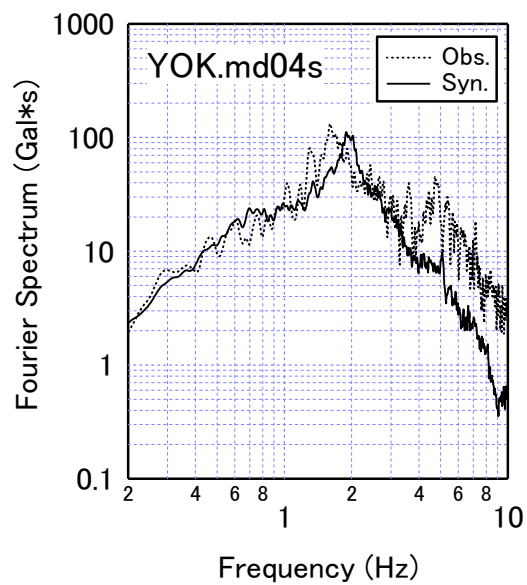
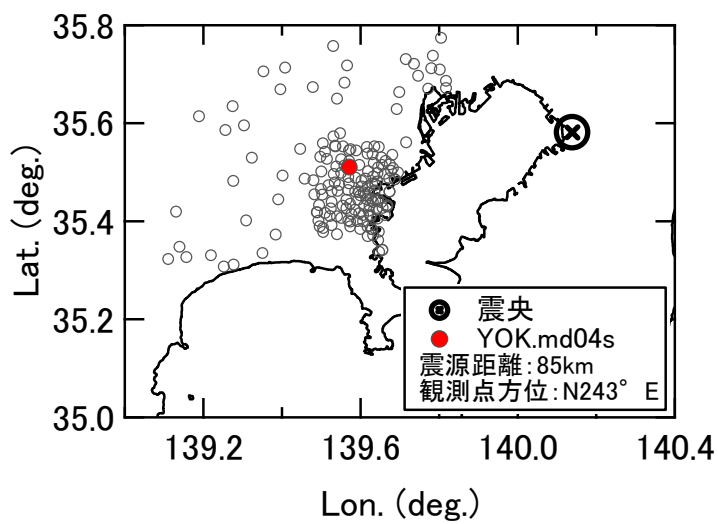


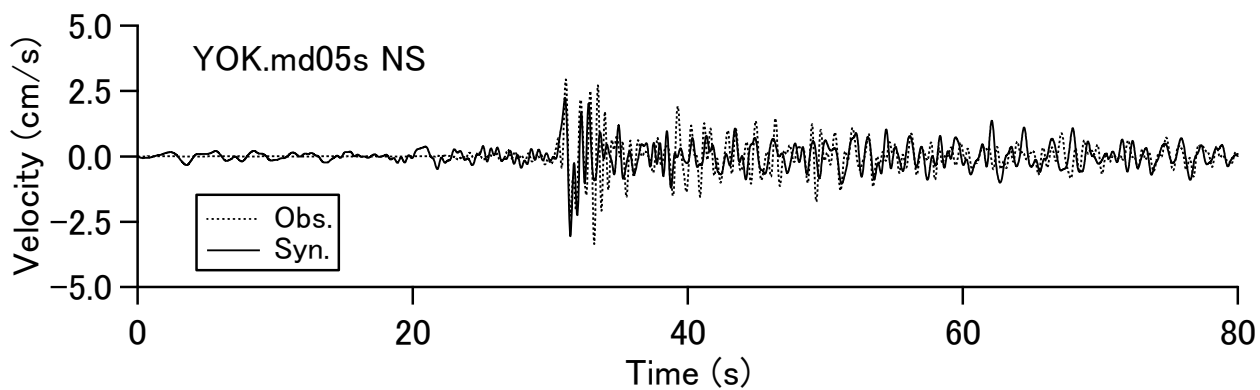
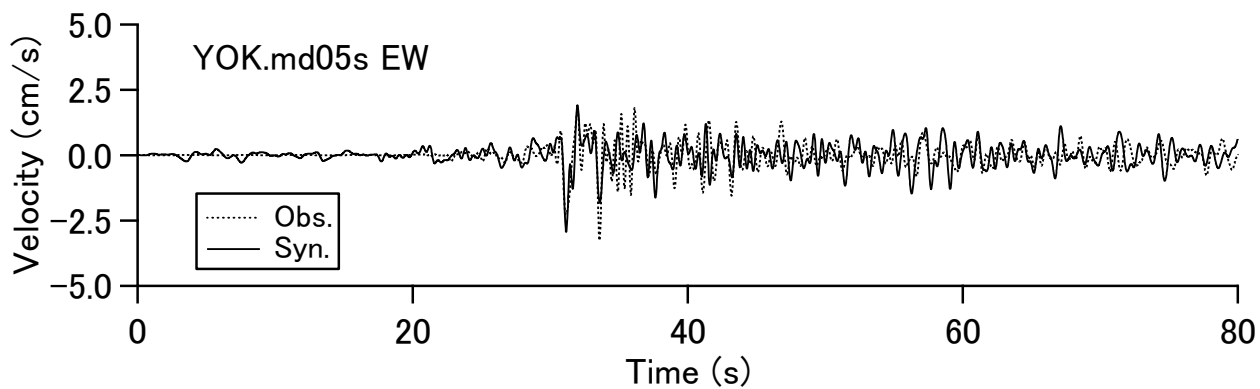
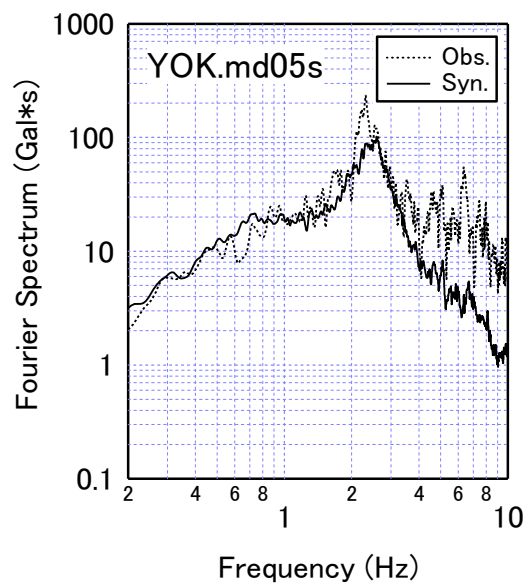
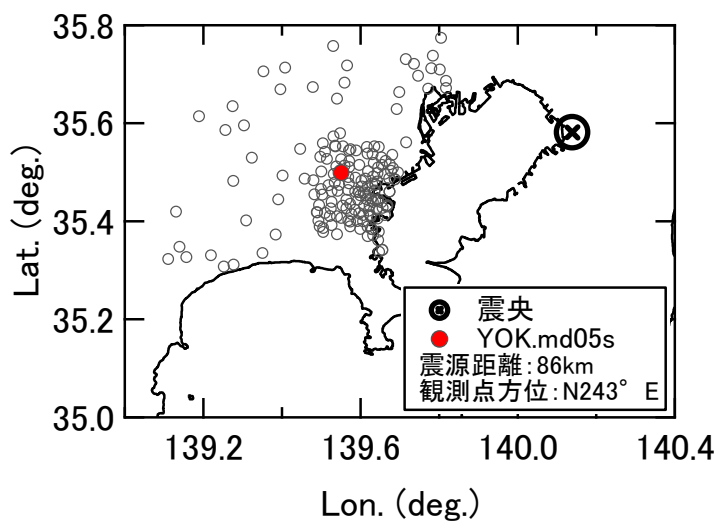


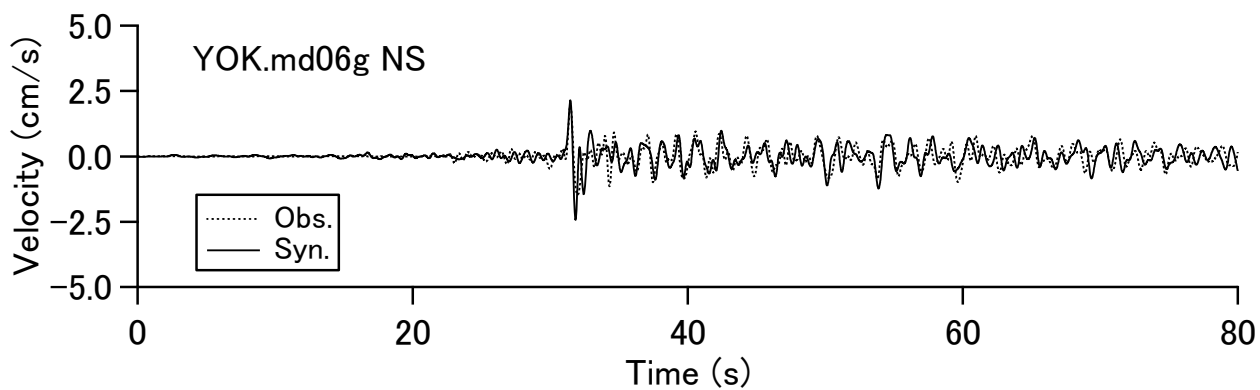
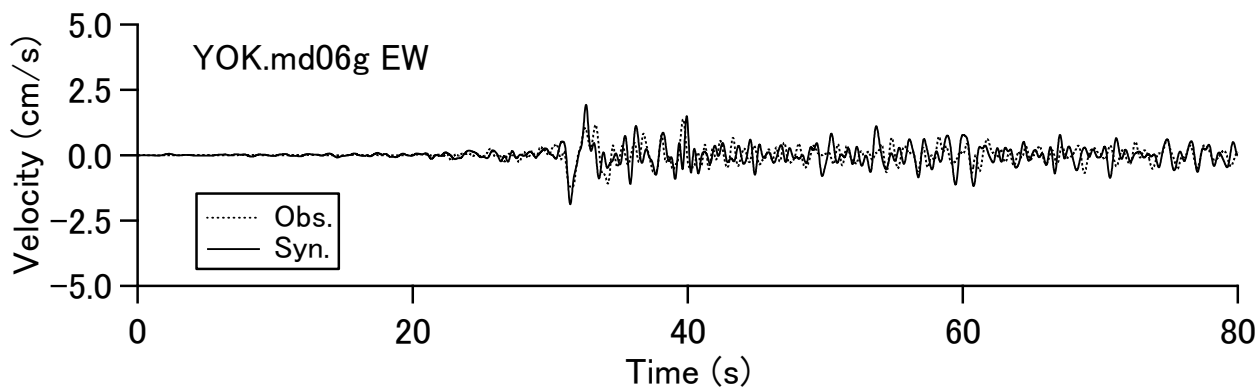
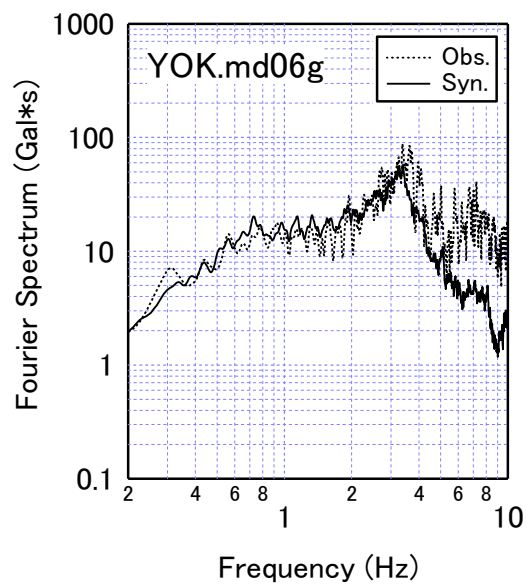
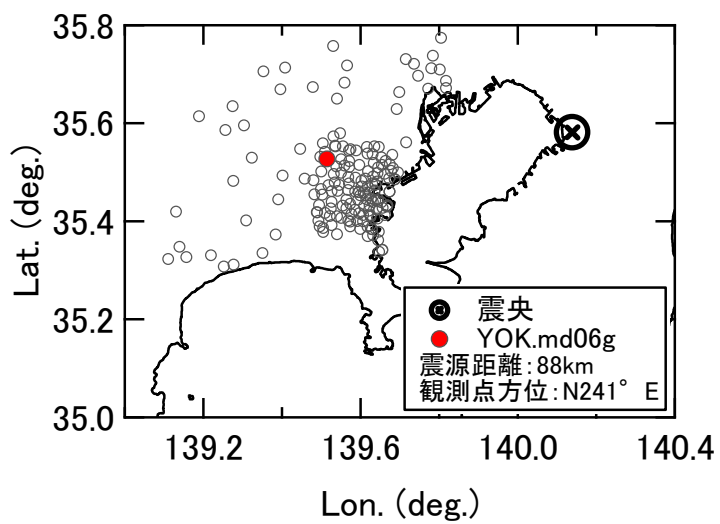




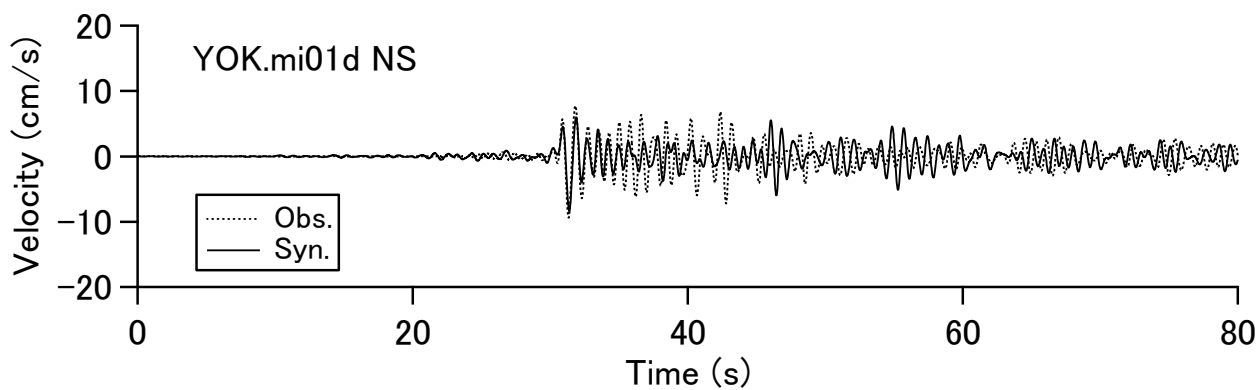
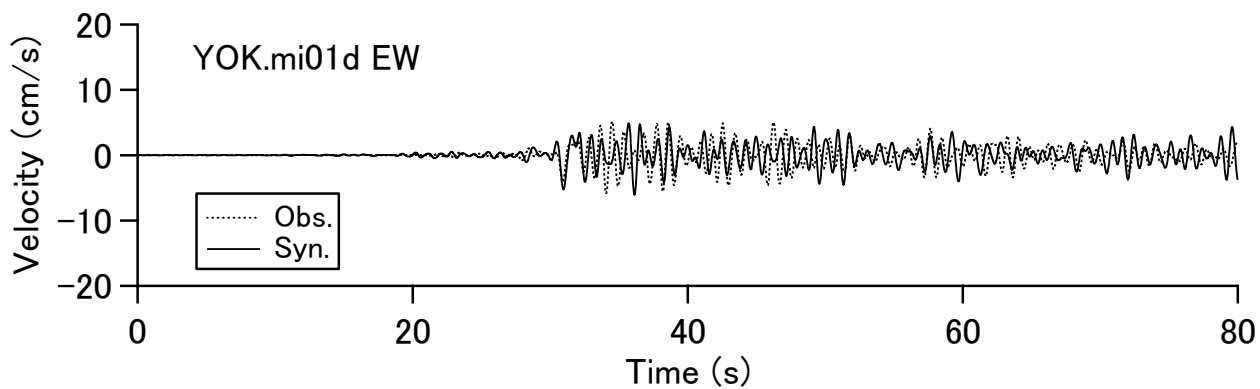
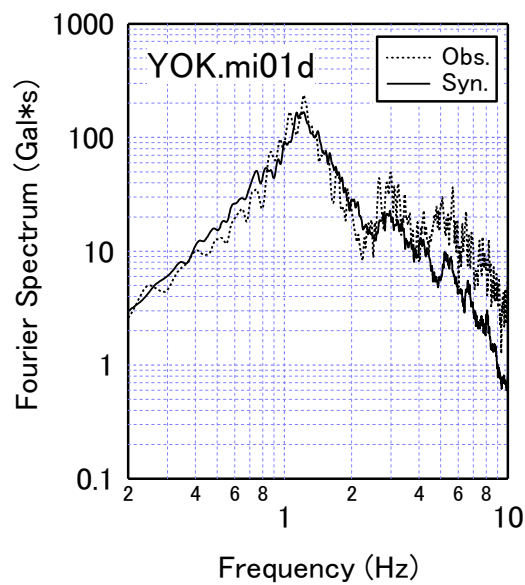
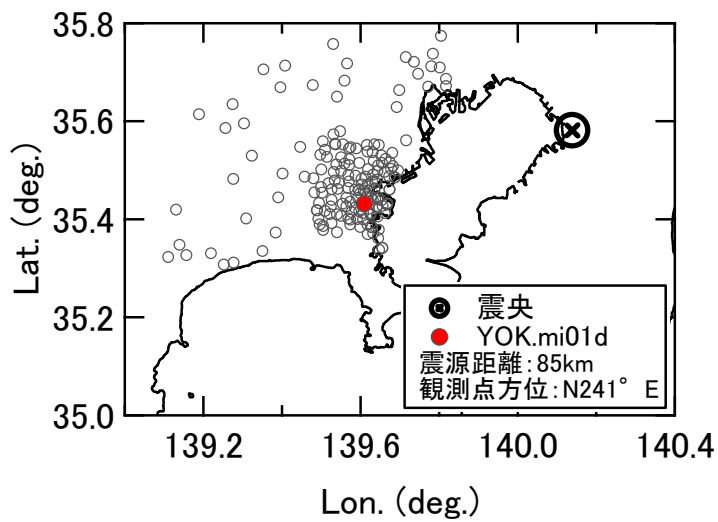


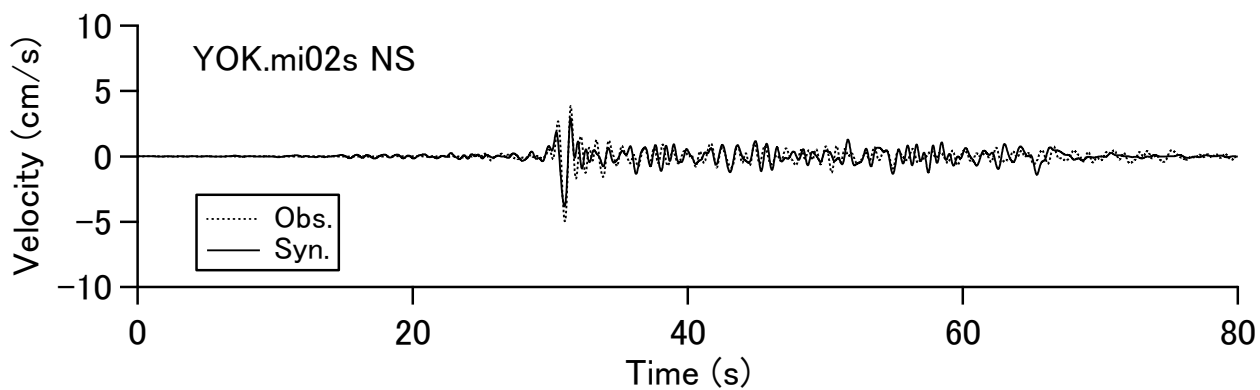
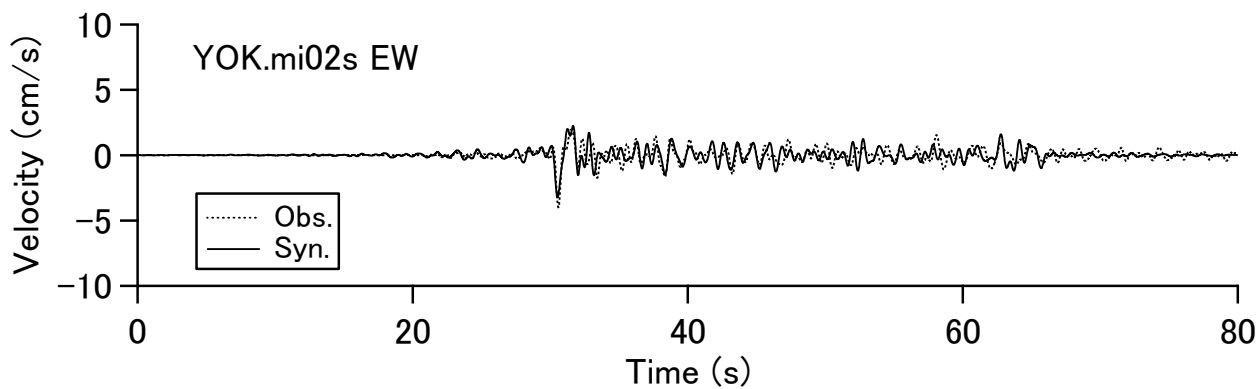
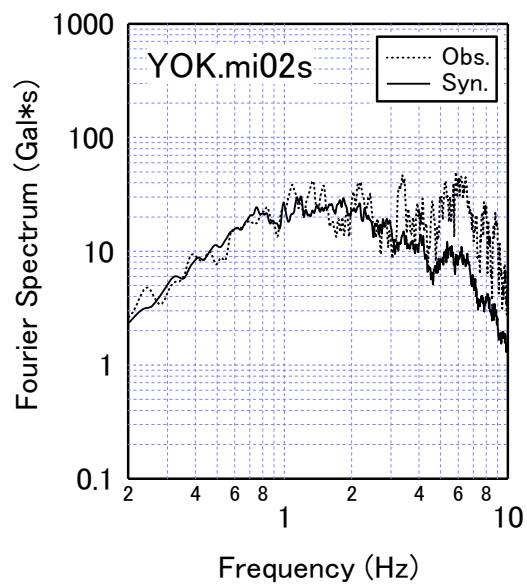
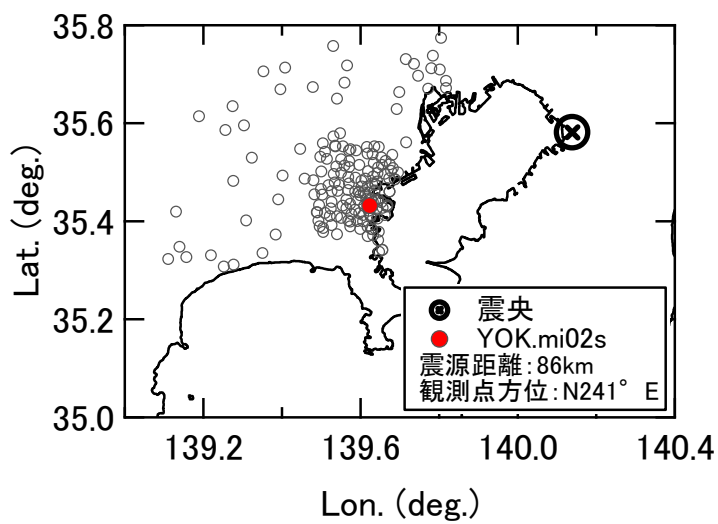


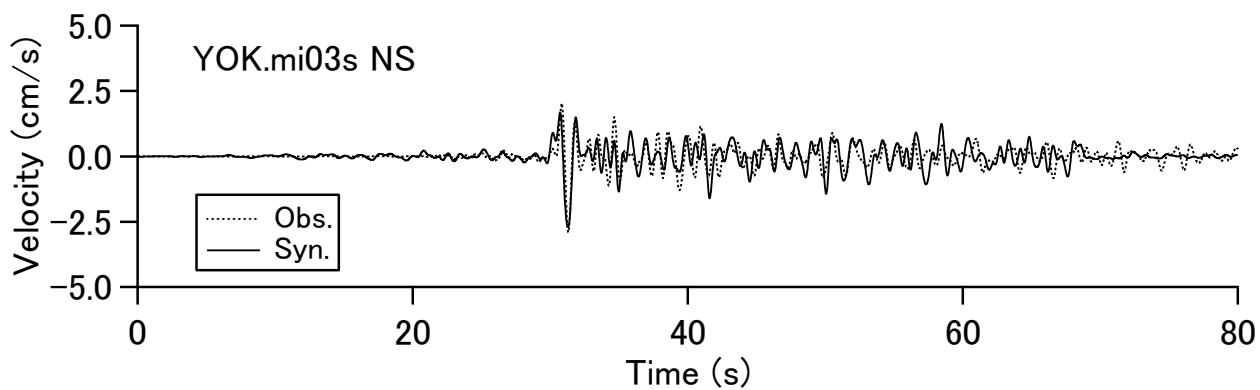
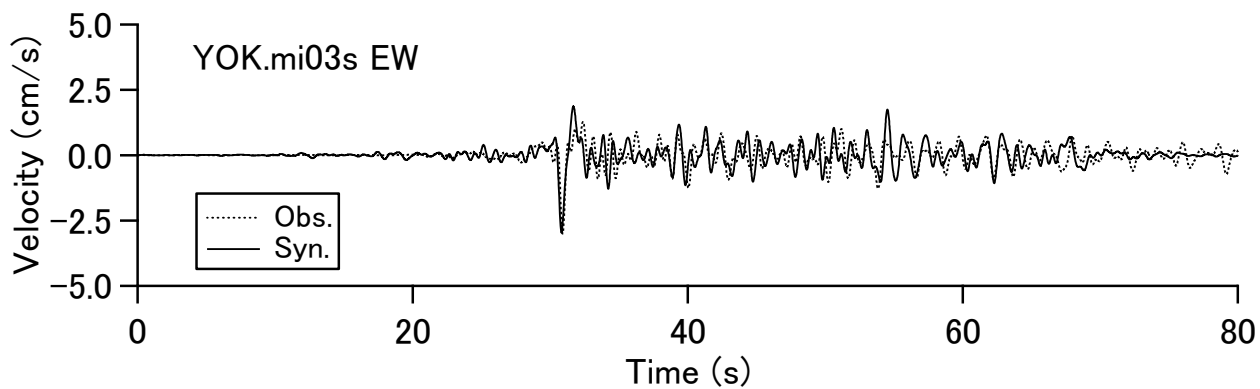
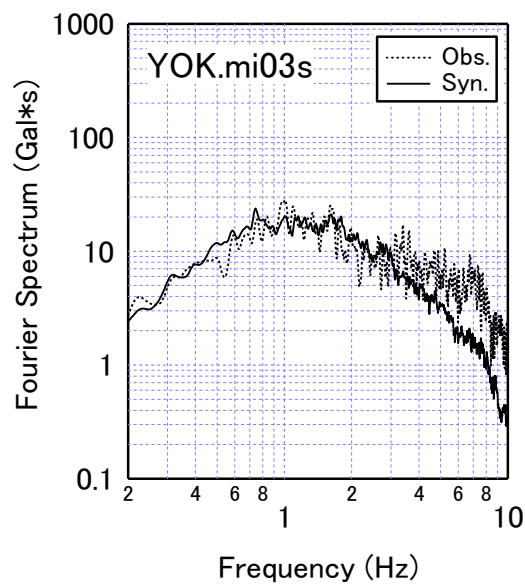
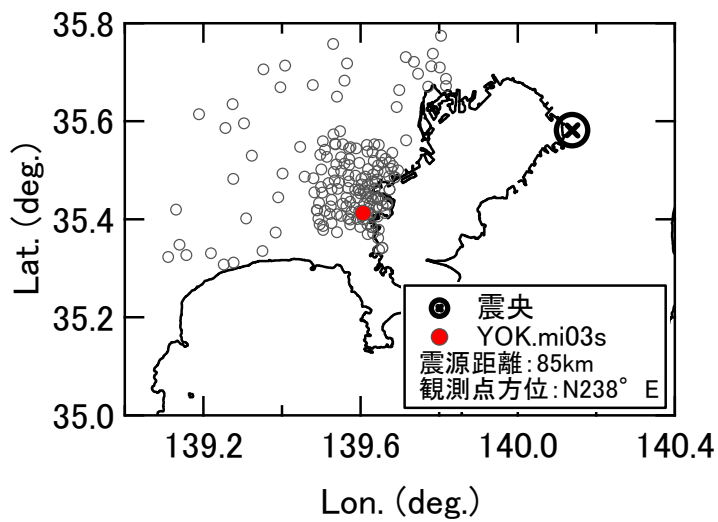


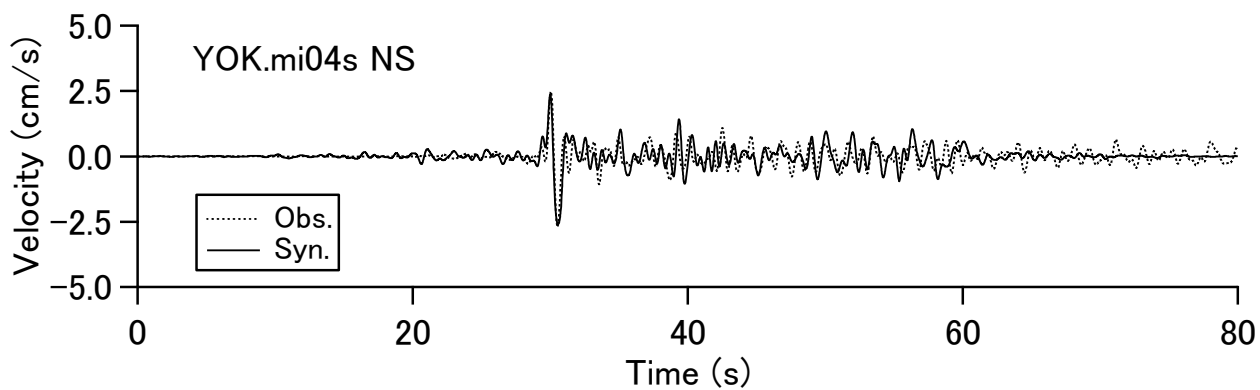
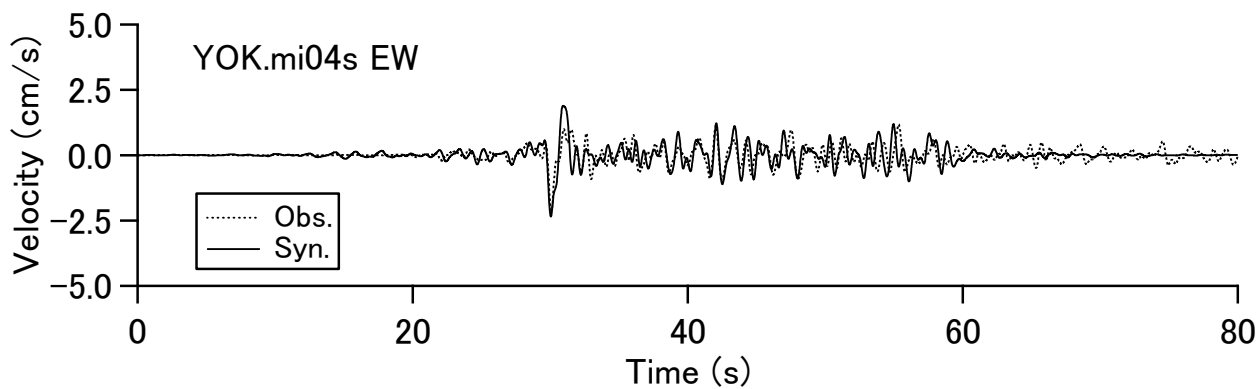
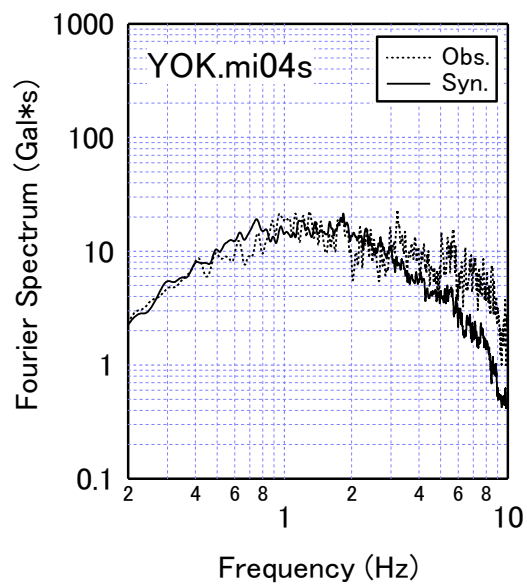
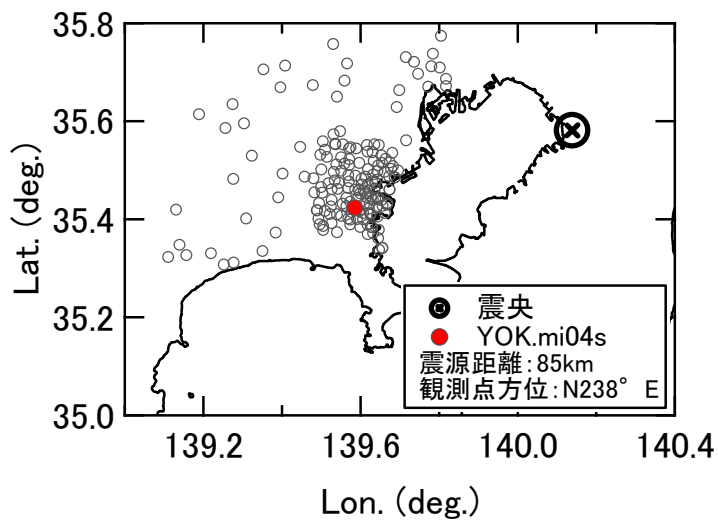


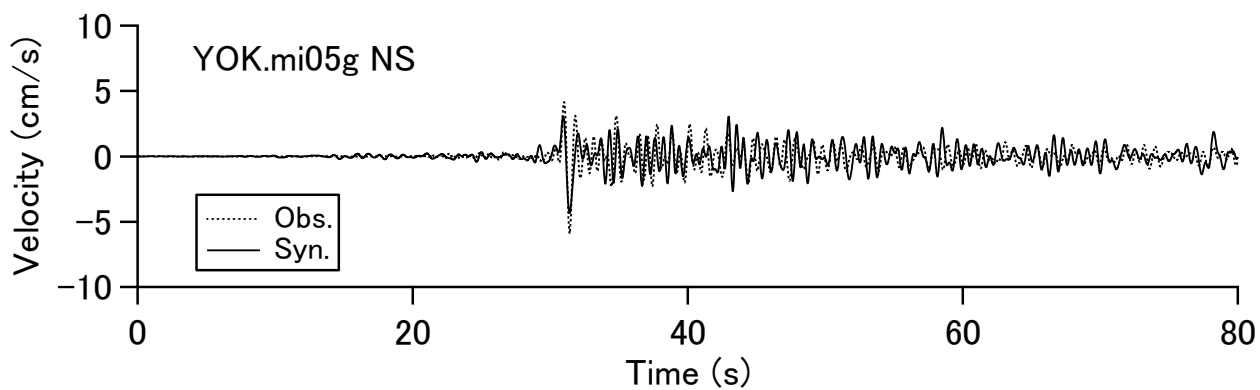
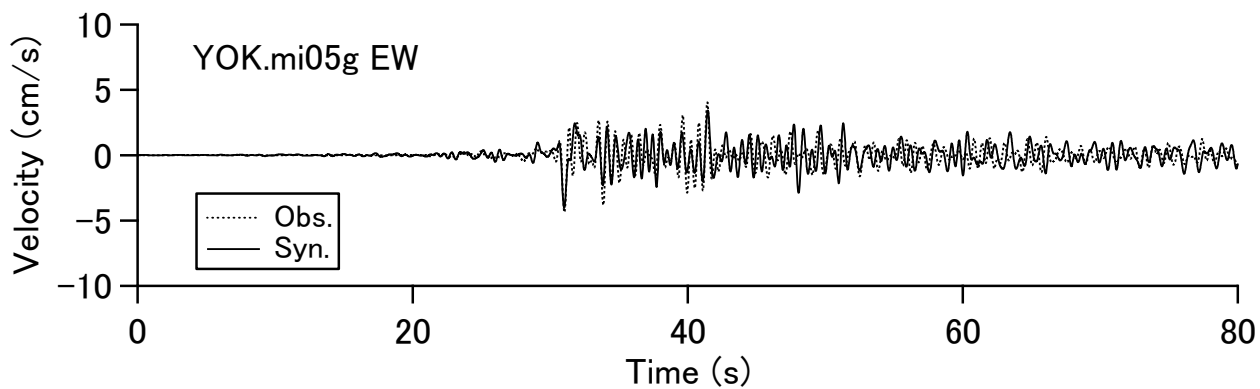
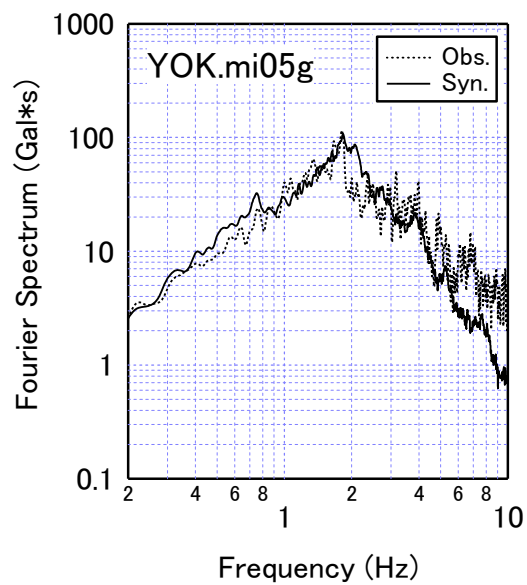
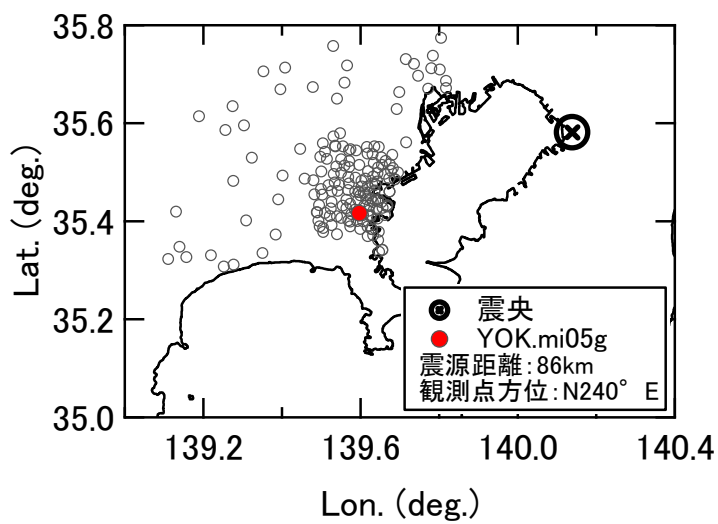


