

# 堆積平野の不整形構造に伴う地震動伝播性状に関する研究

名古屋大学環境学研究科都市環境学専攻博士前期課程2年  
福和研究室 田中久美子

## 1. 序論

兵庫県南部地震における「震災の帯」形成は堆積層端部の基盤段差で生成される波と下方から伝播する実体波との干渉効果であると考えられている。この現象は濃尾平野の西端部においても発生する可能性が示唆されている。図1に示すように1944年の東南海地震被害率<sup>1)</sup>においても養老断層の東側で被害の大きい地域が見られる。この東海・東南海地震は今世紀中に再び起こると考えられており、その対策としても基盤段差構造における地震動伝播性状の解明は重要な課題である。このような背景から、兵庫県におけるシミュレーションや強震記録を用いた検討は数多く行われており、基盤段差構造により生成される波と下方からの波の干渉効果により局所的な応答増幅があるということは明らかにされている。しかし、基盤段差で生成される波の種類やその伝播経路などについて詳細に検討されたものは少ない。また、濃尾平野を対象とした研究も少ない。

そこで、本論では、単純な2層構造の基盤段差モデルの2次元FEM解析に基づき、詳細な基盤段差生成波の分析を行う。また、平成11・12・13年度に実施された濃尾平野地下構造調査結果<sup>2)</sup>を参考に実際の地盤に近いモデルを用いた解析的検討を行う。更に、濃尾平野西端部の基盤段差である養老断層に直交する測線上で2000年より行われている強震観測記録を用い、地震動の伝播方向による違いや解析との比較・検討を行う。

## 2. 基盤段差構造における波動伝播性状

### 2.1 解析概要

堆積層と基盤の2層モデルにより解析し、基盤段差での波動伝播性状について検討する。表1にモデルの物性値を、図2に解析モデルを示す。また、基盤段差で生成される波動のみを抽出するため、図2のモデル1による解析結果から図3に示す平行成層モデル（モデル2）の解析結果を引き、下方から伝播する実体波を取り除いた結果についても検討する。入射波はSH波とSV波の水平成分で時刻5秒にパルスを持つパルス幅0.02秒の三角パルス波とする。

表1 物性値

	Vs (m/s)	Vp (m/s)	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	減衰(%)
堆積層	1500	3600	2.3	0
基盤	3000	5000	2.7	0

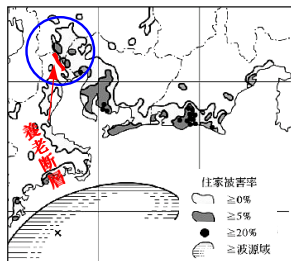


図1 1944年東南海地震の被害率<sup>1)</sup>

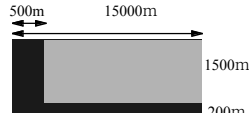


図2 モデル1

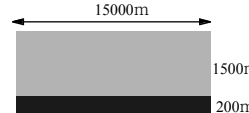


図3 モデル2

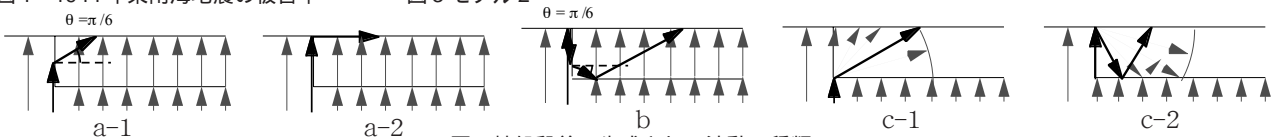


図4 基盤段差で生成される波動の種類

### 2.2 基盤段差生成波の種類

鉛直下方入射した際、基盤段差で生成されると理論的に考えられる波動の種類として以下の4種類が考えられる。このうちa)からc)の波動の伝播状態を図4に示す。黒の矢印が目にする波動である。d)の表面波は従来の研究ではa-2の経路を通ると考えられているが、生成位置などを確定できないため、ここでは表示しない。

