

# 北上川等堤防復旧技術検討会

## 報告書 資料編

### 8. 地震計設置状況及び余震観測データ

北上川等堤防復旧技術検討会  
国土交通省 東北地方整備局

## <目次>

1. 下中ノ目上流地区（鳴瀬川） ..... 1
2. 湊尻上流地区（江合川） ..... 4 3

# 下中ノ目上流地区(鳴瀬川)

# 1. 業務概要

## 1. 1 目的

東北地方の太平洋側では、大震災から4ヶ月を経過してもなお大きな余震が続いており、時折鳴瀬川堤防でも震度4～5程度の揺れが発生している。

このような状況において、余震データを収集しこの記録を分析することによって、鳴瀬川堤防左岸 30.3k～30.7k 付近(下中ノ目上流地区)での地震時特性を明らかにすることを目的とする。

ここに、地震動特性とは、以下の項目をいう。

- ① 地盤の揺れ方 (加速度、変位時刻歴波形、振動方向)
- ② 堤体の揺れ方 ((加速度、変位時刻歴波形、振動方向)
- ③ 被災断面と無被災断面における地盤および盛土の揺れ方の違い

## 1. 2 地震計の設置箇所と数量

地震計は、鳴瀬川堤防左岸 30.3k～30.7k 付近に6箇所設置した。設置位置条件は、以下のとおりである。

表-1.2.1 地震計設置条件一覧

河川名	被災箇所	設置地点	地震計	
			番号	位置記号
鳴瀬川 (左岸)	被災	30.3k 川裏 (法尻付近の地盤面)	200552	J 30.3U
	被災	30.4k 天端 (盛土天端法肩付近)	200551	J 30.4C
	被災	30.4k 川表 (法尻付近の盛土面)	200557	J 30.4O
	無被災	30.7k 川裏 (法尻付近の地盤面)	200554	J 30.7U
	無被災	30.7k 天端 (盛土天端法肩付近)	200555	J 30.7C
	無被災	30.7k 川表 (法尻付近の地盤面)	200558	J 30.7O

地震計の設置位置 (平面) を図-1.2.1 に示す。

また、被災断面 (30.3k) と無被災断面 (30.7k) における断面位置を図-1.2.2、図-1.2.3 に示す。

地震計の設置およびバッテリー交換 (データ回収) 日時については、表-1.2.2 地震計設置、バッテリー交換表に示す。

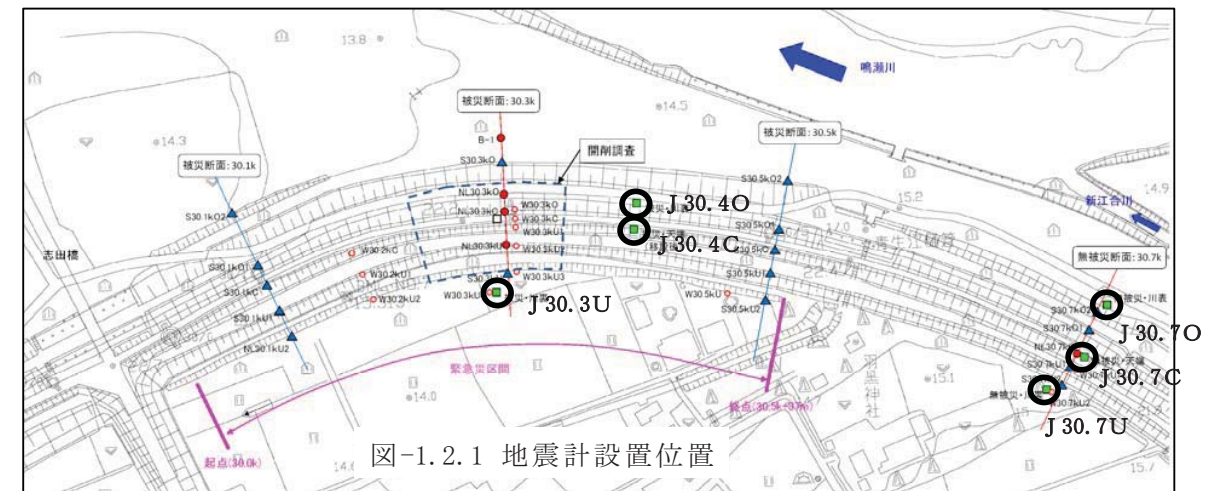


図-1.2.1 地震計設置位置

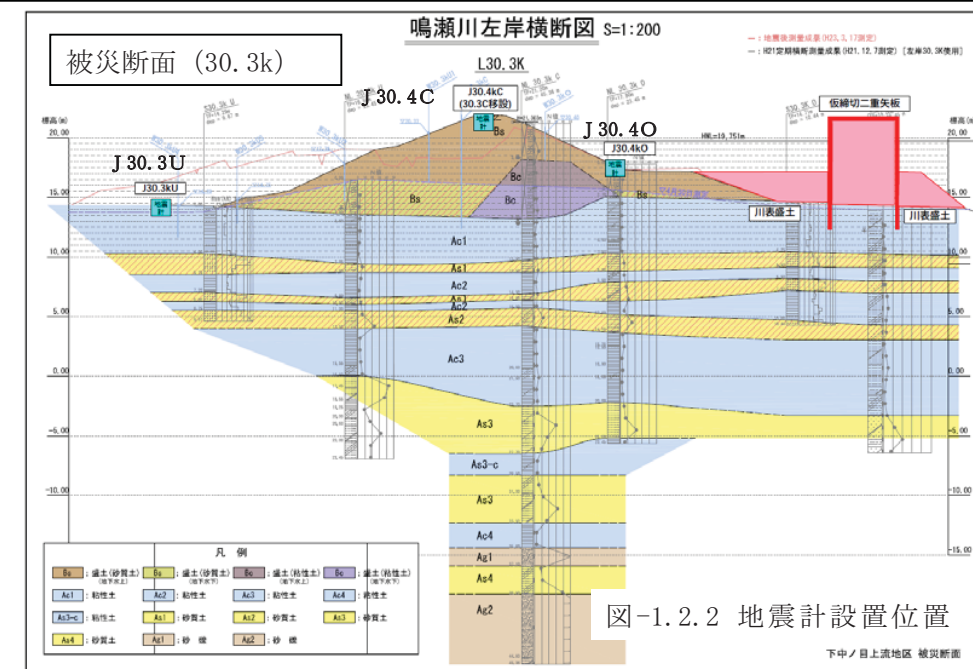


図-1.2.2 地震計設置位置

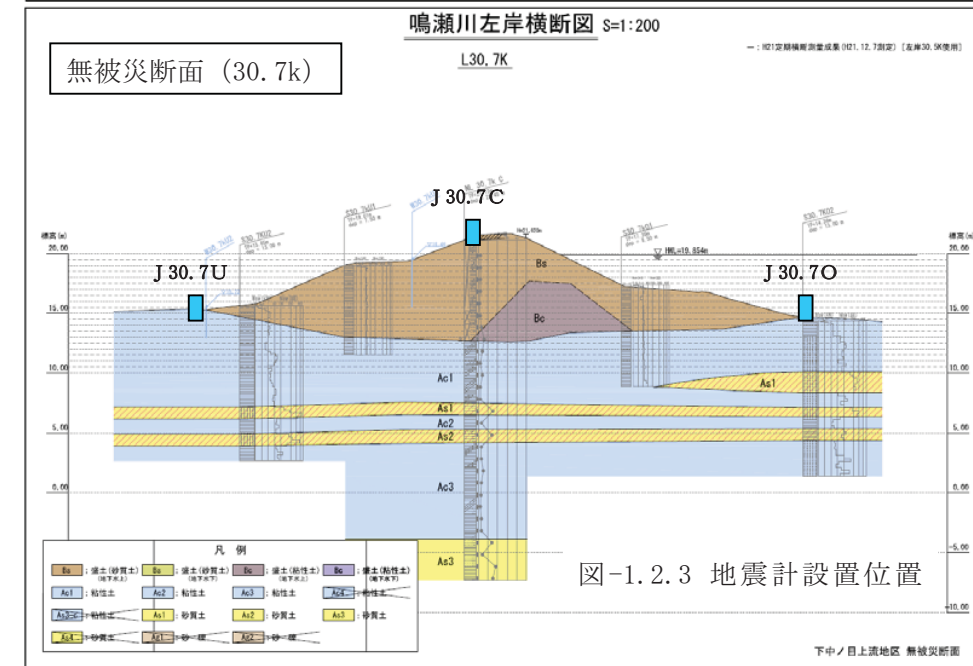


図-1.2.3 地震計設置位置



## 2. 地震計の概要と設置状況

### 2.1 地震計の概要

地震計測には、名古屋大学、愛知工業大学、(株)東海理化、応用地震計測(株)が共同開発した小型地震計を使用した。これは、地震波形を収録するとともに、最大加速度、S I 値、計測震度をリアルタイムで出力できる機能を有している。

地震計の外観を図-2.1.1、主な仕様を表-2.1.1 に示す。



図-2.1.1 小型地震計の外観

表-2.1.1 主な仕様

センサー	半導体センサー (JA-30SA32-25B)
成分数	3成分 (水平2成分、垂直1成分)
プレトリガー	1.5秒
トリガーレベル	3～9.99ガル
測定範囲	±2.0G (垂直成分は±1.0G)
記録時間	1波形100秒×56波形
内部演算	計測震度、S I 値
時計	内部クロック
インターフェイス	RS-232C、Ethernet
連動	あり
電源	AC100V
バッテリー	1.2V電源

### 2.2 設置状況

地震計の設置位置の選定理由は、以下の通りである。

- ① 被災断面については、特に大きな変状（はらみ出し）が見られた 30.3k 付近を対象とした。
- ② 無被災断面は、被災箇所から 200m程度上流で被災が見られず、周辺に家屋などの障害物がない 30.7k を対象とした。
- ③ 各断面方向には、地盤と盛土のゆれ方の違いを把握するため、堤内地（盛土法尻付近の地盤上）、堤防天端（盛土上）、堤外地（盛土法尻付近の地盤上または盛土上）を対象とした。

地震計の設置にあたっては、常時、地震時に地震計が容易に動かないようにコンクリート基礎（□600mm\*600mm、高さ 400mm）に固定した。また、堤防の縦断方向の方位を確定し、磁北（N）との関係を明確にした。地震計の方位について表-2.2.1 に示す。

地震計の設置位置と方位を図-2.2.1、写真 2.2.1 に示す。

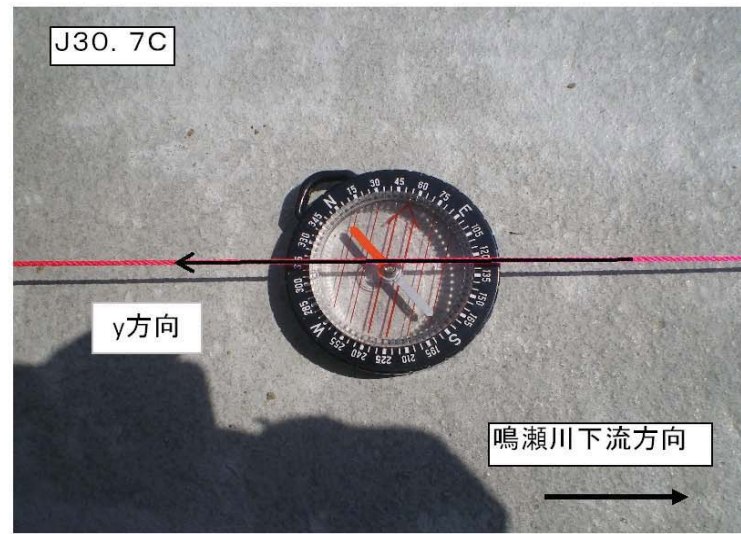
また、地震計の方位を設置地点毎に写真-2.2.2～2.2.3 に示す。

表-2.2.1 地震計設置方位一覧

河川名	被災箇所	設置地点	地震計	
			位置記号	方位
鳴瀬川 左岸	被災	30.3k 川裏（法尻付近の地盤面）	J 30.3U	N285W
	被災	30.4k 天端（盛土天端法尻付近）	J 30.4C	N300W
	被災	30.4k 川表（法尻付近の盛土面）	J 30.4O	N290W
	無被災	30.7k 川裏（法尻付近の地盤面）	J 30.7U	N310W
	無被災	30.7k 天端（盛土天端法尻付近）	J 30.7C	N315W
	無被災	30.7k 川表（法尻付近の地盤面）	J 30.7O	N315W

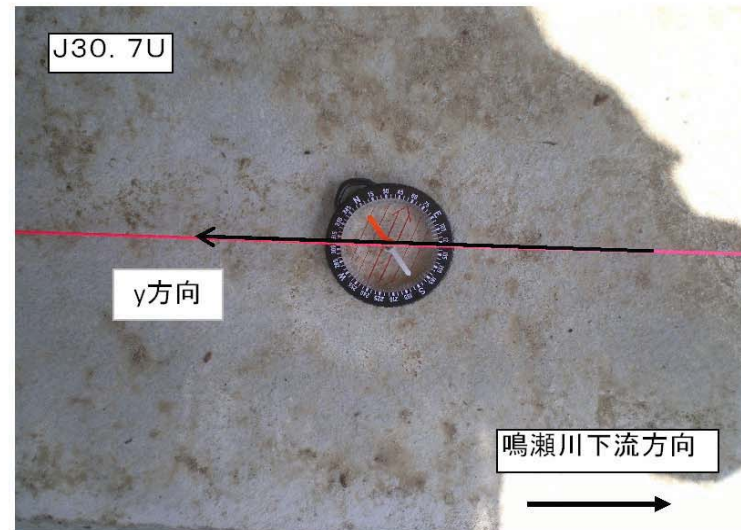
各地点の地震計設置状況については、巻末資料（2）にまとめて示す。





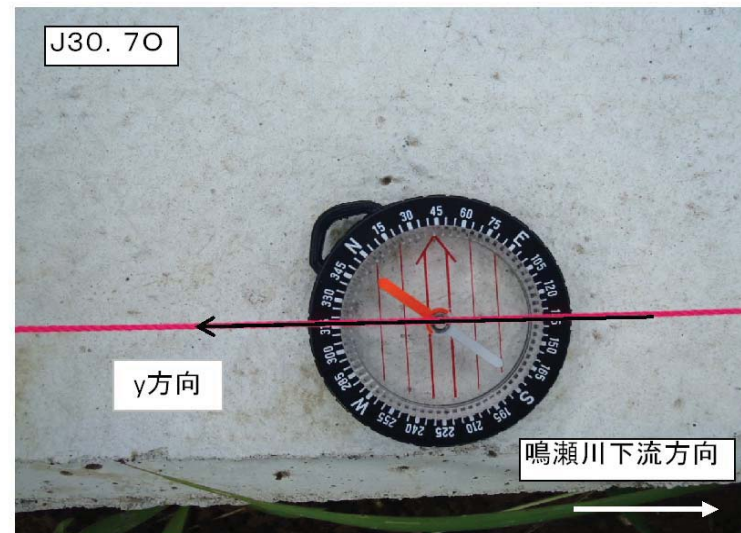
【J30.7C】  
堤防天端（盛土天端法肩付近）

【N315W】  
【堤防縦断(Y方向):  
北から上流方向に315°】



【J30.7U】  
川裏（法尻付近の地盤面）

【N310W】  
【堤防縦断(Y方向):  
北から上流方向に310°】



【J30.7O】  
川表（法尻付近の地盤面）

【N315W】  
【堤防縦断(Y方向):  
北から上流方向に315°】

写真-2.2.3 地震計の方位角（無被災断面）

### 2.3 波形データの処理方法と相関関係の整理

地震記録は 100Hz サンプリングで、1 スパン 100 秒間のデータである。記録が 100 秒を超えると複数のデータに跨るが、データ間に重なりや遅延はなく、連続サンプリングが可能となっている。

そこで、以下に波形データの処理方法について示す。

- ① 生記録に所定の校正係数を乗じて加速度データに変換する。
- ② トリガー開始時間は、Z 方向の加速度が 3 ガルを超過した時点とする。
- ③ 各地震計（地震記録）には絶対時刻が定義されていないことから、周波数特性の分析には何ら不都合はないものの、地点間の相対変位等を調べる場合には精度的な限界がある。本検討では、見える化や相対変位を計算する際には、法尻、天端、川裏で P 波初動の到達はほぼ同時と過程し、時間軸方向にデータをシフト（トリガー開始時間より 1.5 秒前の時間を地震の初動時間とする）させ、時刻のズレが出来るだけ小さくなるように処理をした。（変位波形による相関分析を実施し、差異のないことを確認）
- ④ オフセットを除去する。ただし、今回の 3 記録については、地震直前のバイアスは補正されているため、K-NET にみられるような地震前の顕著なオフセット（ドリフト）はみられなかった。そこで、加速度については、記録された生の地震データを用いている。
- ⑤ 速度・変位を計算するために、FFT（高速フーリエ変換）を実施している。このとき、High-Pass-filter をかけている（周期 10 秒～20 秒の台形型、周期 10 秒がコーナー周期、20 秒以上が振幅ゼロ（0.05Hz 以下の低い周波数は実務上使用しない））。データは 16384 個（163.84 秒間のデータ）を使用した。

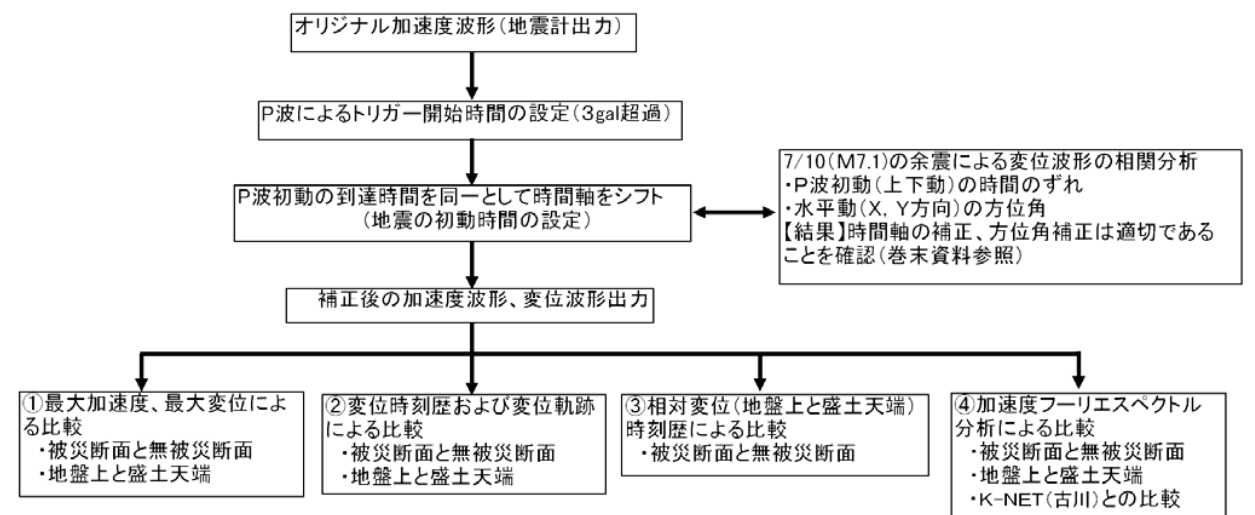


図-2.3 波形データの処理方法および相関関係の整理



### 3. 地震観測結果

#### 3. 1 地震観測データ（最大加速度、最大変位）の整理

##### （1）被災断面と無被災断面における最大加速度、最大変位の比較

地震観測記録一覧表を表-3.1.1に示す。

図-3.1.1に被災断面と無被災断面における最大加速度を比較して示す。

これらより以下のことが明らかとなった。

- ① 最大加速度は、被災断面、無被災断面とも天端（盛土）>川裏（地表面）>川表の順に大きい。
- ② 川裏（地表面）の最大加速度は、堤防横断方向、堤防縦断方向において被災断面が無被災断面より大きい傾向にある。
- ③ 天端（盛土）の最大加速度は、堤防横断方向、堤防縦断方向において無被災断面が被災断面より大きい傾向にある。
- ④ 川表の最大加速度は、被災断面、無被災断面とも同様な値を示す。

図-3.1.2に被災断面と無被災断面における最大変位を比較して示す。

ここに、用いたデータは、観測以降、全地点で記録された13地震を対象にした。

これらより以下のことが明らかとなった。

- ① 堤防横断方向、縦断方向の最大変位は、川裏（地表面）、天端（盛土）において無被災断面が被災断面より大きくなる傾向にある。
- ② ①を除いては、最大変位は、横断、縦断方向、上下方向において被災断面、無被災断面とも同様な値を示す。

##### （2）地表面（川裏）と天端（盛土上）における最大加速度、最大変位の比較

図-3.1.3に断面毎の地表面と天端（盛土上）における最大加速度を比較して示す。

これらより以下のことが明らかとなった。

- ① 堤防の横断方向の最大加速度は、被災断面、無被災断面とも天端（盛土）が川裏（地表面）の1.5倍程度大きくなっている。
- ② 堤防の縦断方向の最大加速度は、被災断面において天端（盛土）と川裏（地表面）との関係において±1.5倍程度の間でばらついている。
- ③ 堤防の縦断方向の最大加速度は、無被災断面において天端（盛土）が川裏（地表面）の1.3倍程度大きくなっている。

図-3.1.4に断面毎の地表面と天端（盛土上）における最大変位を比較して示す。

ここに、用いたデータは、観測以降、全地点で記録された13地震を対象にした。

これらより以下のことが明らかとなった。

- ① 堤防の横断方向の最大加速度は、被災断面、無被災断面とも天端（盛土）が川裏（地表面）をやや上回る傾向にある。
- ② ①を除いては、最大変位は、断面にかかわらず川裏（地表面）、天端とも同様な値を示す。

##### （3）古川地表面と被災地表面（川裏）における最大加速度の比較

図-3.1.5に古川地表面と被災地表面（川裏）における最大加速度最大加速度を比較して示す。

これらより以下のことが明らかとなった。

- ① 堤防横断方向の最大加速度は、被災地表面（川裏）が古川地表面の1.0～2.0倍の範囲で大きくなっている。
- ② 堤防縦断方向の最大加速度は、データにばらつきはみられるが、被災地表面（川裏）が古川地表面の1.0～3.0倍の範囲で大きくなっている。

3. 2 6月～7月における最大余震の選定と地震の諸元

地震観測は、2011年6月3日（金）から実施しているが、被災箇所（30.3k）、無被災箇所（30.7k）のすべての地点（6箇所）において記録されているのは7月10日（日）以降である。そこで、7月10日以降に記録された最大加速度の大きな地震を3個（7月10日、7月23日、7月25日）選定した。

各地震についての諸元（マグニチュードと震央位置）および観測地点から震央までの距離と方位角を以下に示す。

①【7月10日の地震の諸元（速報値、K-NET ホームページより）】

発生年月日	時間 時:分	緯度 (度)	経度 (度)	深度 (km)	マグニチュード*
2011/7/10	9:57	38.0	143.5	10	7.1

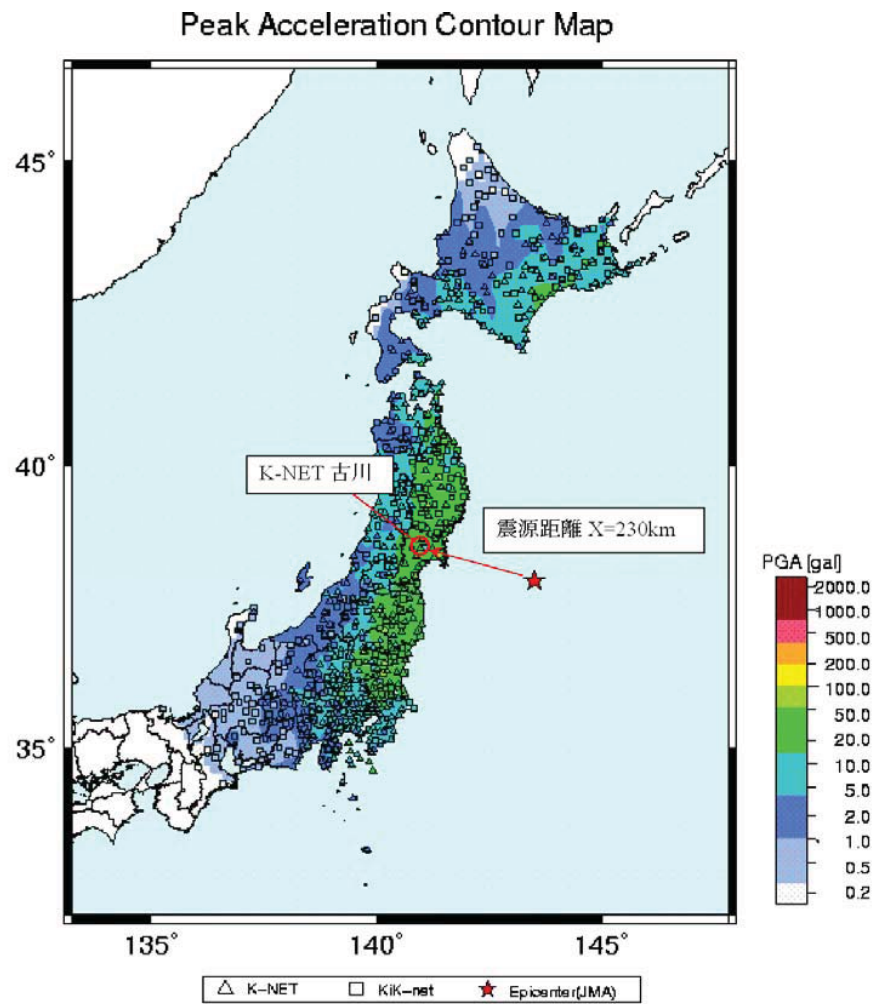


図-3.2.1 地震の諸元（7月10日（日）地震速報値）

②【7月23日の地震の諸元（速報値、K-NET ホームページより）】

発生年月日	時間 時:分	緯度 (度)	経度 (度)	深度 (km)	マグニチュード*
2011/7/23	13:34	38.9	142.3	40	6.5

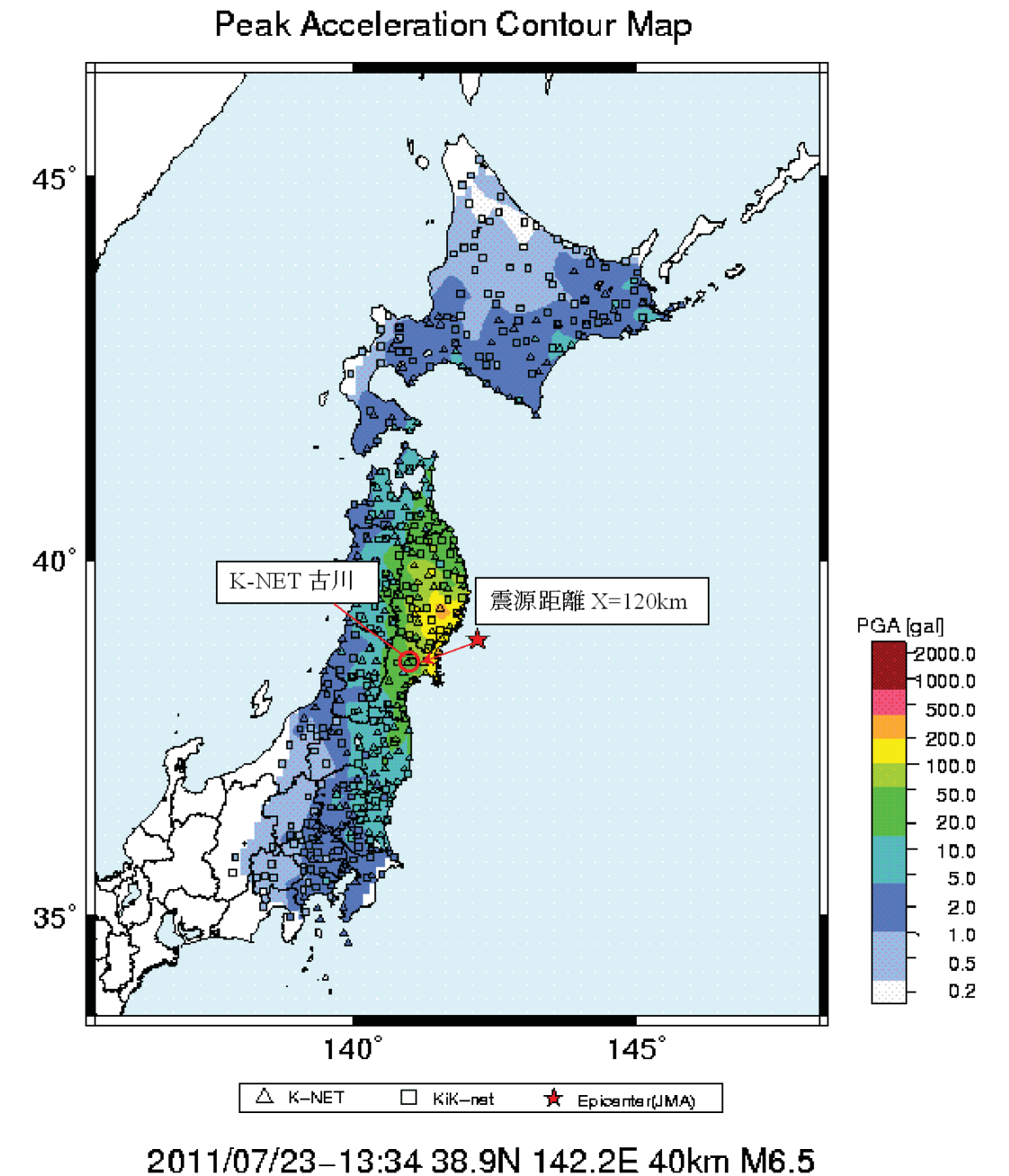


図-3.2.2 地震の諸元（7月23日（土）地震速報値）

③ 【7月25日の地震の諸元（速報値、K-NET ホームページより）】

発生年月日	時間 時:分	緯度 (度)	経度 (度)	深度 (km)	マグニチュード*
2011/7/25	3:51	37.7	141.6	40	6.2

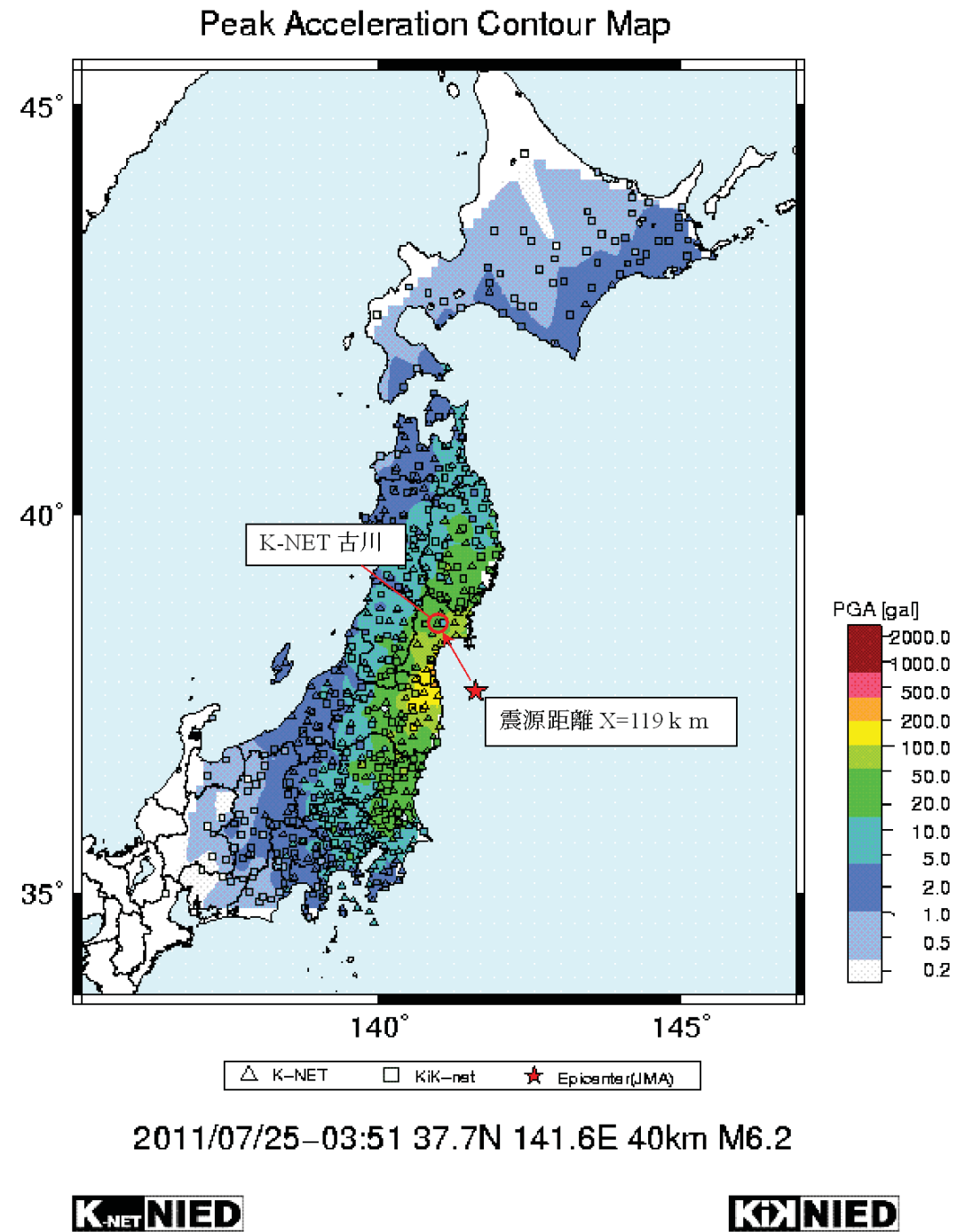


図-3.2.3 地震の諸元（7月25日（月）地震速報値）

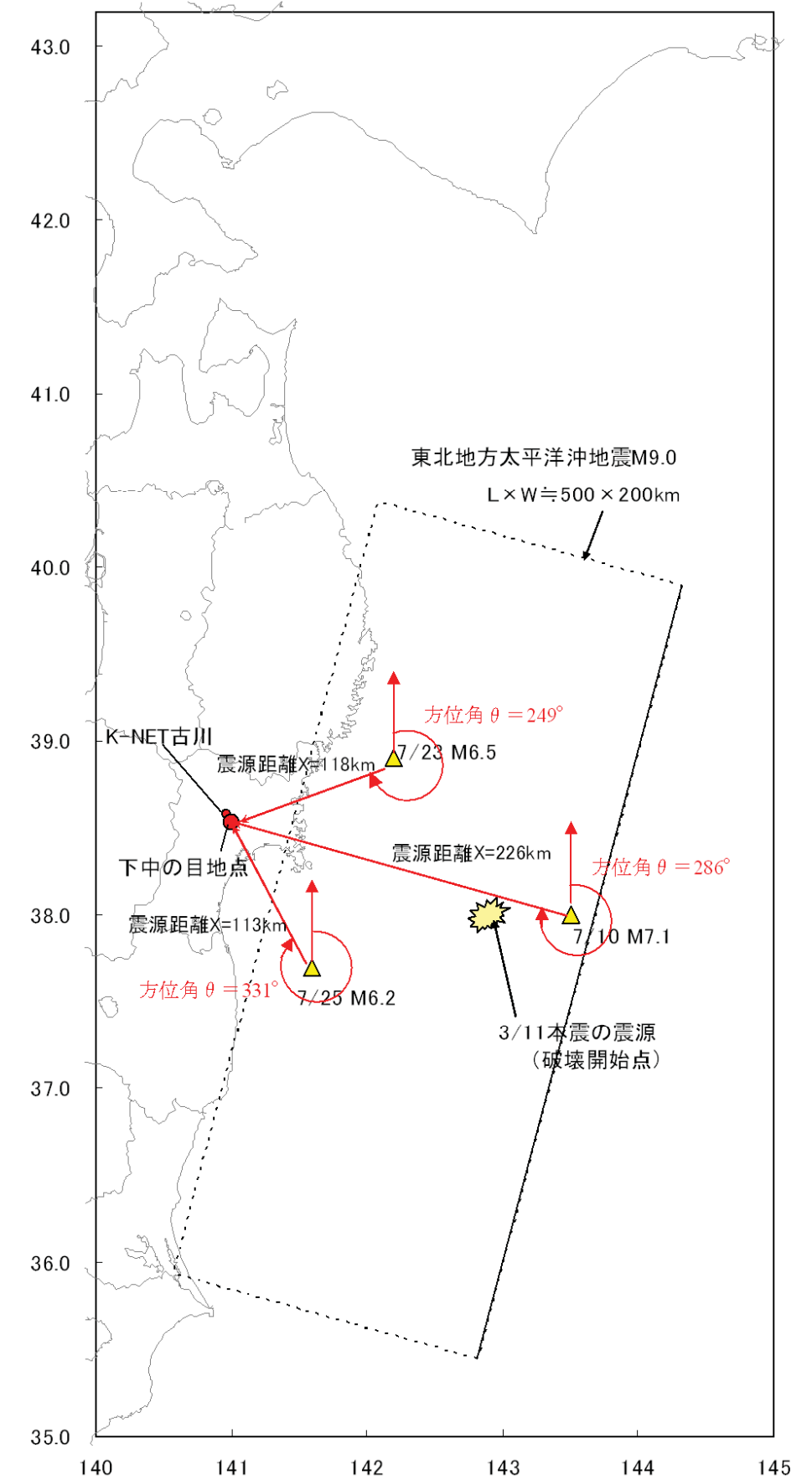


図-3.2.4 観測地点（下中の目地点）から震源までの距離と方位角

3. 3 【余震記録 (A)】 (2011年7月10日 (日) 9時57分、M=7.1)

地震記録波形を図-3.3.1に示す。

同図には、K-NETで記録された対象箇所(被災箇所 30.3k)に最も近い観測地点「古川」での強震記録波形も併せて示している。

これより、本対象地点は、「古川」に比べて大きな加速度が生じていることが判る。

(1) K-NET「古川」における本震(2011年3月11日(金)発生)との比較

図-3.3.2にK-NETで記録された「古川」における本震と余震の地震波形および加速度フーリエスペクトルを比較して示す。加速度フーリエスペクトル結果より、周波数特性の形状は類似していること、倍率は10~25倍程度の差異がみられることが明らかにされた。

また、図-3.3.3にK-NET「古川」の地盤と地震基盤面から地表面におけるサイト増幅特性を示す。これより、「古川」では0.2~1.0 Hzの増幅が大きく、特に0.2~0.3 Hz、0.8~1.0 Hzで卓越していることが判る。

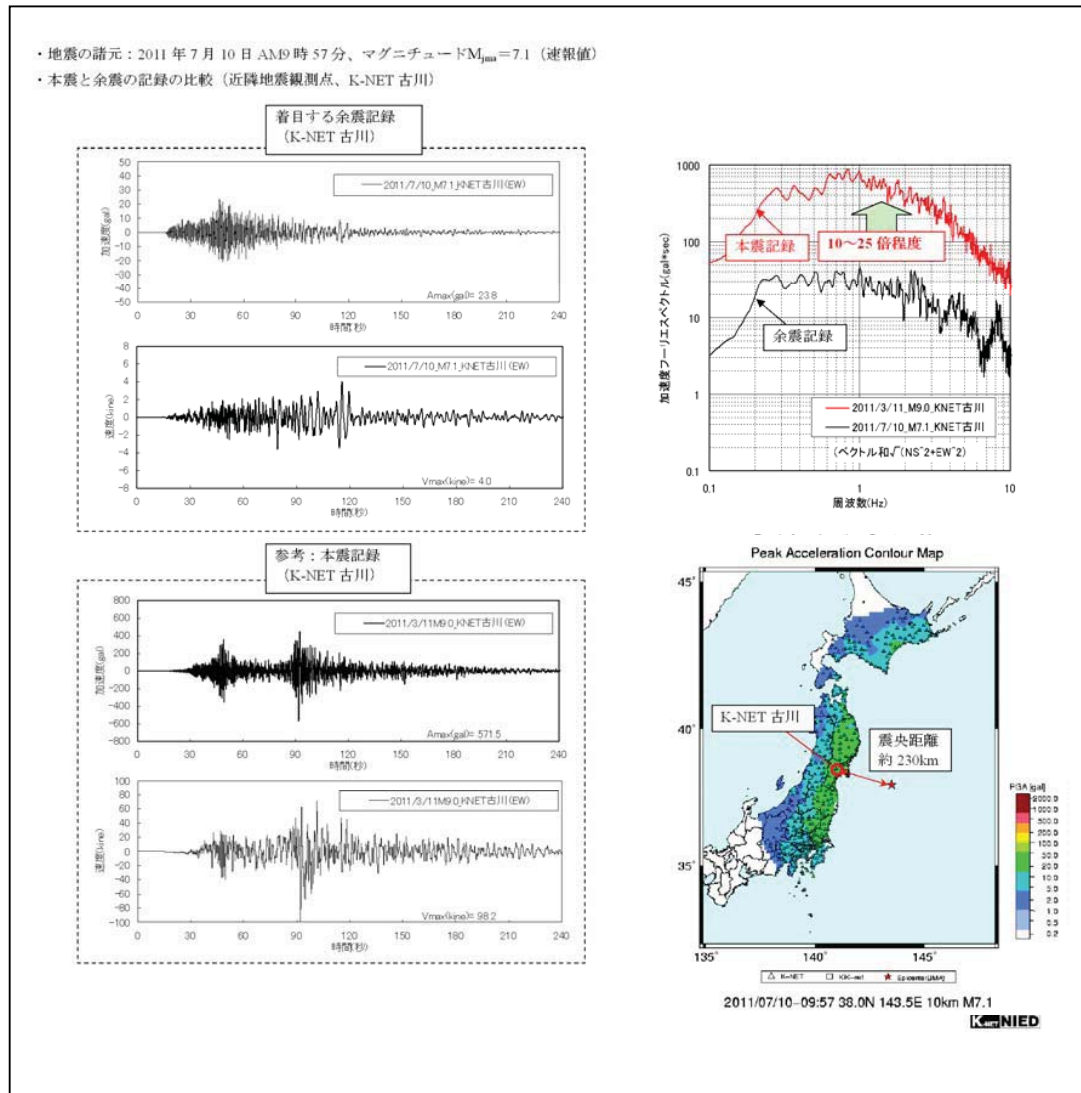
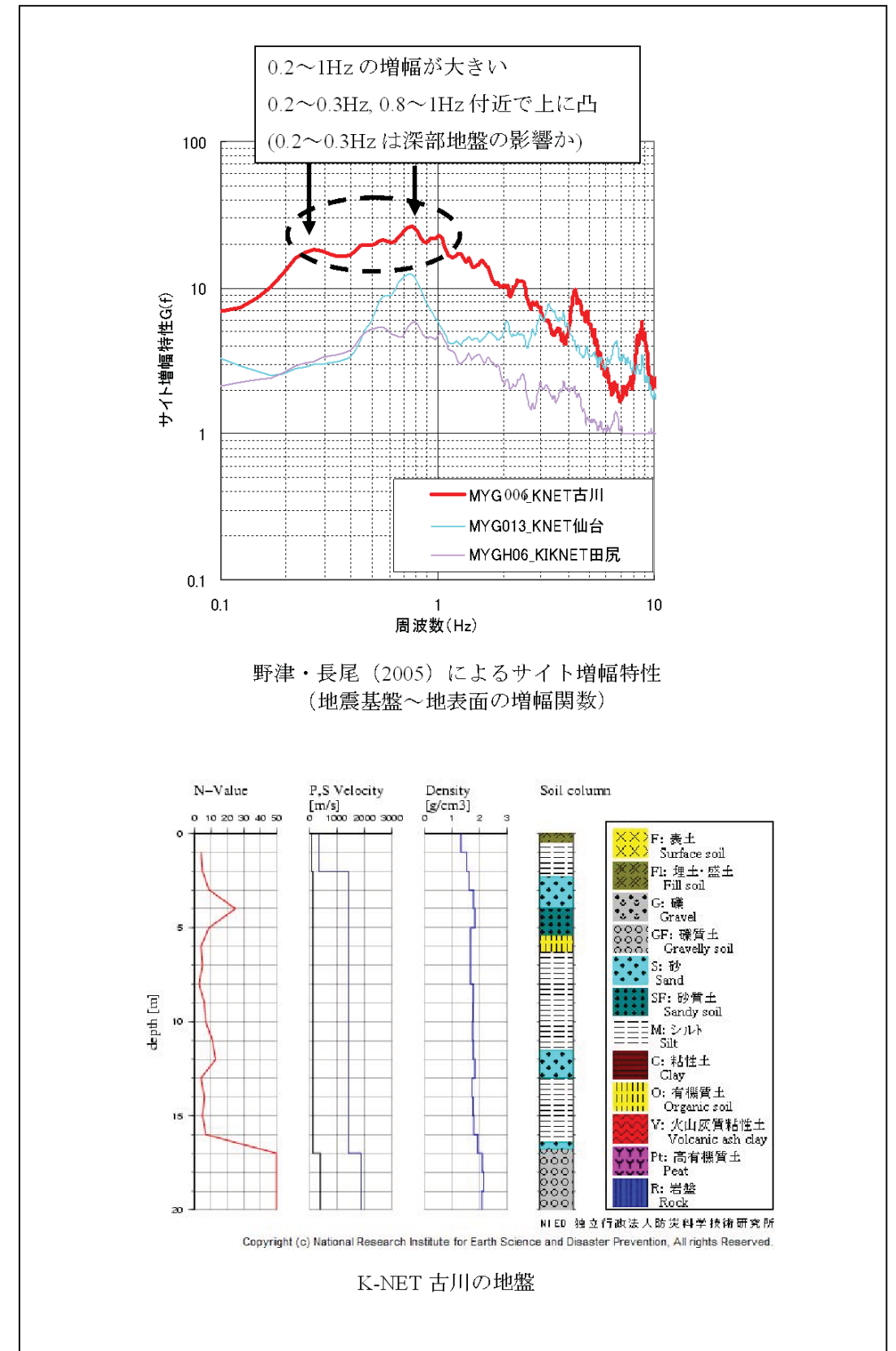


図-3.3.2 本震と余震の地震波形および加速度フーリエスペクトル (K-NET)

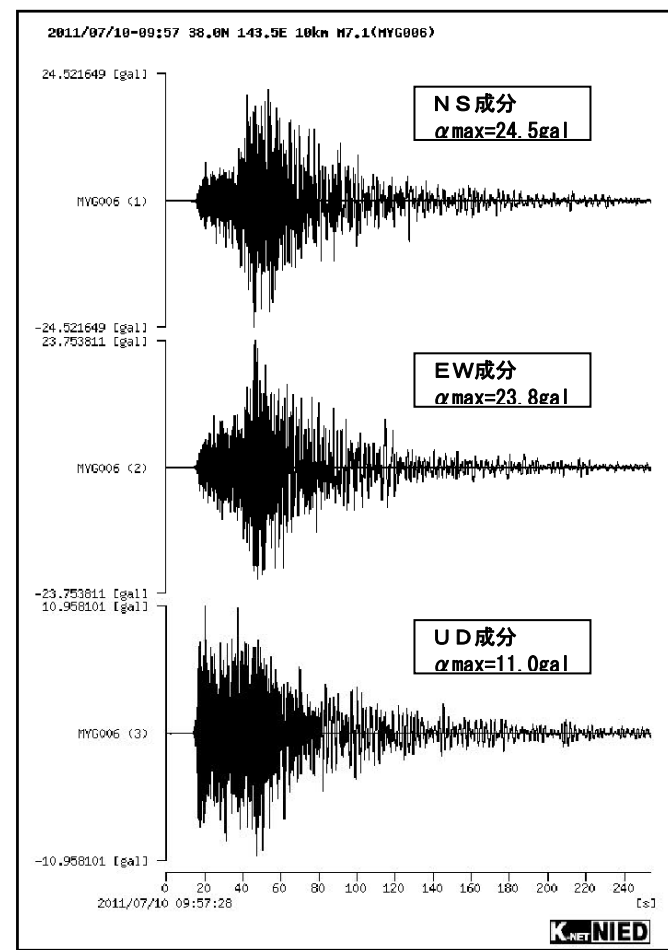
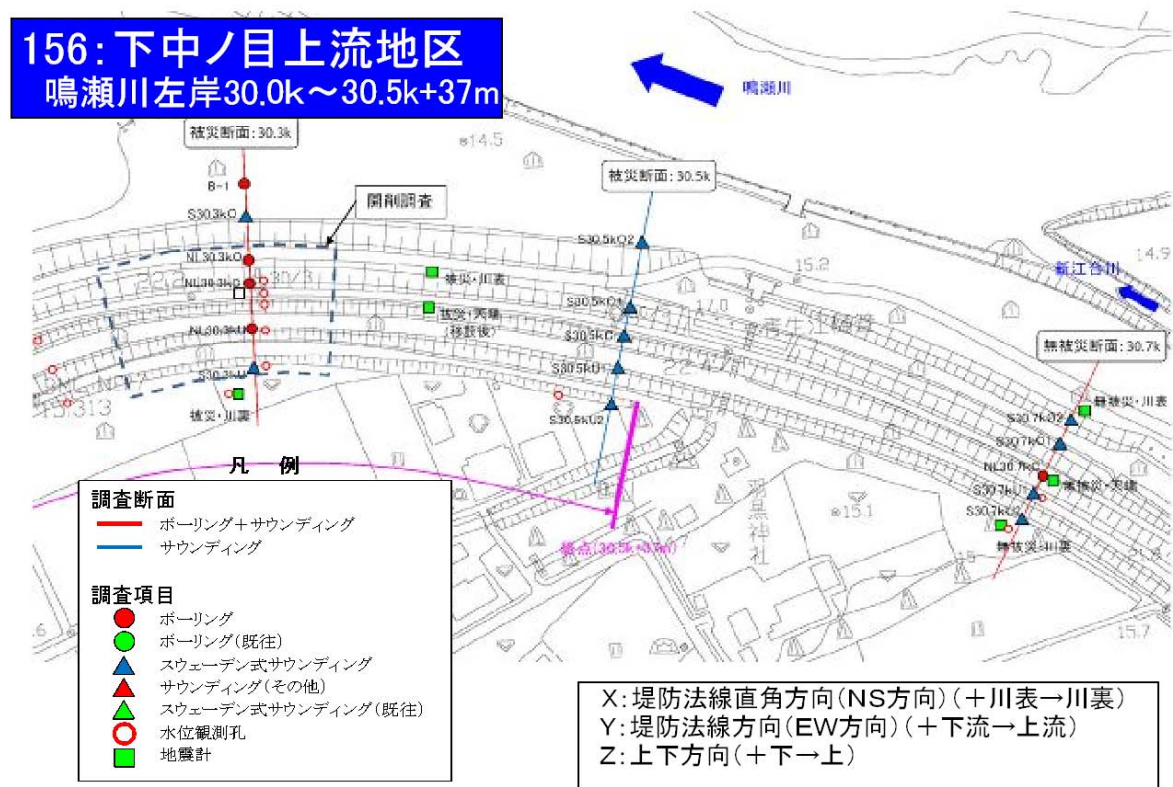


野津・長尾 (2005) によるサイト増幅特性 (地震基盤~地表面の増幅関数)

K-NET 古川の地盤

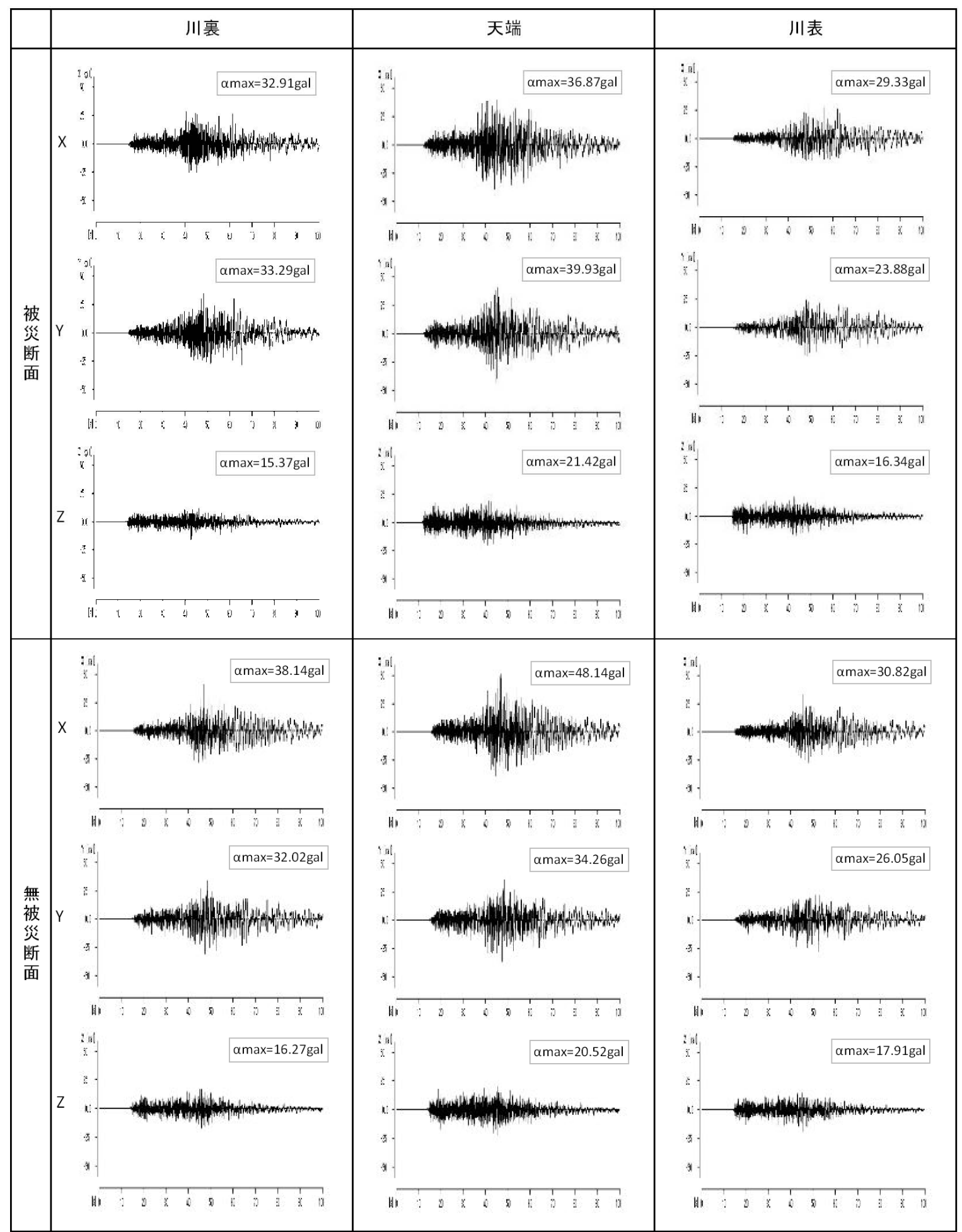
図-3.3.3 古川の地盤とサイト増幅特性 (K-NET)





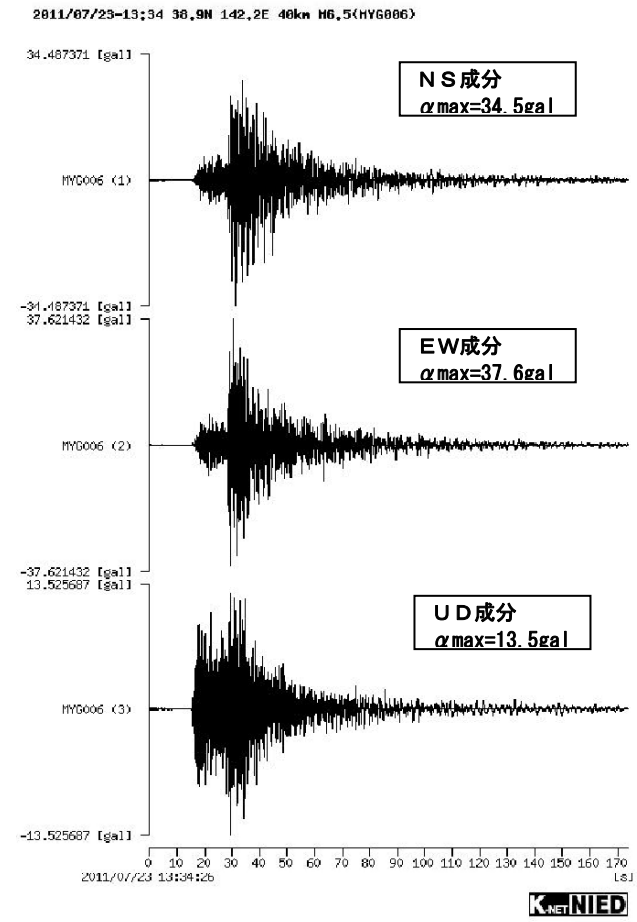
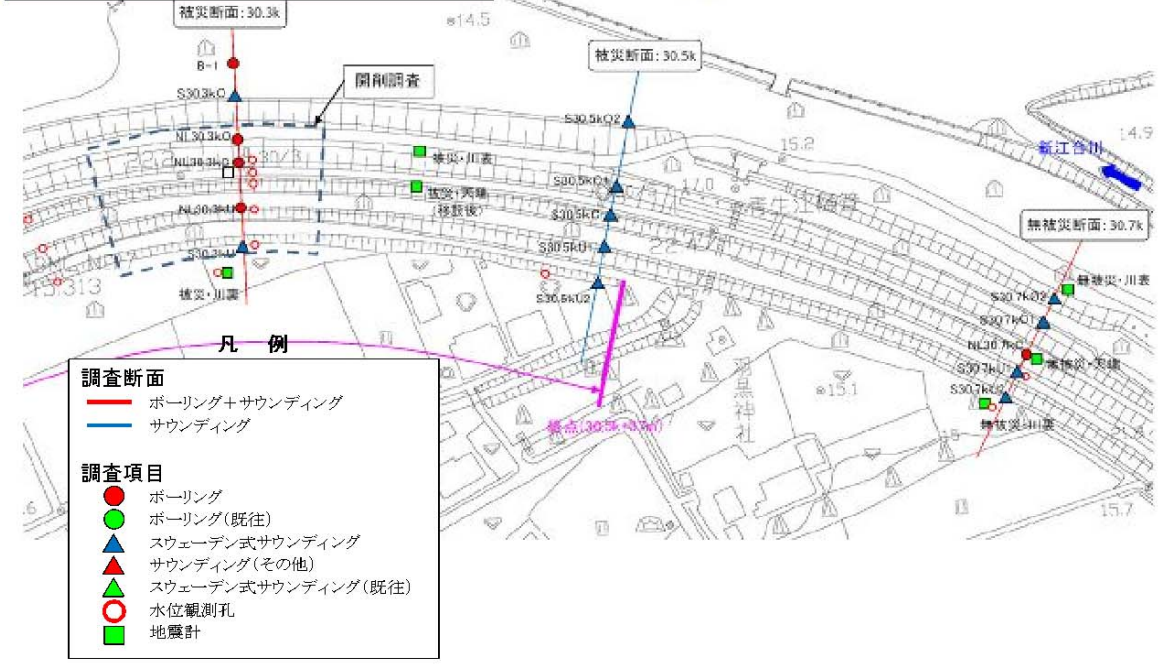
「古川」での強震記録  
(K-NETより引用)  
 ・2011/7/10 9:57  
 ・震源地 三陸沖  
 ・震源深さ 10km  
 ・マグニチュード 7.1

図-3.3.1 地震記録波形 (2011/7/10)



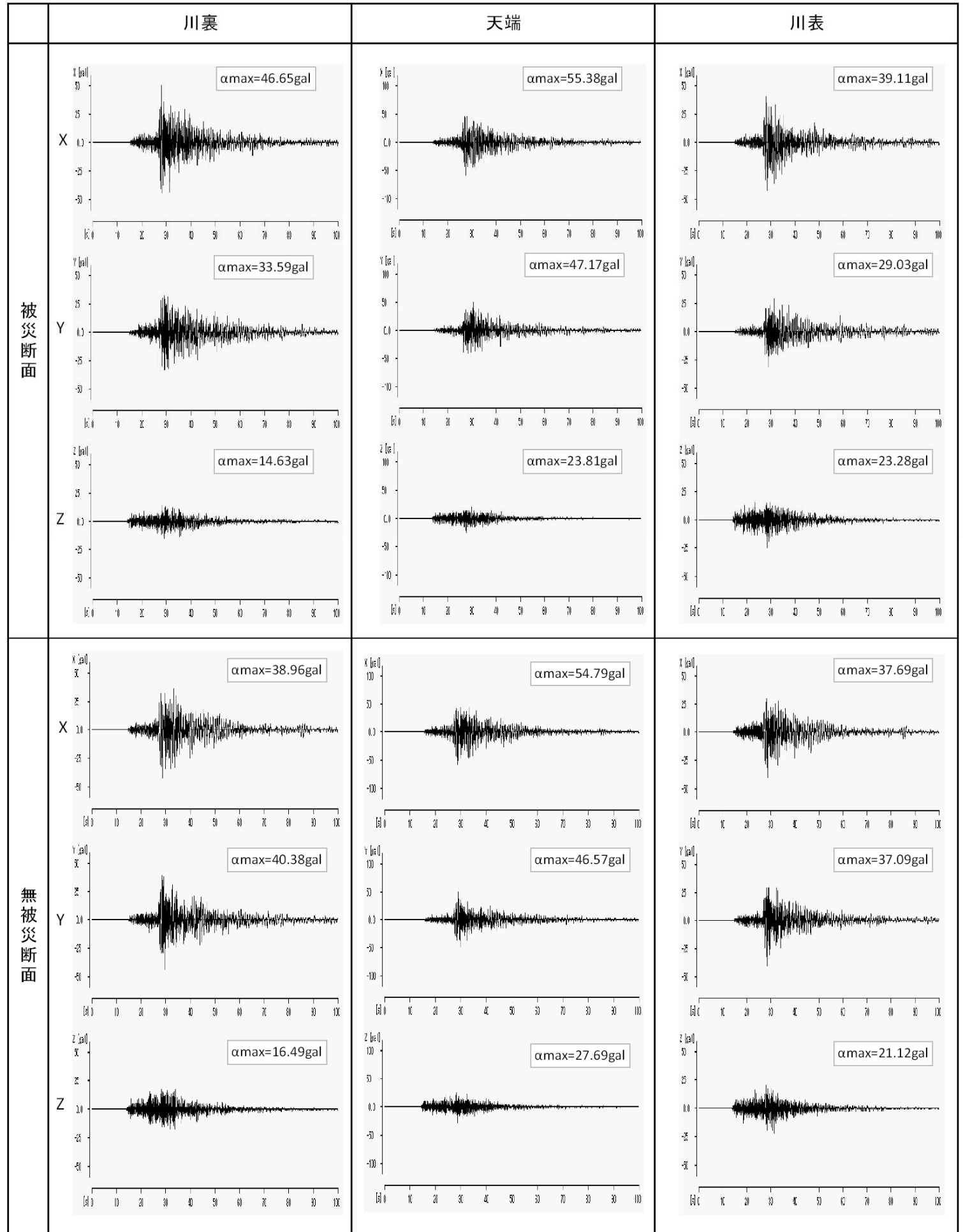
X: 堤防横断方向、Y: 堤防縦断方向、Z: 上下方向

**156:下中ノ目上流地区**  
 鳴瀬川左岸30.0k~30.5k+37m



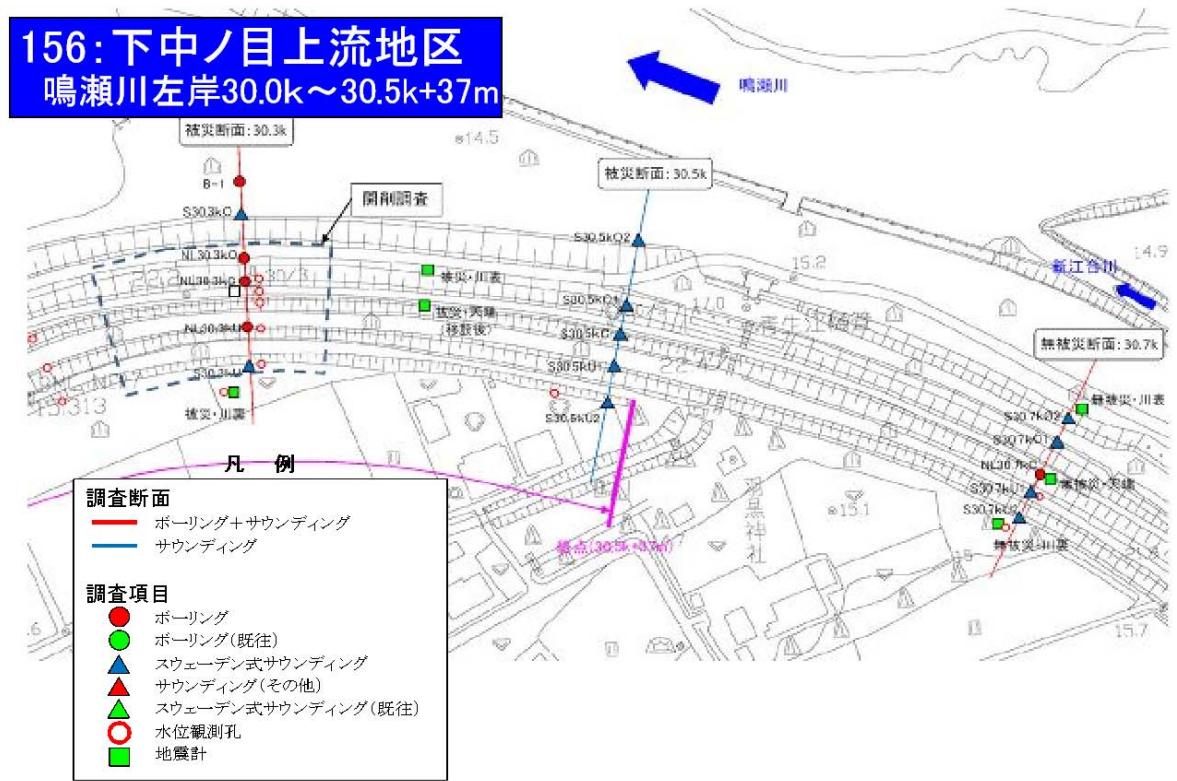
「古川」での強震記録  
 (K-NETより引用)  
 ・2011/7/23 13:34  
 ・震源地 宮城県沖  
 ・震源深さ 40km  
 ・マグニチュード 6.5

図-3.4.1 地震記録波形 (2011/7/23)

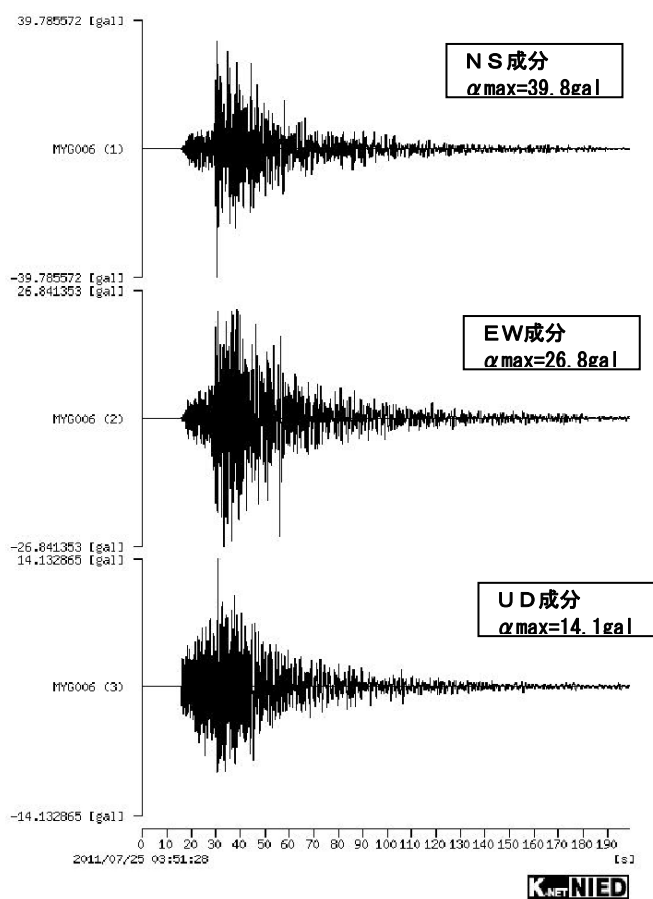


X:堤防横断方向、Y:堤防縦断方向、Z:上下方向

**156:下中ノ目上流地区**  
 鳴瀬川左岸30.0k~30.5k+37m

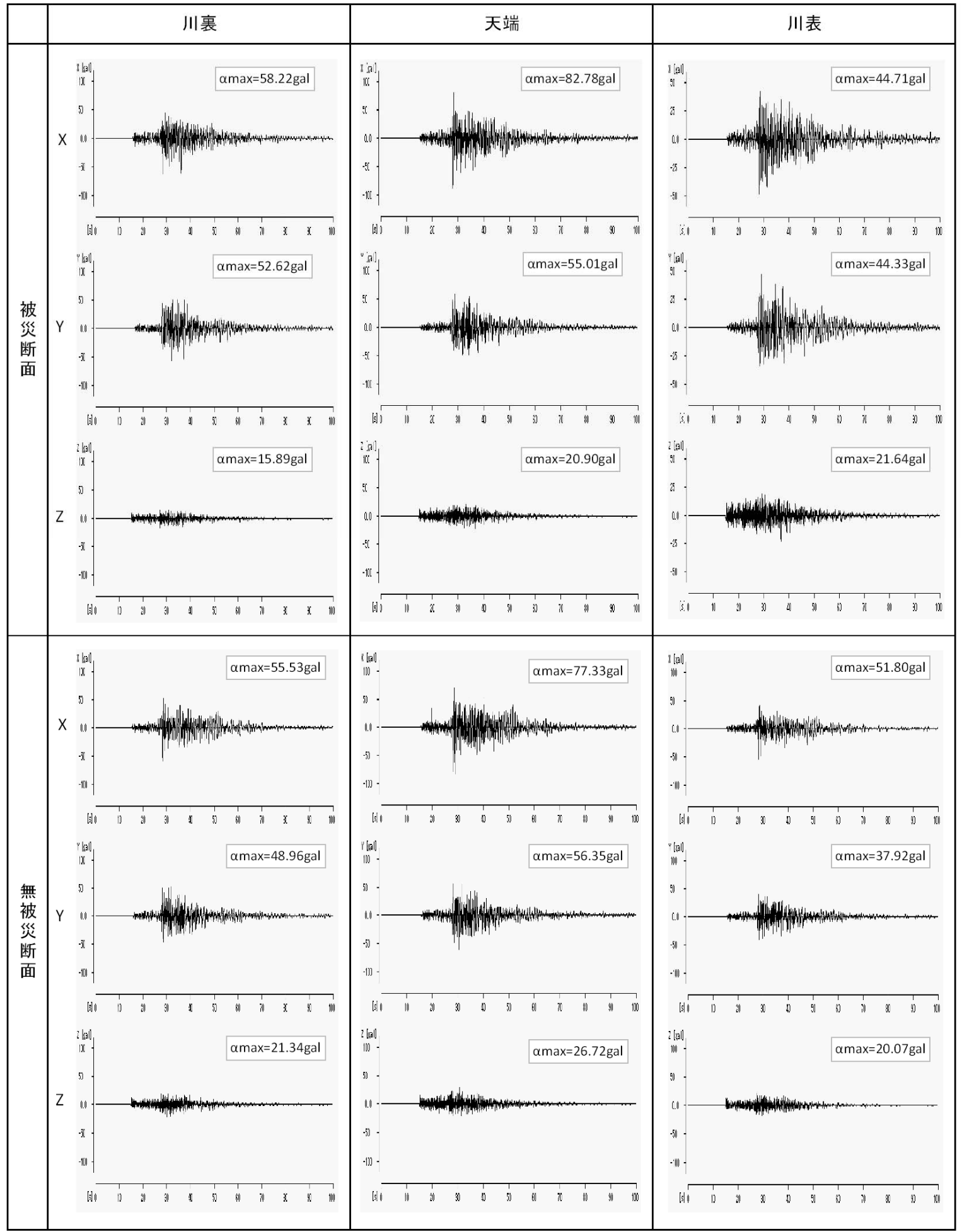


2011/07/25-03:51 37.7N 141.6E 40km HG.2(MYG006)



「古川」での強震記録  
 (K-NETより引用)  
 ・2011/7/25 3:51  
 ・震源地 福島県沖  
 ・震源深さ 40km  
 ・マグニチュード 6.2

図-3.5.1 地震記録波形 (2011/7/25)



X:堤防横断方向、Y:堤防縦断方向、Z:上下方向



(2) 加速度時刻歴および加速度軌跡 (オービット)

図-3.3.4、図-3.3.5 に被災断面、無被災断面の観測地点における加速度時刻歴、加速度粒子軌跡を示す。

また、図-3.3.6 に被災断面、無被災断面における成分毎の加速度波形を重ねて表示した。これらより以下のことが明らかとなった。

【被災断面(30.3k)】

- ① 最大加速度は、盛土の天端における縦断方向 (Y方向) で最も大きい。
- ② 水平方向の最大加速度は、盛土の天端>川裏 (地盤面) >川表 (盛土の法尻付近) の順に大きくなっている。
- ③ 加速度軌跡は、いずれの地点においても原点を中心にほぼ円形状を示している。

【無被災断面(30.7k)】

- ① 最大加速度は、盛土の天端における横断方向 (X方向) で最も大きい。
- ② 水平方向の最大加速度は、盛土の天端>川裏 (地盤面) >川表 (地盤面) の順に大きくなっている。
- ③ 加速度軌跡は、いずれの地点においても原点を中心に円形状を示していて、優位な方向性は認められないが、加速度のピーク時には横断方向 (X方向) に大きな加速度振幅がみられる。

(3) 変位時刻歴および変位軌跡 (オービット)

図-3.3.7、図-3.3.8 に被災断面、無被災断面の観測地点における南北方向 (横断方向)、東西方向 (縦断方向) の変位時刻歴および変位軌跡を時間を追って示す。

ここに、地震の進入方向は、被災断面の縦断方向にほぼ一致している。

また、図-3.3.9 に被災断面、無被災断面における成分毎の変位波形を重ねて表示した。これらより、被災断面と無被災断面では同様な粒子軌跡がみられることが明らかとなった。これらの傾向をまとめると以下のようである。

- ① t = 48~58 秒では、堤防縦断 (Y) 方向の揺れが卓越している。
- ② t = 58~68 秒では、堤防縦断 (Y) 方向に加えて堤防横断 (X) 方向の揺れも大きくなっている。
- ③ t = 80~90 秒では、堤防縦断 (Y) 方向に加えて堤防横断 (X) 方向の揺れがさらに大きくなっている。
- ④ t = 90~100 秒では、堤防横断 (X) 方向の揺れが卓越している。
- ⑤ t = 100~110 秒では、堤防縦断 (Y) 方向の揺れが卓越している。

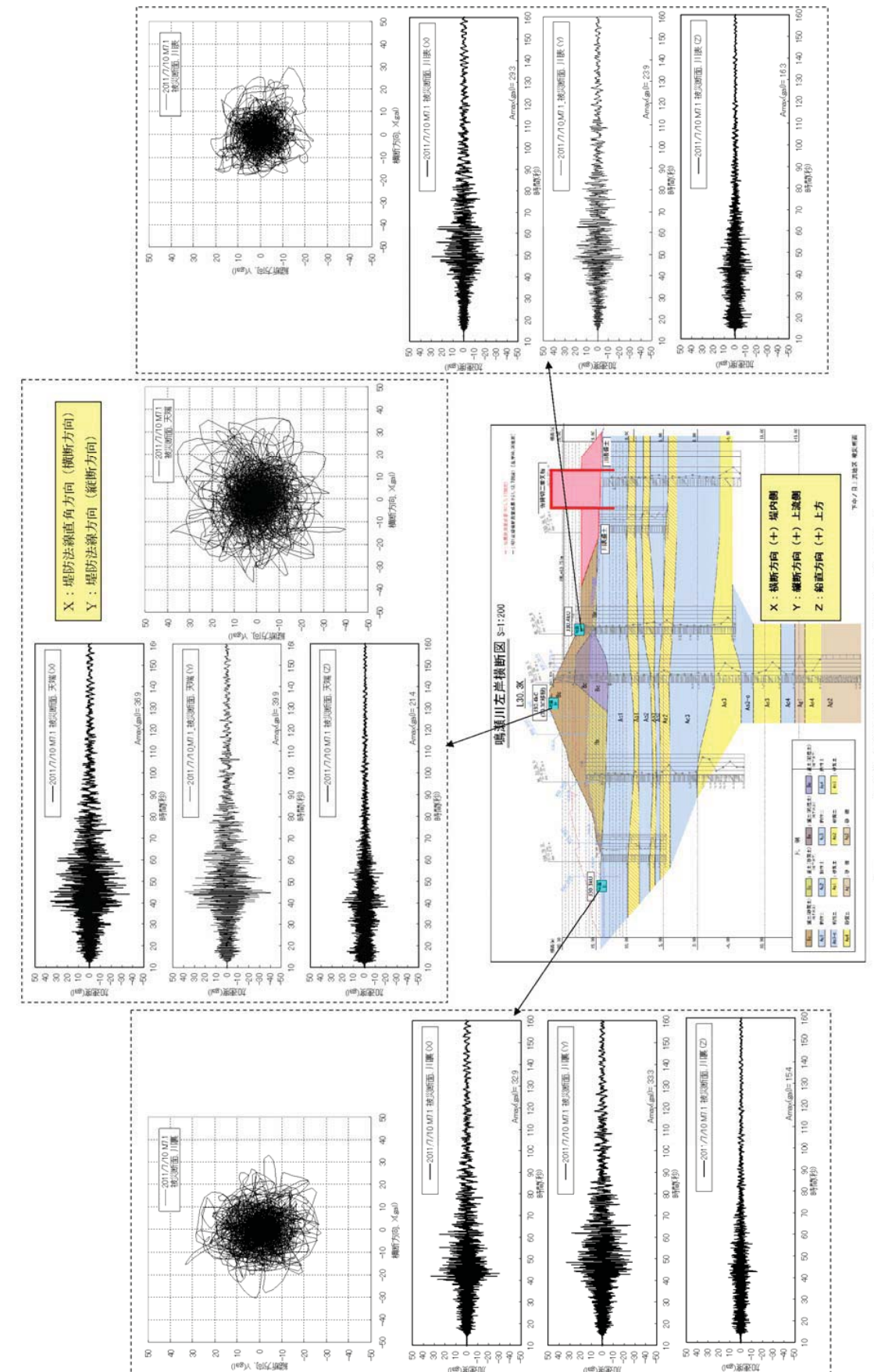


図-3.3.4 加速度時刻歴波形と加速度軌跡 (被災断面)