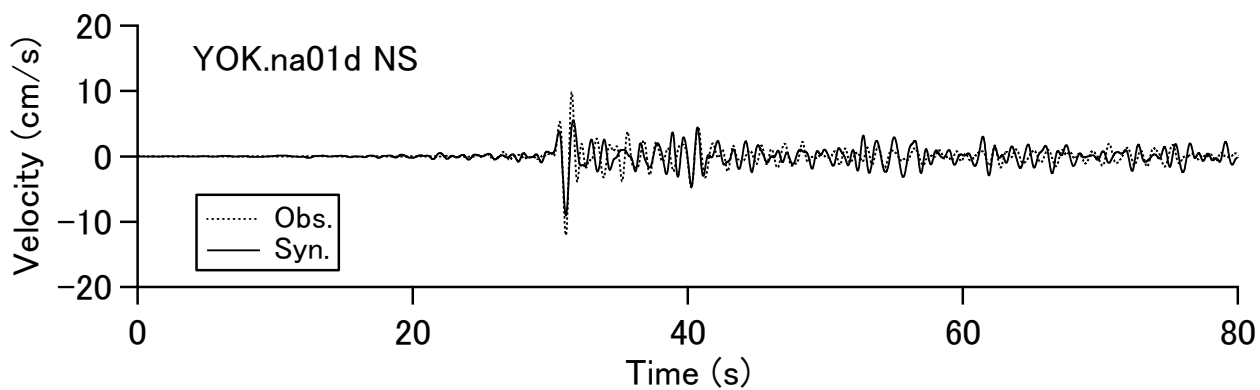
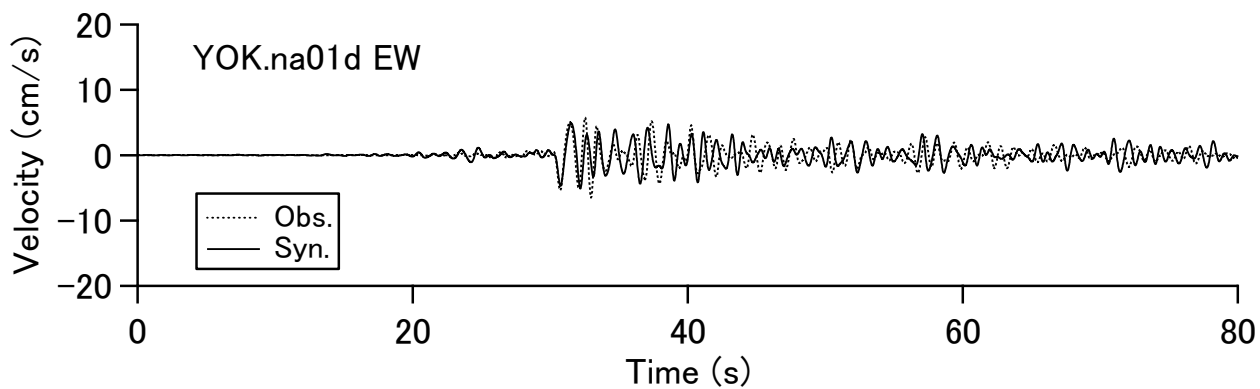
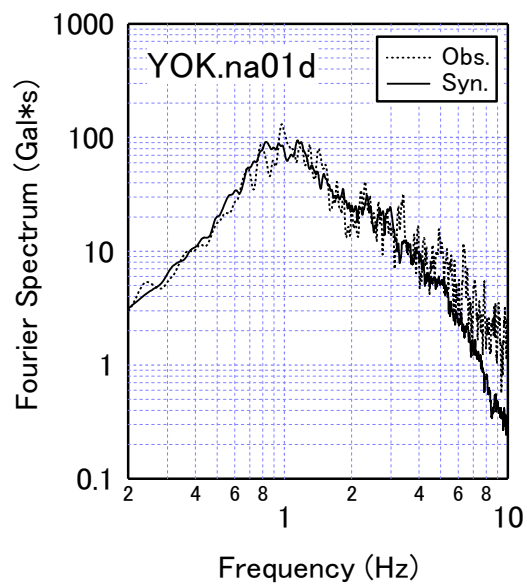
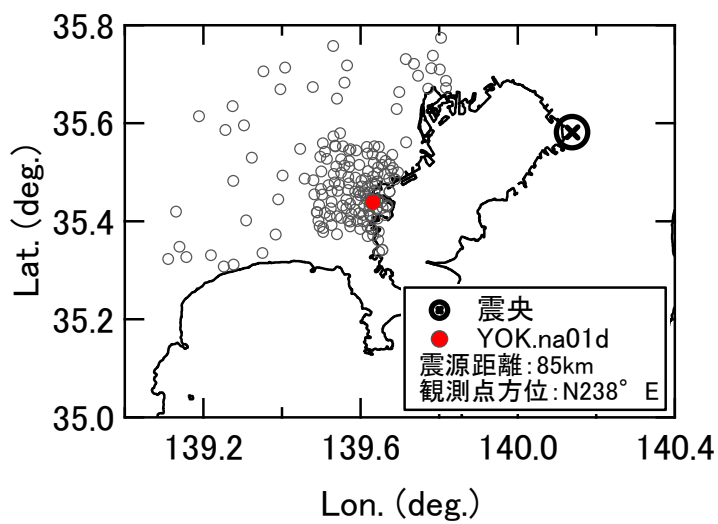


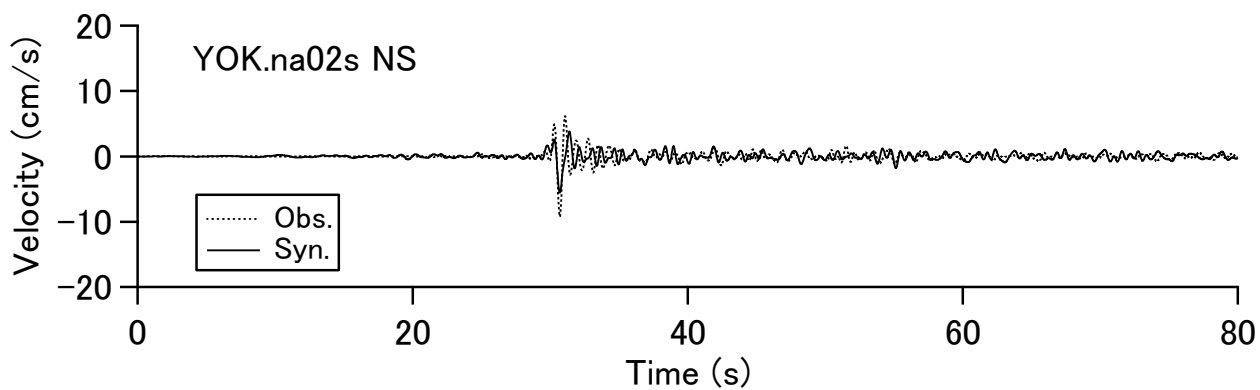
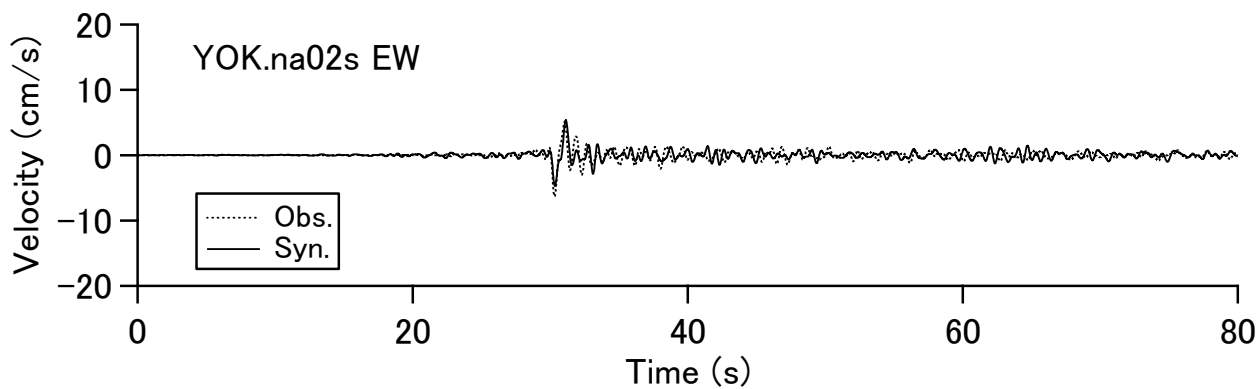
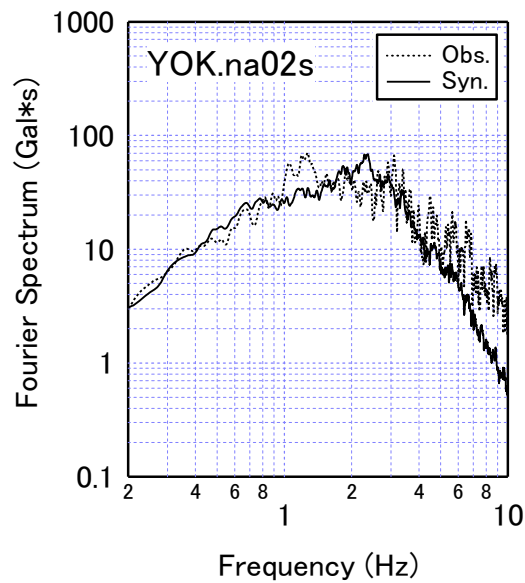
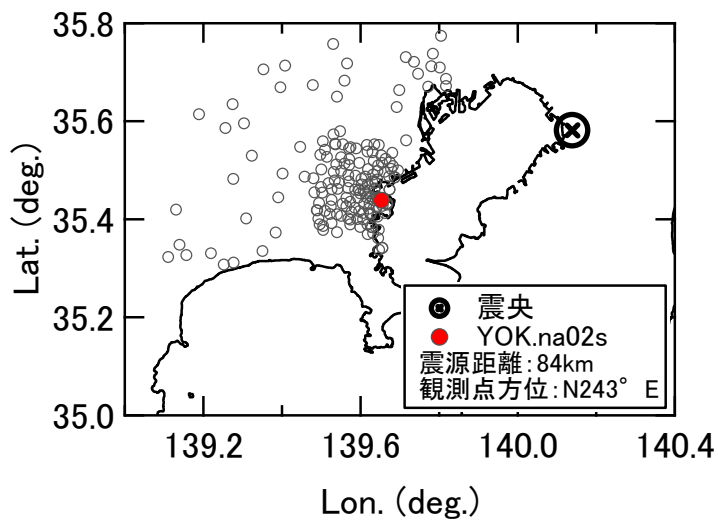


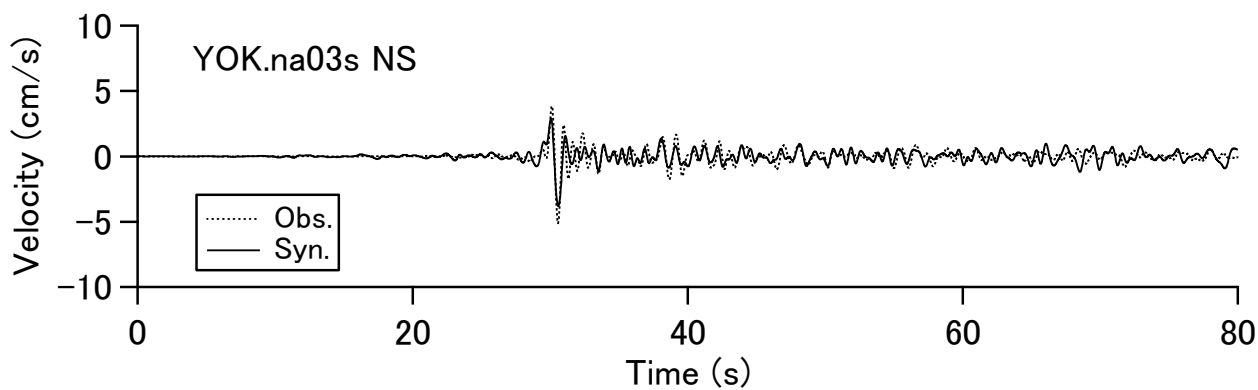
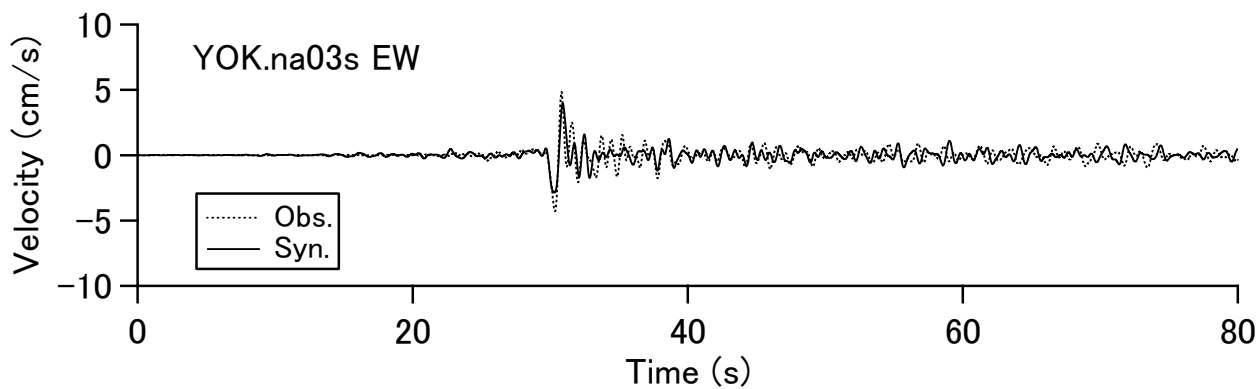
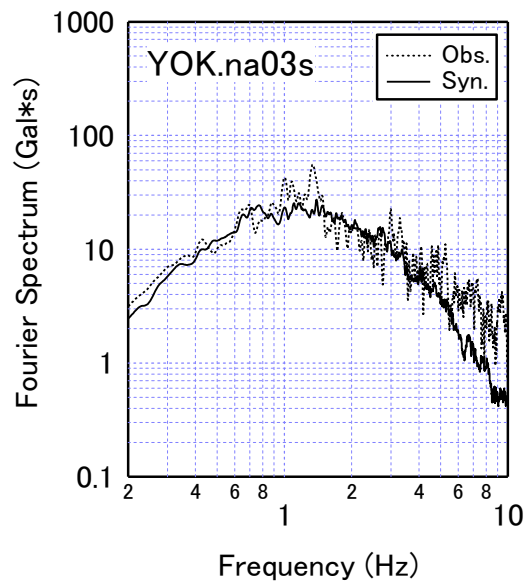
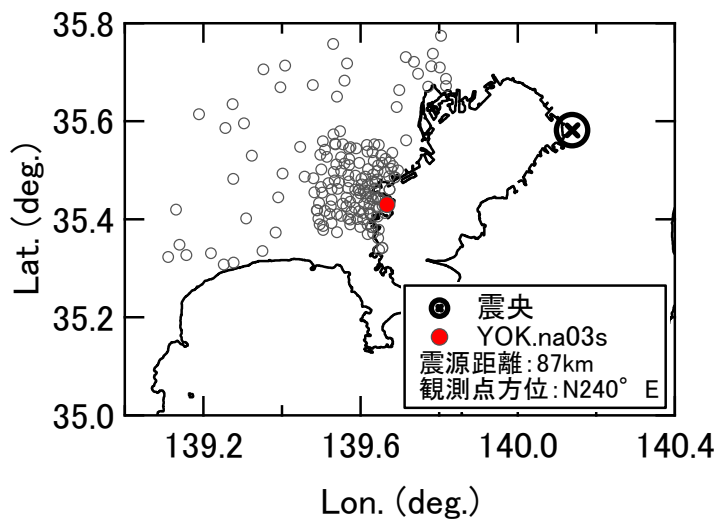




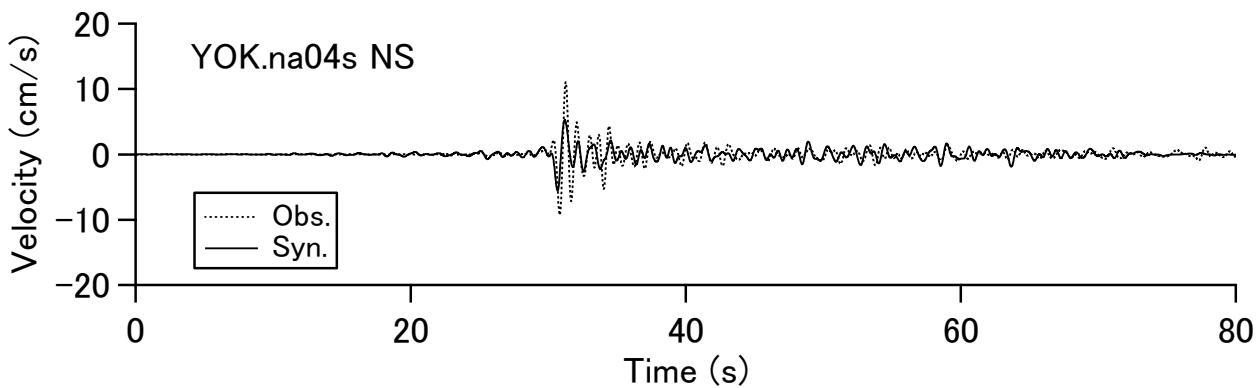
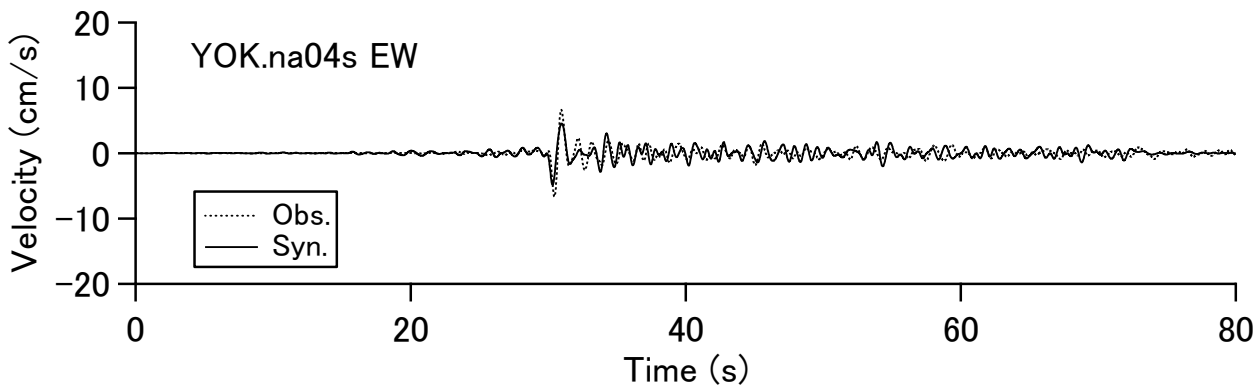
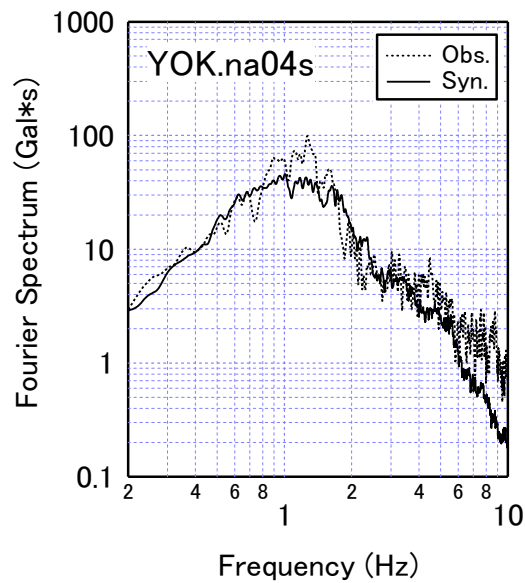
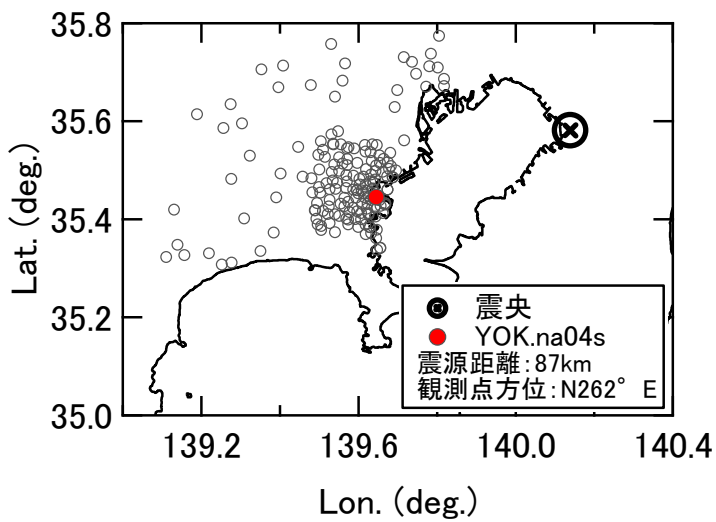


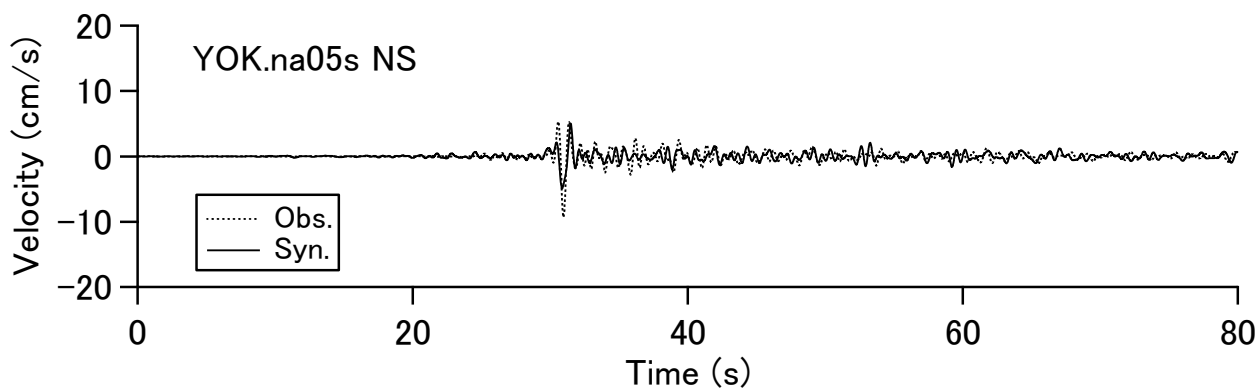
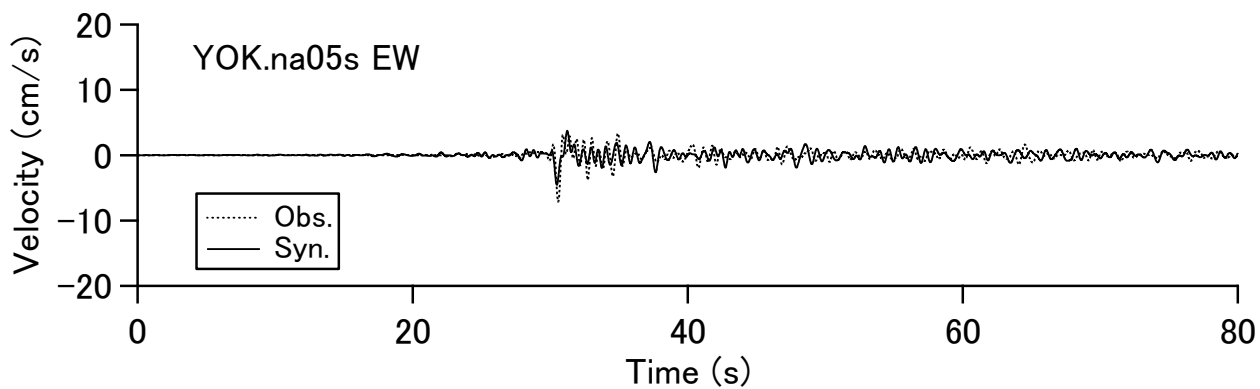
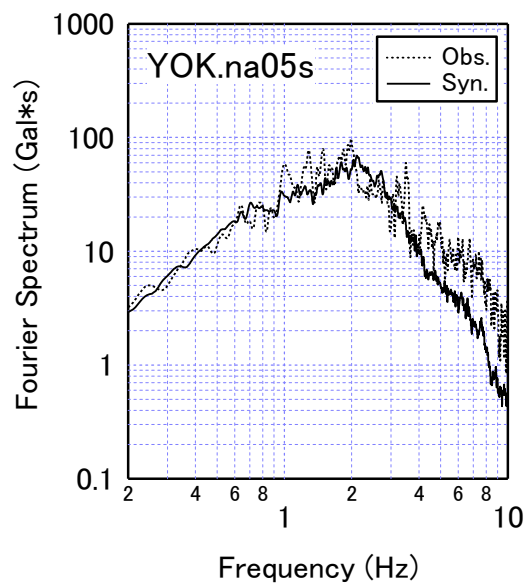
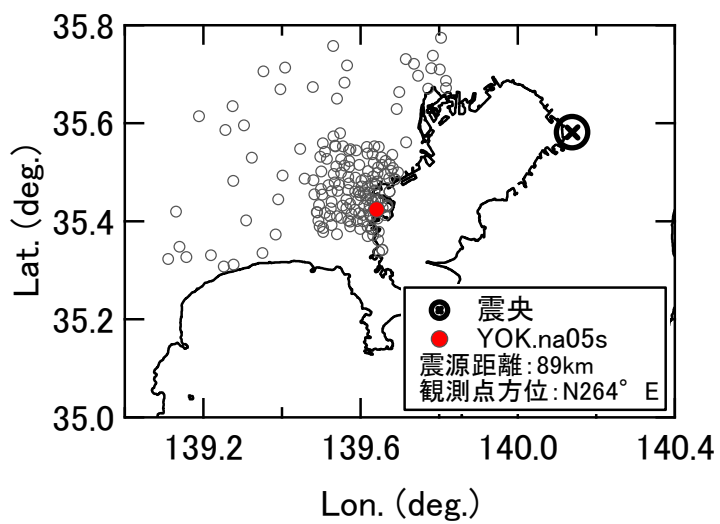


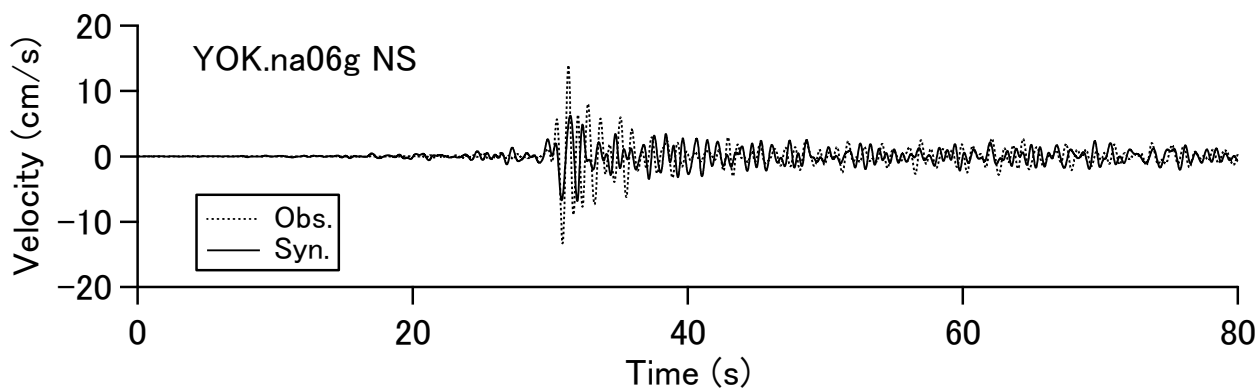
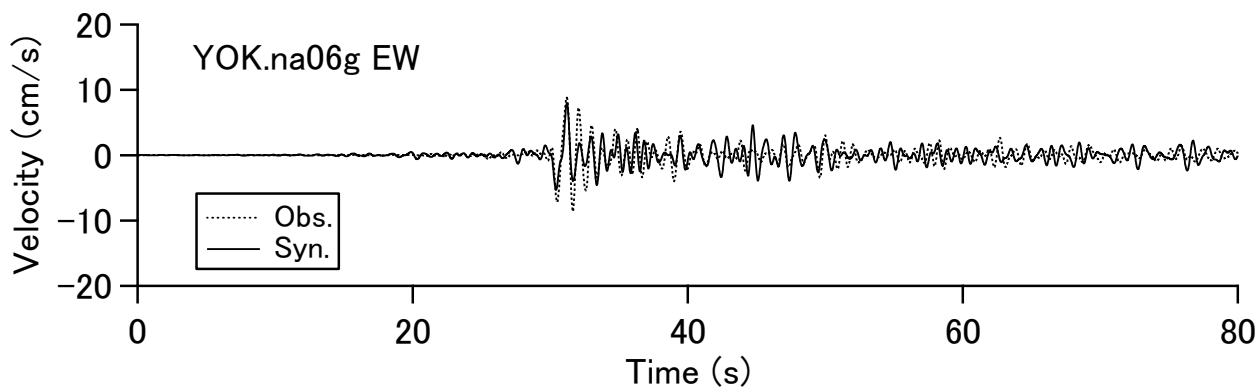
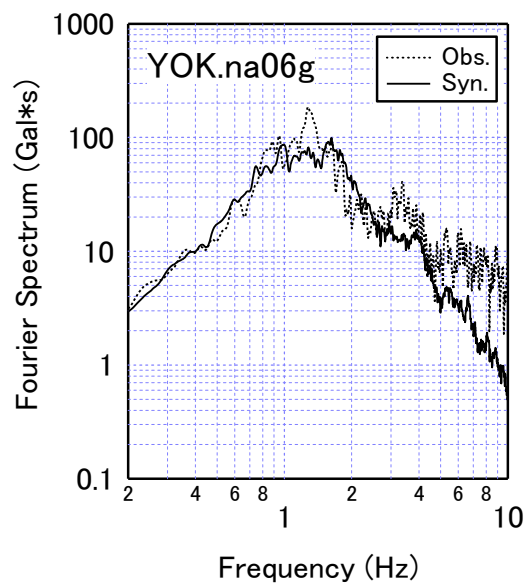
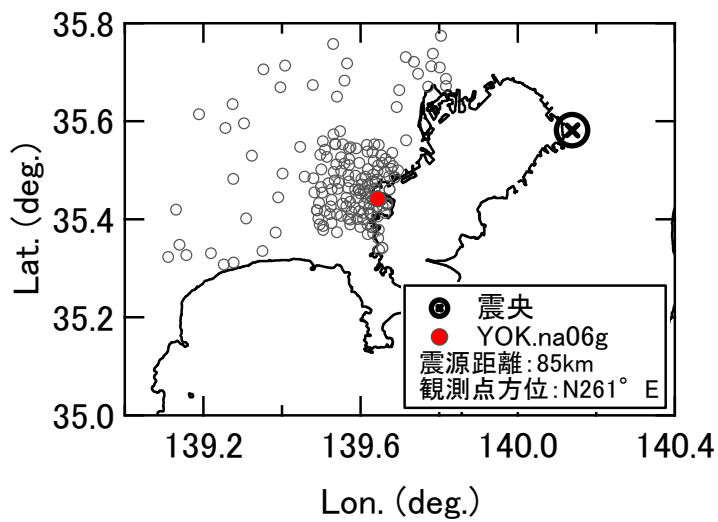


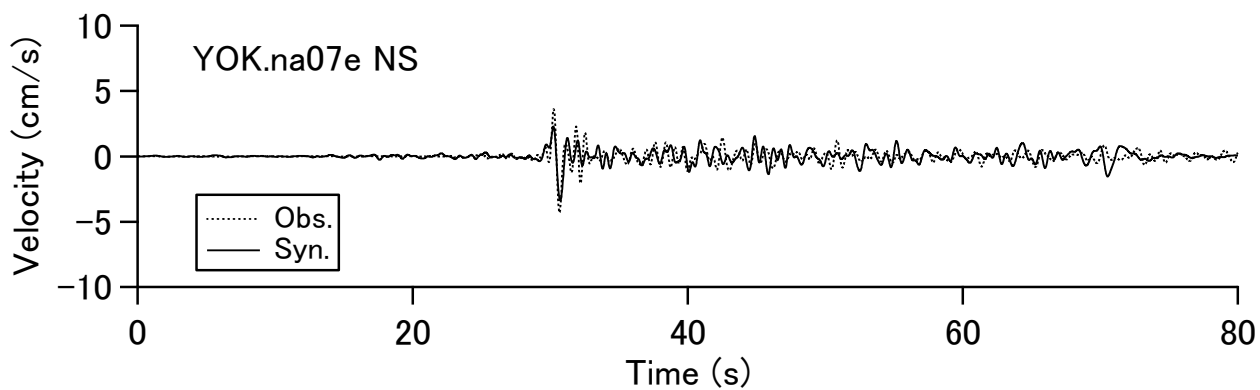
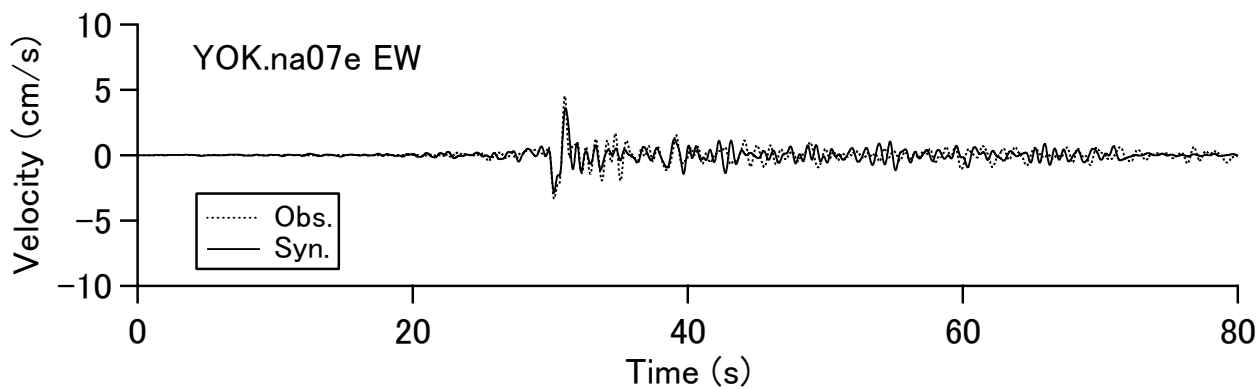
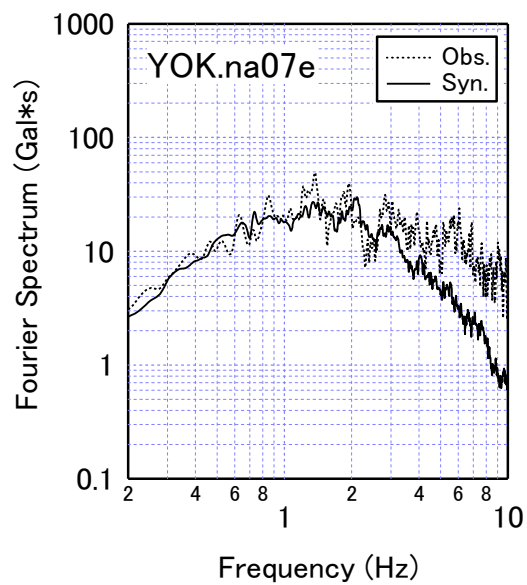
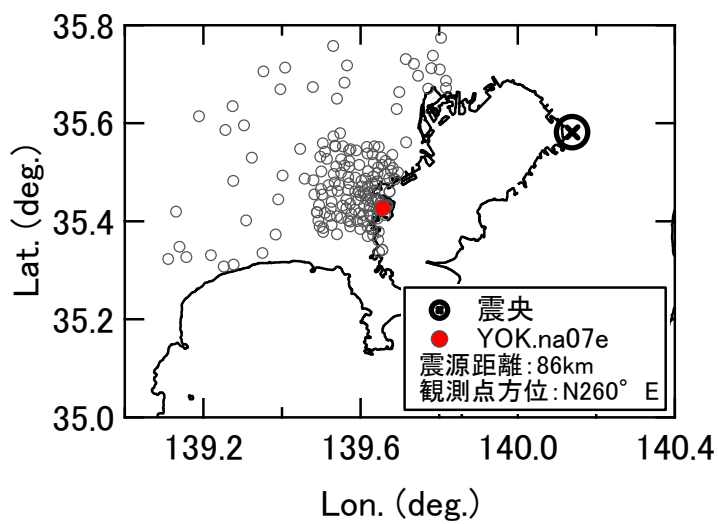


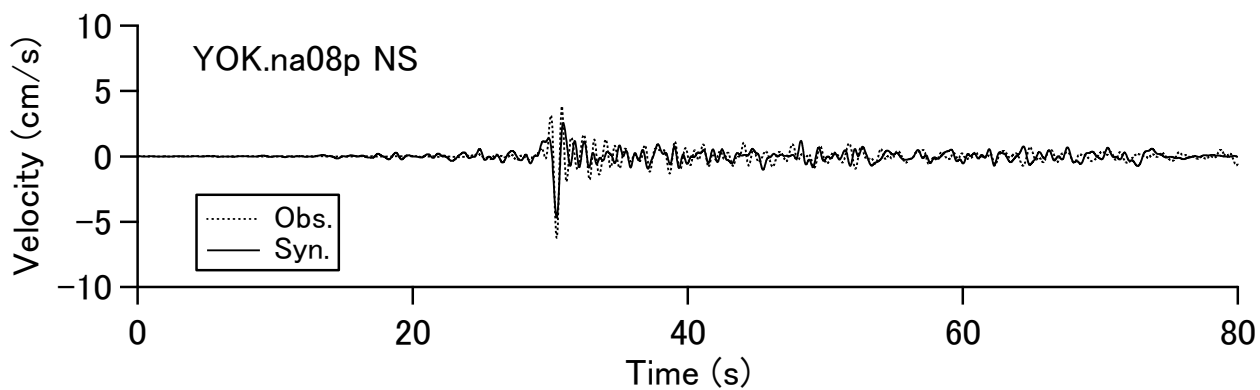
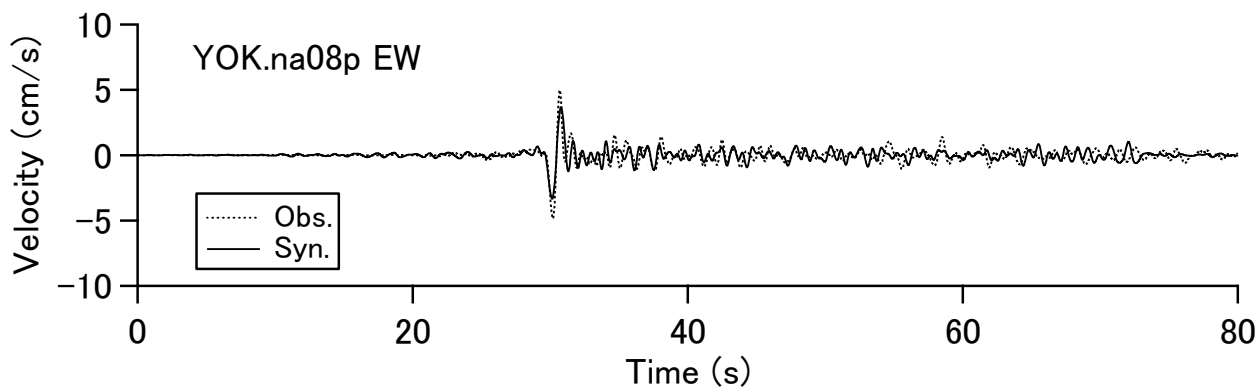
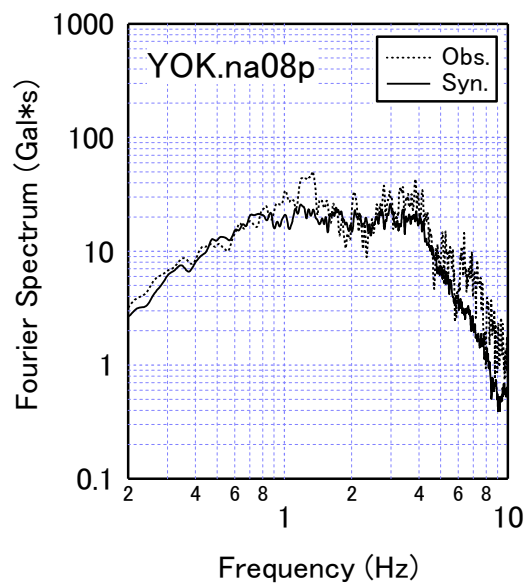
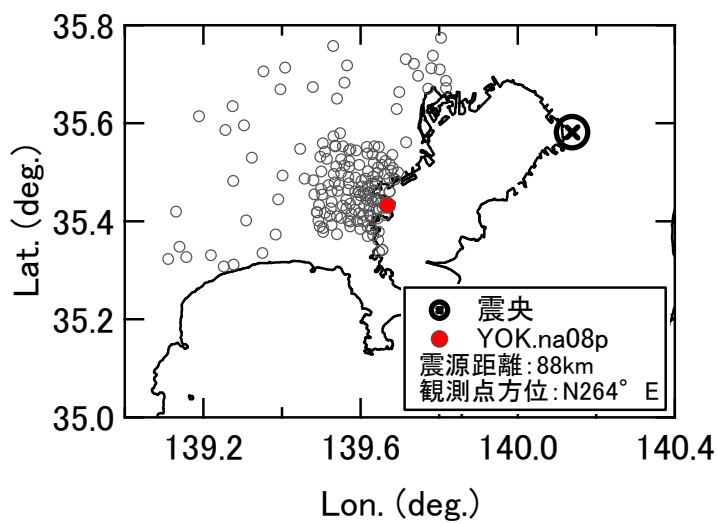