a). 基盤段差面の基盤側を伝播し、屈折して堆積層内に伝播する波(a-1)と、同様に基盤段差面を伝播して地表から堆積層表面を伝播する波(a-2)。

b). 基盤段差面の基盤側を伝播し、地表面で反射した後、屈折して下向きに堆積層内を伝播する波。

c). 基盤段差の下部から同心円状に堆積平野内を伝播する波(c-1)とその反射波(c-2)。

d). 基盤段差面を伝播し、地表面で生成する表面波。

表1の物性値とスネルの法則より、鉛直下方入射の際に基盤段差面から堆積層に入射する時(a-1・b)の屈折角は $\pi/6$ である。

### 2.3 解析結果

図5にSH波入射とSV波入射のモデル1-モデル2の応答を5.1秒から0.2秒毎に7.1秒までスナップショットで示す。横軸に基盤段差からの距離、縦軸に地表からの深さをとる。SH波はz軸に振幅をとる3次元表示とし、SV波は水平成分と鉛直成分の応答をそれぞれ横軸と縦軸に示す。なお、振幅は波動の伝播する様子がわかりやすいよう倍率を変えて表示する。これより、図4に示した幾つかの異なる波動が伝播している様子が分かる。

### 2.4 走時曲線に基づく考察

図6にモデル1における解析結果の地表応答波を、縦軸に基盤段差からの距離をとってSH波とSV波についてそれぞれ並べて示す。

これより、鉛直下方から入射する実体波とその基盤での反射波が約6秒と約8秒にはっきりと確認できる。また、この実体波と基盤段差付近で生成した波動とが6秒付近において干渉していることが分かる。次に、図4に示した波の走時を計算し、走時曲線を求める。なお、a-2の地表を伝播する波の速度は、SH波入射の場合は堆積層のS波速度、SV波入射の場合は堆積層のP波速度として走時を計算する。図7に図6の波形からモデル2に入射させた時の地表応答波を引いた波形を、更に図4に示す波と下方から伝播する実体波とその反射波の走時曲線を重ねて図示する。