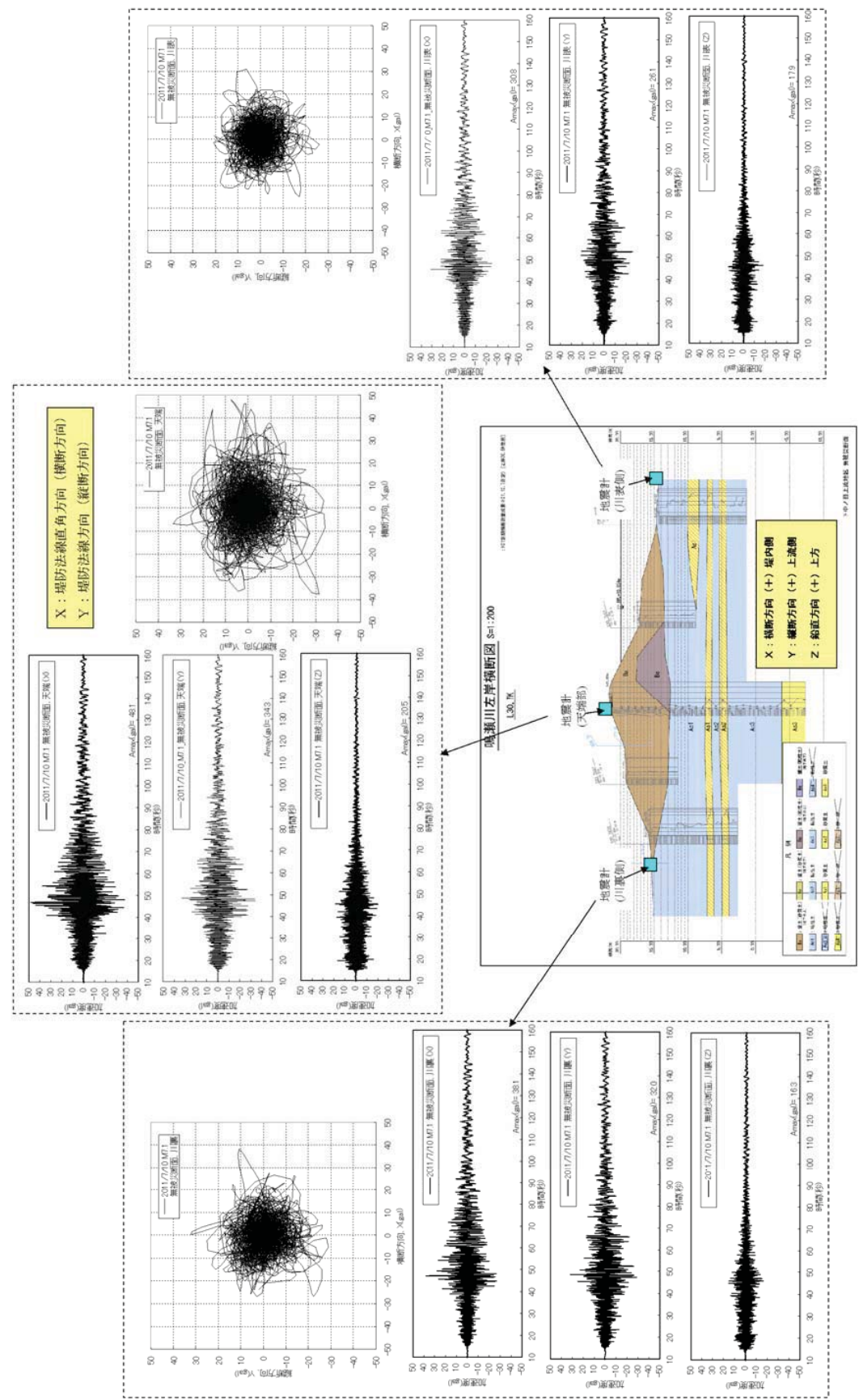


図-3.3.5 加速度時刻歴波形と加速度軌跡(無被災断面)

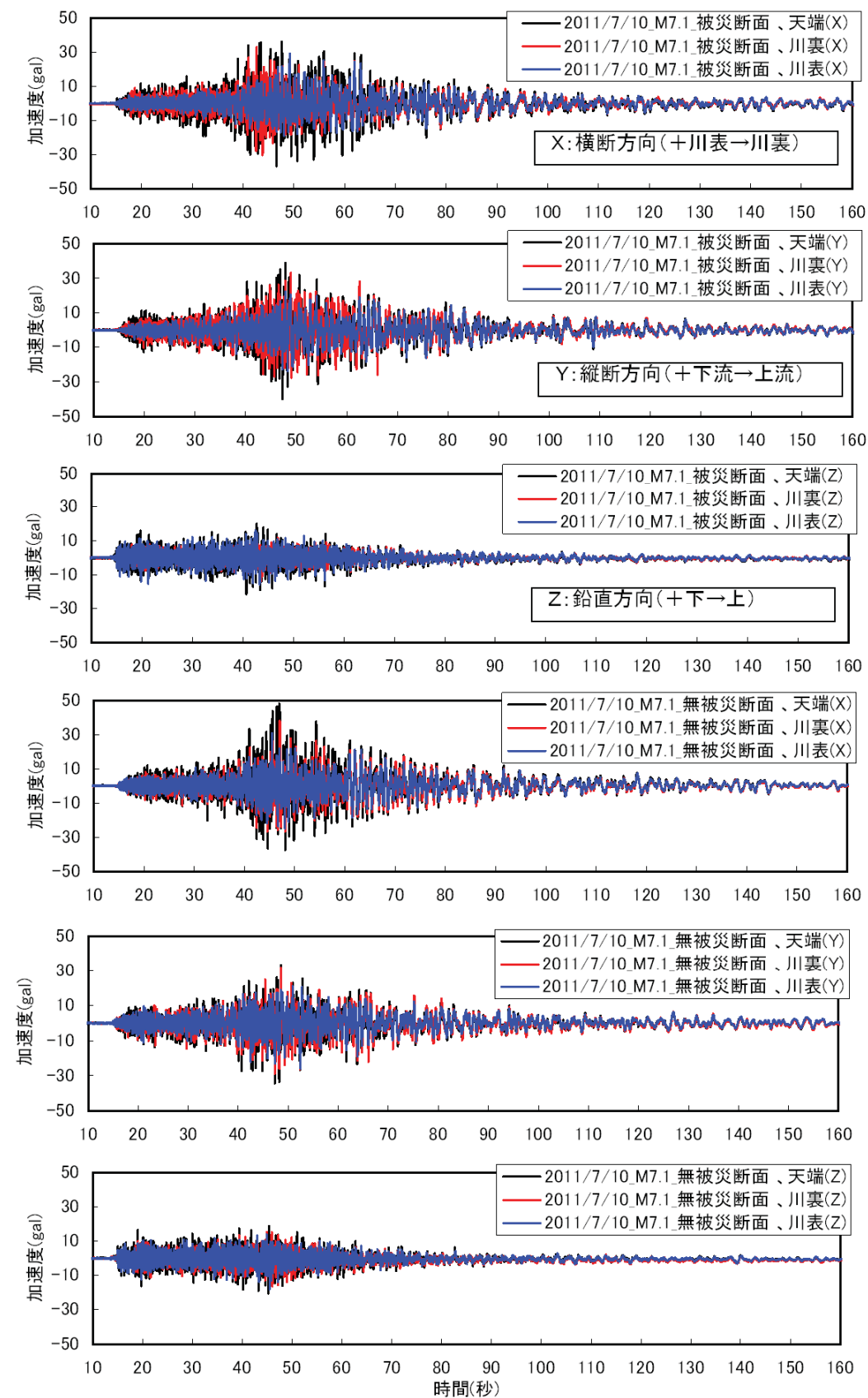
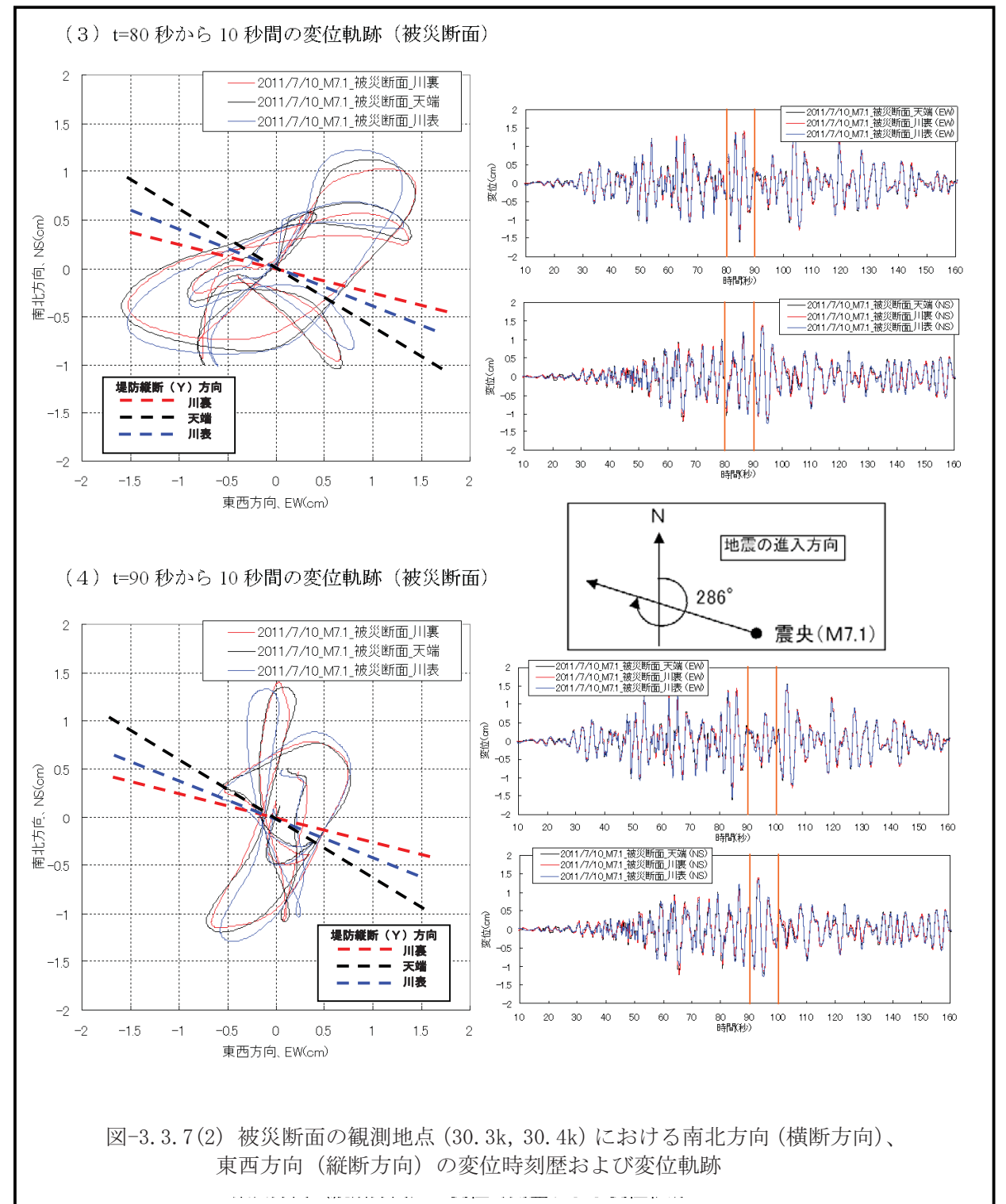
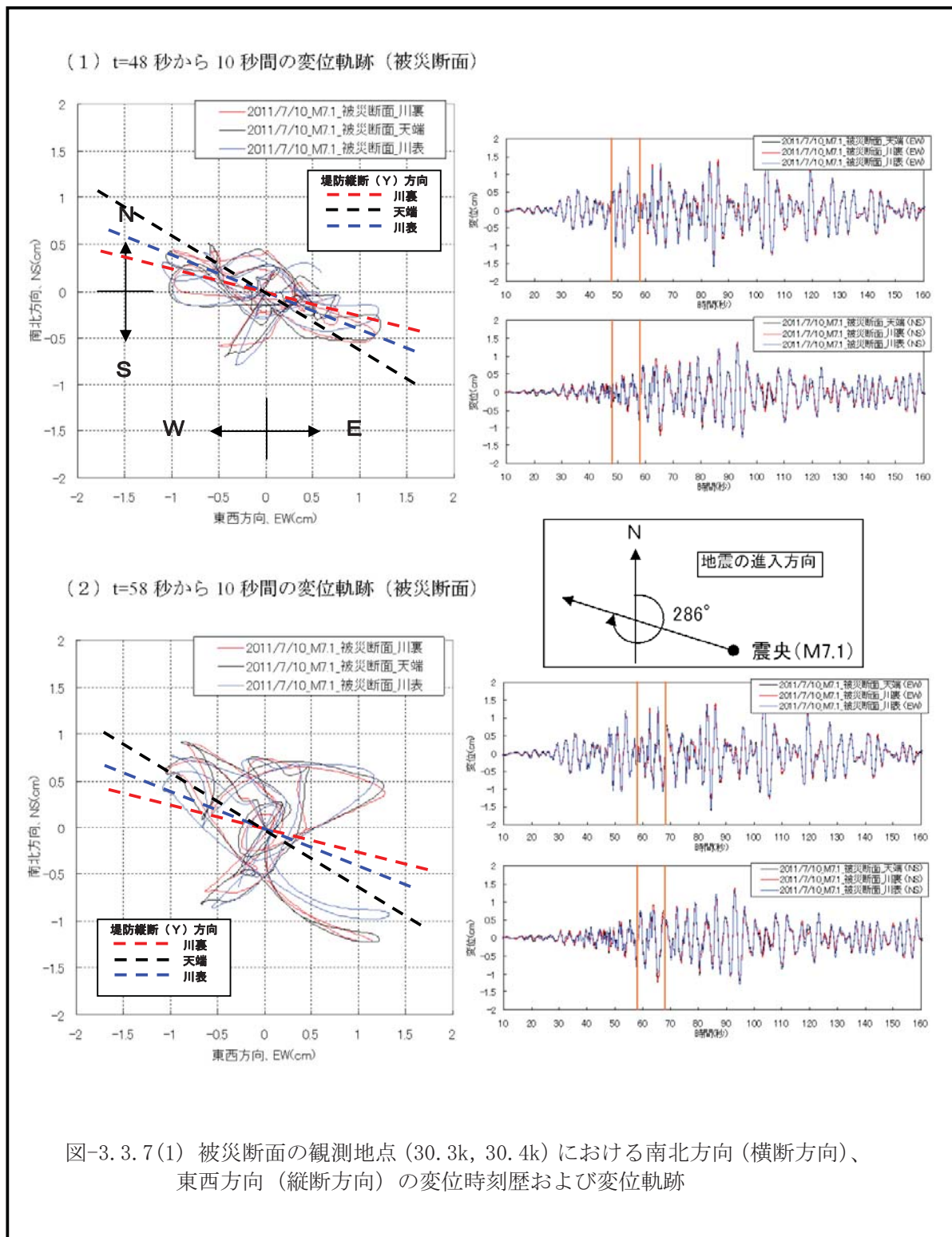


図-3.3.6 加速度時刻歴(成分別重ね書き)(2011.7.10)



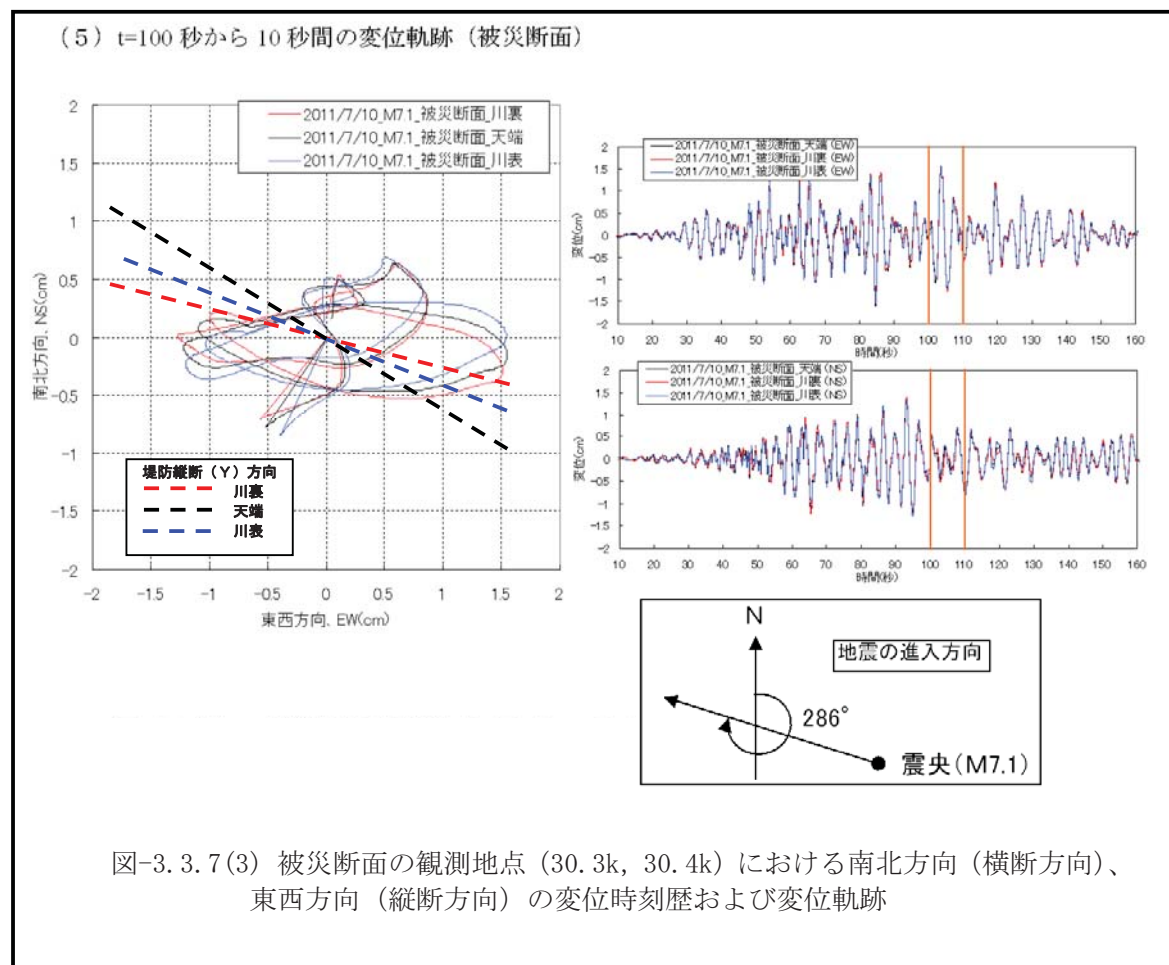


図-3.3.7(3) 被災断面の観測地点 (30.3k, 30.4k) における南北方向 (横断方向)、東西方向 (縦断方向) の変位時刻歴および変位軌跡

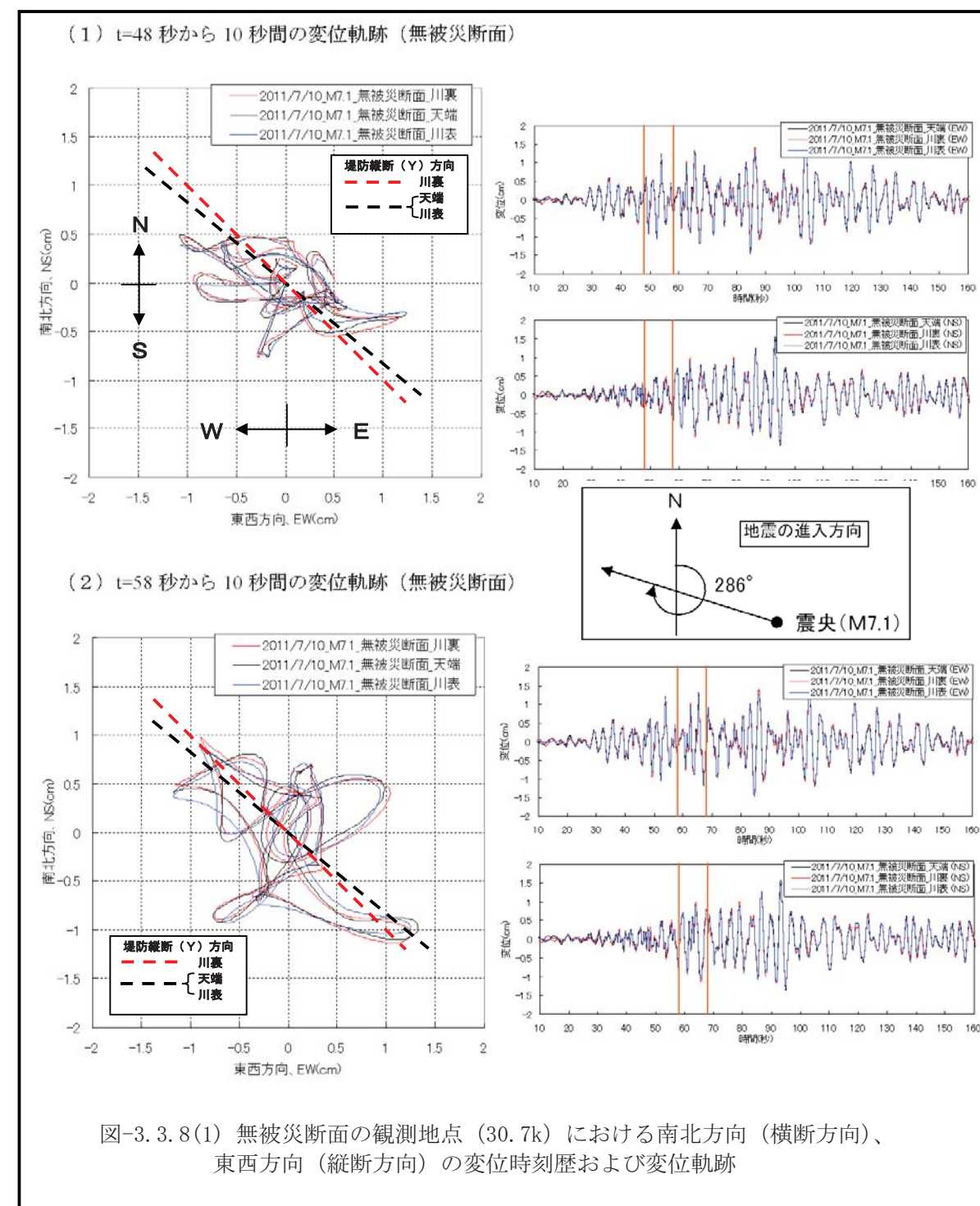


図-3.3.8(1) 無被災断面の観測地点 (30.7k) における南北方向 (横断方向)、東西方向 (縦断方向) の変位時刻歴および変位軌跡

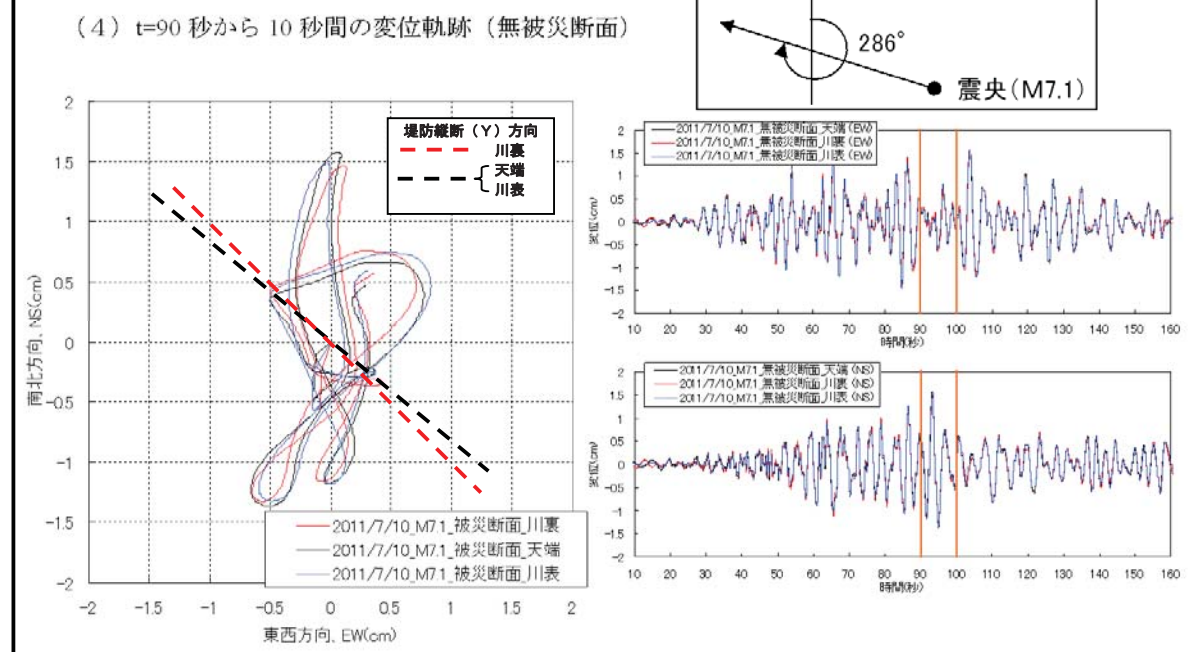
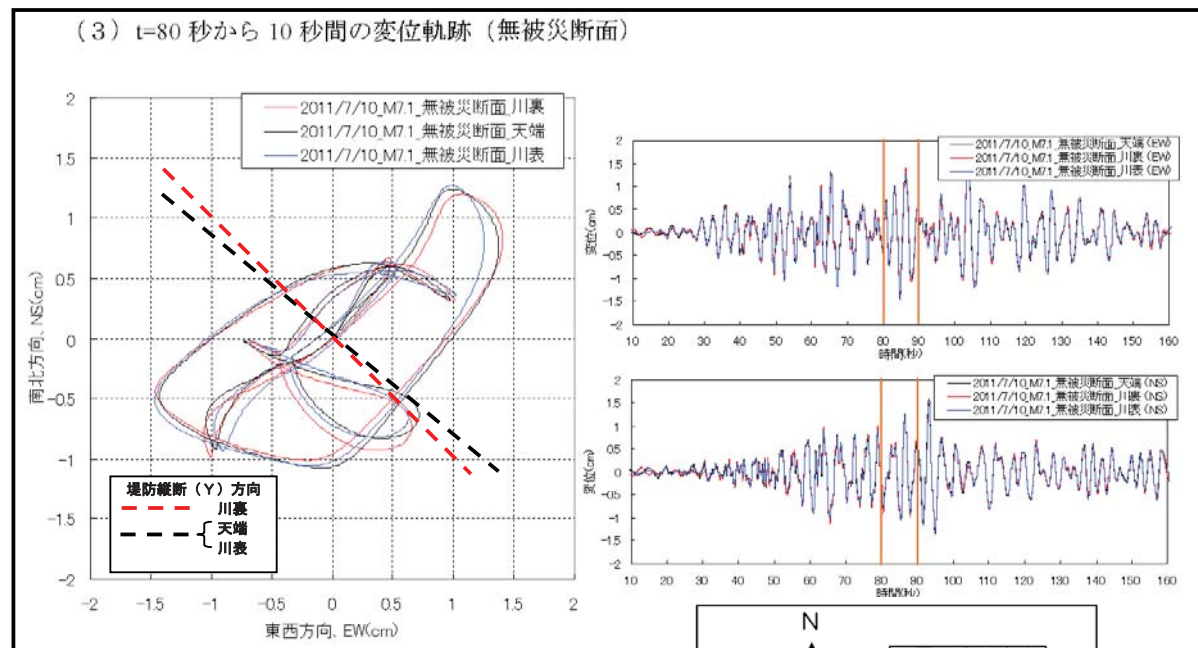


図-3.3.8(2) 無被災断面の観測地点 (30.7k) における南北方向 (横断方向)、東西方向 (縦断方向) の変位時刻歴および変位軌跡

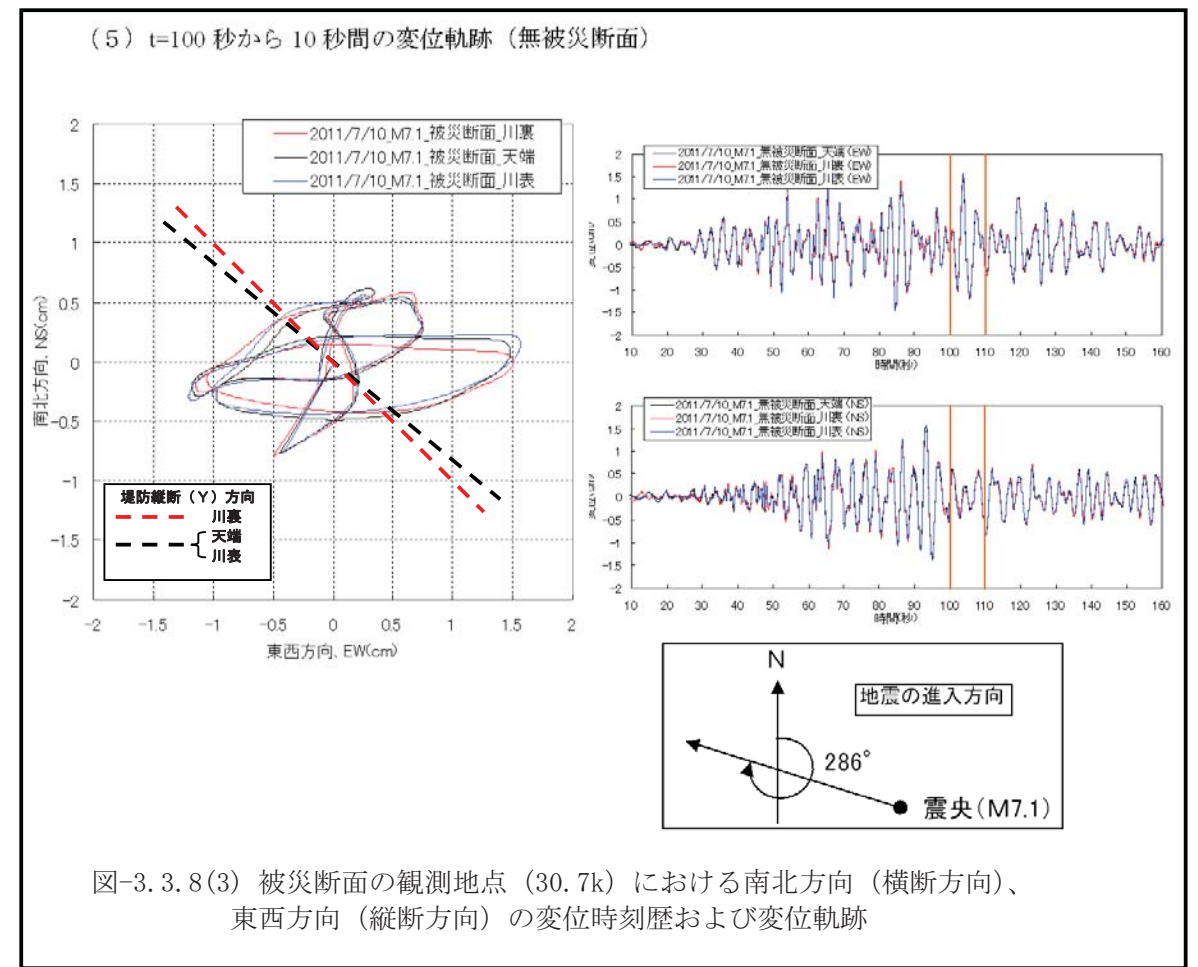


図-3.3.8(3) 被災断面の観測地点 (30.7k) における南北方向 (横断方向)、東西方向 (縦断方向) の変位時刻歴および変位軌跡

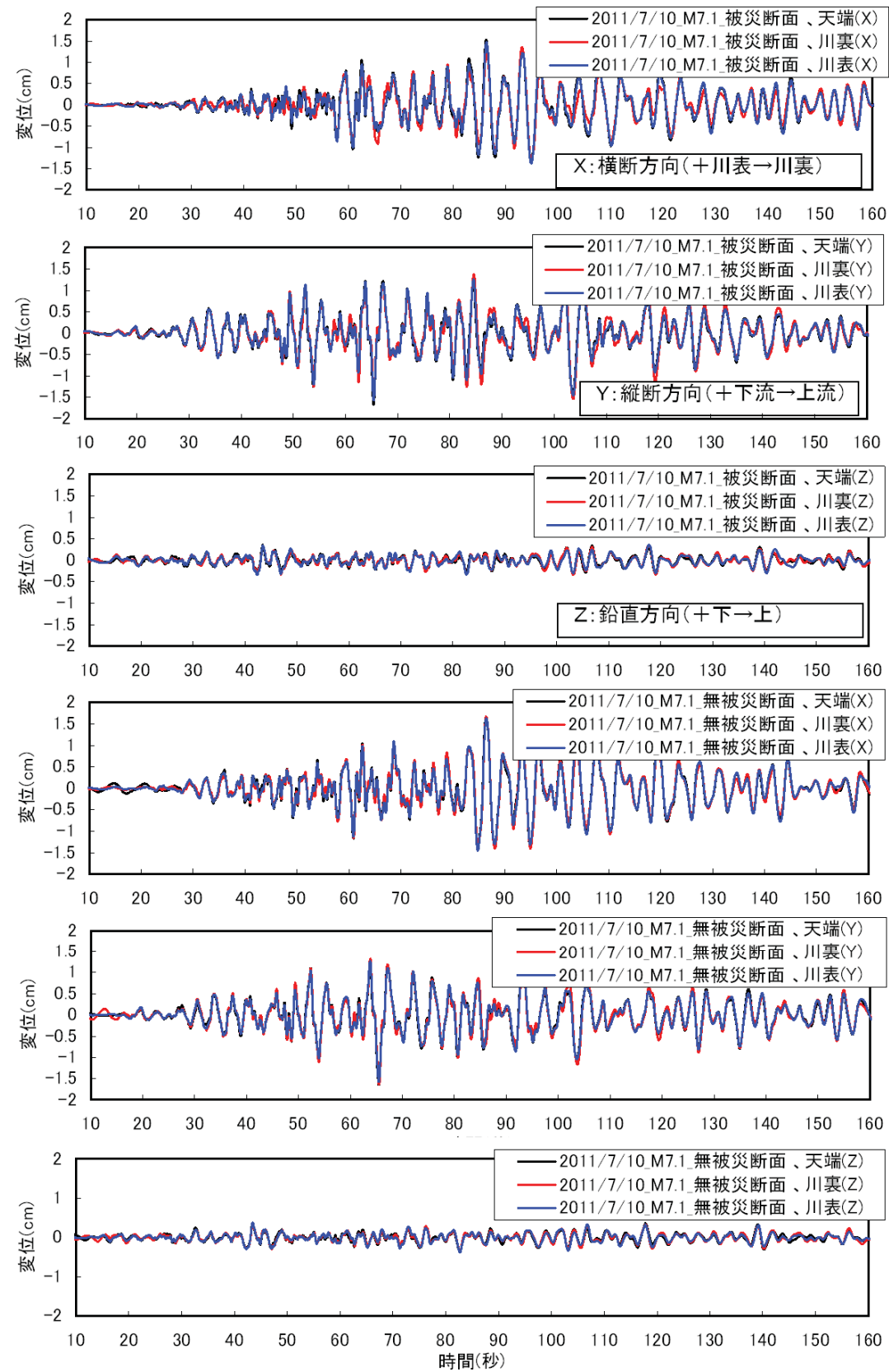


図-3.3.9 変位時刻歴（成分別重ね書き）（2011.7.10）

#### （４）加速度フーリエスペクトル特性

図-3.3.10、図-3.3.11 に被災断面、無被災断面の観測地点における加速度フーリエスペクトルを示す。

また、同図には加速度応答スペクトル特性（ $h = 5\%$ ）も合わせて表示した。これらより、以下のことが明らかとなった。

##### 【被災断面（30.3k）】

- ① 各地点における水平方向の加速度スペクトルは類似した形状を示す。
- ② 各地点とも縦断方向（Y方向）の周波数が卓越しており、卓越周波数は  $f = 0.3\text{Hz}$  付近および  $1.0\text{Hz}$  付近にみられる。
- ③ 盛土部では、 $f = 1.0\text{Hz}$  より高い周波数領域で横断方向（X方向）にやや高いスペクトル成分を有している。

##### 【無被災断面（30.7k）】

- ① 各地点における水平方向の加速度フーリエスペクトルは類似した形状を示す。
- ② 各地点とも横断方向（X方向）の周波数が卓越しており、卓越周波数は  $f = 0.3\text{Hz}$  付近および  $1.0\text{Hz}$ 、 $1.2\text{Hz}$  付近にみられる。
- ③ 盛土部では、 $f = 1.0\text{Hz}$  より高い周波数領域で横断方向（X方向）にやや高いスペクトル成分を有している。

図-3.3.12、図-3.3.13 に被災断面と無被災断面における川裏地盤面に対する盛土の加速度の応答性について示す。

これらより、以下のことが明らかとなった。

- ① 被災断面における川表、天端では、周波数  $f = 1.0\text{Hz}$  付近でやや増幅している。
- ② 被災断面における天端では、 $f = 2.0\text{Hz}$  以上においても増幅しているが、川表では逆に減少している。
- ③ 無被災断面における天端では、 $f = 2.0 \sim 3.0\text{Hz}$  および  $6.0\text{Hz}$  付近で増幅しているが、川表では逆に減少している。

図-3.3.14 に無被災断面に対する被災断面の加速度フーリエスペクトル比を示す。

これらより、以下のことが明らかとなった。

- ① 川裏、天端では、周波数  $f = 1.5\text{Hz}$  以上の領域において、被災断面の応答が増幅している。
- ② 川表では、 $f = 1.0\text{Hz} \sim 3.0\text{Hz}$  において、被災断面の応答が増幅している。

図-3.3.15 に K-NET「古川」に対する被災断面、無被災断面の地盤面における加速度フーリエスペクトル比および H/V スペクトルを示す。

これらより、以下のことが明らかとなった。

- ① H/V スペクトルによるピークは、古川、対象地点とも、 $f = 1.0\text{Hz}$ 、 $1.2\text{Hz}$ 、 $2.5\text{Hz}$  付近にみられることから、これらの周波数付近で震動が増幅する性質がある。なお、 $f = 0.2 \sim 0.3\text{Hz}$  付近のピークは、工学的基盤以深の深部地盤構造に起因するものである。
- ② 「古川」に対する対象地点のスペクトル比より、 $f = 1.0 \sim 1.2\text{Hz}$  付近、 $3.0\text{Hz}$  以上において、対象地点での応答が増幅しており、揺れやすいものと考えられる。

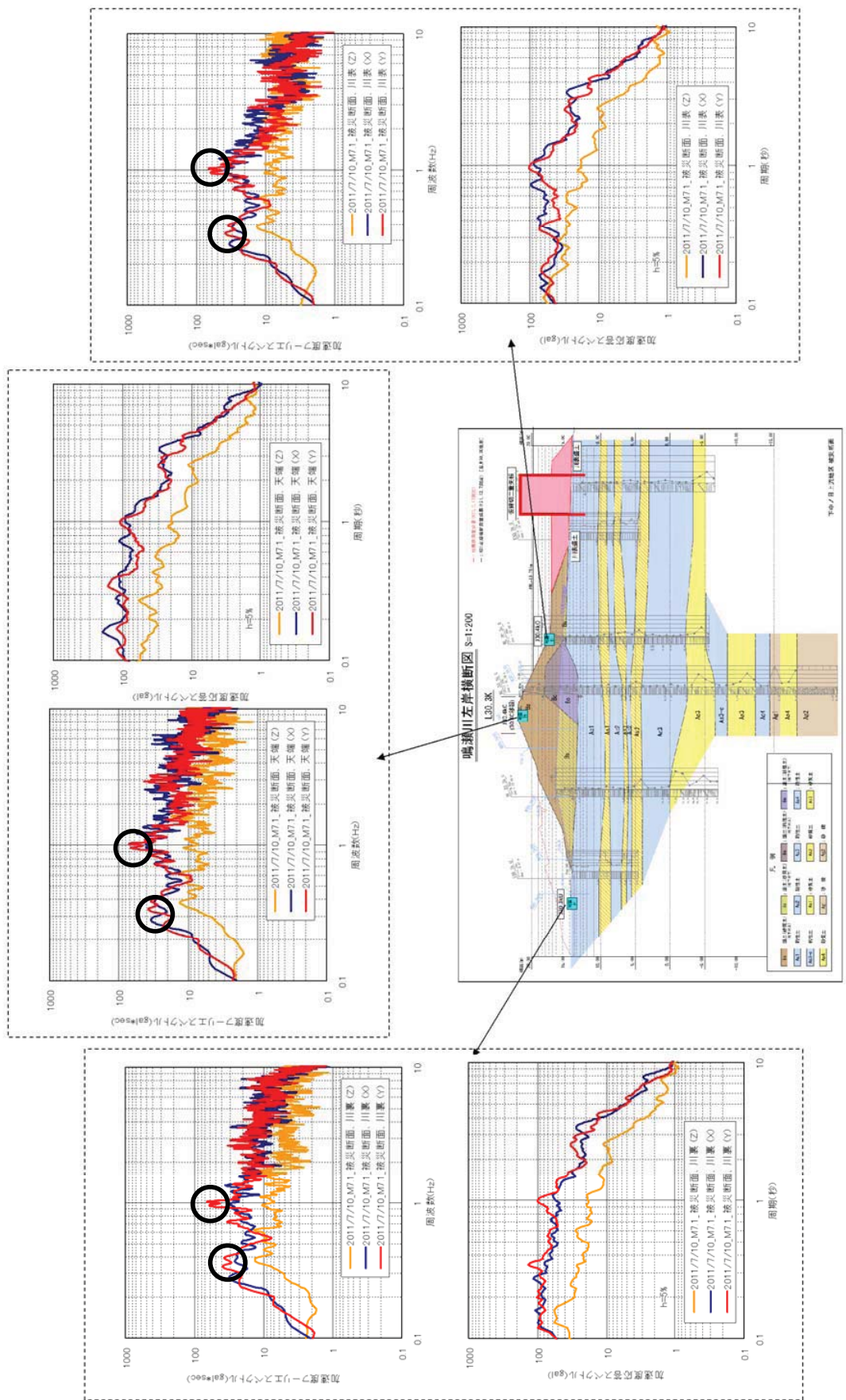


図-3.3.10 加速度フリーエスペクトルと加速度応答スペクトル (被災断面)

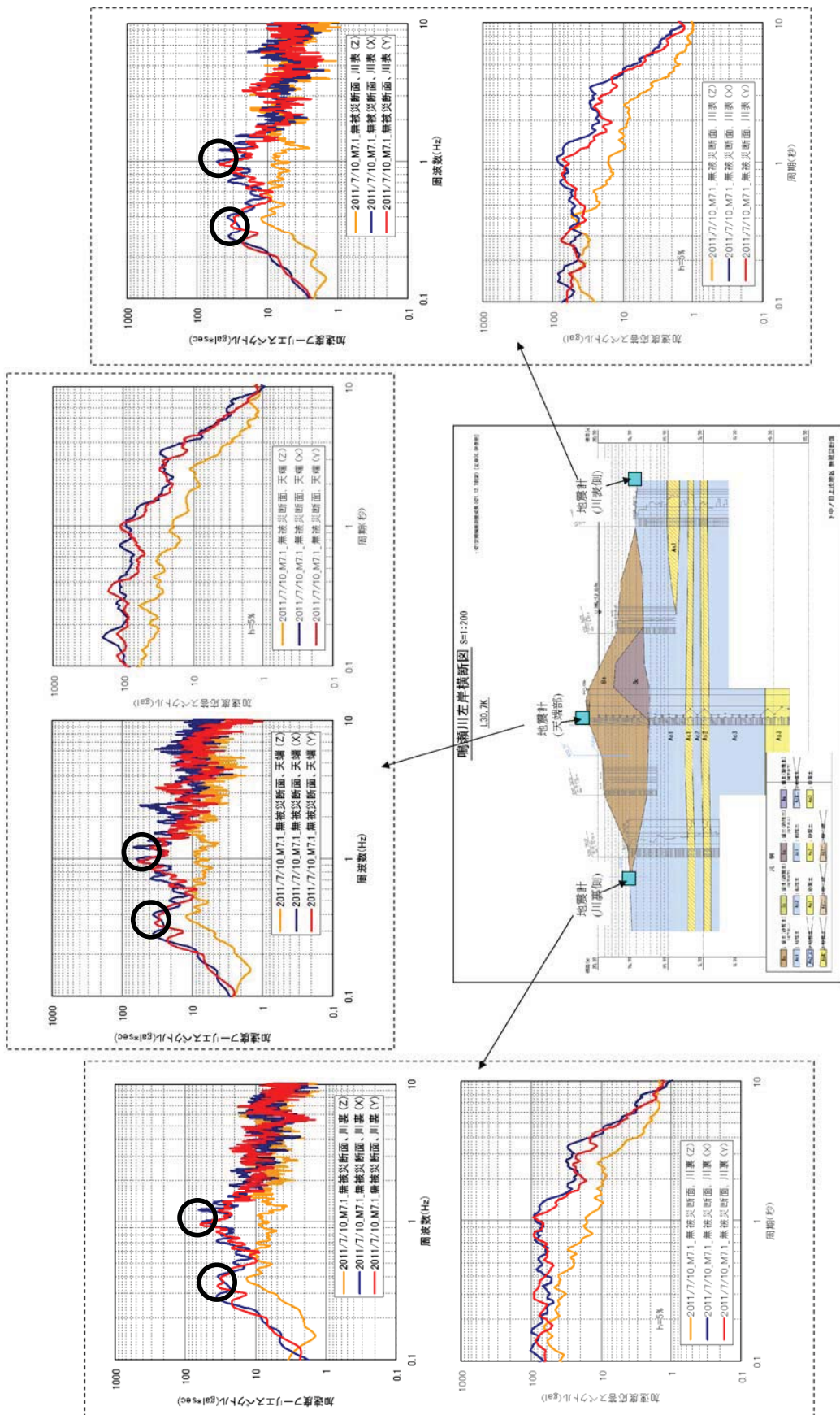


図-3.3.11 加速度フリーエスペクトルと加速度応答スペクトル (無被災断面)

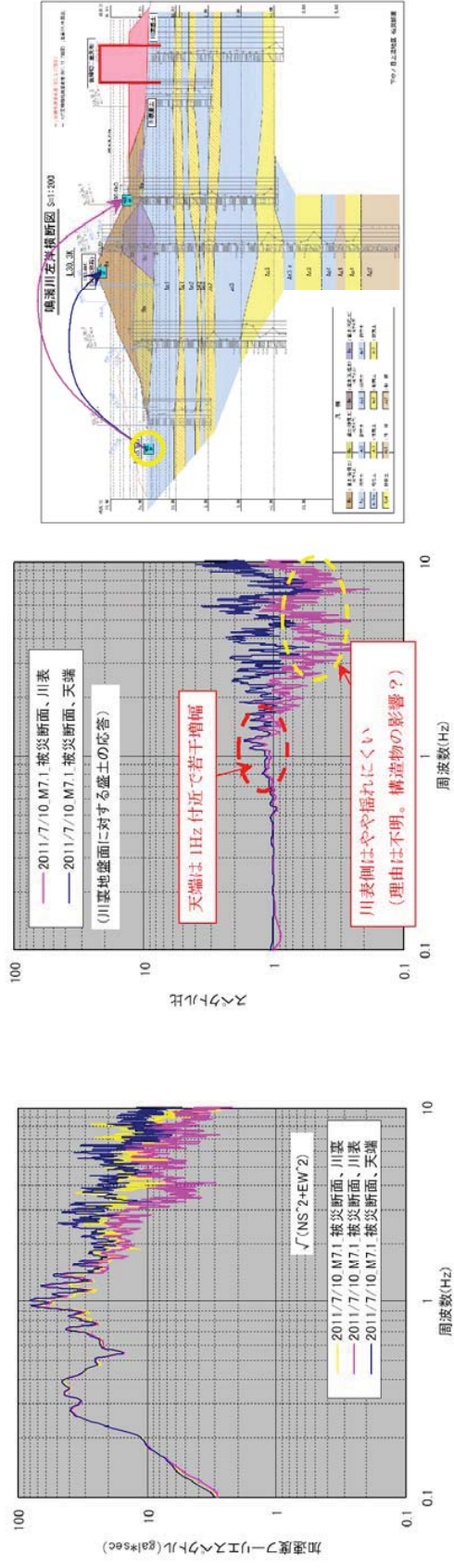


図-3.12 被災断面の盛土の応答

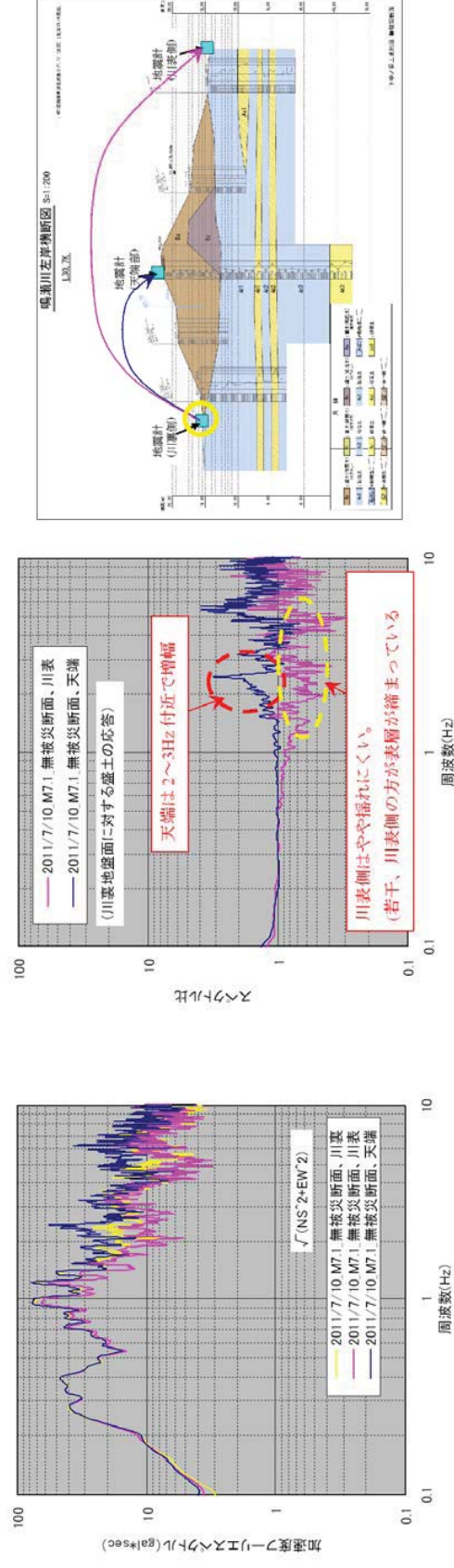


図-3.13 無被災断面の盛土の応答

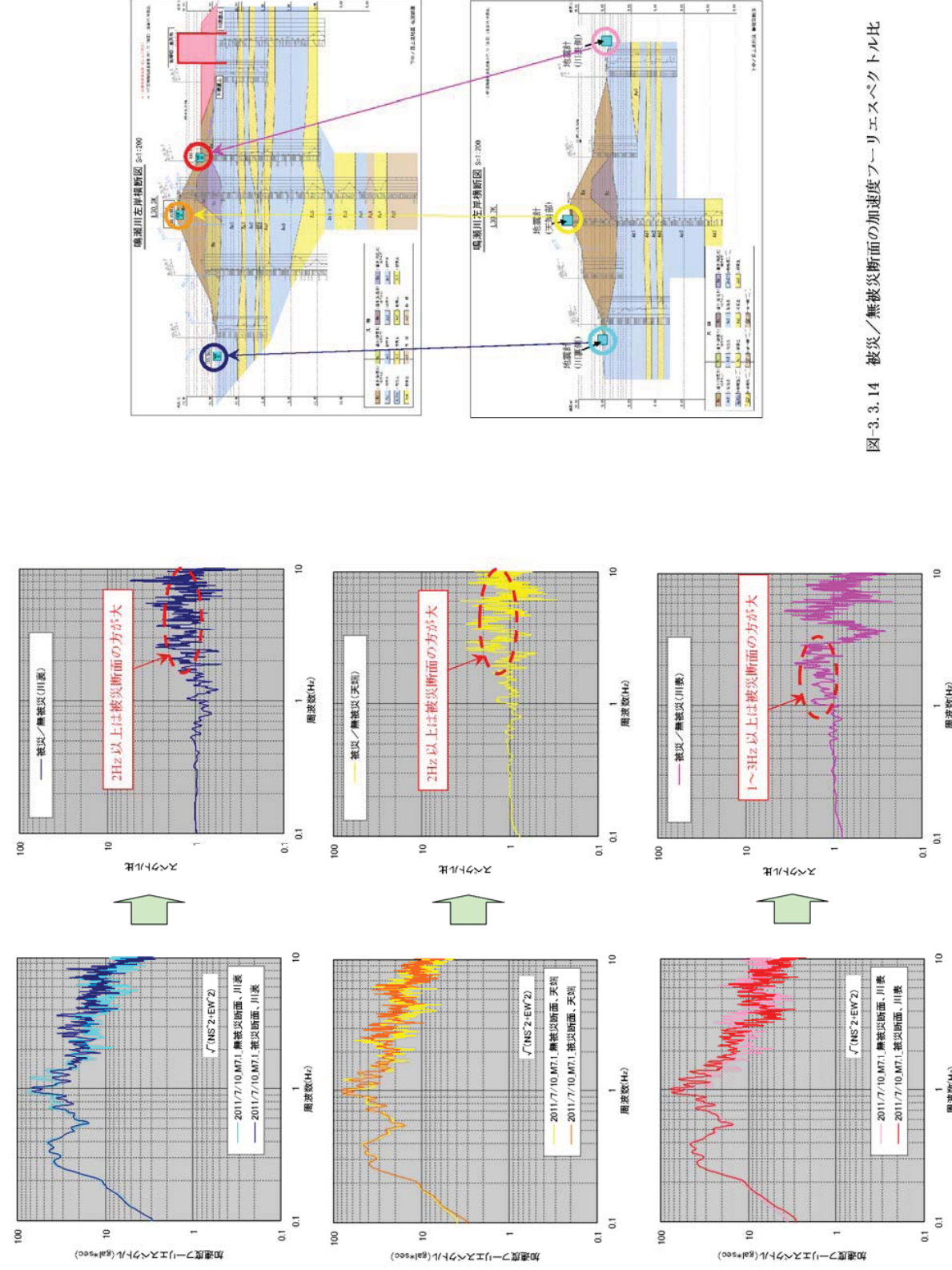


図-3.14 被災/無被災断面の加速度フーリエスペクトル比



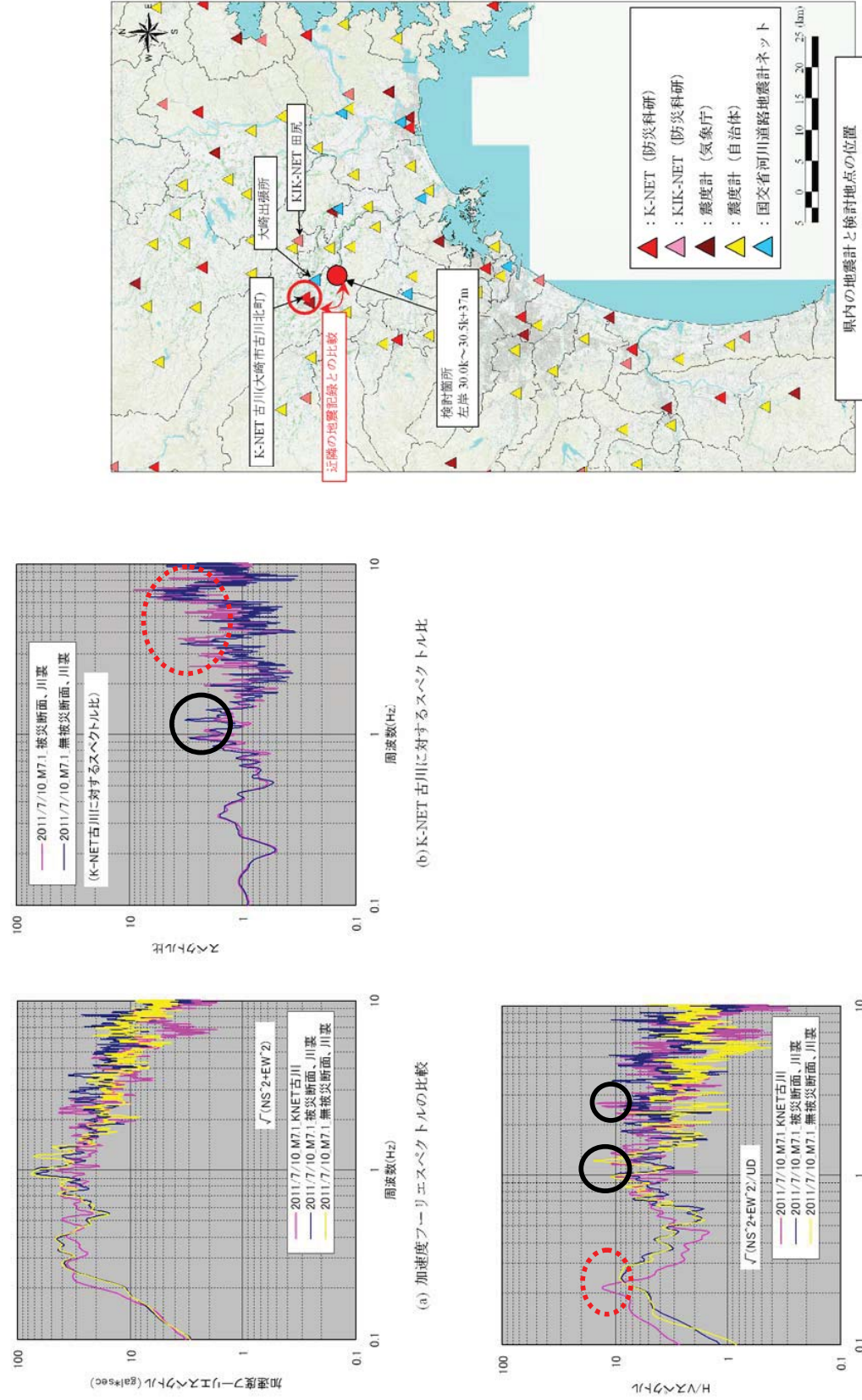


図-3.15 K-NET「古川」に対する対象地盤でのスペクトル比、H/Vスペクトル

(5) まとめ

地震観測は、多発する余震による堤防の地震時特性を明らかにし、被災発生の原因の基礎資料とすることを目的に行った。

観測の結果、以下のことが明らかにされた。

- ① 堤防の震動特性として、水平方向（横断、縦断）の加速度は天端（盛土）＞川裏（地盤面）＞川表（盛土または地盤面）の順に大きくなっている。
- ② 各地点における変位軌跡から、地震発生から時間が経過するにつれ震動の方向が変化し、最大振幅時には堤防横断方向に大きく震動している。
- ③ 川表は、被災断面、無被災断面とも川裏に比べて揺れにくい傾向にあるといえるが、原因は明らかではない。
- ④ 被災断面における盛土天端では、幅広い周波数（ $f = 1\text{Hz}$ 以上）で揺れやすい傾向が認められる。
- ⑤ H/V スペクトルによるピークは、古川、対象地点とも、 $f = 1.0\text{Hz}$ 、 $1.2\text{Hz}$ 、 $2.5\text{Hz}$ 付近にみられることから、これらの周波数付近で震動が増幅する性質がある。なお、 $f = 0.2 \sim 0.3\text{Hz}$ 付近のピークは、工学的基盤以深の深部地盤構造に起因するものである。
- ⑥ 「古川」に対する対象地点のスペクトル比より、 $f = 1.0 \sim 1.2\text{Hz}$ 付近、 $3.0\text{Hz}$ 以上において、対象地点での応答が増幅しており、揺れやすいものと考えられる。

3. 4 【余震記録 (B)】 (2011年7月23日 (土) 13時34分、M=6.5)

地震記録波形を図-3.4.1に示す。

同図には、K-NETで記録された対象箇所(被災箇所30.3k)に最も近い観測地点「古川」での強震記録波形も併せて示している。

これより、本対象地点は、「古川」に比べて大きな加速度が生じていることが判る。

(1) K-NET「古川」における本震(2011年3月11日(金)発生)との比較

図-3.4.2にK-NETで記録された「古川」における本震と余震の地震波形および加速度フーリエスペクトルを比較して示す。加速度フーリエスペクトル結果より、周波数特性の形状は類似していること、倍率は10~50倍程度の差異がみられることが明らかにされた。

また、図-3.4.3にK-NET「古川」の地盤と地震基盤面から地表面におけるサイト増幅特性を示す。これより、「古川」では0.2~1.0 Hzの増幅が大きく、特に0.2~0.3 Hz、0.8~1.0 Hzで卓越していることが判る。

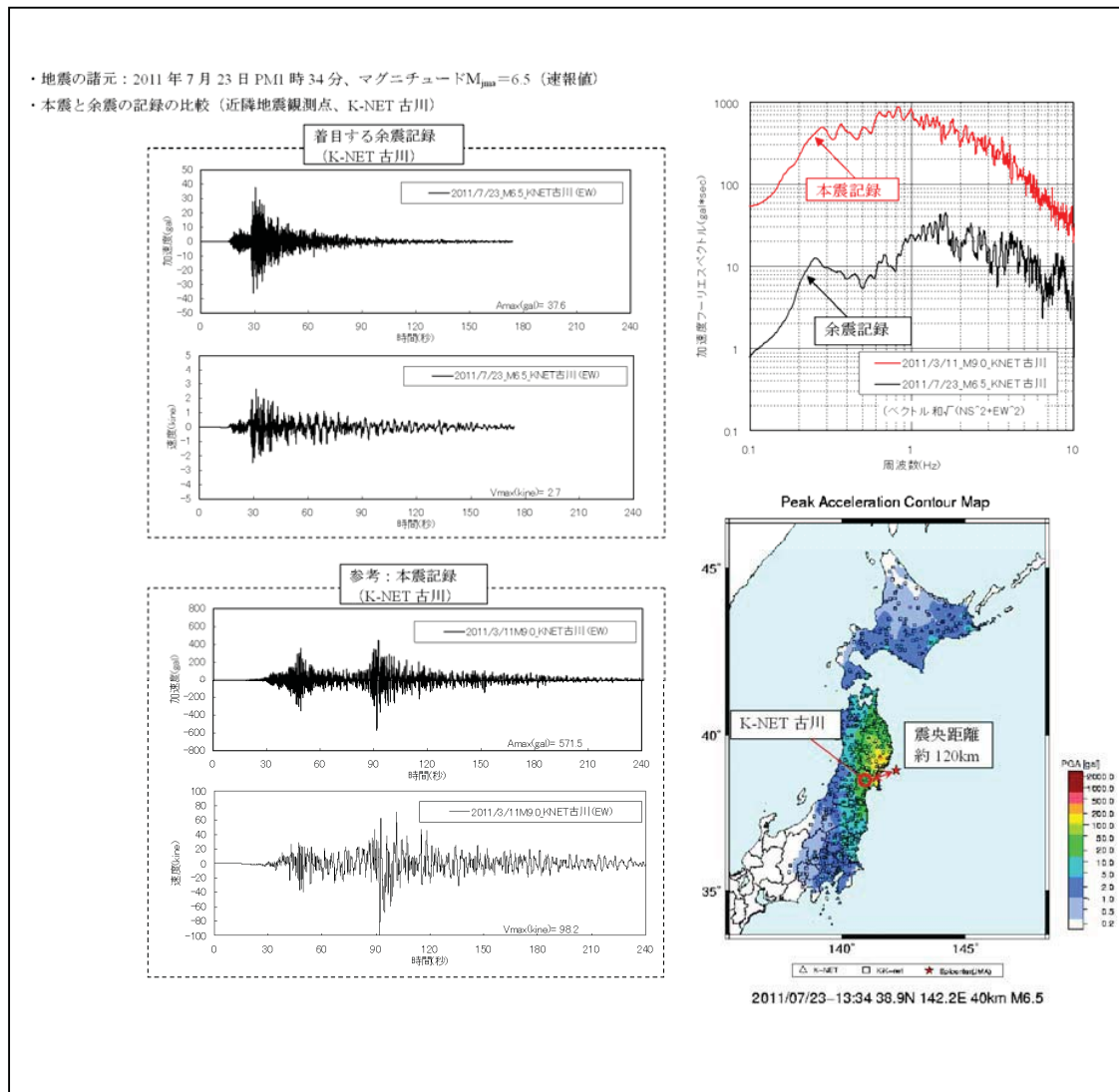
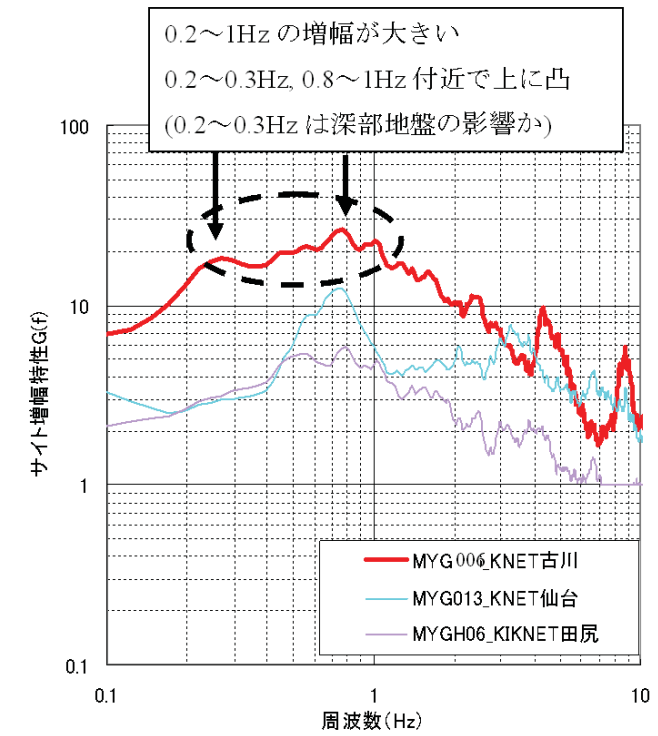


図-3.3.2 本震と余震の地震波形および加速度フーリエスペクトル (K-NET)



野津・長尾(2005)によるサイト増幅特性 (地震基盤~地表面の増幅関数)

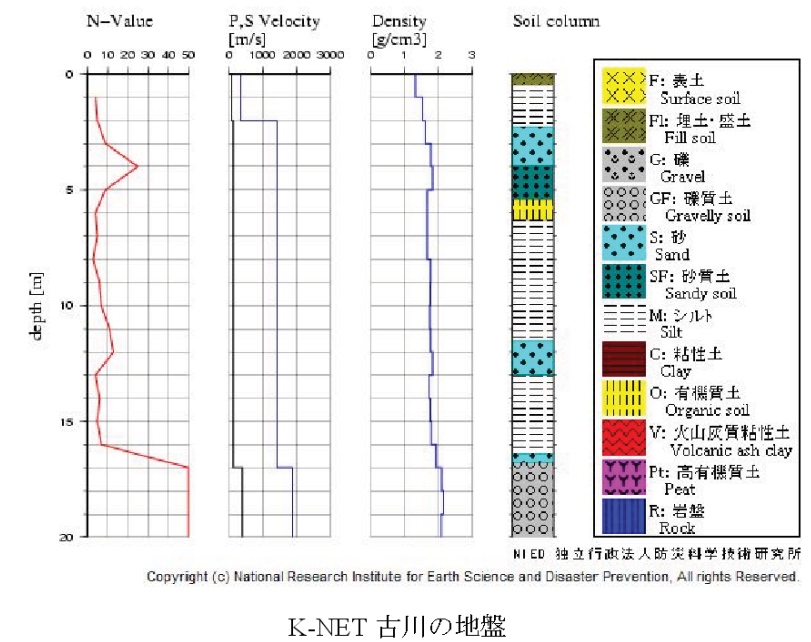


図-3.4.3 古川の地盤とサイト増幅特性 (K-NET)

(2) 加速度時刻歴および加速度軌跡（オービット）

図-3.4.4、図-3.4.5 に被災断面、無被災断面の観測地点における加速度時刻歴、加速度粒子軌跡を示す。

また、図-3.4.6 に被災断面、無被災断面における成分毎の加速度波形を重ねて表示した。これらより以下のことが明らかとなった。

【被災断面(30.3k)】

- ① 最大加速度は、盛土の天端における横断方向（X方向）で最も大きい。
- ② 水平方向の最大加速度は、盛土の天端＞川裏（地盤面）＞川表（盛土の法尻付近）の順に大きくなっている。
- ③ 加速度軌跡は、いずれの地点においても堤防横断（X）方向に長い楕円形を示している。

【無被災断面(30.7k)】

- ① 最大加速度は、盛土の天端における横断方向（X方向）で最も大きい。
- ② 水平方向の最大加速度は、盛土の天端＞川裏（地盤面）＞川表（地盤面）の順に大きくなっている。
- ③ 加速度軌跡は、いずれの地点においても原点を中心に円形状を示していて、優位な方向性は認められないが、加速度のピーク時には横断方向（X方向）に大きな加速度振幅がみられる。

(3) 変位時刻歴および変位軌跡（オービット）

図-3.4.7、図-3.4.8 に被災断面、無被災断面の観測地点における南北方向（横断方向）、東西方向（縦断方向）の変位時刻歴および変位軌跡を時間を追って示す。

ここに、地震の進入方向は、被災断面の縦断方向に対して時計周りに 40°～50° ずれている。

また、図-3.3.9 に被災断面、無被災断面における成分毎の変位波形を重ねて表示した。これらより、被災断面と無被災断面では同様な粒子軌跡がみられることが明らかとなった。これらの傾向をまとめると以下のようである。

- ① t = 25～35 秒では、堤防横断（x）方向の揺れが卓越している。
- ② t = 35～45 秒では、堤防縦断（Y）方向に加えて堤防横断（X）方向の揺れも見られるが、いずれも揺れは小さい。
- ③ t = 45～55 秒では、堤防横断（X）方向の揺れがやや卓越している。
- ④ t = 55～65 秒では、堤防横断（X）方向の揺れが卓越しているが揺れは小さい。
- ⑤ t = 80～90 秒では、堤防横断（X）方向の揺れが卓越しているが揺れは小さい。

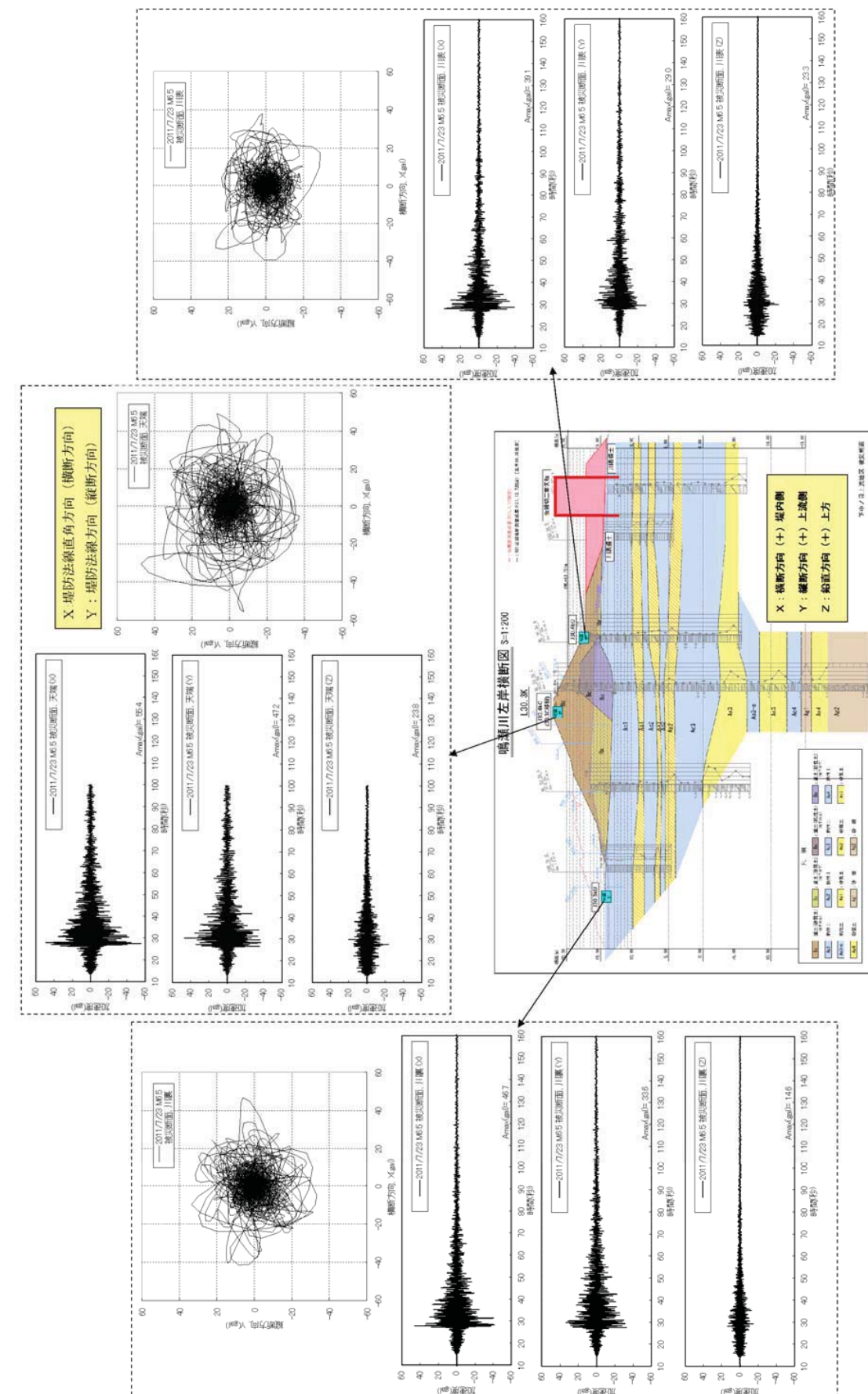


図-3.4.4 加速度時刻歴波形と加速度軌跡（被災断面）

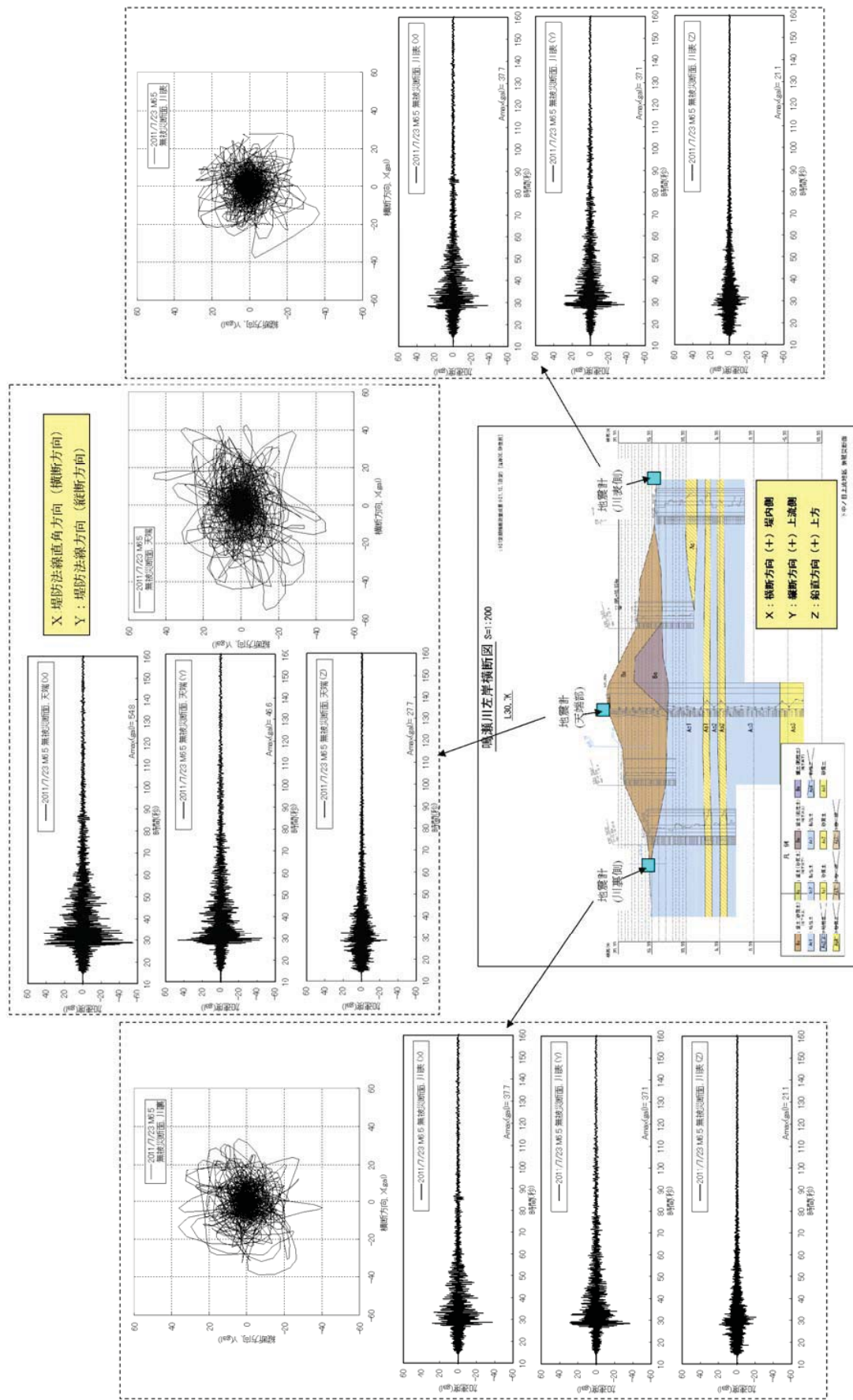


图-3.4.5 加速度時刻履歴波形と加速度軌跡(無被災断面)