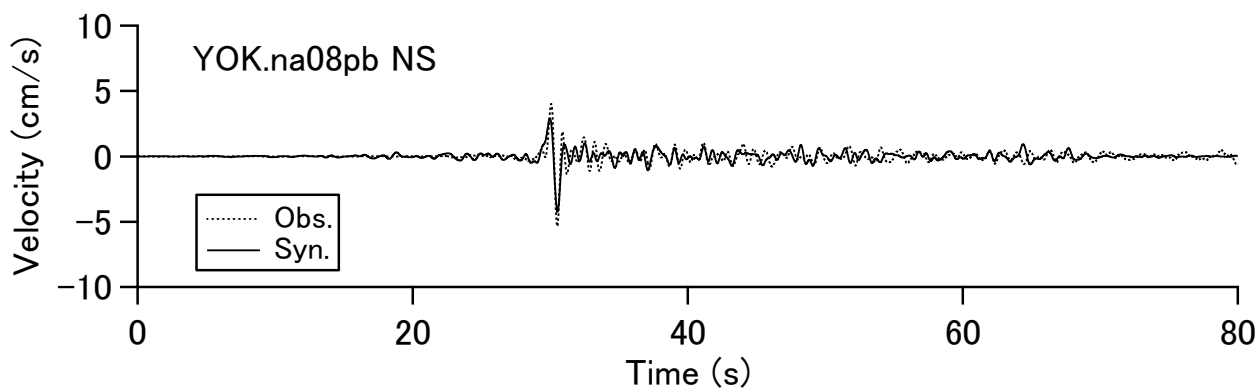
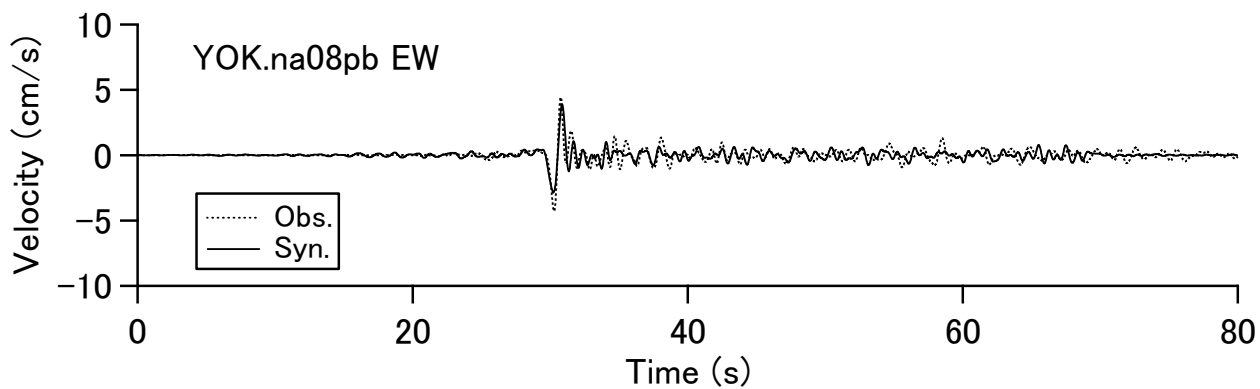
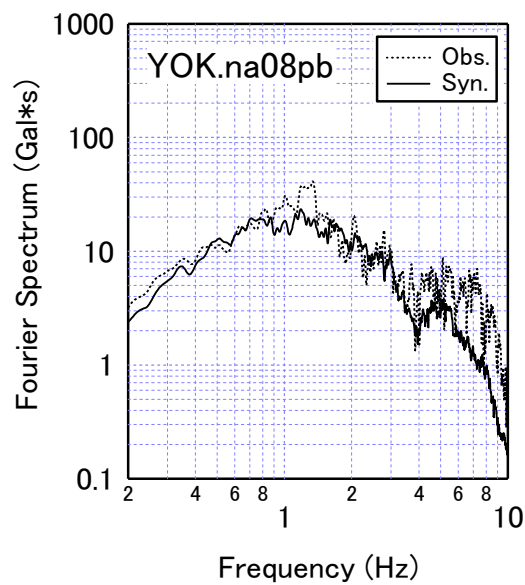
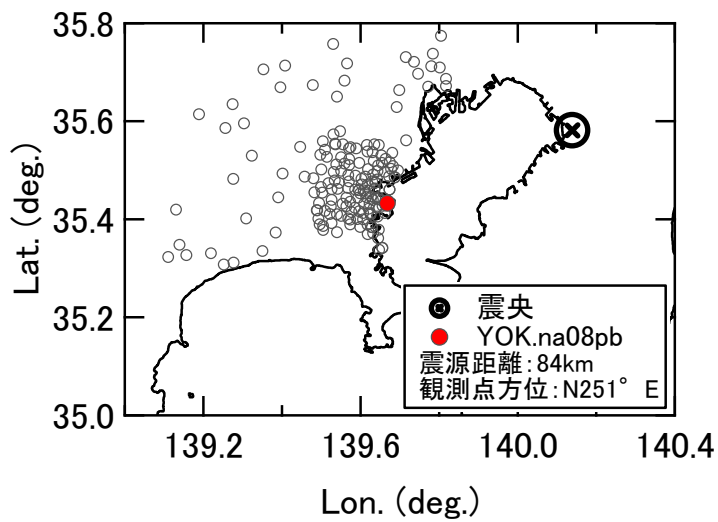


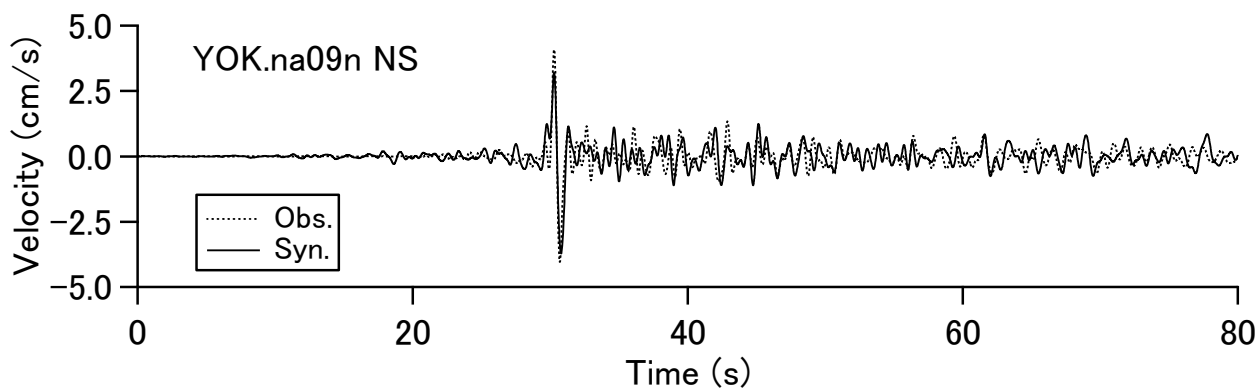
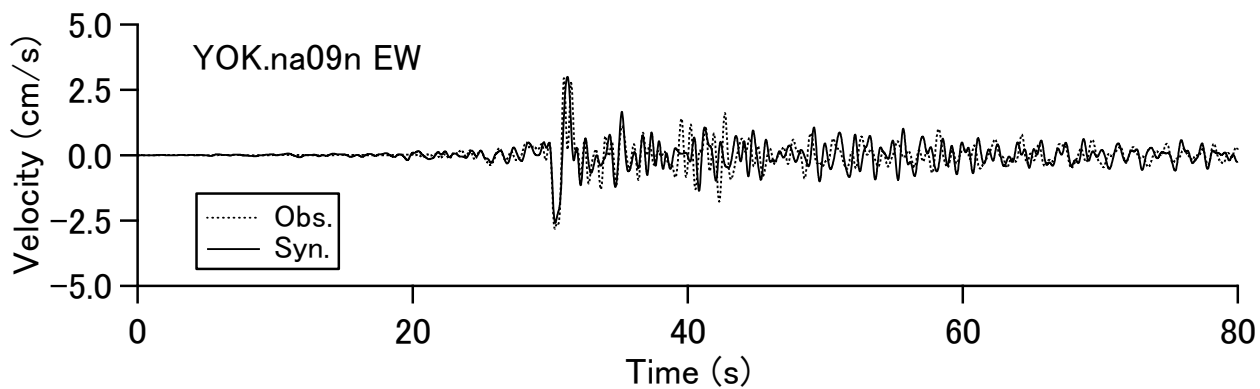
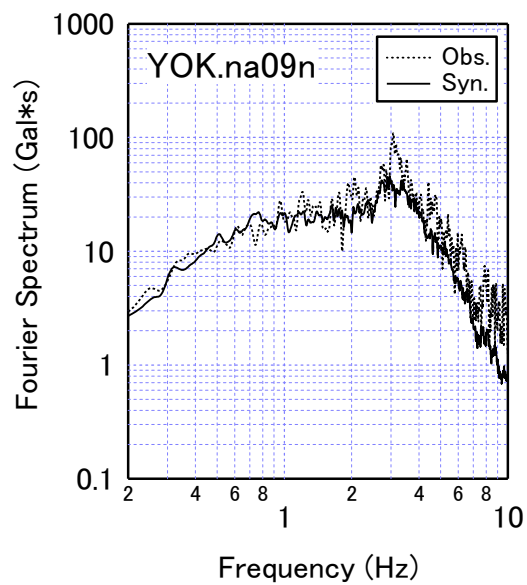
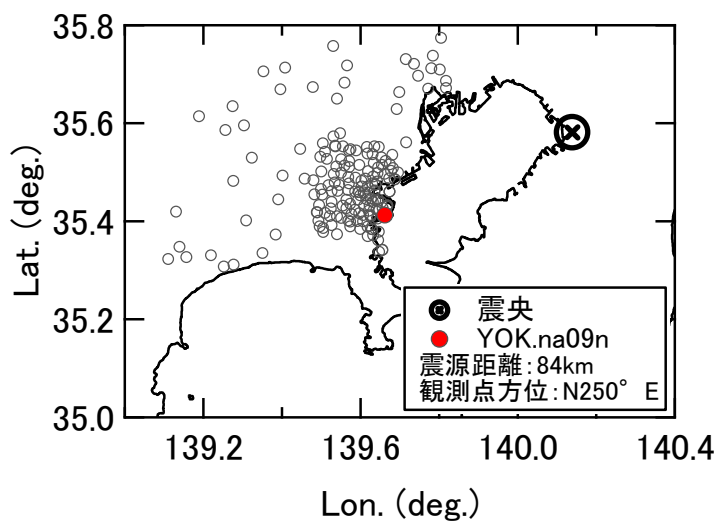


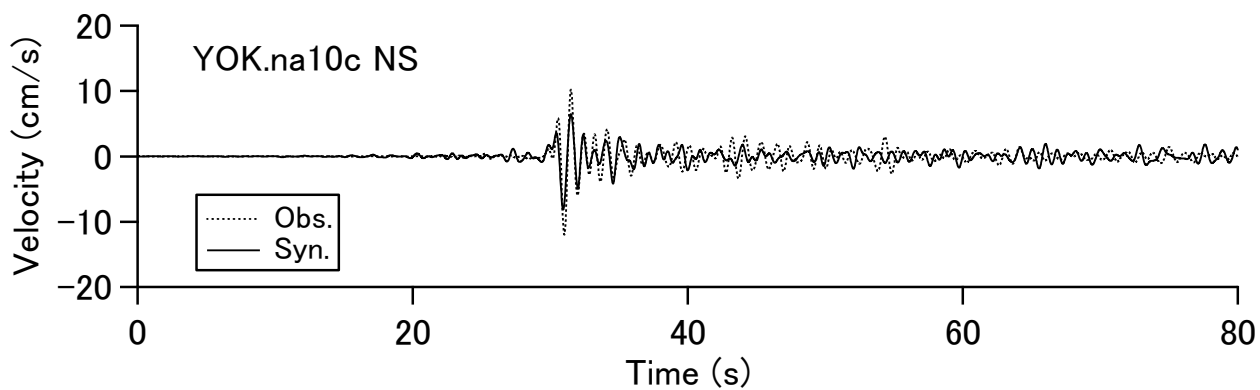
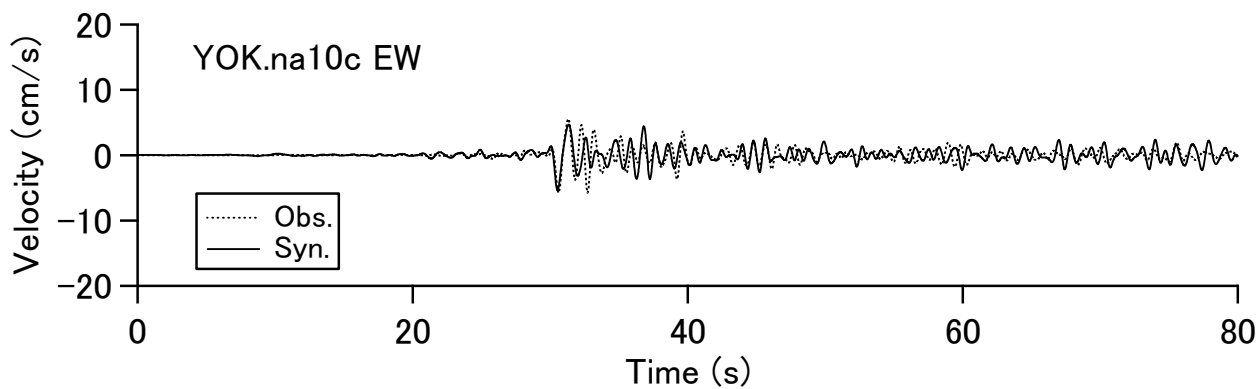
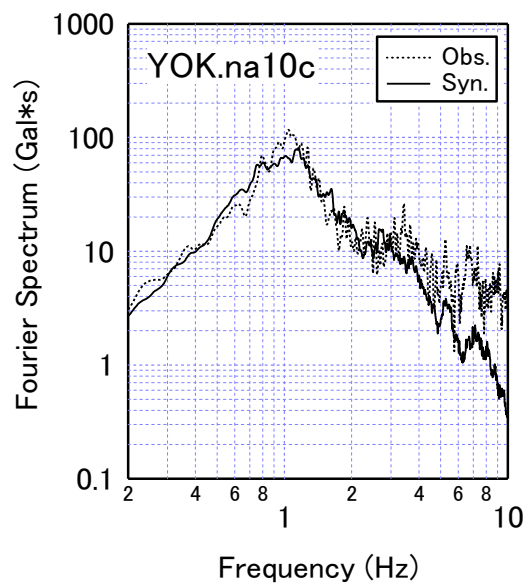
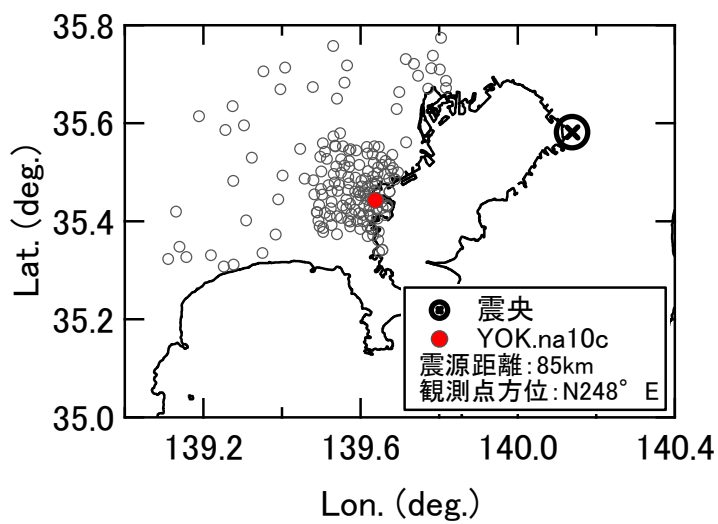




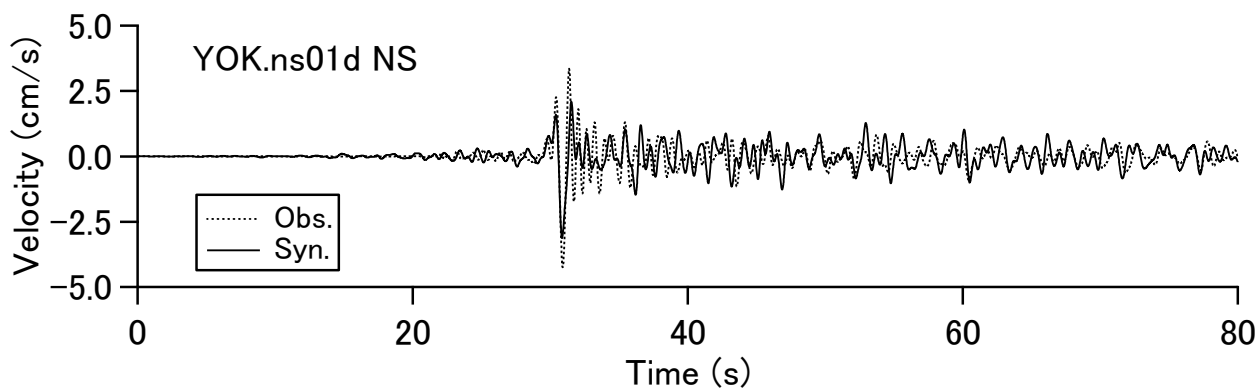
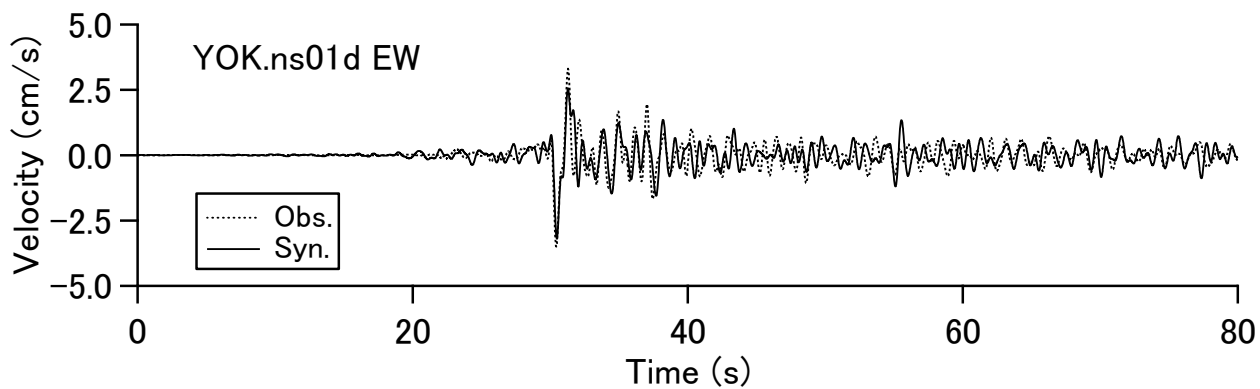
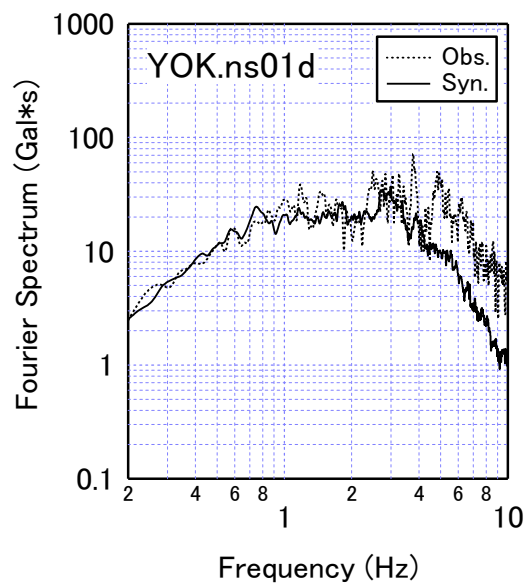
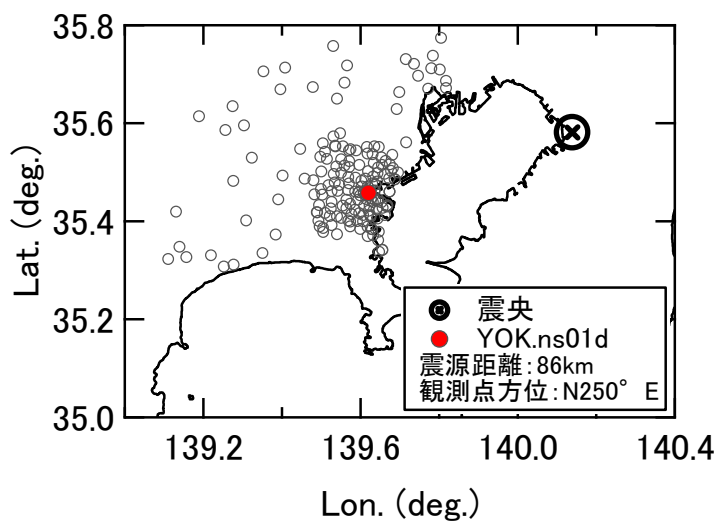


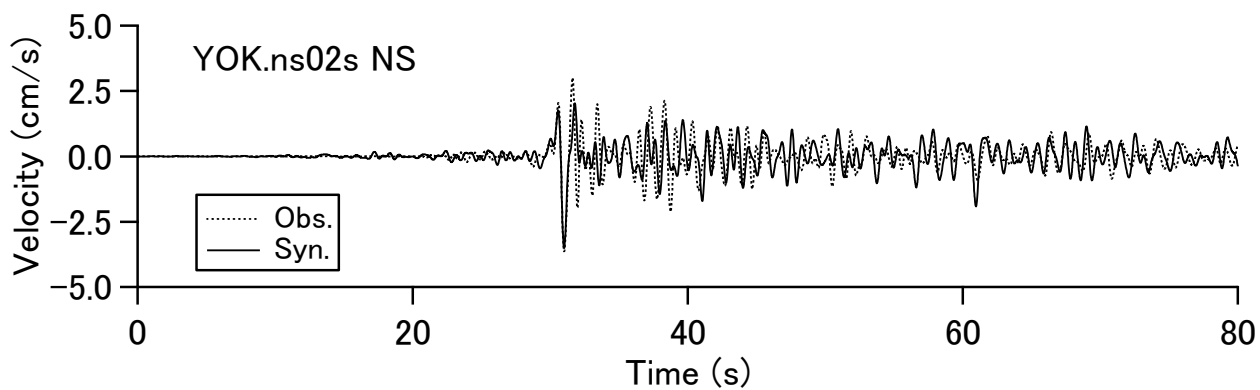
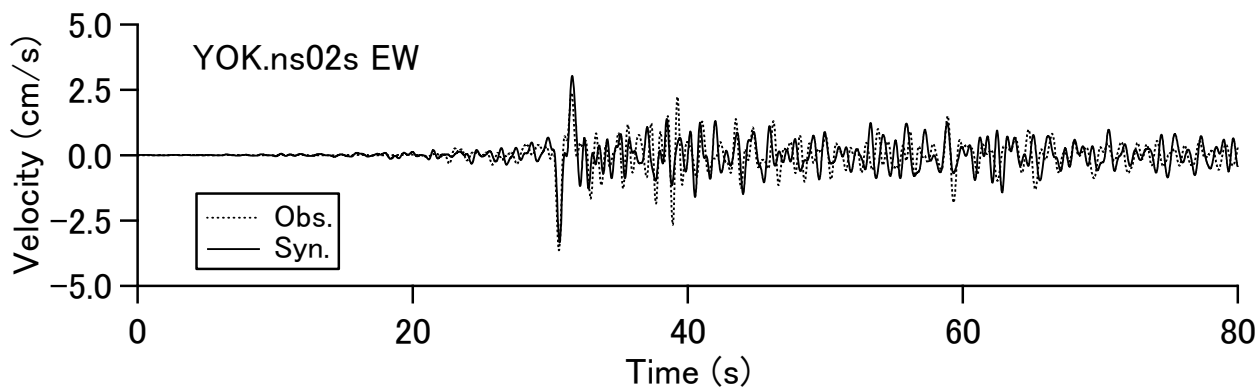
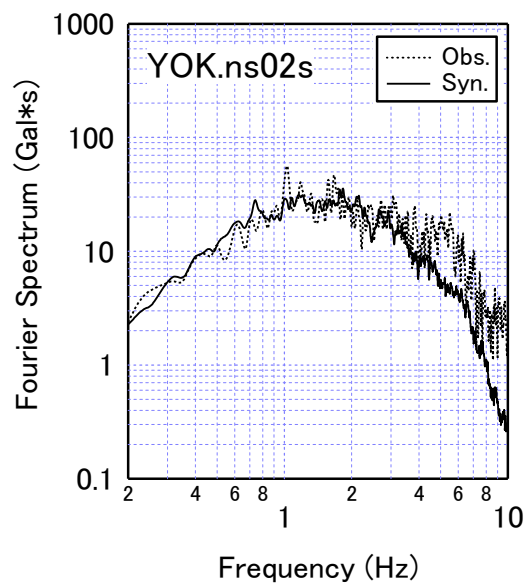
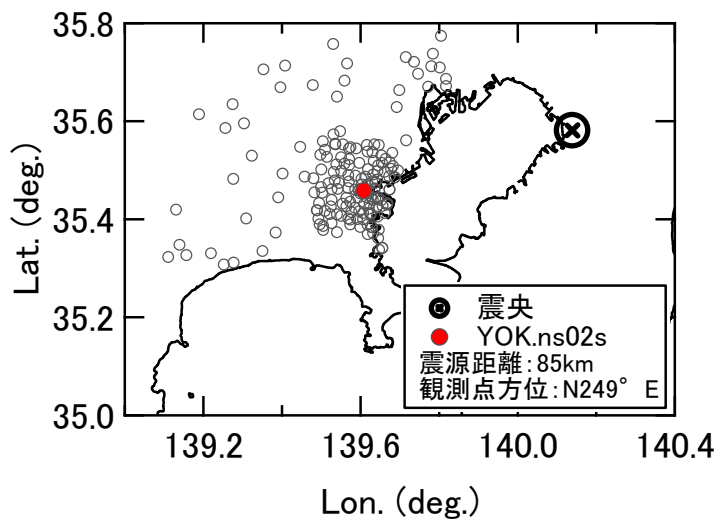


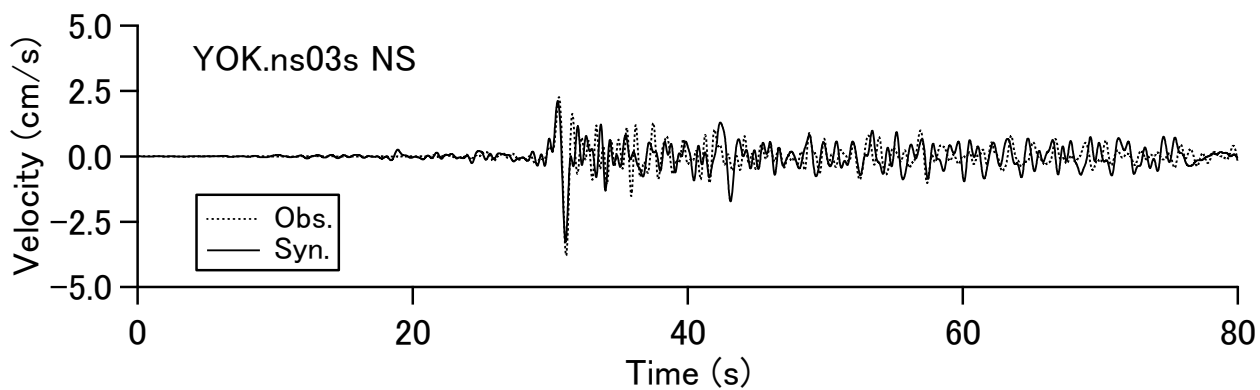
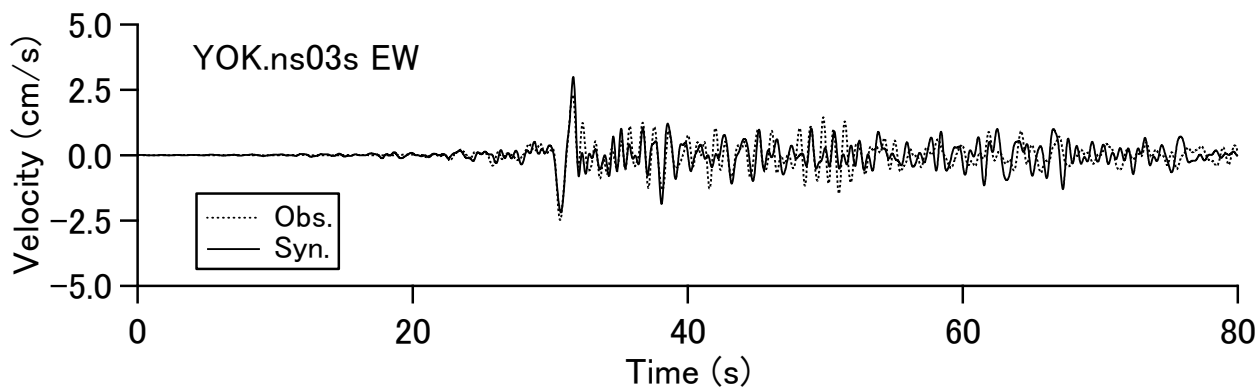
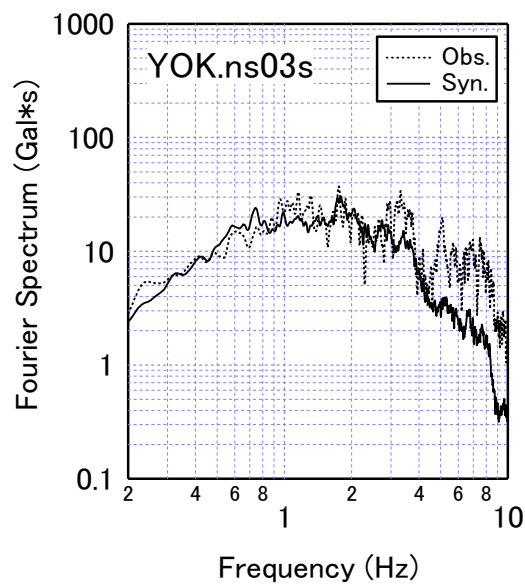
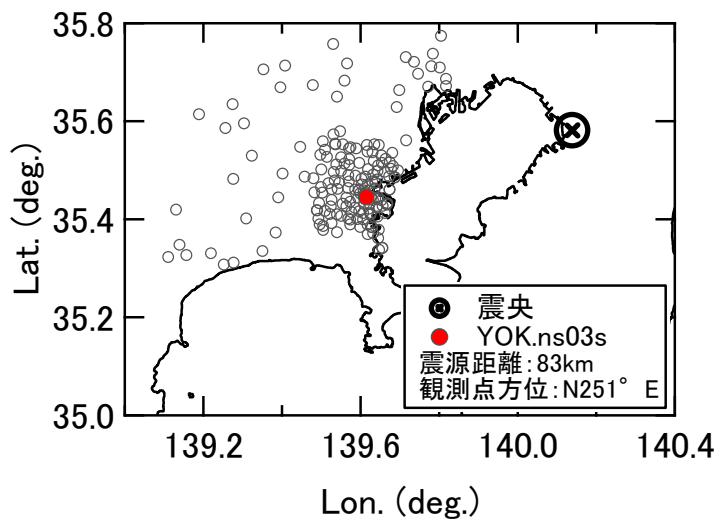


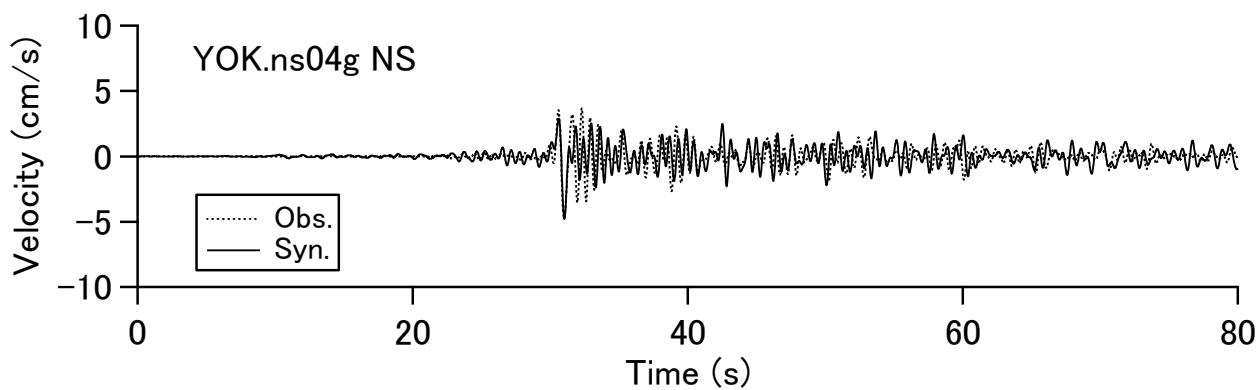
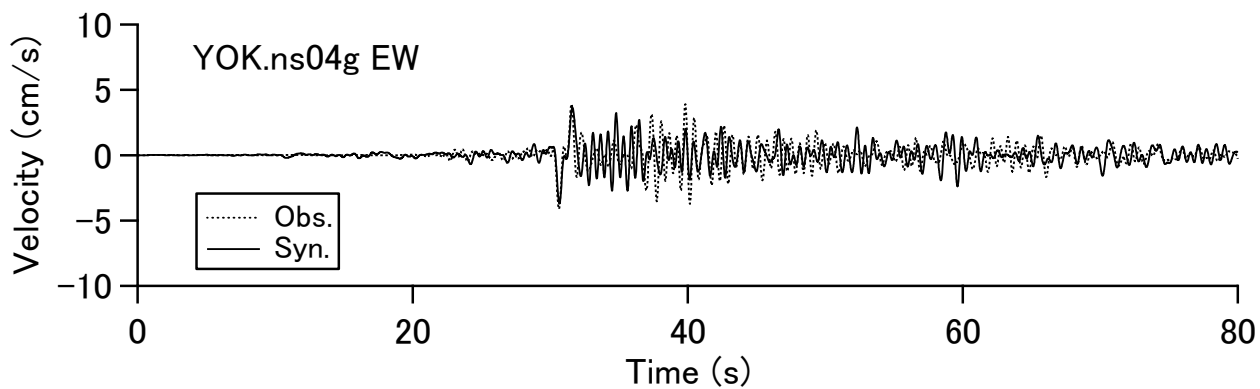
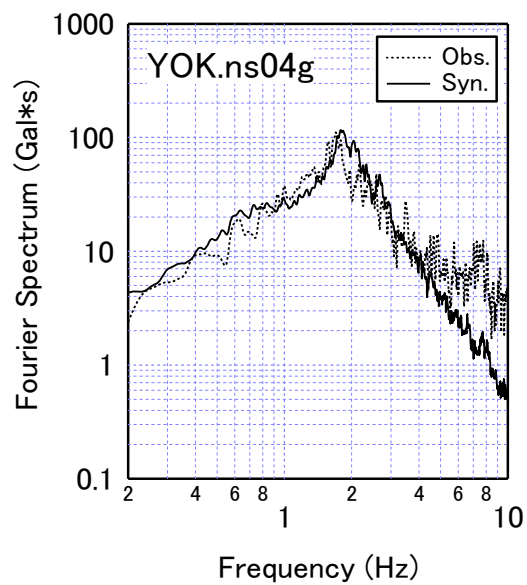
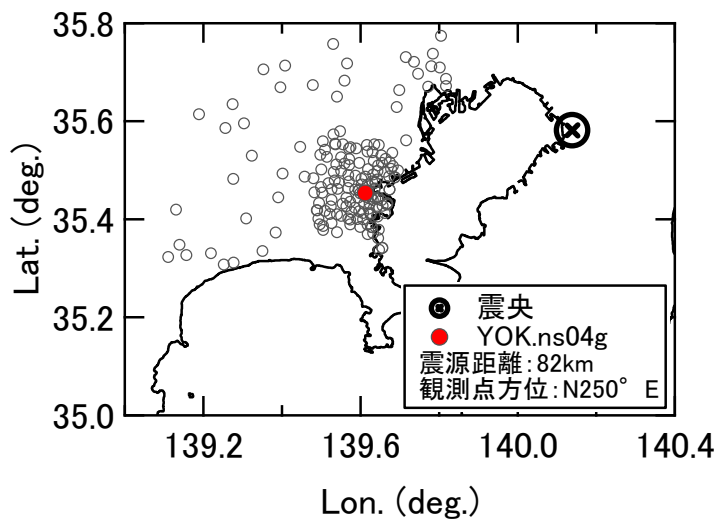