図7より、走時曲線と解析結果はよく対応している。SH波入射の場合はa-1・b・c-1・c-2の波動が卓越しており、SV波入射の場合はa-2の波動が卓越している。

図7において約6秒にある実体波の走時と交わる波動が干渉

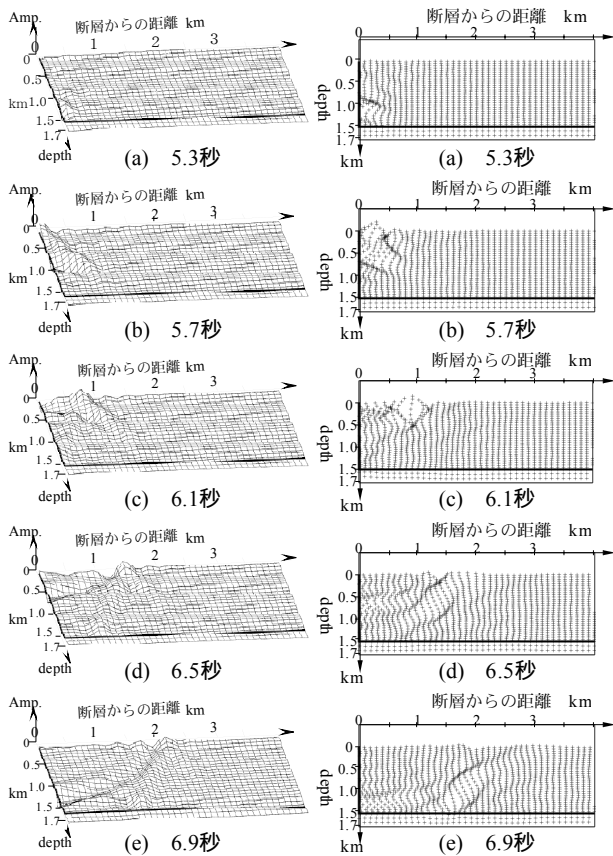


図5 モデル1からモデル2の解析結果を引いた

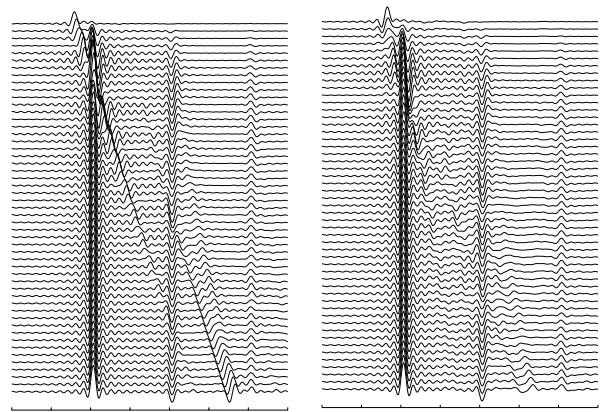
断面応答のスナップショット(左側:SH波、右側:SV波)

効果を生じる波動であると言える。以上より、SH波入射の場合はa-1の基盤段差面で屈折する波動、SV波入射の場合はa-2の基盤段差面の基盤側を伝播し地表から堆積層のP波速度で地表面を伝播する波動が、下方から伝播する実体波との干渉効果に寄与していると考えられる。また、図7において走時曲線に対応しない波群も幾つか見られるが、これは表面波であると思われる。

### 2.5 振幅に基づく検討

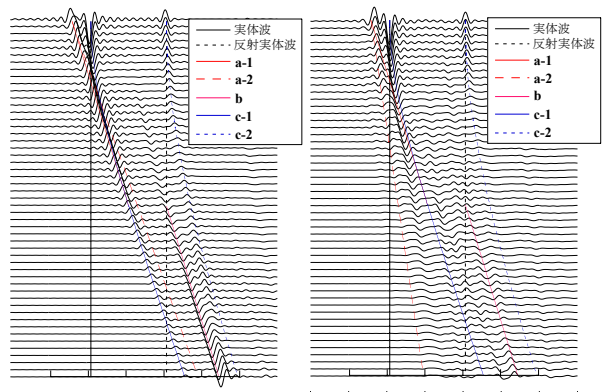
図8にモデル1に対する入射波がSH波とSV波についてそれぞれパルス波、中心周期1秒・2秒のリッカーウェーブレットの時の地表最大応答分布を示す。横軸に基盤段差からの距離を示す。これより、SH波入射の場合、入射波の周期によらず800mから1000m付近においてピークが生じているのに対し、SV波入射の場合は入射波の周期が長くなるほど基盤から離れた位置にピークが生じている。この原因として、先に述べたようにSH波入射の場合は図4.a-1の屈折波と干渉するが、SV波入射の場合は図4.a-2の波以外に表面波とも干渉していることが予想される。つまり、表面波の分散性により長周期になるほど伝播速度が速くなり、基盤段差から離れた位置で干渉していると考えられる。

図7の走時曲線より、約6秒で下方から伝播する実体波と基盤段差で屈折する波との交点は866mである。従って、SH波入射の場合、基盤段差から866mの位置で2つの波が干渉していると思われる。図8よりパルス波の場合の最大応答を示す位置は800mである。ただし、解析では堆積層のメッシュ幅を基盤段差から50m毎に設定してあるため、最大振幅は750mから850mの間で生じていることになり、走時曲線から得られる