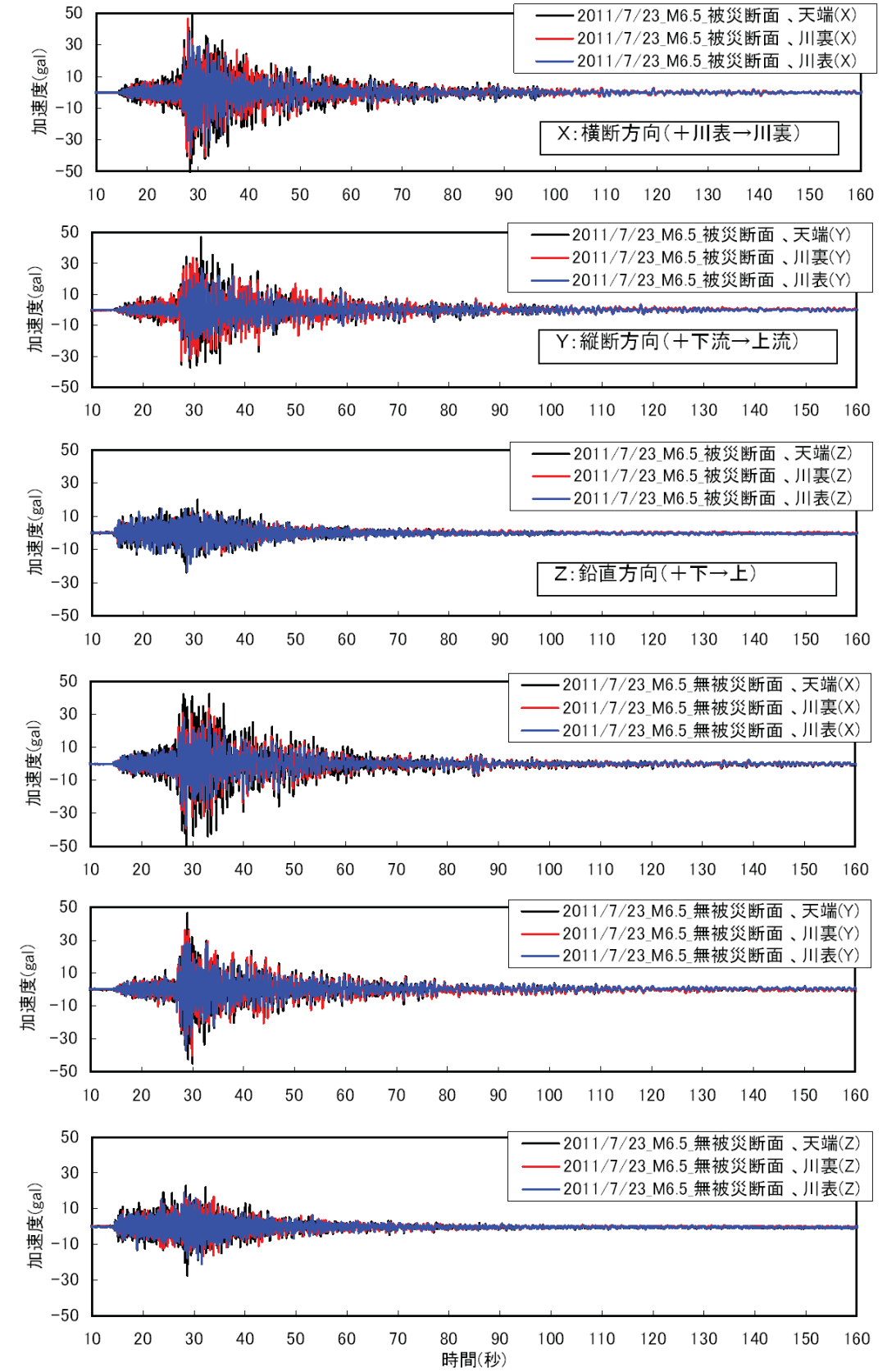
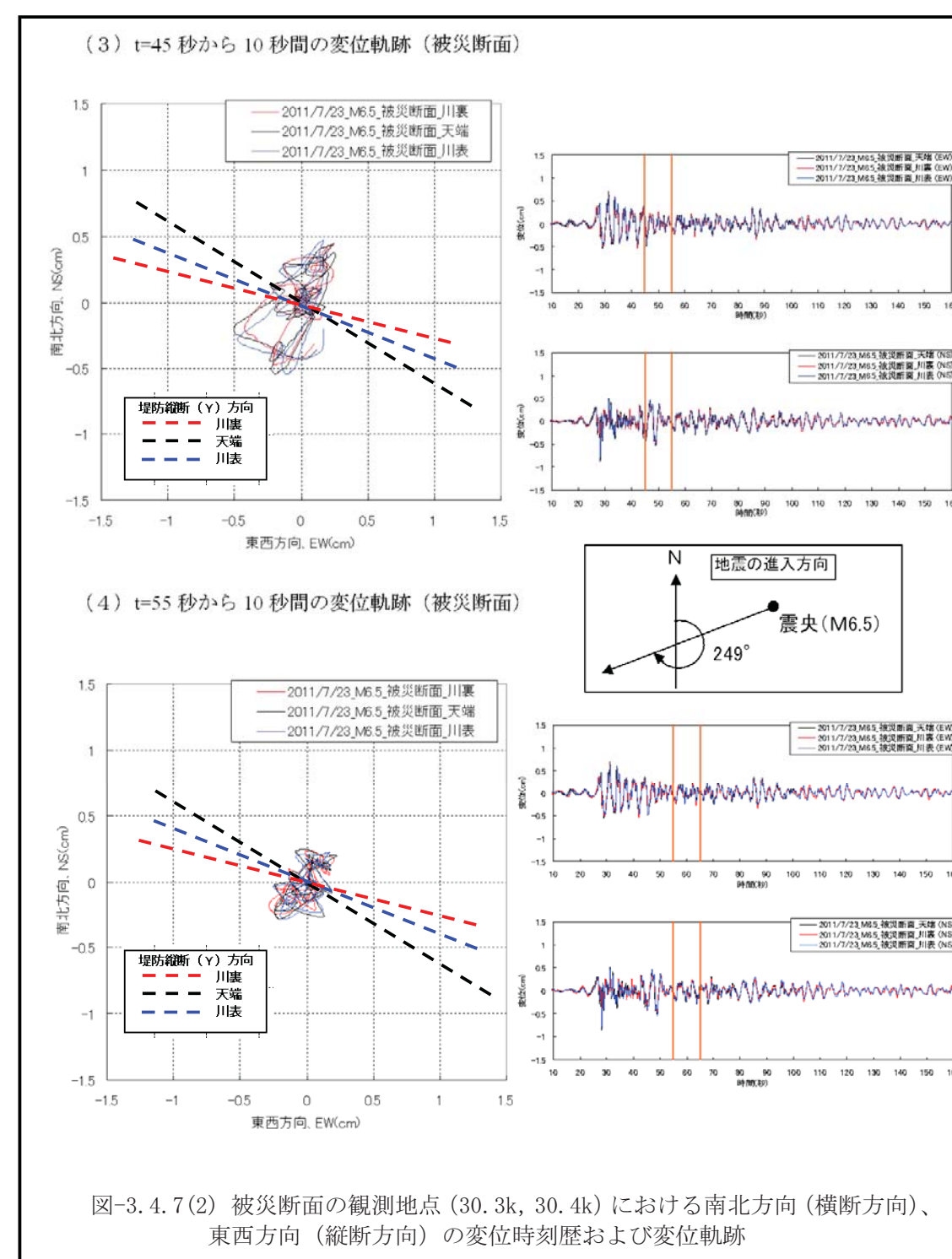
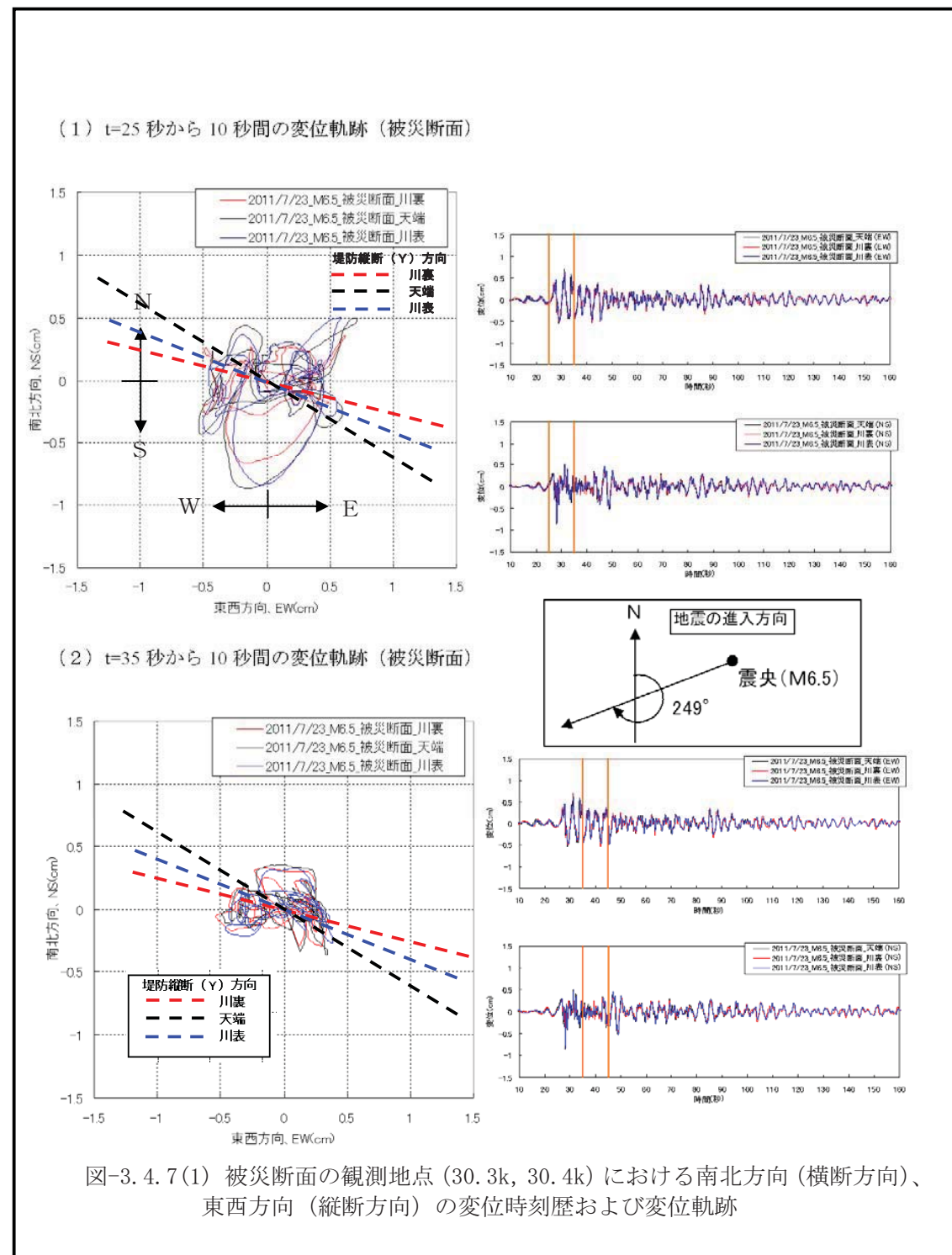


图- 加速度時刻歴(2011.7.23)

図-3.4.6 加速度時刻歴（成分別重ね書き）（2011.7.23）



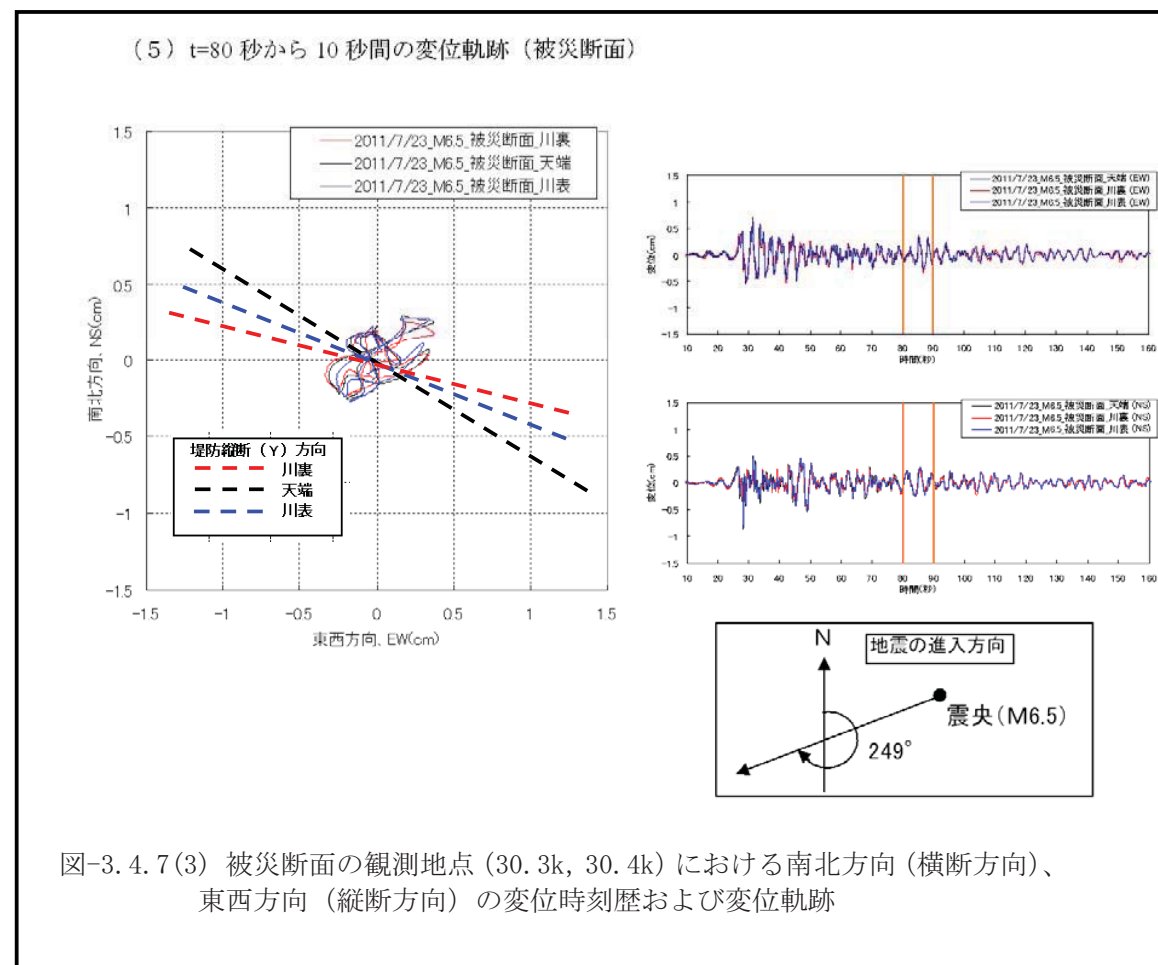


図-3.4.7(3) 被災断面の観測地点 (30.3k, 30.4k) における南北方向 (横断方向)、東西方向 (縦断方向) の変位時刻歴および変位軌跡

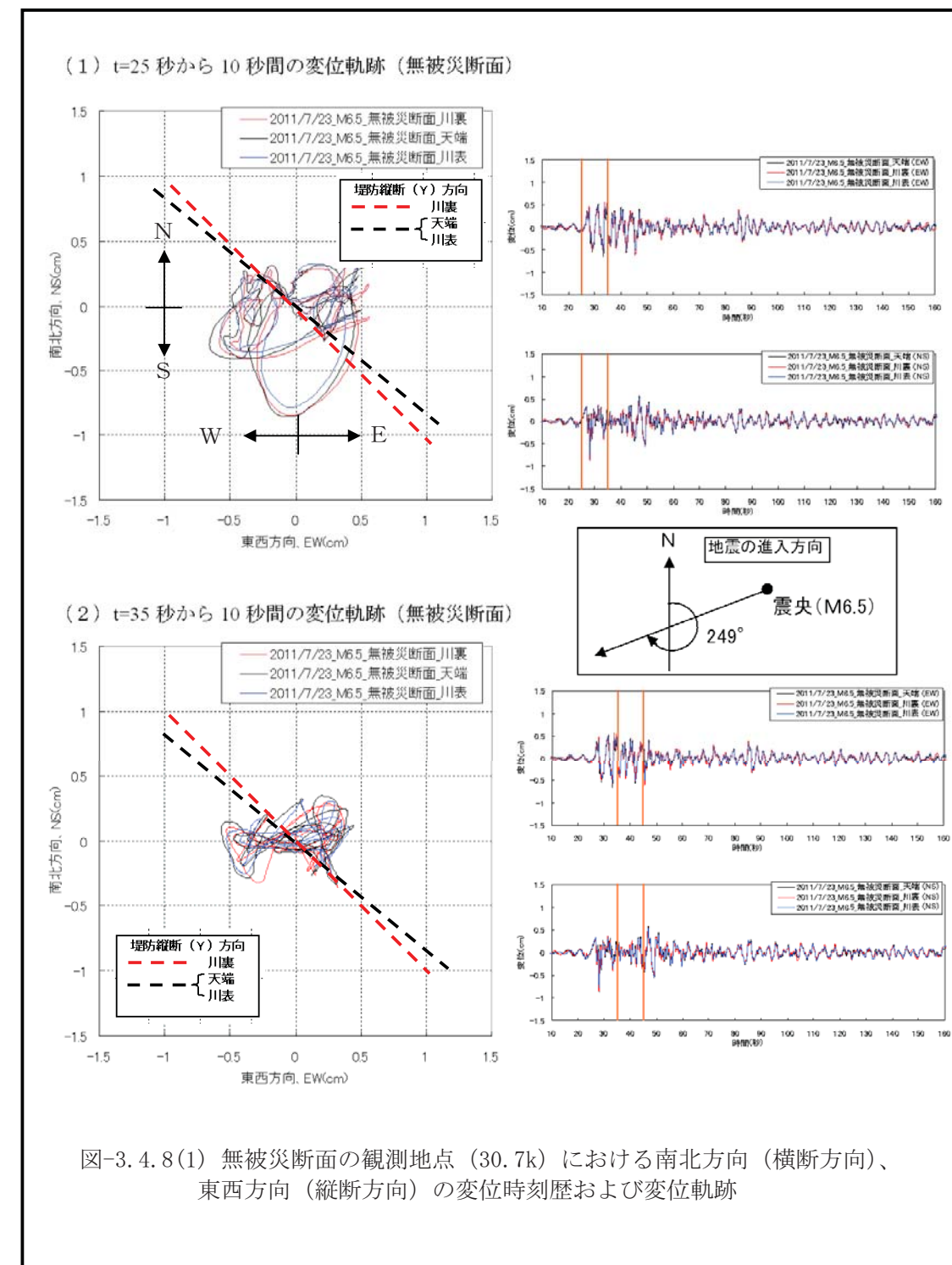
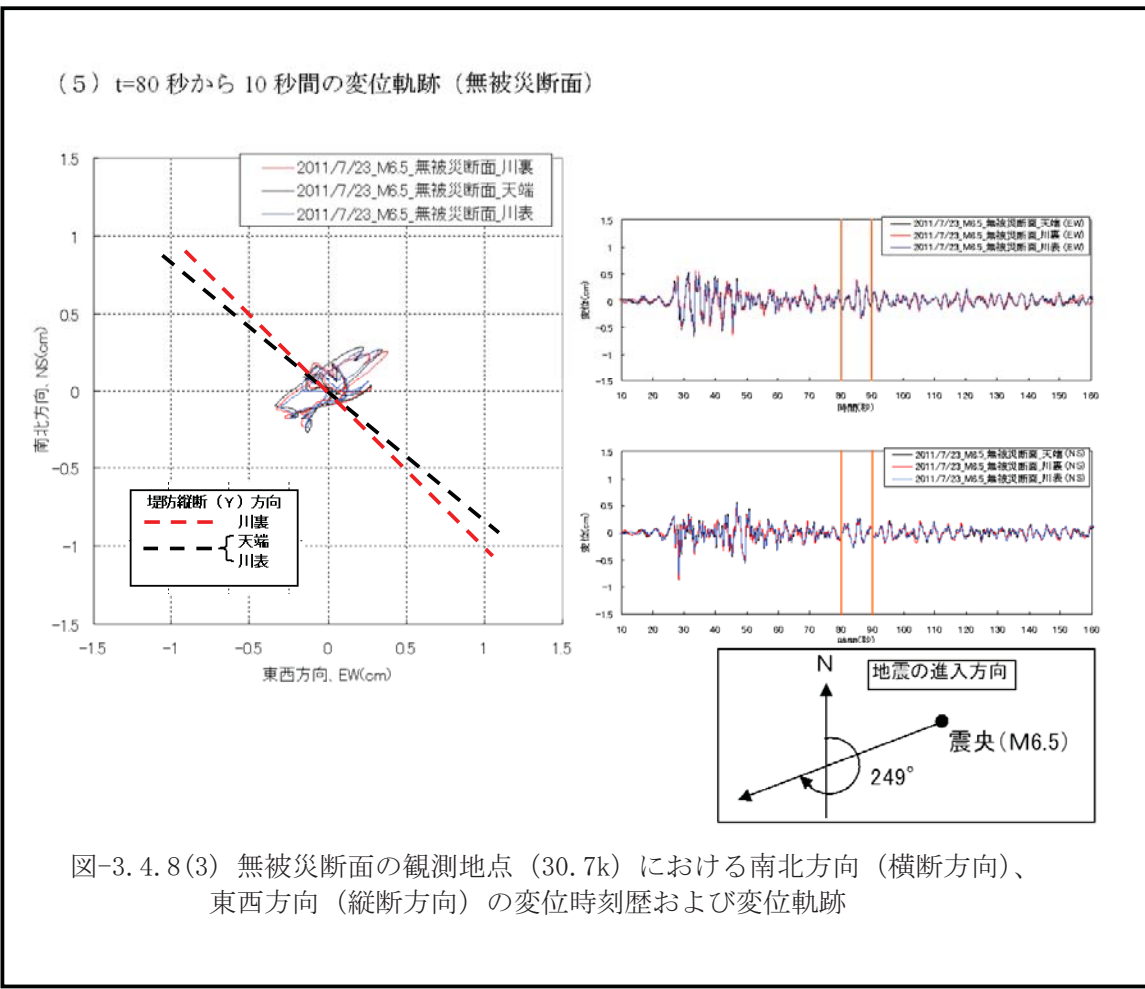
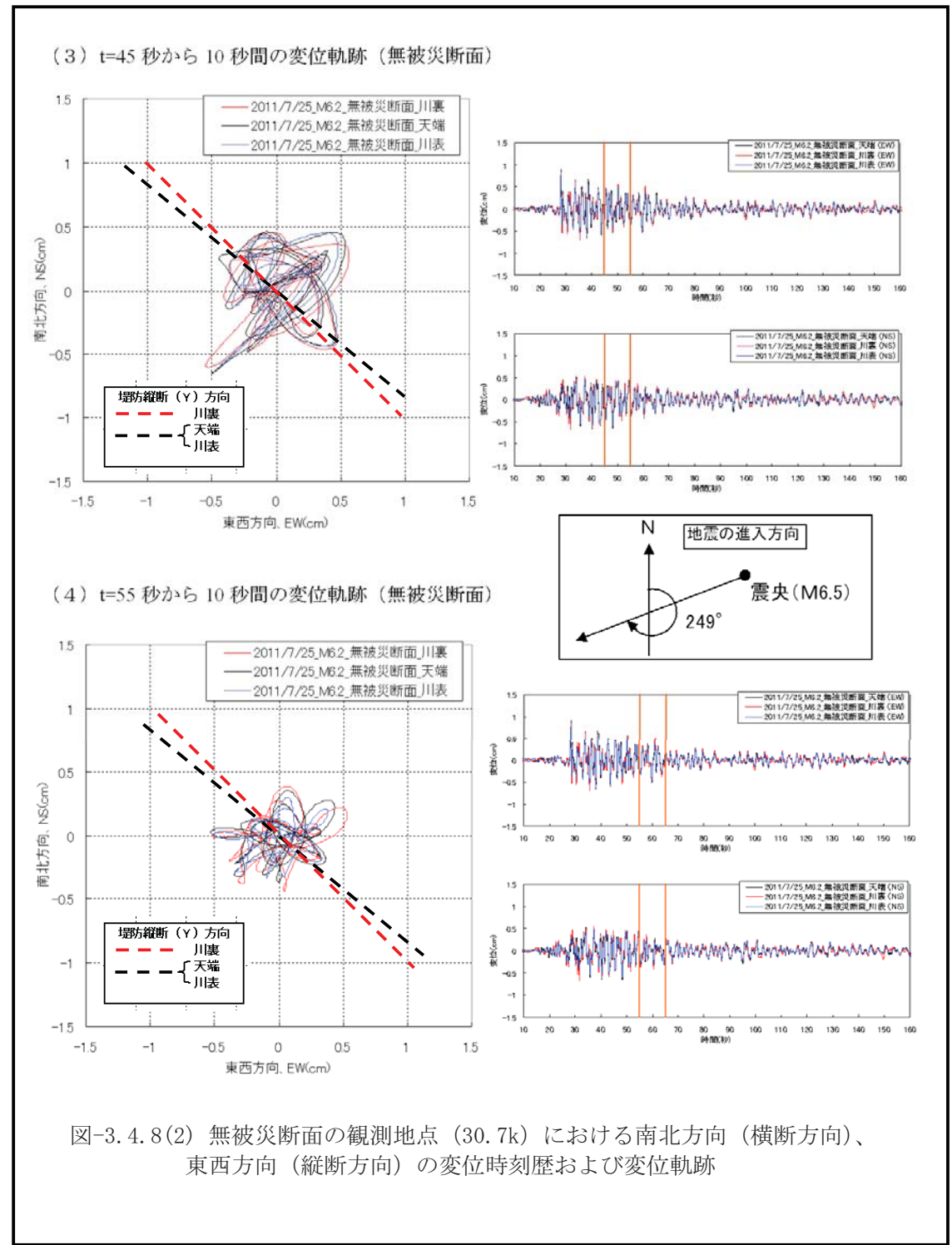


図-3.4.8(1) 無被災断面の観測地点 (30.7k) における南北方向 (横断方向)、東西方向 (縦断方向) の変位時刻歴および変位軌跡



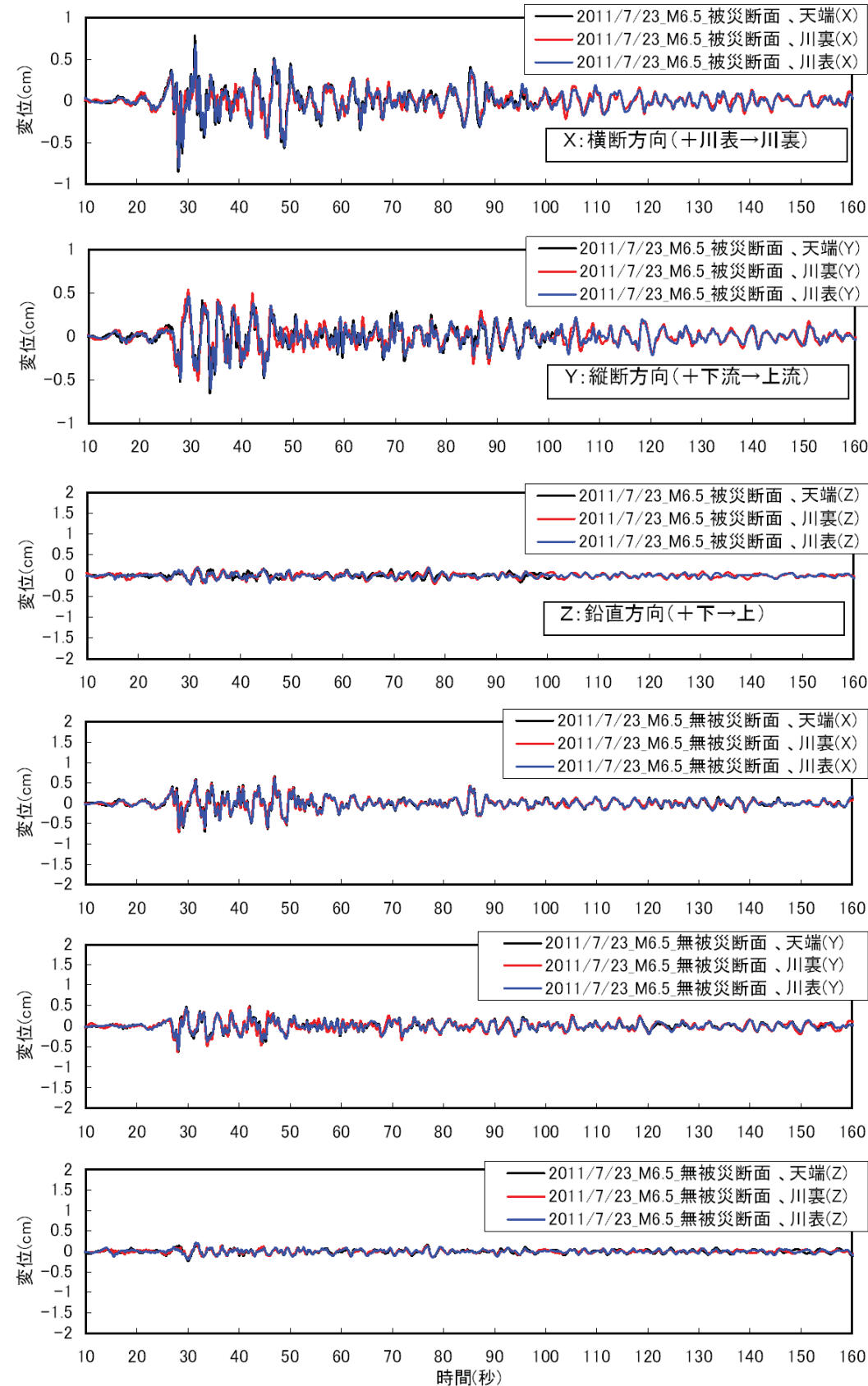


図-3.4.9 変位時刻歴（成分別重ね書き）（2011.7.23）

#### （４）加速度フーリエスペクトル特性

図-3.4.10、図-3.4.11 に被災断面、無被災断面の観測地点における加速度フーリエスペクトルを示す。

また、同図には加速度応答スペクトル特性（ $h = 5\%$ ）も合わせて表示した。これらより、以下のことが明らかとなった。

##### 【被災断面（30.3k）】

- ① 各地点における水平方向の加速度スペクトルは類似した形状を示す。
- ② 各地点とも横断方向（X方向）の周波数が卓越しており、卓越周波数は  $f = 1.0, 1.2\text{Hz}$  付近付近にみられる。
- ③ 盛土部では、 $f = 2.0\text{Hz}$  より高い周波数領域で横断方向（X方向）にやや高いスペクトル成分を有している。

##### 【無被災断面（30.7k）】

- ① 各地点における水平方向の加速度フーリエスペクトルは類似した形状を示す。
- ② 各地点とも横断（X）方向の周波数が卓越しており、卓越周波数は  $f = 1.0 \sim 1.3\text{Hz}$  付近にみられる。
- ③ 盛土部では、 $f = 2.0\text{Hz}$  より高い周波数領域で横断方向（X方向）にやや高いスペクトル成分を有している。

図-3.4.12、図-3.4.13 に被災断面と無被災断面における川裏地盤面に対する盛土の加速度の応答性について示す。

これらより、以下のことが明らかとなった。

- ① 被災断面における川表、天端では、周波数  $f = 1.0\text{Hz}$  付近でやや増幅している。
- ② 被災断面における天端では、 $f = 2.0\text{Hz}$  以上においても増幅しているが、川表では逆に減少している。
- ③ 無被災断面における天端では、 $f = 2.0 \sim 3.0\text{Hz}$  および  $6.0\text{Hz}$  付近で増幅しているが、川表では逆に減少している。

図-3.3.14 に無被災断面に対する被災断面の加速度フーリエスペクトル比を示す。

これらより、以下のことが明らかとなった。

- ① 川裏、天端では、周波数  $f = 1.5\text{Hz}$  以上の領域において、被災断面の応答が増幅している。
- ② 川表では、 $f = 1.0\text{Hz} \sim 3.0\text{Hz}$  において、被災断面の応答が増幅している。

図-3.4.15 に K-NET「古川」に対する被災断面、無被災断面の地盤面における加速度フーリエスペクトル比および H/V スペクトルを示す。

これらより、以下のことが明らかとなった。

- ① H/V スペクトルによるピークは、対象地点で、 $f = 1.0\text{Hz}$  付近、古川では  $f = 1.5, 2.2\text{Hz}$  付近にみられることから、これらの周波数付近で震動が増幅する性質がある。なお、 $f = 0.2 \sim 0.3\text{Hz}$  付近のピークは、工学的基盤で深の深部地盤構造に起因するものである。
- ② 「古川」に対する対象地点のスペクトル比より、 $f = 1.0 \sim 1.2\text{Hz}$  付近、 $3.0\text{Hz}$  以上において、対象地点での応答が増幅しており、揺れやすいものと考えられる。



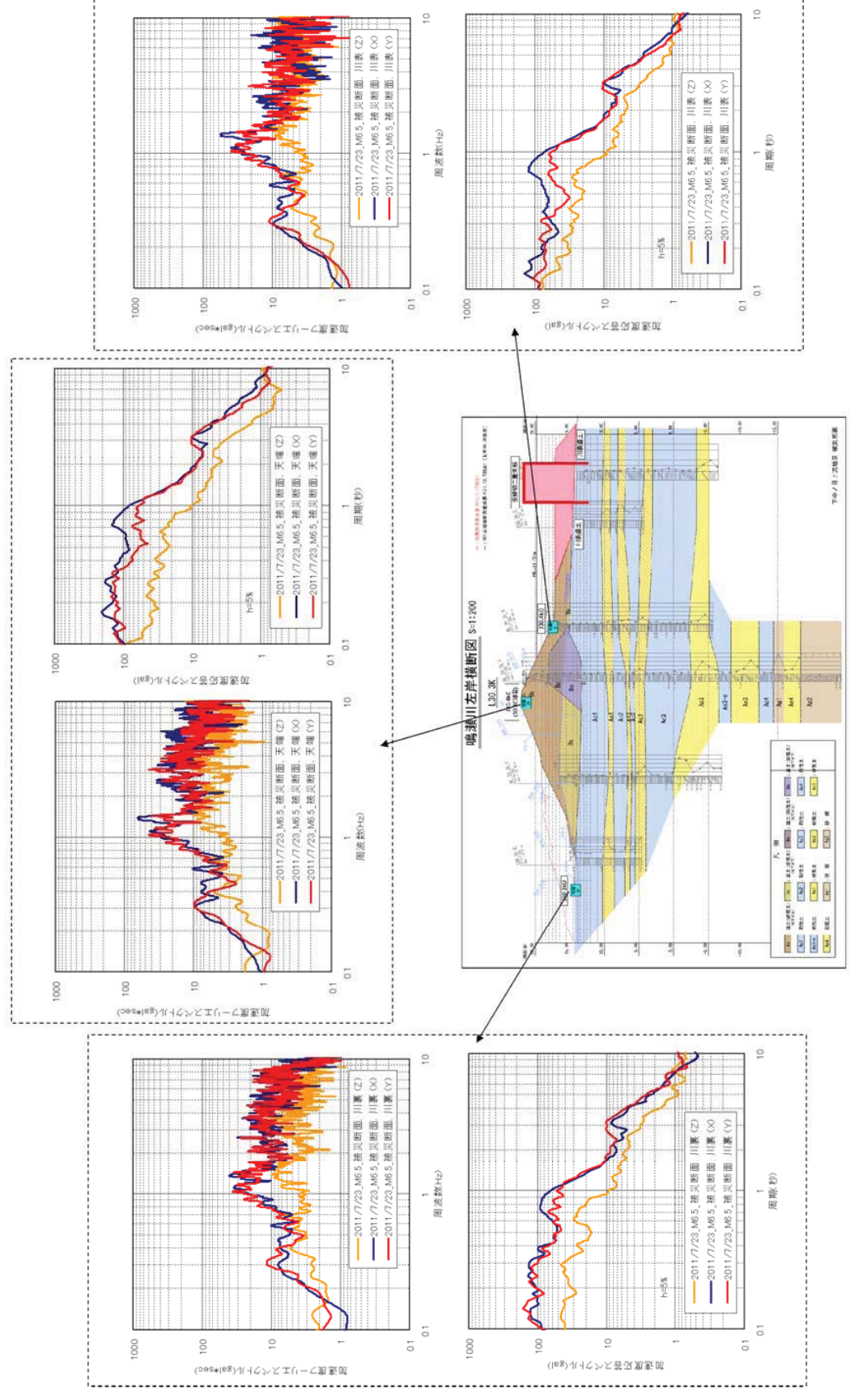


図-3.4.10 加速度フーリエスペクトルと加速度応答スペクトル (被災断面)

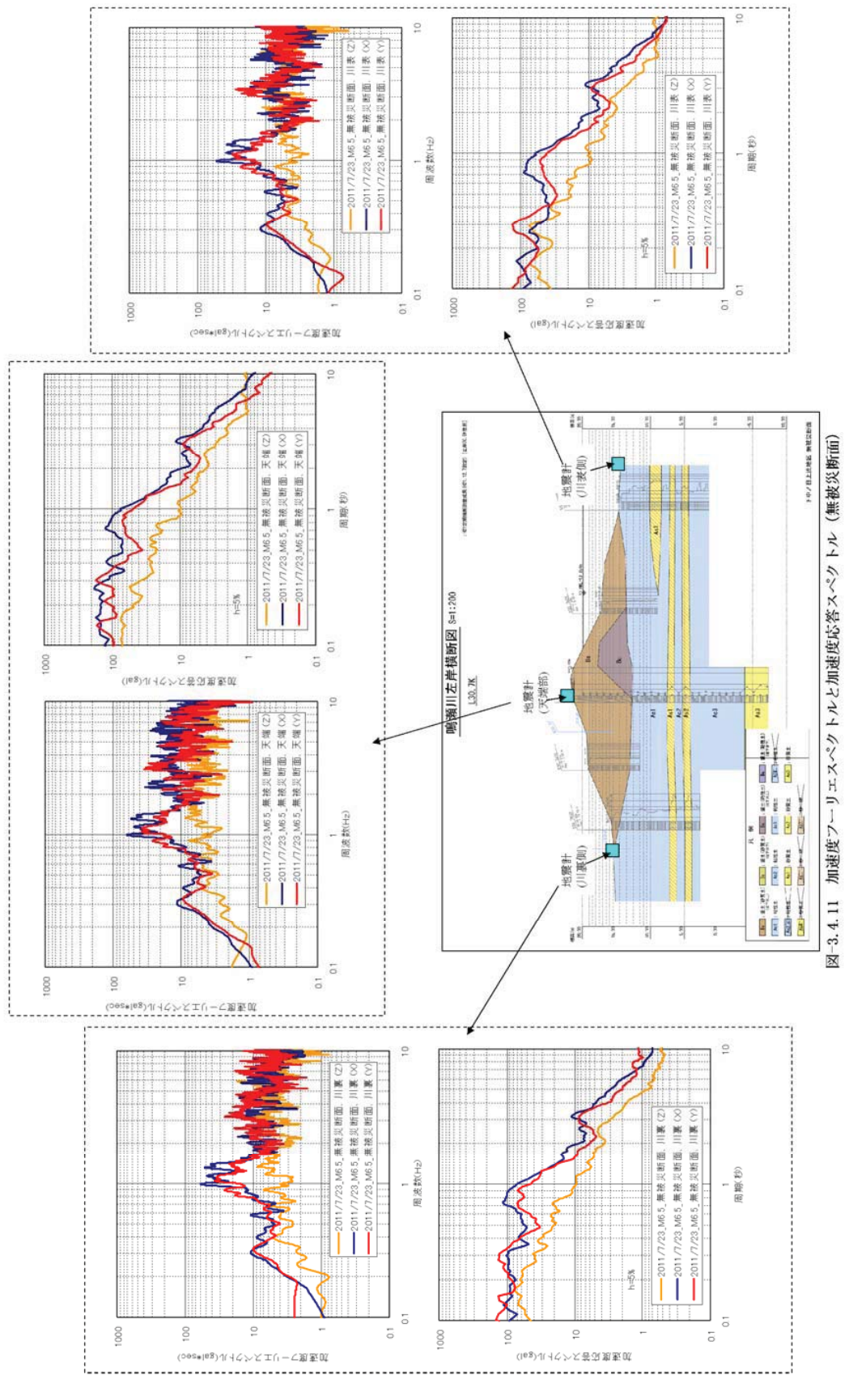


図-3.4.11 加速度フーリエスペクトルと加速度応答スペクトル (無被災断面)

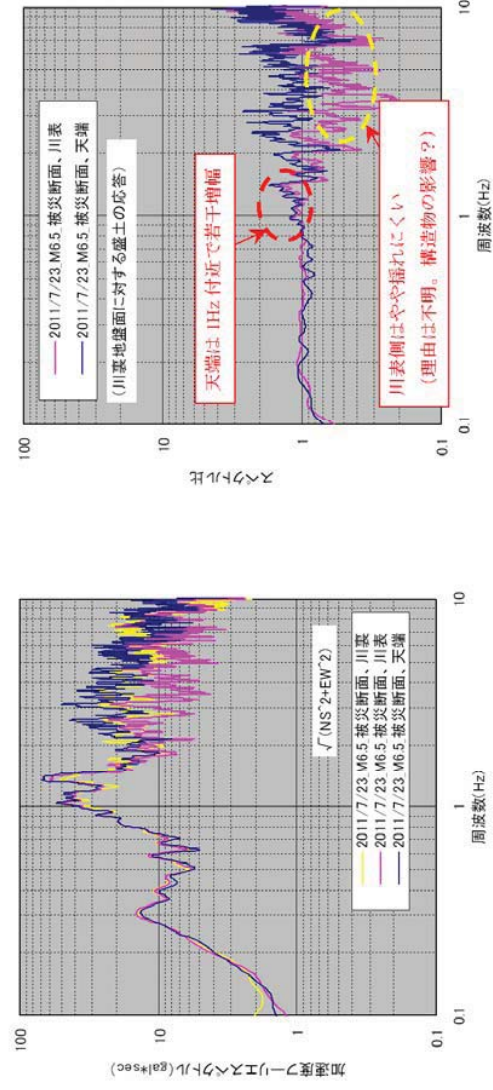


図-3.4.12 被災断面の盛土の応答

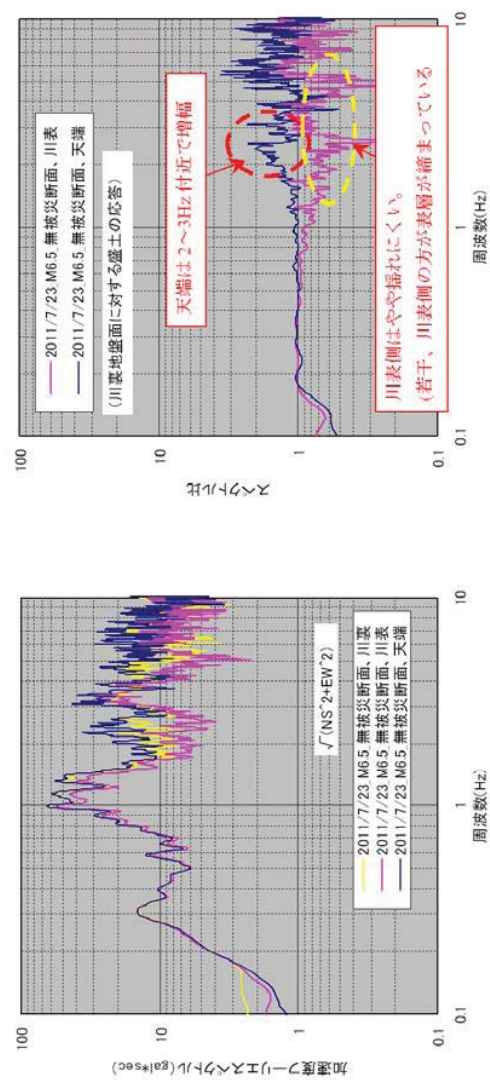


図-3.4.13 無被災断面の盛土の応答

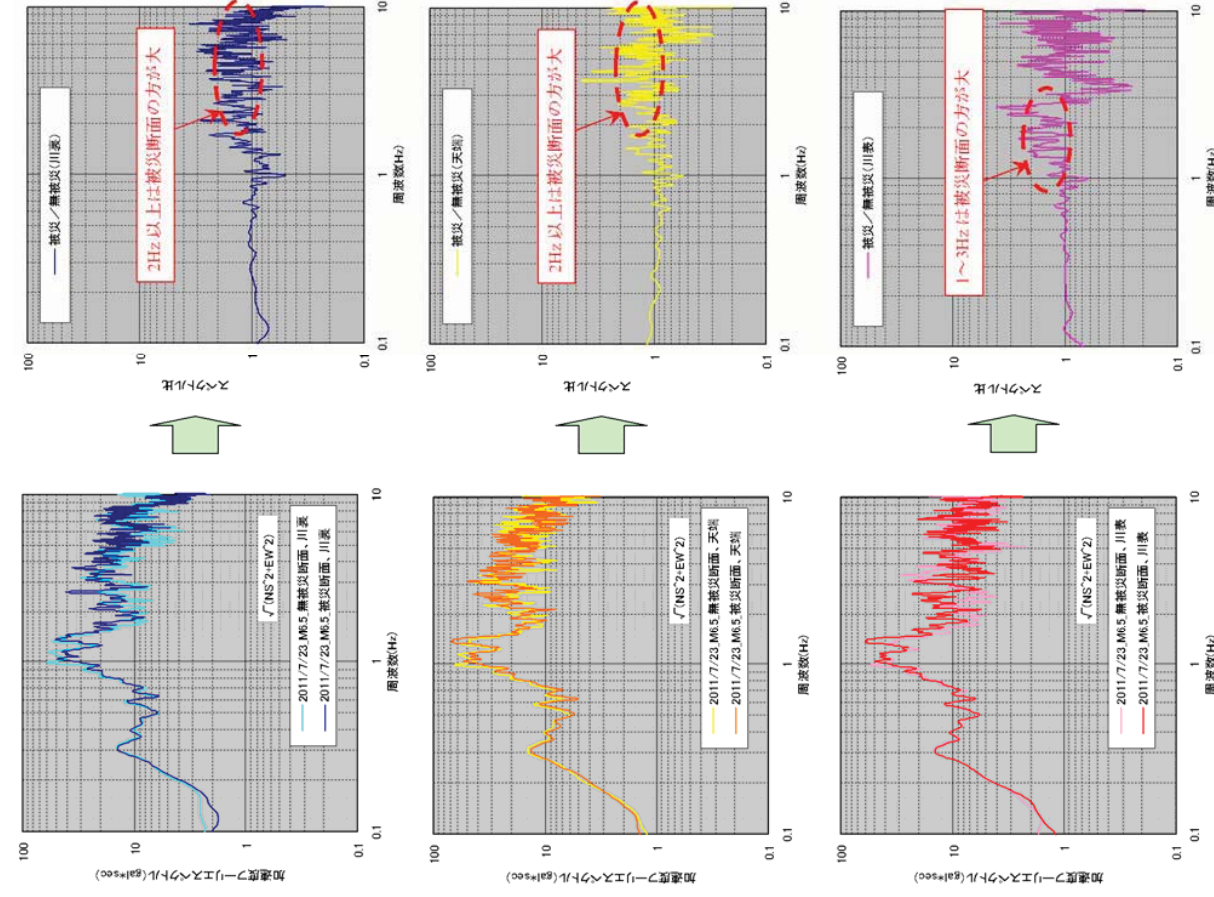


図-3.4.14 被災/無被災断面の加速度フリーエスペクトル比

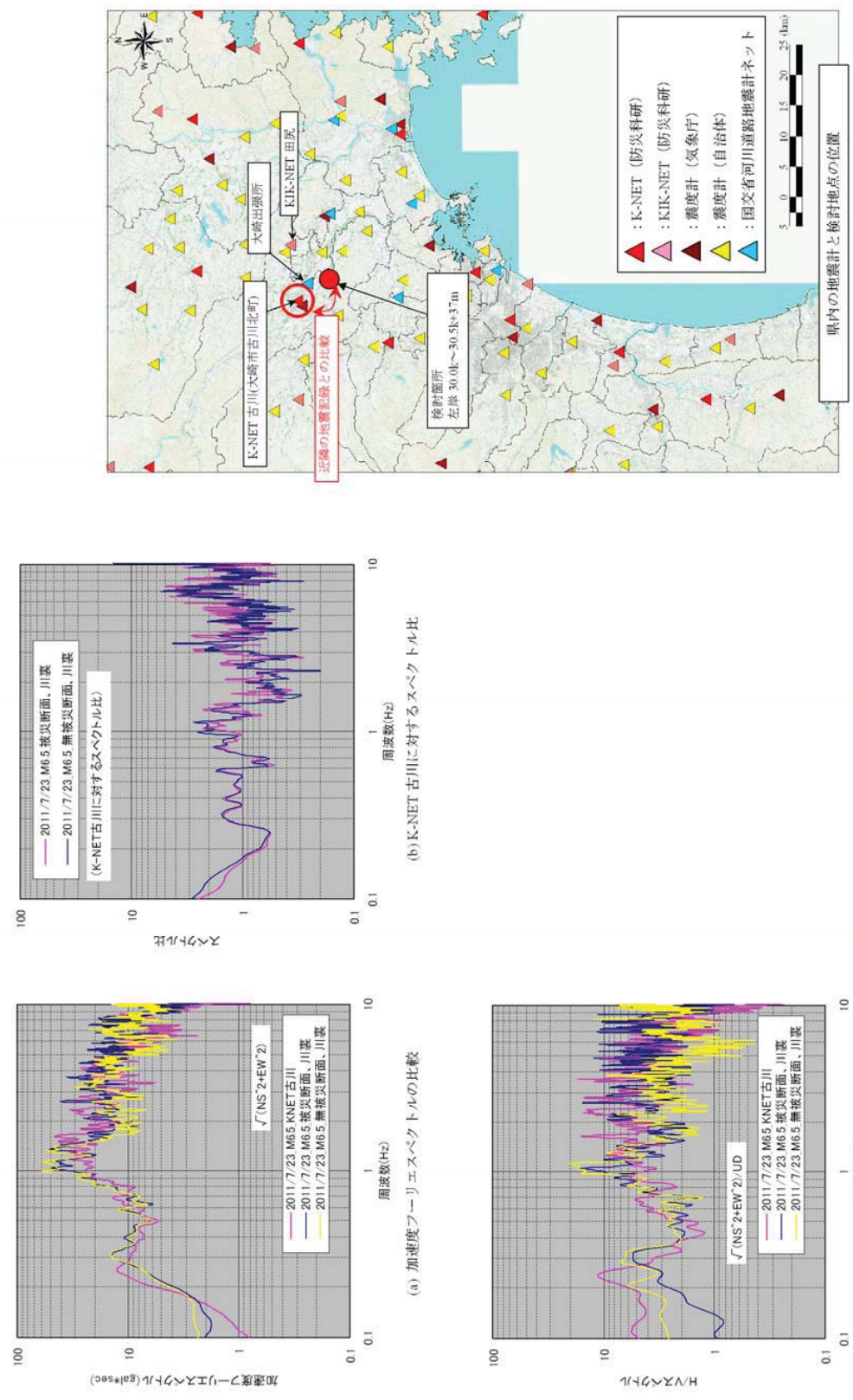


図-3.4.15 K-NET 古川に対する対象地盤でのスペクトル比、H/V スペクトル

3. 5 【余震記録 (C)】 (2011年7月25日 (月) 3時51分、M=6.2)

地震記録波形を図-3.5.1に示す。  
同図には、K-NETで記録された対象箇所(被災箇所30.3k)に最も近い観測地点「古川」での強震記録波形も併せて示している。

これより、本対象地点は、「古川」に比べて大きな加速度が生じていることが判る。

(1) K-NET「古川」における本震(2011年3月11日(金)発生)との比較

図-3.5.2にK-NETで記録された「古川」における本震と余震の地震波形および加速度フーリエスペクトルを比較して示す。加速度フーリエスペクトル結果より、周波数特性の形状は類似していること、倍率は10~50倍程度の差異がみられることが明らかにされた。

また、図-3.5.3にK-NET「古川」の地盤と地震基盤面から地表面におけるサイト増幅特性を示す。これより、「古川」では0.2~1.0 Hzの増幅が大きく、特に0.2~0.3 Hz、0.8~1.0 Hzで卓越していることが判る。

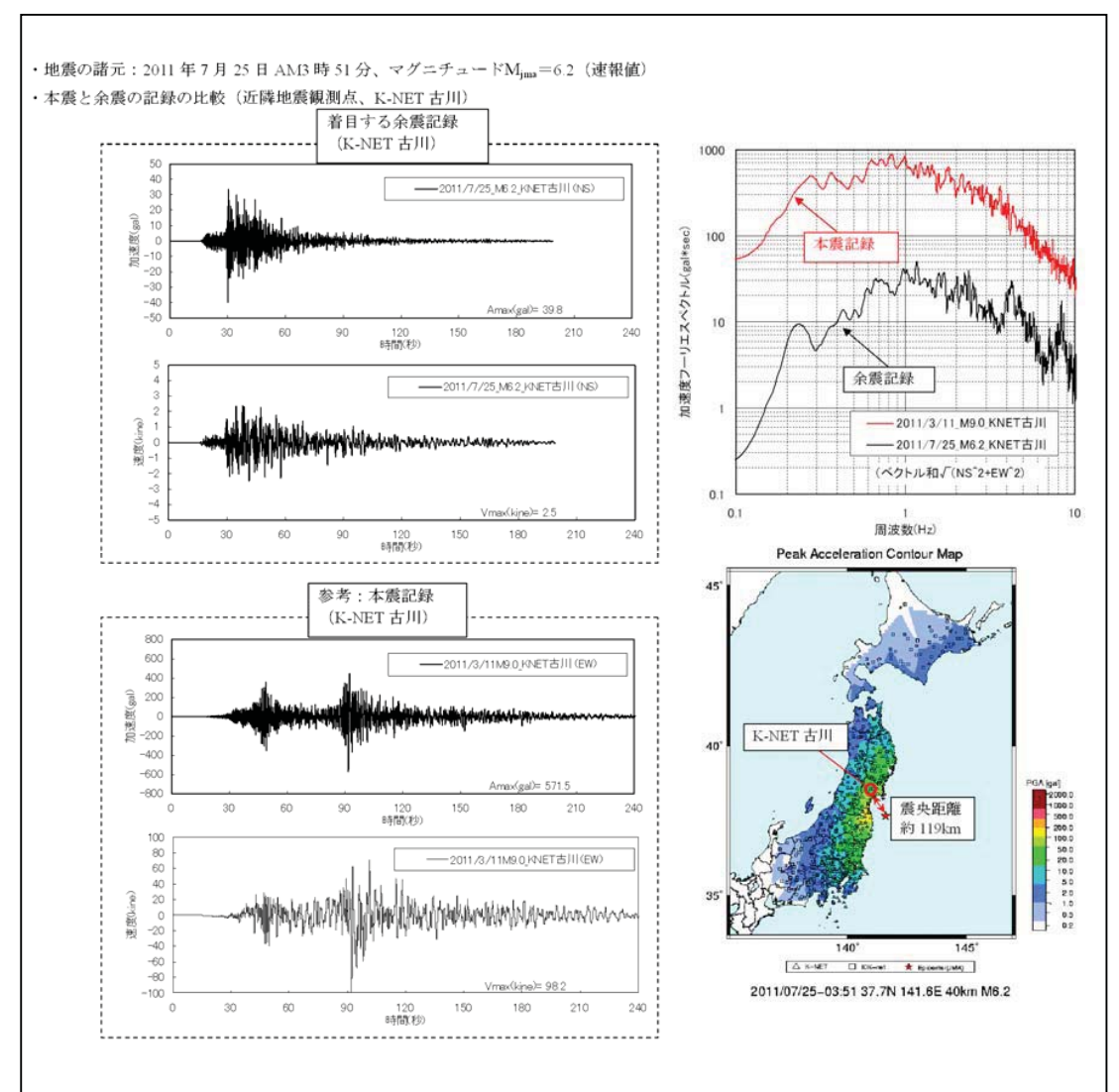
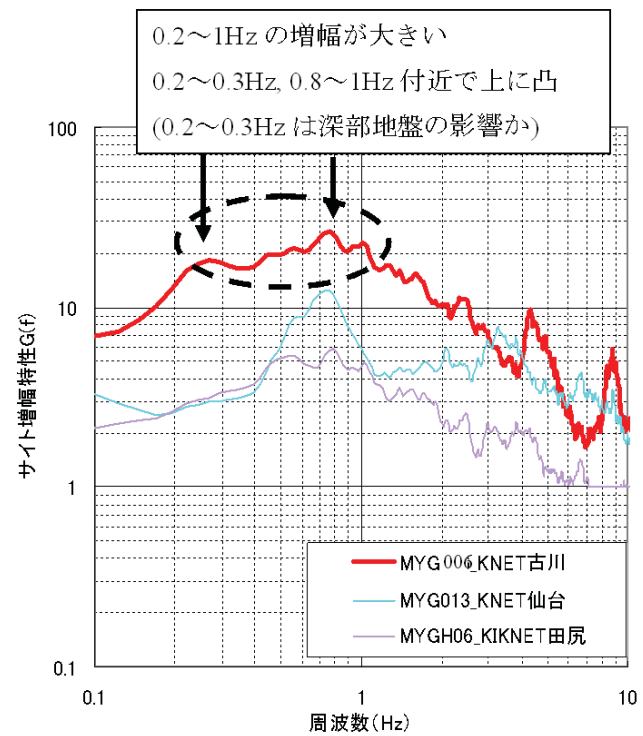
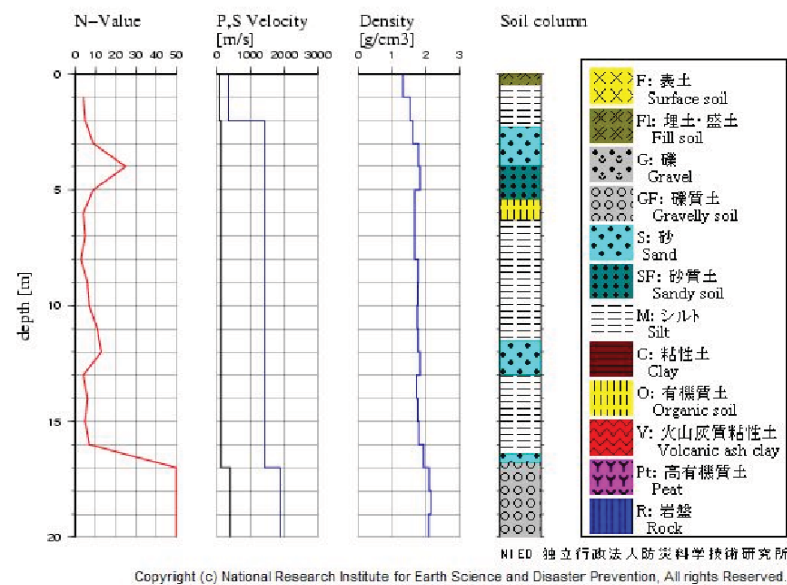


図-3.5.2 本震と余震の地震波形および加速度フーリエスペクトル (K-NET)



野津・長尾 (2005) によるサイト増幅特性  
(地震基盤～地表面の増幅関数)



K-NET 古川の地盤

図-3.5.3 古川の地盤とサイト増幅特性 (K-NET)

### (2) 加速度時刻歴および加速度軌跡 (オービット)

図-3.5.4、図-3.5.5 に被災断面、無被災断面の観測地点における加速度時刻歴、加速度粒子軌跡を示す。

また、図-3.5.6 に被災断面、無被災断面における成分毎の加速度波形を重ねて表示した。これらより以下のことが明らかとなった。

#### 【被災断面(30.3k)】

- ① 最大加速度は、盛土の天端における横断 (Y) 方向で最も大きい。
- ② 水平方向の最大加速度は、盛土の天端>川裏 (地盤面) >川表 (盛土の法尻付近) の順に大きくなっている。
- ③ 加速度軌跡は、盛土の天端、川表で原点を中心にほぼ円形状を示している。川裏 (地盤面) では、縦断 (Y) 方向に長い楕円形状を示している。

#### 【無被災断面(30.7k)】

- ① 最大加速度は、盛土の天端における横断方向 (X方向) で最も大きい。
- ② 水平方向の最大加速度は、盛土の天端>川裏 (地盤面) >川表 (地盤面) の順に大きくなっている。
- ③ 加速度軌跡は、いずれの地点においても原点を中心に円形状を示していて、優位な方向性は認められないが、加速度のピーク時には横断方向 (X方向) に大きな加速度振幅がみられる。

### (3) 変位時刻歴および変位軌跡 (オービット)

図-3.5.7、図-3.5.8 に被災断面、無被災断面の観測地点における南北方向 (横断方向)、東西方向 (縦断方向) の変位時刻歴および変位軌跡を時間を追って示す。

ここに、地震の進入方向は、被災断面の縦断方向に対して反時計周りに  $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$  ずれている。

また、図-3.5.9 に被災断面、無被災断面における成分毎の変位波形を重ねて表示した。これらより、被災断面と無被災断面では同様な粒子軌跡がみられることが明らかとなった。これらの傾向をまとめると以下のようである。

- ①  $t = 25 \sim 35$  秒では、堤防横断 (X) 方向の揺れがやや卓越している。
- ②  $t = 35 \sim 45$  秒では、堤防縦断 (Y) 方向に加えて堤防横断 (X) 方向の揺れも見られるが、いずれも揺れは小さい。
- ③  $t = 45 \sim 55$  秒では、堤防横断 (X) 方向の揺れがやや卓越している。
- ④  $t = 55 \sim 65$  秒では、堤防縦断 (Y) 方向の揺れが卓越しているが揺れは小さい。
- ⑤  $t = 65 \sim 75$  秒では、堤防縦断 (Y) 方向の揺れが卓越しているが揺れは小さい。

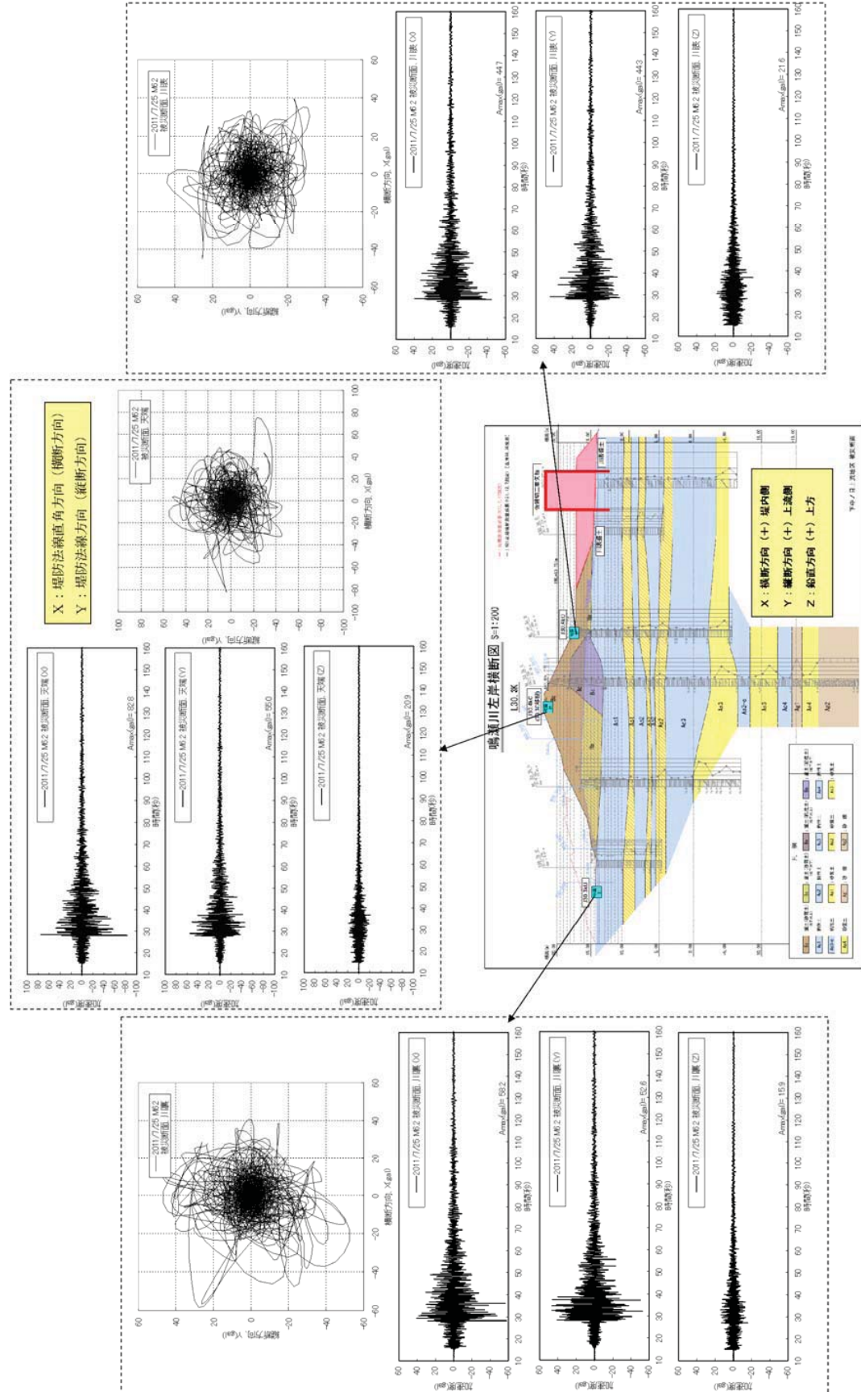


图-3.5.4 加速度时刻歷波形と加速度軌跡（被災断面）

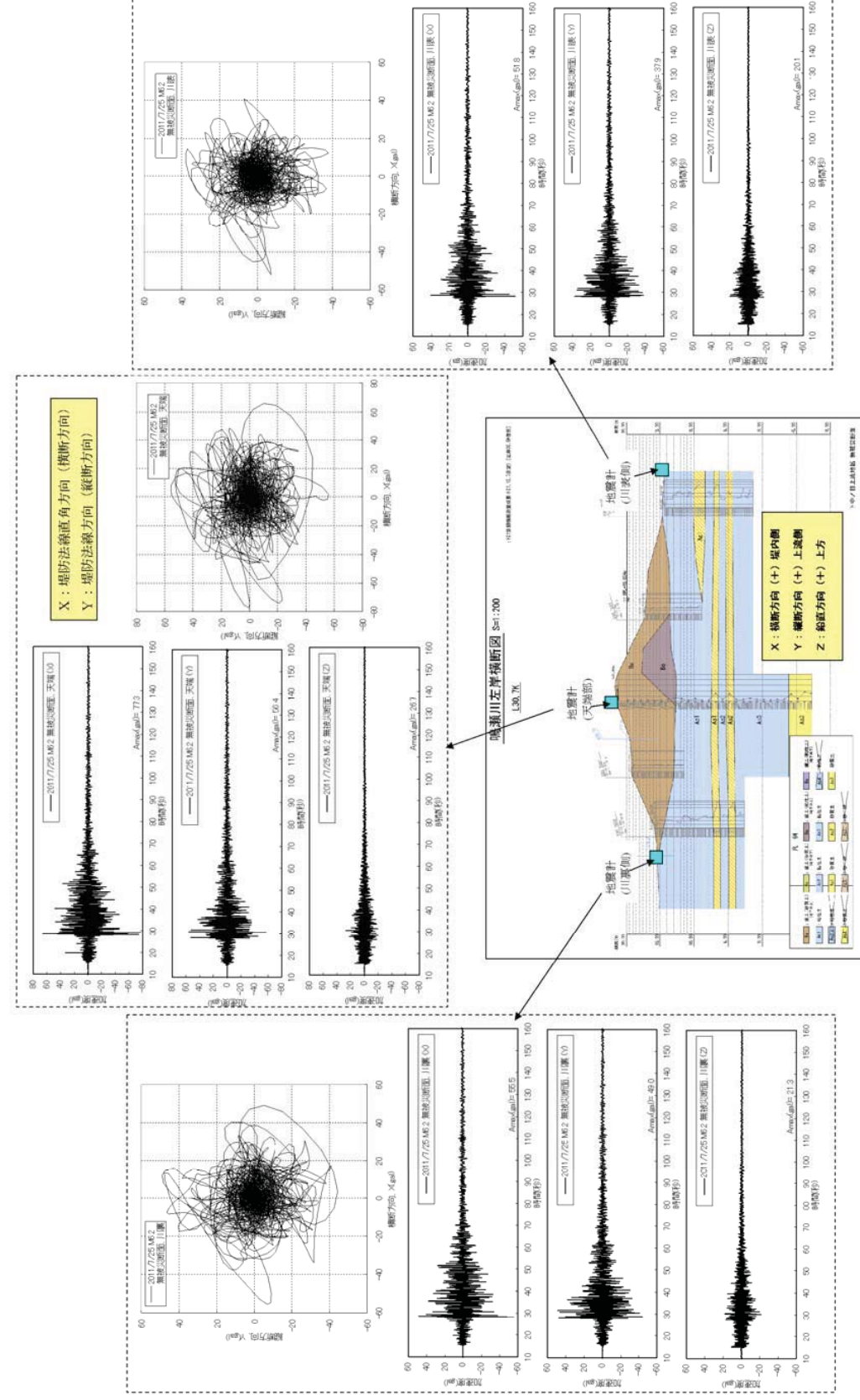


图-3.5.5 加速度时刻歷波形と加速度軌跡（無被災断面）

図-3.5.6 加速度時刻歴（成分別重ね書き）（2011.7.25）

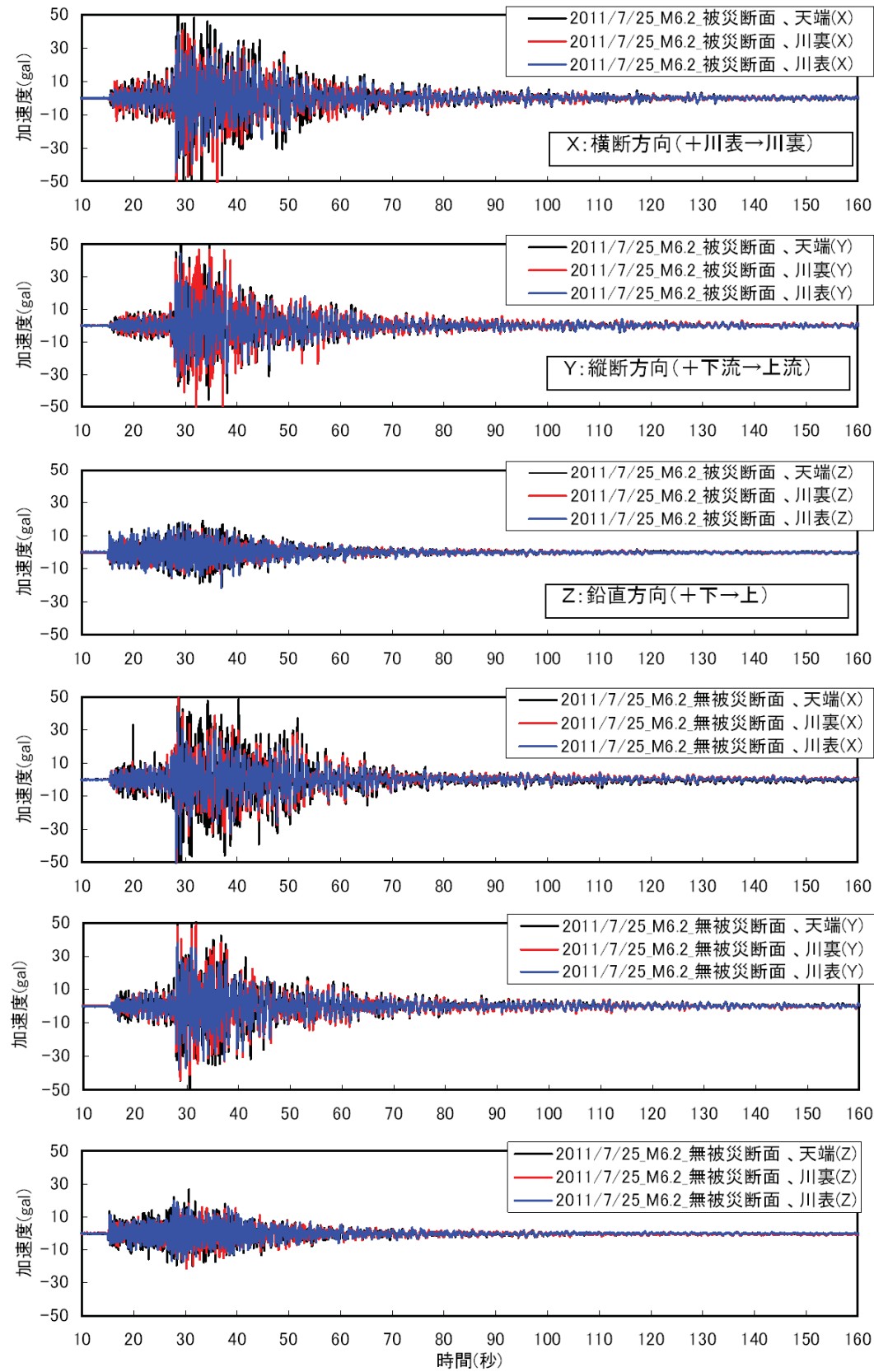


図- 加速度時刻歴(2011.7.25)

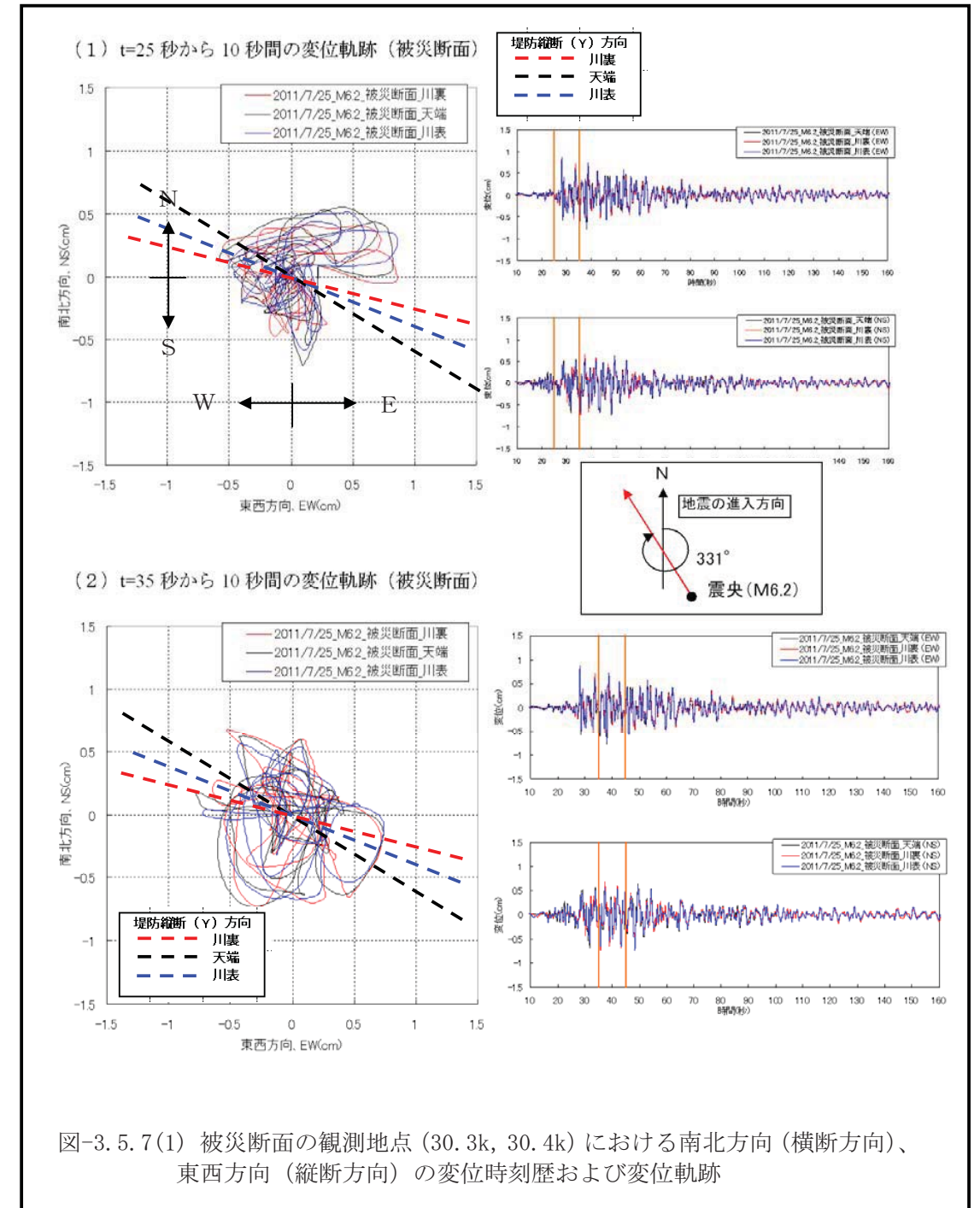
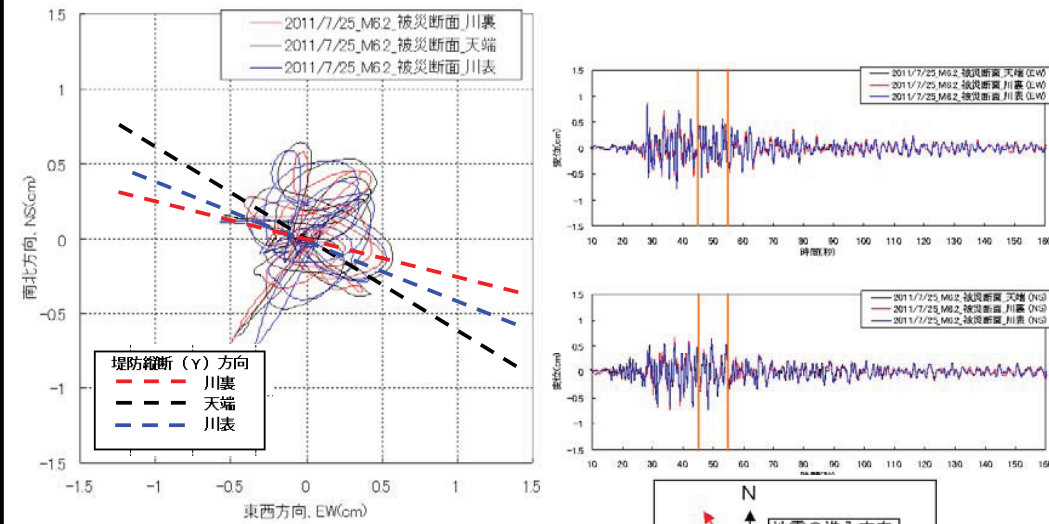


図-3.5.7(1) 被災断面の観測地点(30.3k, 30.4k)における南北方向(横断方向)、東西方向(縦断方向)の変位時刻歴および変位軌跡

(3) t=45 秒から 10 秒間の変位軌跡 (被災断面)



(4) t=55 秒から 10 秒間の変位軌跡 (被災断面)