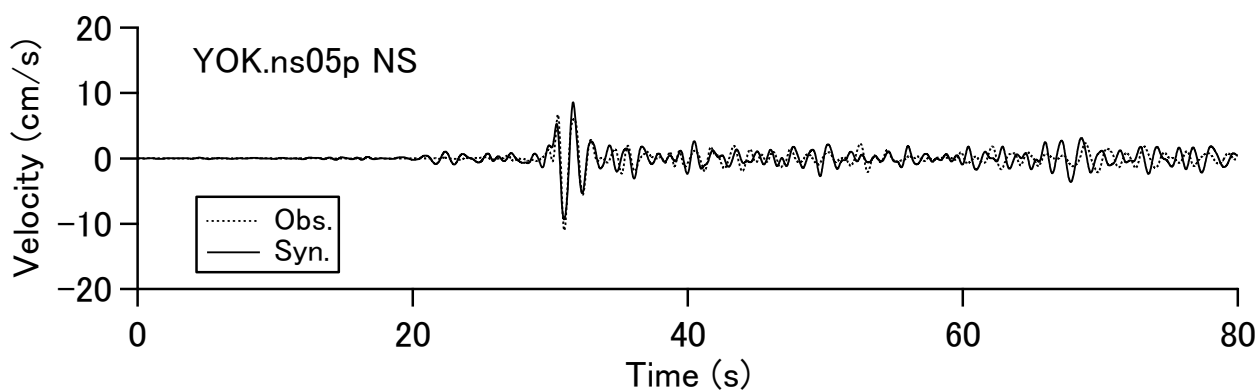
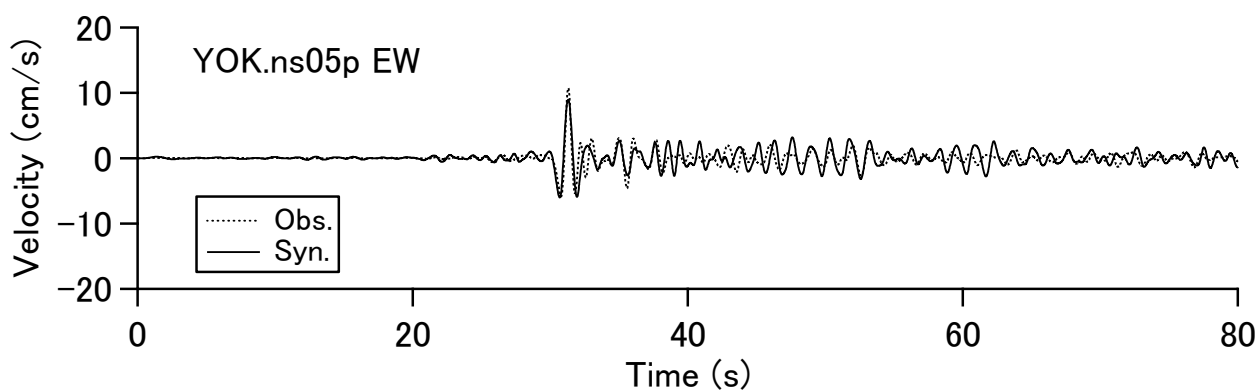
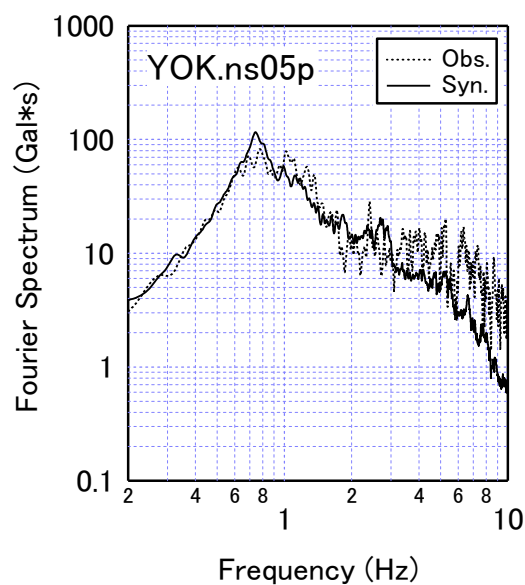
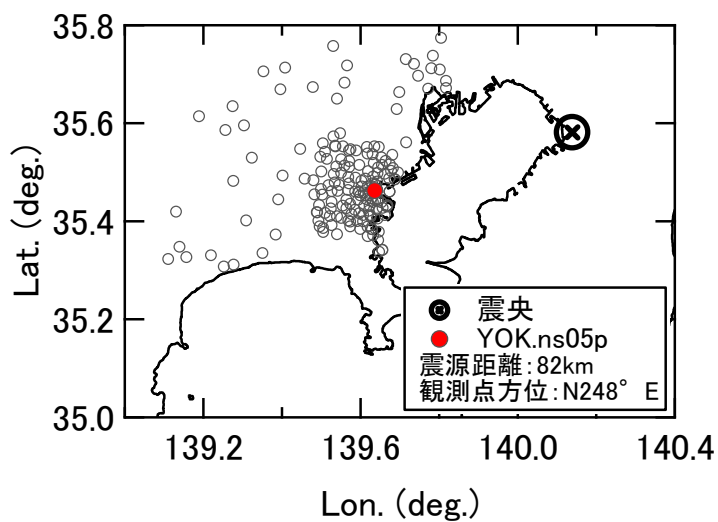


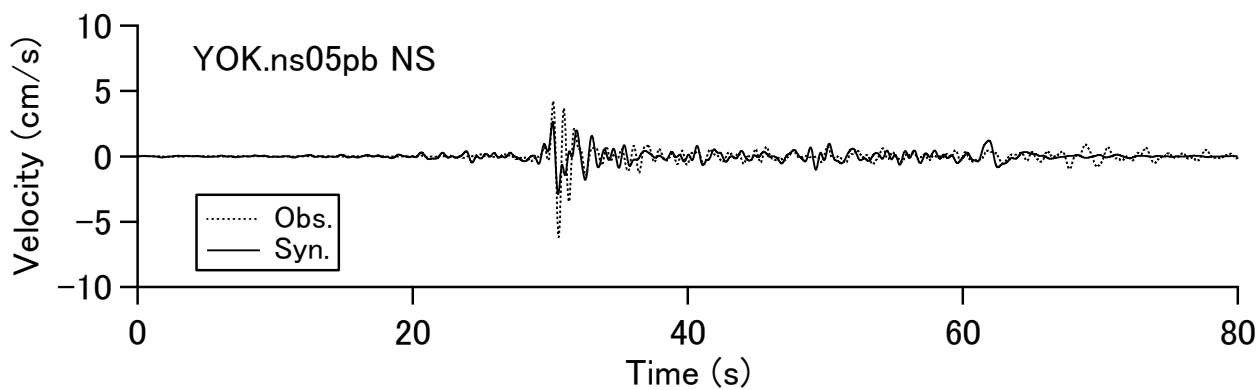
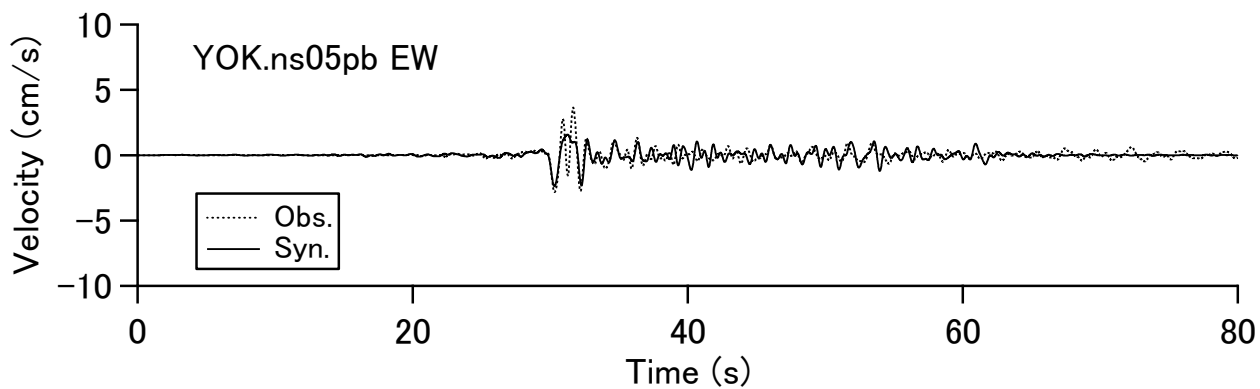
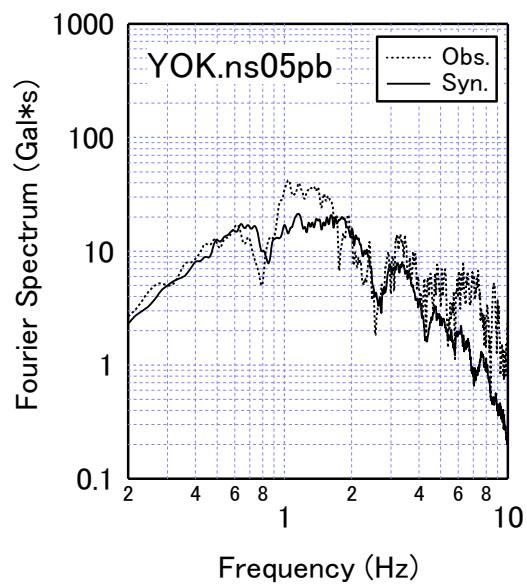
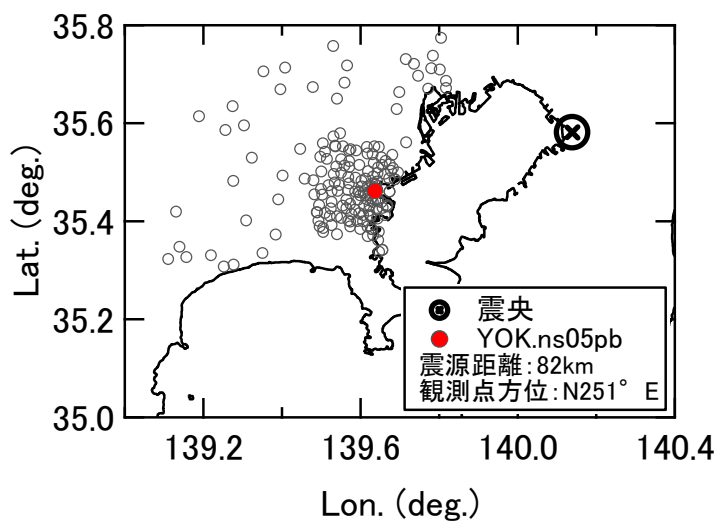


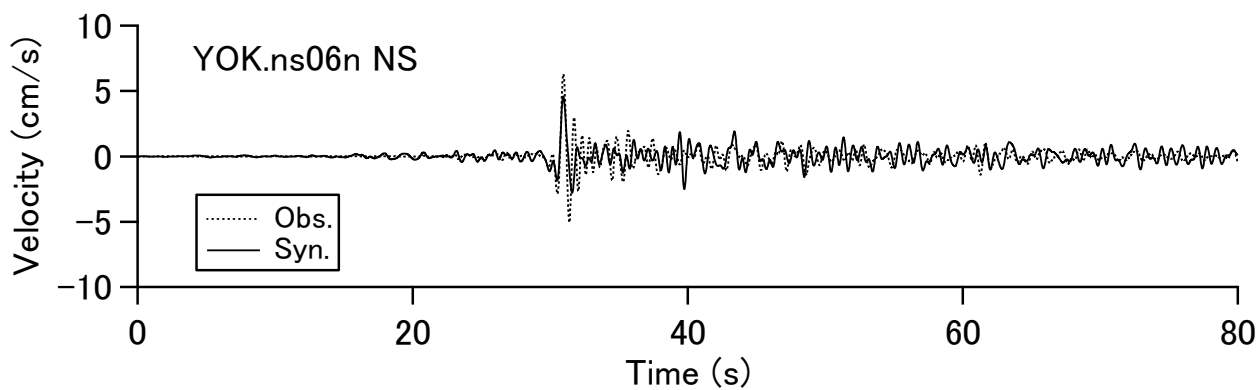
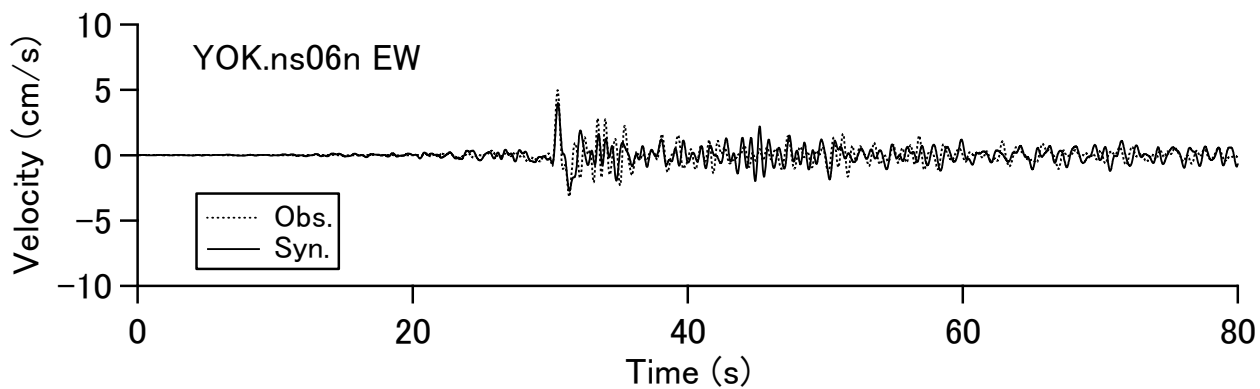
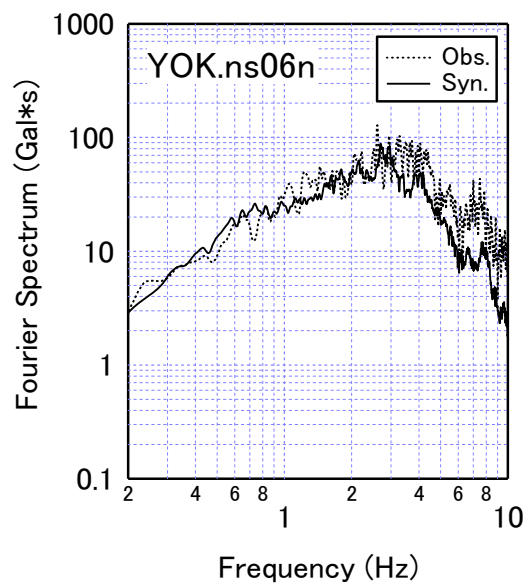
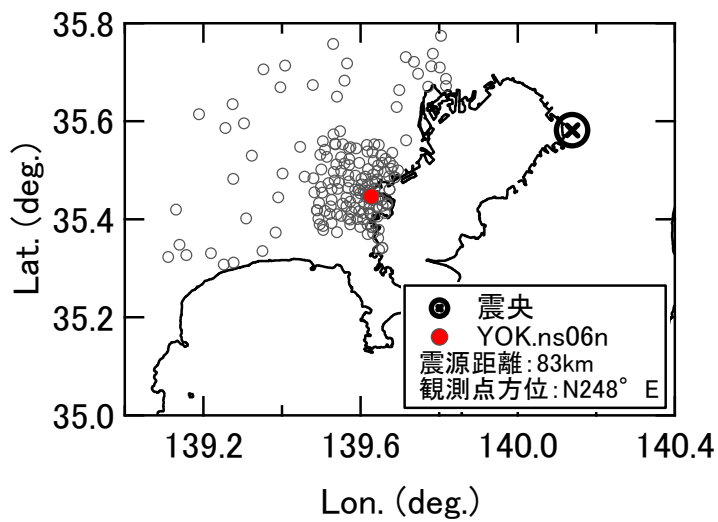


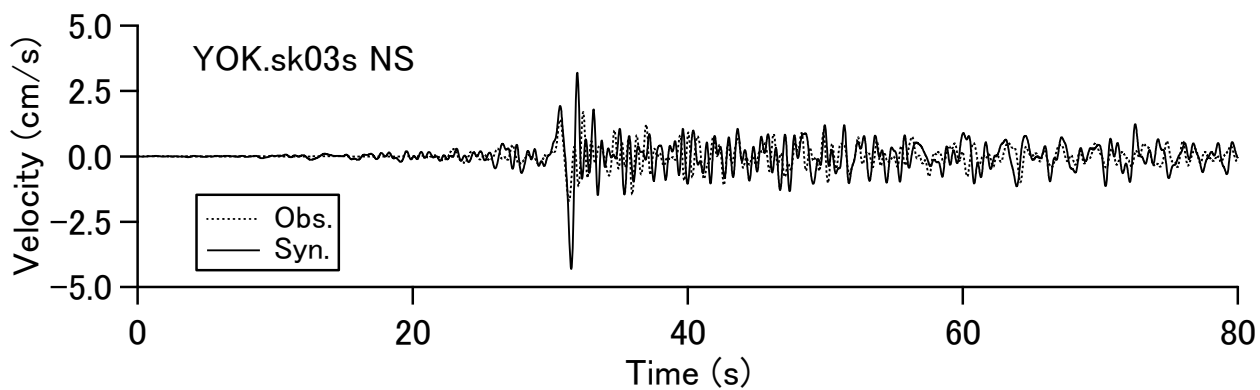
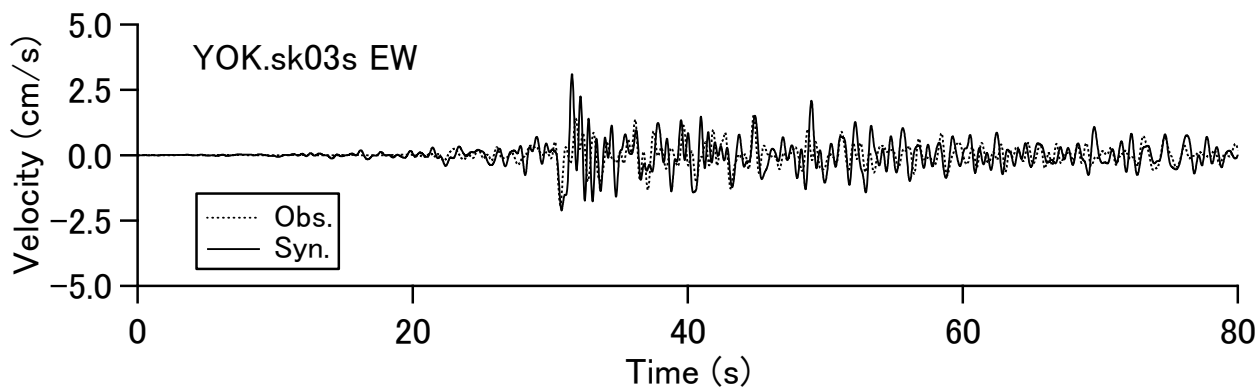
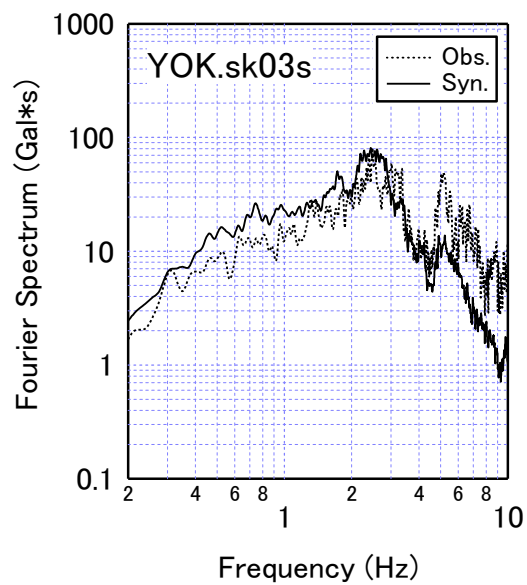
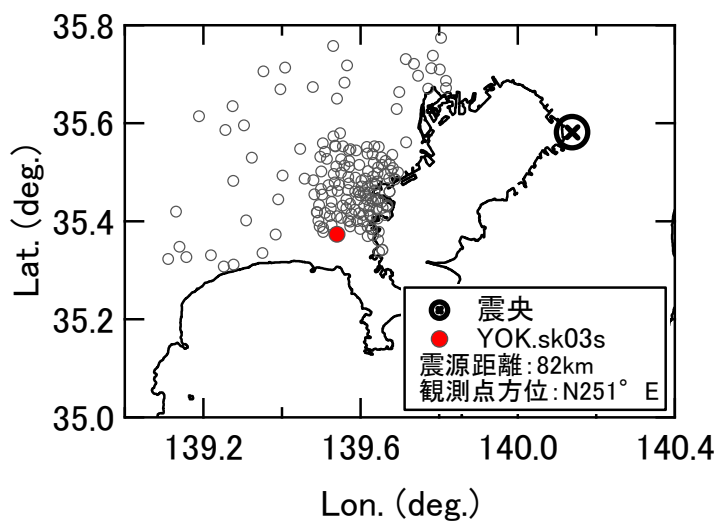




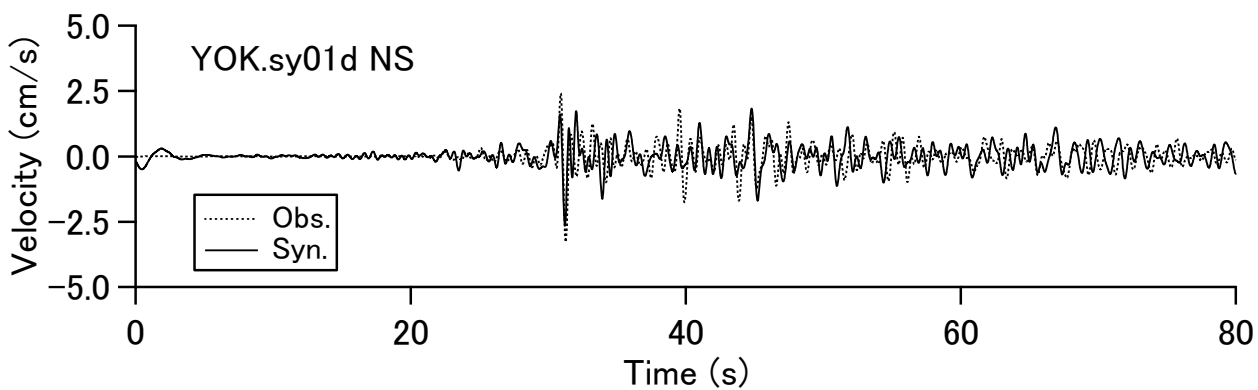
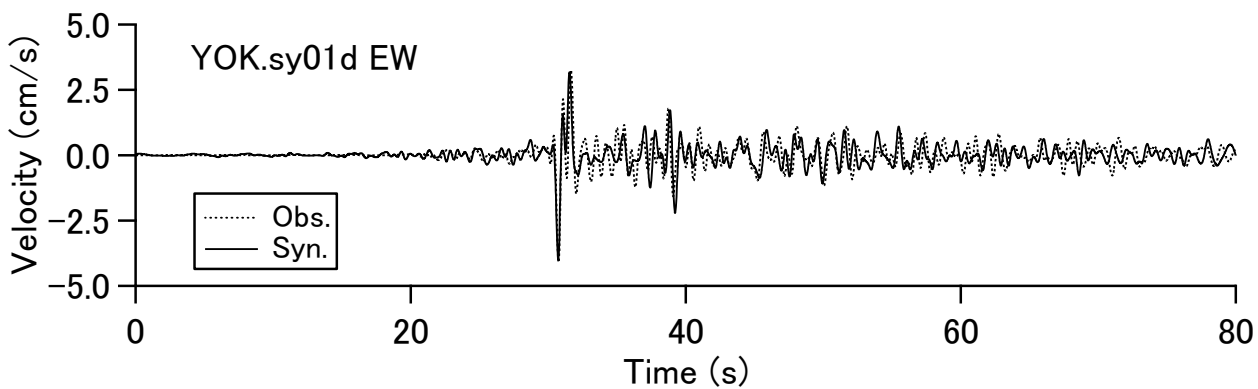
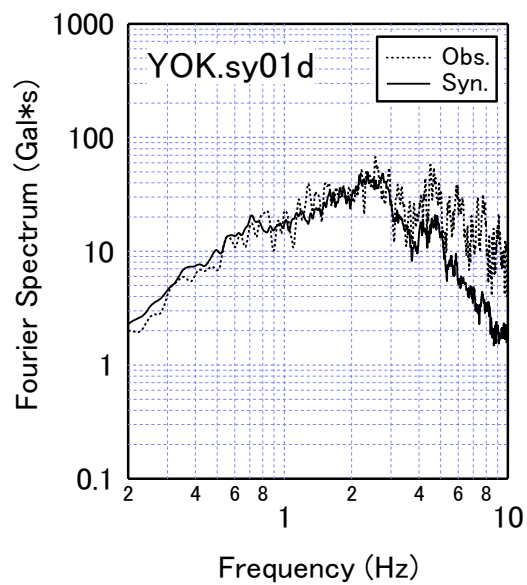
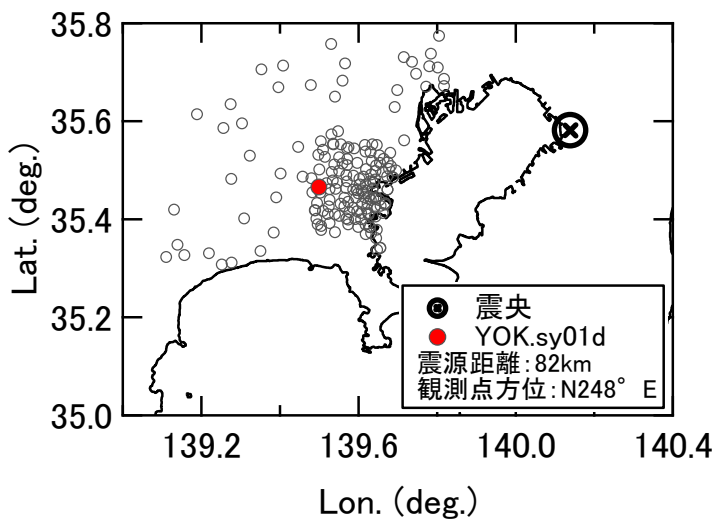


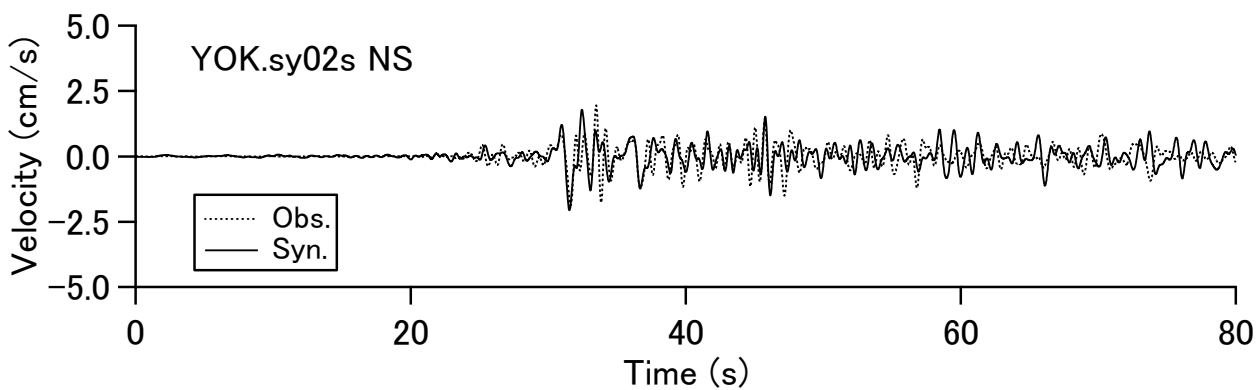
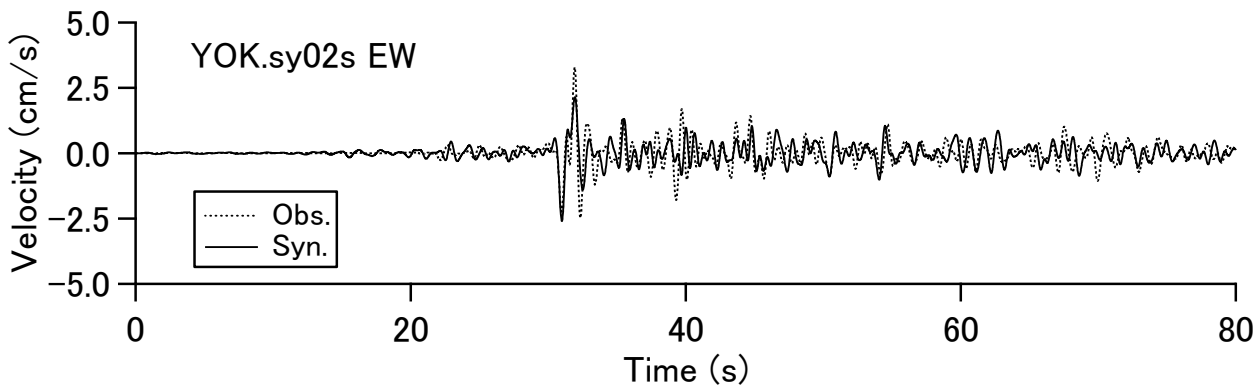
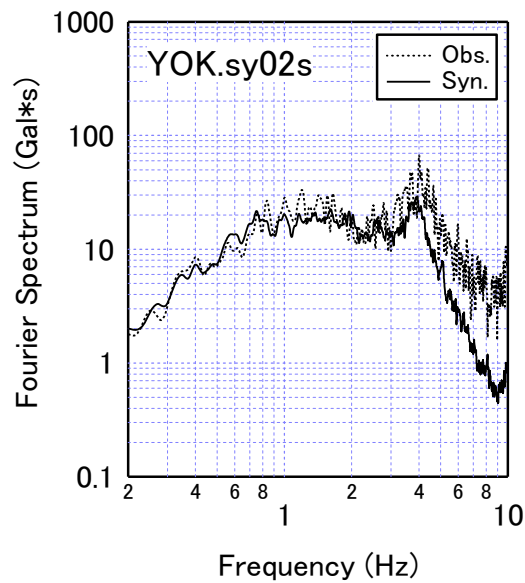
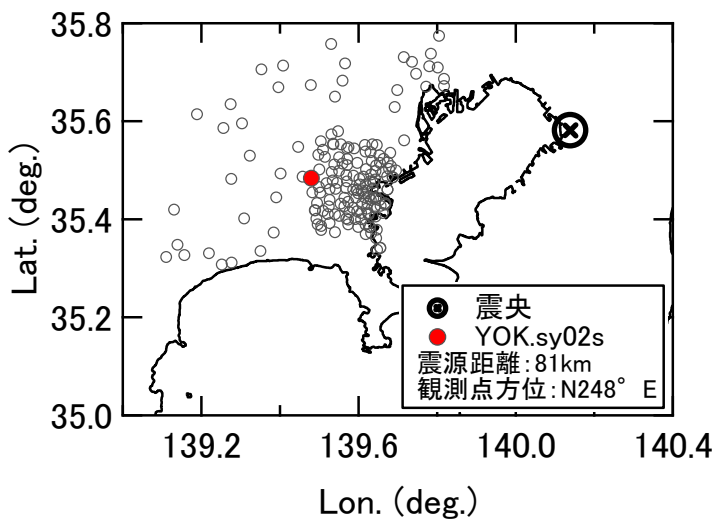


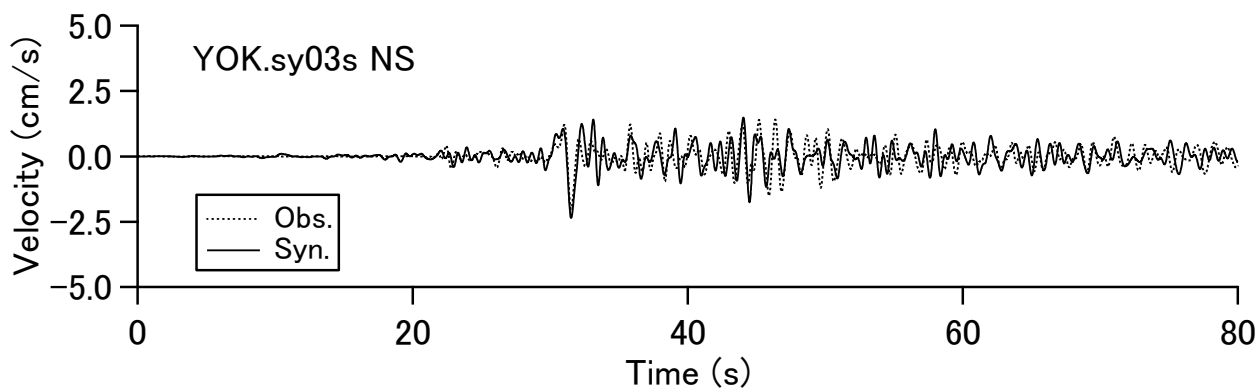
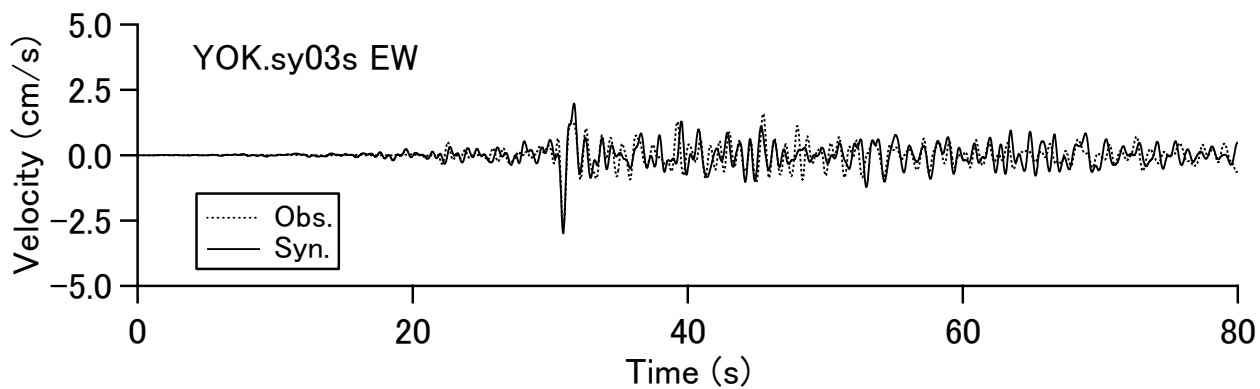
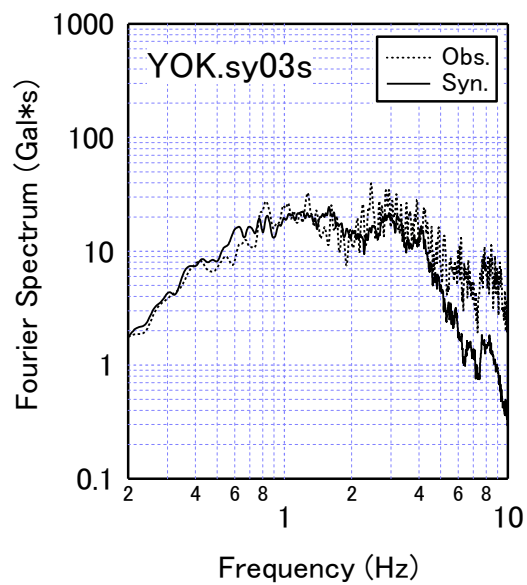
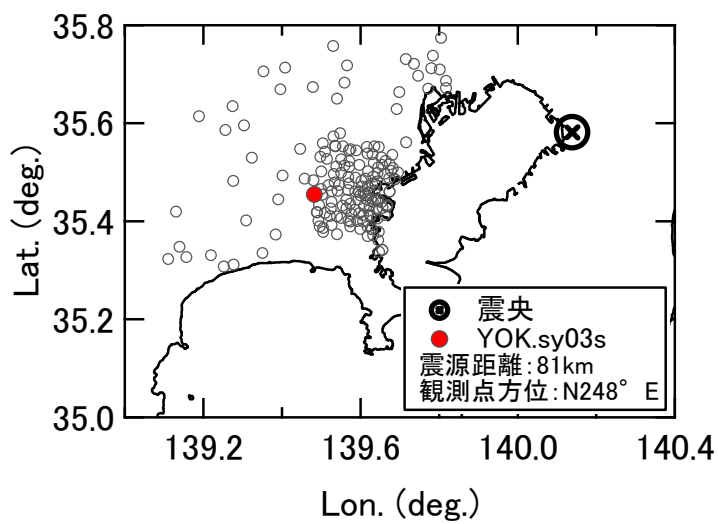


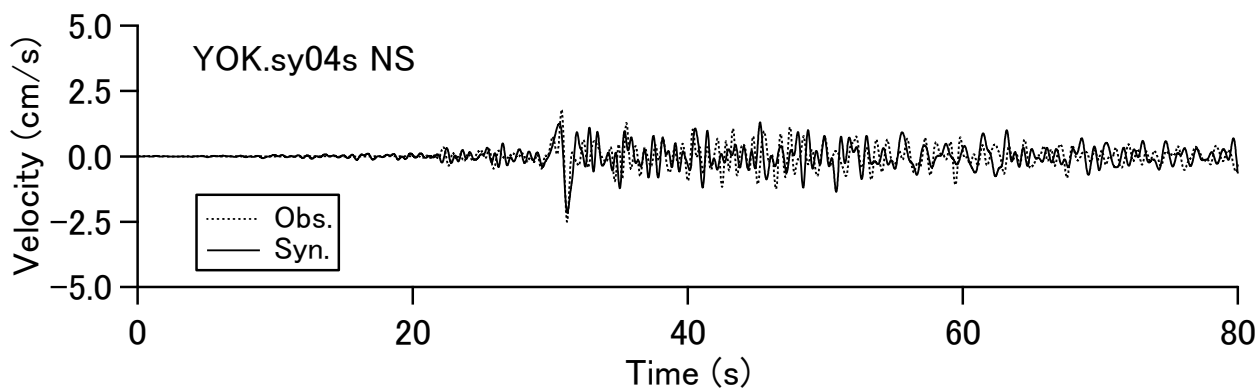
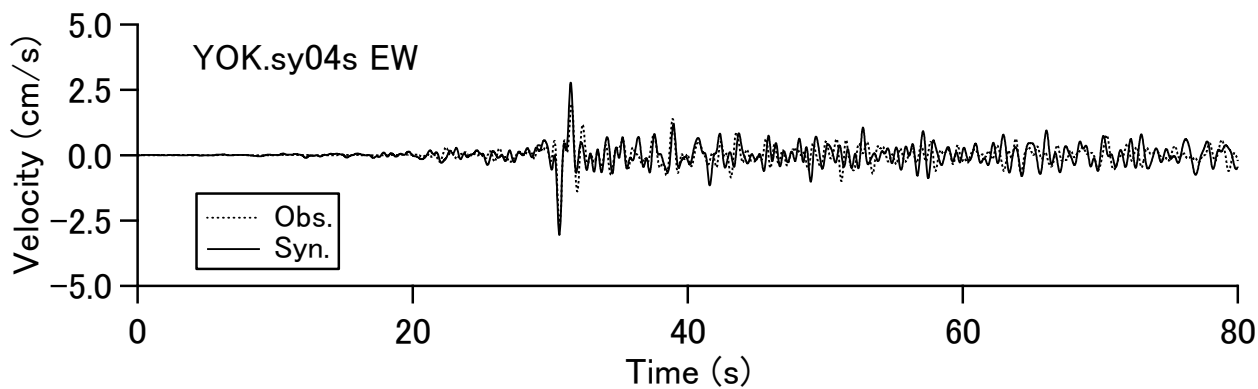
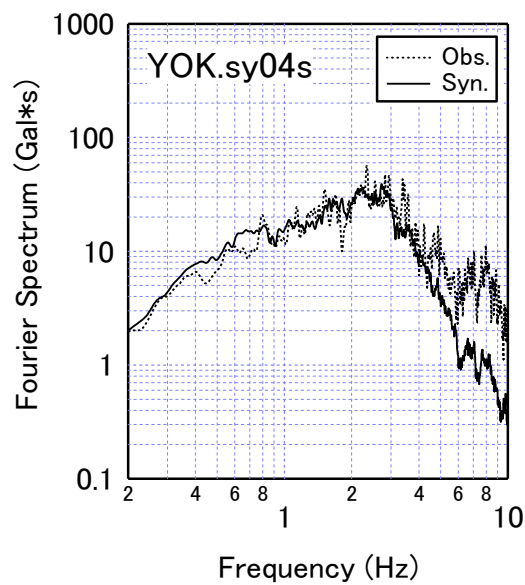
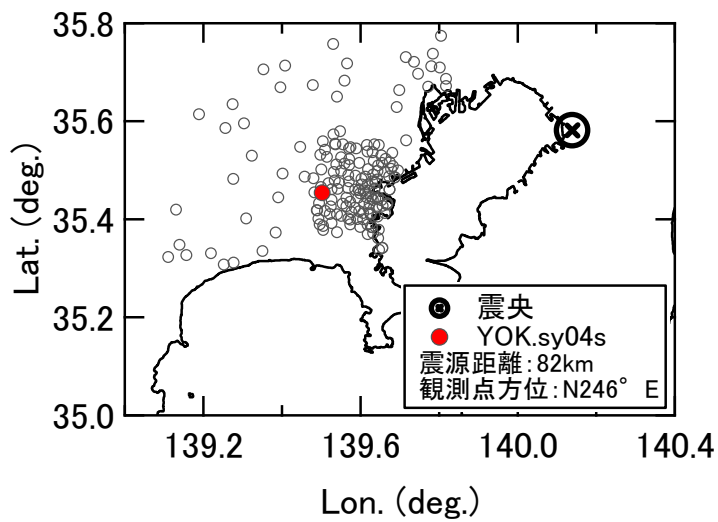