(a) SH波入射 (b) SV波入射

図6 モデル1における地表応答波



(a) SH波入射 (b) SV波入射

図7 モデル1-モデル2における地表応答波と理論走時

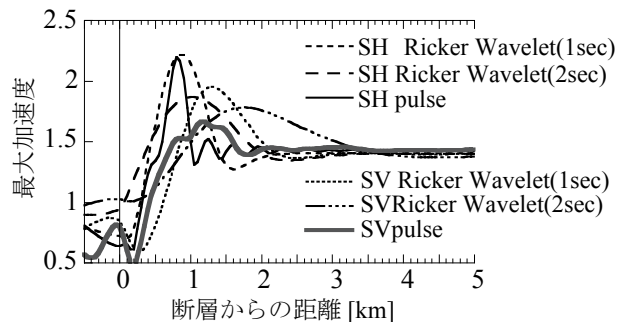


図8 モデル1における最大応答分布

干渉地点との対応は良い。

## 3. 濃尾平野における基盤段差構造の地震動伝播性状

本節では濃尾平野西端部の基盤段差による干渉効果について解析と強震記録から分析する。

### 3.1 強震計の設置状況が観測記録に与える影響

兵庫県南部地震以降、全国的に強震観測が盛んになり、濃尾平野においても自治体や大学などによって高密度に強震観測が行われている。本論ではこれらのサイトの設置状況が、サイト固有の影響を記録に与えていないか検討するため、最大加速度が系統的に大きくなっているか小さくなっているサイトを求めた。図9にその結果を示す。この原因としてサイトの地盤条件と設置状況の影響が考えられる。そこで、図9に示すように系統的に応答が小さくなっているサイトとそこから約3.5kmしか離れておらず、地盤条件が同じであると思われるサイトにおいて微動計測を行い、設置状況の影響について検討した。ここ

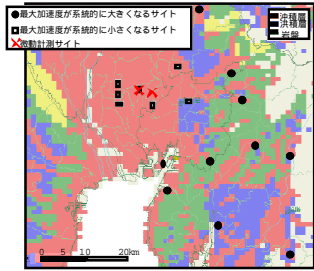


図9 水平成分の最大応答分布

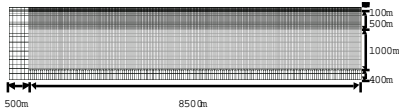


図10 濃尾平野基盤段差モデル

表2 解析モデルの物性値

	層厚 (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )
1	100	400	1500	1.8
2	500	900	2200	2.1
3	1000	1300	2800	2.3
4	300	3000	5000	2.5

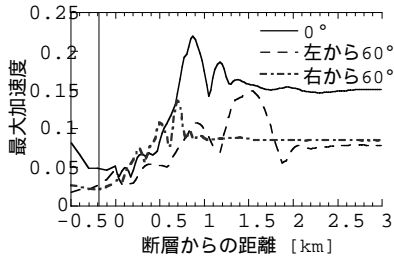


図13 水平成分の最大応答分布

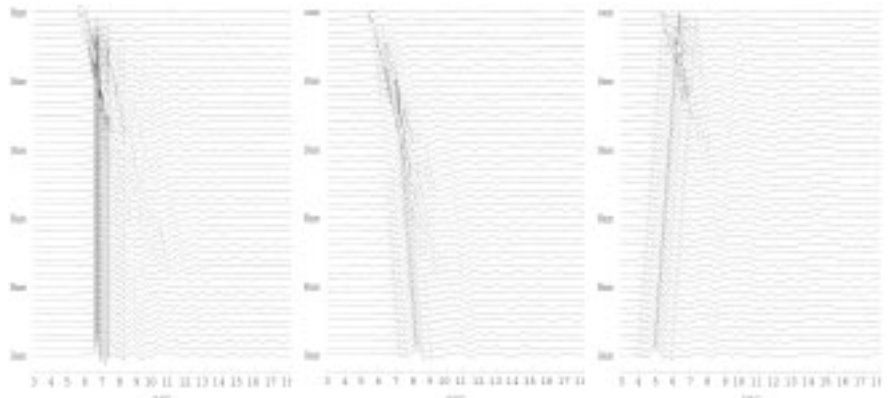
では、分析の詳細は省略するが、建物規模や建物からの距離によって、微動レベルでは影響があることが分かった。そのため、強震記録を用いる際にはその設置状況についても考慮して分析する必要がある。