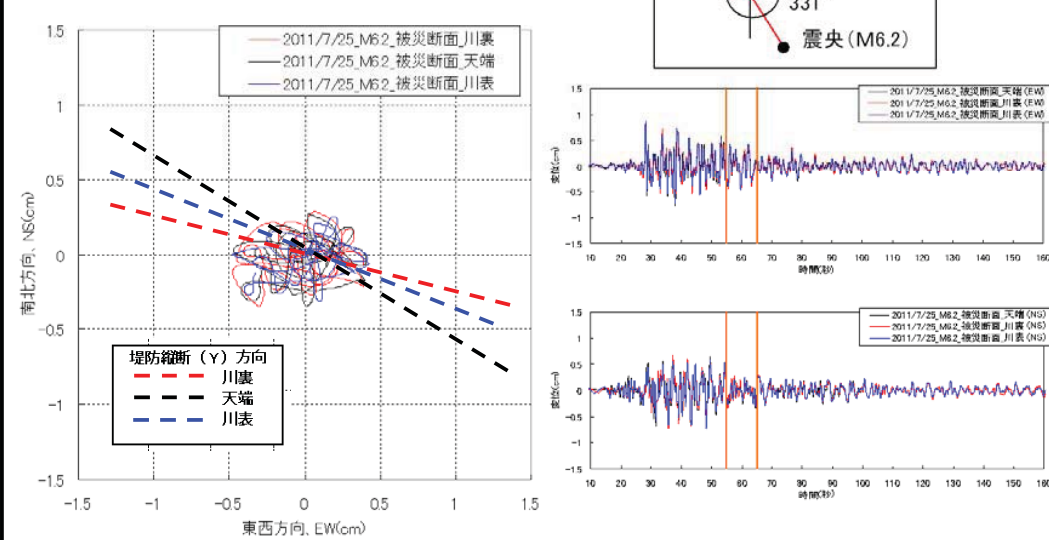


図-3.5.7(2) 被災断面の観測地点 (30.3k, 30.4k) における南北方向 (横断方向)、東西方向 (縦断方向) の変位時刻歴および変位軌跡

(5) t=65 秒から 10 秒間の変位軌跡 (被災断面)

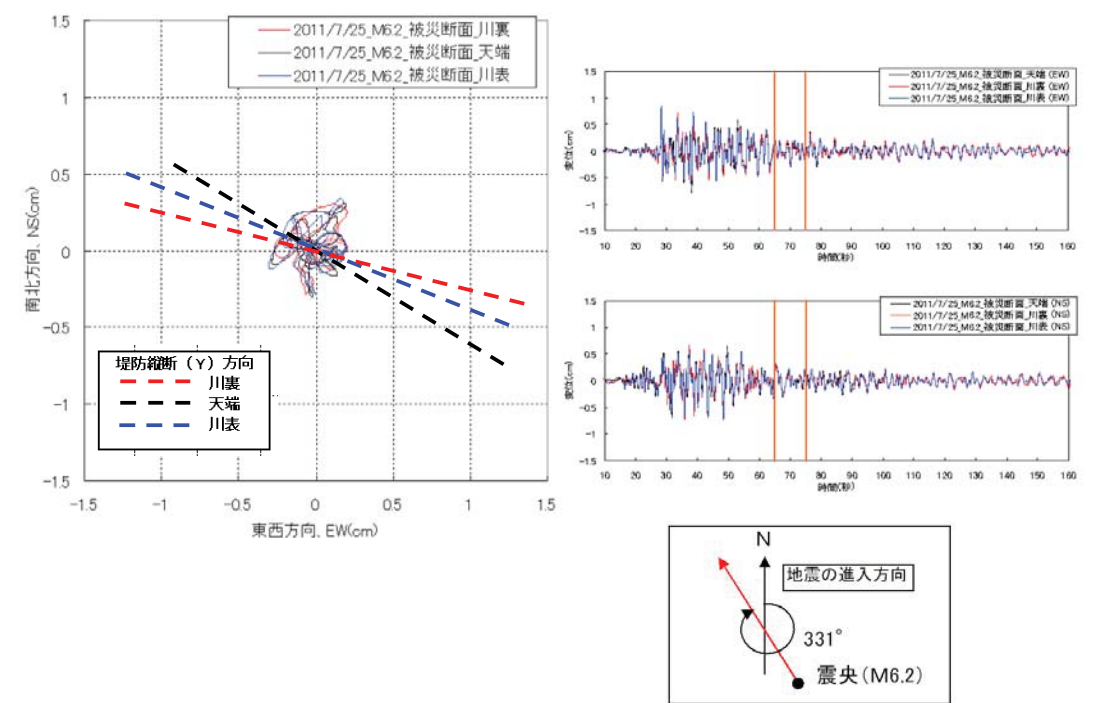
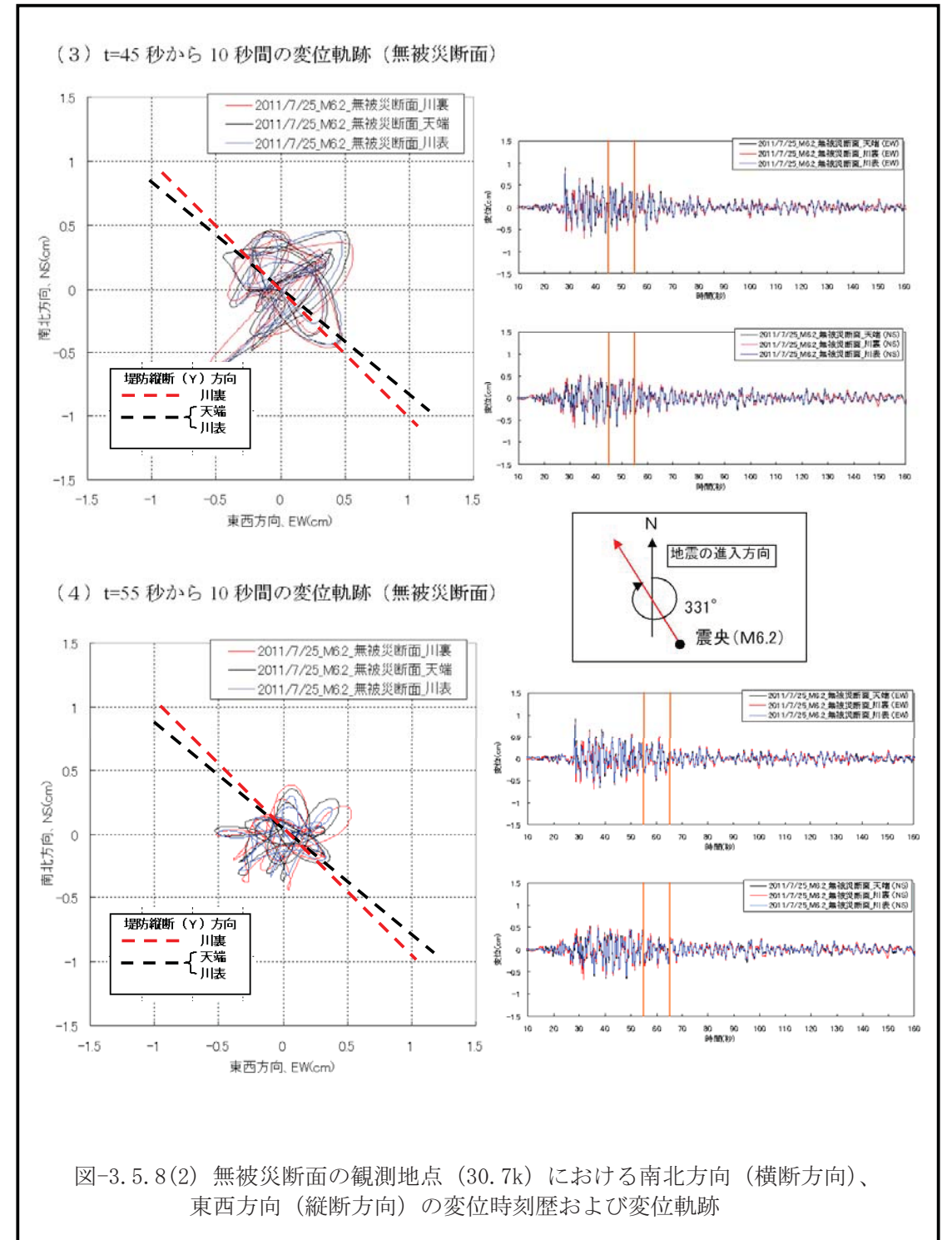
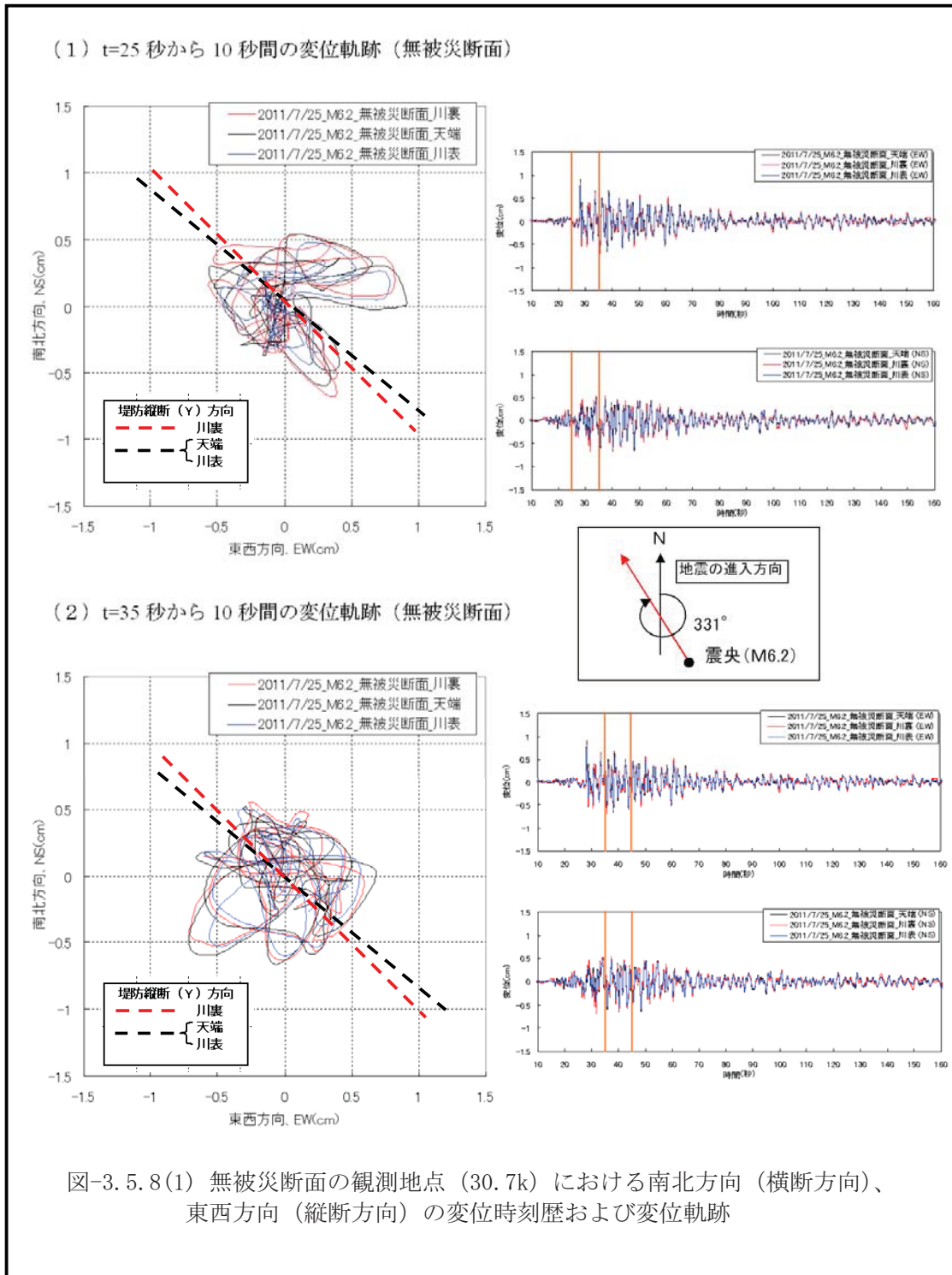


図-3.5.7(3) 被災断面の観測地点 (30.3k, 30.4k) における南北方向 (横断方向)、東西方向 (縦断方向) の変位時刻歴および変位軌跡





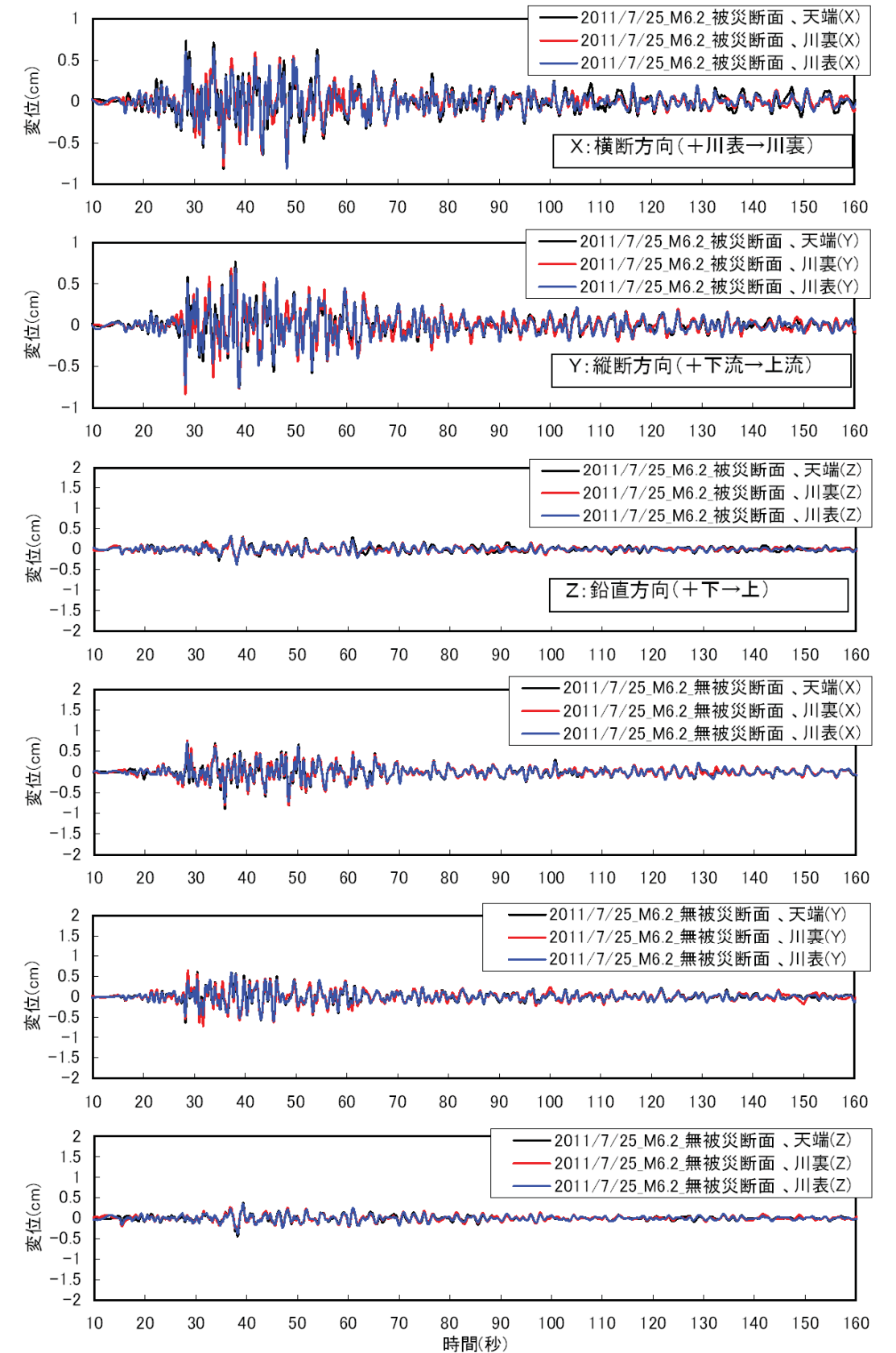
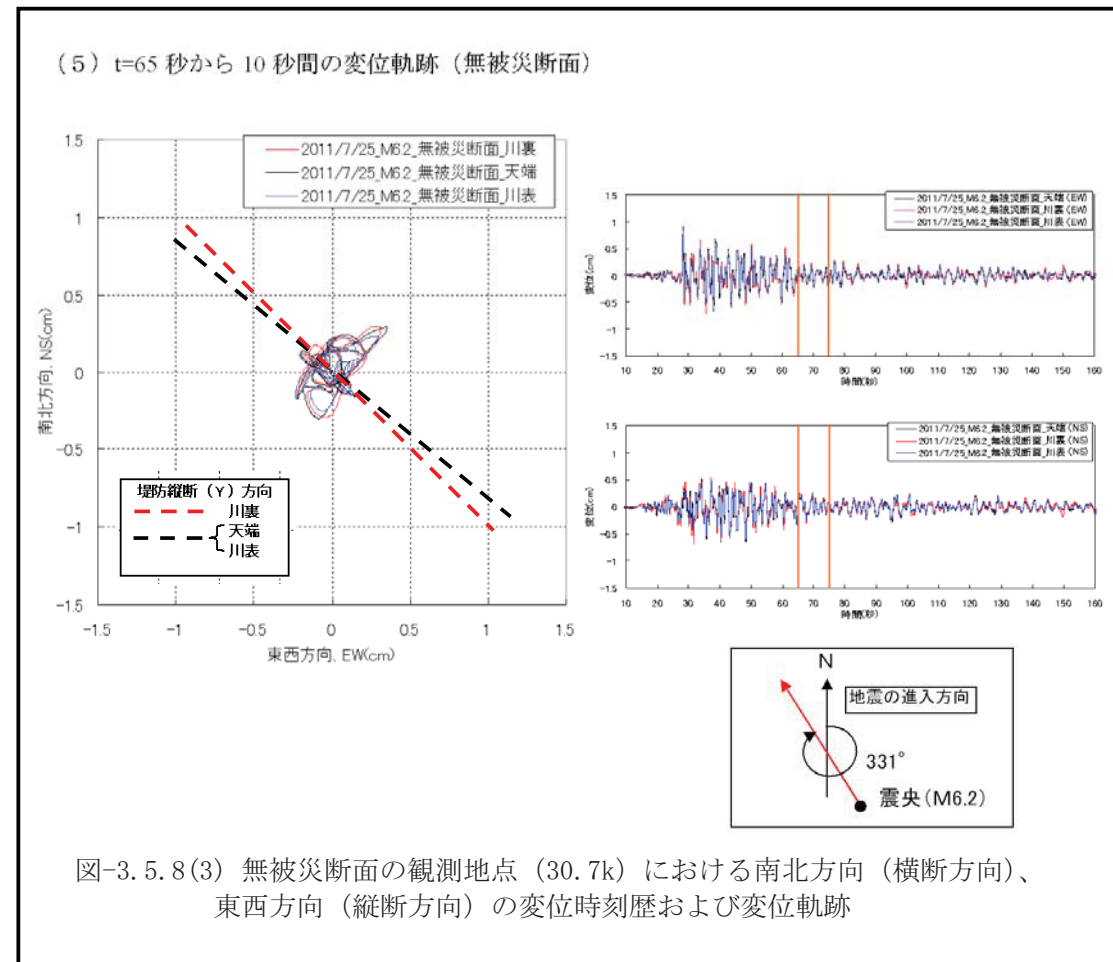


図-3.5.9 変位時刻歴(成分別重ね書き)(2011.7.25)

(4) 加速度フーリエスペクトル特性

図-3.5.10、図-3.5.11 に被災断面、無被災断面の観測地点における加速度フーリエスペクトルを示す。

また、同図には加速度応答スペクトル特性 (h = 5%) も合わせて表示した。

これらより、以下のことが明らかとなった。

【被災断面 (30.3k)】

- ① 各地点における水平方向の加速度スペクトルは類似した形状を示す。
- ② 各地点とも水平 (X, Y) 方向の周波数が  $f = 1.0 \sim 1.5 \text{ Hz}$  付近で卓越している。
- ③ 盛土部では、 $f = 2.0 \text{ Hz}$  より高い周波数領域で横断方向 (X方向) にやや高いスペクトル成分を有している。

【無被災断面 (30.7k)】

- ① 各地点における水平方向の加速度フーリエスペクトルは類似した形状を示す。
- ② 各地点とも水平 (X, Y) 方向の周波数が  $f = 1.0 \sim 1.5 \text{ Hz}$  付近で卓越している。
- ③ 盛土部では、 $f = 1.0 \text{ Hz}$  より高い周波数領域で横断方向 (X方向) にやや高いスペクトル成分を有している。特に、 $f = 2.2 \text{ Hz}$  にピークがみられる。

図-3.5.12、図-3.5.13 に被災断面と無被災断面における川裏地盤面に対する盛土の加速度の応答性について示す。

これらより、以下のことが明らかとなった。

- ① 被災断面における川表、天端では、周波数  $f = 1.0 \text{ Hz}$  付近でやや増幅している。
- ② 被災断面における天端では、 $f = 2.0 \text{ Hz}$  以上においても増幅しているが、川表では逆に減少している。
- ③ 無被災断面における天端では、 $f = 2.0 \sim 3.0 \text{ Hz}$  および  $6.0 \text{ Hz}$  付近で増幅しているが、川表では逆に減少している。

図-3.5.14 に無被災断面に対する被災断面の加速度フーリエスペクトル比を示す。

これらより、以下のことが明らかとなった。

- ① 川裏、天端では、周波数  $f = 1.5 \text{ Hz}$  以上の領域において、被災断面の応答が増幅している。
- ② 川表では、 $f = 1.0 \text{ Hz} \sim 3.0 \text{ Hz}$  において、被災断面の応答が増幅している。

図-3.5.15 に K-NET「古川」に対する被災断面、無被災断面の地盤面における加速度フーリエスペクトル比およびH/Vスペクトルを示す。

これらより、以下のことが明らかとなった。

- ① H/Vスペクトルによるピークは、対象地点で、 $f = 1.0 \sim 1.2 \text{ Hz}$  付近、古川では  $f = 1.0, 1.3, 2.2 \text{ Hz}$  付近にみられることから、これらの周波数付近で震動が増幅する性質がある。なお、 $f = 0.2 \sim 0.3 \text{ Hz}$  付近のピークは、工学的基盤以深の深部地盤構造に起因するものである。
- ② 「古川」に対する対象地点のスペクトル比より、 $f = 0.8 \sim 1.2 \text{ Hz}$  付近、 $3.0 \text{ Hz}$  以上において、対象地点での応答が増幅しており、揺れ易いものと考えられる。この傾向は、被災断面において顕著である。

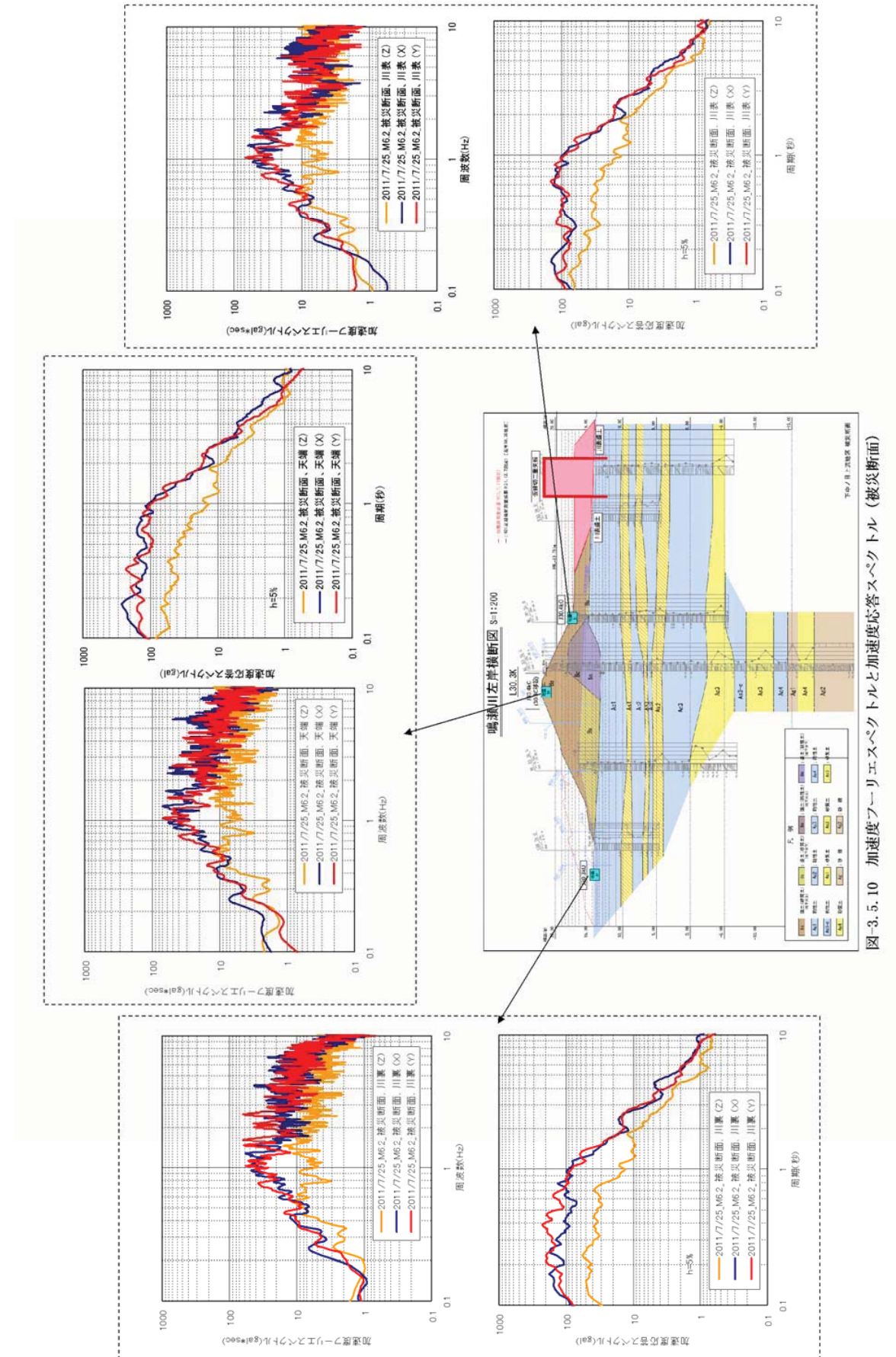


図-3.5.10 加速度フーリエスペクトルと加速度応答スペクトル (被災断面)

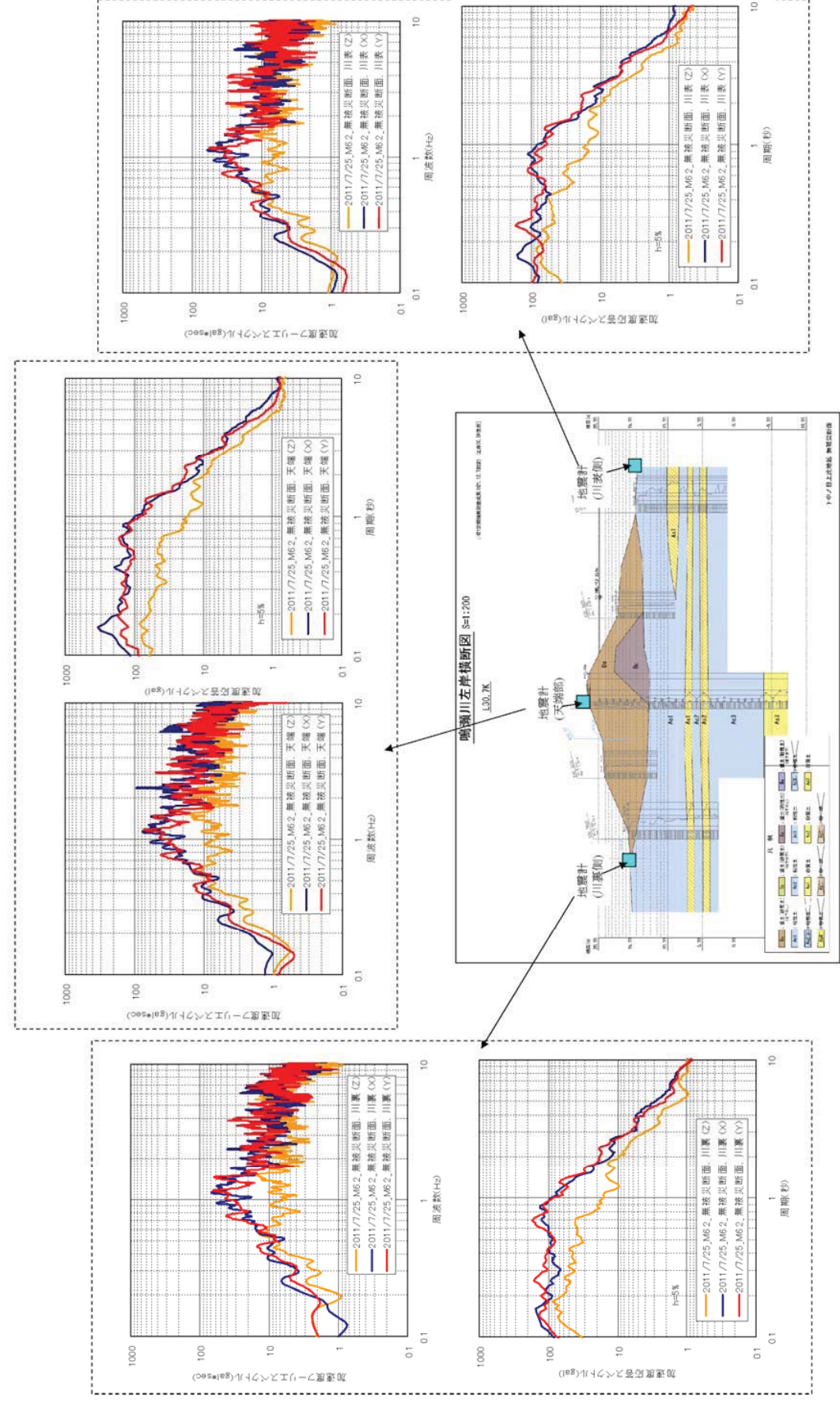


図-3.5.11 加速度フーリエスペクトルと加速度応答スペクトル（無被災断面）

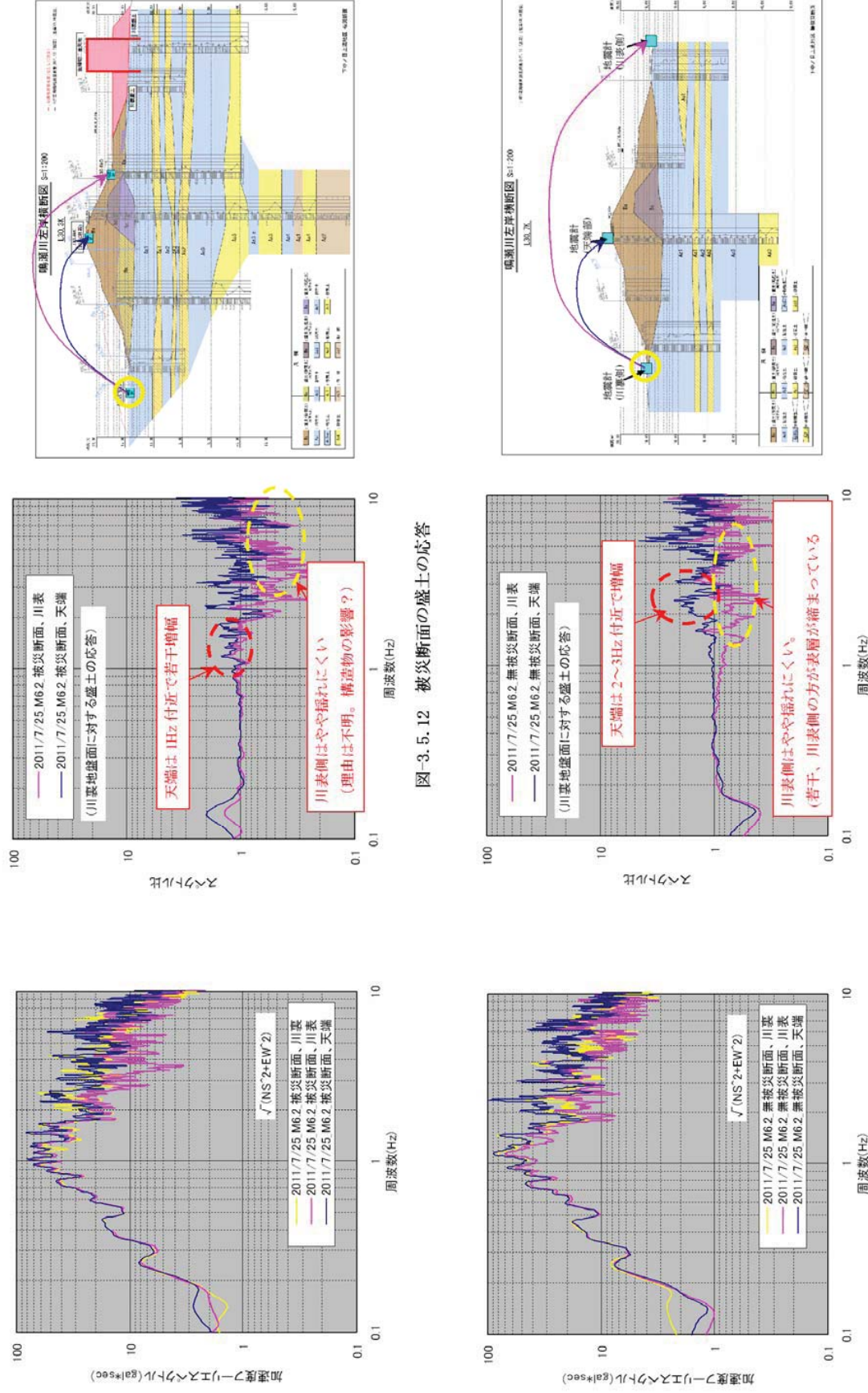


図-3.5.12 被災断面の盛土の応答

図-3.5.13 無被災断面の盛土の応答

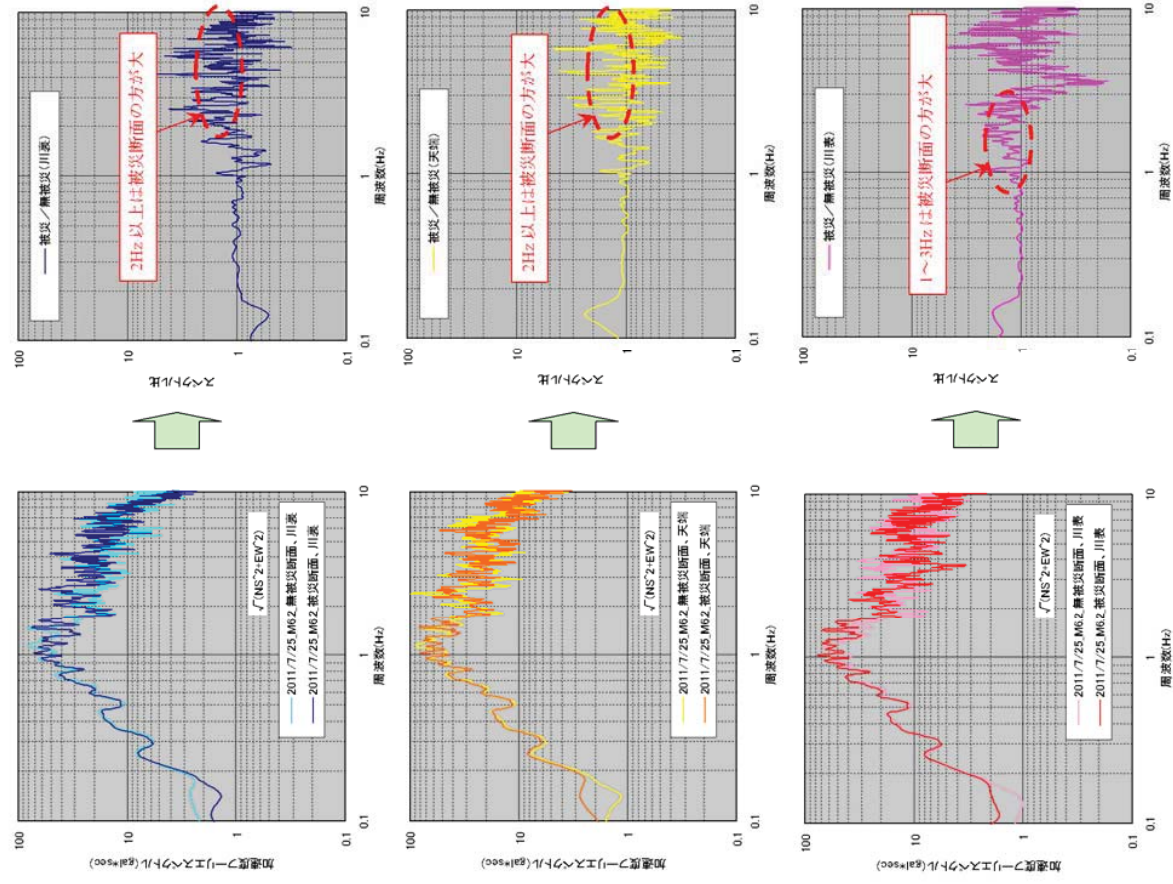


図-3.5.14 被災/無被災断面の加速度フーリエスペクトル比

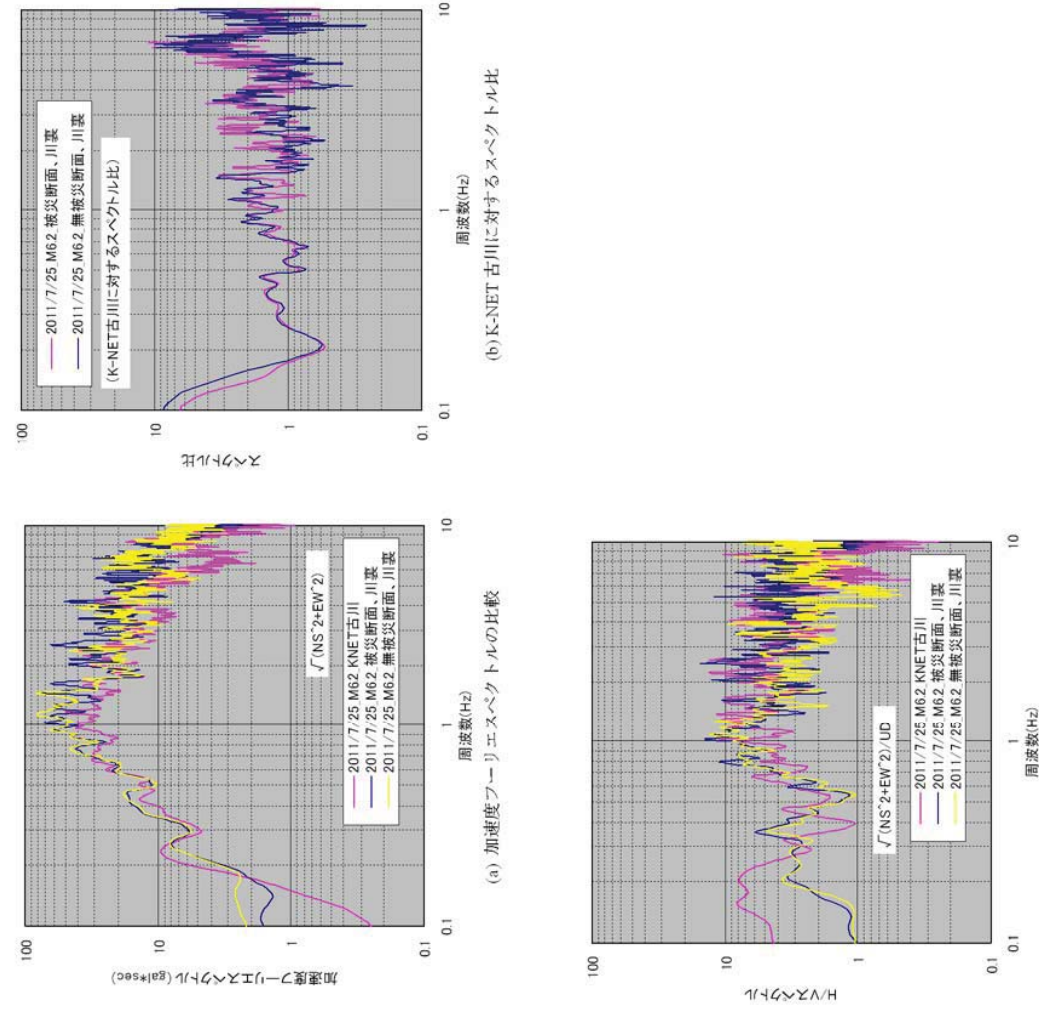
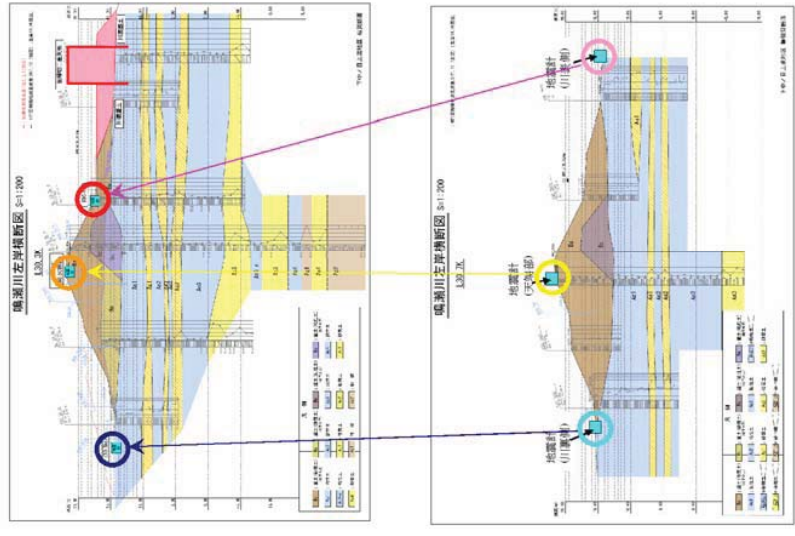


図-3.5.15 K-NET「古川」に対する対象地盤でのスペクトル比、H/Vスペクトル

# 浏屍上流地区(江合川)

# 1. 地震計設置の概要

## (1) 目的

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本太平洋沖地震において、北上川水系で堤防が被災した。本震後も震度 4~5 程度の揺れが発生している。

このような状況において、余震データを収集しこの記録を分析することによって、江合川堤防左岸 27.6k~27.8k 付近での地震動特性を明らかにすることを目的とする。

ここに、地震動特性は以下の項目とする。

- ① 地盤の揺れ方（加速度、変位時刻波形、振動方向）
- ② 堤体の揺れ方（加速度、変位時刻波形、振動方向）
- ③ 被災断面と無被災断面における地盤および盛土の揺れ方の違い

## (2) 設置箇所

河川名：北上川水系 江合川

地 点：涸尻上流地区

<被災箇所 左岸 27.6k、無被災箇所 左岸 27.8k+150>

### 【選定理由】

- ・ 被災箇所と無被災箇所から、各 1 断面を代表地点として抽出した。
- ・ 被災箇所は最も変状規模の大きい左岸 27.6k を、無被災箇所は被災箇所近く、堤内地に盛土や道路が近接しない単純構造の左岸 27.8k+150 を代表地点とした。

## (3) 観測方法

各地点に設置した小型地震計は、個々にバッテリー(12V)を電源として作動する物を使用した。バッテリーは週一回の頻度で交換し、交換時にはデータ回収および時刻あわせを実施した。

## (4) 設置機器

製品名：E-キャッチャーNEW

作成元：応用地震計測株式会社

・ 2011 年 6 月 1 日~2 日：設置

機器名	数量	シリアル番号	備考
E-キャッチャーNEW	4 台	S/N:200547 S/N:200548 S/N:200549 S/N:200550	
金属製保護ケース	4 台	—	—
バッテリー	8 個	—	—

・ 2011 年 7 月 4 日（設置）

機器名	数量	シリアル番号	備考
E-キャッチャーNEW	2 台	S/N:200553 S/N:200556	
金属製保護ケース	2 台	—	—
バッテリー	4 個	—	—

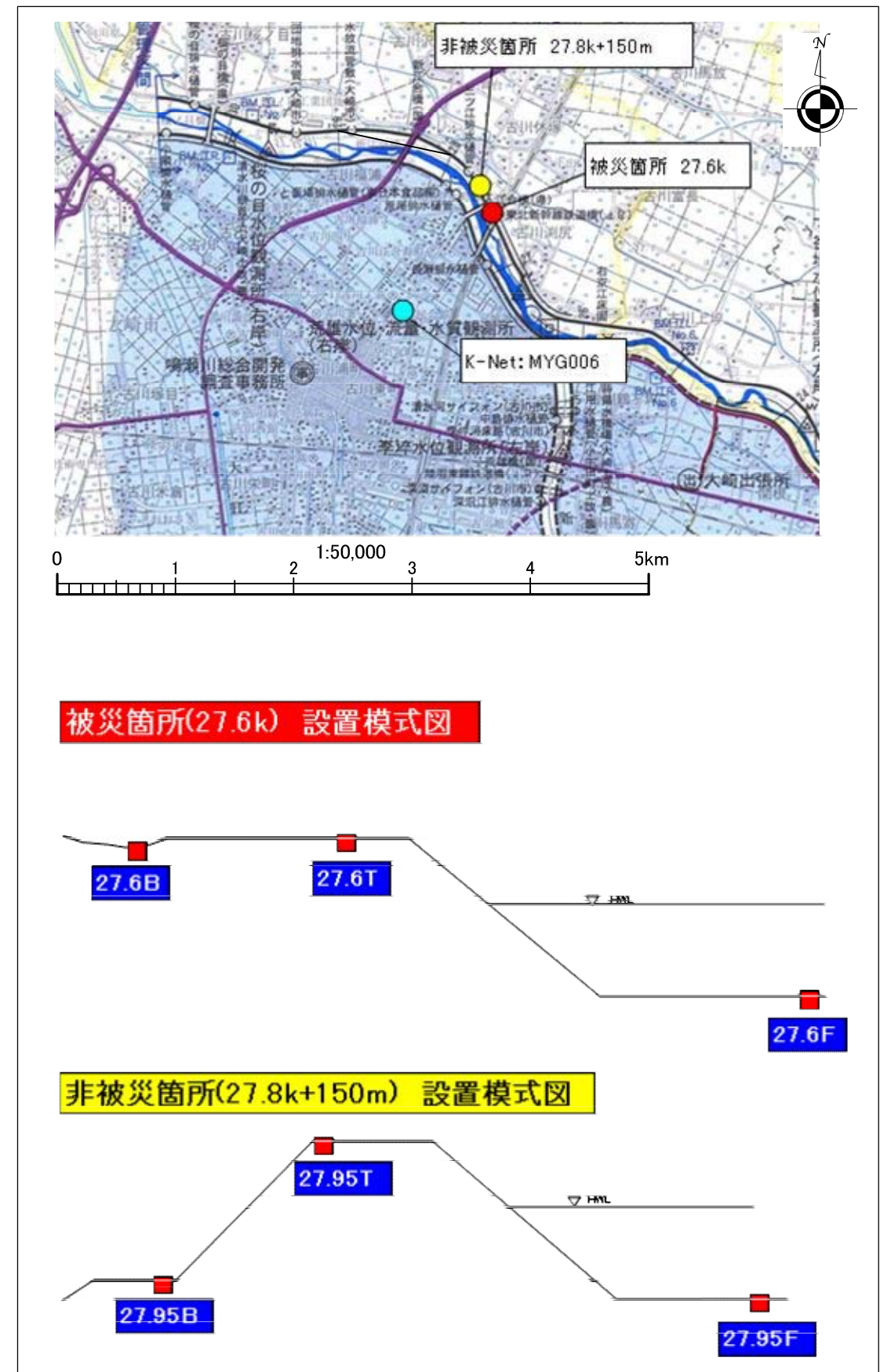


図 1.1 小型地震計設置概要図

## 2. 地震計の概要と設置状況

### 2.1 地震計の概要

地震計測には、名古屋大学、愛知工業大学、(株)東海理化、応用地震計測(株)が共同開発した小型地震計を使用した。これは、地震波形を記録するとともに、最大加速度、SI 値、計測震度をリアルタイムで出力できる機能を有している。

地震計の外観を図 2.1.1 に、主な仕様を表 2.1.1 に示す。



図 2.1.1 小型地震計の外観

表 2.1.1 主な仕様

センサー	半導体センサー(JA-30SA32-25B)
成分数	3成分(水平2成分、垂直1成分)
プレトリガー	15秒
トリガーレベル	3~999ガル
測定範囲	±2.0G(垂直成分は±1.0G)
記録時間	1波形 100秒×56波形
内部演算	計測震度、SI値
時計	内部クロック
インターフェイス	RS-232C、e-thernet
連動	あり
電源	AC100V(バッテリーでも可)

### 2.2 設置状況

小型地震計の設置状況を図 2.2.1~図 2.2.4 に示すとともに、表 2.2.1 に一覧表として整理した。なお、巻末に設置時の設定画面を添付致しました。

表 2.2.1 小型地震計設置一覧表

地区	距離標	地点名	シリアルNo	設置日	磁北からのずれ		
					X軸	Y軸	
湧尻上流	27.8k+150	27.8k+150F	S/N : 200556	H23.7.4	N60E	N30W	
		27.8k+150B	S/N : 200547	H23.6.1			
		27.8k+150T	S/N : 200548	H23.6.1			
	被災箇所	27.6k	27.6kF	S/N : 200553	H23.7.4	N70E	N20W
			27.6kT	S/N : 200550	H23.6.2		
			27.6kB	S/N : 200549	H23.6.1		

各地震計の向き

X 軸(堤防横断方向) : +方向(堤内側)、-方向(堤外側)

Y 軸(堤防法線方向) : +方向(上流側)、-方向(下流側)

Z 軸(鉛直方向) : +方向(上方)、-方向(下方)

無被災箇所(27.8k+150)の設置状況

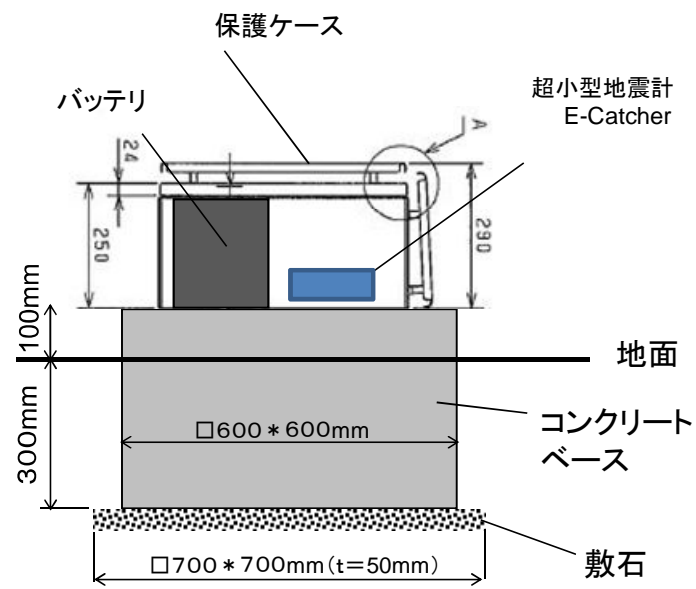


磁北からのずれ(X軸方向) N60E

被災箇所(27.6k)の設置状況



磁北からのずれ(X軸方向) N70E



設置台



設置手順



1) コンクリートベース設置



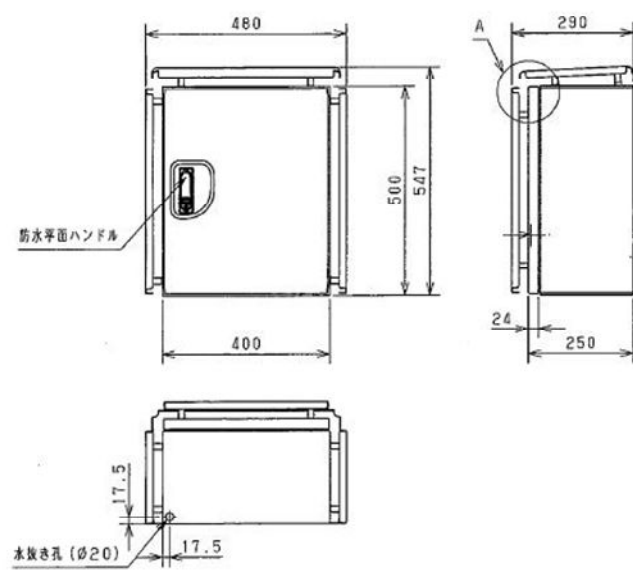
2) 位置出し(方位設定)



3) アンカー用穴 削孔



4) ホールインアンカー



保護ケース寸法



5) 保護箱設置



6) 保護箱開口部のシール



7) バッテリー取付け



8) 地震計設置(粘着テープ)



9) 地震計設置



10) 設置完了

図 2.2.1 地震計設置概要図



地震計設置地点 被災箇所

地震計の設置は、被災箇所および無被災箇所において、代表1断面で3箇所（川表法尻、天端、川裏法尻）の観測を実施した。  
被災箇所の代表断面は変状規模の大きい27.6kを選定した。

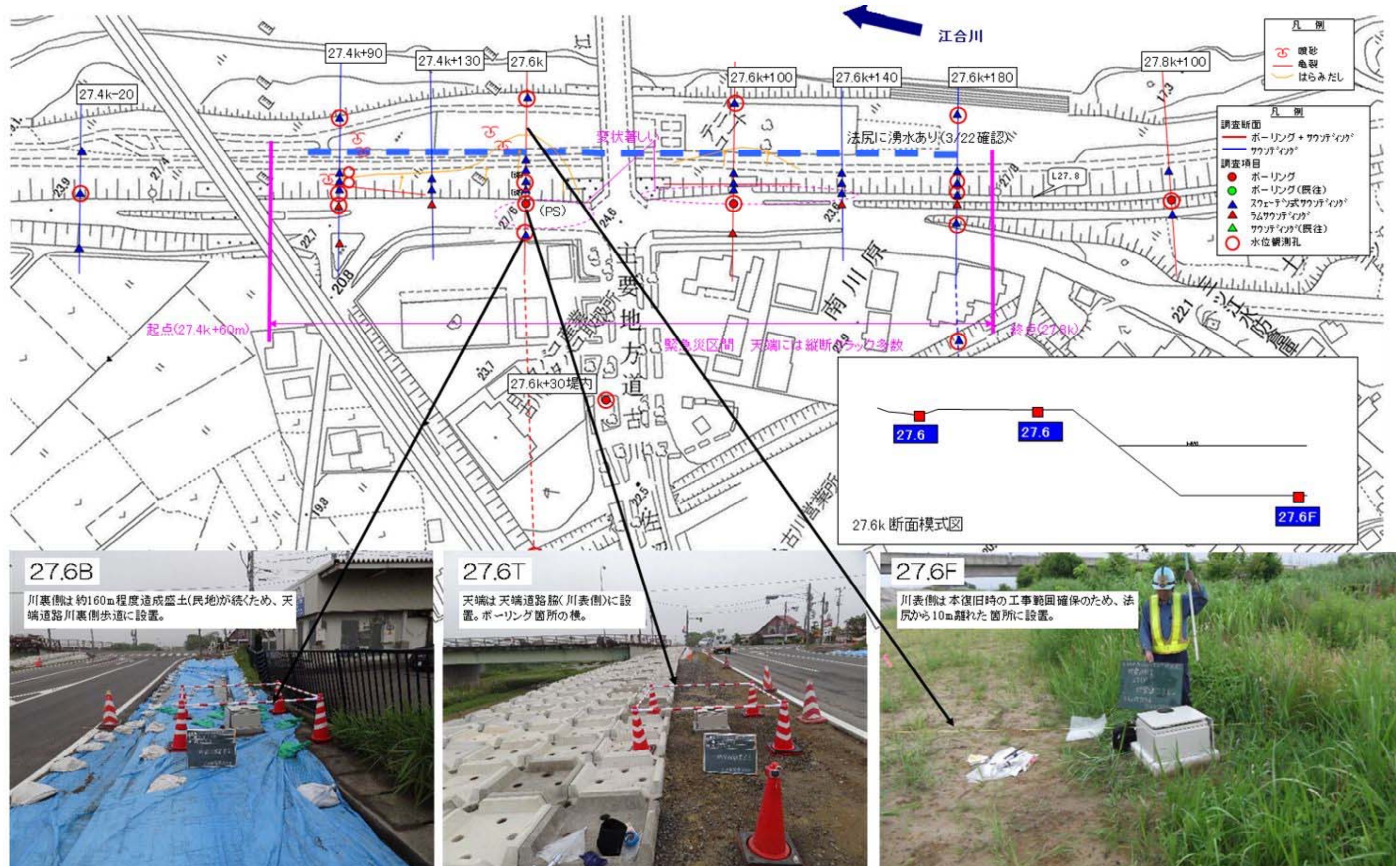


図 2.2.2 小型地震計設置位置図 被災箇所（左岸 27.6k）

地震計設置地点 無被災箇所

地震計の設置は、被災箇所および無被災箇所において、代表1断面で3箇所（川表法尻、天端、川裏法尻）の観測を実施した。

無被災箇所の代表断面は被災箇所に近く、堤内地に盛土や道路が近接しない単純構造で天端に地震計の設置可能な幅員が確保できる27.8k+150を選定した。

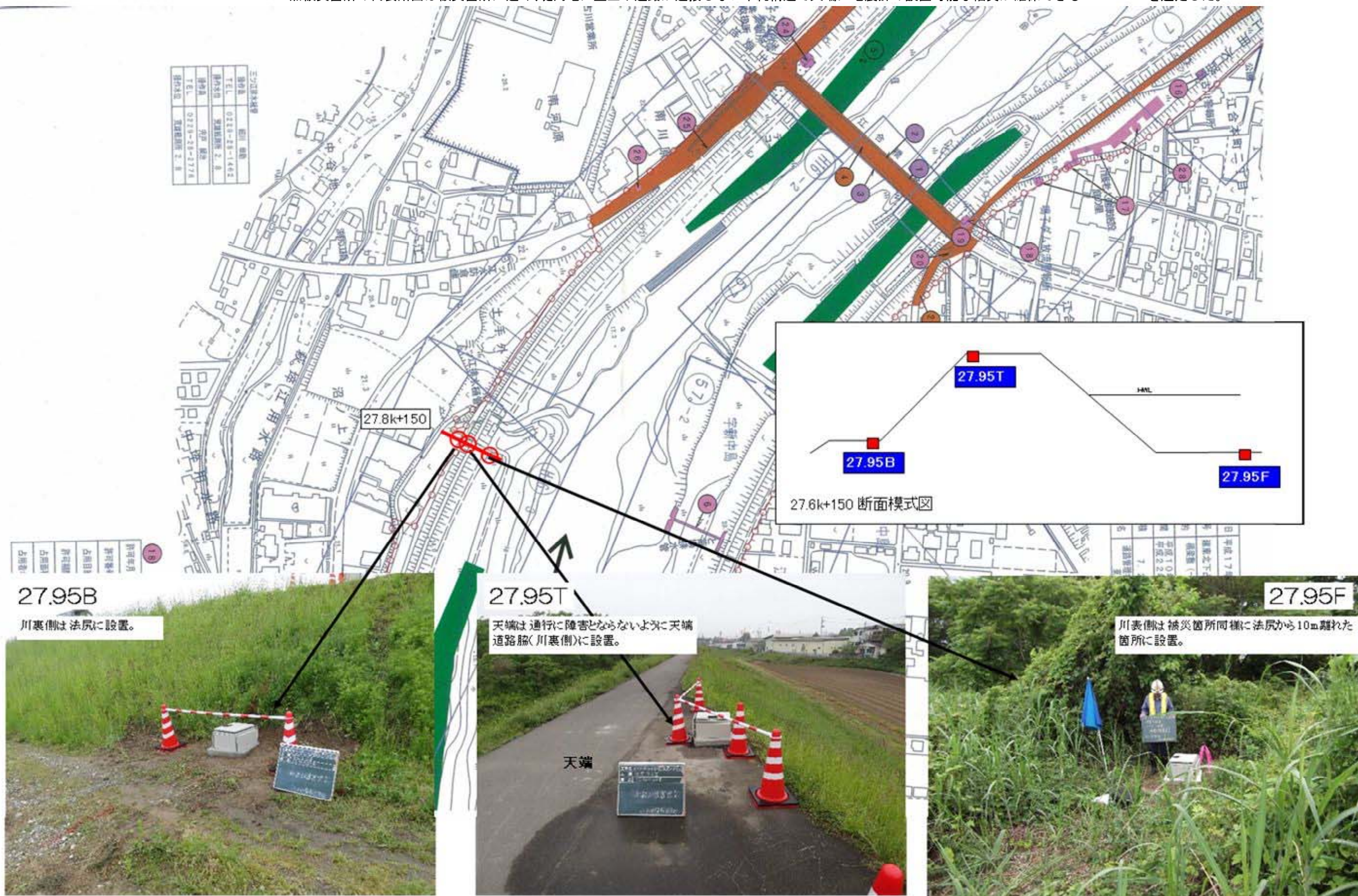


図 2.2.3 小型地震計設置位置図 被災箇所 (左岸 27.6k)

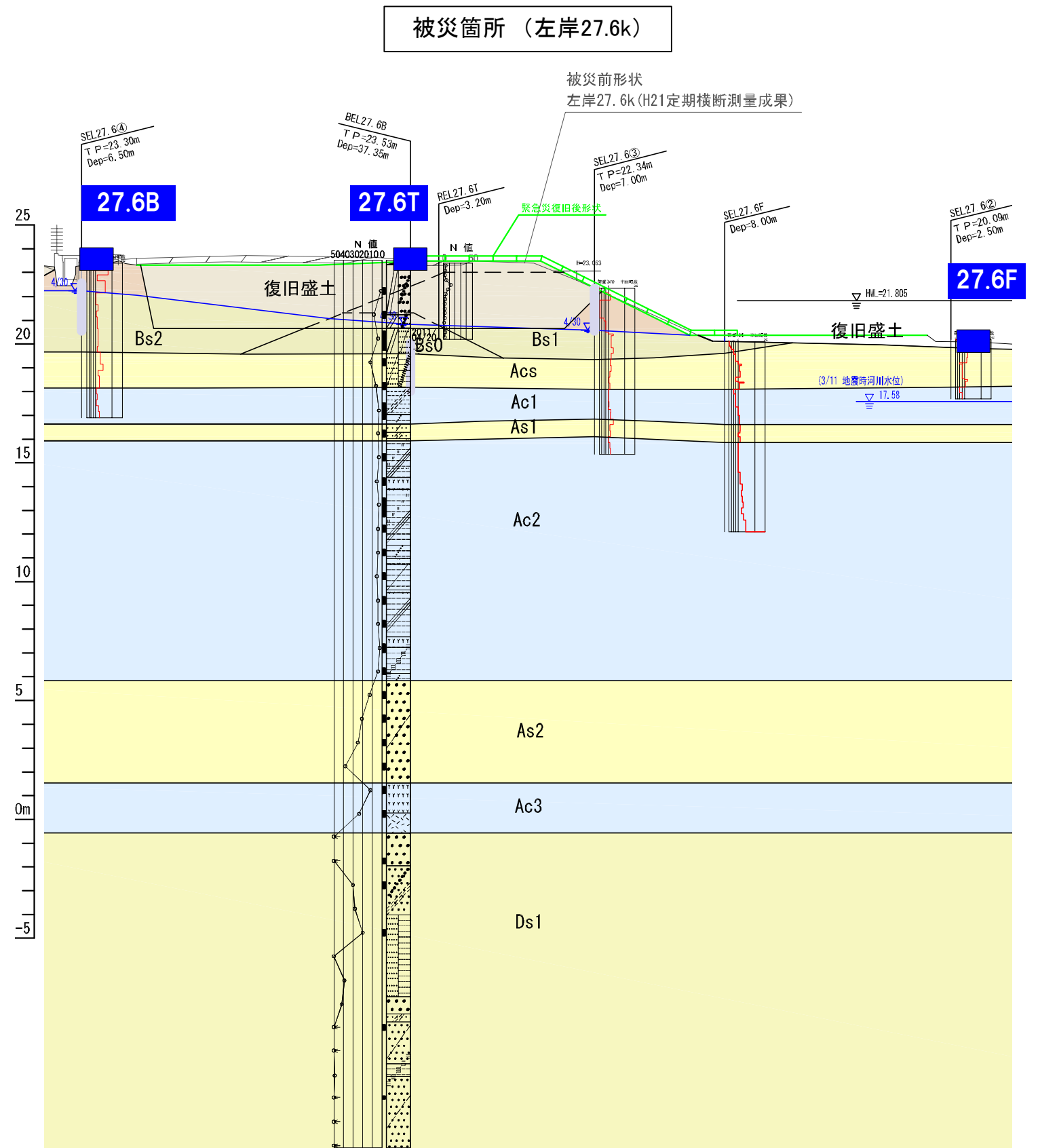
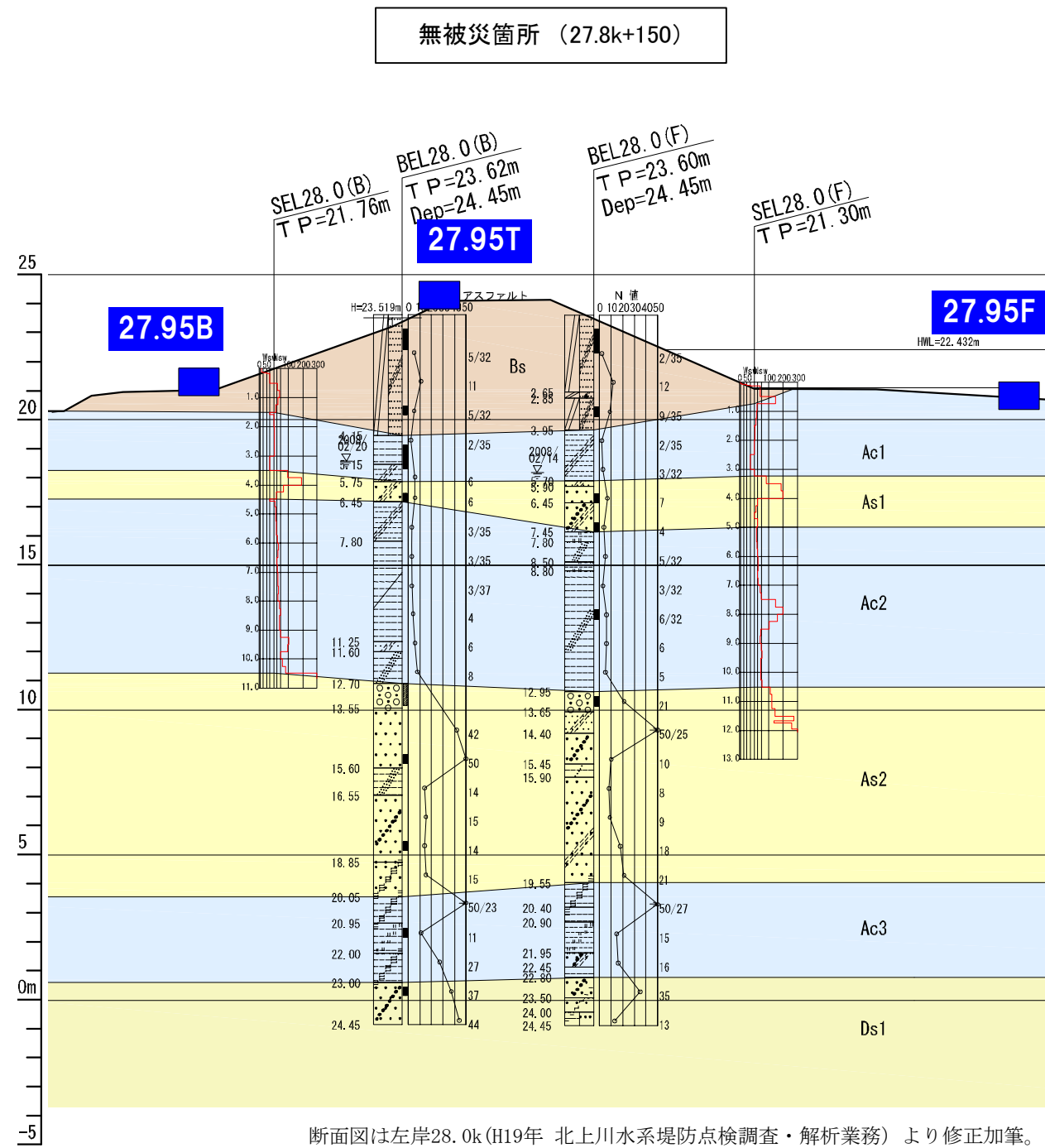


図 2.2.4 小型地震計設置位置図

3. 観測結果

小型地震計を設置した H23/6/1 以降の余震観測結果を表 3.1 に示す。このうち、1 断面 3 台観測（表法尻、天端、裏法尻）を実施した 7/4 以降で、K-NET 古川地点で最大加速度的大きい 3 つの余震を抽出して次節以降の「見える化」作業を実施した。

図 3.3 には現地に設置した小型地震計の最大加速度を図化した。K-NET 古川地点では 8/19 余震の最大加速度が最大値を示すが、現地に設置した地震計では 7/23 余震の最大加速度が最大値を示す。また、被災断面 (27.6k) と無被災断面 (27.8k+150) の最大加速度を比較すると、被災断面では堤内外の地盤と天端の最大加速度はほぼ同じであるが、無被災断面では天端の最大加速度がやや大きい傾向 (1.0~1.5 倍程度) にある。

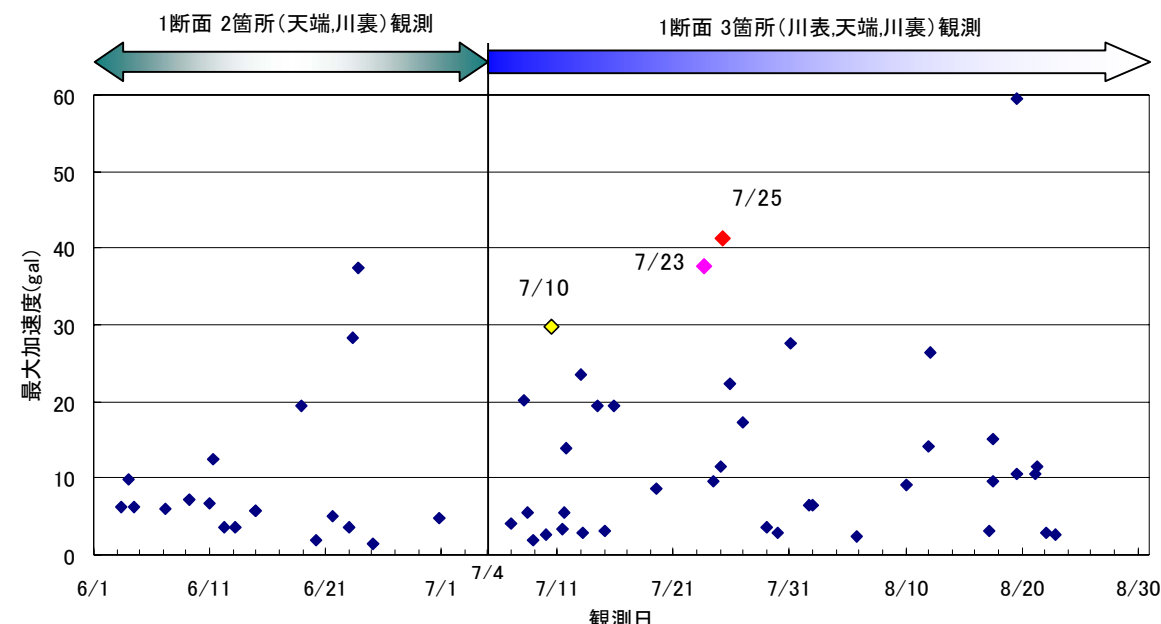


図 3.1 余震観測結果 (K-NET 古川)

表 3.1 余震観測結果一覧表

地震	K-Net MYG006 古川		震源までの水平距離 (km)	方位角 (北を0, 時計回りを正)	E-キャッチャーnew 最大加速度 (gal)																		データ回収 & 時刻合わせ			
	発生日	時刻			震源深さ	マグニチュード	観測日	最大加速度 (gal)	被災箇所 (27.6k断面)						無被災箇所 (27.8k+150断面)											
									27.6B			27.6T			27.6F			27.8+150B			27.8+150T			27.8+150F		
							X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z					
6/3	9:06:16	10km	M5.9	2011/6/3 9:06	6.2	280	119°	6.56	5.37	3.95	7.09	6.12	2.91				4.85	5.67	3.95	5.74	7.16	2.61				
6/4	1:01:02	20km	M5.6	2011/6/4 1:01	9.9	180	173°	10.15	11.86	4.1	10.22	10.45	2.91				5.74	6.86	3.13	7.09	6.86	3.28				
6/4	12:38:37	80km	M4.5	2011/6/4 12:38	6.2	40	137°										5.44	6.86	5.82	5.82	7.01	5.37				
6/7	5:10:58	40km	M4.5	2011/6/7 5:10	6	100	147°	5.59	5.44	2.98	5.44	4.1	2.76							5.07	5.44	3.13				
6/9	7:11:53	30km	M5.1	2011/6/9 7:11	7.1	140	70°												8.36	10.52	3.95					
6/10	22:39:59	50km	M4.4	2011/6/10 22:39	6.7	80	88°												13.51	8.06	10.15					
6/11	7:36:24	40km	M5.0	2011/6/11 7:36	12.6	120	104°												14.33	14.55	6.64					
6/12	5:09:43	20km	M4.6	2011/6/12 5:09	3.7	160	169°												3.06	4.25	1.41					
6/13	5:23:13	60km	M4.2	2011/6/13 5:23	3.7	70	79°												6.41	8.21	2.09					
6/14	22:07:55	10km	M5.9	2011/6/14 22:07	5.7	240	110°												4.62	5.37	2.46					
6/14	23:56:47	20km	M5.3	2011/6/14 23:56	5.7	170	53°												20	11.94	5.89					
6/18	20:31:27	30km	M5.9	2011/6/18 20:31	19.5	140	142°	16.42	14.55	10.37	17.09	15.52	8.28				13.21	13.88	9.62	18.96	18.06	10.59				
6/20	3:59:24	40km	M4.5	2011/6/20 3:59	1.8	190	165°																			
6/21	13:40:07	40km	M4.6	2011/6/21 13:40	5	90	81°										4.77	7.01	4.4	6.41	8.58	3.65				
6/22	23:30:00	20km	M5.4	2011/6/22 23:30	3.5	220	44°																			
6/23	6:51:25	20km	M6.7	2011/6/23 6:51	28.3	200	41°				36.35	26.57	8.5				4.1	3.2	2.01							
6/23	19:35:14	60km	M5.3	2011/6/23 19:35	37.4	60	99°	50.6	31.35	23.73	48.81	27.91	21.72				29.78	44.86	21.34	48.44	36.12	20.67				
6/25	2:41:18	50km	M5.3	2011/6/25 2:41	1.5	410	20°																			
6/30	19:23:19	20km	M5.3	2011/6/30 19:23	4.7	140	156°	4.4	3.35	2.83	3.35	3.28	2.61				4.55	3.65	2.76	6.41	5.15	2.23				
7/7	0:16:12		M5.8	2011/7/7 0:16	4.1	250	162°	2.46	3.2	0.97	2.61	2.98	1.41	2.68	3.28	1.26										
7/8	3:36:11	50km	M5.6	2011/7/8 3:36	20.1	170	172°	12.31	11.34	7.38	12.01	9.62	6.56	13.43	12.76	9.03	9.33	9.85	8.28	13.28	15	6.04	8.95	12.46	4.85	
7/8	11:43:20	50km	M4.0	2011/7/8 11:43	5.5	60	88°	5.22	4.25	1.71	12.01	9.62	6.56	4.4	5.07	2.09							7.31	5.44	3.5	
7/8	22:11:37	40km	M4.8	2011/7/8 22:11	2	180	35°	4.32	5.74	2.38				5.29	5.59	3.43	4.77	5.07	2.83	6.49	8.43	2.46	5	6.94	2.61	
7/9	22:42:11	50km	M4.1	2011/7/9 22:42	2.7	90	66°																			
7/10	9:57:43	10km	M7.1	2011/7/10 9:57	29.7	230	105°	24.33	28.73	14.1	22.46	31.05	14.63	22.24	31.87	19.85	23.96	23.58	17.16	31.27	28.73	13.95	22.39	27.39	11.49	
7/11	10:36:35	40km	M4.5	2011/7/11 10:36	3.3	110	100°																			
7/11	13:29:55	50km	M5.0	2011/7/11 13:29	5.6	130	50°	6.04	3.73	4.85	5.52	3.95	3.28	4.55	3.95	3.28	3.58	4.62	3.35	5.67	5.59	3.06	4.32	6.27	2.31	
7/12	18:00:16	60km	M4.9	2011/7/11 18:00	13.8	100	75°	18.58	13.8	8.36	12.39	9.33	6.12	13.66	15.6	7.91	18.66	19.55	13.36	20.67	17.16	8.95	13.21	20.45	9.48	
7/13	0:37:40	50km	M5.1	2011/7/13 0:37	23.5	100	108°	19.25	20.97	8.21	19.93	20.37	8.28	17.98	25	10	18.43	19.18	9.92	25	21.57	9.18	15.22	19.78	7.16	
7/13	5:47:53		M5.3	2011/7/13 5:47	3	150	168°																			
7/14	10:35:10	60km	M4.8	2011/7/14 10:35	19.4	80	103°	10.45	12.91	9.4	11.27	13.13	9.4	10.67	14.33	11.04	14.85	12.98	14.4	17.76	16.79	14.92	16.42	19.33	9.03	
7/15	1:47:41	60km	M4.1	2011/7/15 1:47	3.2	90	74°										3.95	6.64	2.61	5.89	7.53	2.23	4.47	5.07	2.16	
7/15	21:02:36	60km	M5.5	2011/7/15 21:02	19.4	250	179°																			
7/19	10:39:28	20km	M5.3	2011/7/19 10:39	8.6	160	152°	7.38	4.85	3.35	7.76	5.37	3.13	8.21	8.13	3.95	5	5.89	3.2	5.89	6.64	2.76	5.15	5.15	2.23	
7/23	13:34:41	40km	M6.5	2011/7/23 13:34	37.7	110	71°	33.21	39.03	19.93	35.15	41.95	19.78	34.33	49.11	19.55	29.55	38.29	31.05	46.13	53.81	21.57	29.78	48.07	19.1	
7/24	8:56:31	50km	M4.3	2011/7/24 8:56	9.5	80	103°	6.19	6.27	3.88	4.85	5.07	2.98	5.97	5.52	3.35	8.43	4.47	5.52	8.13	5.22	4.03	7.16	6.49	5.07	
7/25	0:07:26	50km	M5.2	2011/7/25 0:07	11.4	100	75°	9.7	10	3.8	10.3	10.74	4.32	11.64	12.46	4.92	12.68	12.83	4.92	12.46	14.33	5.89	12.54	13.73	4.1	
7/25	3:51:43	40km	M6.2	2011/7/25 3:51	41.3	110	150°	30.97	28.14	12.83	32.54	23.81	12.54	30.75	28.14	15.3	24.11	19.7	13.51	31.35	26.57	15.15	24.18	21.94	10.52	
7/25	20:05:05	40km	M5.1	2011/7/25 20:05	22.3	100	94°	18.66	12.01	8.88	17.24	10.89	8.13	23.58	15.22	11.79	14.55	18.81	12.16	21.64	27.02	9.55	17.69	20.22	8.58	
7/26	22:36:19	50km	M4.5	2011/7/26 22:36	17.3	80	105°	11.34	6.49	4.77	11.27	5.07	4.55	11.34	7.83	6.19	8.06	9.33	5.44	12.39	10.97	4.92	9.85	8.06	5.15	
7/29	1:02:07	60km	M4.1	2011/7/29 1:02	3.6	90	74°	3.28	3.43	2.31	2.46	3.35	1.49				4.25	5.37	3.28	4.77	6.49	2.68	3.95	6.04	2.31	
7/29	23:54:22	10km	M5.5	2011/7/29 23:54	2.8	230	156°																			
7/31	3:54:21	40km	M6.4	2011/7/31 3:54	27.6	190	170°	20.15	23.73	13.43	23.66	22.61	11.86				18.51	19.63	11.34	22.09	24.03	10.97	22.39	19.33	7.91	
8/1	15:55:18	40km	M4.6	2011/8/1 15:55	6.6	100	82°	5.22	4.4	3.8	4.1	2.91	2.61				5.59	6.64	3.28	9.62	8.13	3.06	5.59	7.09	2.61	
8/1	22:45:31	50km	M5.7	2011/8/1 22:45	6.4	170	37°	3.88	4.62	2.68							4.62	3.88	2.46	5.97	5	2.01	4.55	3.06	2.01	
8/5	19:54:17	30km	M4.9	2011/8/5 19:54	2.5	220	39°																			
8/10	2:45:15	50km	M4.2	2011/8/10 2:45	9.1	70	78°	10.67	15.37	4.77	7.01	10.45	4.55	8.13	17.46	5	8.8	13.36	8.13	11.19	16.27	6.56	11.49	15.45	5.59	
8/11	22:31:42	20km	M5.3	2011/8/11 22:31	14.2	120	99°	15.89	13.43	9.62	14.55	9.77	7.53	16.42	17.16	8.58	18.66	26.64	12.24	30.3	30.53	12.24	21.19	30.45	11.79	
8/12	3:22:33	50km	M6.0	2011/8/12 3:22	26.5	180	173°	12.98	18.13	7.83	16.57	17.01	7.16	16.34	17.98	7.68	16.27	16.12	6.71	20.22	18.13	7.46	14.03	15.75	7.24	
8/17	4:36:18	30km	M5.4	2011/8/17 4:36	3.1	220	34°																			
8/17	12:05:23	40km	M5.2	2011/8/17 12:05	15.2	110	100°	12.76	14.33	7.24	10.22	11.79	6.27	14.25	16.12	8.43	18.13	19.85	10.07	19.78	21.27	9.92	18.13	17.16	7.46	
8/17	12:14:47	40km	M4.6	2011/8/17 12:14	9.5	110	100°	6.56	5.59	3.95	5.44	4.92	4.1	6.27	7.31	4.85	6.71	11.71	5.74	9.7	13.66	5.89	8.5	17.24	4.4	
8/																										