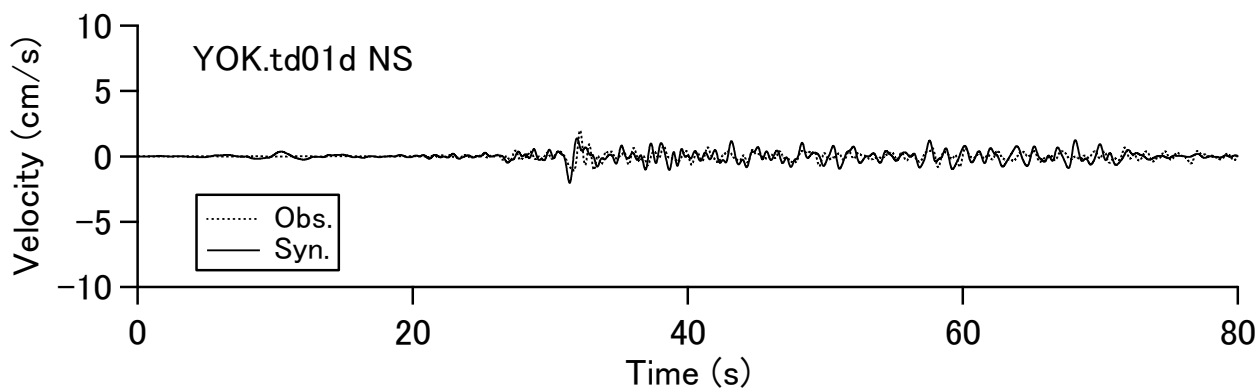
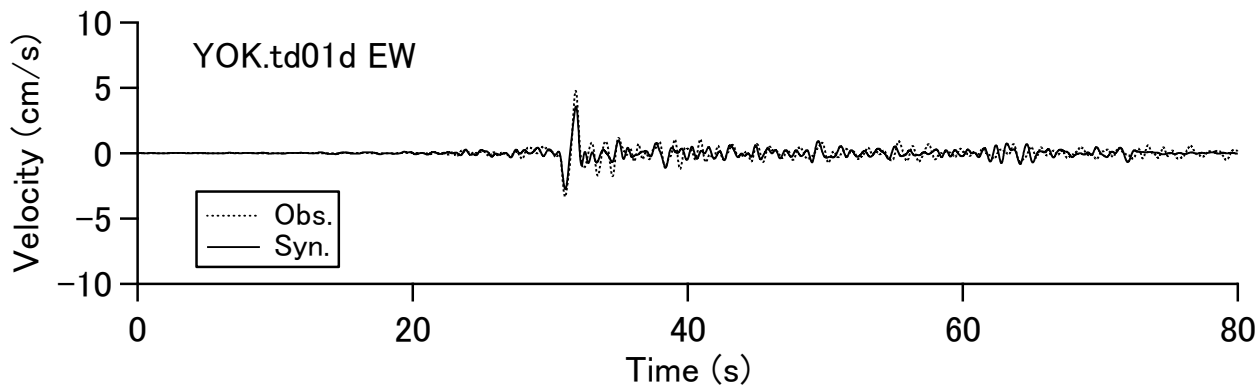
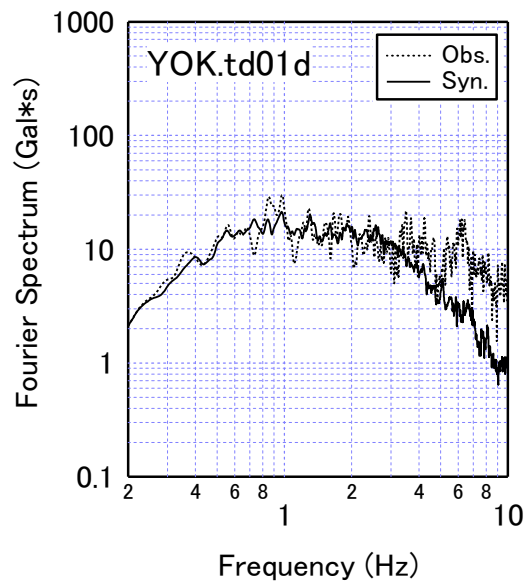
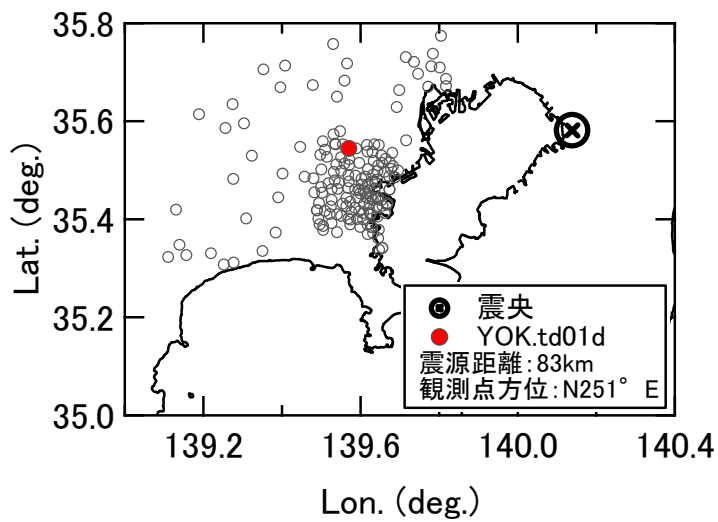


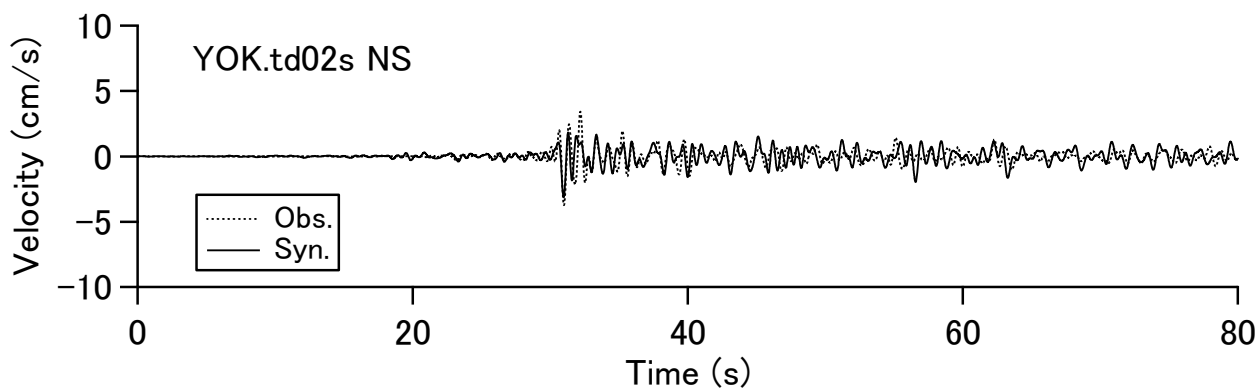
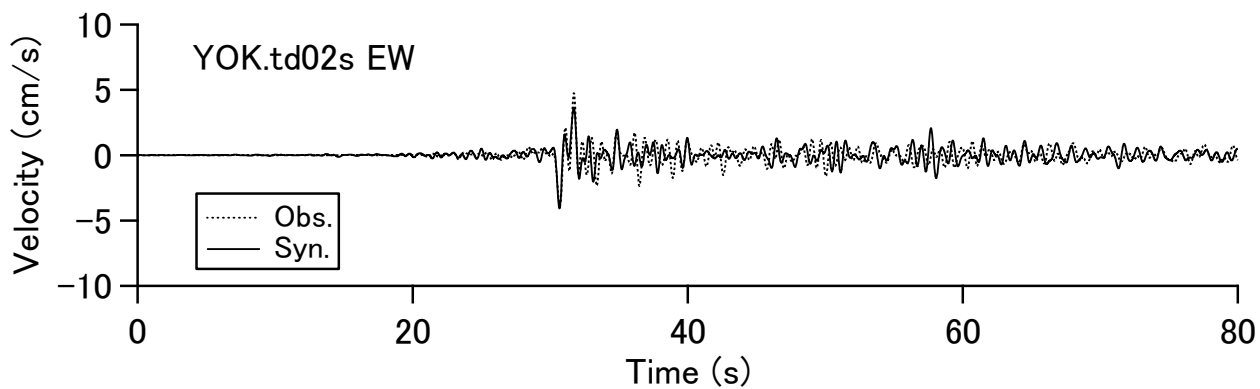
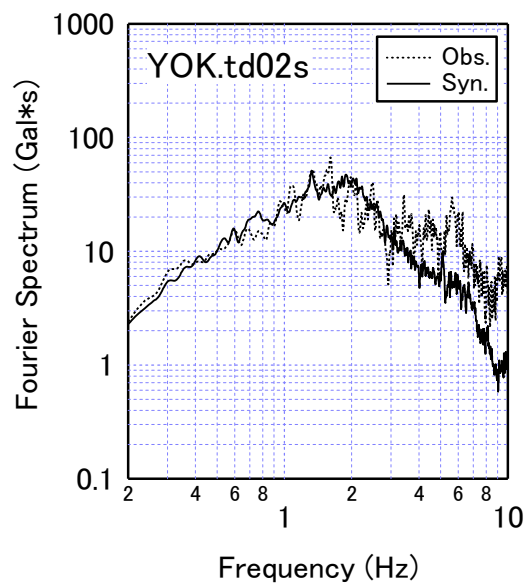
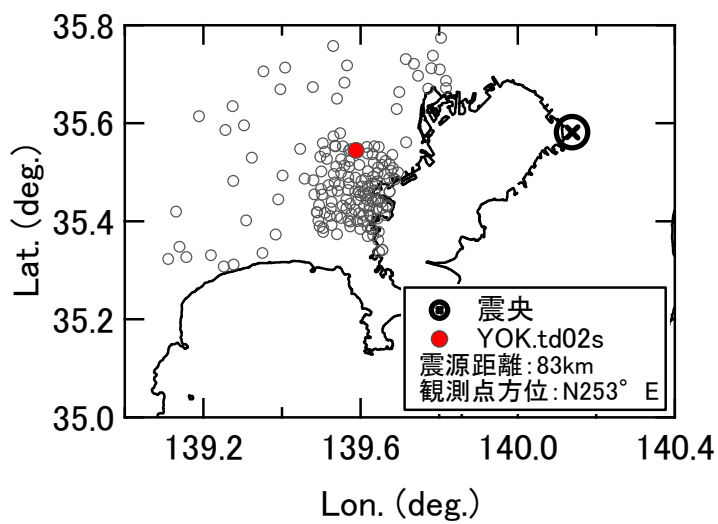


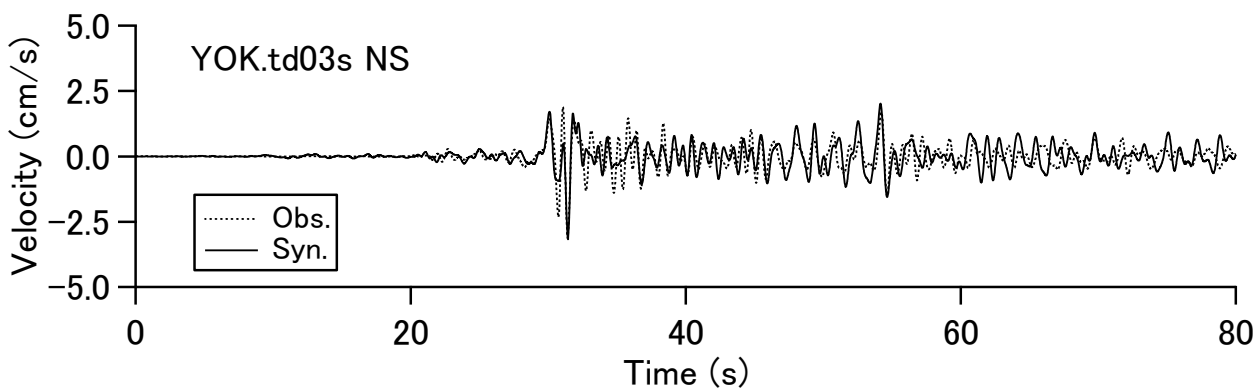
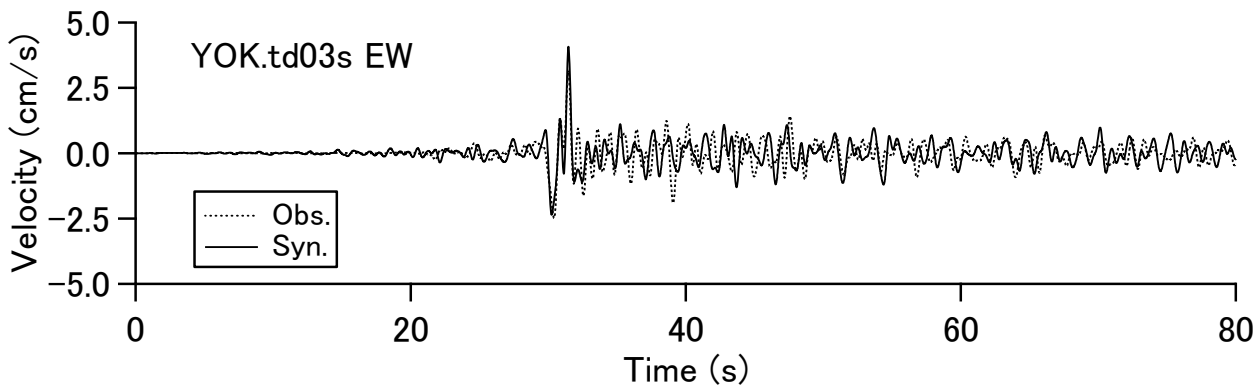
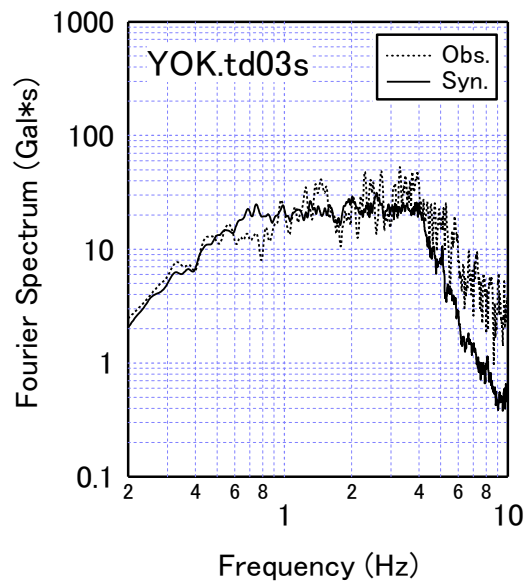
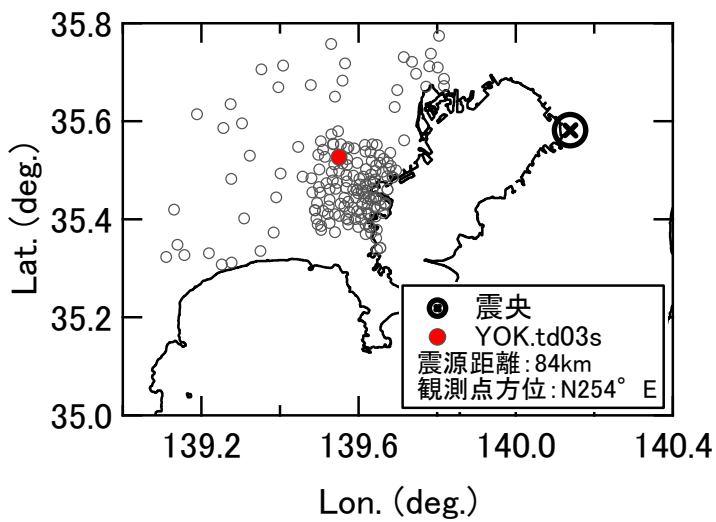


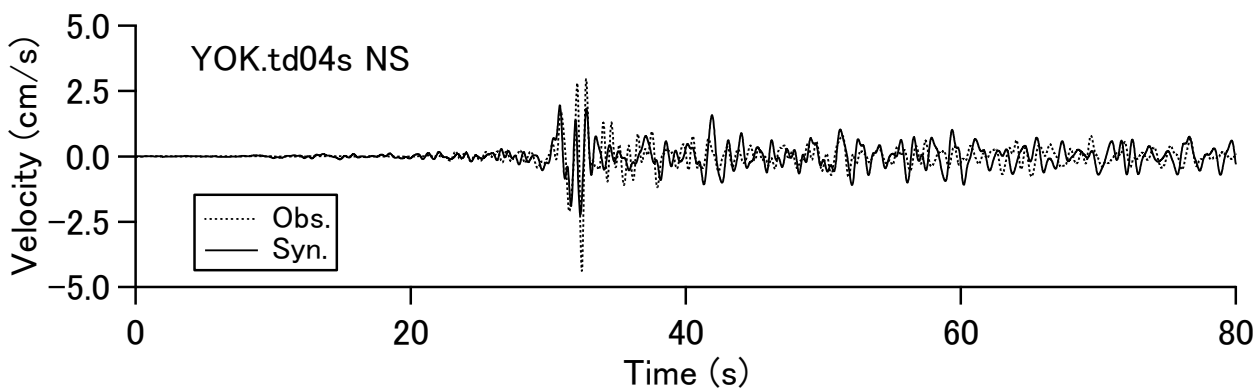
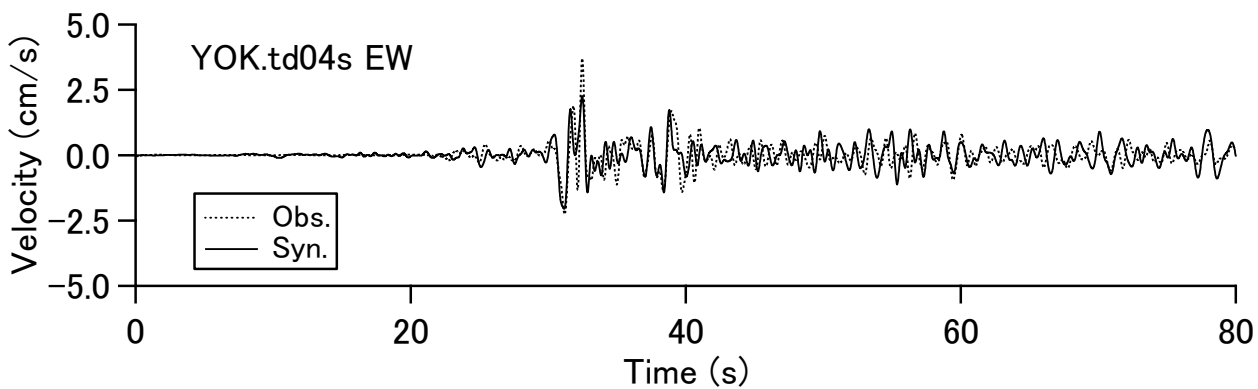
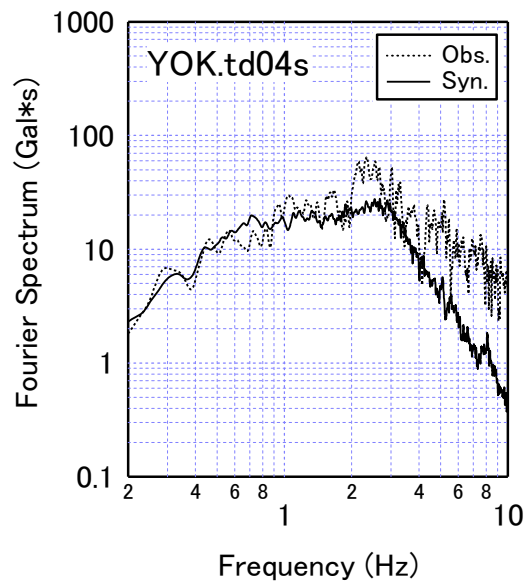
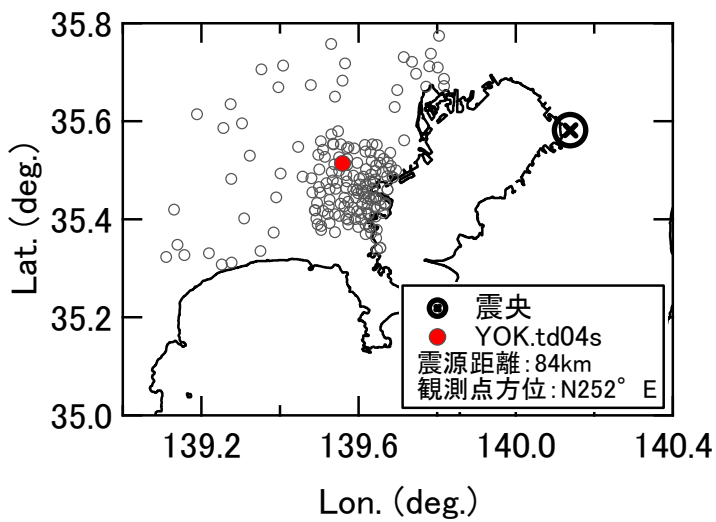




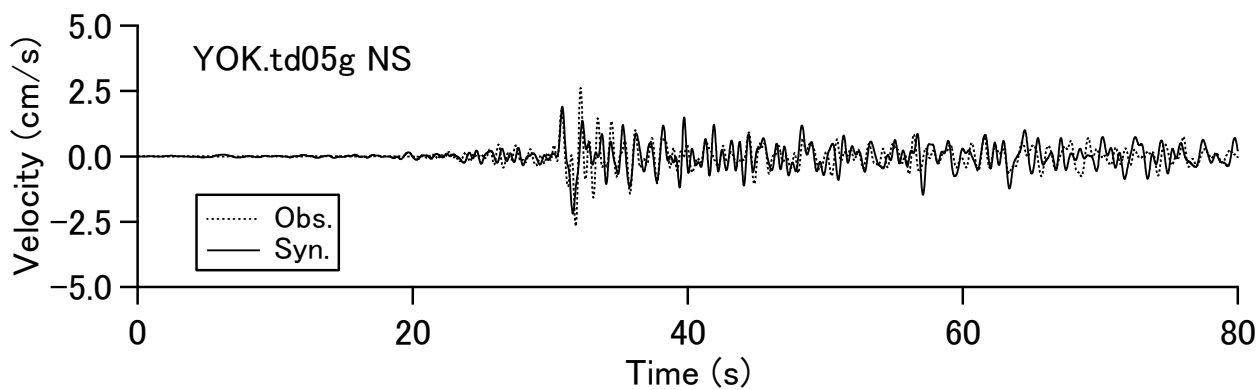
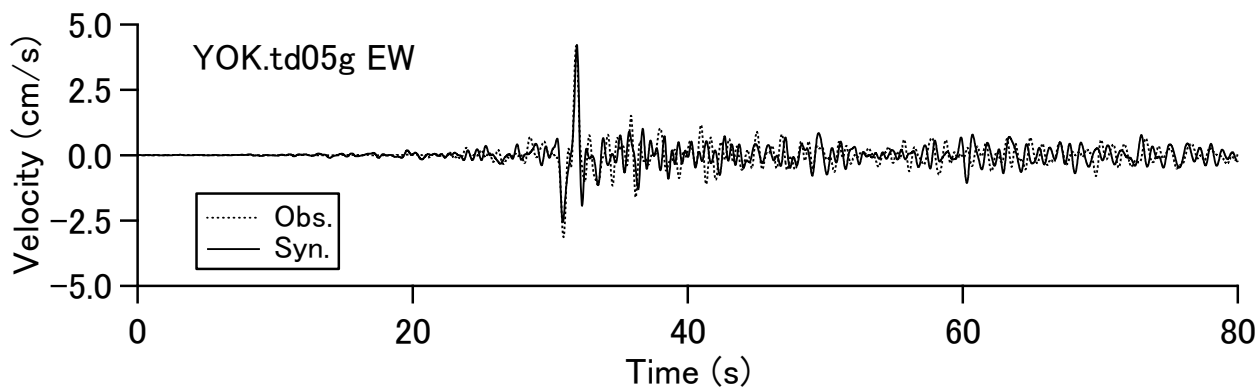
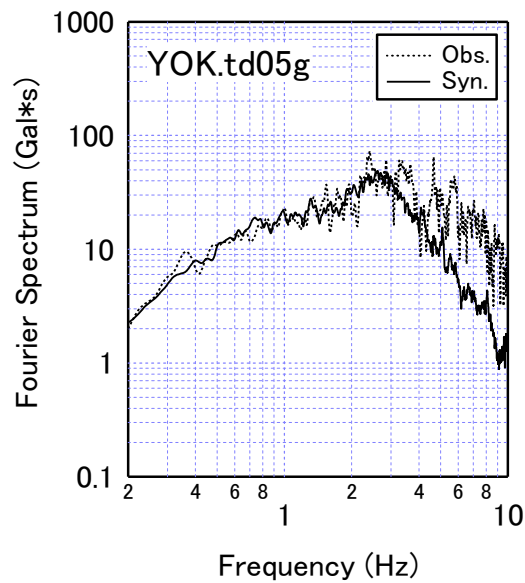
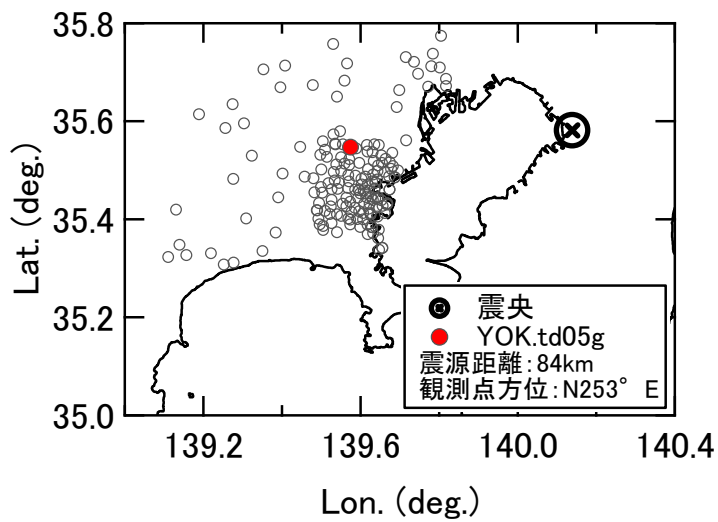


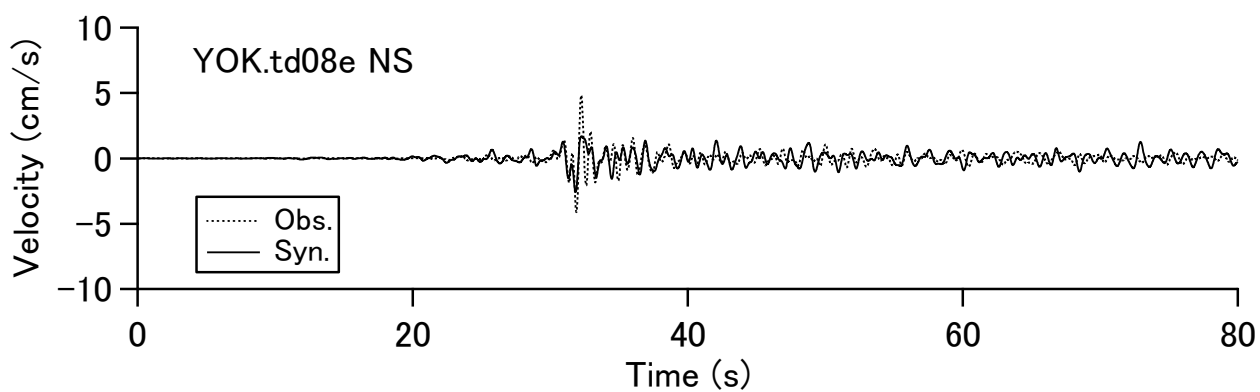
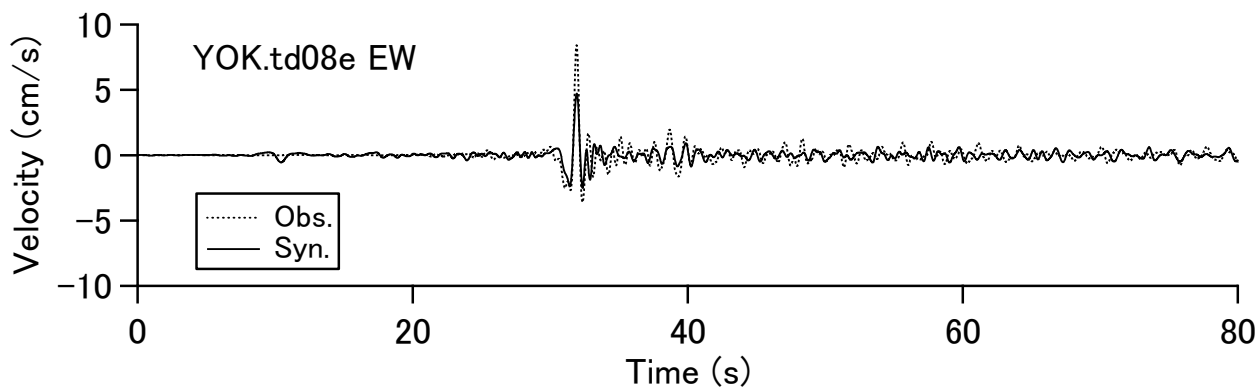
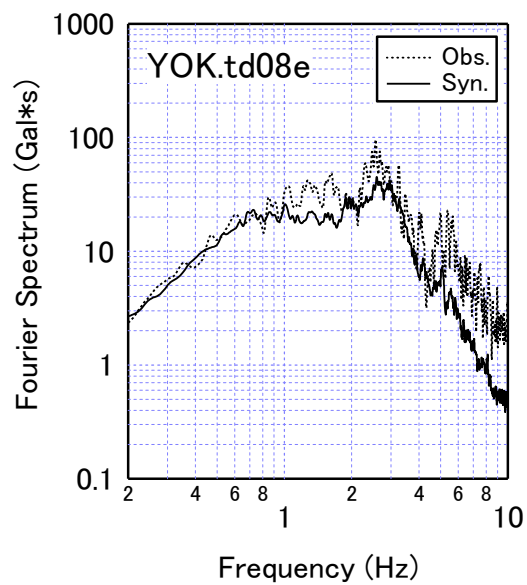
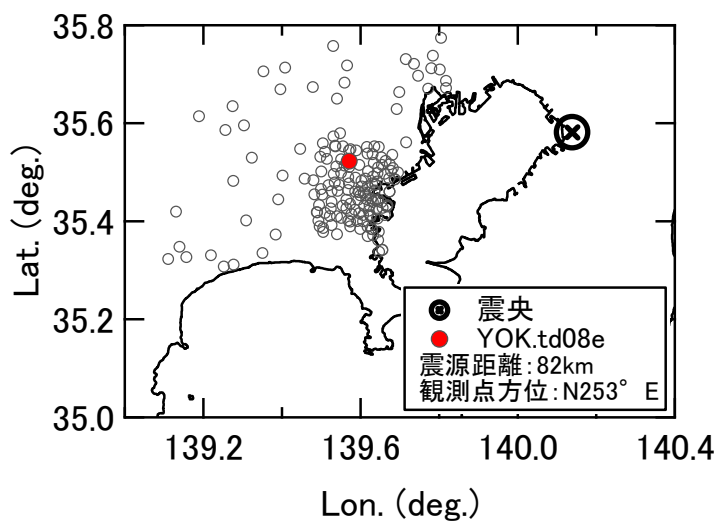


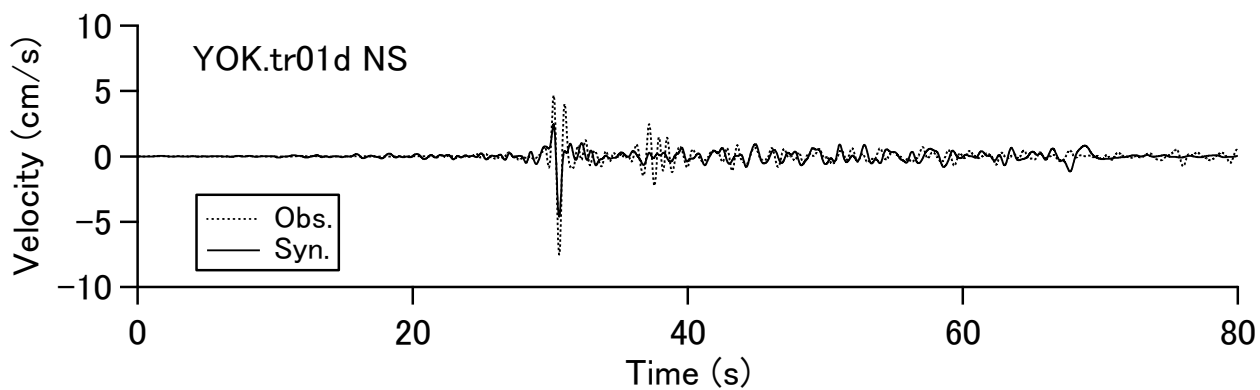
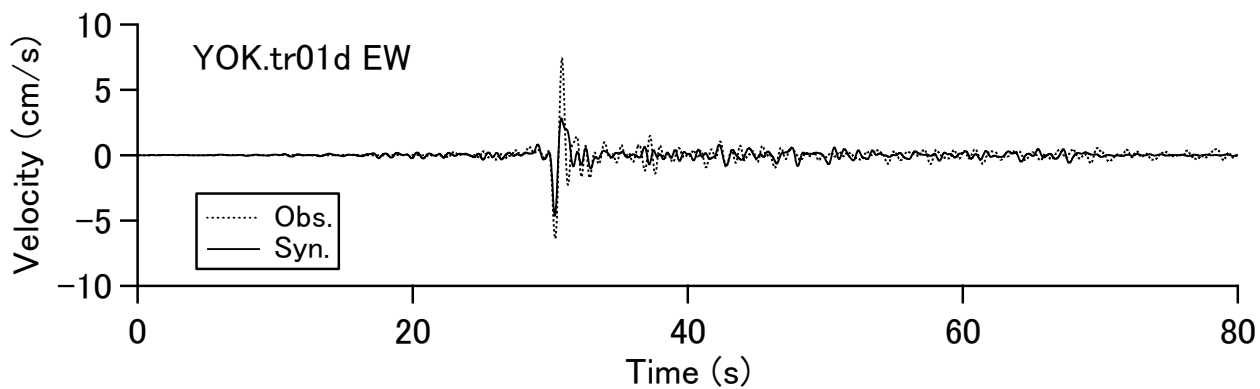
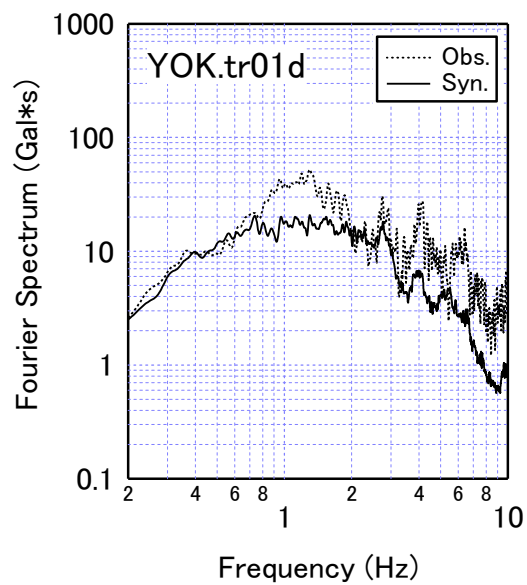
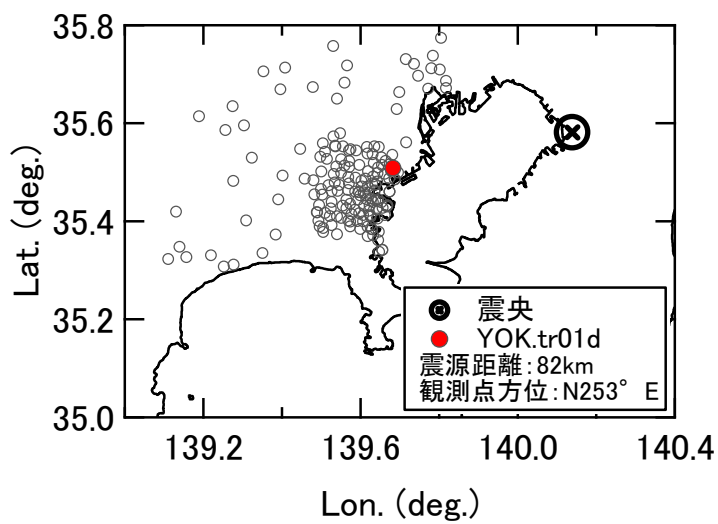