### 3.2 解析に基づく検討

図10のように濃尾平野端部をモデル化し、2次元FEM解析を行った。用いた物性値及び層厚を表2に示す。実際には様々な方向から地震動は伝播するため、ここでは、入射角による地震動伝播性状の違いに着目する。パルスSV波を下方から入射角(a)0°、(b)左から60°、(c)右から60°で入射させる場合における地表震波形を図11に水平成分、図12に鉛直成分を基盤段差から5kmまで0.1km毎に並べて示す。図13に地表における水平成分の最大応答分布を示す。図11より、どの入射角においても基盤段差から伝播している波と下方から伝播する実体波とが干渉していることが確認できる。また、波形から読みとった干渉唾置と図13の最大値のピーク唾置との対応も良い。図12の鉛直成分より、下方から伝播する実体波が到達する前に基盤段差から伝播している波が認められ、特に入射角0°の鉛直下方入射の場合にこの波が卓越していることが分かる。左からと右から入射した場合にも基盤段差付近にこれらの波が卓越しており、単純化した2層地盤ではなく実際の地盤に近い場合においても基盤段差構造によって波が生成され、干渉していることが確認できる。

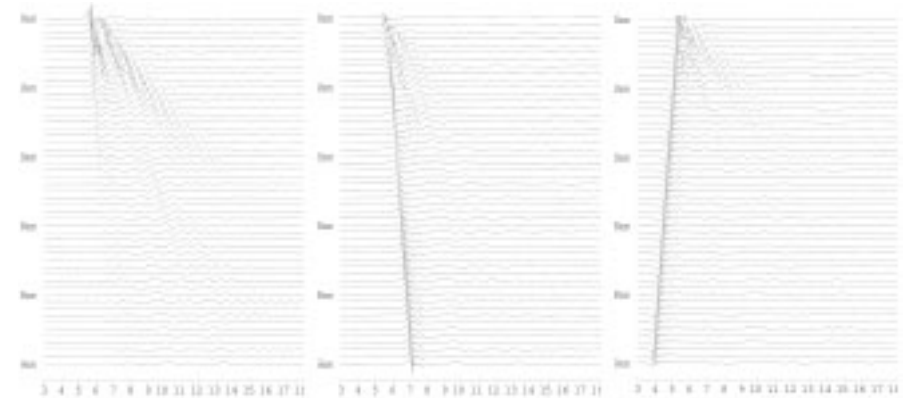
### 3.3 強震観測記録に基づく検討

養老断層に直交する測線上の観測記録について分析し、波の干渉による増幅が見られるか解析結果との比較・検討を行う。



(a) 鉛直下方入射 (b) 左から入射角 60° (c) 右から入射角 60°

図11 SV波入射における水平成分地表応答波の入射角による違い



(a) 鉛直下方入射 (b) 左から入射角 60° (c) 右から入射角 60°

図12 SV波入射における鉛直成分地表応答波の入射角による違い

図14に強震観測点と養老断層の唾置、本検討で用いた地震の震央唾置を示す。ここでは、3.2の解析同様、直下から伝播する愛知県西部地震、西から伝播する兵庫県北部地震、東から伝播する静岡県西部地震の3つについて検討する。強震観測は断層と直交した測線上で岩盤上のOKJO、堆積層上のTUCH、NISH、JYAK、OKANであり、OKJOが欠測している兵庫県北部地震では同じ岩盤上の22214Aの記録を用いる。また、KiK-netの羽島(GIFH09)の記録も用いる。実測記録には様々な振動数成分の波が含まれており、下方から伝播する実体波と基盤段差生成波を見分けることが困難である。そこで、本論では非常常スペクトルより実体波部分とそれ以外の後続の部分の波群において優勢な振動数成分のフィルターを速度波形に施すことによって、それぞれの波群の伝播性状について検討する。図15に(a)愛知県西部地震、(b)兵庫県北部地震、(c)静岡県西部地震の断層直交