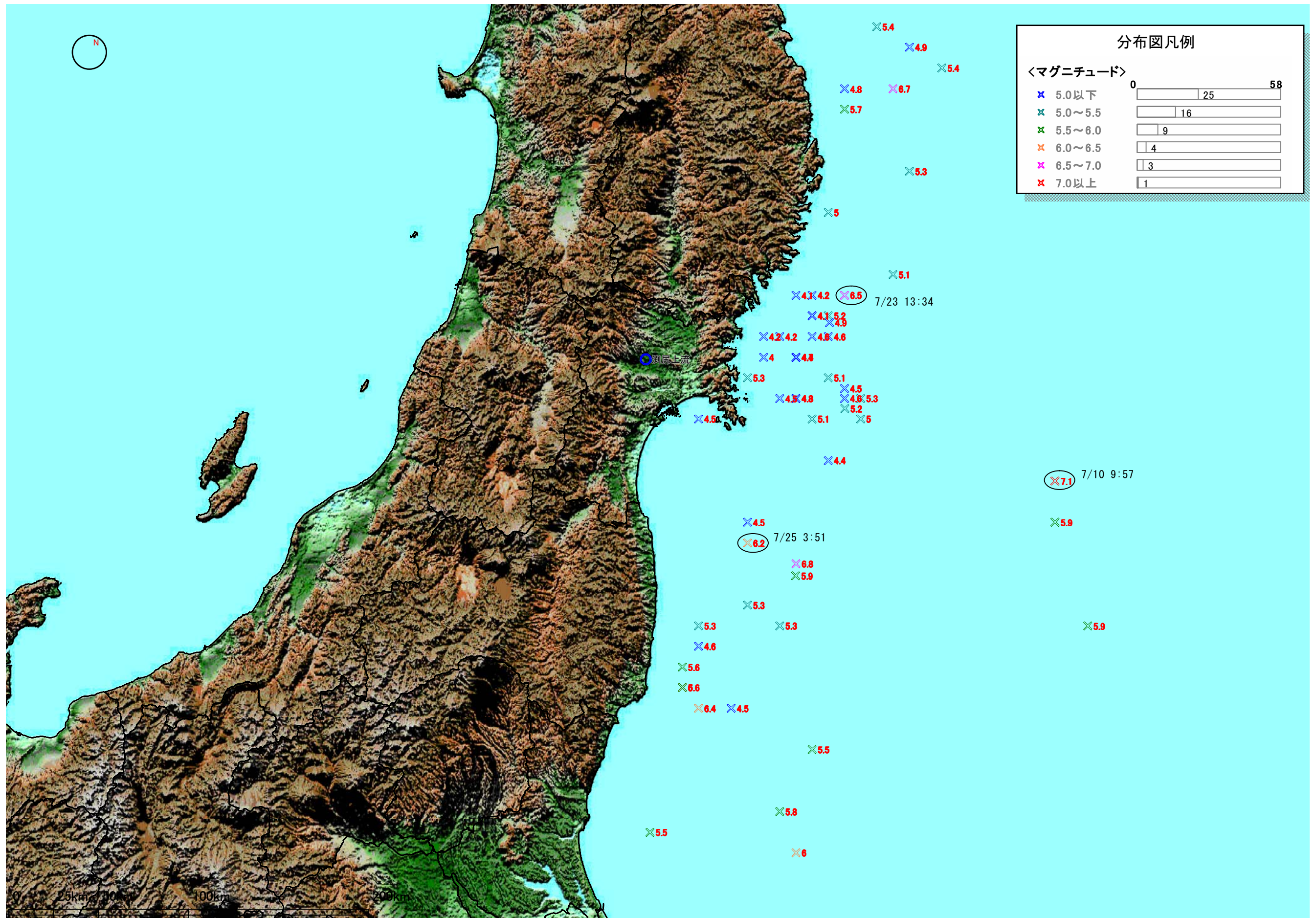


図 3.2 余震震源分布図

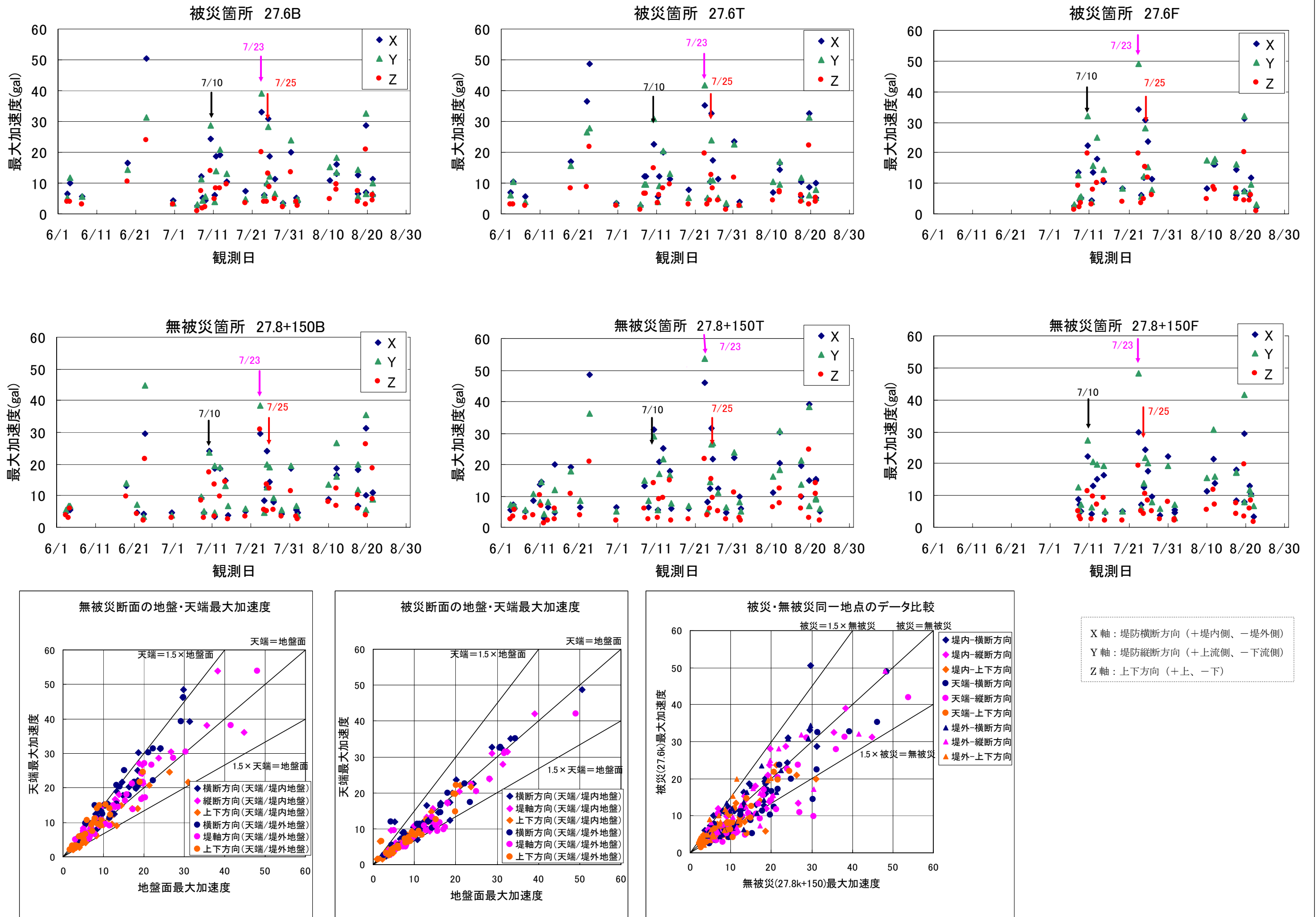


図 3.3 小型地震計の余震観測結果 (各方位の最大加速度) 9

#### 4. 地震動の見える化

収集した余震観測結果の内、最大加速度の大きい3つの余震を抽出して、「地震動の見える化」作業を実施した手順を下図に示す。

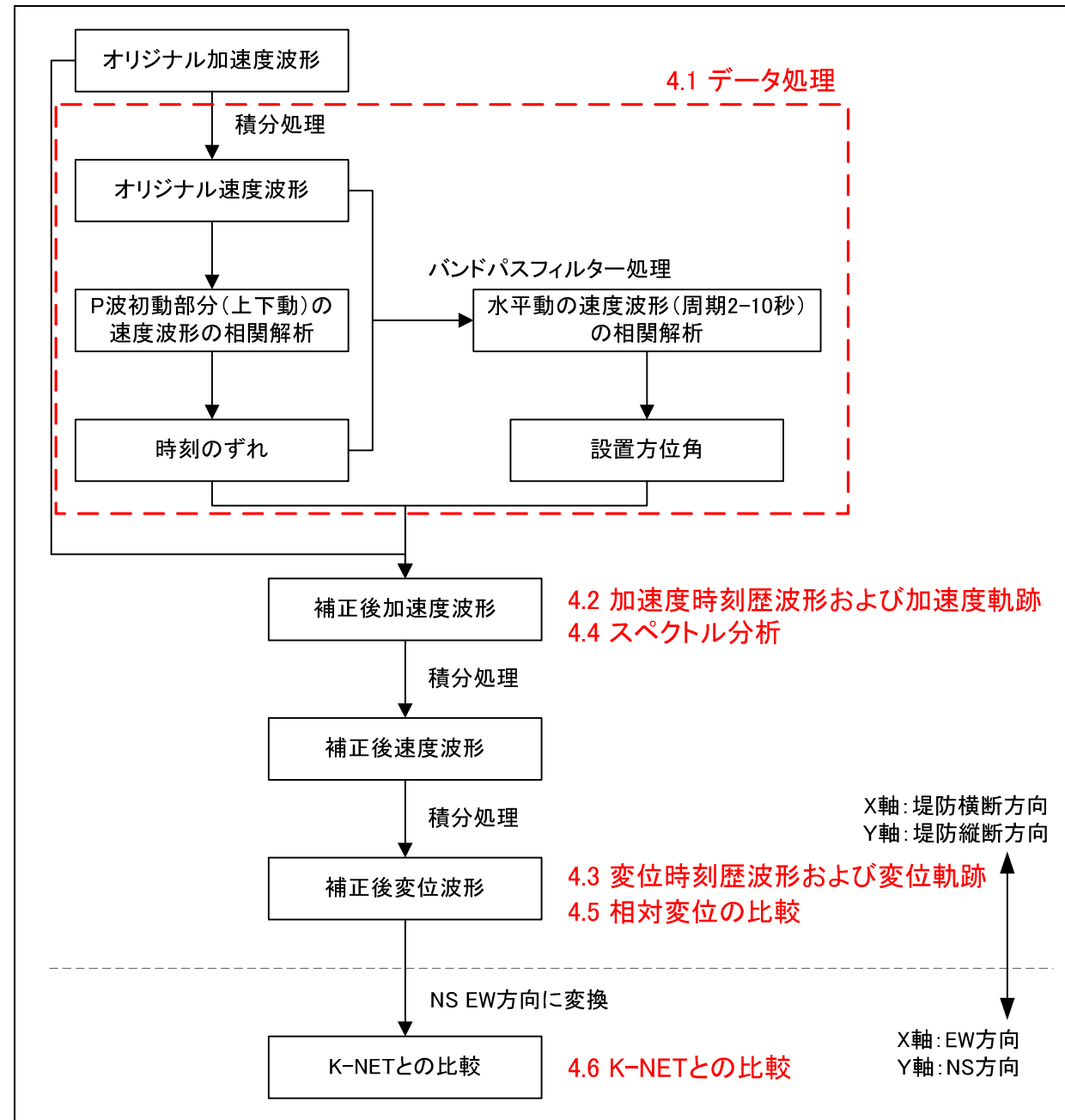


図 4.1 地震動見える化の作業手順

#### 4.1 データ補正

##### 4.1.1 時刻補正

余震観測を行っている E-キャッチャー（応用地震計測製）は、機器毎に内部時計を用いているため、観測データを整理するうえでは、機器毎の時刻を合わせる必要がある。

6か所で行われた観測記録の時刻補正は、P波初動の上下動成分の速度波形を用いることとした。ここで速度波形を用いた理由は、加速度波形では表層部分の速度構造の相違を反映しやすく、観測点ごとに波形の形状が異なり、また、変位波形では初動の位相が見えにくくなるため、速度波形でP波初動を合わせるのが適切と判断したからである。

表 4.1.1 に解析を行った3つの地震の震源諸元を示す。

P波初動部分にはやや長周期帯域のノイズ成分が含まれていたため、P波の立ち上がりの初動時刻を用いた時刻補正はできなかった。そこで、P波初動を含む5~10秒間（2011年7月23日および7月25日の地震では5秒以降の波形がやや乱れているため5秒間、7月10日の地震では10秒間）の上下動成分の波形を用いて、観測点 27.6kB 地点の波形との相関解析を行った。27.6kB 地点以外の波形を1サンプルごとにずらしながら 27.6kB 地点の波形との相関を計算し、もっとも相関の高い時刻を 27.6kB に対する時計のずれとして求めた。

図 4.1.1 に時刻補正解析結果を示す。相関解析により、波形の位相がよくそろっていることが確認できる。表 4.1.2 に時間の補正量を示す。

3つの余震（7/10~7/25）の間には、7/13 および 7/20 の2回の時刻合わせ(バッテリー交換含む)を実施している。7/23 と 7/25 の間には時刻合わせを行っていないため、この2つの差異は個々の機器の内部時計の精度（最大 月差 1分）によるものと考えられる。一方、7/10 と 7/23,7/25 の余震の差異は2回の時刻合わせも一因と考えられる。

表 4.1.1 解析を行った地震の諸元

発生日月	発震時刻	経度	緯度	深さ(km)	Mj	震央	測尻上流からの位置関係	
							水平距離(km)	方位角
2011年7月10日	9:57:07.4	38.032	143.507	34	7.3	FARE OFF MIYAGI PREF	230	105°
2011年7月23日	13:34:23.9	38.874	142.091	47.2	6.4	KINKAZAN REGION	110	71°
7月25日	3:51:25.3	37.709	141.627	45.8	6.3	FARE OFF FUKUSHIMA PREF	110	150°

表 4.1.2 時間の補正量

時間シフト量	2011/7/10 9:57	2011/7/23 13:34	2011/7/25 3:51
27.6kB	基準	基準	基準
27.6kF	-1.00	1.00	-0.22
27.6kT	-1.01	-0.44	-1.01
27.8k+150B	1.99	3.01	2.80
27.8k+150F	1.86	1.02	0.86
27.8k+150T	-2.00	-0.63	-1.98

※マイナスは 27.6kB に対して時計が遅れていることを示している。

※プラスは 27.6kB に対して時計が進んでいることを示している。

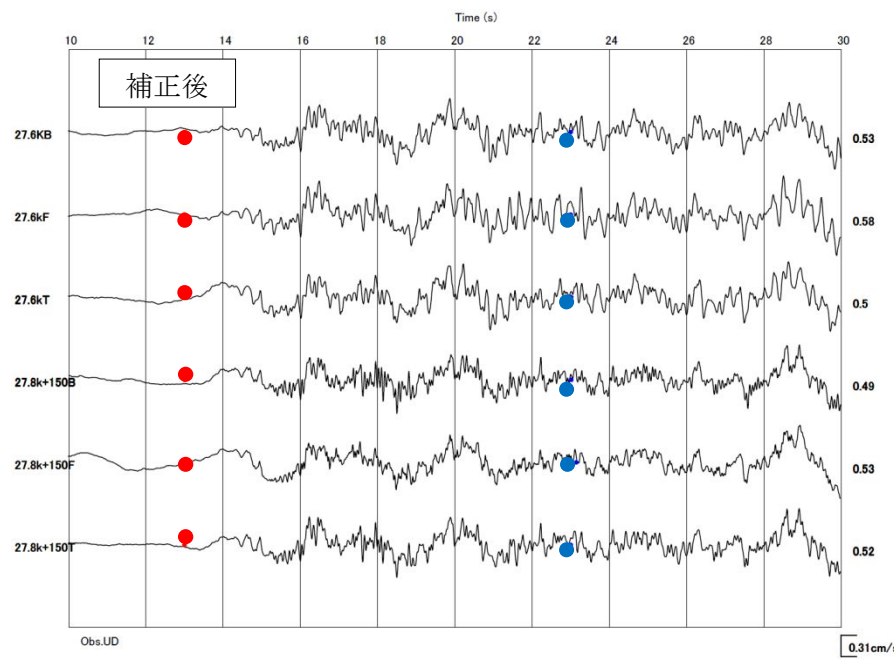
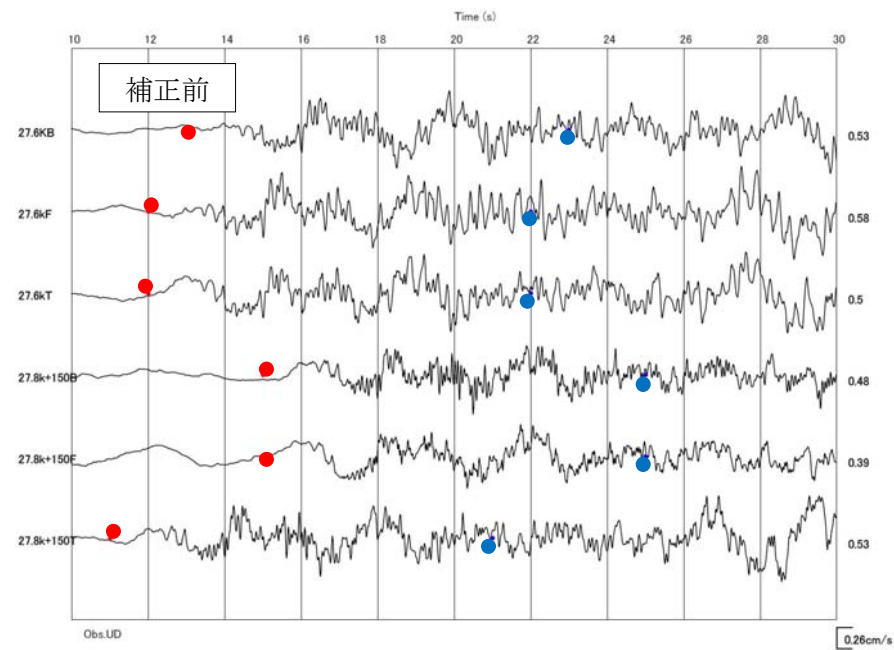


図 4.1.1-1 2011 年 7 月 10 日の地震の速度波形の上下動成分  
 上図：補正前 下図：補正後  
 赤丸、青丸は相関解析を行った波形の区間を示す。

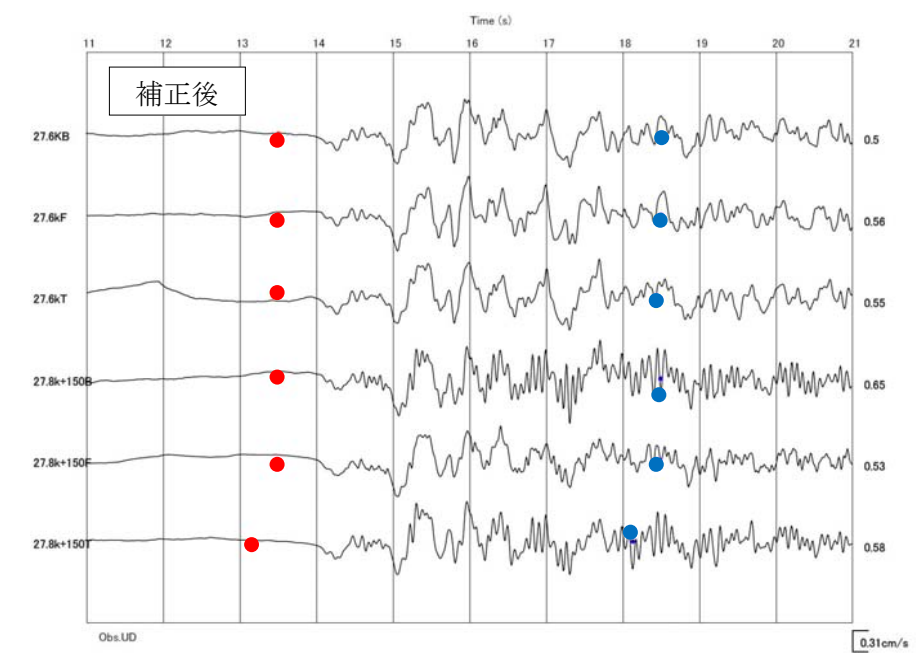
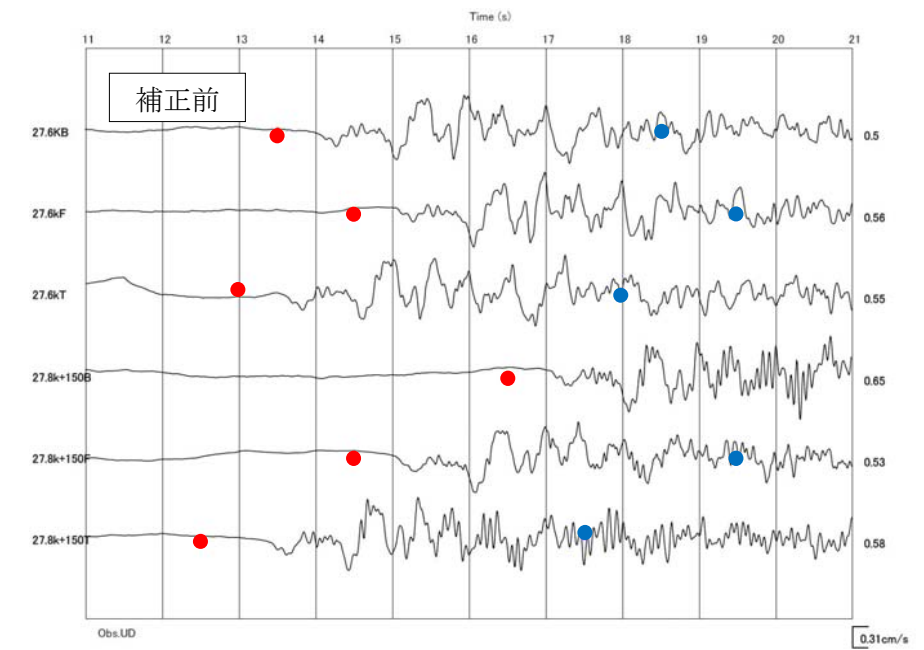


図 4.1.1-2 2011 年 7 月 23 日の地震の速度波形の上下動成分  
 上図：補正前 下図：補正後  
 赤丸、青丸は相関解析を行った波形の区間を示す。



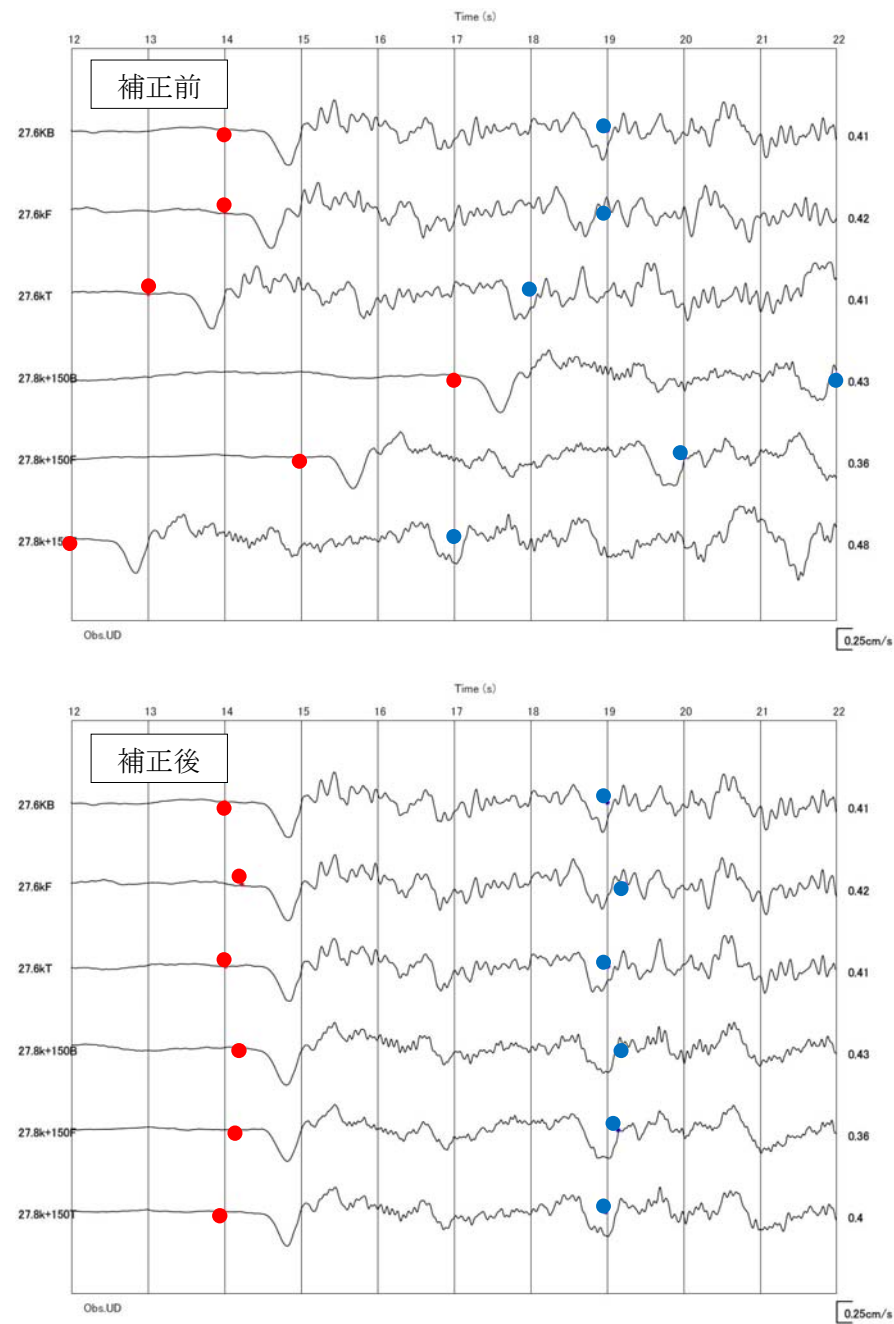


図 4.1.1-3 2011 年 7 月 25 日の地震の速度波形の上下動成分

上図：補正前 下図：補正後

赤丸、青丸は相関解析を行った波形の区間を示す。

#### 4.1.2 座標軸変換

速度波形記録の水平 2 成分の相関解析により、地震計間の設置方位のずれを推定した。既往の研究によると相関解析による設置方位の推定には、周期 10 秒以上とできるだけ長周期帯域の波形を用いることが望ましい（汐見ほか、2009）。一方、E-キャッチャーの長周期成分の分解能は低く、図 4.1.2 に示す観測されたスペクトルでは周期 2 秒以上にピークがみられることから、周期 2-10 秒の帯域のバンドパスフィルターを施すこととした。

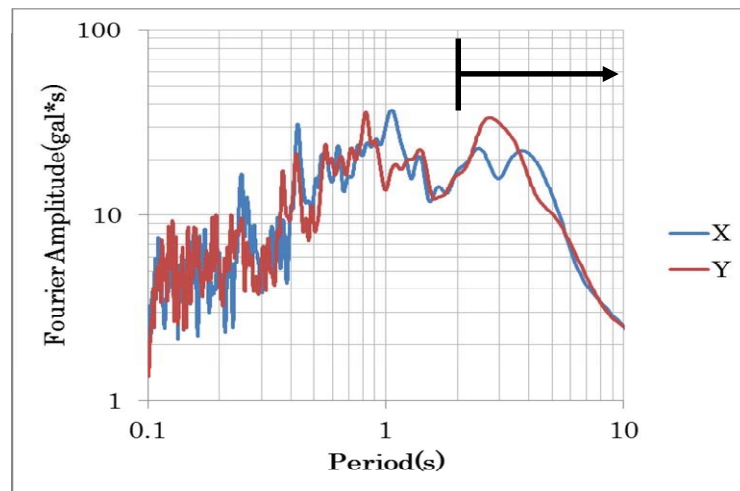


図 4.1.2 オリジナル加速度波形のスペクトル (7/10 27.6kB)

基準地震計は 27.6k 地点では 27.6kB、27.8k+150 地点では、27.8k+150B とした。相関係数は、観測波形の表面波と判断した部分について（2011 年 7 月 10 日の地震では 100 秒間、2011 年 7 月 23 日の地震では 50 秒間、2011 年 7 月 25 日の地震では 80 秒間）、水平 2 成分の波形を 1 度反時計回りに波形を回転させ、基準地震計の記録との相関係数を求める。これを -180 度から 180 度まで繰り返して、相関係数を求める。3 つの地震について相関係数を重みづけ平均して（相関係数の最大値で重みづけ）、相関が最大となる角度を基準地震計に対する設置方位として求める。

図 4.1.3 に各地震計の相関係数を示す。表 4.1.3 に各地震計の設置方位を示す。

図 4.1.4 に各地震の速度波形を示す。比較のために設置方位補正前の波形も示す。回転角は最大で 5 度であったため、目視では設置方位補正の効果はあまり見られなかった。相関係数は 0.95 以上であるため、波形の一致度は高い。

表 4.1.3 各地震計の設置方位

SITE	2011/7/10 9:57		2011/7/23 13:34		2011/7/25 3:51		3地震平均	
	27.6kBに対する 回転角 (時計回り)	相関係数	27.6kBに対する 回転角 (時計回り)	相関係数	27.6kBに対する 回転角 (時計回り)	相関係数	27.6kBに対する 回転角 (平均値)	相関係数 (平均)
27.6kB	基準	-	基準	-	基準	-	基準	-
27.6kF	2	0.997	2	0.990	2	0.993	2	0.993
27.6kT	4	0.998	5	0.990	4	0.997	5	0.995
SITE	27.8kB+150Bに 対する回転角 (時計回り)		27.8kB+150Bに 対する回転角 (時計回り)		27.8kB+150Bに 対する回転角 (時計回り)		27.8kB+150Bに 対する回転角 (平均値)	
	相関係数	相関係数	相関係数	相関係数	相関係数	相関係数	相関係数	相関係数
27.8k+150B	基準	-	基準	-	基準	-	基準	-
27.8k+150F	4	0.951	1	0.995	5	0.984	3	0.977
27.8k+150T	1	0.995	2	0.998	4	0.989	2	0.994

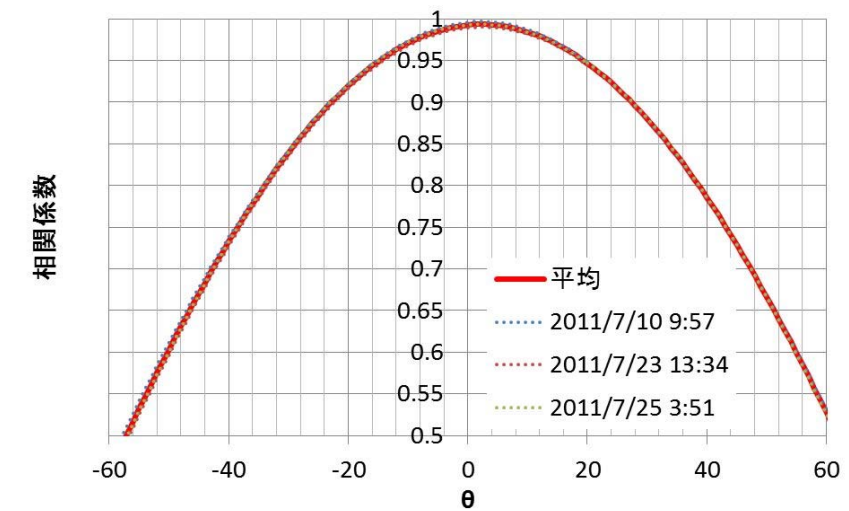


図 4.1.3-1 27.6kF の地震計の相関係数 (27.6kB 基準)

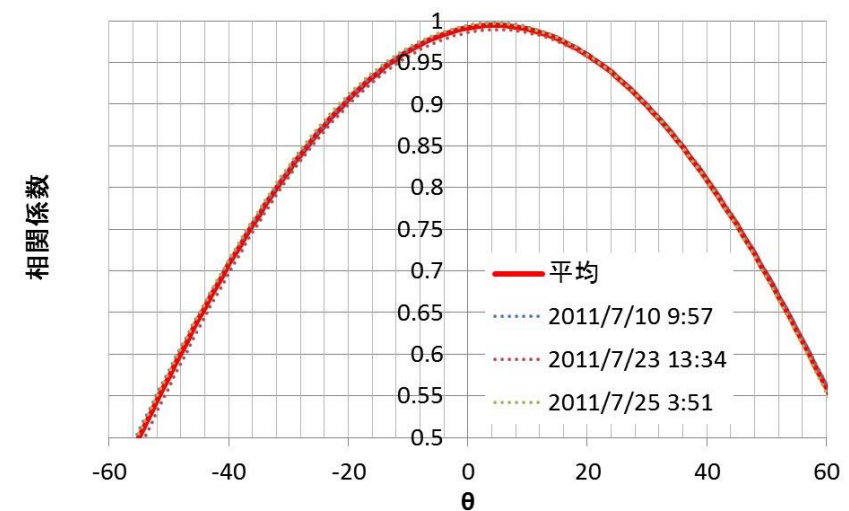


図 4.1.3-2 27.6kT の地震計の相関係数 (27.6kB 基準)

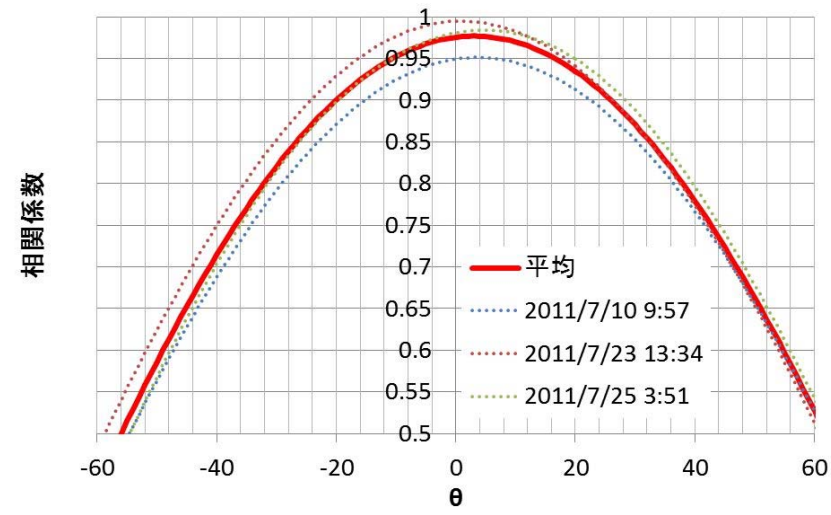


図 4.1.3-3 27.8k+150F の地震計の相関係数 (27.8k+150B 基準)

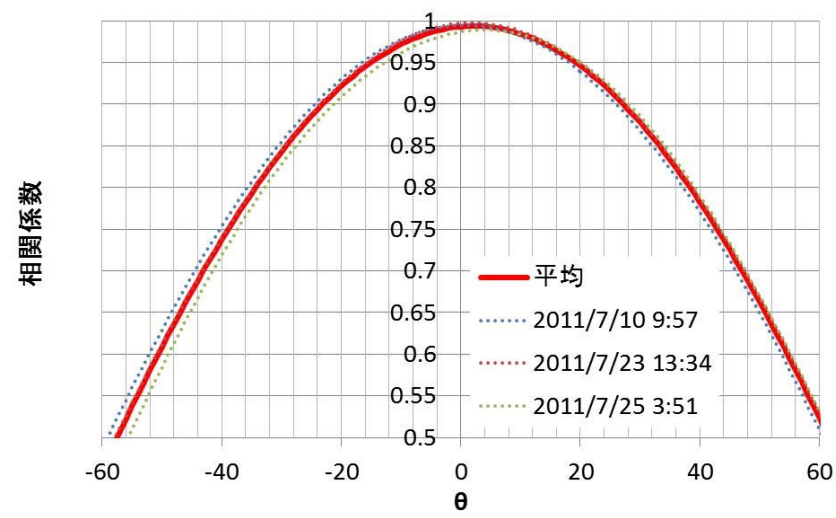


図 4.1.3-4 27.8k+150T の地震計の相関係数 (27.8k+150B 基準)

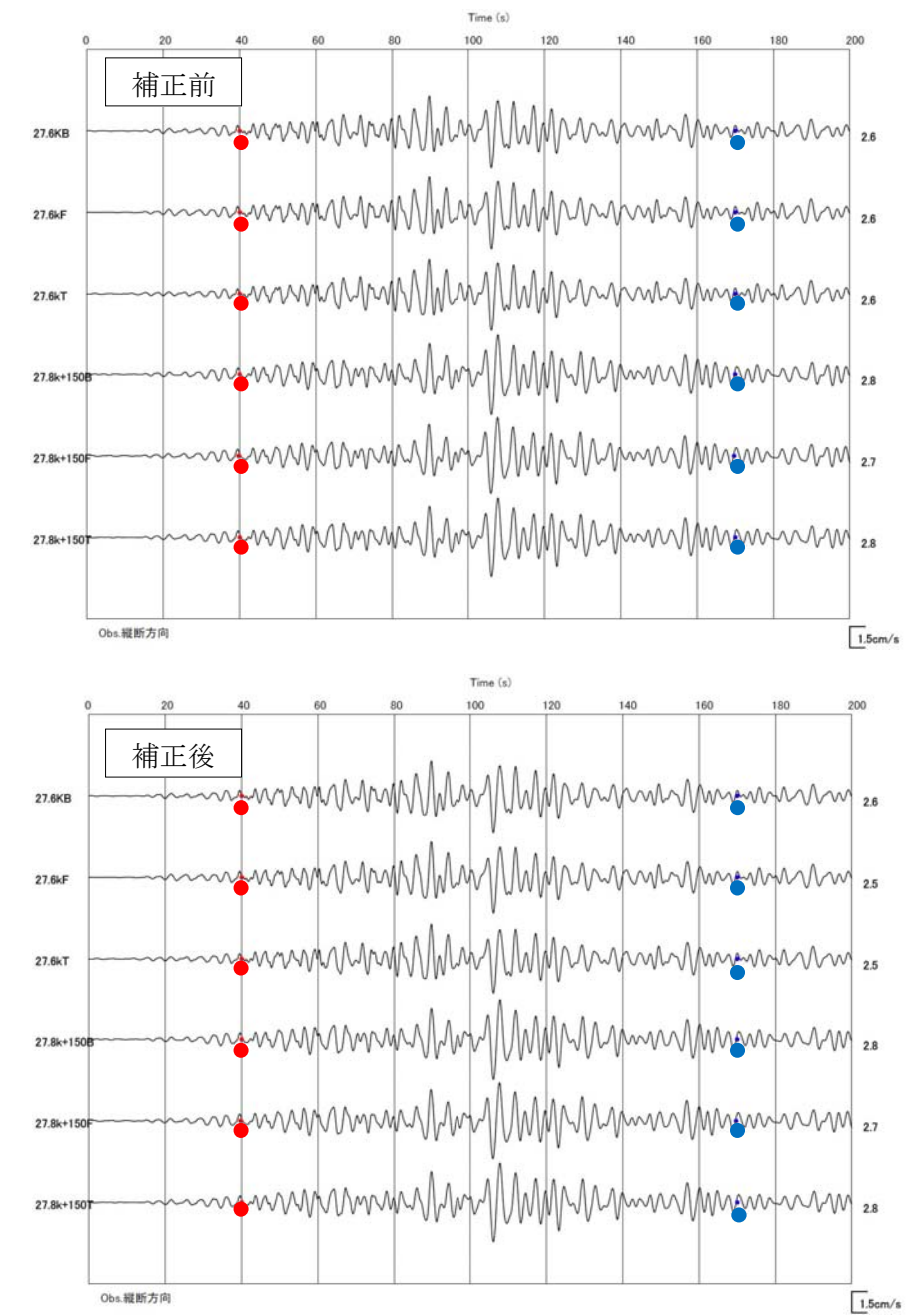


図 4.1.4-1 2011年7月10日の地震 (周期2-10秒速度波形) 縦断方向成分

上図：補正前 下図：補正後

赤丸、青丸は相関解析を行った波形の区間を示す。

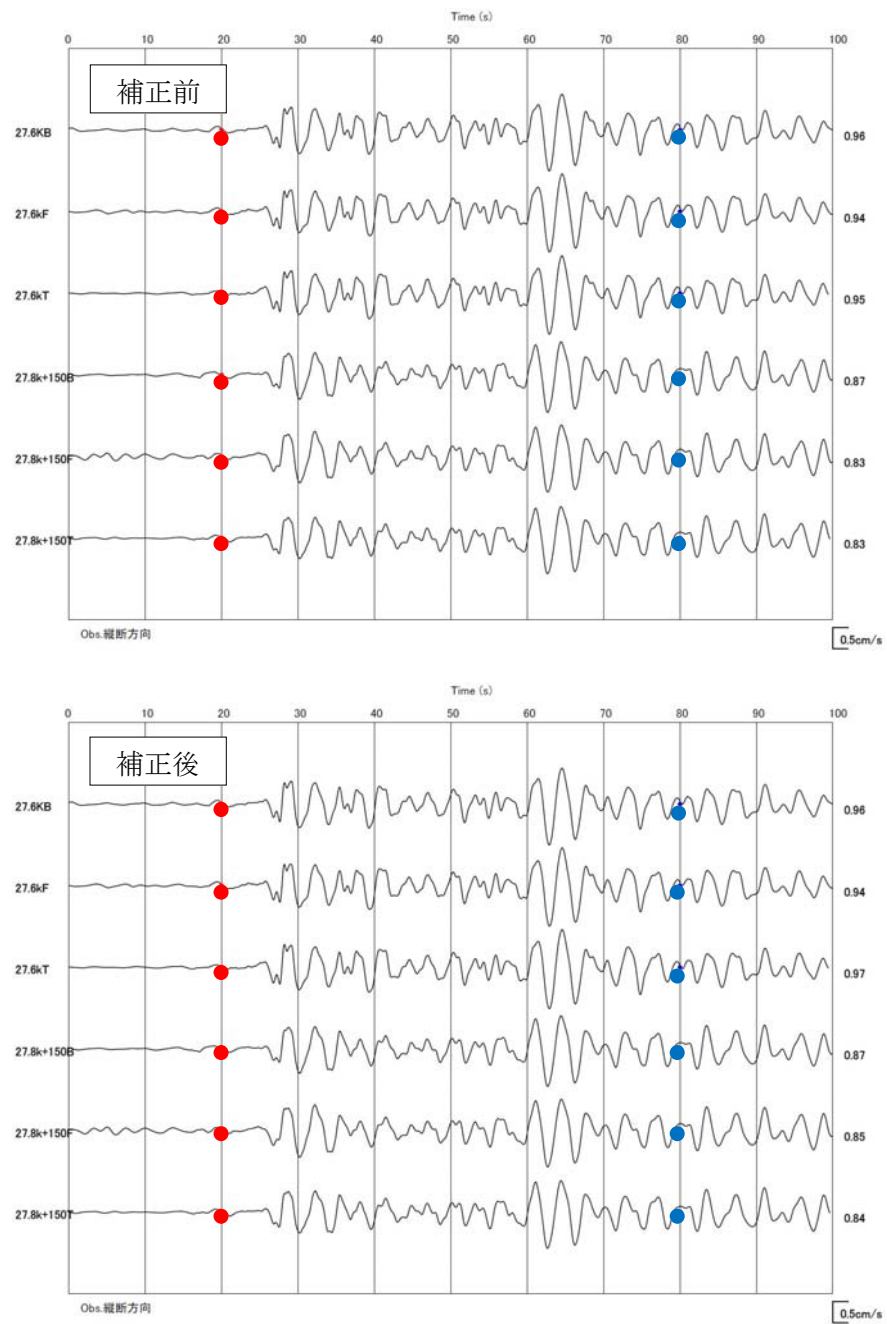


図 4.1.4-2 2011 年 7 月 23 日の地震（周期 2-10 秒速度波形） 縦断方向成分  
 上図：補正前 下図：補正後  
 赤丸、青丸は相関解析を行った波形の区間を示す。

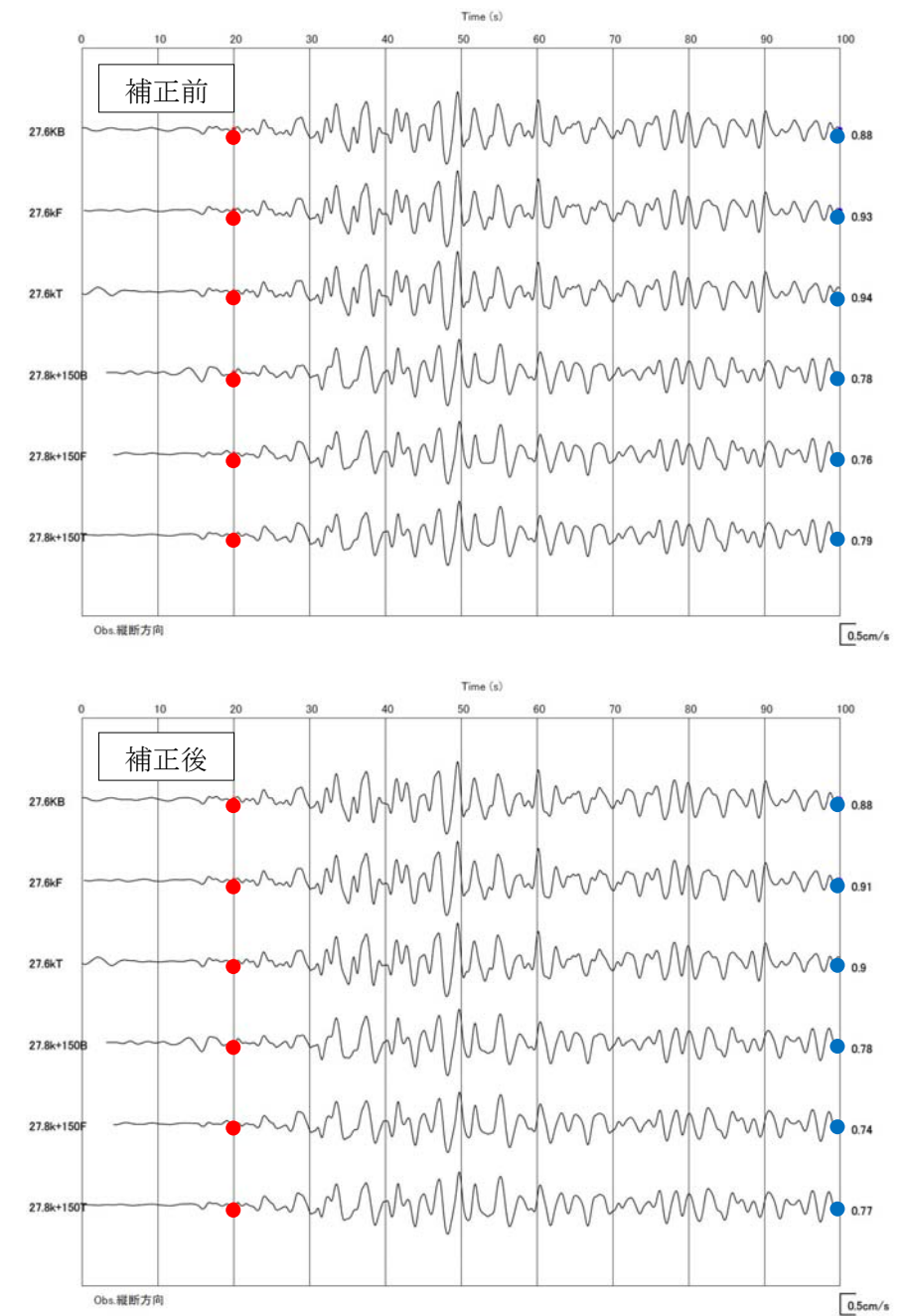


図 4.1.4-3 2011 年 7 月 25 日の地震（周期 2-10 秒速度波形） 縦断方向成分  
 上図：補正前 下図：補正後  
 赤丸、青丸は相関解析を行った波形の区間を示す。

## 4.2 加速度時刻歴波形および加速度軌跡

抽出した3つの地震について、4.1節のとおり時刻および方位を補正したデータを用いて加速度の比較を実施した。

### 4.2.1 余震記録A (2011年7月10日(日) 9時57分 M7.1)

図4.2.1に加速度の時刻歴波形を、図4.2.2および図4.2.3には地点毎の加速度重合せ図および加速度の軌跡を示す。特徴は以下のとおりである。

#### <被災断面 (27.6k) >

- ・最大加速度は、川表地表面の27.6kFにおける堤防縦断方向(Y方向)で最も大きい。ただし、3地点ともにほぼ同程度の加速度を示す。
- ・堤防横断方向の加速度は、3地点ともにほぼ同様の値を示す。
- ・図4.2.2の加速度重合せ図から、3地点とも同様の時刻歴波形と判断される。軌跡については、いずれも原点を中心に円形状を示している。45~50(s)および60~65(s)の間は、堤防縦断方向(Y)にやや大きな加速度振幅が見られる。

#### <無被災断面 (27.8k+150) >

- ・最大加速度は、天端の27.8k+150Tにおける堤防横断方向(X方向)で最も大きい。
- ・堤防横断方向の加速度は、川裏≒川表<天端の順に大きく、天端の最大加速度は川裏川表地表面の約1.5倍程度となっている。
- ・図4.2.3の加速度重合せ図から、川表川裏の地盤面と比較して天端の揺れが約1.5倍程度大きくなっている。軌跡については、いずれも原点を中心に円形状を示している。

### 4.2.2 余震記録B (2011年7月23日(土) 13時34分 M6.5)

図4.2.4に加速度の時刻歴波形を、図4.2.5および図4.2.6には地点毎の加速度重合せ図および加速度の軌跡を示す。特徴は以下のとおりである。

#### <被災断面 (27.6k) >

- ・最大加速度は、川表地表面の27.6kFにおける堤防縦断方向(Y方向)で最も大きい。堤防横断方向および上下方向は同様の加速度を示す。
- ・堤防横断方向の加速度は、3地点ともにほぼ同様の値を示す。
- ・図4.2.5の加速度重合せ図から、3地点とも同様の時刻歴波形と判断される。軌跡については、原点を中心に円形状を示しているが、ピーク時の27.5~32.5(s)の間は、堤防縦断方向(Y)にやや大きな加速度振幅が見られる。

#### <無被災断面 (27.8k+150) >

- ・最大加速度は、天端の27.8k+150Tにおける堤防縦断方向(Y方向)で最も大きい。
- ・堤防横断方向の加速度は、川裏≒川表<天端の順に大きく、天端の最大加速度は川裏川表地表面の約1.5倍程度となっている。
- ・図4.2.6の加速度重合せ図から、川表川裏の地盤面と比較して天端の横断方向の揺れが約1.5倍程度大きくなっている。軌跡については、原点を中心に円形状を示しているが、ピーク時の27.5~32.5(s)の間は、堤防縦断方向(Y)にやや大きな加速度振幅が見られる。

### 4.2.3 余震記録C (2011年7月25(月) 3時51分 M6.2)

図4.2.7に加速度の時刻歴波形を、図4.2.8および図4.2.9には地点毎の加速度重合せ図および加速度の軌跡を示す。特徴は以下のとおりである。

#### <被災断面 (27.6k) >

- ・最大加速度は、天端の27.6kTにおける堤防横断方向(X方向)で最も大きい。ただし、3地点ともにほぼ同程度の加速度を示す。
- ・堤防横断方向の加速度は、3地点ともにほぼ同様の値を示す。
- ・図4.2.8の加速度重合せ図から、3地点とも同様の時刻歴波形と判断される。軌跡については、原点を中心に円形状を示しているが、32.5~35(s)の間は堤防横断方向(X)に、35~37.5(s)の間は堤防縦断方向(X)に、やや大きな加速度振幅が見られる。

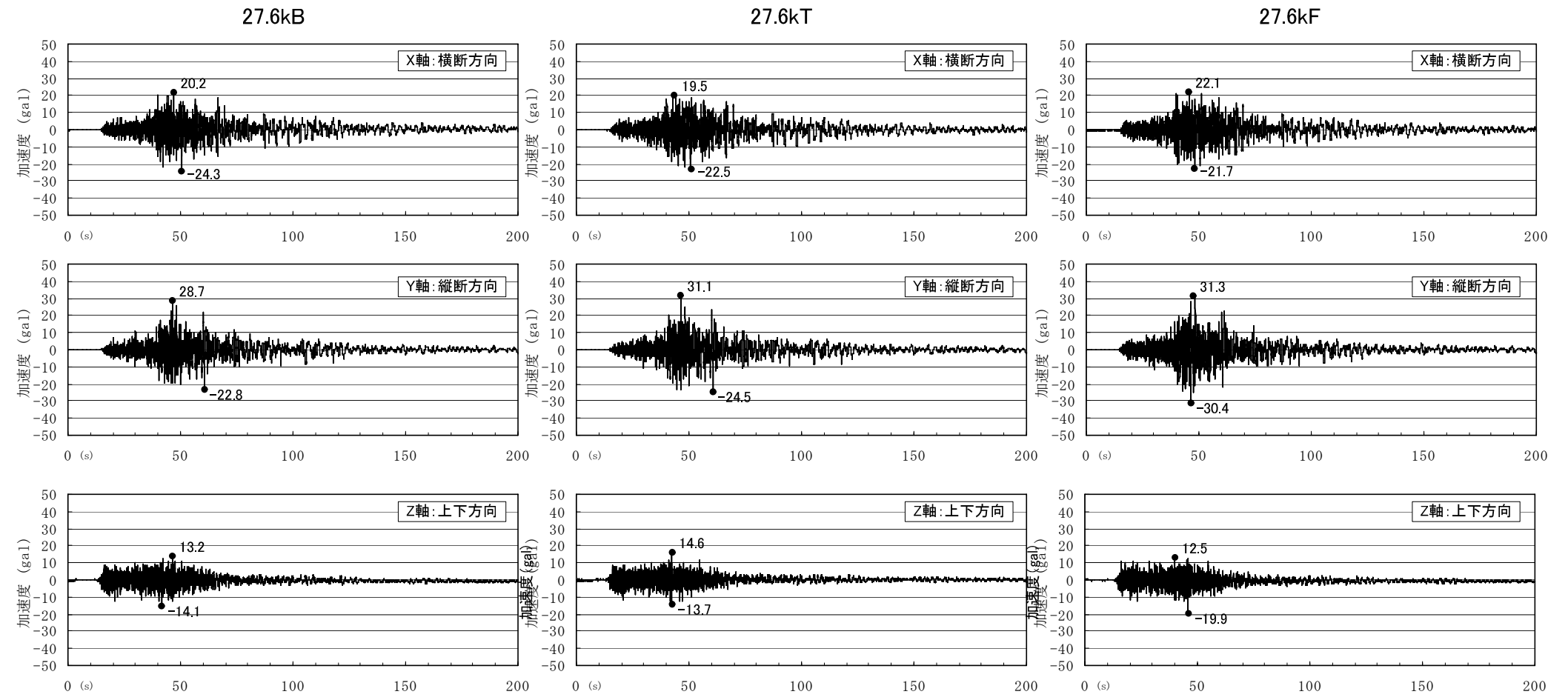
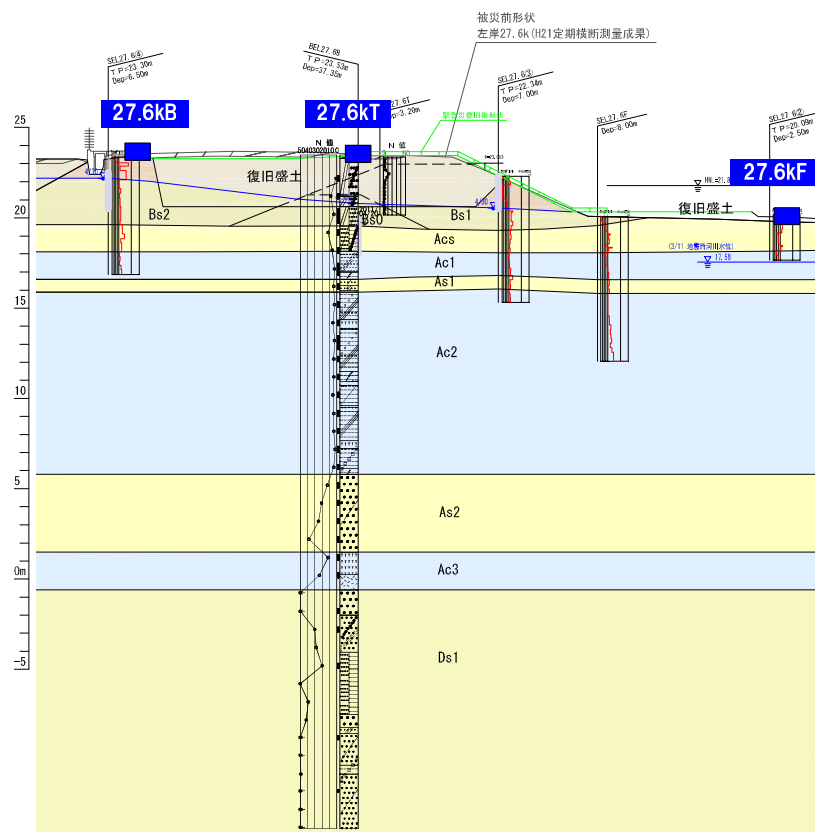
#### <無被災断面 (27.8k+150) >

- ・最大加速度は、天端の27.8k+150Tにおける堤防横断方向(X方向)で最も大きい。
- ・堤防横断方向の加速度は、川裏≒川表<天端の順に大きく、天端の最大加速度は川裏川表地表面の約1.3倍程度となっている。
- ・図4.2.9の加速度重合せ図から、川表川裏の地盤面と比較して天端の横断方向の揺れが約1.5倍程度大きくなっている。軌跡については、原点を中心にほぼ円形状を示している。

#### 加速度のまとめ

- 被災箇所においては、3地点(川表、川裏、天端)の最大加速度、加速度時刻歴波形、加速度軌跡を比較した結果、いずれもほぼ同様の結果と判断される。  
→ 堤防による増幅などは見られない
- 無被災区間においては、いずれの余震においても天端が川表川裏の地表面よりも1.5倍程度大きな値を示す。  
→ 堤防により増幅していると判断される。
- 被災箇所および無被災箇所ともに加速度軌跡はほぼ円形状を示すが、時間により堤防縦断方向にやや大きな加速度振幅が見られる場合もあるが、優位な方向性は見られない。
- 被災箇所と無被災箇所を比較すると、無被災箇所の天端の揺れが大きい。その他は同程度である。

被災箇所 (左岸27.6k)



無被災箇所 (27.8k+150)

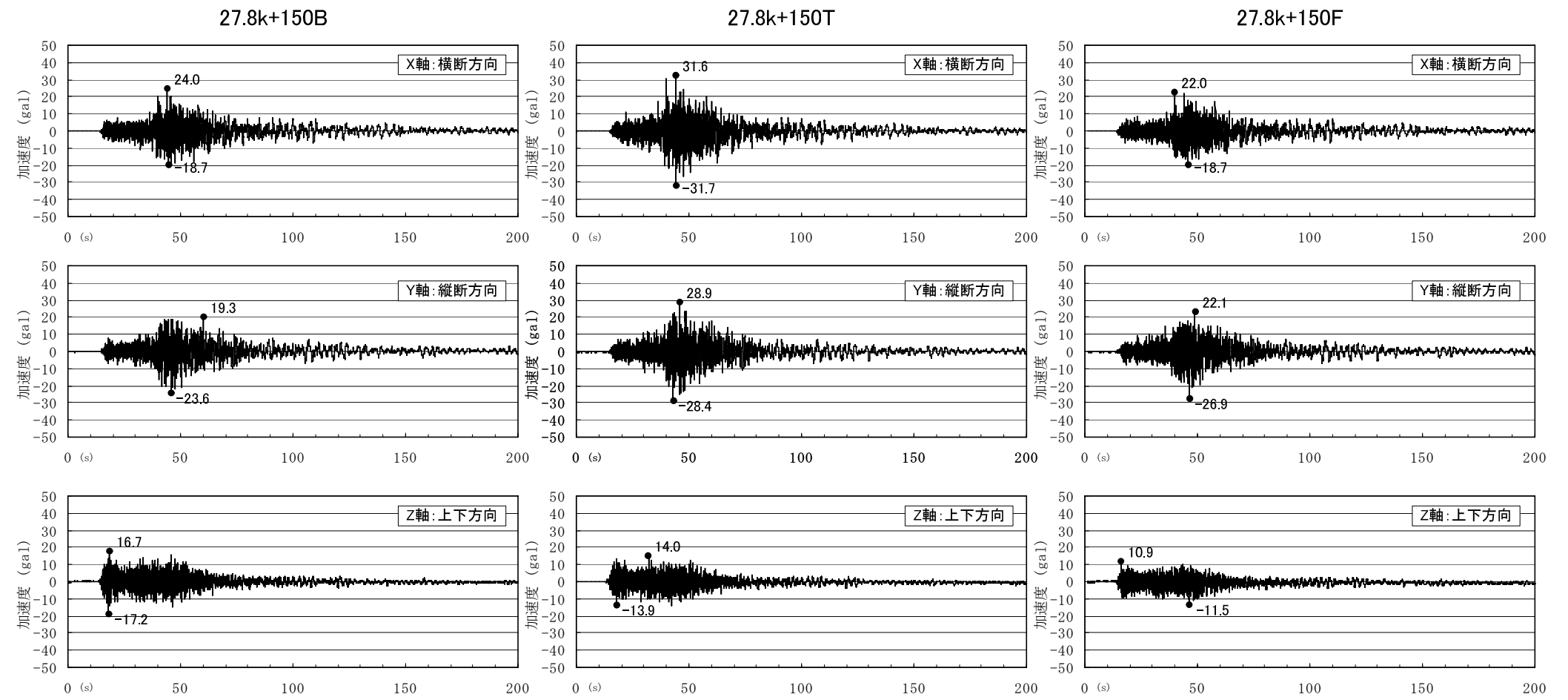
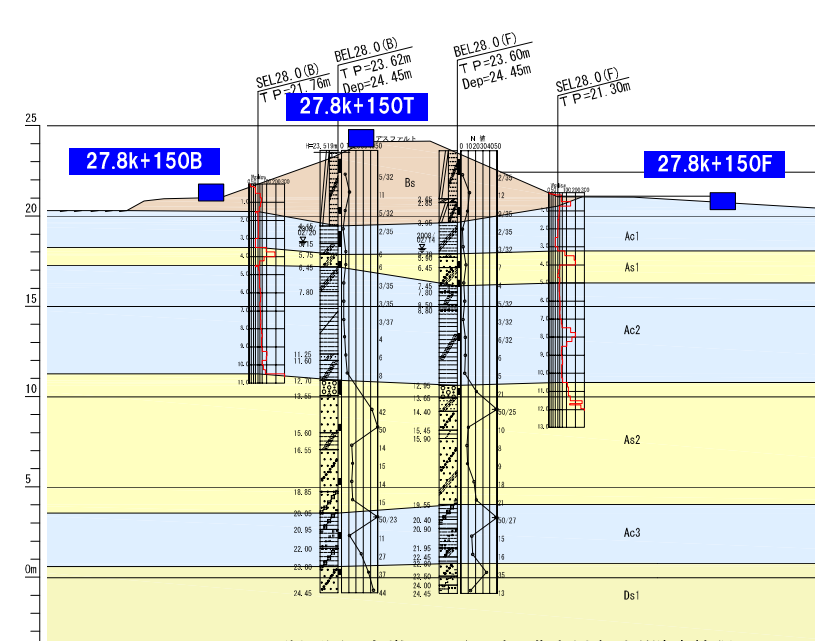
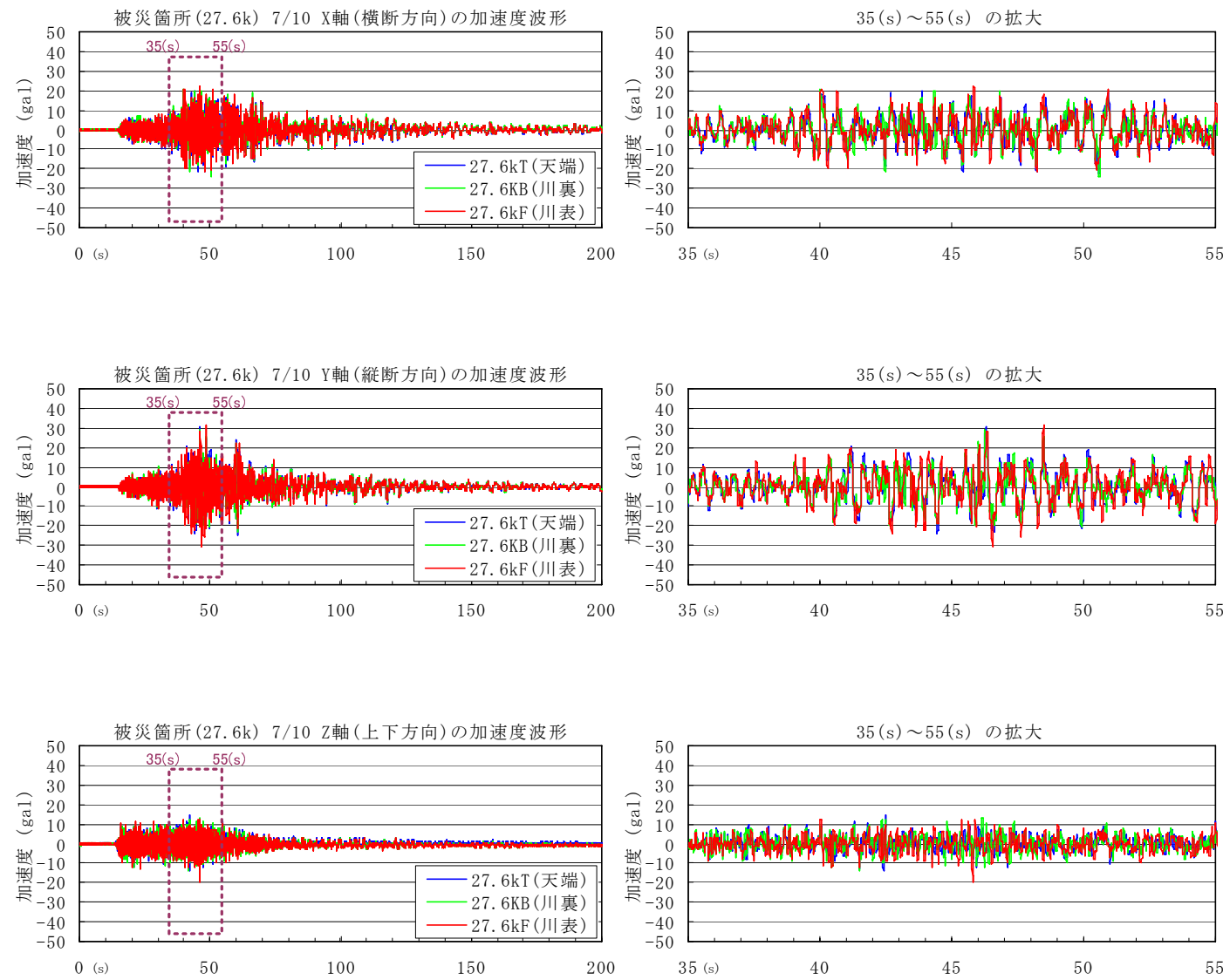


図 4.2.1 加速度時刻歴波形 (余震記録 A 7/10 9:57 M7.1)

被災箇所(27.6k) 7/10 加速度時刻波形



被災箇所(27.6k) 加速度軌跡 (7/10)

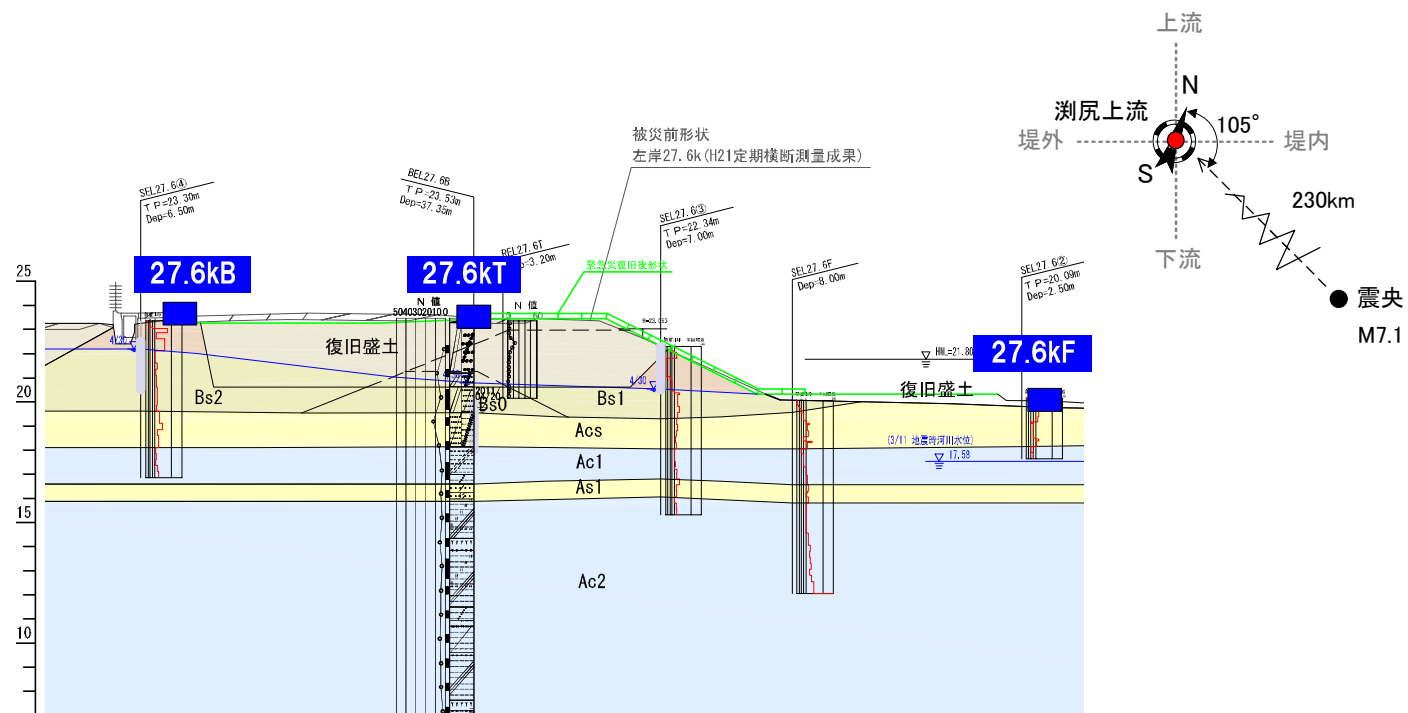
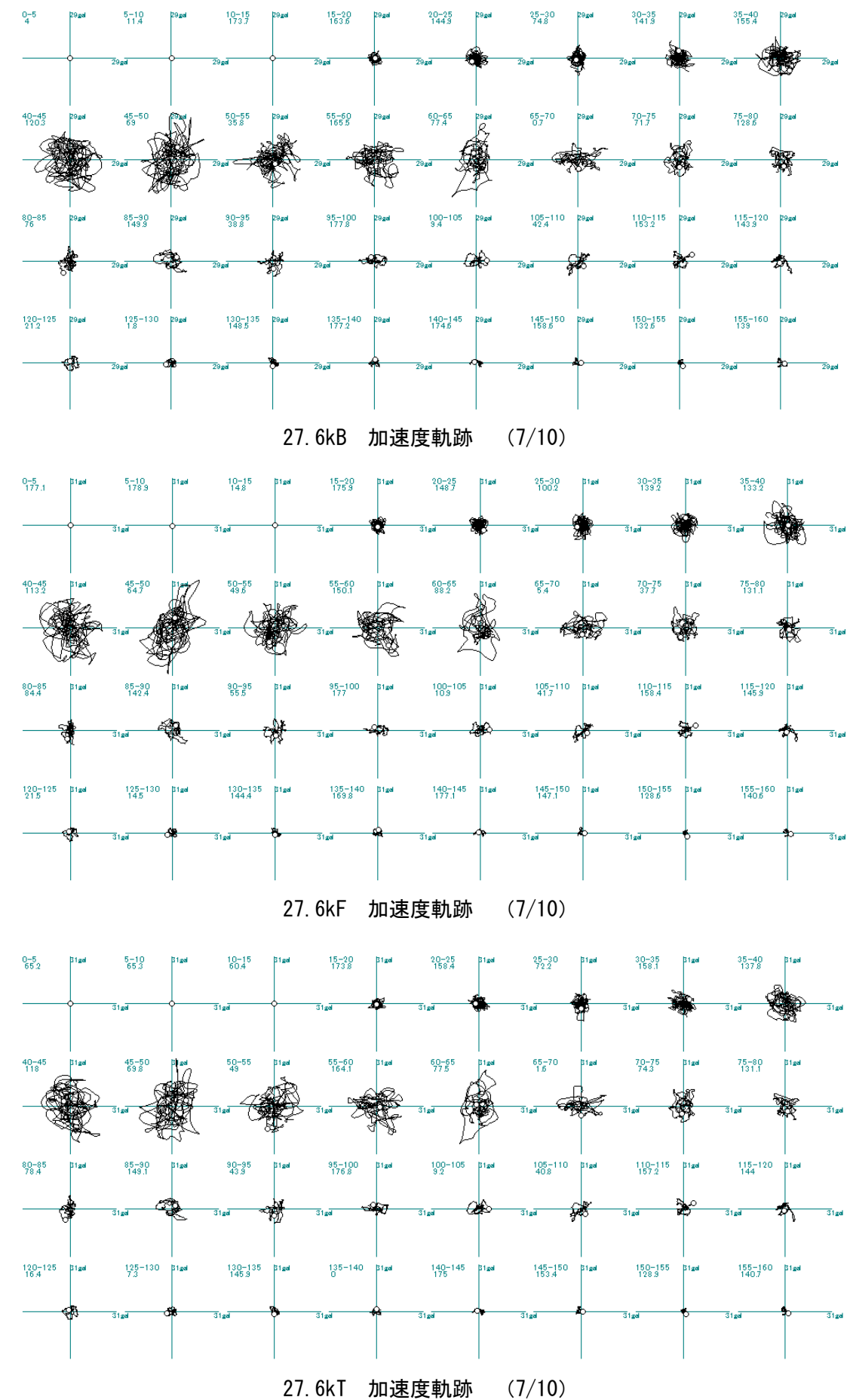
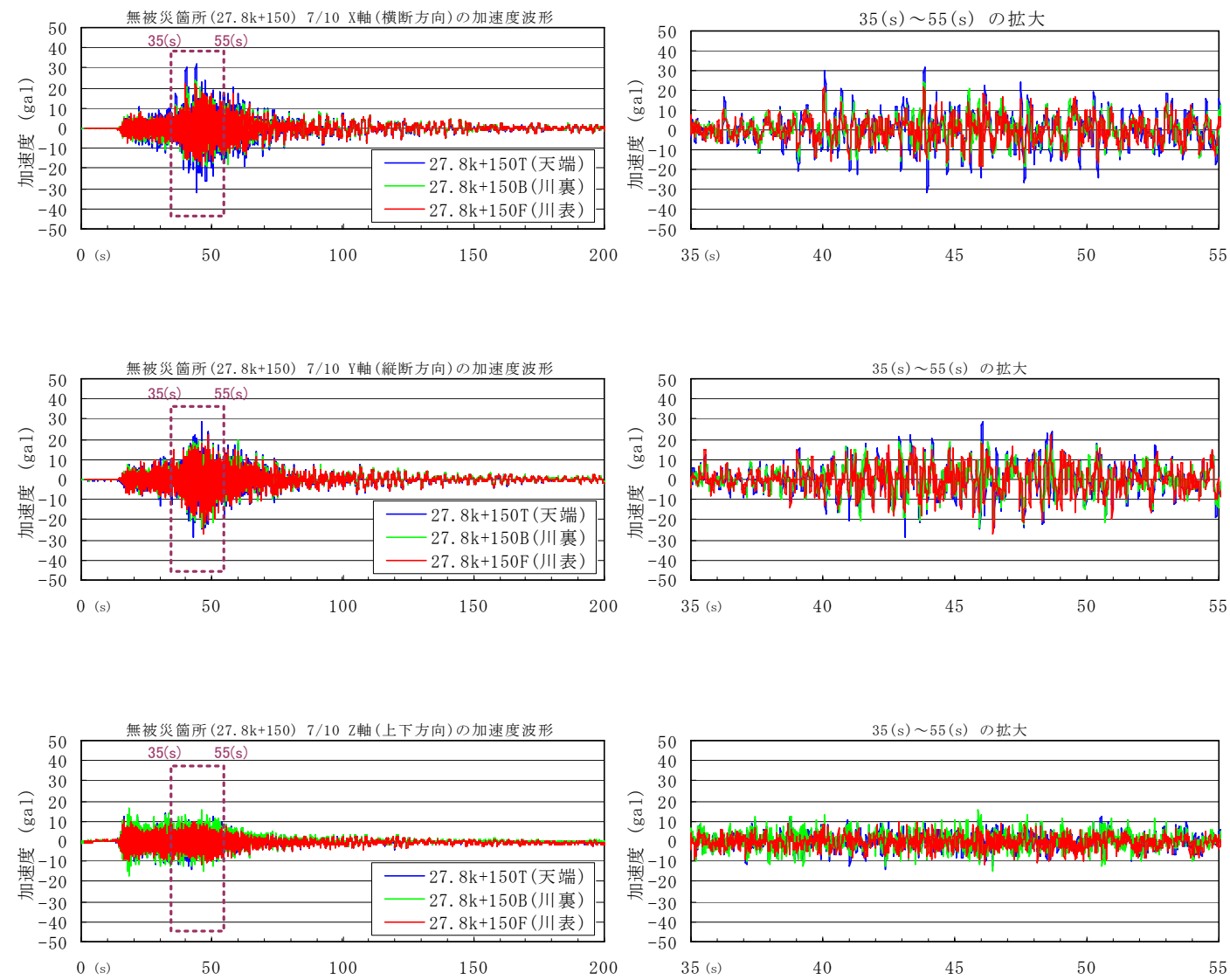
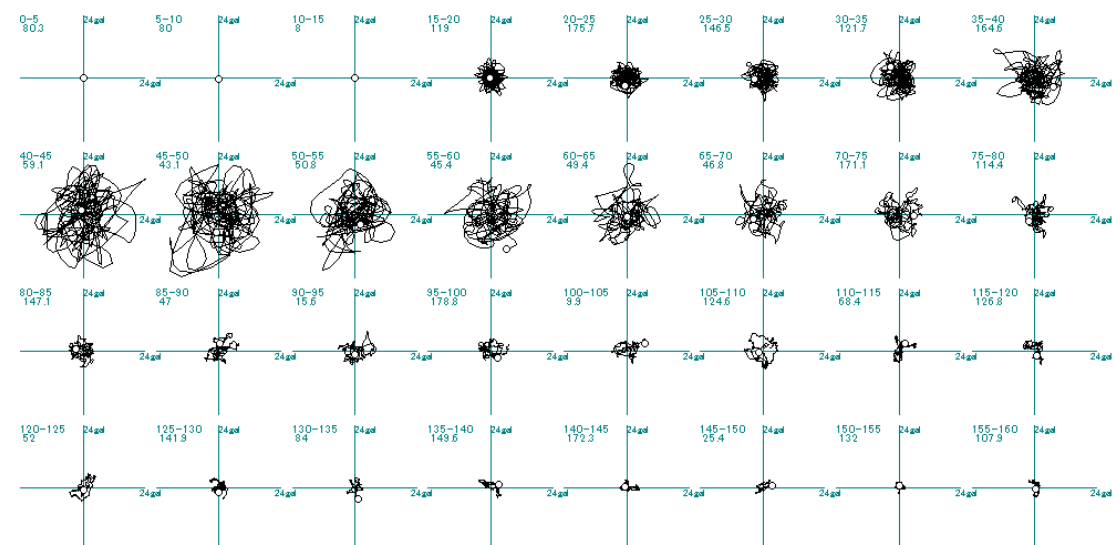