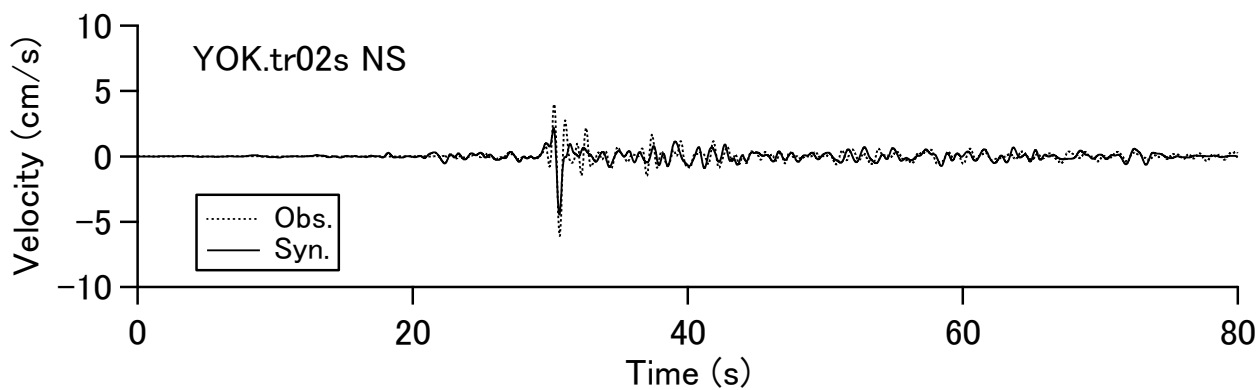
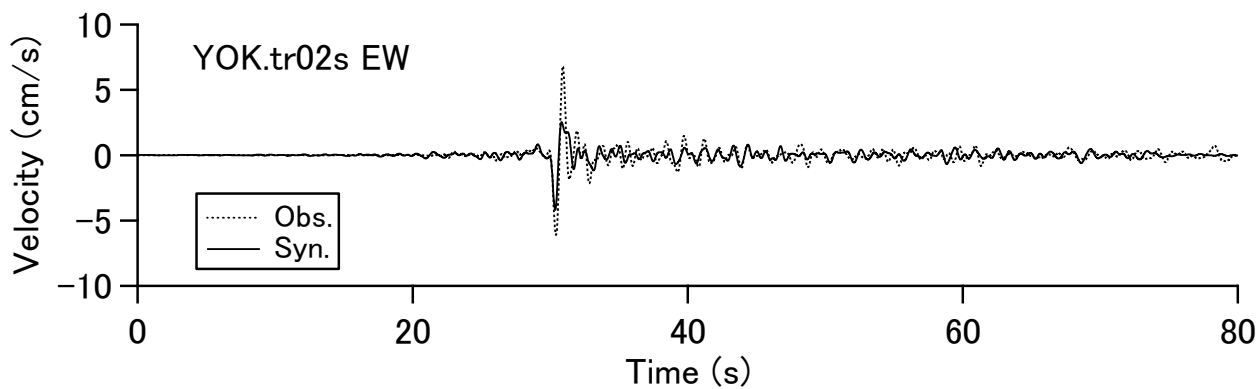
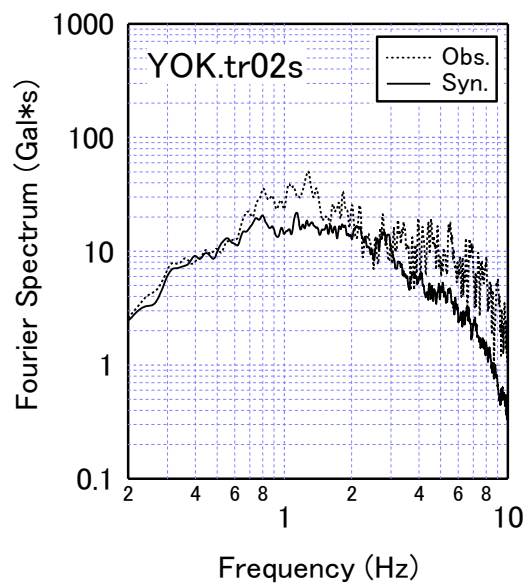
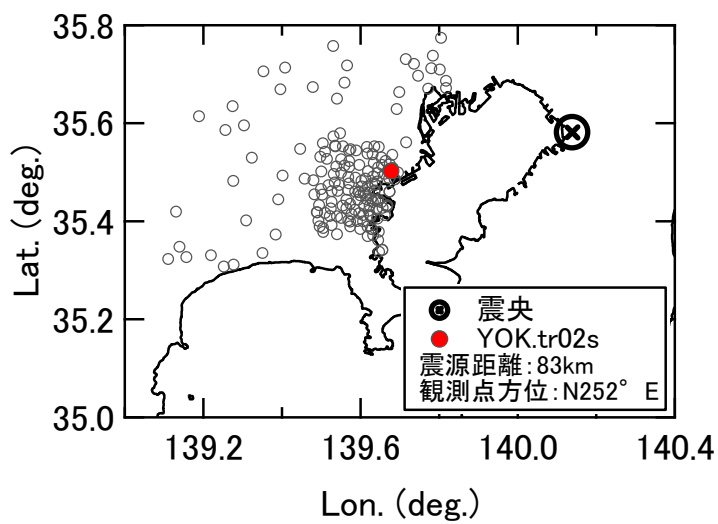


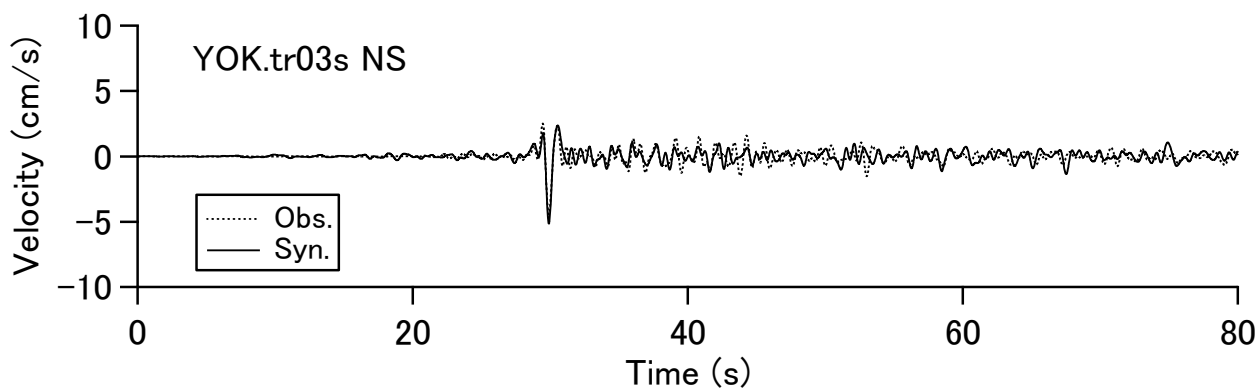
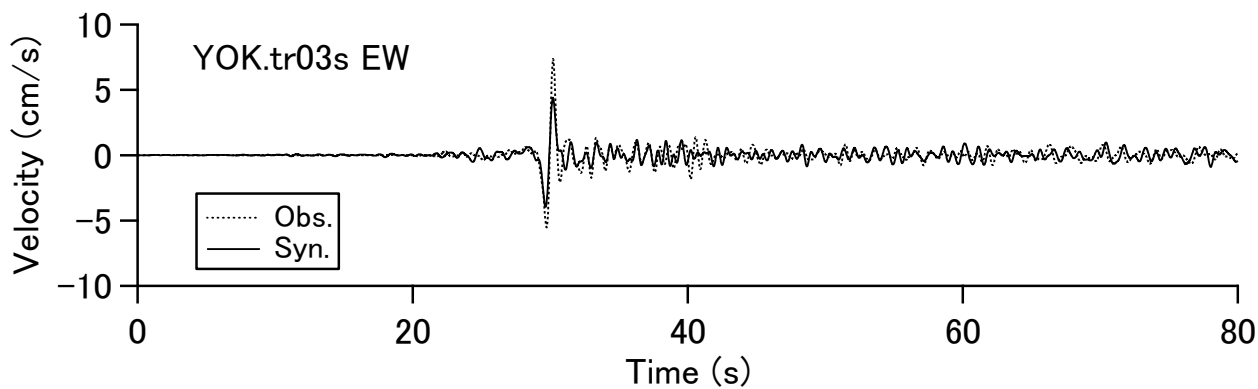
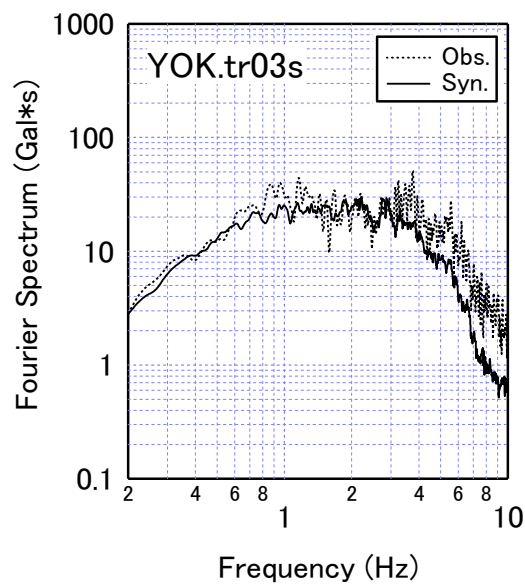
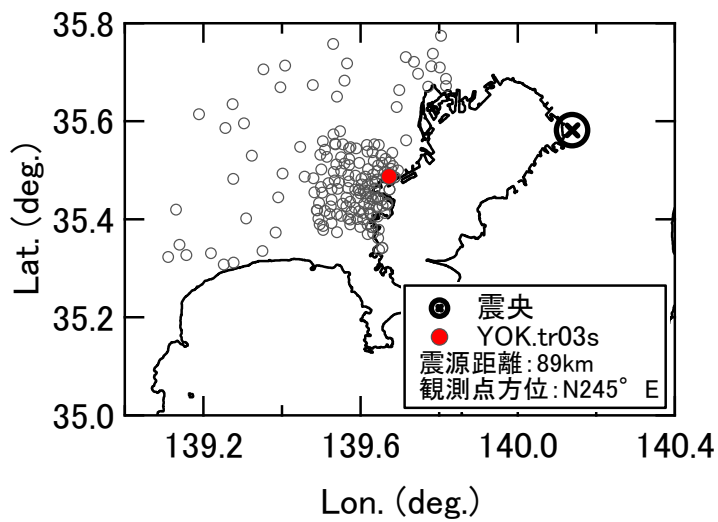


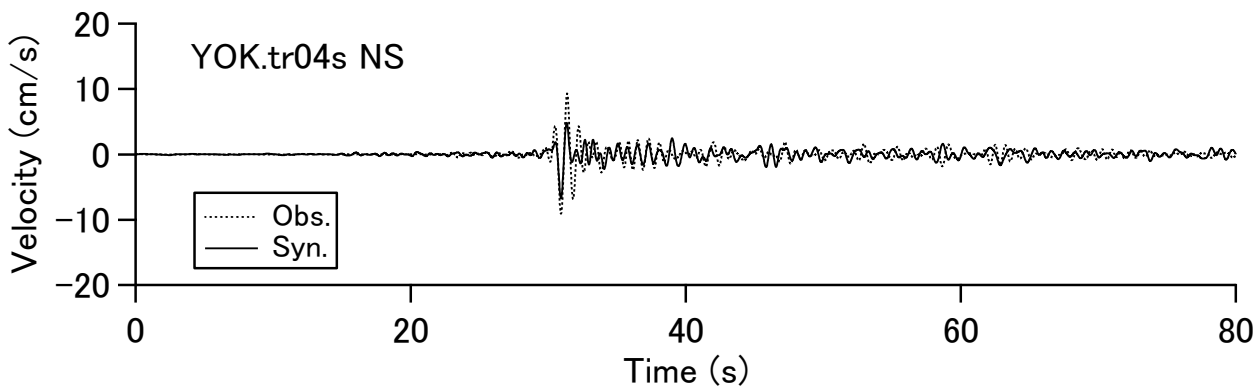
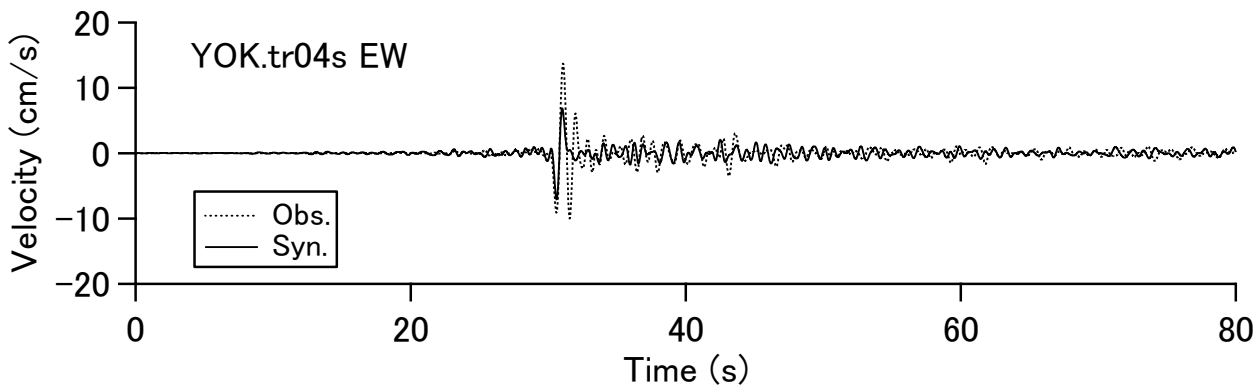
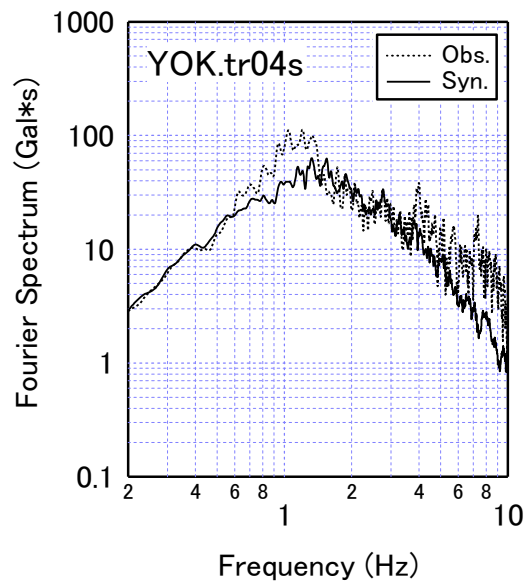
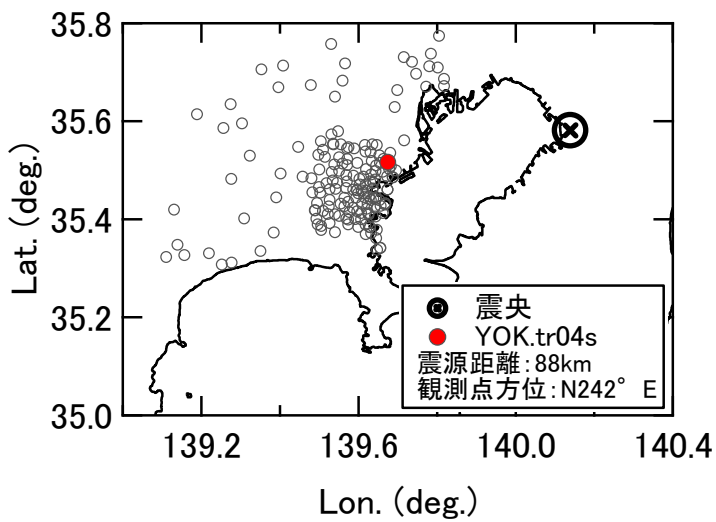


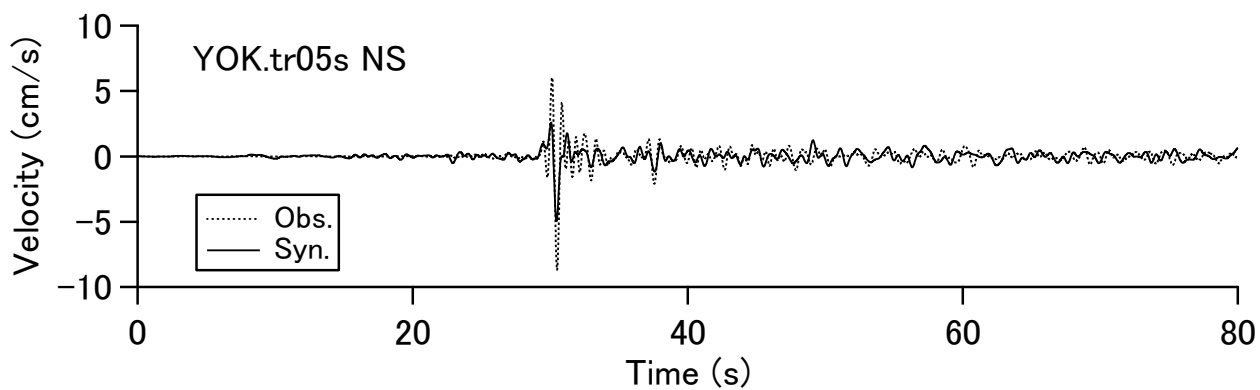
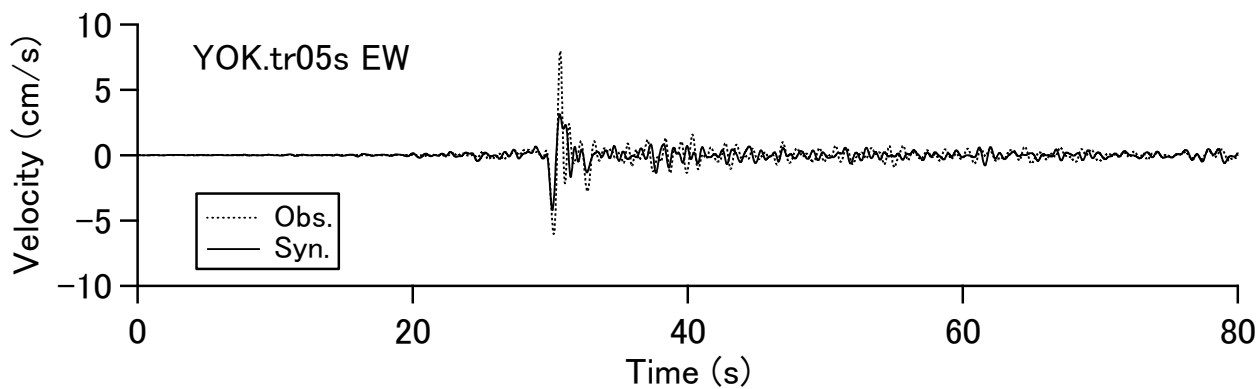
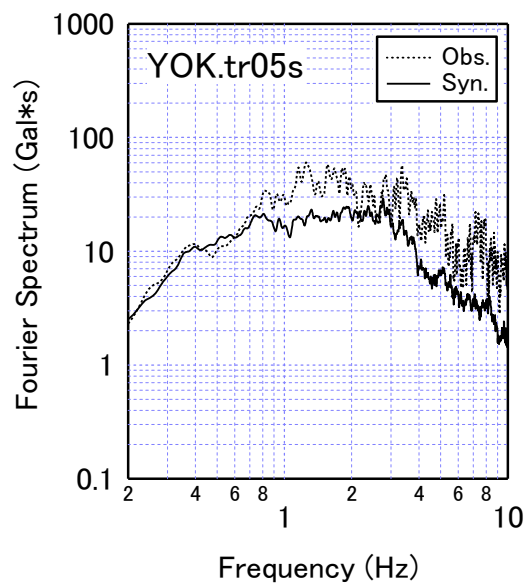
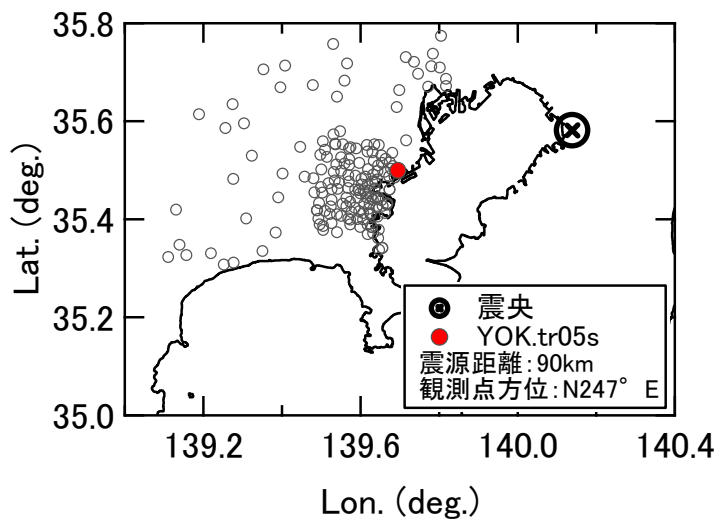


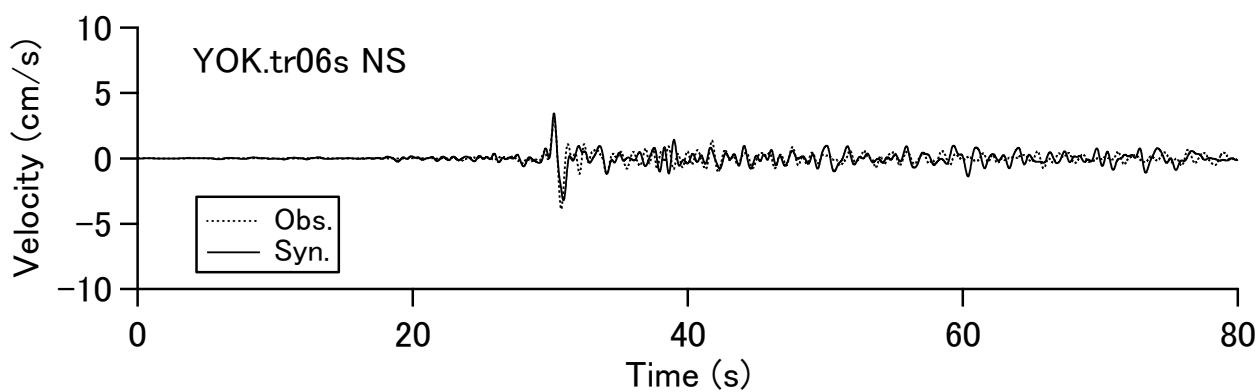
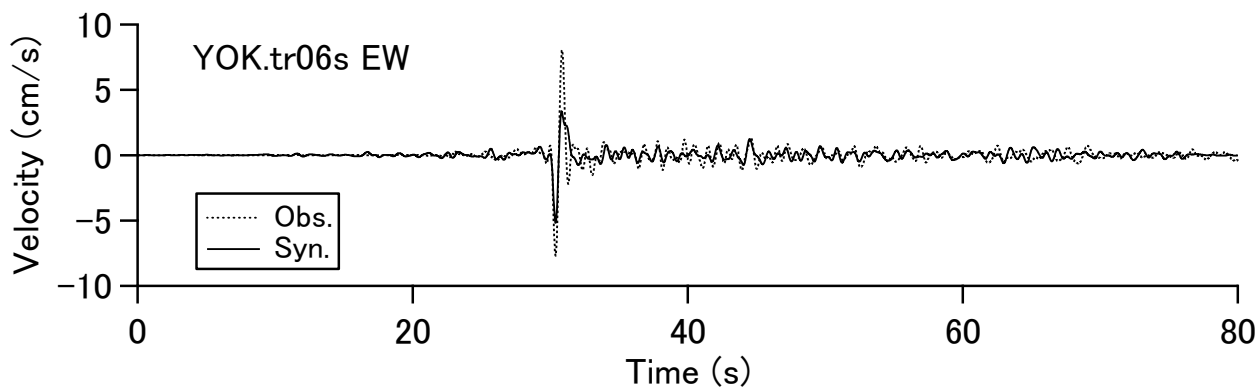
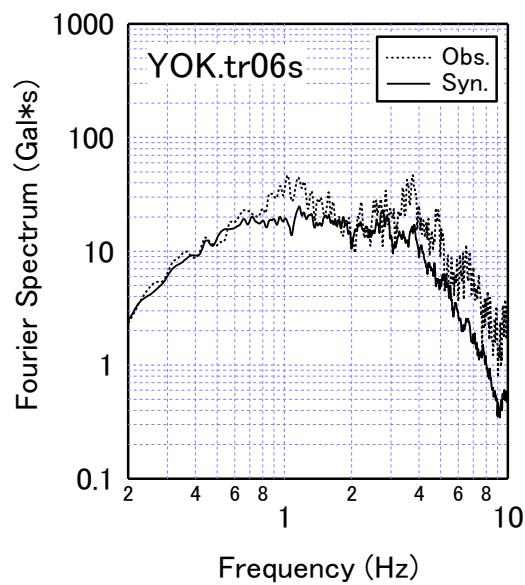
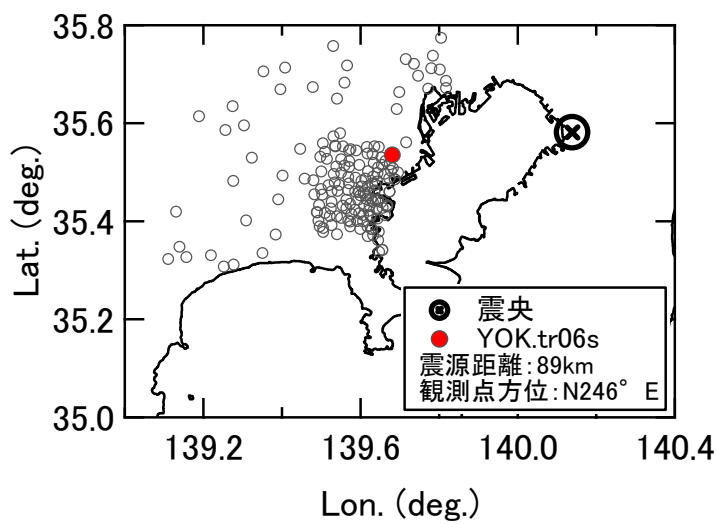




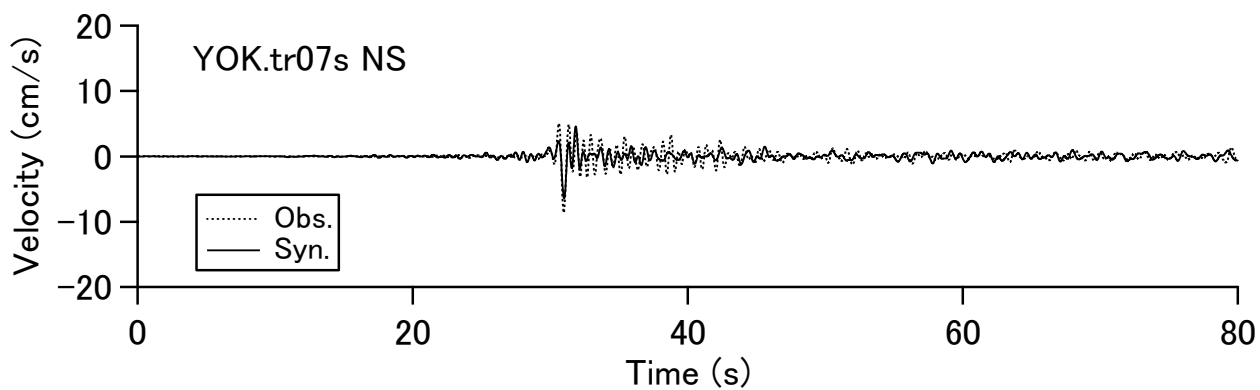
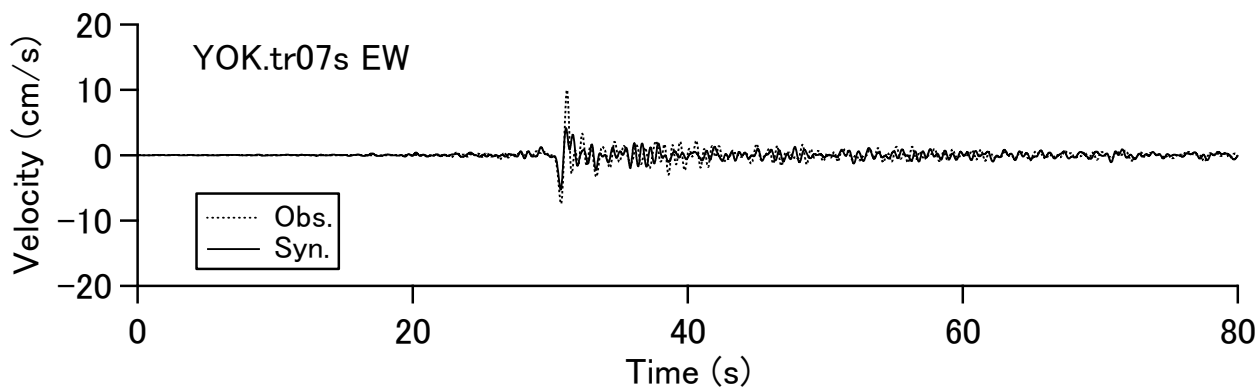
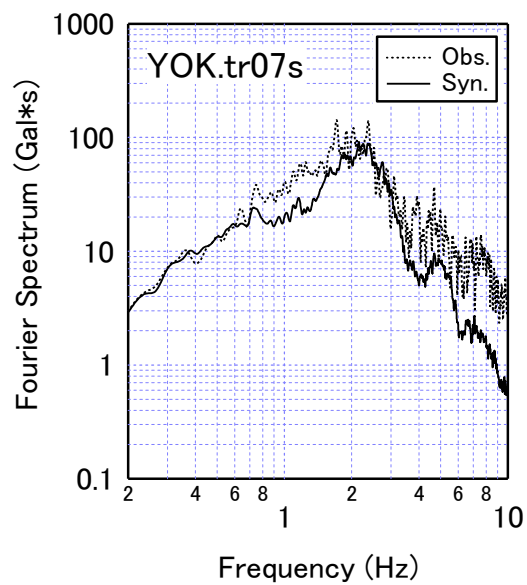
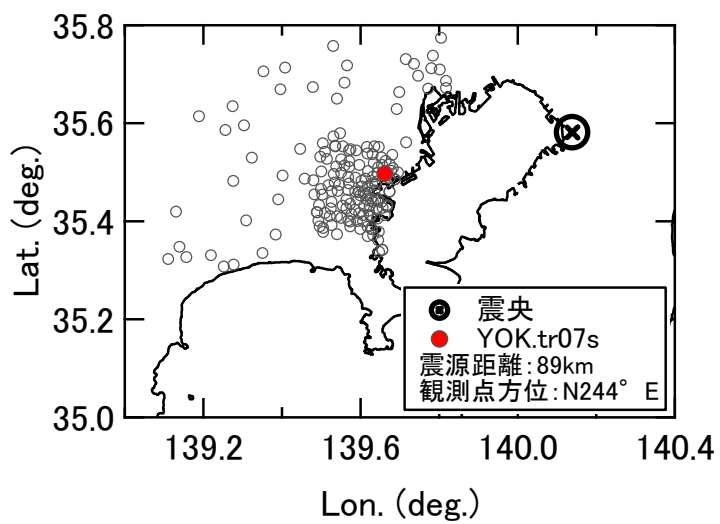


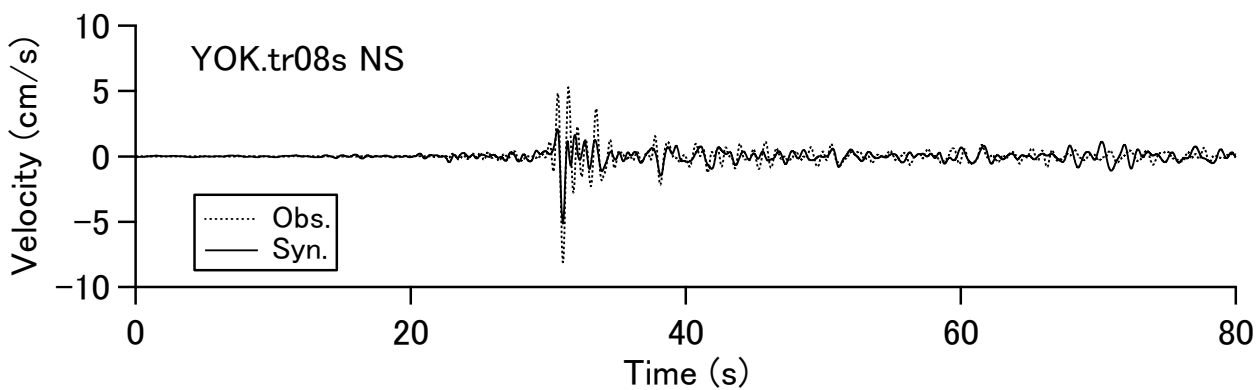
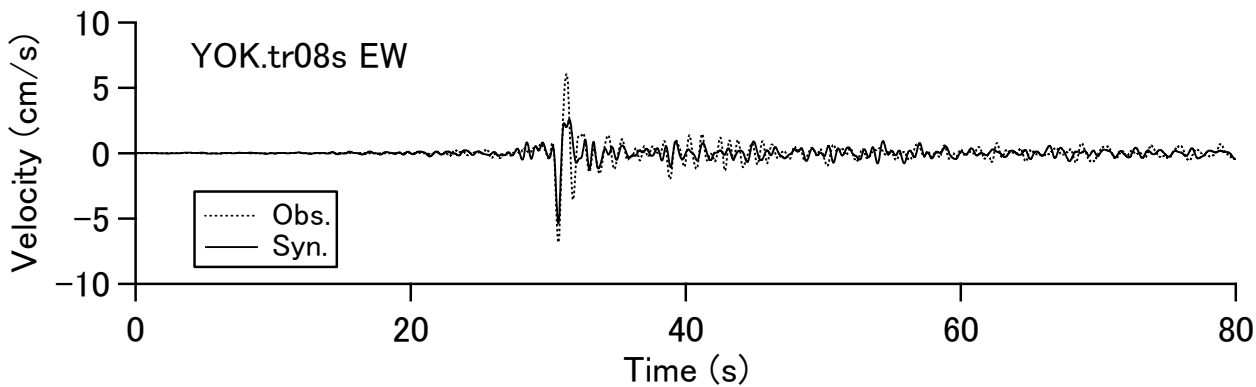
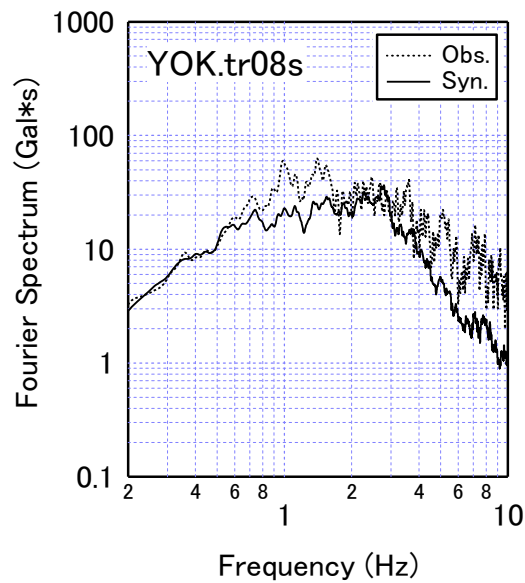
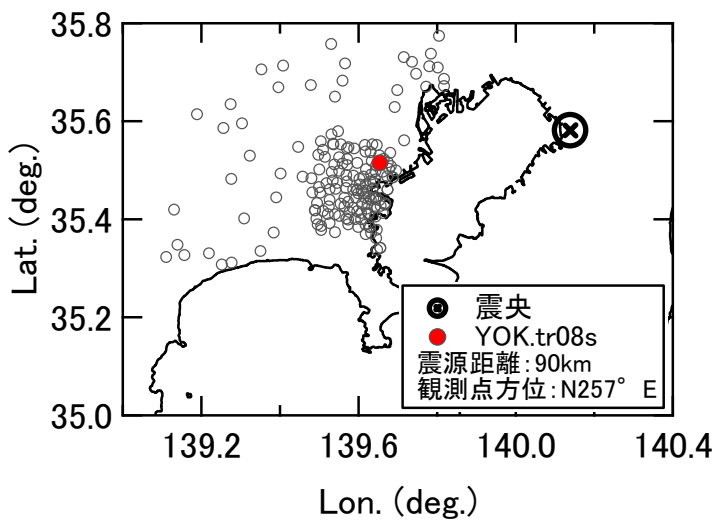


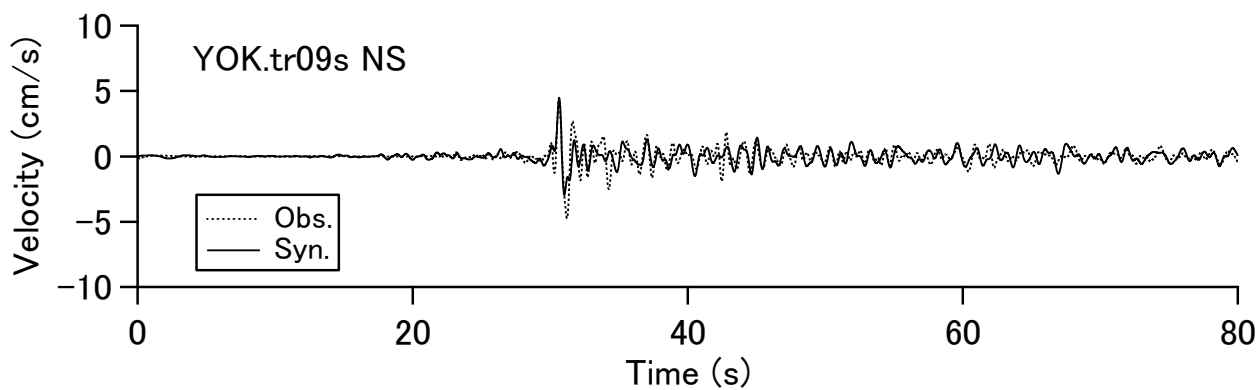
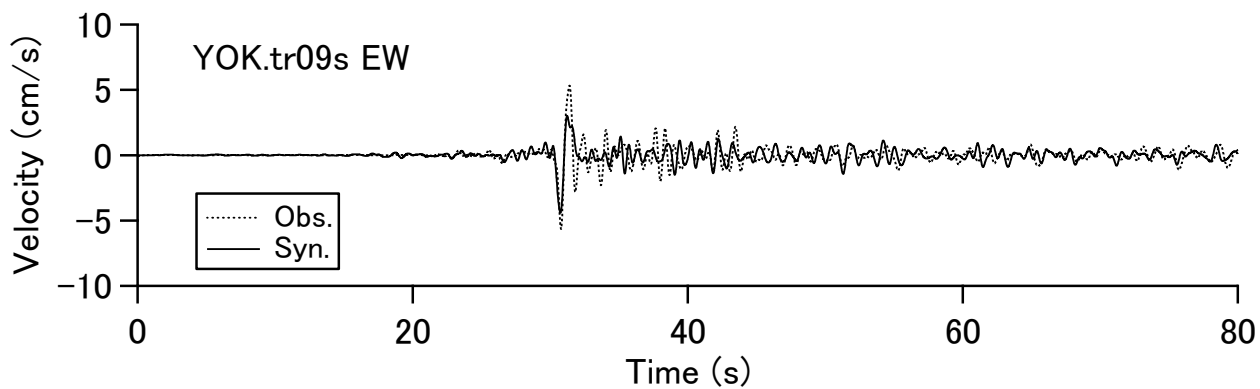
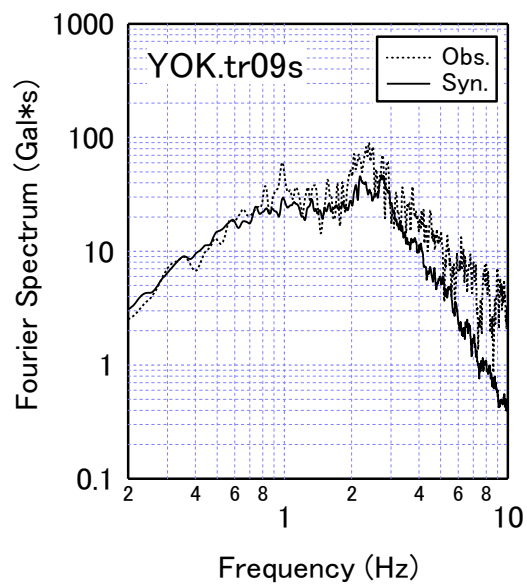
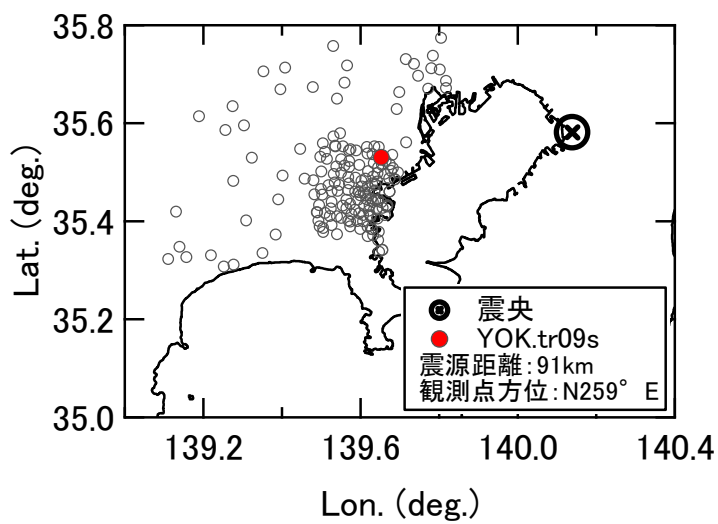