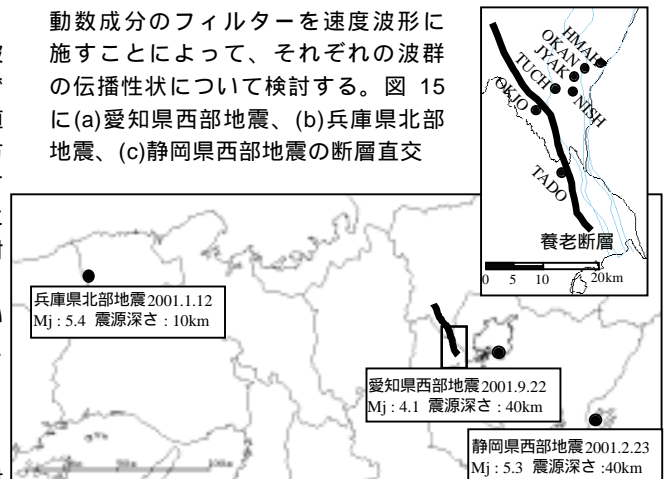


図14 検討に用いる強震観測点と地震

方向の速度波形を示す。縦軸はそれぞれ養老断層からの距離に比例する位置に示す。ただし、兵庫県北部地震の 22214A 地点は OKJO の代用であるため、OKJO と同じ位置に示してある。図 15 より、岩盤上の OKJO や 22214A に比べ、平野内では応答が増幅していることが分かる。また、西・東から伝播する兵庫県北部地震と静岡県西部地震は平野内において継続時間が非常に長くなっている。

図 16 に実体波が優勢と思われる 3Hz フィルター波形を図 15 と同様に示す。これより、幾つかの波群が一定間隔で見られるが、これは実体波が地表に到達した後、堆積層内を繰り返し反射した波であると考えられる。

また、図 17 に基盤段差で生成されたと考えられる振動数成分のフィルター波形を図 15 と同様に示す。図 17 の (a) 愛知県西部地震を見ると幾つかの速度で伝播する波群を確認することが出来る。この波群と実体波は TUCH 地点付近かそれよりも断層側で干渉している可能性が高い。これらの波群を結びと基盤段差付近から伝播しており、基盤段差生成波である可能性が高い。これと同様の傾向が (b) の兵庫県北部地震にも見られるが、この地震は震源が浅いため濃尾平野に到達する以前に既に表面波が生成されているため、様々な振動数成分の波が伝播していると考えられる。また、東から伝播する (c) 静岡県西部地震は図 16 のフィルター波形においても複雑な形状をしており、実体波と基盤段差生成波を分割することが困難であった。

#### 4 結論

本論では、解析と実測から平野端部の基盤段差構造に伴う地震動伝播性状について検討してきた。その結果、解析では SH 波の場合は基盤段差面に屈折する波、SV 波は基盤段差で生成される表面波との干渉が支配的であると考えられる。干渉位置の基盤段差からの距離は SH 波が 0.8~1km 付近、SV 波が 1~2km 付近である。

また、濃尾平野を対象とした入射角の違いによる検討を行った。その結果、解析からは基盤段差側から斜め入射した場合の方が逆から斜め入射した場合よりも基盤段差に近い位置で干渉することが分かった。実測においては解析同様、伝播方向の異なる 3 つの地震について検討し、直下からと左から伝播する地震においては干渉している可能性が高いことが分かった。しかし、強震観測点は基盤段差に最も近い地点でも約 3km 離れているため、1~2km 付近で干渉しているという解析結果と調和的とは言い難い。そのため、今後は観測点を増やすことや他の地震についても検討し、モデルの形状などを变化させた解析などが必要である。

#### 参考文献

- 1) 宮村撰三：東海道地震の震度分布（その 1），地震研究所彙報，24，pp.99-134，1946
- 2) 愛知県：平成 11 年度愛知県濃尾平野地下構造調査報告書，平成 9 年度尾張西部地域活断層調査報告書