図 4.2.2 被災箇所加速度重合せ図 (余震記録 A 7/10 9:57 M7.1)

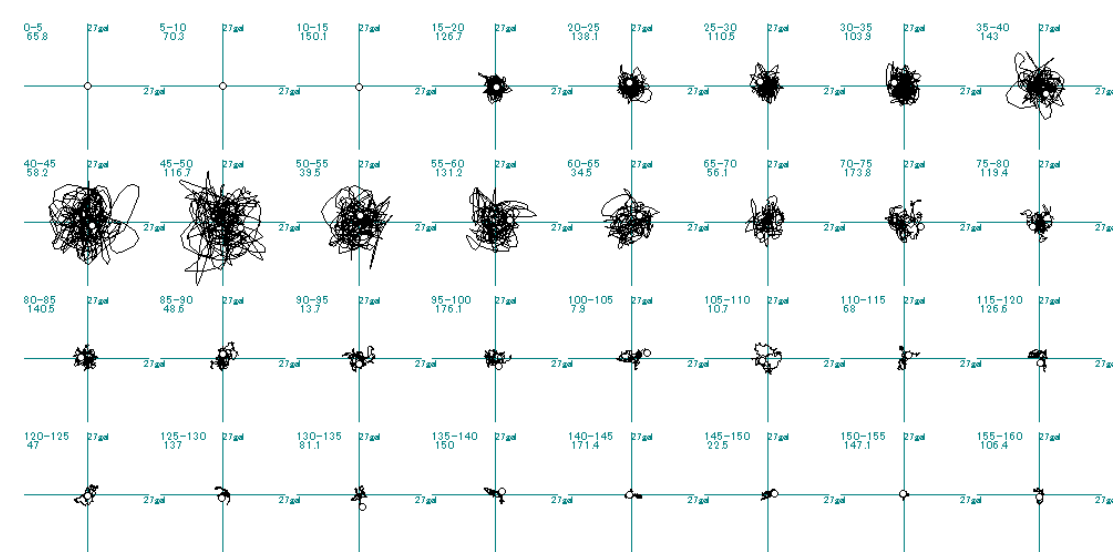
無被災箇所(27.8k+150) 7/10 加速度時刻波形



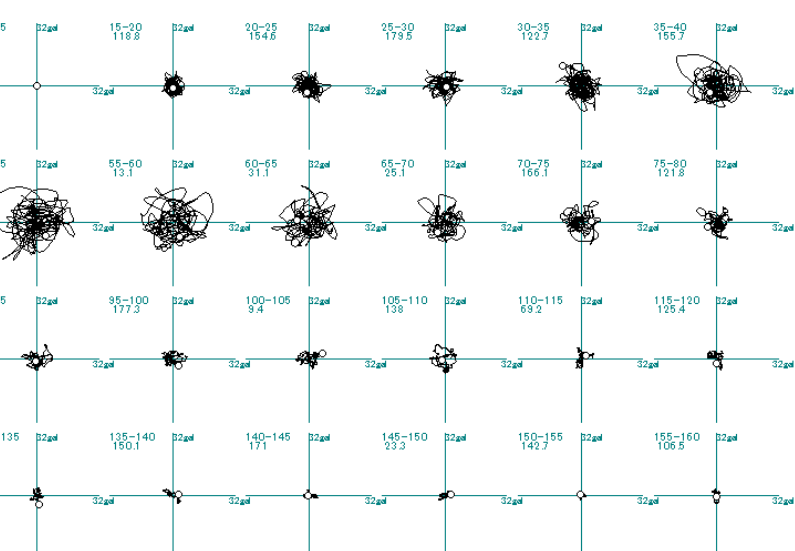
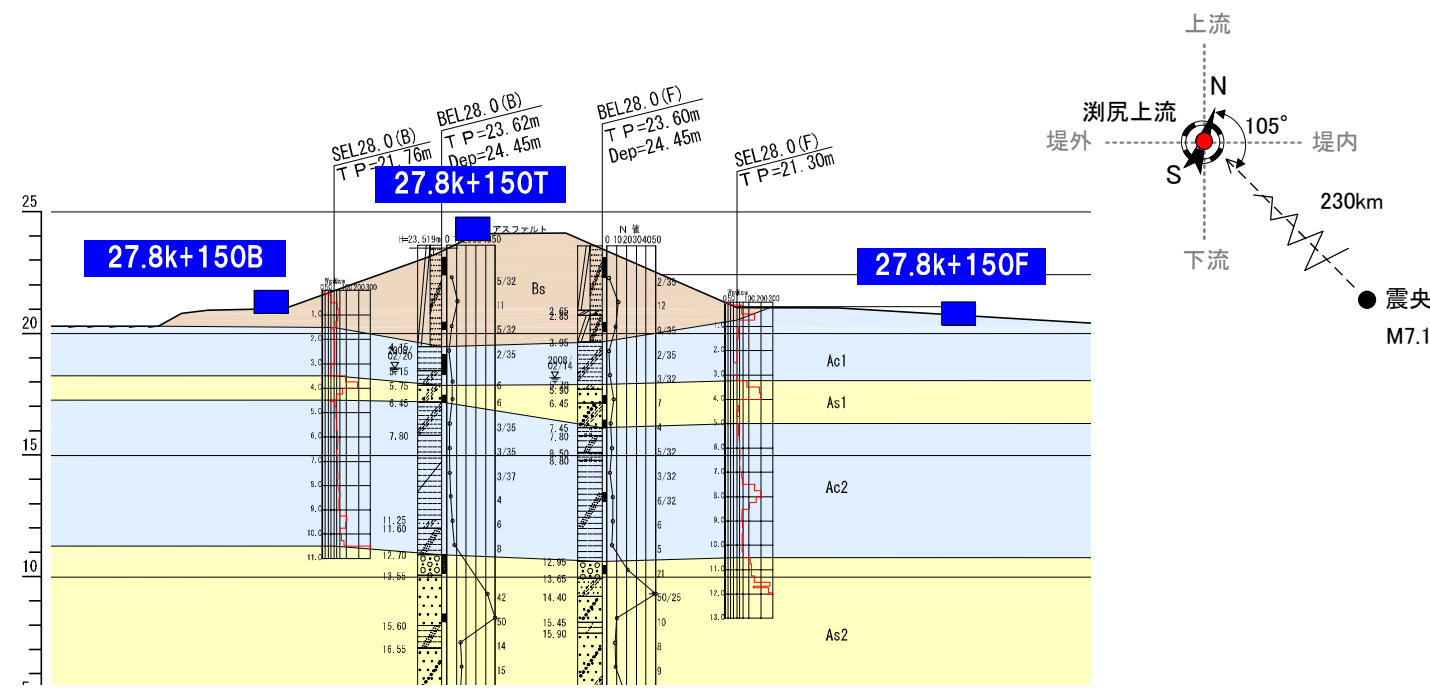
無被災箇所(27.8k+150) 加速度軌跡 (7/10)



27.8k+150B 加速度軌跡 (7/10)



27.8k+150F 加速度軌跡 (7/10)

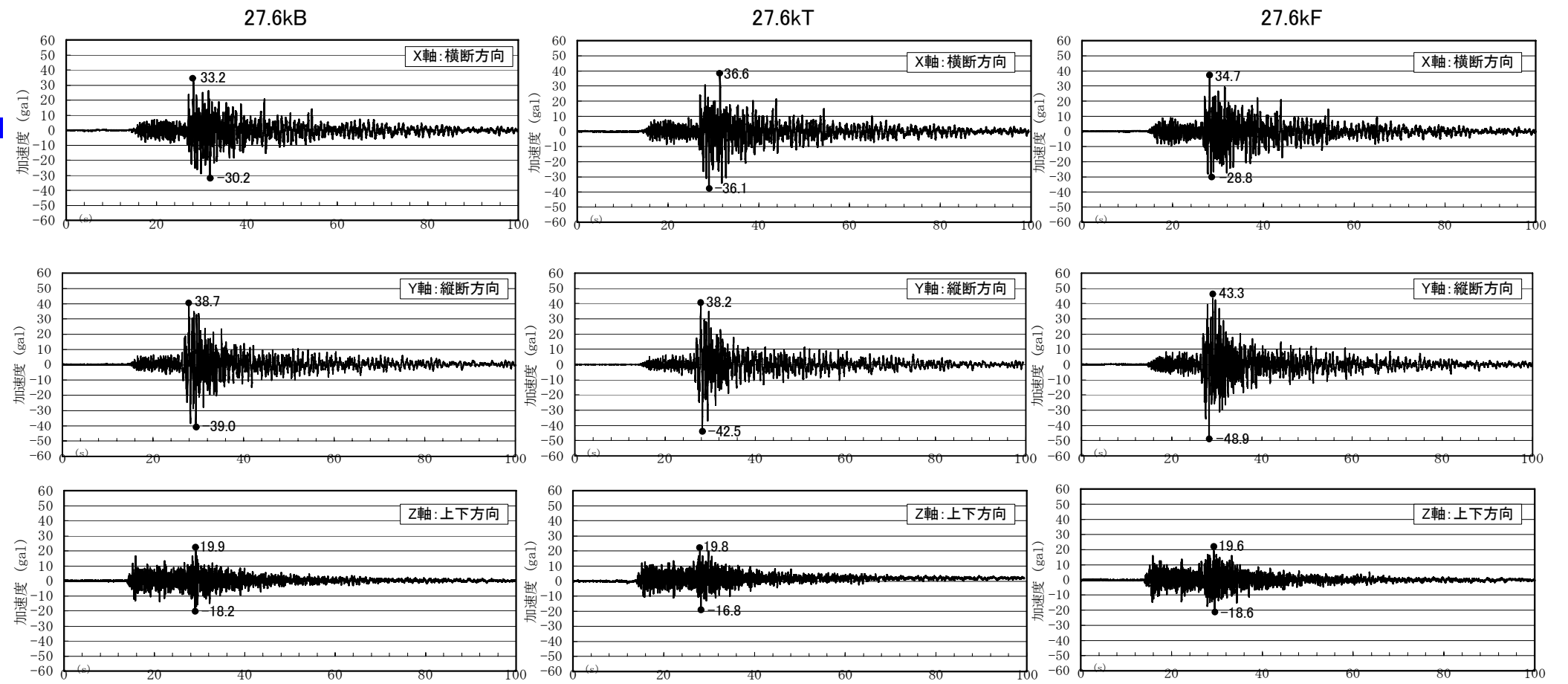
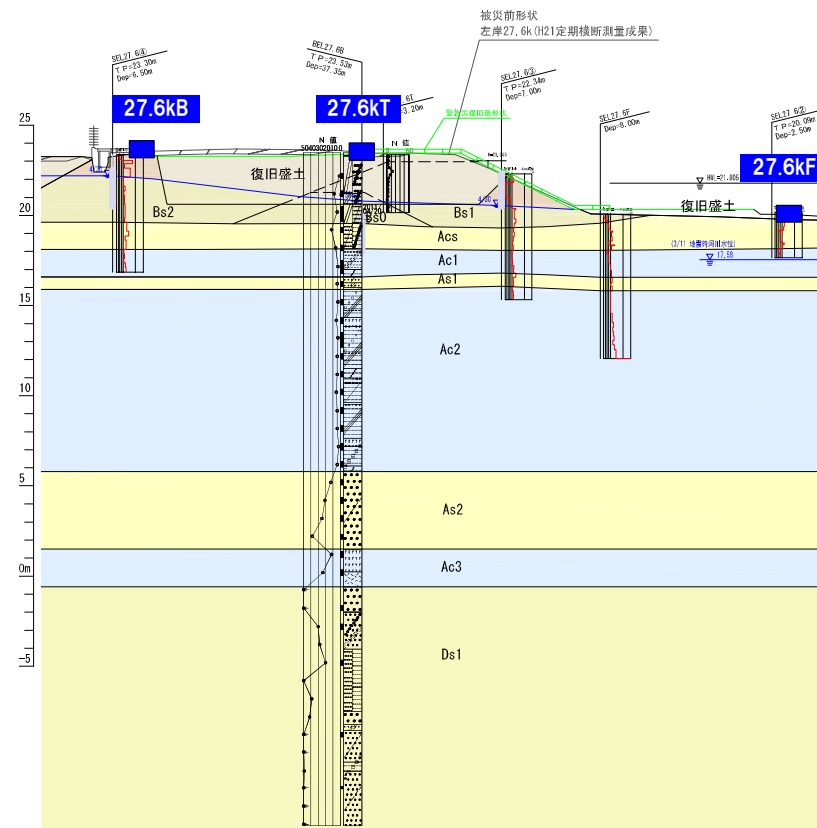


27.8k+150T 加速度軌跡 (7/10)

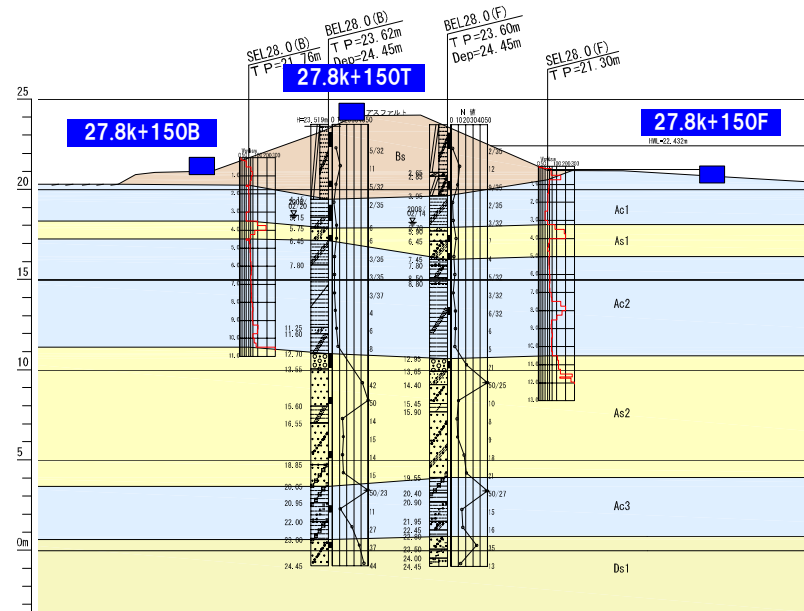
図 4.2.3 無被災箇所加速度重合せ図 (余震記録 A 7/10 9:57 M7.1)



被災箇所（左岸27.6k）



無被災箇所（27.8k+150）



断面図は左岸28.0k (H19年 北上川水系堤防点検調査・解析業務) より修正加筆。

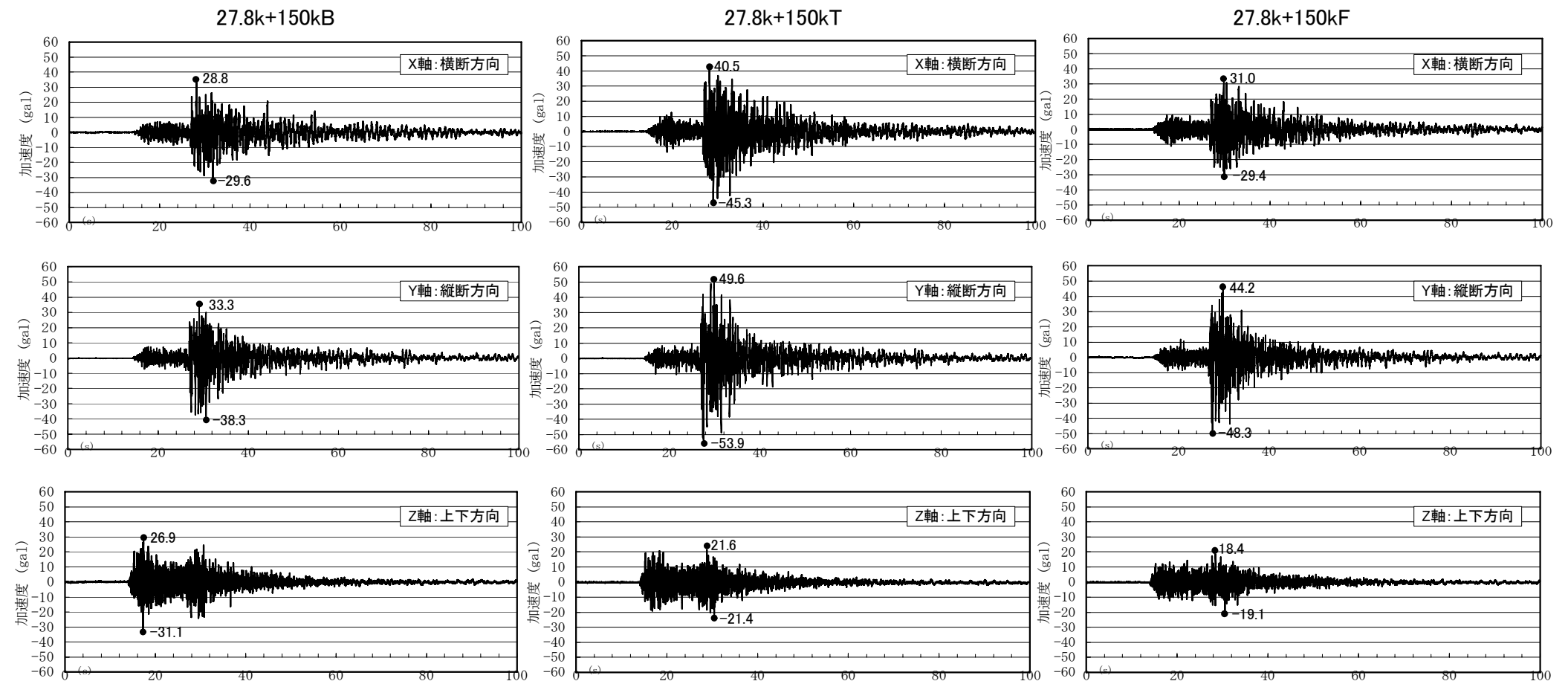
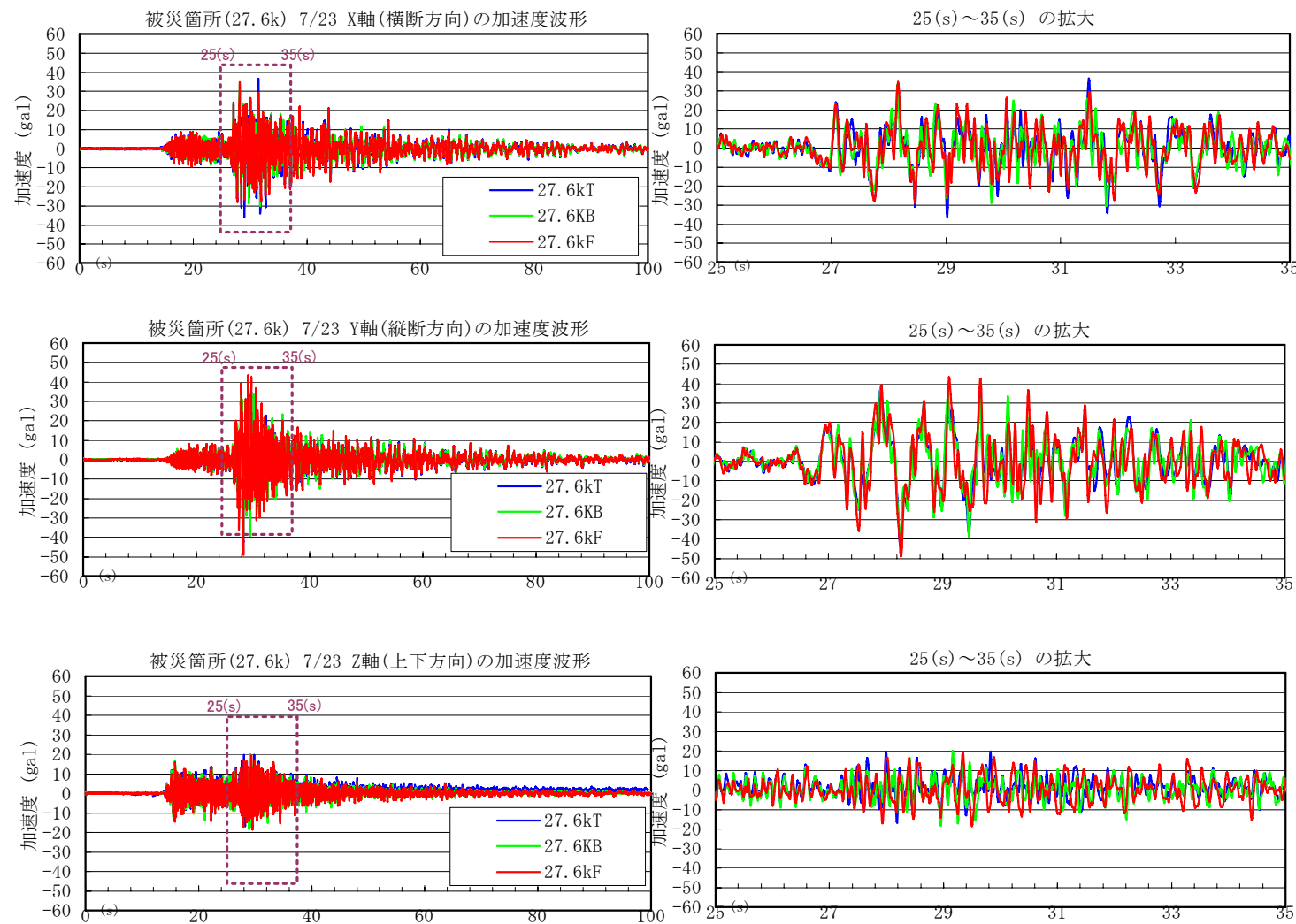


図 4.2.4 加速度時刻歴波形（余震記録 B 7/23 13:34 M6.5）

被災箇所(27.6k) 7/23 加速度時刻波形



被災箇所(27.6k) 加速度軌跡 (7/23)

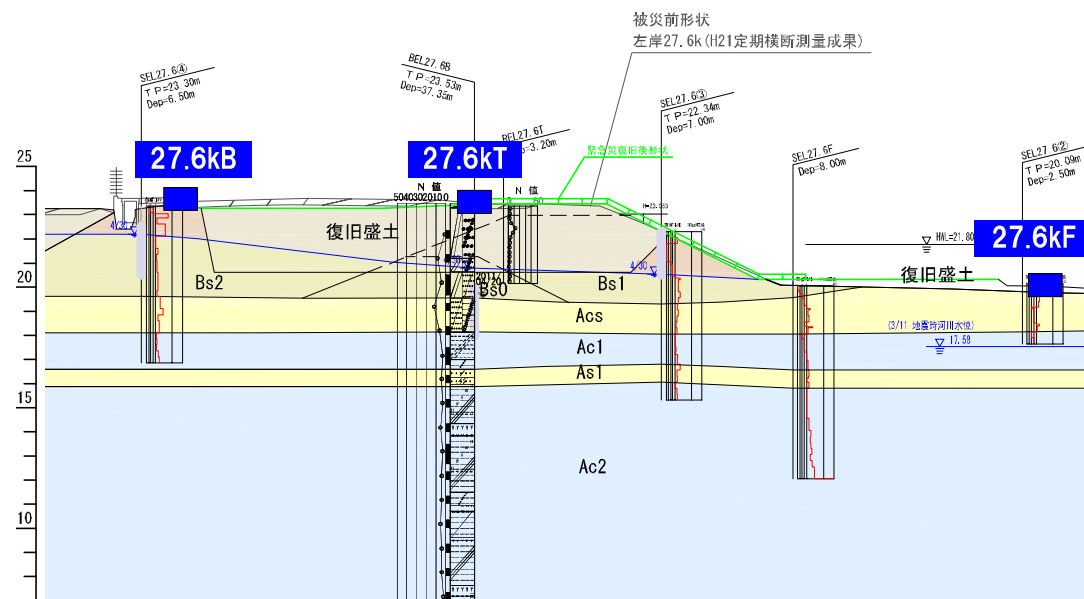
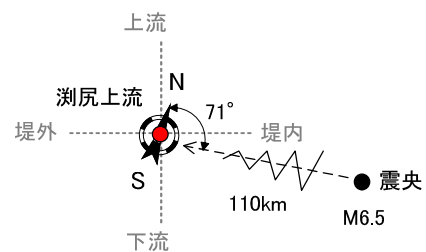
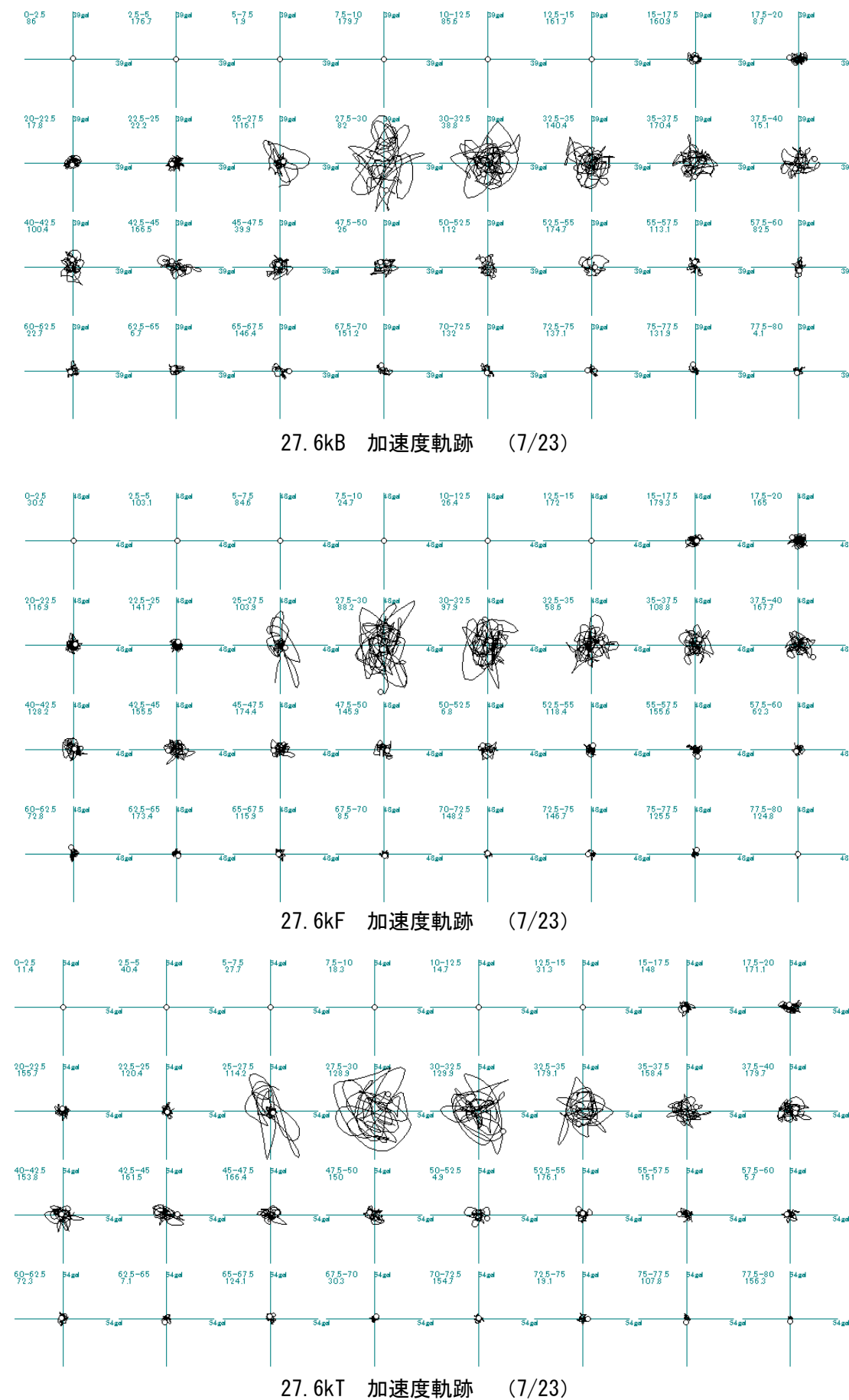
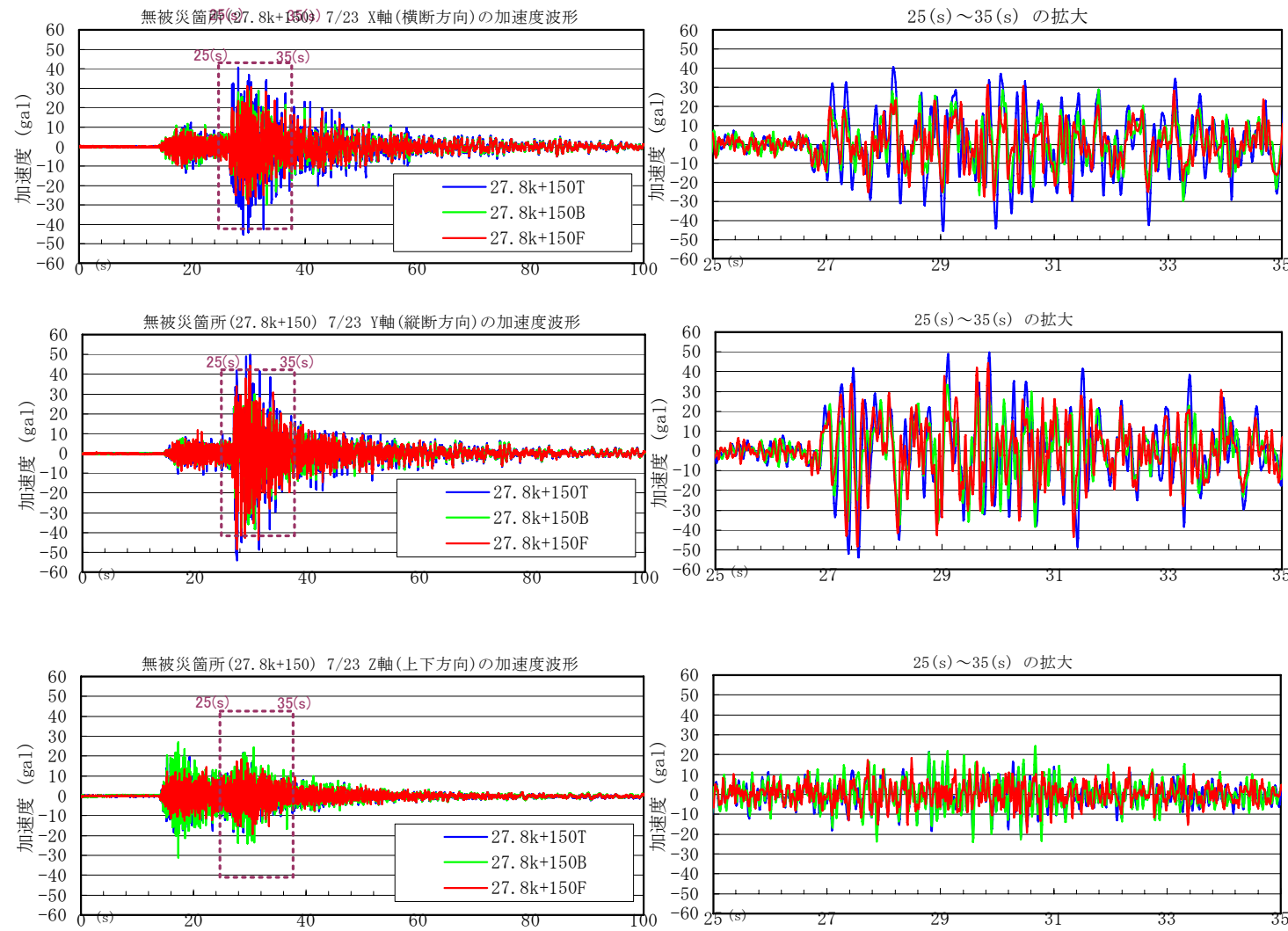
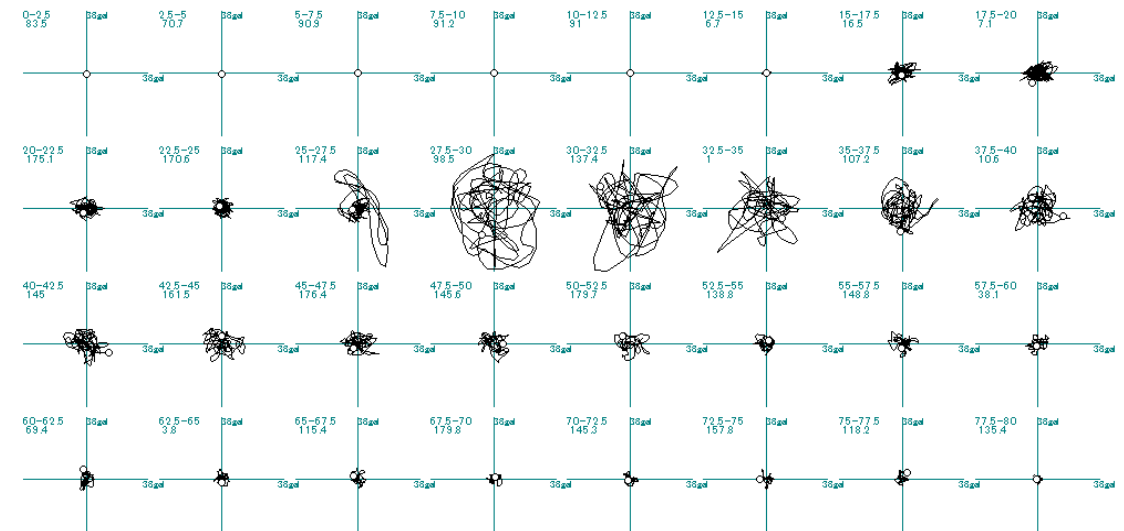


図 4.2.5 被災箇所加速度重合せ図 (余震記録 B 7/23 13:34 M6.5)

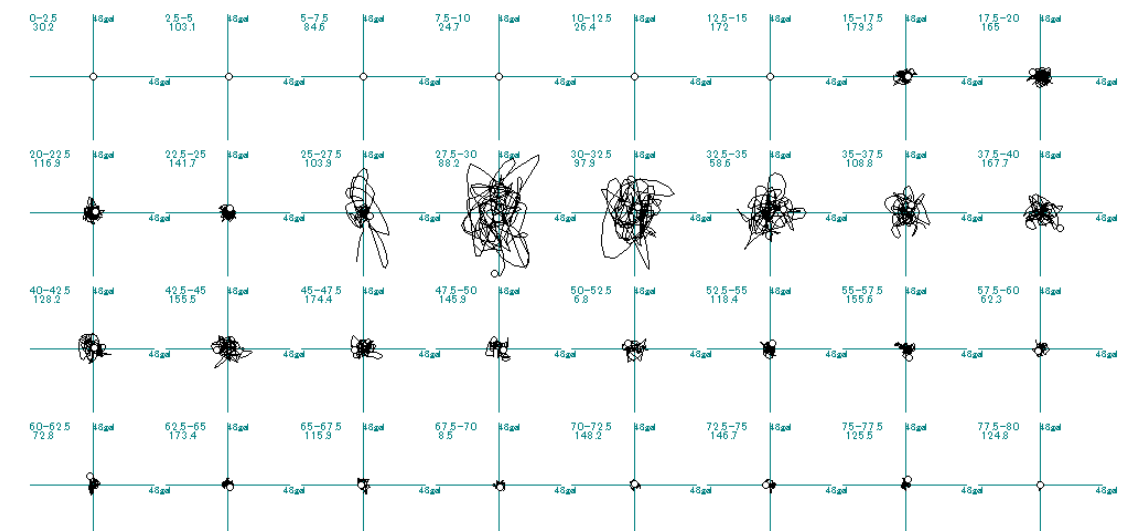
無被災箇所(27.8k+150) 7/23 加速度時刻波形



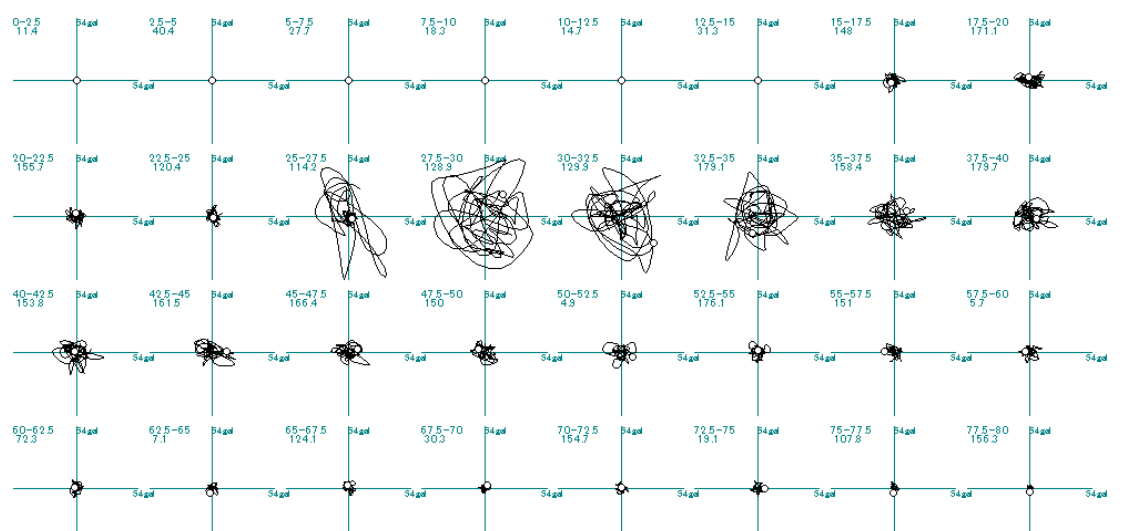
無被災箇所(27.8k+150) 加速度軌跡 (7/23)



27.8k+150B 加速度軌跡 (7/23)



27.8k+150F 加速度軌跡 (7/23)



27.8k+150T 加速度軌跡 (7/23)

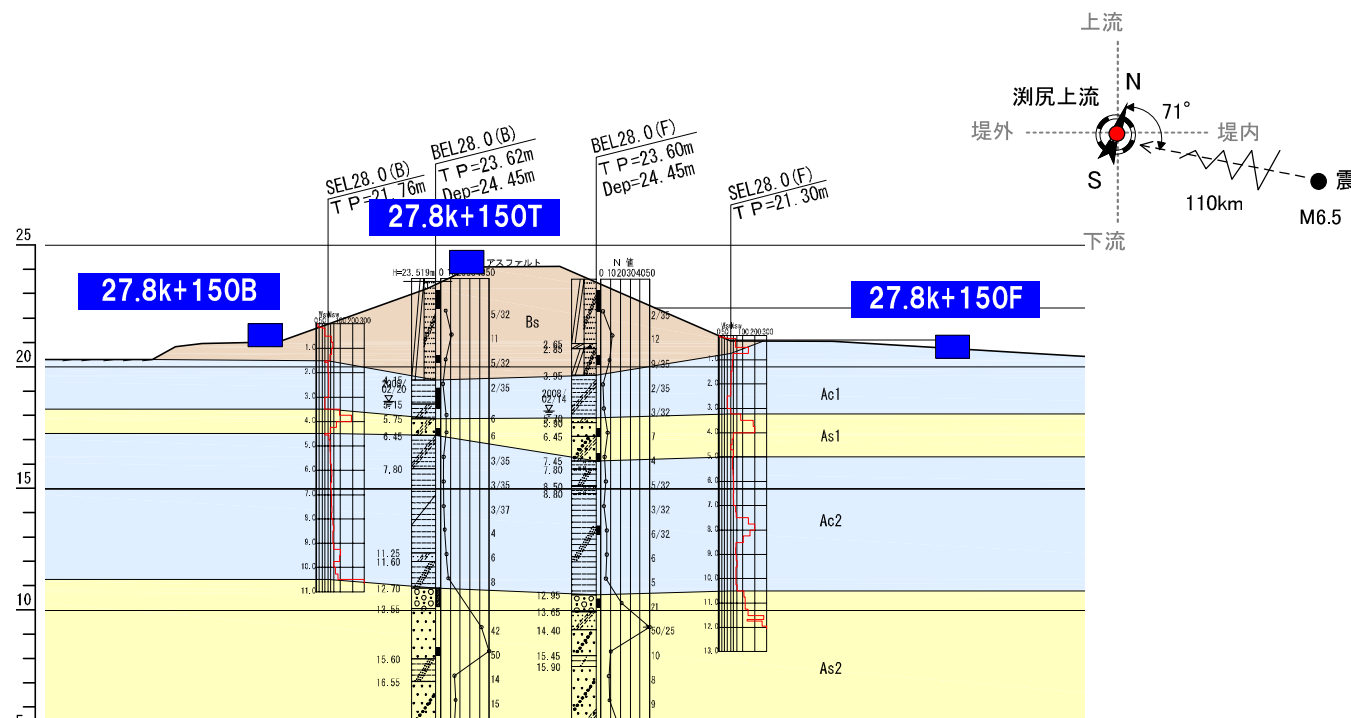
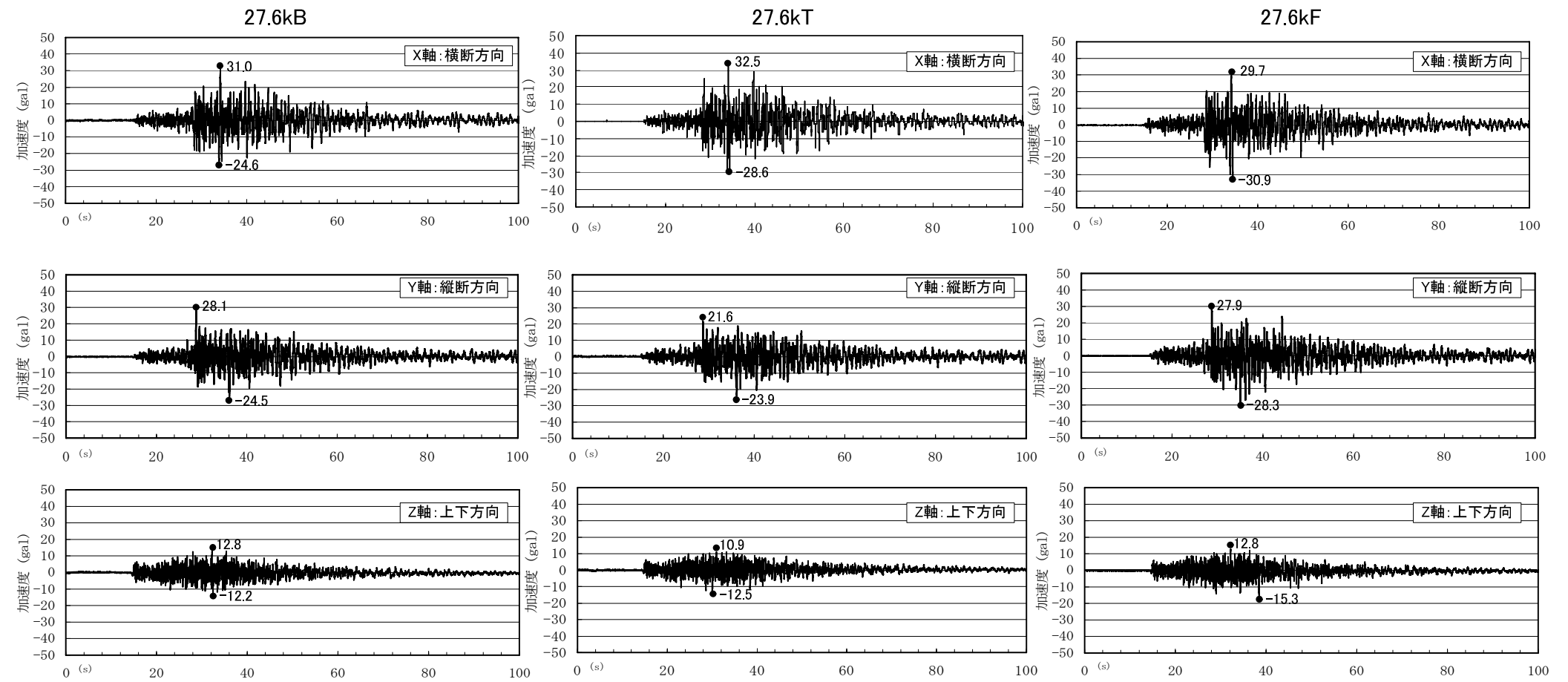
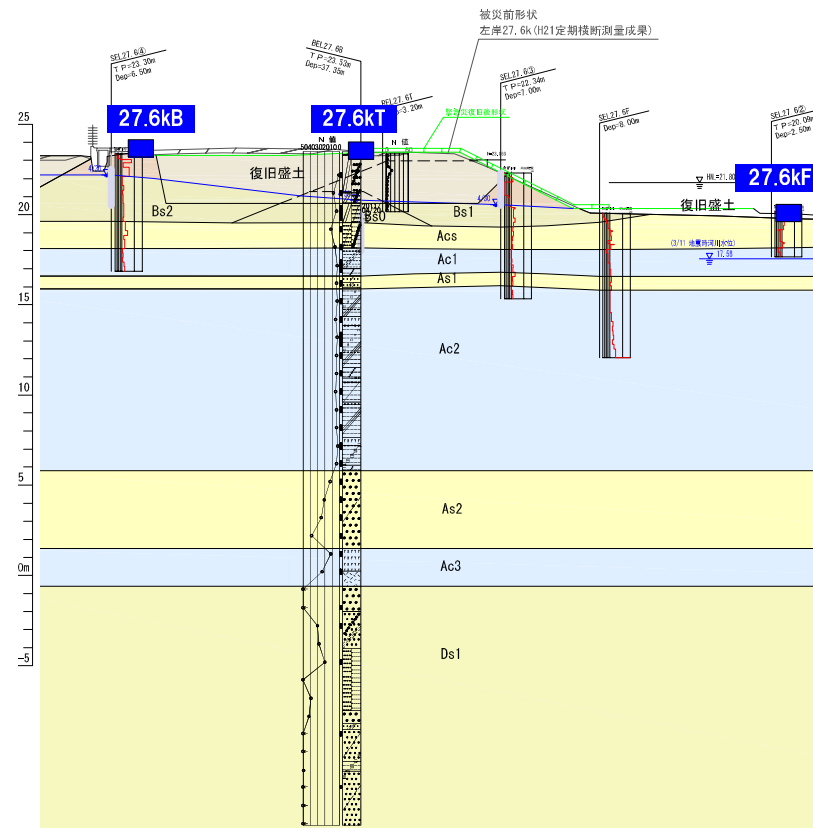
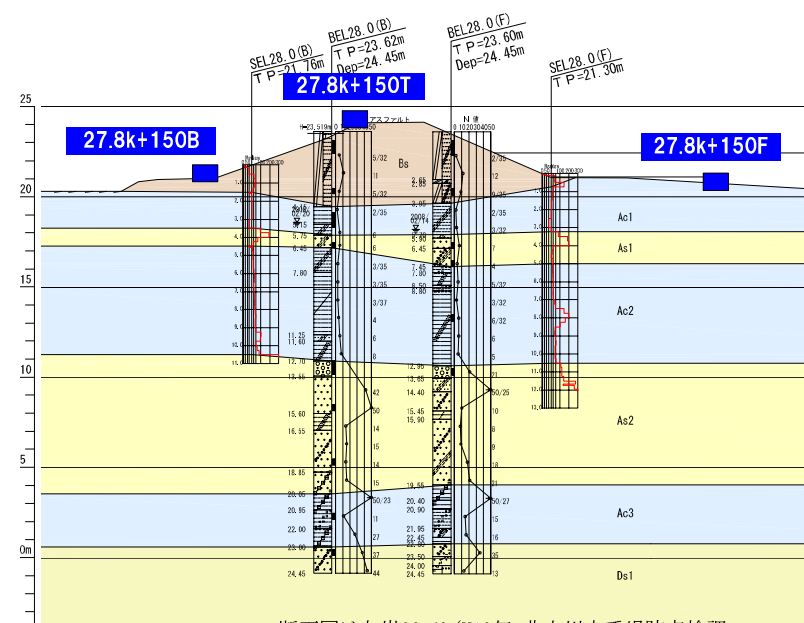


図 4.2.6 無被災箇所加速度重合せ図 (余震記録 B 7/23 13:34 M6.5)

被災箇所（左岸27.6k）



無被災箇所（27.8k+150）



断面図は左岸28.0k (H19年 北上川水系堤防点検調査・解析業務) より修正加筆。

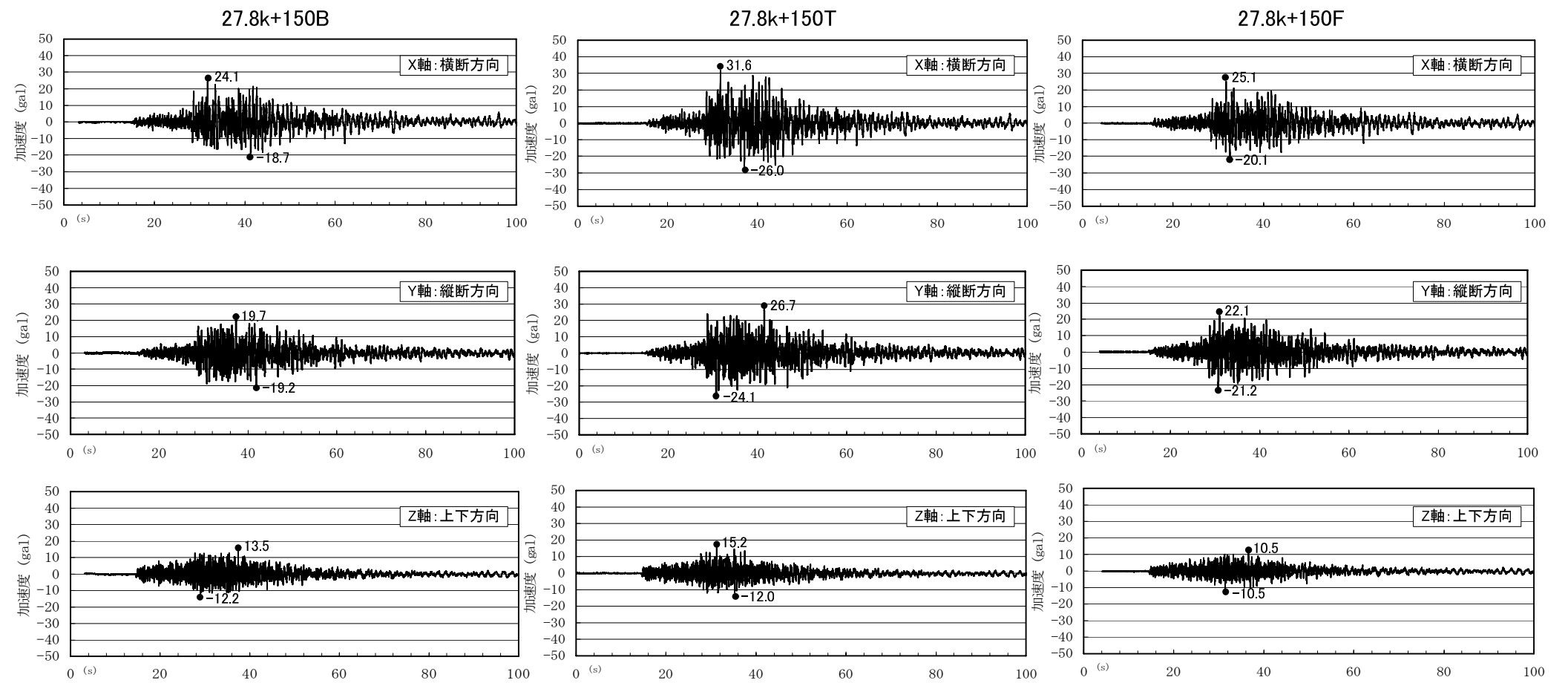
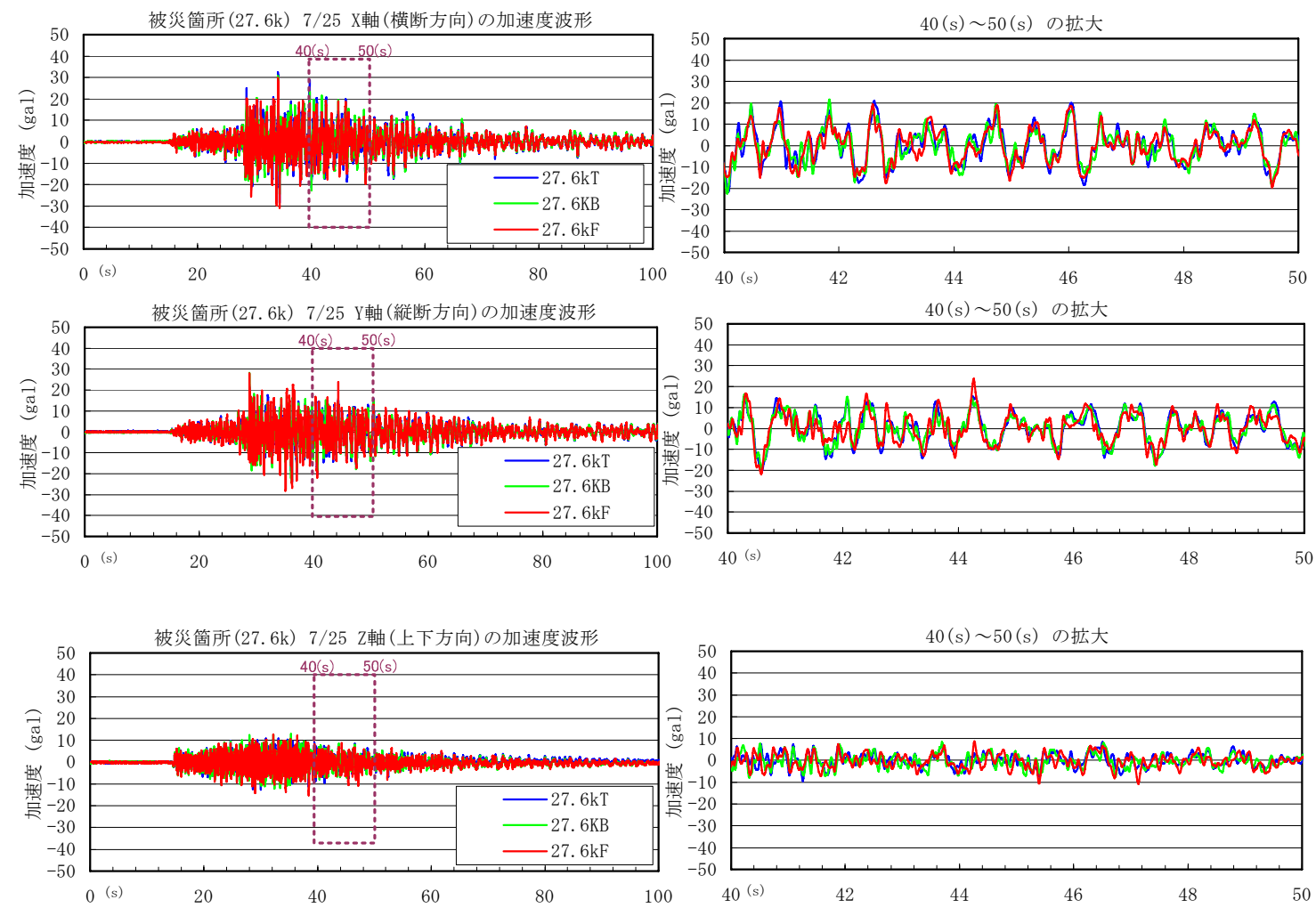
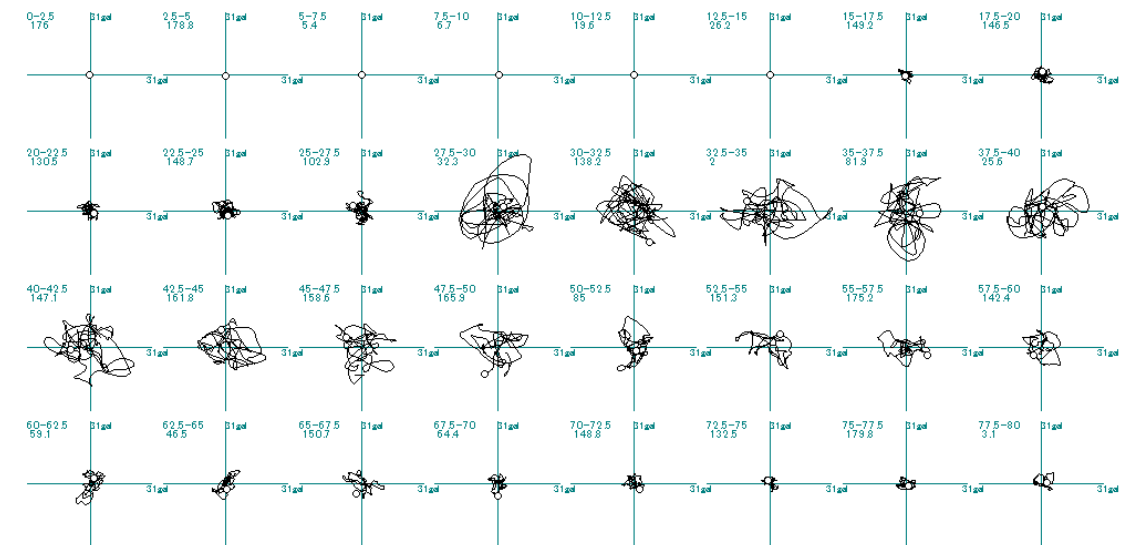


図 4.2.7 加速度時刻歴波形（余震記録 C 7/25 3:51 M6.2）

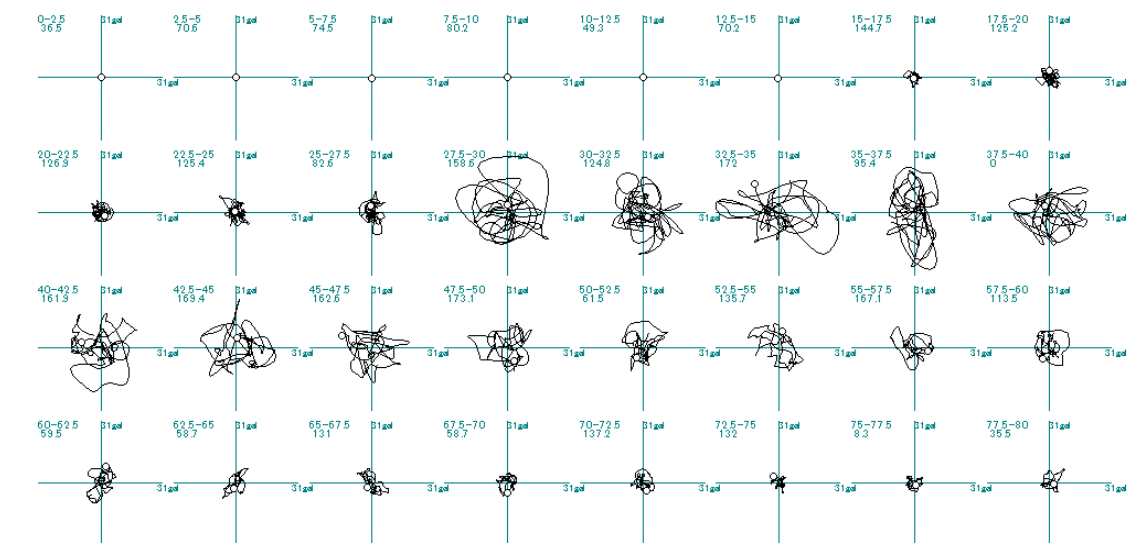
被災箇所(27.6k) 7/25加速度時刻波形



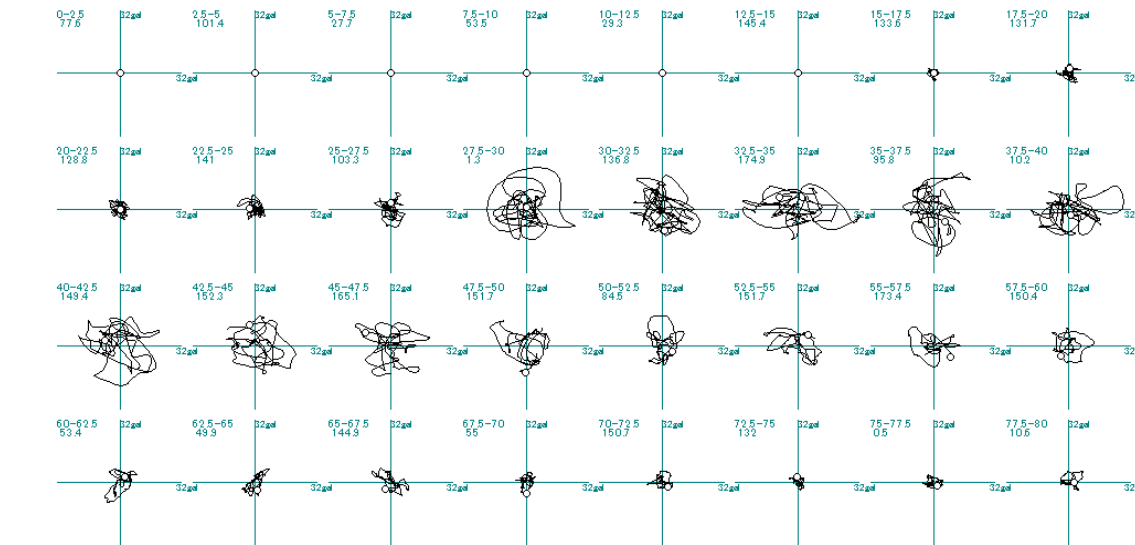
被災箇所(27.6k) 加速度軌跡 (7/25)



27.6kB 加速度軌跡 (7/25)



27.6kF 加速度軌跡 (7/25)



27.6kT 加速度軌跡 (7/25)

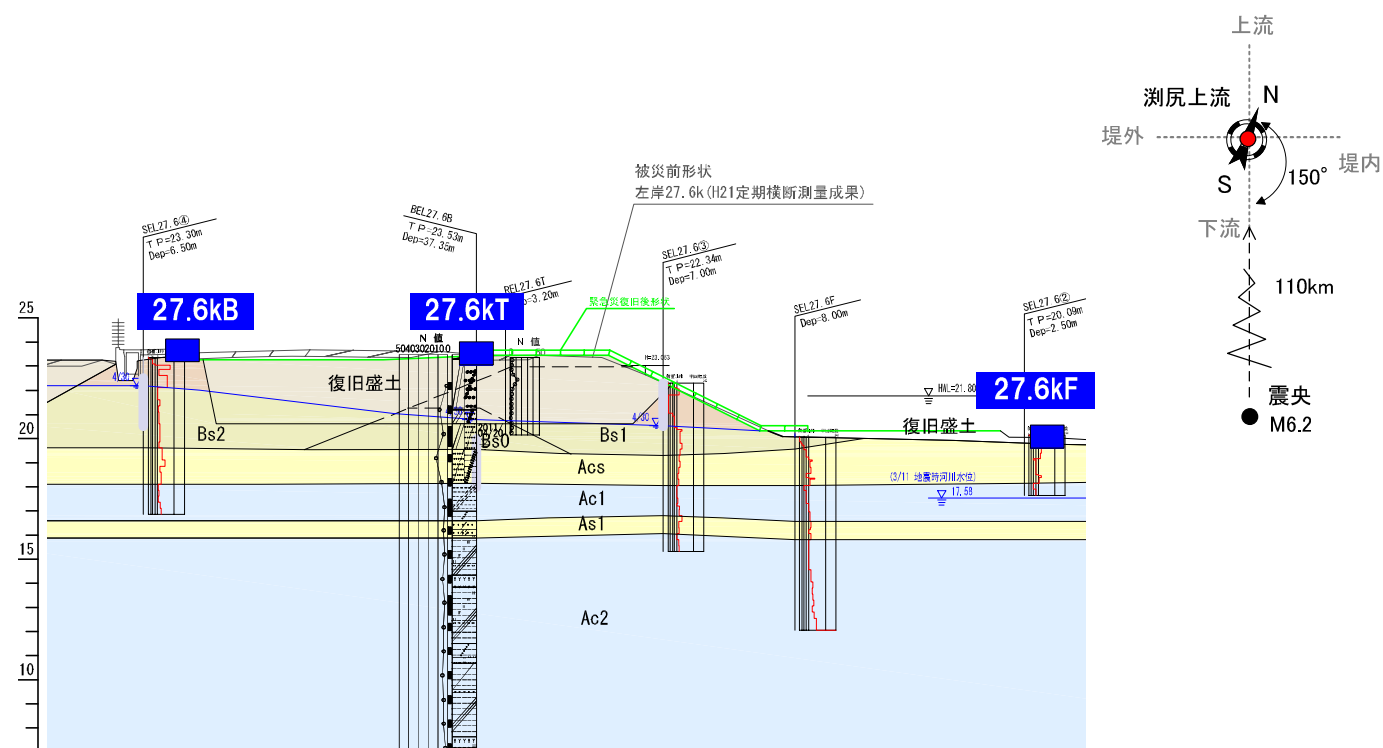
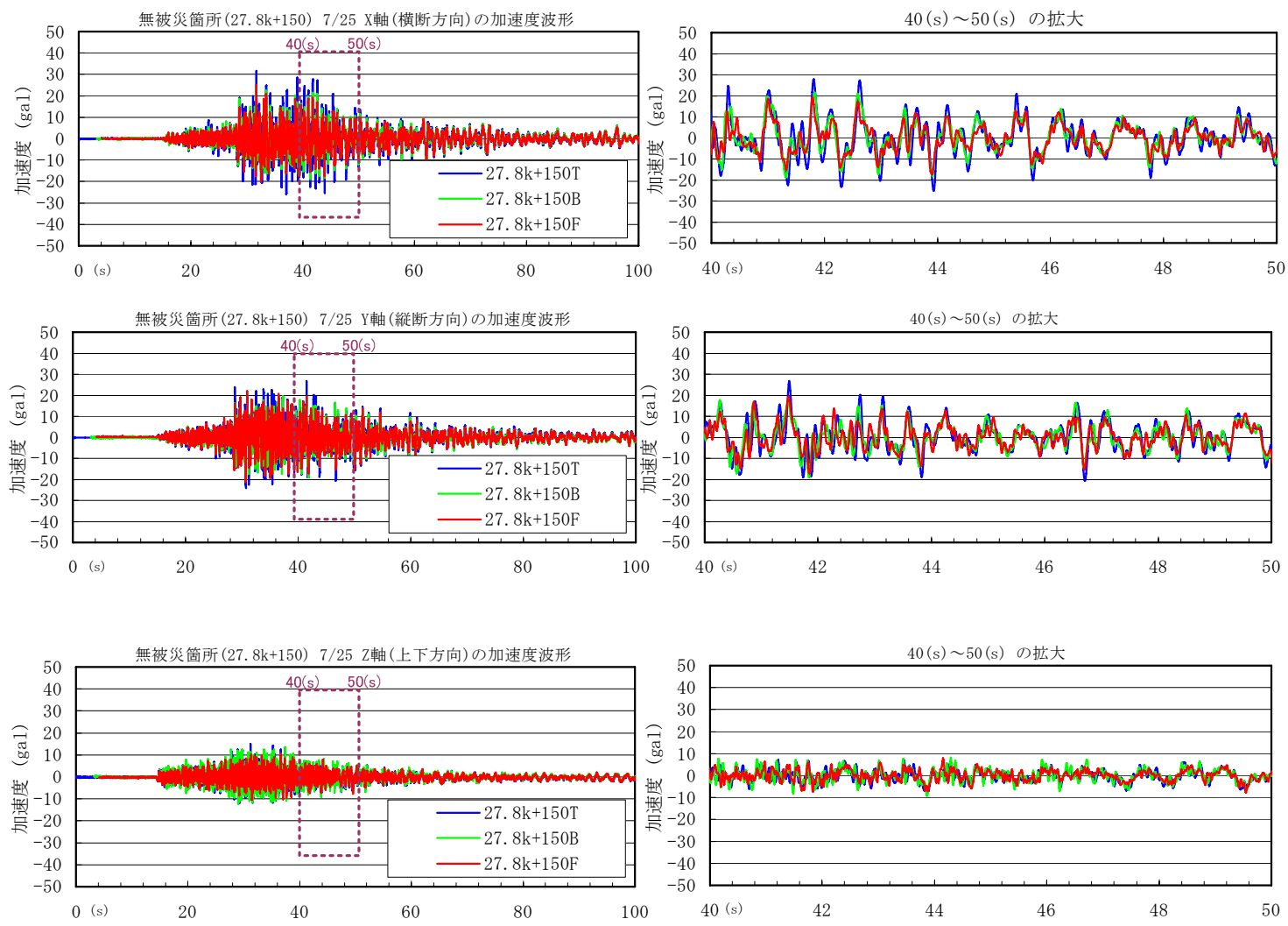


図 4.2.8 被災箇所加速度重合せ図 (余震記録 C 7/25 3:51 M6.2)

無被災箇所(27.8k+150) 7/25 加速度時刻波形



無被災箇所(27.8k+150) 加速度軌跡 (7/25)

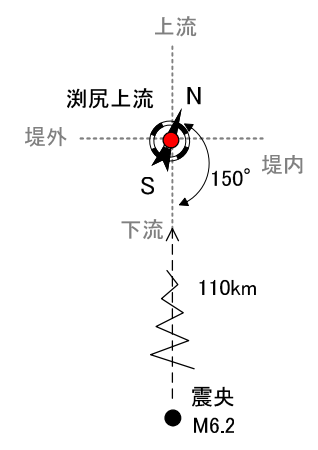
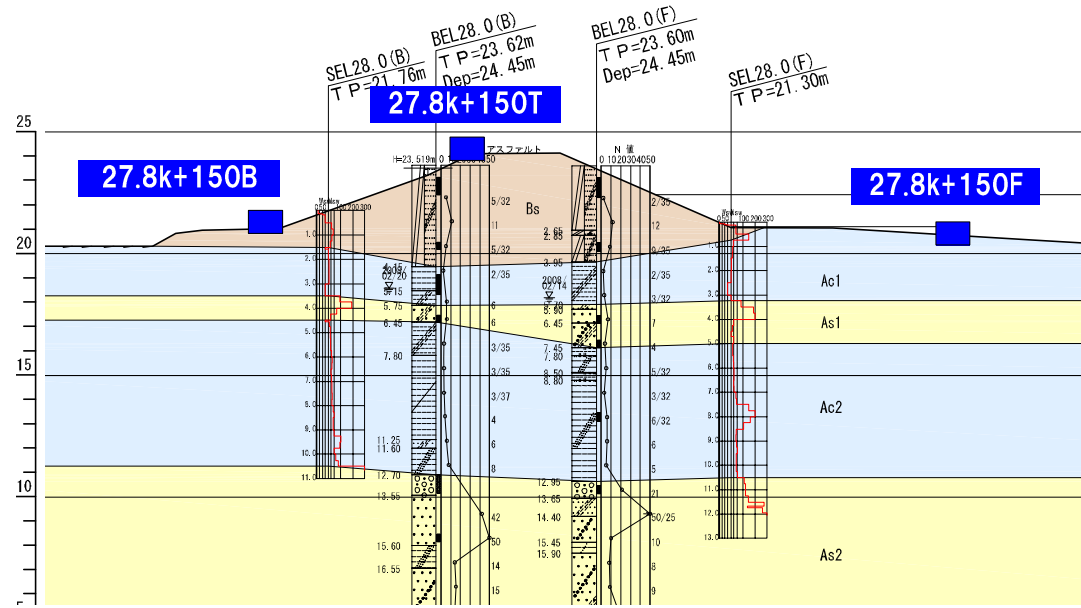
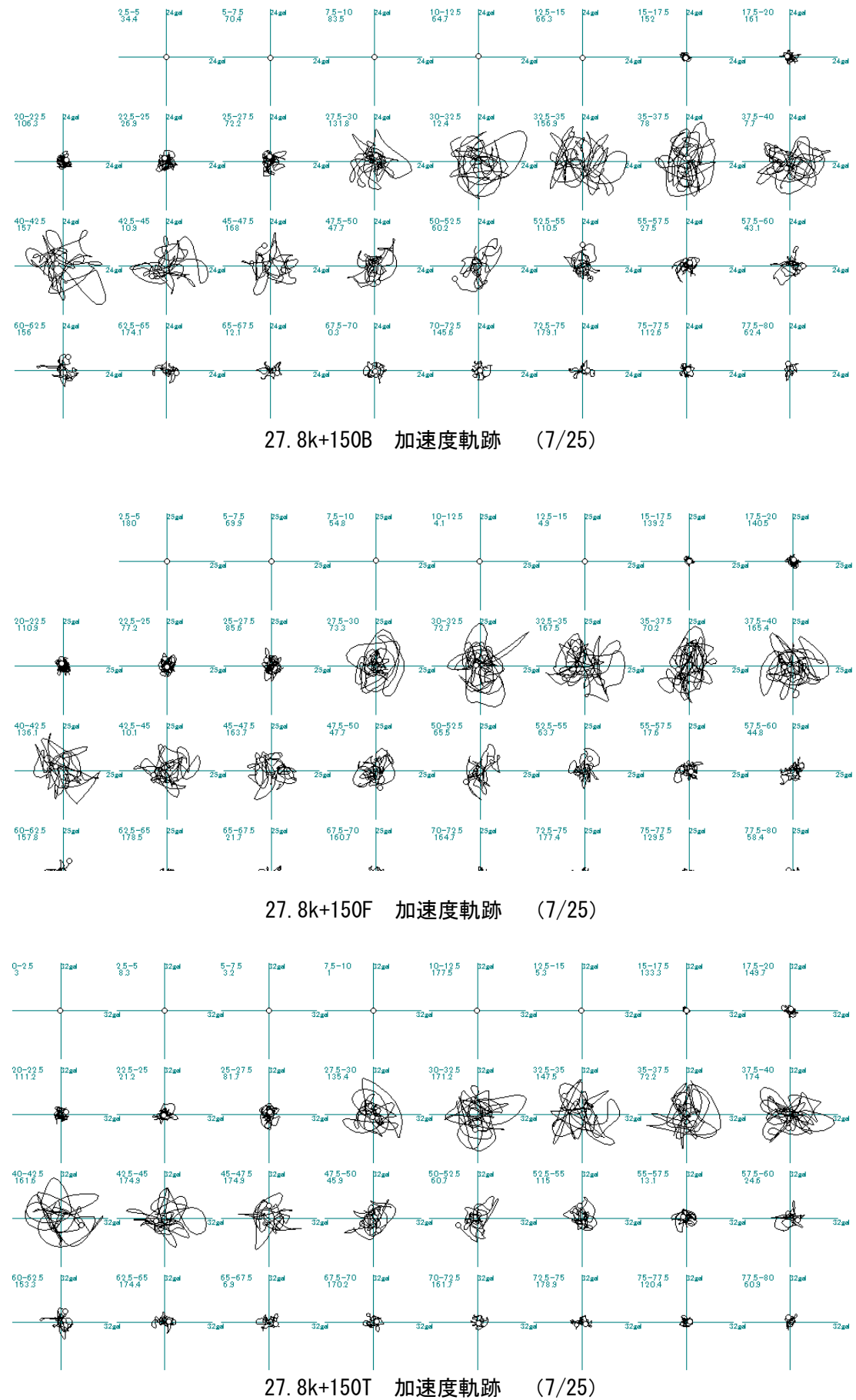


図 4.2.9 無被災箇所加速度重合せ図 (余震記録 C 7/25 3:51 M6.2)