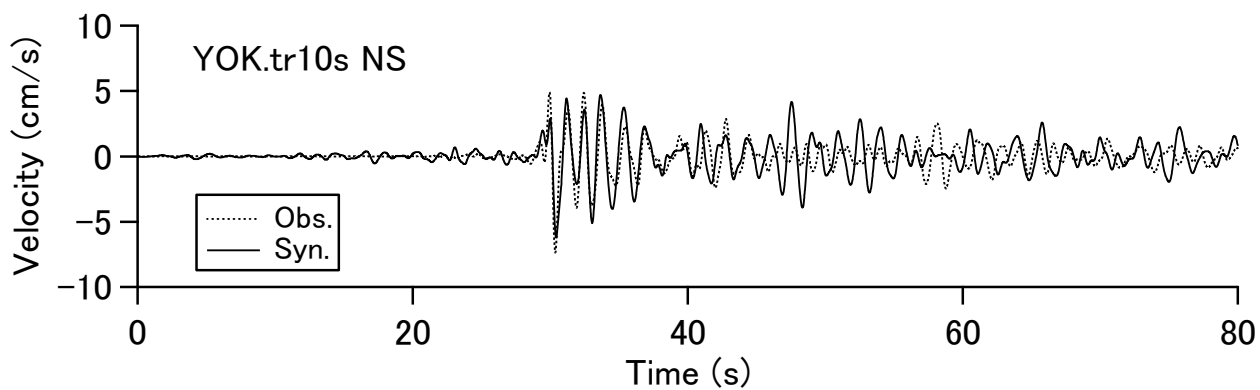
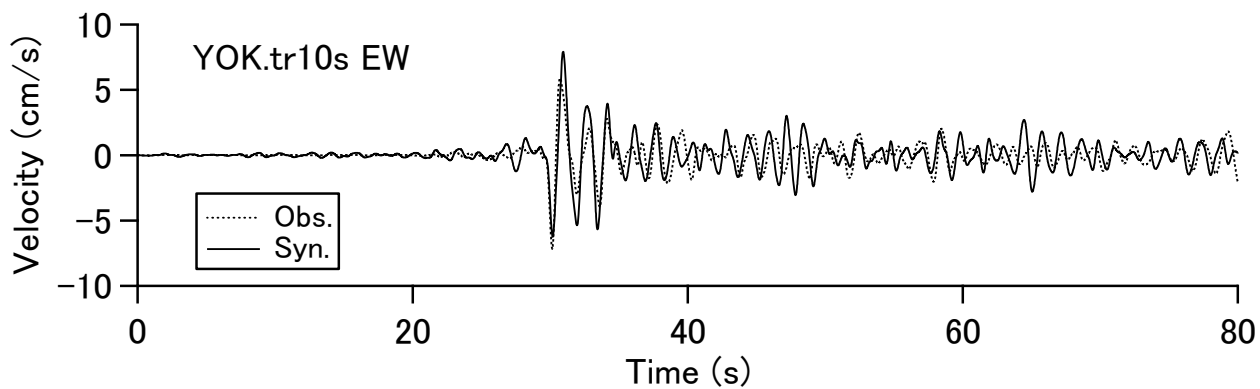
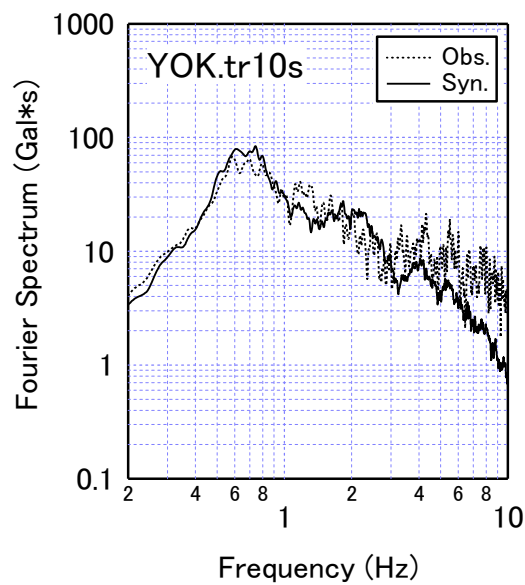
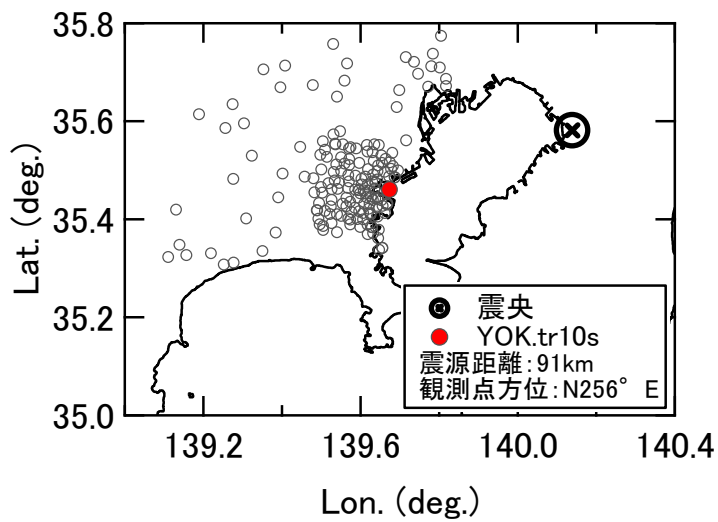


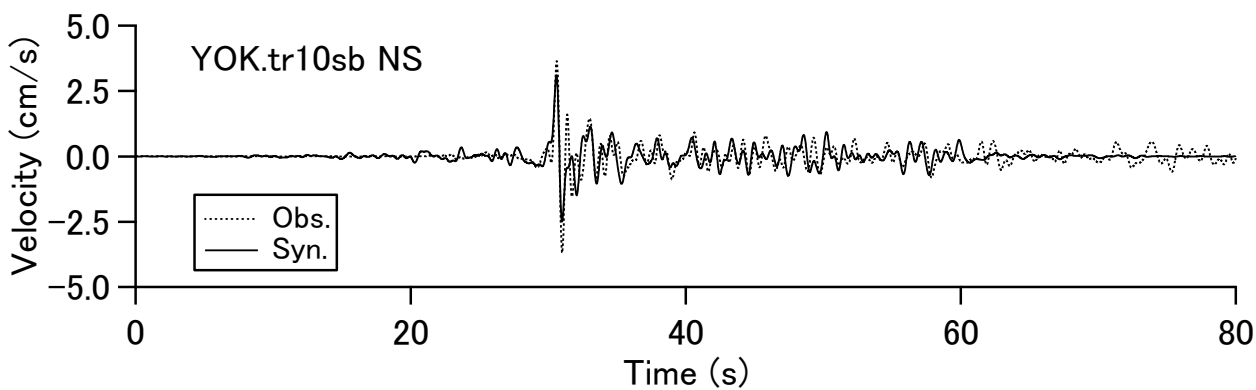
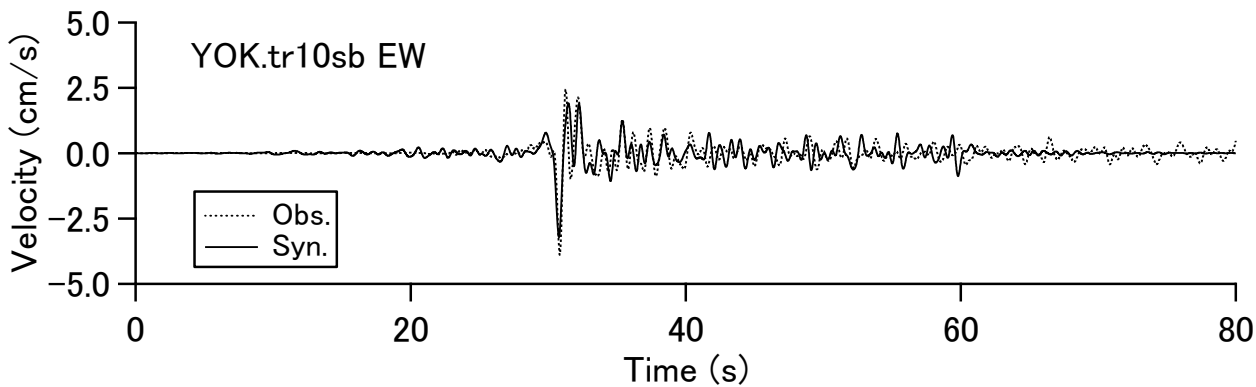
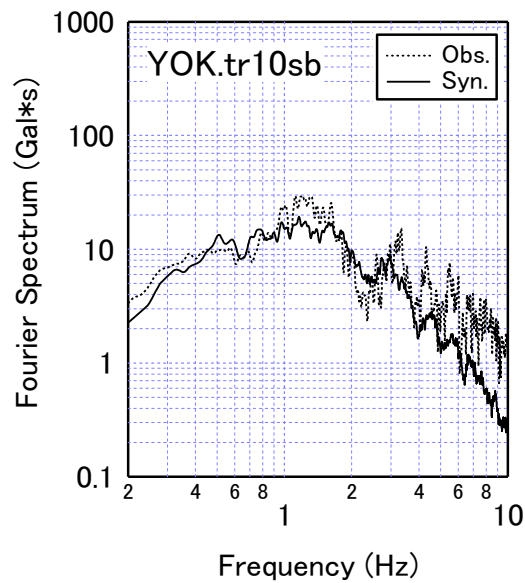
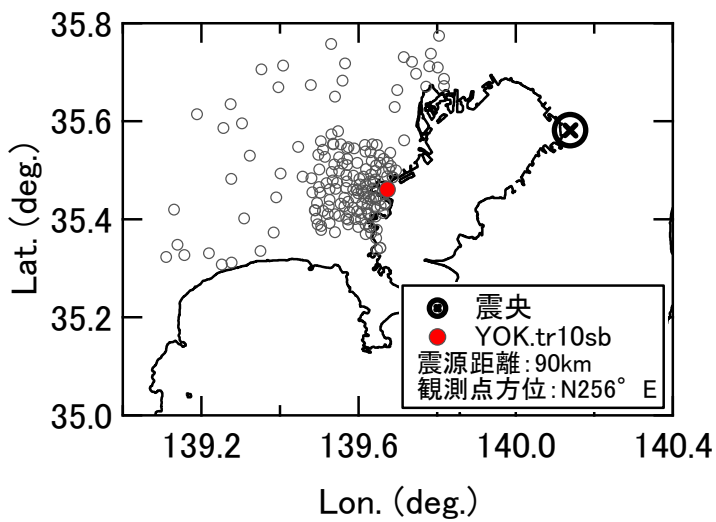


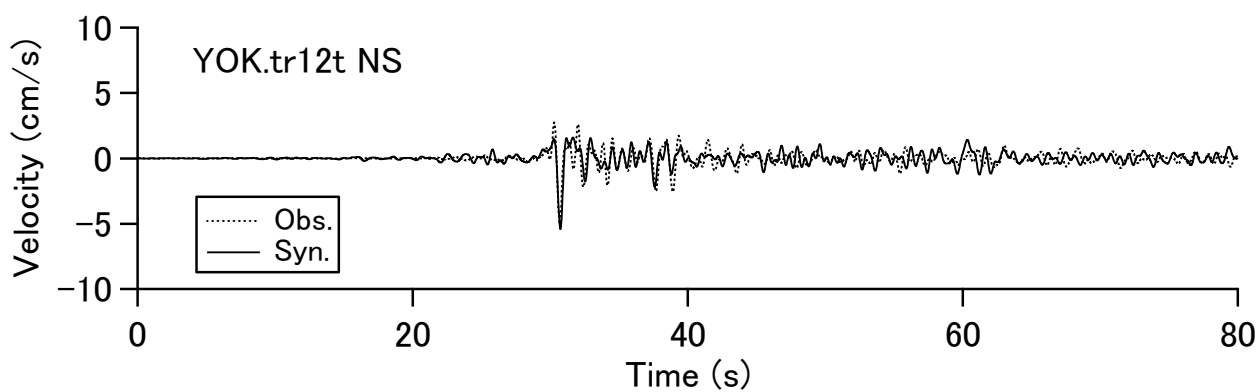
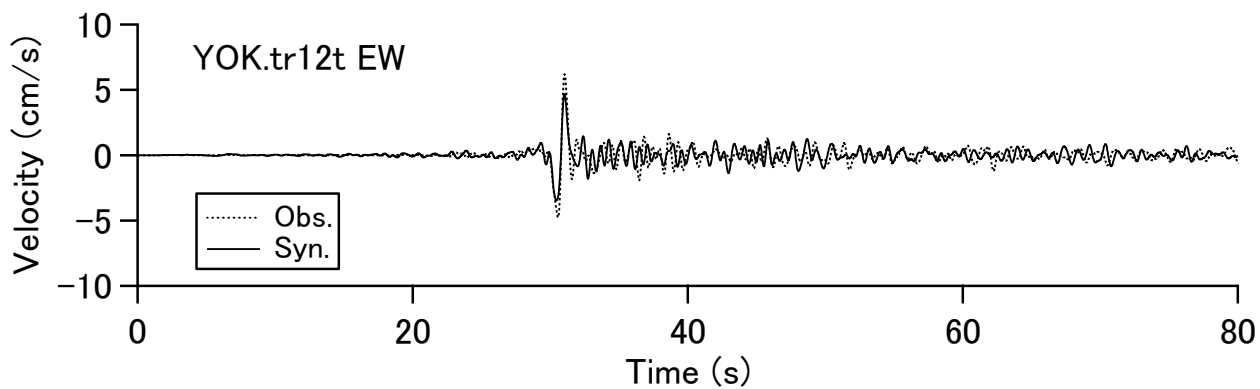
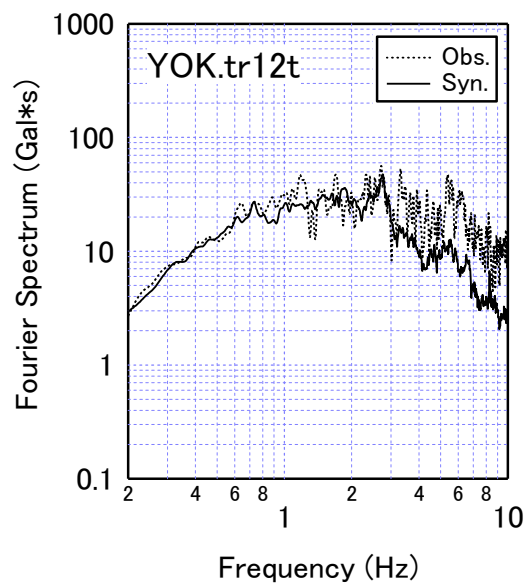
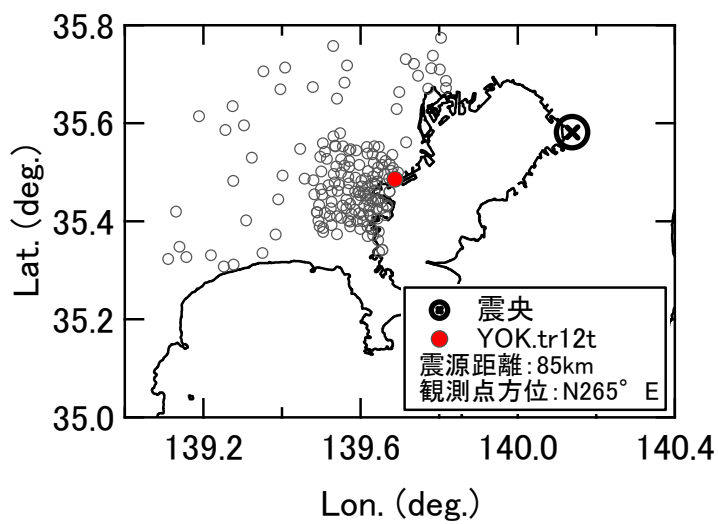


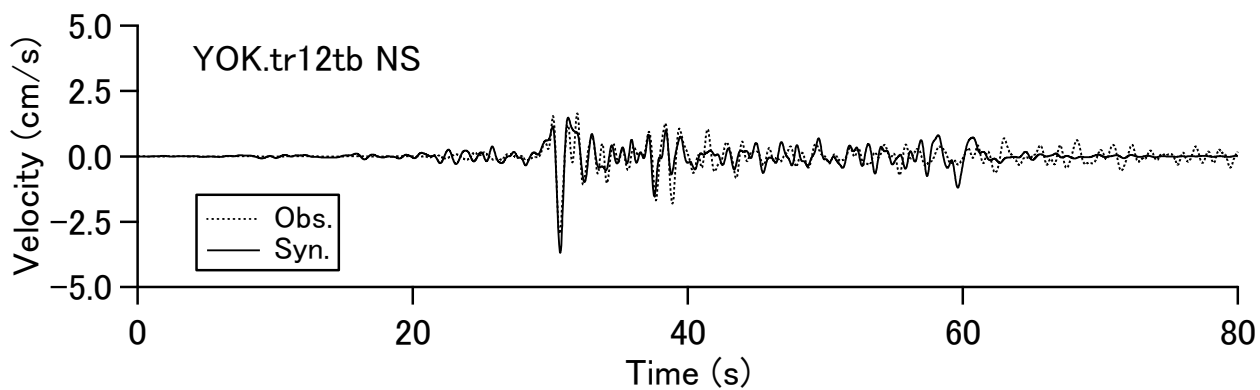
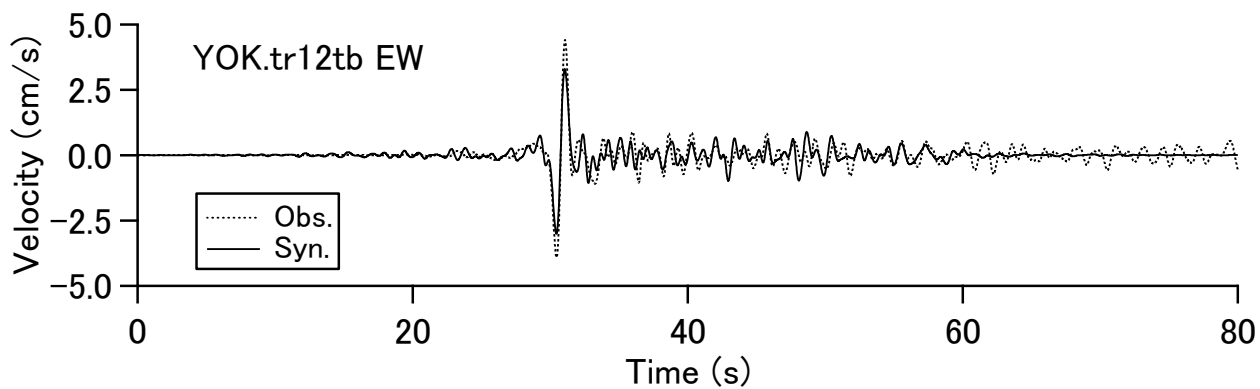
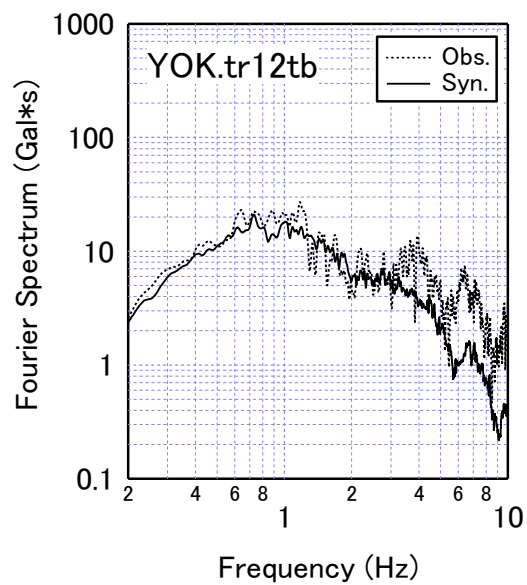
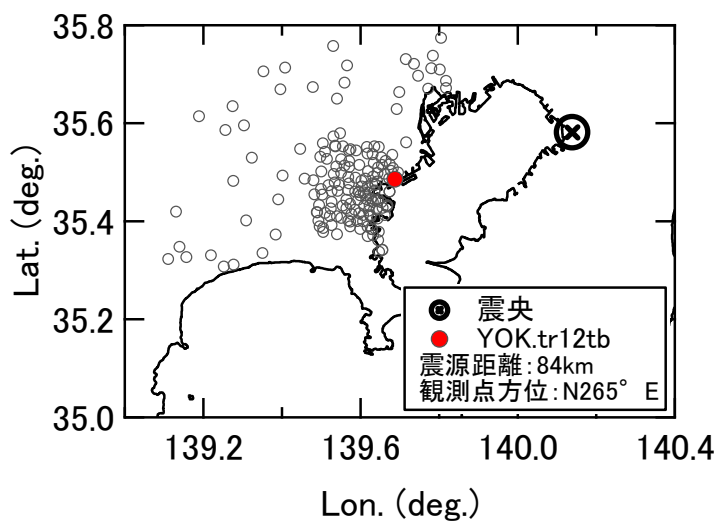


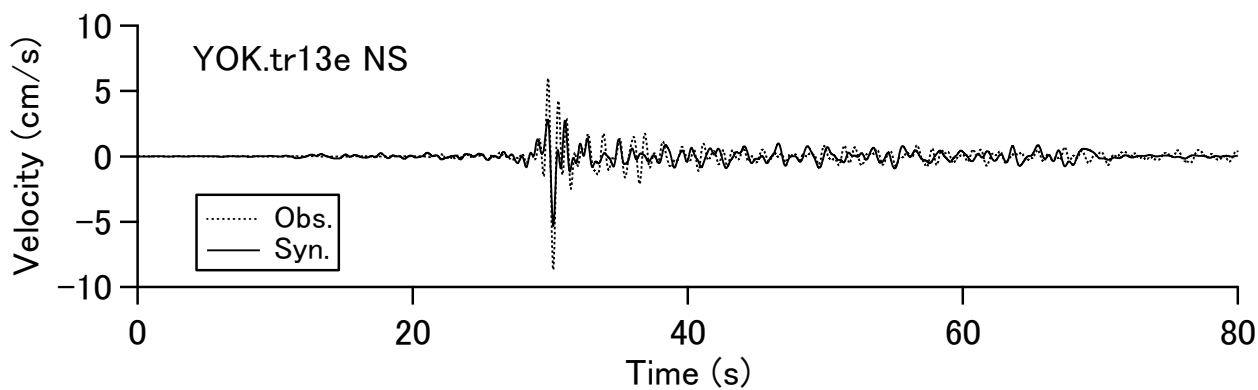
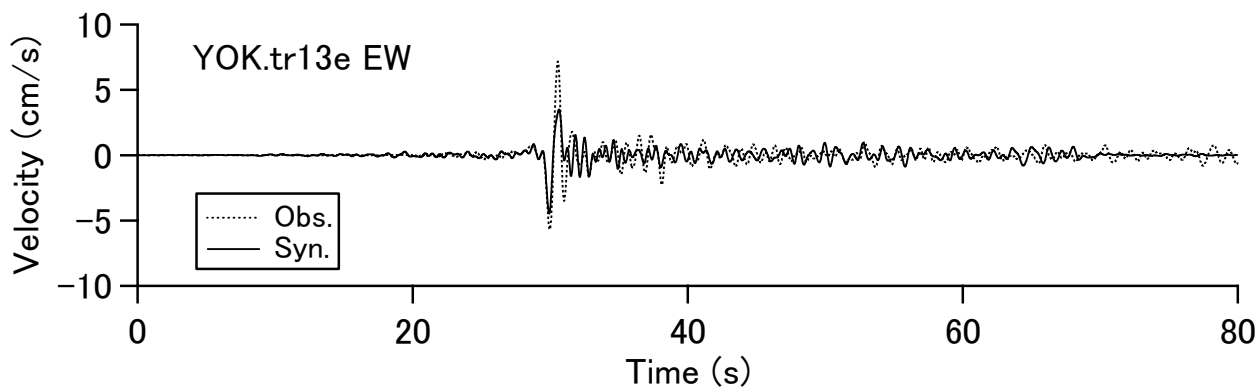
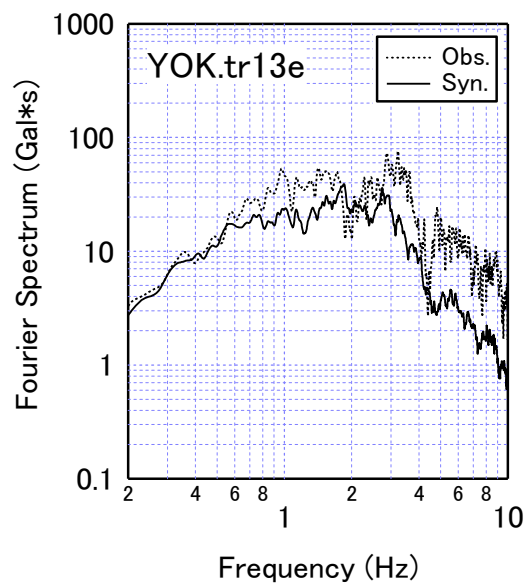
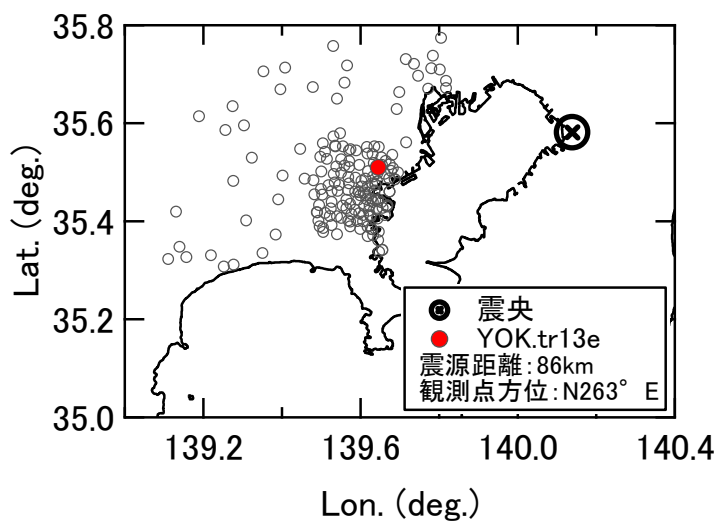




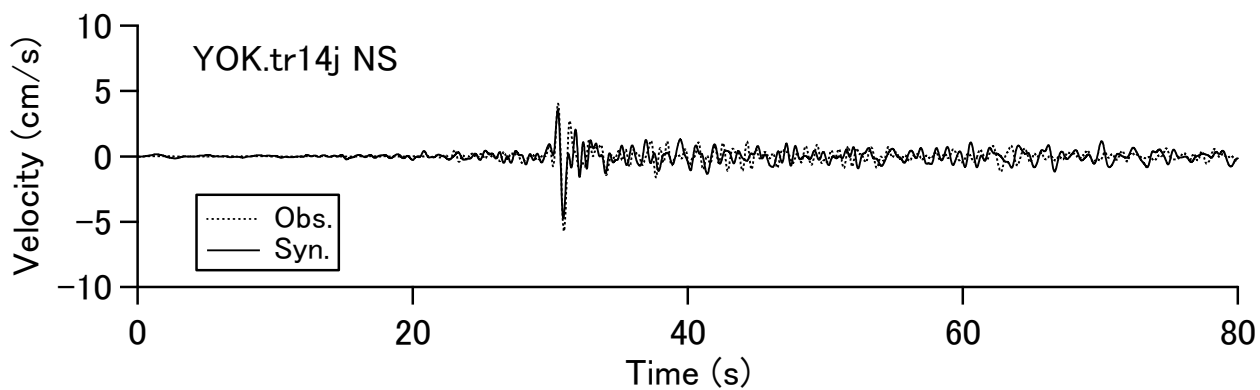
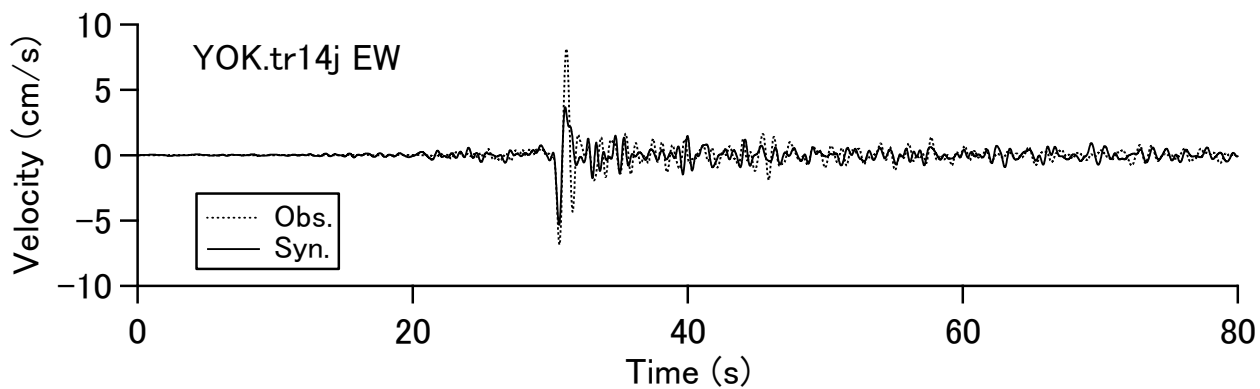
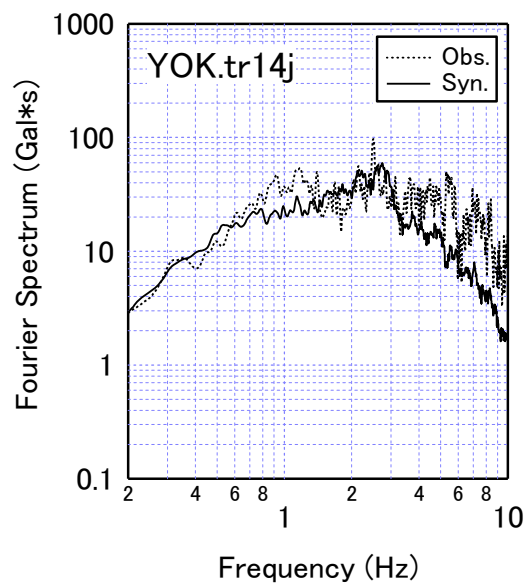
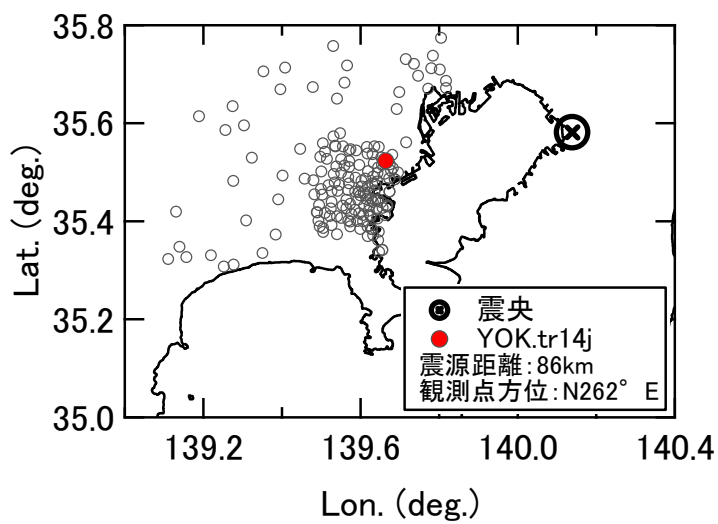


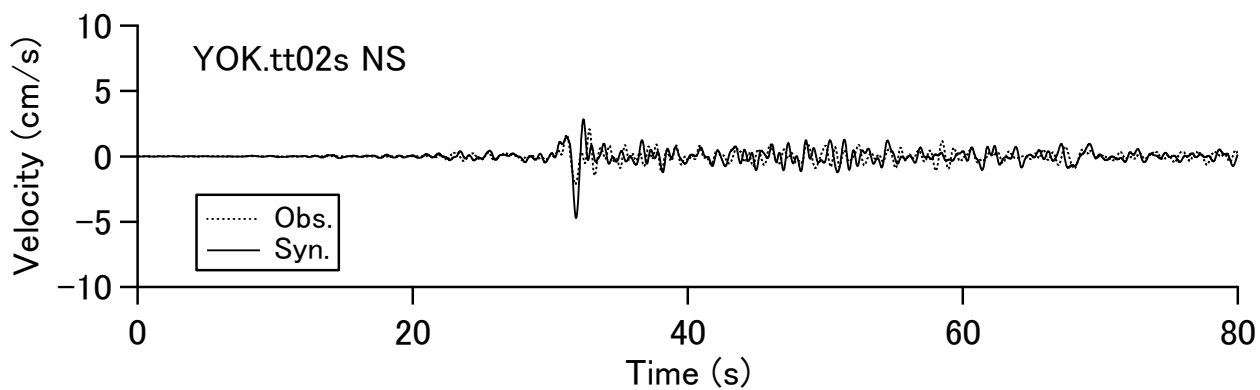
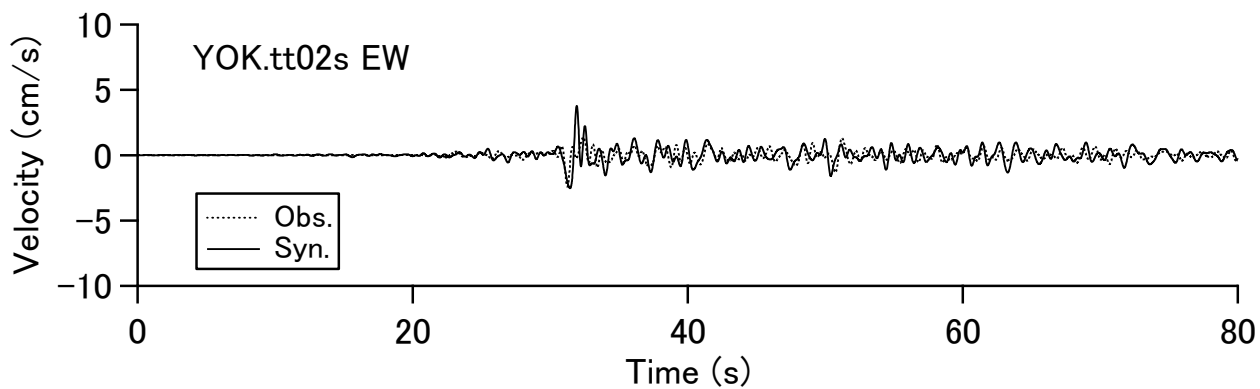
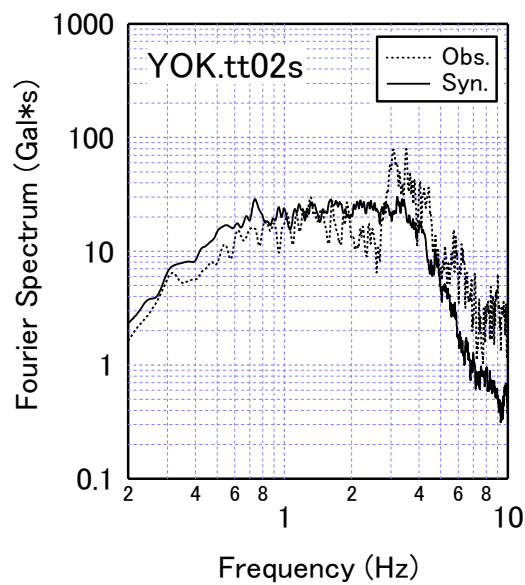
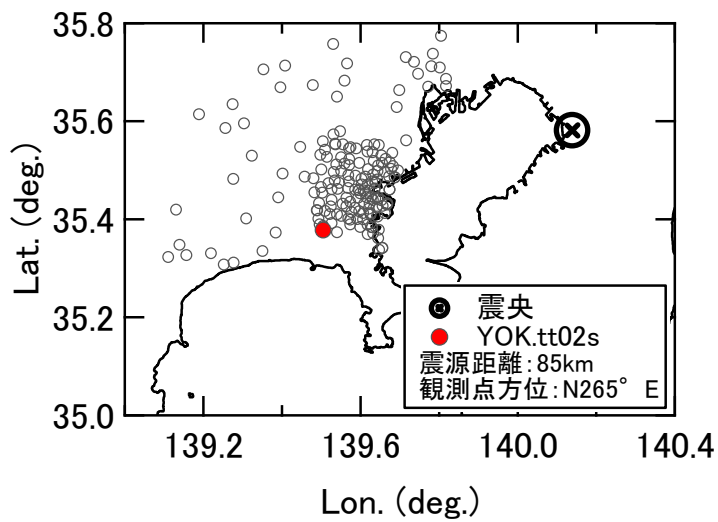