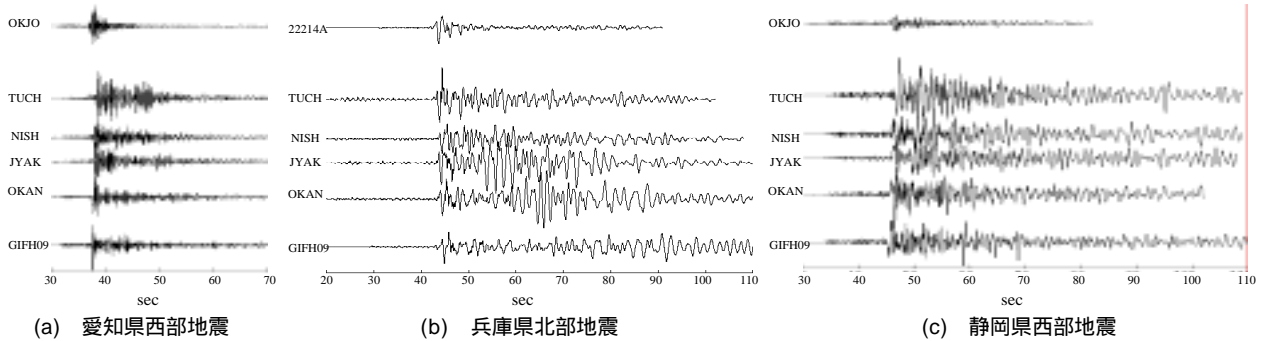


図 15 速度波形

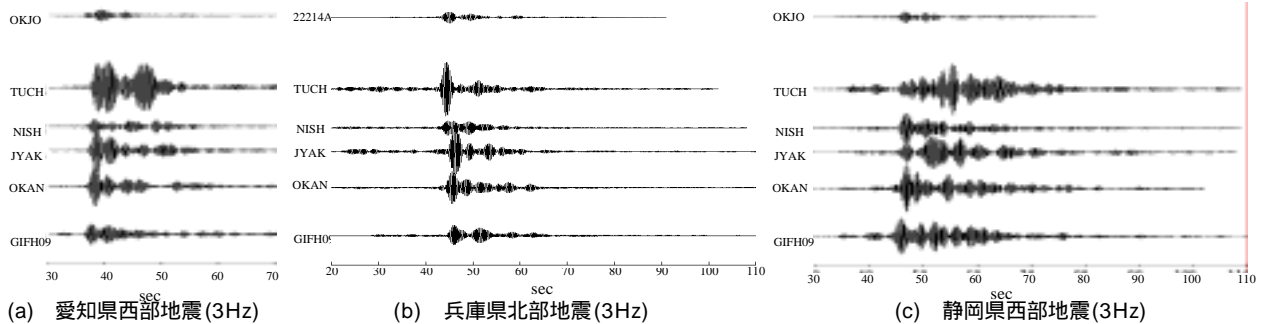


図 16 実体波成分が優勢なフィルター波形

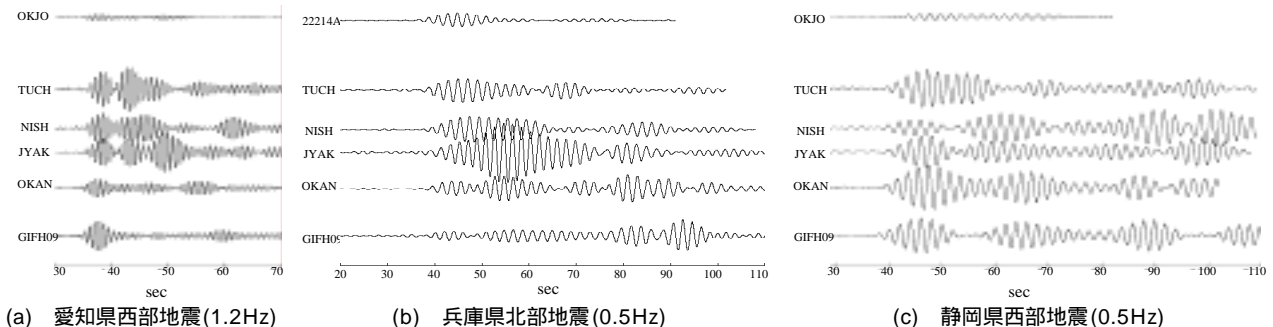


図 17 実体波以外の振動数成分優勢なフィルター波形