### 4.3 変位時刻歴波形および変位軌跡

4.1 節のとおり時刻および方位を補正した加速度データを用いて、積分を2回行うことにより変位波形を作成した。長周期のノイズをカットするために周期5秒以上の成分を除去するローカットフィルターを施した。(高周波数成分は除去していない。)

#### 4.3.1 余震記録A (2011年7月10日(日) 9時57分 M7.1)

図4.3.1および図4.3.2には地点毎の変位重合せ図および変位の軌跡を示す。特徴は以下のとおりである。

##### <被災断面 (27.6k) >

- ・変位の時刻歴波形は3地点ともに同様の波形を示す。
- ・変位軌跡の特徴は、時刻により変位が卓越する方向が異なっているが、ピーク値の90~110(s)の間では、縦断方向および縦断方向から時計回りに45°程度の傾きをもって振動している。

##### <無被災断面 (27.8k+150) >

- ・変位の時刻歴波形は3地点ともに同様の波形を示す。
- ・変位軌跡の特徴は、時刻により変位が卓越する方向が異なっているが、ピーク値の90~110(s)の間では、縦断方向の揺れが卓越している。

#### 4.3.2 余震記録B (2011年7月23日(土) 13時34分 M6.5)

図4.3.3および図4.3.4には地点毎の変位重合せ図および変位の軌跡を示す。特徴は以下のとおりである。

##### <被災断面 (27.6k) >

- ・変位の時刻歴波形は3地点ともに同様の波形を示す。
- ・変位軌跡の特徴は、時刻により変位が卓越する方向が異なっているが、ピーク値の25~30(s)の間では、縦断方向の揺れが卓越している。

##### <無被災断面 (27.8k+150) >

- ・変位の時刻歴波形は3地点ともに同様の波形を示す。
- ・変位軌跡の特徴は、時刻により変位が卓越する方向が異なっているが、ピーク値の90~110(s)の間では、縦断方向の揺れが卓越している。

#### 4.3.3 余震記録C (2011年7月25(月) 3時51分 M6.2)

図4.3.5および図4.3.6には地点毎の変位重合せ図および変位の軌跡を示す。特徴は以下のとおりである。

##### <被災断面 (27.6k) >

- ・変位の時刻歴波形は3地点ともに同様の波形を示す。
- ・変位軌跡の特徴は、時刻により変位が卓越する方向が異なっているが、ピーク値の40~50(s)の間では、縦断方向から時計回りに20°~40°程度の傾きをもって振動している。

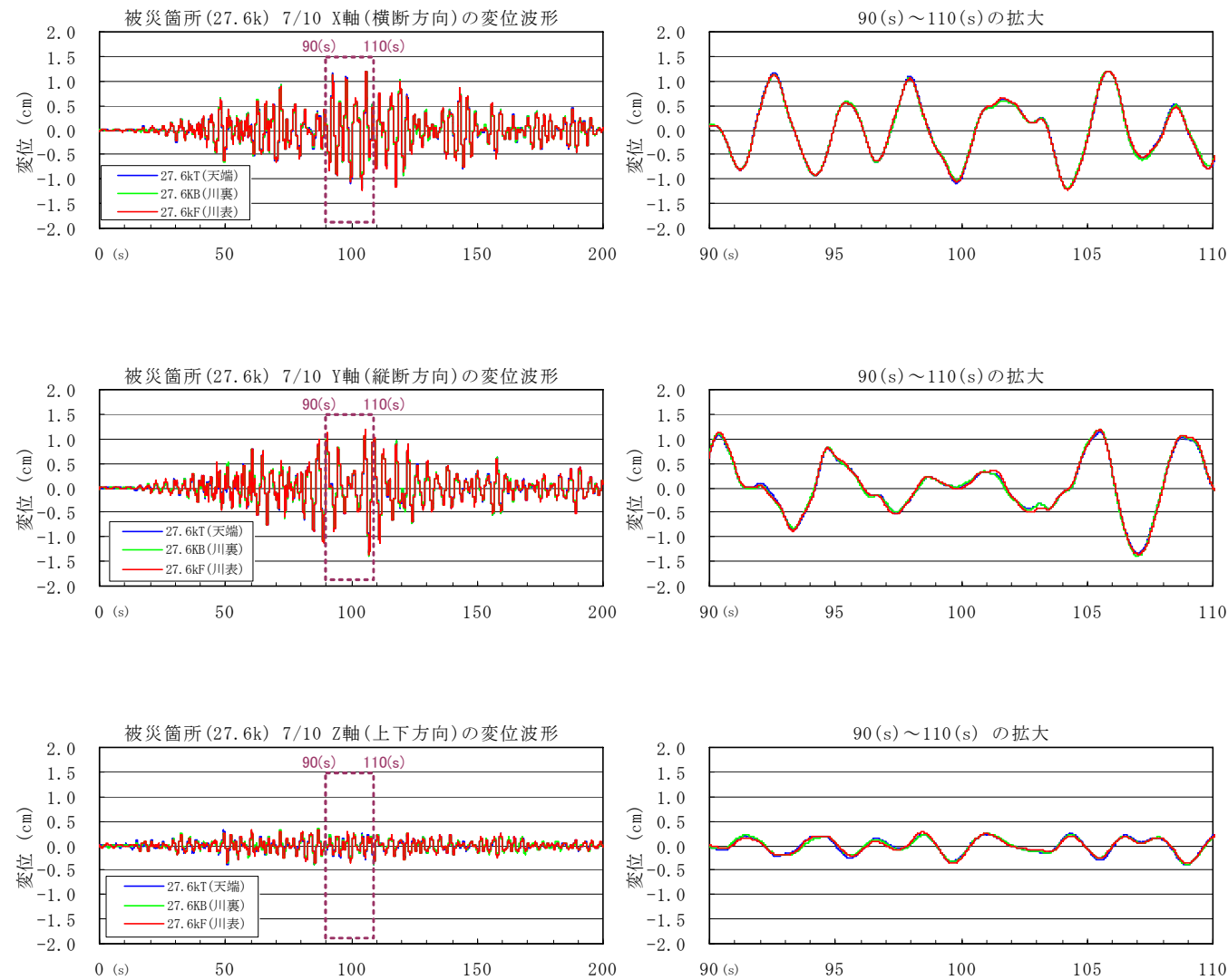
##### <無被災断面 (27.8k+150) >

- ・変位の時刻歴波形は3地点ともに同様の波形を示す。
- ・変位軌跡の特徴は、時刻により変位が卓越する方向が異なっているが、ピーク値の40~50(s)の間では、縦断方向から時計回りに40°~50°程度の傾きをもって振動している。

### 変位のまとめ

- 被災箇所においては、3地点(川表、川裏、天端)の変位時刻歴波形、変位軌跡を比較した結果、いずれもほぼ同様の結果と判断される。
- 無被災区間においては、3地点(川表、川裏、天端)の変位時刻歴波形、変位軌跡を比較した結果、いずれもほぼ同様の結果と判断される。
- 被災箇所および無被災箇所ともに変位軌跡は時間により卓越する方向が異なっている。優位な方向性は見られない。
- 被災箇所と無被災箇所を比較した結果、優位な差は見られない。

被災箇所(27.6k) 7/10 変位時刻波形



被災箇所(27.6k) 変位軌跡 (7/10)

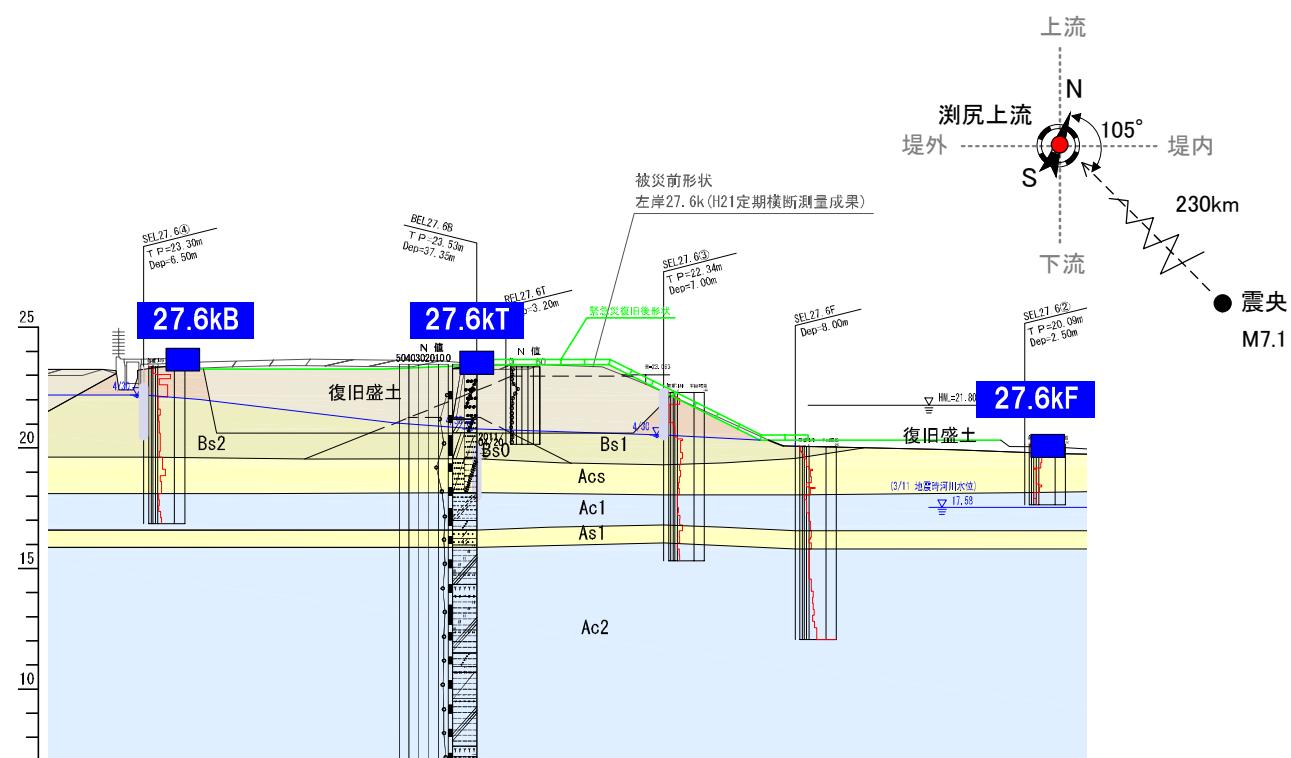
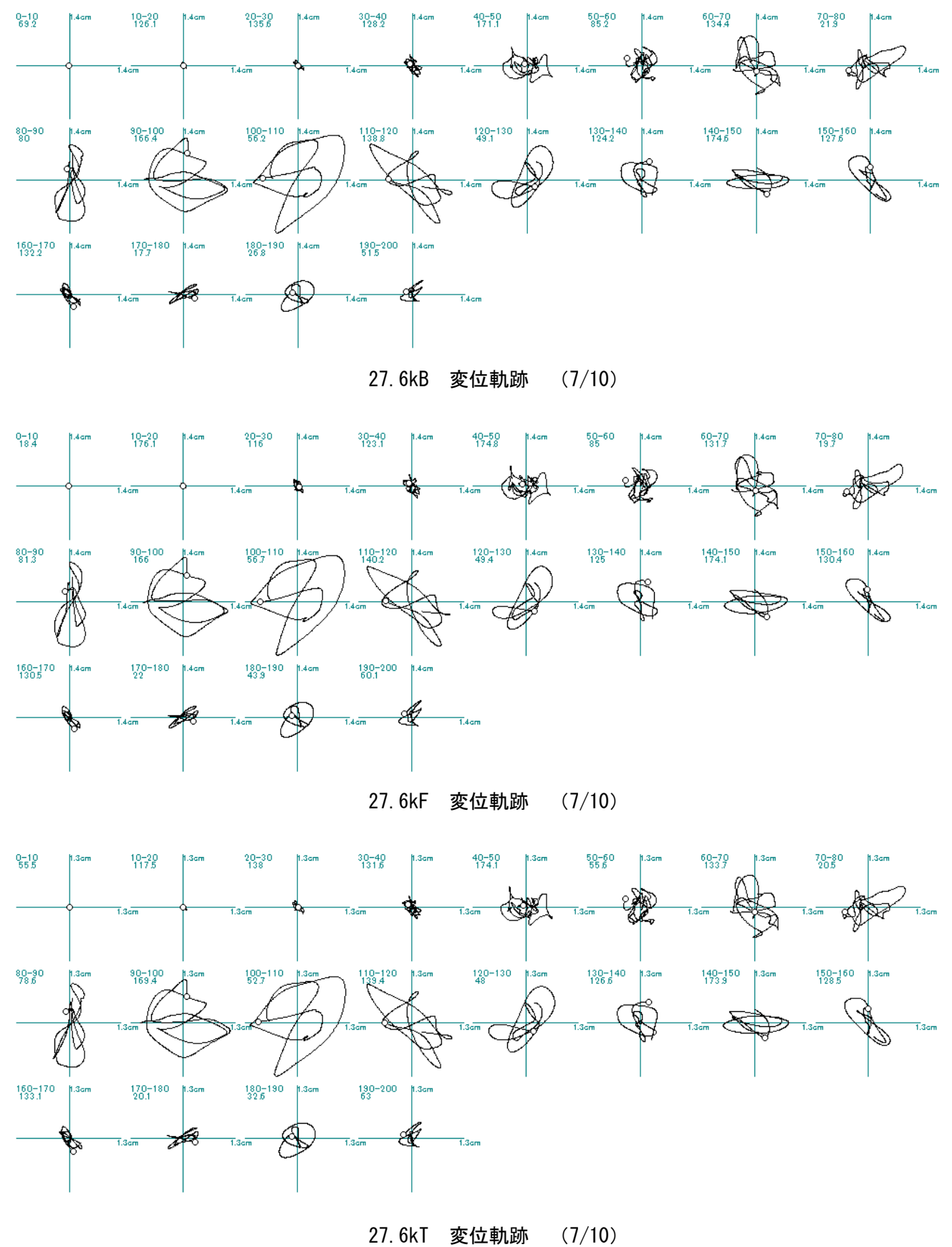
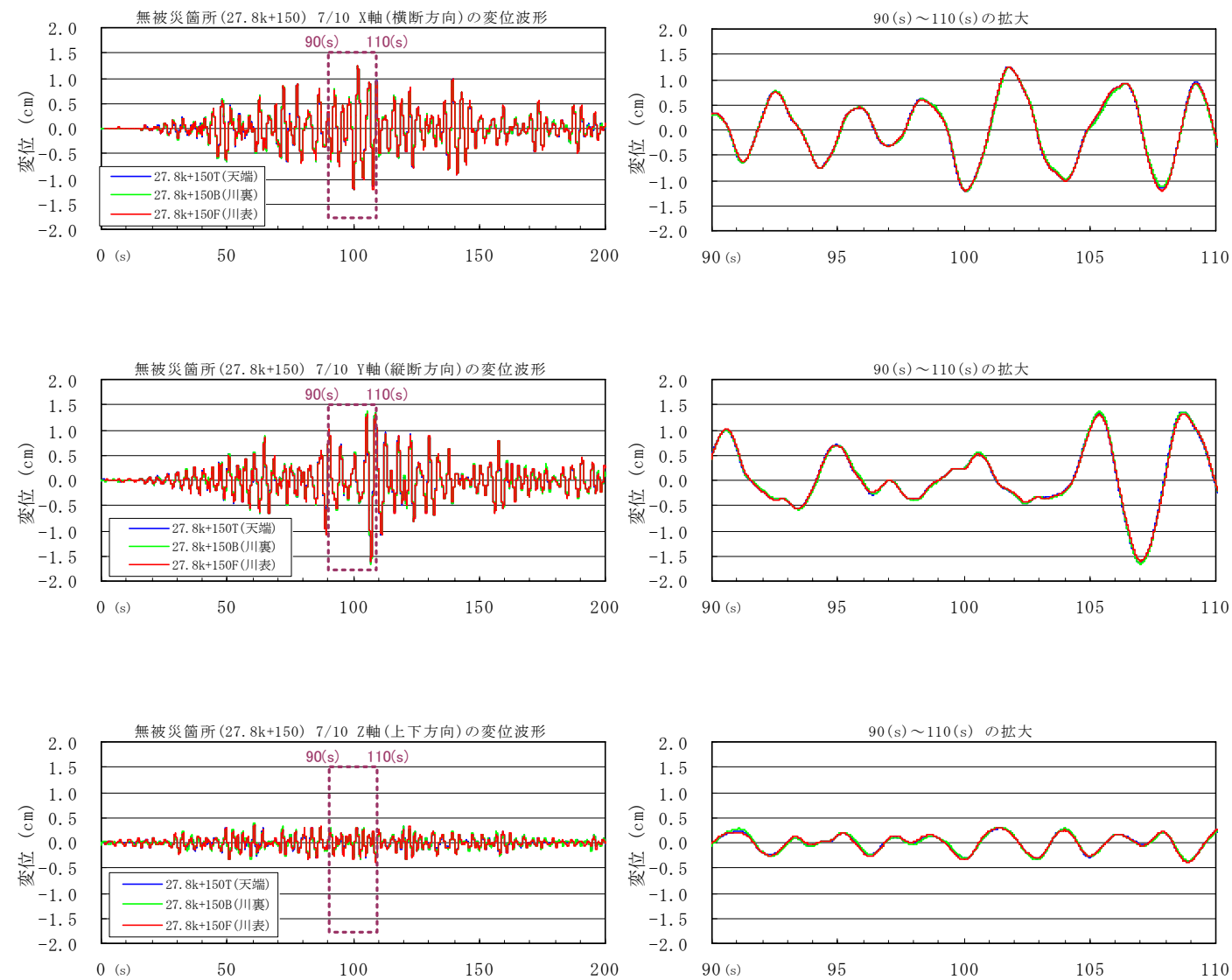


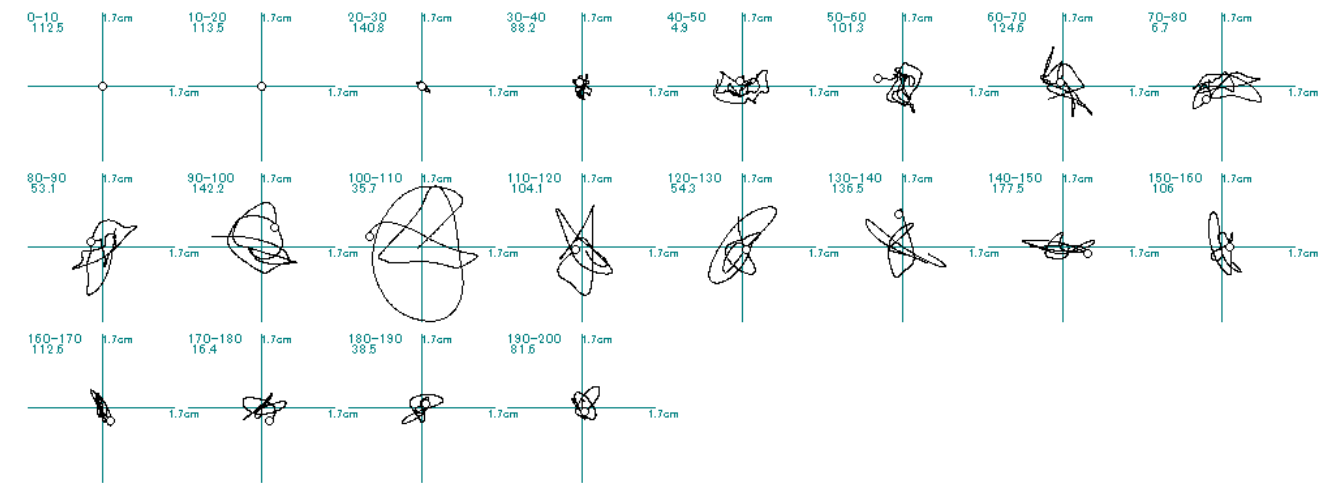
図 4.3.1 被災箇所時刻変位波形重合せ図・変位軌跡 (余震記録 A 7/10 9:57 M7.1)



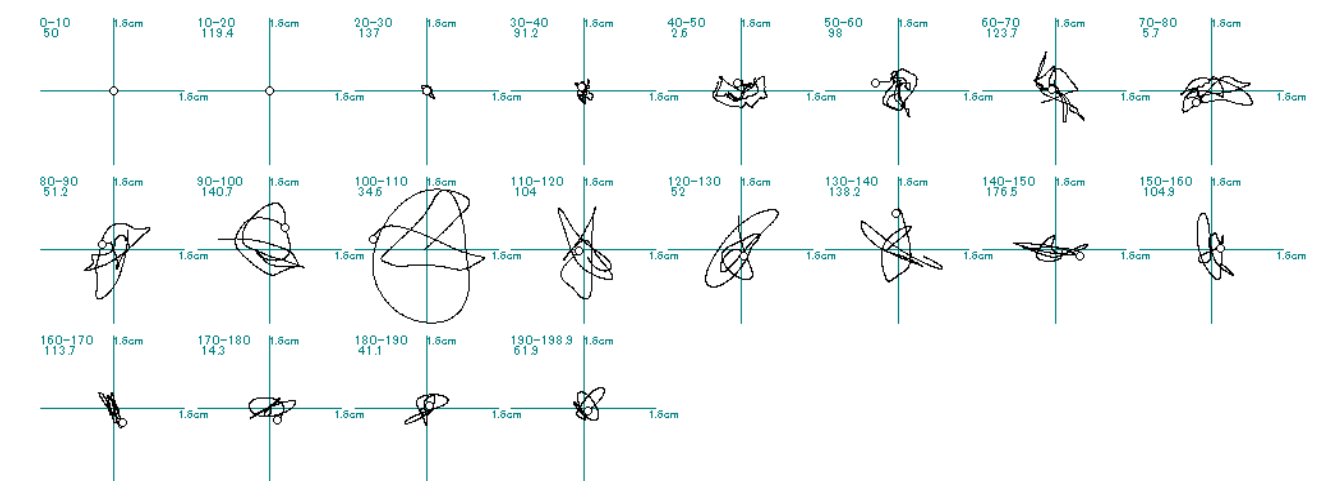
無被災箇所(27.8k+150) 7/10 変位時刻波形



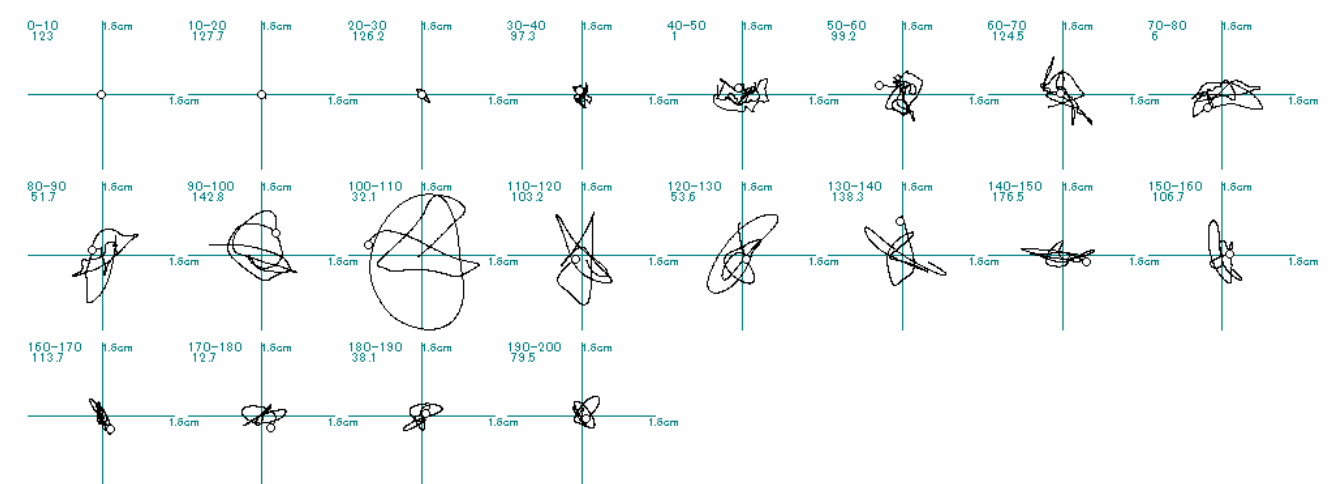
無被災箇所(27.8k+150) 変位軌跡 (7/10)



27.8k+150B 変位軌跡 (7/10)



27.8k+150F 変位軌跡 (7/10)



27.8k+150T 変位軌跡 (7/10)

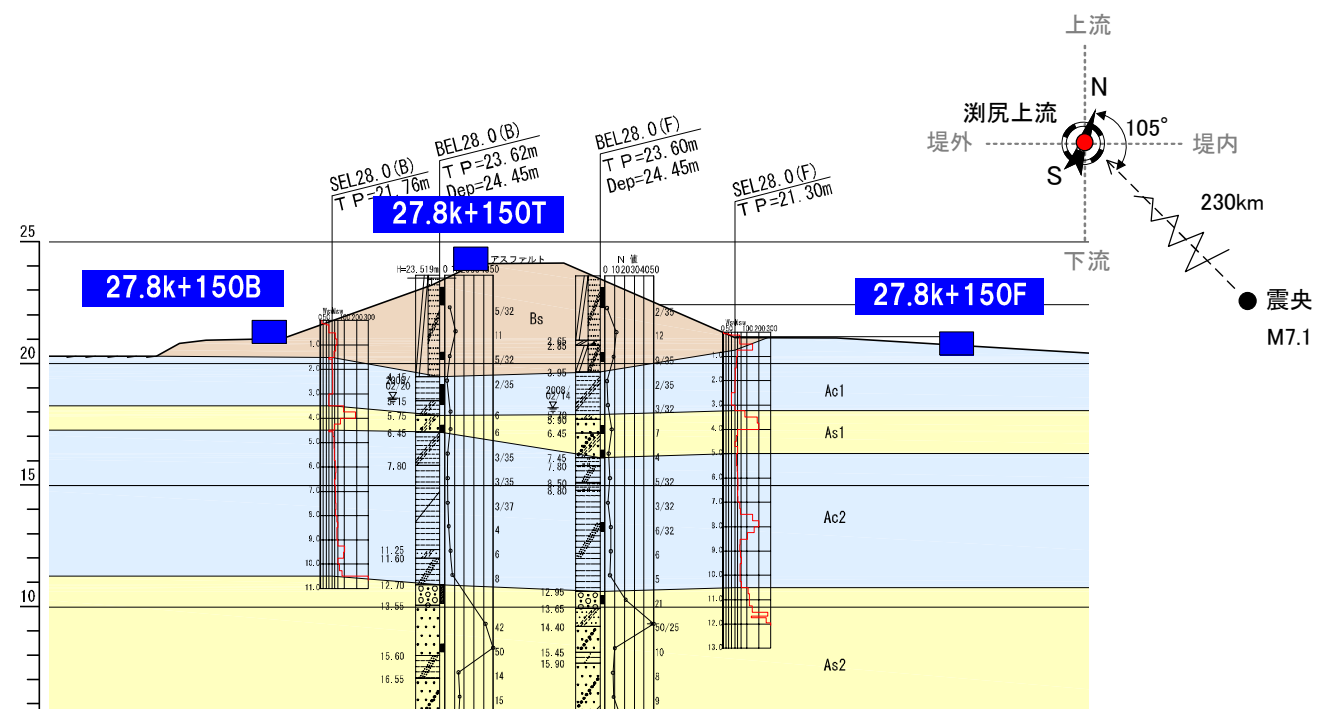
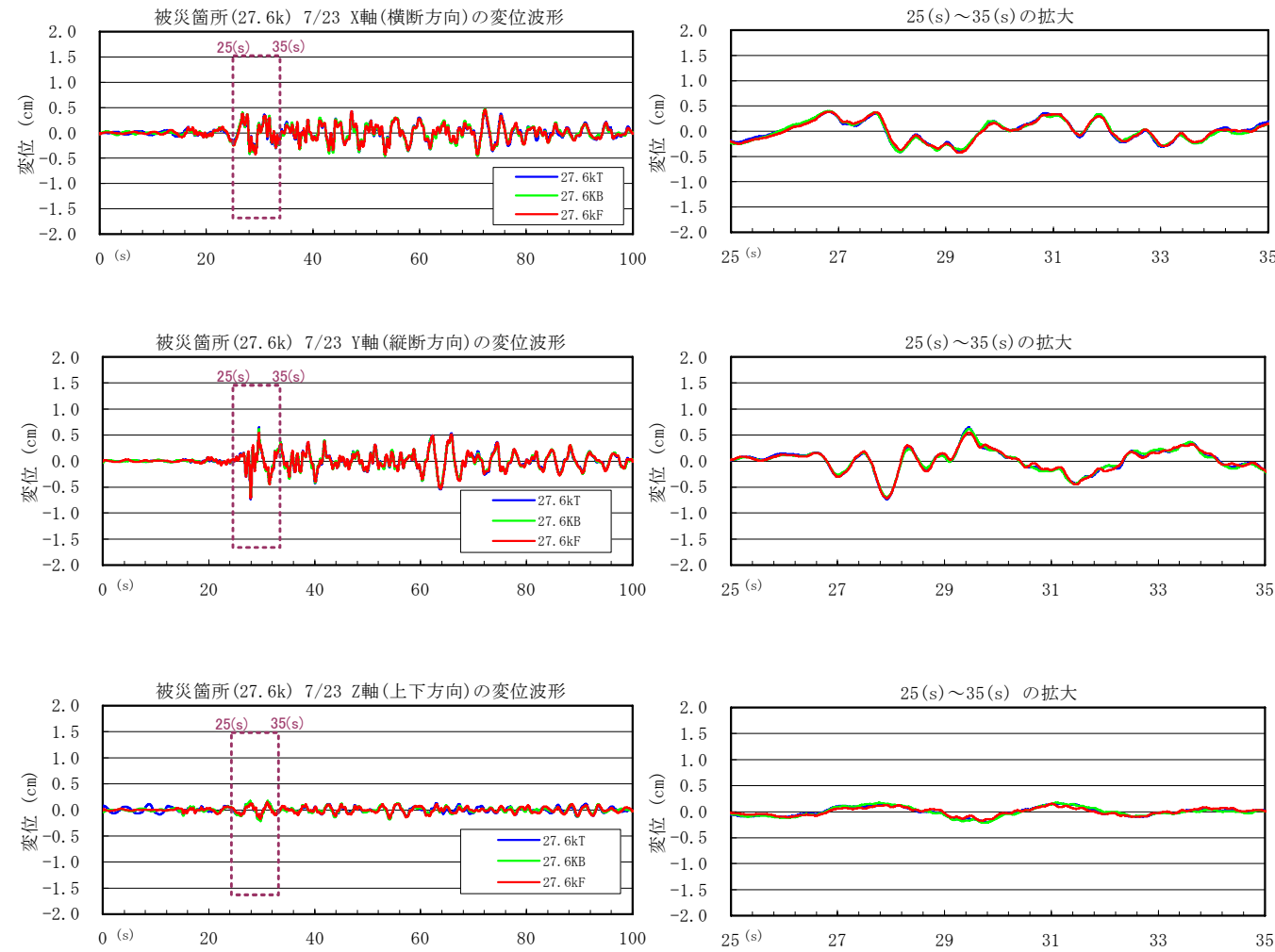
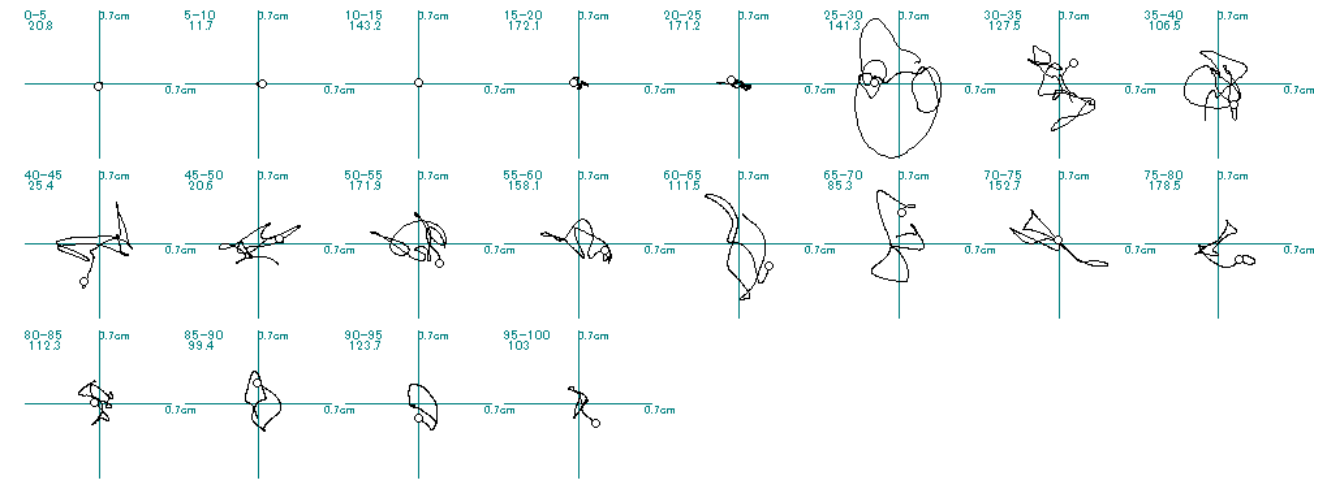


图 4.3.2 無被災箇所変位時刻波形重合せ図・変位軌跡 (余震記録 A 7/10 9:57 M7.1)

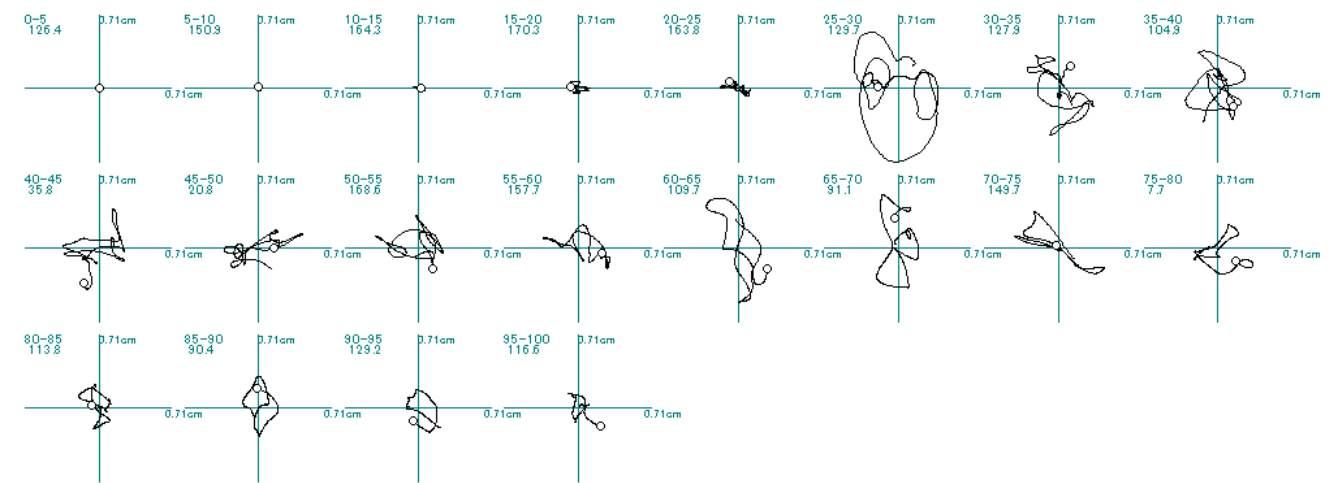
被災箇所(27.6k) 7/23 変位時刻波形



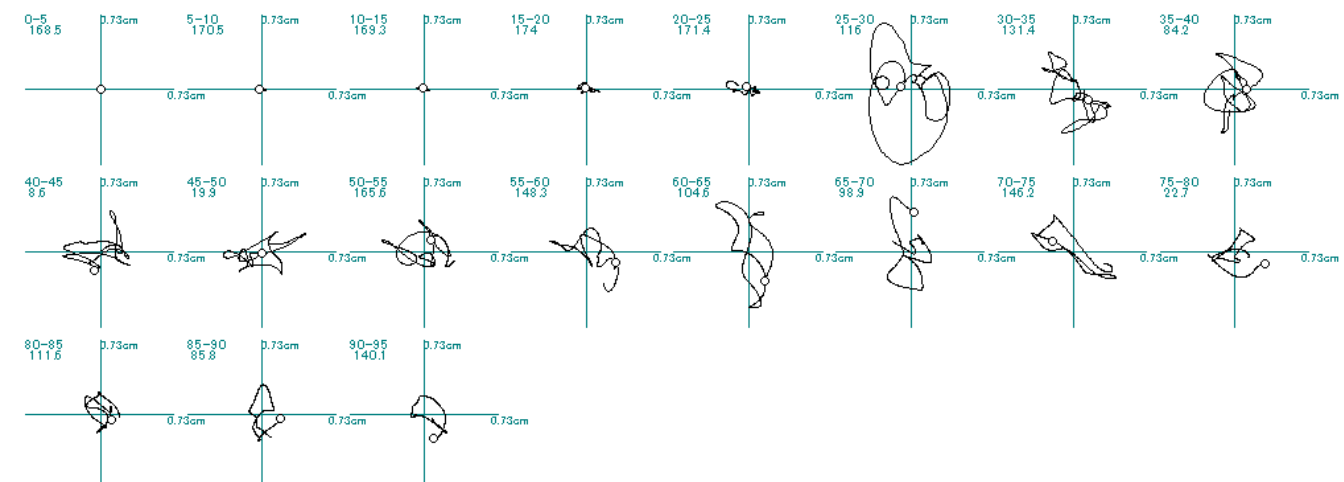
被災箇所(27.6k) 変位軌跡 (7/23)



27.6kB 変位軌跡 (7/23)



27.6kF 変位軌跡 (7/23)



27.6kT 変位軌跡 (7/23)

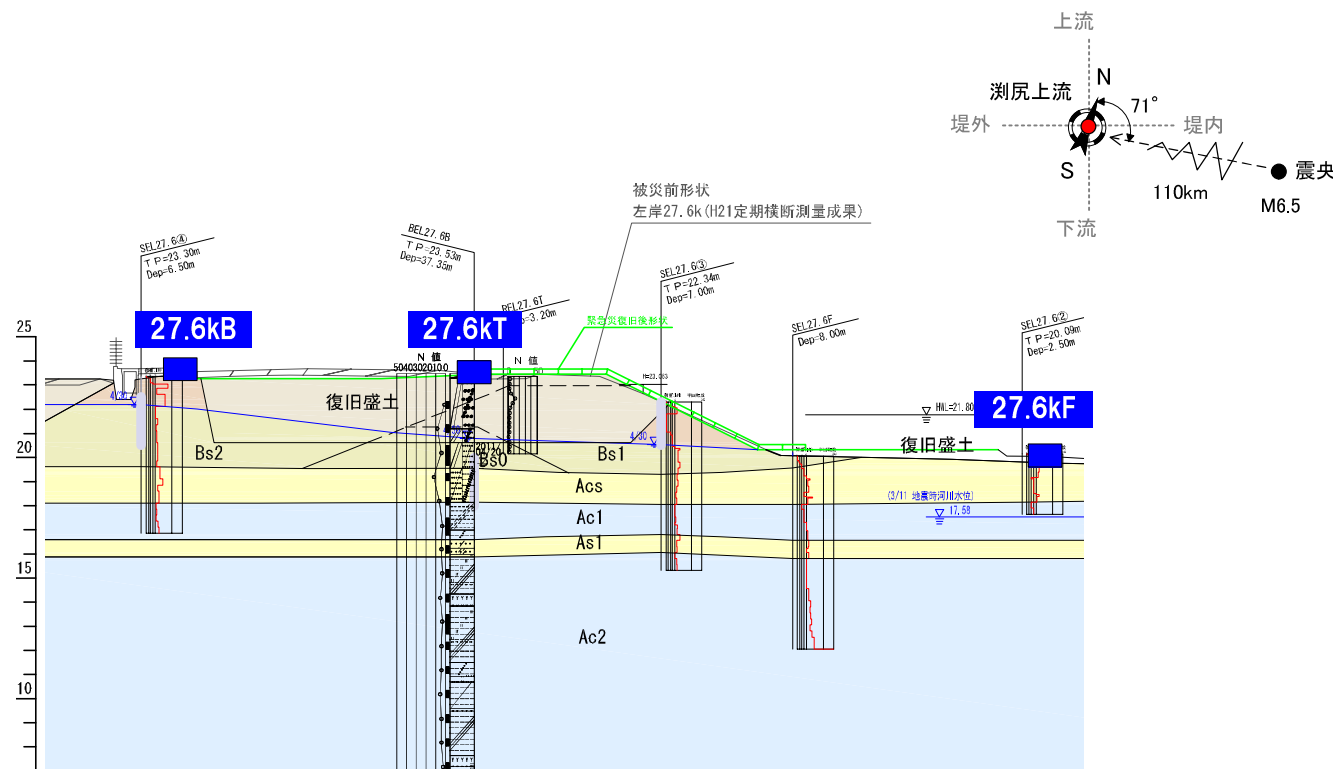
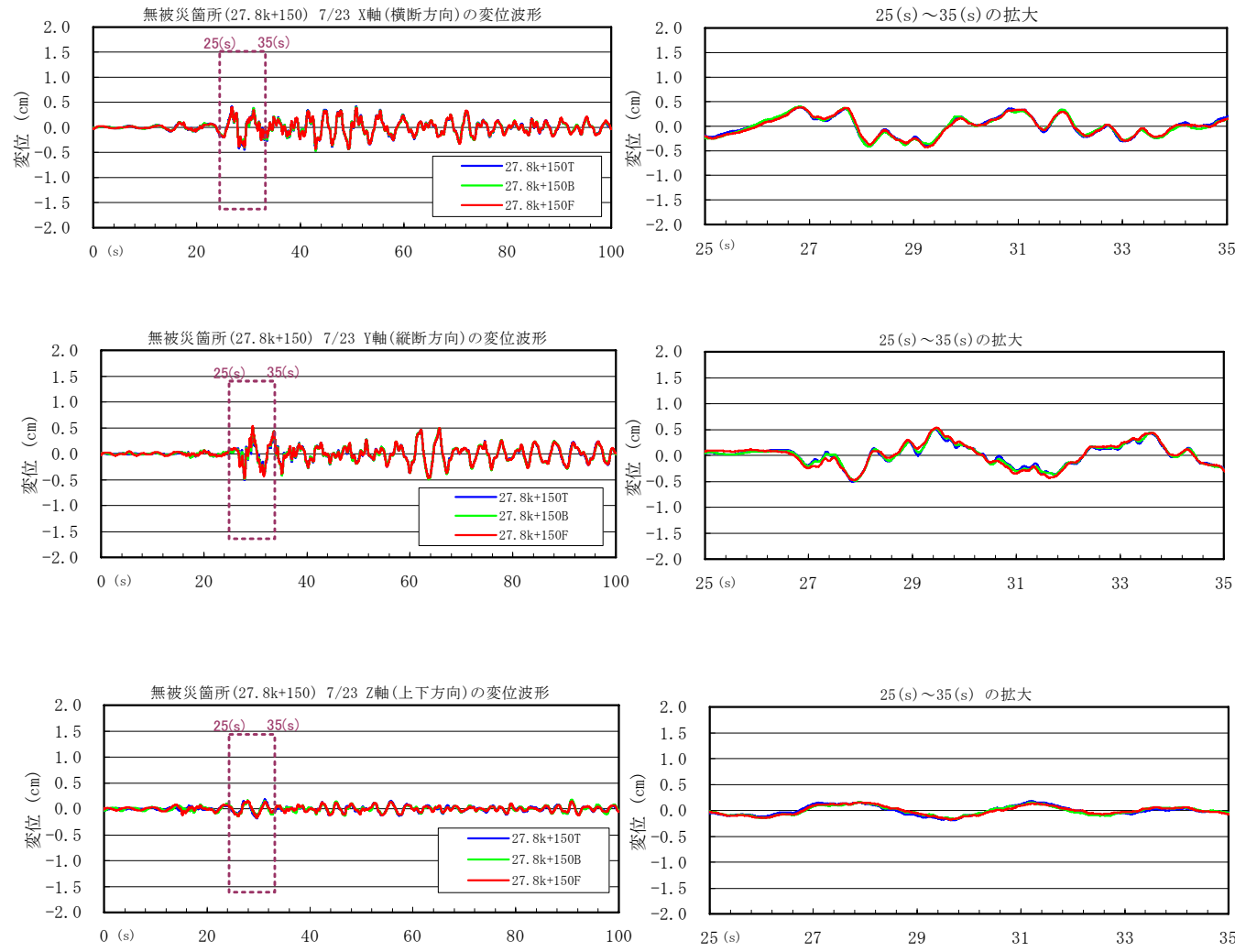
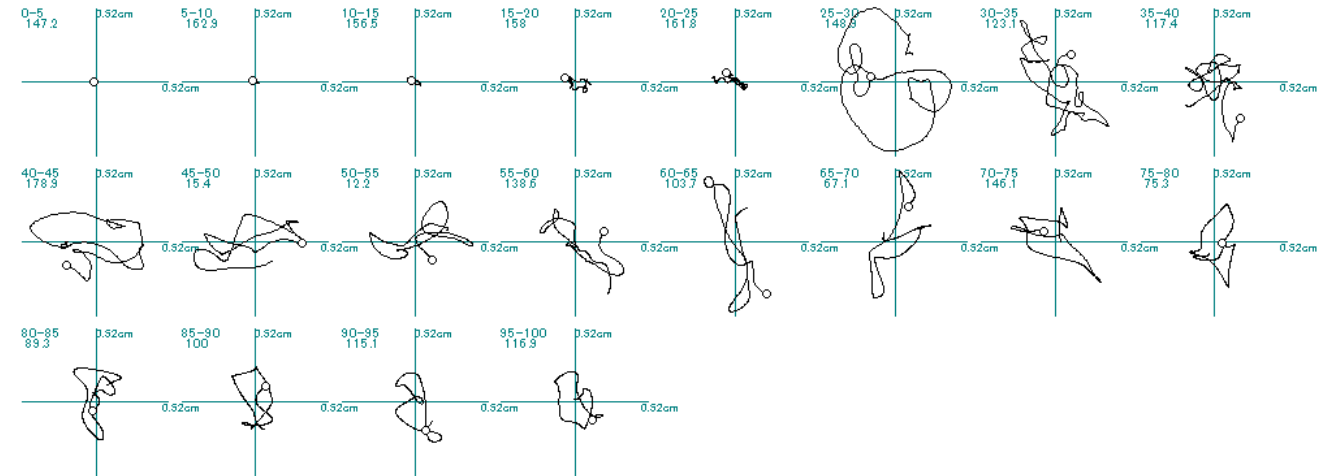


図 4.3.3 被災箇所時刻変位波形重ね合せ図・変位軌跡 (余震記録 B 7/23 13:34 M6.5)

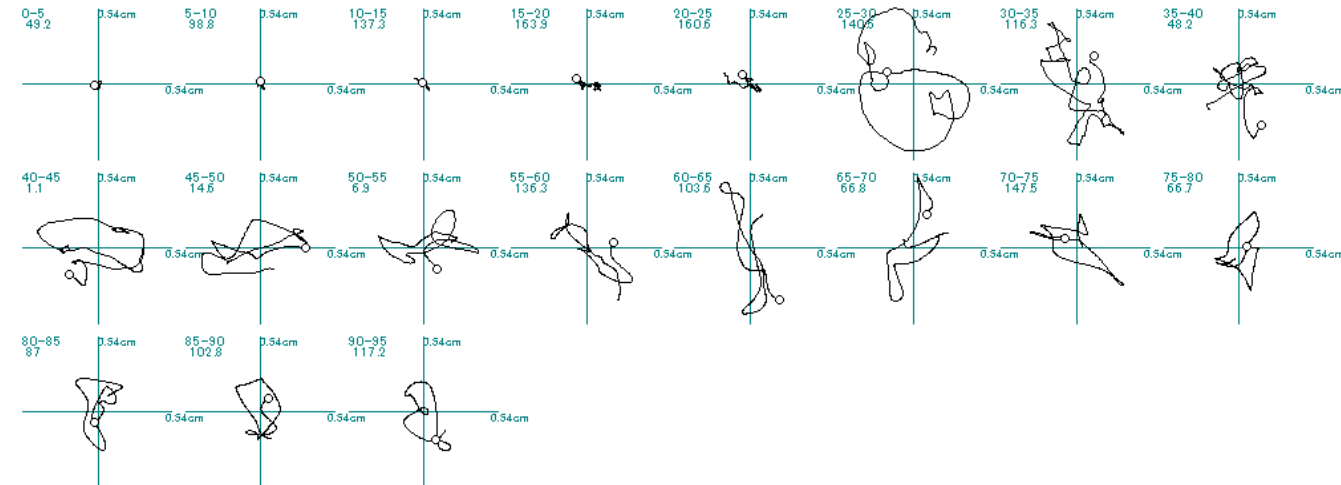
無被災箇所(27.8k+150) 7/23 変位時刻波形



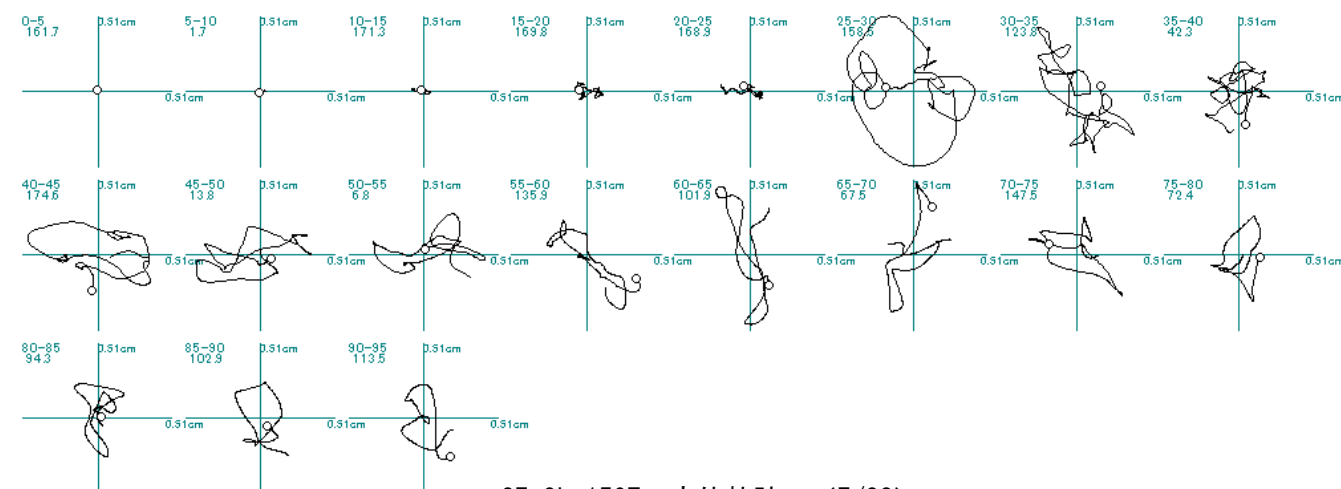
無被災箇所(27.8k+150) 変位軌跡 (7/23)



27.8k+150B 変位軌跡 (7/23)



27.8k+150F 変位軌跡 (7/23)



27.8k+150T 変位軌跡 (7/23)

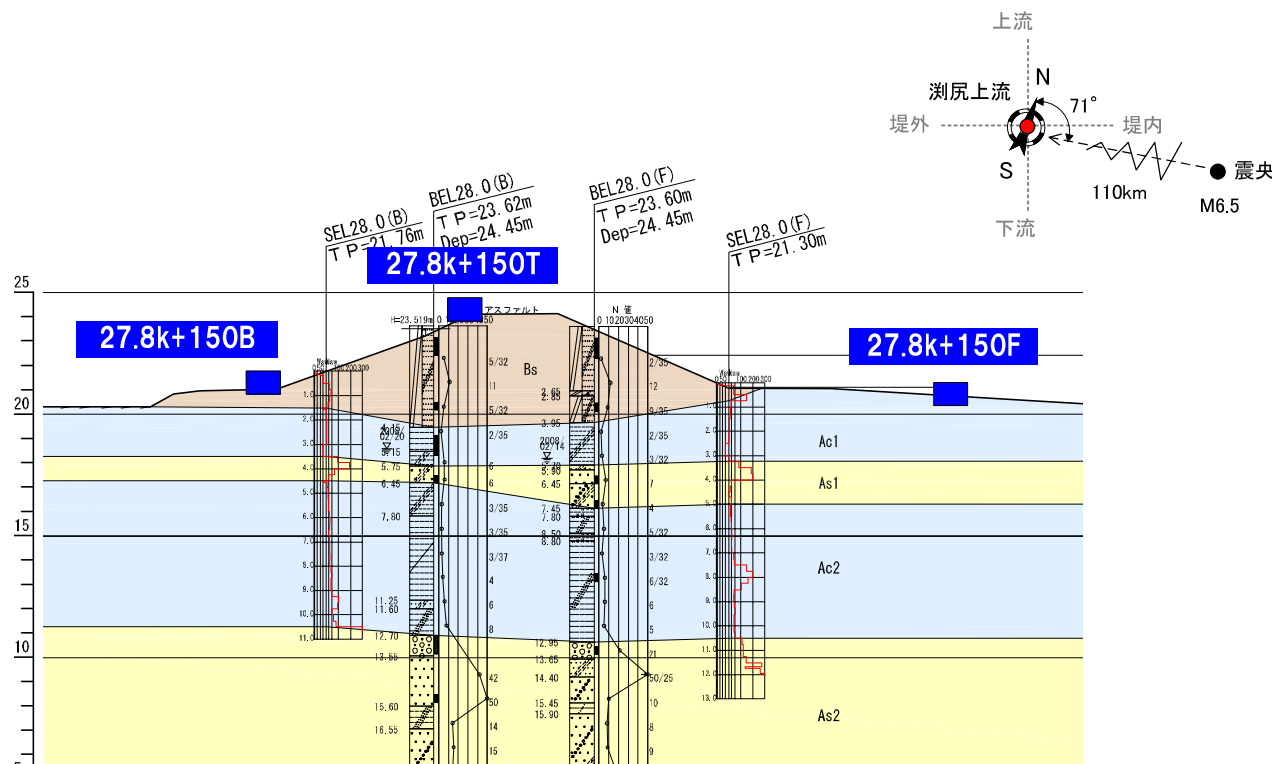
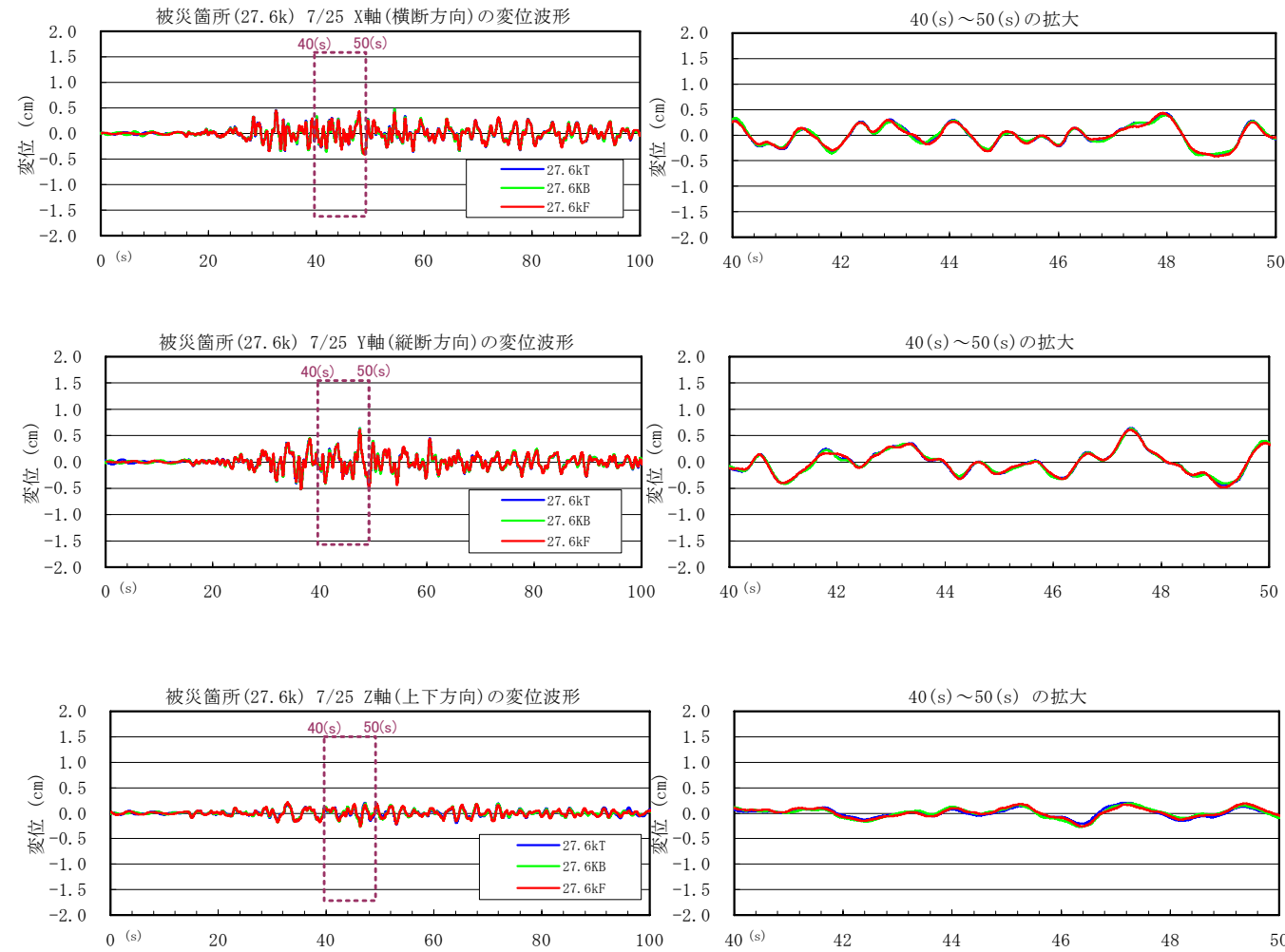
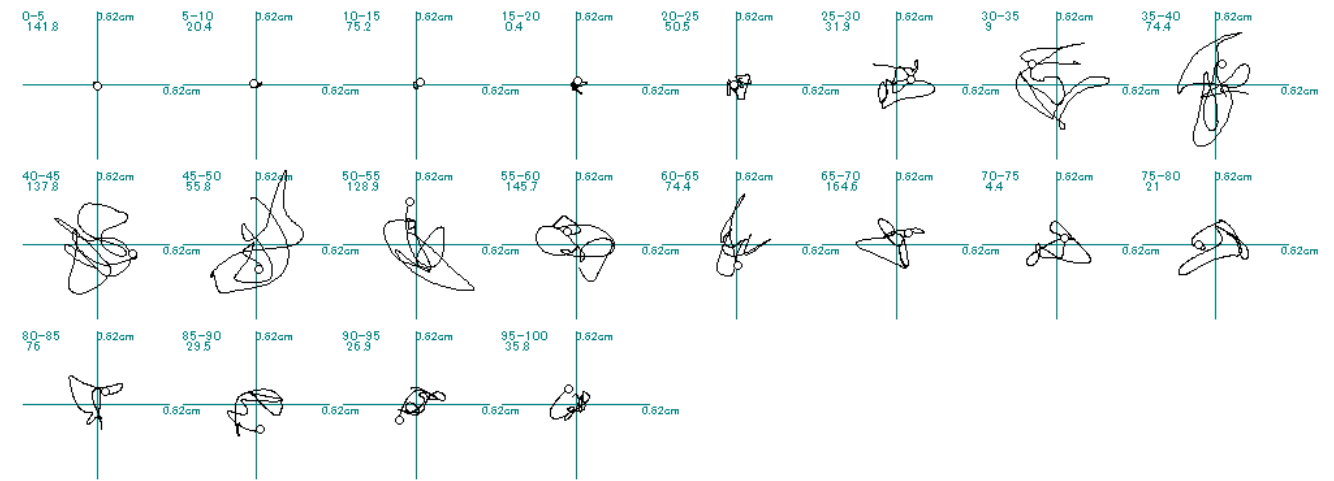


図 4.3.4 無被災箇所変位時刻波形重合せ図・変位軌跡 (余震記録 B 7/23 13:34 M6.5)

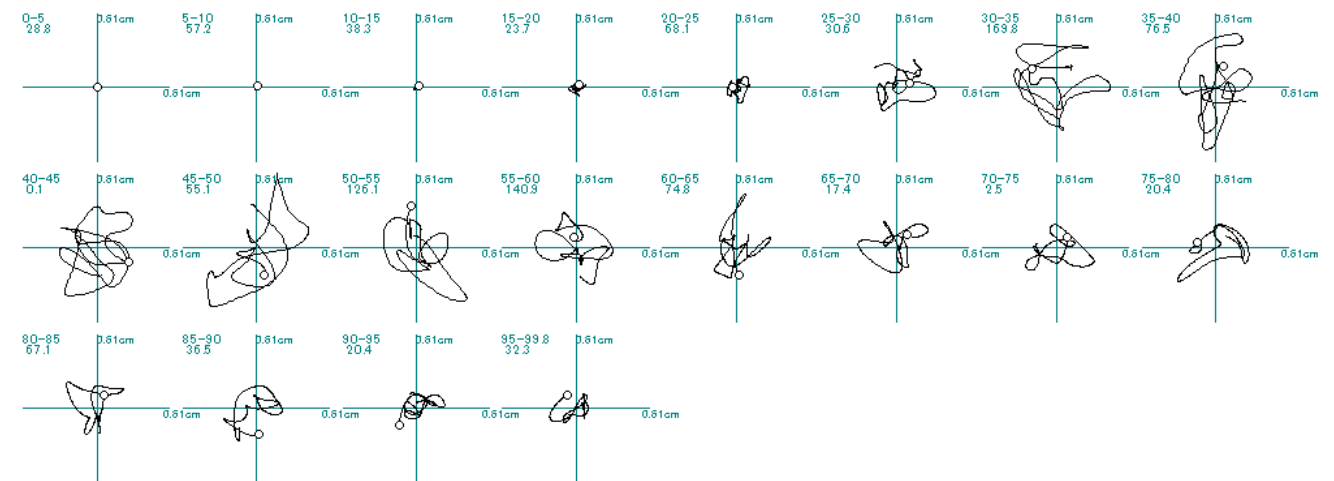
被災箇所(27.6k) 7/25 変位時刻波形



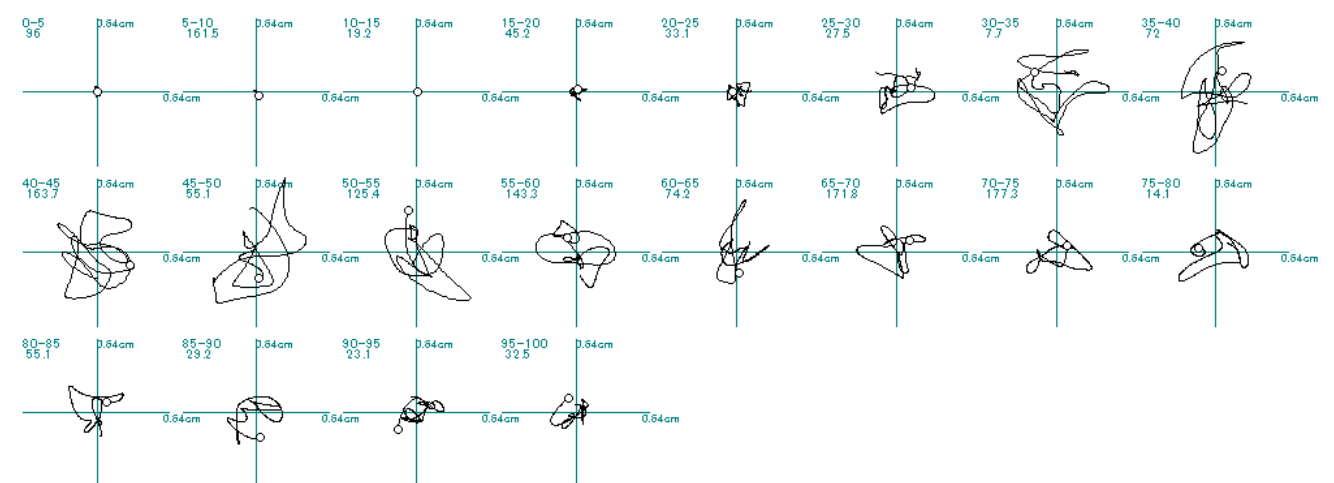
被災箇所(27.6k) 変位軌跡 (7/25)



27.6kB 変位軌跡 (7/25)



27.6kF 変位軌跡 (7/25)



27.6kT 変位軌跡 (7/25)

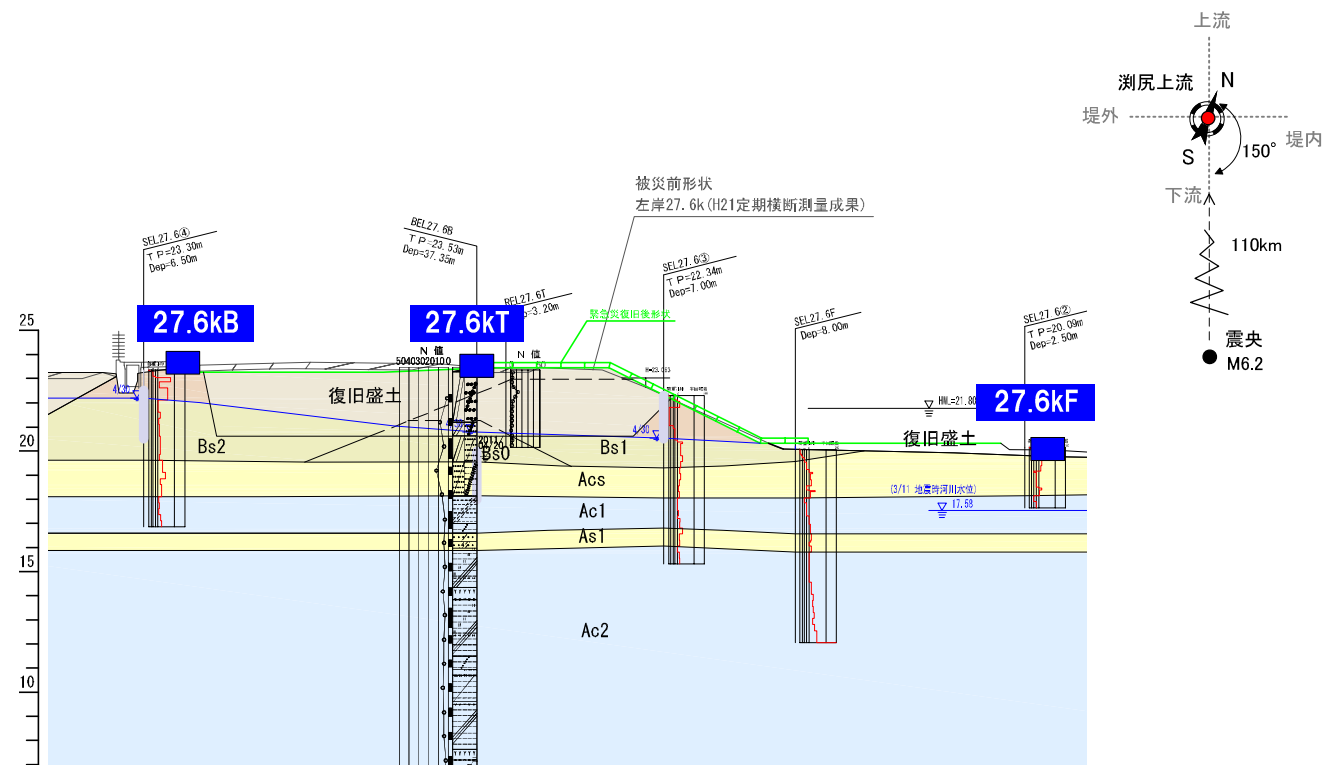
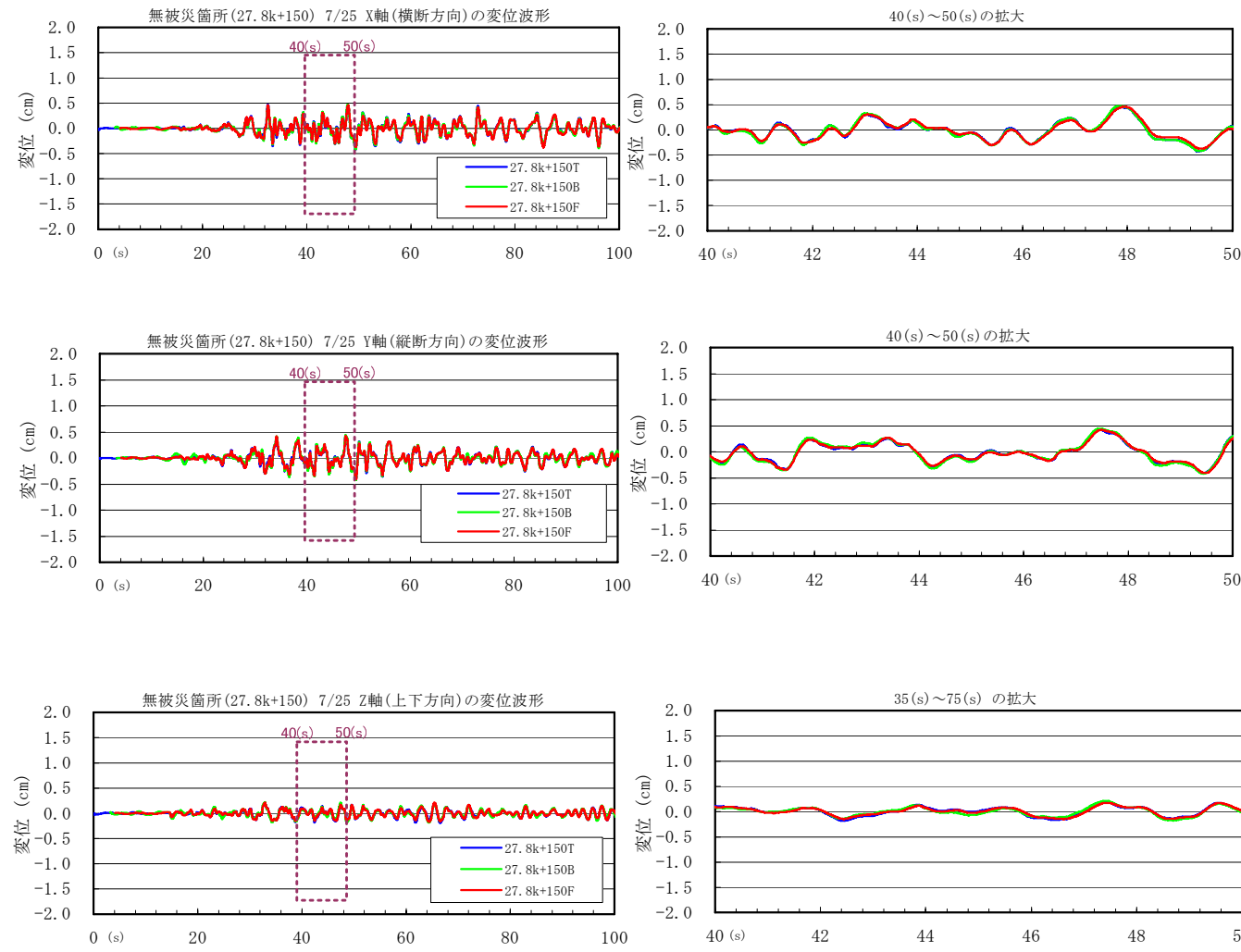


図 4.3.5 被災箇所時刻変位波形重合せ図・変位軌跡 (余震記録 C 7/25 3:51 M6.2)

無被災箇所(27.8k+150) 7/25 変位時刻波形



無被災箇所(27.8k+150) 変位軌跡 (7/25)

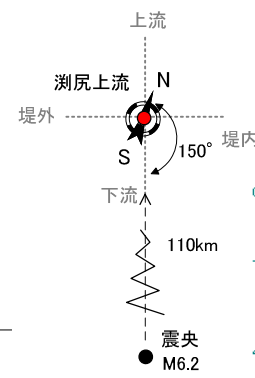
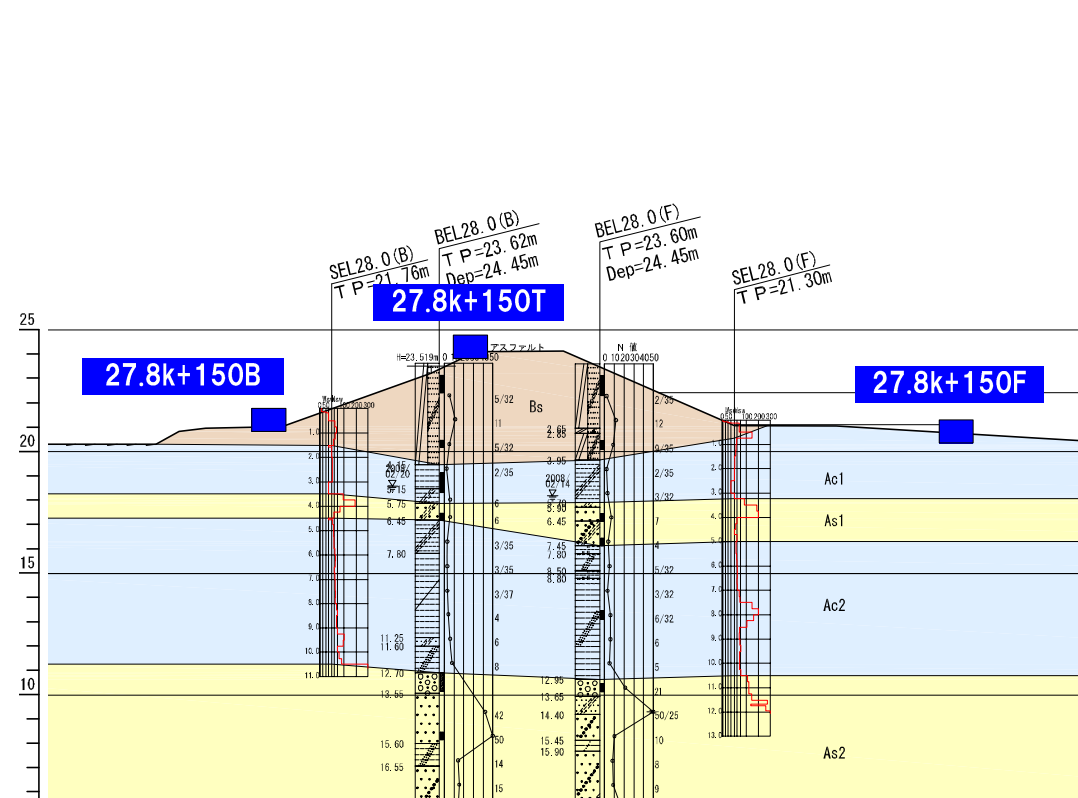
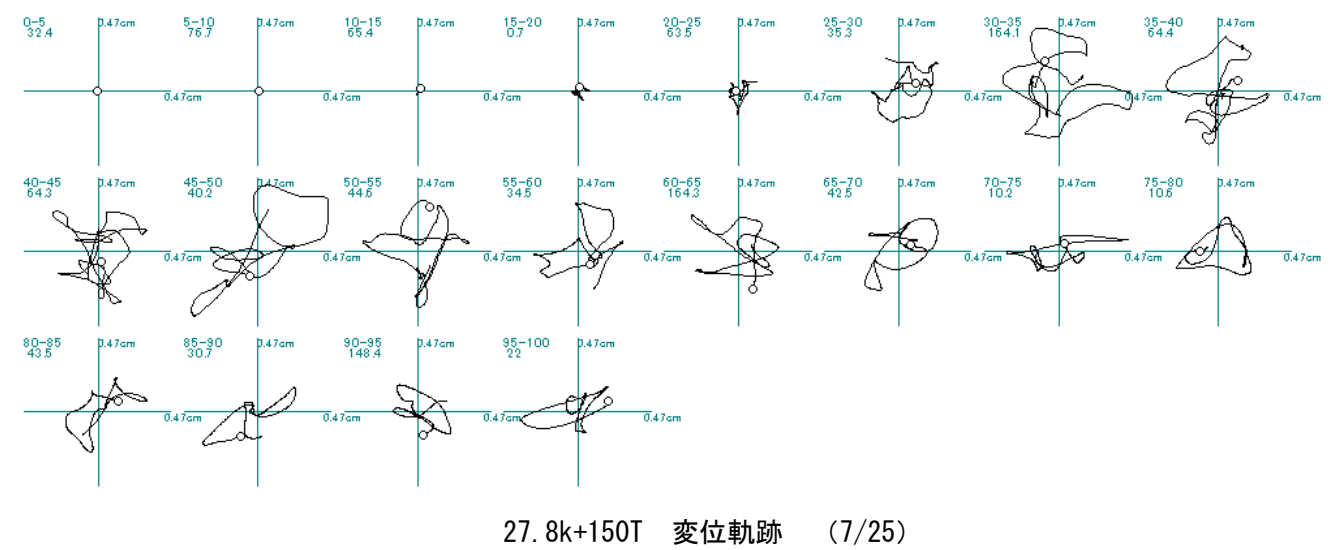
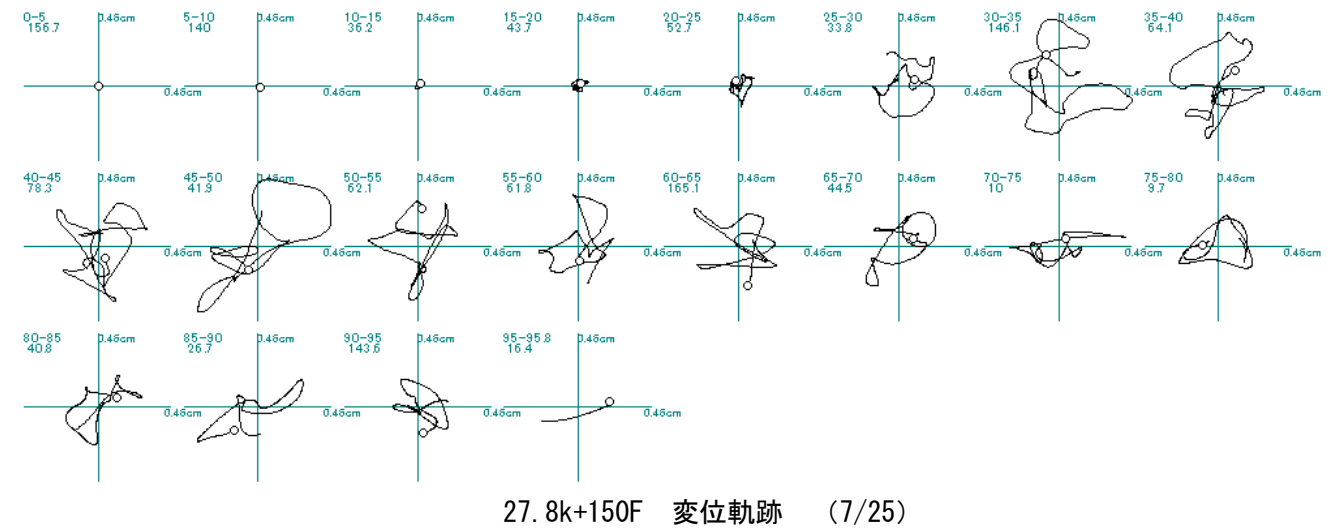
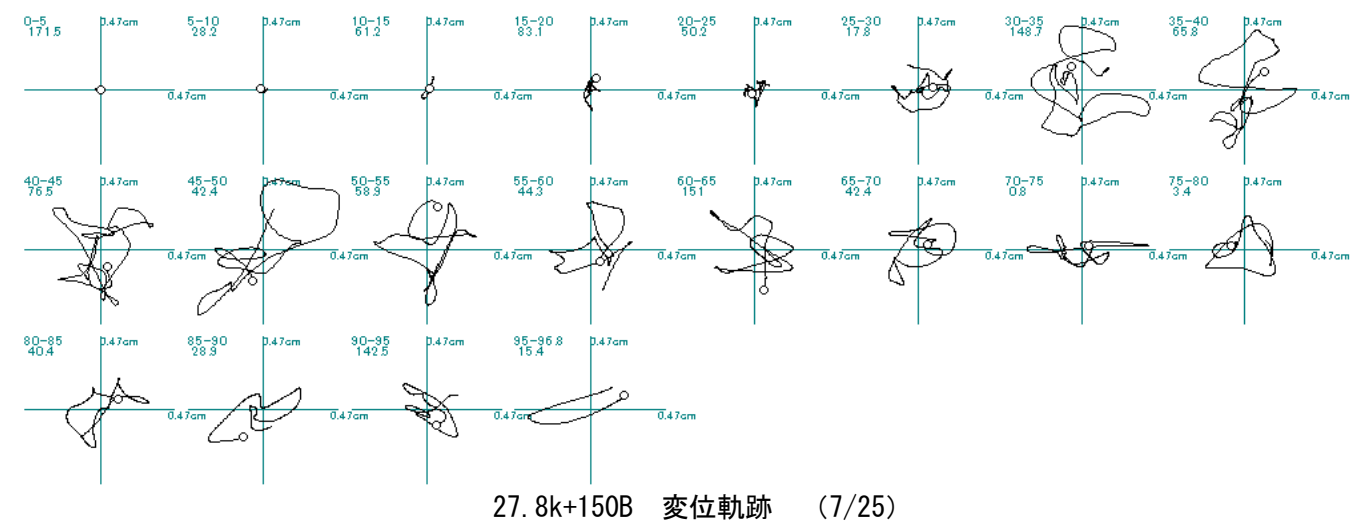


図 4.3.4 無被災箇所変位時刻波形重合せ図・変位軌跡 (余震記録 C 7/25 3:51 M6.2)

#### 4.4 スペクトル

加速度波形のフーリエスペクトルを求め図 4.4.1 に示す。フーリエスペクトルにはバンド幅 0.1Hz の Parzen Window を施している。スペクトル分析の結果を以下に示す。

##### 4.4.1 フーリエスペクトル

###### <被災断面 (27.6k) >

- ・3 地点(川表、川裏、天端)のスペクトルを比較すると、水平成分(縦断・横断方向)においては同様の形状を示す。
- ・上下方向では、周波数 3Hz~6Hz 程度で川裏 27.6kB および 27.6kT がやや小さい値を示す。

###### <無被災断面 (27.8k+150) >

- ・3 地点(川表、川裏、天端)のスペクトルを比較すると、水平成分(縦断・横断方向)において周波数 3Hz~7Hz 間で天端 27.6kT が大きい値を示す。
- ・上下方向では、ほぼ同様の形状を示す。

###### <被災箇所と無被災箇所の比較>

- ・被災箇所の加速度が卓越する周波数は、水平成分(縦断・横断方向)では周波数 1Hz~2Hz 付近である。上下方向では 27.6kF 地点で周波数 3Hz~4Hz 付近が卓越する。
- ・無被災箇所の加速度が卓越する周波数は、水平成分(縦断・横断方向)では 27.8k+150T 地点で周波数 3Hz~7Hz 付近である。上下方向では特に卓越する周波数は見られない。

##### 4.4.2 フーリエスペクトル比

堤防盛土の応答性を検討するため、川表地表面の地震計を基準として天端地震計とのスペクトルを比較した。27.6k 地点においては 27.6kF を、27.8k+150 地点においては 27.8k+150F を基準としてスペクトル比を算出した。余震毎のスペクトル比を図 4.4.2 に、各成分の集積図を図 4.4.3 に示す。

###### <被災断面 (27.6k) >

- ・水平成分(縦断・横断方向)、上下方向ともに大きなピークは見られない。

###### <無被災断面 (27.8k+150) >

- ・水平成分(縦断・横断方向)および上下方向ともに、周波数 3Hz~4Hz、6~7Hz 付近で大きな値を示している。上下方向には大きなピークは見られない。

###### <被災箇所と無被災箇所の比較>

- ・被災箇所および無被災箇所ともにスペクトル比の特性は 3 つの余震でほぼ同様の傾向を示している。
- ・被災箇所では、特に大きなスペクトル比を示す傾向はなく、天端の増幅は見られない。
- ・無被災箇所では、堤防横断方向および縦断方向において、周波数 3Hz~4Hz、6~7Hz 付近で大きな値を示している。上下方向には大きなピークは見られない。
- ・被災箇所と無被災箇所を比較すると、スペクトル比の大きさが大きく違い、水平成分(縦断・横断方向)では、無被災箇所の周波数 3Hz~4Hz、6~7Hz 付近で大きな値を示している。上下方向には大きなピークは見られない。

これらのことから、無被害の堤防では、周波数 3Hz~4Hz、6~7Hz 付近で加速度が増幅する傾向があるが、応急復旧した被災箇所の堤防では、このような傾向は見られない。被災箇所で加速度が増幅しないのは、応急復旧した堤防内部が緩い状態にあるものと思われる。

##### 4.4.3 H/V スペクトル

地震動の H/V スペクトルは、表面波の応答特性を表す量として考えられている。H/V スペクトルを図 4.4.4 に示す。

- ・いずれの地点でも周波数 0.2Hz にピークが見られるが、これは K-NET 古川(MYG006)地点にも見られる。このことから、0.2Hz のピークは工学的基盤以深の深部地盤構造に起因するピークと考えられる。
- ・被災箇所 27.6k 地点では川表地表面を含む 3 地点(川表、天端、川裏)で周波数 1Hz 付近にピークが見られる。このことから、周波数 1Hz 付近の振動が増幅する可能性がある。
- ・無被災箇所 27.8k+150 地点では特に大きなピークは見られない。

###### スペクトルのまとめ

- 被災箇所では、周波数 1~2Hz 付近の振動が増幅する可能性がある。堤体による加速度の増幅は見られない。
- 無被災箇所では、堤防盛土により天端の加速度が周波数 3Hz~4Hz、6~7Hz 付近で増幅する傾向にある
- 応急復旧した被災箇所で堤防盛土による天端加速度の増幅が見られない原因は、応急復旧した堤防内部が緩い状態にあるものと思われる。

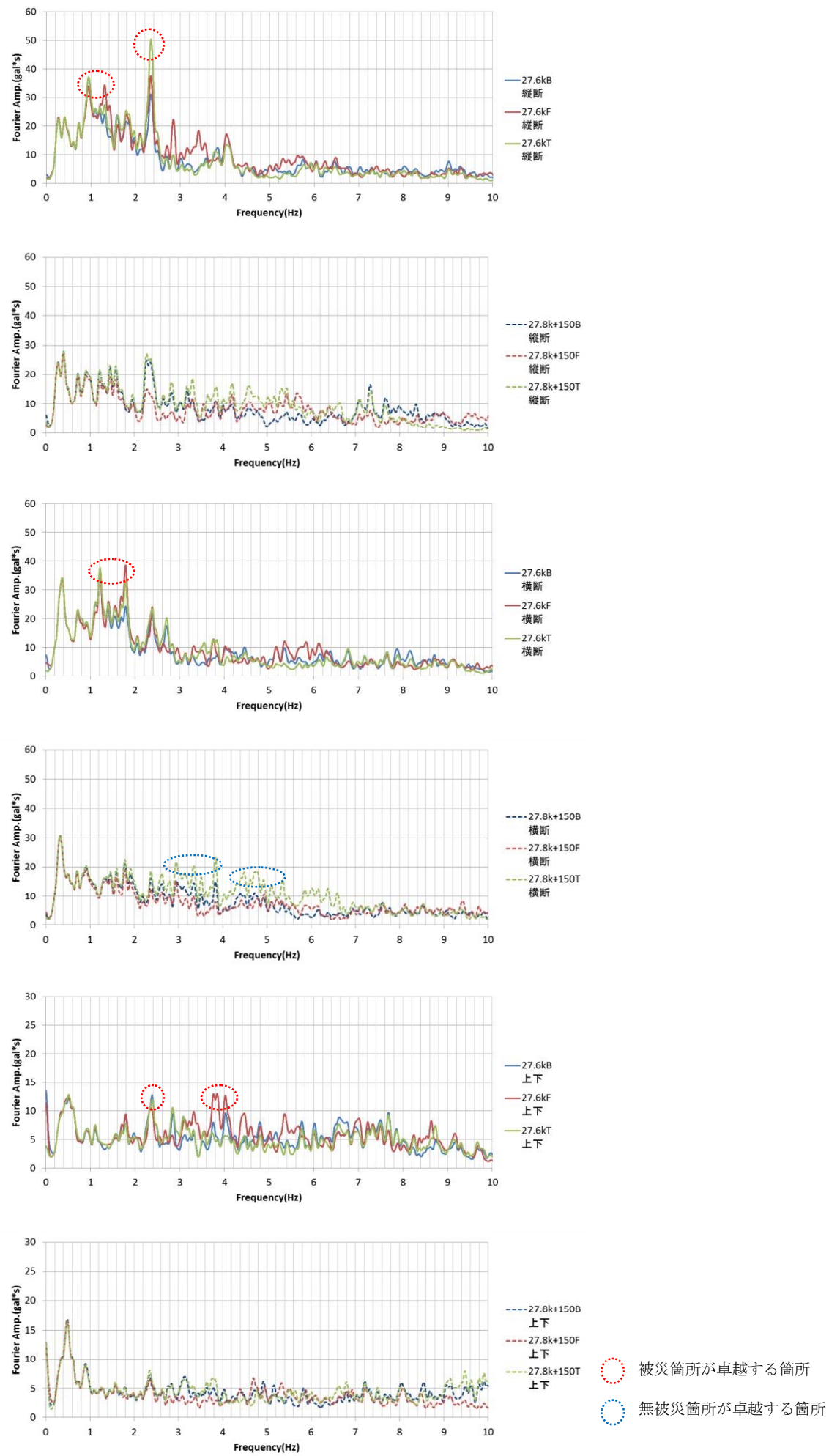


図 4.4.1-1 2011年7月10日の地震のフーリエスペクトル

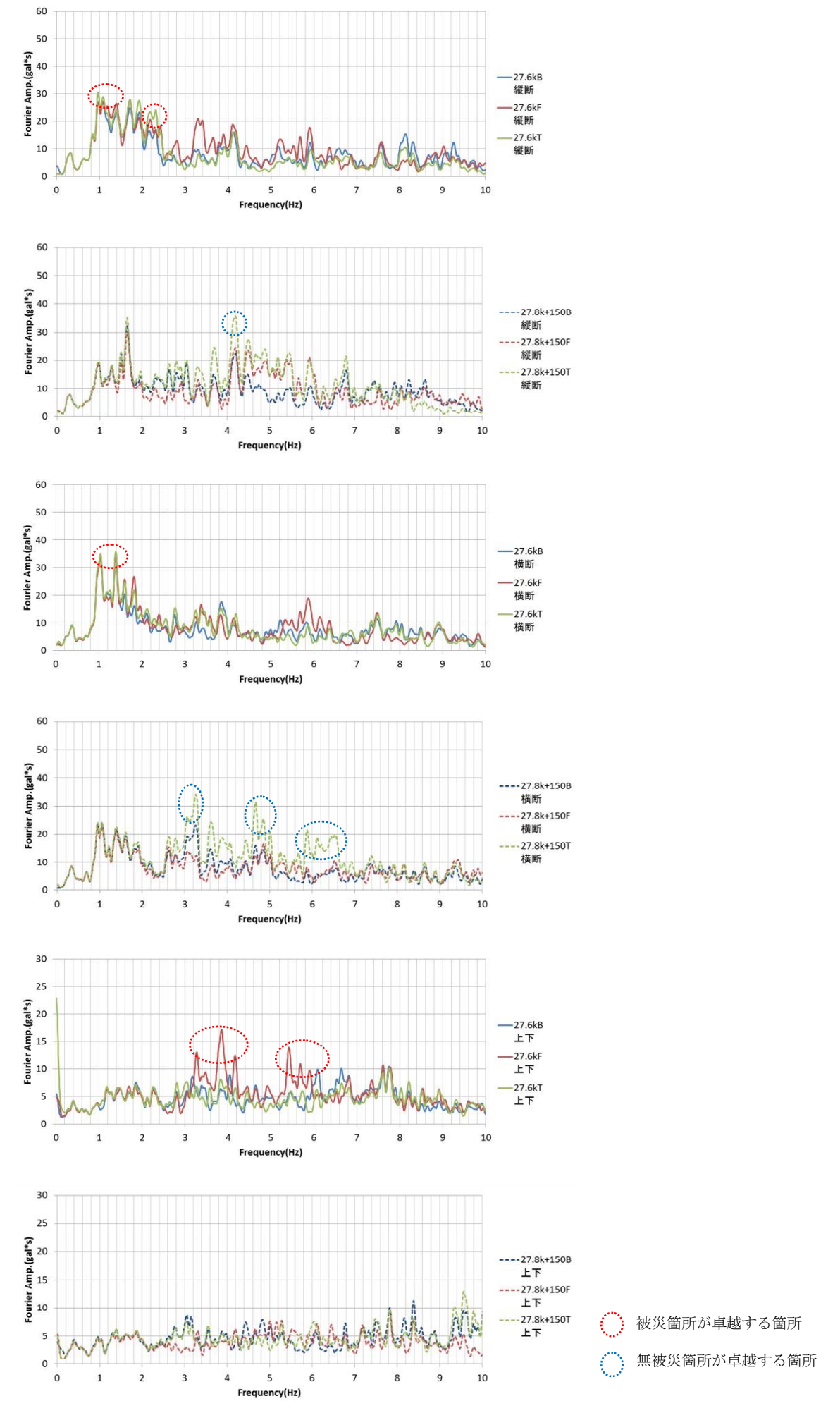


図 4.4.1-2 2011年7月23日の地震のフーリエスペクトル

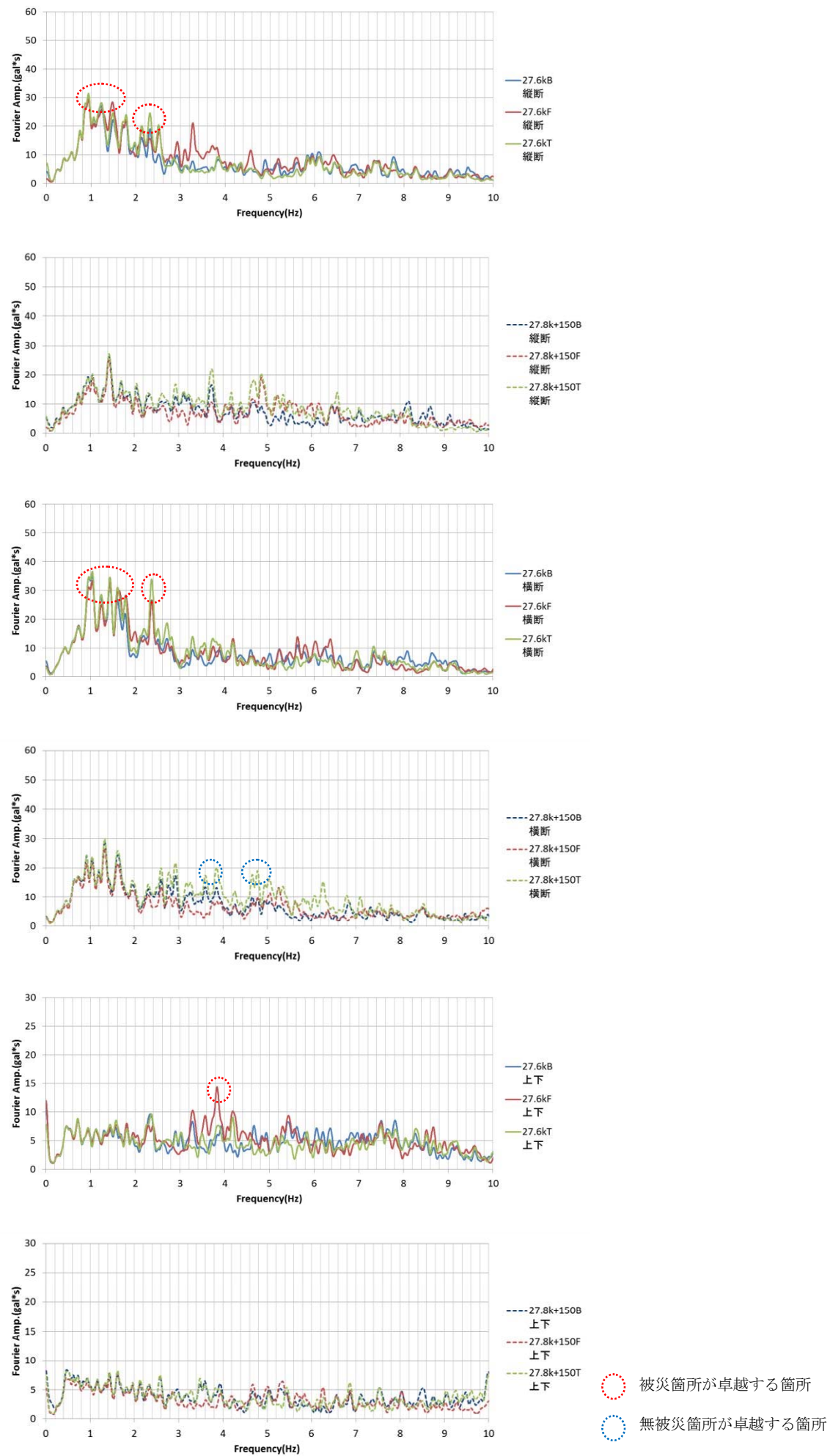


図 4.4.1-3 2011年7月25日の地震のフーリエスペクトル

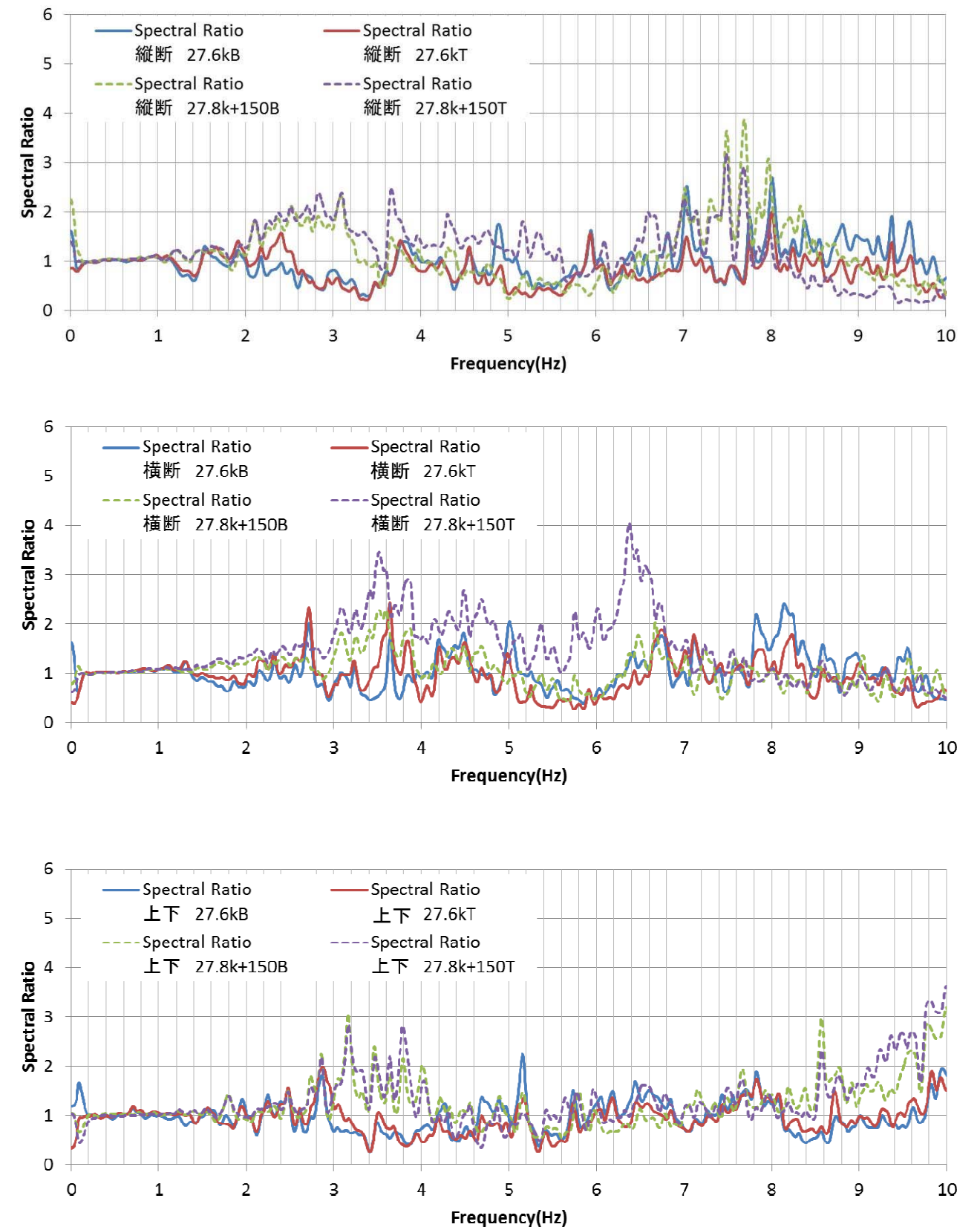


図 4.4.2-1 2011年7月10日の地震のフーリエスペクトル比  
27.6k 地点：27.6kF 基準  
27.8k+150 地点：27.8k+150F 基準



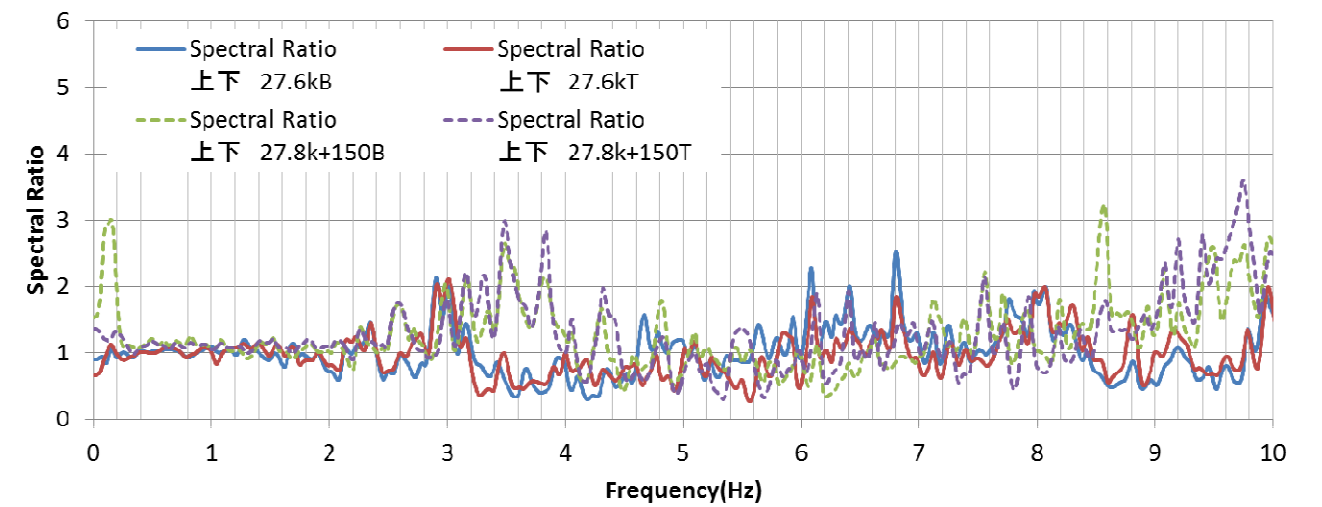
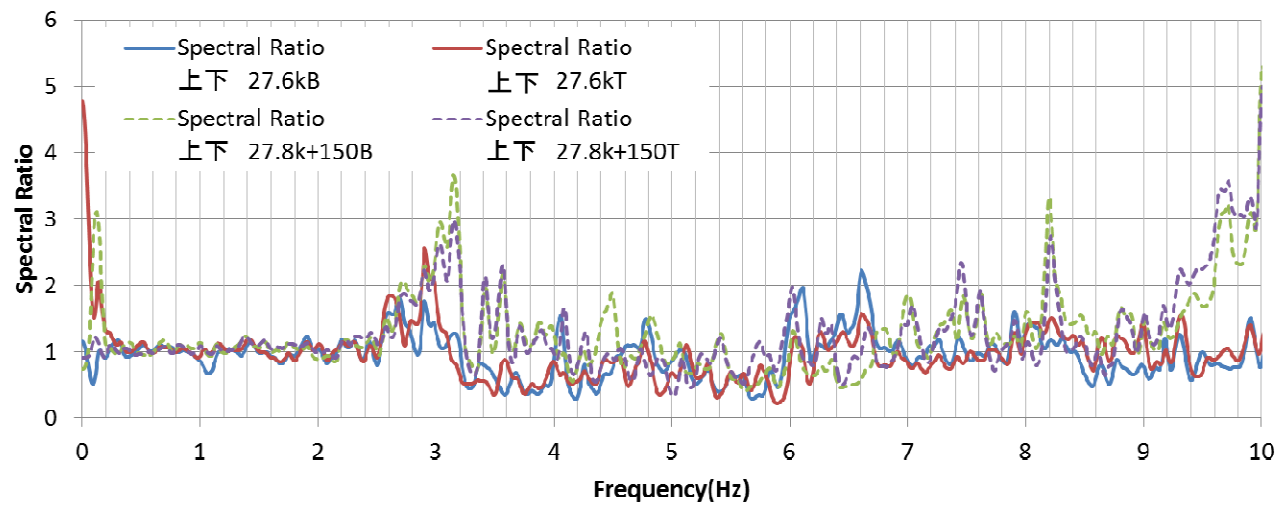
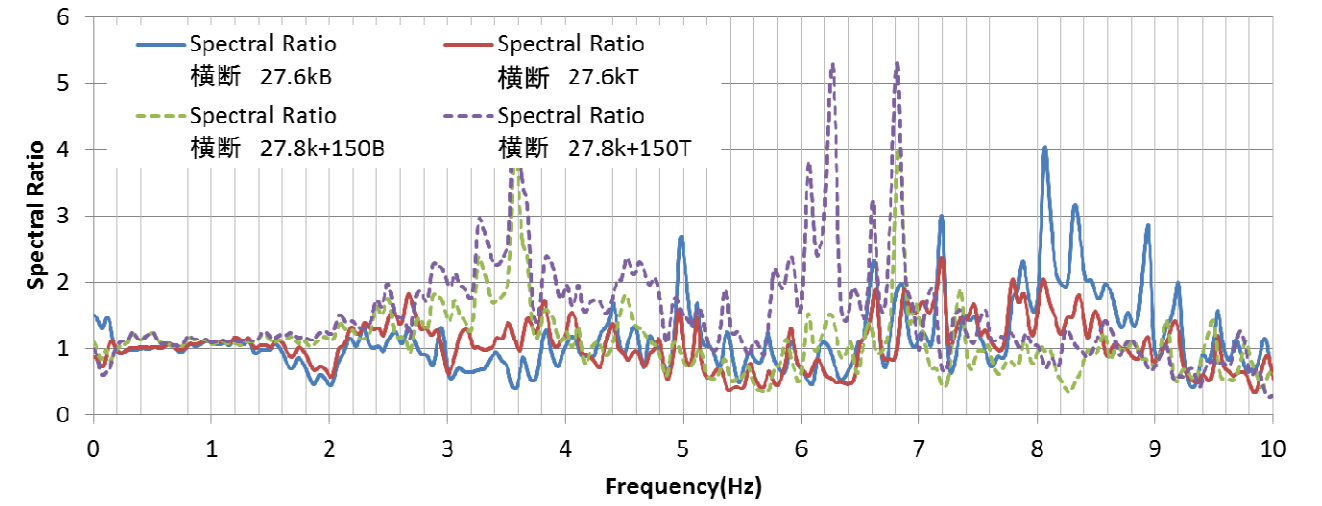
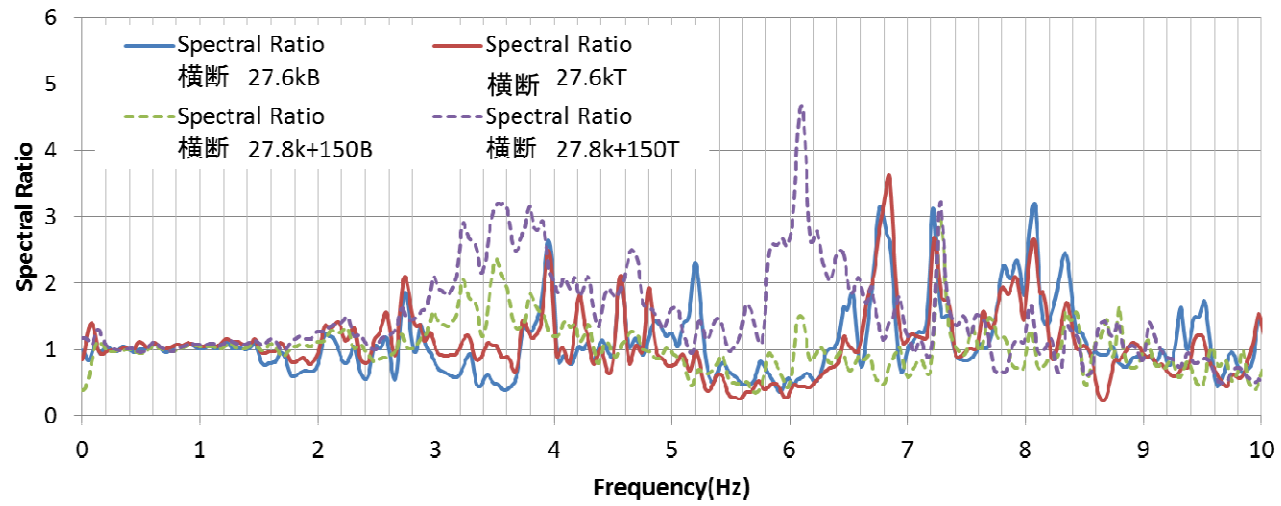
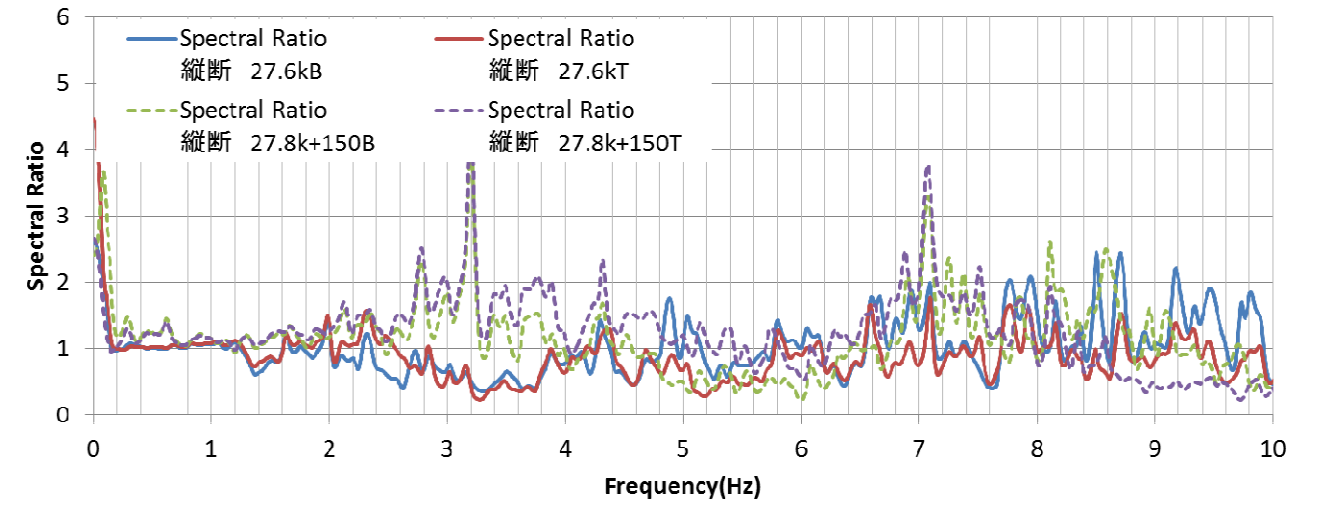
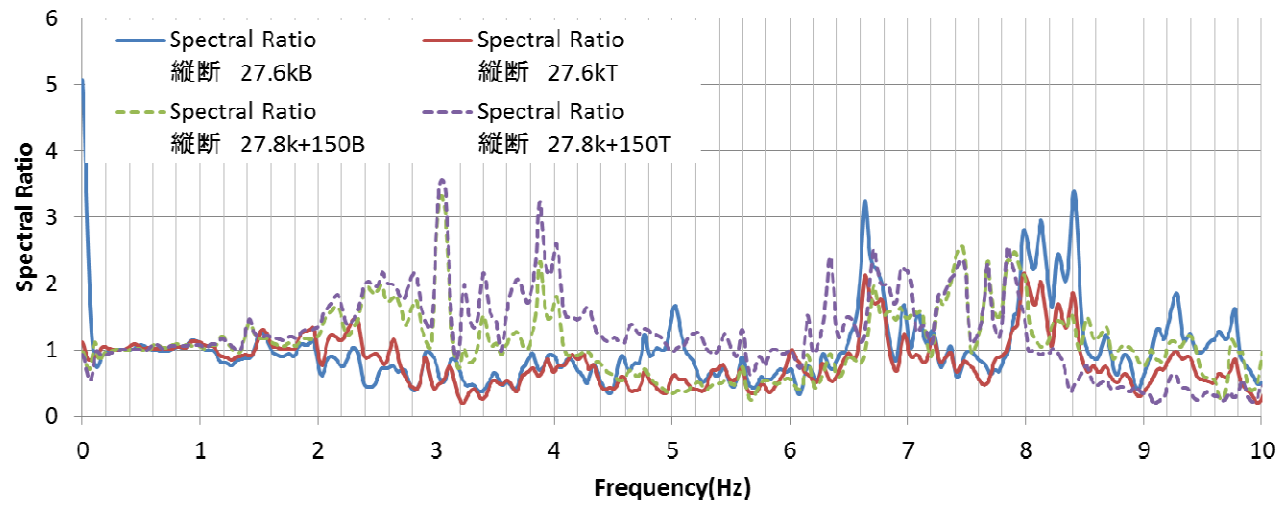


図 4.4.2-2 2011年7月23日の地震のフーリエスペクトル比  
 27.6k 地点：27.6kF 基準  
 27.8k+150 地点：27.8k+150F 基準

図 4.4.2-3 2011年7月25日の地震のフーリエスペクトル比  
 27.6k 地点：27.6kF 基準  
 27.8k+150 地点：27.8k+150F 基準

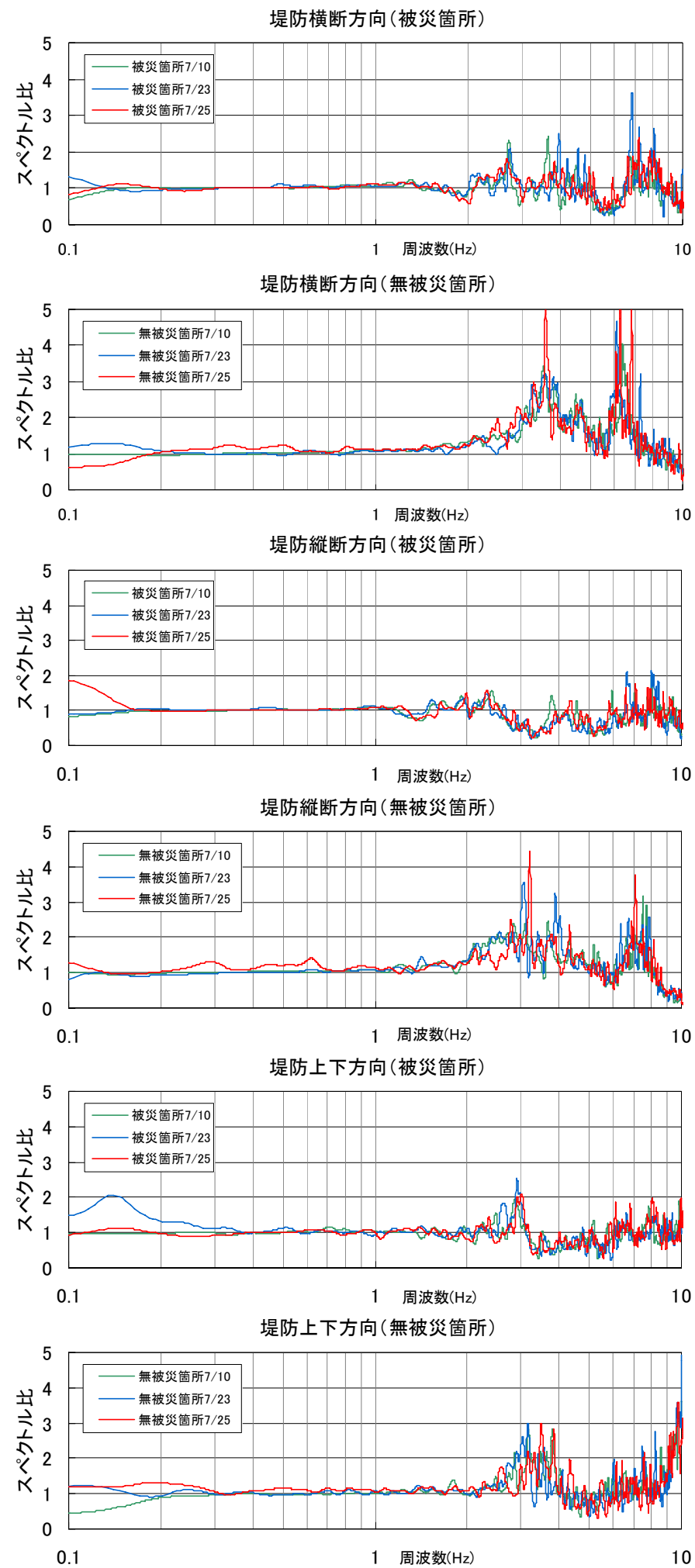


図 4.4.3 川表地表面に対する天端加速度のスペクトル比 (3地震のまとめ)

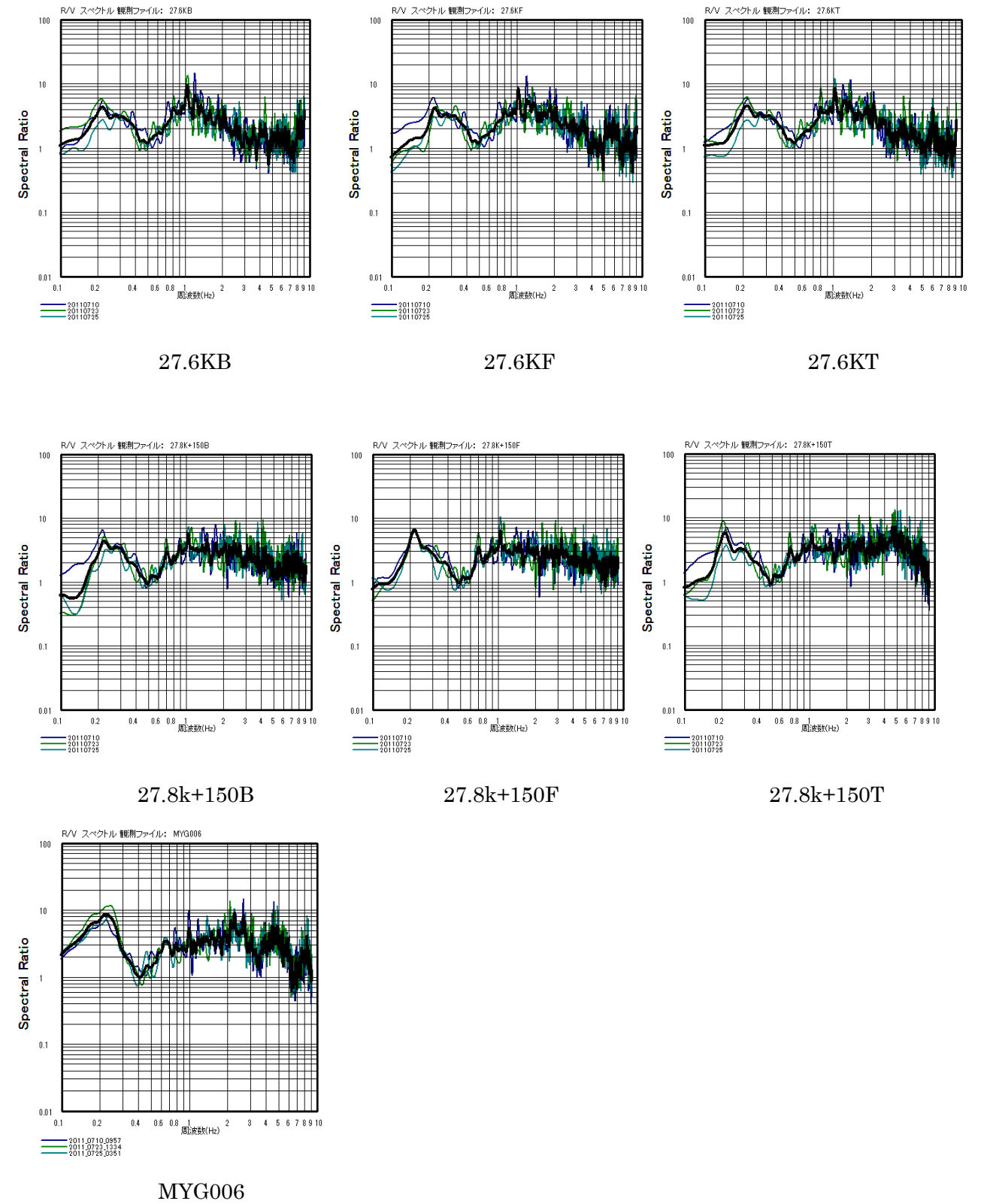


図 4.4.4 地震動のH/Vスペクトル

#### 4.5 相対変位

変位波形の相対変位波形を求め図 4.5.1~4.5.3 に示す。27.6k 地点においては 27.6kF との差を、27.8k+150 地点においては 27.8k+150kF との差を求めた。

27.6k 地点の相対振幅は、27.8k+150 地点の相対振幅に比べやや大きい値を示している。その傾向は 3 つの地震で同じである。

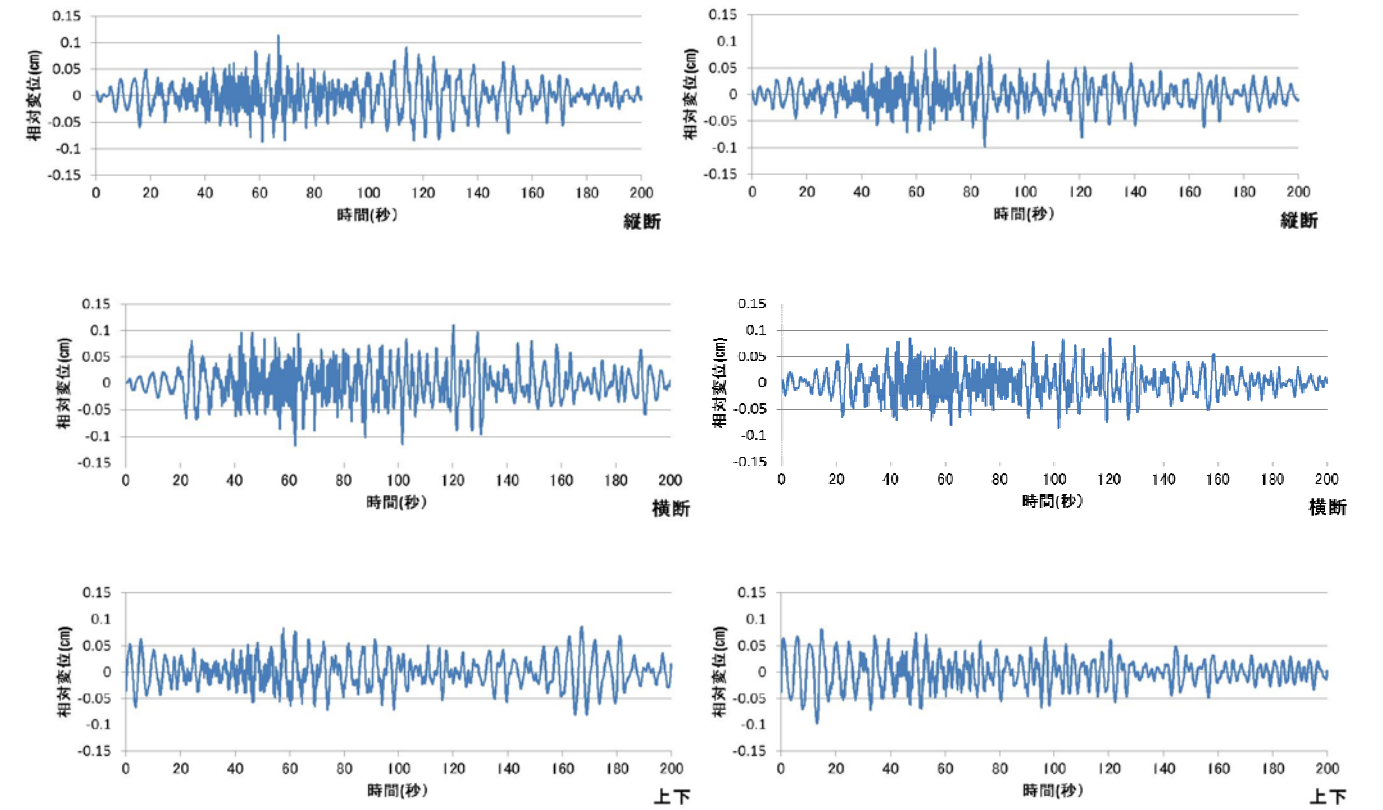


図 4.5.1-1 相対変位波形 2011 年 7 月 10 日の地震

左図：27.6kF 右図：27.6kT

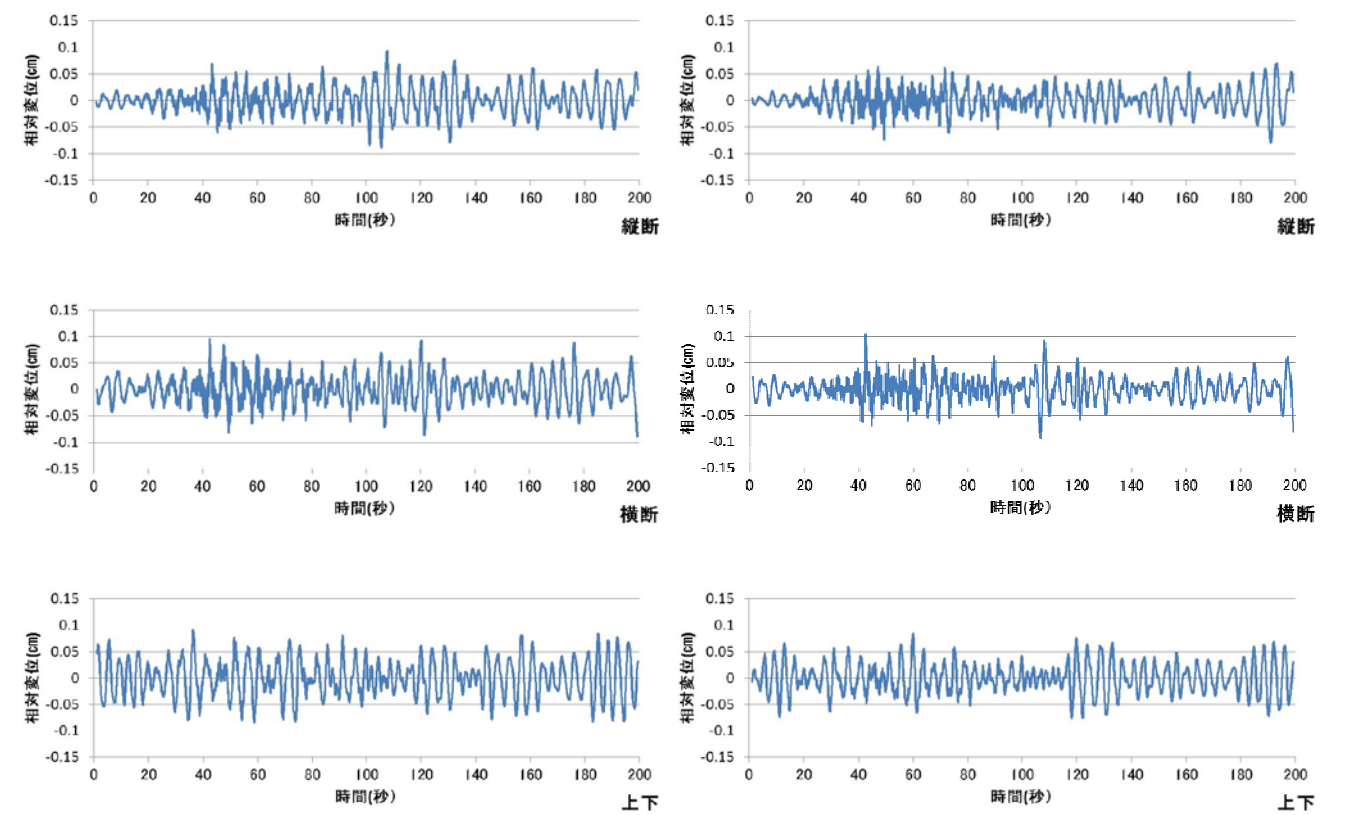


図 4.5.1-2 相対変位波形 2011 年 7 月 10 日の地震

左図：27.8k+150B 右図：27.8k+150T

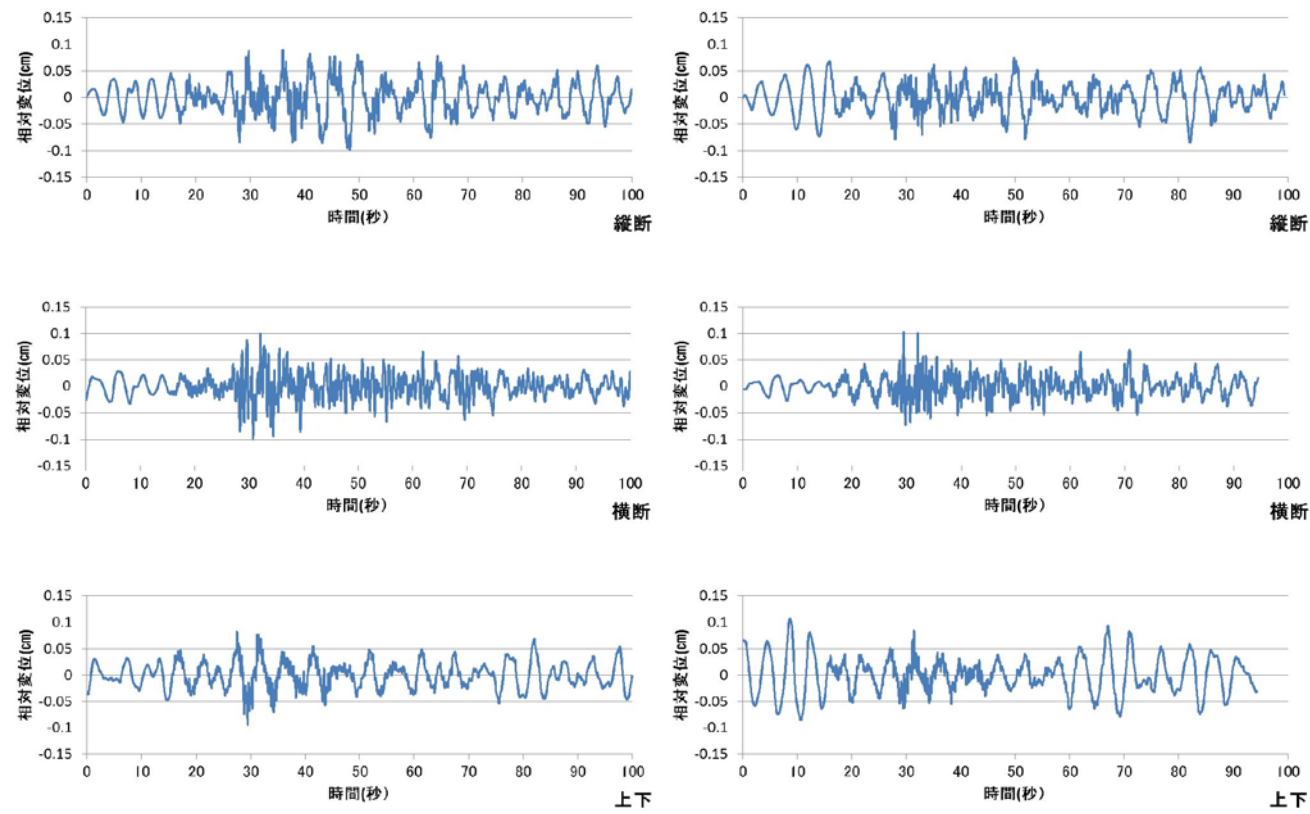


図 4.5.2-1 相対変位波形 2011年7月23日の地震  
左図：27.6kB 右図：27.6kT

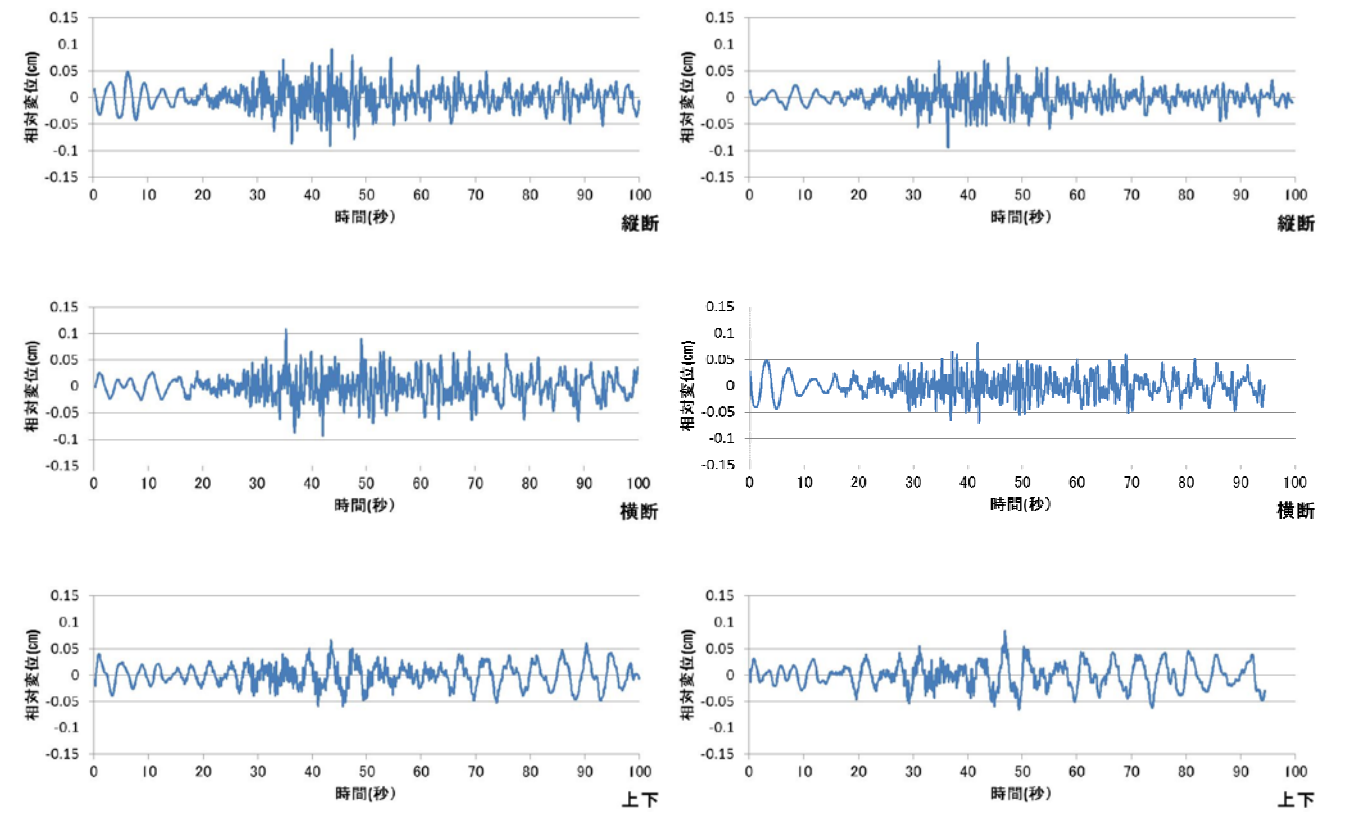


図 4.5.3-1 相対変位波形 2011年7月25日の地震  
左図：27.6kB 右図：27.6kT

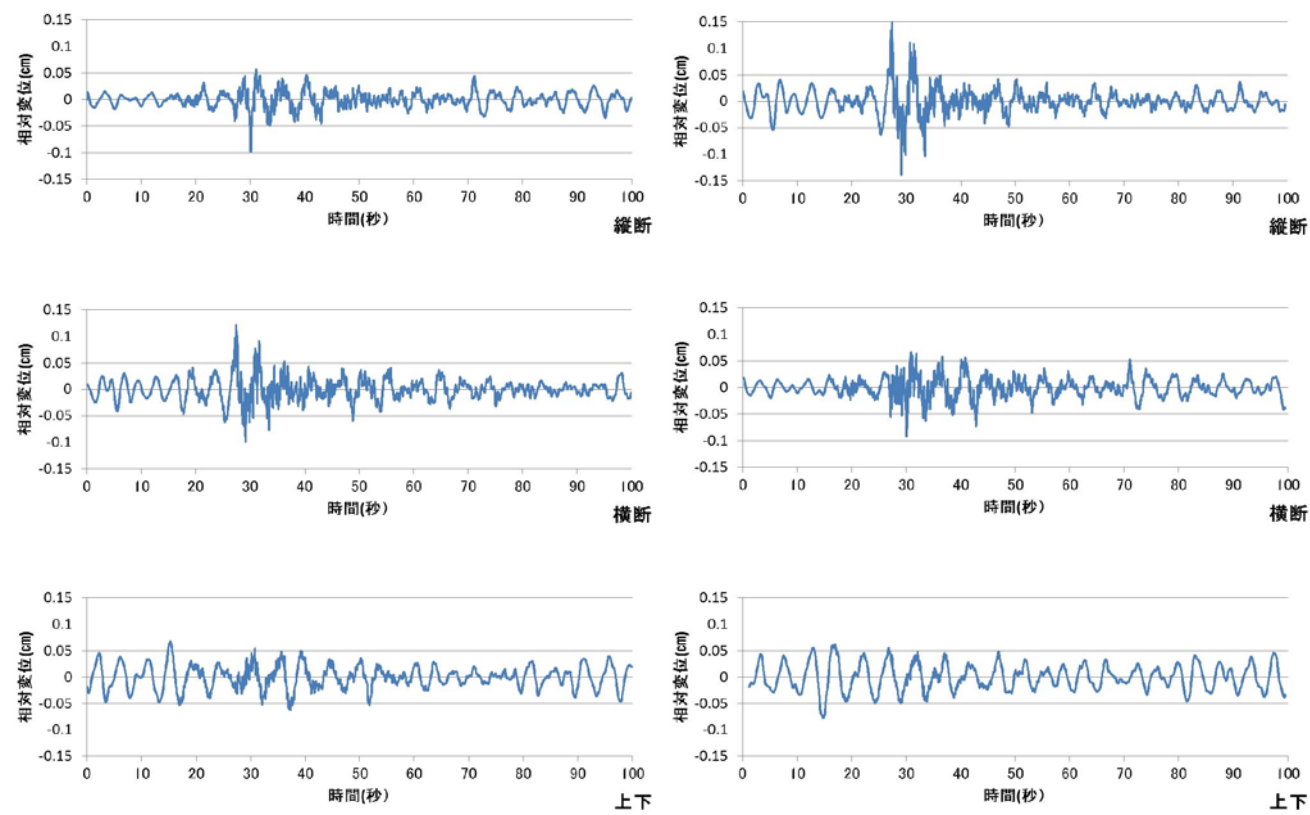


図 4.5.2-2 相対変位波形 2011年7月23日の地震  
左図：27.8k+150B 右図：27.8k+150T

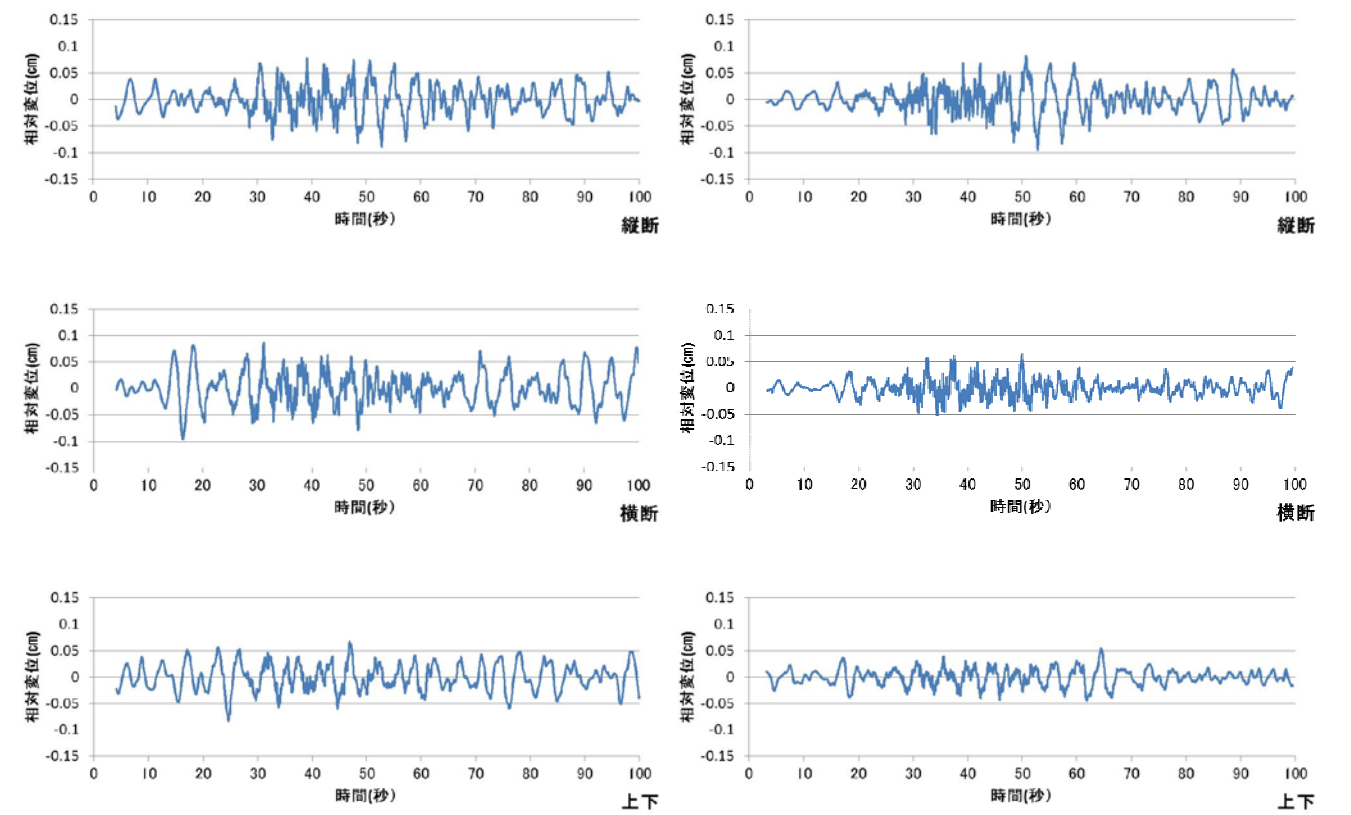


図 4.5.3-2 相対変位波形 2011年7月25日の地震  
左図：27.8k+150B 右図：27.8k+150T

#### 4.6 K-NET 記録との比較

観測された記録を座標軸回転させて、NS、EW 方向に変換し、K-NET 古川の変位波形との比較を行った。時刻ずれについては目視により初動を合わせるようにした。

図 4.6.1~4.6.3 に変位波形の比較を示す。波形の特徴や振幅は概ね K-NET 記録とよく対応している。

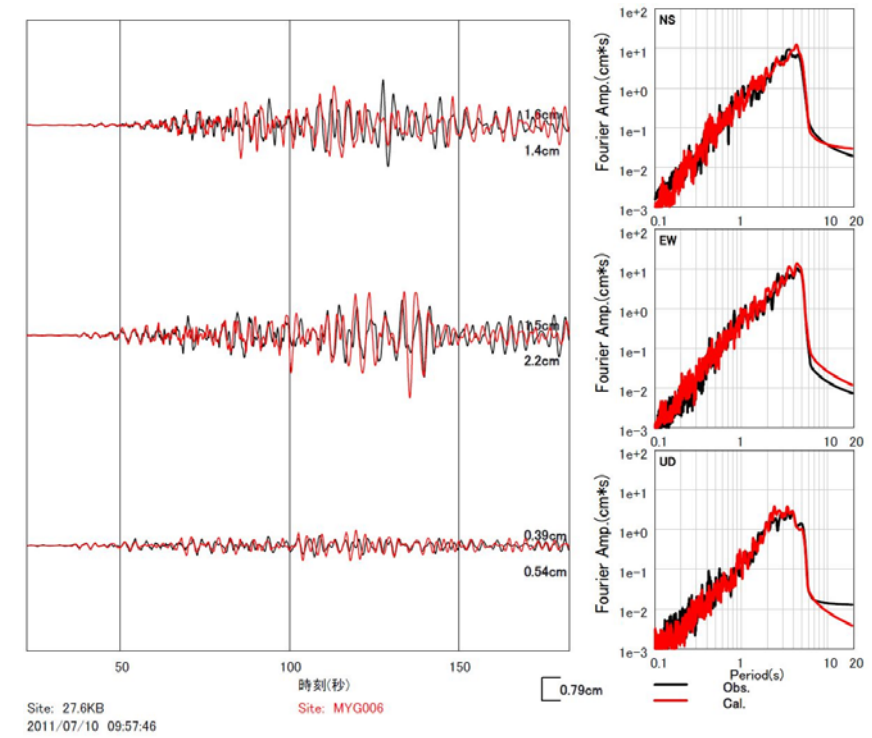


図 4.6.1-1 K-NET 古川との比較 変位波形 2011 年 7 月 10 日の地震  
黒 : 27.6kB 赤 : K-NET 古川

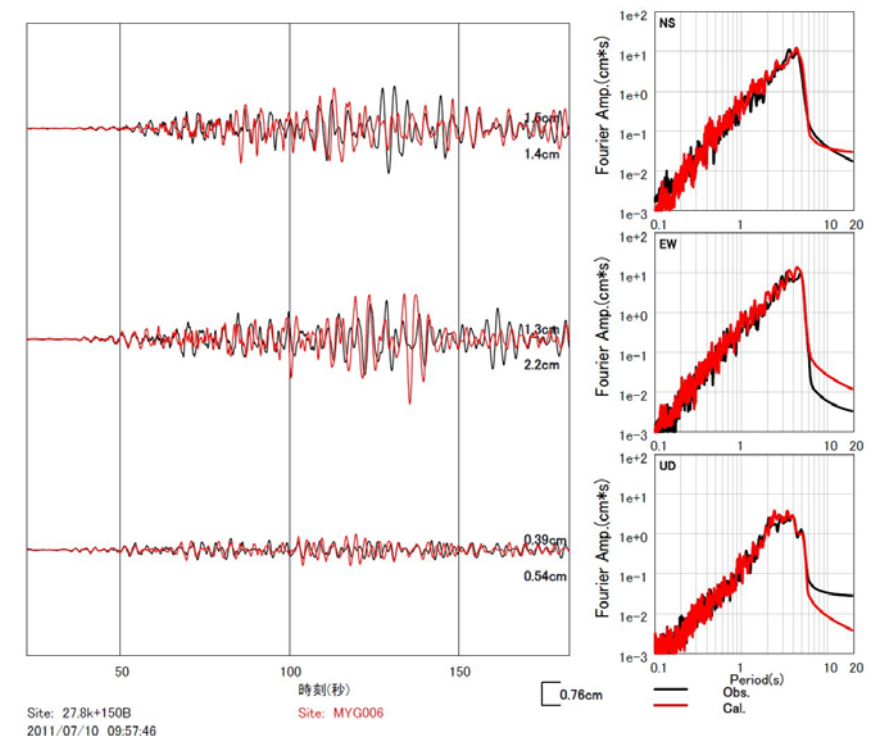


図 4.6.1-2 K-NET 古川との比較 変位波形 2011 年 7 月 10 日の地震  
黒 : 27.8k+150B 赤 : K-NET 古川

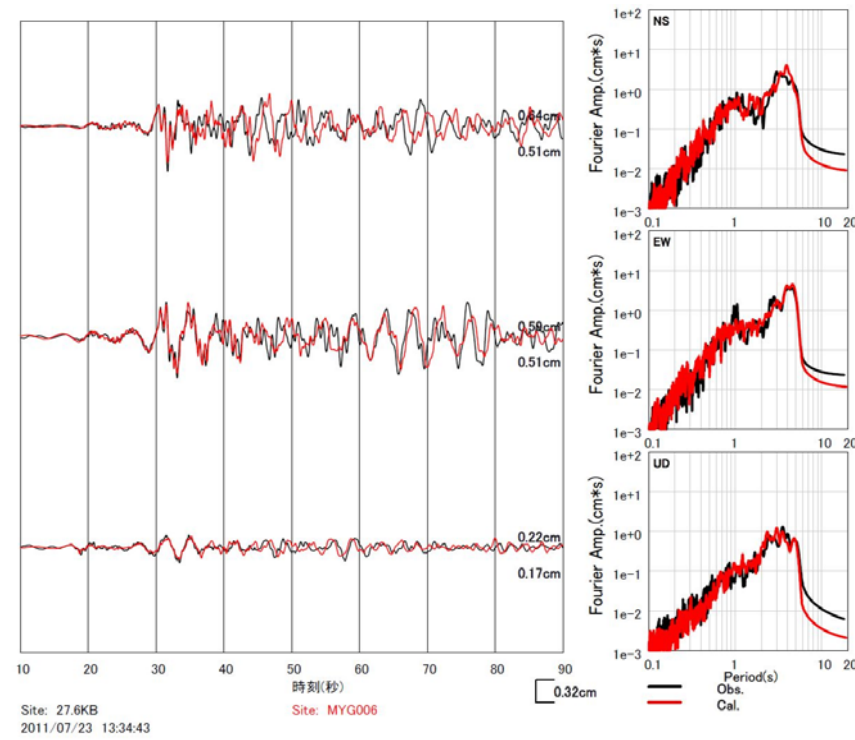


図 4.6.2-1 K-NET 古川との比較 変位波形 2011 年 7 月 23 日の地震  
黒 : 27.6kB 赤 : K-NET 古川

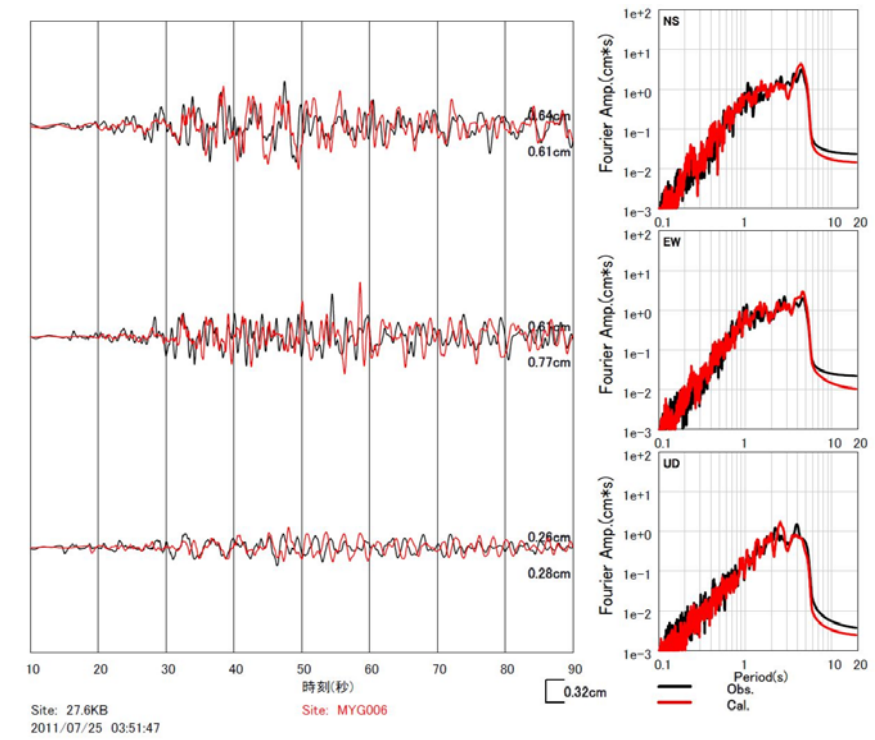


図 4.6.3-1 K-NET 古川との比較 変位波形 2011 年 7 月 25 日の地震  
黒 : 27.6kB 赤 : K-NET 古川

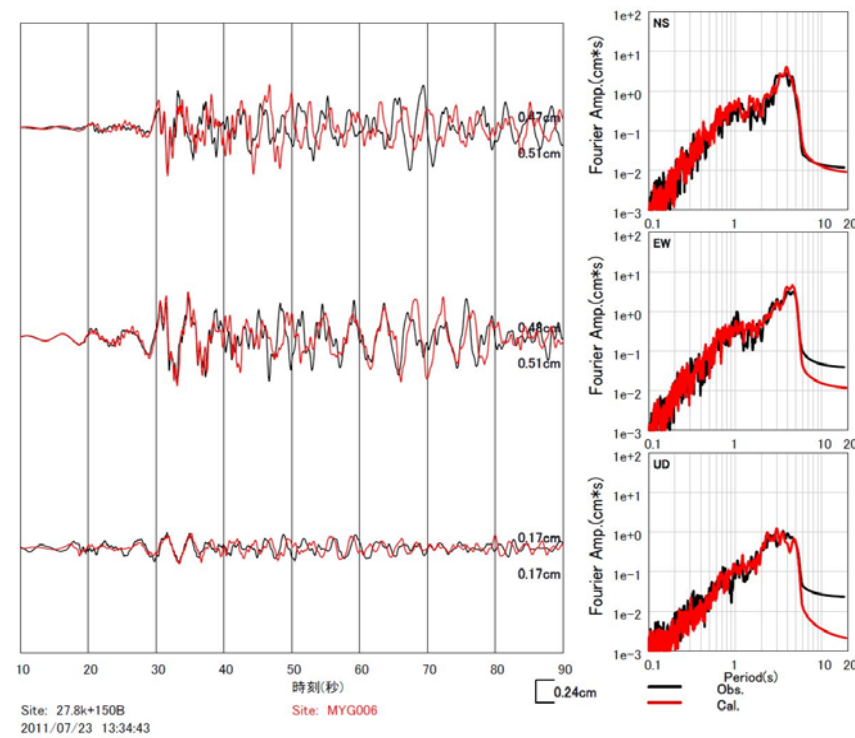


図 4.6.2-2 K-NET 古川との比較 変位波形 2011 年 7 月 23 日の地震  
黒 : 27.8k+150B 赤 : K-NET 古川

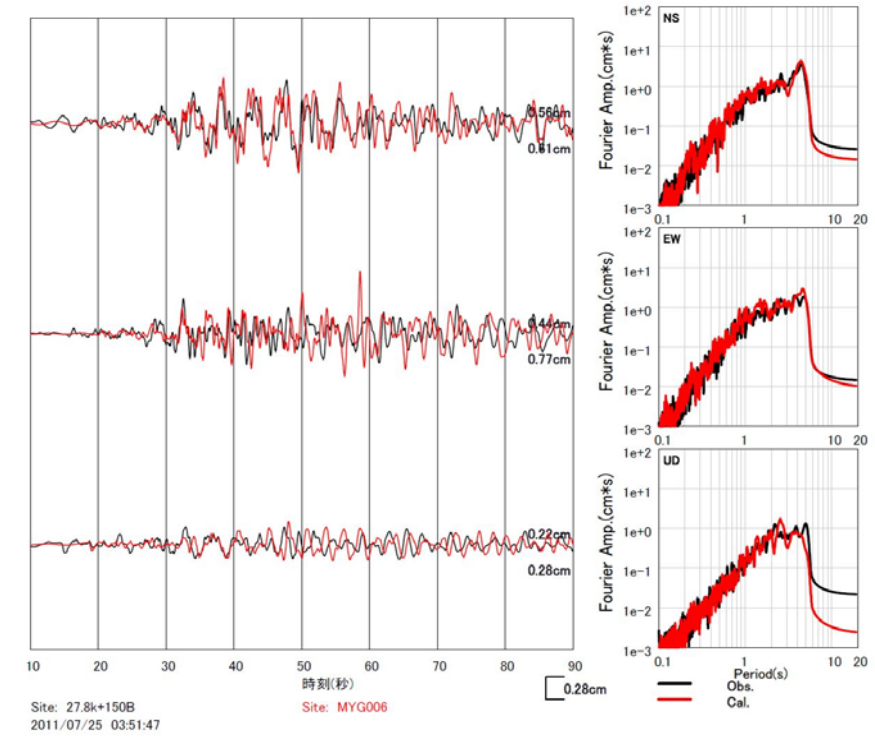


図 4.6.3-2 K-NET 古川との比較 変位波形 2011 年 7 月 25 日の地震  
黒 : 27.8k+150B 赤 : K-NET 古川

参考文献

汐見勝彦・佐々木俊二・酒井慎一・笠原敬司・関根秀太郎・中川茂樹・小原一成・平田直・棚田俊收, 2009, 地震動の長周期成分を用いた首都圏地震観測網 (MeS0-net) の設置方位推定、地震研究所彙報, 84, 115-125.