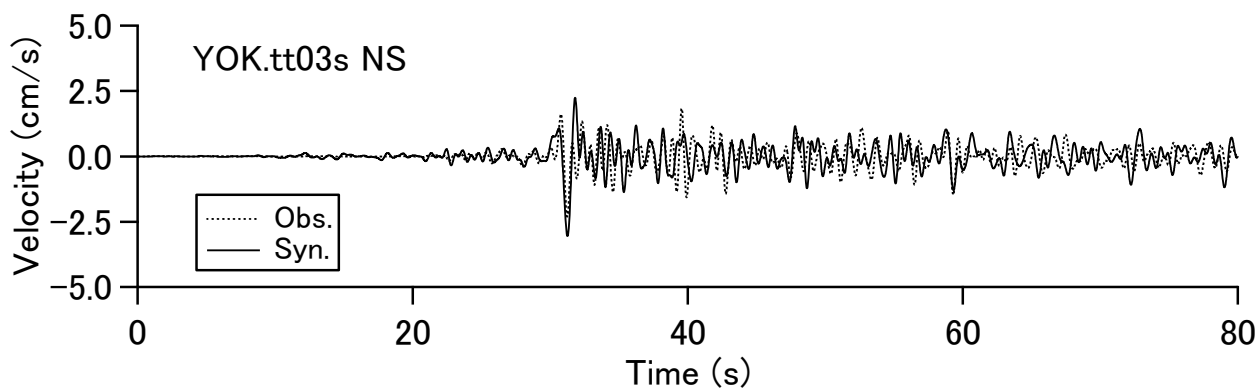
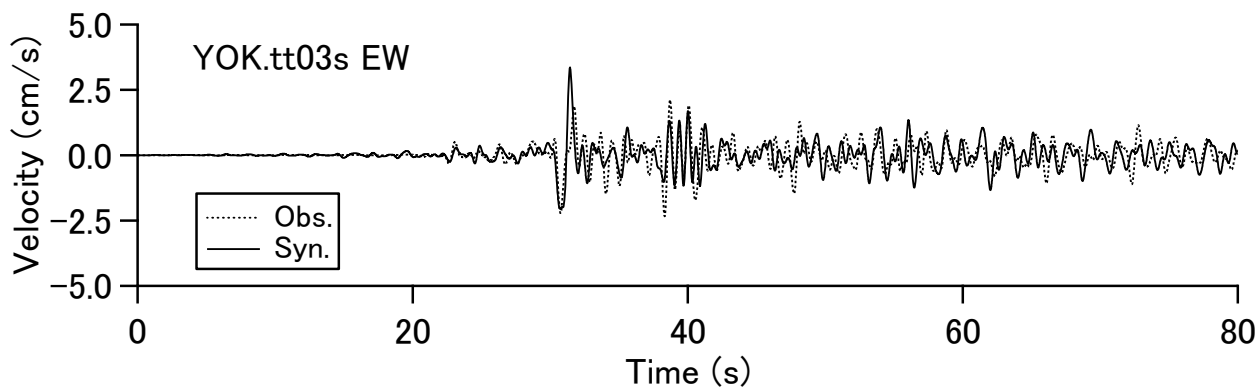
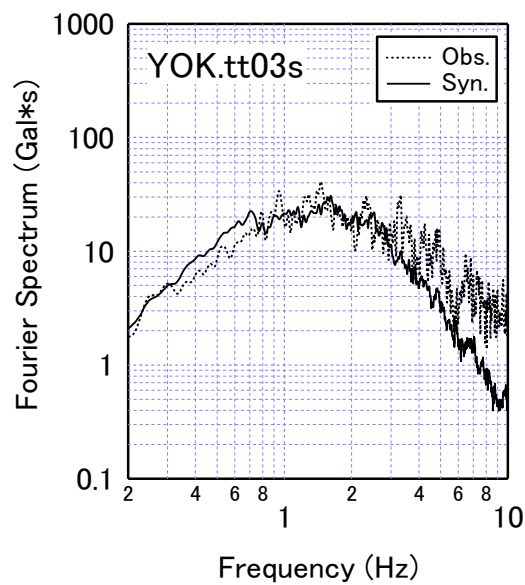
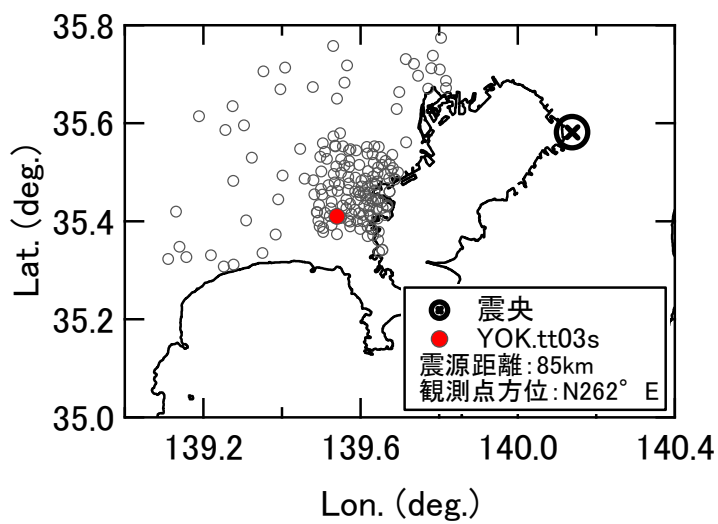


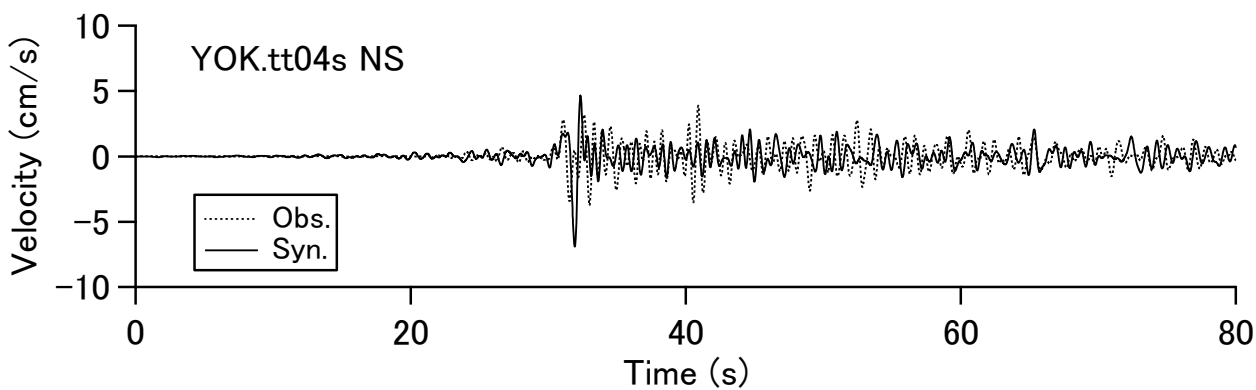
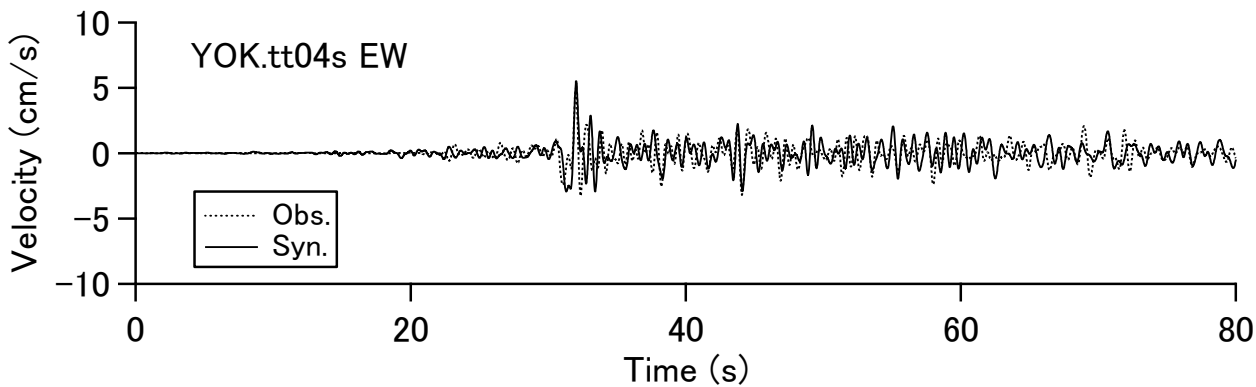
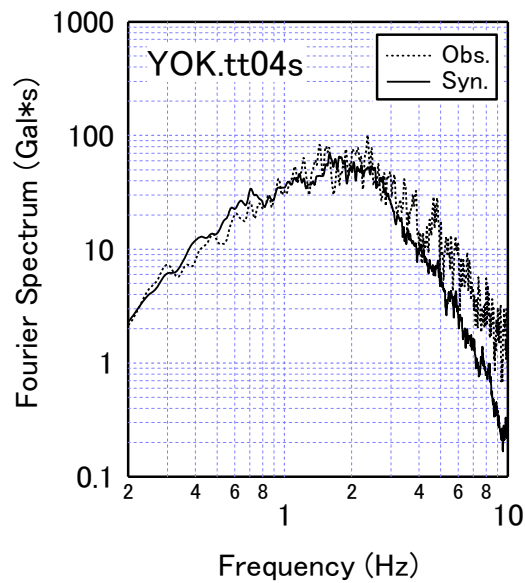
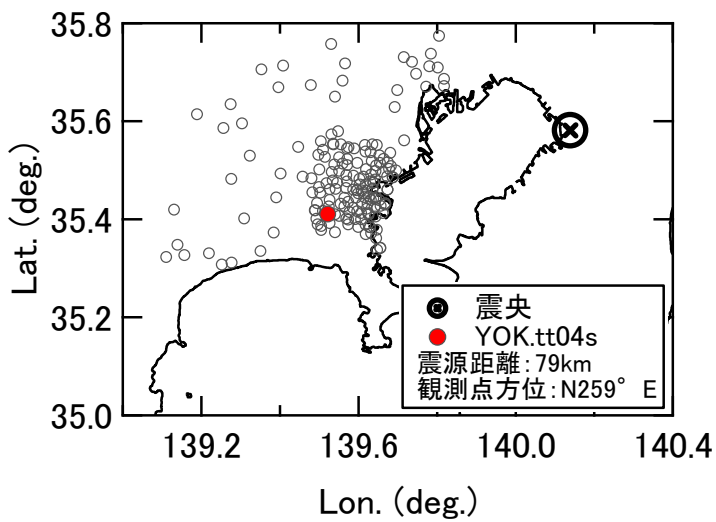


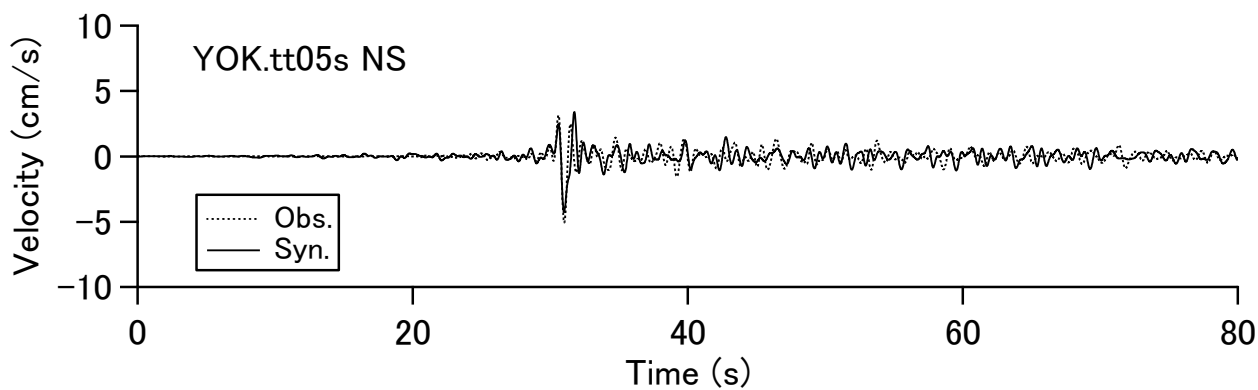
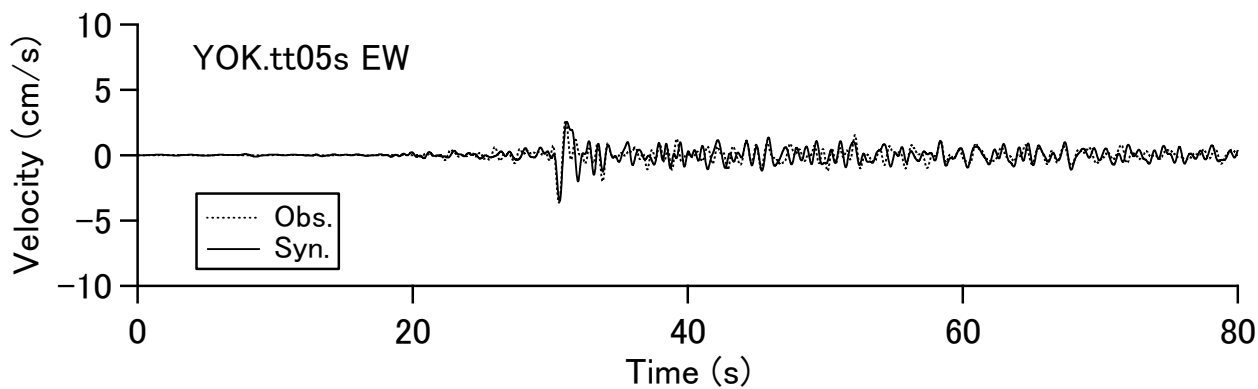
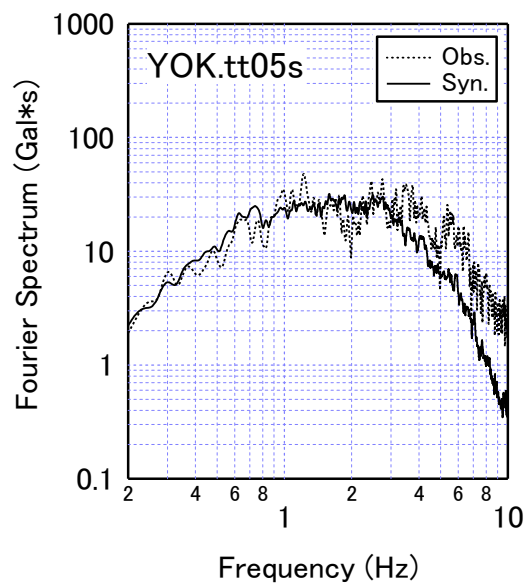
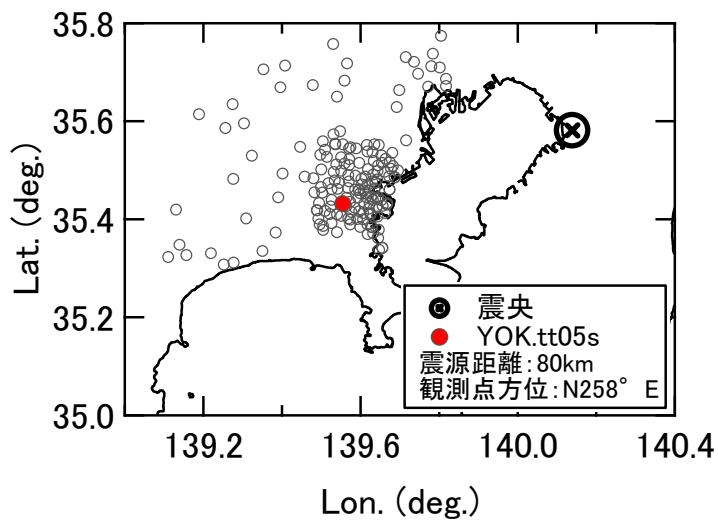


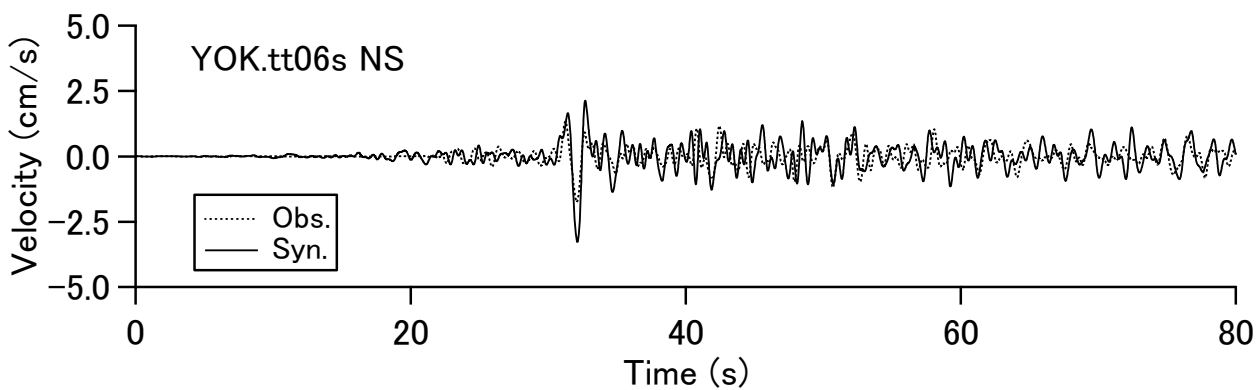
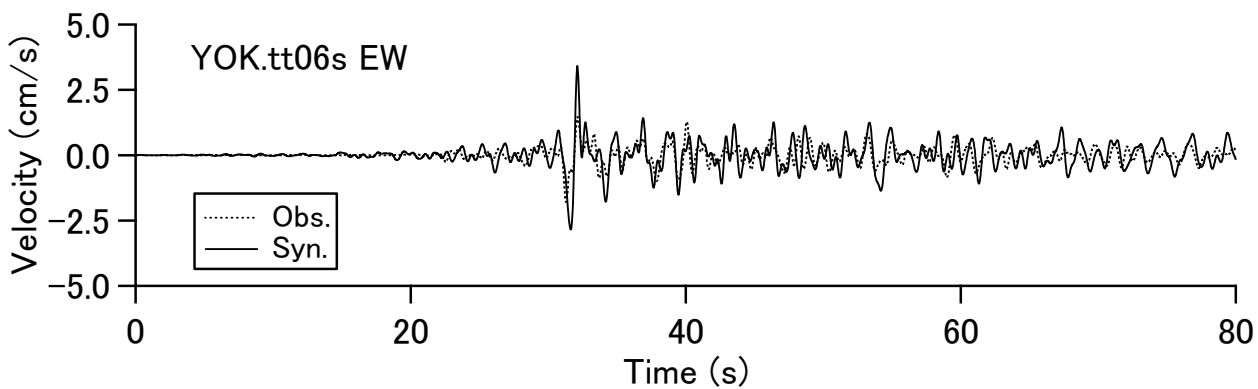
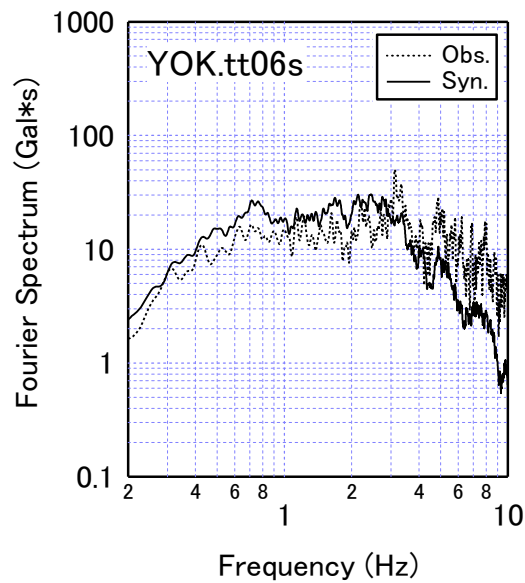
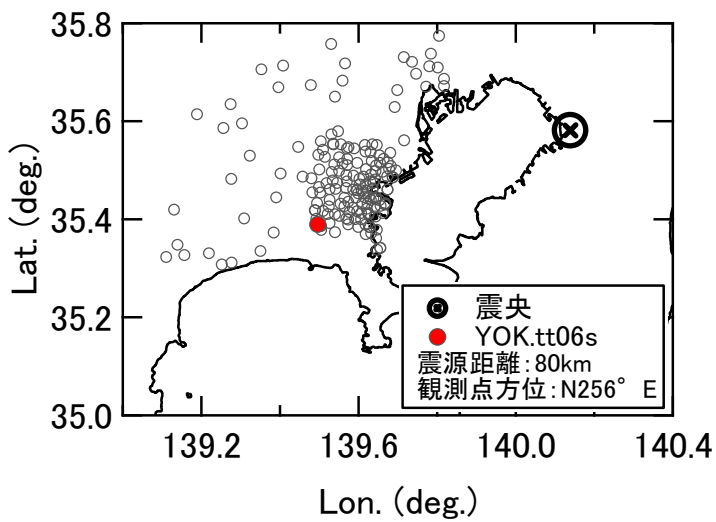


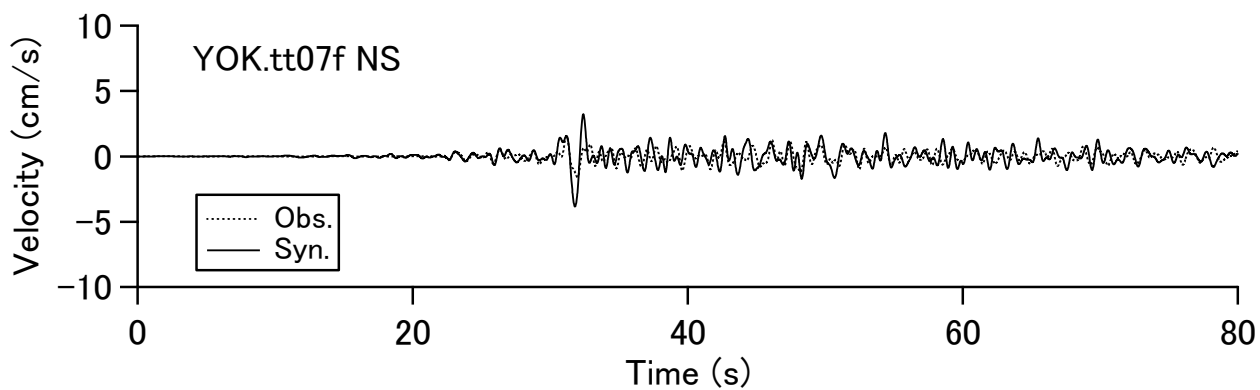
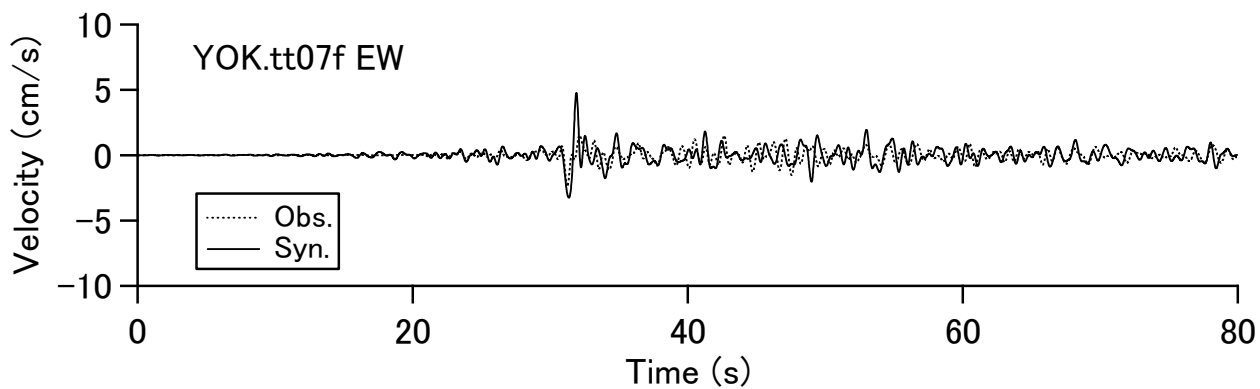
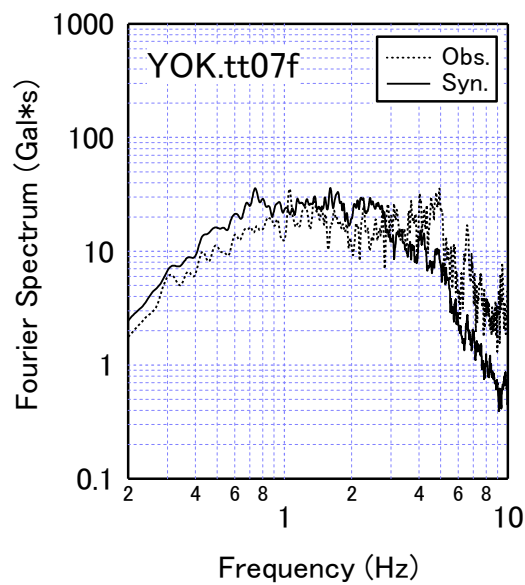
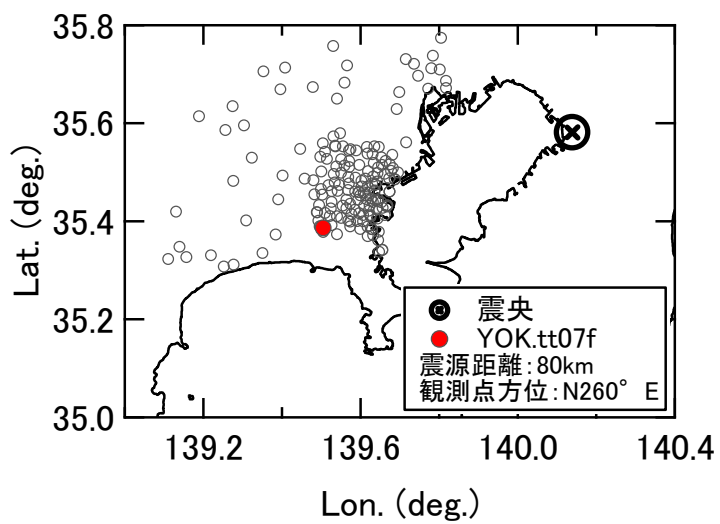


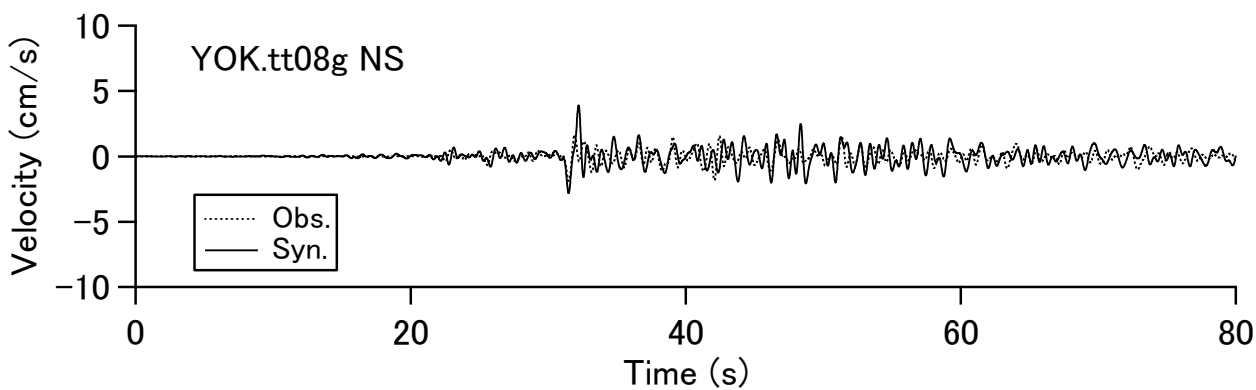
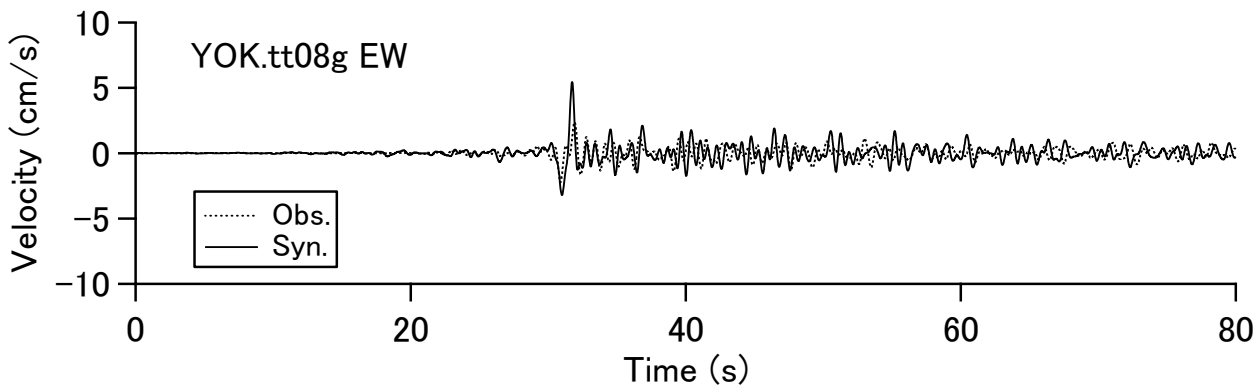
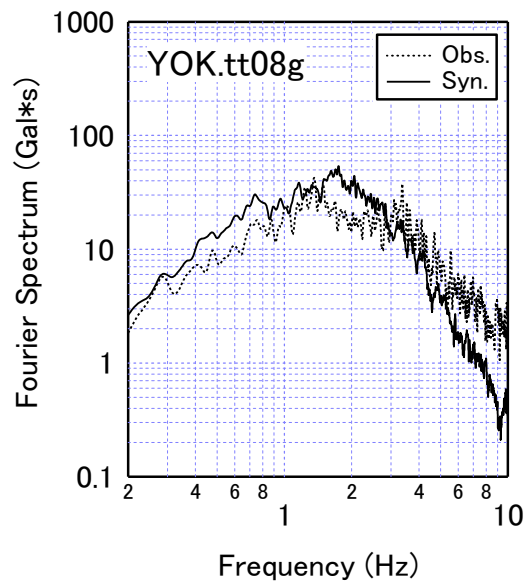
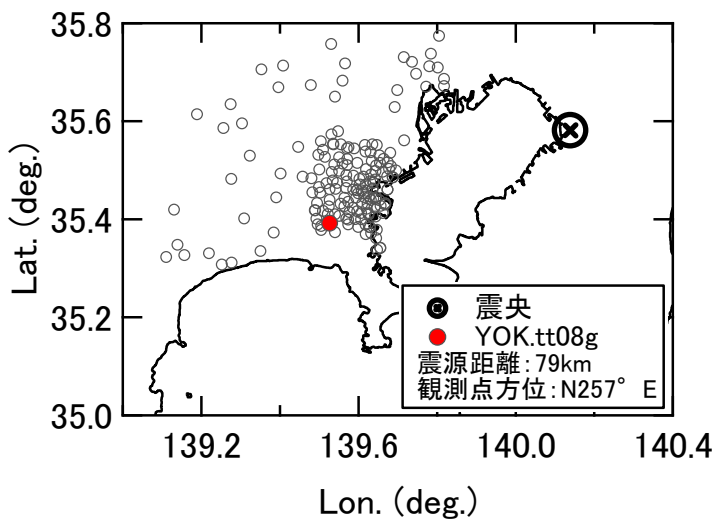




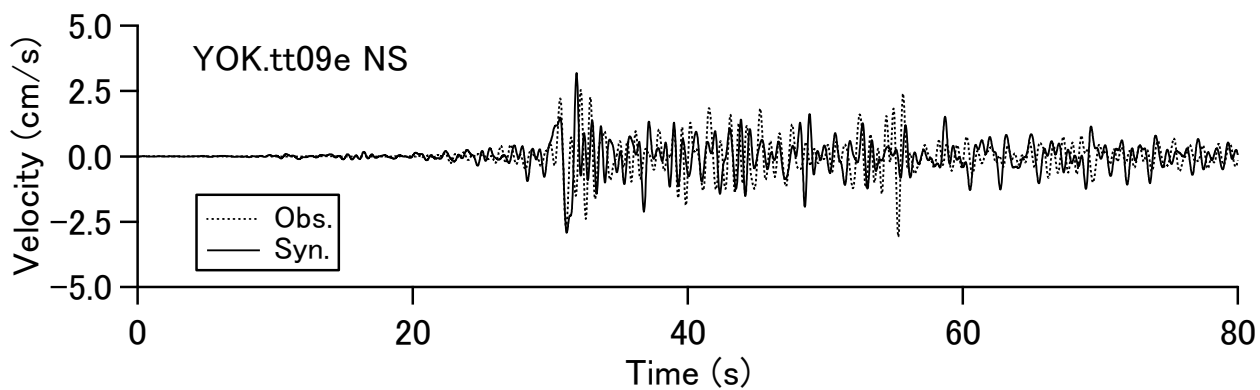
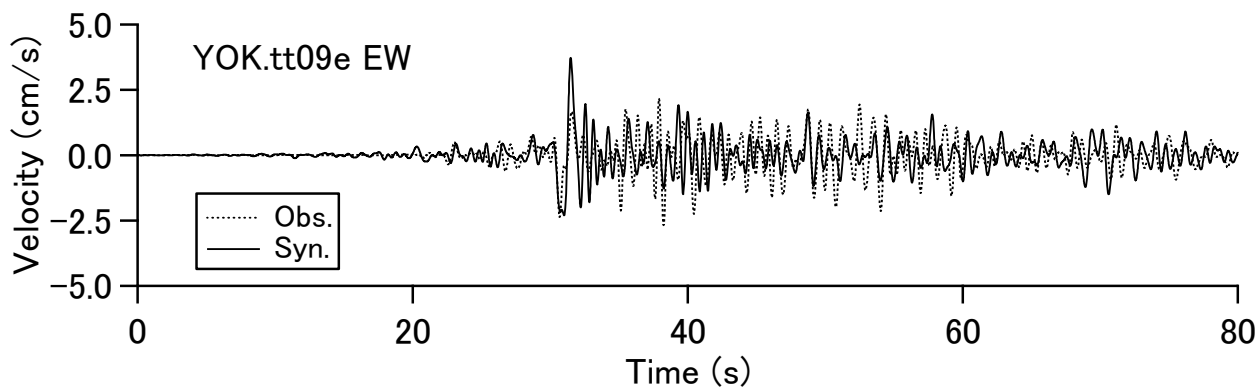
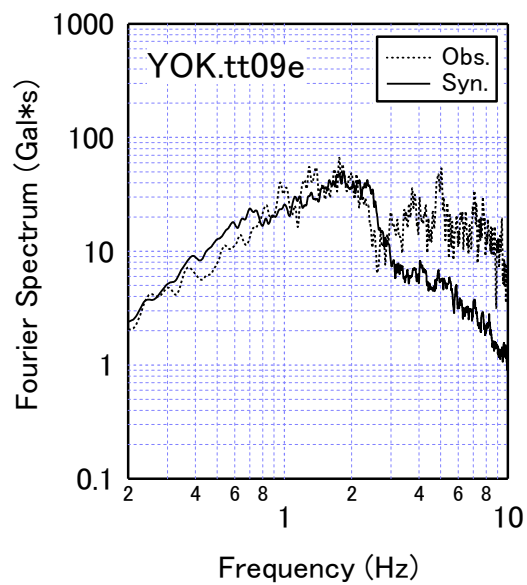
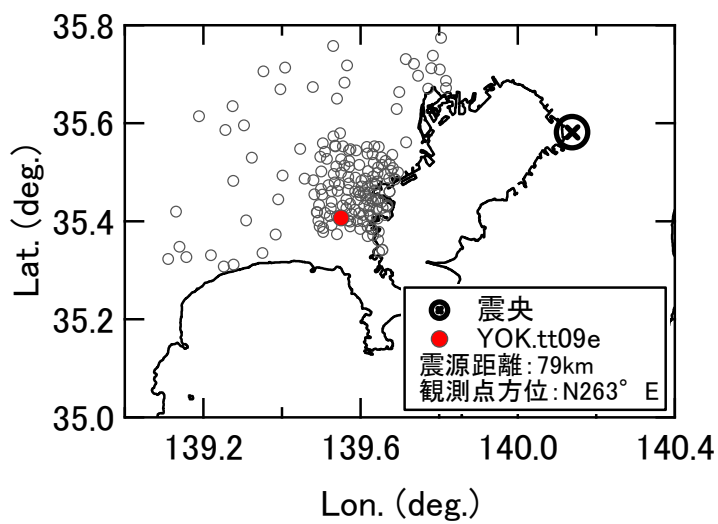


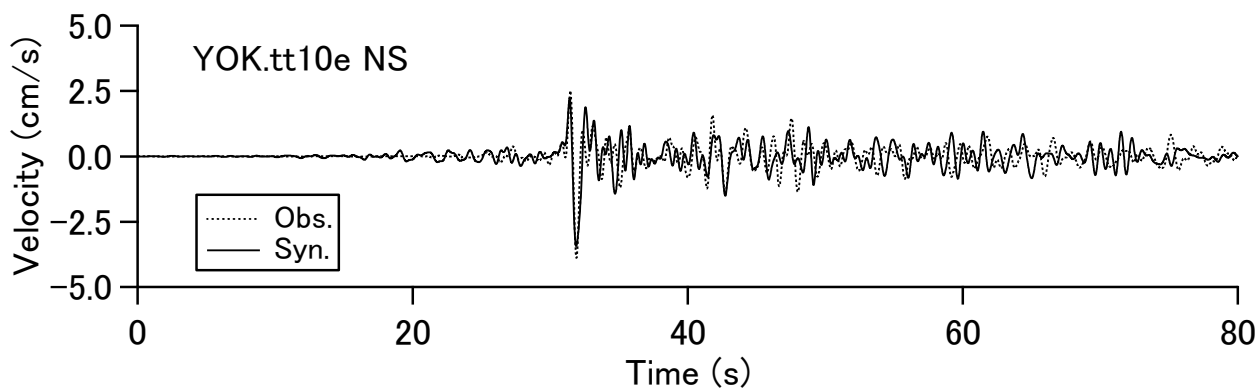
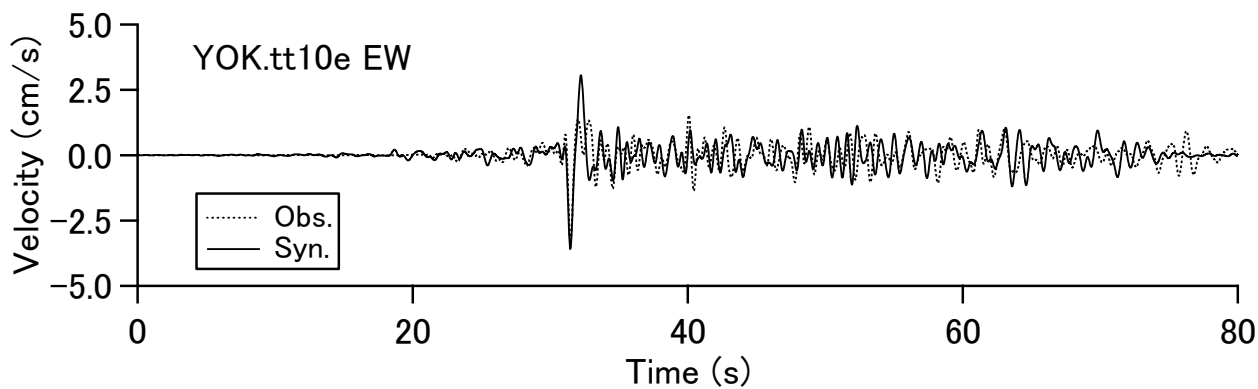
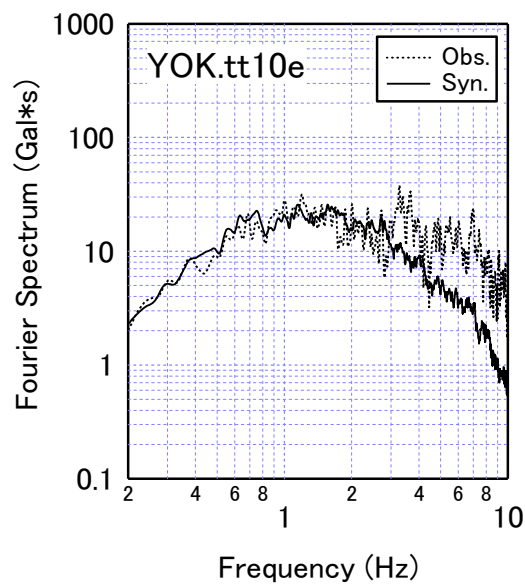
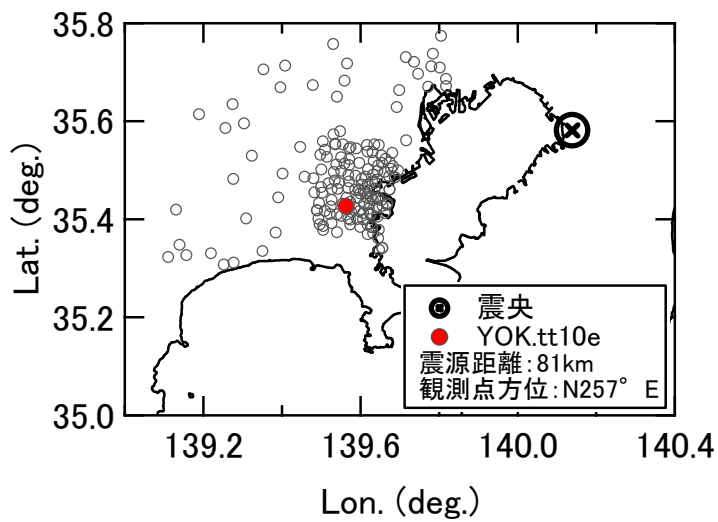












港湾空港技術研究所資料 No.1323

2016.6

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2016) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています