

建築研究資料

Building Research Data

No. 147

September 2013

超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討
- 南海トラフ4連動地震による超高層・免震建物の応答解析 -

STUDY ON LONG-PERIOD GROUND MOTIONS AND RESPONSES OF
SUPER-HIGH-RISE BUILDINGS ETC.

- Evaluations of responses of super-high-rise and seismically-isolated
buildings under the hypothetical maximum level earthquake in Nankai
trough region -

大川出、佐藤智美、佐藤俊明、藤堂正喜、
北村春幸、鳥井信吾、辻泰一、北村佳久

Izuru Okawa, Toshimi Satoh, Toshiaki Sato, Masanobu Tohdo,
Haruyuki Kitamura, Shingo Torii, Yasukazu Tsuji, Yoshihisa Kitamura

独立行政法人 建築研究所

Published by

Building Research Institute

Incorporated Administrative Agency, Japan

はしがき

近い将来にわが国近海の高層域において巨大地震が発生することが確実視され、その結果として想像を絶する大災害の発生が危惧されている。地震による津波災害のほか、建築分野では、発生する長周期地震動により、大都市域に多く建設されてきた超高層建築物や、現在広く建設が進められている免震建築物などの固有周期が長い建築物への影響が懸念されている。

建築研究所は、建築物への長周期地震動の影響について、平成 23 年度に着手した個別重点研究課題「長周期地震動に対する超高層建築物等の応答評価技術の高度化」（平成 23-24 年度）の関連課題において、建築基準整備促進事業の平成 23、24 年度の課題「超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討」の事業主体の（株）大崎総合研究所のほか、（社）日本建築構造技術者協会、（社）日本免震構造協会と共同研究を行った。本資料は、平成 24 年度に実施した共同研究の検討内容をとりまとめたものである。

長周期地震動については、本資料既刊の第 127 号、第 144 号で取り扱ってきた。いずれも、巨大地震に伴う各地の長周期地震動及びその影響を予測する試みである。第 127 号では、既往の観測データに基づいて予測手法を開発し、南海トラフでの巨大地震による地震動シミュレーションを行ない、第 144 号では、その予測手法について 2011 年東北地方太平洋沖地震の強震観測データを用いた見直しを行った上で、南海トラフ 3 連動巨大地震に適用し長周期地震動のシミュレーションおよび超高層、免震両建築物の応答特性の検討を行っている。

本資料第 147 号は、内閣府が公表した南海トラフ 4 連動地震などの最大級とされるマグニチュード 9 クラスの震源モデルに基づいて、長周期地震動のシミュレーションを行うとともに、第 144 号と同様にそれら地震動の建築物への影響について検討を行ったものである。

本作業の実施にあたっては、当該分野を専門とする大学や民間の研究者にもご参加をいただきながら検討を進めた。これらのご協力に対して、厚く御礼申し上げます。

2013 年 9 月

独立行政法人建築研究所
理事長 坂本 雄三

超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討 -南海トラフ4連動地震による超高層・免震建物の応答解析-

大川出¹⁾、佐藤智美²⁾、佐藤俊明³⁾、藤堂正喜²⁾、
北村春幸⁴⁾、鳥井信吾⁵⁾、辻泰一⁶⁾、北村佳久⁷⁾

概要

国土交通省の建築基準整備促進事業では、平成20-22年度に課題「超高層建築物等の安全対策に関する検討」のなかで、長周期地震動の予測式の提案を行なった。平成23年度の建築基準整備促進事業では、提案予測式を活用した国土交通省の平成22年12月「超高層建築物等における長周期地震動への対策試案」へのさまざまな意見（パブリックコメント）および、2011年東北地方太平洋沖地震での観測記録の特性も踏まえて、予測式の改良版を提案した。

主な改良点は、二つあり、一つは、提案式をMw=9のマグニチュードまで適用可能にし、さらに規模が大きい地震については観測値への対応を考えて、頭打ちを導入した。もう一つは、わが国の東側の太平洋プレートと南西側のフィリピン海プレート（南海トラフ）で起こる地震について伝播特性に違いがあること、また関東地域の地震基盤が深い観測点で増幅率および伝播特性に違いがあることを確認し、それを評価式に反映したことである。さらに改良評価式を2003年内閣府が提示した南海トラフ3連動地震の震源モデルに適用し地震動を作成し、超高層・免震建築物の代表的モデルを用いた地震応答解析を行って、その応答レベルについて考察、整理している。

本報告は、南海トラフにおけるM9クラスの超巨大震源（内閣府設定）に対して、建築基準整備促進事業の平成23年度成果である長周期地震動の改良（新）予測式を適用し、主要地点における長周期地震動時刻歴を作成して、平成23年度と同様に超高層、免震各建築物の地震応答解析を行い、その結果についてまとめたものである。

また、予測手法は主として、観測データに基づくためデータが得られた観測地点における長周期地震動の予測に重点が置かれてきたが、今後開発手法の実務への適用性の観点から、任意地点における長周期地震動の予測手法への発展可能性についても検討した。具体的には、長周期地震動の特性が深い地下構造と関わりがあることが知られており、最近情報が増加しているこれらの地下構造データと地盤増幅、地震動震幅の時間変動の関わりについても検討し、実用的な手法の提案を行っている。

本検討の主要部分は、平成24年度建築基準整備促進事業の事業主体である（株）大崎総合研究所と（独）建築研究所との共同研究により実施した。検討を進めるにあたり、当該分野を専門とする大学や民間の研究者のご意見を反映させるため、事業主体が地震動・応答WGを設置した。さらに、（社）日本建築構造技術者協会及び（社）日本免震構造協会も共同研究に参加し、超高層建築物や免震建築物の応答特性については、それぞれSWGを設置して検討を行った。これらの委員リストを後に示す。

- 1) (独)建築研究所
- 2) (株)大崎総合研究所
- 3) 清水建設(株)技術研究所
- 4) 東京理科大学工学部
- 5) (株)日建設計構造設計部門
- 6) 鹿島建設(株)建築設計本部
- 7) 清水建設(株)設計本部

STUDY ON LONG-PERIOD GROUND
MOTIONS AND RESPONSES OF SUPER-HIGH-RISE BUILDINGS ETC.

- Evaluations of responses of super-high-rise and seismically-isolated buildings under the
hypothetical maximum level earthquake in Nankai trough region -

by

Izuru Okawa¹⁾, Toshimi Satoh²⁾, Toshiaki Sato³⁾, Masanobu Tohdo²⁾,
Haruyuki Kitamura⁴⁾, Shingo Torii⁵⁾, Yasukazu Tsuji⁶⁾, Yoshihisa Kitamura⁷⁾

ABSTRACT

A revision of the formula predictive of the long-period motions incorporating the recorded data collected during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake and its aftershocks were reported in our previous report, the Building Research Data Vol.144. According to the report, the revised formula considers the differences in source regions, i.e., the Philippine Sea Plate and the Pacific Sea Plate.

In this report, the prediction rules were established on the determination of site coefficients regarding site amplification and the group delay time for any selected site that is not given as recording station. These site coefficients are related with the travelling time of seismic wave from seismic to engineering bedrock underlying the site.

In addition, the revised formula was applied to the hypothetical largest seismic source in the Nankai trough zone that was set up by the Central Disaster Management Council (CDMC), Cabinet Office in 2012 to simulate the long-period earthquake motions. The simulated long-period motions were compared with the computed motions from the three-connected Nankai trough subduction zone that was reported in our previous report. The earthquake motions for the principal sites, the west of Shinjuku in Kanto plain, Tsushima, west of Aichi Prefecture, in Nobi plain, and Konohana, on the Osaka bay and Hamamatsu just on the seismic source were computed with the average-level motions. The computed motions were further used as input motions for response computations of high-rise buildings and base-isolated buildings. Various analytical models were selected with both classes of buildings. The high-rise buildings include types of steel and reinforced concrete, and height of buildings with 100 m through 250 m. The base-isolated buildings were selected with respect to the construction periods, types of super structures and height, and also the types of control devices such as rubber bearings and/or dampers. Totally twenty two analytical models were selected to use for analyses.

The responses of super-high-rise buildings became fairly larger than the design criteria limit and exceed the responses with the three-connected ones. The responses of base-isolated buildings also became excessive, and considerably larger than those for three-connected one.

This paper gives the basic data for considering how the design earthquake motions should be, in case one is faced to the unprecedented large earthquake motions.

- 1) Building Research Institute, 2) Ohsaki Research Institute
- 3) Institute of Technology, Shimizu Corporation, 4) Tokyo University of Science
- 5) Nikken Sekkei, Inc., 6) Kajima Corporation, 7) Shimizu Corporation

目 次

第1章	はじめに	1-1
第2章	改良経験式の連動型地震に対する適用性と信頼性の向上に資する検討	2-1
2-1	背景・目的	2-1
2-2	任意地点での長周期地震動の計算方法の検討	2-3
2-3	南海トラフ沿いの巨大地震に対する地表における長周期地震動波形の計算と地震動特性の設定方法の検討	2-79
2-4	工学的基盤における内閣府による計算波と本業務の計算波の比較	2-140
2-5	東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーションの整理	2-215
2-6	考察とまとめ	2-227
第3章	超高層建物の地震応答計算	3-1
3-1	はじめに	3-1
3-2	地震動概要	3-2
3-3	超高層建物の応答解析結果	3-12
3-4	S80m 級モデル建物の部材損傷評価	3-29
第4章	免震建築物の地震応答計算	4-1
4-1	検討用入力地震動	4-1
4-2	検討用建物	4-3
4-3	応答解析結果	4-4
4-4	エネルギー吸収に関する検討	4-17
4-5	地震動のばらつきに関する検討	4-37
4-6	まとめ	4-44
第5章	まとめ	5-1

執筆者リスト

第1章	大川 出((独)建築研究所)
第2章	佐藤智美((株)大崎総合研究所)、藤堂正喜((株)大崎総合研究所)、 佐藤俊明((株)清水建設)
第3章	北村春幸、鳥井信吾、辻泰一(日本建築構造技術者協会・長周期地震動 SWG)
第4章	北村佳久(日本免震構造協会 長周期地震動 SWG)
第5章	大川 出(前掲)

検討委員会・WG の設置について

平成 24 年度国土交通省建築基準整備促進事業「超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討」の検討のため、事業主体である（株）大崎総合研究所が事務局となり、以下の地震動・応答 WG が設置された。また、共同研究に参加した（社）日本建築構造技術者協会及び（社）日本免震構造協会において、超古層建築物及び免震建築物の応答解析を実施するため、それぞれ長周期地震動 SWG が設置された。

地震動・応答 WG および各 SWG 委員リストを以下に示す。

地震動・応答 WG 名簿（事務局：（株）大崎総合研究所、平成 25 年 3 月現在）

主査 大川 出 （独）建築研究所
委員 西川孝夫 （社）日本免震構造協会：首都大学東京（名誉教授）
委員 北村春幸 東京理科大学
委員 瀬瀬一起 東京大学
委員 翠川三郎 東京工業大学
委員 久田嘉章 工学院大学
委員 勝俣英雄 （株）大林組
委員 小鹿紀英 （株）小堀鐸二研究所
委員 長島一郎 大成建設（株）
委員 鳥井信吾 （社）日本建築構造技術者協会：（株）日建設計
委員 北村佳久 （社）日本免震構造協会：清水建設（株）
委員 加藤研一 （株）小堀鐸二研究所
委員 佐藤俊明 清水建設（株）
委員 藤堂正喜 （株）大崎総合研究所
委員 佐藤智美 （株）大崎総合研究所
委員 飯場正紀 （独）建築研究所
委員 五條 涉 （独）建築研究所
委員 小山 信 （独）建築研究所
委員 斉藤大樹 豊橋技術科学大学
委員 前田 亮 国土交通省住宅局
委員 岡野大志 国土交通省住宅局
委員 岩崎和明 国土交通省住宅局
委員 向井昭義 国土交通省国土技術政策研究所
委員 小豆畑達哉 国土交通省国土技術政策研究所

日本建築構造技術者協会（JSCA）長周期地震動 SWG 委員リスト

- 主査 北村 春幸 東京理科大学
委員 遠藤 文明 (株)大林組
委員 大川 出 (独)建築研究所
委員 片山 貴裕 (株)NTTファシリティーズ
委員 木村 雄一 大成建設(株)
委員 小鹿 紀英 (株)小堀鐸二研究所
委員 小林 光男 (株)織本構造設計
委員 斉藤大樹 豊橋技術科学大学
委員 須賀 貴之 東京理科大学
委員 溜 正俊 (株)三菱地所設計
委員 田村 和夫 千葉工業大学
委員 辻 泰一 鹿島建設(株)
委員 出水 俊彦 佐藤工業(株)
委員 藤堂 正喜 (株)大崎総合研究所
委員 鳥井 信吾 (株)日建設計
委員 中島 徹 大成建設
委員 長瀬 正 (株)竹中工務店
委員 長谷川 隆 (独)建築研究所
委員 早野裕次郎 (株)山下設計
委員 東野 雅彦 (株)竹中工務店
委員 人見 泰義 (株)日本設計
委員 正月 俊行 (株)構造計画研究所
委員 松井 和幸 清水建設(株)
委員 依田 博基 (株)久米設計

日本免震構造協会 (JSSI) 長周期地震動 SWG 委員リスト

主査	北村 佳久	清水建設(株)
委員	鹿島 孝	(株)竹中工務店
委員	北村 春幸	東京理科大学
委員	公塚 正行	(株)i2s2
委員	近藤 明洋	鹿島建設(株)
委員	高山 峯夫	福岡大学
委員	田村 和夫	千葉工業大学
委員	竹中 康雄	鹿島建設(株)
委員	中澤 昭伸	(株)織本構造設計
委員	中島 隆裕	(株)久米設計
委員	中塚 光一	大林組(株)
委員	西川 耕二	(株)日本設計
委員	長谷川 豊	オイレス工業(株)
委員	花井 勉	えびす建築研究所(株)
委員	早部 安弘	大成建設(株)
委員	山本 裕	(株)日建設計
委員	飯場 正紀	(独)建築研究所
委員	大川 出	(独)建築研究所
委員	斉藤 大樹	豊橋技術科学大学
委員	西川 孝夫	(社)日本免震構造協会：首都大学東京 (名誉教授)
委員	可児 長英	(社)日本免震構造協会

第1章 はじめに

国土交通省建築基準整備促進事業では、平成 20～22 年度に課題「超高層建築物等の安全対策に関する検討」のなかで、長周期地震動の予測式の提案を行ない、その成果は、国土交通省・平成 22 年 12 月「超高層建築物等における長周期地震動への対策試案」に活用された。さらに平成 23 年度同事業では試案に対するさまざまな意見（パブリックコメント）や、2011 年東北地方太平洋沖地震での観測記録の特性も踏まえて、予測式の改良版を提案し、2003 年内閣府が提示した南海トラフ 3 連動地震の震源モデルに基づいた地震動を作成し、その地震動に対する超高層・免震建築物の代表的モデルを用いた地震応答解析を行い、その応答レベルについて考察、整理している。後者の検討については建築研究資料第 144 号で公表している。

平成 24 年に内閣府は、新たに南海トラフにける最大級の地震として M9 クラスの超巨大震源モデルを設定し、それに対する地震被害想定を公表した。

本報告は、上記最大級の南海トラフ・超巨大震源に対して、平成 23 年度成果の長周期地震動の改良（新）予測式を適用し、主要地点における長周期地震動時刻歴を作成し、前年度と同様に、超高層、免震各建築物の地震応答解析を行い、その結果についてまとめた。

第 2 章以下、各章の作業内容の概要は以下の通りである。

第 2 章では、まず内閣府(2012)の南海トラフ沿いの巨大地震の断層モデル(Mw9.0)に基づき、4 個のセグメントに対応した 4 つの巨視的断層面から成る 4 連動の震源モデルを設定し、改良経験式を用いて長周期地震動(平均波)を試算した。さらに、地形的な構造単位に基づき 6 枚の巨視的断層面からなる震源モデルを設定し、長周期地震動を作成した。並行して、平均的な波の選択・作成方法の検討、震源断層の矩形化の有無の影響の検討、関東平野、濃尾平野、大阪平野を対象にサイト地盤増幅率、群遅延時間のサイト係数の面的補間の検討、面的補間を用いた 4 連動 6 セグメントモデルでの長周期地震動の作成、工学的基盤でのサイト係数の再検討、さらに他プロジェクト、他研究との比較を行っている。

第 3 章では、23 年度と同様、実在する物件に近い超高層建築物・解析モデルを用いて、長周期地震動を入力地震動として、応答解析を行ない、各建築物の層間変形角など種々指標の高さ分布を示した。入力地震動は、23 年度と同様に、大阪市此花(OSKH02)、愛知県津島市(AIC003)、東京都新宿(KGIN)、静岡県浜松市(SZ0024)の 4 地点で評価された地震動時刻歴を用いている。

また、3 連動地震について、昨年度(2011)の改良式による地震動による各応答値と、今年度行った 4 連動地震動に対する応答解析結果について比較を行っている。

第 4 章では、23 年度と同様に、各種代表的免震建築物について既存免震建築物の解析モデルを用いた地震応答解析を行った。入力地震動は第 3 章の超高層建築物と同じで、第 2 章で求めた内閣府設定

の Mw9 巨大地震（4連動）である。本章でも、昨年度における同じく内閣府震源に基づく 3 連動地震動に対する応答計算結果との比較を行っている。

検討の詳細とまとめは各章ごとに記述している。

第 5 章では、以上の検討事項について整理し、今後の課題等についても整理した。

本課題には、(独) 建築研究所、事業者の(株)大崎総合研究所の他に(社) 日本建築構造技術者協会、(社) 日本免震構造協会が共同研究者として参画している。

第2章 改良経験式の連動型地震に対する適用性と信頼性の向上に資する検討

2-1 概要

建築研究資料第144号では、東北地方太平洋沖地震及びその余震によるデータ等を用いて、長周期地震動の経験式の改良を行った。改良経験式は、観測点がある地点のみで計算が可能であった。そこで、今年度は、改良経験式による任意の建設地点での評価方法を検討する。また、南海トラフ沿いの巨大地震や東北地方太平洋沖地震のような連動型地震に対する、震源モデル設定方法を検討し、地震動作成手法、設定手法の適用性の検討を行う。そして、内閣府(2012)の南海トラフ沿いの巨大地震(Mw9.0)の震源モデルに基づき、長周期地震動を作成し、内閣府(2012)が公開している地震動(周期3秒程度以下が有効範囲)との比較を行う。これらの検討の中で、各種ばらつきを評価し、地震動設定手法を検討する。

まず、建築研究資料第144号で作成した改良経験式の概要を、以下に示す。

周期 T の関数である減衰定数5%の絶対加速度応答スペクトル $S_A(T)$ を、 M_w と断層最距離 R [km] をパラメータとする(1)式で表現される。

$$\log_{10} S_A(T) = a_1(T) M_w + a_2(T) M_w^2 + be(T)R + bw(T)R - \log_{10}(R^{p(T)} + d(T)10^{0.5M_w}) + c_0(T) + c_j(T) + cw_j(T) \quad (2.1-1)$$
 T は、0.1~10.0秒で55ポイントで定義した。 a_1 、 a_2 、 be 、 bw 、 d 、 p 、 c_0 、 c_j 、 cw_j は回帰係数である。このうち、 a_1 、 a_2 は、震源特性を表現する回帰係数であり、この改良経験式では M_w^2 項を導入している。 be 、 bw は、太平洋プレート、フィリピン海プレートの地震の内部減衰に関する伝播特性を表す係数であり、地震によりいずれかの係数が選択され、選択外の係数は0となる。同様に、 c_j 、 cw_j は、 j 観測点でのサイト係数であり、周期1秒以上における 10° 、 10^{cw} を地盤増幅率と呼ぶ。関東平野の1都6県にある Tz が1秒以上の観測点において、フィリピン海プレートの地震を対象とする場合は、 cw_j を選択し、それ以外は c_j を選択する。ここで、 Tz は、地震基盤上面から工学的基盤上面までの、鉛直伝播するS波の伝播時間であり、地盤の固有周期の1/4に相当する指標である(2-2節の(2)式参照)。したがって、本研究では、関東平野の観測点のうち地盤の固有周期が4秒以上の観測点では、太平洋プレートの地震とフィリピン海プレートの地震でサイト係数が異なると設定したことに相当する。 Tz が大きいほど地盤増幅率が大きくなることから、地盤増幅率が大きい観測点で地盤増幅率の違いを考慮している。なお、 $Tz > 3.2$ が1秒以上の観測点でも、太平洋プレートとフィリピン海プレートの地震の両方が観測されていない観測点では、 c_j が用いられる。 c_0 は、基準としたFKSH19(都路)でのサイト係数である。FKSH19は、周期1秒以上では、地震基盤からの地盤増幅がないとみなすことができる。なお、 c_j 、 cw_j とも、地殻内地震に対して求められているサイト係数と地震数で重みづけ平均したものが最終的に用いられる。

中心周波数 f の関数である群遅延時間の平均値 $\mu_{igr}(f)$ 、分散 $\sigma_{igr}^2(f)$ は M_0 [dyne-cm] と震源距離 X [km] をパラメータとする次式で表現される。

$$\mu_{igr}(f) = A_{tgr1}(f) M_0^{1/3} + Be_1(f)X + Bw_1(f)X + C_{1f}(f) + Cw_{1f}(f) \quad (2.1-2)$$

$$\sigma_{igr}^2(f) = A_{tgr2}(f) M_0^{1/3} + Be_2(f)X + Bw_2(f)X + C_{2f}(f) + Cw_{2f}(f) \quad (2.1-3)$$

ここで、 A_{tgr1} 、 Be_1 、 Bw_1 、 C_{1j} 、 Cw_{1j} 、 A_{tgr2} 、 Be_2 、 Bw_2 、 C_{2j} 、 Cw_{2j} は回帰係数であり、このうちのC、Cwをサイト係数と呼ぶ。 Be 、 Bw 、 C_j 、 Cw_j の太平洋プレートの地震とフィリピン海プレートの地震に対する扱いは、 be 、 bw 、 c_j 、 cw_j と同じである。

2-2 任意地点での長周期地震動の計算方法の検討

2-2-1 はじめに

23年度作成した改良経験式に基づく長周期地震動予測手法では、地震観測点において、その地点固有の地盤増幅率、サイト特性を考慮した時刻歴波形の予測が可能となっている。しかし、任意地点での予測方法はまだ検討されていない。ここでは、旧経験式の場合と同様に、地震調査研究推進本部(以後、地震本部と呼ぶ)が公開している、工学的基盤までの三次元地下構造モデルを用いて、大阪平野、濃尾平野、関東平野での加速度応答スペクトル $S_A(h=5\%)$ の地盤増幅率、群遅延時間の平均値・標準偏差のサイト係数の面的評価を行うための回帰式の作成を行なう。

なお、工学的基盤での $S_A(h=5\%)$ の地盤増幅率、群遅延時間の平均値・標準偏差のサイト係数は、周期 1 秒以上で観測点固有の地盤増幅率、周期 0.5 秒以下では全国一律の工学的基盤での地盤増幅率、周期 0.5~1 秒ではこれらの遷移域となるため、ここでの検討対象周期は 0.5~10 秒である。

2-2-2 手法

旧経験式による面的評価の際には、(2.2-1)式により、地震基盤上面から工学的基盤上面までの堆積層伝播時間 $T_z[s]$ を定義している。

$$T_z = \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{Vs_i} \quad (2.2-1)$$

ここで、 H_i 、 Vs_i は、それぞれ、 i 層の厚さ、 S 波速度、 N は層数である。地震本部(2009)から公開されている三次元速度構造モデルでは、地震基盤の S 波速度は、関東平野、濃尾平野で 3.2km/s、大阪平野で 2.9km/s であるため、 T_z に地震基盤の S 波速度 $Vs[km/s]$ を付与して、 $T_z3.2$ 、 $T_z2.9$ と呼ぶ。対象とする 3 つの平野での T_z 分布を図 2.2-1 に示す。なお、地震本部(2009)の三次元速度構造モデルの工学的基盤の Vs は、大阪平野、濃尾平野、関東平野でそれぞれ、0.35km/s、0.35km/s、0.5km/s である。

観測点での速度構造は、地震本部の約 1km 間隔の三次元速度構造モデルから、観測点を囲む 4 地点での速度構造の重み付け平均で算出した。

周期 T における加速度応答スペクトルの地盤増幅率 $C(T)$ は、旧経験式の場合と同様に、バイリニア型でモデル化する。バイリニア型モデルは、折れ曲がりの T_z を $Tlim(T)$ とすると、 $Tlim(T)$ を境に(2.2-2)式による 2 つの回帰式で表現される。

$$\log_{10}C(T)=a(T)+b(T)T_z \quad (2.2-2)$$

ここで、 a 、 b は回帰係数である。はじめに、 $Tlim(T)$ 以上で(2.2-2)式で回帰分析を行ない、次に、 $Tlim(T)$ での $C(T)$ の値を固定して、 $Tlim(T)$ 以下で(2.2-2)式で回帰分析を行なった。 $Tlim(T)$ も未知パラメータとして初期解析を行ったところ、2 つの回帰式の傾き $b(T)$ の違いが小さい場合、 $Tlim(T)$ がよく決まらず、周期により大きく変動することがわかった。そこで、 $Tlim(T)$ は、この初期解析での推定値と表面波理論振幅応答(メディアムレスポンス)を同様に回帰した場合の推定値を参考に設定した。表面波理論振幅応答としては、旧経験式の場合と同様に、ラブ波とレイリー波の表

面波理論振幅応答の対数平均を用いた。

群遅延時間の平均値のサイト係数 $c_{\mu gr}$ と群遅延時間の標準偏差のサイト係数 $c_{\sigma gr}$ は、それぞれ、1本の回帰式で表現する。

$$c_{\mu gr}(T)=a_1(T)+b_1(T)Tz \quad (2.2-3)$$

$$c_{\sigma gr}(T)=a_2(T)+b_2(T)Tz \quad (2.2-4)$$

関東平野では、 $Tz3.2$ が1秒以上の観測点で、太平洋プレートの地震とフィリピン海プレートの地震で地盤増幅率、サイト係数を区別している。太平洋プレートの地震の地盤増幅率、サイト係数が、上式のモデルと合うことから、太平洋プレートの地震の地盤増幅率に対して(2.2-2)式により回帰式を作成した。そして、太平洋プレートの地震の地盤増幅率に対するフィリピン海プレートの地盤増幅率の比 $rat(T)$ をモデル化した補正係数を算出し、フィリピン海プレートの地盤増幅率を表すこととした。同様に、フィリピン海プレートのサイト係数からの太平洋プレートの地震のサイト係数の差 $diff(T)$ をモデル化した補正係数を算出し、フィリピン海プレートのサイト係数を表すこととした。後述のように、フィリピン海プレートの地盤増幅率、サイト係数とも $2.75 \leq Tz3.2 \leq 3.5$ 秒の東京都内の観測点で大きいことから、この地域を対象とした $rat(T)$ 、 $diff(T)$ の平均値を補正係数としている。地盤増幅率に対しては、この地域以外の観測点を対象に、 $rat(T)$ の平均値も求め補正係数としている。

2-2-3 データ

図 2.2-2 には、関東平野 1 都 6 県(島は除く)での地盤増幅率 C と $Tz3.2$ の関係を示す。周期 1 ～10 秒を 1 秒刻みで表示した。図 2.2-2 をみると、 $Tz3.2$ が 0.75 秒以下の千葉県いくつかの観測点と神奈川県 1 地点で、他の観測点に比べ、地盤増幅率が大きい傾向があることがわかる。

これらの観測点は、図 2.2-3 に示すように、 $Tz3.2$ が大きい領域に挟まれた、 $Tz3.2$ が 0.75 秒以下の房総半島南部 9 地点と三浦半島南部 1 地点である。これらの地点での表面波が、周辺の $Tz3.2$ が大きい領域の地下構造の影響を大きく受けているためと考えられる。図 2.2-3 の(c)は、北緯 $34.5^\circ \sim 35.4^\circ$ 、東経 $139.5^\circ \sim 140.15^\circ$ で、 $Tz3.2 \leq 0.75$ 秒の場合に +1.5 秒して図化したものである。図 2.2-3 で赤丸で表示した地点と、この周辺の $Tz3.2$ が 0.75 ～1.5 秒の地点(図 2.2-3 で青丸で表示)を他地点と区別して、 $Tz3.2$ との関係を表示したのが図 2.2-4、図 2.2-6 である。図 2.2-4 は千葉県、図 2.2-6 は神奈川県である。赤丸で表示した地点は、明らかに他地点より、同じ $Tz3.2$ に対して地盤増幅率が大きいことが確認できる。また、図 2.2-4 に示したように千葉県では 1 地震のみの観測点が 3 地点ある。他の 1 地震のみの観測点は、東京の 1 観測点である。これらの地点は、1 地震の特徴のみが反映されているため、回帰のデータには含めないことにした。また、赤丸で表示した地点は、図 2.2-5、図 2.2-7 に示したように周期 1 秒以上で $Tz3.2$ を +1.5 秒にして回帰分析を行うこととした。周期 1 秒未満では、補正は行わない。

図 2.2-8 には、濃尾平野での地盤増幅率 C と $Tz3.2$ の関係を示す。三重県の観測点は愛知県の観測点に比べやや増幅率が小さい傾向がある。愛知県で過小評価になることを避けるために、回帰では三重県のデータを除くこととした。なお、濃尾平野では 1 地震のみの観測点はない。

図 2.2-9 には、大阪平野での地盤増幅率 C と $Tz2.9$ の関係を示す。和歌山県の観測点は山地のみであるが Tz が大きく、地盤増幅率は大きくない。これは、三次元有限差分法で使用する地下構

造モデルを作成する際、山地を平らにして埋め込んだ影響と推測される。そこで、旧経験式の場合と同様に堆積層が厚い地域での地盤増幅率の予測を重視して、和歌山県の観測点は検討対象から除いた。周期 4 秒程度以上では、同じ $T_z2.9$ に対する地盤増幅率が兵庫県の方が大阪府より大きい特徴がみられる。 $T_z2.9 \geq 0.7$ 秒の兵庫県の観測点を $T_z2.9$ 分布とともに図 2.2-10 に赤丸で表示した。 $T_z2.9$ が大きい海域の領域と $T_z2.9$ が小さい六甲山に挟まれた領域にあることがわかる。関東平野の場合と同様に、これらの地点での表面波が、周辺の $T_z2.9$ が大きい領域の構造の影響を大きく受けたためと考えられる。図 2.2-10 の(c)は、北緯 $34.6^\circ \sim 34.75^\circ$ 、東経 $135.0^\circ \sim 135.35^\circ$ で、 $T_z2.9 \geq 0.7$ 秒の場合に $+0.6$ 秒して図化したものである。図 2.2-10 で赤丸で表示した地点を他地点と区別して、 $T_z2.9$ との関係を表示したのが図 2.2-11 である。赤丸で表示した地点は、明らかに他地点より、同じ $T_z2.9$ に対して地盤増幅率が大きいことが確認できる。そこで、赤丸で表示した地点は、図 2.2-12 に示したように周期 4 秒以上で $T_z2.9$ を $+0.6$ 秒にして回帰分析を行うこととした。周期 4 秒未満では、補正は行わない。また、図 2.2-11 に塗りつぶした記号で示した、1 地震のみが観測されている兵庫県 2 地点、大阪府 1 地点は回帰のデータには含めないことにした。

群遅延時間の平均値と標準偏差のサイト係数も、同様の考え方でデータの補正、取捨選択を行った。ただし、地盤増幅率は、海溝型地震と地殻内地震の地震数の重み付け平均であるのに対して、群遅延時間の平均値と標準偏差のサイト係数は、海溝型地震のみで求められている。したがって、関東平野で太平洋プレートとフィリピン海プレートで分類した場合、1 地震のみの観測点も多いため、関東平野では 1 地震の観測点もデータに含めることとした。また、大阪平野では、地盤増幅率は周期 4 秒以上で $T_z2.9$ を $+0.6$ 秒としたが、観測値に基づき群遅延時間の平均値と標準偏差のサイト係数は周期 1 秒以上で $T_z2.9$ を $+0.6$ 秒とした。継続時間の方が、最大値指標である加速度応答スペクトルより、より短周期まで三次元地下構造の影響が大きいものと考えられる。

2-2-4 回帰結果

(a) 加速度応答スペクトルの地盤増幅率

図 2.2-13～図 2.2-15 には、3 つの平野の観測点の T_z と表面波理論振幅応答の関係を示す。 $Tlim(T)$ もパラメータとしたバイリニア型の回帰式も図示している。図 2.2-16～図 2.2-18 には、3 つの平野の T_z と地盤増幅率の関係を算出したデータと最終的なバイリニア型の回帰式を示す。図 2.2-16 の関東平野において、 $T_z3.2$ が 3 秒付近の東京は都内の地点であり、他の地点よりやや増幅率が大きい傾向がみられる。都内は、既存の超高層建物も多く、今後も建設が予測されることから、工学的に重要な地域である。そこで、 $T_z3.2$ が 2.25 秒以上の東京の観測点の重みを 2 倍にして回帰分析を行っている。また、 $T_z3.2$ が 3.5 秒以上では、データも少なく、また、増大する特徴がほとんどみられないため、 $T_z3.2 \leq 3.5$ 秒を回帰のデータとし、 $T_z3.2 \geq 3.5$ 秒では $T_z3.2$ の増幅率で一定としている。濃尾平野と大阪平野では、観測点の T_z の最大値以上は、地盤増幅率を一定とした。濃尾平野と大阪平野の観測点の T_z の最大値は、それぞれ、津島における 1.58 秒、此花における 2.52 秒である。濃尾平野では周期 4 秒以上で、 $Tlim$ より長周期側の回帰式は 2 地点のみで決まっているため、この 2 地点での増幅率は周期 4 秒以上で元の増幅率と一致する。大阪平野では周期 4 秒以上で、 T_z が長周期側の回帰式は 3 地点のみで決まっており、うち 2 地点の T_z と増

幅率がほぼ同じであるため、この3地点での増幅率は周期4秒以上で元の増幅率とほぼ一致する。

図 2.2-19～図 2.2-21 には、回帰係数を示す。上述のように、 T_{lim} もパラメータとして、 T_z と表面波理論振幅応答の関係、 T_z と地盤増幅率との関係の回帰式を作成した場合の T_{lim} を参照して、最終的な回帰式の T_{lim} を設定している。なお、旧経験式では全周期で $T_{lim}=1$ 秒としていたが、今回は、短周期で T_{lim} が小さいという、表面波理論振幅応答にも地盤増幅率にもみられる特徴を反映させている。関東平野では、 T_{lim} より長周期側での回帰係数は、旧経験式と改良経験式でほとんど同じである。これは、 T_{lim} が周期 2.5 秒以上で同じであることが一因である。ただし、ここで示した改良経験式は、太平洋プレートの地震に対する増幅率であり、フィリピン海プレートの地震に対する増幅率はさらに大きくなる。したがって、平均的には、改良経験式による地盤増幅率の方が旧経験式による地盤増幅率より大きくなる。 T_{lim} より長周期側での回帰誤差 e が改良経験式の方が小さい主な要因は、フィリピン海プレートの地震に対する増幅率を区別したことによるものと考えられる。 T_{lim} より短周期側での回帰誤差 e が改良経験式の方が小さいのは、 T_{lim} を周期依存としたことと、上述のように千葉県や神奈川県の一部の観測点の T_z を補正したことによるものと考えられる。濃尾平野で、 T_{lim} より長周期側での回帰誤差 e が周期 4 秒以上で 0 であるのは、2 観測点のみから求められたためである。同様に、大阪平野で、 T_{lim} より長周期側での回帰誤差 e が周期 4 秒程度以上で 0 に近いのは、上述のように 3 観測点のみから求められ、かつ、内 2 観測点の T_z と地盤増幅率がほぼ同じであるためである。

図 2.2-22 には、関東平野における太平洋プレートの地震の地盤増幅率に対するフィリピン海プレートの地震の地盤増幅率の比 rat を示す。 $2.75 \leq T_z 3.2 \leq 3.5$ 秒の東京の観測点で大きい傾向がある。 $2.75 \leq T_z 3.2 \leq 3.5$ 秒の東京の観測点での比の平均値と、他の観測点での比の平均値を図中に示した。図 2.2-23(a)には東京周辺の $T_z 3.2$ 分布、(b)、(c)には rat 分布を示す。東京で rat が大きい地域は、ほぼ東京 23 区内である。図 2.2-24(d)には、 rat の周期依存性を示す。太平洋プレートの地震の増幅率に rat を乗ずることによりフィリピン海プレートの地震の増幅率が算出できる。

(b) 群遅延時間の平均値と標準偏差のサイト係数

図 2.2-24～図 2.2-29 には、 $T_z 3.2$ の補正やデータの取捨選択前の元データのサイト係数と T_z との関係を示す。図 2.2-30～図 2.2-35 には、 $T_z 3.2$ の補正やデータの取捨選択後のデータと最終的な回帰式を示す。地盤増幅率の場合と同様、関東平野、濃尾平野、大阪平野では、 T_z が、それぞれ、3.5 秒以上、1.58 秒以上、2.52 秒以上で一定とした。地盤増幅率と比較して、データのばらつきが大きい。

図 2.2-36～図 2.2-38 には、回帰係数を示す。旧経験式に対するサイト係数の回帰式はバイリニア型であるため、改良経験式に対するサイト係数の回帰式よりパラメータが 1 つ多いが、改良経験式の方が回帰誤差が小さいか同程度である。特に、関東平野はフィリピン海プレートの地震を区別したため、回帰誤差が特に小さくなっている。

図 2.2-39、図 2.2-40 には、関東平野におけるフィリピン海プレートの地震のサイト係数から太平洋プレートの地震のサイト係数を引いた値 $diff$ を示す。 $2.75 \leq T_z 3.2 \leq 3.5$ 秒の範囲の東京の観測点での $diff$ の平均値を図中に示した。その他の地点では、 $diff$ がほぼ 0 に近いことから、平均値は示していない。図 2.2-41(a)には群遅延時間の平均値の $diff$ 分布を、(b)には $diff$ の周期依存性

を示す。群遅延時間の標準偏差については同様に図 2.2-42 に示す。太平洋プレートの地震のサイト係数に *diff* を加えるによりフィリピン海プレートの地震のサイト係数が算出できる。

2-2-5 回帰式に基づく地盤増幅率とサイト係数の予測

図 2.2-43 には、太平洋プレートの地震に対する関東平野の 4 観測点における元の地盤増幅率と地盤増幅率の回帰式に基づく地盤増幅率との比較を示す。元の地盤増幅率については、その観測点で加速度応答スペクトルの経験式(距離減衰式)作成に用いられている地震の記録に基づき、観測点毎の標準偏差を計算して、平均±標準偏差を表示した。東雲、横浜では、両地盤増幅率がほぼ同じである。一方、大手町、新宿では、回帰式は周期 5~8 秒で特に過小評価である。フィリピン海プレートの地震に対する同様の結果を図 2.2-44 に示す。±標準偏差を考慮すると回帰式による地盤増幅率は元の地盤増幅率をほぼ表している。なお、 T_z を用いた回帰式の標準誤差は、誤差伝播の法則に基づき、太平洋プレートの地震に対する回帰式の標準誤差と *rat* の標準誤差の二乗和のルートで計算し、標準偏差はその 10 のべき乗とした。濃尾平野の 2 観測点、大阪平野の 2 観測点での同様の結果を図 2.2-45、図 2.2-46 に示す。名古屋と大阪では、周期 5~6 秒でやや過大評価である。津島や此花は、上述のように、周期 4 秒以上でこれらの地点の増幅率に合うような回帰式となっていることがわかる。

同様の検討結果を、群遅延時間の平均値のサイト係数に対して図 2.2-47~図 2.2-50 に、群遅延時間の標準偏差のサイト係数に関して図 2.2-51~図 2.2-54 に示す。元のサイト係数は、海溝型地震のみから得られており、特に関東平野では、太平洋プレートとフィリピン海プレートに分類したため、サイト係数の算出に用いられている地震数が少ないため表示していない。 T_z を用いたサイト係数の回帰式の標準偏差が大きいことからわかるように、特に関東平野では両サイト係数の違いが大きい観測点もある。濃尾平野と大阪平野の観測点では、±標準偏差を考慮すると両サイト係数はほぼ合っている。

図 2.2-55~図 2.2-60 には、3 つの平野における、観測点での地盤増幅率を地図上で空間補間した場合と地盤増幅率の回帰式を用いて、地震本部の地下構造モデルと同じほぼ 1km 間隔で予測した場合の比較を示す。関東平野は太平洋プレートの地震に対する増幅率である。濃尾平野では、三重県でやや過大評価であるのは、同じ T_z に対して相対的に地盤増幅率がやや大きい愛知県での地盤増幅率が過小評価されるのを避けるために、三重県の観測点のデータを除いて回帰分析を行ったためである。

群遅延時間の平均値のサイト係数に対する同様の比較を図 2.2-61~図 2.2-66 に、群遅延時間の標準偏差のサイト係数に対する同様の比較を図 2.2-67~図 2.2-72 に示す。群遅延時間の平均値と標準偏差のサイト係数については、地盤増幅率に比べ、再現性はよくない。

考察のために、図 2.2-73~図 2.2-75 には、地震本部(2009, 2012)による南海地震、東南海地震、想定東海地震に対する速度応答スペクトル分布、最大速度分布、継続時間分布を示す。震源の影響もあるため、定量的な比較はできないが、スペクトルが継続時間が大きい領域は T_z が大きい領域に対応している。大阪平野では、改良経験式で観測点が少ない大阪府の東側の領域では、 T_z を用いた地盤増幅率やサイト係数が大きくなっており、地震本部によるスペクトル分布、継続時間分布と定性的に整合している。

2-2-6 まとめ

関東平野(1都6県)、濃尾平野、大阪平野を対象として、加速度応答スペクトルの地盤増幅率と群遅延時間の平均値・標準偏差のサイト係数の面的評価のための回帰式を作成した。回帰式は、地震本部(2009)の約1km間隔の三次元地下構造モデルに基づく、対象地点直下の地下構造モデルから算出される地震基盤上面から工学的基盤上面までの伝播時間(固有周期の1/4) T_z がパラメータとなっている。旧経験式に対する回帰式の回帰誤差と同じか小さい回帰式が作成された。地盤増幅率については、回帰式の回帰誤差も小さく、元の地盤増幅率の再現性が比較的良好な結果となった。一方、サイト係数は、回帰式の回帰誤差が相対的に大きく、元のサイト係数の再現性が必ずしもよくない結果であった。

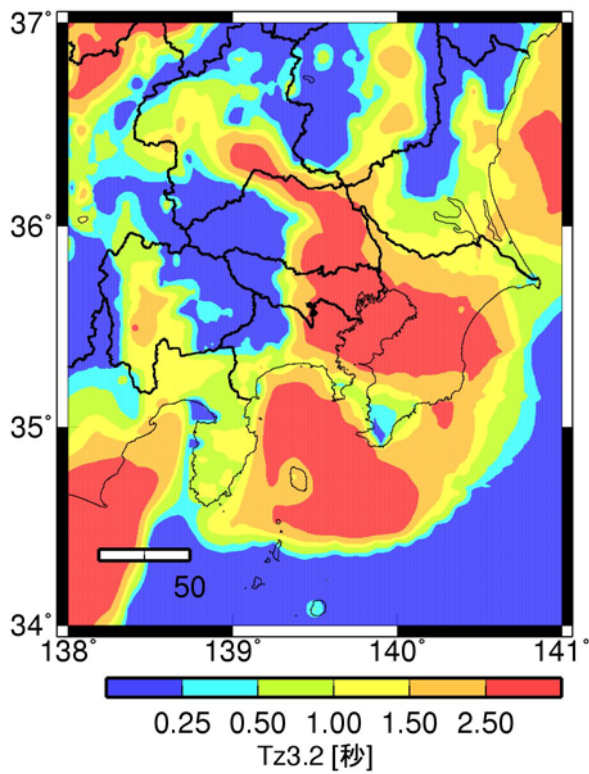
参考文献

地震本部(2009)。「長周期地震動予測地図」2009年試作版、

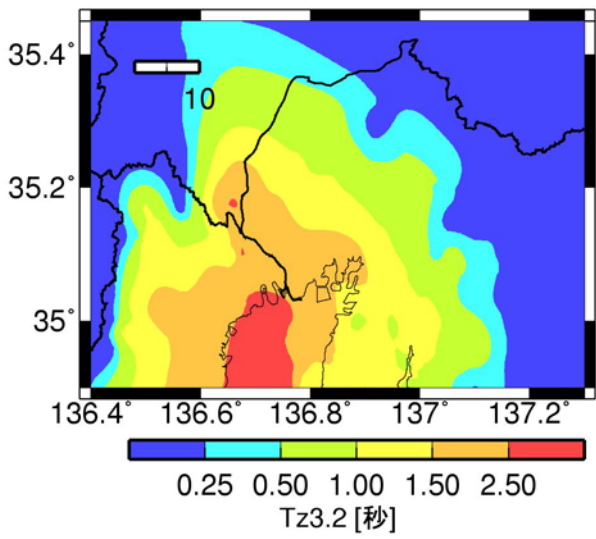
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_choshuki/choshuki2009_c3.pdf

地震本部(2012)。「長周期地震動予測地図」2012年試作版、

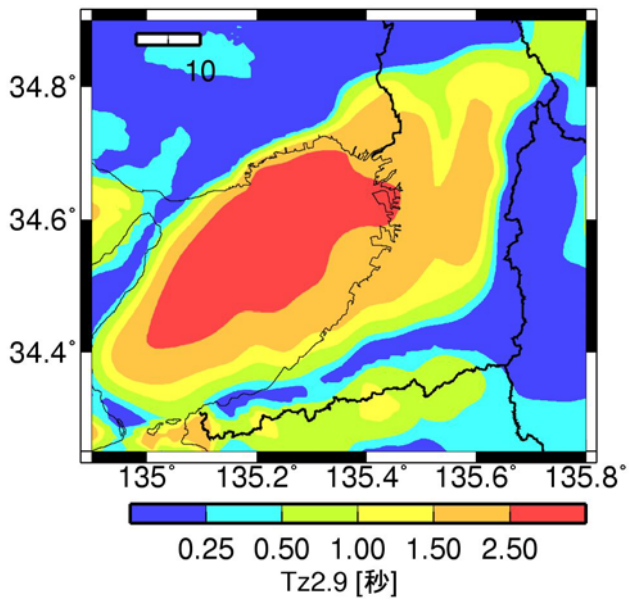
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/choshuki2012.pdf



(a) 関東平野



(b) 濃尾平野



(c) 大阪平野

図 2.2-1 地震本部(2009)の地下構造モデルに基づく T_z 分布

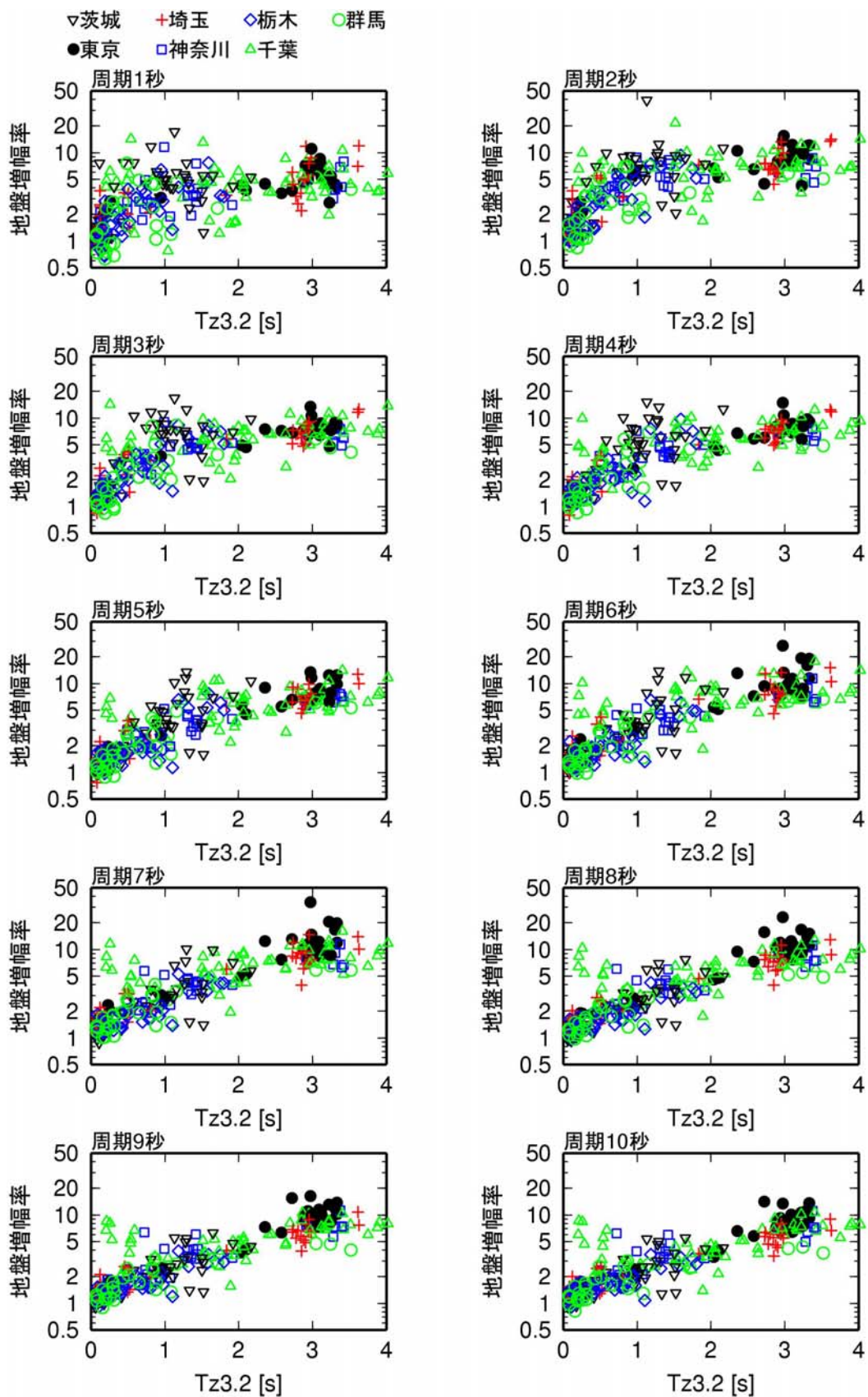
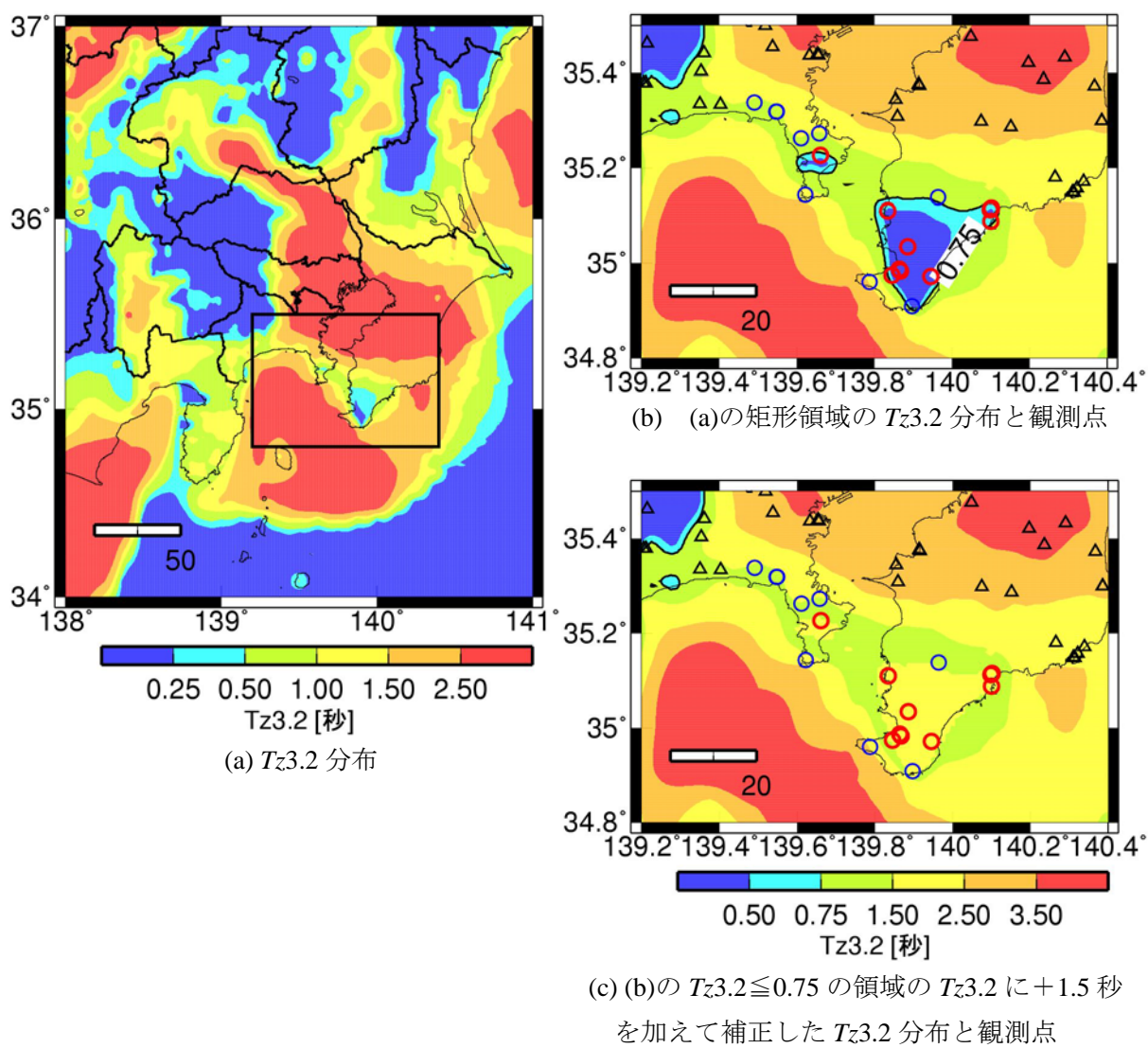


図 2. 2-2 関東平野の観測点の元データの $Tz_{3.2}$ と地盤増幅率の関係(太平洋プレートの地震)



- 補正する観測点
- 補正する観測点の周辺地点
- △ 補正しない地点

図 2.2-3 関東平野の $T_{z3.2}$ 分布と観測点

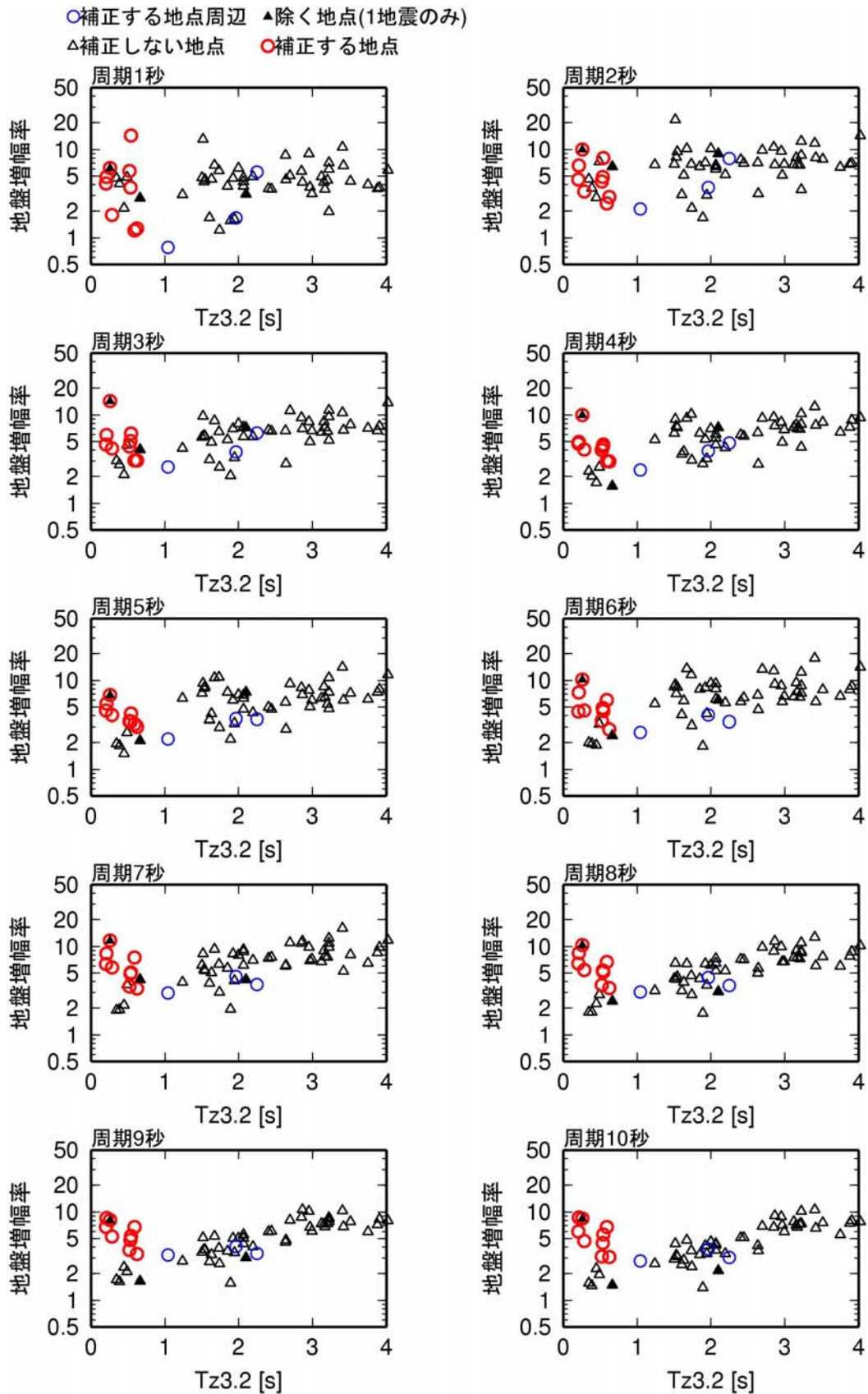


図 2.2-4 千葉県観測点の元データの $T_{z3.2}$ と地盤増幅率の関係(太平洋プレートの地震)

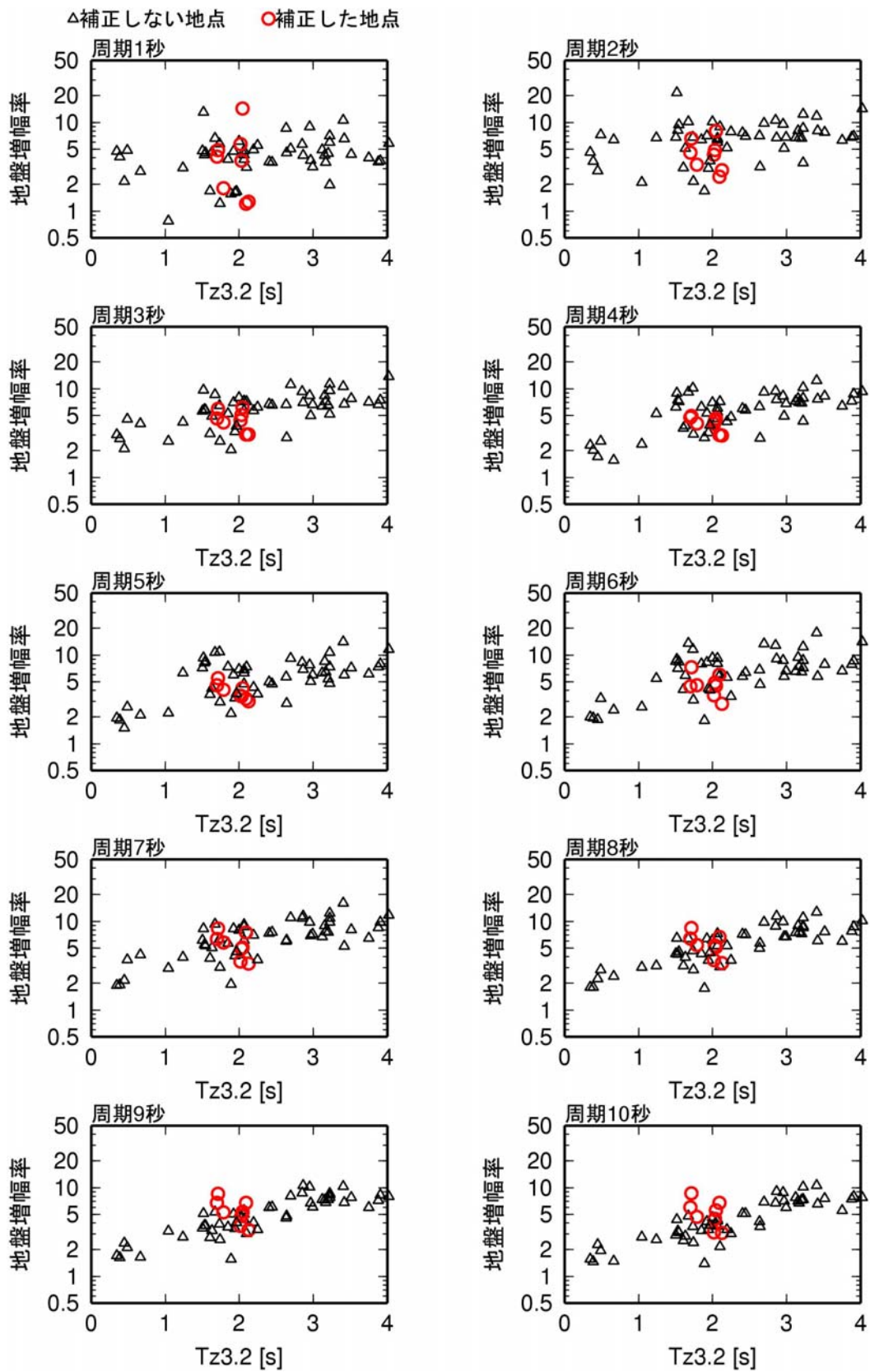


図 2.2-5 千葉県観測点の補正後の $Tz_{3.2}$ と地盤増幅率の関係(太平洋プレートの地震)

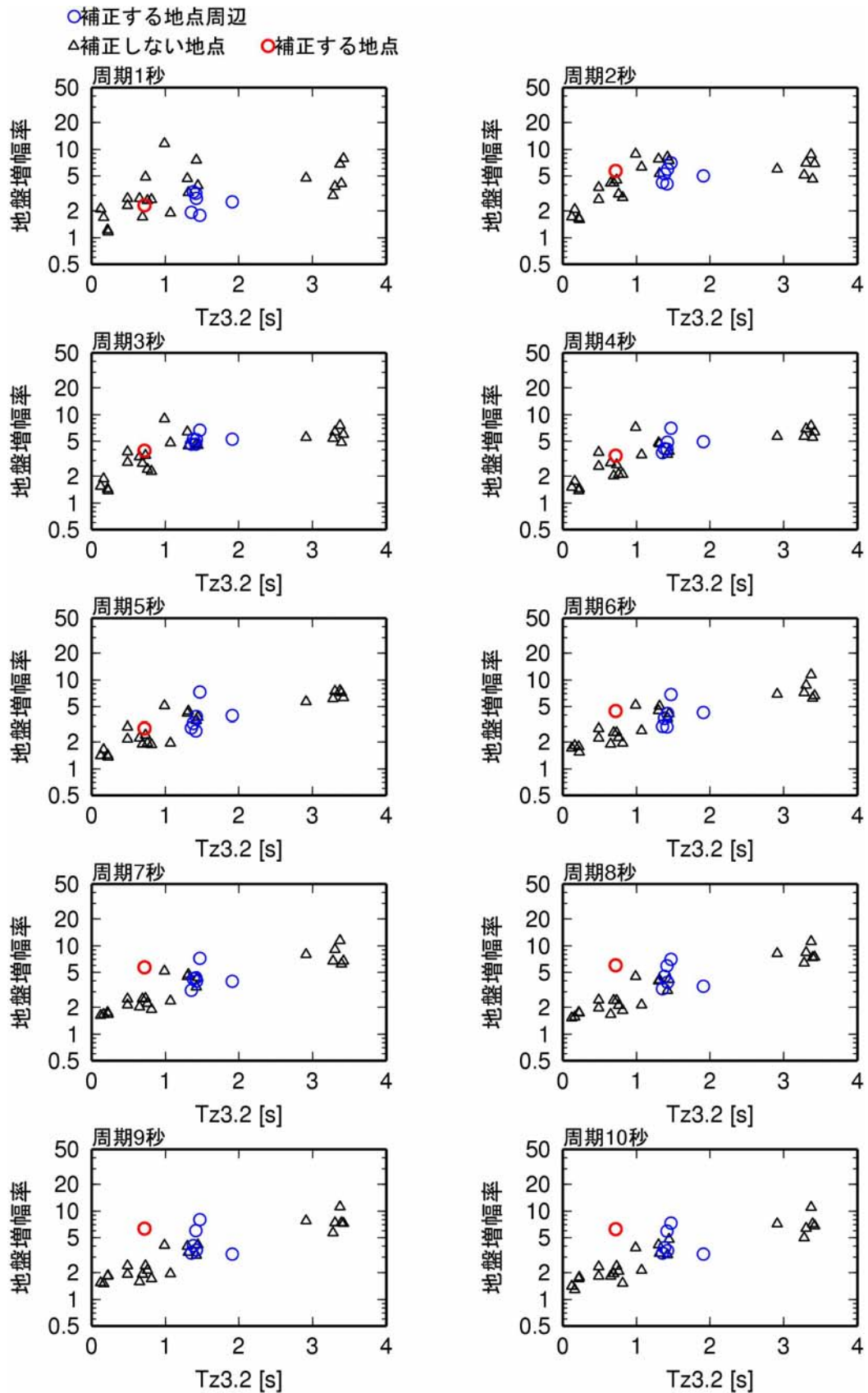


図 2. 2-6 神奈川県観測点の元データの $Tz_{3.2}$ と地盤増幅率の関係(太平洋プレートの地震)

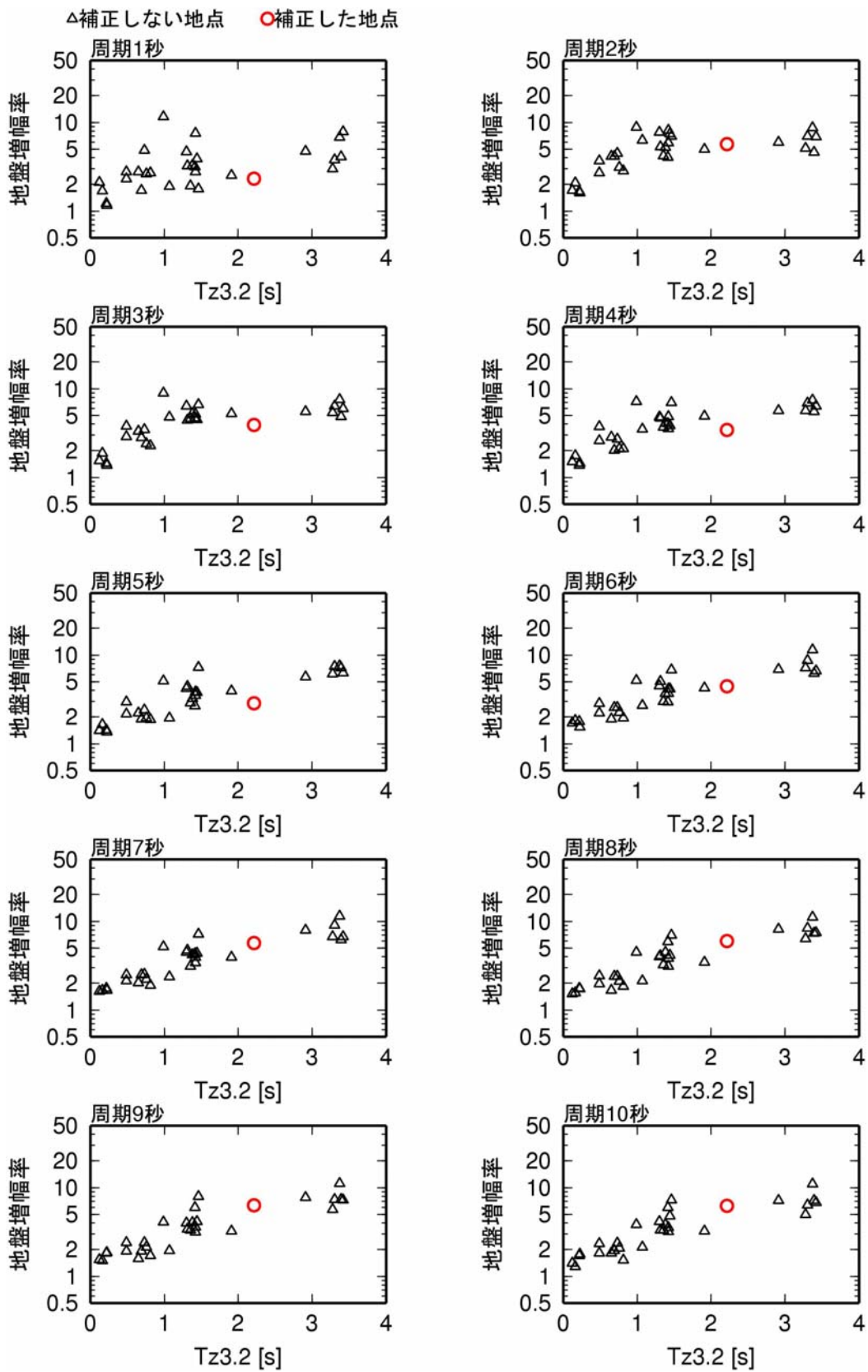


図 2.2-7 神奈川県観測点の補正後の $Tz_{3.2}$ と地盤増幅率の関係(太平洋プレートの地震)

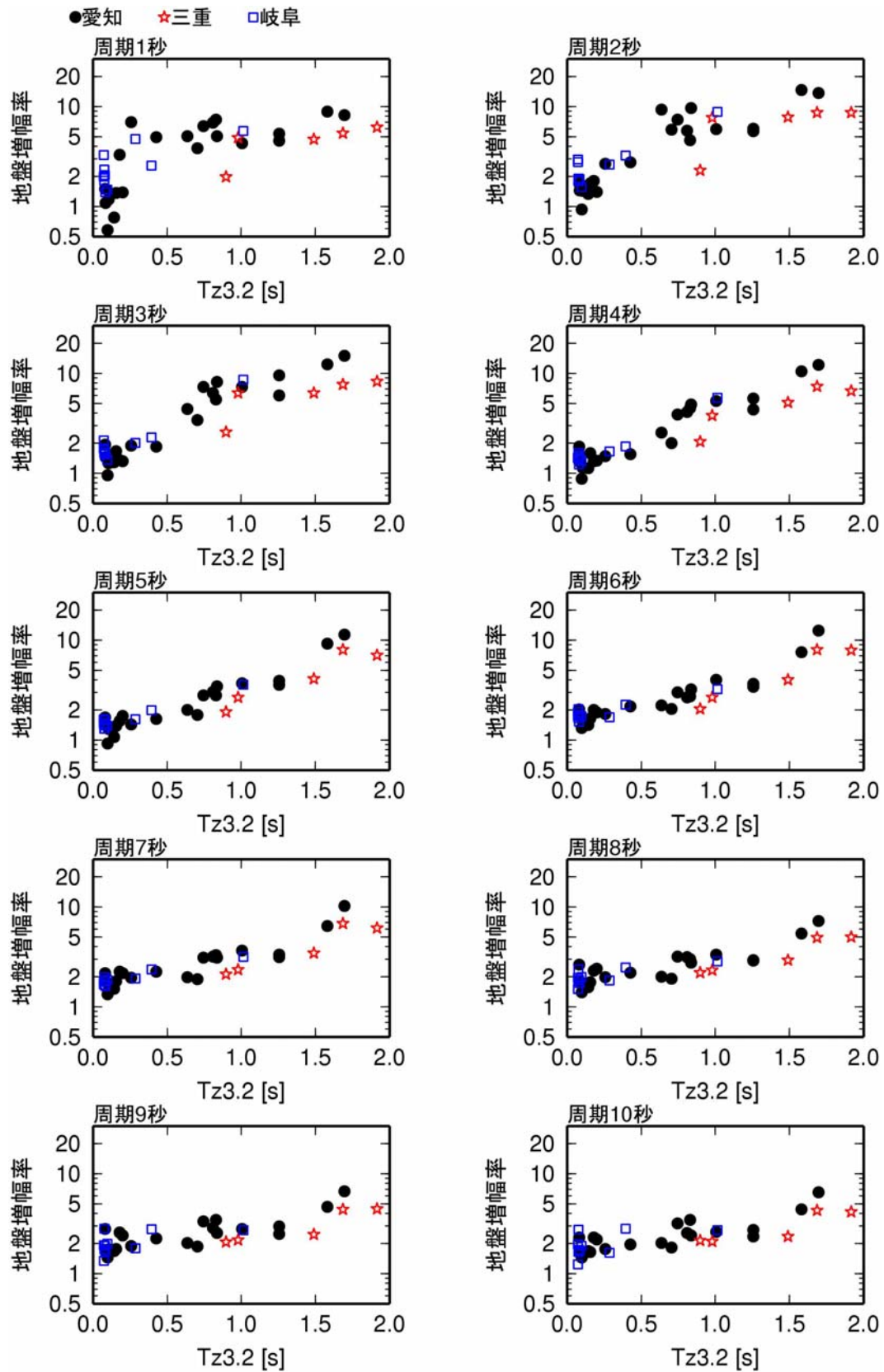


図 2. 2-8 濃尾平野の観測点の元データの $Tz_{3.2}$ と地盤増幅率の関係

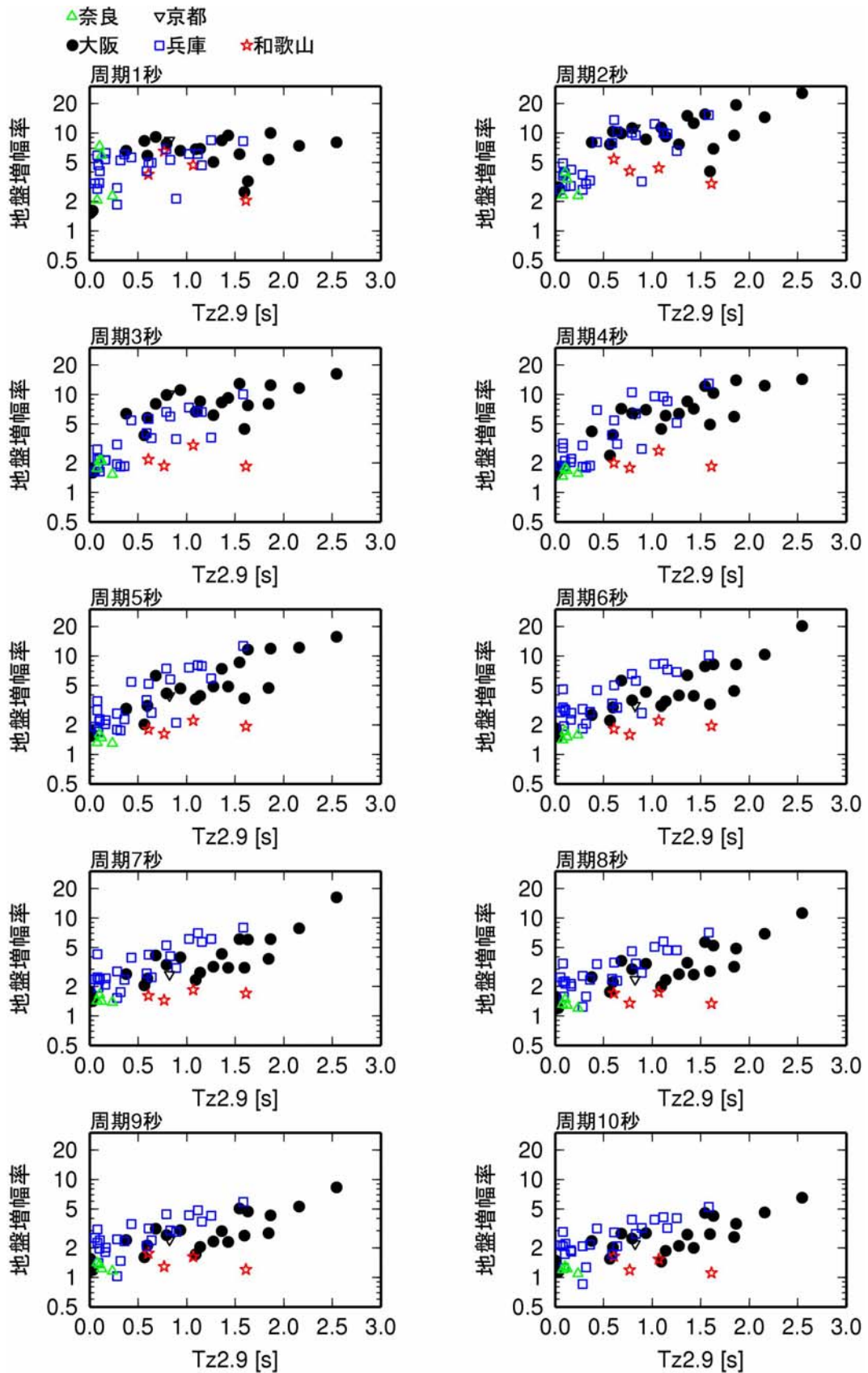
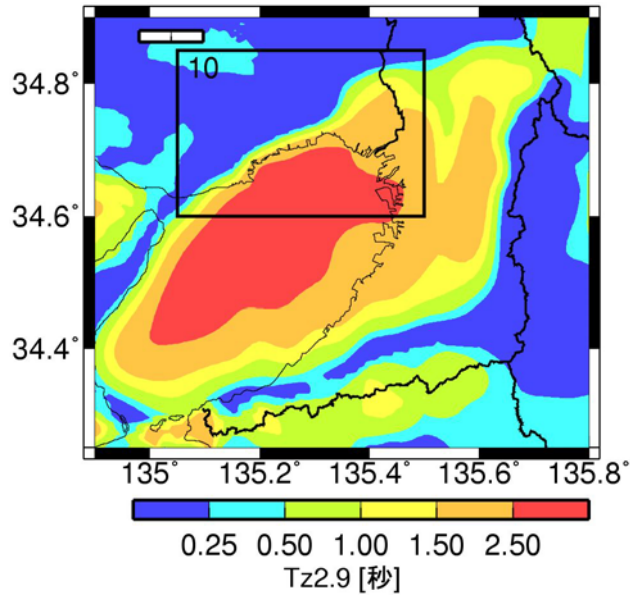
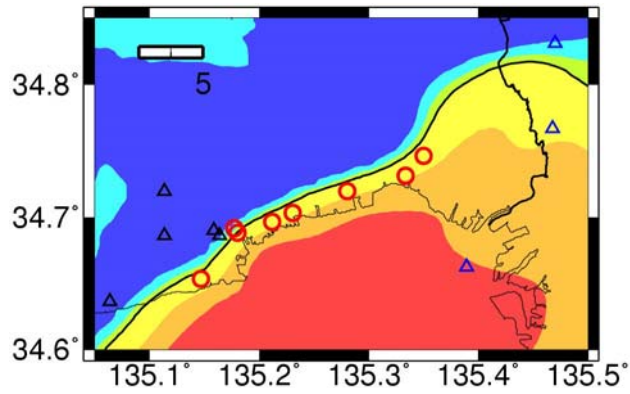


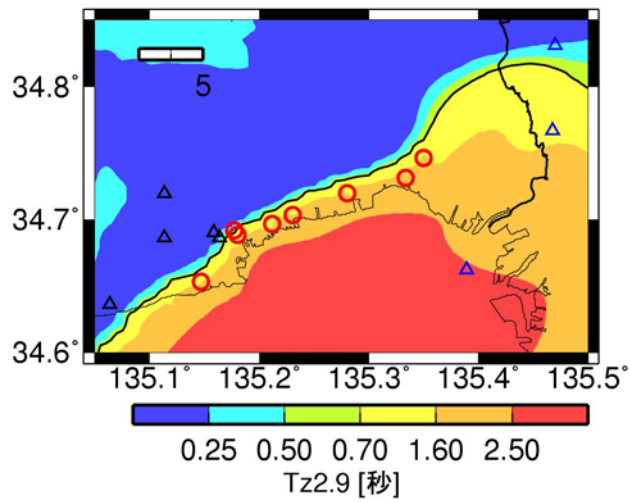
図 2. 2-9 大阪平野の観測点の元データの $T_{z2.9}$ と地盤増幅率の関係



(a) $Tz_{3.2}$ 分布



(b) (a)の矩形領域の $Tz_{3.2}$ 分布と観測点



(c) (b)の $Tz_{2.9} \leq 0.70$ の領域の $Tz_{2.9}$ に+0.6秒を加えて補正した $Tz_{2.9}$ 分布と観測点

○ 補正する観測点 △ 補正しない観測点(黒：兵庫県、青：大阪府)

図 2. 2-10 大阪平野の $Tz_{2.9}$ 分布と観測点

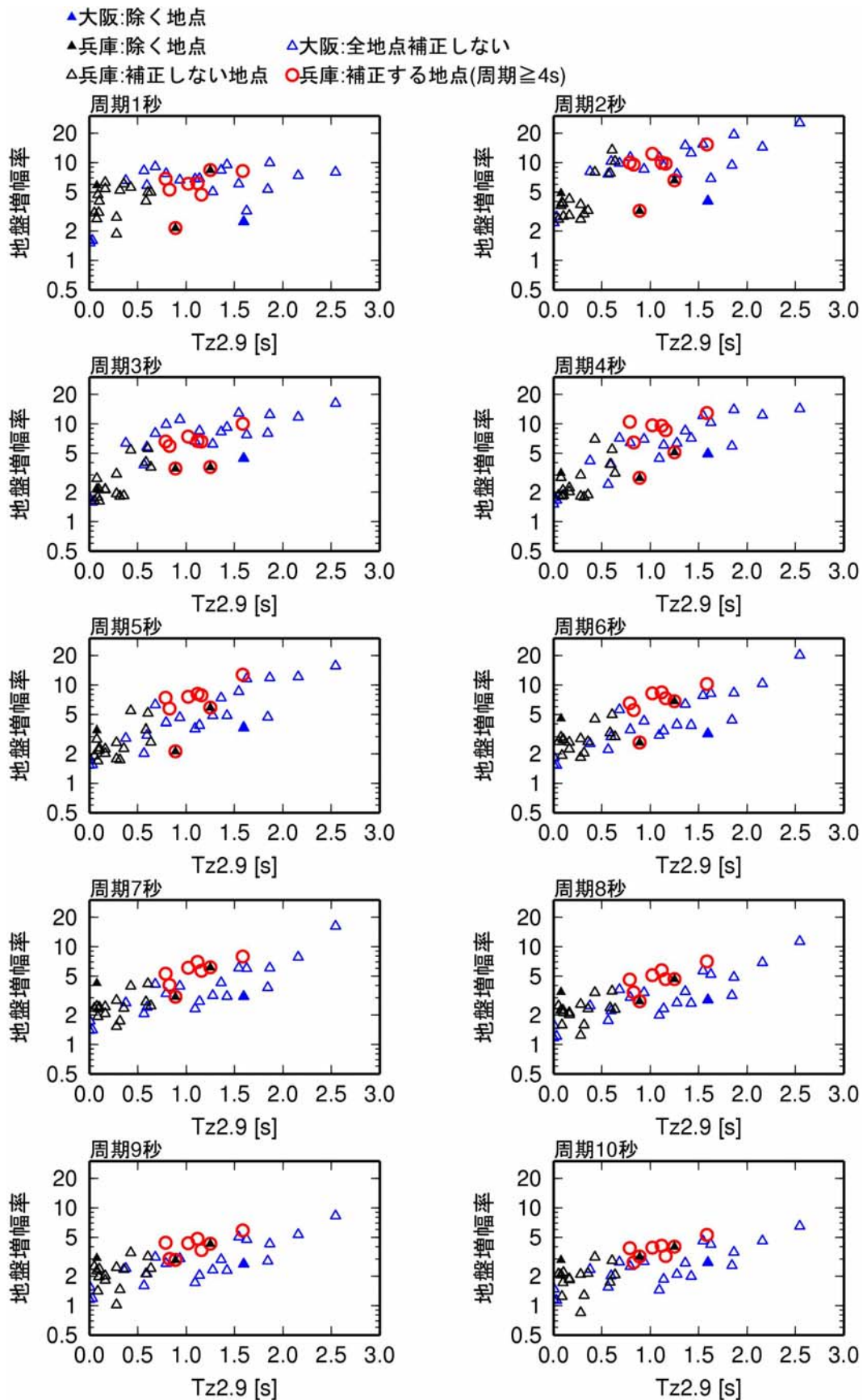


図 2.2-11 兵庫県と大阪府の観測点の元データの $Tz_{2.9}$ と地盤増幅率の関係

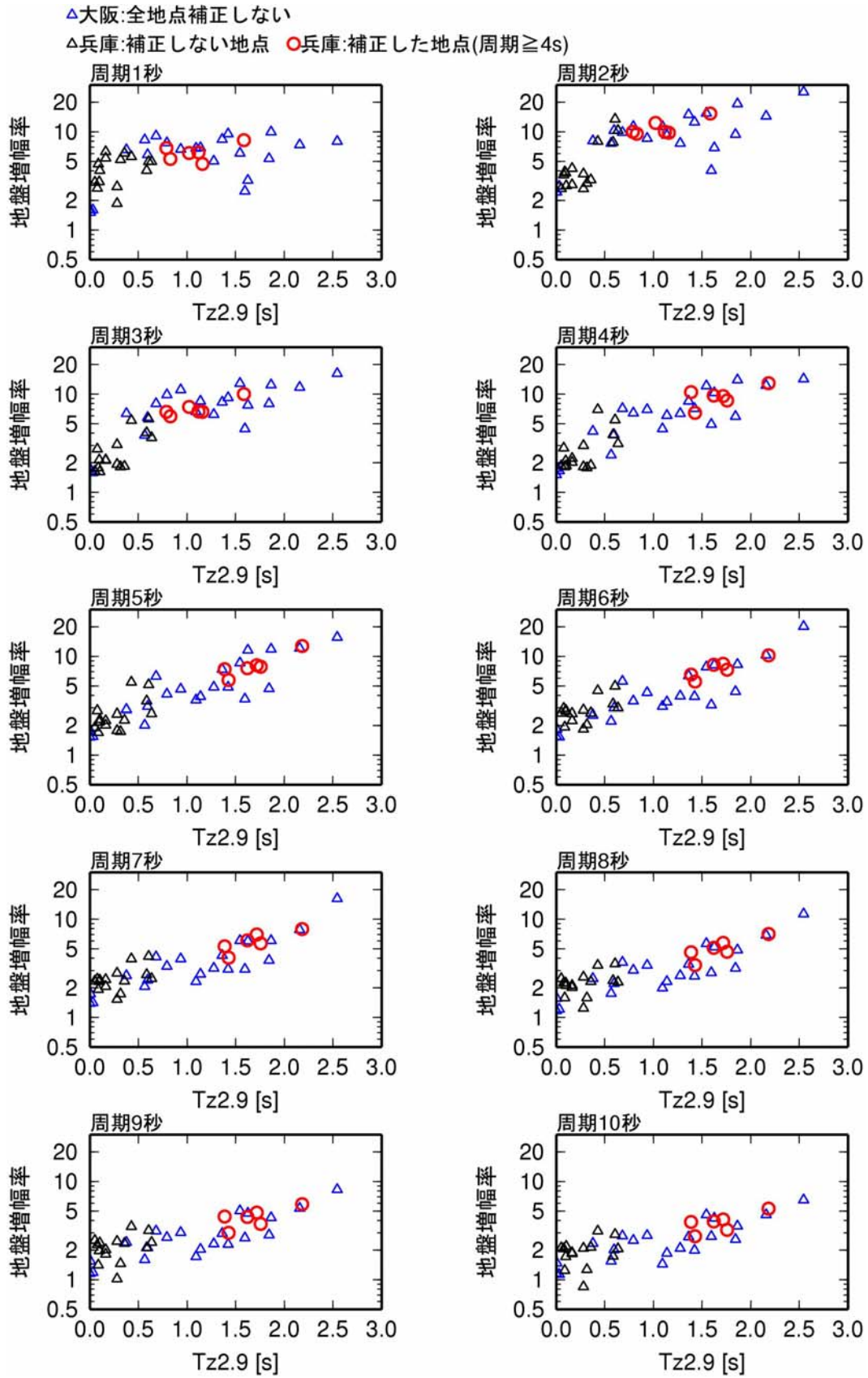


図 2.2-12 兵庫県と大阪府の観測点の補正後の $Tz_{3.2}$ と地盤増幅率の関係

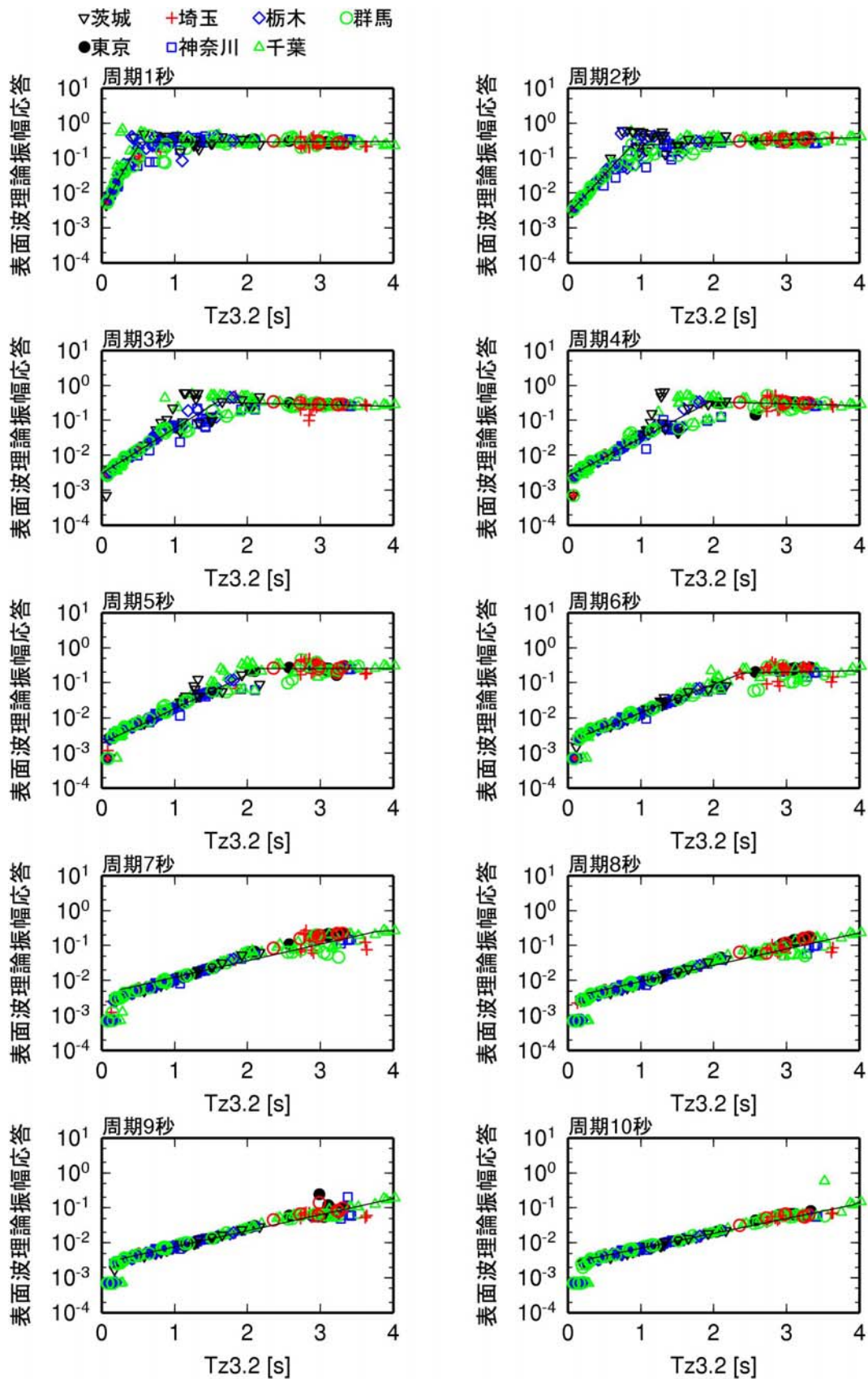


図 2.2-13 関東平野の観測点の $T_{z3.2}$ と表面波理論振幅応答の関係と回帰式

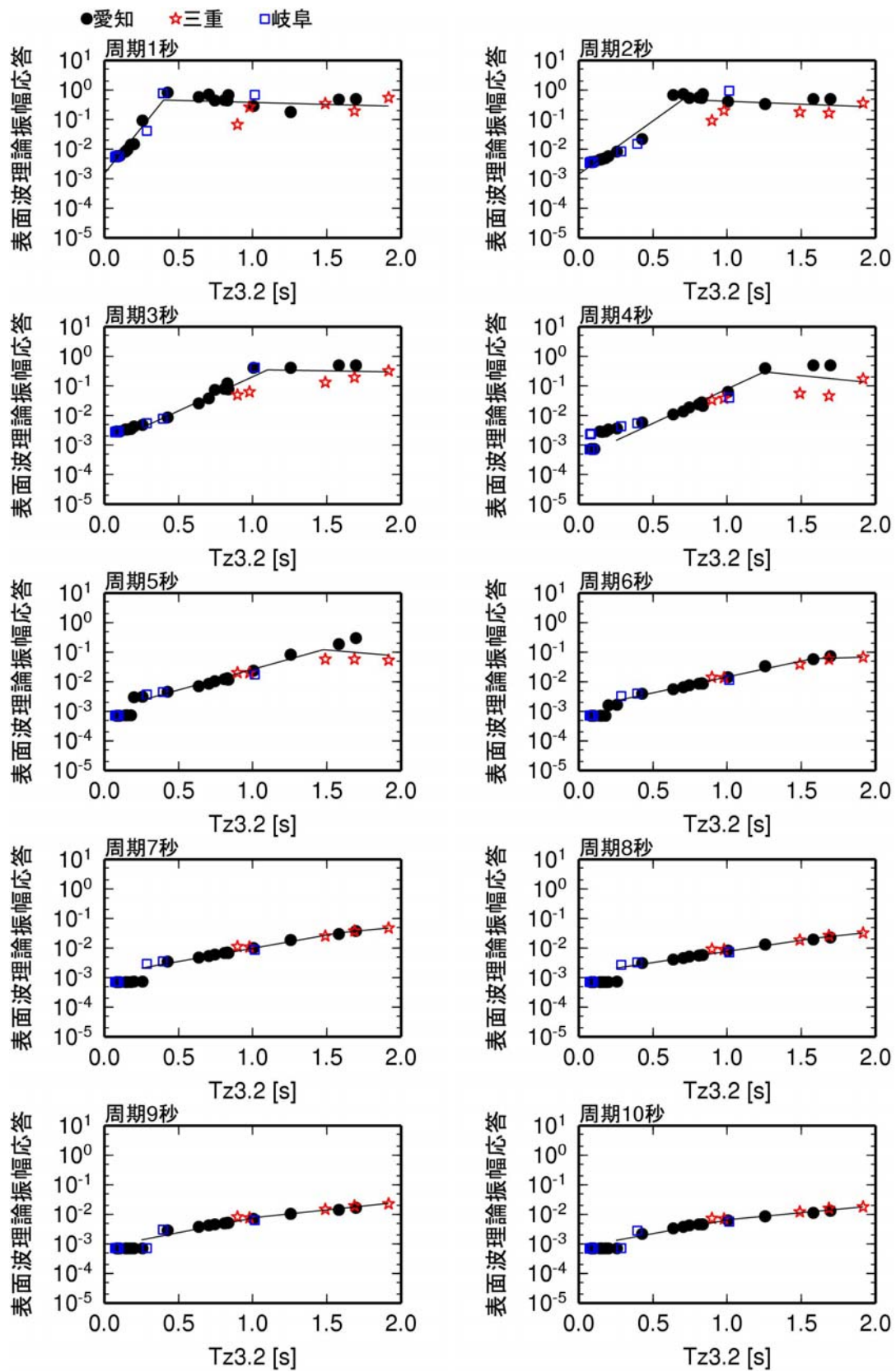


図 2.2-14 濃尾平野の観測点の $Tz3.2$ と表面波理論振幅応答の関係と回帰式

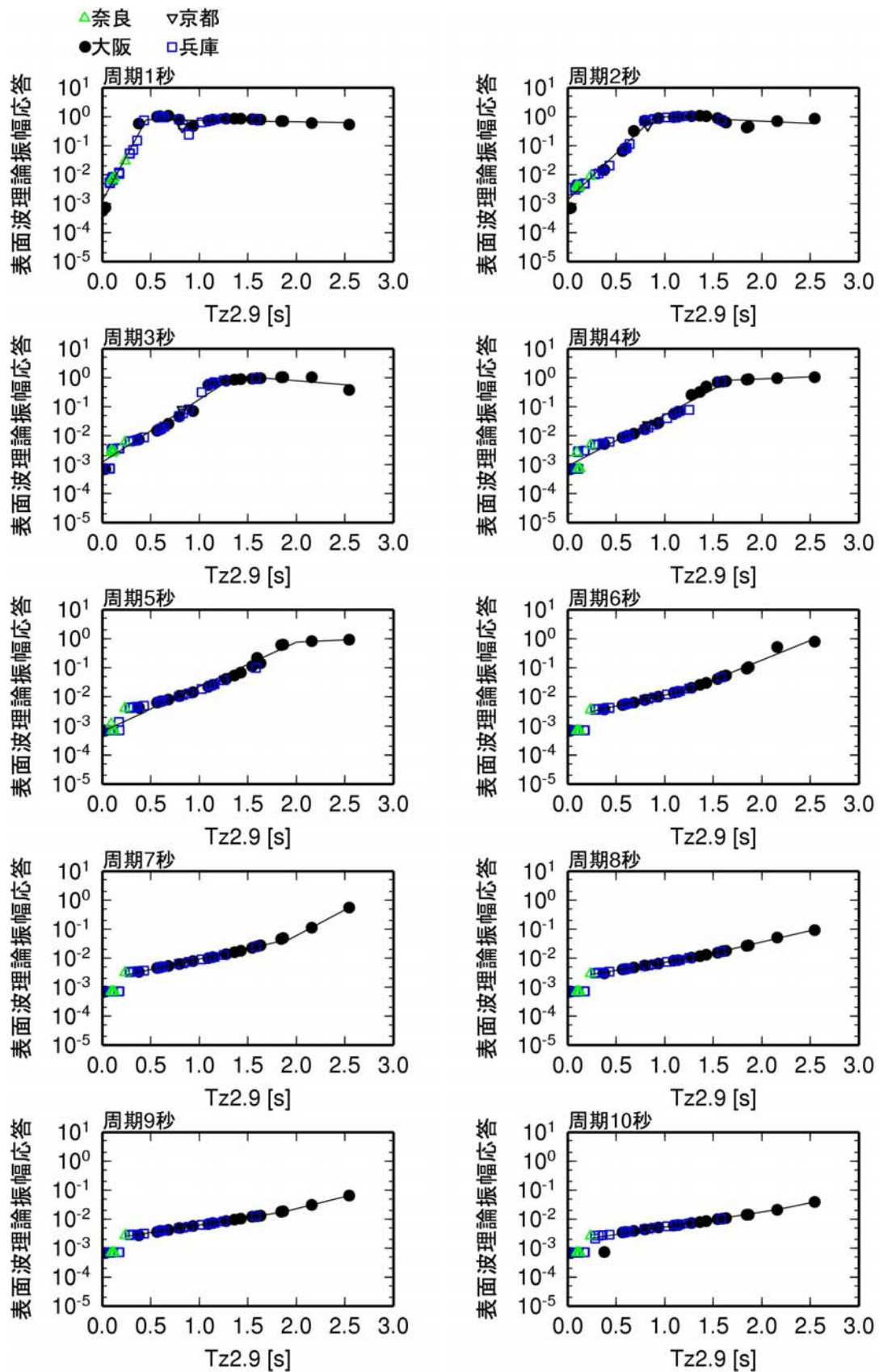


図 2.2-15 大阪平野の観測点の $T_{z2.9}$ と表面波理論振幅応答の関係と回帰式

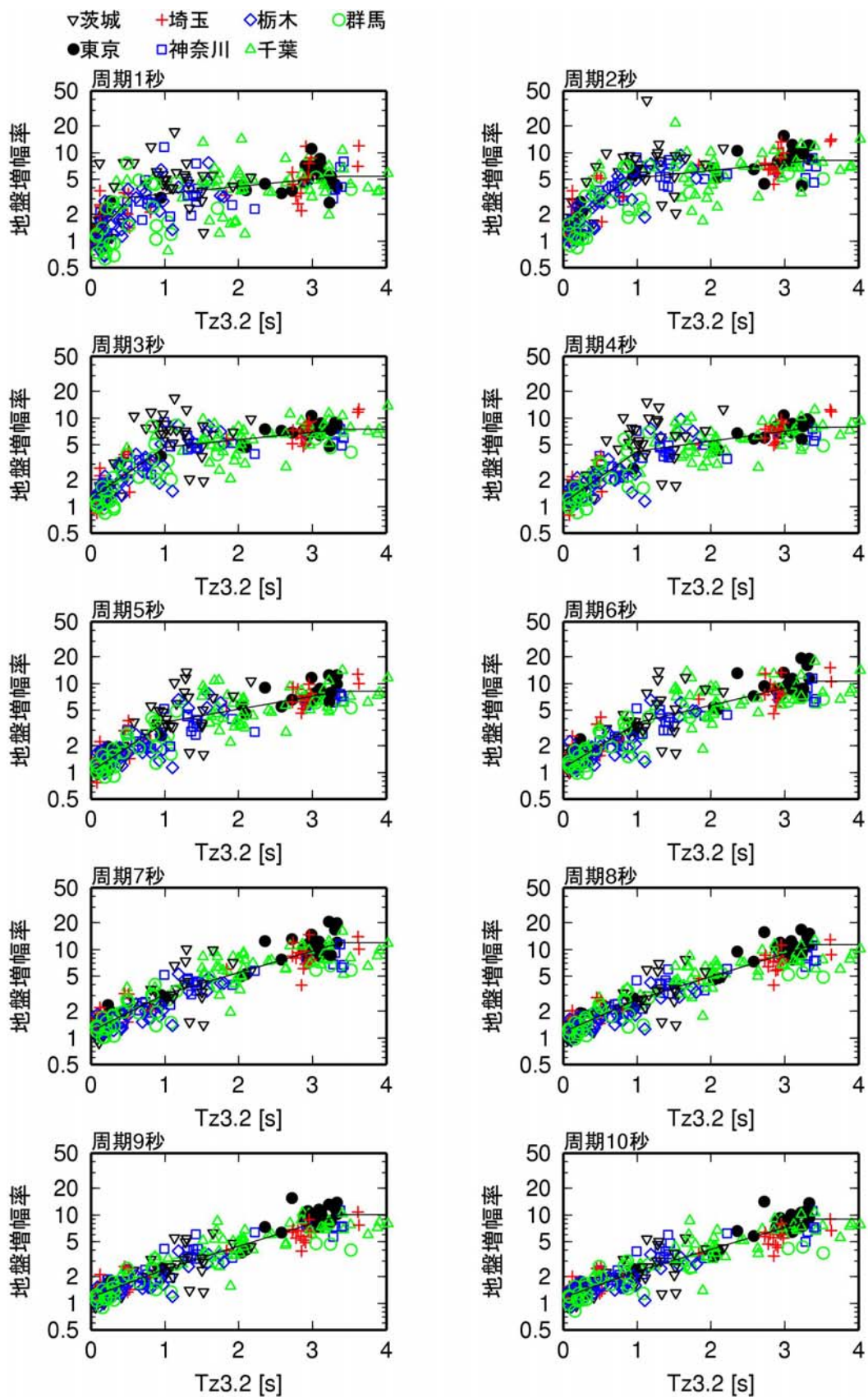


図 2.2-16 関東平野の観測点の $Tz_{3.2}$ と地盤増幅率の関係と回帰式(太平洋プレートの地震)

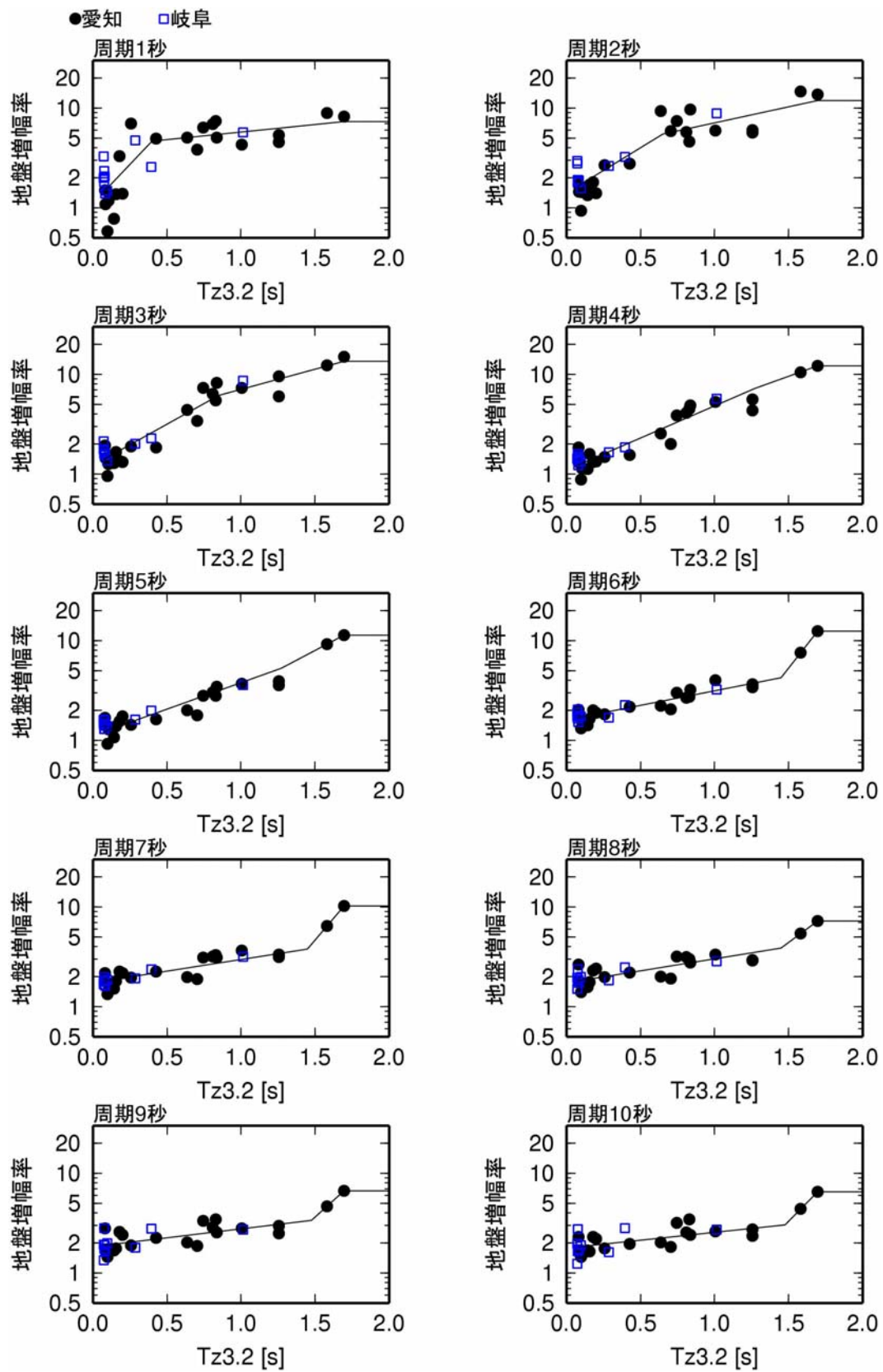


図 2.2-17 濃尾平野の観測点の $Tz_{3.2}$ と地盤増幅率の関係と回帰式

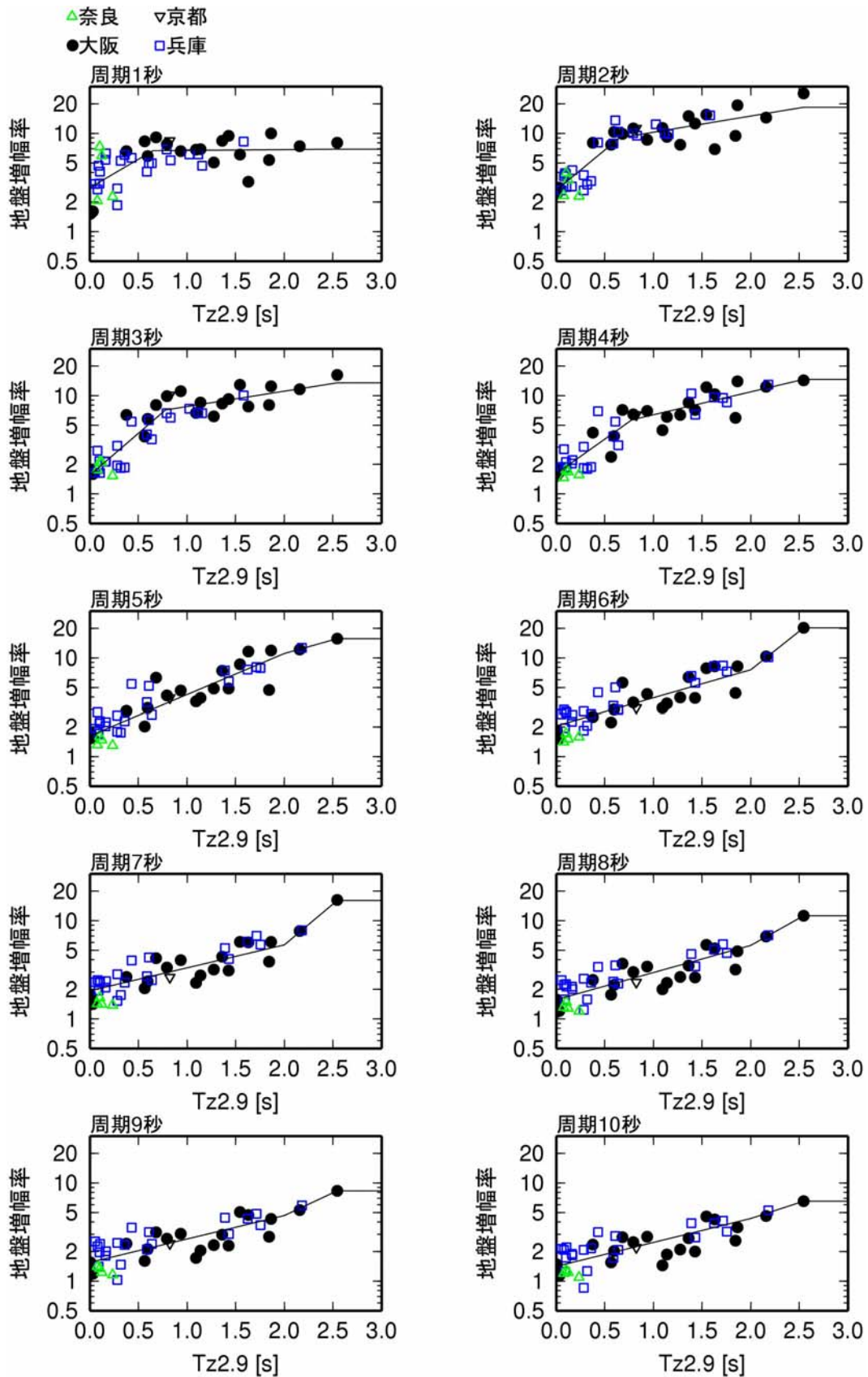
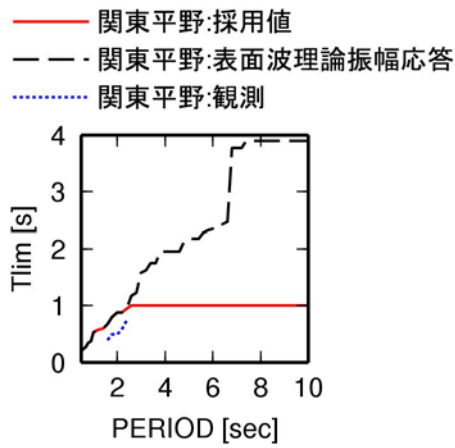
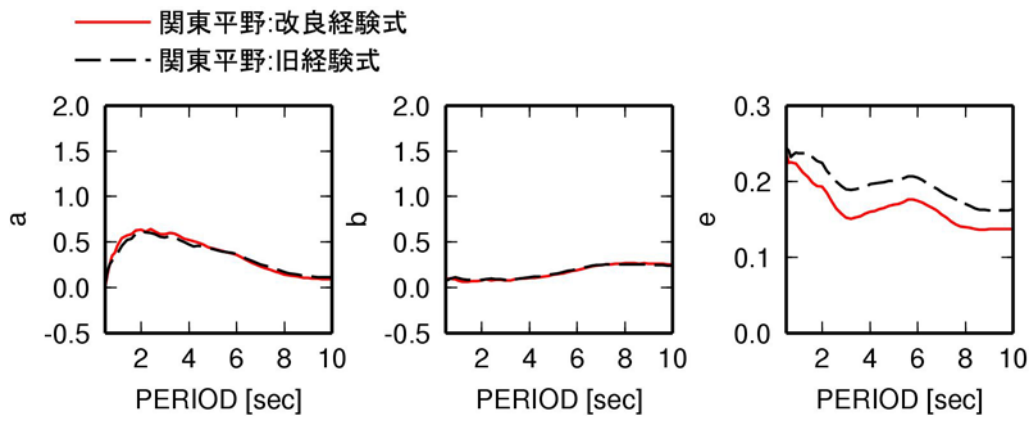


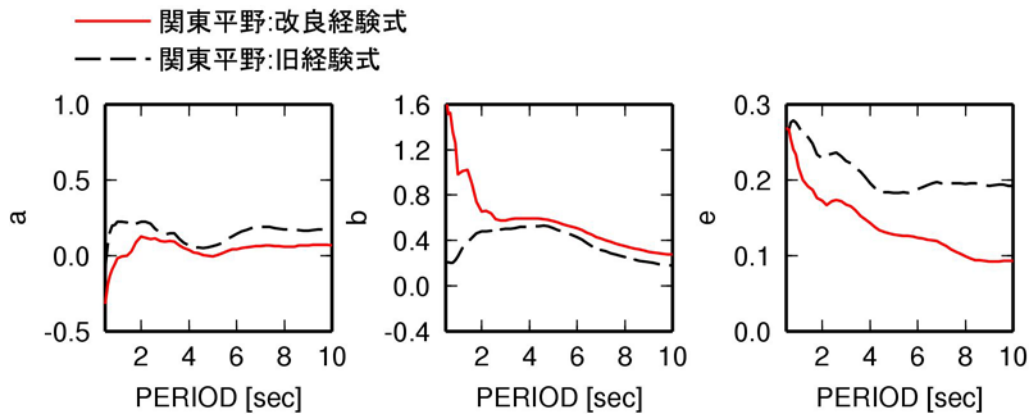
図 2.2-18 大阪平野の観測点の $Tz_{2.9}$ と地盤増幅率の関係と回帰式



(a) T_{lim}

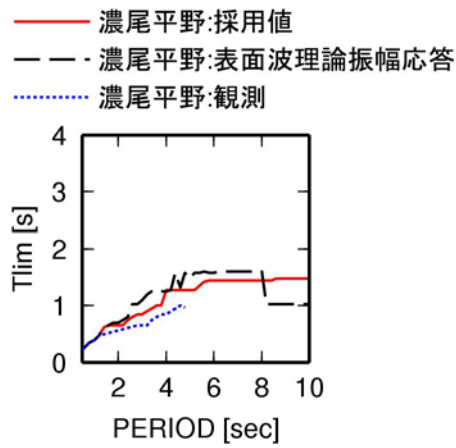


(b) T_{lim} 以上の周期の回帰式

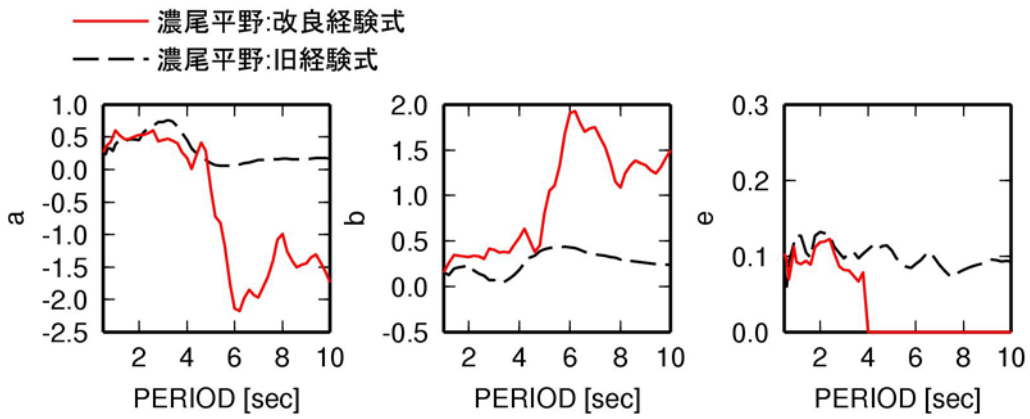


(c) T_{lim} 以下の周期の回帰式

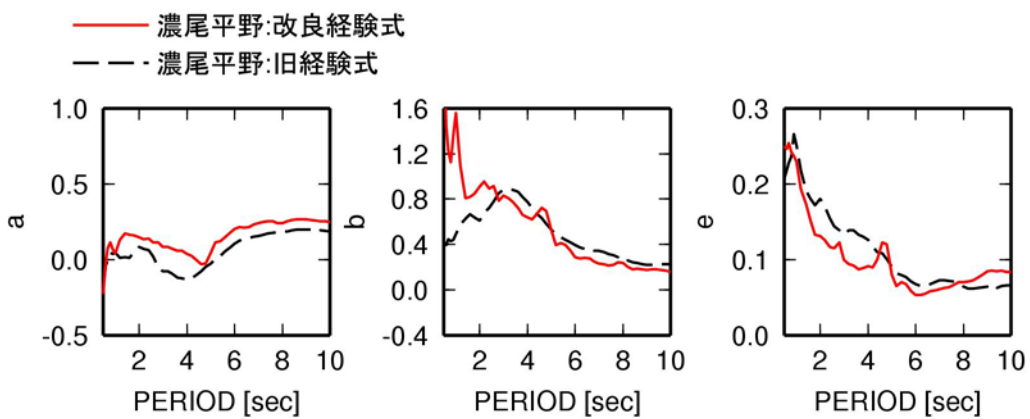
図 2.2-19 関東平野の地盤増幅率の回帰係数と回帰誤差 e (太平洋プレートの地震)



(a) T_{lim}



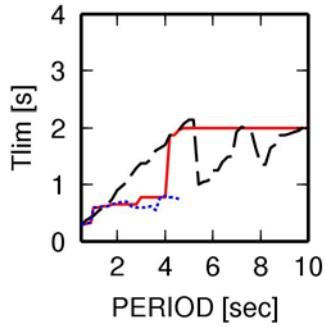
(b) T_{lim} 以上の周期の回帰式



(c) T_{lim} 以下の周期の回帰式

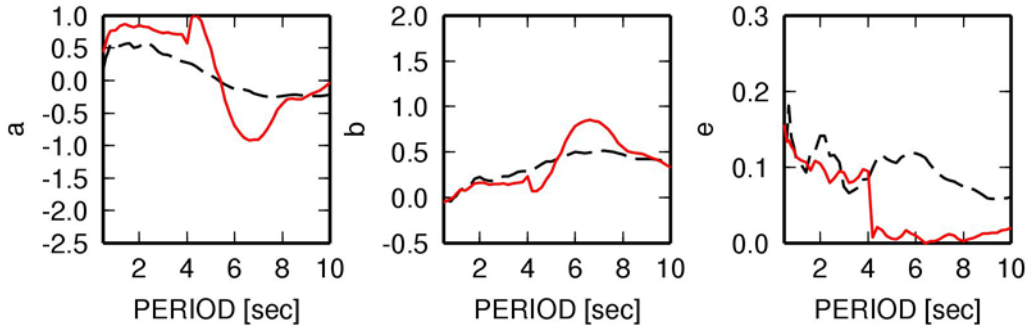
図 2.2-20 濃尾平野の地盤増幅率の回帰係数と回帰誤差 e

— 大阪平野:採用値
 - - - 大阪平野:表面波理論振幅応答
 大阪平野:観測



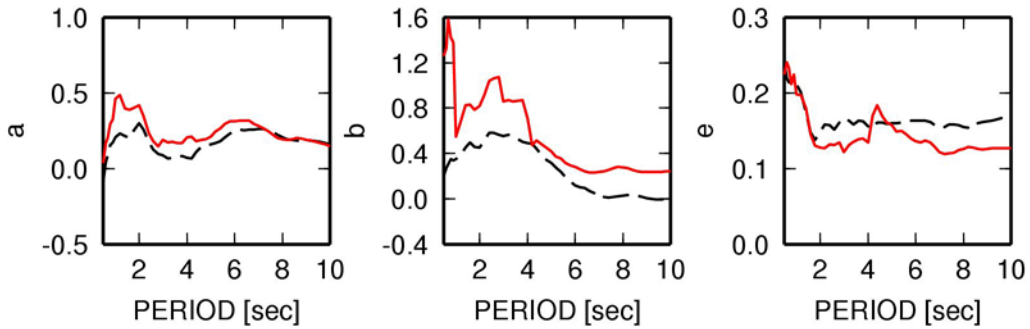
(a) T_{lim}

— 大阪平野:改良経験式
 - - - 大阪平野:旧経験式



(b) T_{lim} 以上の周期の回帰式

— 大阪平野:改良経験式
 - - - 大阪平野:旧経験式



(c) T_{lim} 以下の周期の回帰式

図 2.2-21 大阪平野の地盤増幅率の回帰係数と回帰誤差

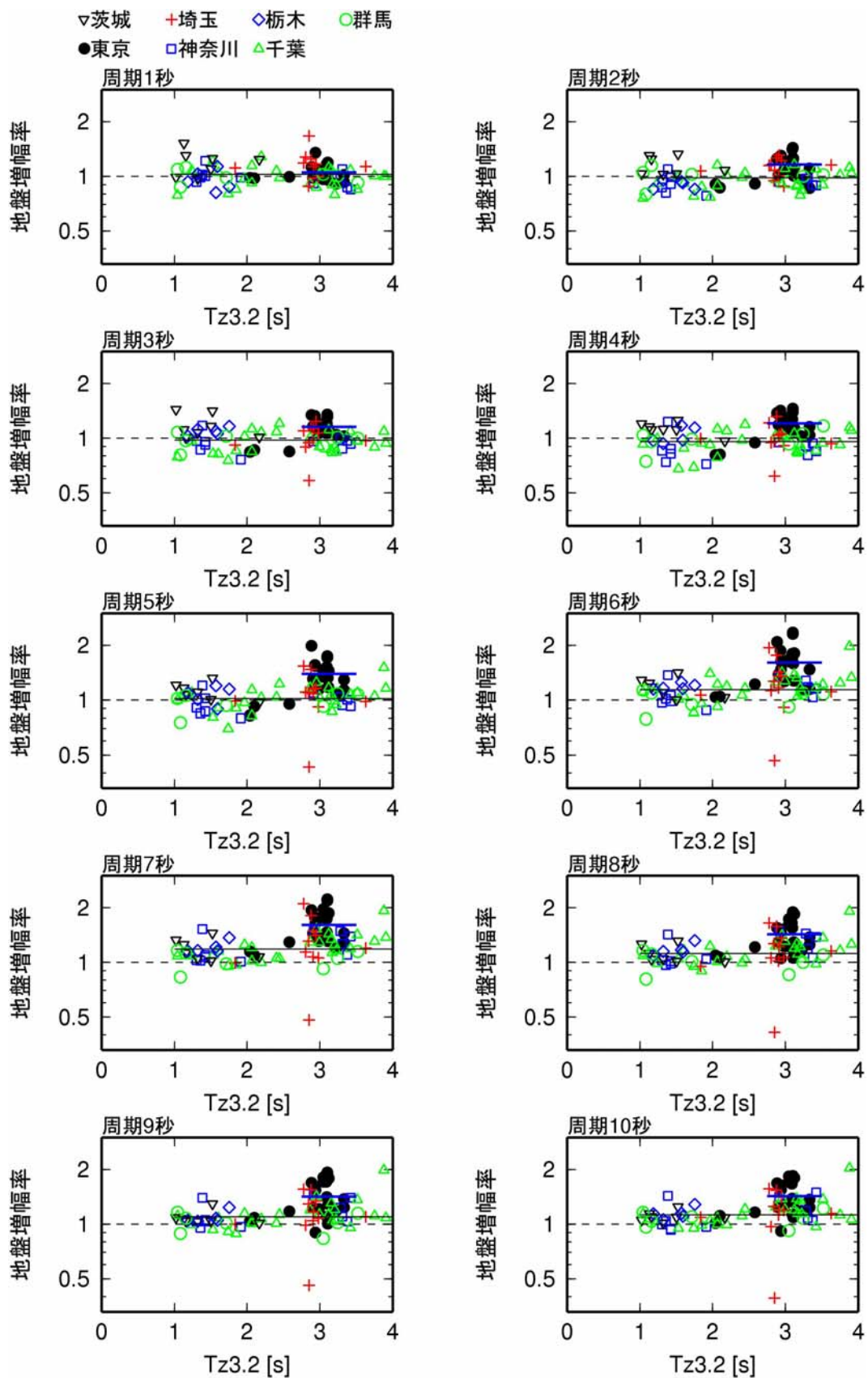
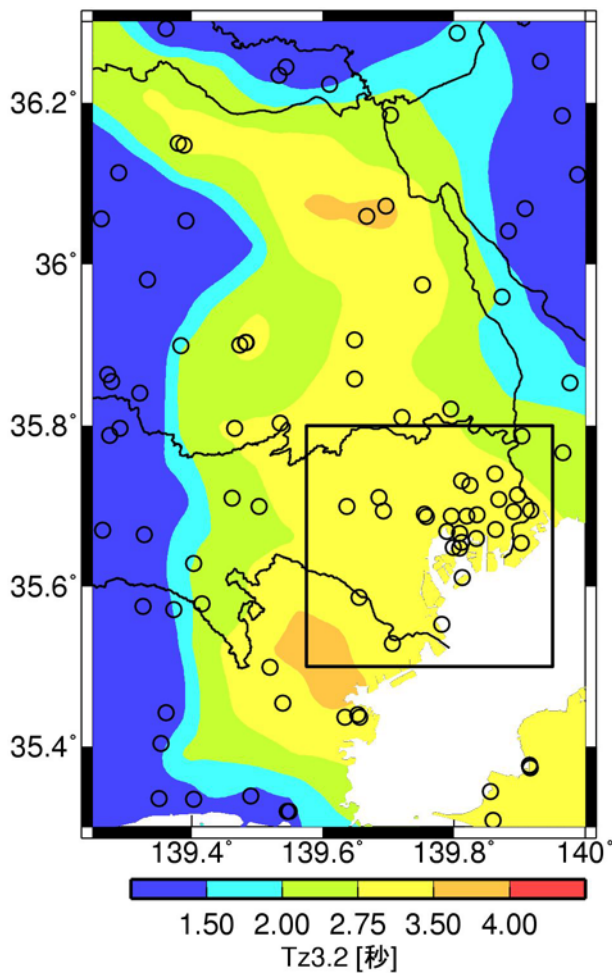
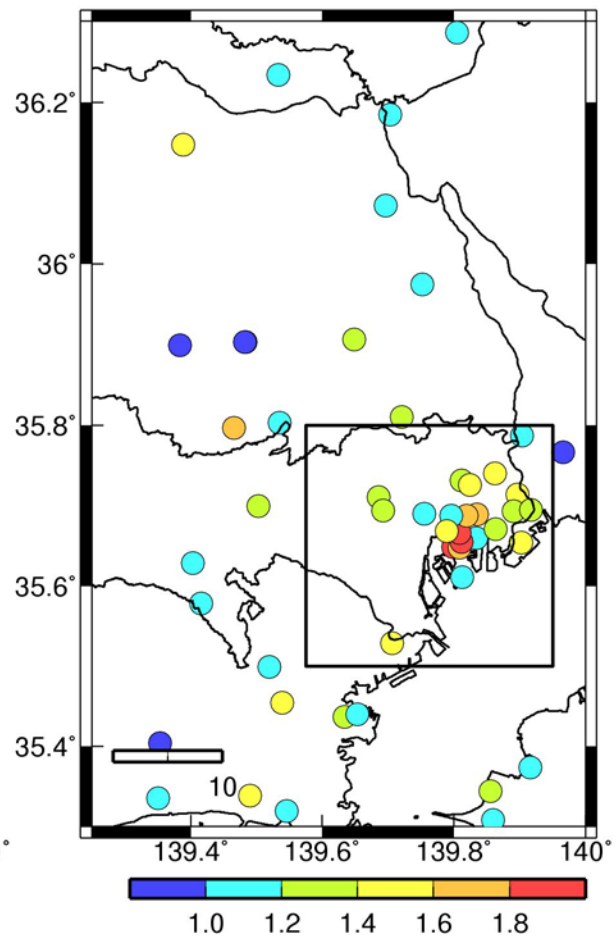


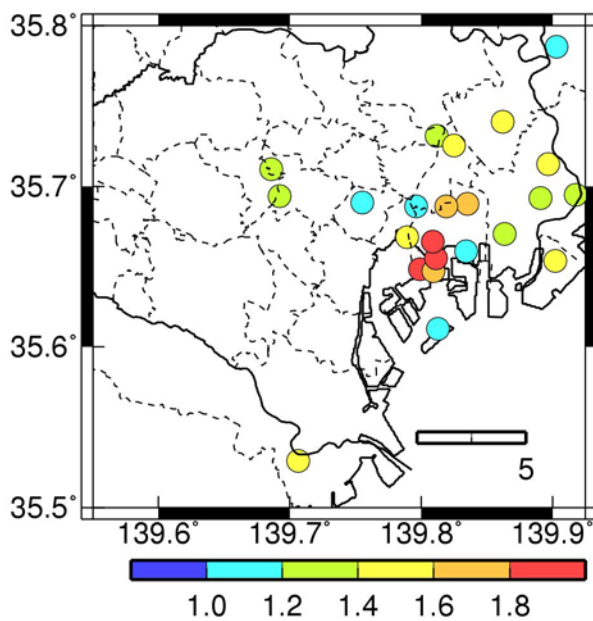
図 2.2-22 関東平野の $T_{z3.2} \geq 1$ s 以上の観測点での太平洋プレートの地震の地盤増幅率に対するフィリピン海プレートの地震の地盤増幅率の比 rat



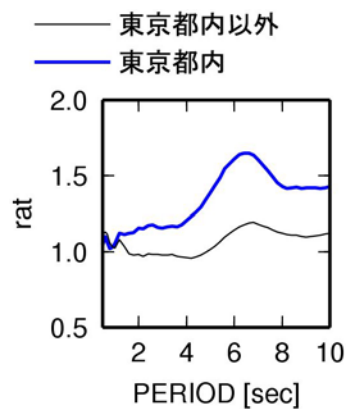
(a) $Tz_{3.2}$ 分布(○ : 全観測点)



(b) rat 分布(○ : rat がある観測点)



(c) (a),(b)の矩形領域内の rat 分布(○ : rat がある観測点)



(d) rat の周期依存性

図 2. 2-23 関東平野の $Tz_{3.2}$ 分布と太平洋プレートとフィリピン海プレートの地震の地盤増幅率の比 rat

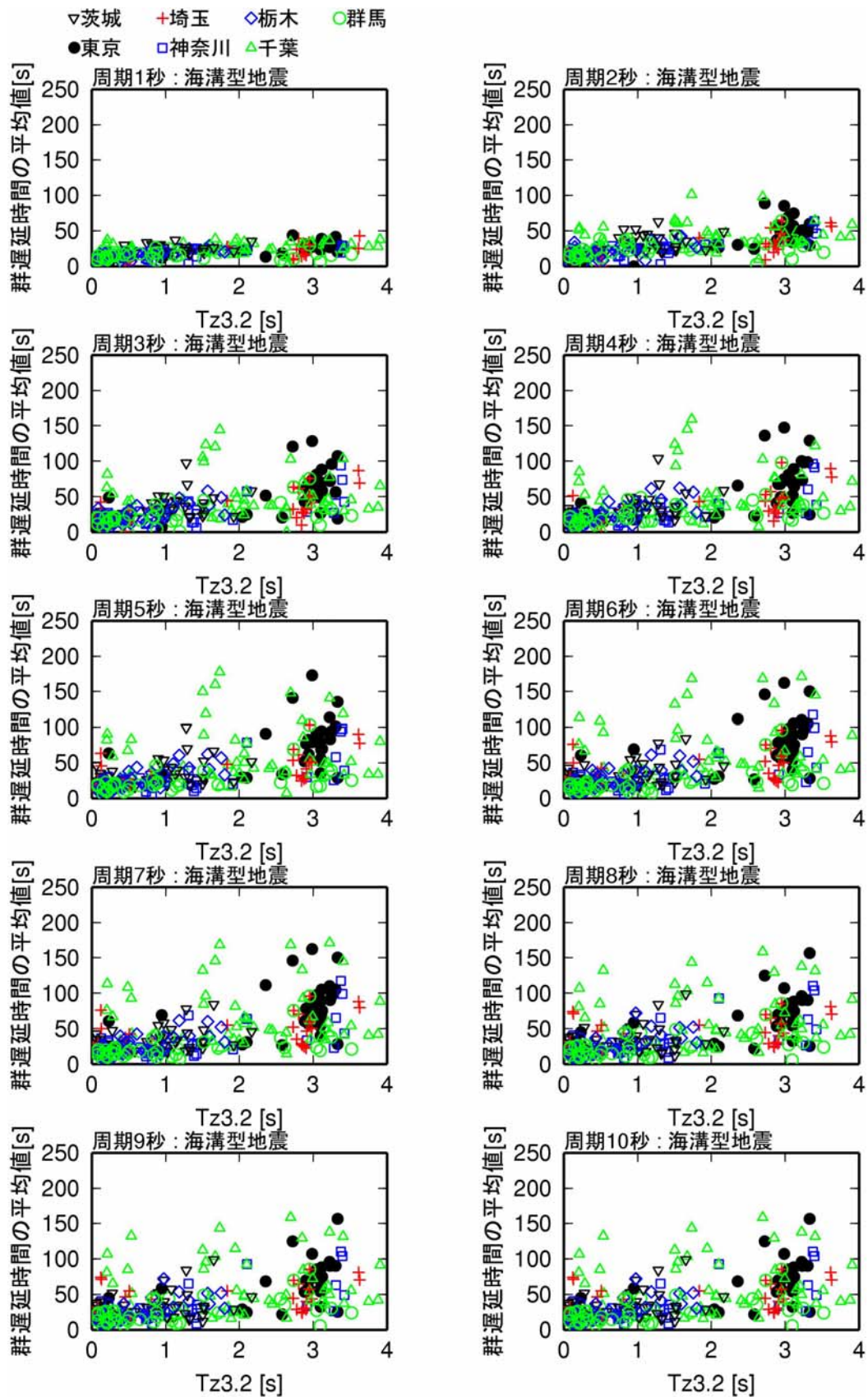


図 2.2-24 関東平野の観測点の元データの $Tz_{3.2}$ と群遅延時間の平均値のサイト係数の関係(太平洋プレートの地震)

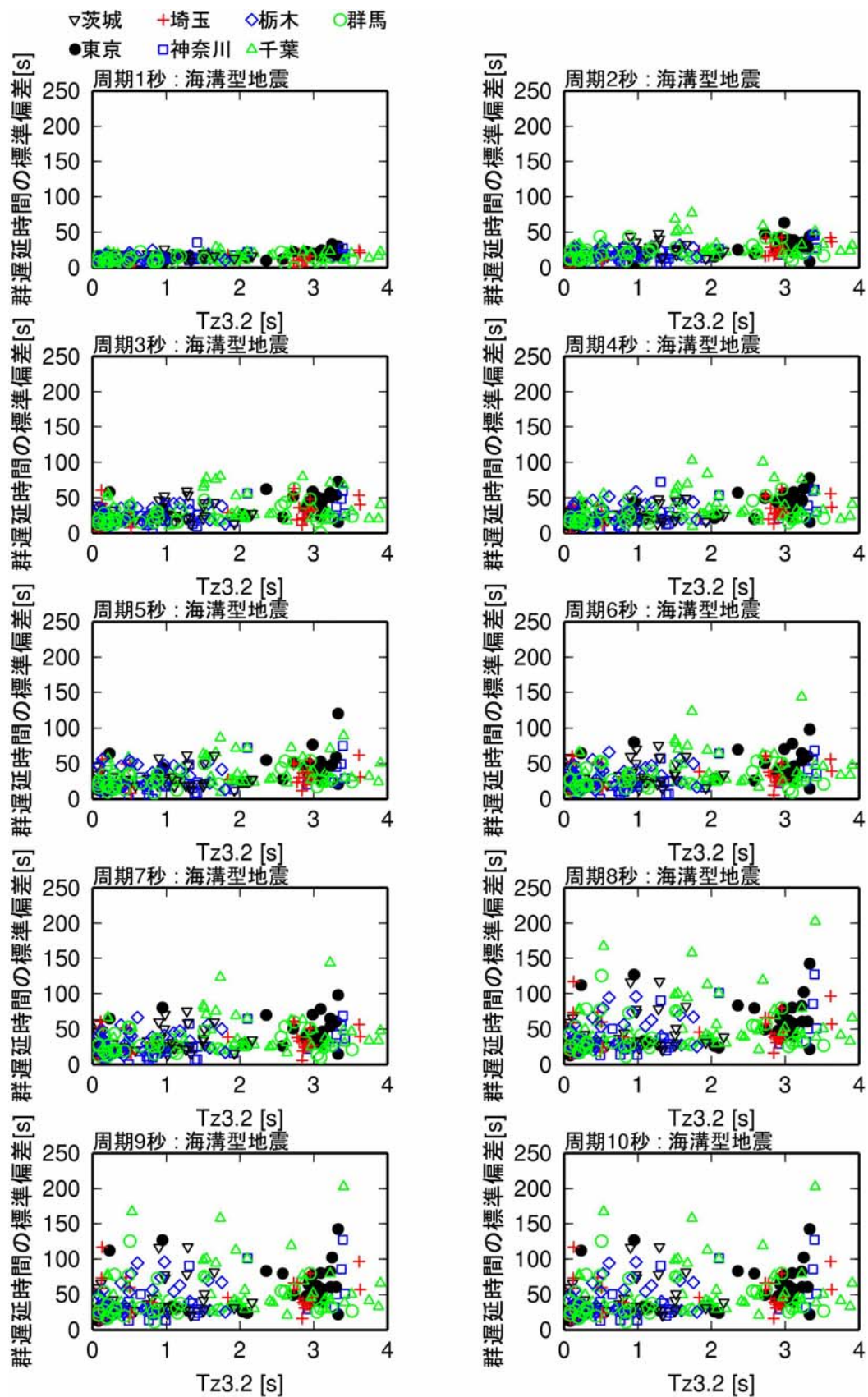


図 2.2-25 関東平野の観測点の元データの $Tz_{3.2}$ と群遅延時間の標準偏差のサイト係数の関係(太平洋プレートの地震)

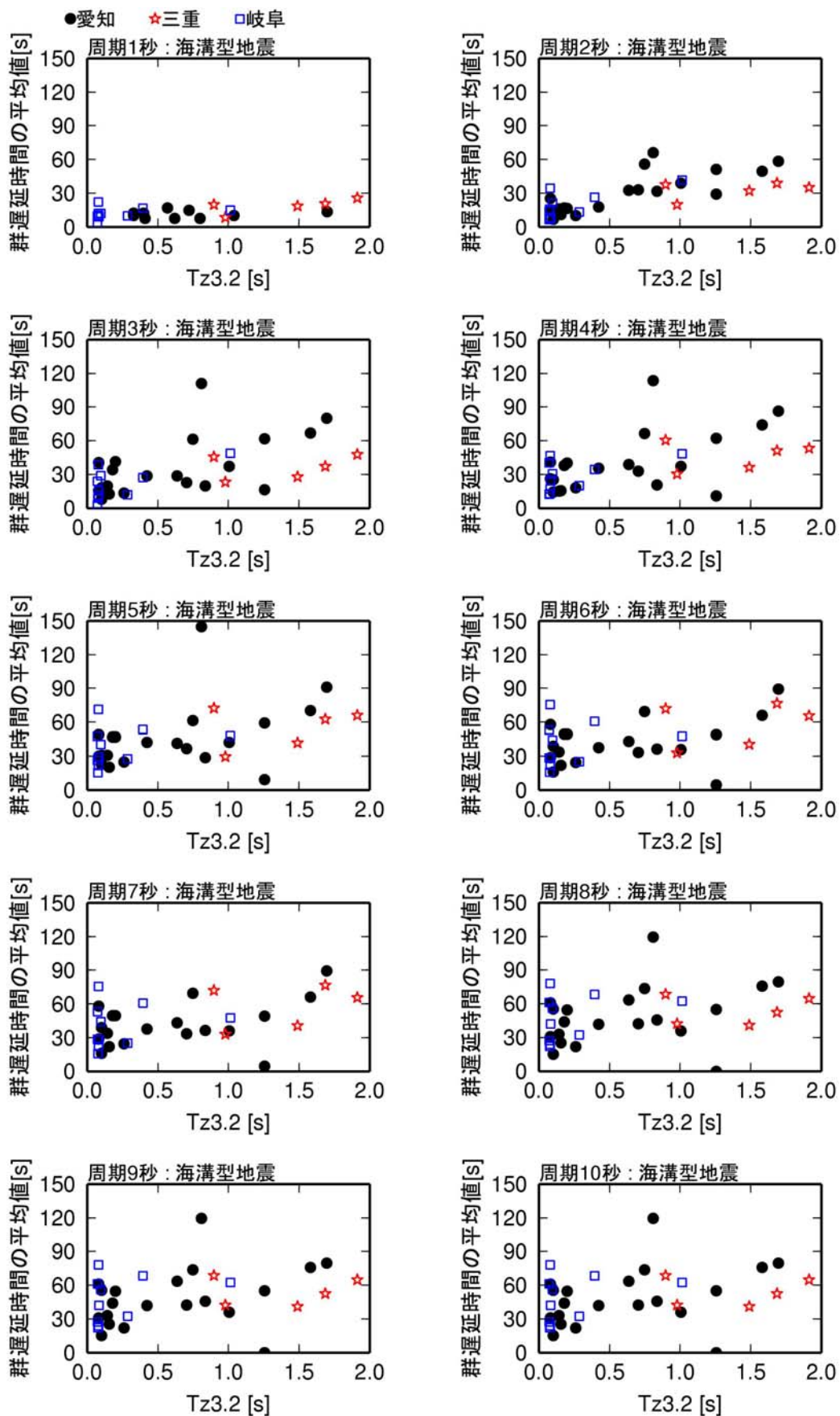


図 2. 2-26 濃尾平野の観測点の元データの $Tz_{3.2}$ と群遅延時間の平均値のサイト係数の関係

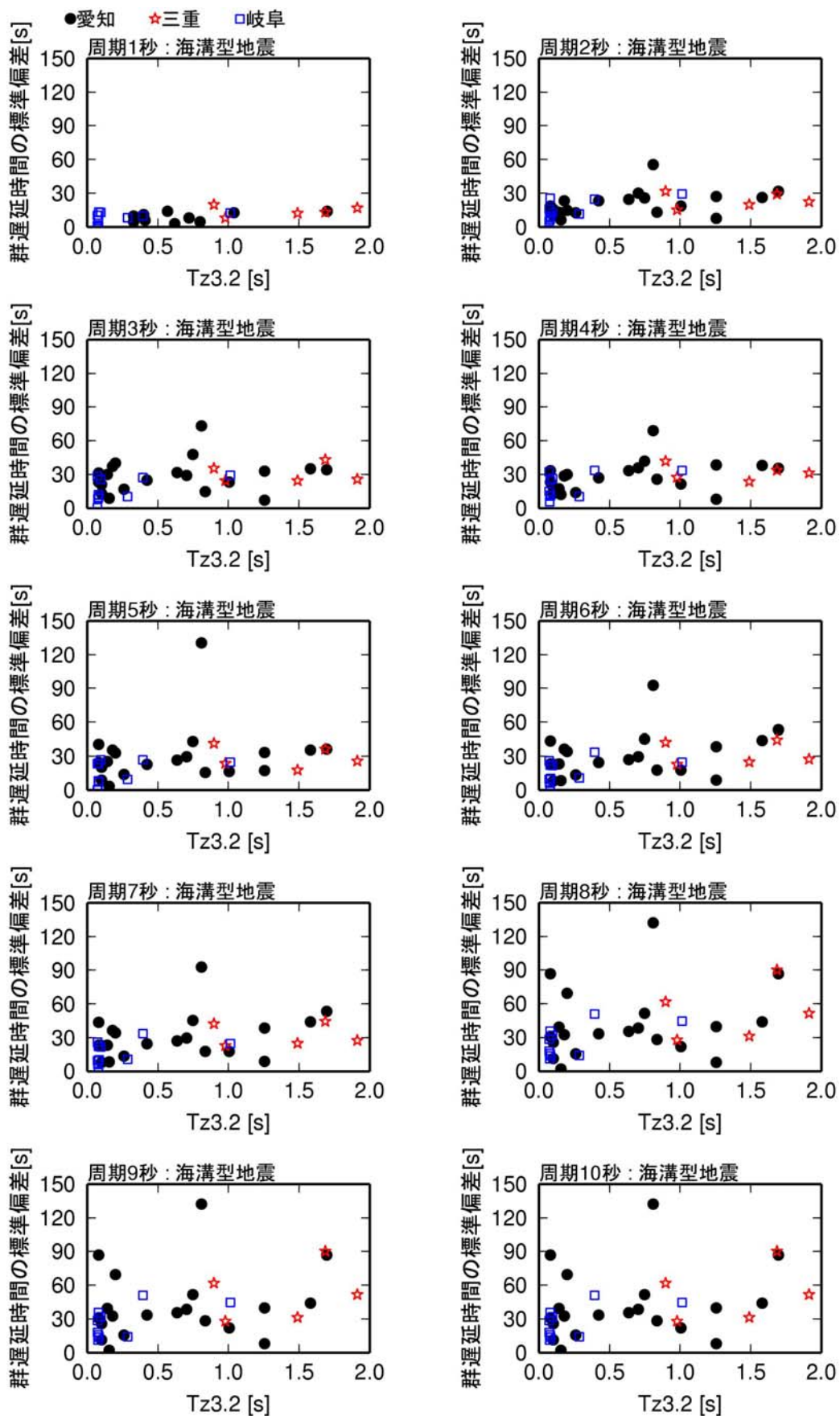


図 2.2-27 濃尾平野の観測点の元データの $Tz_{3.2}$ と群遅延時間の平均値のサイト係数の関係

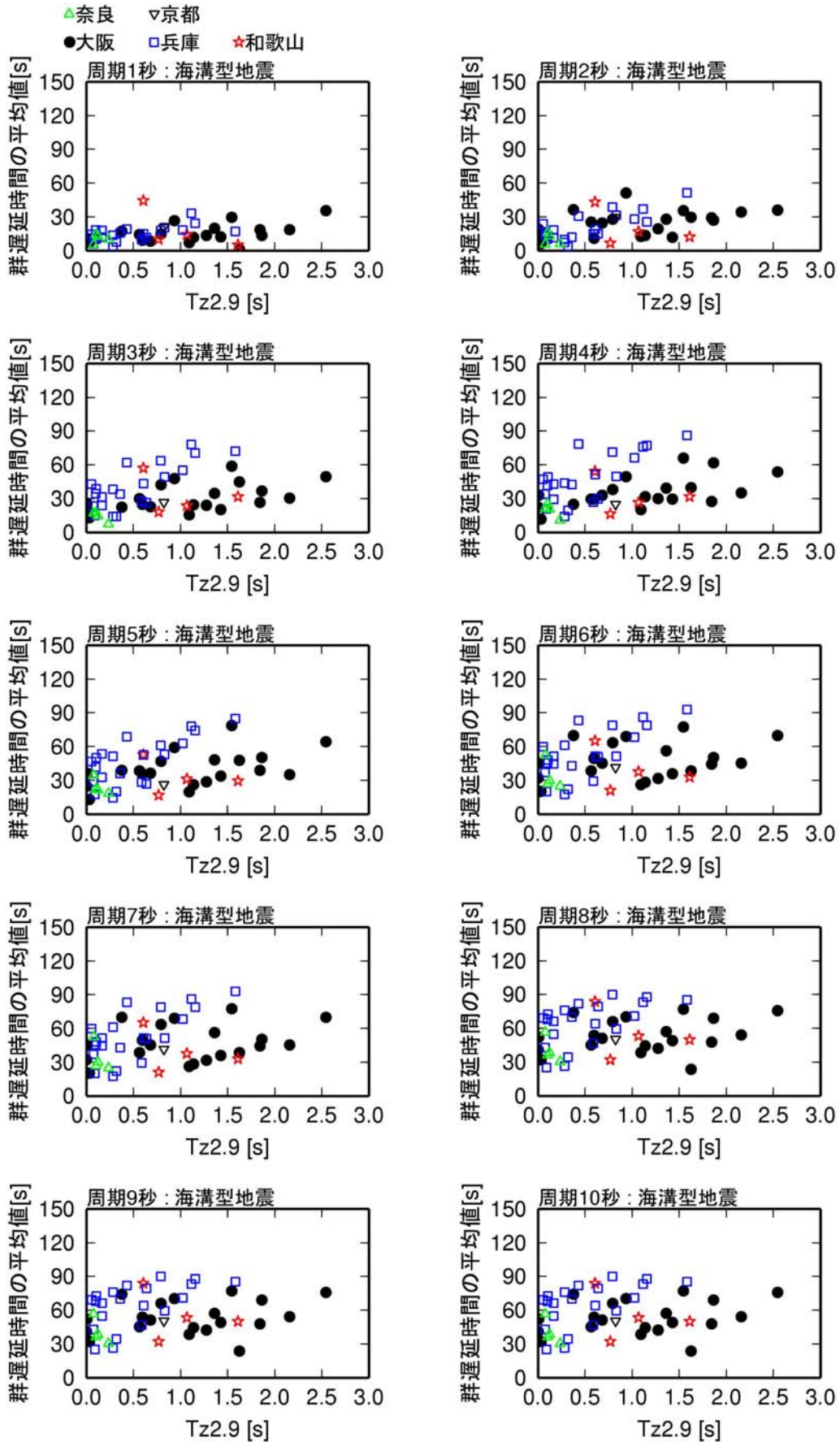


図 2. 2-28 大阪平野の観測点の元データの $Tz_{2.9}$ と群遅延時間の平均値のサイト係数の関係

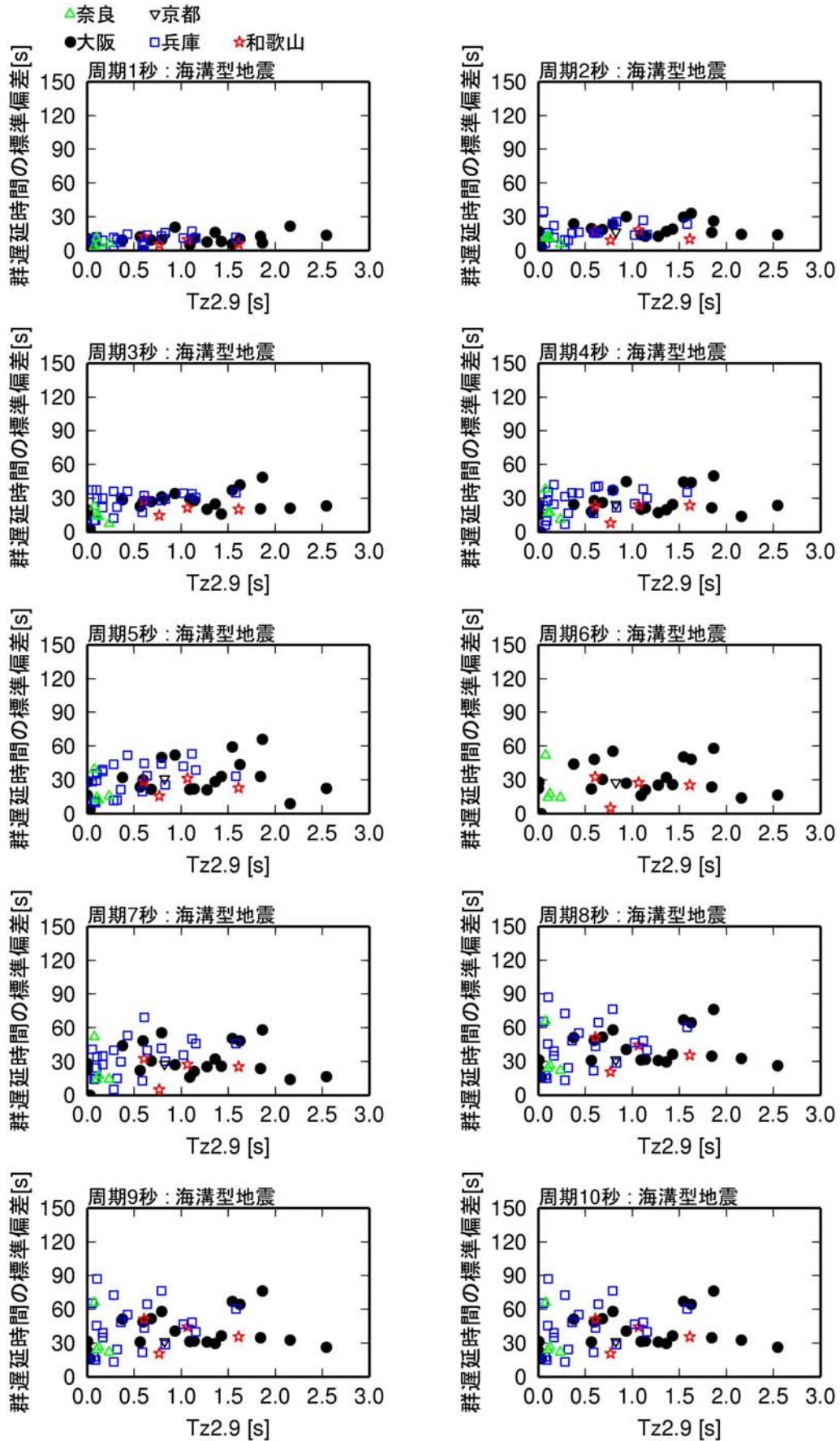


図 2.2-29 大阪平野の観測点の元データの $T_{z2.9}$ と群遅延時間の標準偏差のサイト係数の関係

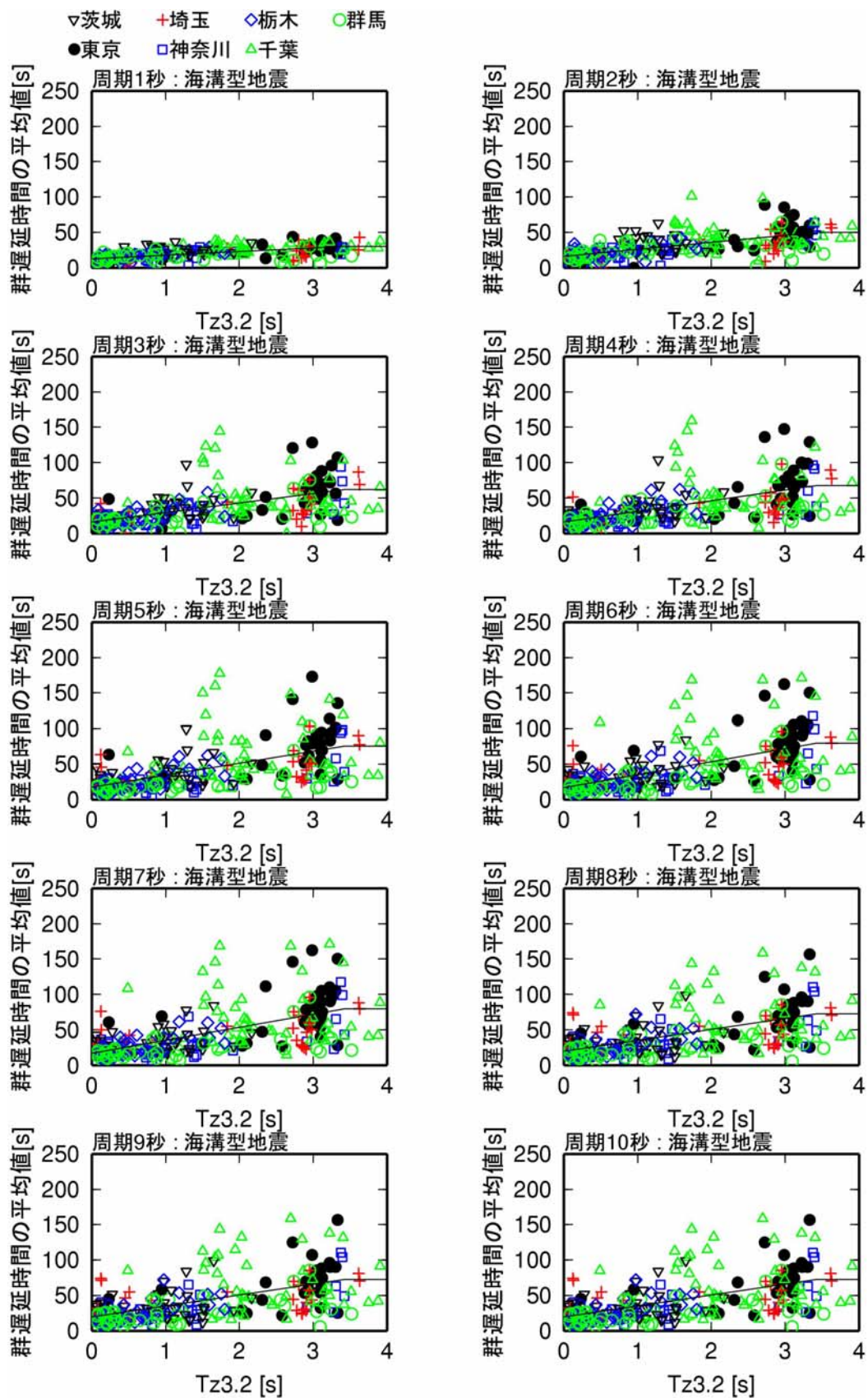


図 2.2-30 関東平野の観測点の $Tz_{3.2}$ と群遅延時間の平均値のサイト係数の関係と回帰式

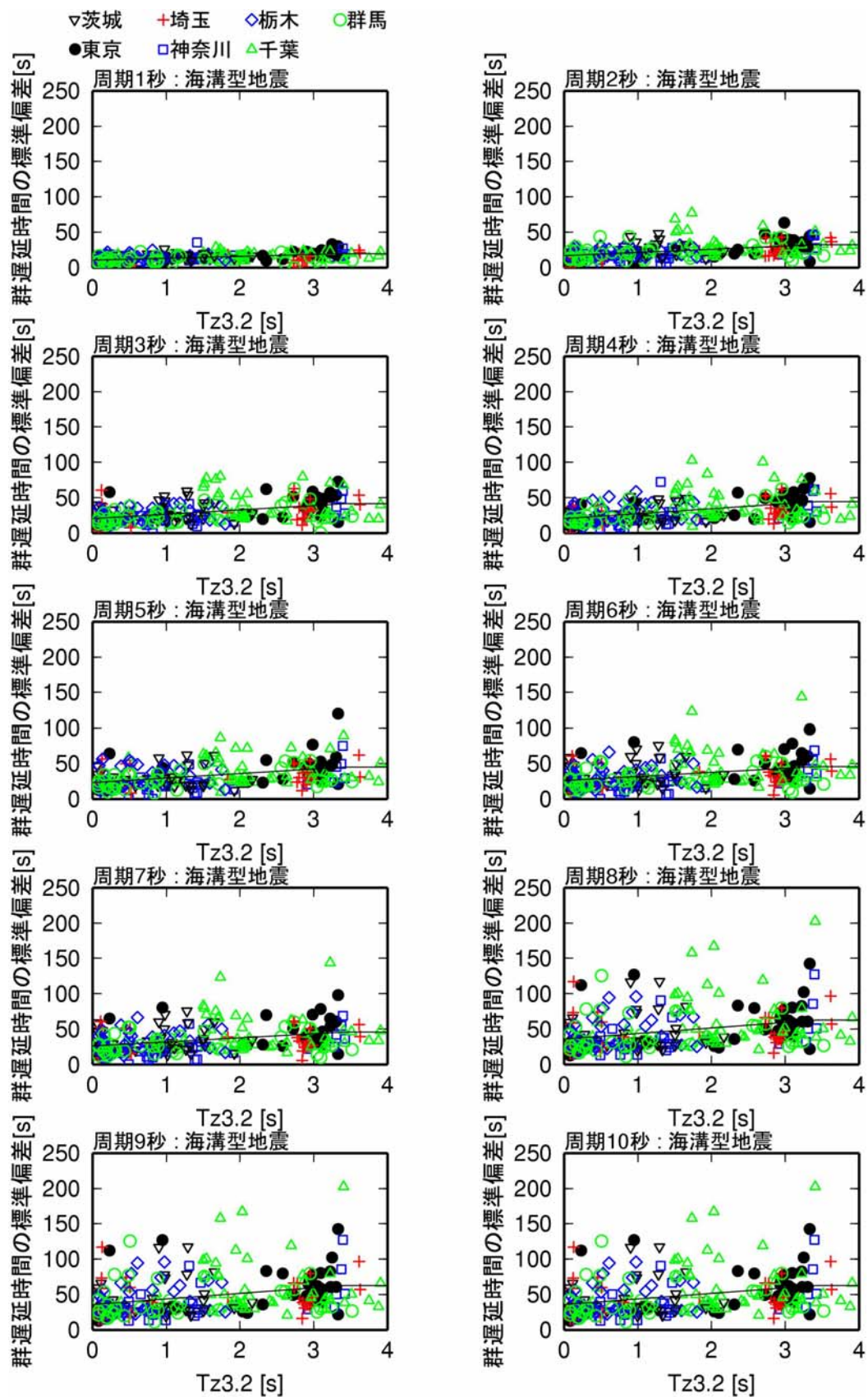


図 2.2-31 関東平野の観測点の $Tz_{3.2}$ と群遅延時間の標準偏差のサイト係数の関係と回帰式

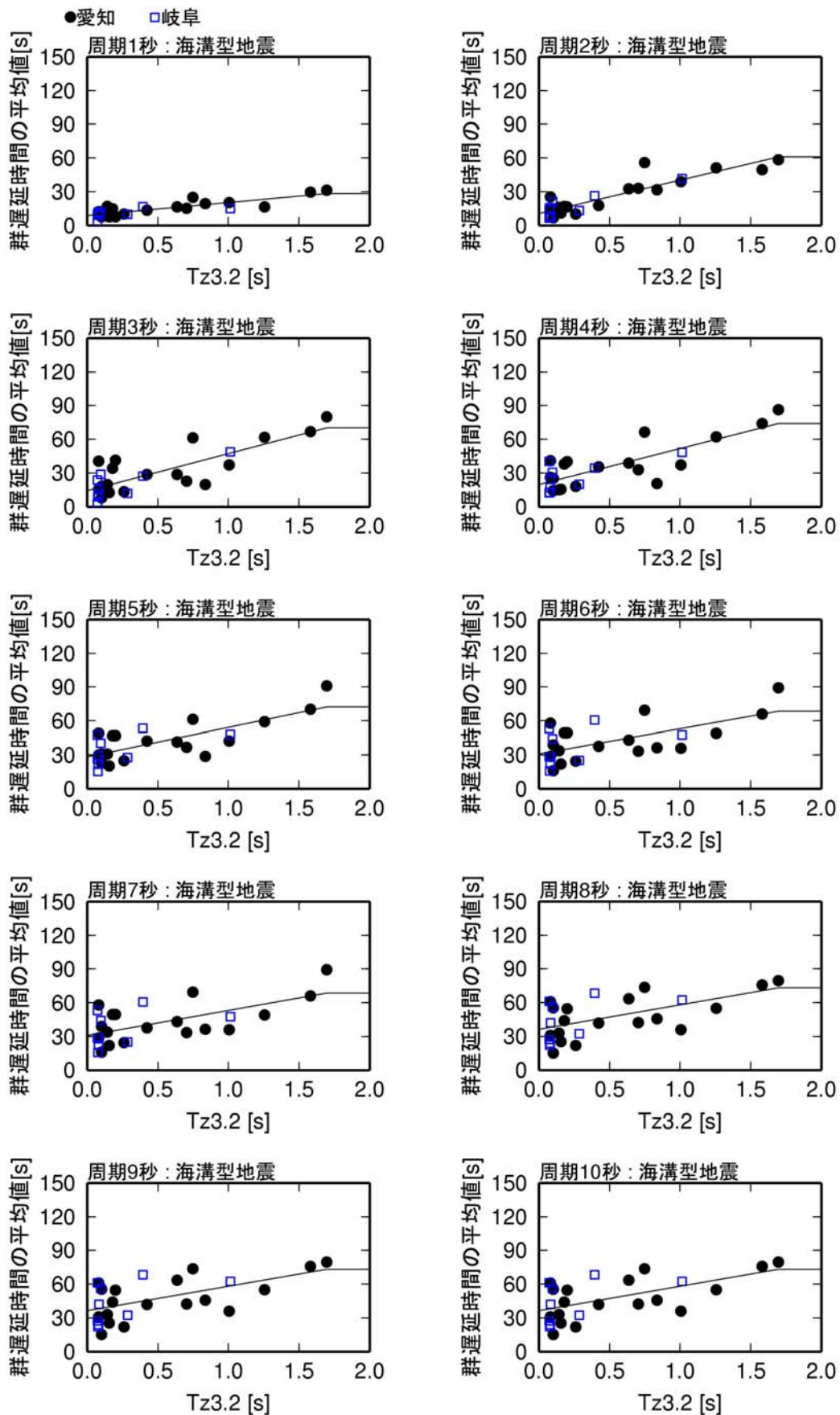


図 2.2-32 濃尾平野の観測点の $Tz_{3.2}$ と群遅延時間の平均値のサイト係数の関係と回帰式

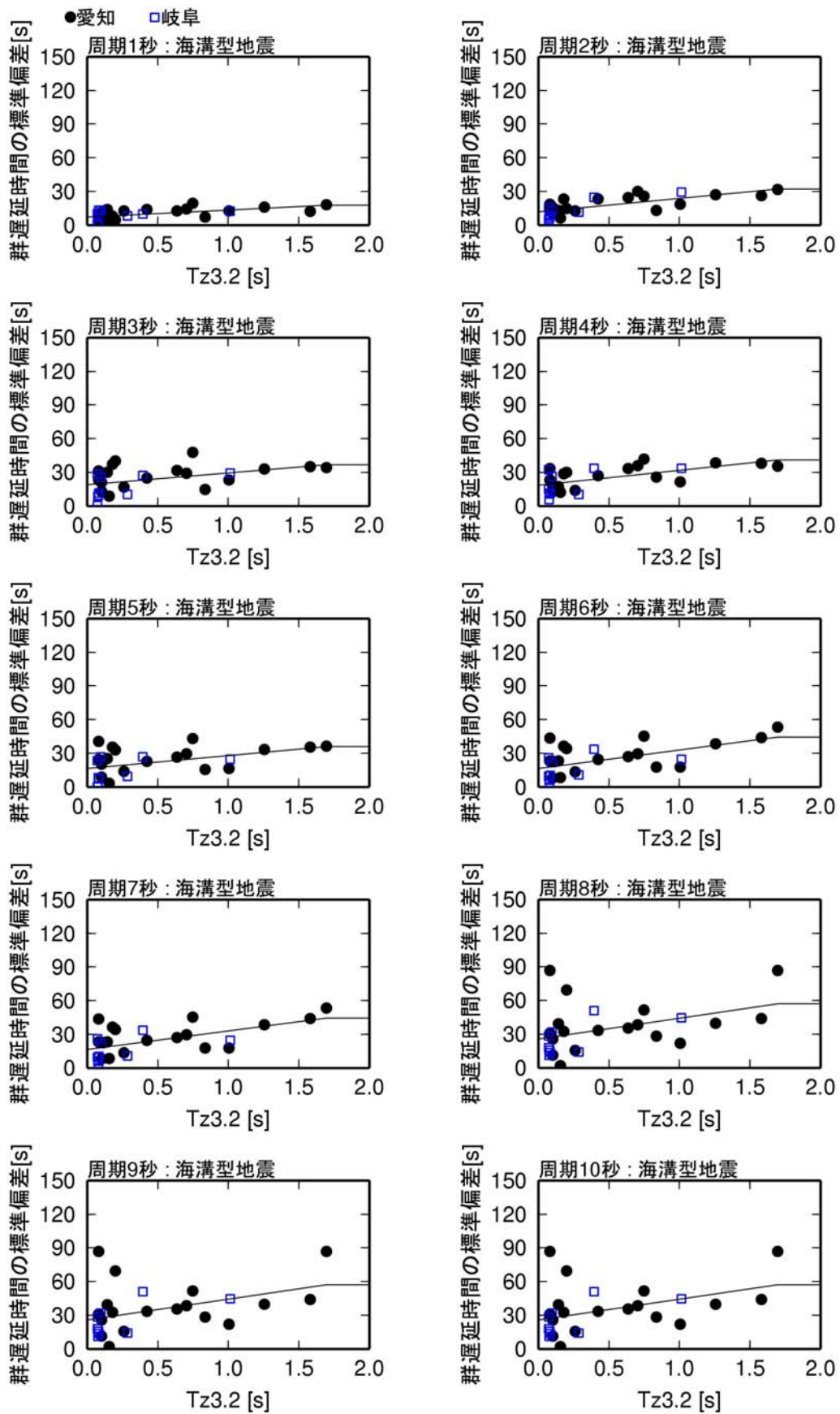


図 2.2-33 濃尾平野の観測点の $Tz_{3.2}$ と群遅延時間の標準偏差のサイト係数の関係と回帰式

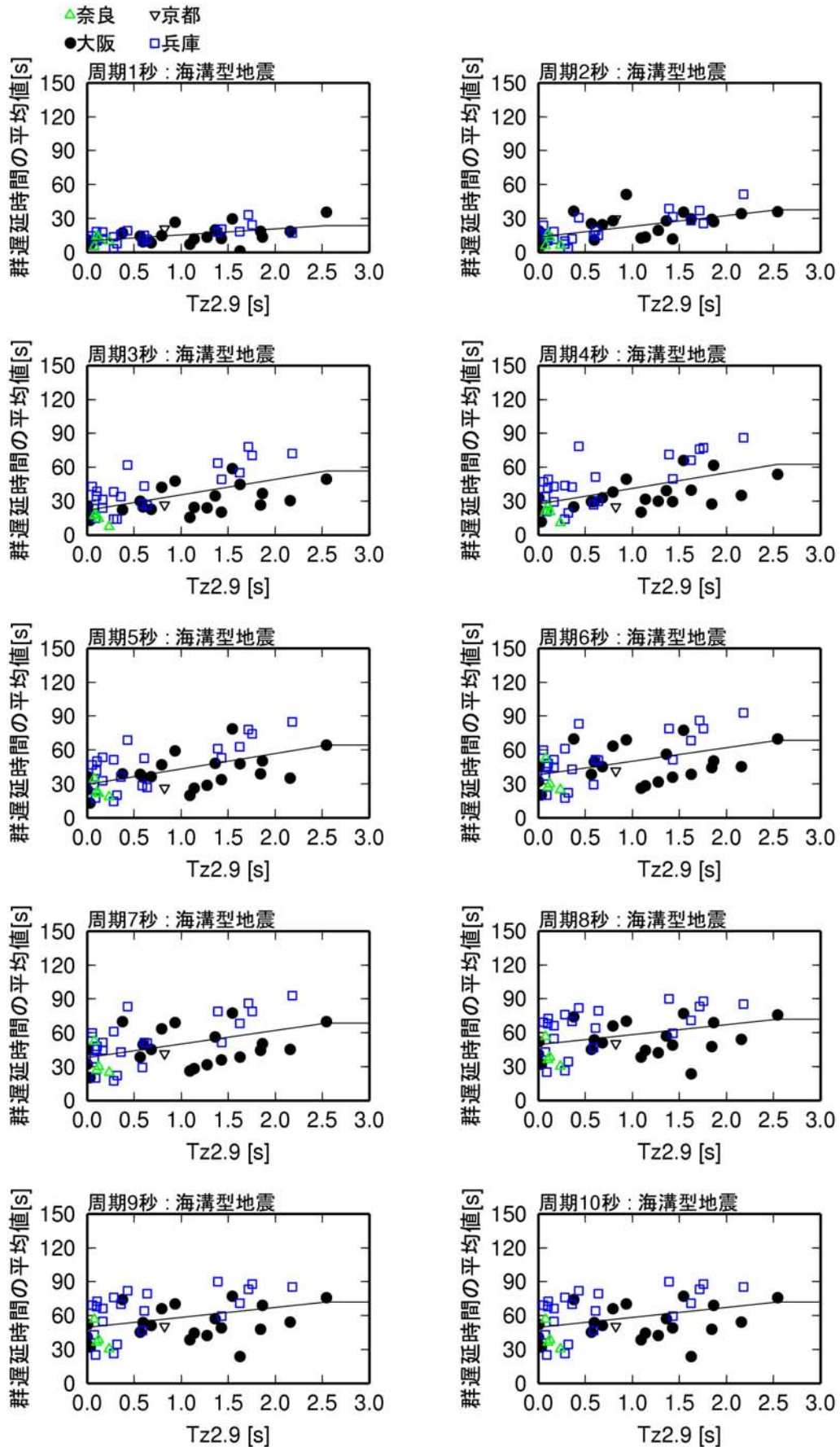


図 2.2-34 大阪平野の観測点の $Tz_{2.9}$ と群遅延時間の平均値のサイト係数の関係と回帰式

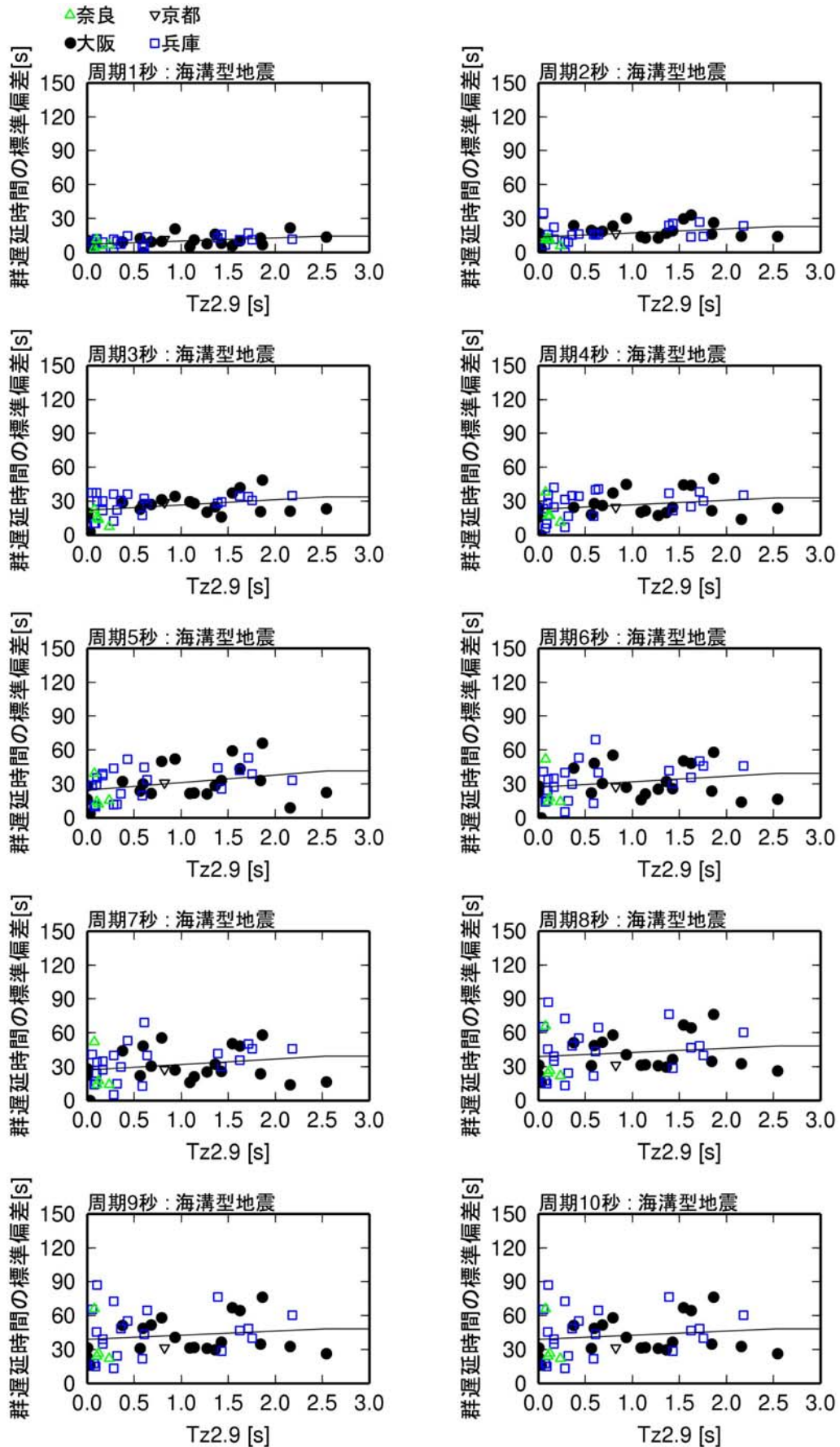


図 2. 2-35 大阪平野の観測点の $T_{z2.9}$ と群遅延時間の標準偏差のサイト係数の関係と回帰式

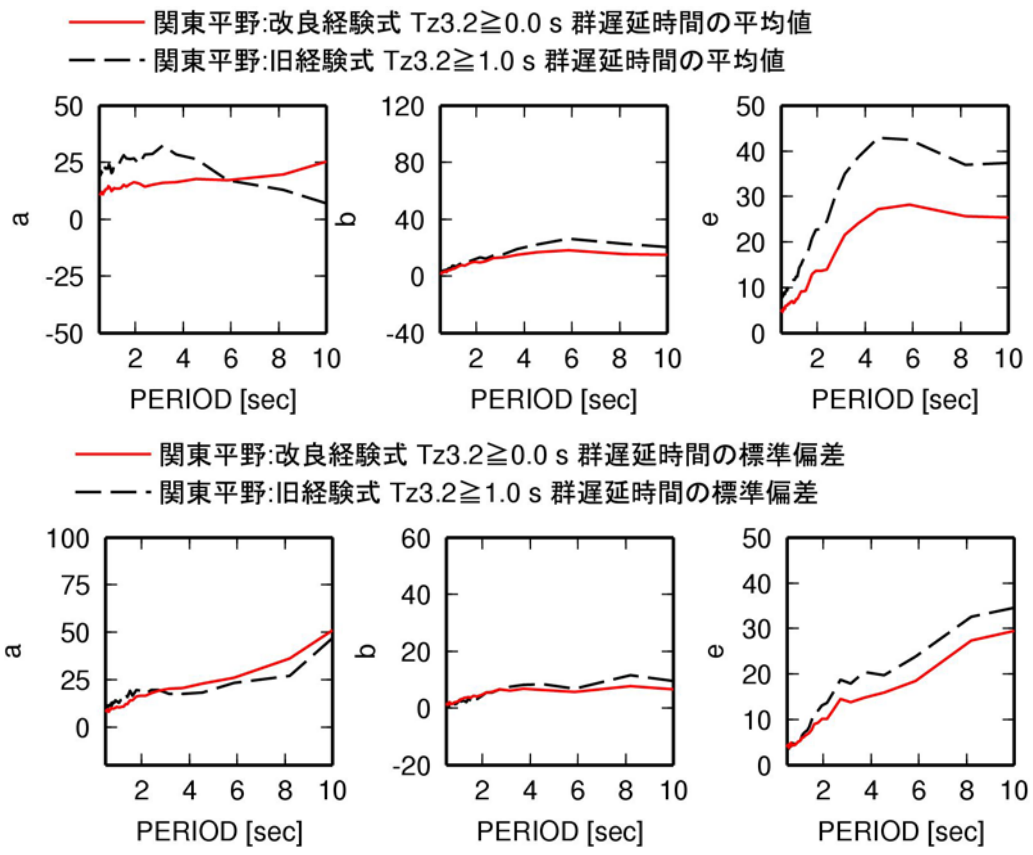


図 2. 2-36 関東平野の群遅延時間の平均値と標準偏差のサイト係数の回帰係数と回帰誤差 e(太平洋プレートの地震)

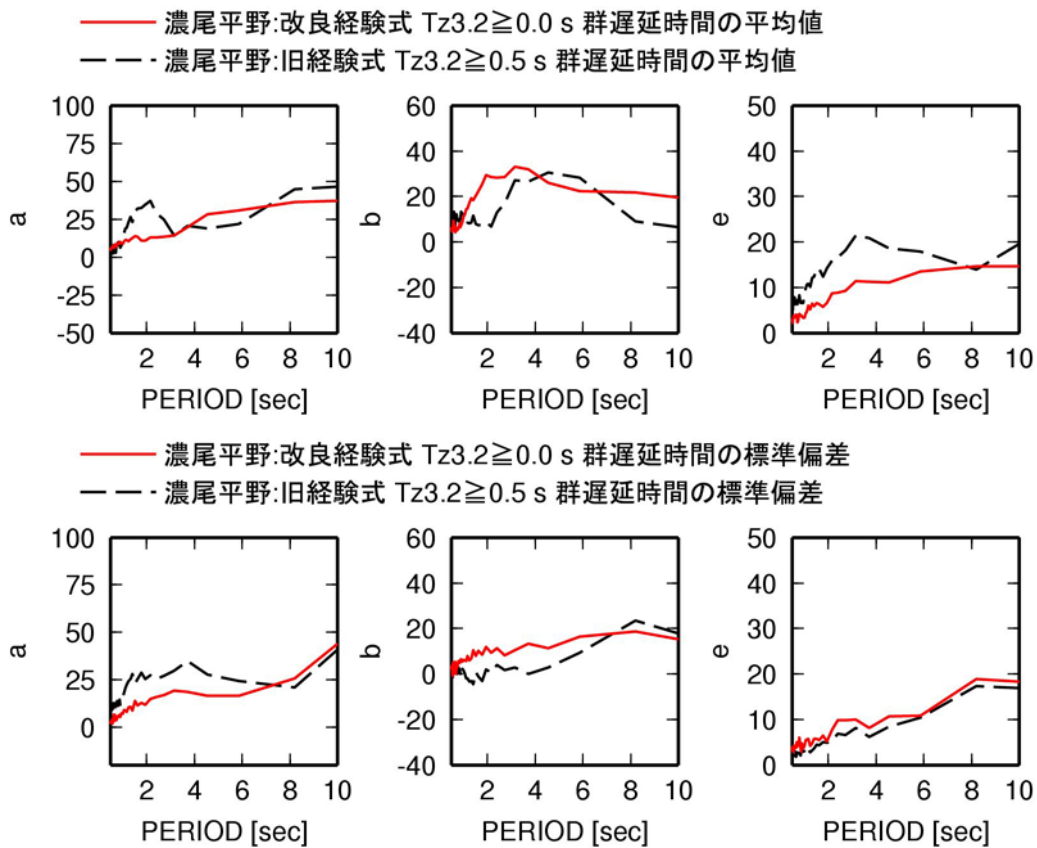


図 2. 2-37 濃尾平野の群遅延時間の平均値と標準偏差のサイト係数の回帰係数と回帰誤差 e

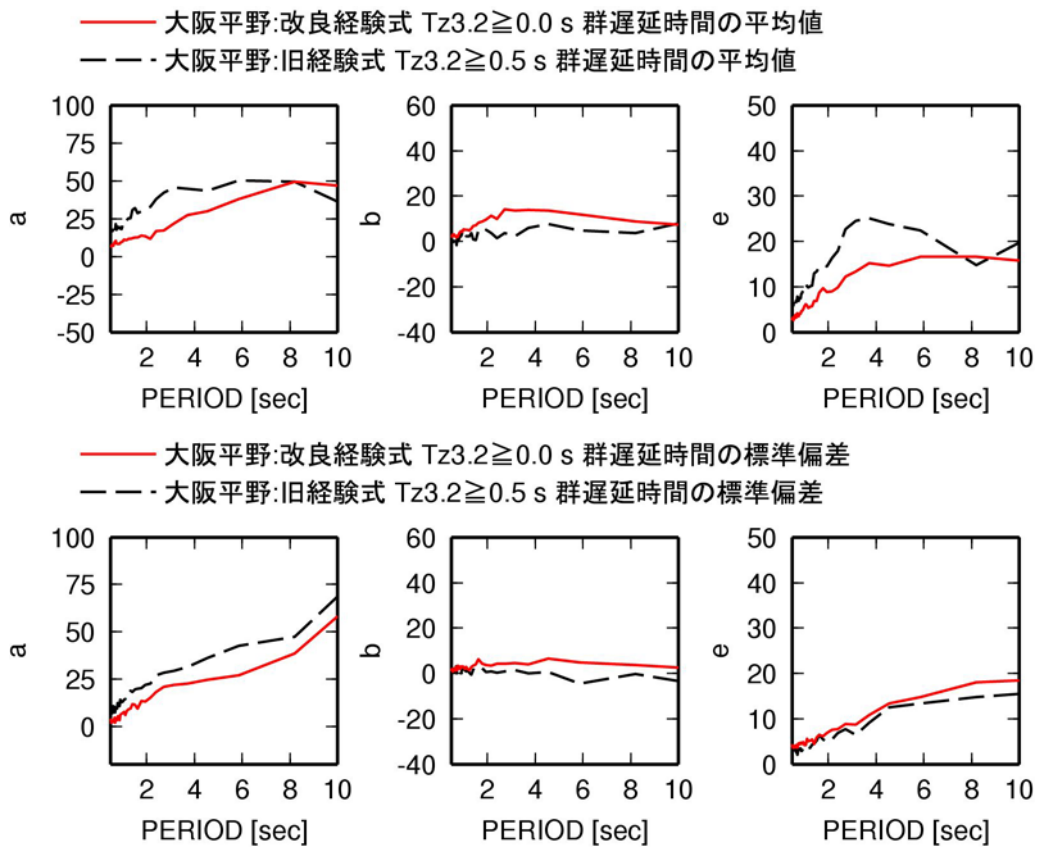


図 2. 2-38 大阪平野の群遅延時間の平均値と標準偏差のサイト係数の回帰係数と回帰誤差 e

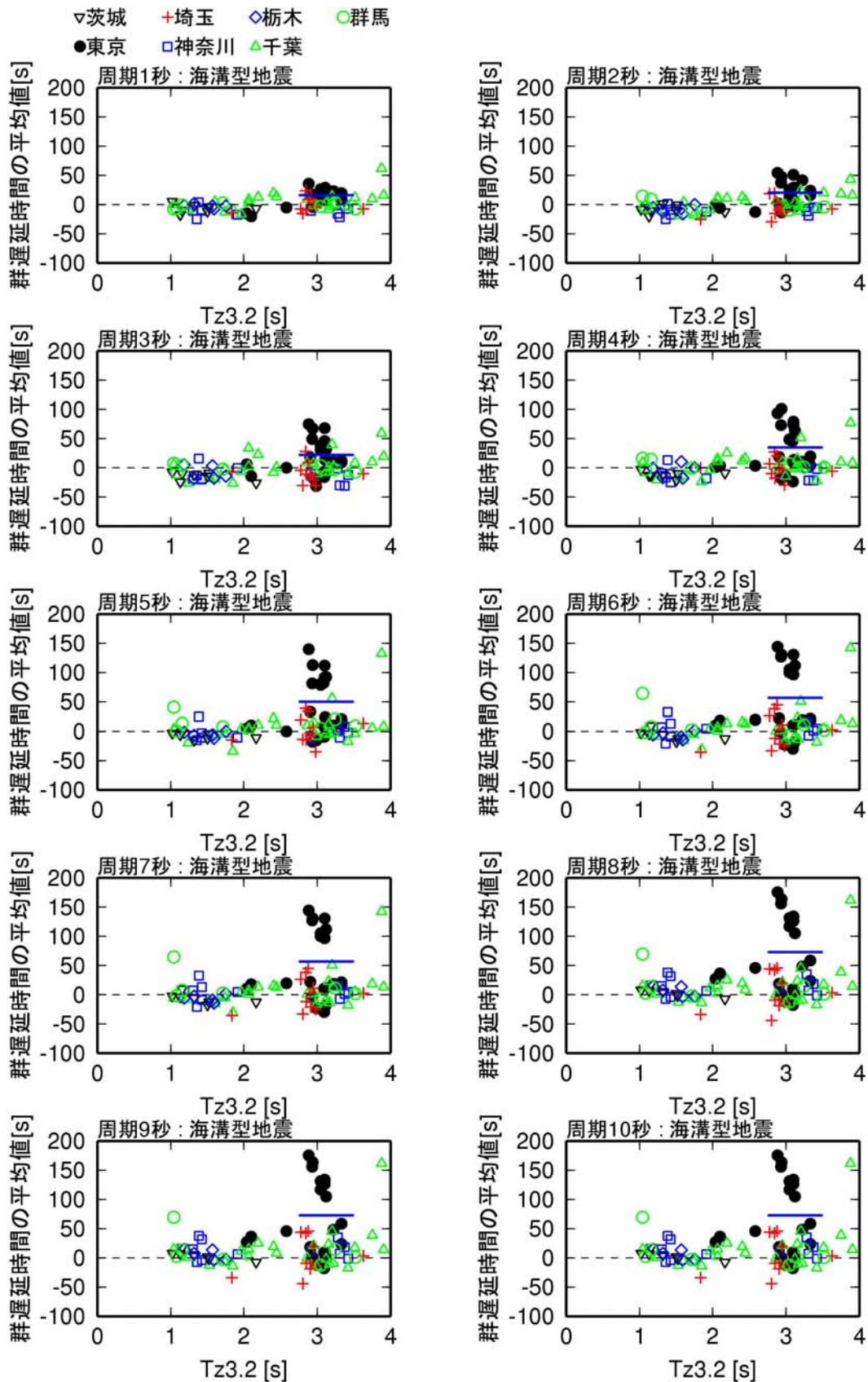


図 2.2-39 関東平野の $Tz3.2 \geq 1$ s 以上の観測点でのフィリピン海プレートの地震の群遅延時間の平均値のサイト係数の太平洋プレートの地震の群遅延時間の平均値のサイト係数からの差 diff

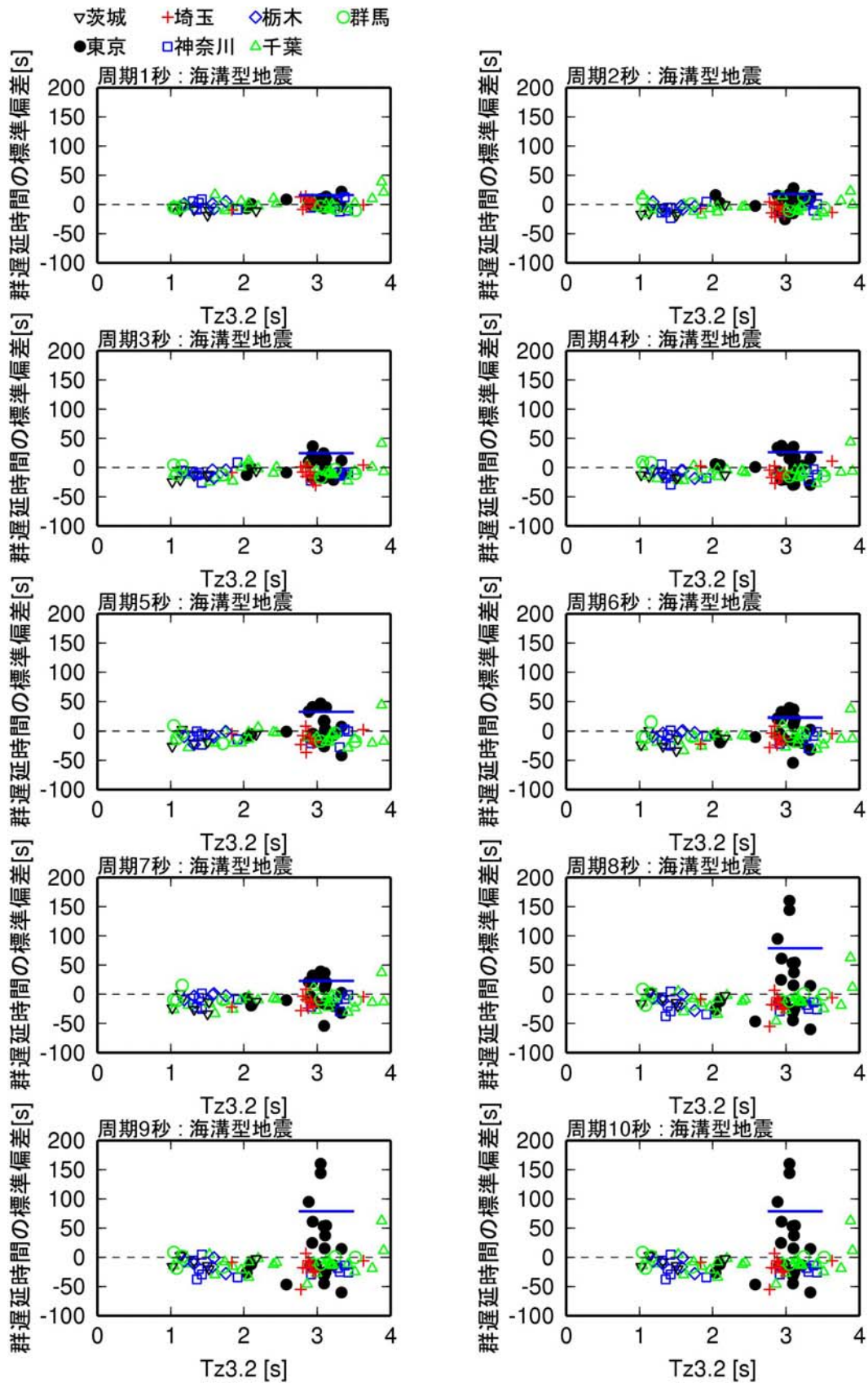
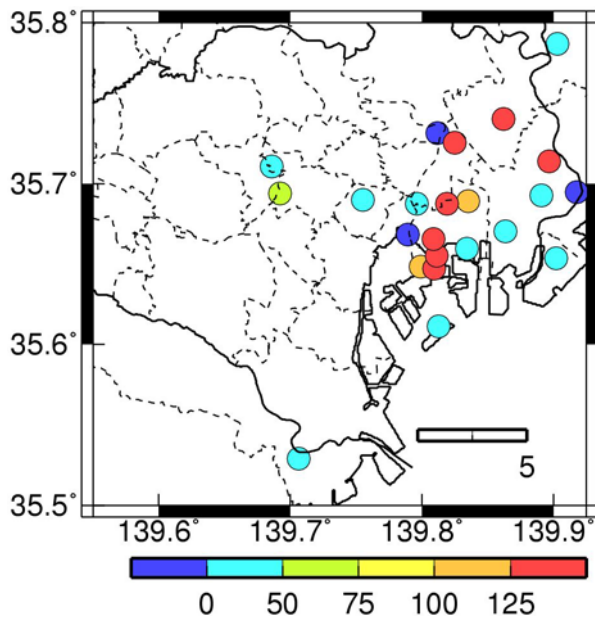
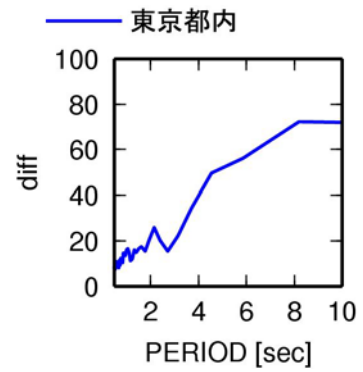


図 2.2-40 関東平野の $Tz3.2 \geq 1$ s 以上の観測点でのフィリピン海プレートの地震の群遅延時間の平均値のサイト係数の太平洋プレートの地震の群遅延時間の平均値のサイト係数からの差 diff

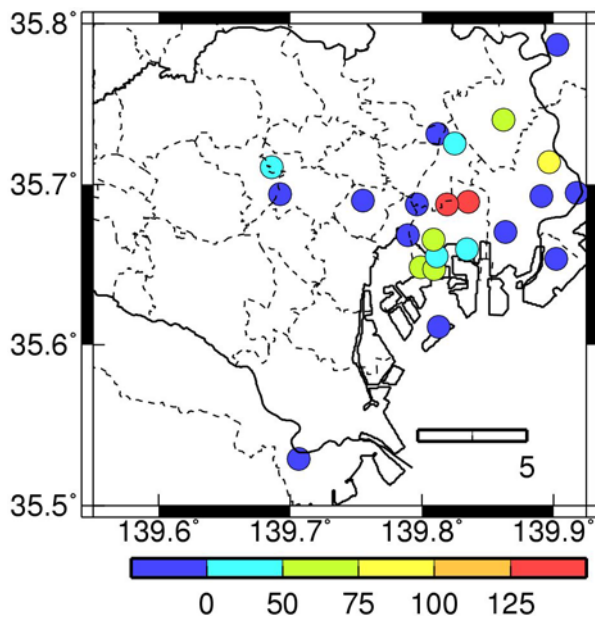


(a) diff 分布

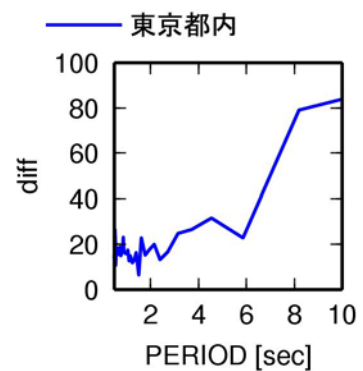


(b) diff の周期依存性

図 2.2-41 関東平野のフィリピン海プレートの地震の群遅延時間の平均値のサイト係数の太平洋プレート
プレートの地震の群遅延時間の平均値のサイト係数からの差 diff の分布と diff の周期依存性



(a) diff 分布



(b) diff の周期依存性

図 2.2-42 関東平野のフィリピン海プレートの地震の群遅延時間の平均値のサイト係数の太平洋プレート
プレートの地震の群遅延時間の平均値のサイト係数からの差 diff の分布と diff の周期依存性

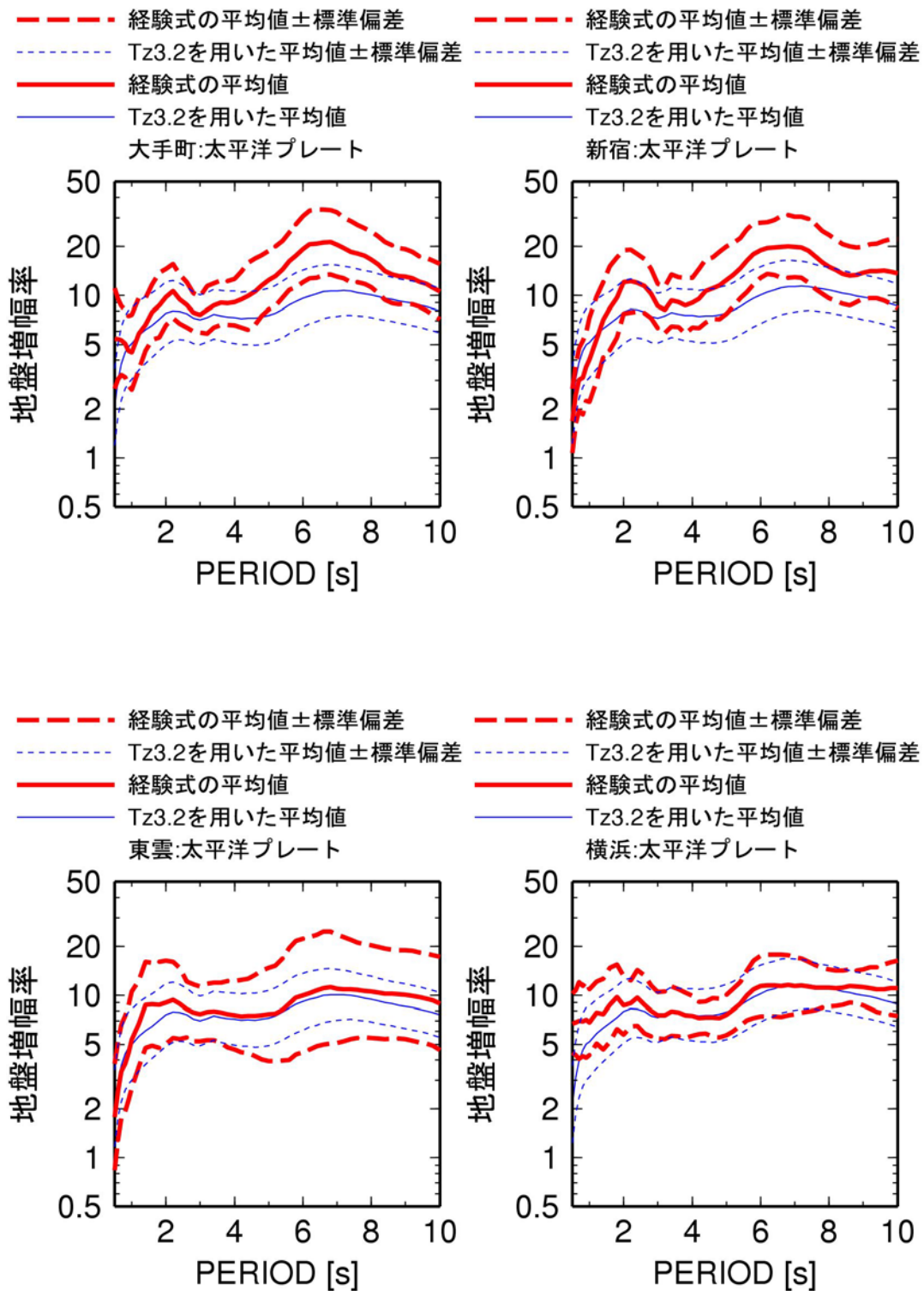


図 2. 2-43 関東平野の 4 観測点での元の地盤増幅率と補間の回帰式に基づく地盤増幅率の比較 (太平洋プレートの地震)

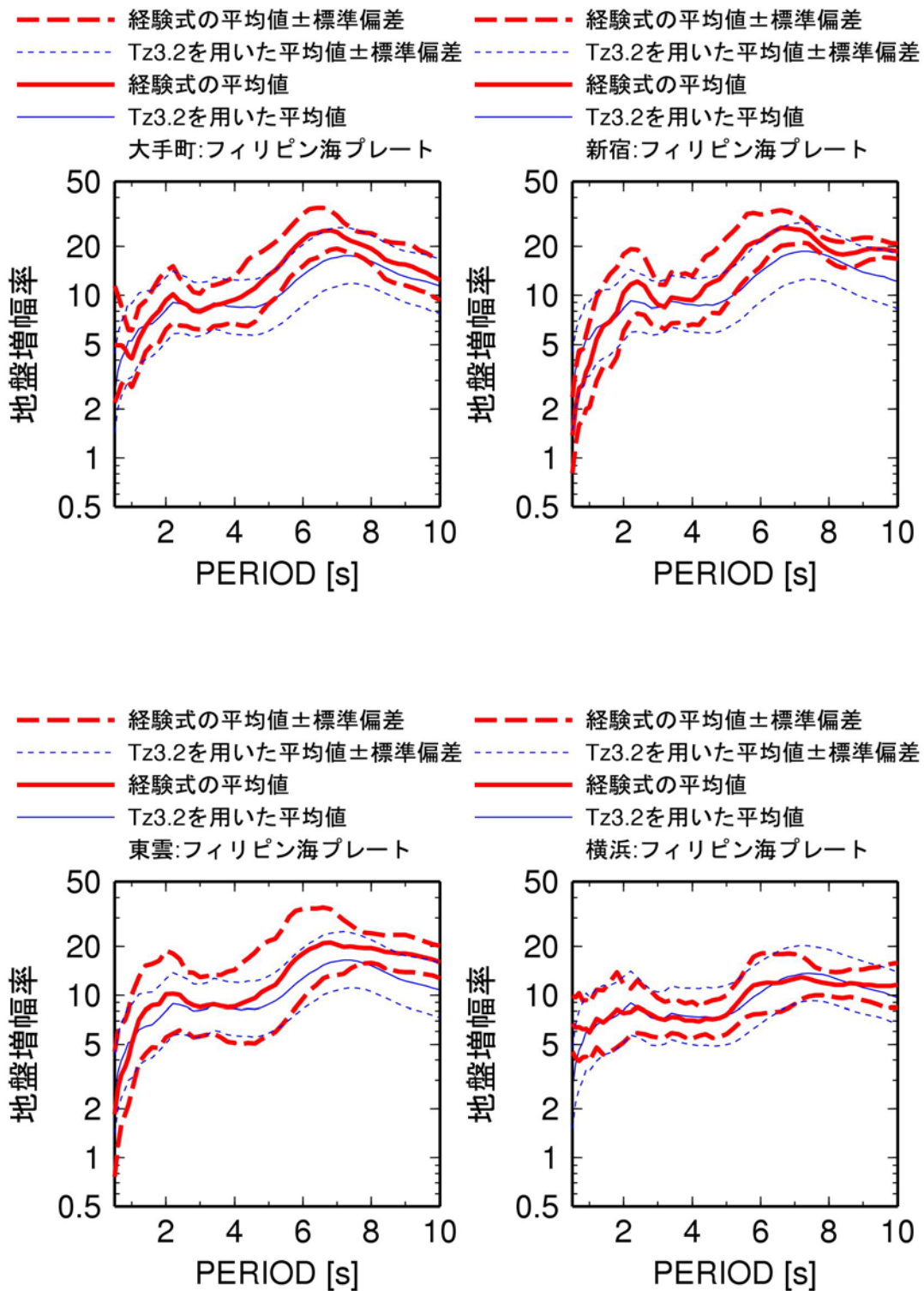


図 2.2-44 関東平野の4観測点での元の地盤増幅率と補間の回帰式に基づく地盤増幅率の比較 (フィリピン海プレートの地震)

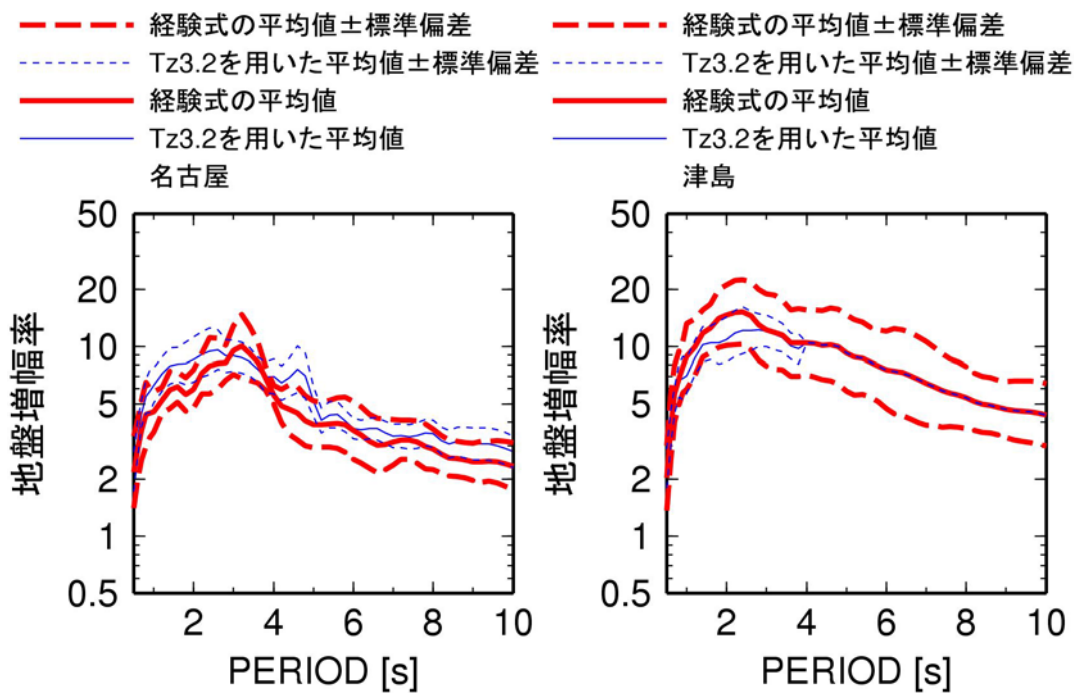


図 2. 2-45 濃尾平野の 2 観測点での元の地盤増幅率と補間の回帰式に基づく地盤増幅率の比較

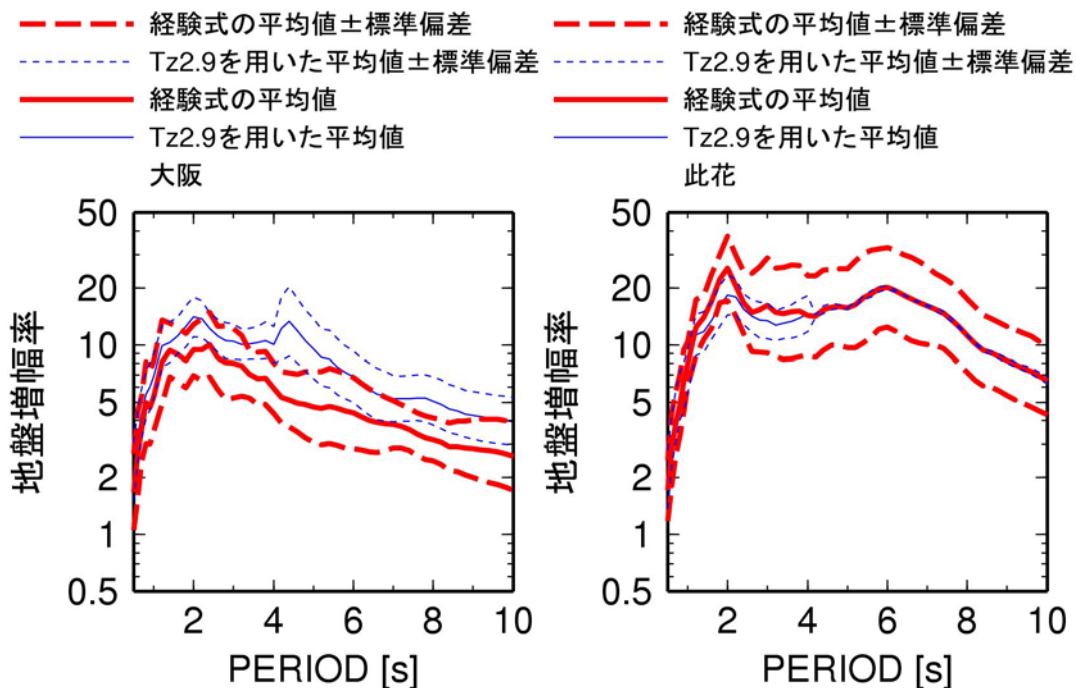


図 2. 2-46 大阪平野の 2 観測点での元の地盤増幅率と補間の回帰式に基づく地盤増幅率の比較

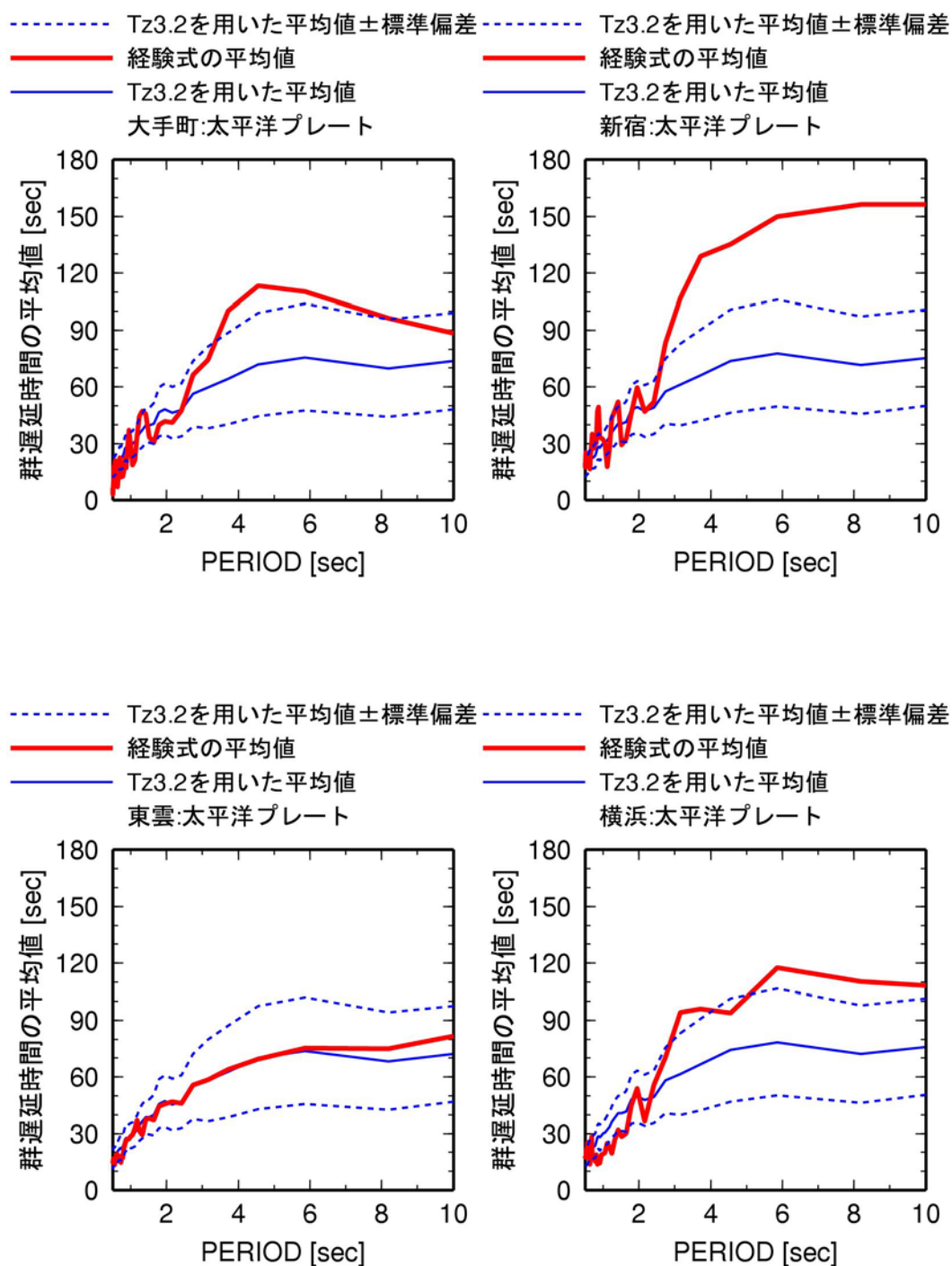


図 2. 2-47 関東平野の 4 観測点での元の群遅延時間の平均値のサイト係数と補間の回帰式に基づくサイト係数の比較(太平洋プレートの地震)

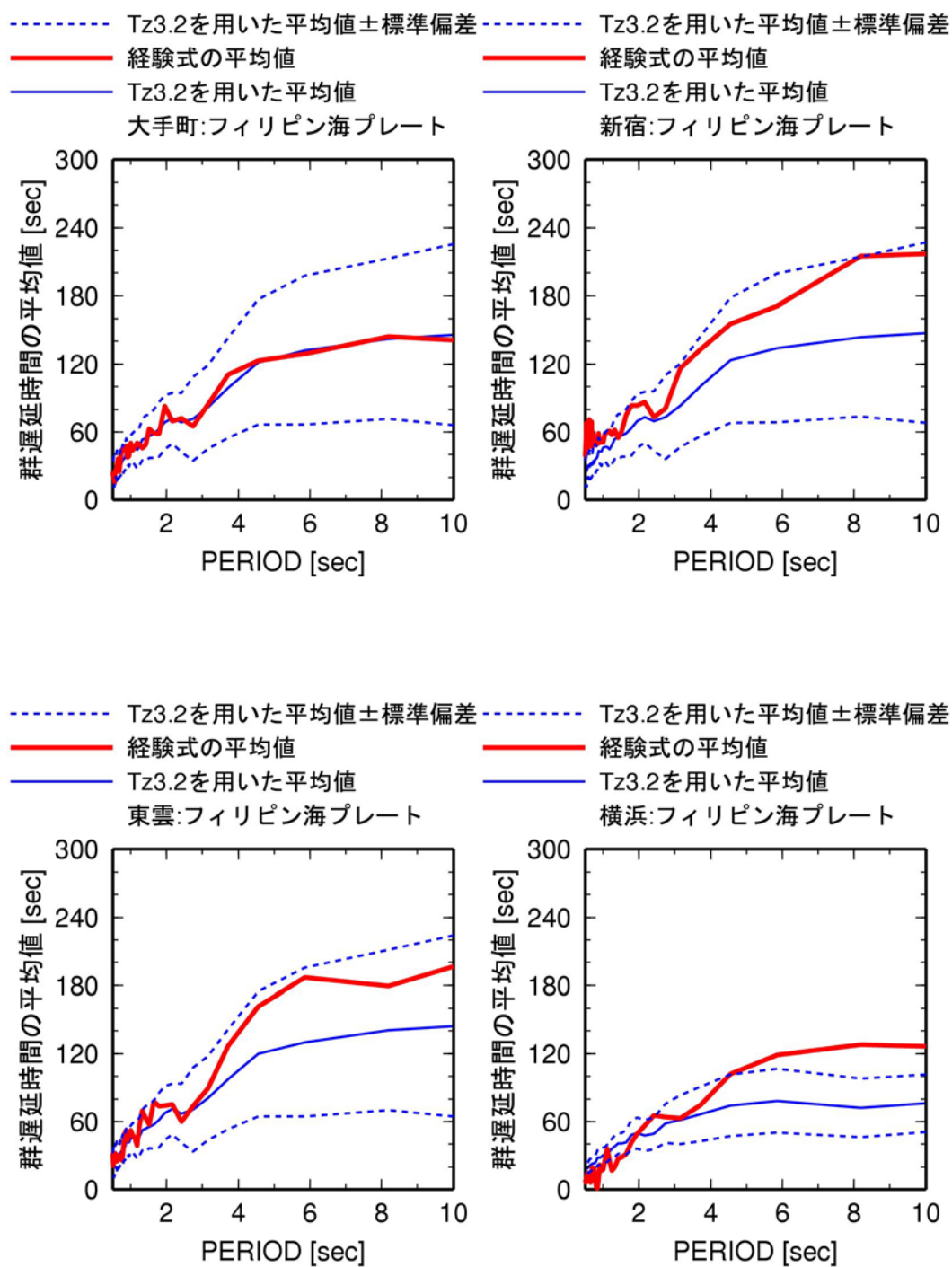


図 2. 2-48 関東平野の 4 観測点での元の群遅延時間の平均値のサイト係数と補間の回帰式に基づくサイト係数の比較(フィリピン海プレートの地震)

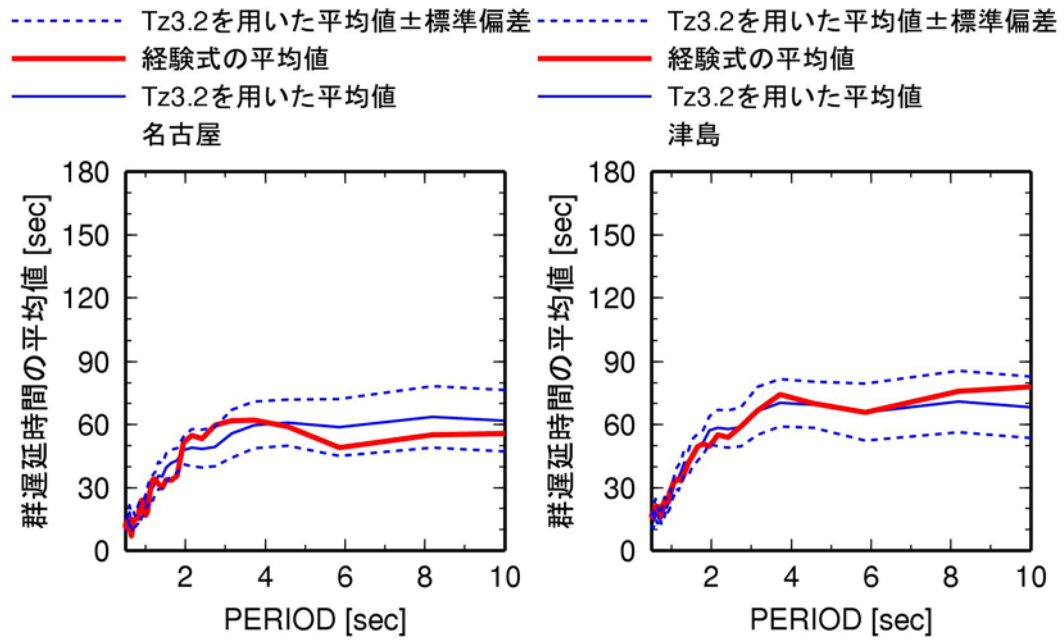


図 2. 2-49 濃尾平野の 2 観測点での元の群遅延時間の平均値のサイト係数と補間の回帰式に基づくサイト係数の比較

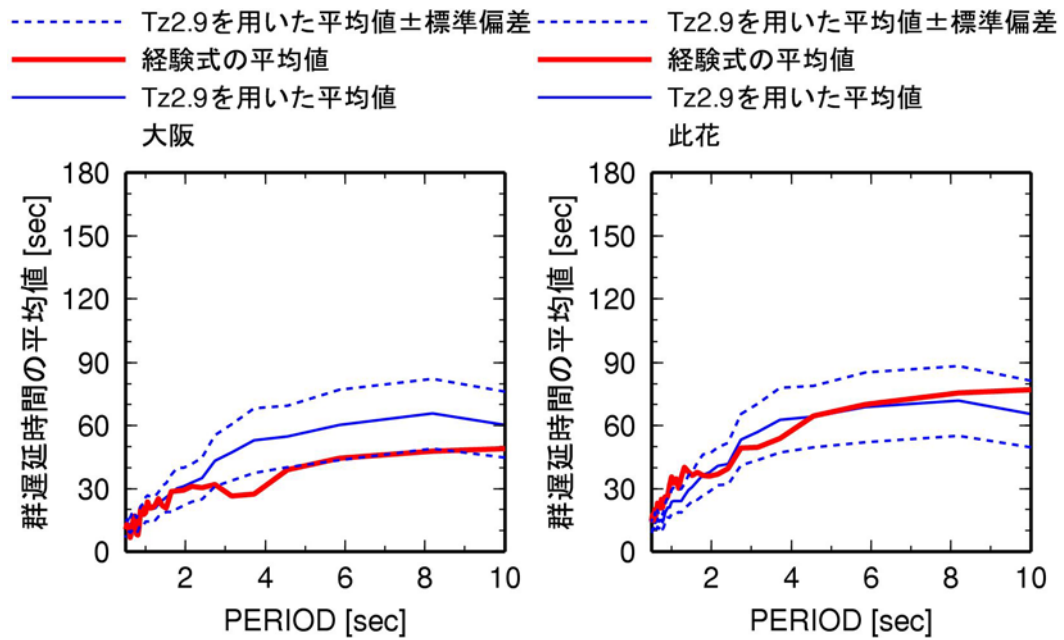


図 2. 2-50 大阪平野の 2 観測点での元の群遅延時間の平均値のサイト係数と補間の回帰式に基づくサイト係数の比較

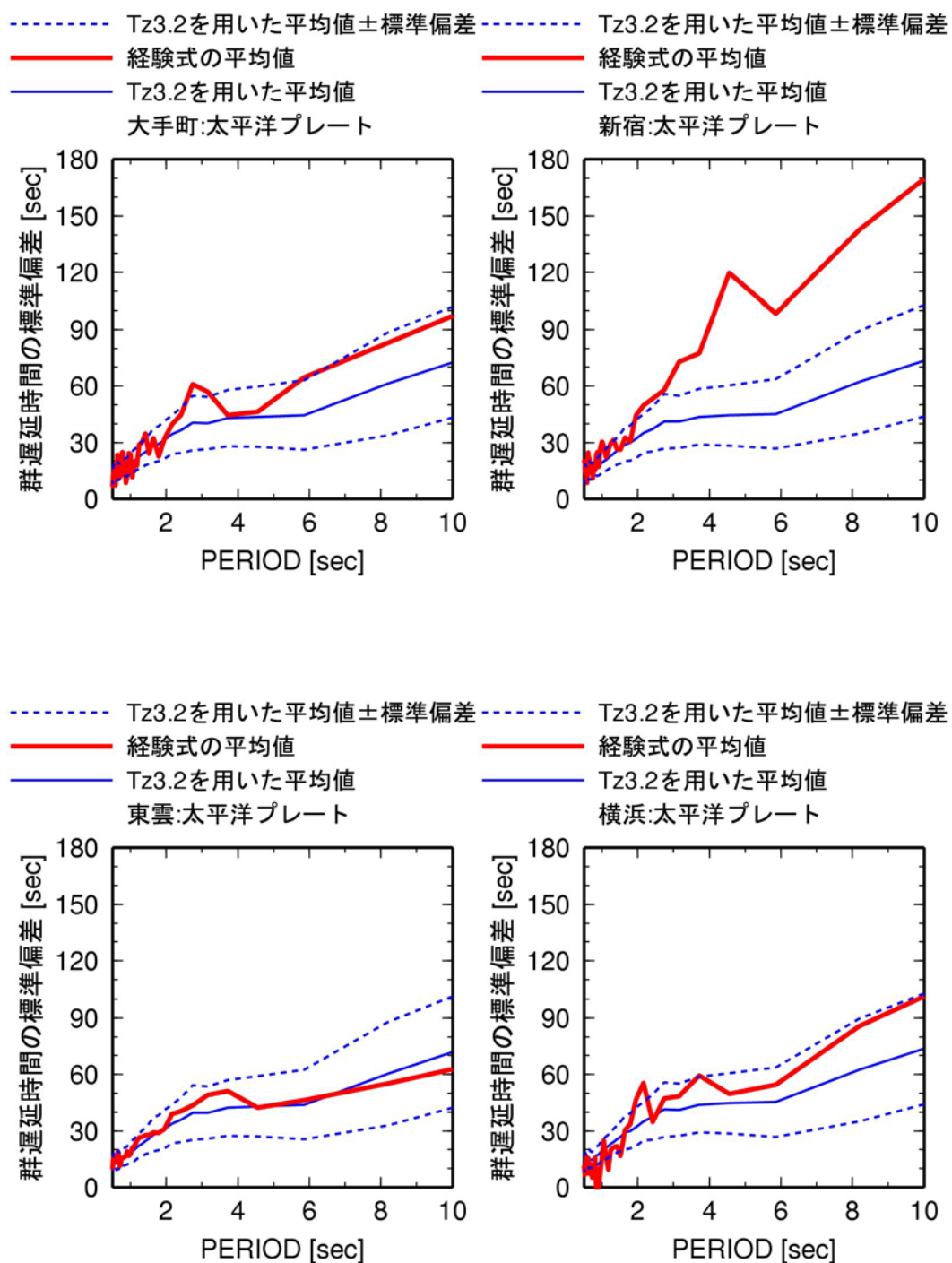


図 2. 2-51 関東平野の4観測点での元の群遅延時間の標準偏差のサイト係数と補間の回帰式に基づくサイト係数の比較(太平洋プレートの地震)

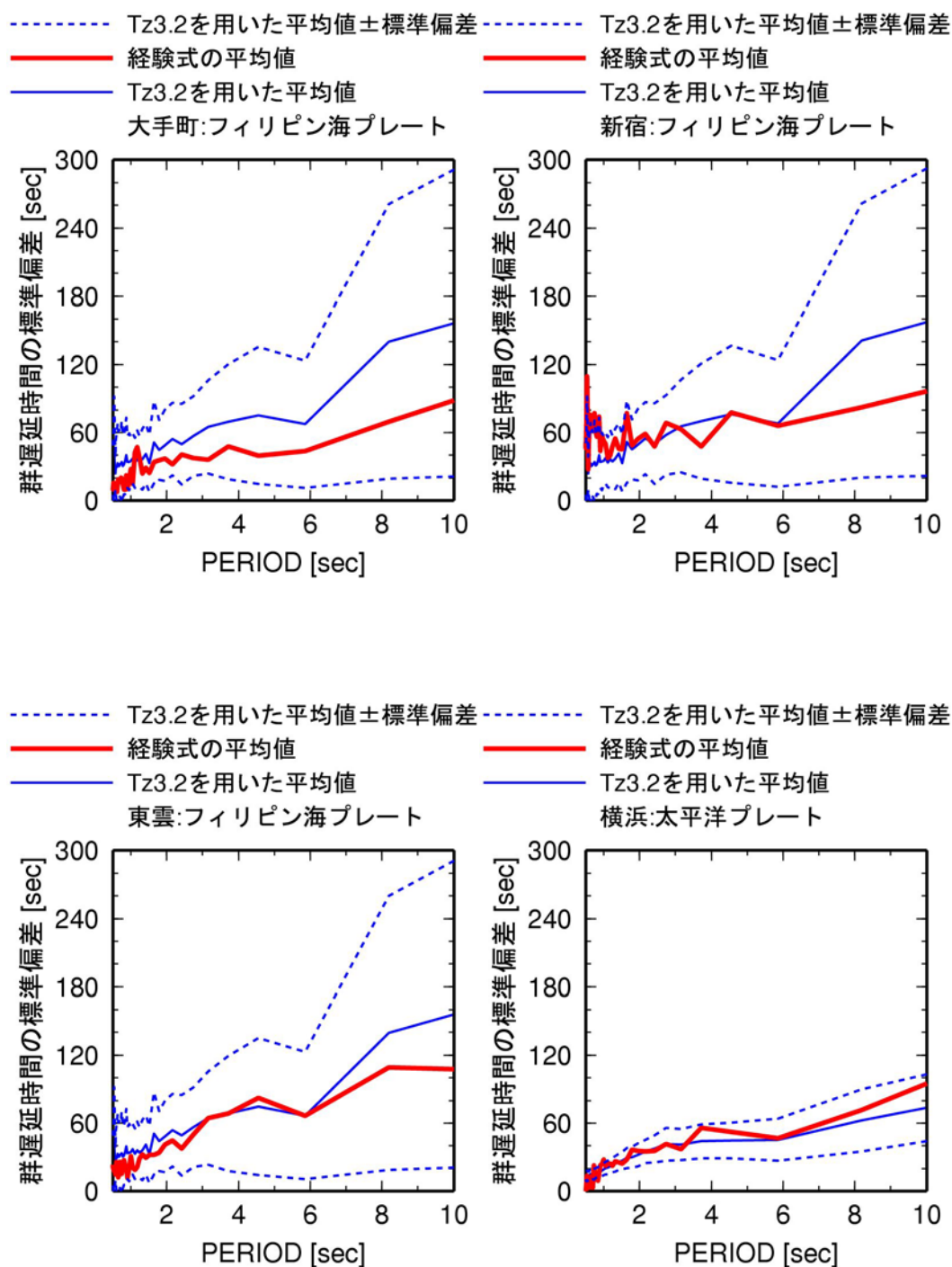


図 2. 2-52 関東平野の4観測点での元の群遅延時間の標準偏差のサイト係数と補間の回帰式に基づくサイト係数の比較(フィリピン海プレートの地震)

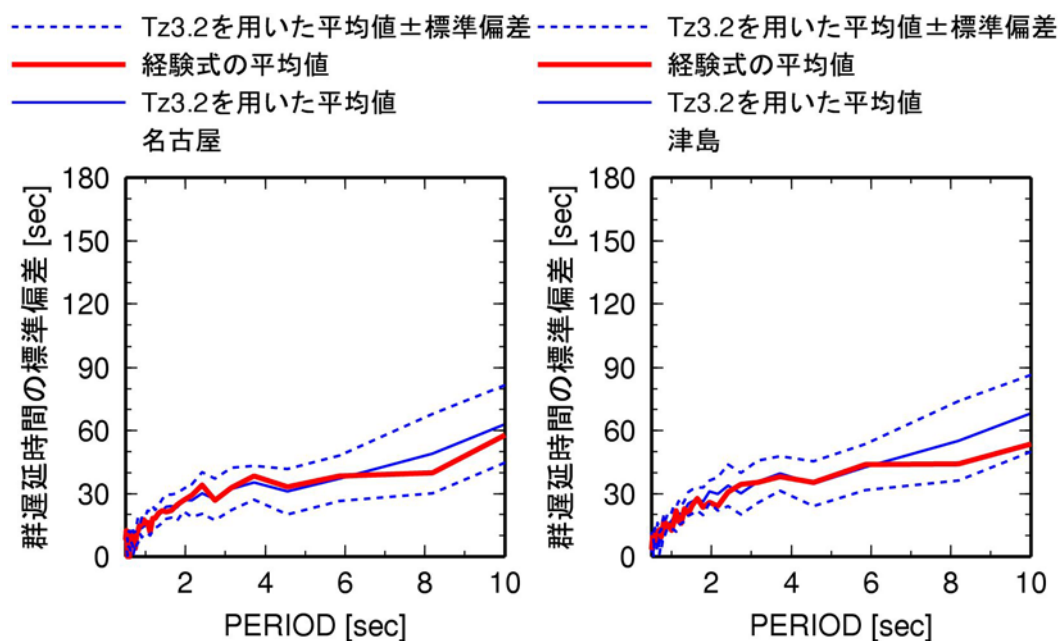


図 2. 2-53 濃尾平野の 2 観測点での元の群遅延時間の標準偏差のサイト係数と補間の回帰式に基づくサイト係数の比較

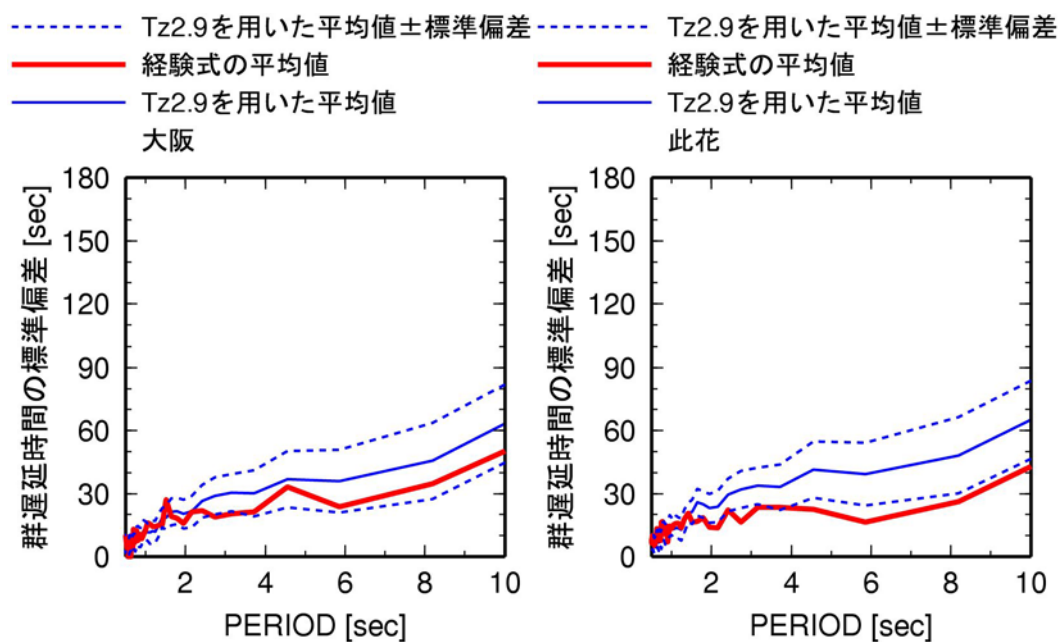
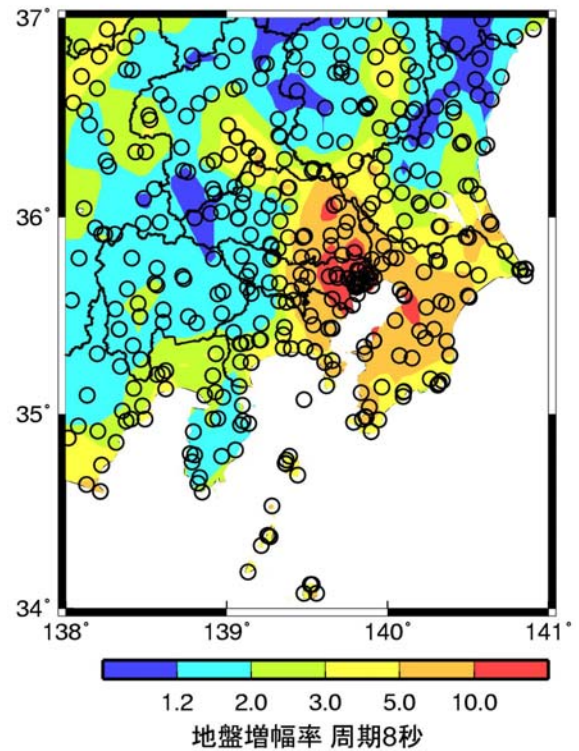
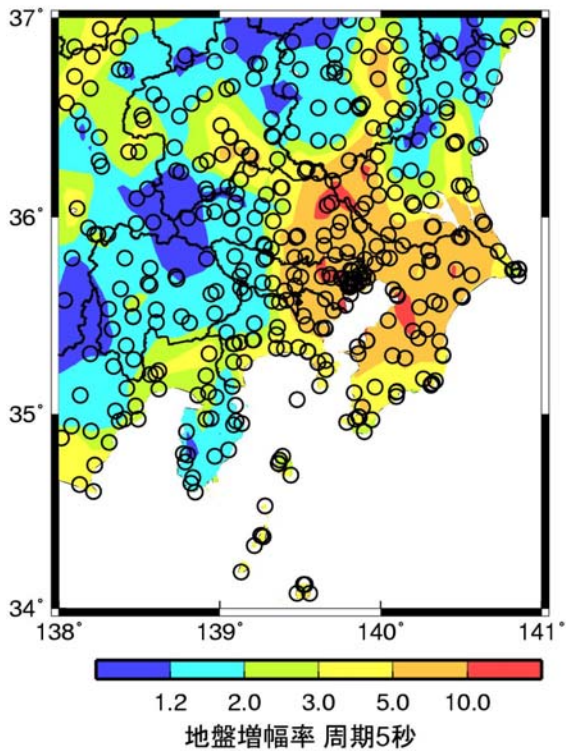
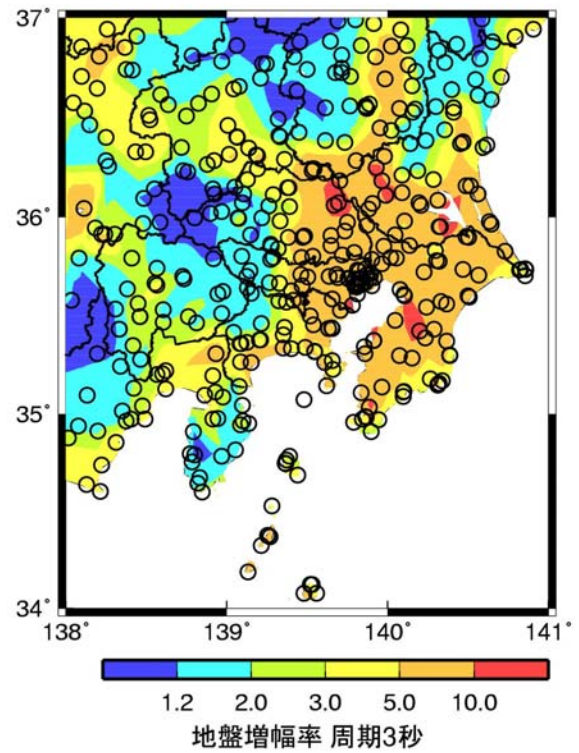
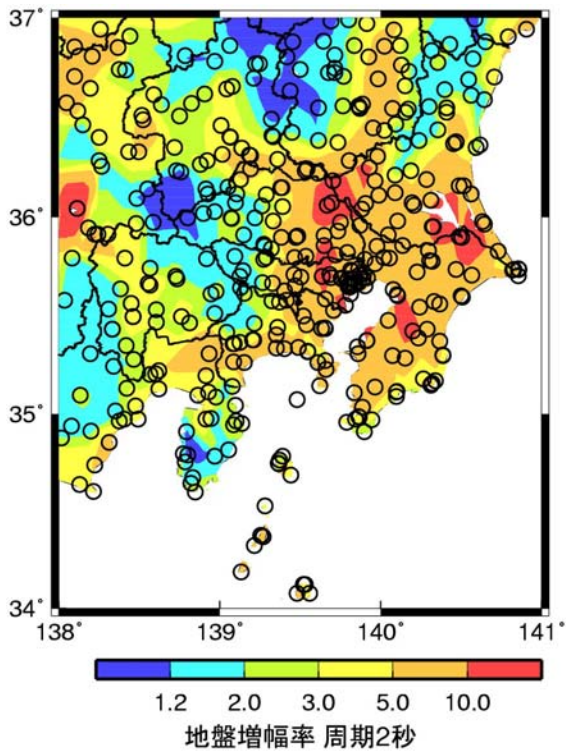
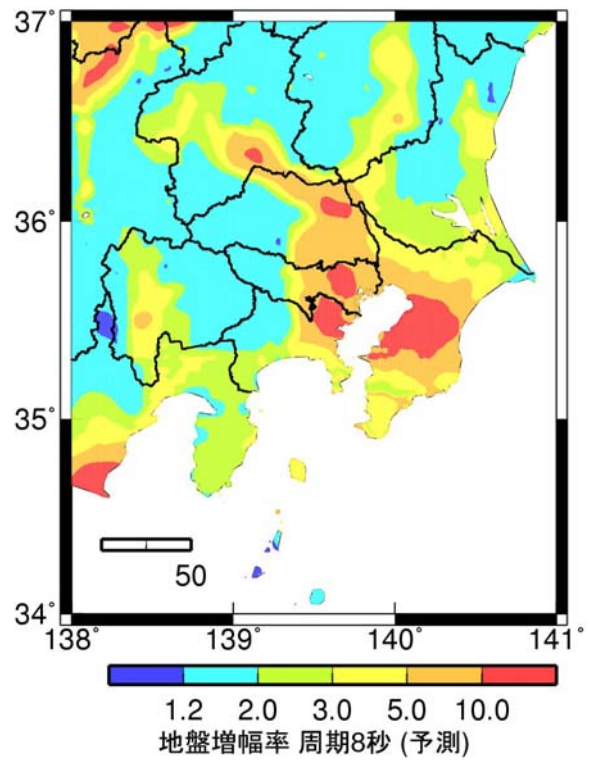
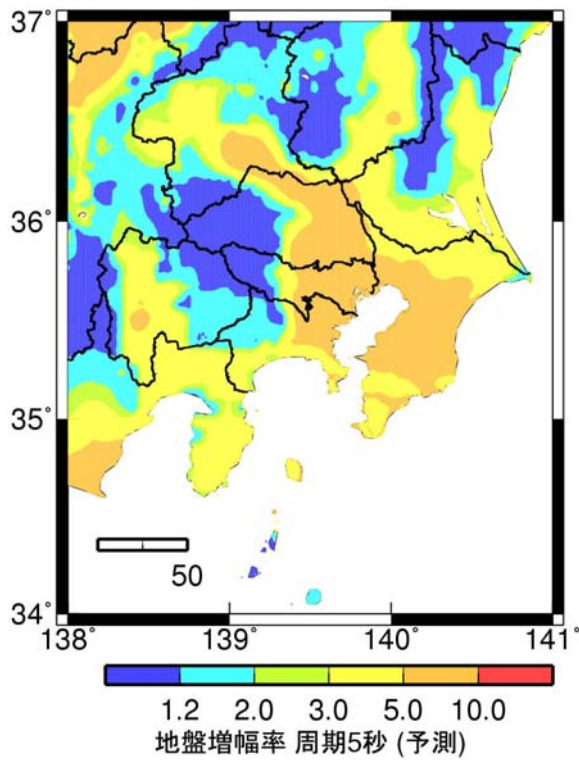
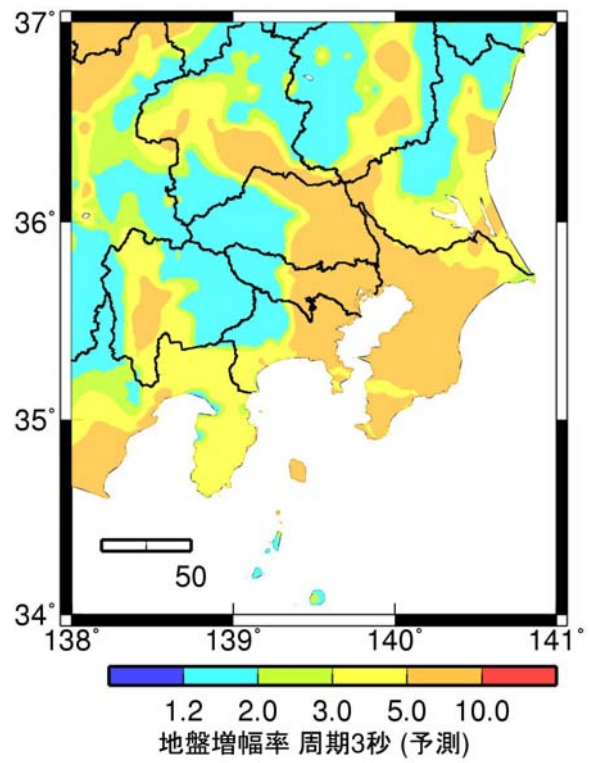
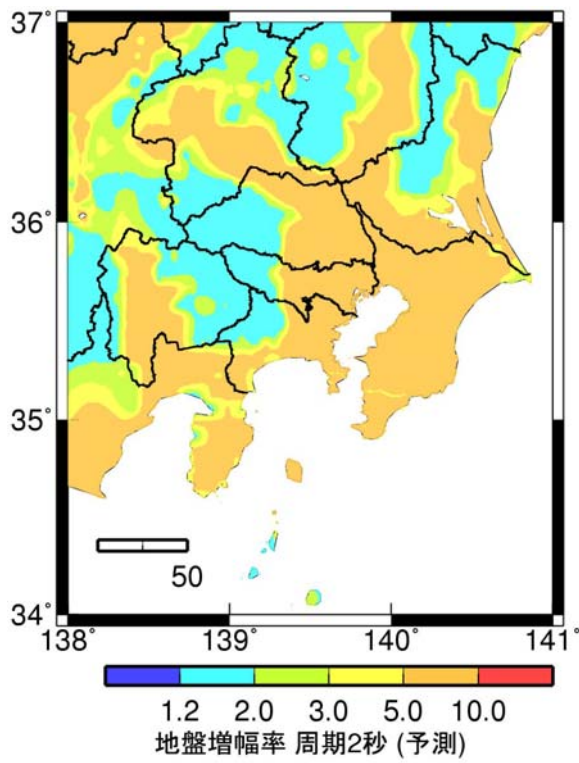


図 2. 2-54 大阪平野の 2 観測点での元の群遅延時間の標準偏差のサイト係数と補間の回帰式に基づくサイト係数の比較



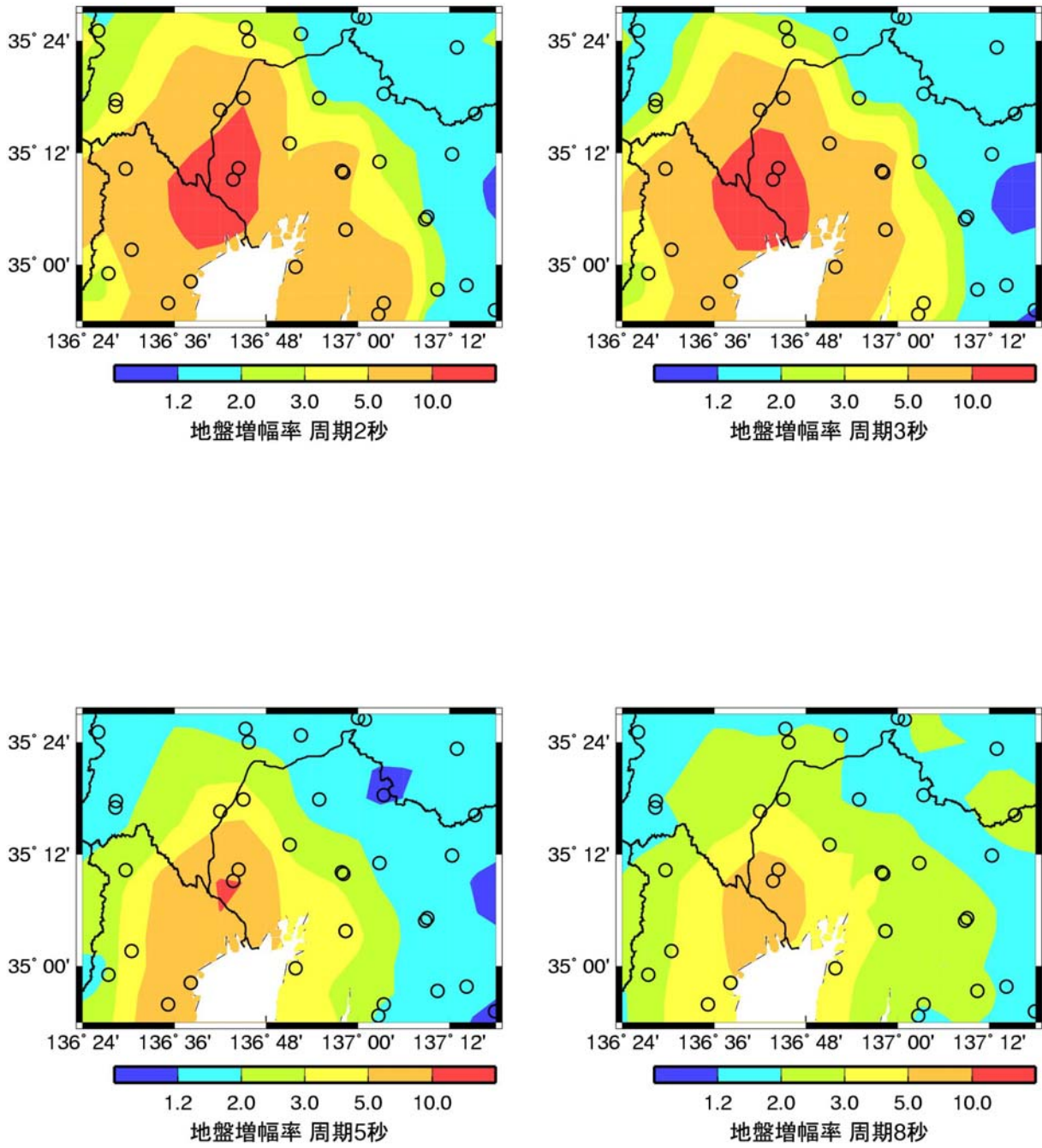
S_A h=5 %: 水平成分(Mw2: 海溝型地震は伝播経路東+地殻内地震)

図 2.2-55 関東平野の観測点での地盤増幅率の単純な空間補間(太平洋プレートの地震)



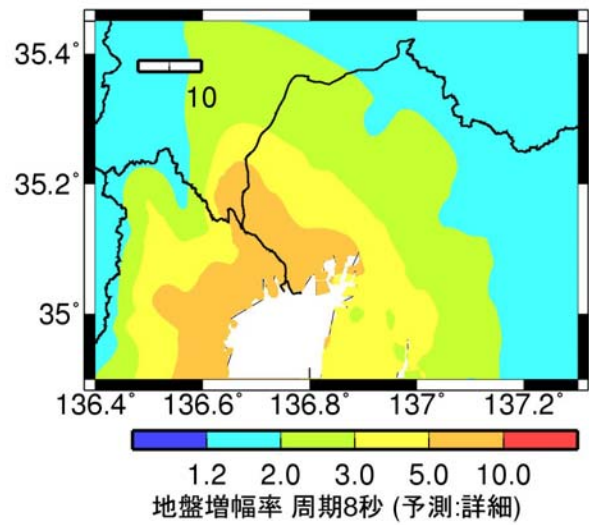
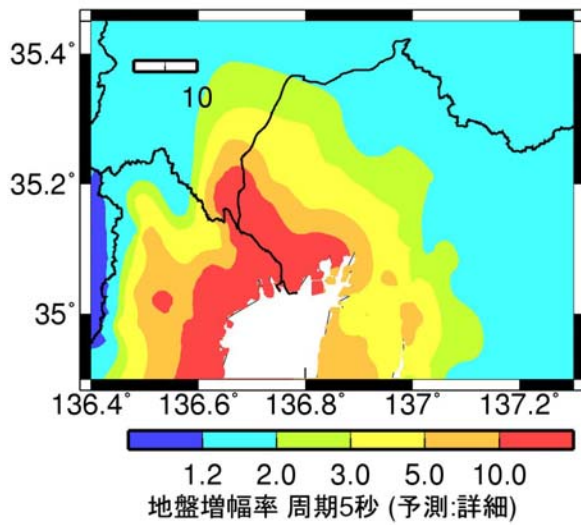
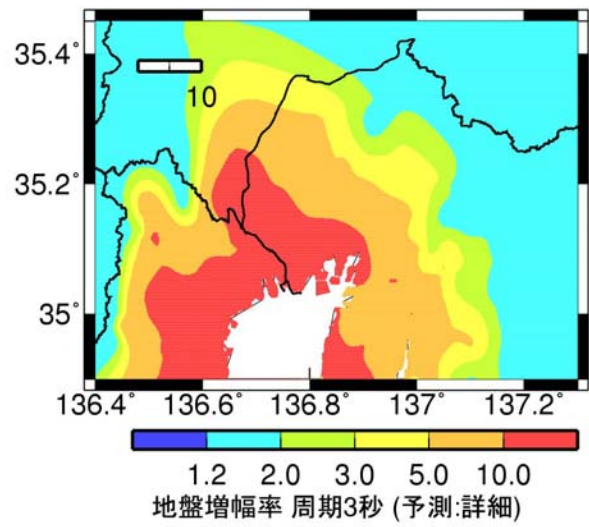
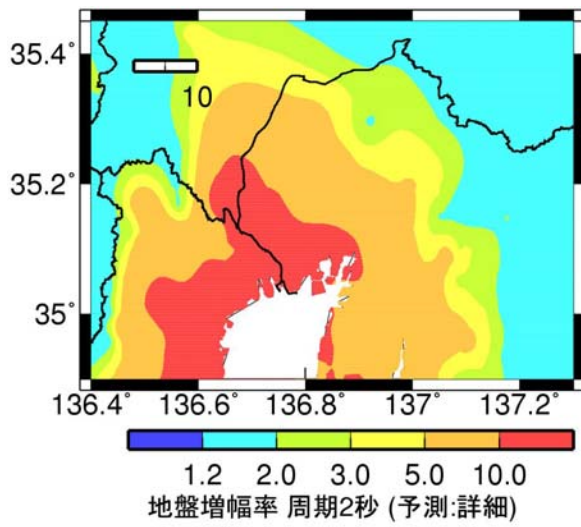
S_A h=5 %: 水平成分

図 2. 2-56 関東平野の地盤増幅率の回帰式に基づく予測(太平洋プレートの地震)



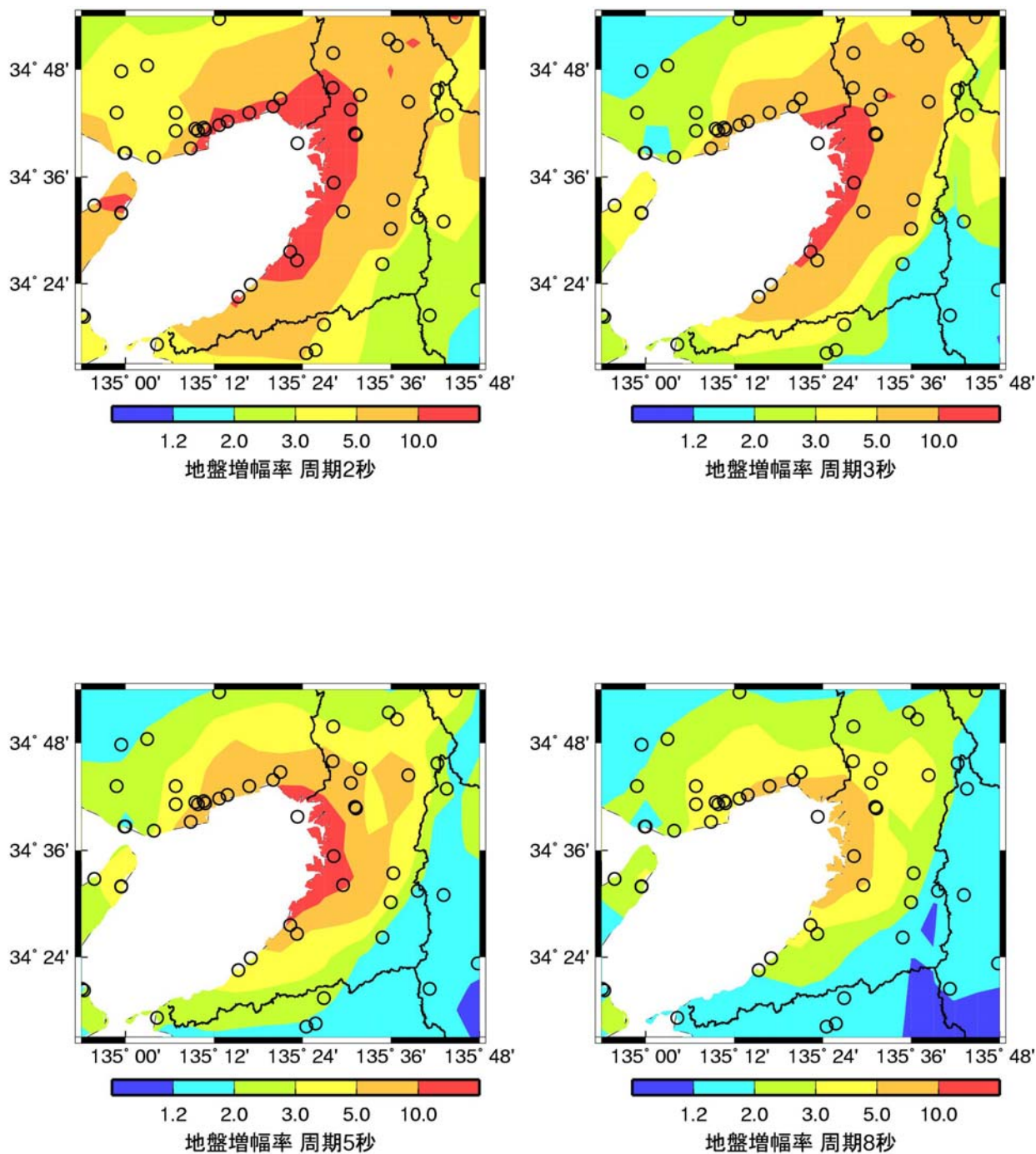
S_A h=5 %: 水平成分(Mw2: 海溝型地震は伝播経路西十地殻内地震)

図 2.2-57 濃尾平野の観測点での地盤増幅率の単純な空間補間



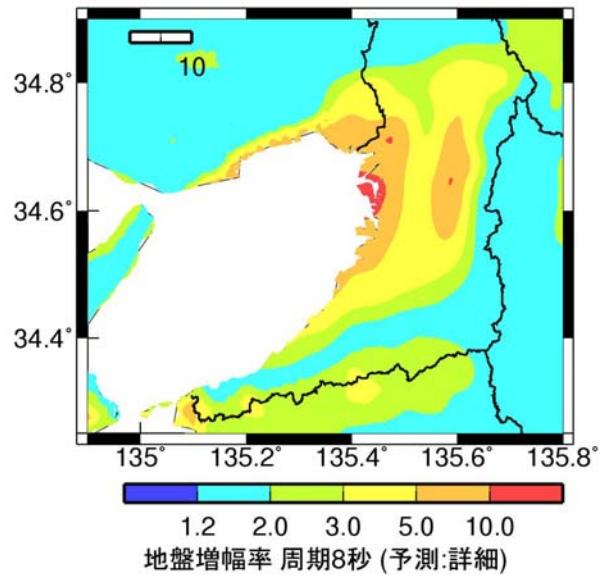
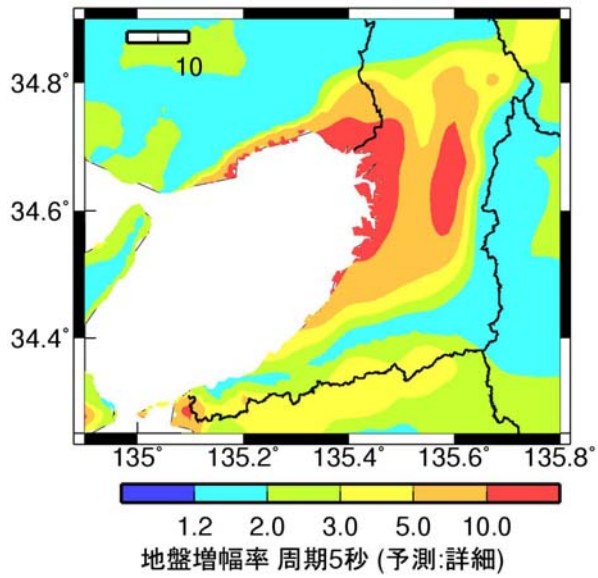
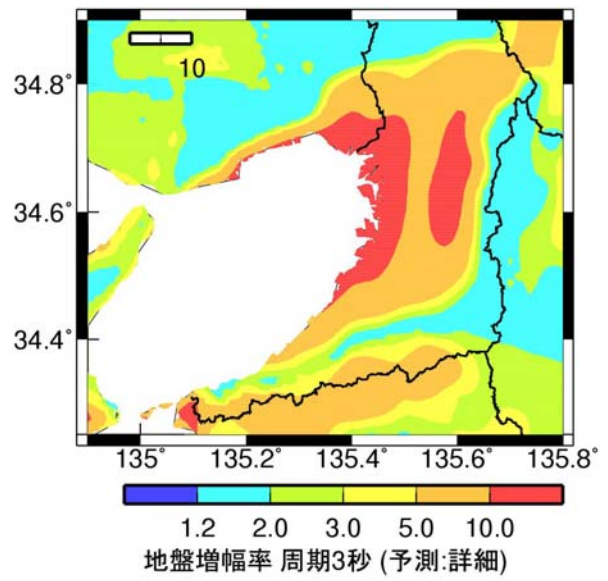
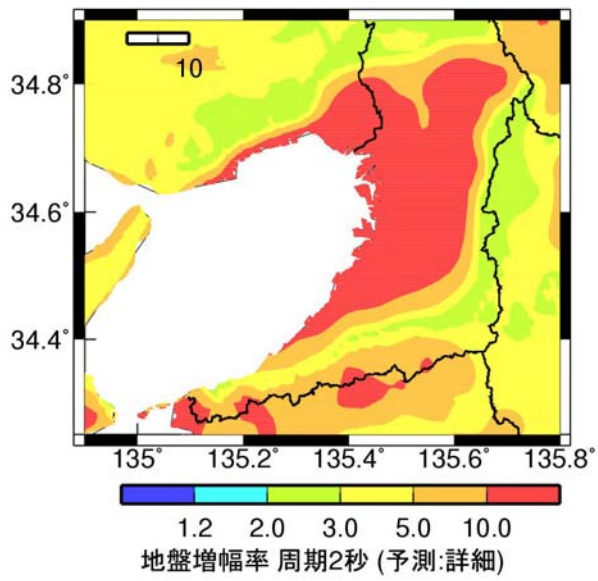
S_A h=5%: 水平成分

図 2. 2-58 濃尾平野の地盤増幅率の回帰式に基づく予測



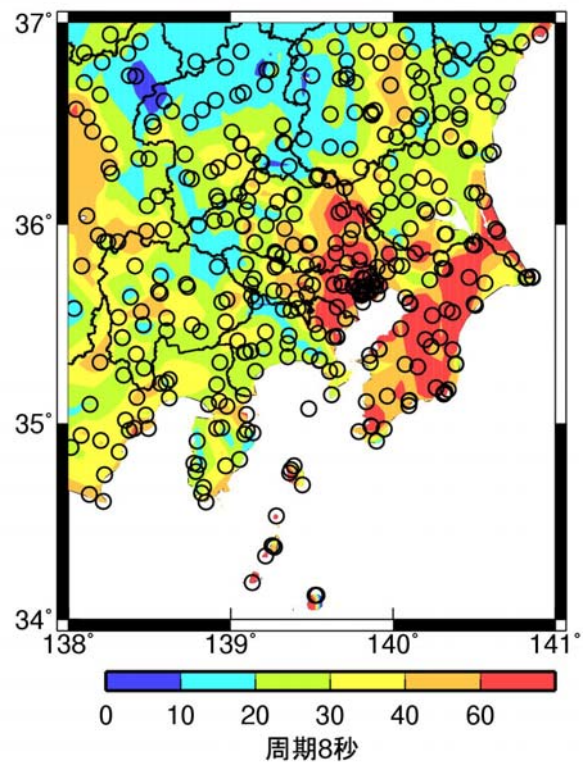
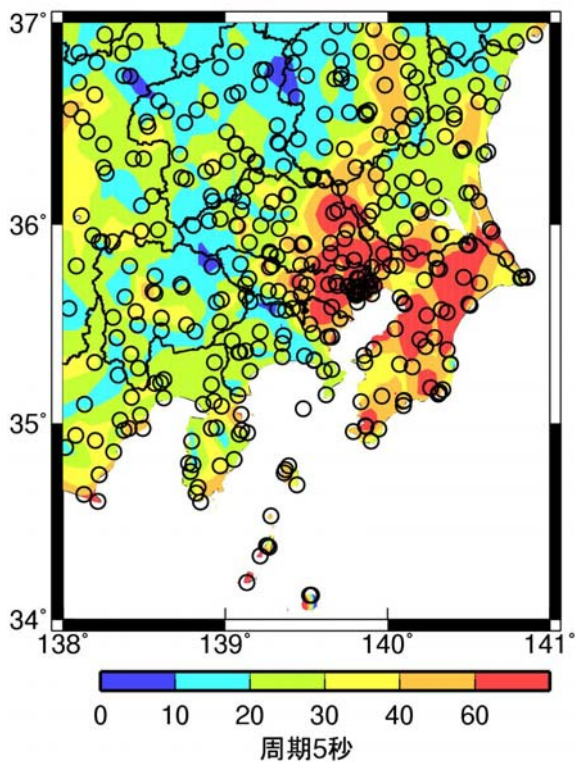
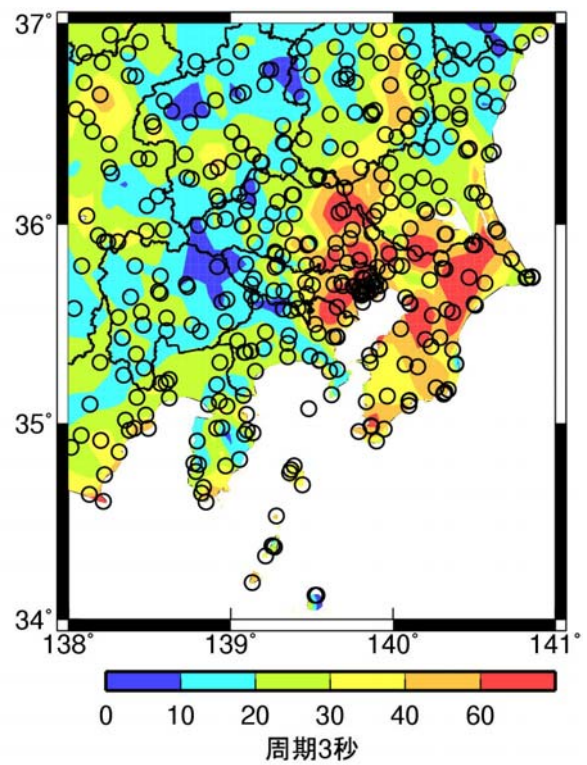
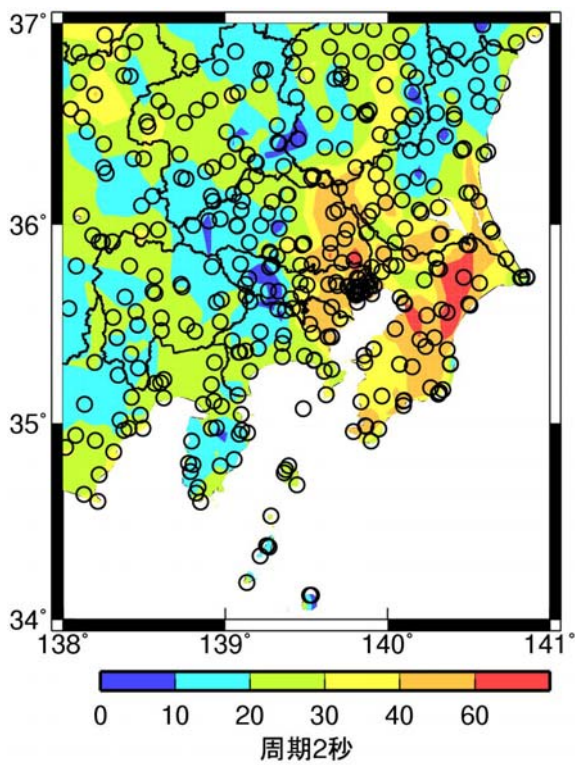
S_A h=5 %: 水平成分(Mw2:海溝型地震は伝播経路西+地殻内地震)

図 2.2-59 濃尾平野の観測点での地盤増幅率の単純な空間補間



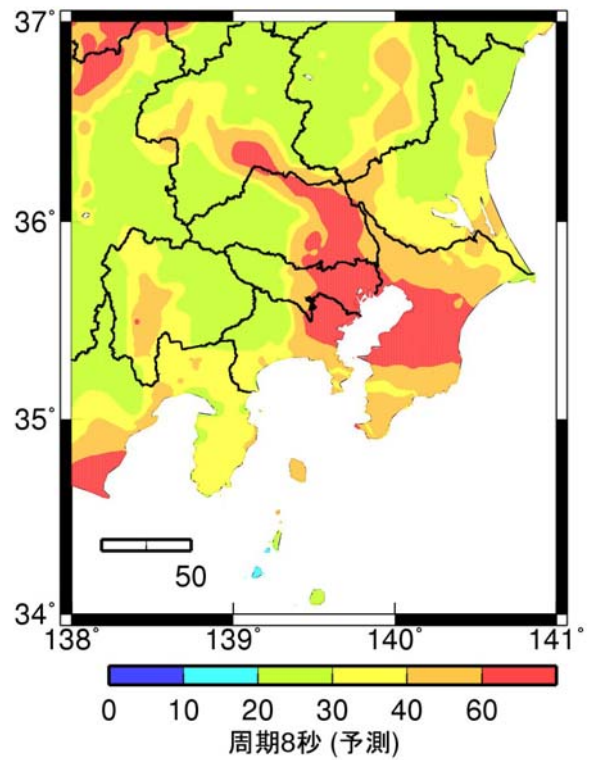
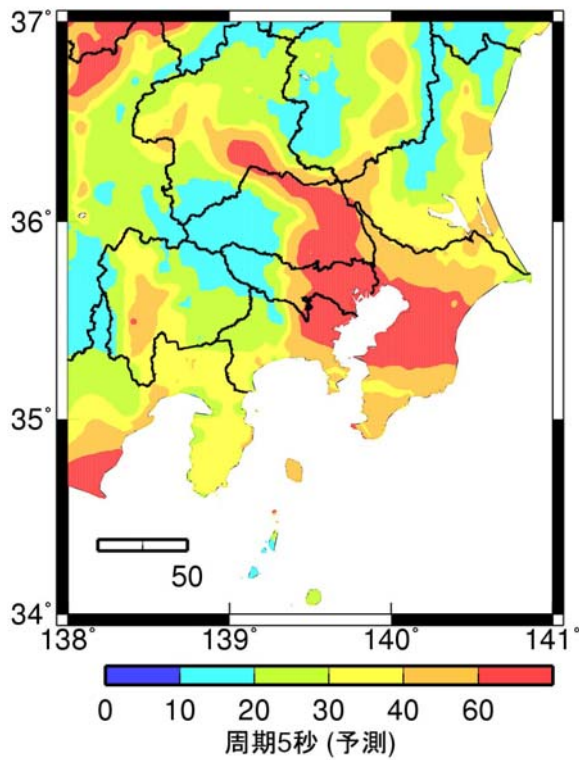
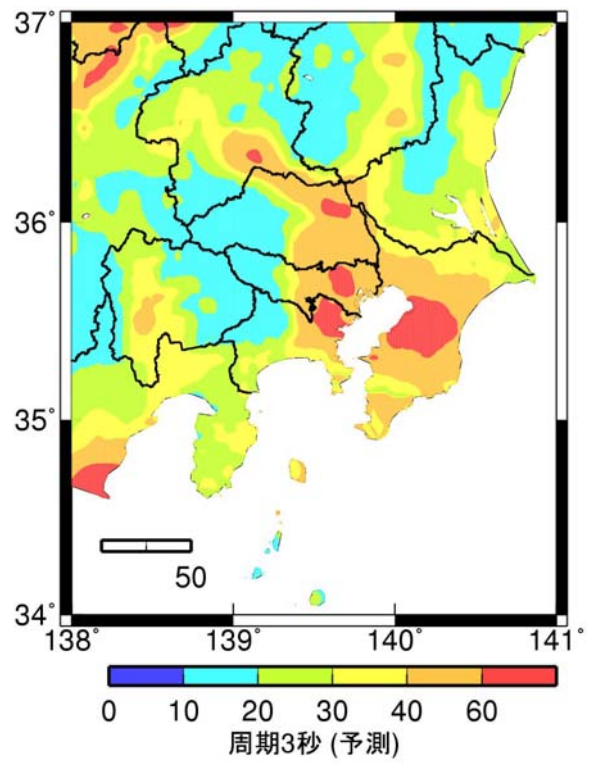
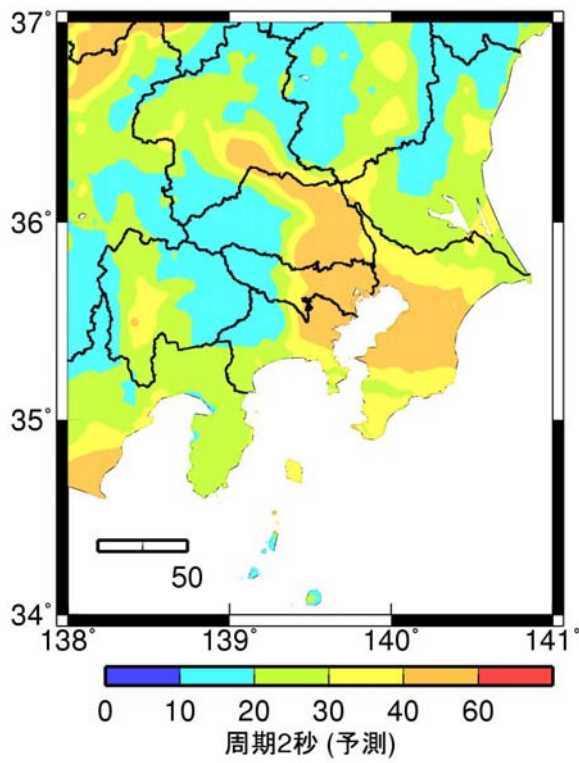
S_A h=5 %: 水平成分

図 2.2-60 大阪平野の地盤増幅率の回帰式に基づく予測



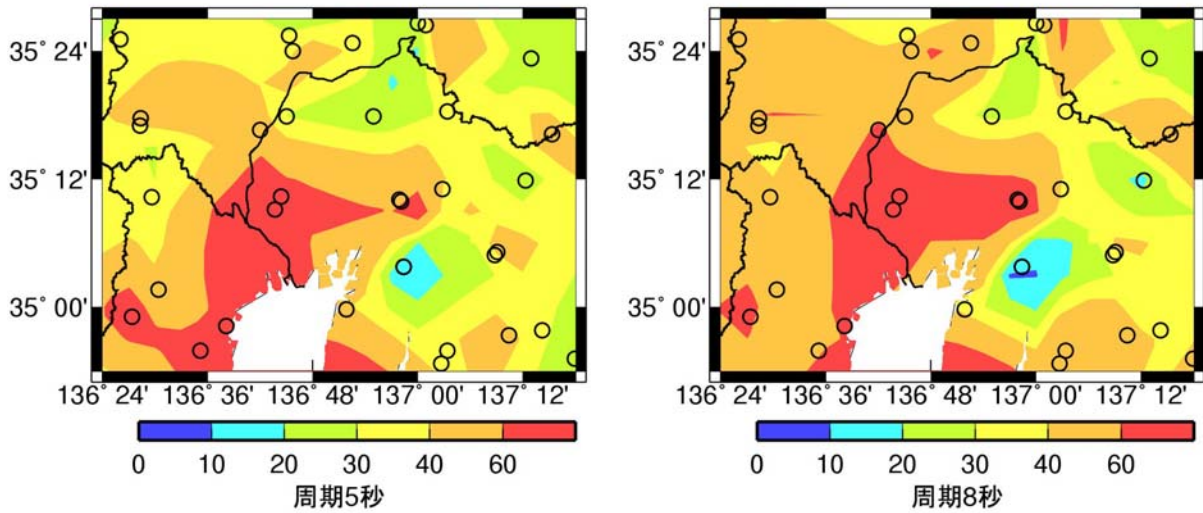
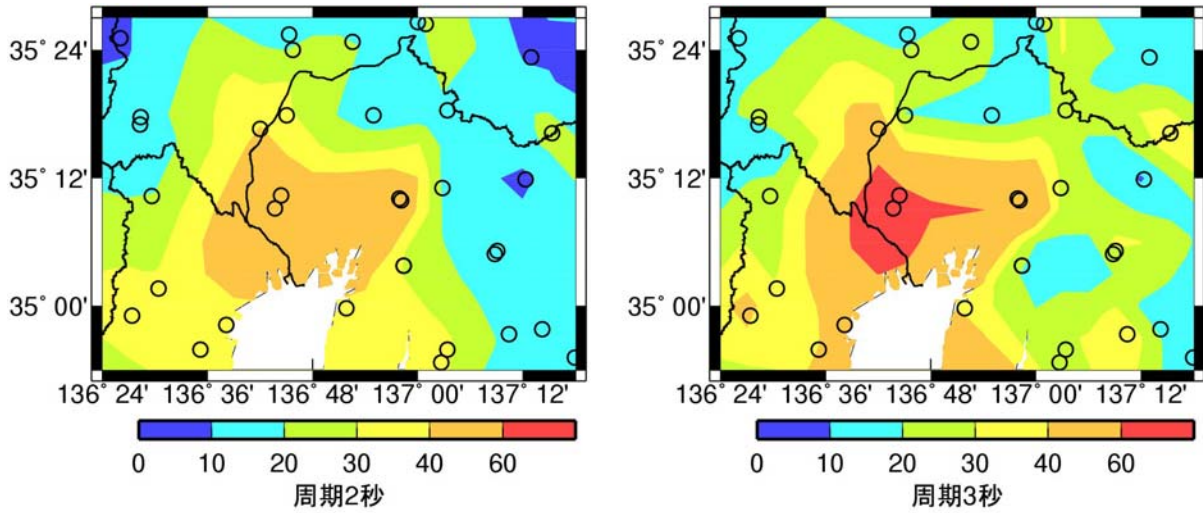
群遅延時間の平均値: 水平成分(伝播経路東)

図 2.2-61 関東平野の観測点での群遅延時間の平均値のサイト係数の単純な空間補間(太平洋プレート地震)



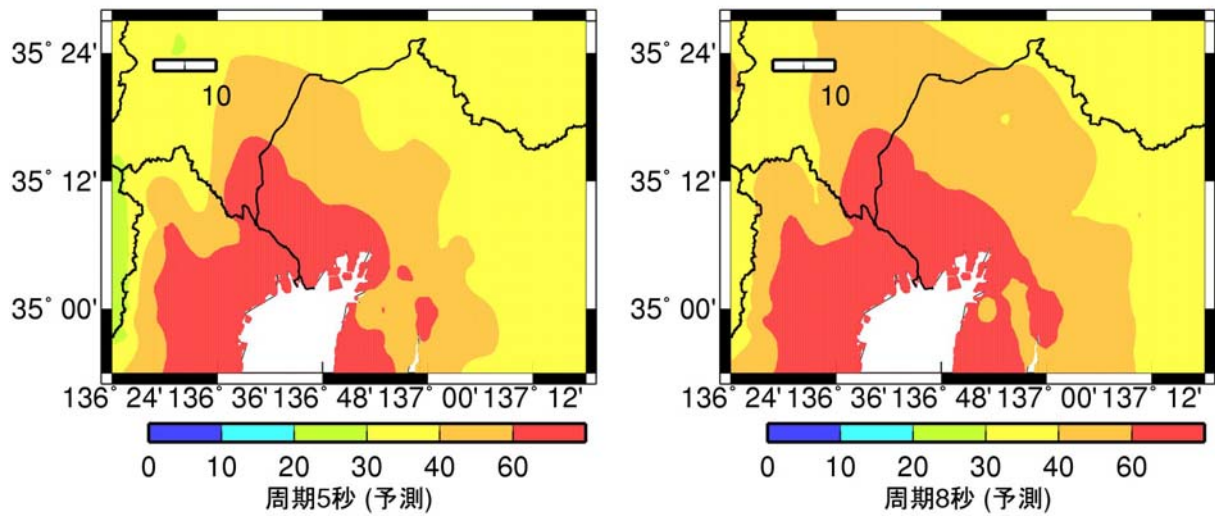
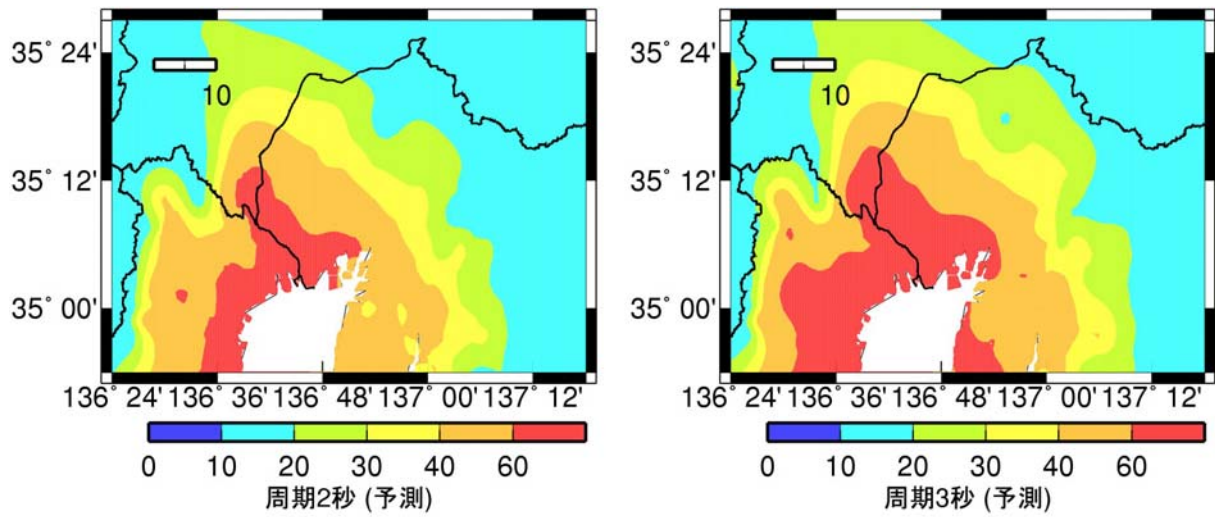
群遅延時間の平均値: 水平成分

図 2. 2-62 関東平野の群遅延時間の平均値のサイト係数の回帰式に基づく予測(太平洋プレートの地震)



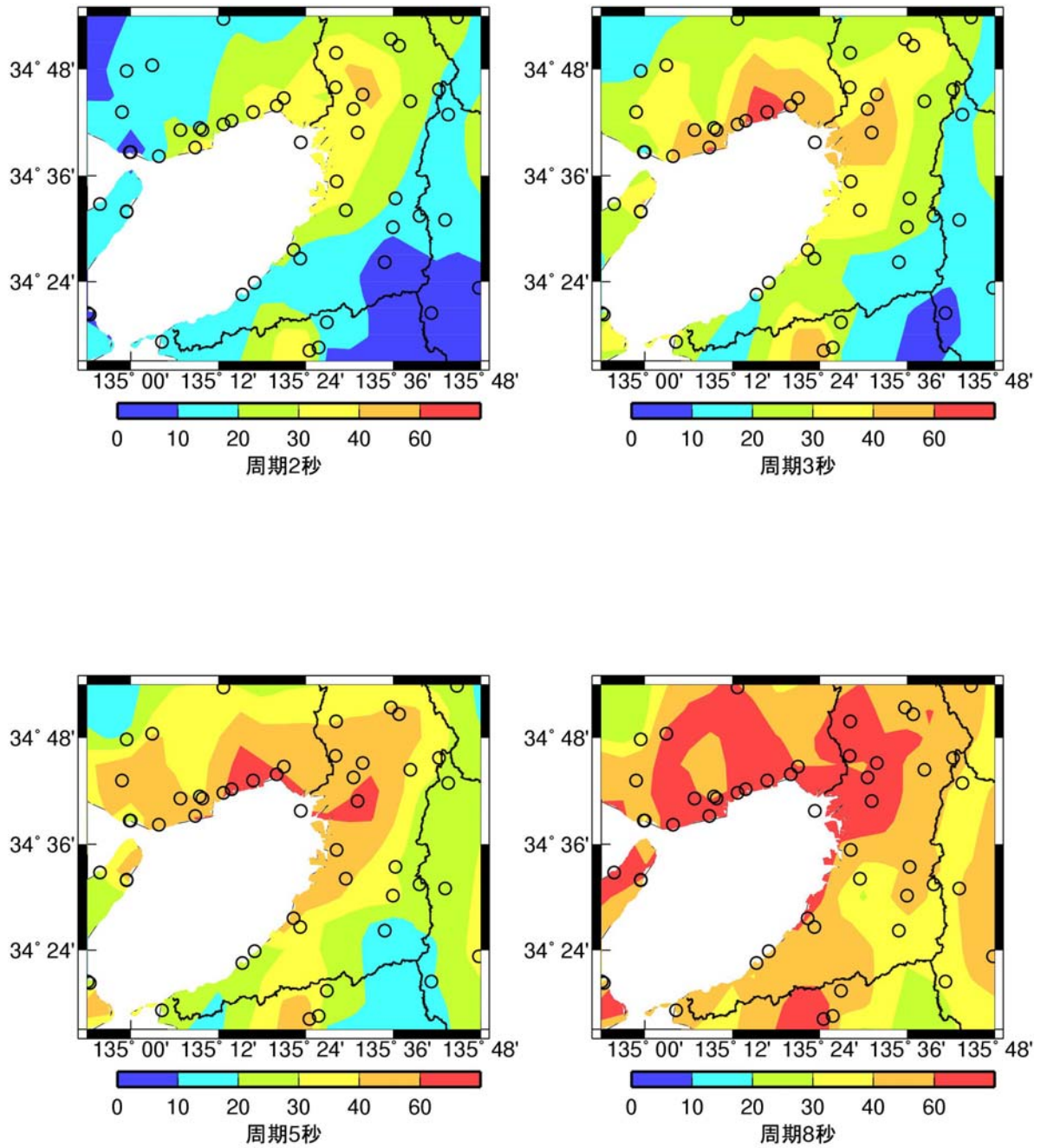
群遅延時間の平均値: 水平成分(伝播経路西)

図 2. 2-63 濃尾平野の観測点での群遅延時間の平均値のサイト係数の単純な空間補間



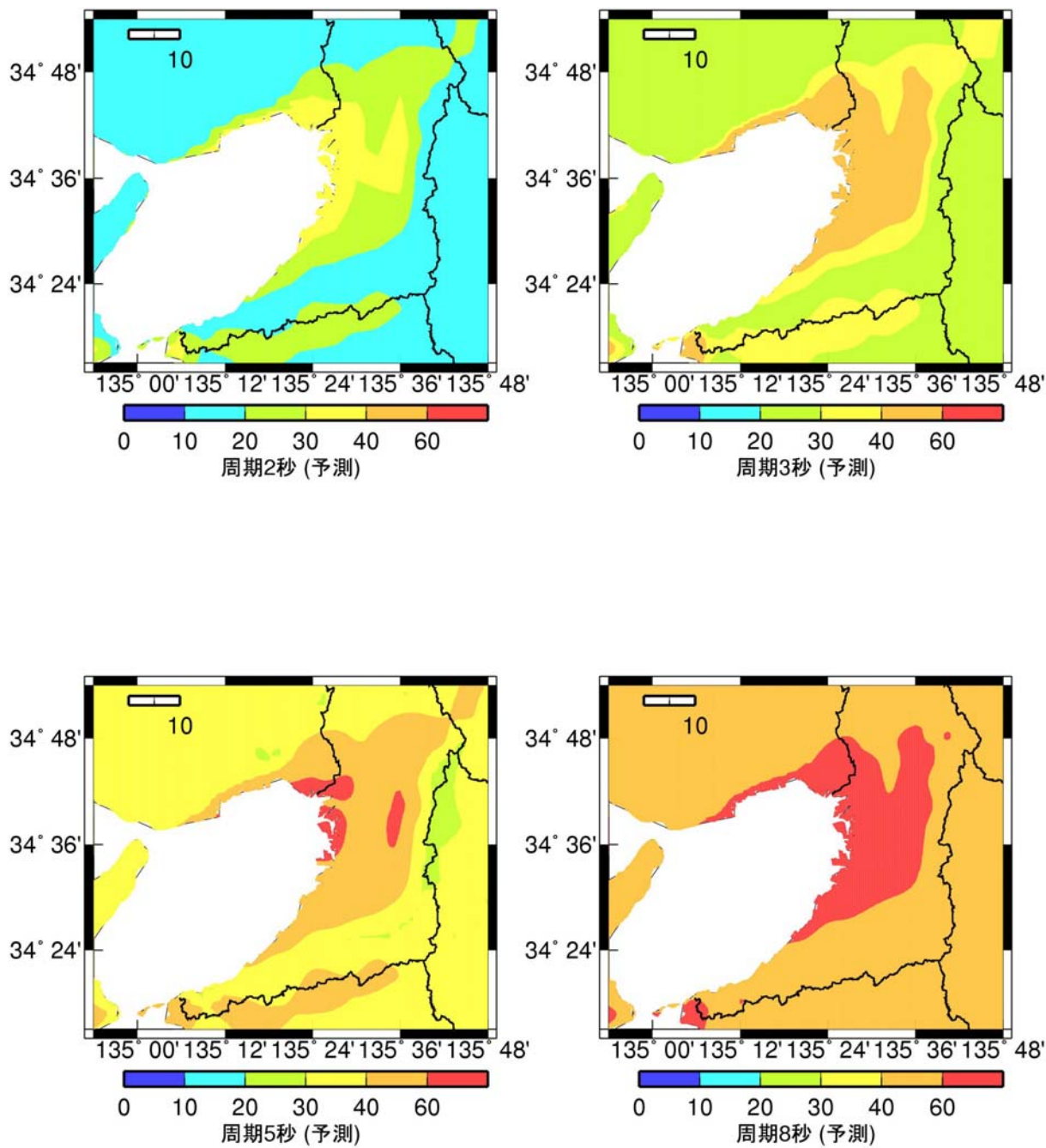
群遅延時間の平均値

図 2. 2-64 濃尾平野の群遅延時間の平均値のサイト係数の回帰式に基づく予測



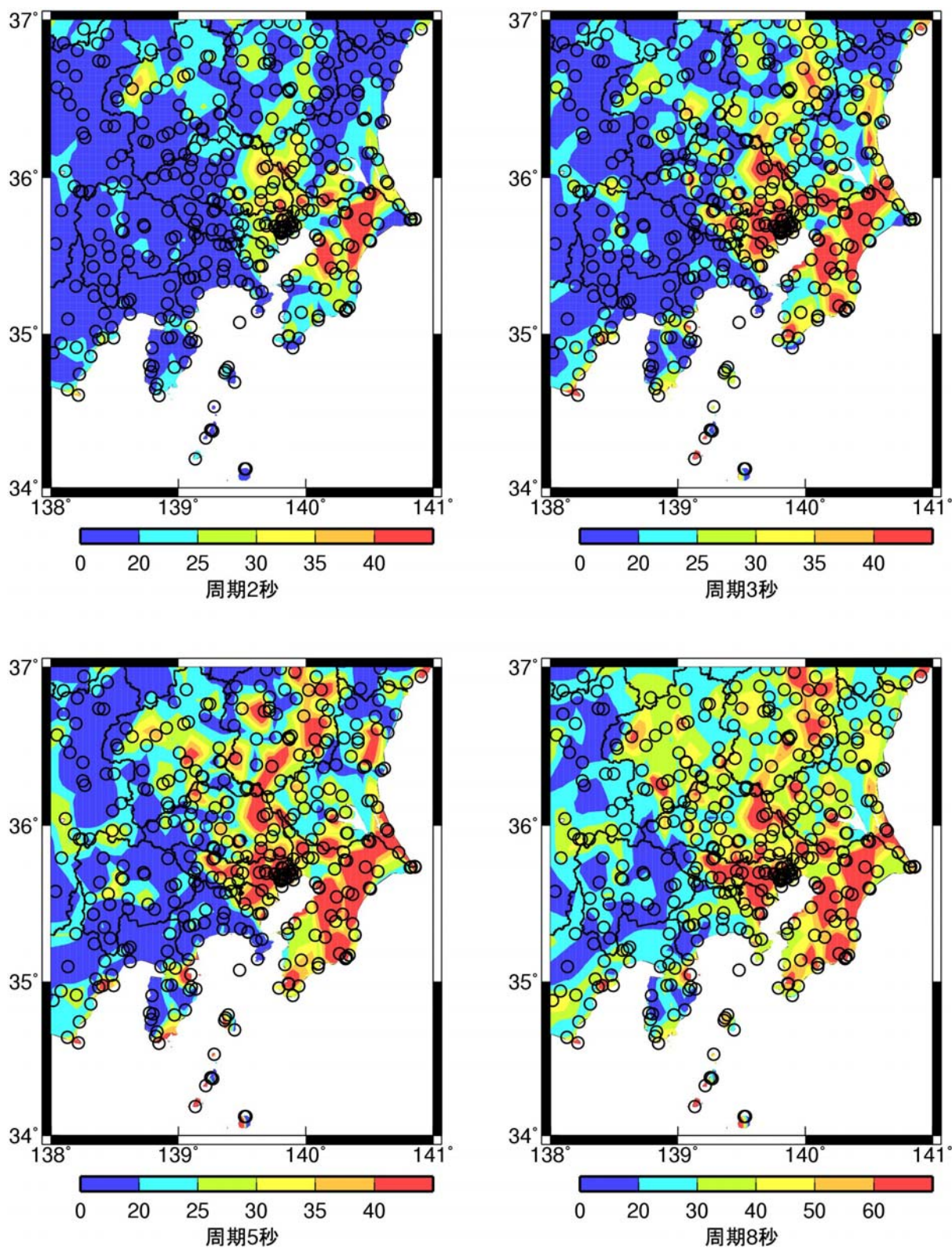
群遅延時間の平均値: 水平成分(伝播経路西)

図 2. 2-65 大阪平野の観測点での群遅延時間の平均値のサイト係数の単純な空間補間



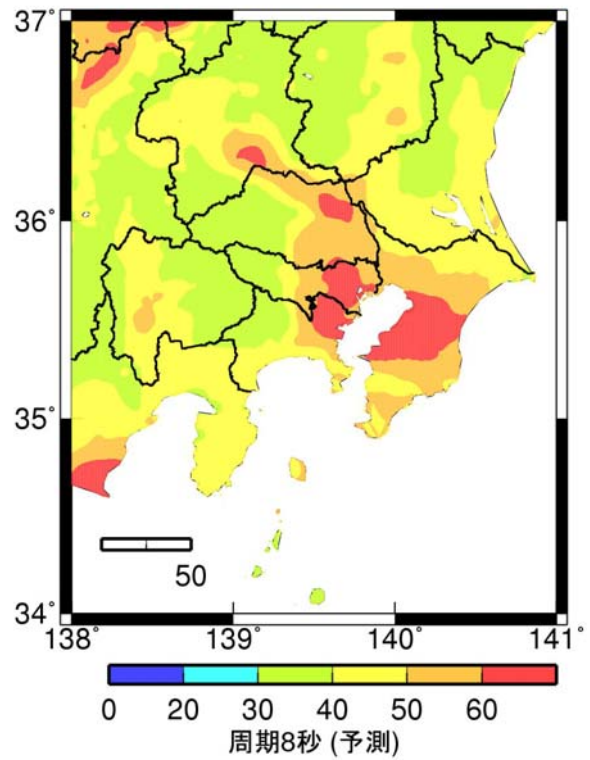
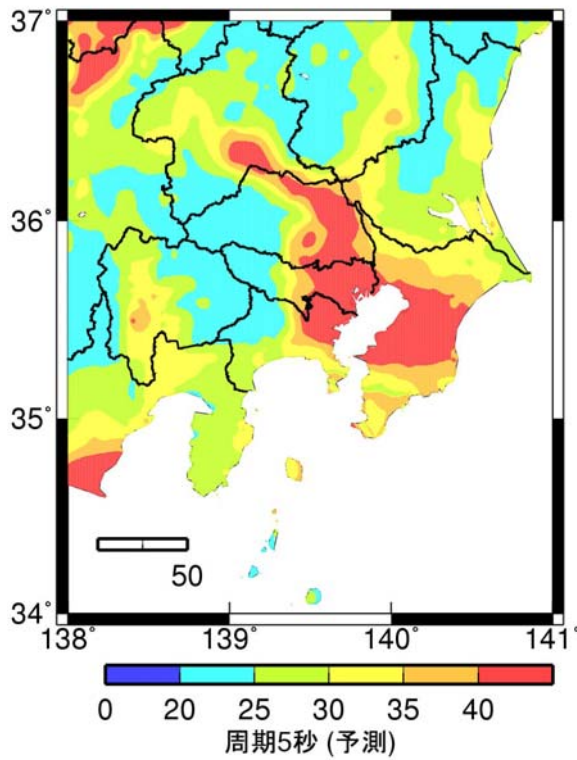
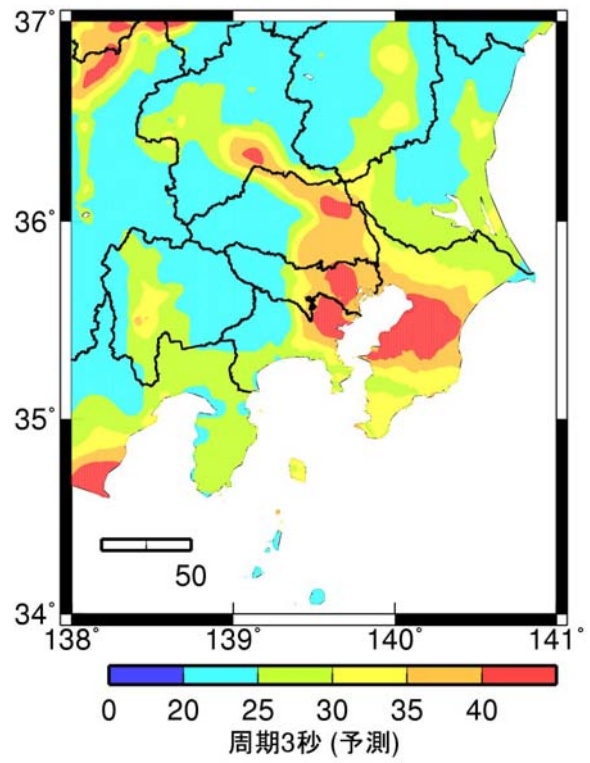
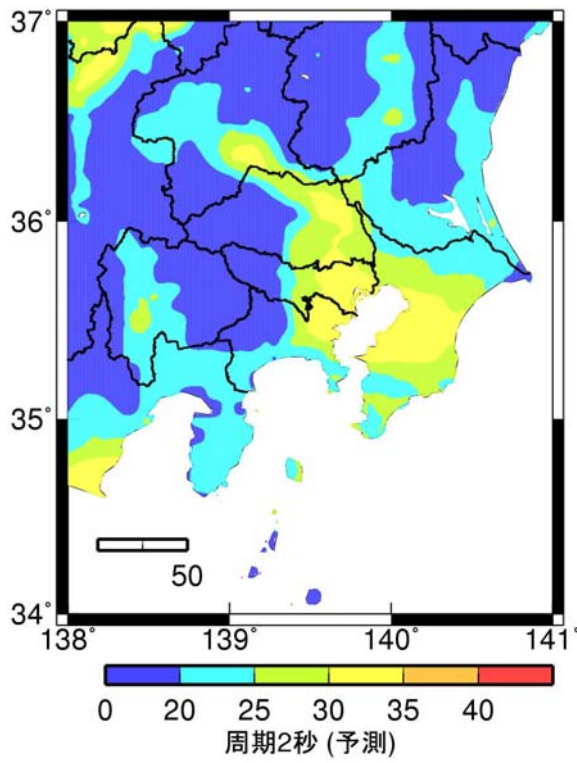
群遅延時間の平均値

図 2.2-66 大阪平野の群遅延時間の平均値のサイト係数の回帰式に基づく予測



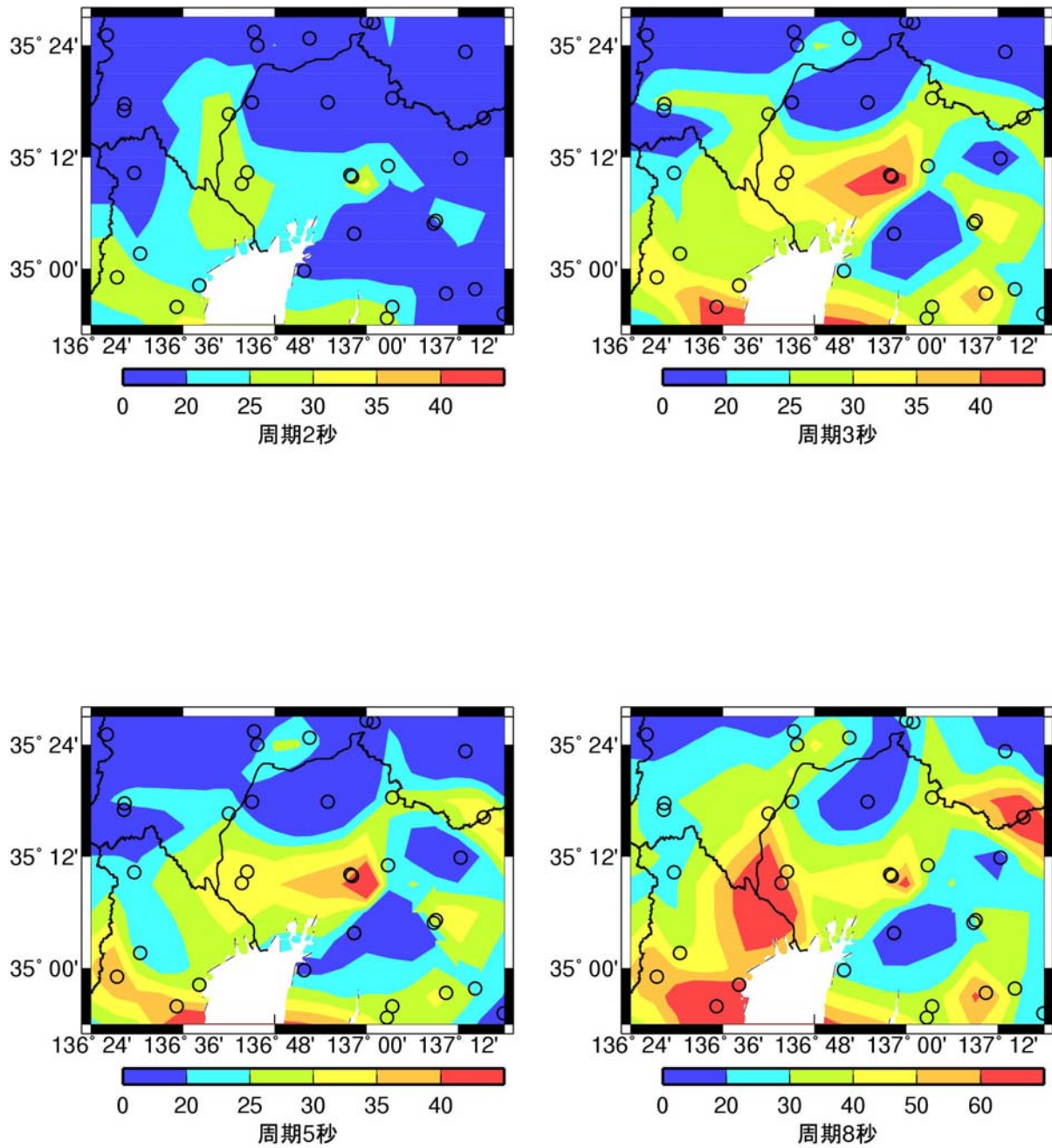
群遅延時間の標準偏差: 水平成分(伝播経路東)

図 2.2-67 関東平野の観測点での群遅延時間の標準偏差のサイト係数の単純な空間補間(太平洋プレートの地震)



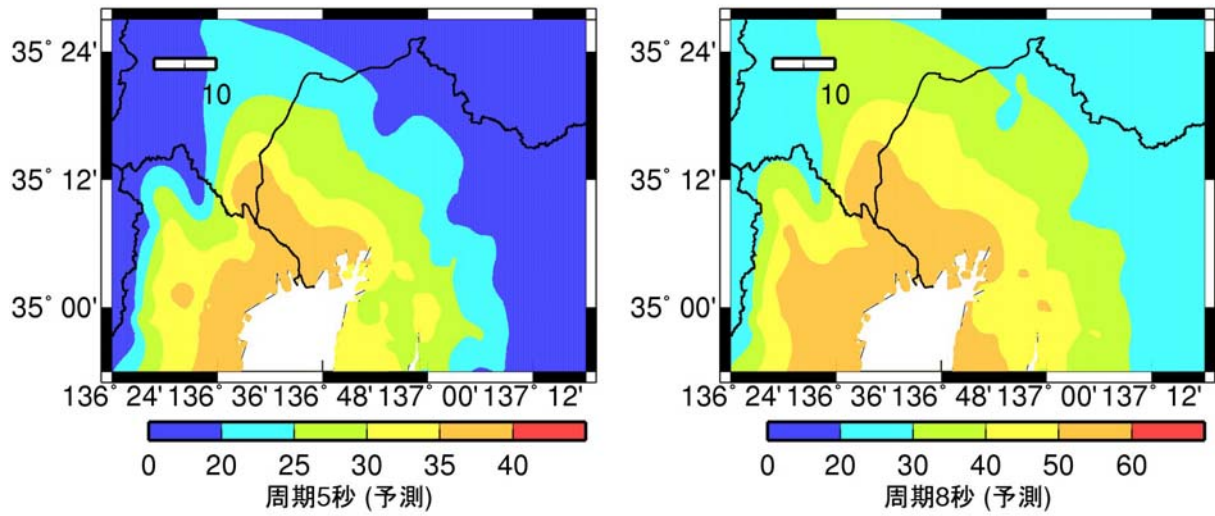
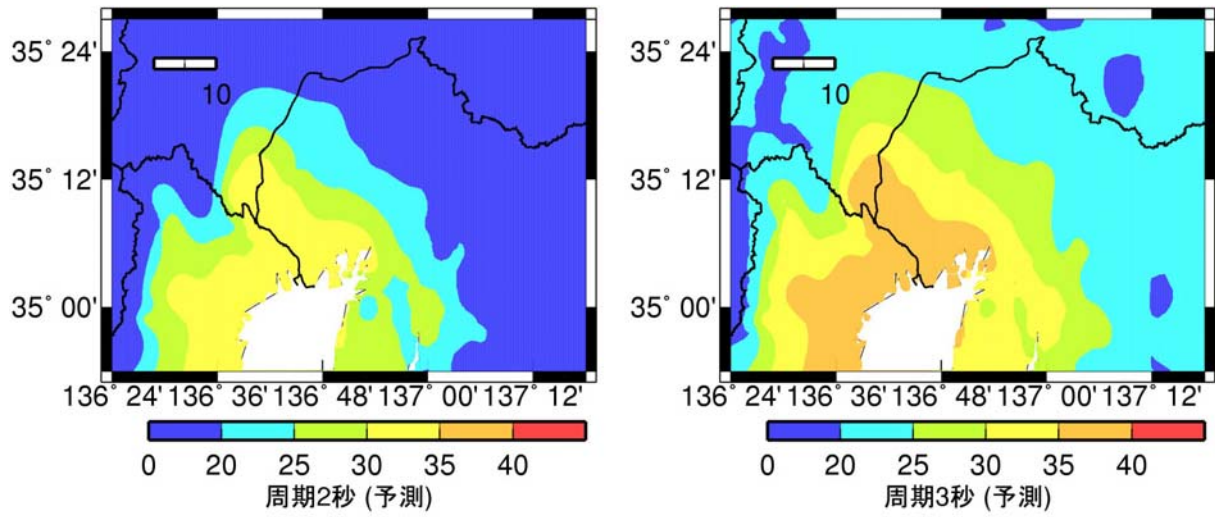
群遅延時間の標準偏差: 水平成分

図 2. 2-68 関東平野の群遅延時間の標準偏差のサイト係数の回帰式に基づく予測(太平洋プレート
トの地震)



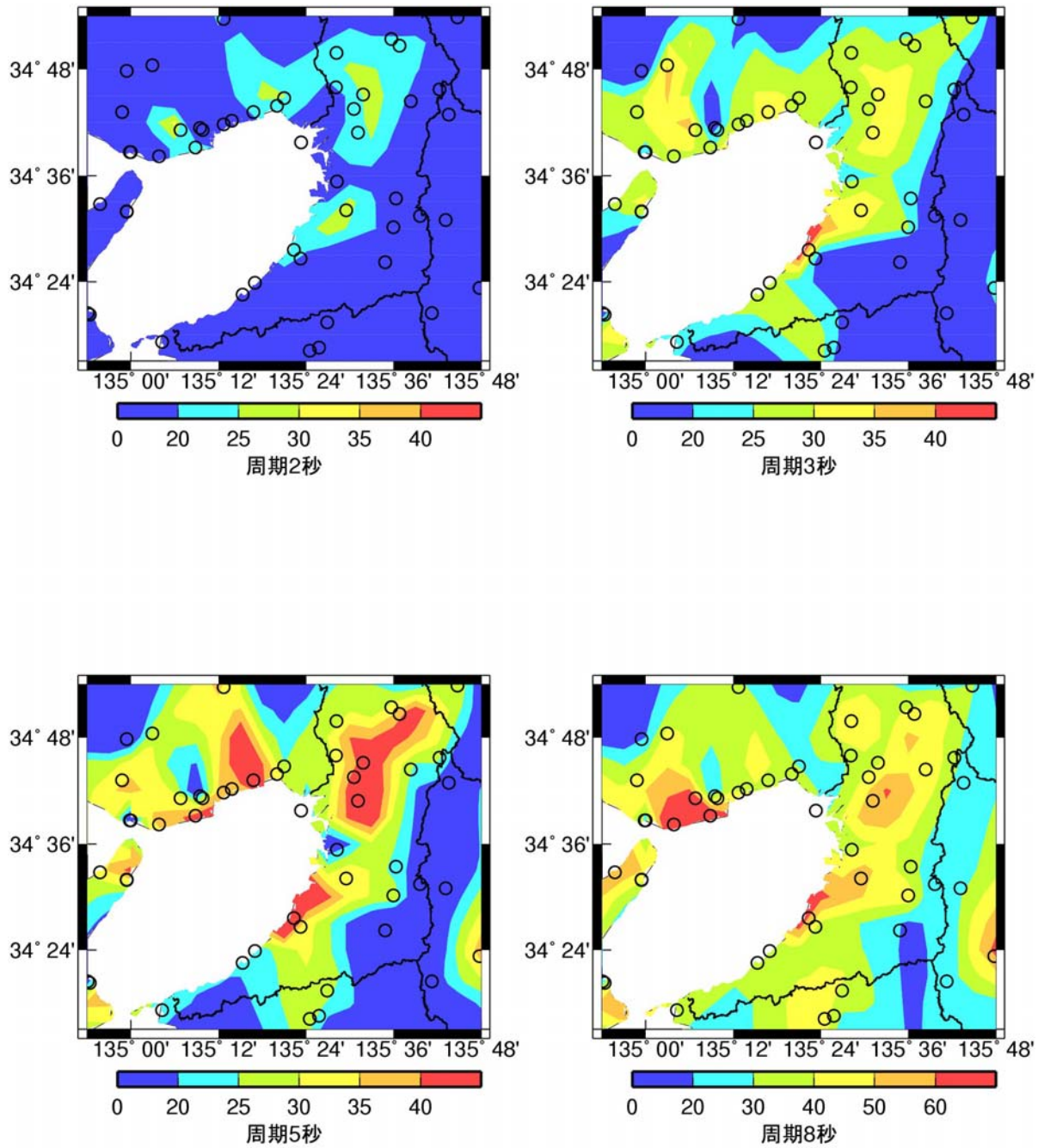
群遅延時間の標準偏差: 水平成分(伝播経路西)

図 2. 2-69 濃尾平野の観測点での群遅延時間の標準偏差のサイト係数の単純な空間補間



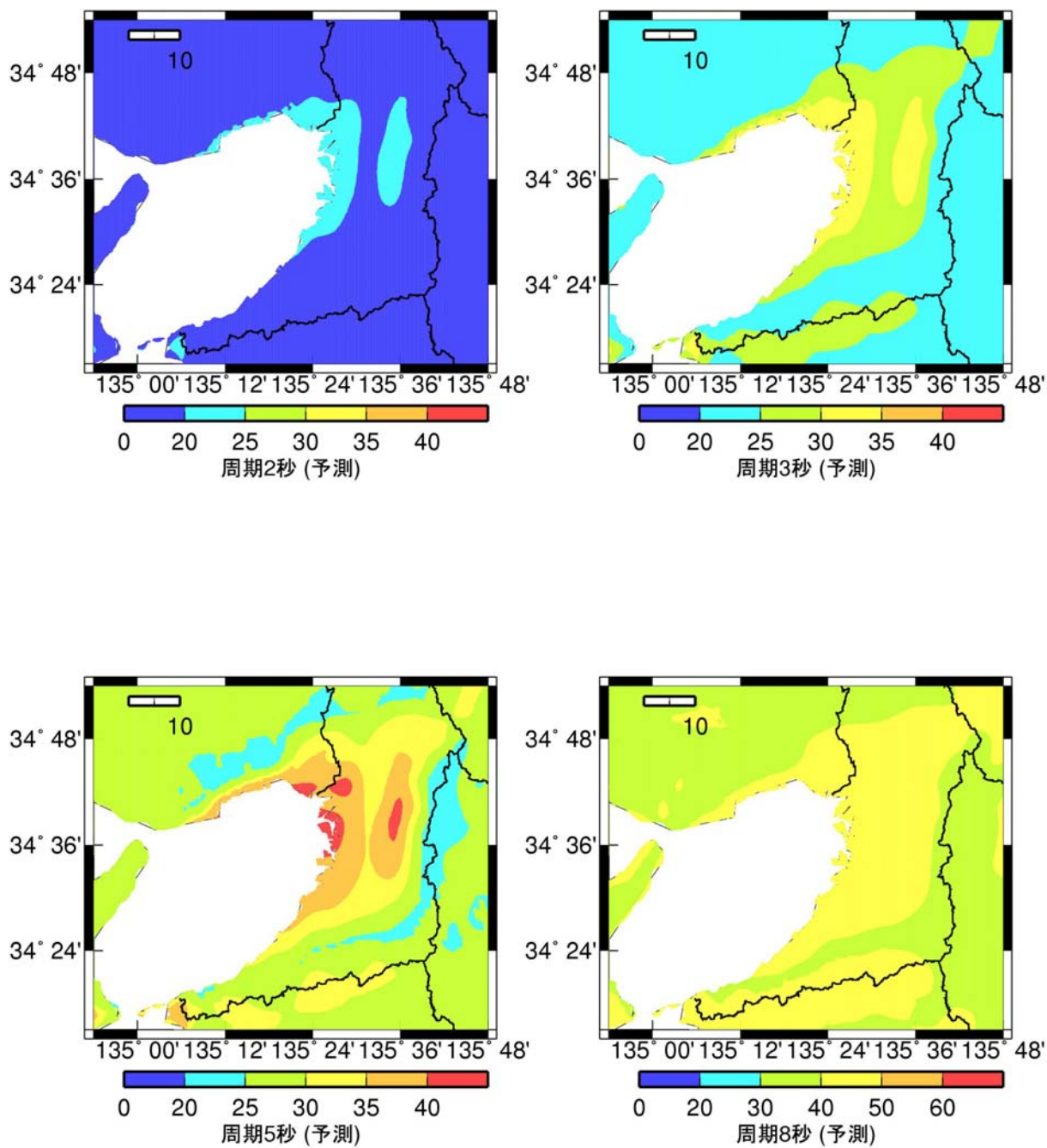
群遅延時間の標準偏差

図 2.2-70 濃尾平野の群遅延時間の標準偏差のサイト係数の回帰式に基づく予測



群遅延時間の標準偏差: 水平成分(伝播経路西)

図 2.2-71 大阪平野の観測点での群遅延時間の標準偏差のサイト係数の単純な空間補間



群遅延時間の標準偏差: 水平成分

図 2. 2-72 大阪平野の群遅延時間の標準偏差のサイト係数の回帰式に基づく予測

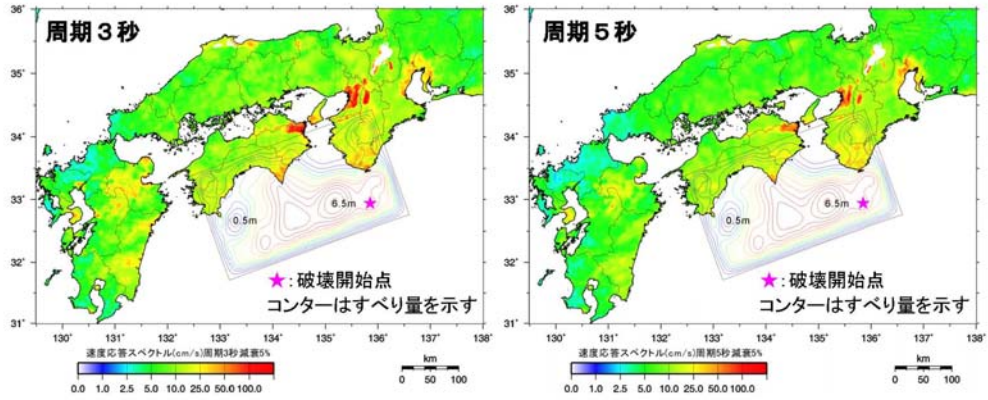


図 3.1-1 相対速度応答スペクトル(周期 3 秒と周期 5 秒)の分布

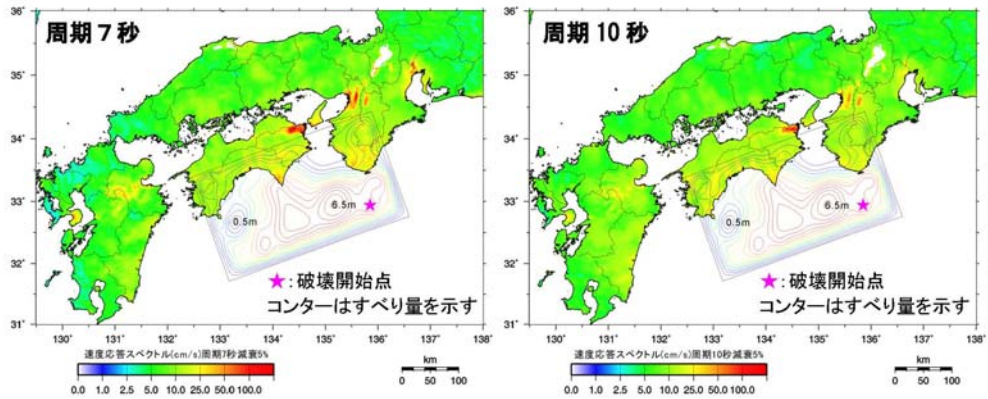


図 3.1-2 相対速度応答スペクトル(周期 7 秒と周期 10 秒)の分布

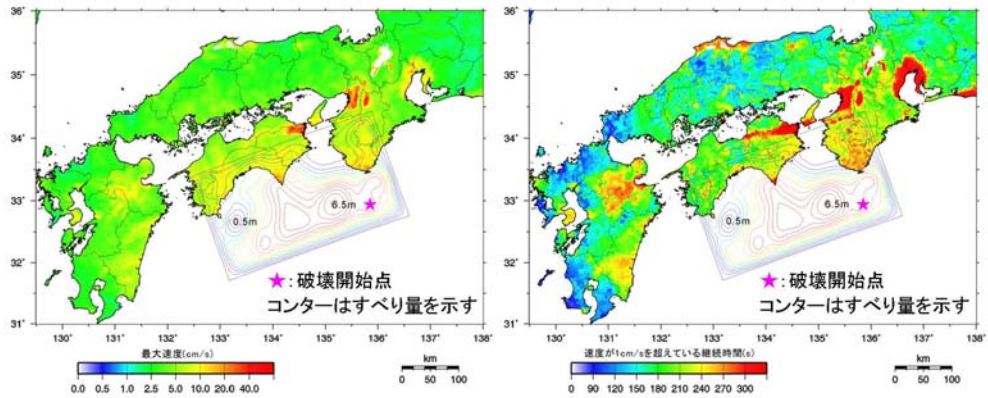


図 3.2 最大速度の分布

図 3.3 継続時間の分布

図 2.2-73 南海地震に対する地震動分布(地震本部, 2012)

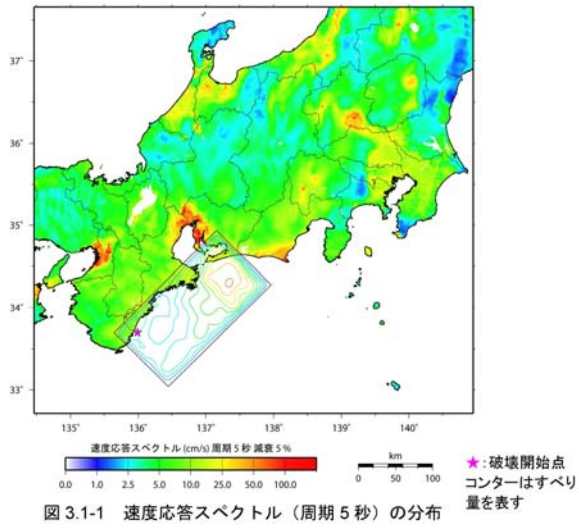


図 3.1-1 速度応答スペクトル (周期 5 秒) の分布

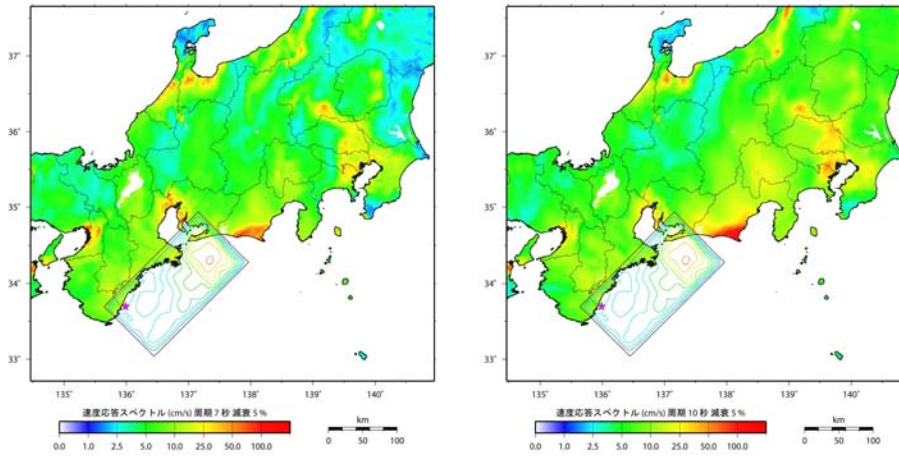


図 3.1-2 速度応答スペクトル (周期 7 秒と周期 10 秒) の分布

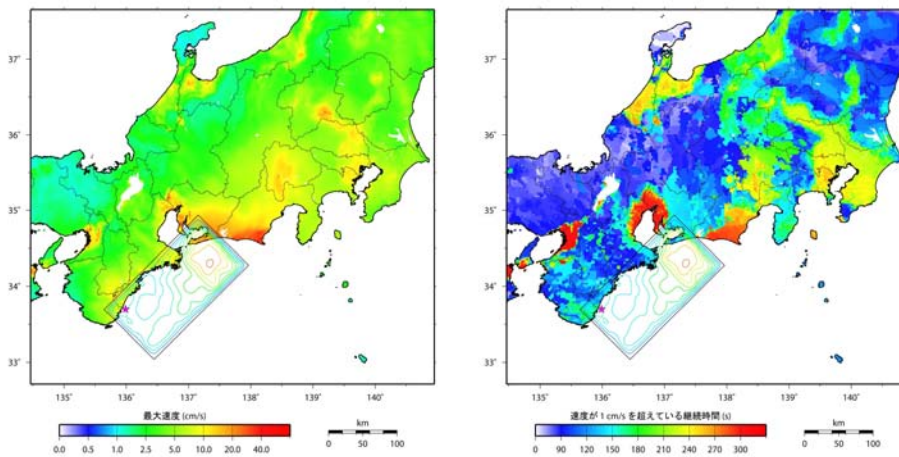


図 3.2 長周期地震動における最大速度の分布 図 3.3 長周期地震動の継続時間の分布

図 2.2-74 東南海地震に対する地震動分布(地震本部, 2009)

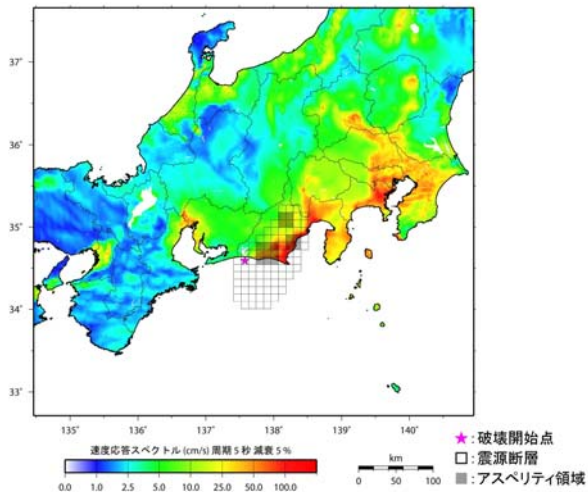


図 2.1-1 速度応答スペクトル (周期 5 秒) の分布

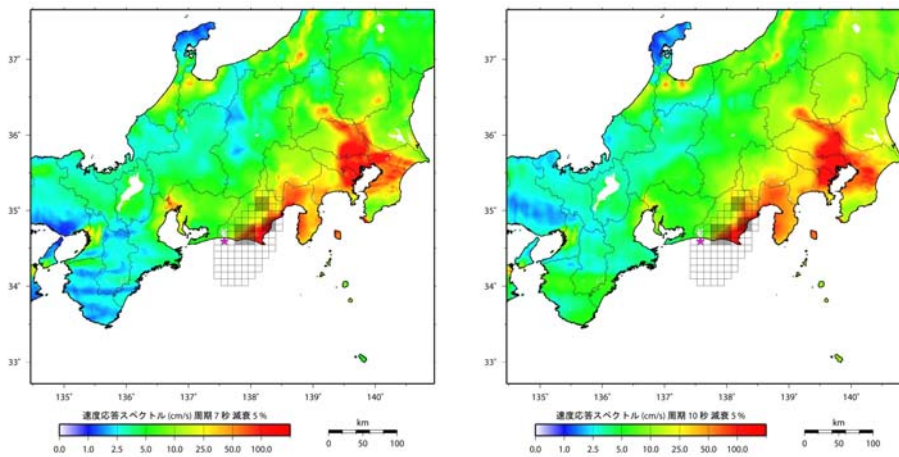


図 2.1-2 速度応答スペクトル (周期 7 秒と周期 10 秒) の分布

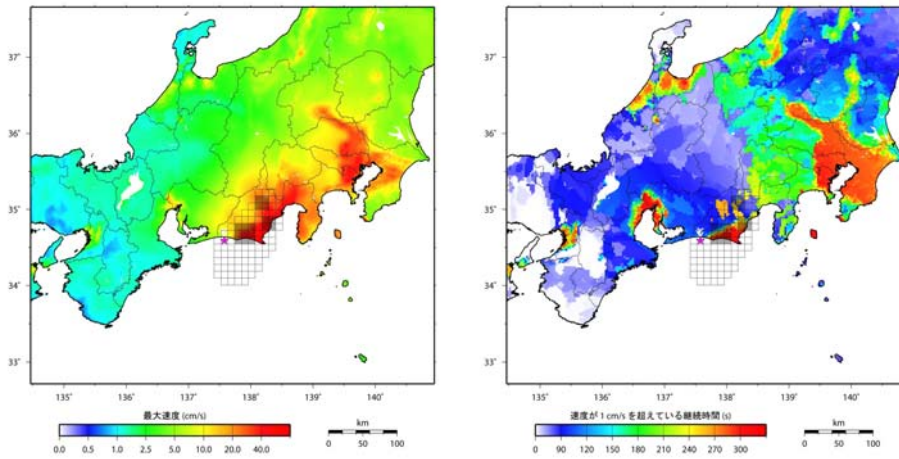


図 2.2 長周期地震動における最大速度の分布 図 2.3 長周期地震動の継続時間の分布

図 2.2-75 想定東海地震に対する地震動分布 (地震本部, 2009)

2-3 南海トラフ沿いの巨大地震に対する地表における長周期地震動波形の計算と地震動特性の設定方法の検討

2-3-1 はじめに

内閣府(2012)の南海トラフ沿いの巨大地震の断層モデル(Mw9.0)に基づき、震源モデルを設定し、改良経験式を用いて、地表における長周期地震動(平均波)を計算する。そして、23年度検討した、3連動の震源モデル(Mw8.7)の長周期地震動との比較を行う。また、震源モデルを矩形化したモデルも作成し、矩形化した場合としない場合で長周期地震動を作成し、その違いを検討する。

さらに、乱数により異なる波形が計算されるため、複数の計算波から、平均的な波を設定あるいは選択する方法について検討する。

また、内閣府(2012)の計測震度との比較、藤原・他(2012)の南海トラフの巨大地震に対する三次元有限差分法、統計的グリーン関数法による計算波との比較を行う。

最後に、連動型地震の計算波の応答スペクトルと、それぞれの断層から計算される応答スペクトルのSRSS(二乗和平方根)との比較を行い、その違いについて考察する。

2-3-2 計算条件

内閣府(2012)では、巨視的断層面が同じで、強震動生成域の位置が異なる4ケースで強震動の計算を行っている。図2.3-1には、そのうちの基本ケースの断層面と、23年度用いた5つの巨視的断層面から成る3連動(東海・東南海・南海)の断層面との比較を示す。内閣府(2012)の断層面は、23年度用いた3連動の断層面と比べ、日向灘域が追加されるとともに陸域に広がっていることが大きな特徴である。図2.3-2には、23年度用いた3連動(Mw8.7)の断層面と破壊開始点、計算地点を示す。図2.3-3には、4連動4セグメントモデルの断層面と破壊開始点、計算地点を示す。内閣府(2012)の巨視的断層面は、地形的な構造単位では6つのセグメントに分けられることから、4連動6セグメントモデルも設定した。図2.3-4にはこの断層面と破壊開始点、計算地点を示す。また、4連動6セグメントモデルとこれを矩形化した断層面を図2.3-5に示す。

表2.3-1に23年度用いた3連動の断層パラメータを、表2.3-2に4連動4セグメントモデル、表2.3-3に4連動6セグメントモデルの断層パラメータを示す。23年度実施した、東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーションを通じて設定したMw8.4での頭打ち(上限値)を考慮した。したがって、表2.3-2、3に示したように、内閣府(2012)に基づく4連動の断層の全体のMwは8.9となる。ただし、参考にした内閣府(2012)のMw9.0を用いてMw9.0と表記する。4連動の震源モデルでは、巨視的断層面毎に最も到達時間の早い小断層を破壊開始点としている。矩形化モデルの破壊開始点は、矩形化しないモデルと同じとした。計算地点は、これまで用いてきた代表8観測点と、23年度に建物応答に使われた浜松(SZ0024)である。

図2.3-6には、4連動6セグメントモデルを矩形化した場合としない場合の断層最短距離の比較を示す。関東平野の観測点では、最も近い駿河湾域でも距離の違いは小さい。そこで、関東平野の観測点を除く5観測点で、4連動6セグメントモデルを矩形化した場合としない場合の計算波の応答スペ

クトルの比較を行う。両モデルによる断層最短距離が特に異なるのは、大阪平野 2 地点であり、矩形モデルの方が、南海域東断層、東海域西断層からの断層最短距離が小さくなっている。大阪平野 2 地点までの断層最短距離をほぼ同じに断層面を設定することは可能であるが、その場合、四国や愛知県の地点までの距離の違いが非常に大きくなるなどの問題が生じる。

なお、改良経験式のデータは、断層最短距離 20～400km の範囲にあるが、計算地点は 20km 以内にある。

4 セグメントモデルと同様に、6 セグメントモデルでも改良経験式の平均の地表での地震動を作成する。また、乱数の異なる 21 波を計算する。

2-3-3 平均的な波の選択・作成方法

21 個の波から、平均的な波を選択・作成する方法として、以下の 3 つで比較検討を行う。

- a. 正規軸の残差が小さい波を選択する方法(これまでの方法)
 - ・各波の擬似速度応答スペクトルから擬似速度応答スペクトルの平均値を引いた周期 1～10 秒での残差の和が正で、残差の絶対値が小さい波を選択
 - ・選択された波のうち、エネルギースペクトルからエネルギースペクトルの平均値を引いた周期 1～10 秒での残差の和が正で、残差の絶対値が小さい波を選択
- b. 対数軸の残差が小さい波を選択する方法
 - ・各波の擬似速度応答スペクトルの対数から擬似速度応答スペクトルの対数平均値を引いた周期 1～10 秒での残差の和が正で、残差の絶対値が小さい波を選択
 - ・選択された波のうち、エネルギースペクトルの対数からエネルギースペクトルの対数平均値を引いた周期 1～10 秒での残差の和が正で、残差の絶対値が小さい波を選択
- c. 三の丸波作成方法(宮腰・他, 2006)と同じ方法
 - ・擬似速度応答スペクトルの対数平均値を算出
 - ・21 波の速度波形のうち、最大速度が中央値の波の位相スペクトルを算出
 - ・上記 2 つを用いて波形を再作成

2-3-4 長周期地震動の計算波

図 2.3-7～図 2.3-24 には、代表 8 観測点と浜松(SZ0024)での計算波の擬似速度応答スペクトル(h=5%)とエネルギースペクトルを示す。各図の(a)は、4 連動 6 セグメントモデルの 21 波とその平均値(対数平均値)である。(b)は、3 連動(Mw8.7)の平均波と平均+標準偏差波、4 連動 4 セグメントモデル、4 連動 6 セグメントモデルの平均波の 21 波の平均値の比較である。(c)は、b の方法(対数の残差を用いる方法)により 21 波から選択された波と平均値の比較、(d)は、a の方法(正規軸の残差を用いる方法)により 21 波から選択された波と平均値の比較である。

(b)をみると、関東平野 4 地点では、4 連動 4 セグメントモデル、4 連動 6 セグメントモデルの違いは小さい。これは、最も断層最短距離が小さい駿河湾域の断層が両者で同じであるためである。濃尾

平野 2 地点では、4 連動 4 セグメントモデル、4 連動 6 セグメントモデルでの擬似速度応答スペクトルの違いは小さいが、エネルギースペクトルは 6 セグメントモデルの方がやや大きい。これは、最も近い断層までの断層最短距離と M_w が同じであるが、6 セグメントモデルでは継続時間がやや長くなったためである。大阪平野 2 地点では、擬似速度応答スペクトルは 4 連動 6 セグメントモデルの方が 4 連動 4 セグメントモデルよりやや小さいが、エネルギースペクトルの違いは小さい。これは、最も近い 2 つの断層までの断層最短距離は同じであるが、6 セグメントモデルでは東海域西断層の M_w が 8.3 であるのに対して、4 セグメントモデルでは東海域の M_w が 8.4 であるためと考えられる。ただし、6 セグメントモデルの方が継続時間が長いこと、エネルギースペクトルは同程度となったものと考えられる。浜松では、4 セグメントモデルと 6 セグメントモデルでは、最も近い直上の断層と次に近い駿河湾域の断層までの断層最短距離、 M_w と同じであるため、両モデルによる違いはほとんどない。継続時間の影響を受けるエネルギースペクトルもほぼ同じであるのは、この 2 つの断層と比較して他の断層は断層最短距離が遠く、影響が小さいためと考えられる。

(c) と (d) を比較すると、波の選択方法 a、b による違いはほとんどないことがわかる。ただし、津島 (AIC003) では、a の方法を用いた場合の擬似速度応答スペクトルのピーク値が平均値よりかなり小さくなっている。波の選択方法 a、b によるスペクトルは、c の方法による平均値のスペクトルとの違いも小さい。

図 2.3-25 には、c の方法で作成された波のエネルギースペクトルと、21 波のエネルギースペクトルの平均値(対数平均)との比較を示す。作成された波とエネルギースペクトルの平均値がほぼ合っていることがわかる。

図 2.3-26～図 2.3-30 には、3 連動 (M_w 8.7) の平均波と平均+標準偏差波、4 連動 4 セグメントモデル、4 連動 6 セグメントモデルの平均波の速度波形の比較を示す。4 連動 6 セグメントモデルは、b の方法と c の方法の場合である。同様に図 2.3-31～図 2.3-35 には、加速度波形の比較を示す。図 2.3-26～図 2.3-35 は、経験式の適用範囲である 0.1～10 秒のバンドパスフィルターをかけた波形を表示している。大阪平野 2 地点では、6 セグメントモデルの方が 4 セグメントモデルに比べて、最大速度は小さいが、継続時間が長くなっていることがわかる。

図 2.3-36 には、4 連動 6 セグメントモデルを矩形化した場合としない場合の計算波の擬似速度応答スペクトルの比較を示す。矩形化することにより、南海域東断層、東海域西断層からの断層最短距離が短くなった此花 (OSKH02)、大阪 (OSK005) では、両モデルによる違いがある。矩形化の仕方により計算波が異なることになるため、オリジナルのモデルを用いた方がよいものと考えられる。

2-3-5 既往の計算波、観測波との比較

図 2.3-37、38 には、南海地震の此花 (OSKH02) における断層モデルに基づく既往の計算波(鶴来・他, 2005; 関口・他, 2006; 釜江・川辺, 2006) と地震本部 (2012) の舞洲での計算波の擬似速度応答スペクトルと速度波形(周期 0.1～10 秒)との比較を示す。擬似速度応答スペクトルをみると 4 連動 6 セグメントモデルは、釜江・川辺の NS 成分よりやや小さいが 2 成分の平均値と同レベルである。速度波

形をみると、4セグメントモデルでは南海地震の既往の計算波より継続時間がやや短い、6セグメントモデルでは同程度かやや長くなっている。図 2.3-39 は、東海・東南海地震(Mw8.3)の三の丸における断層モデルに基づく既往(宮腰・他, 2006)の計算波(三の丸波)と旧経験式に基づく名古屋(AIC004)での計算波との比較である。4連動の平均波の周期3秒でのスペクトルレベルは、三の丸波の小さい方のレベルである。なお、三の丸波は工学的基盤波であり、他は地表での波であるため、周期1秒以下は直接比較できない。また、名古屋(AIC004)と三の丸は数km離れている。

図 2.3-40 には、津島(AIC003)での計算波と東北地方太平洋沖地震の古川(MYG006)での擬似速度応答スペクトルを示す。地震も観測点も違うが、津島(AIC003)での計算波は、古川(MYG006)での大きい方の成分(EW成分)レベルである。

図 2.3-41 には、内閣府(2012)による計測震度分布を示す。強震動生成域の位置が異なる4ケースに対する統計的グリーン関数法に基づく結果と経験的方法に基づく結果及びこれら5ケースの最大値の結果である。4連動6セグメントモデルで算出した波形から計算した9地点での計測震度と9地点が含まれる市町村における内閣府の計測震度との比較を表 2.3-4 に示す。なお、本検討の計算波は水平1成分のみであることから、計測震度の計算では、水平2成分とも同じ波形と仮定し、上下成分はないとした。また、本検討の計算波は0.1~10秒のみである。このような原因により、内閣府(2012)による計測震度分布より小さめの計算結果になっていると考えられる。

図 2.3-42 には、藤原・他(2012)による南海トラフ沿いの地震の震源モデルを示す。このうち、三次元差分法と統計的グリーン関数法の計算波形のフーリエスペクトルと速度波形が示されている震源モデル(3連動+遠州灘、ANNI4c-s-c スケーリング)と計算地点を図 2.3-43 に示す。愛知県庁と東京都庁のみでは、ANNI4c-s-c スケーリング、ANNI4c-s-c カスケード、ANNI4c-s-c 箱型関数(スケーリング)、ANNI4c-s-cQ 値無限大(スケーリング)の速度応答スペクトルと速度波形が示されている。これらの波形やスペクトルと本検討の計算波との比較を行う。表 2.3-5 には、藤原・他(2012)による南海トラフ沿いの地震の震源モデルの震源パラメータを示す。黄色とオレンジが、本検討と計算波を比較するモデルである。表 2.3-6 には、藤原・他(2012)による南海トラフ沿いの地震の計算ケースを示す。黄色とオレンジが、本検討と計算波を比較するケースである。

図 2.3-44、図 2.3-45、図 2.3-46 には、藤原・他(2012)による表 2.3-6 の全一スの三次元有限差分法に基づく愛知県庁、東京都庁、大阪府庁の速度波形(NS成分)を示す。黄色とオレンジが3連動+遠州灘(ANNI4c-s-c)のケースである。うち、オレンジがスケーリングのケースである。3連動のみ(ANNI3-s-c)と比べると、遠州灘にある浅い震源の影響で3連動+遠州灘(ANNI4c-s-c)のケースは愛知県庁では200~220秒付近で、東京都庁では220秒以降で表面波と考えられる波群の振幅が大きくなっていることがわかる。大阪府庁でも遠州灘の浅い震源の影響がややみられる。なお、全ケースの結果は、図 2.3-43 の5地点で波形のみが示されている。図 2.3-47、48、49 には、名古屋、新宿、大阪での本検討と藤原・他(2012)の統計的グリーン関数法と三次元有限差分法に基づく3連動+遠州灘(ANNI4c-s-c スケーリング, Mw 8.9)のケースの速度フーリエスペクトルと速度波形の比較を示す。本検討の内閣府(2012)に基づく震源モデルはカスケードであり、波形選択方法bによる波形(周期0.1

～10秒のフィルター波)である。藤原・他(2012)の三次元有限差分法の計算波は周期5秒以上で信頼できる(Maeda et al., 2012)。名古屋で本検討の3連動(Mw8.7)と比較すると、藤原・他(2012)の波形の方が、上述のように遠州灘の浅い震源の影響で200～220秒の振幅が大きくなっている。フーリエスペクトルは周期3秒で卓越する特徴は両者同じであるが、震源モデルの違いのため、本検討の3連動の方がやや小さい。新宿では、藤原・他(2012)の三次元有限差分法による波形にはパルスがみられるが、これは主に周期10秒以上の成分である。本検討の波形は周期10秒以下のみであるため、このようなパルスはみられない。周期5～10秒のフーリエスペクトルは、藤原・他(2012)に比べて、本検討の3連動がやや小さい程度であり、Mw9.0の4連動ではほぼ同じレベルである。大阪府庁では、本検討の3連動と藤原・他(2012)のスペクトルは、周期5～10秒でほぼ同じレベルである。藤原・他(2012)の波形の方が、上述のように遠州灘の浅い震源の影響で250秒以降の振幅が大きくなっている。図2.3-50、図2.3-51には、名古屋、新宿での本検討と藤原・他(2012)の三次元有限差分法に基づく3連動+遠州灘(ANNI4c-s-c)のケースの速度応答スペクトルと速度波形の比較を示す。新宿、名古屋とも周期5～10秒の本検討の3連動(Mw8.7)と、藤原・他(2012)のカスケード(Mw8.7)のスペクトルがほぼ同じレベルであり、ほぼ整合しているといえる。

2-3-6 SRSS との比較

連動型地震の計算波は、各断層からの計算波の時刻歴での足し合わせとなるため、応答スペクトルの経験式のみから作成することができない。ここでは、各断層からの応答スペクトルのSRSS(二乗和平方根)を計算し、連動型地震の計算波の応答スペクトルとの比較を試みた。検討対象としたのは、4連動6セグメントモデルの新宿(KGIN)、津島(AIC003)、此花(OSKH02)での計算波である。図2.3-52には、各断層からの応答スペクトルとそのSRSS、連動型地震の計算波の21波の応答スペクトルの平均との比較を示す。SRSSは、連動型地震の応答スペクトルと比べて大きい。特に、複数の断層からの波が重なりあうOSKH02では、その差が大きい。SRSSは、簡便ではあるが大きめの評価となることに注意が必要である。

2-3-7 まとめ

内閣府(2012)の南海トラフ沿いの巨大地震の断層モデル(Mw9.0)に基づき、4連動4セグメントモデルと、地形的な構造単位に基づく6つのセグメントに対応した6つの巨視的断層面から成る4連動6セグメントモデルを設定し、改良経験式を用いて地表での長周期地震動(平均波)を試算した。4連動6セグメントモデルの計算波は4連動4セグメントモデルの計算波と比べて、濃尾平野、大阪平野の観測点では継続時間が伸びることがわかった。大阪平野の2観測点では、擬似速度応答スペクトルは6セグメントモデルの方が4セグメントモデルより小さいが、エネルギースペクトルはほぼ同じであった。濃尾平野の2観測点では、擬似速度応答スペクトルはほぼ同じであったが、エネルギースペクトルは6セグメントモデルの方が4セグメントモデルより大きかった。浜松と関東平野では、両モデルの違いは小さかった。4セグメントモデルでは、南海地震に対する既往の計算波より継続時間が

短い傾向があったが、6セグメントモデルにすることにより、改善されることがわかった。

また、6セグメントモデルを矩形化した場合についても検討を行ったが、断層最短距離が異なる地点では計算波に違いが生じることが確認された。矩形化の仕方で計算波が変動することになるため、矩形化しないオリジナルモデルを用いる方がよいと考えられる。

また、異なる乱数を用いた21波からの平均的な波の選択・作成方法について、3つの考え方に基づき比較検討を行った。3つの考え方による違いは小さかった。

本検討と藤原・他(2012)の南海トラフ沿いの巨大地震に対する計算波形、スペクトルの比較を行った。震源モデルが異なるため、定量的な比較は困難であるが、両者のモデルの違いを考慮するとほぼ整合する結果となっていると考えられる。

参考文献

- 中央防災会議 東南海・南海地震等に関する専門調査会(2003). 第16回資料3 図表集, pp. 18-20,
<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai>
- 藤原広行・森川信之・青井真・前田宜浩(2012). 3.4 長周期・広帯域地震動予測のための時刻歴波形の検討等, 長周期地震動予測地図作成等支援事業 平成23年度成果報告書,
http://www.jishin.go.jp/main/chousakenkyuu/choshuki_shien/h23/3_4.pdf
- 釜江克宏・川辺秀憲(2006). 南海地震における近畿圏の強震動予測, 第34回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会, pp. 35-40.
- Maeda, T., N. Morikawa, S. Aoi, H. Fujiwara (2012). FD simulation for long-period ground motions of Great Nankai Trough, Japan earthquakes, The 15th world conference of earthquake engineering, WCEE2012_5422.pdf
- 宮腰淳一・中田猛・福和伸夫・柴田昭彦・白瀬陽一・斎藤賢二(2006). 名古屋市三の丸地区における耐震改修用の基準地震動の作成, 日本地震工学会大会, pp. 394-395.
- 内閣府(2012). 南海トラフの巨大地震に関する津波高、浸水域、被害想定公表について
http://www.bousai.go.jp/nankaitrough_info.html
- 関口春子・吉見雅行・吉田邦一・堀川晴央(2006). 海溝型巨大地震の広帯域地震動予測のためのマルチスケール不均質モデルと南海地震への適用, 海溝型巨大地震を考えるー広帯域強震動の予測2ーシンポジウム論文集, pp. 61-73.
- 鶴来雅人・趙伯明・Petukhin A.・香川敬生(2005). 東南海・南海地震による大阪での強震動予測事例ー広帯域強震動の予測ーシンポジウム論文集, pp. 73-82.
- 地震調査研究推進本部(2009). 「長周期地震動予測地図」2009年試作版,
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_choshuki/choshuki2009.pdf
- 地震調査研究推進本部(2012). 「長周期地震動予測地図」2012年試作版,
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/choshuki2012.pdf

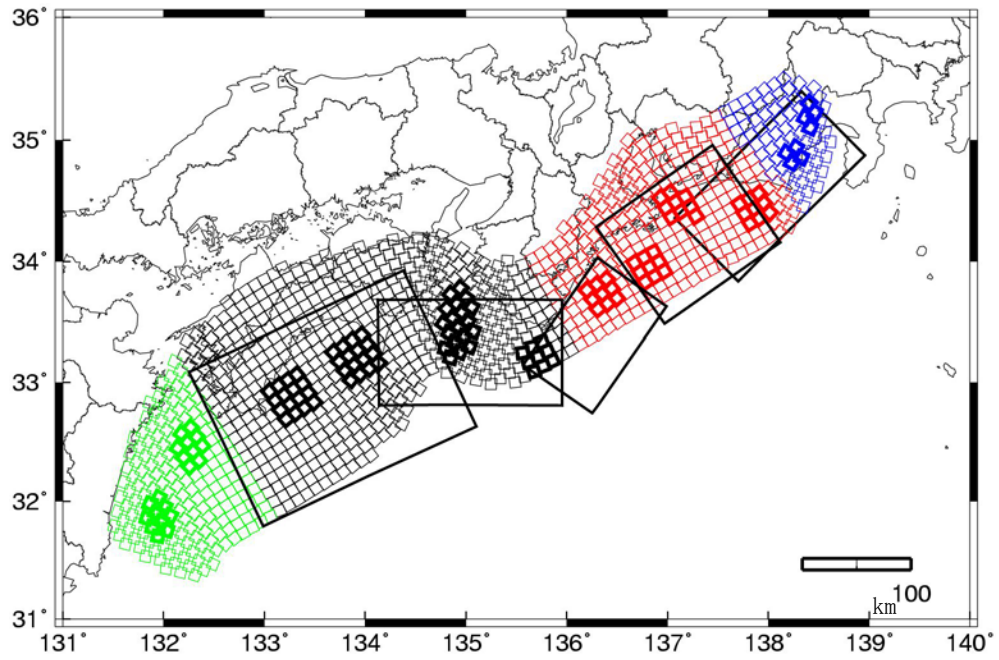
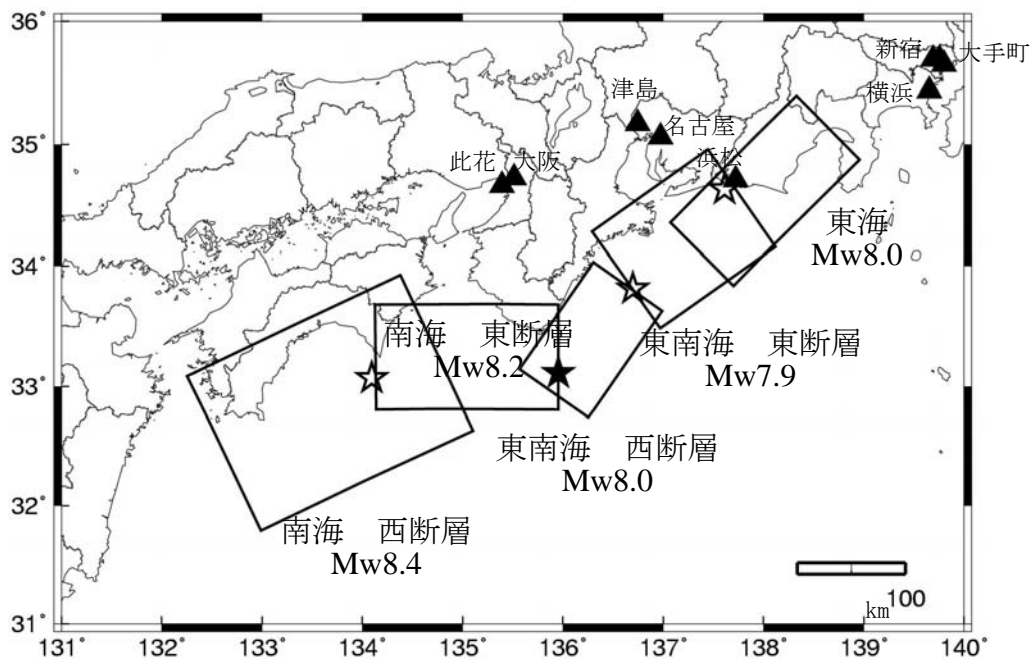
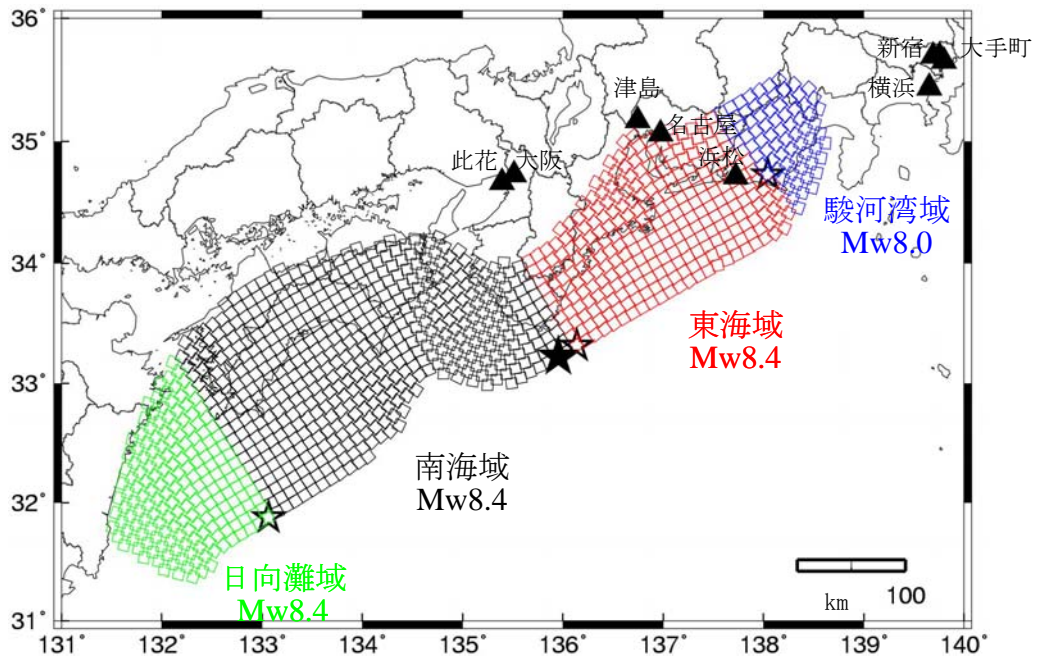


図 2.3-1 23年度の検討に用いた3連動の断層面(5つの大きな矩形)と内閣府(2012)の基本ケースの断層面(小さな正方形の内、濃い方が強震動生成域、薄い方が背景領域)



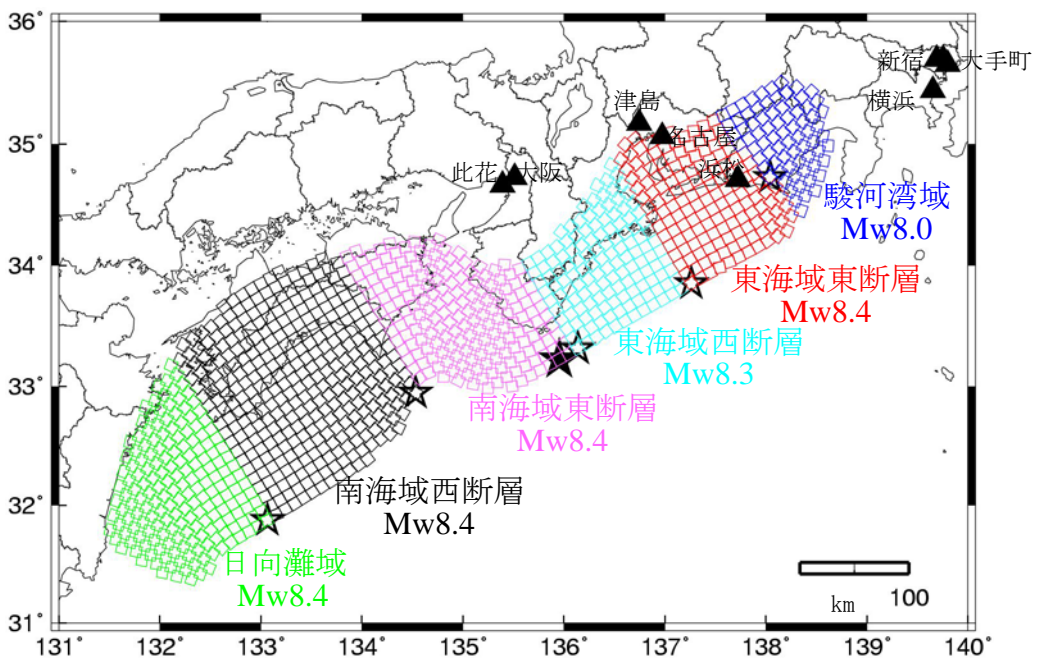
★第1破壊開始点、☆その他の破壊開始点

図 2.3-2 23年度の検討に用いた3連動の断層面(5つの大きな矩形)と破壊開始点及び計算地点



★第1破壊開始点、☆その他の破壊開始点

図 2.3-3 4連動4セグメントモデルと計算地点



★第1破壊開始点、☆その他の破壊開始点

図 2.3-4 4連動6セグメントモデルと計算地点

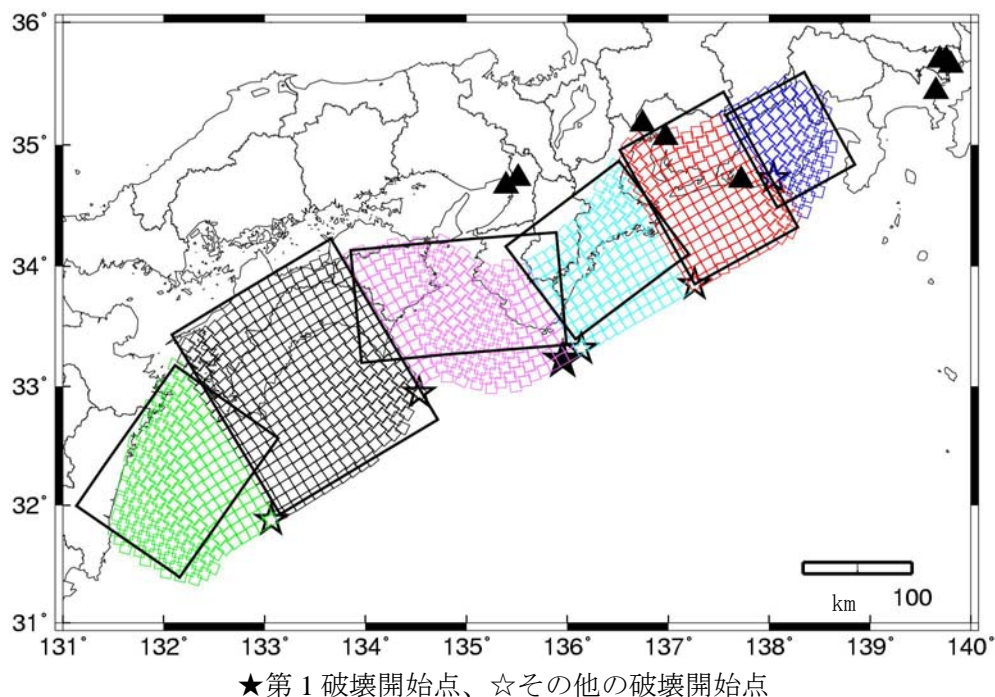


図 2.3-5 今回検討した4連動6セグメントモデルとこれを矩形化した震源モデルと計算地点

表 2.3-1 23年度の検討に用いた3連動(Mw8.7)モデル

		M_0 [dyne · cm]	M_w	破壊時間差[s]	参考文献	参考文献中での引用
南海	東断層	2.91×10^{28}	8.2	0.0	鶴来・他(2005)	中央防災会議(2003)
	西断層	5.46×10^{28}	8.4	64.4	鶴来・他(2005)	中央防災会議(2003)
東南海	東断層	9.01×10^{27}	7.9	38.5	鶴来・他(2005)	中央防災会議(2003)
	西断層	1.48×10^{28}	8.0	0.0	鶴来・他(2005)	中央防災会議(2003)
東海		1.12×10^{28}	8.0	84.5	地震本部(2009)	
全体		1.2×10^{29}	8.7			

*鶴来・他(2005)は中央防災会議(2003)に基づいている。地震本部(2009)も中央防災会議(2003)に基づいている。

表 2.3-2 内閣府(2012)に基づく4連動4セグメント(Mw9.0)モデル

		M_0 [dyne · cm]	M_w	破壊時間差[s]	参考文献	参考文献中での M_0 と M_w
日向灘域		4.3×10^{28}	8.4	114.7	内閣府(2012)	同じ
南海域		5.0×10^{28}	8.4	0.0	内閣府(2012)	2.2×10^{29} (Mw8.8)
東海域		5.0×10^{28}	8.4	7.4	内閣府(2012)	8.3×10^{28} (Mw8.5)
駿河湾域		1.2×10^{28}	8.0	94.4	内閣府(2012)	同じ
全体		2.77×10^{29}	8.9		内閣府(2012)	3.4×10^{29} (Mw9.0)

表 2.3-3 内閣府(2012)に基づく4連動6セグメント(Mw9.0)モデル

		M_0 [dyne · cm]	M_w	破壊時間差[s]	参考文献	参考文献中での M_0 と M_w
日向灘域		4.3×10^{28}	8.4	114.7	内閣府(2012)	同じ
南海域	西断層	5.0×10^{28}	8.4	50.3	内閣府(2012)	1.26×10^{29} (Mw8.7)
南海域	東断層	5.0×10^{28}	8.4	0.0	内閣府(2012)	7.77×10^{28} (Mw8.5)
東海域	西断層	3.97×10^{28}	8.3	7.4	内閣府(2012)	同じ
東海域	東断層	4.31×10^{28}	8.4	51.8	内閣府(2012)	同じ
駿河湾域		1.2×10^{28}	8.0	94.4	内閣府(2012)	同じ
全体		2.77×10^{29}	8.9		内閣府(2012)	3.4×10^{29} (Mw9.0)

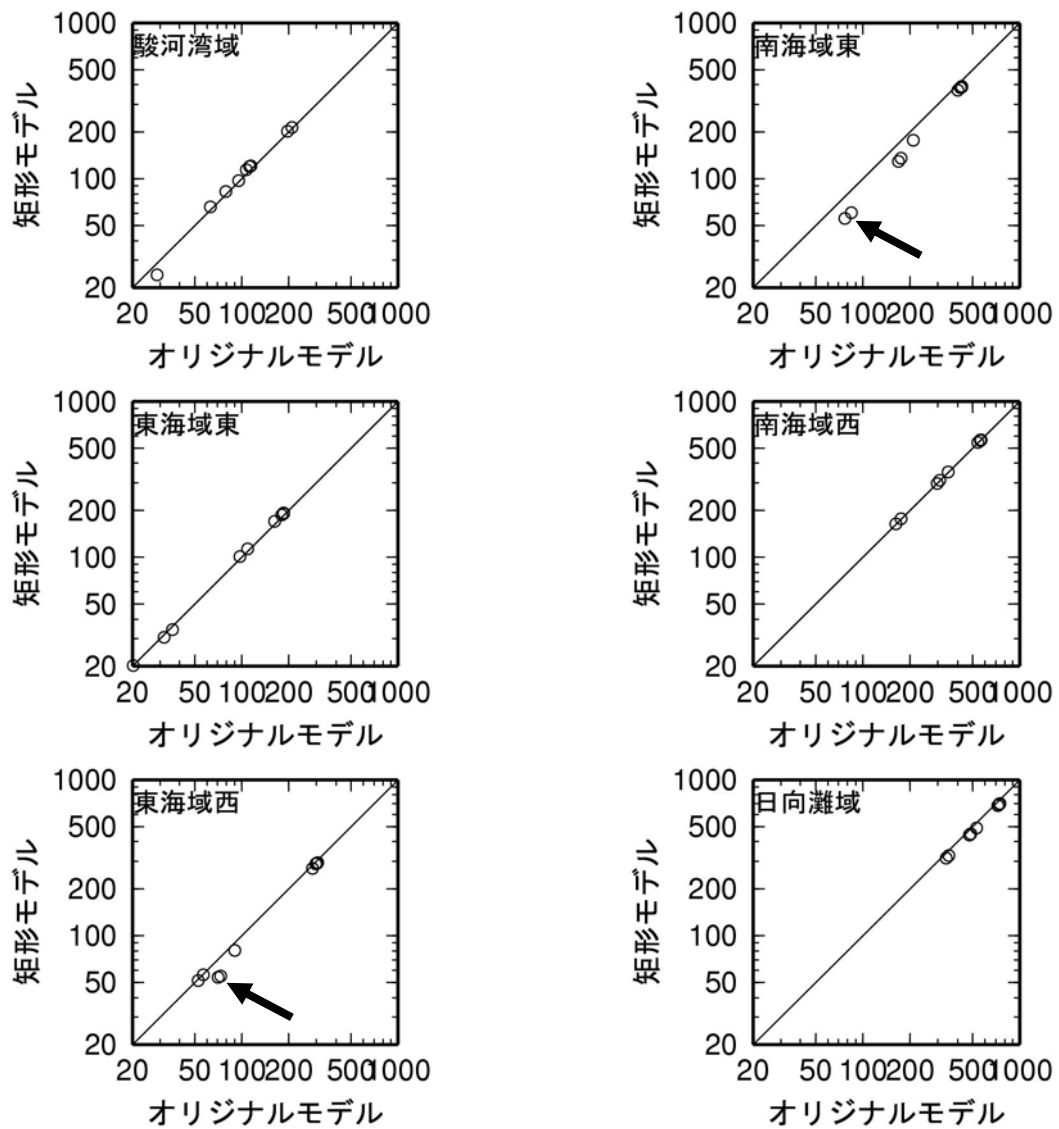
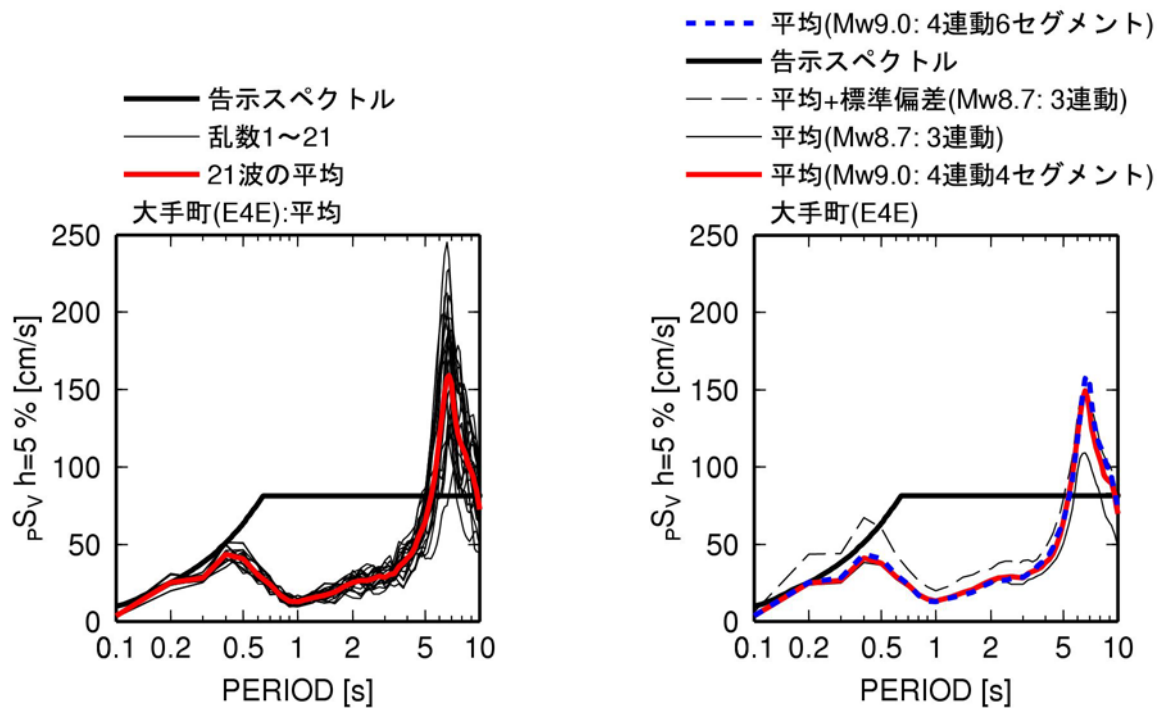
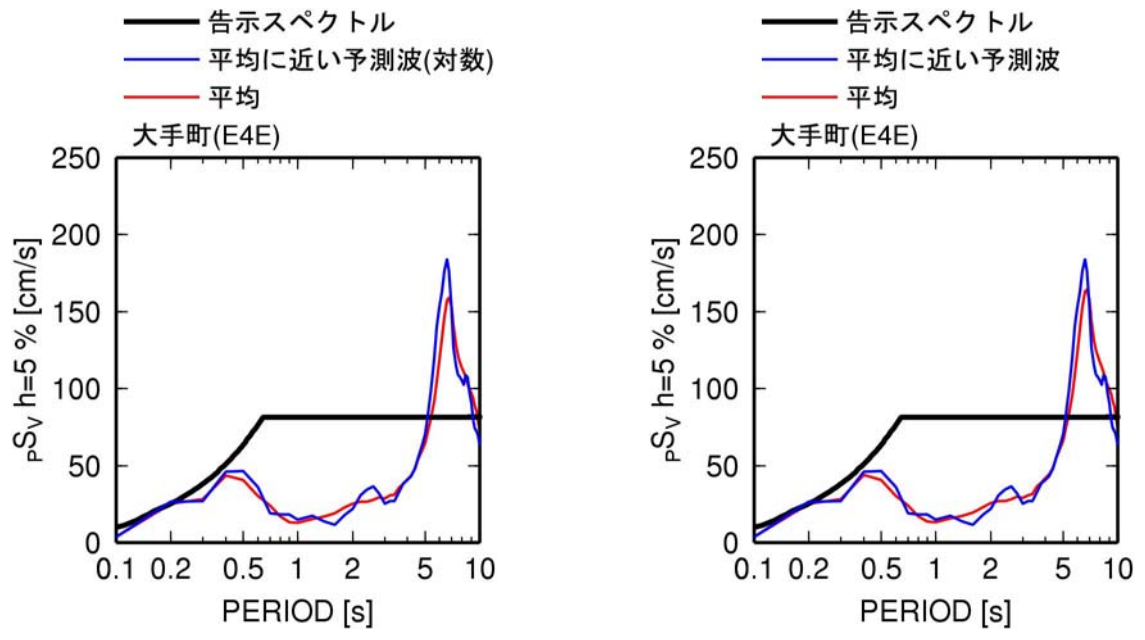


図 2.3-6 4連動6セグメントモデルを矩形化した場合としない場合(オリジナルモデル)の9観測点での断層最短距離の比較(矢印は大阪平野の2観測点)



(a) 21波とその平均(4連動6セグメントモデル)

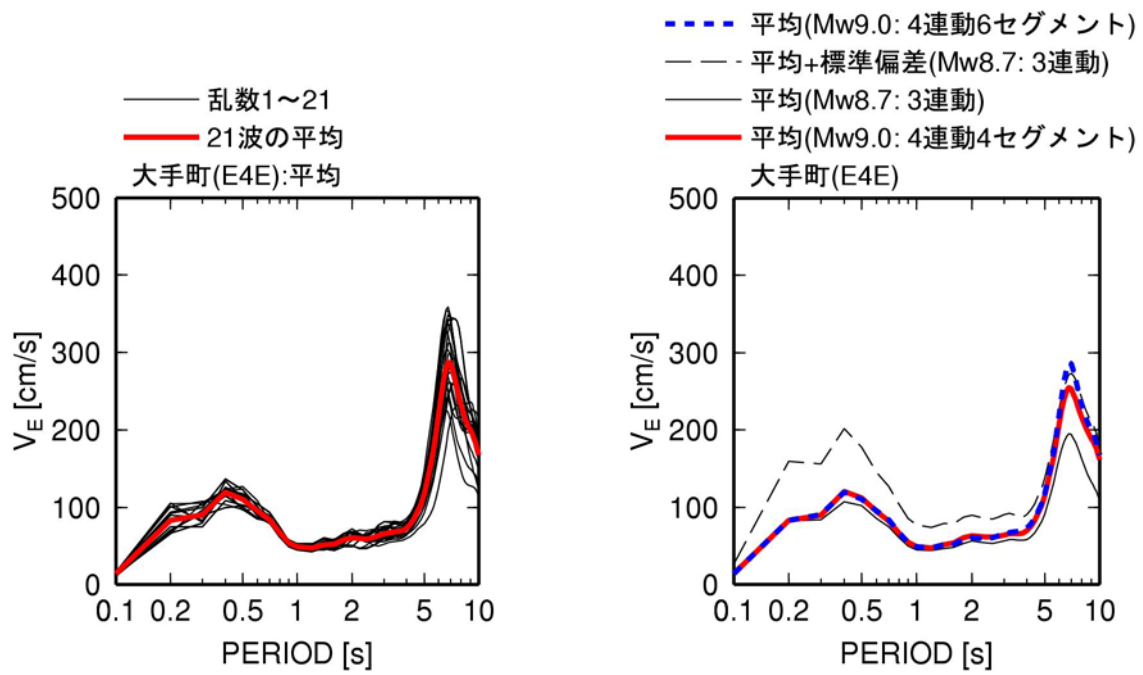
(b) 異なる震源モデルの比較



(c) 21波の平均に対数での残差が近い波

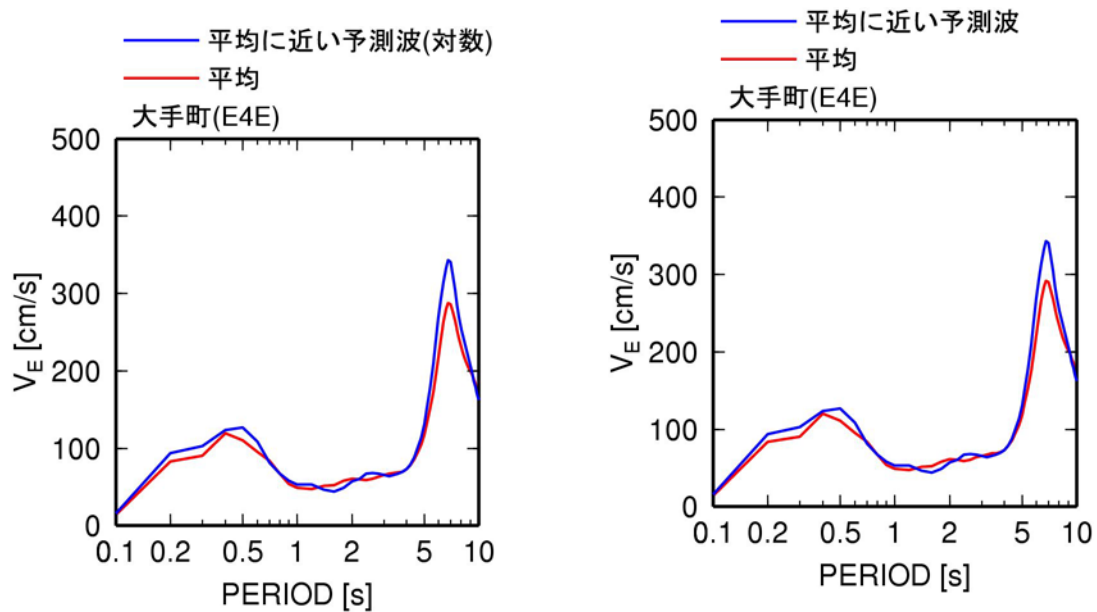
(d) 21波の平均に正規軸での残差が近い波

図 2.3-7 大手町(E4E)での4連動6セグメントモデル(Mw9.0)の平均波21波とその平均及び平均に近い波、及び3連動(Mw8.7)、4連動4セグメントモデル(Mw9.0)の擬似速度応答スペクトル(h=5%)



(a) 21波とその平均(4連動6セグメントモデル)

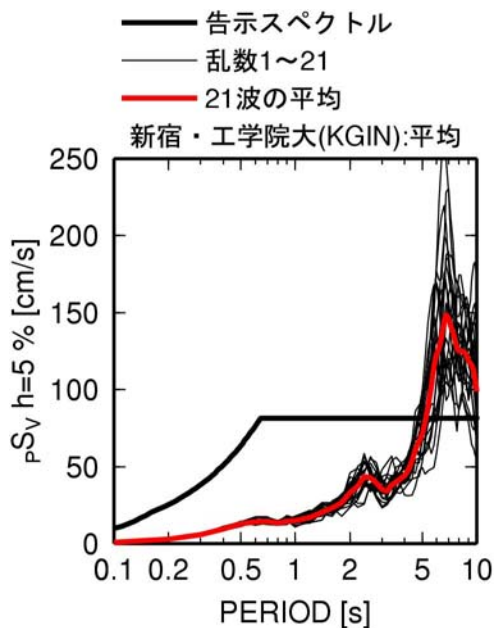
(b) 異なる震源モデルの比較



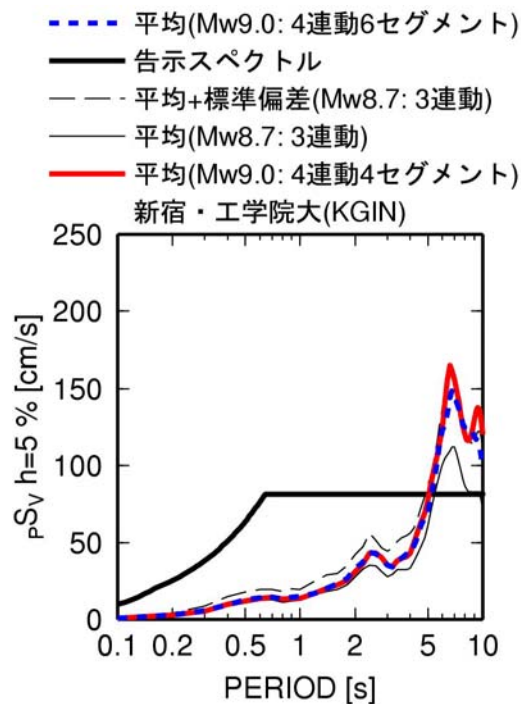
(c) 21波の平均に対数での残差が近い波

(d) 21波の平均に正規軸での残差が近い波

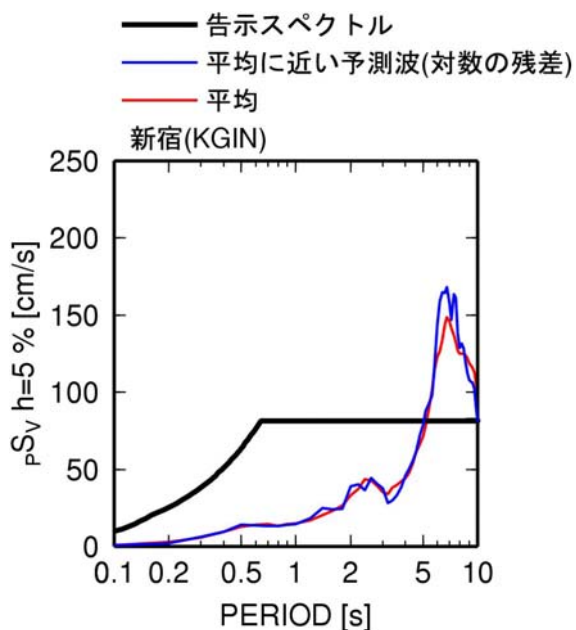
図 2.3-8 大手町(E4E)での4連動6セグメントモデル(Mw9.0)の平均波21波とその平均及び平均に近い波、及び3連動(Mw8.7)、4連動4セグメントモデル(Mw9.0)のエネルギースペクトル(h=10%)



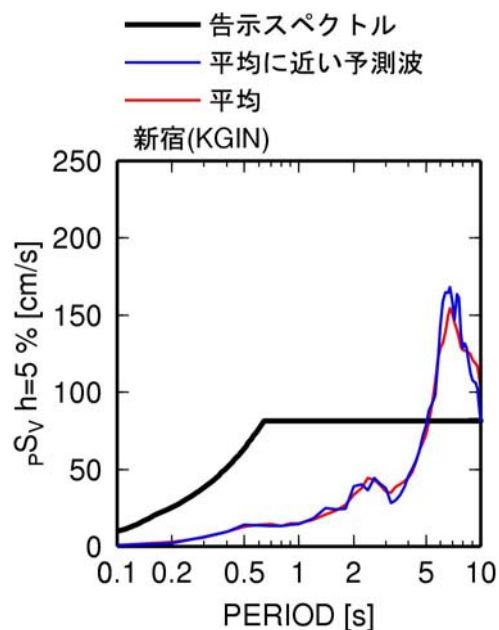
(a) 21波とその平均(4連動6セグメントモデル)



(b) 異なる震源モデルの比較

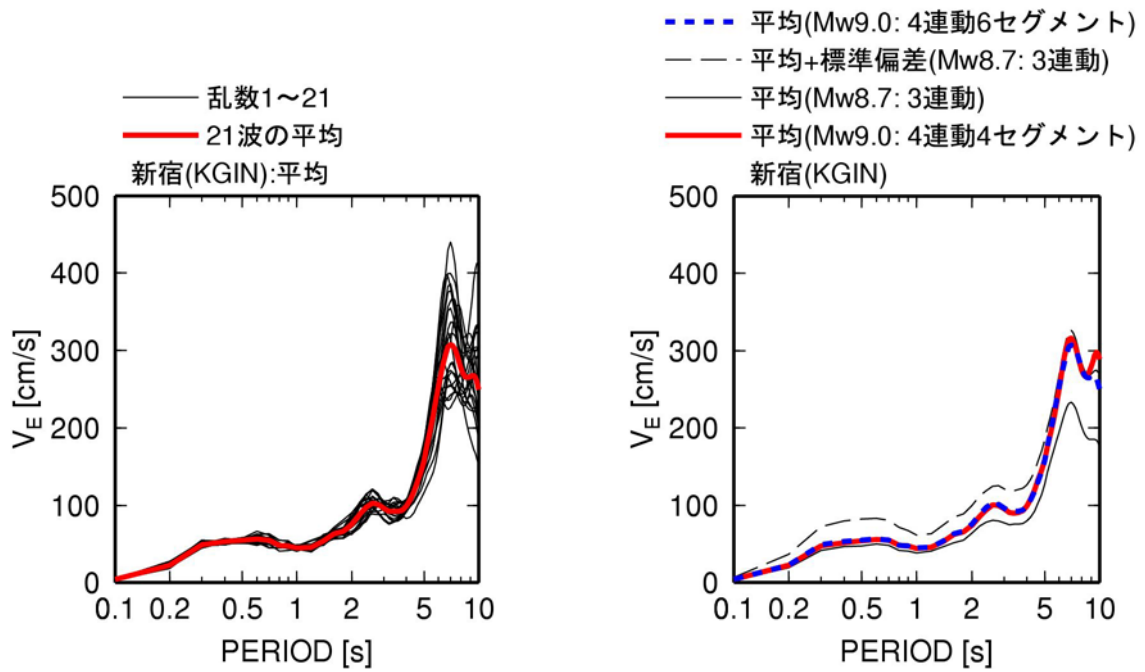


(c) 21波の平均に対数での残差が近い波



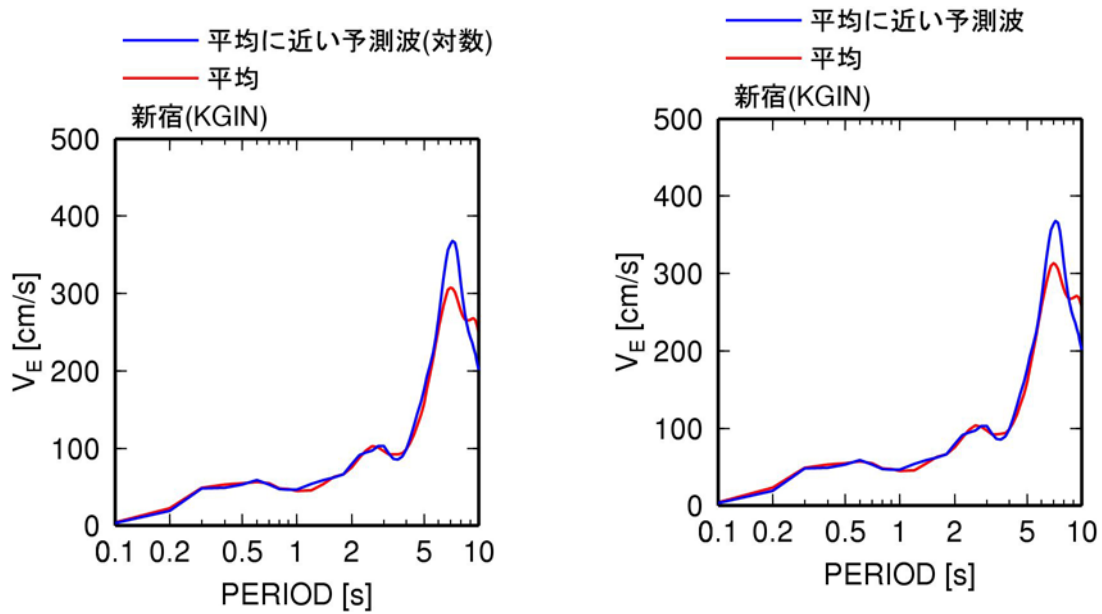
(d) 21波の平均に正規軸での残差が近い波

図 2.3-9 新宿・工学院大(KGIN)での4連動6セグメントモデル(Mw9.0)の平均波21波とその平均及び平均に近い波、及び3連動(Mw8.7)、4連動4セグメントモデル(Mw9.0)の擬似速度応答スペクトル(h=5%)



(a) 21波とその平均(4連動6セグメントモデル)

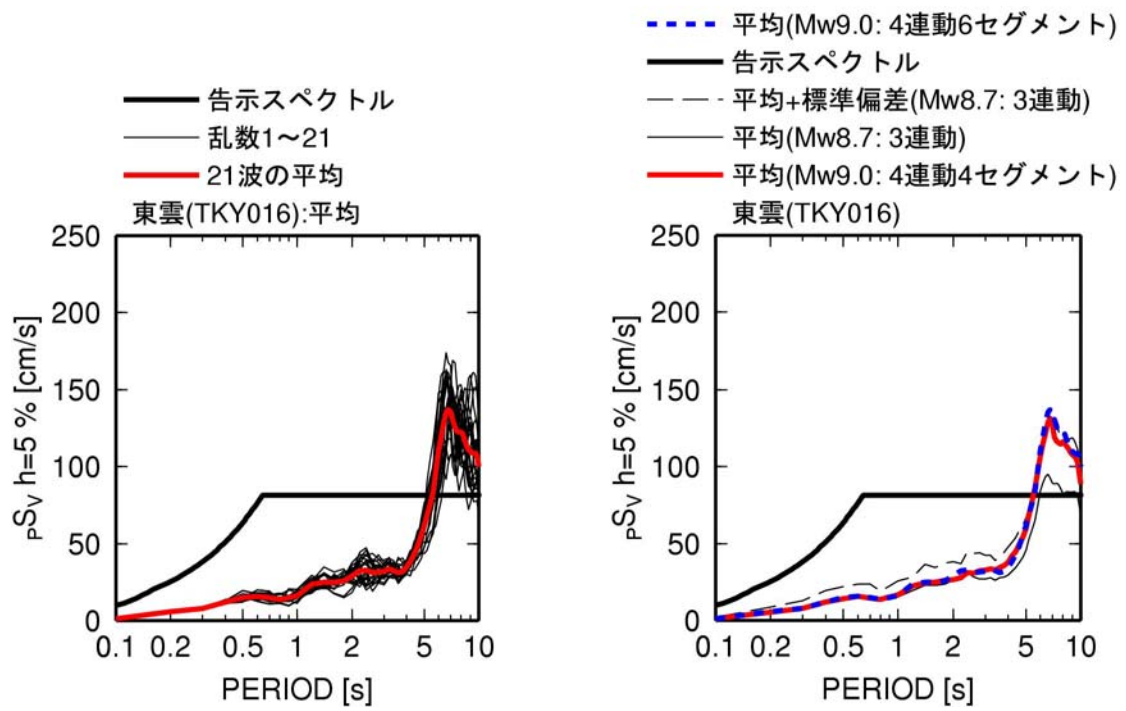
(b) 異なる震源モデルの比較



(c) 21波の平均に対数での残差が近い波

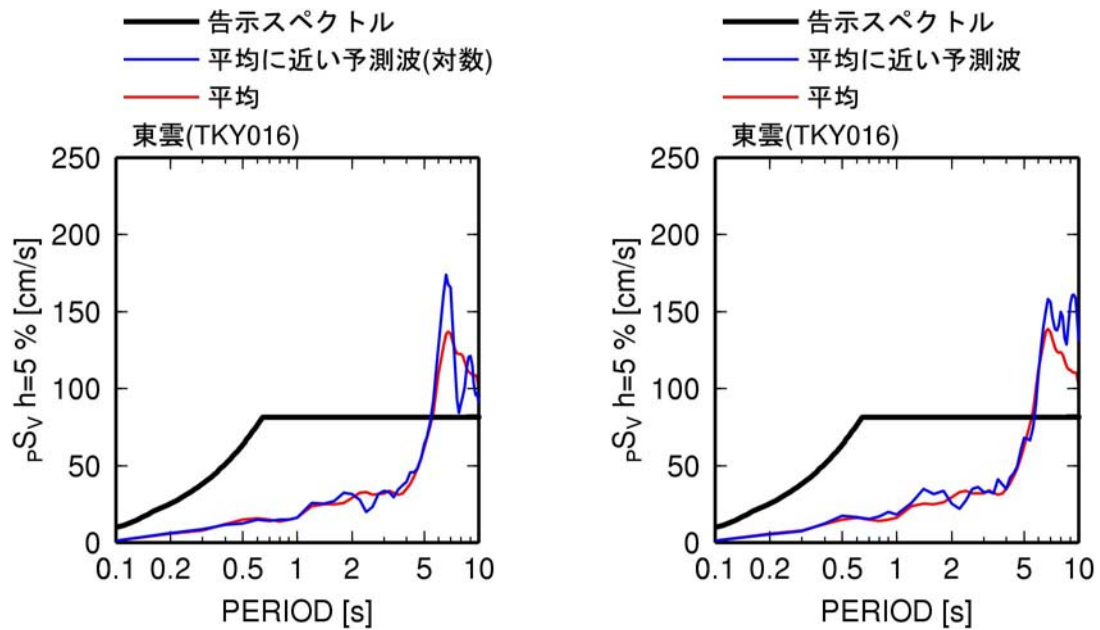
(d) 21波の平均に正規軸での残差が近い波

図 2.3-10 新宿・工学院大(KGIN)での4連動6セグメントモデル(Mw9.0)の平均波21波とその平均及び平均に近い波、及び3連動(Mw8.7)、4連動4セグメントモデル(Mw9.0)のエネルギースペクトル ($h=10\%$)



(a) 21波とその平均(4連動6セグメントモデル)

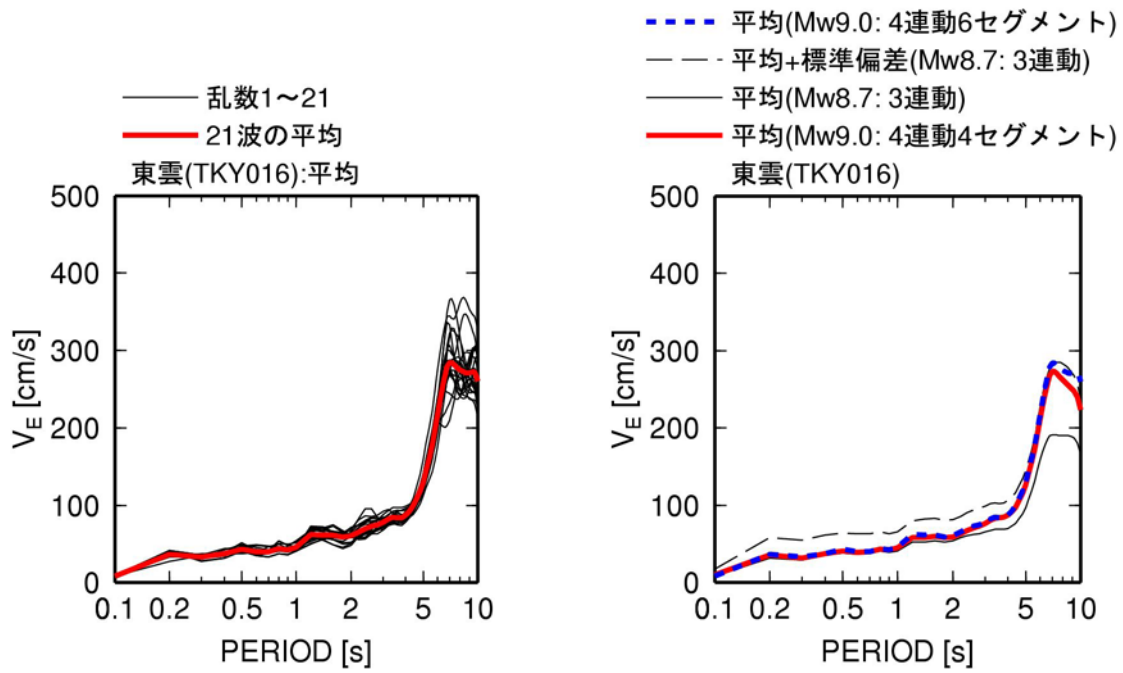
(b) 異なる震源モデルの比較



(c) 21波の平均に対数での残差が近い波

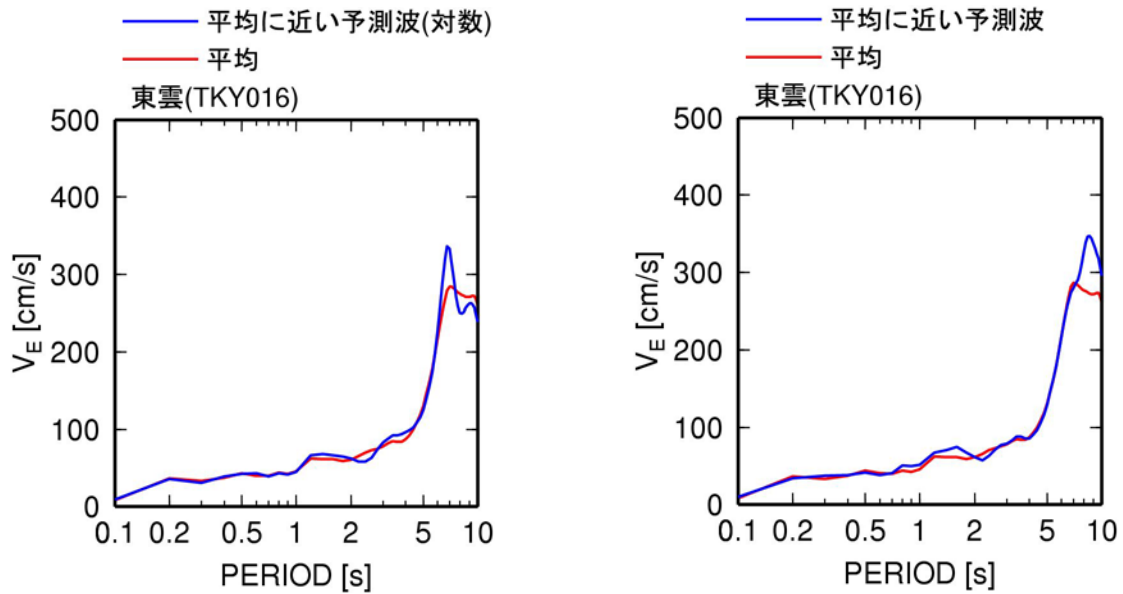
(d) 21波の平均に正規軸での残差が近い波

図 2.3-11 東雲(TKY016)での4連動6セグメントモデル(Mw9.0)の平均波21波とその平均及び平均に近い波、及び3連動(Mw8.7)、4連動4セグメントモデル(Mw9.0)の擬似速度応答スペクトル(h=5%)



(a) 21波とその平均(4連動6セグメントモデル)

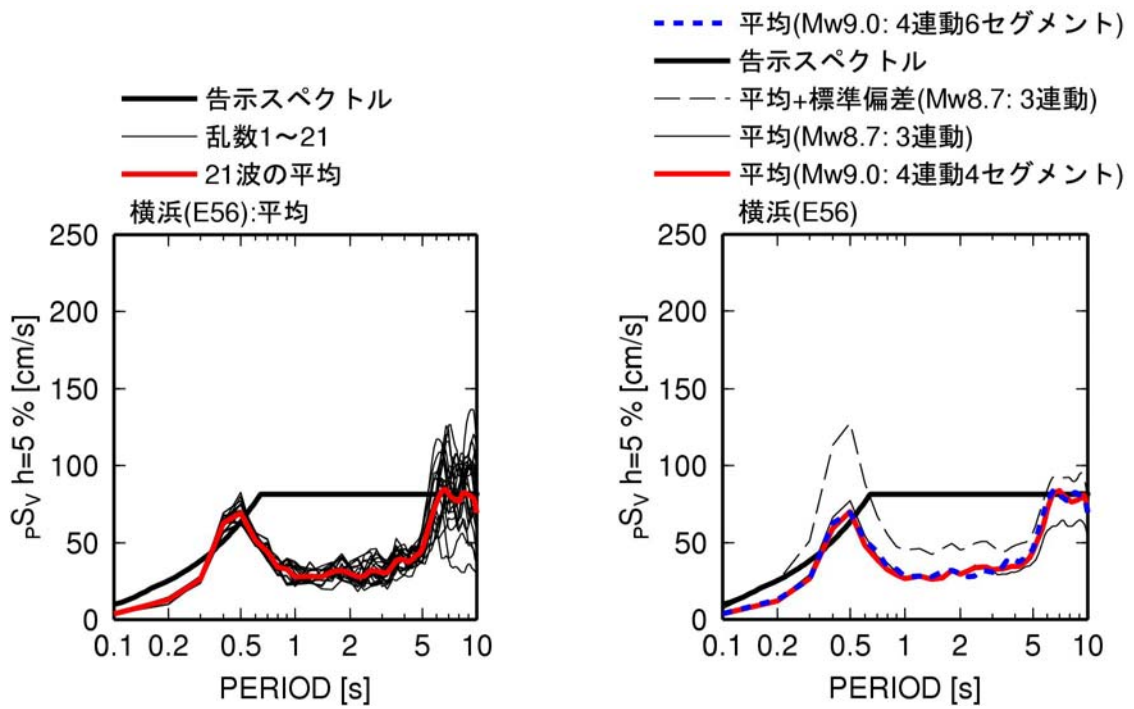
(b) 異なる震源モデルの比較



(c) 21波の平均に対数での残差が近い波

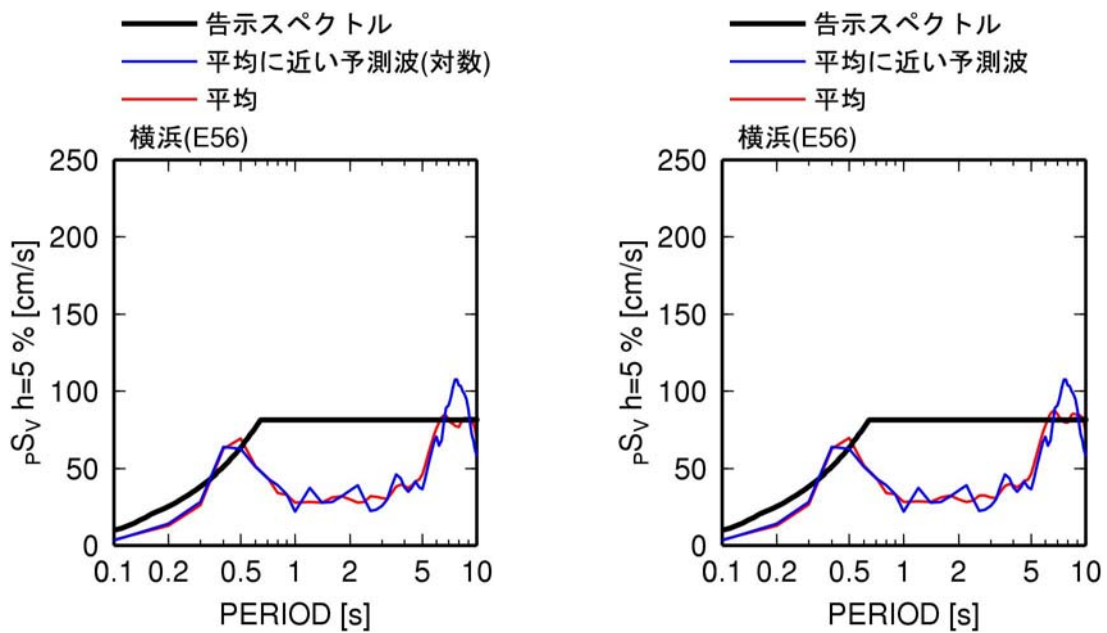
(d) 21波の平均に正規軸での残差が近い波

図 2.3-12 東雲(TKY016)での4連動6セグメントモデル(Mw9.0)の平均波21波とその平均及び平均に近い波、及び3連動(Mw8.7)、4連動4セグメントモデル(Mw9.0)のエネルギースペクトル(h=10%)



(a) 21波とその平均(4連動6セグメントモデル)

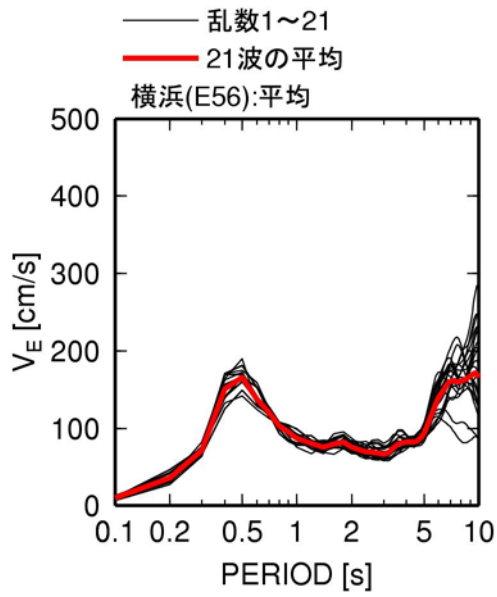
(b) 異なる震源モデルの比較



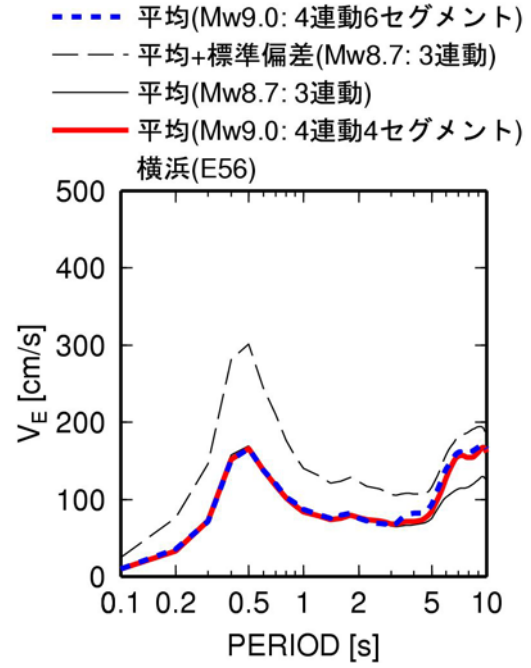
(c) 21波の平均に対数での残差が近い波

(d) 21波の平均に正規軸での残差が近い波

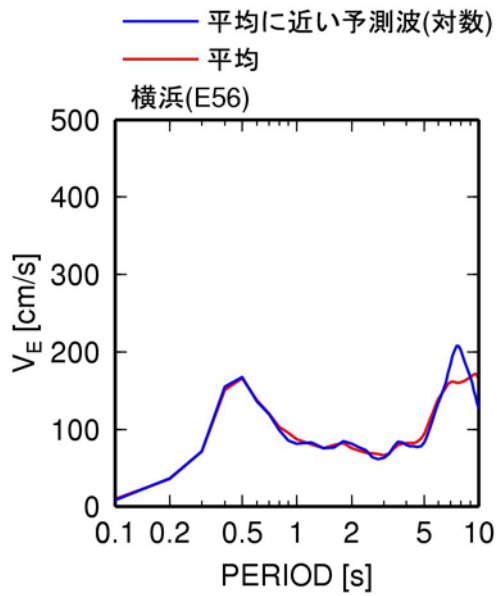
図 2.3-13 横浜 (E56) での 4 連動 6 セグメントモデル (Mw9.0) の平均波 21 波とその平均及び平均に近い波、及び 3 連動 (Mw8.7)、4 連動 4 セグメントモデル (Mw9.0) の擬似速度応答スペクトル ($h=5\%$)



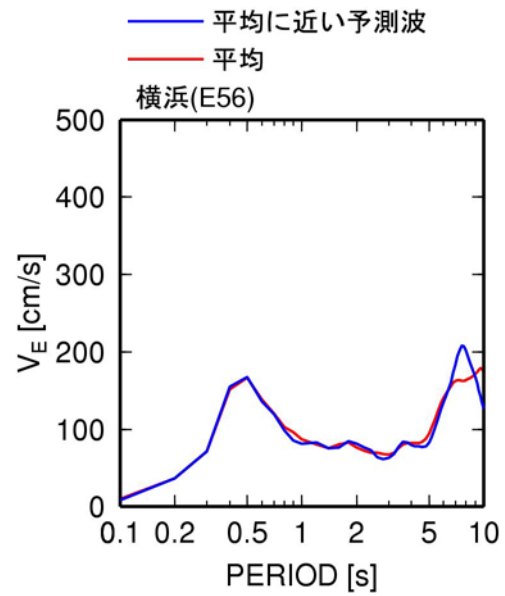
(a) 21波とその平均(4連動6セグメントモデル)



(b) 異なる震源モデルの比較

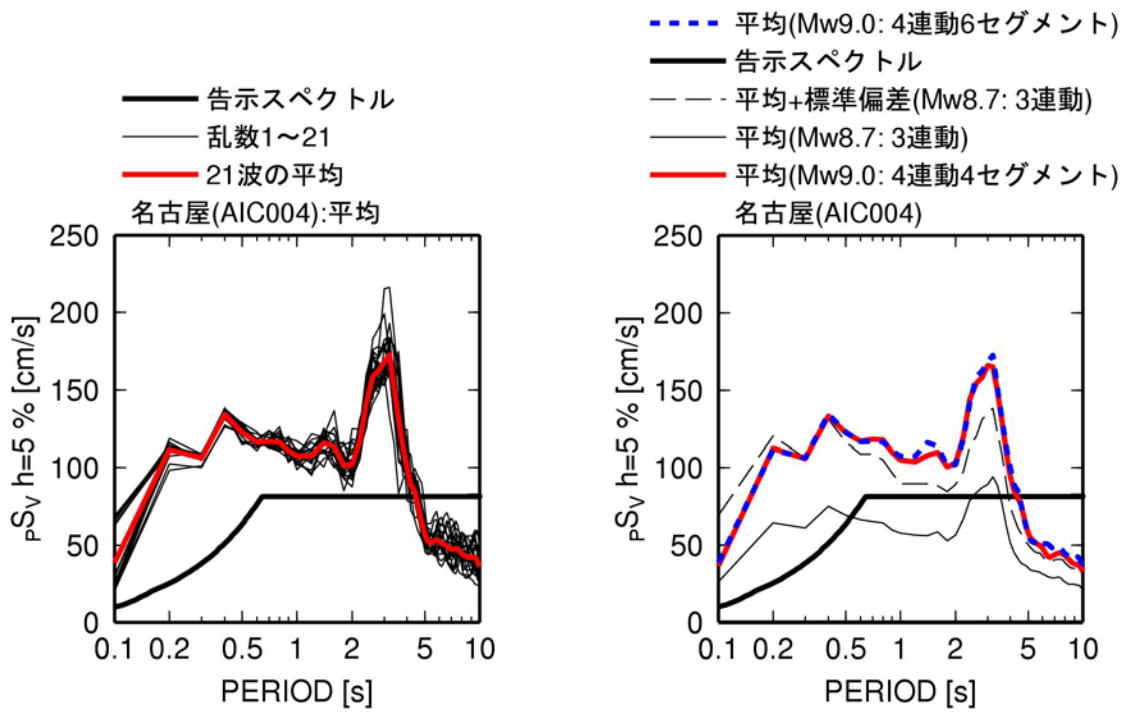


(c) 21波の平均に対数での残差が近い波



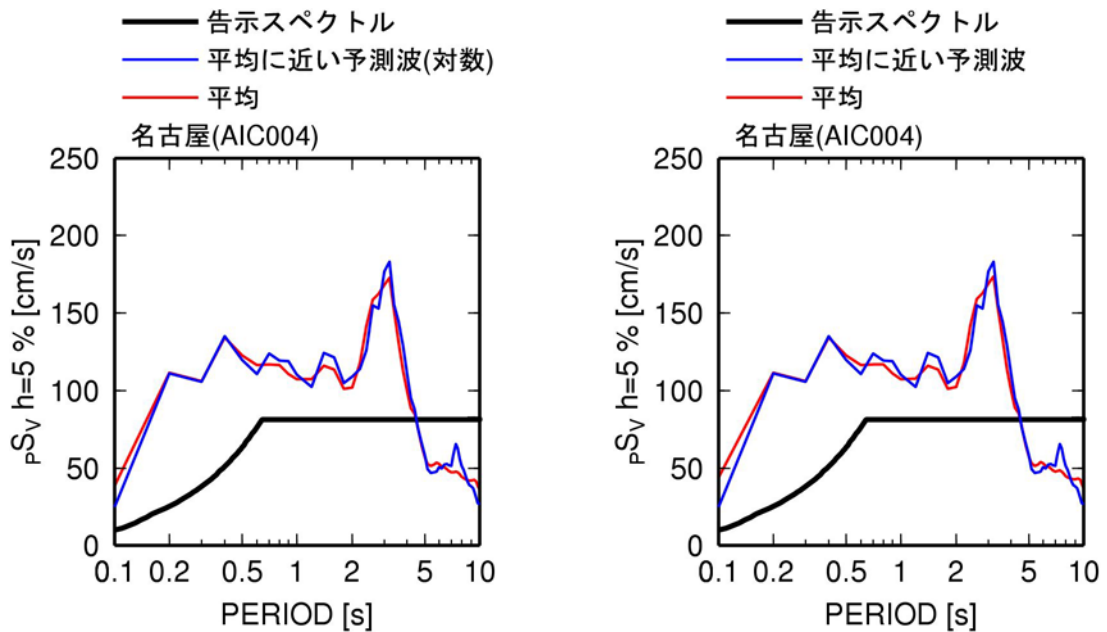
(d) 21波の平均に正規軸での残差が近い波

図 2.3-14 横浜 (E56) での 4 連動 6 セグメントモデル (Mw9.0) の平均波 21 波とその平均及び平均に近い波、及び 3 連動 (Mw8.7)、4 連動 4 セグメントモデル (Mw9.0) のエネルギースペクトル ($h=10\%$)



(a) 21波とその平均(4連動6セグメントモデル)

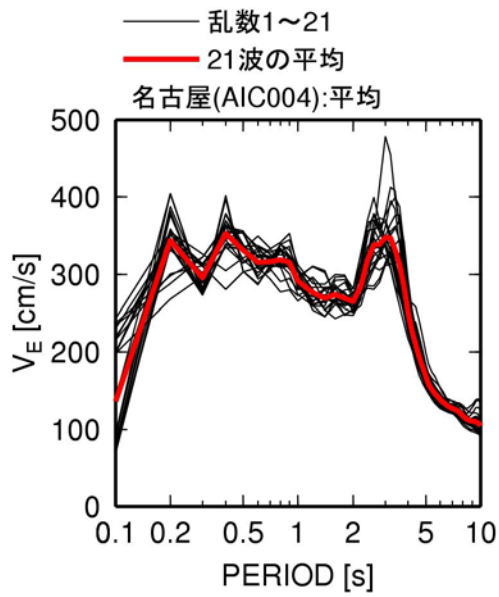
(b) 異なる震源モデルの比較



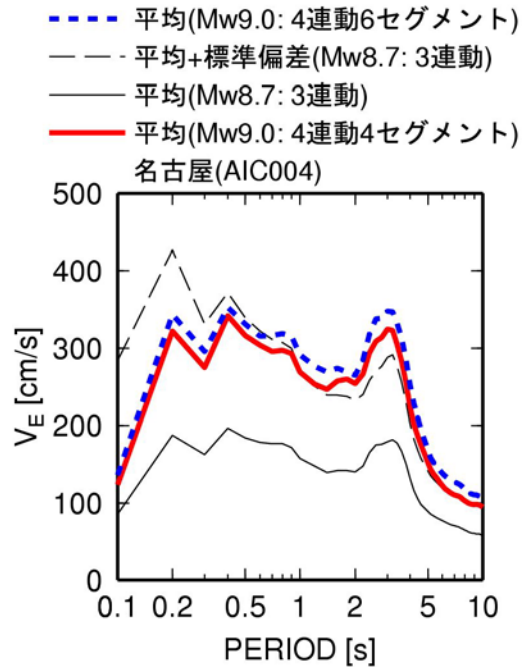
(c) 21波の平均に対数での残差が近い波

(d) 21波の平均に正規軸での残差が近い波

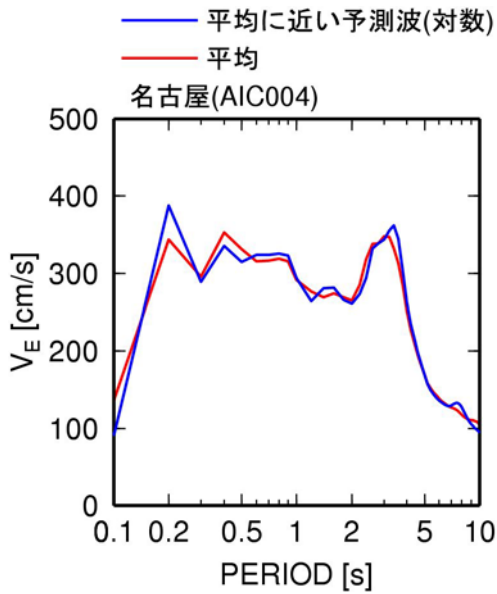
図 2.3-15 名古屋(AIC004)での4連動6セグメントモデル(Mw9.0)の平均波21波とその平均及び平均に近い波、及び3連動(Mw8.7)、4連動4セグメントモデル(Mw9.0)の擬似速度応答スペクトル(h=5%)



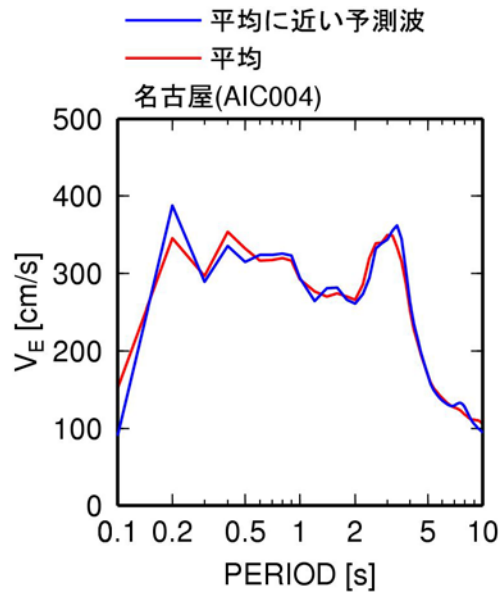
(a) 21波とその平均(4連動6セグメントモデル)



(b) 異なる震源モデルの比較

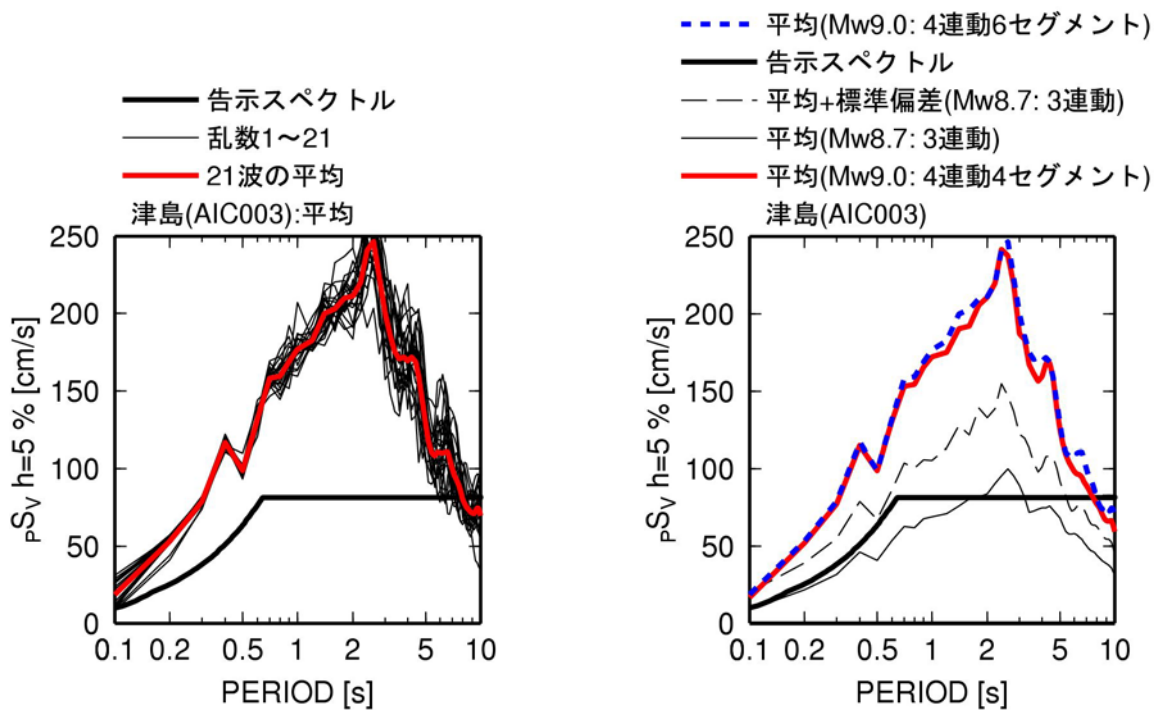


(c) 21波の平均に対数での残差が近い波



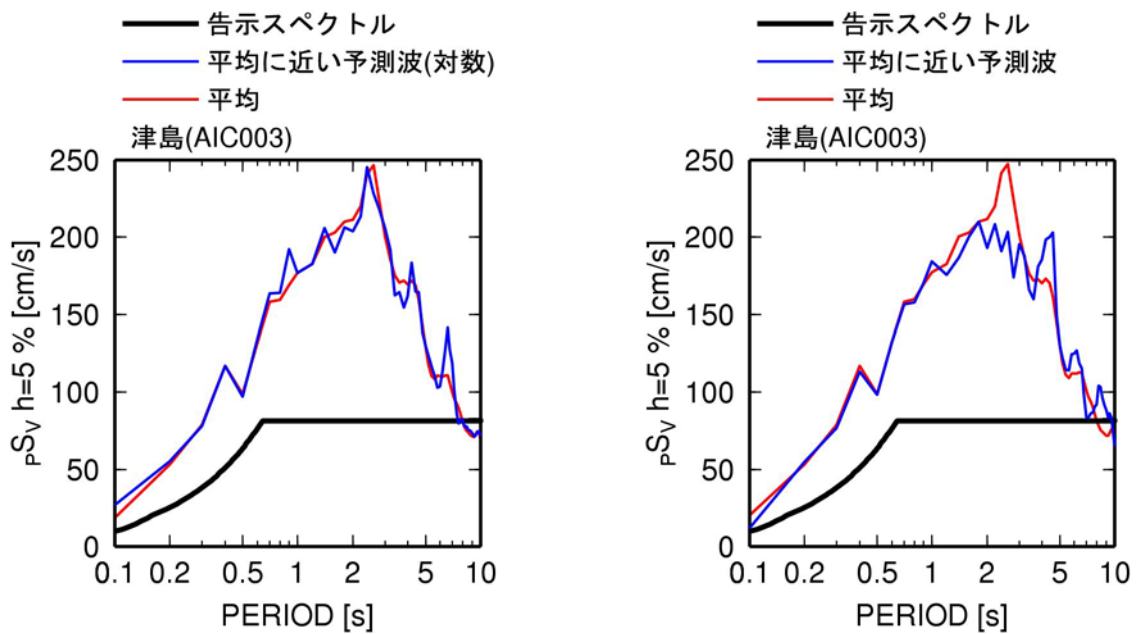
(d) 21波の平均に正規軸での残差が近い波

図 2.3-16 名古屋(AIC004)での4連動6セグメントモデル(Mw9.0)の平均波21波とその平均及び平均に近い波、及び3連動(Mw8.7)、4連動4セグメントモデル(Mw9.0)のエネルギースペクトル(h=10%)



(a) 21波とその平均(4連動6セグメントモデル)

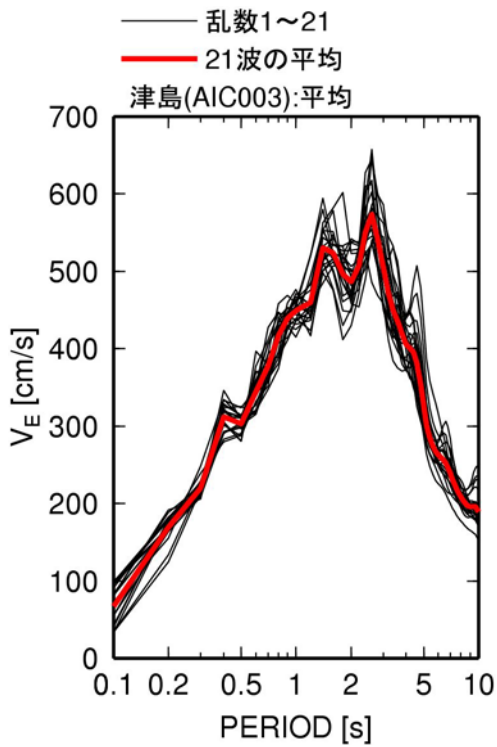
(b) 異なる震源モデルの比較



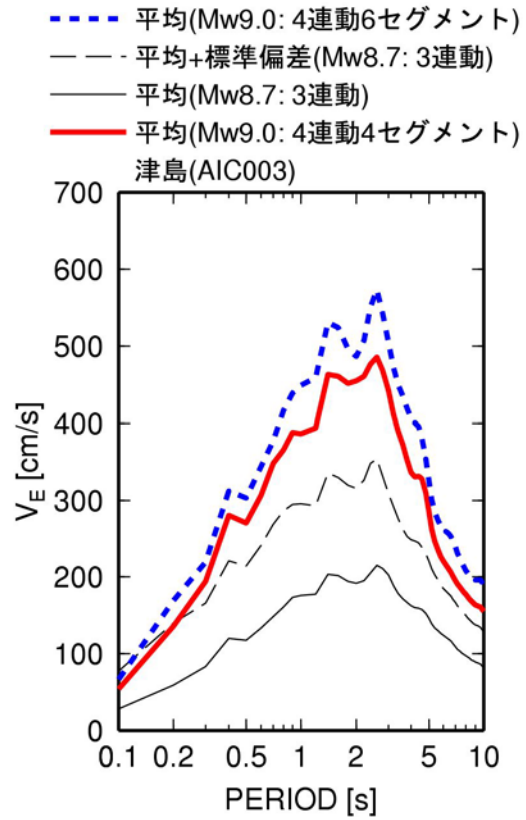
(c) 21波の平均に対数での残差が近い波

(d) 21波の平均に正規軸での残差が近い波

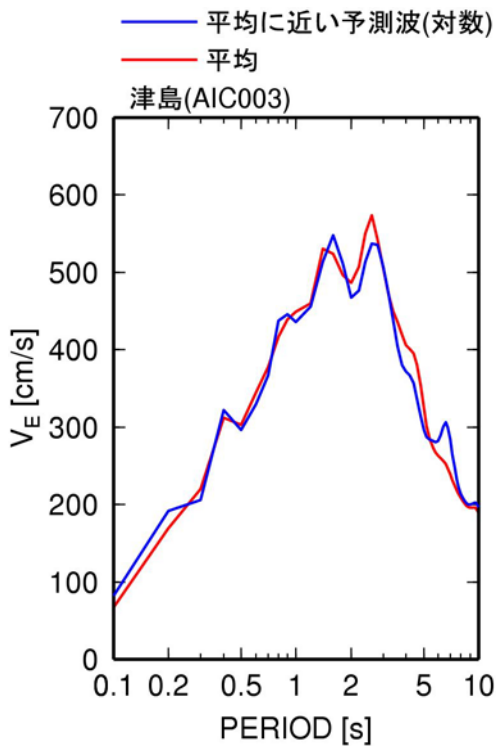
図 2.3-17 津島(AIC003)での4連動6セグメントモデル(Mw9.0)の平均波21波とその平均及び平均に近い波、及び3連動(Mw8.7)、4連動4セグメントモデル(Mw9.0)の擬似速度応答スペクトル(h=5%)



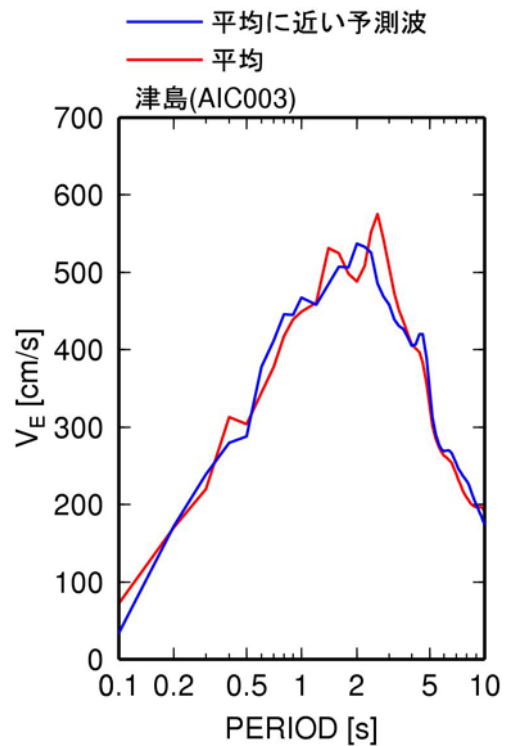
(a) 21波とその平均(4連動6セグメントモデル)



(b) 異なる震源モデルの比較

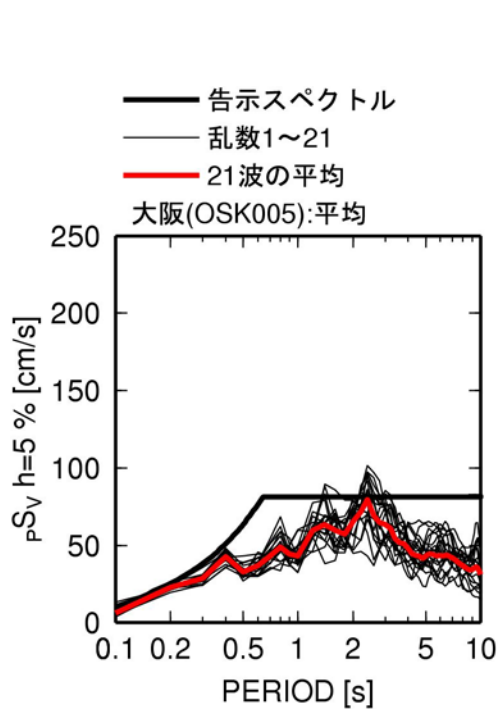


(c) 21波の平均に対数での残差が近い波

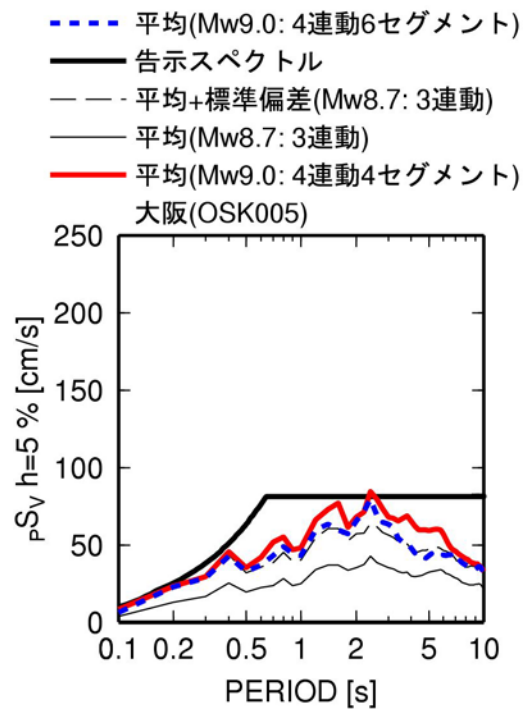


(d) 21波の平均に正規軸での残差が近い波

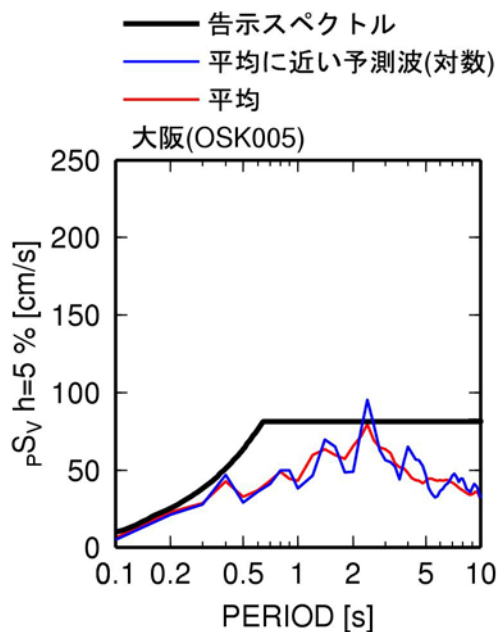
図 2.3-18 津島(AIC003)での4連動6セグメントモデル(Mw9.0)の平均波21波とその平均及び平均に近い波、及び3連動(Mw8.7)、4連動4セグメントモデル(Mw9.0)のエネルギースペクトル(h=10%)



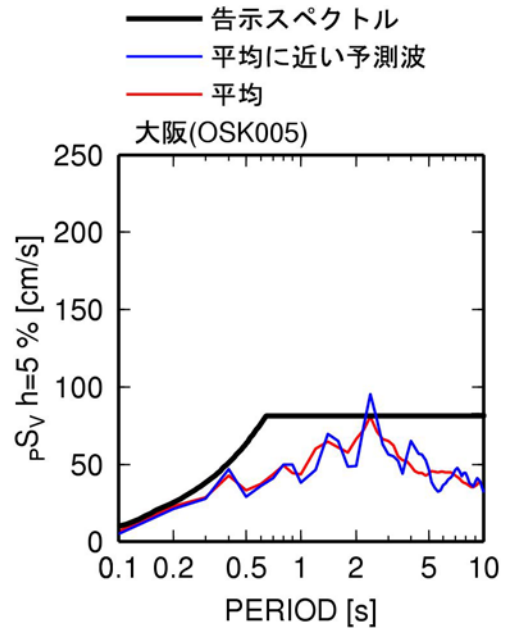
(a) 21波とその平均(4連動6セグメントモデル)



(b) 異なる震源モデルの比較

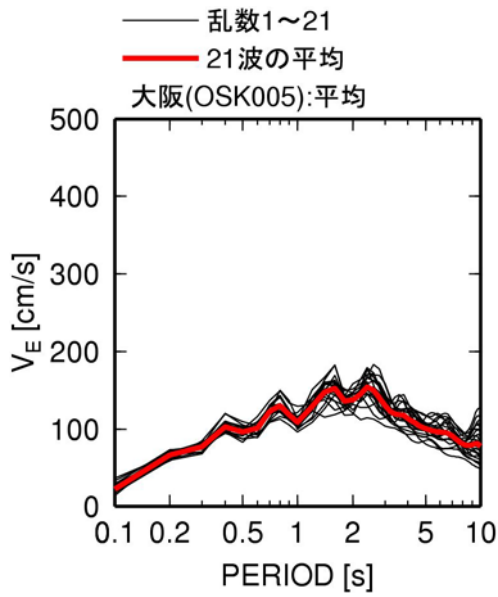


(c) 21波の平均に対数での残差が近い波

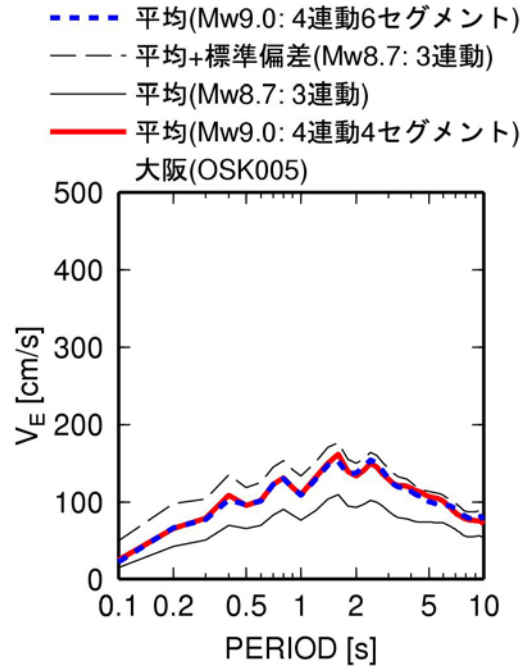


(d) 21波の平均に正規軸での残差が近い波

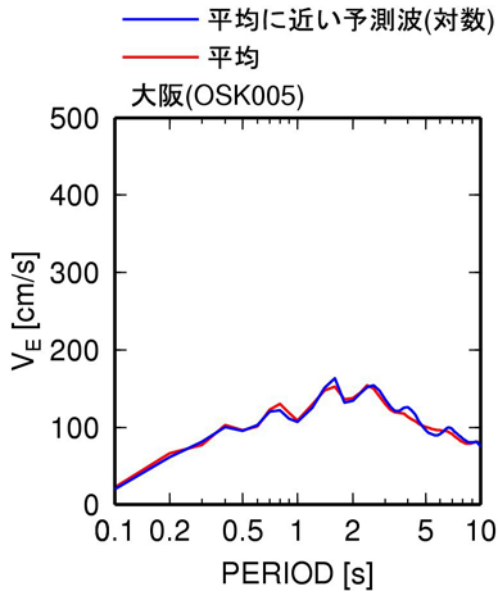
図 2.3-19 大阪 (OSK005) での 4 連動 6 セグメントモデル (Mw9.0) の平均波 21 波とその平均及び平均に近い波、及び 3 連動 (Mw8.7)、4 連動 4 セグメントモデル (Mw9.0) の擬似速度応答スペクトル (h=5%)



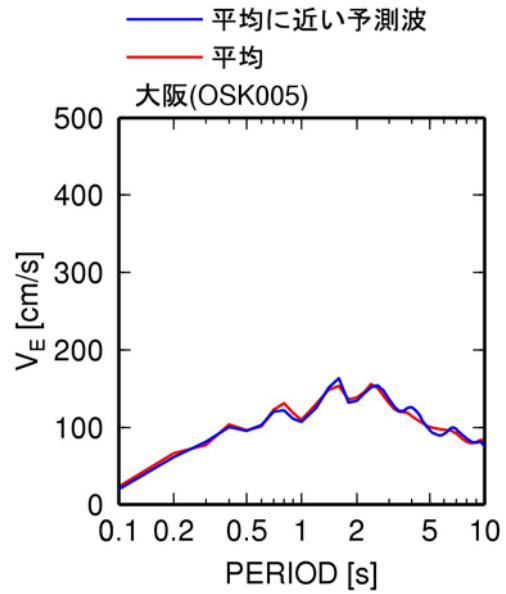
(a) 21波とその平均(4連動6セグメントモデル)



(b) 異なる震源モデルの比較

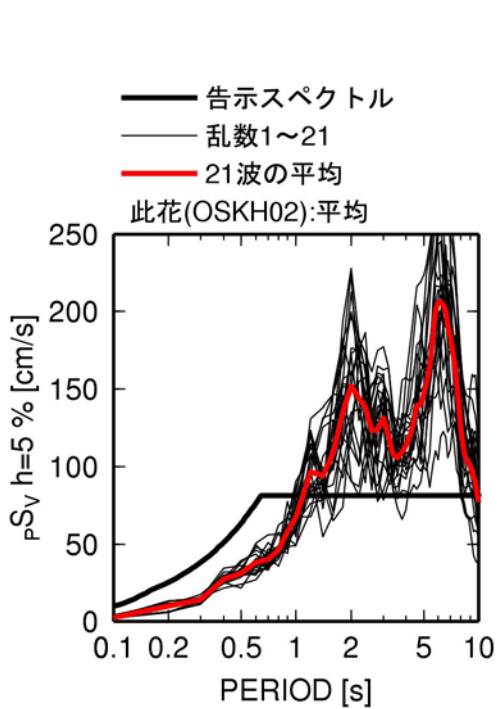


(c) 21波の平均に対数での残差が近い波

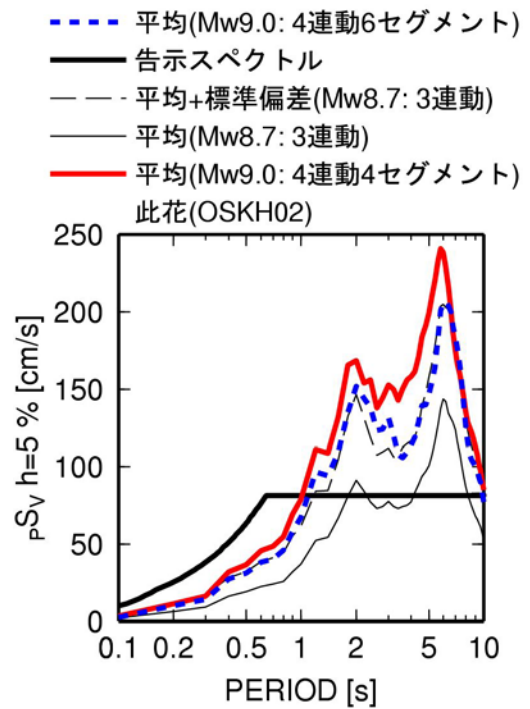


(d) 21波の平均に正規軸での残差が近い波

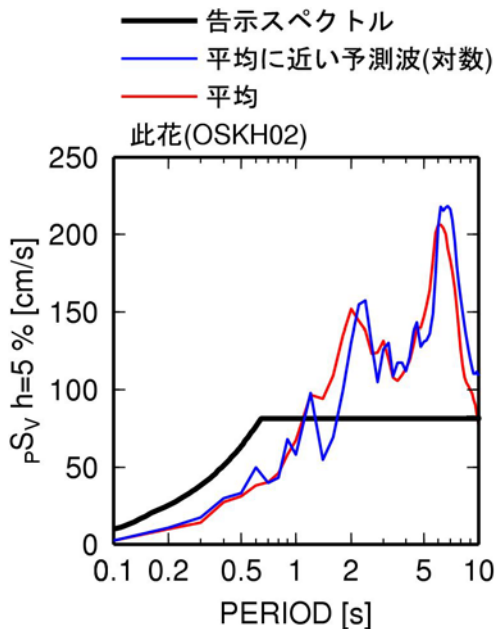
図 2.3-20 大阪 (OSK005) での 4 連動 6 セグメントモデル (Mw9.0) の平均波 21 波とその平均及び平均に近い波、及び 3 連動 (Mw8.7)、4 連動 4 セグメントモデル (Mw9.0) のエネルギースペクトル (h=10%)



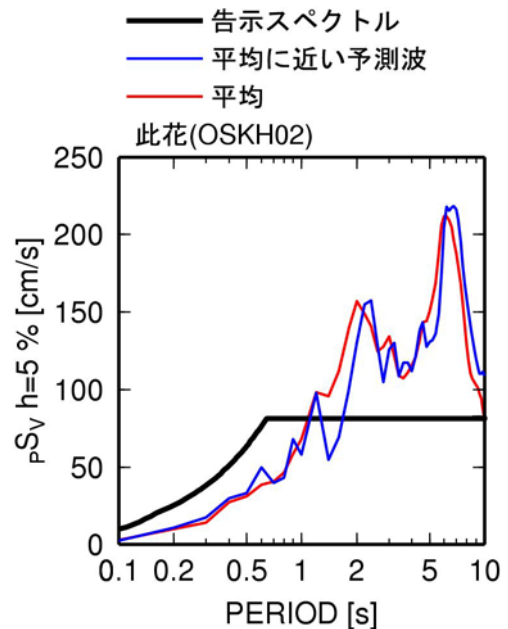
(a) 21波とその平均(4連動6セグメントモデル)



(b) 異なる震源モデルの比較

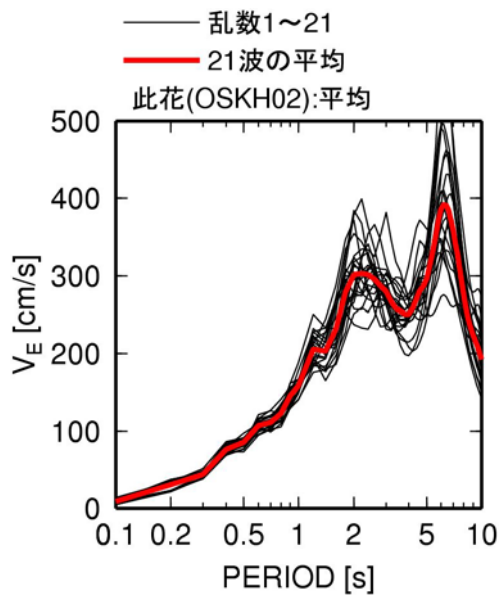


(c) 21波の平均に対数での残差が近い波

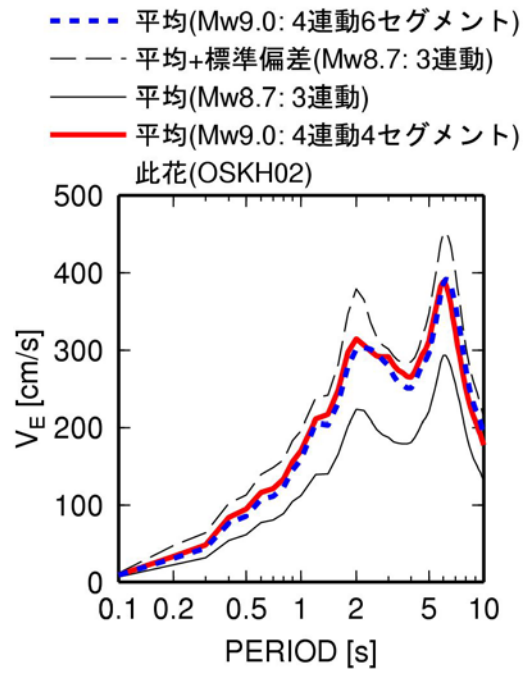


(d) 21波の平均に正規軸での残差が近い波

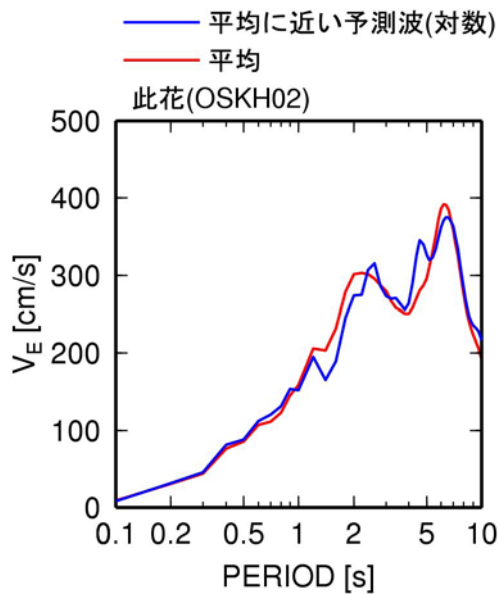
図 2.3-21 此花(OSKH02)での4連動6セグメントモデル(Mw9.0)の平均波21波とその平均及び平均に近い波、及び3連動(Mw8.7)、4連動4セグメントモデル(Mw9.0)の擬似速度応答スペクトル(h=5%)



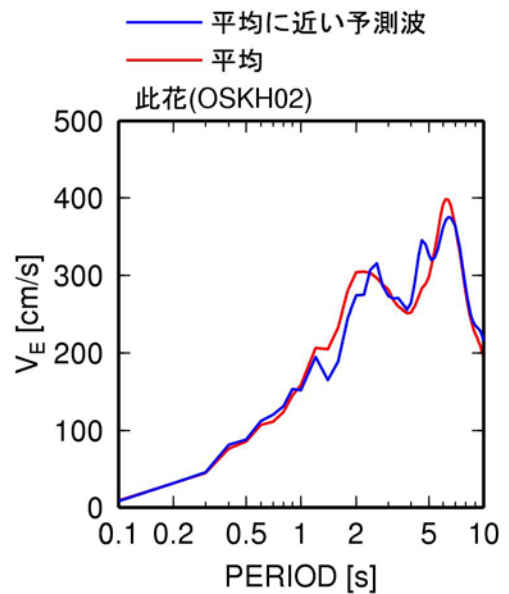
(a) 21波とその平均(4連動6セグメントモデル)



(b) 異なる震源モデルの比較

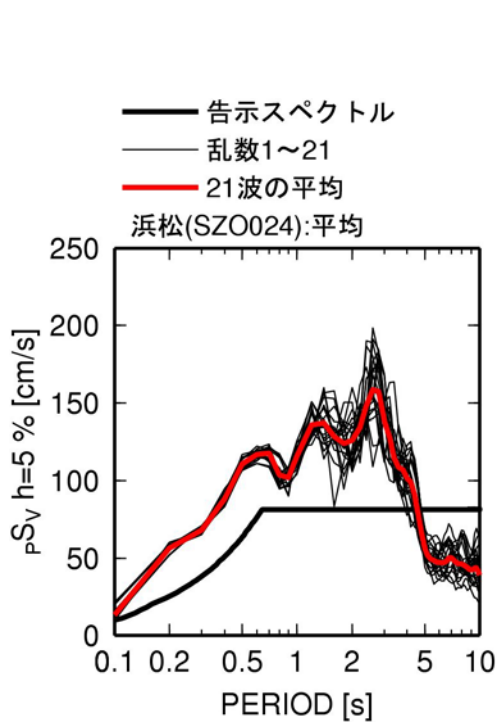


(c) 21波の平均に対数での残差が近い波

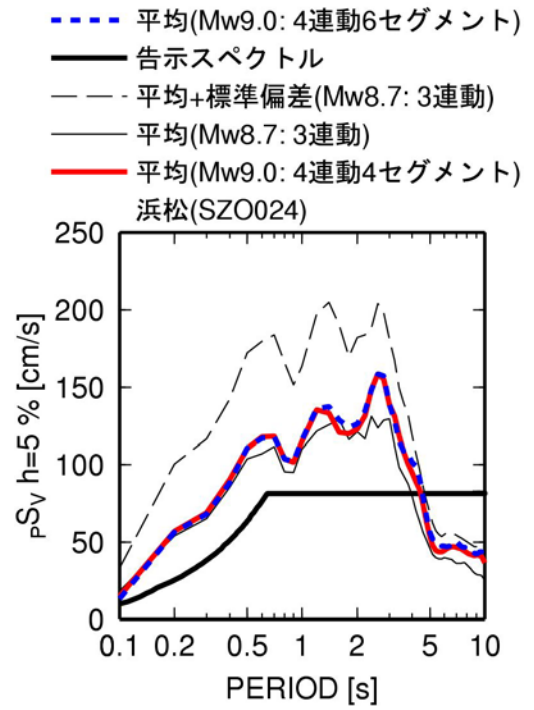


(d) 21波の平均に正規軸での残差が近い波

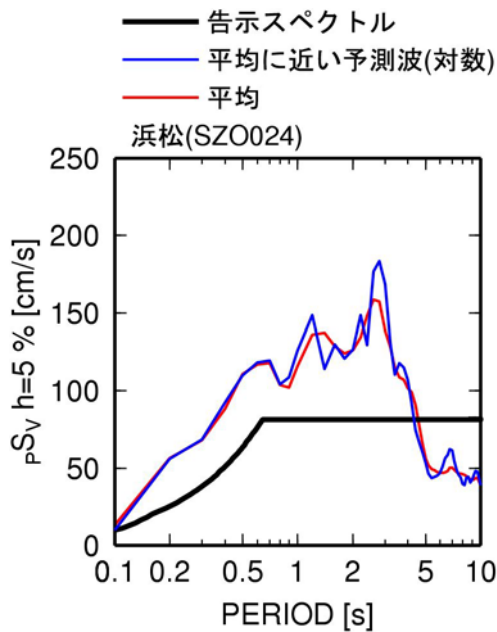
図 2.3-22 此花(OSKH02)での4連動6セグメントモデル(Mw9.0)の平均波21波とその平均及び平均に近い波、及び3連動(Mw8.7)、4連動4セグメントモデル(Mw9.0)のエネルギースペクトル(h=10%)



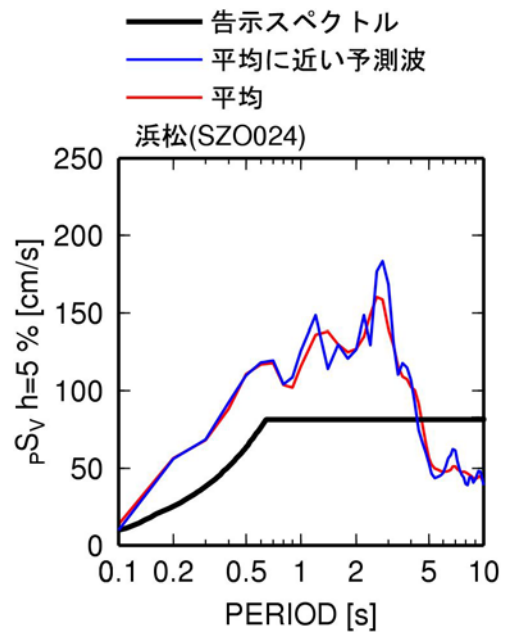
(a) 21波とその平均(4連動6セグメントモデル)



(b) 異なる震源モデルの比較

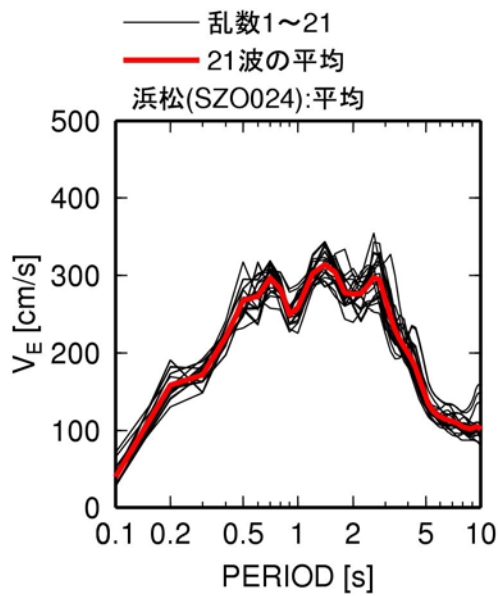


(c) 21波の平均に対数での残差が近い波

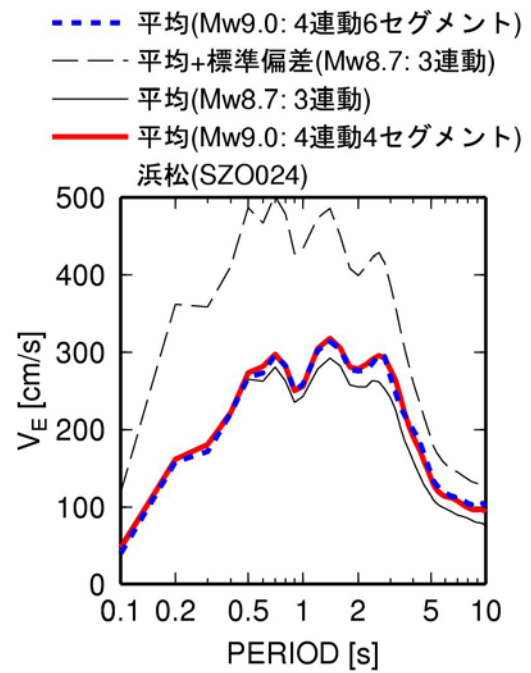


(d) 21波の平均に正規軸での残差が近い波

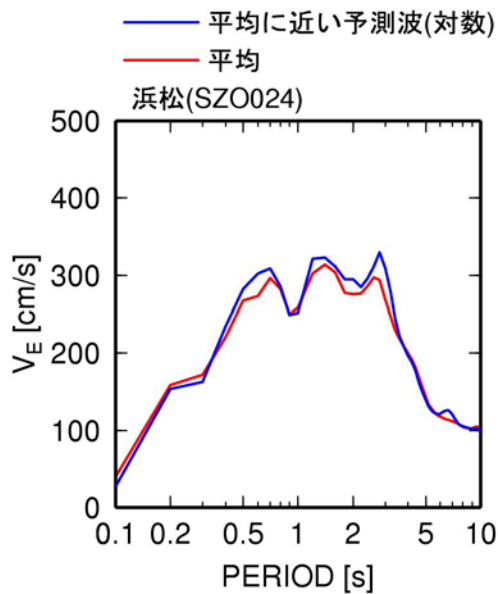
図 2.3-23 浜松(SZO024)での4連動6セグメントモデル(Mw9.0)の平均波21波とその平均及び平均に近い波、及び3連動(Mw8.7)、4連動4セグメントモデル(Mw9.0)の擬似速度応答スペクトル(h=5%)



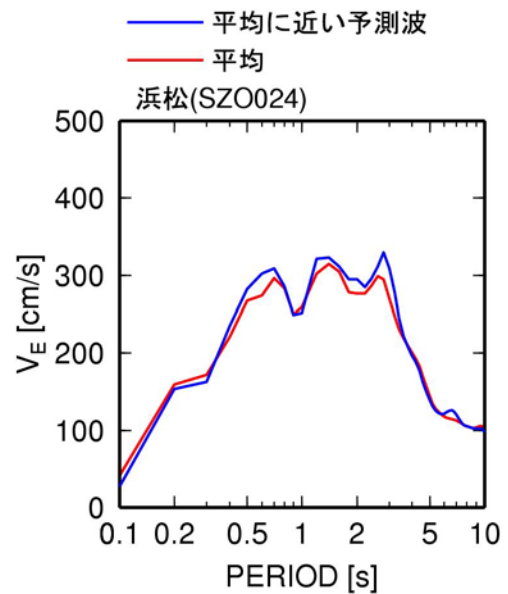
(a) 21波とその平均(4連動6セグメントモデル)



(b) 異なる震源モデルの比較



(c) 21波の平均に対数での残差が近い波



(d) 21波の平均に正規軸での残差が近い波

図 2.3-24 浜松 (SZO024) での 4 連動 6 セグメントモデル (Mw9.0) の平均波 21 波とその平均及び平均に近い波、及び 3 連動 (Mw8.7)、4 連動 4 セグメントモデル (Mw9.0) のエネルギースペクトル (h=10%)

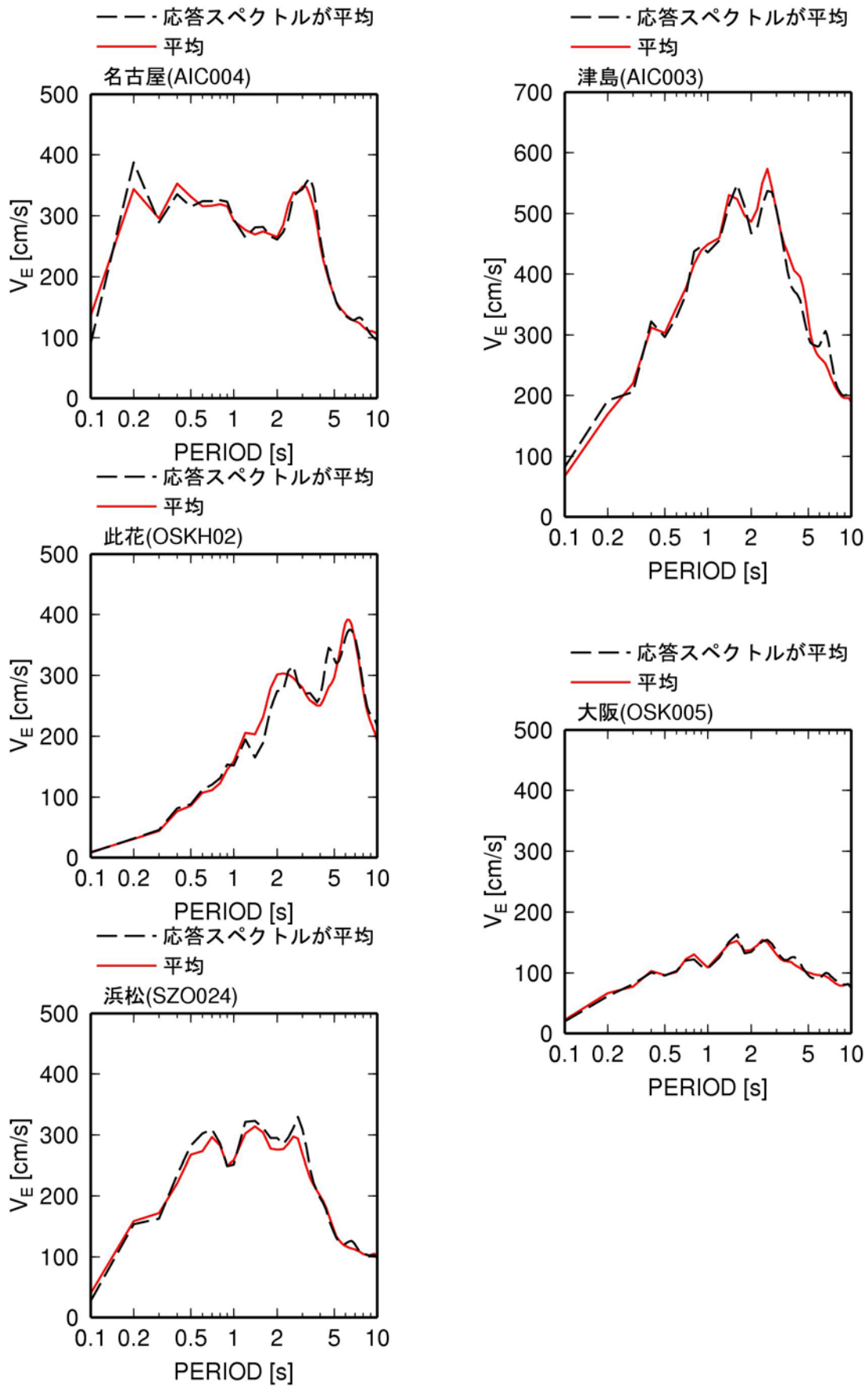


図 2.3-25 応答スペクトルの平均にフィッティングさせて作成した波形のエネルギースペクトル

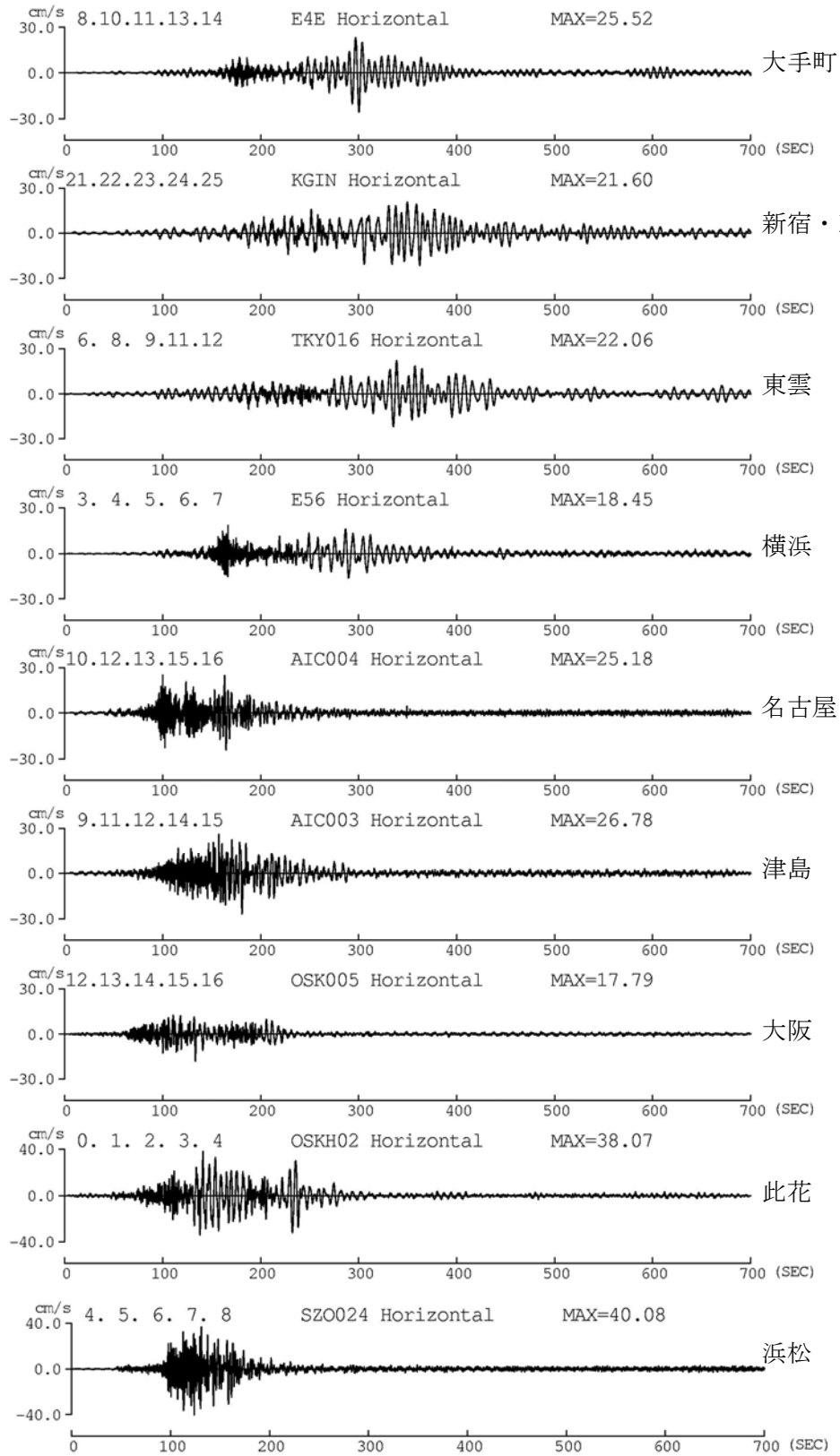


図 2.3-26 3連動(Mw8.7)の代表8観測点と浜松での平均波の速度波形

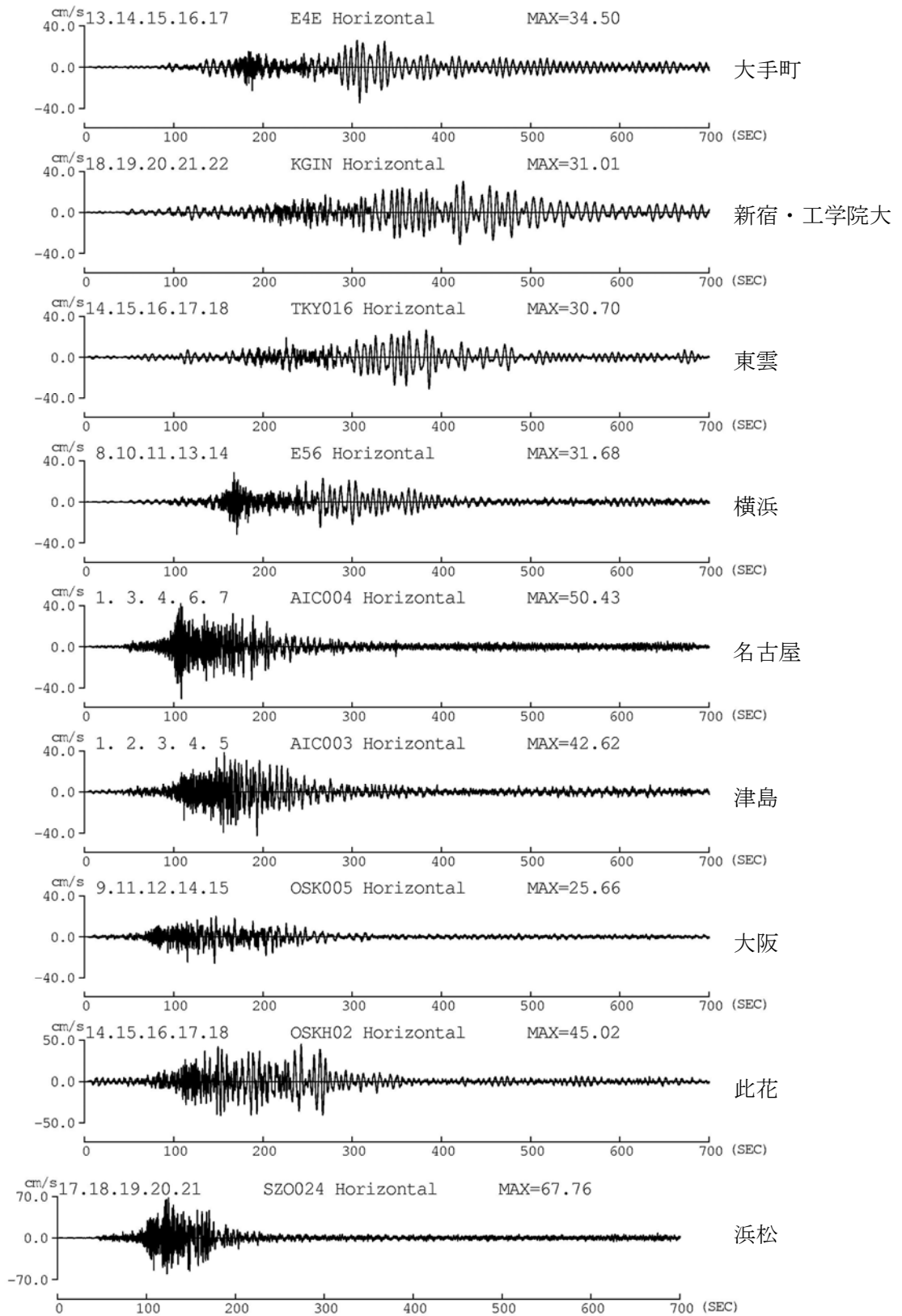


図 2.3-27 3連動(Mw8.7)の代表8観測点と浜松での平均+標準偏差波の速度波形

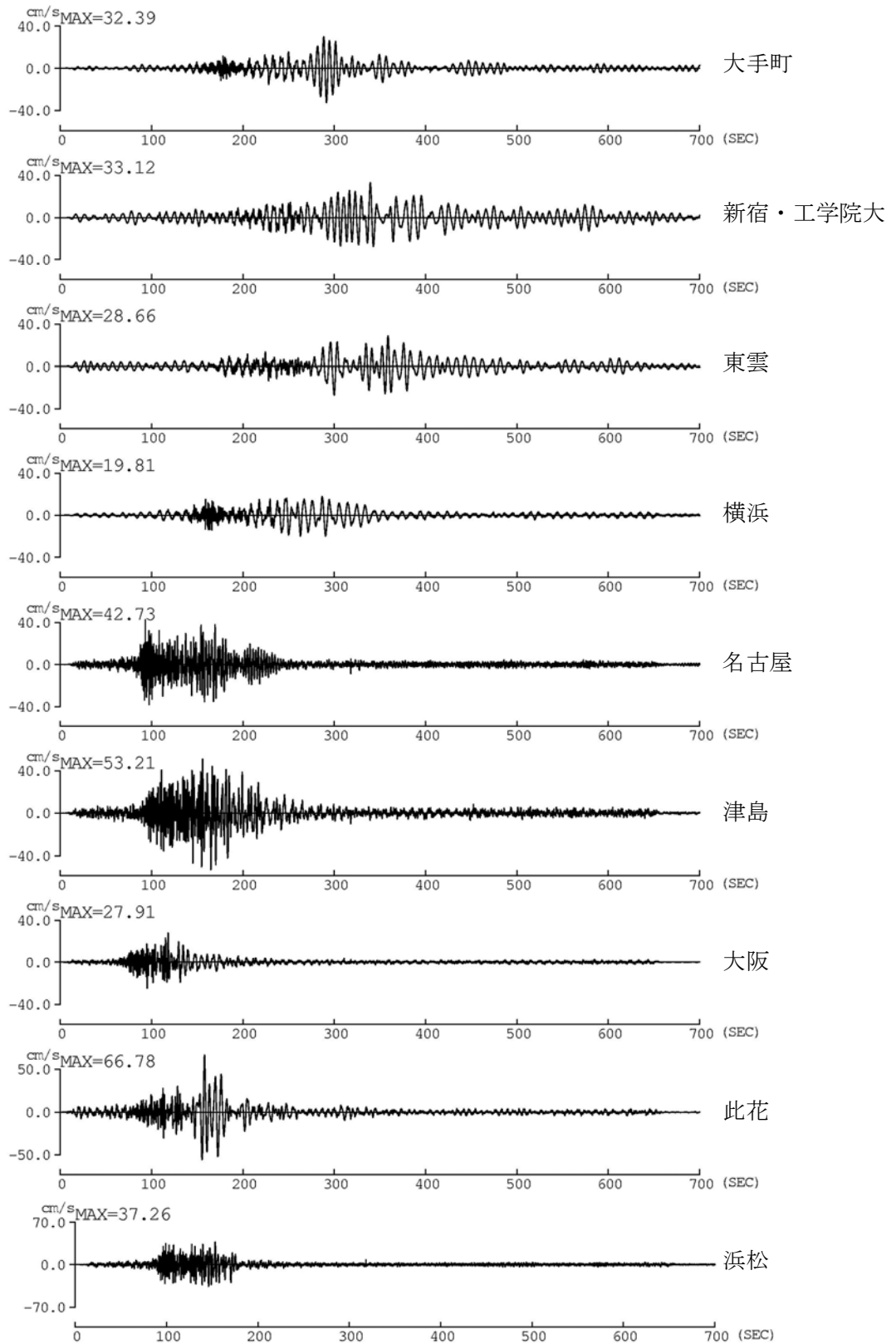


図 2.3-28 4 連動 4 セグメントモデル (Mw9.0) の代表 8 観測点と浜松での平均波の速度波形

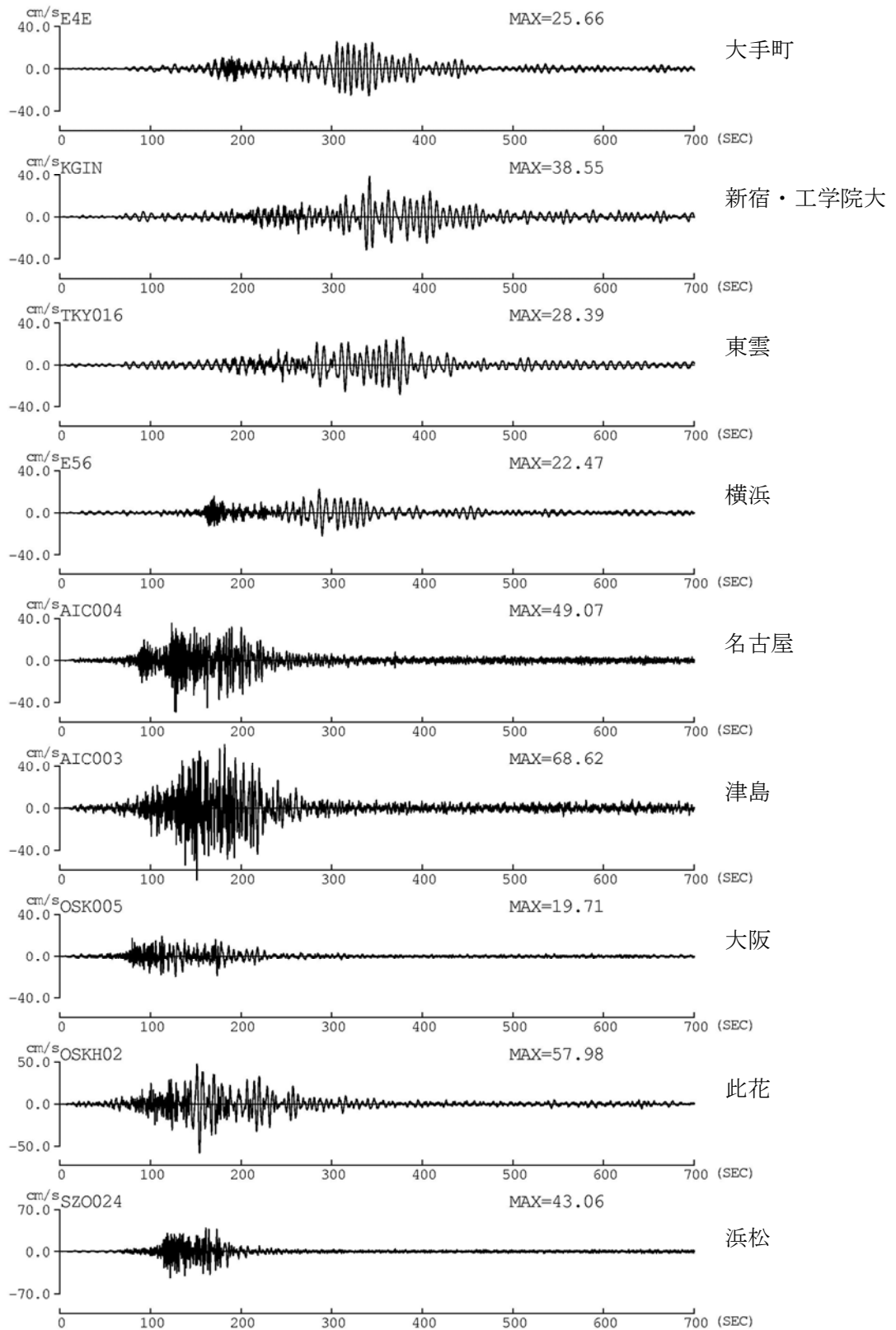


図 2.3-29 4 連動 6 セグメントモデル (Mw9.0) の代表 8 観測点と浜松での平均波の速度波形 ((21 波の応答スペクトルの平均値との対数残差が小さい波形を選択した場合: 平均的な波作成方法 b))

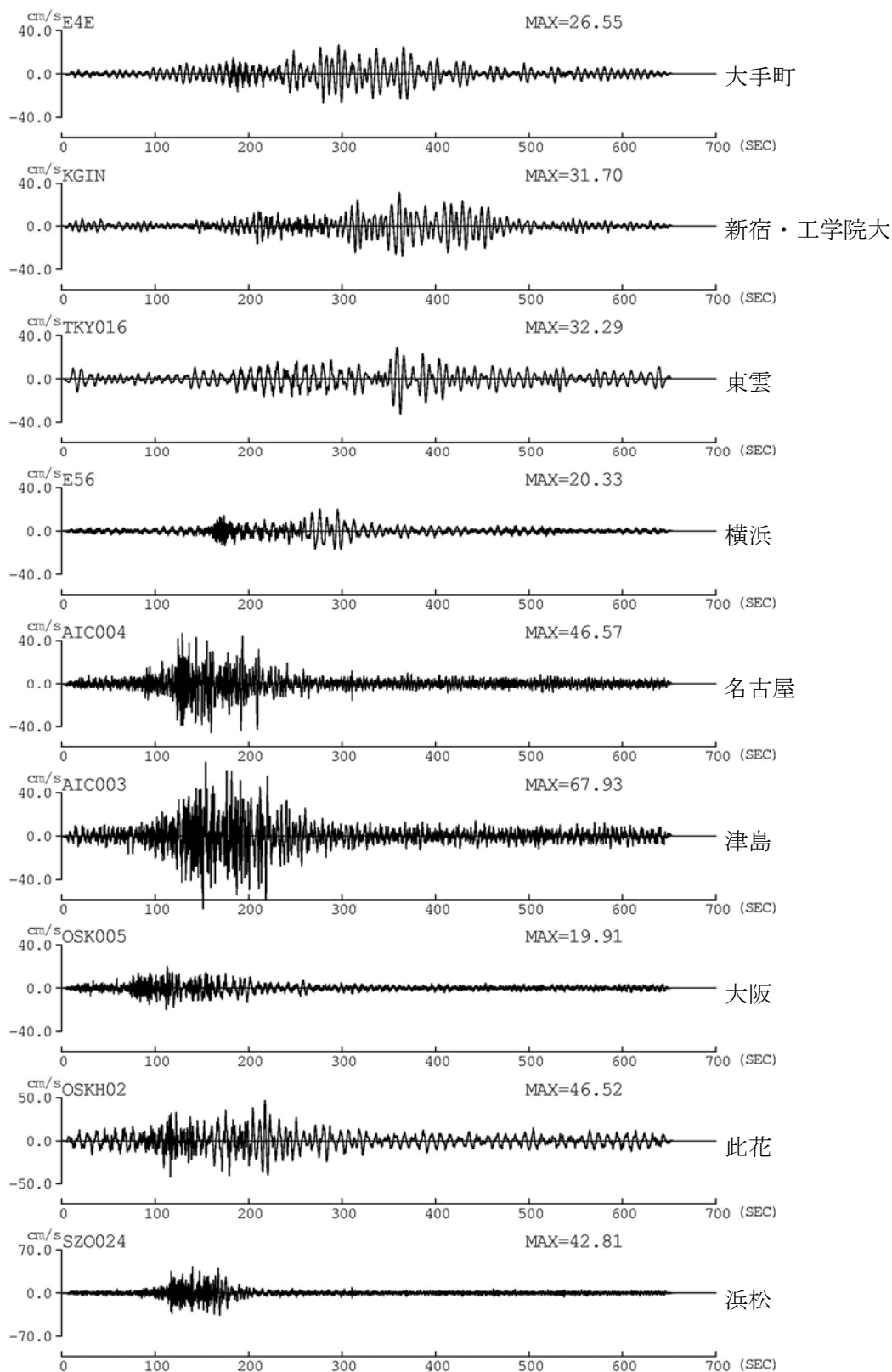


図 2.3-30 4連動6セグメントモデル(Mw9.0)の代表8観測点と浜松での平均波の速度波形(応答スペクトルの平均値を用いた場合：平均的な波作成方法c)

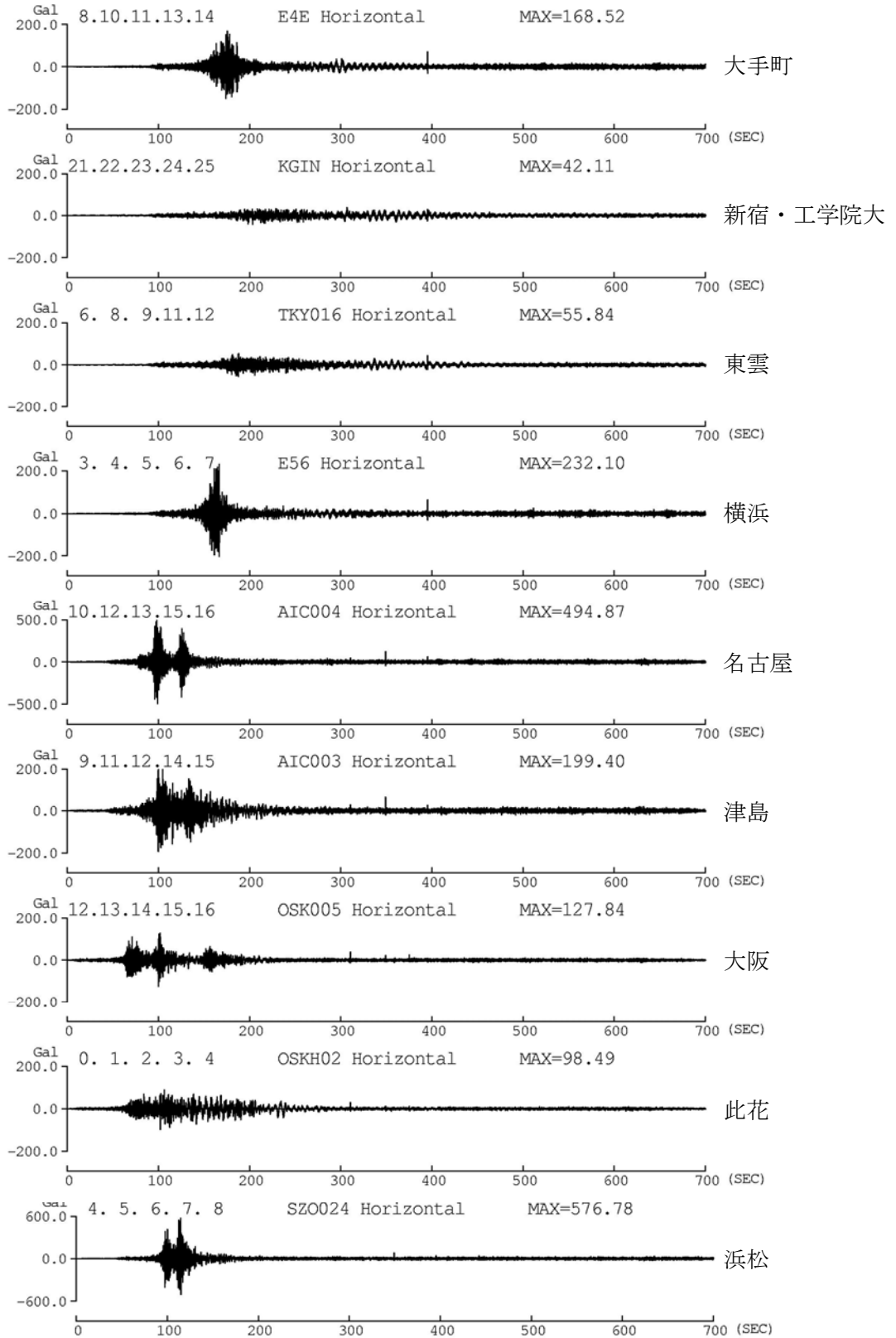


図 2.3-31 3連動(Mw8.7)の代表8観測点と浜松での加速度波形(平均)

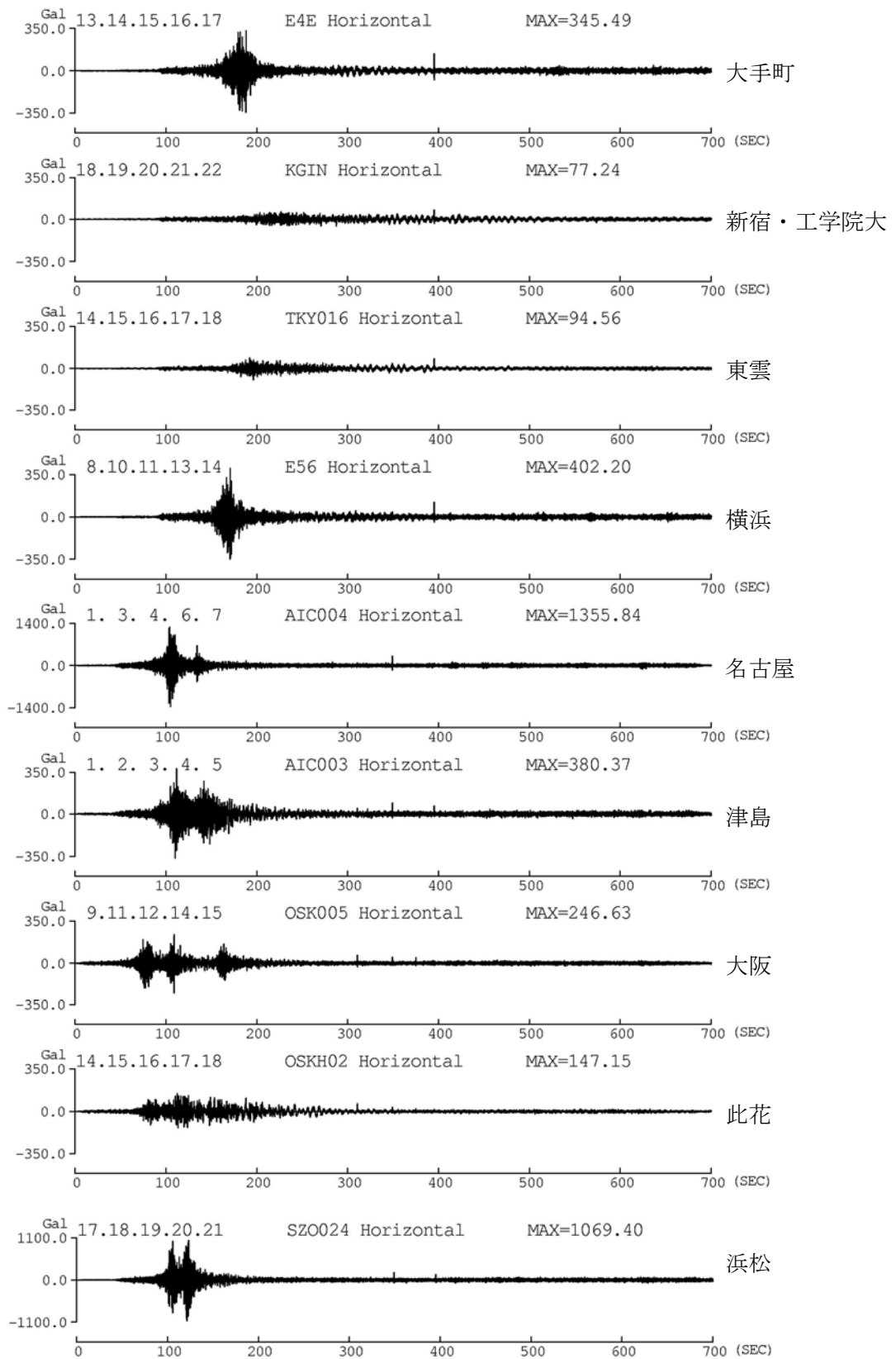


図 2.3-32 3連動(Mw 8.7)の代表8観測点と浜松での平均+標準偏差波の加速度波形

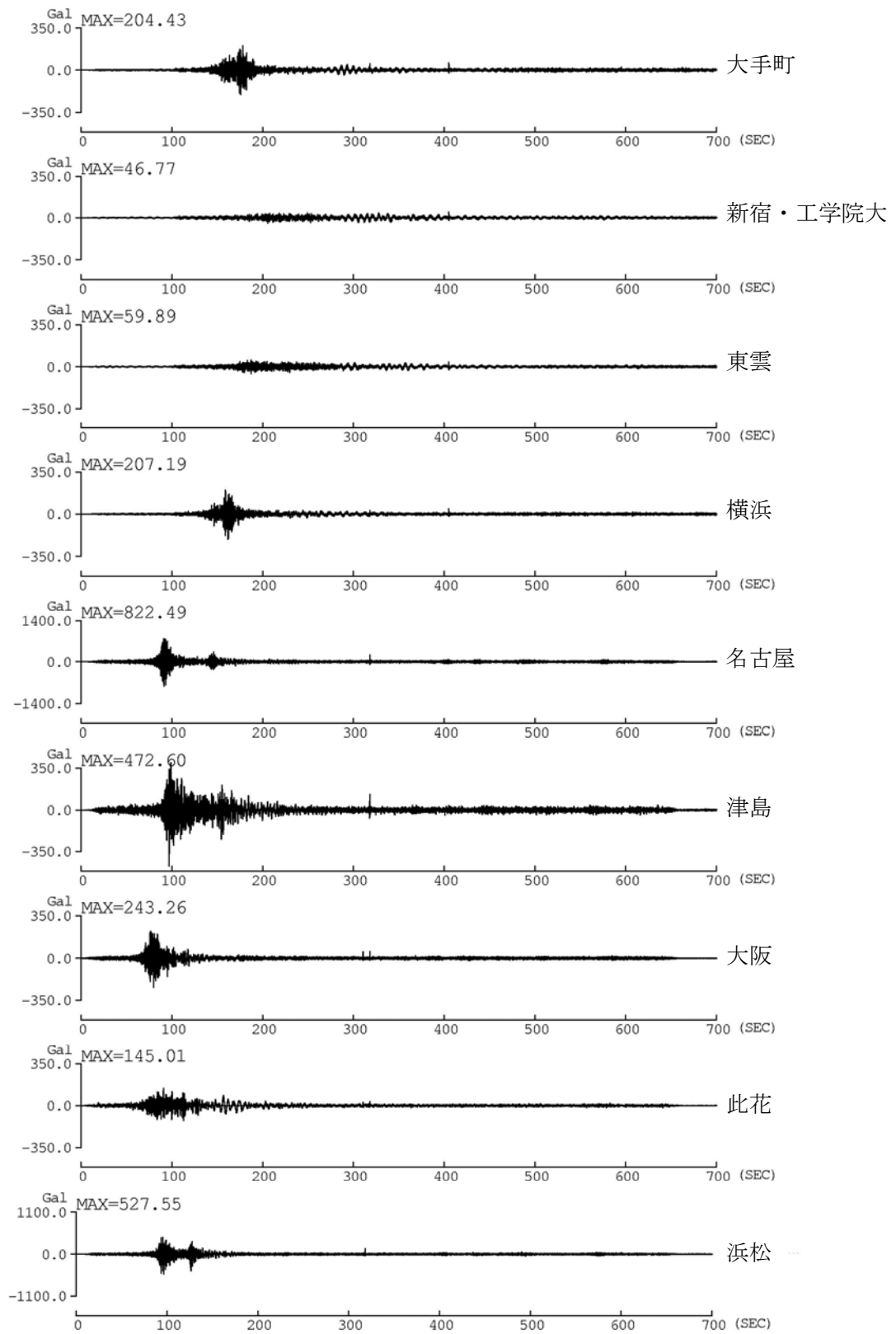


図 2.3-33 4 連動 4 セグメントモデル (Mw9.0) の代表 8 観測点と浜松での平均波の加速度波形

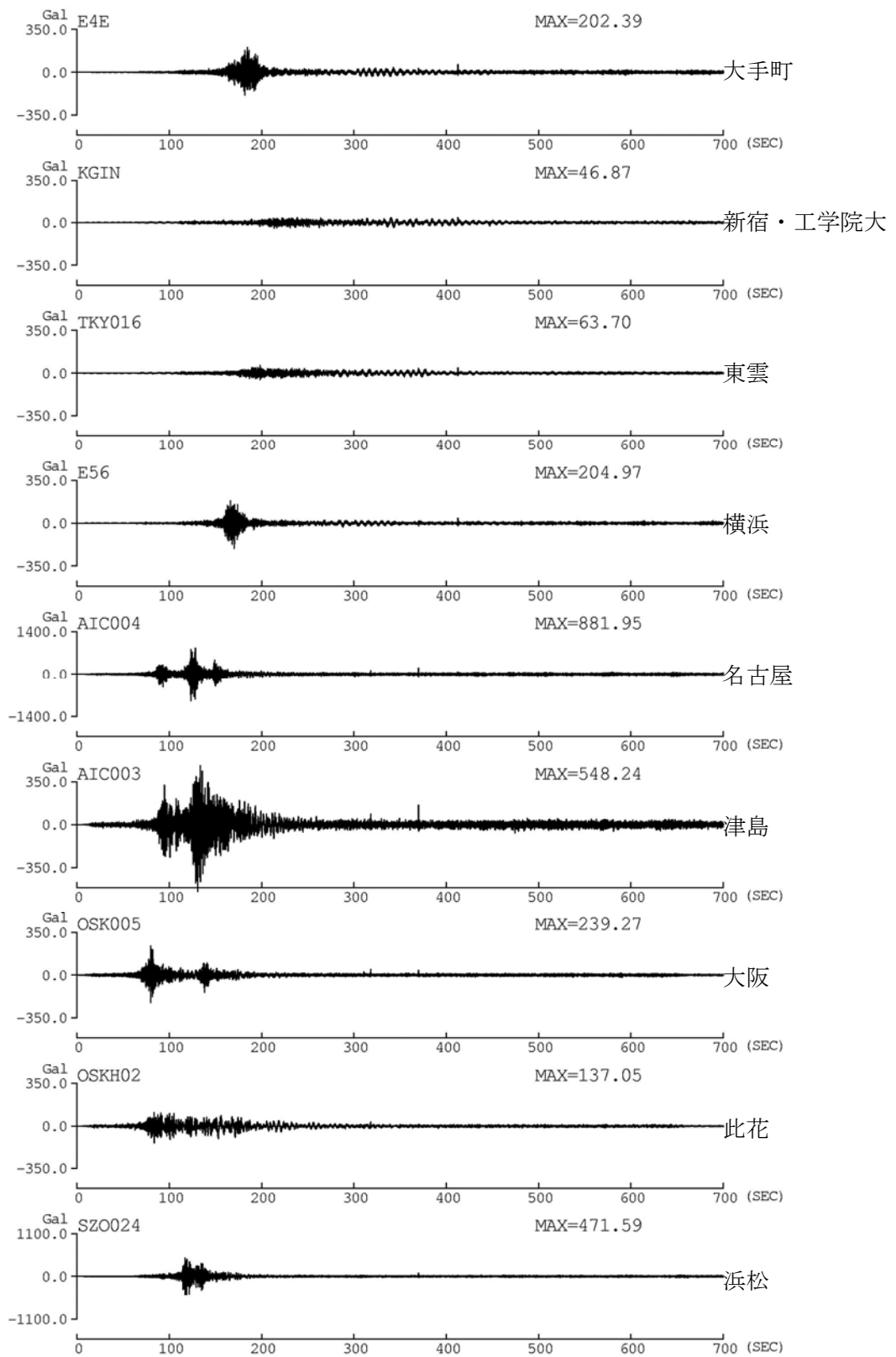


図 2.3-34 4 連動 6 セグメントモデル (Mw9.0) の代表 8 観測点と浜松での平均波の加速度波形 (21 波の応答スペクトルの平均値との対数残差が小さい波形を選択した場合: 平均的な波作成方法 b)

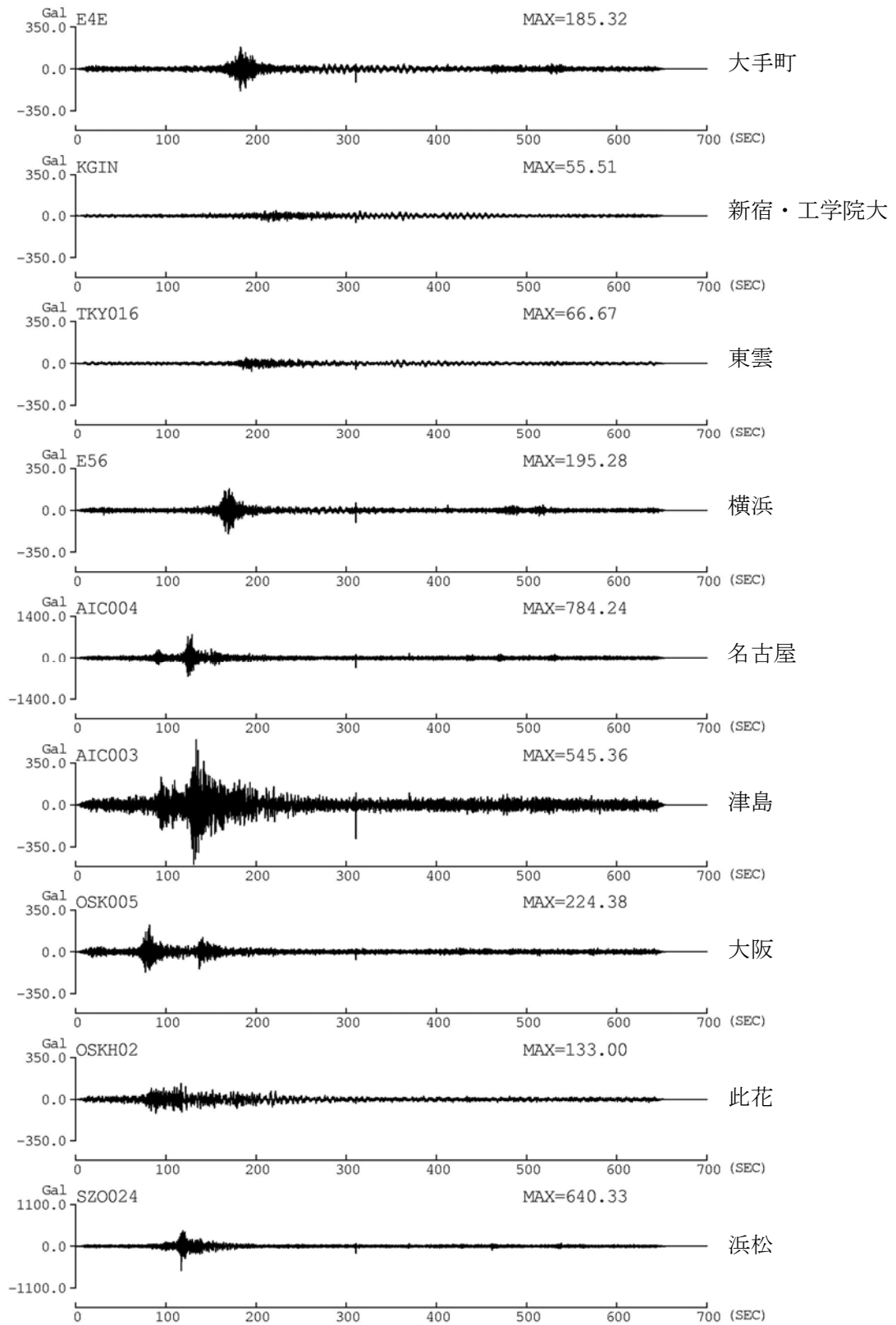


図 2.3-35 4連動6セグメントモデル(Mw9.0)の代表8観測点と浜松での平均波の加速度波形(応答スペクトルの平均値を用いた場合:平均的な波作成方法c)

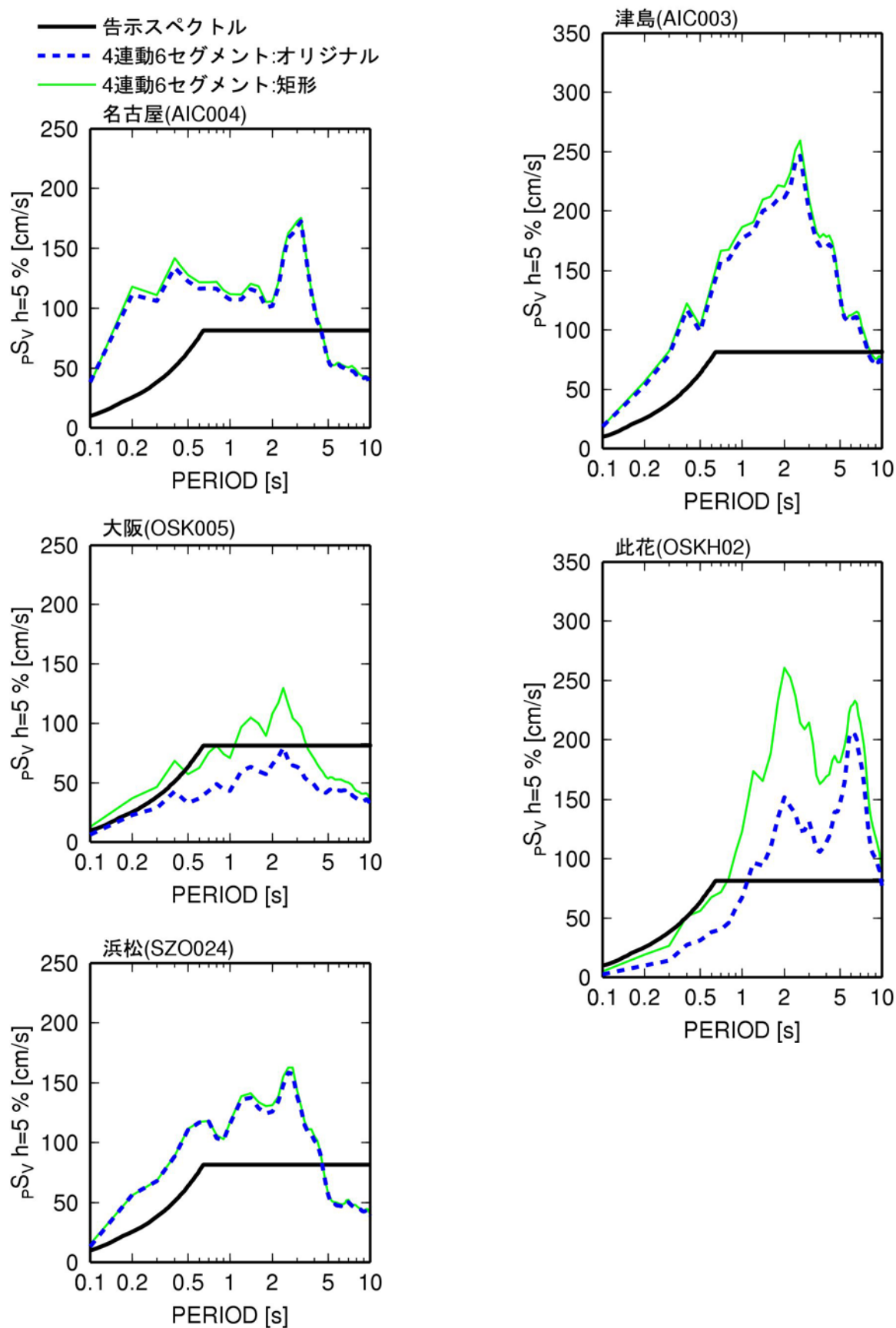
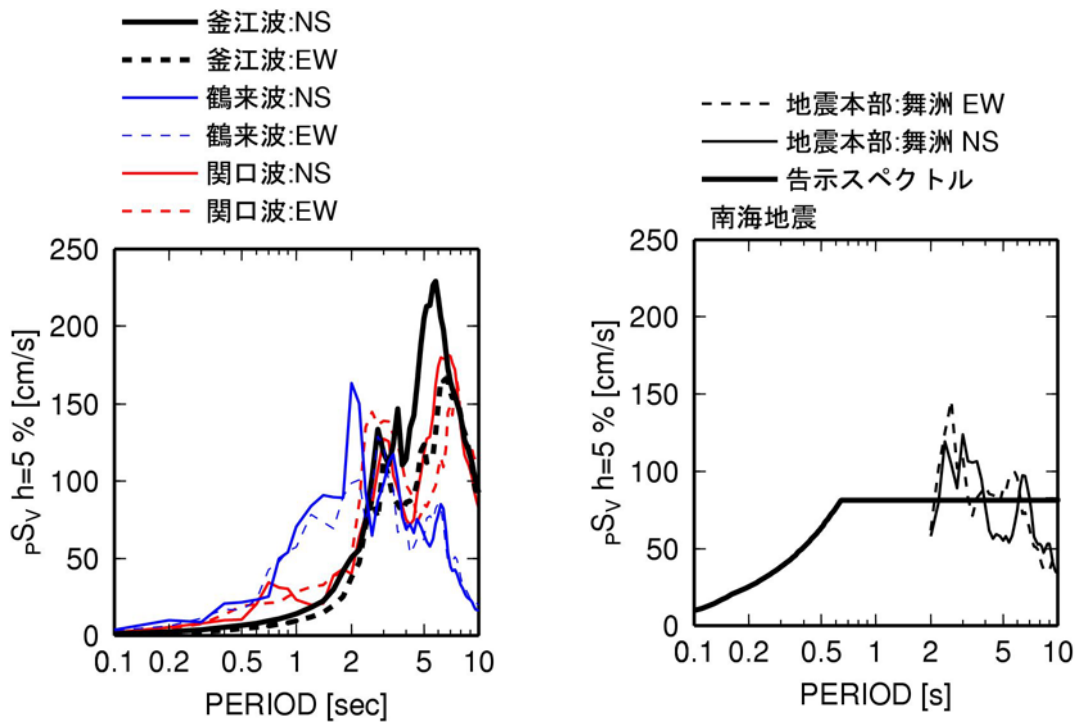
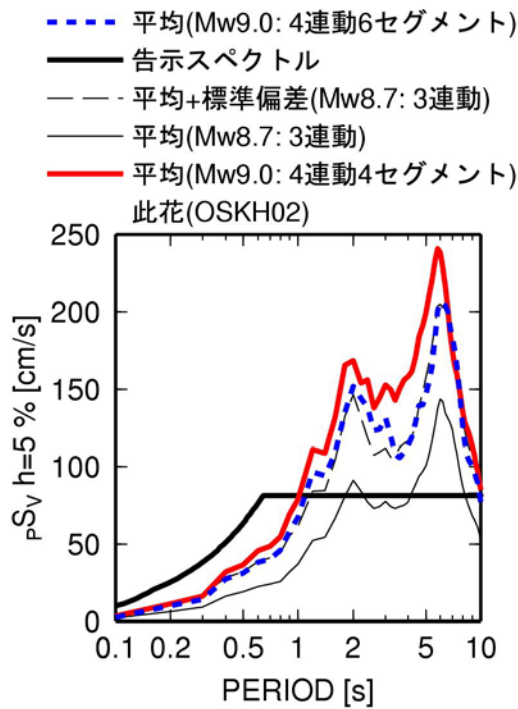


図2.3-36 6セグメントモデルを矩形化した場合としない場合(オリジナルモデル)の5地点での擬似速度応答スペクトルの比較



(a) 南海地震の OSKH02 での既往の計算波 (b) 南海地震の舞洲での地震本部(2012)による計算波

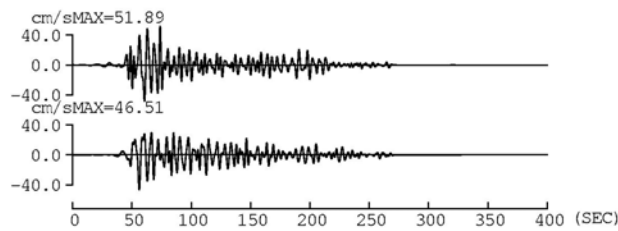


(c) 連動地震の本検討の OSKH02 での計算波

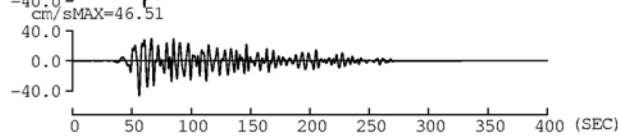
図 2.3-37 南海地震の OSKH02 または舞洲での既往の計算波と本検討の OSKH02 での連動地震の計算波の擬似速度応答スペクトル

釜江波(OSKH02)

NS

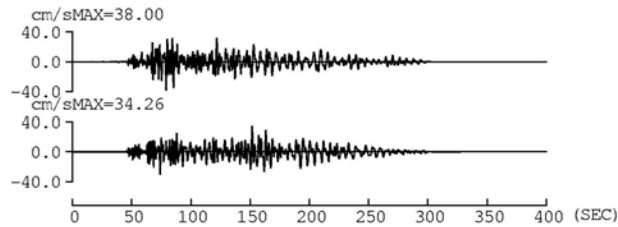


EW

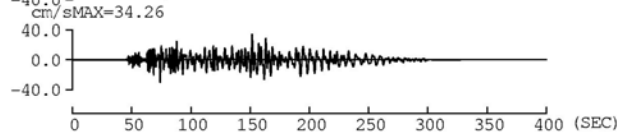


鶴来波(OSKH02)

NS

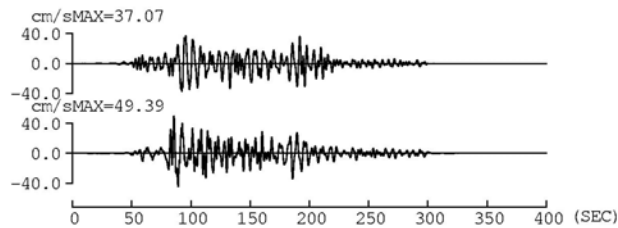


EW

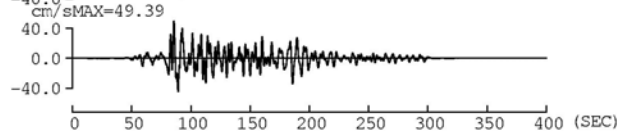


関口波(OSKH02)

NS

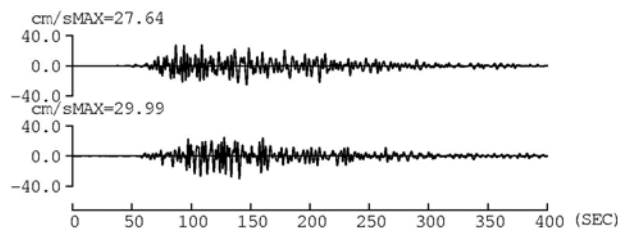


EW

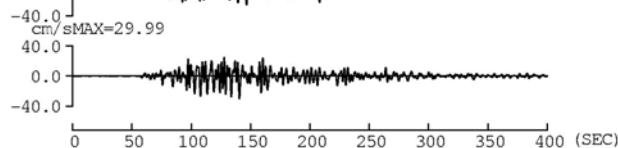


地震本部(舞洲)

NS



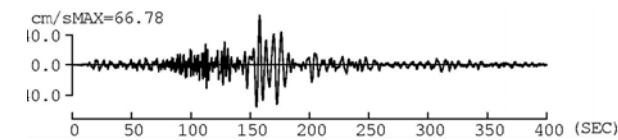
EW



本業務 (OSKH02)

4セグメントモデル

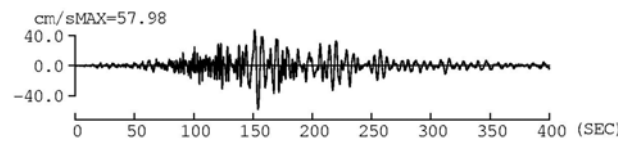
選択された波



本業務 (OSKH02)

6セグメントモデル

選択された波



本業務 (OSKH02)

6セグメントモデル

再作成された波

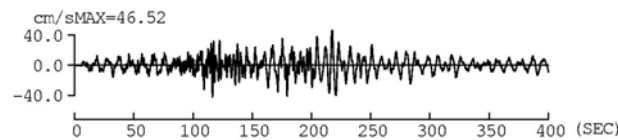
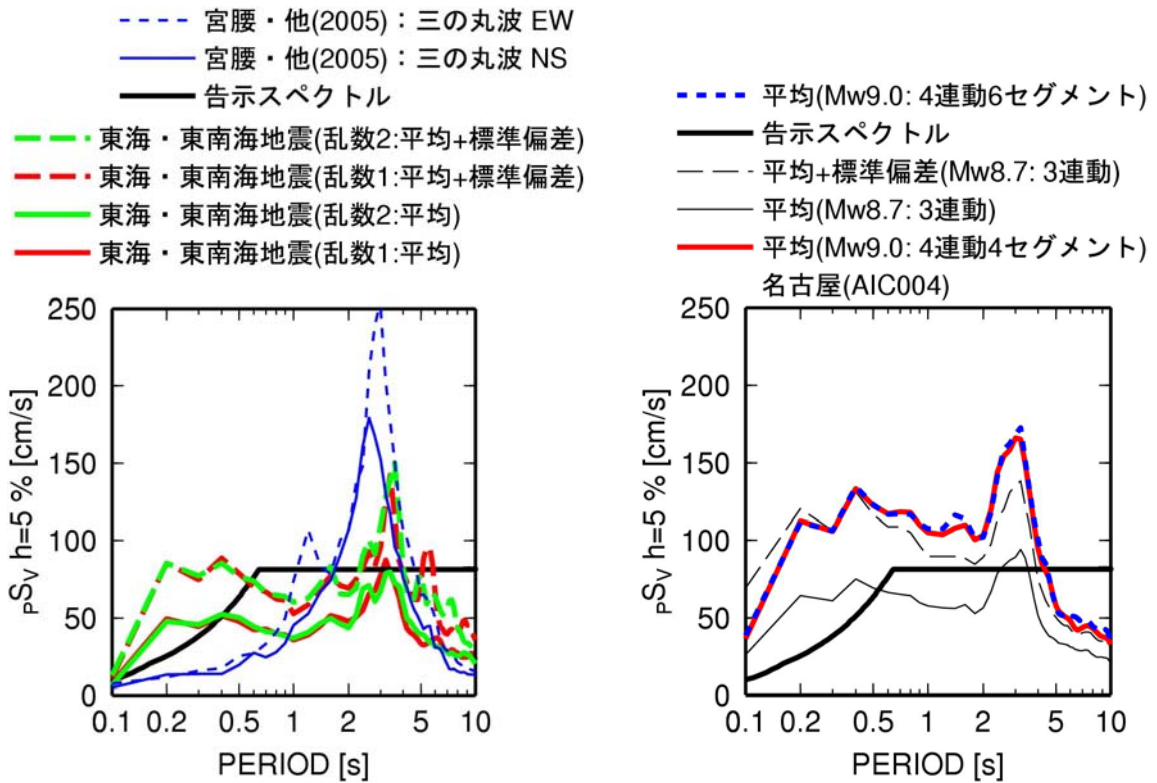
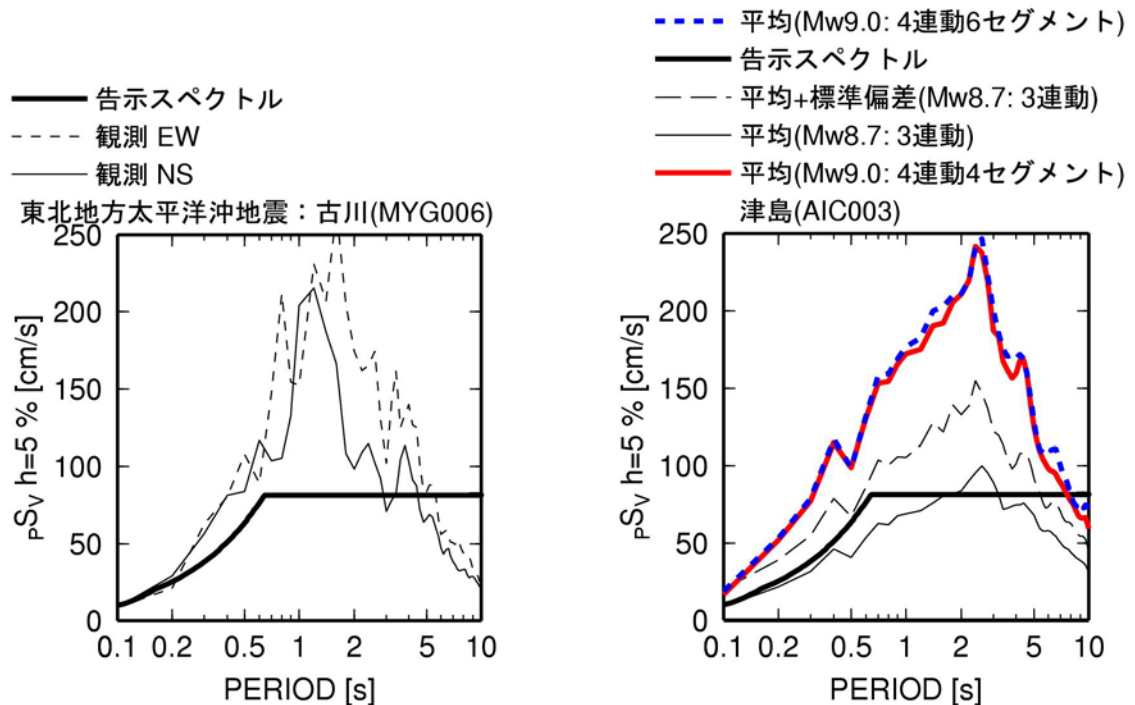


図 2.3-38 南海地震に対する OSKH02 での既往の計算波 (OSKH02) と地震本部の舞洲での計算波および本業務の OSKH02 での計算波の周期 0.1~10 秒の速度波形の比較 (ただし、釜江波は 2.5~10 秒、地震本部の波は 2~10 秒)



(a) 東海・東南海地震の三の丸での既往の計算波(三の丸波) と H22 年度に建物応答用に用いた名古屋(AIC004)での計算波 (b) 本検討の計算波

図 2.3-39 名古屋での既往の計算波と本検討の計算波



(a) 東北地方太平洋沖地震の古川 (b) 南海トラフ沿いの巨大地震の本業務の津島

図 2.3-40 津島での計算波と東北地方太平洋沖地震の古川での観測波の擬似速度応答スペクトルの比較

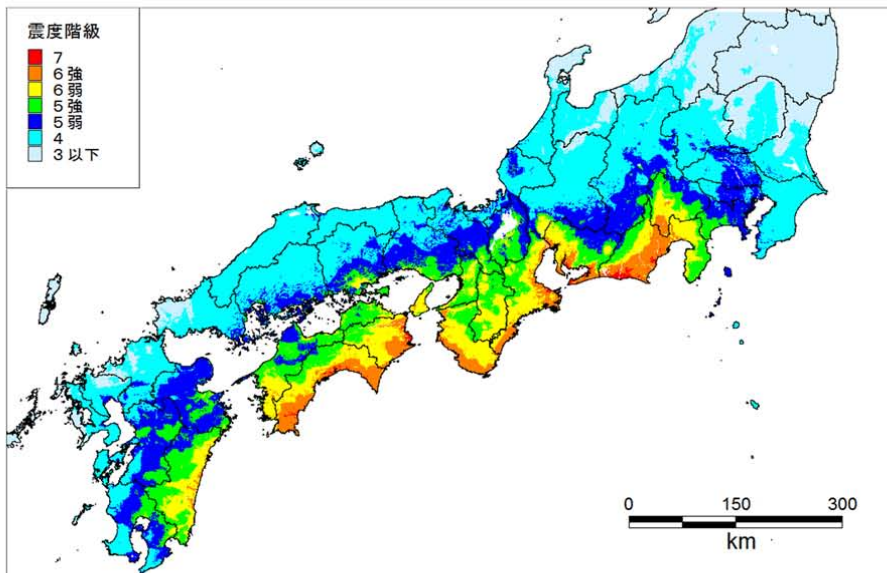


図5.1 基本ケースの震度分布

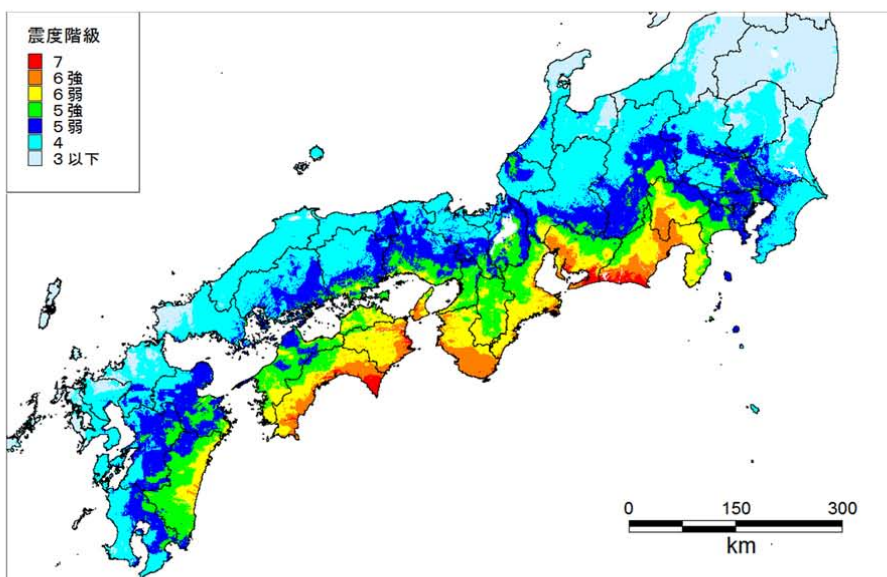


図5.2 東側ケースの震度分布

図 2.3-41 内閣府(2012)の南海トラフ沿いの巨大地震の震度分布

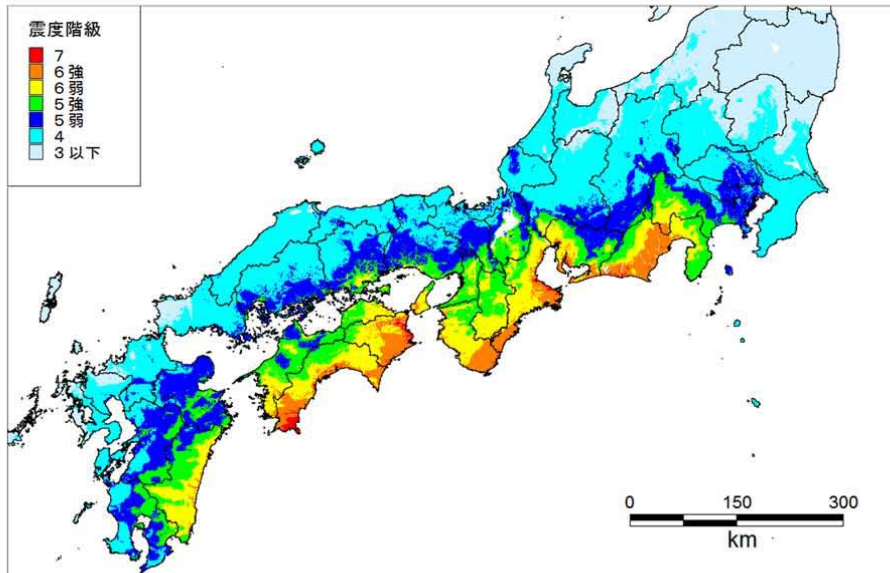


図5.3 西側ケースの震度分布

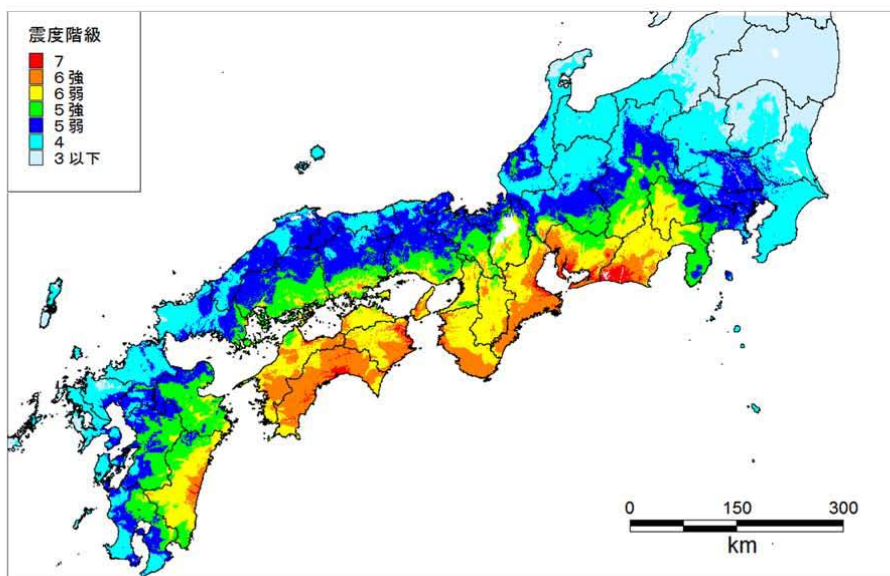


図5.4 陸側ケースの震度分布

図 2.3-41 内閣府(2012)の南海トラフ沿いの巨大地震の震度分布 (続き)

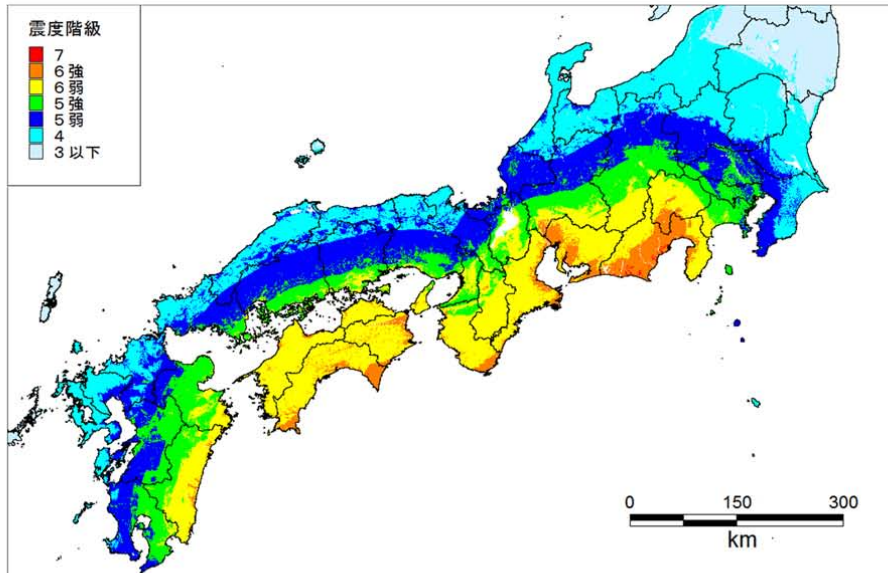


図5.5 経験的手法による震度分布

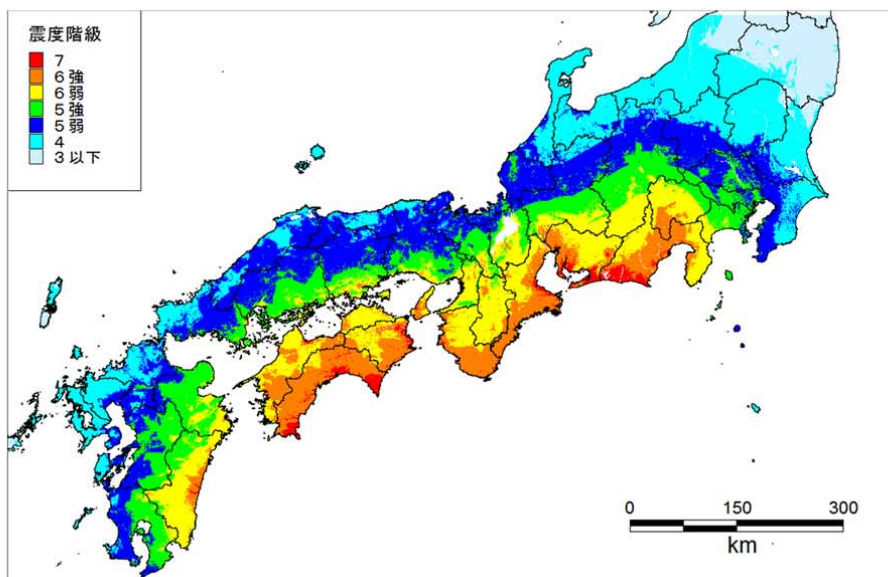


図5.6 震度の最大値の分布図

強震波形4ケースと経験的手法の震度の最大値の分布

図 2.3-41 内閣府(2012)の南海トラフ沿いの巨大地震の震度分布 (続き)

表 2.3-4 内閣府(2012)と本業務の計測震度の比較

M9.0 : 6セグメントモデル(本検討)						M9.0(内閣府, 2012)							M8.7(中央防災会議, 2003)
観測点 記号	観測点 名	平均値に近い波を選択		応答スペクトルの平均		市町村名	基本 ケース	陸側 ケース	東側 ケース	西側 ケース	経験的 手法	最大値	
		計測 震度	震度 階級	計測 震度	震度 階級								
E4E	大手町	5.0	5強	5.0	5強	東京都千代田区	5弱	5弱	5強	5弱	5強	5強	5弱
KGIN	新宿	4.2	4	4.3	4	東京都新宿区	5弱	5弱	5強	5弱	5強	5強	5弱
TKY016	東雲	4.1	4	4.1	4	東京都江東区	5弱	5強	5強	5弱	5強	5強	5弱
E56	横浜	5.2	5強	5.2	5強	神奈川県横浜市中区	5強	5強	5強	5強	6弱	6弱	5弱
AIC004	名古屋	6.2	6強	6.1	6強	愛知県名古屋市緑区	6強	6強	6強	6強	6強	6強	6弱
AIC003	津島	6.0	6強	6.0	6強	愛知県津島市	6強	6強	6強	6弱	6強	6強	6弱
OSK005	大阪	5.1	5強	5.0	5強	大阪府大阪市東淀川区	6弱	6強	6弱	6弱	6弱	6強	5強
OSKH02	此花	5.2	6弱	5.4	6弱	大阪府大阪市此花区	6弱	6弱	6弱	6弱	6弱	6弱	6弱
SZ0024	浜松	5.9	6弱	5.9	6弱	静岡県浜松市中区	7	7	7	7	6強	7	7

*本検討は水平2成分のみを用い、10Hz以上は含まれていないため、小さめになると考えられる。

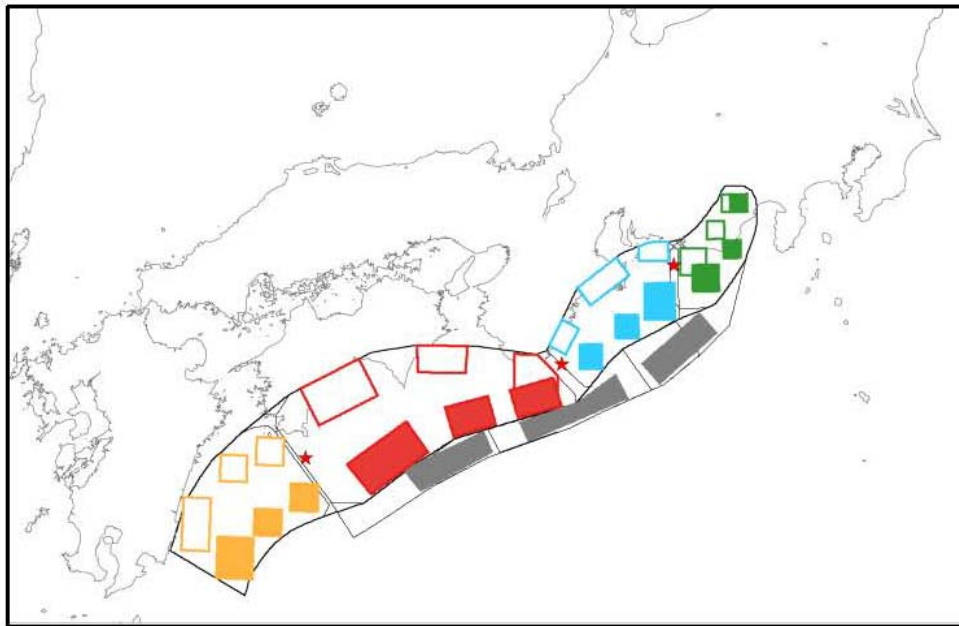


図 3.4-2 本検討で設定した震源モデル。南海（赤：ANNKI）、東南海（青：ATNKI）、想定東海（緑：ATOKI）、日向灘（橙：AHGND）、トラフ沿い（灰：ATRGH）のアスペリティ分布。想定東海、東南海、南海、日向灘については、深いアスペリティ（白抜き）と浅いアスペリティを設定している。トラフ沿いは、(a) 四国沖、(b) 紀伊半島沖、(c) 遠州灘沖の3か所にすべりの大きな領域を設定している。想定東海、東南海、南海が同時に破壊したケースが3連動（ANNI3）、3連動にトラフ沿いの領域を組み合わせたケース（ANNI4）と、3連動に日向灘を組み合わせたケース（ANNI5）が4連動となる。図内の赤星印は、仮定した破壊開始点（西、中央、東）である。

図 2.3-42 藤原・他(2012)の震源モデル

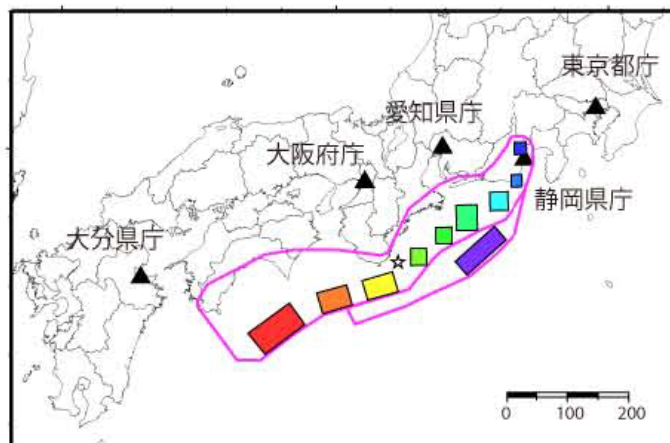


図 2.3-43 藤原・他(2012)の震源モデルのうち、三次元差分法と統計的グリーン関数法の計算波形のフーリエスペクトルと速度波形が示されている震源モデル(3連動+遠州灘、ANNI4c-s-c スケーリング)と計算地点。愛知県庁と東京都庁では、ANNI4c-s-c スケーリング、ANNI4c-s-c カスケード、ANNI4c-s-c 箱型関数(スケーリング)、ANNI4c-s-cQ 値無限大(スケーリング)の速度応答スペクトルと速度波形が示されている。

表 2.3-5 震源パラメータの一覧(藤原・他, 2012)

		南海	東南海	想定東海	日向灘	トラフ沿い	南海-東南海	
							カスケード	スケーリング
全体	面積(km ²)	35800	14500	9400	19000	12500	50300	51200
	地震モーメント(Nm)	8.33×10^{21}	2.14×10^{21}	1.13×10^{21}	3.23×10^{21}	1.72×10^{21}	1.05×10^{22}	1.43×10^{22}
	平均すべり量(m)	5.8	3.7	3.0	4.2	3.4	—	6.9
	応力降下量(MPa)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	Mw	8.5	8.2	8.0	8.3	8.1	8.6	8.7
南海1	面積(km ²)	3580	—	—	—	—	3580	3580
	地震モーメント(Nm)	2.15×10^{21}	—	—	—	—	2.15×10^{21}	2.87×10^{21}
	平均すべり量(m)	14.9	—	—	—	—	14.9	19.8
	応力降下量(MPa)	15.0	—	—	—	—	15.0	15.3
南海2,3	面積(km ²)	1790	—	—	—	—	1790	1790
	地震モーメント(Nm)	7.60×10^{20}	—	—	—	—	7.60×10^{20}	1.02×10^{21}
	平均すべり量(m)	10.5	—	—	—	—	10.5	14.0
	応力降下量(MPa)	15.0	—	—	—	—	15.0	15.3
東南海1	面積(km ²)	—	1450	—	—	—	1450	1450
	地震モーメント(Nm)	—	5.54×10^{20}	—	—	—	5.54×10^{20}	7.40×10^{20}
	平均すべり量(m)	—	9.5	—	—	—	9.5	12.6
	応力降下量(MPa)	—	15.0	—	—	—	15.0	15.3
東南海2,3	面積(km ²)	—	725	—	—	—	725	725
	地震モーメント(Nm)	—	1.96×10^{20}	—	—	—	1.96×10^{20}	2.62×10^{20}
	平均すべり量(m)	—	6.7	—	—	—	6.7	8.9
	応力降下量(MPa)	—	15.0	—	—	—	15.0	15.3
想定東海1	面積(km ²)	—	—	940	—	—	—	—
	地震モーメント(Nm)	—	—	2.89×10^{20}	—	—	—	—
	平均すべり量(m)	—	—	7.6	—	—	—	—
	応力降下量(MPa)	—	—	15.0	—	—	—	—
想定東海2,3	面積(km ²)	—	—	470	—	—	—	—
	地震モーメント(Nm)	—	—	1.02×10^{20}	—	—	—	—
	平均すべり量(m)	—	—	5.4	—	—	—	—
	応力降下量(MPa)	—	—	15.0	—	—	—	—
日向灘1	面積(km ²)	—	—	—	1900	—	—	—
	地震モーメント(Nm)	—	—	—	8.31×10^{20}	—	—	—
	平均すべり量(m)	—	—	—	10.8	—	—	—
	応力降下量(MPa)	—	—	—	15.0	—	—	—
日向灘2,3	面積(km ²)	—	—	—	950	—	—	—
	地震モーメント(Nm)	—	—	—	2.94×10^{20}	—	—	—
	平均すべり量(m)	—	—	—	7.7	—	—	—
	応力降下量(MPa)	—	—	—	15.0	—	—	—
トラフ沿い	面積(km ²)	—	—	—	—	2500	—	—
	地震モーメント(Nm)	—	—	—	—	7.57×10^{20}	—	—
	平均すべり量(m)	—	—	—	—	7.50	—	—
	応力降下量(MPa)	—	—	—	—	15.00	—	—
背景領域	面積(km ²)	28640	11600	7520	15200	10000	40240	41140
	地震モーメント(Nm)	4.66×10^{21}	1.19×10^{21}	6.33×10^{20}	1.81×10^{21}	9.64×10^{20}	5.85×10^{21}	8.10×10^{21}
	平均すべり量(m)	4.0	2.6	2.1	2.9	2.4	—	4.9
	応力降下量(MPa)	1.8	1.8	1.8	1.8	3.0	—	1.4
参考								
中央防災会議	Mw	8.6	8.2	8.0			8.6	
地震本部	Mw	8.4	8.1	8.0			8.5	

表 2.3-5 震源パラメータの一覧(藤原・他, 2012) (続き)

		東南海-想定東海		南海-東南海-想定東海		3連動+日向灘		3連動+トラフ沿い	
		カスケード	スケーリング	カスケード	スケーリング	カスケード	スケーリング	カスケード	スケーリング
全体	面積(km ²)	23900	23600	59700	60300	78700	80482	72200	72800
	地震モーメント(Nm)	3.27×10^{21}	4.46×10^{21}	1.16×10^{22}	1.82×10^{22}	1.48×10^{22}	2.81×10^{22}	1.33×10^{22}	2.42×10^{22}
	平均すべり量(m)	—	4.7	—	7.5	—	8.6	—	8.2
	応力降下量(MPa)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	Mw	8.3	8.4	8.6	8.8	8.7	8.9	8.7	8.9
南海1	面積(km ²)	—	—	3580	3580	3580	3580	3580	3580
	地震モーメント(Nm)	—	—	2.15×10^{21}	3.34×10^{21}	2.15×10^{21}	3.98×10^{21}	2.15×10^{21}	3.57×10^{21}
	平均すべり量(m)	—	—	14.9	23.1	14.9	27.5	14.9	24.6
	応力降下量(MPa)	—	—	15.0	15.2	15.0	15.3	15.0	15.1
南海2,3	面積(km ²)	—	—	1790	1790	1790	1790	1790	1790
	地震モーメント(Nm)	—	—	7.60×10^{20}	1.18×10^{21}	7.60×10^{20}	1.41×10^{21}	7.60×10^{20}	1.26×10^{21}
	平均すべり量(m)	—	—	10.5	16.3	10.5	19.5	10.5	17.4
東南海1	面積(km ²)	1450	1450	1450	1450	1450	1450	1450	1450
	地震モーメント(Nm)	5.54×10^{20}	7.66×10^{20}	5.54×10^{20}	8.61×10^{20}	5.54×10^{20}	1.03×10^{21}	5.54×10^{20}	9.19×10^{20}
	平均すべり量(m)	9.5	13.1	9.5	14.7	9.5	17.5	9.5	15.7
東南海2,3	面積(km ²)	725	725	725	725	725	725	725	725
	地震モーメント(Nm)	1.96×10^{20}	2.71×10^{20}	1.96×10^{20}	3.05×10^{20}	1.96×10^{20}	3.63×10^{20}	1.96×10^{20}	3.25×10^{20}
	平均すべり量(m)	6.7	9.2	6.7	10.4	6.7	12.4	6.7	11.1
想定東海	面積(km ²)	940	940	940	940	940	940	940	940
	地震モーメント(Nm)	2.89×10^{20}	4.00×10^{20}	2.89×10^{20}	4.50×10^{20}	2.89×10^{20}	5.36×10^{20}	2.89×10^{20}	4.80×10^{20}
	平均すべり量(m)	7.6	10.5	7.6	11.8	7.6	14.1	7.6	12.6
想定東海2,3	面積(km ²)	470	470	470	470	470	470	470	470
	地震モーメント(Nm)	1.02×10^{20}	1.41×10^{20}	1.02×10^{20}	1.59×10^{20}	1.02×10^{20}	1.89×10^{20}	1.02×10^{20}	1.70×10^{20}
	平均すべり量(m)	5.4	7.4	5.4	8.4	5.4	10.0	5.4	8.9
日向灘1	面積(km ²)	—	—	—	1900	1900	—	—	—
	地震モーメント(Nm)	—	—	—	8.31×10^{20}	1.54×10^{21}	—	—	—
	平均すべり量(m)	—	—	—	10.8	20.0	—	—	—
日向灘2,3	面積(km ²)	—	—	—	950	950	—	—	—
	地震モーメント(Nm)	—	—	—	2.94×10^{20}	5.45×10^{20}	—	—	—
	平均すべり量(m)	—	—	—	7.7	14.2	—	—	—
トラフ沿い	面積(km ²)	—	—	—	—	—	—	2500	2500
	地震モーメント(Nm)	—	—	—	—	—	—	7.57×10^{20}	2.08×10^{21}
	平均すべり量(m)	—	—	—	—	—	—	7.50	20.60
背景領域	面積(km ²)	19120	18820	47760	48360	62960	64742	57760	58360
	地震モーメント(Nm)	1.83×10^{21}	2.48×10^{21}	6.48×10^{21}	1.03×10^{22}	8.29×10^{21}	1.60×10^{22}	7.45×10^{21}	1.36×10^{22}
	平均すべり量(m)	—	3.3	—	5.3	—	6.1	—	5.8
参考	中央防災会議 Mw	8.3	—	8.7	—	—	—	—	—
	地震本部 Mw	8.4	—	8.5	—	—	—	—	—

表 2.3-6 地震動計算を行ったケースの一覧(藤原・他, 2012)

ケース名					領域						
領域	トラフ沿い	深さ	破壊	※	南海	東南海	想定東海	日向灘	トラフ沿い		
									a. 四国沖	b. 紀伊半島沖	c. 遠州灘沖
ANNKI		d	c		○						
		s	c		○						
ATNKI		s	c			○					
ATOKI		s	e				○				
AHGND		d	w					○			
		s	w					○			
ATRGH	a		c						○		
	b		w							○	
	c		c								○
ANNI1		s	c	cas	○	○					
		s	e	cas	○	○					
ANNI2		s	c	cas		○	○				
ANNI3		d	w		○	○	○				
		d	c		○	○	○				
		d	e		○	○	○				
		s	w		○	○	○				
		s	w	cas	○	○	○				
		s	c		○	○	○				
		s	c	cas	○	○	○				
		s	e		○	○	○				
ANNI4	a	d	w		○	○	○		○		
	a	d	c		○	○	○		○		
	a	d	e		○	○	○		○		
	a	s	w		○	○	○		○		
	a	s	c		○	○	○		○		
	a	s	c	cas	○	○	○		○		
	a	s	c	box	○	○	○		○		
	a	s	e		○	○	○		○		
	b	d	w		○	○	○			○	
	b	d	c		○	○	○			○	
	b	d	e		○	○	○			○	
	b	s	w		○	○	○			○	
	b	s	c		○	○	○			○	
	b	s	e		○	○	○			○	
	c	d	w		○	○	○				○
	c	d	c		○	○	○				○
	c	d	e		○	○	○				○
c	s	w		○	○	○				○	
c	s	c		○	○	○				○	
c	s	c	cas	○	○	○				○	
c	s	c	box	○	○	○				○	
c	s	c	qi	○	○	○				○	
c	s	e		○	○	○				○	
ANNI5		d	c		○	○	○	○			
		s	c		○	○	○	○			

※ cas: カスケードモデル、box: 箱形関数、qi: Q値無限大モデル

表 2.3-6 地震動計算を行ったケースの一覧(藤原・他, 2012) (続き)

ケース名		アスペリティ深さ			破壊開始点 (南海トラフ全体に対して)			震源のモデル化			
領域	トラフ沿い	深さ	破壊	※	深い	浅い	西	中央	東	カスケード	スケーリング
ANNKI		d	c		○			○			○
		s	c			○		○			○
ATNKI		s	c			○		○			○
ATOKI		s	e			○			○		○
AHGND		d	w		○		○				○
		s	w			○	○				○
ATRGH	a		c			-		○			○
	b		w			-	○				○
	c		c			-		○			○
ANNI1		s	c	cas		○		○		○	
		s	e	cas		○			○	○	
ANNI2		s	c	cas		○		○		○	
ANNI3		d	w		○		○				○
		d	c		○			○			○
		d	e		○					○	○
		s	w			○	○				○
		s	w	cas		○	○			○	○
		s	c			○		○			○
		s	c	cas		○		○		○	○
		s	e			○			○		○
ANNI4	a	d	w		○		○				○
	a	d	c		○			○			○
	a	d	e		○				○		○
	a	s	w			○	○				○
	a	s	c			○		○			○
	a	s	c	cas		○		○		○	○
	a	s	c	box		○		○			○
	a	s	e			○			○		○
	b	d	w		○		○				○
	b	d	c		○			○			○
	b	d	e		○				○		○
	b	s	w			○	○				○
	b	s	c			○		○			○
	b	s	e			○			○		○
	c	d	w		○		○				○
	c	d	c		○			○			○
	c	d	e		○				○		○
c	s	w			○	○				○	
c	s	c			○		○			○	
c	s	c	cas		○		○		○	○	
c	s	c	box		○		○			○	
c	s	c	qi		○		○			○	
c	s	e			○			○		○	
ANNI5		d	c		○			○			○
		s	c			○		○			○

※ cas: カスケードモデル、box: 箱形関数、qi: Q 値無限大モデル

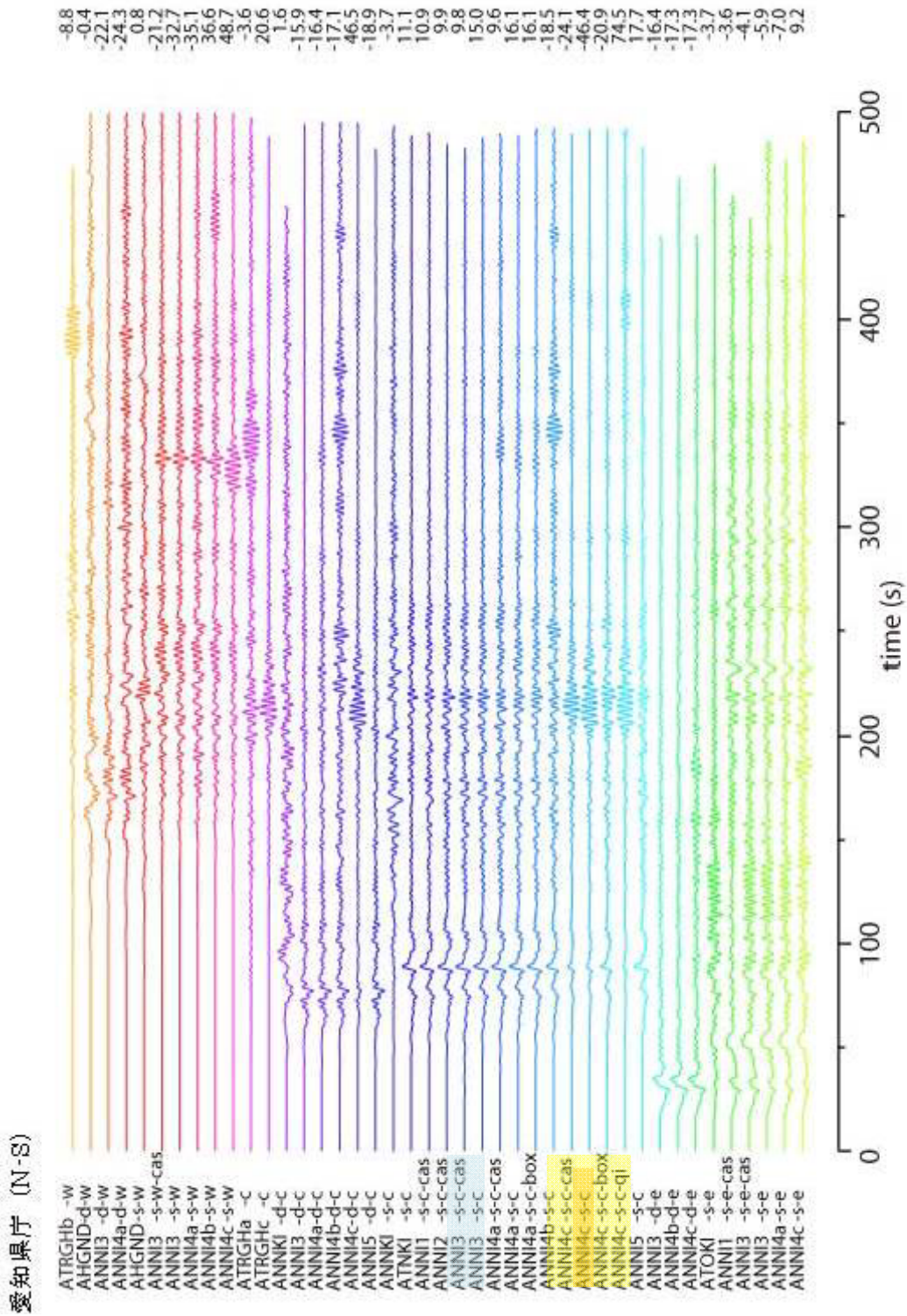


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

図 2.3-44 三次元有限差分法に基づく全ケースの愛知県庁の NS 成分の速度波形(藤原・他, 2012)

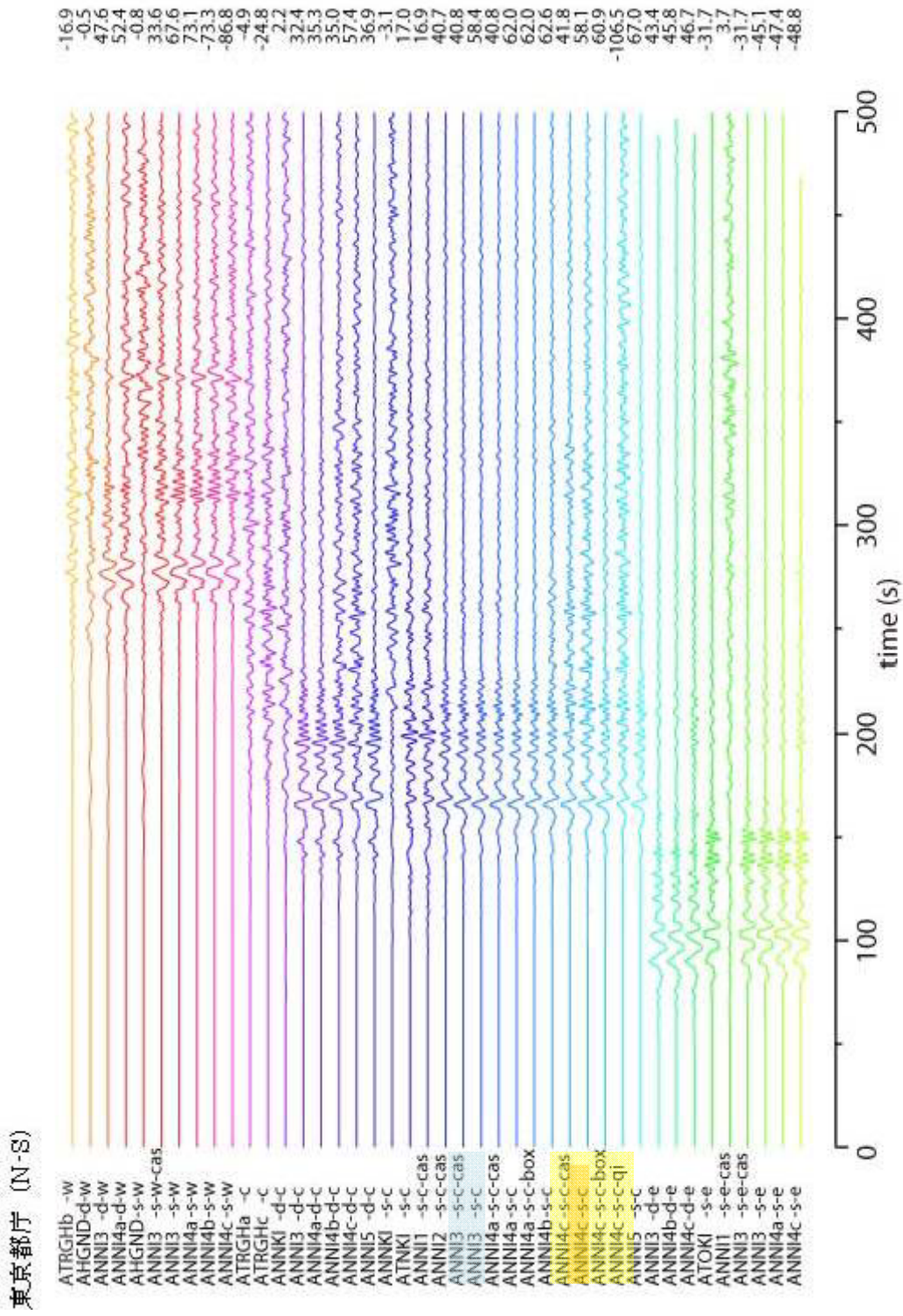


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅 (単位は cm/s)。

図 2.3-45 三次元有限差分法に基づく全ケースの東京都庁の NS 成分の速度波形(藤原・他, 2012)

大阪府庁 (N-S)

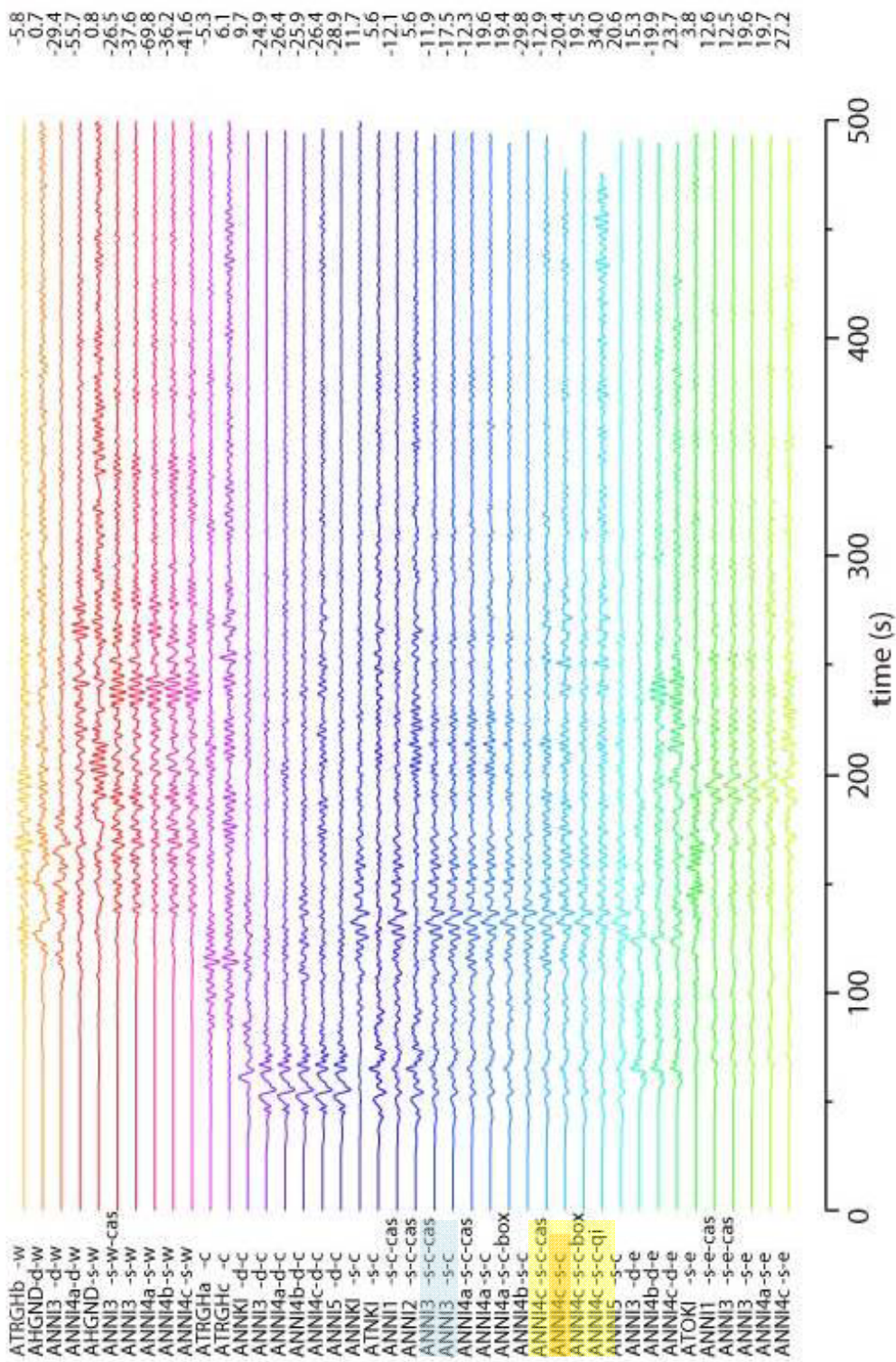
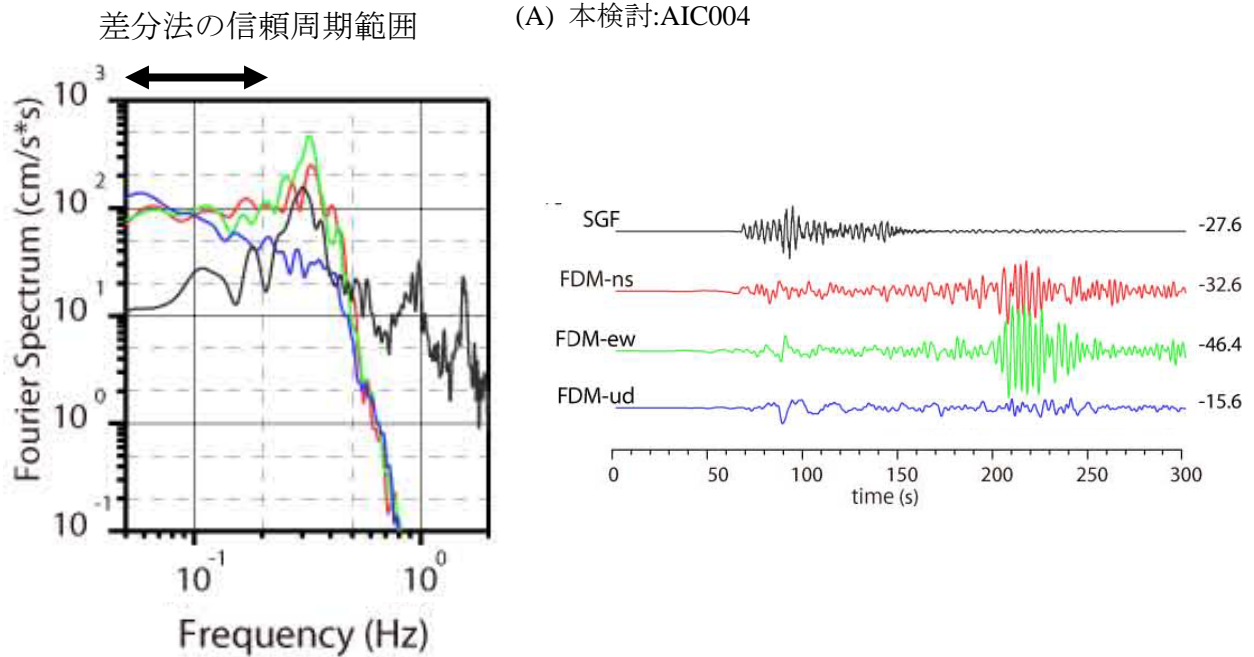
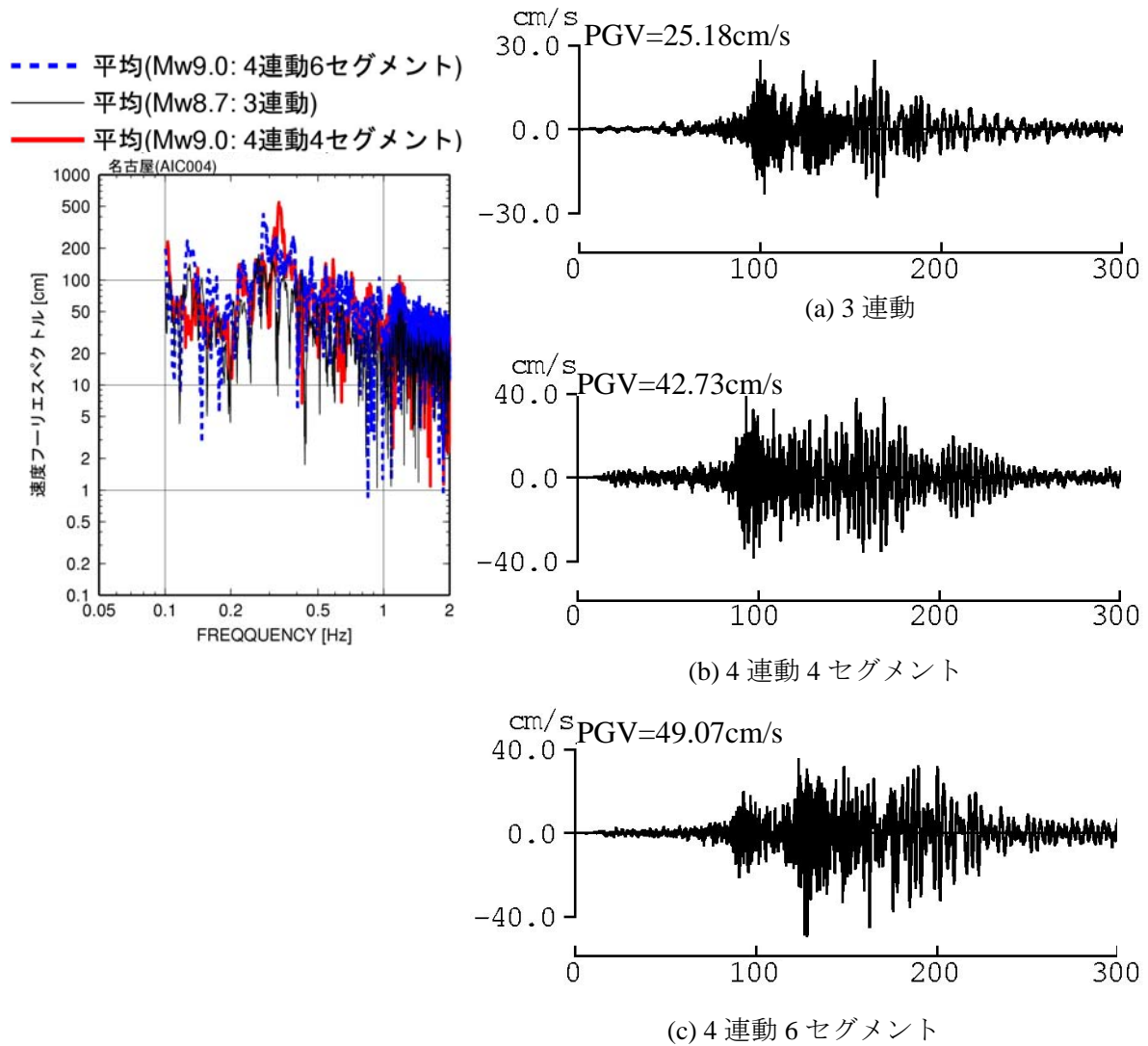


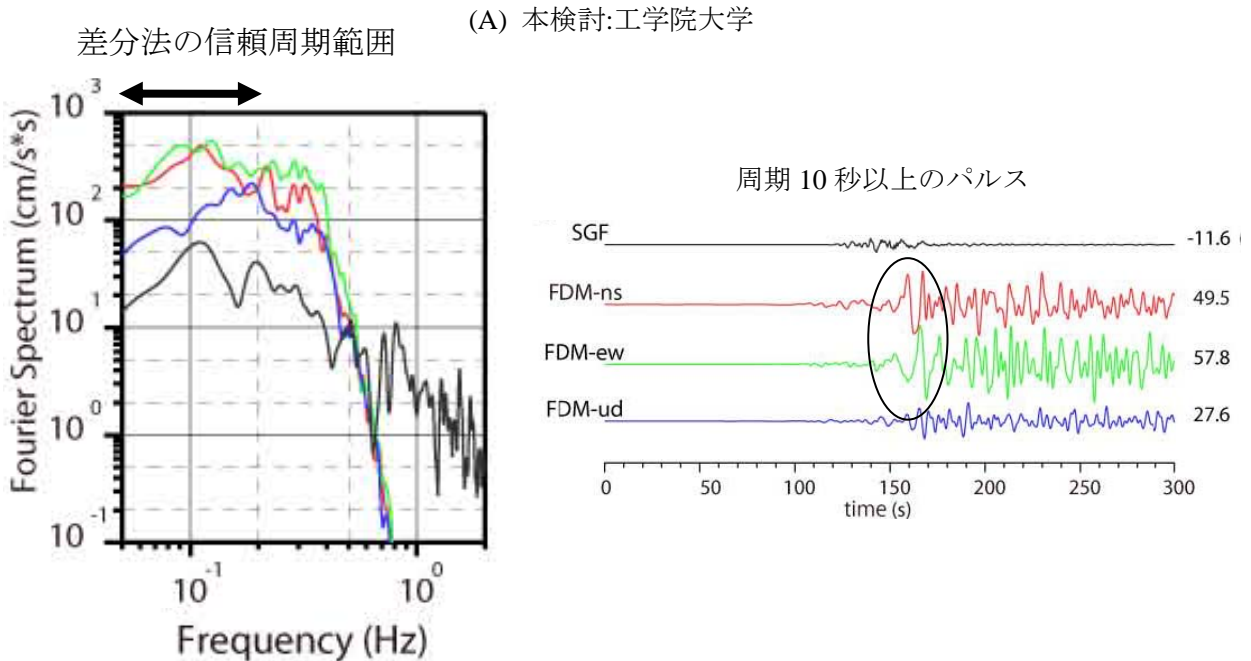
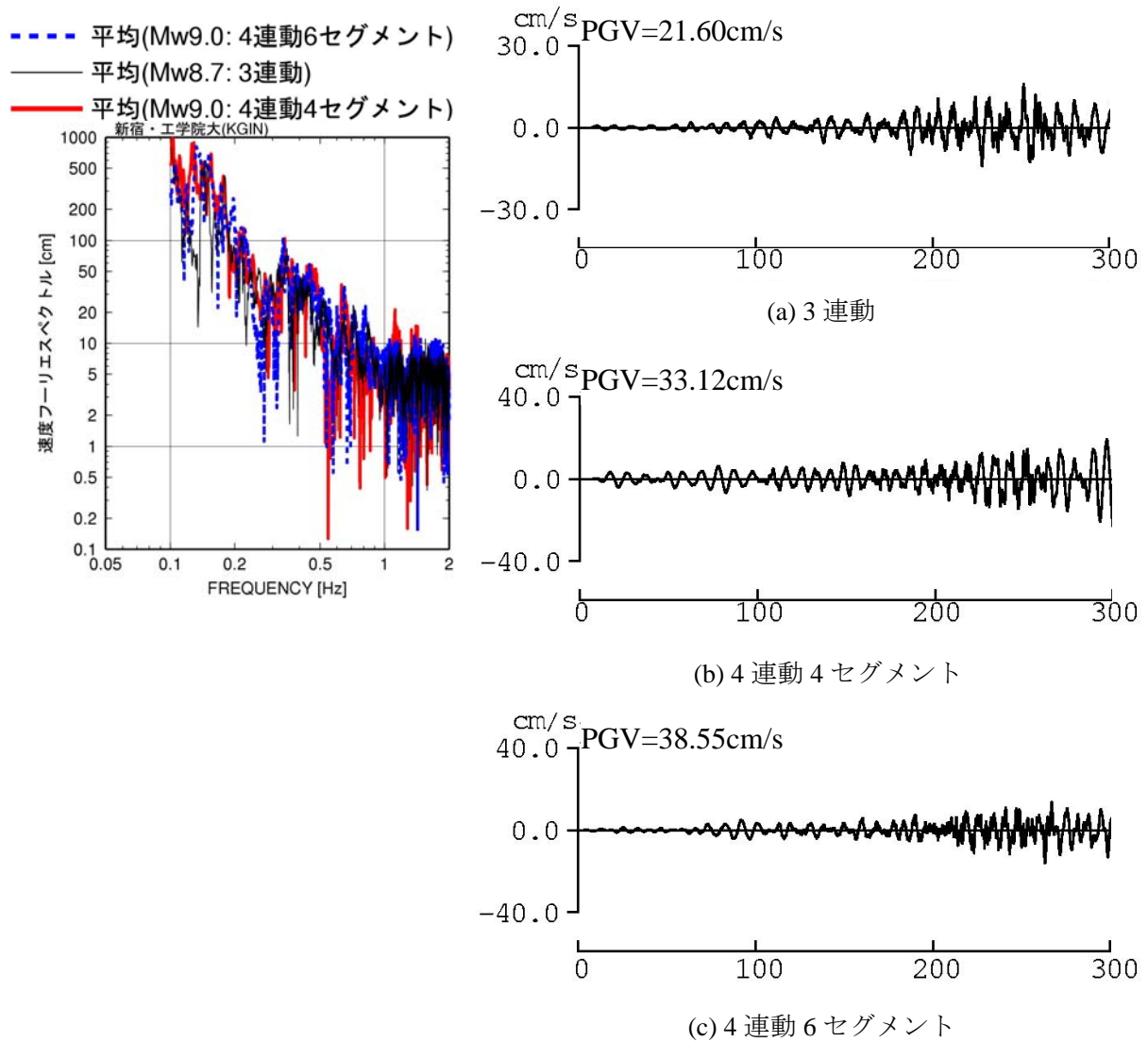
図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

図 2.3-46 三次元有限差分法に基づく全ケースの大阪府庁の NS 成分の速度波形(藤原・他, 2012)



(B) 藤原・他(2012):愛知県庁(3連動+遠州灘、ANNI4c-s-c スケーリング)

図 2.3-47 本検討と藤原・他(2012)の名古屋での計算波の速度フーリエスペクトルと速度波形



(B) 藤原・他(2012):東京都庁(3連動+遠州灘、ANNI4c-s-c スケーリング)

図 2.3-48 本検討と藤原・他(2012)の新宿での計算波の速度フーリエスペクトルと速度波形

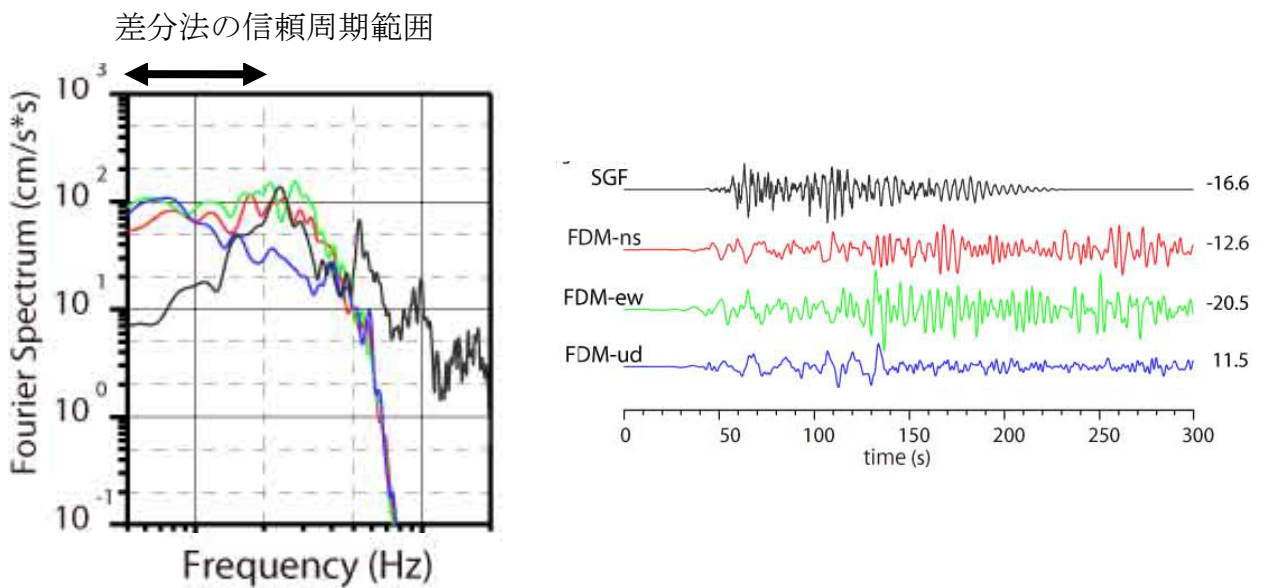
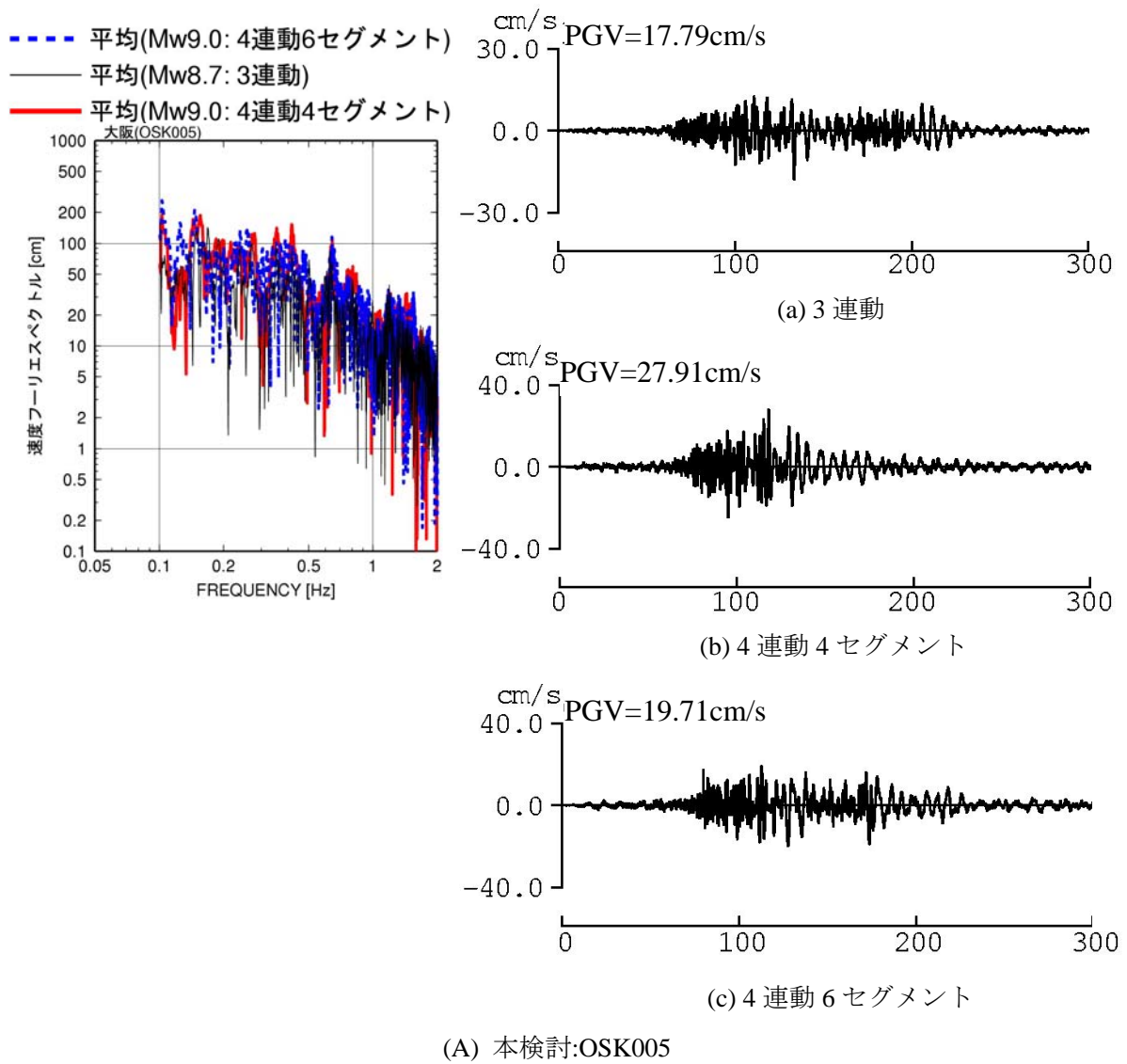


図 2.3-49 本検討と藤原・他(2012)の大阪での計算波の速度フーリエスペクトルと速度波形

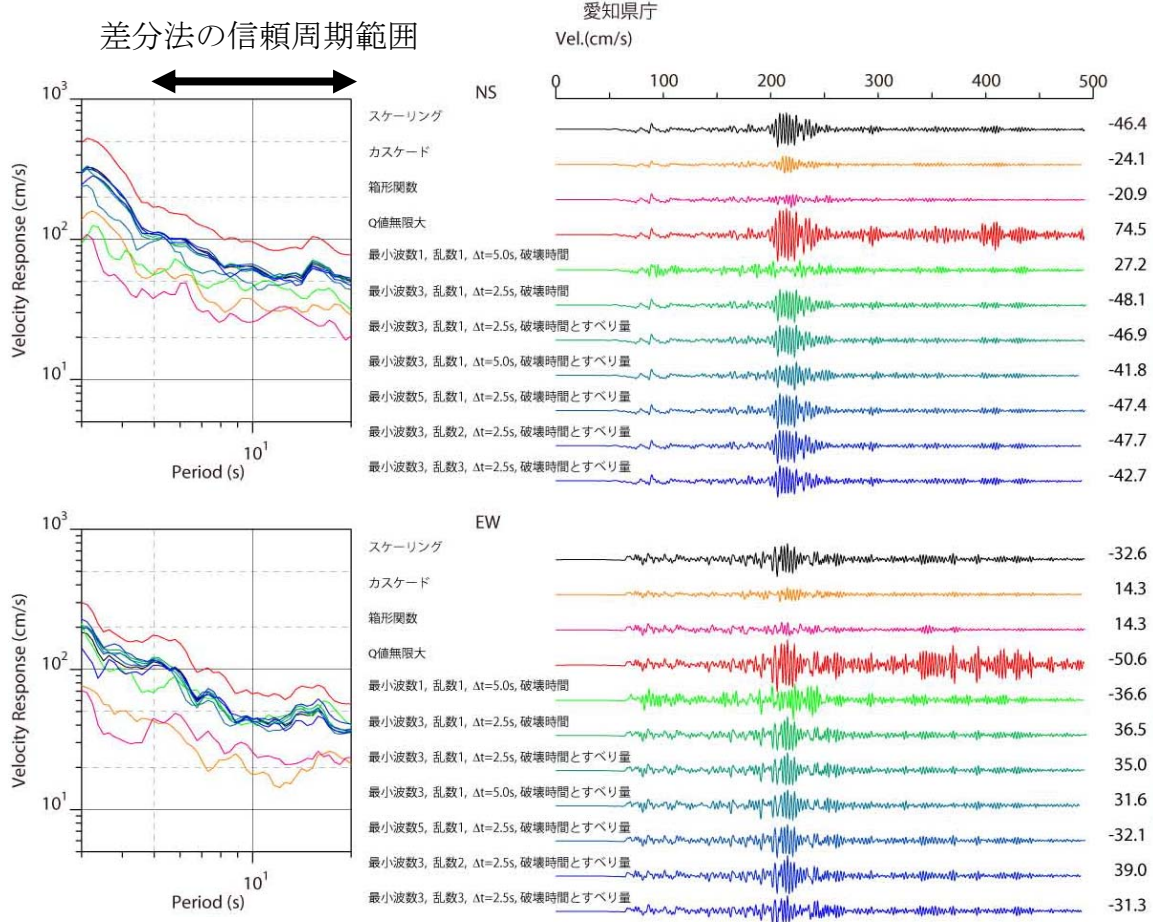
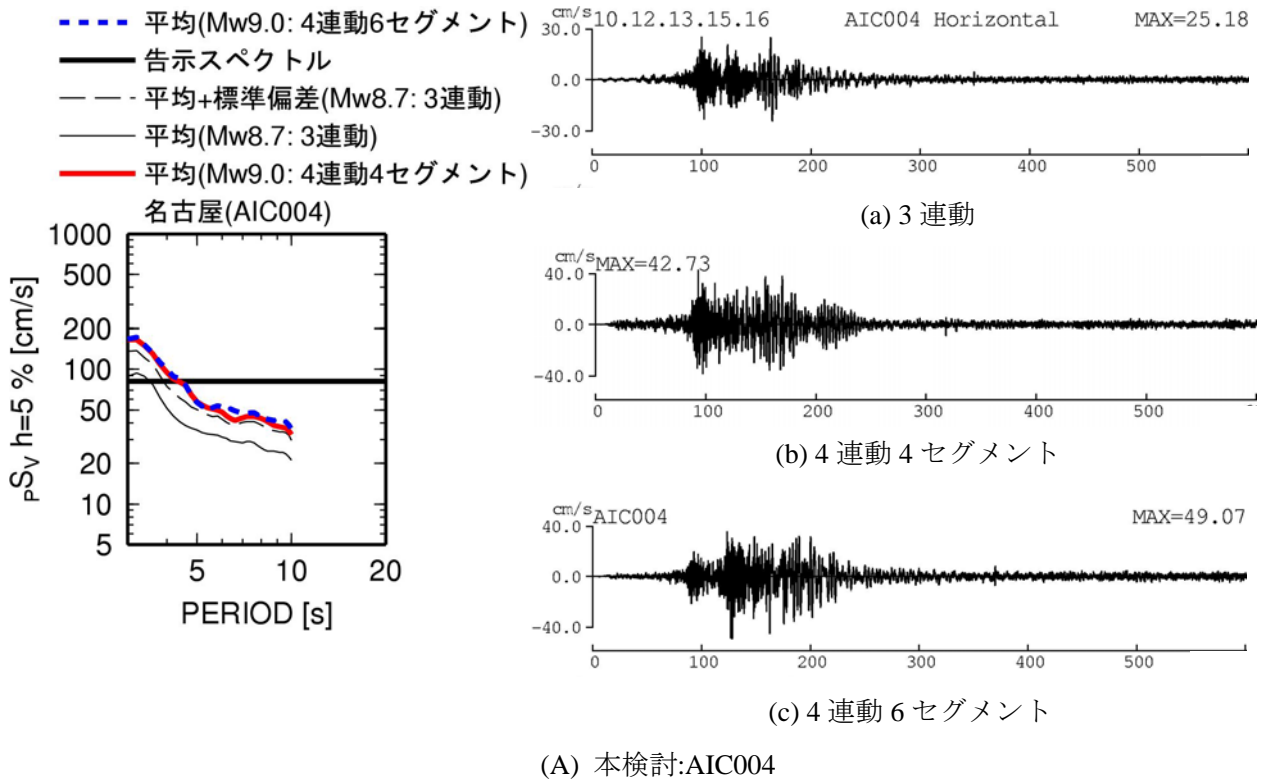
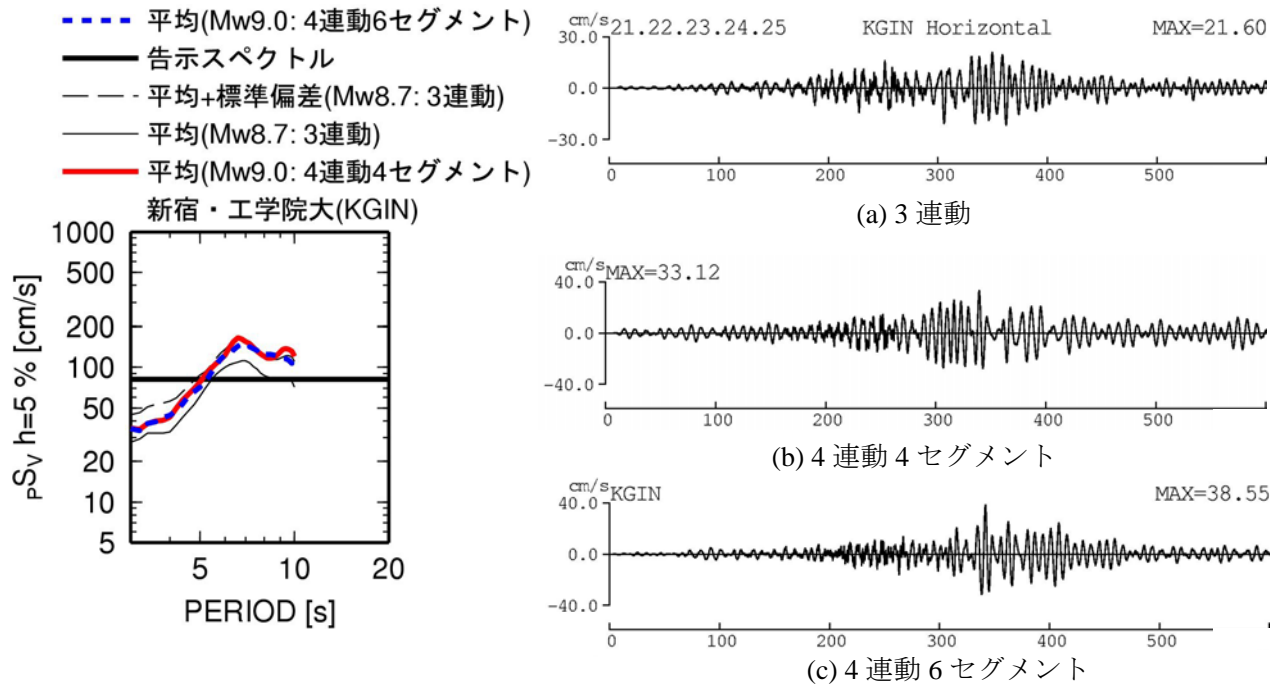
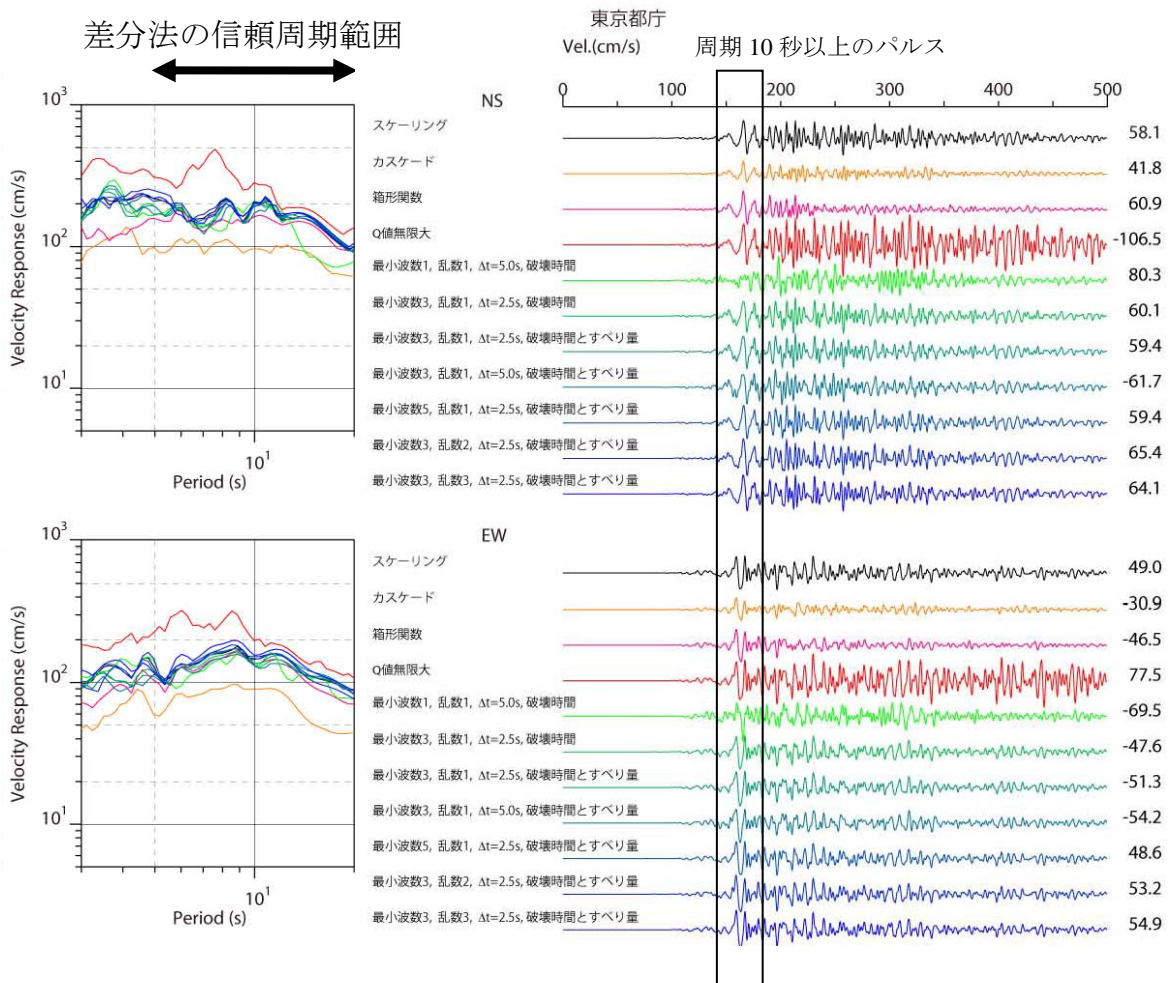


図 2.3-50 本検討と藤原・他(2012)の名古屋における計算波の速度応答スペクトルと速度波形



(A) 本検討 (工学院大学)



(B) 藤原・他(2012) : 東京都庁(3連動+遠州灘、ANNI4c-s-c)

図 2.3-51 本検討と藤原・他(2012)の新宿での計算波の速度応答スペクトルと速度波形

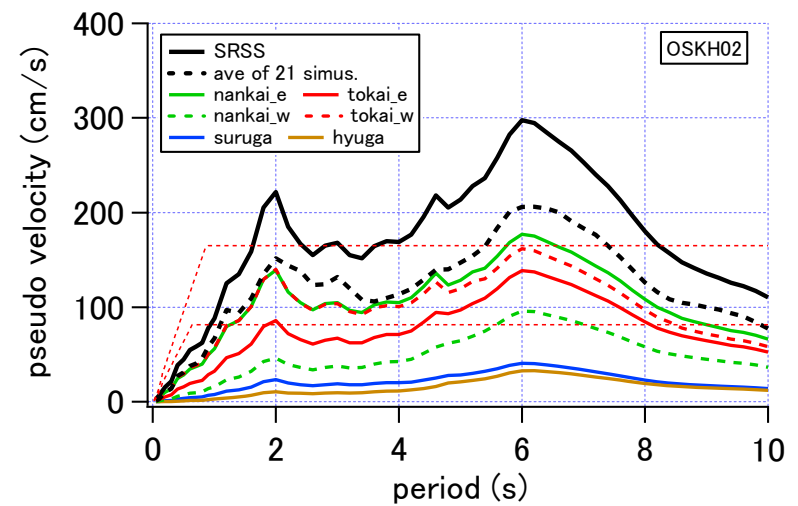
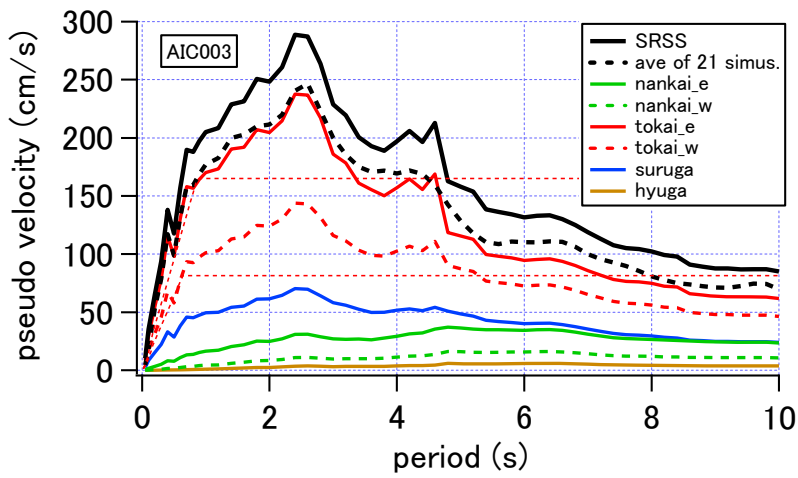
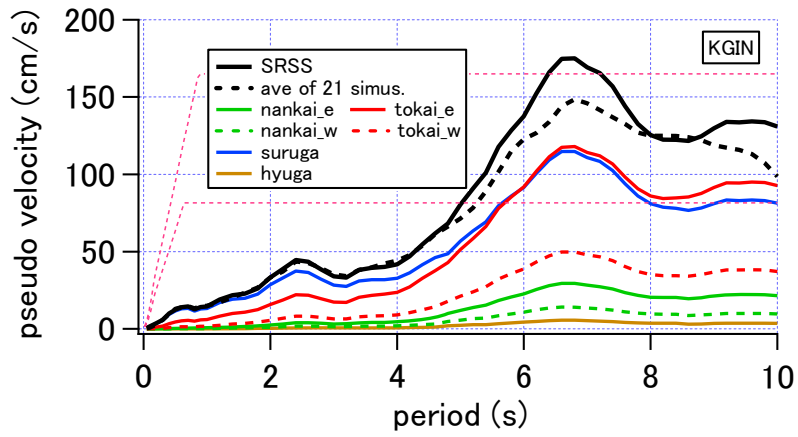


図 2.3-52 4連動6セグメントモデルによる擬似速度応答スペクトルと各セグメントからの擬似速度応答スペクトルとそのSRSS

2-4 工学的基盤における内閣府による計算波と本業務の計算波の比較

2-4-1 はじめに

内閣府(2012)により、南海トラフの巨大地震に対する計算波形のデジタル値が公開された。この計算波は工学的基盤での波であるため、本業務でも工学的基盤での波形を計算し、両者の比較を行う。

2-4-2 内閣府(2012)の震源モデルと手法の概要

内閣府(2012)の波形は、5km×5km メッシュの工学的基盤 (S 波速度 $V_s=350\sim 700\text{m/s}$ 相当層) における強震動(加速度)波形である。統計的グリーン関数法に基づき計算された波形であるため、周期 3 秒程度以下のみが有効である。内閣府(2012)では、強震動生成域の位置が異なる 4 ケースで計算を実施しているが、今回公開された波形は、図 2.4-1 に示す基本ケースと陸域ケースの 2 ケースである。表 2.4-1 には、基本ケースの断層パラメータを示す。

2-4-3 本業務の震源モデルと手法の概要

本業務の震源モデルは、内閣府(2012)の震源モデルに基づき設定した、4 連動 6 セグメントモデルである。2.3 節では、9 地点の地表での計算を行ったが、この 2.4 節では、工学的基盤での波形を計算する。

計算地点は、23 年度に 3 連動地震に対して地表の計算波形を作成した 22 地点に、西日本の 9 地点を加えた 31 地点である。図 2.4-1 に、震源モデルと計算地点を示す。表 2.4-2 に、本業務の断層パラメータを示す。図 2.4-2 には、計算地点のうち関東平野、濃尾平野、大阪平野での観測点位置を、フィリピン海プレートの地震に対する周期 5 秒での地盤増幅率分布とともに示す。表 2.4-3、表 2.4-4 に観測点リストを示す。なお、図 2.4-1 の▲で示した観測点では、2-2 節で作成した T_z をパラメータとした地盤増幅率とサイト係数の回帰式を用いて補間した場合の計算も実施した。なお、 T_z は、地震本部(2009)の地下構造モデルに基づく地震基盤から工学的基盤までの地盤の固有周期の 1/4 に相当する指標 ▲で示した観測点を代表観測点と呼ぶ。

なお、本業務の計算波は、2-3 で示した 3 つの手法のうち、以下のような三の丸波作成方法(宮腰・他, 2006)と同じ方法で作成した。

- ・擬似速度応答スペクトル ($h=5\%$) の対数平均値を算出
- ・21 波の速度波形のうち、最大速度が中央値の波の位相スペクトルを算出
- ・上記 2 つを用いて波形を再作成

2-4-4 工学的基盤波への変換

23 年度、K-NET、KiK-net 観測点での S 波検層結果に S 波速度 400m/s 以上の基盤が存在し、この層上面からの 1 次周期が 0.067 秒以下 (15Hz 以上) の観測点を工学的基盤の観測点として選択し、全国一律の工学的基盤補正係数を作成している。図 2.4-4 には、両条件のスペクトルの地盤増幅率が求められている工学的基盤の観測点の分布を示す。339 地点であったものが、S 波速度 600m/s 以下という条件を加えたことにより、237 地点となった。図 2.4-5 には、両条件の群遅延時間のサイト係数が求められている工学的基盤の観測点の分布を示す。332 地点であったものが、

S波速度 600m/s 以下という条件を加えたことにより、224 地点となった。両条件による工学的基盤補正係数を図 2.4-6、図 2.4-7 に示す。スペクトルの地盤増幅率、群遅延時間のサイト係数とも両条件によるの違いは小さい。そこで、以降の検討では、23 年度作成した工学的基盤補正係数を用いた。

周期 1 秒以上では、地表の地盤増幅率、サイト係数を用い、周期 0.5 秒以下では、工学的基盤補正係数を用いる。そして、周期 0.5～1 秒では、図 2.4-8 に示すマッチングフィルターを用いて、両者の重み付け平均として、工学的基盤波を計算する。Tz をパラメータとした補間の回帰式を用いた場合は、これを地表の地盤増幅率、サイト係数として、同様にして工学的基盤波を計算する。

2-4-5 計算波の比較

図 2.4-9、図 2.4-10 には、本業務と内閣府(2012)による計算波の擬似速度応答スペクトル(減衰定数 5%)の比較を示す。このうち、図 2.4-9 では、本業務の計算波として、回帰式を用いて補間した場合も示している。補間の回帰式を反映して、補間した場合は、補間しない場合に比べ、大きい地点ではやや小さく、小さい地点ではやや大きくなっている。ただし、両者の違いは、内閣府(2012)の基本ケースと陸域ケースの違い程度である。本業務と内閣府(2012)による計算波が比較できる 3 秒以下でみると、関東平野では両者はほぼ同レベルであり、特に本業務は内閣府(2012)の基本ケースと類似している。濃尾平野の 2 観測点では、周期 2 秒以下では、本業務は内閣府(2012)の陸域ケースレベルであるが、周期 2～3 秒では本業務は陸域ケースよりさらに大きい。大阪平野では、此花(OSKH02)で周期 2 秒前後で本業務の方が大きい。図 2.4-10 をみると、内閣府(2012)の陸域ケースにおいて、浜松(SZ0024)、徳島(TKS002)、高知(KOC007)などの震源直上の観測点で本業務のスペクトルレベルを超えている。ただし、これらの 3 観測点のうち徳島(TKS002)、高知(KOC007)では、基本ケースは本業務のスペクトルレベル程度である。関東平野や濃尾平野の観測点は、図 2.4-9 と同様の特徴がある。近畿地方の観測点では、奈良(NAR002)を除き、本業務の方が内閣府より小さい傾向がある。15 ページの九州の 2 観測点では、大分(OIT010)では本業務が内閣府の 2～3 倍と大きく、宮崎(MYZ013)ではほぼ同レベルである。近畿地方の観測点や九州の観測点での計算波の特徴については、5 節で考察する。

図 2.4-11、図 2.4-12 には、エネルギースペクトル(h=10%)について、図 2.4-9、図 2.4-10 と同様に示す。濃尾平野付近の観測点や此花(OSKH02)では、本業務の方が内閣府より大きい傾向が、応答スペクトルの場合より顕著である。これは、本業務の方が継続時間が長いと考えられる。

図 2.4-13～図 2.4-27 には、本業務と内閣府(2012)による計算波の 0.1～10Hz の加速度フィルター波を示す。本業務の代表観測点では、地盤増幅率とサイト係数の回帰式を用いて補間した場合の計算波も示している。補間した場合としない場合の波形の形状は類似している。関東平野では、本業務の方が内閣府(2012)より継続時間が長い特徴がある。これは、内閣府の計算波は周期 3 秒程度以下が有効周波数であるが、本業務の関東平野の観測点の波は周期 3 秒以上が卓越しているためと考えられる。その他の地域では、主要な部分の継続時間は類似している。これは、此花(OSKH02)を除くと、関東平野の観測点と比較して周期 3 秒以上の波がそれ以下の波に比べて小さいためと考えられる。本業務の計算波の最大加速度は、浜松(SZ0024)の 560cm/s^2 が最大で、TKS002

で 500cm/s^2 で 2 番目に大きい。濃尾平野では 300cm/s^2 程度である。一方、内閣府の計算波の最大加速度は、陸域ケースでは、浜松(SZ0024)で 1600cm/s^2 、高知(KOC007)で、 1500cm/s^2 程度と大きい。基本ケースでも 1000cm/s^2 、徳島(TKS002)や高知(KOC007)で 700cm/s^2 程度と大きい。

内閣府の計算波は周期 3 秒程度以下が有効周波数であるため、参考程度であるが、図 2.4-28～図 2.4-42 には、同様に $0.1\sim 10\text{Hz}$ の速度フィルター波を示す。本業務の最大速度は、関東平野では、東京都心部や横、埼玉南部で $20\sim 30\text{cm/s}$ 、埼玉北部や千葉では $10\sim 20\text{cm/s}$ である。濃尾平野の津島(AIC003)で約 70cm/s であるが、その他の濃尾平野や大阪平野、浜松では $40\sim 60\text{cm/s}$ である。徳島(TKS002)の最大速度が、本業務で計算した 31 観測点で最大で約 80cm/s 、大分で 2 番目に大きく 73cm/s である。一方、内閣府の計算波の最大速度は、陸域ケースでは、浜松(SZ0024)で約 170cm/s 、高知(KOC007)で 114cm/s と 100cm/s を超える地点もある。基本ケースでも、徳島(TKS002)で 85cm/s 、浜松(SZ0024)で 75cm/s と大きい。

なお、内閣府(2012)で用いている統計的グリーン関数法では、断層最短距離を X とし、 C を定数として $1/(X+C)$ で距離減衰すると仮定している。 C は 18km としているが、この値は暫定的なものであり、震源直上の震度の大きさを適正に評価するには、今後再検討が必要であると述べられている。したがって、本業務の経験式に基づく震源直上の計算波の妥当性の検証を、内閣府(2012)の計算波との比較から行うことは困難である。

2-4-6 考察

追加した観測点のうち、本業務の計算波が、内閣府の計算波に比べて小さい傾向にあった京都(KYT012)、滋賀(SIG010)、和歌山(WKY001)と、大きい特徴があった大分(OIT010)での計算波について、経験式作成に用いた観測記録を用いて考察を行う。

図 2.4-43(a)には、京都(KYT012)、滋賀(SIG010)、和歌山(WKY001)と、本業務と内閣府の計算波が同レベルであった奈良(NAR002)の位置と 2004 年 9 月 5 日 23:57 に発生した紀伊半島沖地震の本震($M_w7.4$)と約 5 時間前の前震($M_w7.2$)の震央位置とメカニズム解を示す。図 2.4-43(b)には、大分(OIT010)と、九州の観測点である宮崎(MYZ013)、四国の観測点である高知(KOC007)、徳島(TKS002)の位置と、1996 年 10 月 29 日と 10 月 3 日の日向灘の地震(共に $M_w6.7$)、2001 年芸予地震($M_w6.7$)の震央位置とメカニズム解を示す。なお、図 2.4-43 のコンターは、応答スペクトルの周期 3 秒での地盤増幅率である。

図 2.4-44(a)、(b)には、図 2.4-43(a)、(b)に示した観測点での応答スペクトルの地盤増幅率を示す。(a)をみると、奈良(NAR002)が一番大きいことがわかる。(b)をみると大分(OIT010)が 1 番大きく、周期 2～3 秒では他の 3 地点の 5 倍程度あることがわかる。

図 2.4-40 には、紀伊半島沖地震の前震と本震の観測擬似速度応答スペクトル(水平 2 成分の幾何平均)と、経験式の距離減衰特性を用いて、断層最短距離を 200km に補正した場合のスペクトルを示す。距離補正したスペクトルでみると両地震とも奈良(NAR002)で他の 3 地点より大きくなっており、このような特徴が地盤増幅率に反映されている。計算結果も、この特徴の影響を受けて、奈良(NAR002)では他の 3 観測点より大きくなっていると考えられる。

図 2.4-46 には、日向灘の 2 つの地震と芸予地震の観測擬似速度応答スペクトル(水平 2 成分の幾何平均)と、経験式の距離減衰特性を用いて、断層最短距離を 100km に補正した場合のスペクトル

ルを示す。距離補正したスペクトルで見ると、地震による違いがあるものの、大分(OIT010)では他の観測点より周期2~3秒で2~5倍大きくなっており、このような特徴が地盤増幅率に反映されている。この特徴の影響を受けて、本業務の計算波は大分(OIT010)で大きくなったものと考えられる。

内閣府(2012)の波形データの位置は、約1km間隔の3次メッシュで与えられ、5個間隔の3次メッシュの波形が公開されているため、結果的に5km×5km間隔のデータとなっている。観測点と3次メッシュの位置の違いに例を図2.4-47に示す。図2.4-47(a)には、KYT012、SIG010、図2.4-47(b)には、OIT010の観測点位置を▲で、最も近い3次メッシュの範囲を□で示している。図2.4-47のコンターは地震本部(2012)に基づく地震基盤深さである。OIT010では地震基盤が3km程度と、東京都心部と同程度に堆積層厚が厚いことがわかる。また、3次メッシュの範囲と観測点が離れている場合もあり、地下構造が急変する地域では、計算位置が異なることにより計算結果に若干の違いが生じる可能性が考えられる。

図2.4-48には、23年度計算した、地震本部(2012)の南海地震(Mw8.4)の震源モデルに基づく京都(KYT012)、滋賀(SIG010)、和歌山(WKY001)、奈良(NAR002)での経験式に基づく計算波(地表)と地震本部の計算波の擬似速度応答スペクトルの比較を示す。本業務の改良経験式に基づく計算波のスペクトルは周期2~10秒で、地震本部の計算波のスペクトルとほぼ同じレベルであったことが確認できる。

最後に、三次元有限差分法による南海地震(Mw8.5)の大分(OIT010)の計算波(岩城・他, 2009)との比較を行う。岩城・他(2009)は、図2.4-49に示す破壊開始点が東にあるケース(east-hypo)と西にあるケース(west-hypo)で計算を行っている。図2.4-50には、岩城・他(2009)の計算波と、本業務と内閣府(2012)の4連動地震の計算波の擬似速度応答スペクトルを示す。岩城・他(2009)の計算波は、破壊開始点が東にある場合は、EW成分では周期3秒で150cm/s程度であり、周期6~8秒では350cm/s程度に達している。したがって、本業務の計算波が必ずしも大きすぎるわけではないものと考えられる。

2-4-7 まとめ

南海トラフ沿いの4連動地震(Mw9.0)に対する、経験式に基づく本業務の計算波と、統計的グリーン関数法に基づく内閣府(2012)の計算波(基本ケースと陸域ケース)との比較を行った。

両者が比較できる周期3秒以下のスペクトルは、関東平野ではほぼ同レベルであった。濃尾平野では、本業務の方が周期2~3秒でやや大きい地点が多かった。大阪平野では、大阪府では本業務がやや大きいか同レベルであったが、京都や大津などで本業務がやや小さかった。大分では、本業務が内閣府に比べてはるかに大きい特徴があったが、本業務の計算波は南海地震(Mw8.5)に対する三次元有限差分法による計算波(岩城・他, 2009)より小さいか同程度であった。震源直上の観測点である浜松や高知、徳島などでは、最大加速度が内閣府の方が本業務よりはるかに大きく、周期3秒以上の成分が乏しいのにもかかわらず最大速度も内閣府の方が本業務より大きい傾向があった。ただし、内閣府(2012)の計算波については、震源直上の震度の大きさを適正に評価するには、今後再検討が必要であると明記されている。したがって、内閣府(2012)の計算波との比較に基づく本業務の震源直上の計算波の妥当性の検証は困難である。

また、本業務の計算波では、地盤増幅率とサイト係数を T_z を用いて補間した場合と補間しない場合の比較を行ったが、両者の違いは、内閣府(2012)の計算波の基本ケースと陸域ケースの違い程度であることがわかった。

参考文献

- 岩城麻子・岩田知孝・関口春子・浅野公之・吉見雅行・鈴木晴彦(2009). 大分平野における想定南海地震による長周期地震動のシミュレーション, 地震 第2輯, 第61巻, pp.161-173.
- 宮腰淳一・中田猛・福和伸夫・柴田昭彦・白瀬陽一・斎藤賢二(2006). 名古屋市三の丸地区における耐震改修用の基準地震動の作成, 日本地震工学会大会, pp.394-395.
- 内閣府(2012). 南海トラフの巨大地震に関する津波高、浸水域、被害想定公表について
http://www.bousai.go.jp/nankaitrough_info.html
- 地震調査研究推進本部(2009). 「長周期地震動予測地図」2009年試作版、
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_choshuki/choshuki2009.pdf
- 地震調査研究推進本部(2012). 「長周期地震動予測地図 2.4-」2012年試作版、
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/index.htm

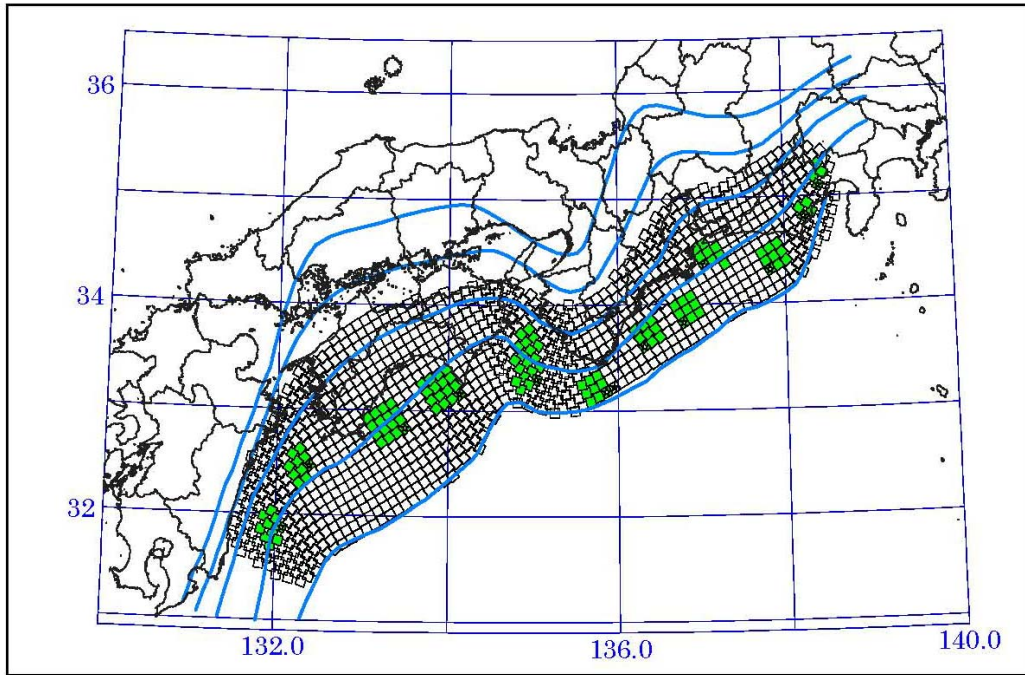


図3.3 強震動生成域の設定の検討ケース(基本ケース)

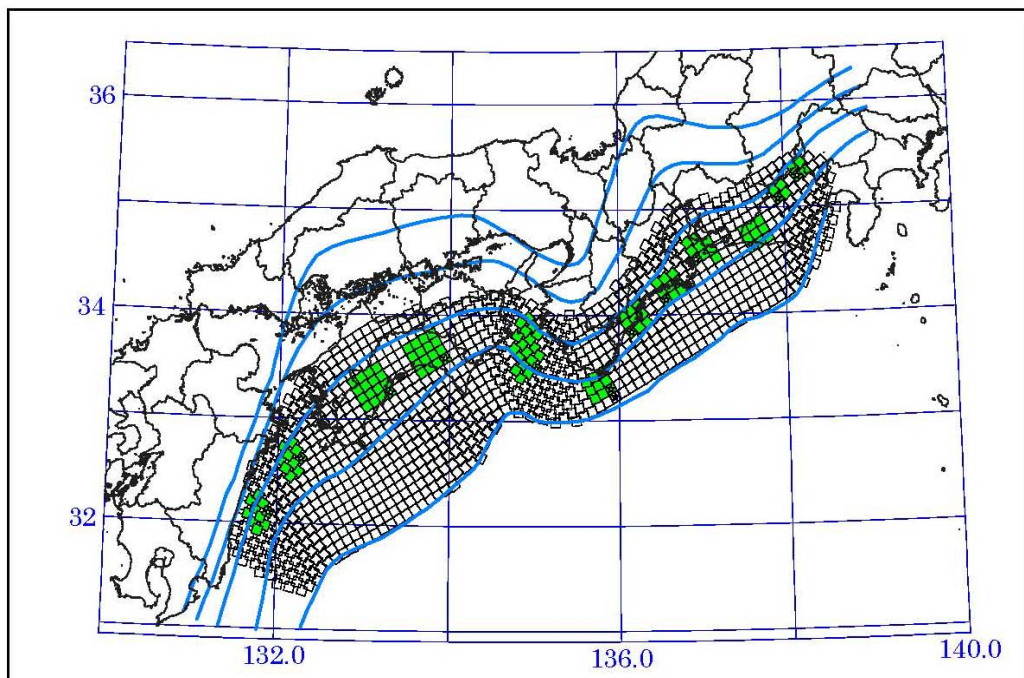


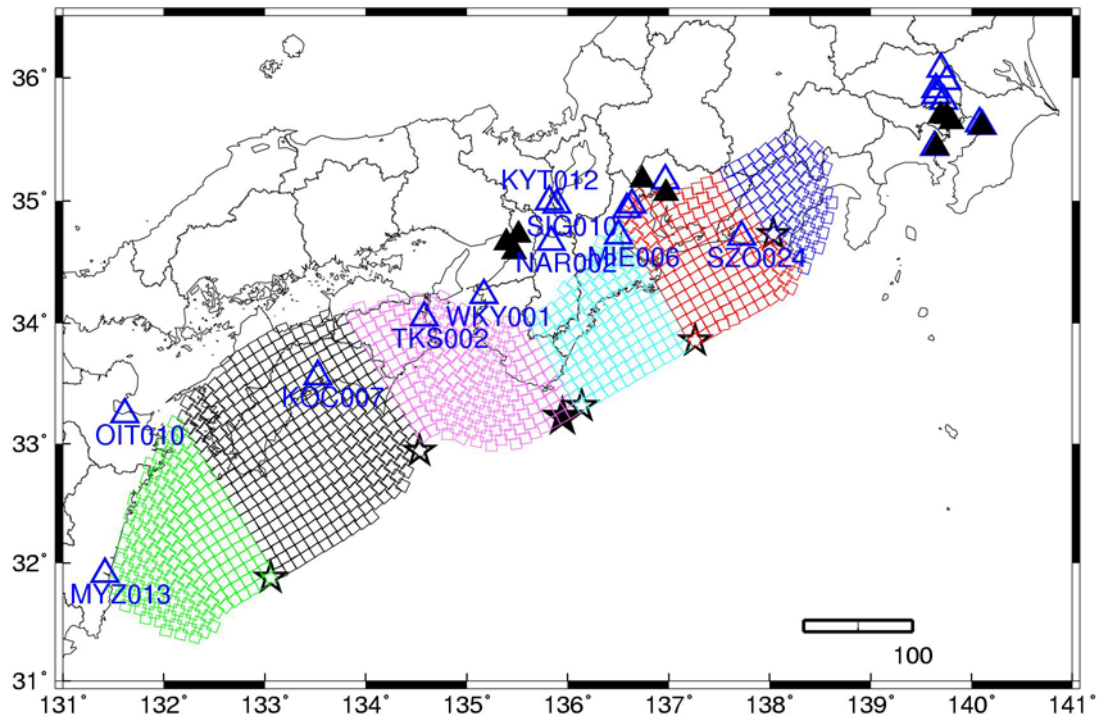
図3.6 強震動生成域の設定の検討ケース(陸側ケース)

図 2. 4-1 内閣府(2012)により、統計的グリーン関数法による強震動計算波形のデジタル値が公開されている2つのケースの強震動生成域の位置(内閣府, 2012)

表 2.4-1 内閣府(2012)の設定している断層パラメータ

表6.2 強震断層モデルのパラメータ一覧(基本ケース)

全体	面積(km ²)	110,150			
	応力パラメータ (MPa)	2.3			
	平均すべり量(m)	7.6			
	地震モーメント(Nm)	3.4E+22			
	Mw	9.0			
各セグメント	セグメント名	日向灘域	南海域	東海域	駿河湾域
	面積(km ²)	19,053	53,790	29,419	7,888
	平均応力降下量(MPa)	4	4	4	4
	平均すべり量(m)	5.5	9.3	6.9	3.6
	地震モーメント(Nm)	4.3E+21	2.0E+22	8.3E+21	1.2E+21
	Mw	8.4	8.8	8.5	8.0
強震動生成域 SMGA	面積(km ²)	2,047	6,109	3,661	853
	面積比	11%	11%	12%	11%
	平均すべり量(m)	11.1	18.6	13.7	7.1
	地震モーメント(Nm)	9.3E+20	4.7E+21	2.1E+21	2.5E+20
	Mw	7.9	8.4	8.1	7.5
強震動生成域 SMGA①	面積(km ²)	1,018	1,953	910	438
	応力パラメータ (MPa)	34.5	46.4	45.4	34.4
	平均すべり量(m)	11.0	20.5	13.7	7.2
	地震モーメント(Nm)	4.6E+20	1.6E+21	5.1E+20	1.3E+20
	Mw	7.7	8.1	7.7	7.3
強震動生成域 SMGA②	面積(km ²)	1,029	1,615	914	415
	応力パラメータ(MPa)	34.5	46.4	45.4	34.4
	平均すべり量(m)	11.1	18.7	13.7	7.0
	地震モーメント(Nm)	4.7E+20	1.2E+21	5.1E+20	1.2E+20
	Mw	7.7	8.0	7.7	7.3
強震動生成域 SMGA③	面積(km ²)	/	1,612	913	/
	応力パラメータ (MPa)		46.4	45.4	
	平均すべり量(m)		18.7	13.7	
	地震モーメント(Nm)		1.2E+21	5.1E+20	
	Mw		8.0	7.7	
強震動生成域 SMGA④	面積(km ²)	/	929	924	/
	応力パラメータ (MPa)		46.4	45.4	
	平均すべり量(m)		14.2	13.8	
	地震モーメント(Nm)		5.4E+20	5.2E+20	
	Mw		7.8	7.7	
背景領域	面積(km ²)	17,006	47,681	25,758	7,035
	応力パラメータ (MPa)	3.7	3.7	3.7	3.7
	平均すべり量(m)	4.9	8.1	5.9	3.1
	地震モーメント(Nm)	3.4E+21	1.6E+22	6.2E+21	9.0E+20
	Mw	8.3	8.7	8.5	7.9
そのほか	破壊伝播速度(km/s)	2.7	2.7	2.7	2.7
	fmax(Hz)	6Hz	6Hz	6Hz	6Hz
	剛性率(Nm ²)	4.1E+10	4.1E+10	4.1E+10	4.1E+10



★：震央位置(第1破壊開始点) ☆：各セグメントでの破壊開始点

▲と△：計算地点 (このうち▲ではTzによる補間の回帰式に基づく計算も実施)

図 2.4-2 内閣府(2012)の巨視的断層モデルに基づく本検討の4連動6セグメントモデルと計算地点

表 2.4-2 本業務の4連動6セグメントモデルの震源パラメーター

	M_0 [dyne · cm]	M_w	破壊時間差[s]	参考文献	参考文献中での M_0 と M_w
日向灘域	4.3×10^{28}	8.4	114.7	内閣府(2012)	同じ
南海域 西断層	5.0×10^{28}	8.4	50.3	内閣府(2012)	1.26×10^{29} ($M_w 8.7$)
南海域 東断層	5.0×10^{28}	8.4	0.0	内閣府(2012)	7.77×10^{28} ($M_w 8.5$)
東海域 西断層	3.97×10^{28}	8.3	7.4	内閣府(2012)	同じ
東海域 東断層	4.31×10^{28}	8.4	51.8	内閣府(2012)	同じ
駿河湾域	1.2×10^{28}	8.0	94.4	内閣府(2012)	同じ
全体	2.38×10^{29}	8.9		内閣府(2012)	3.4×10^{29} ($M_w 9.0$)

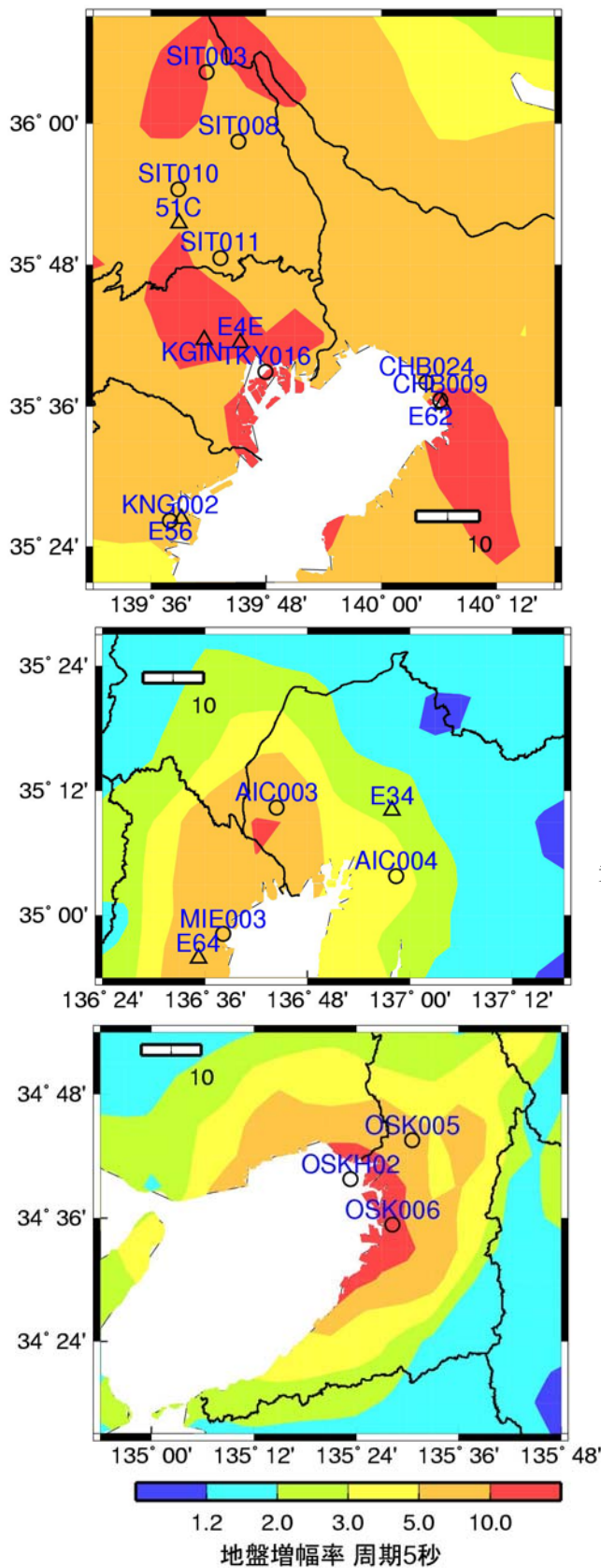


表 2.4-3 23年度、3連動地震を計算した観測点と共通の観測点

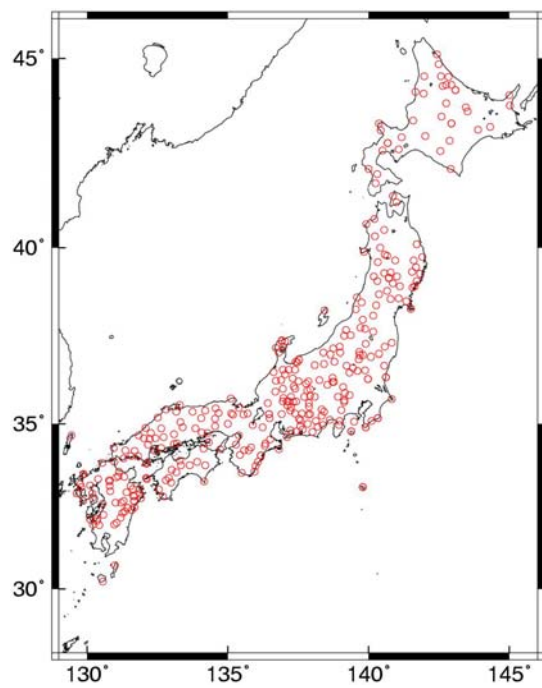
E62	千葉
CHB009	千葉
CHB024	稲毛
SIT003	久喜
SIT008	春日部
SIT010	大宮
51C	さいたま
SIT011	川口
E4E	大手町
KGIN	新宿
TKY016	東雲
E56	横浜
KNG002	横浜
SZ0024	浜松
E34	JMA名古屋
AIC004	名古屋
AIC003	津島
MIE003	四日市
E64	四日市
OSK005	大阪
OSKH02	此花
OSK006	堺

黄色の代表観測点では Tz による回帰式を用いた計算も実施

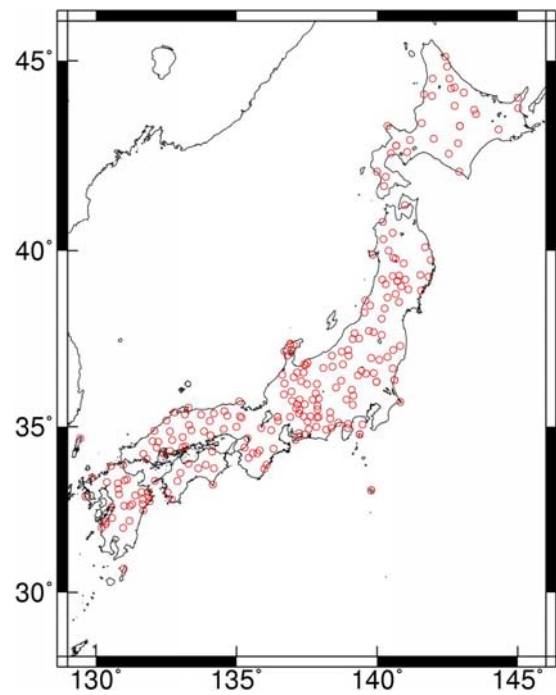
表 2.4-4 今年度、追加した西日本の観測点

NAR002	奈良
KOC007	高知
TKS002	徳島
WKY001	和歌山
MIE006	津
SIG010	大津
MYZ013	宮崎
OIT010	大分
KYT012	京都

図 2.4-3 図 2.4-2 の観測点のうち関東平野、濃尾平野、大阪平野の観測点

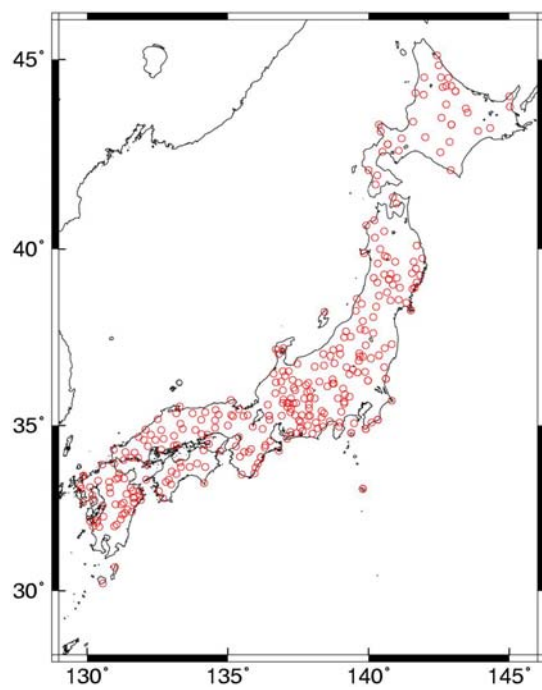


(a) $400\text{m/s} \leq V_s$

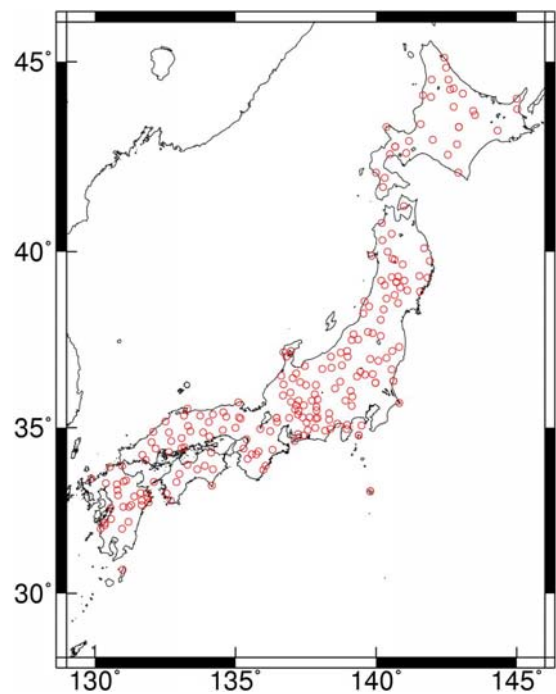


(b) $400\text{m/s} \leq V_s \leq 600\text{m/s}$

図 2.4-4 スペクトルの工学的基盤の地盤増幅率の算出に用いた工学的基盤の観測点



(a) $400\text{m/s} \leq V_s$



(b) $400\text{m/s} \leq V_s \leq 600\text{m/s}$

図 2.4-5 群遅延時間のサイト係数算出に用いた工学的基盤の観測点

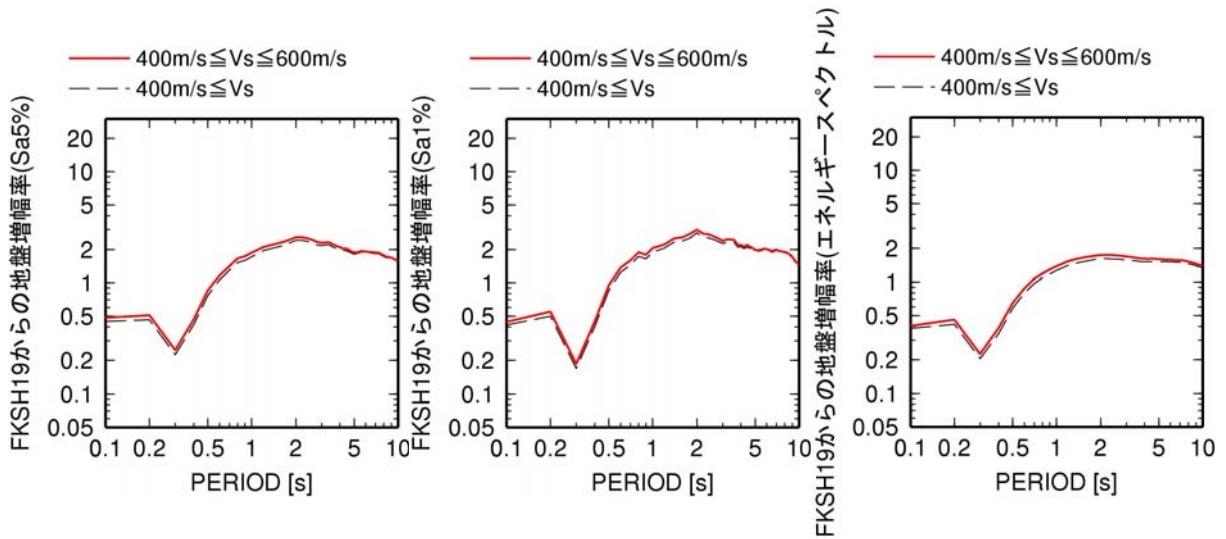


図 2.4-6 スペクトルの経験式の工学的基盤での地盤増幅率

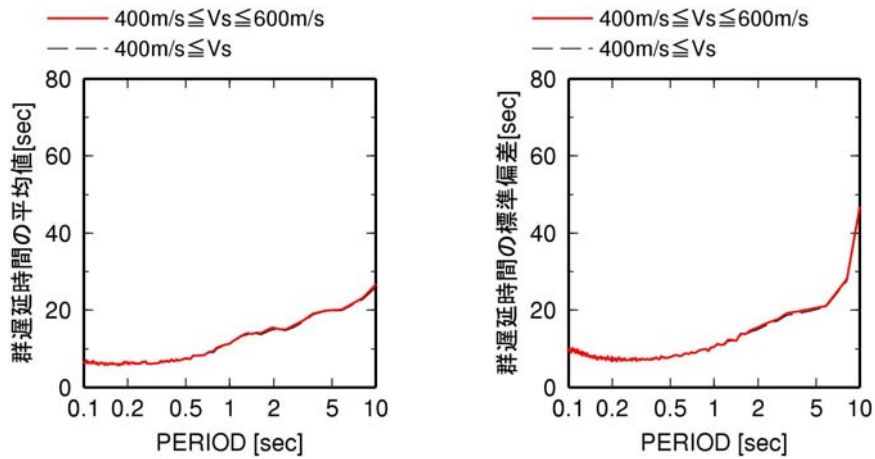


図 2.4-7 群遅延時間の経験式の工学的基盤でのサイト係数

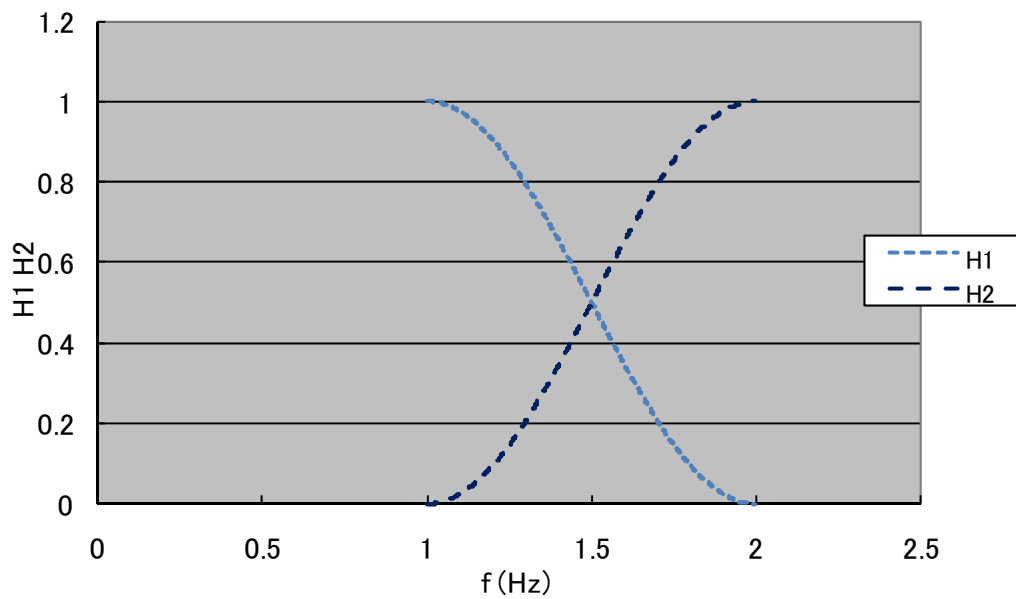


図 2.4-8 マッチングフィルター

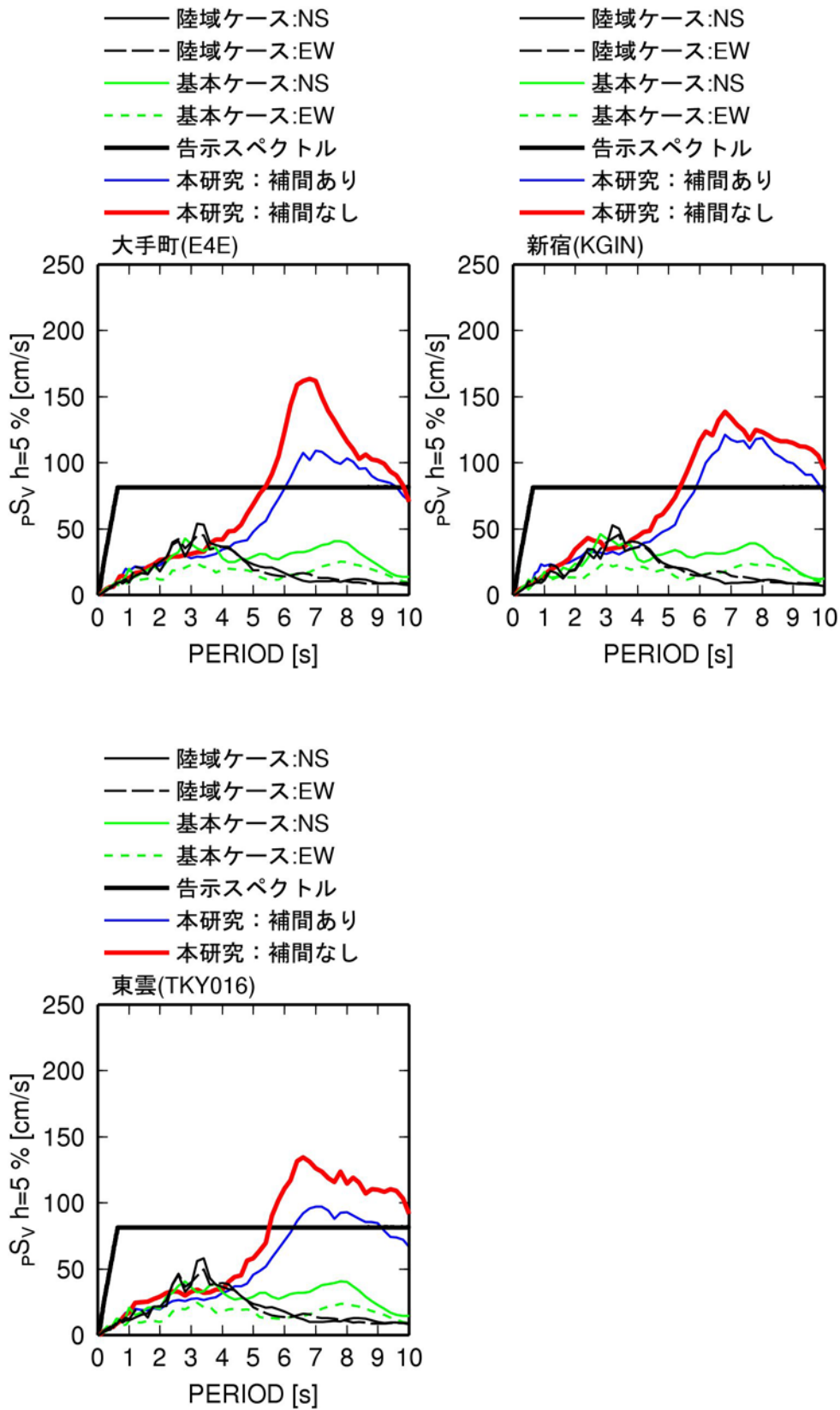


図 2.4-9 本業務(Tzによる補間ありとなし)と内閣府(2012)による計算波の擬似速度応答スペクトル(h=5%)の比較

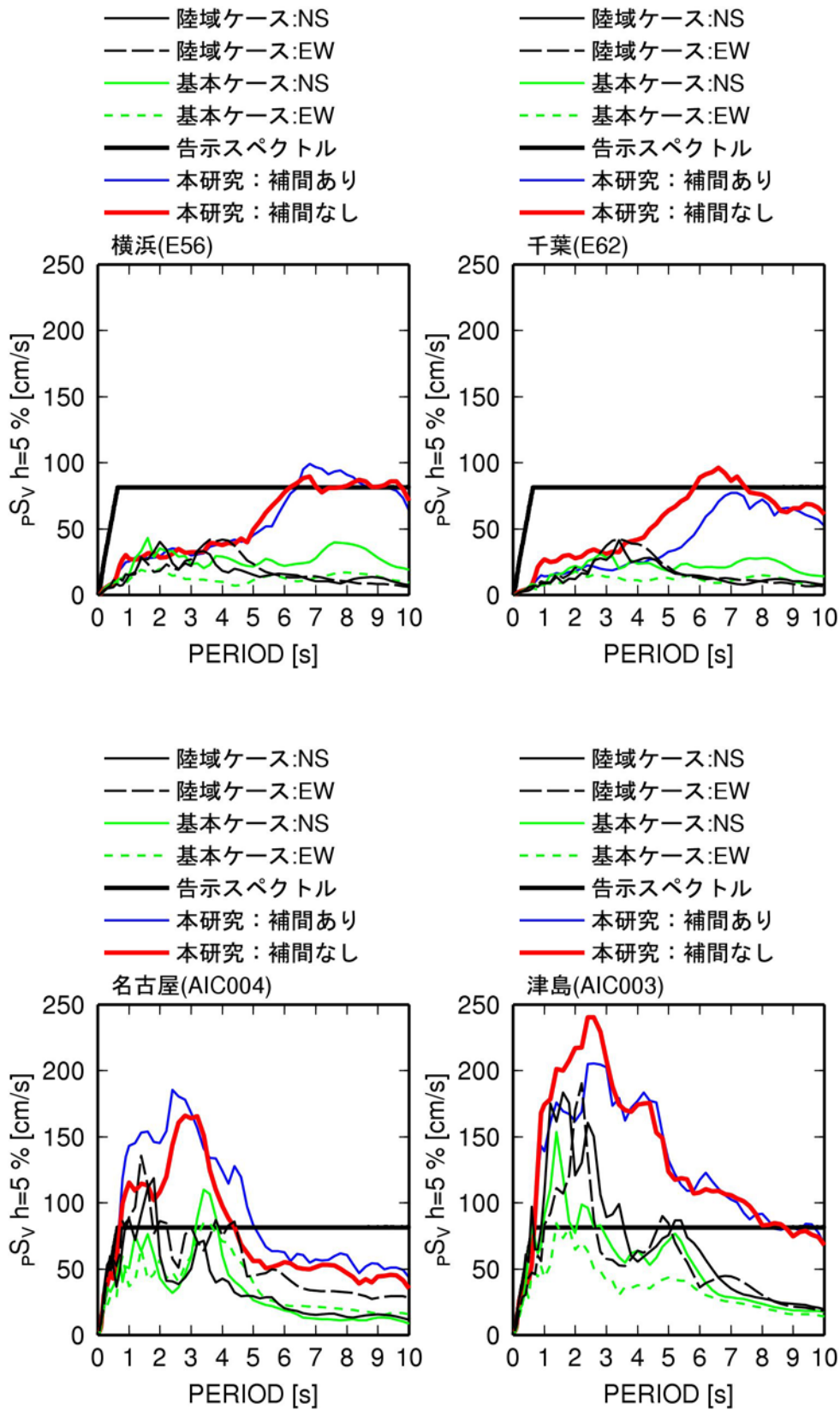


図 2.4-9 本業務(Tz による補間ありとなし)と内閣府(2012)による計算波の擬似速度応答スペクトル(h=5%)の比較(続き)

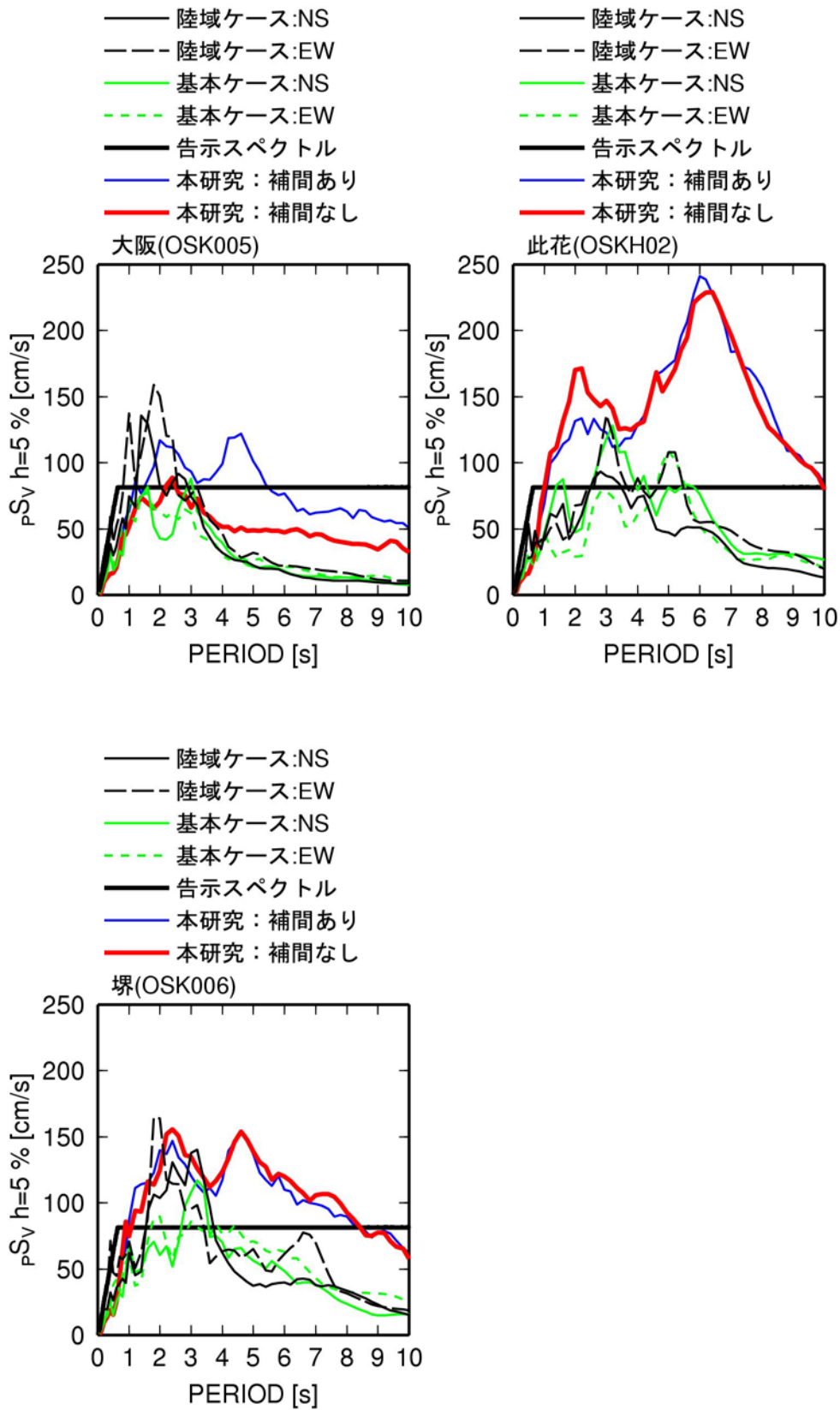


図 2.4-9 本業務(Tzによる補間ありとなし)と内閣府(2012)による計算波の擬似速度応答スペクトル(h=5%)の比較(続き)

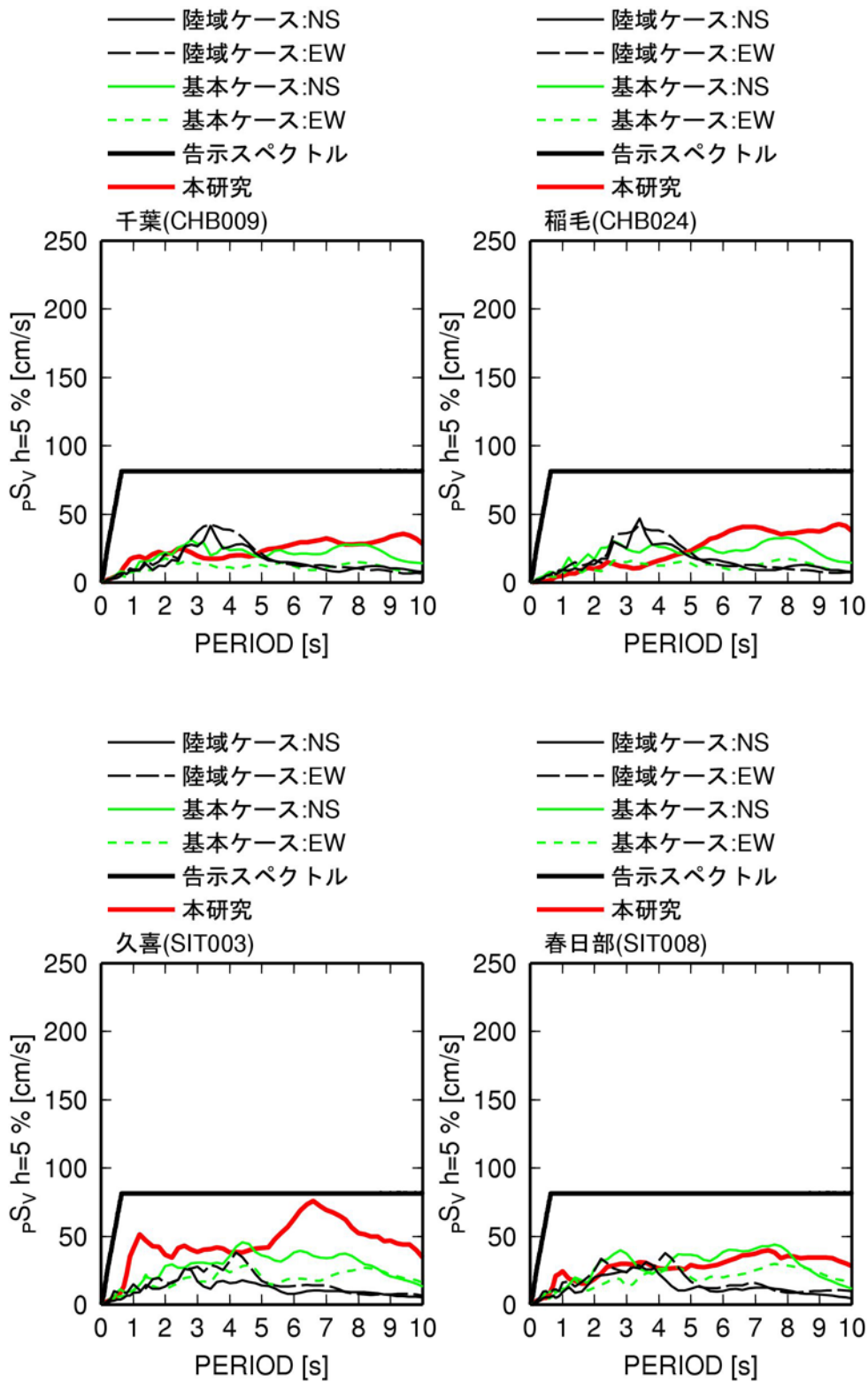


図 2.4-10 本業務(Tzによる補間なし)と内閣府(2012)による計算波の擬似速度応答スペクトル (h=5%)の比較

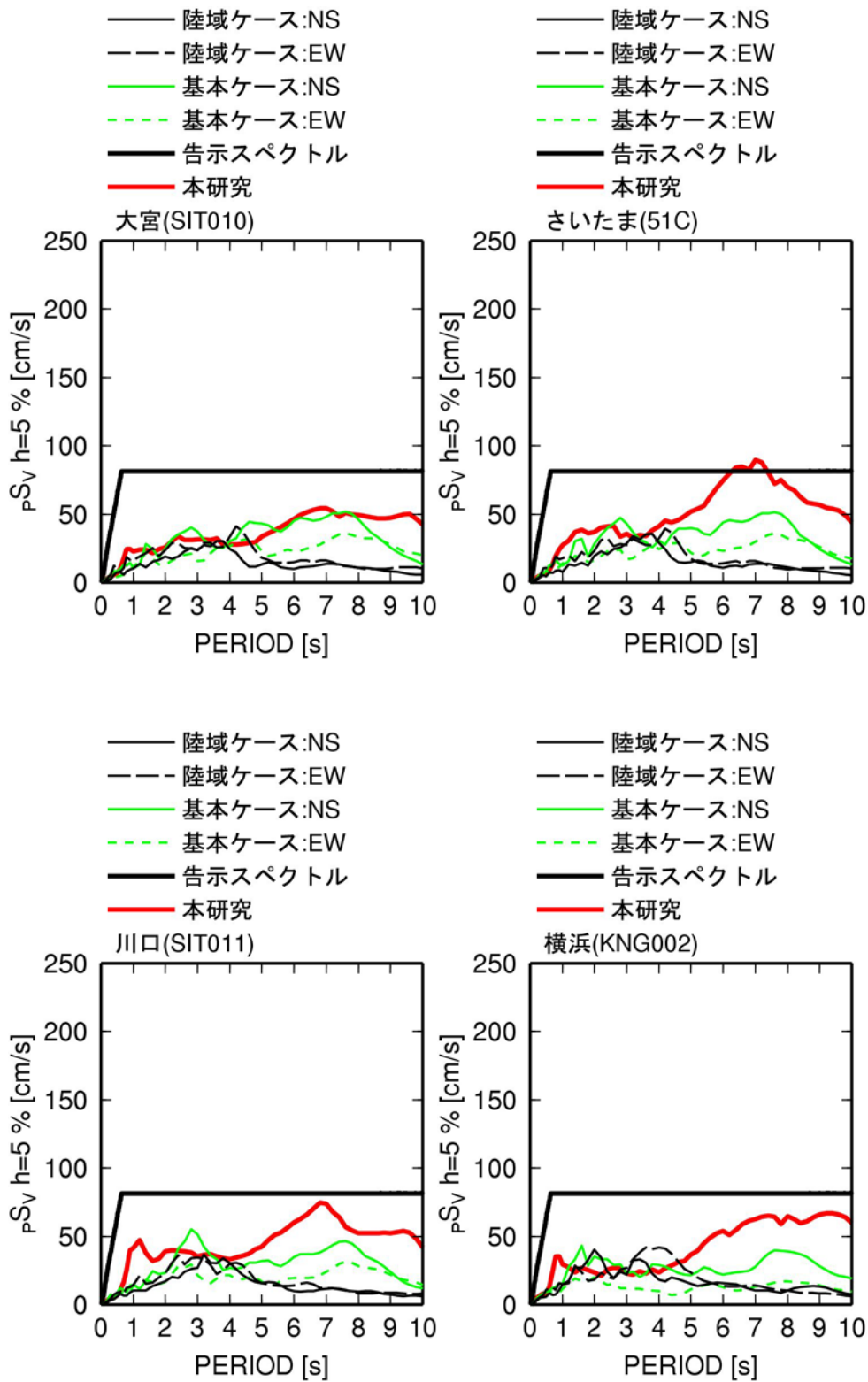


図 2.4-10 本業務(Tzによる補間なし)と内閣府(2012)による計算波の擬似速度応答スペクトル (h=5%)の比較(続き)

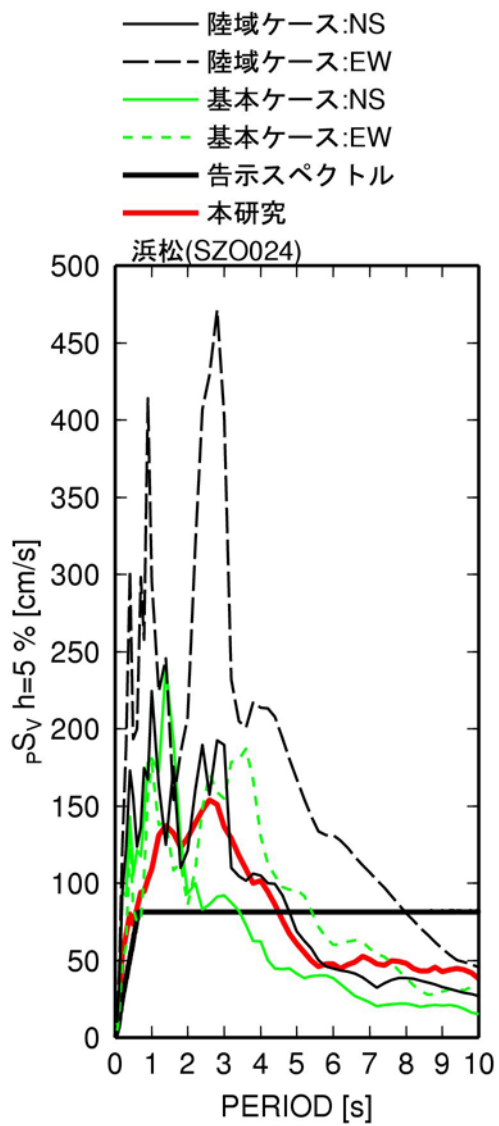


図 2.4-10 本業務(Tzによる補間なし)と内閣府(2012)による計算波の擬似速度応答スペクトル (h=5%)の比較(続き)

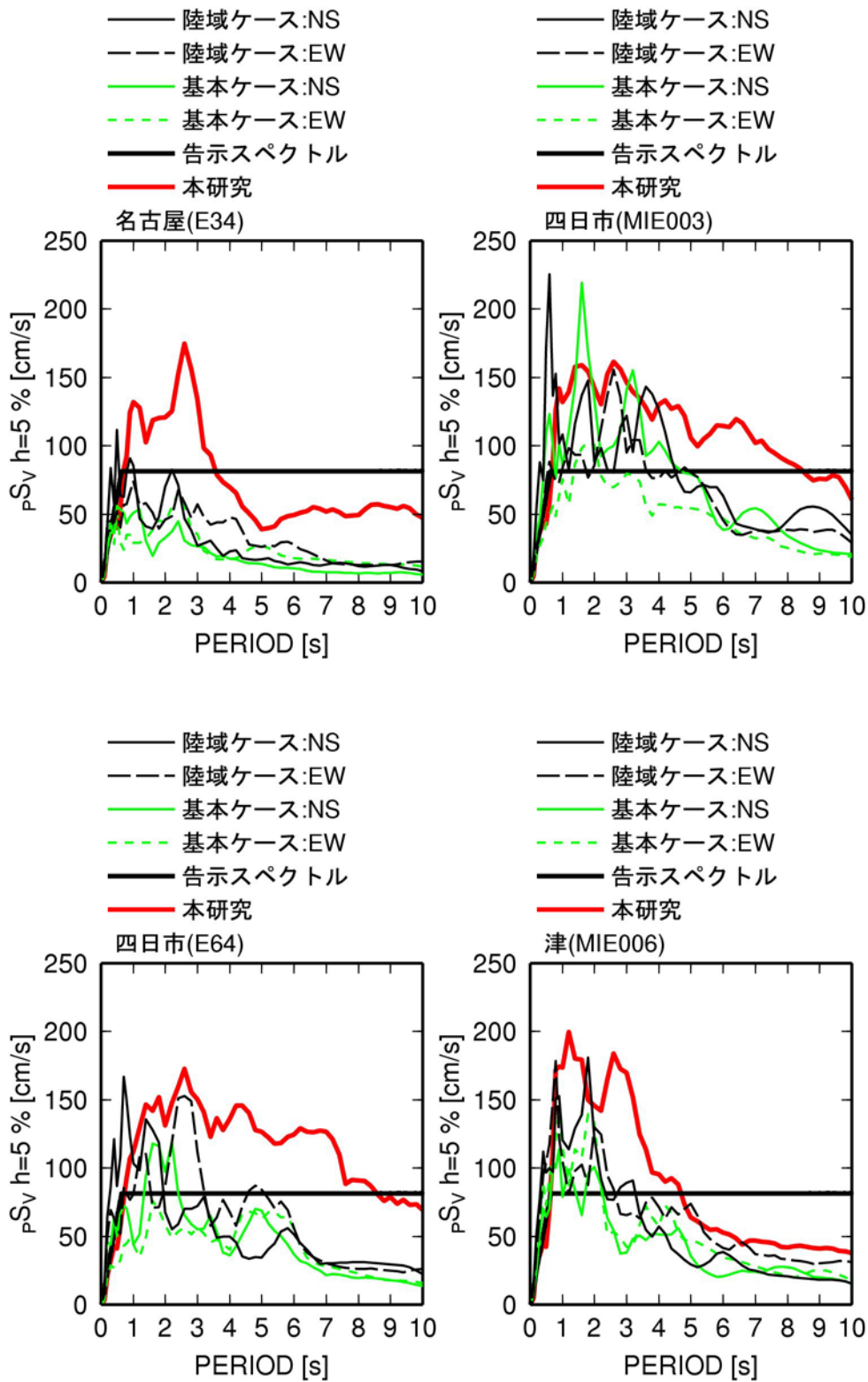


図 2.4-10 本業務(Tzによる補間なし)と内閣府(2012)による計算波の擬似速度応答スペクトル (h=5%)の比較(続き)

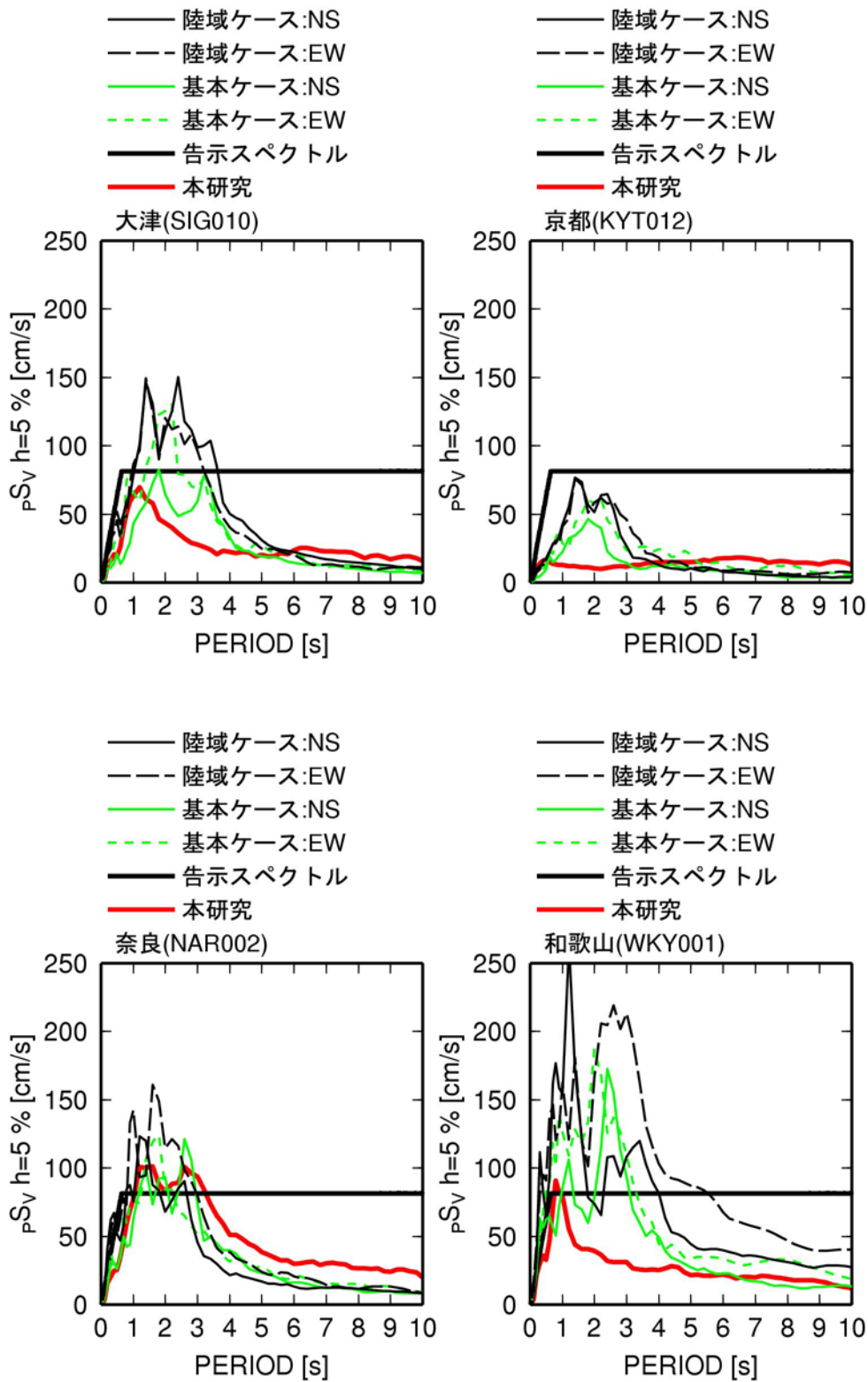


図 2.4-10 本業務(Tzによる補間なし)と内閣府(2012)による計算波の擬似速度応答スペクトル (h=5%)の比較(続き)

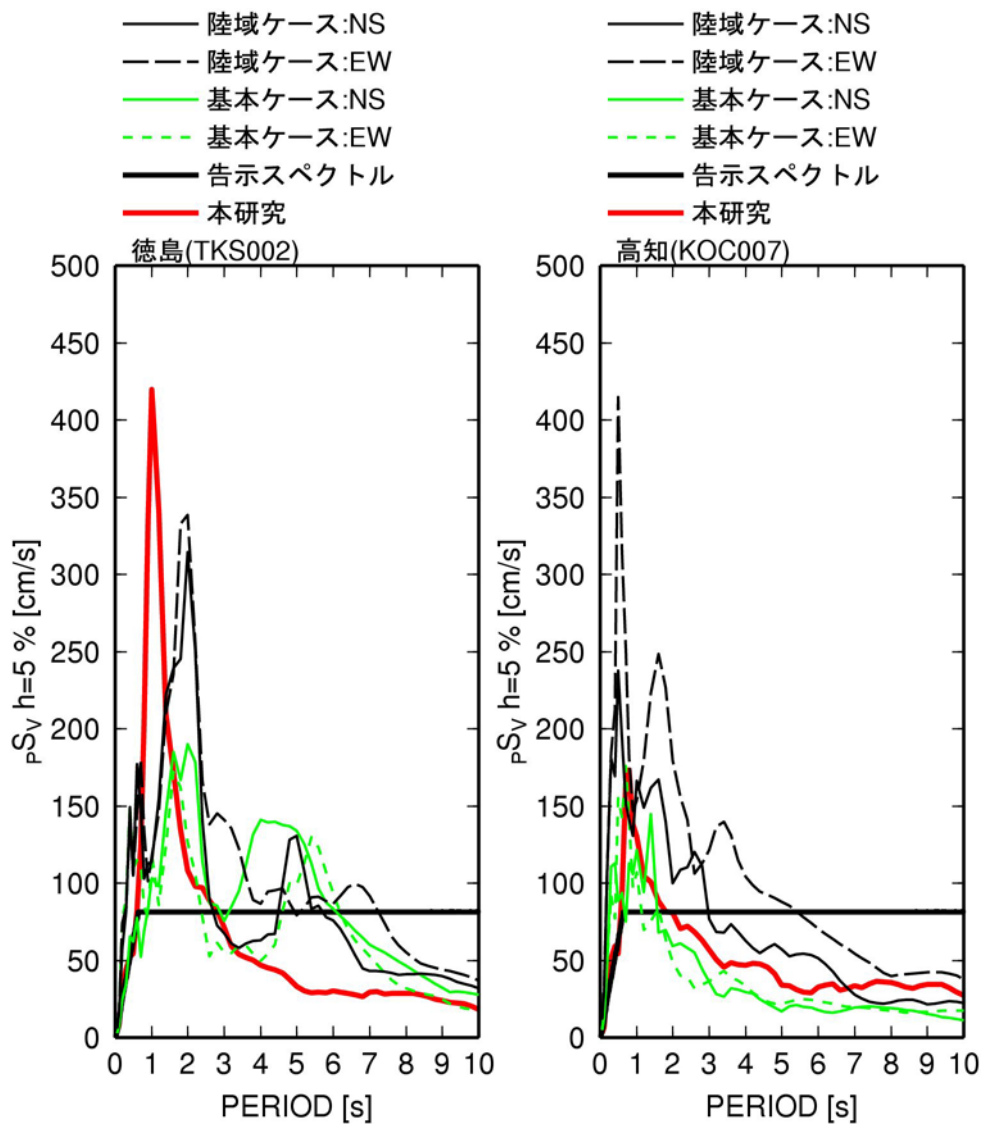


図 2.4-10 本業務(Tzによる補間なし)と内閣府(2012)による計算波の擬似速度応答スペクトル (h=5%)の比較(続き)

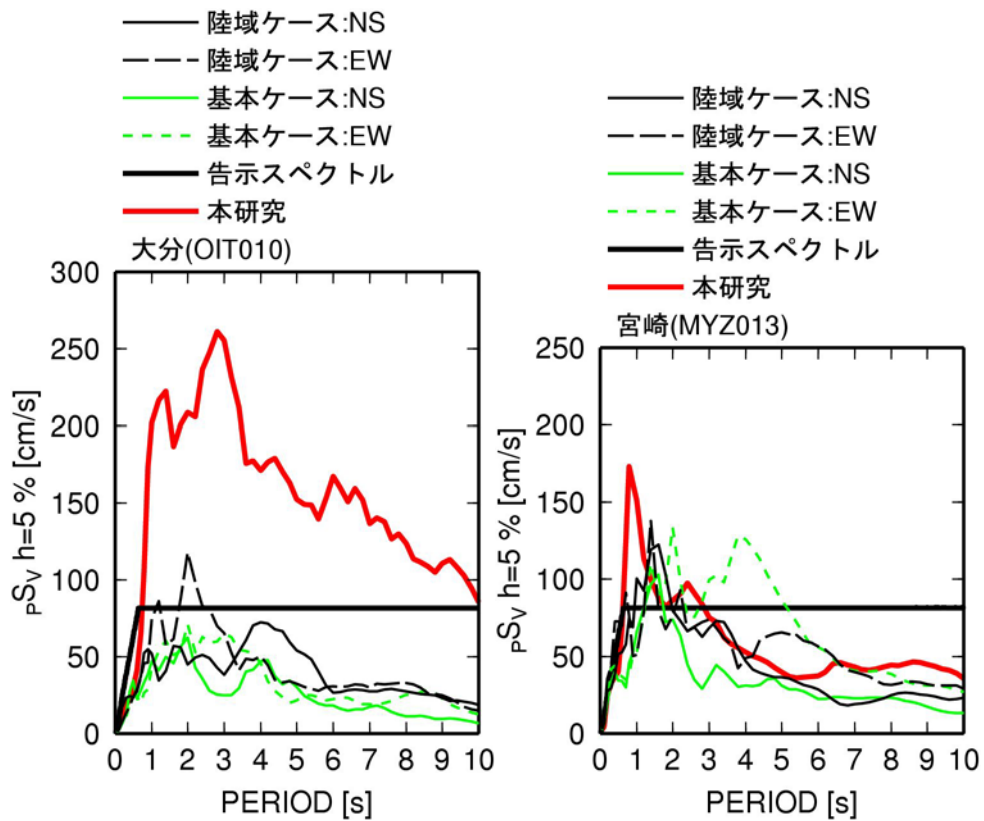


図 2.4-10 本業務(Tzによる補間なし)と内閣府(2012)による計算波の擬似速度応答スペクトル (h=5%)の比較(続き)

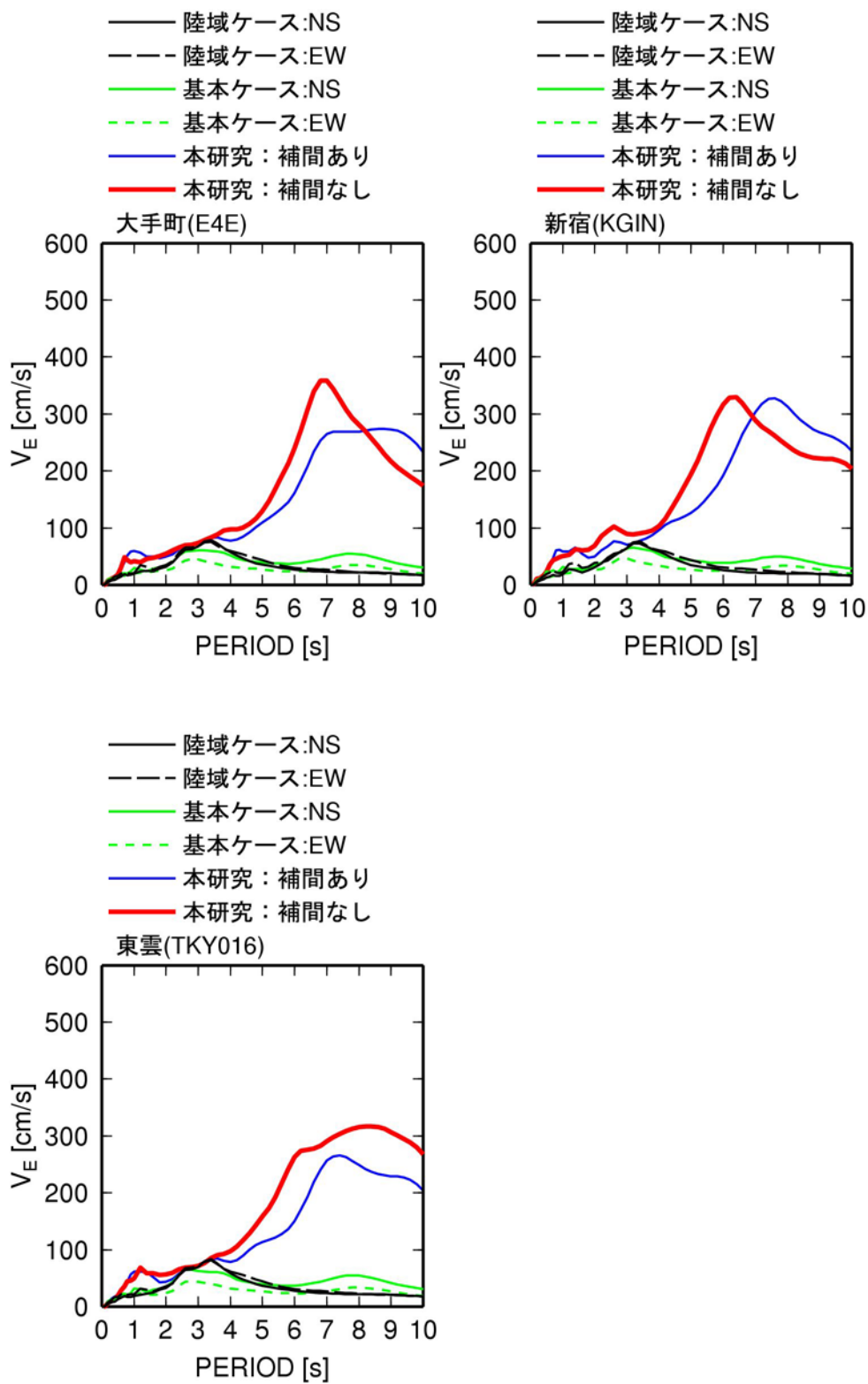


図 2.4-11 本業務(Tzによる補間ありとなし)と内閣府(2012)による計算波のエネルギースペクトル(h=10%)の比較

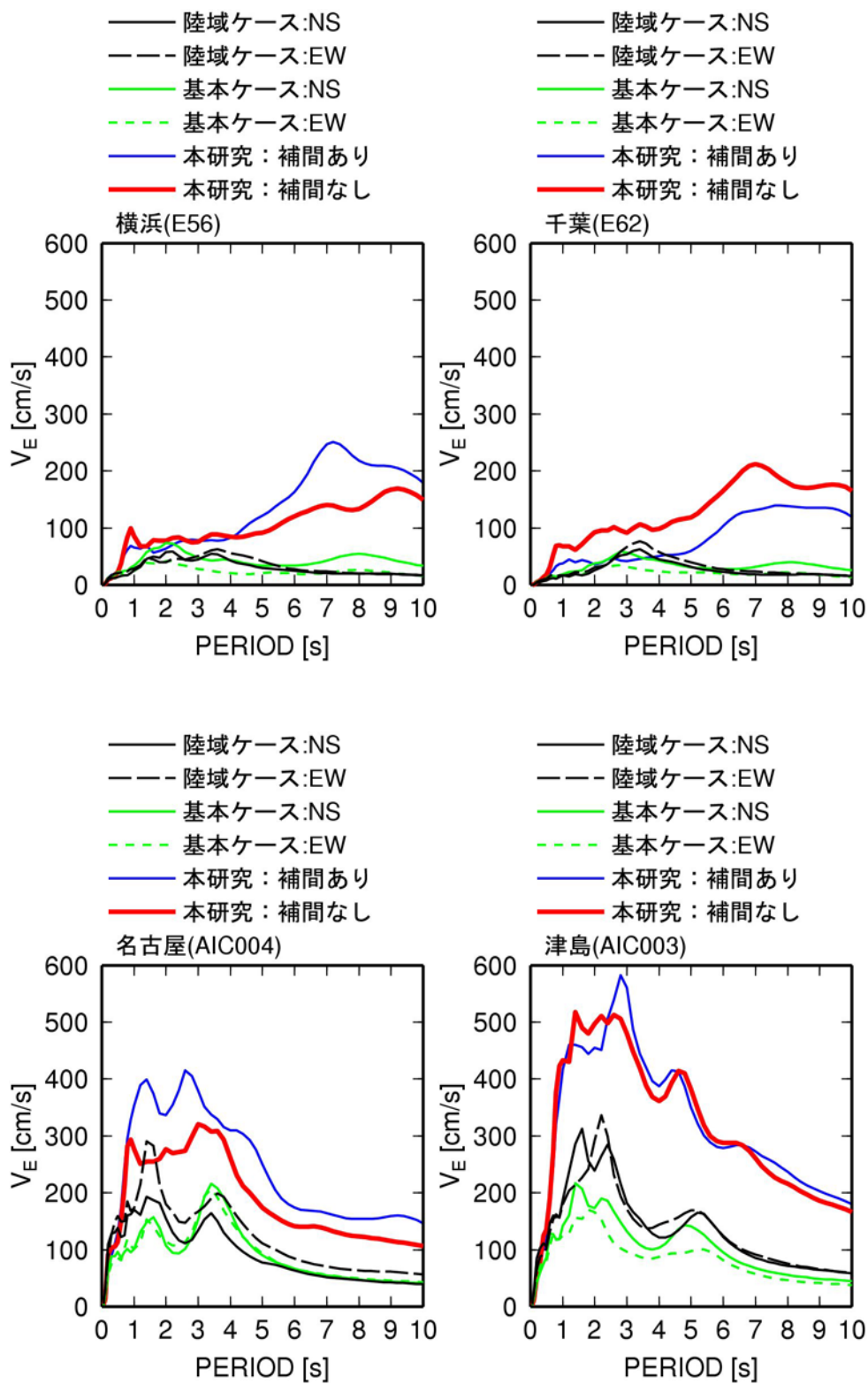


図 2.4-11 本業務(Tzによる補間ありとなし)と内閣府(2012)による計算波のエネルギースペクトル(h=10%)の比較(続き)

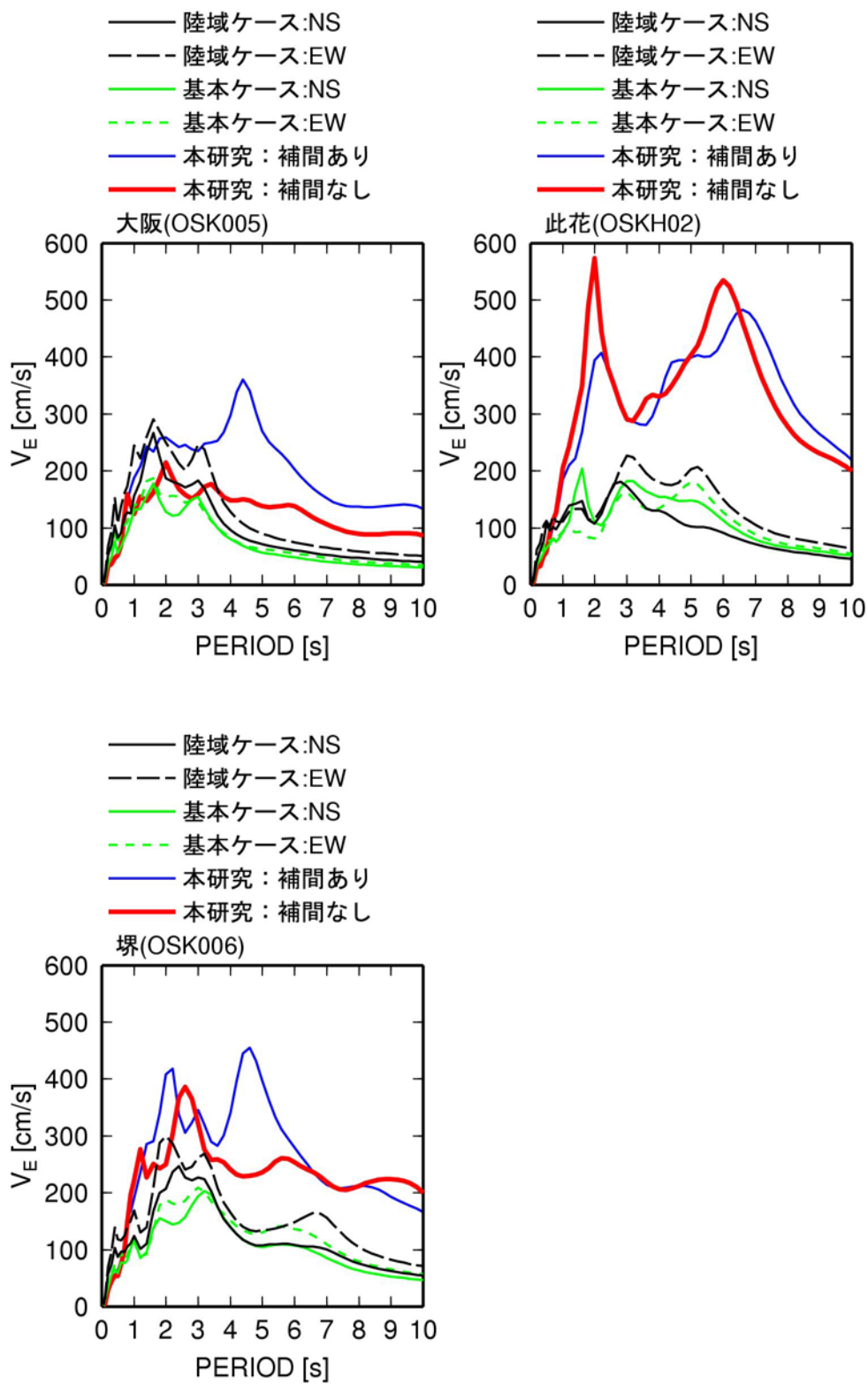


図 2. 4-11 本業務(Tzによる補間ありとなし)と内閣府(2012)による計算波のエネルギースペクトル(h=10%)の比較(続き)

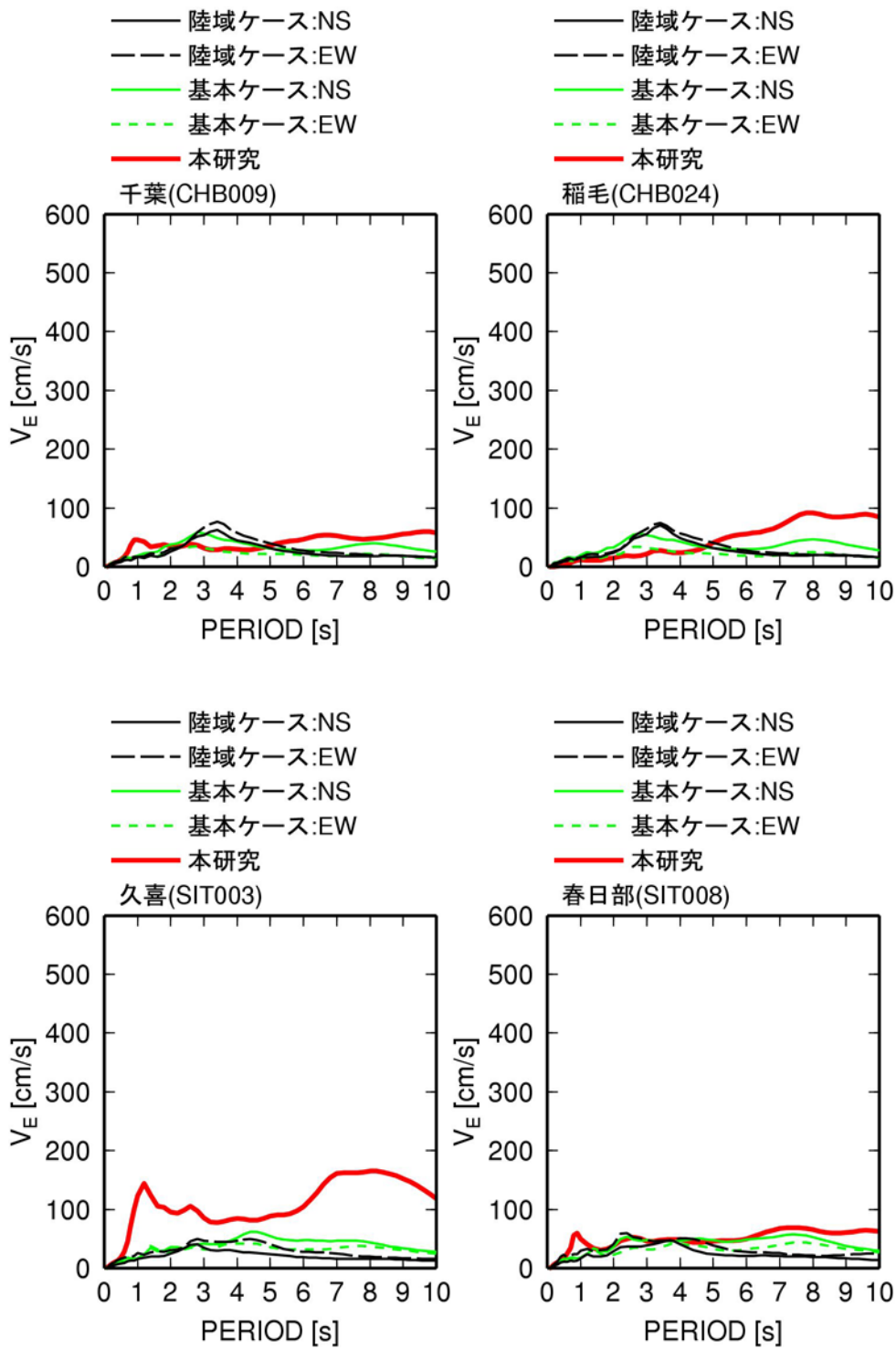


図 2.4-12 本業務(T_z による補間なし)と内閣府(2012)による計算波のエネルギースペクトル ($h=10\%$)の比較

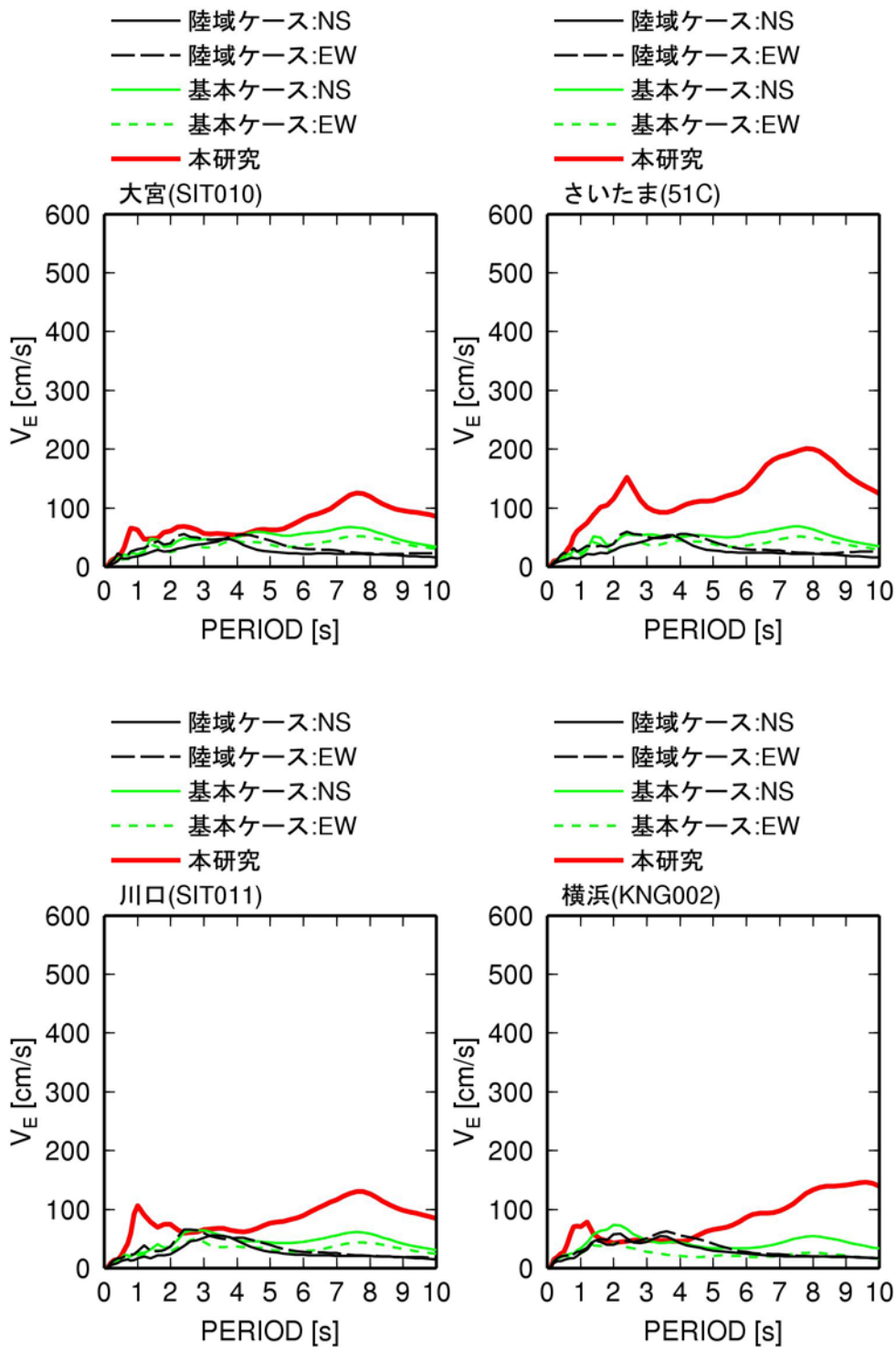


図 2.4-12 本業務(Tzによる補間なし)と内閣府(2012)による計算波のエネルギースペクトル (h=10%)の比較(続き)

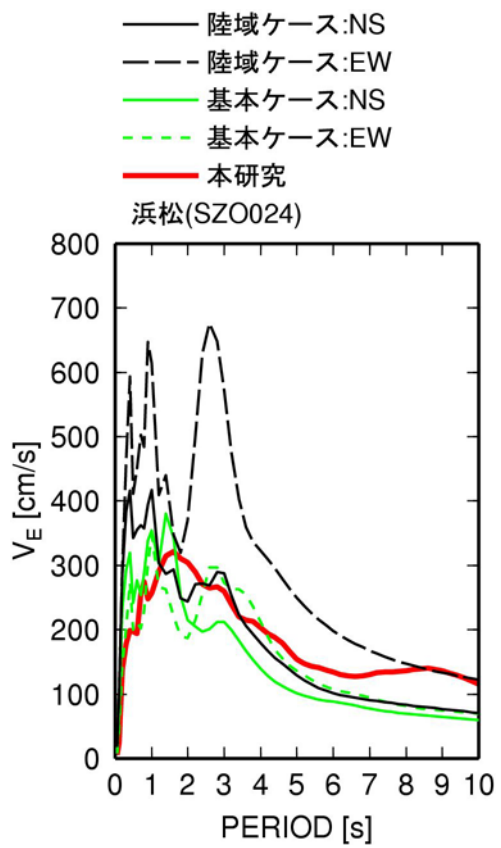


図 2.4-12 本業務(Tzによる補間なし)と内閣府(2012)による計算波のエネルギースペクトル (h=10%)の比較(続き)

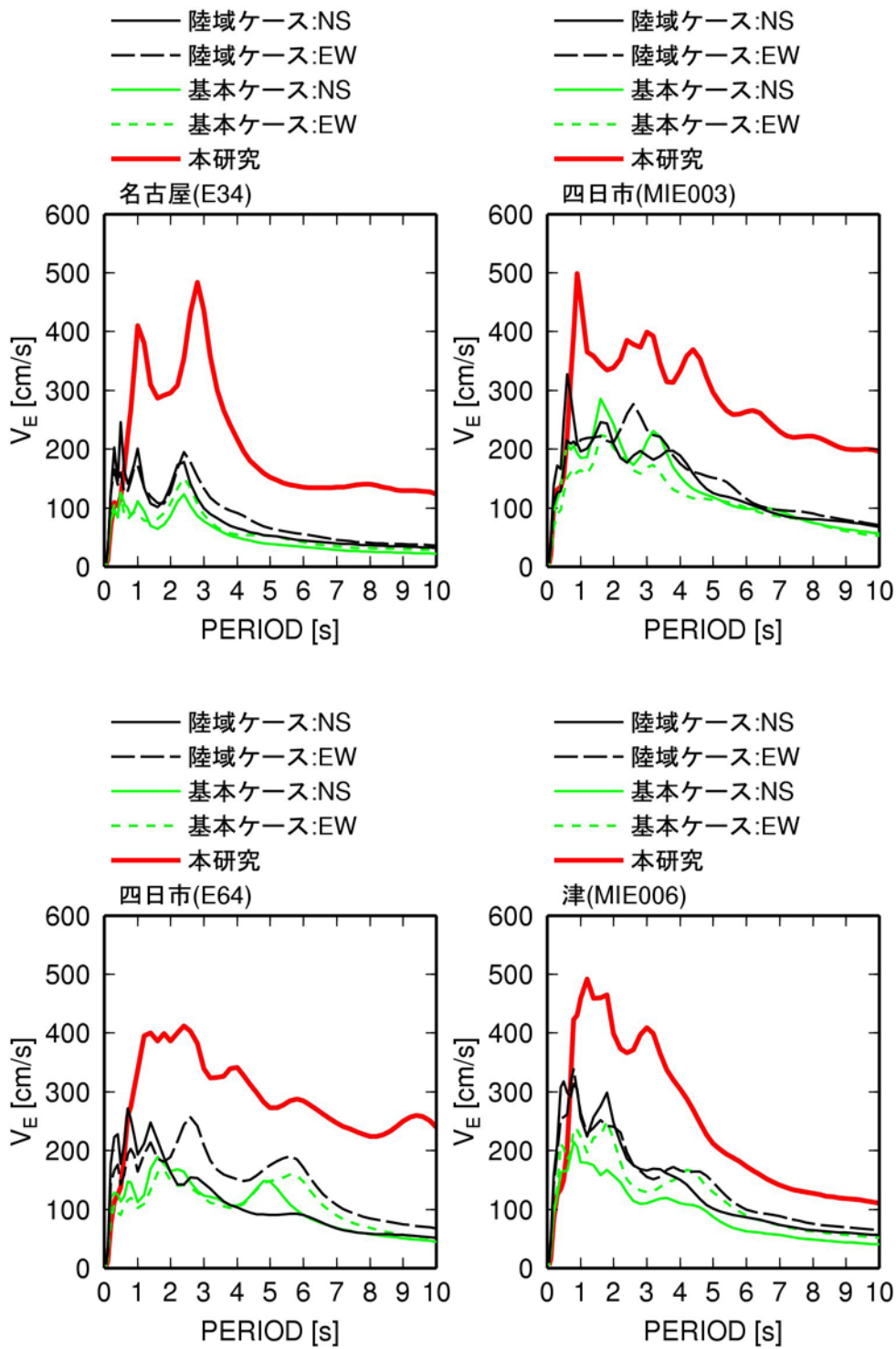


図 2.4-12 本業務(Tzによる補間なし)と内閣府(2012)による計算波のエネルギースペクトル (h=10%)の比較(続き)

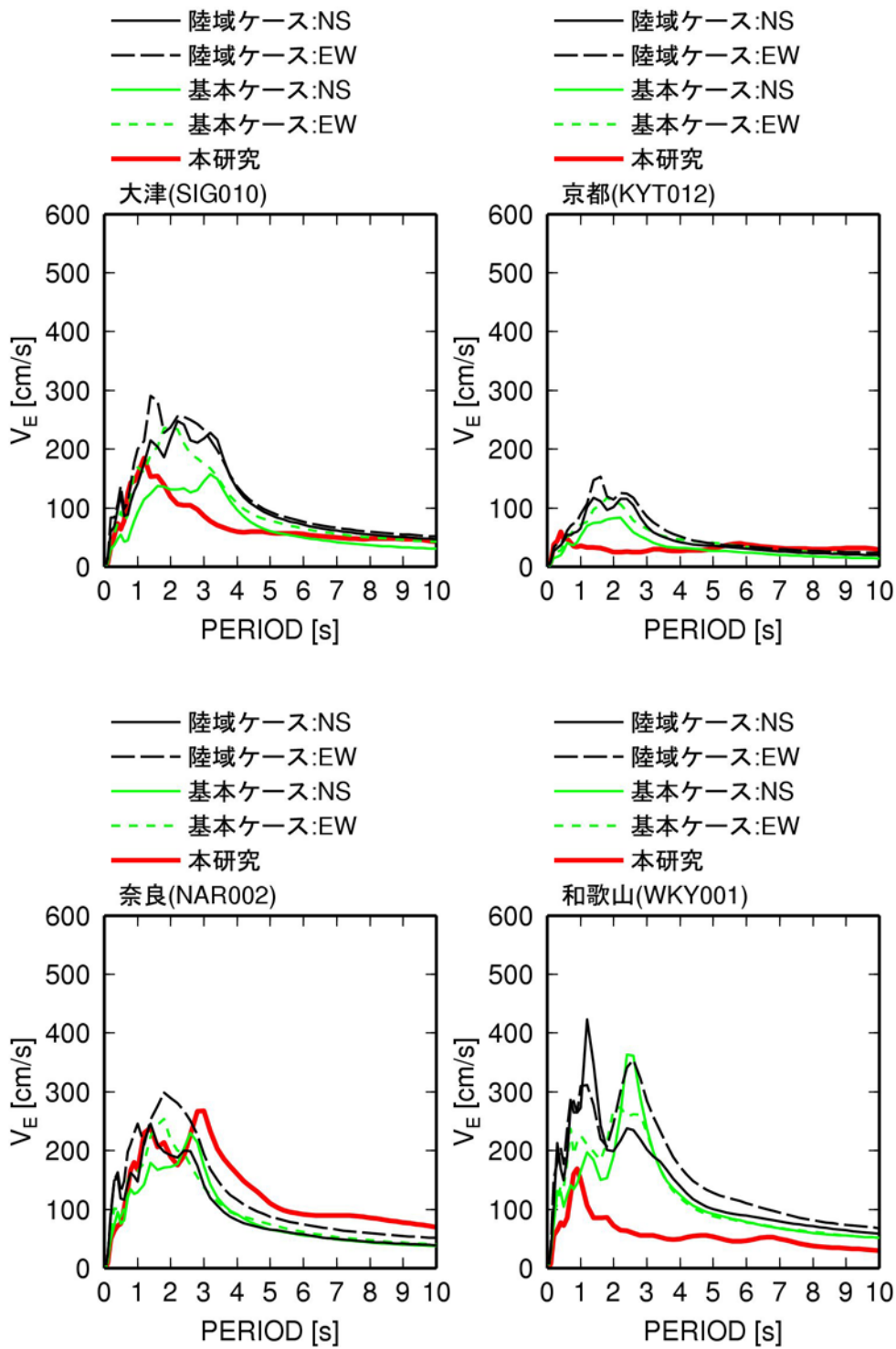


図 2.4-12 本業務(Tzによる補間なし)と内閣府(2012)による計算波のエネルギースペクトル (h=10%)の比較(続き)

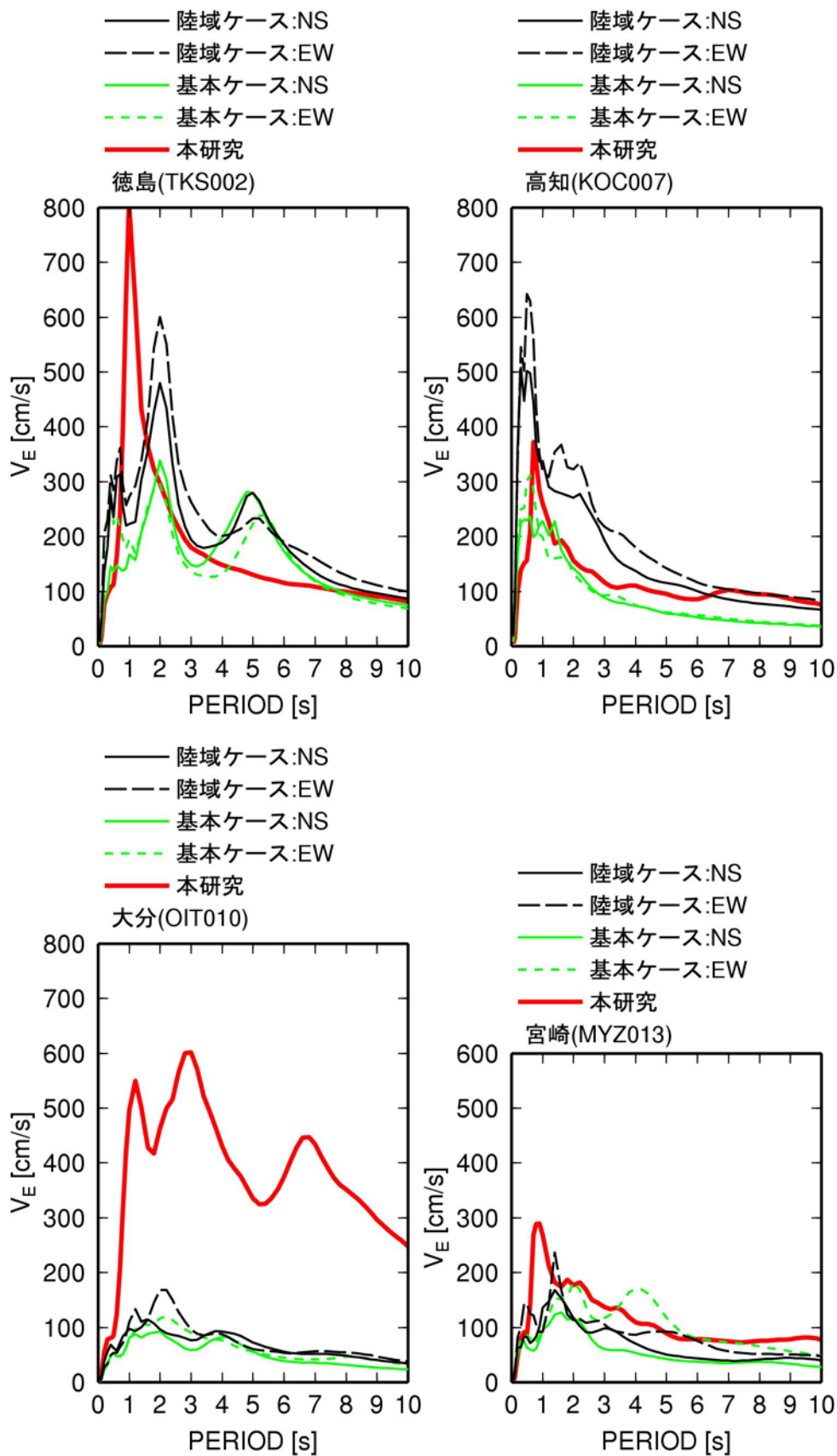
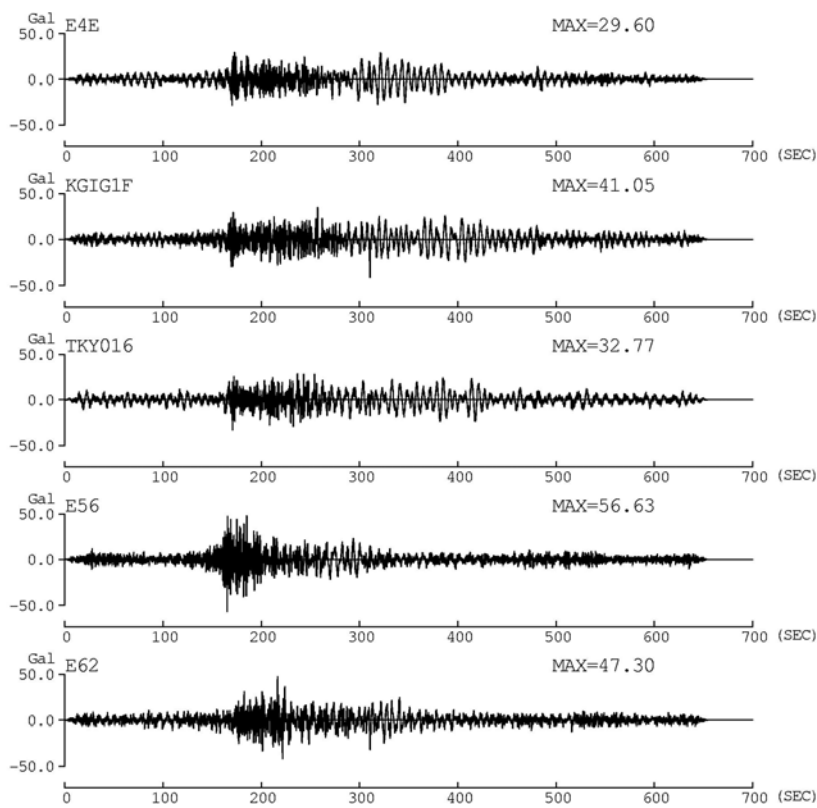
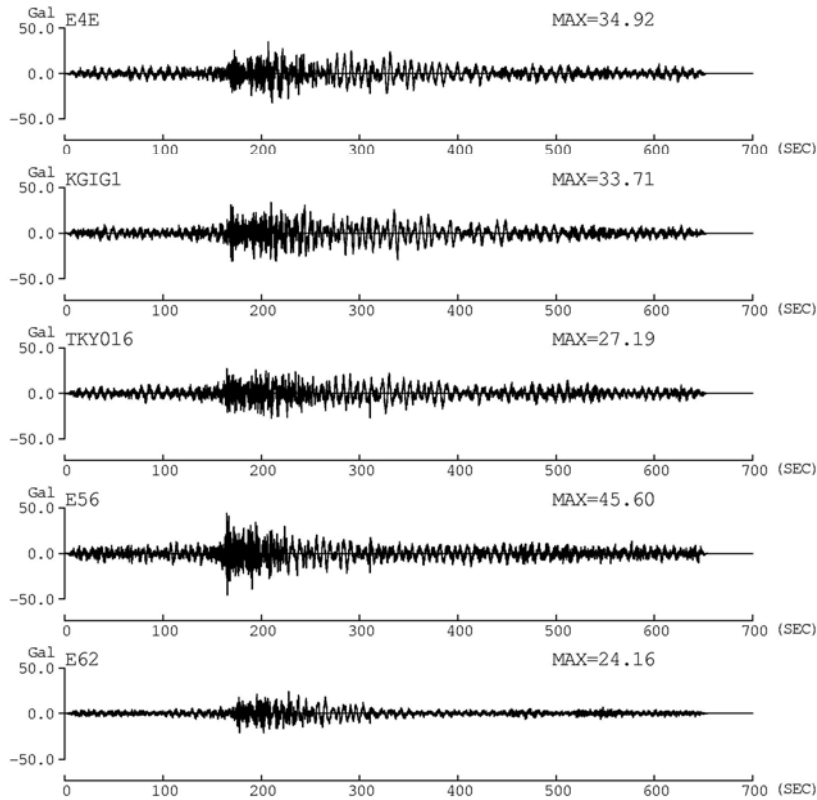


図 2.4-12 本業務(Tzによる補間なし)と内閣府(2012)による計算波のエネルギースペクトル (h=10%)の比較(続き)

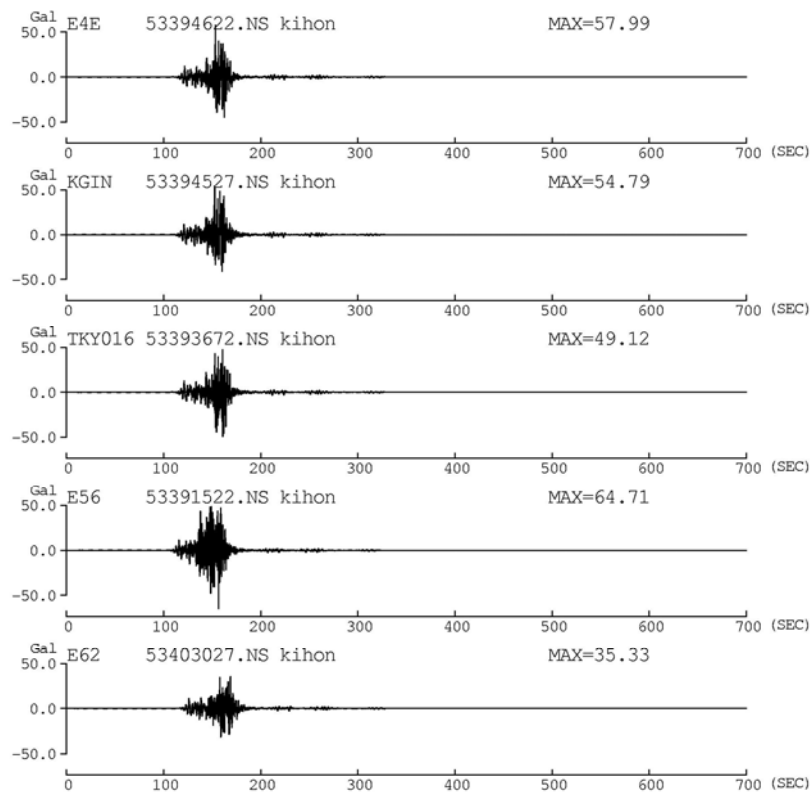


(a) 補間なし

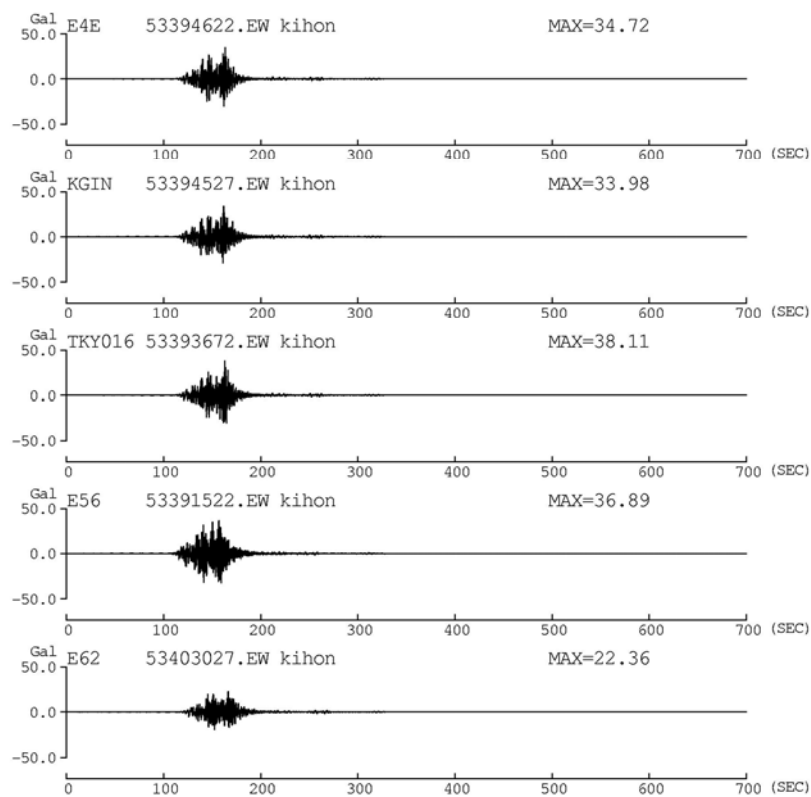


(b) 補間あり

図 2.4-13 関東平野の代表観測点での本業務の 0.1~10Hz の加速度フィルター波

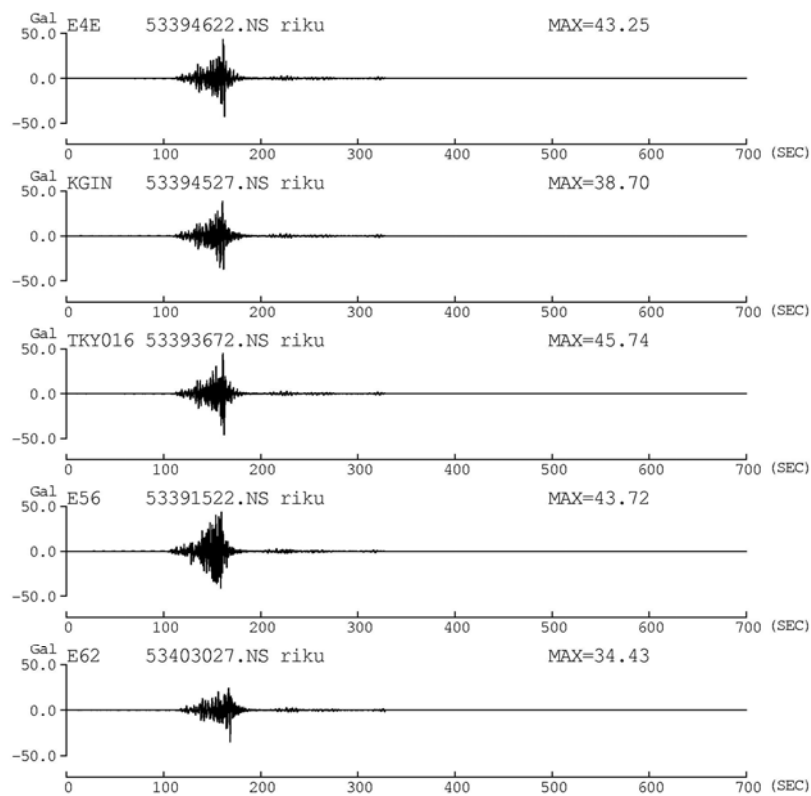


(a) NS 成分

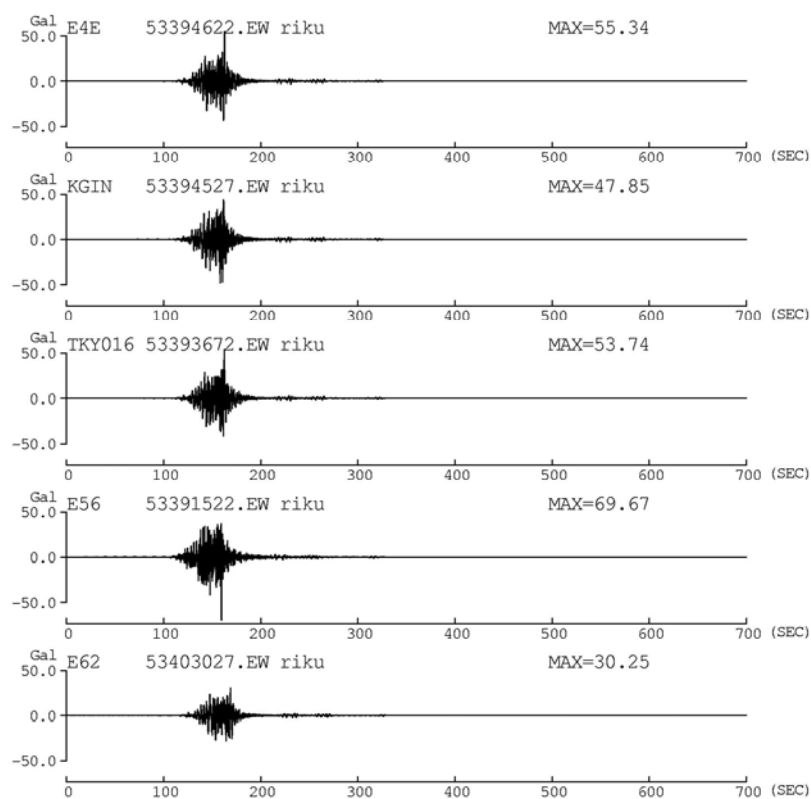


(b) EW 成分

図 2.4-14 関東平野の代表観測点での内閣府(2012)の基本ケースの0.1~10Hzの加速度フィルタ一波

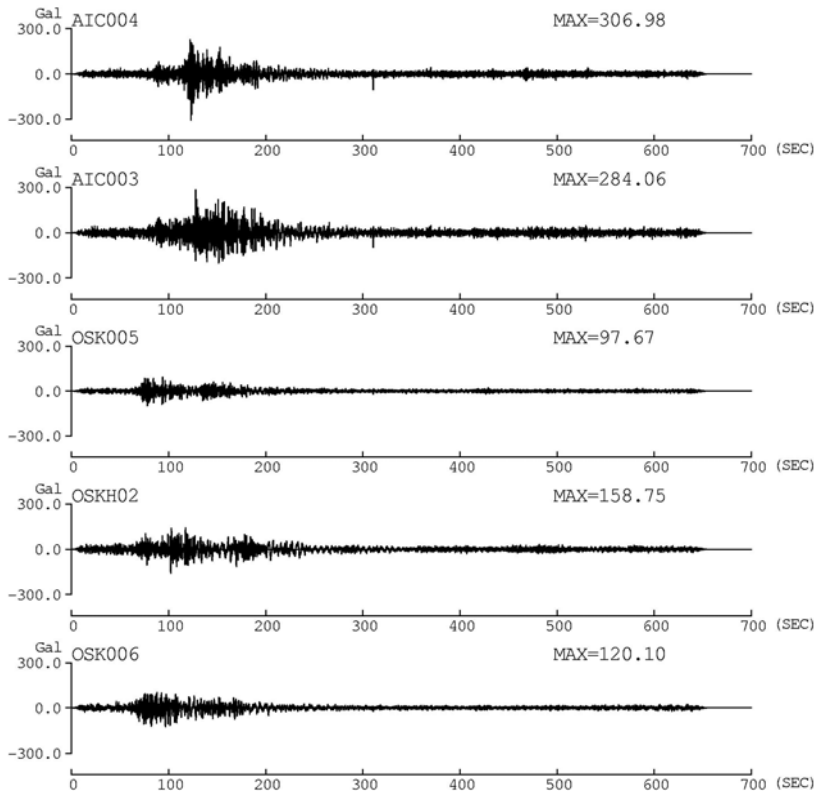


(a) NS 成分

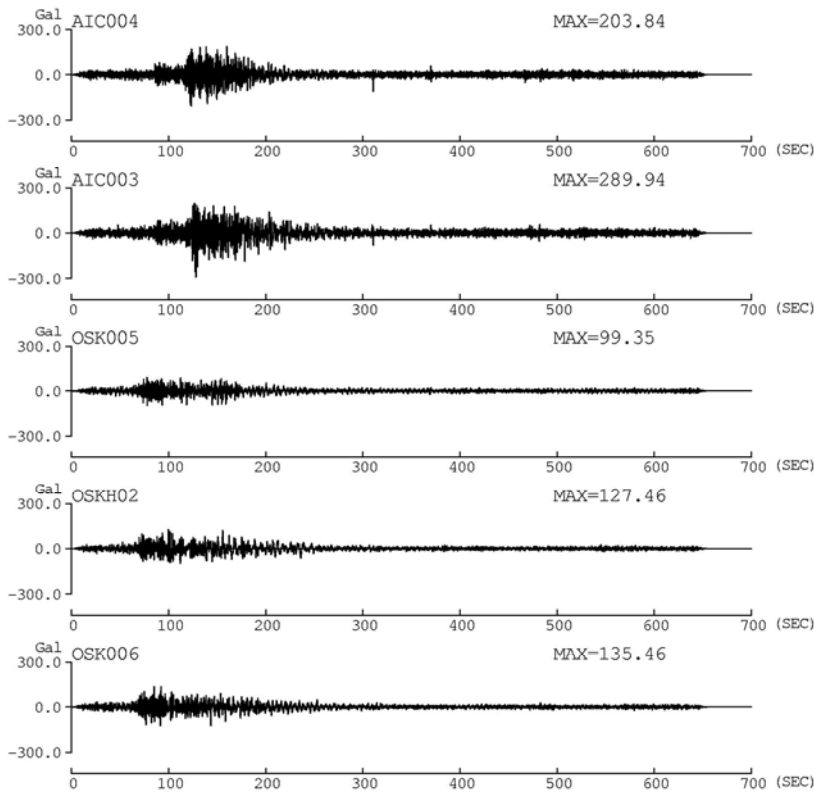


(b) EW 成分

図 2.4-15 関東平野の代表観測点での内閣府(2012)の陸域ケースの 0.1~10Hz の加速度フィルタ一波

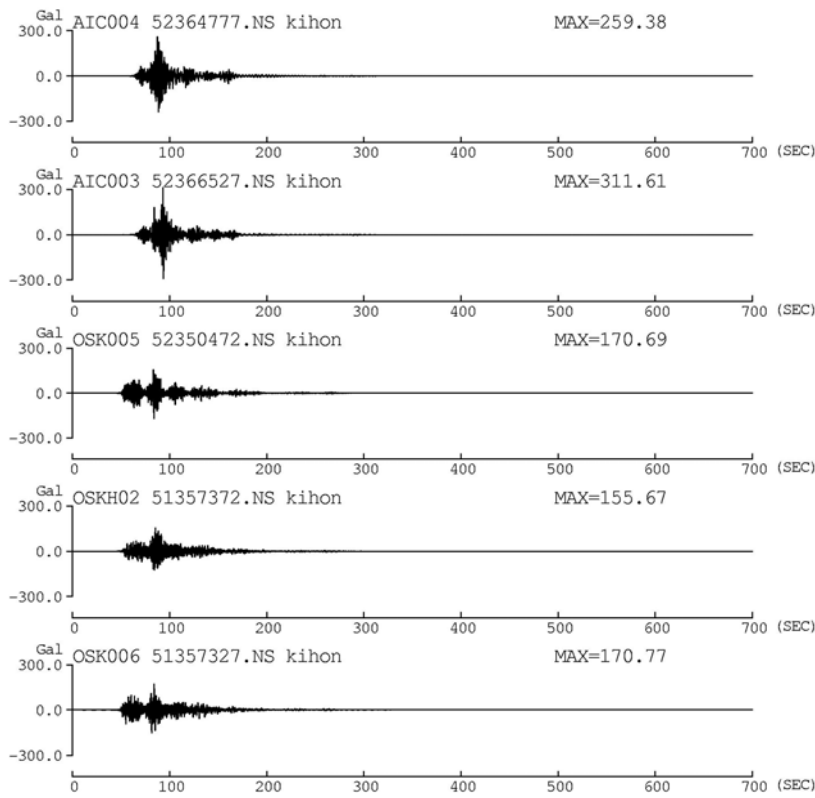


(a) 補間なし

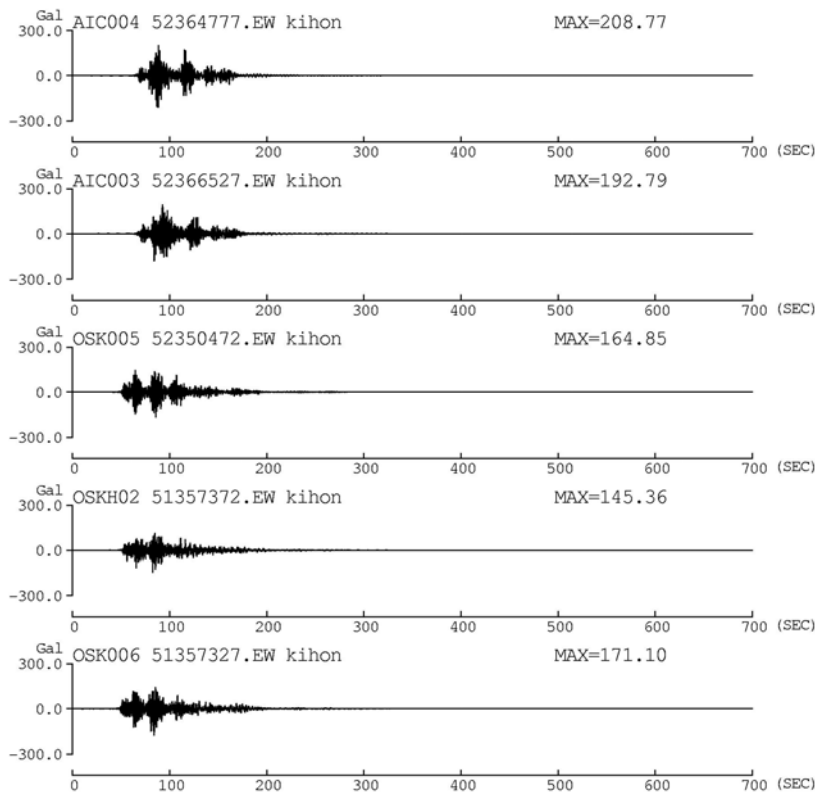


(b) 補間あり

図 2.4-16 濃尾平野・大阪平野の代表観測点での本業務の 0.1~10Hz の加速度フィルター波

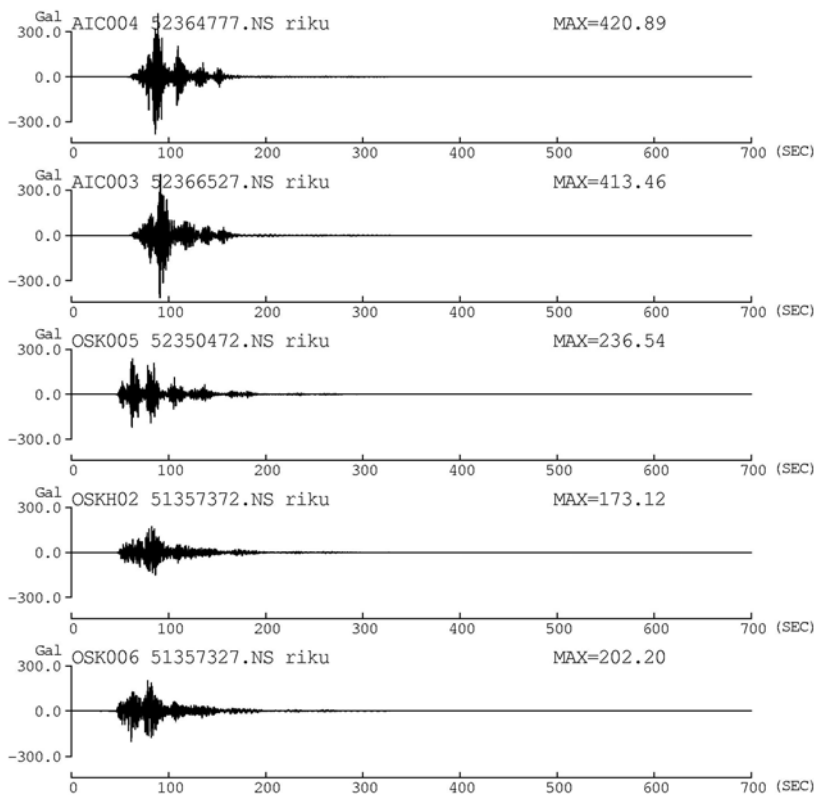


(a) NS 成分

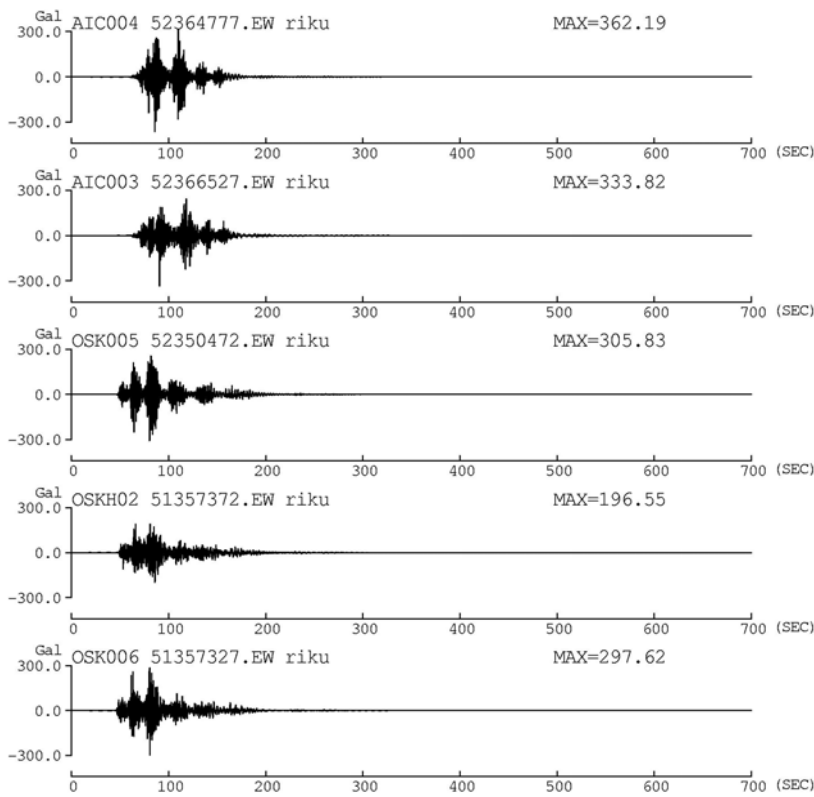


(b) EW 成分

図 2.4-17 濃尾平野・大阪平野の代表観測点での内閣府(2012)の基本ケースの 0.1~10Hz の加速度フィルター波



(a) NS 成分



(b) EW 成分

図 2.4-18 濃尾平野・大阪平野の代表観測点での内閣府(2012)の陸域ケースの 0.1~10Hz の加速度フィルター波

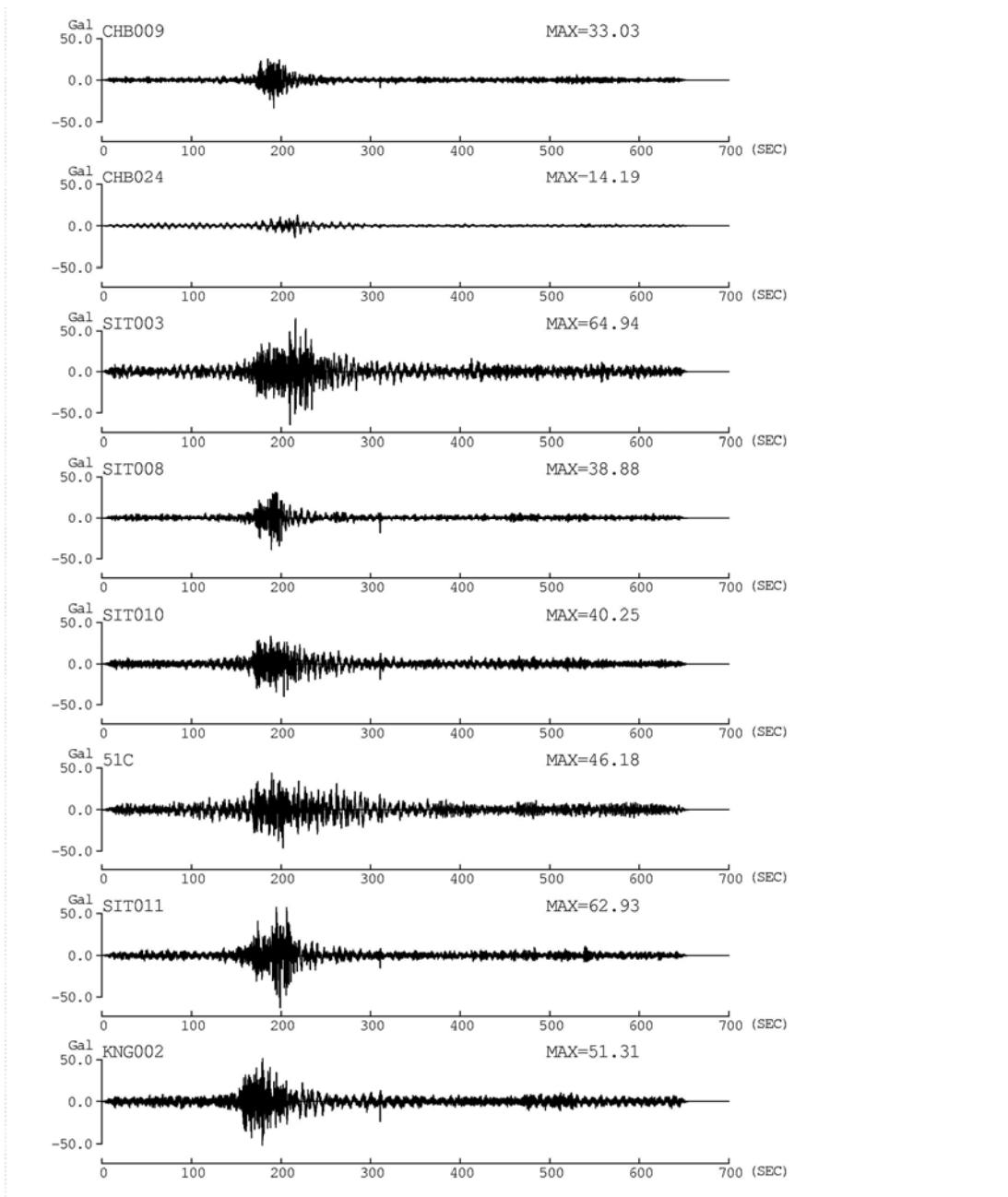
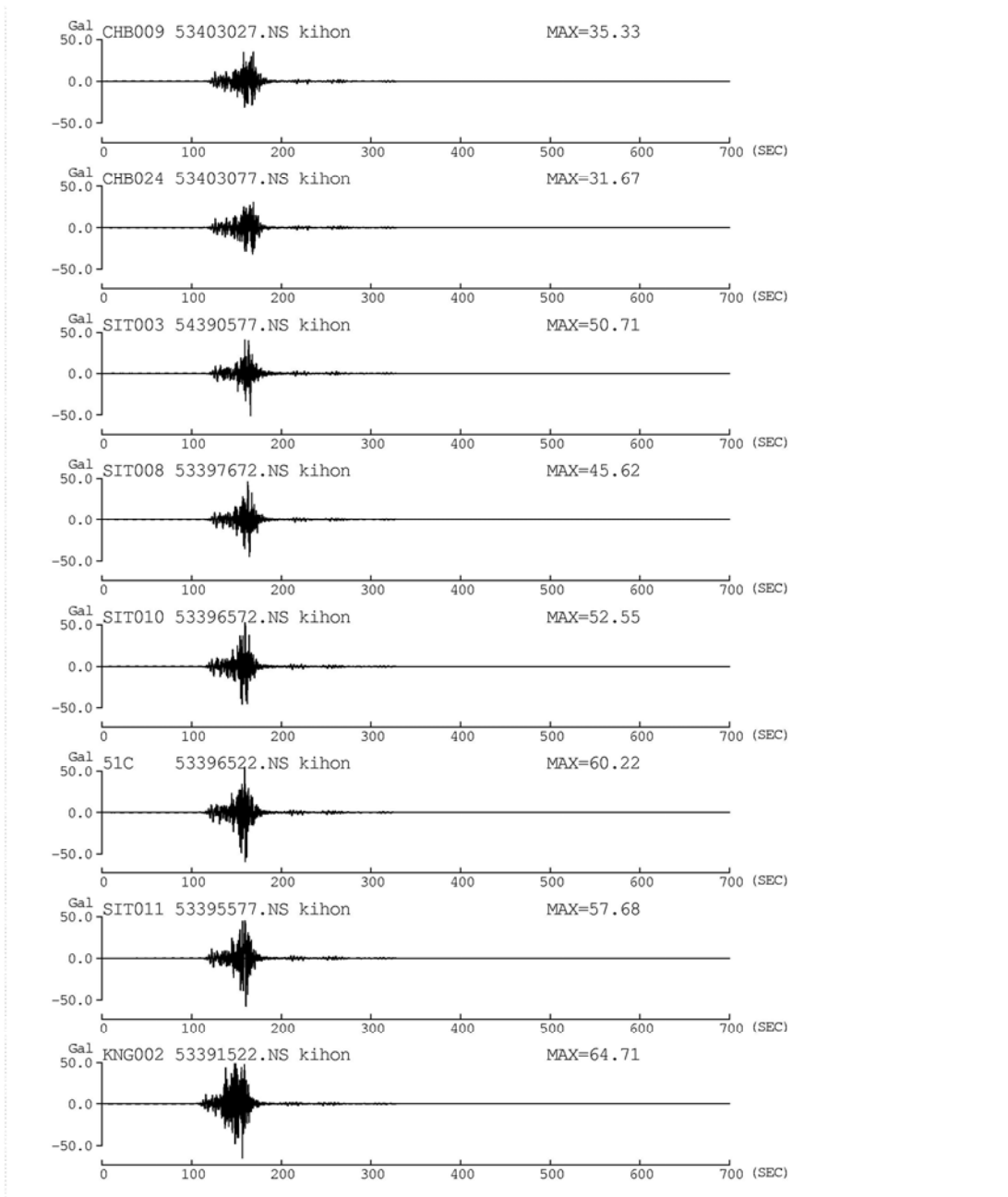
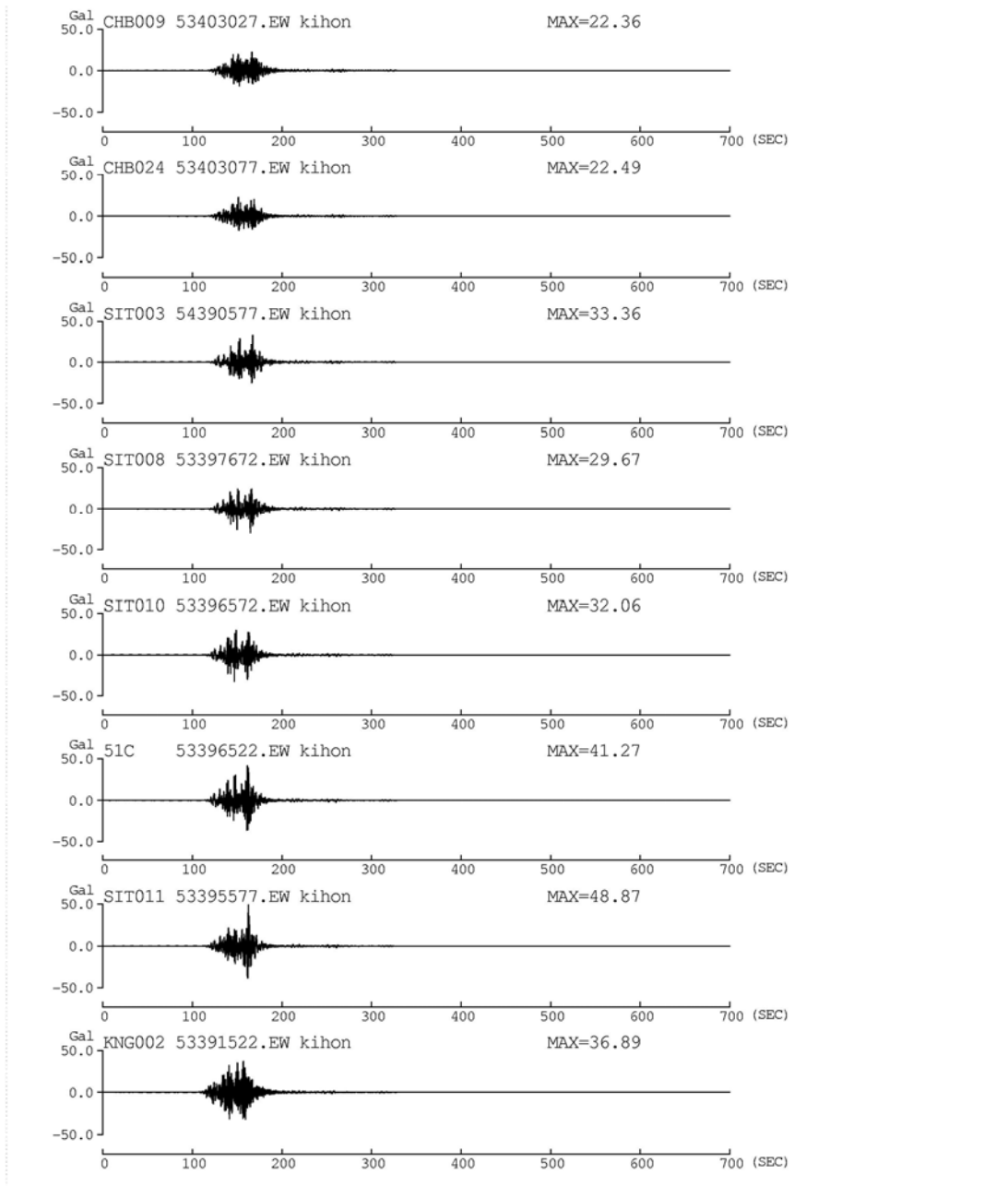


図 2. 4-19 関東平野の代表観測点以外での本業務の 0. 1~10Hz の加速度フィルター波



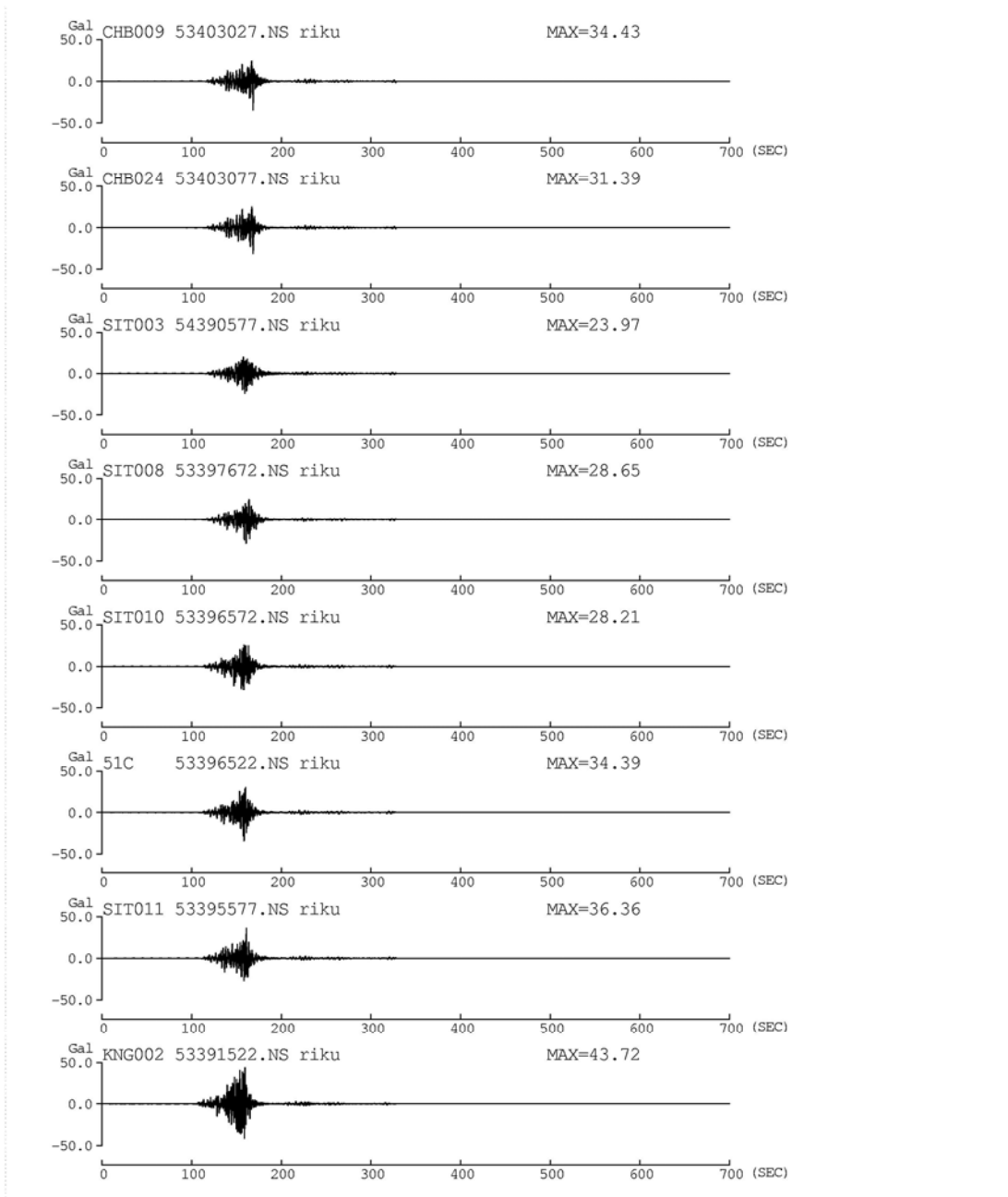
(a) NS 成分

図 2. 4-20 関東平野の代表観測点以外での内閣府(2012)の基本ケースの 0.1~10Hz の加速度フィルター波



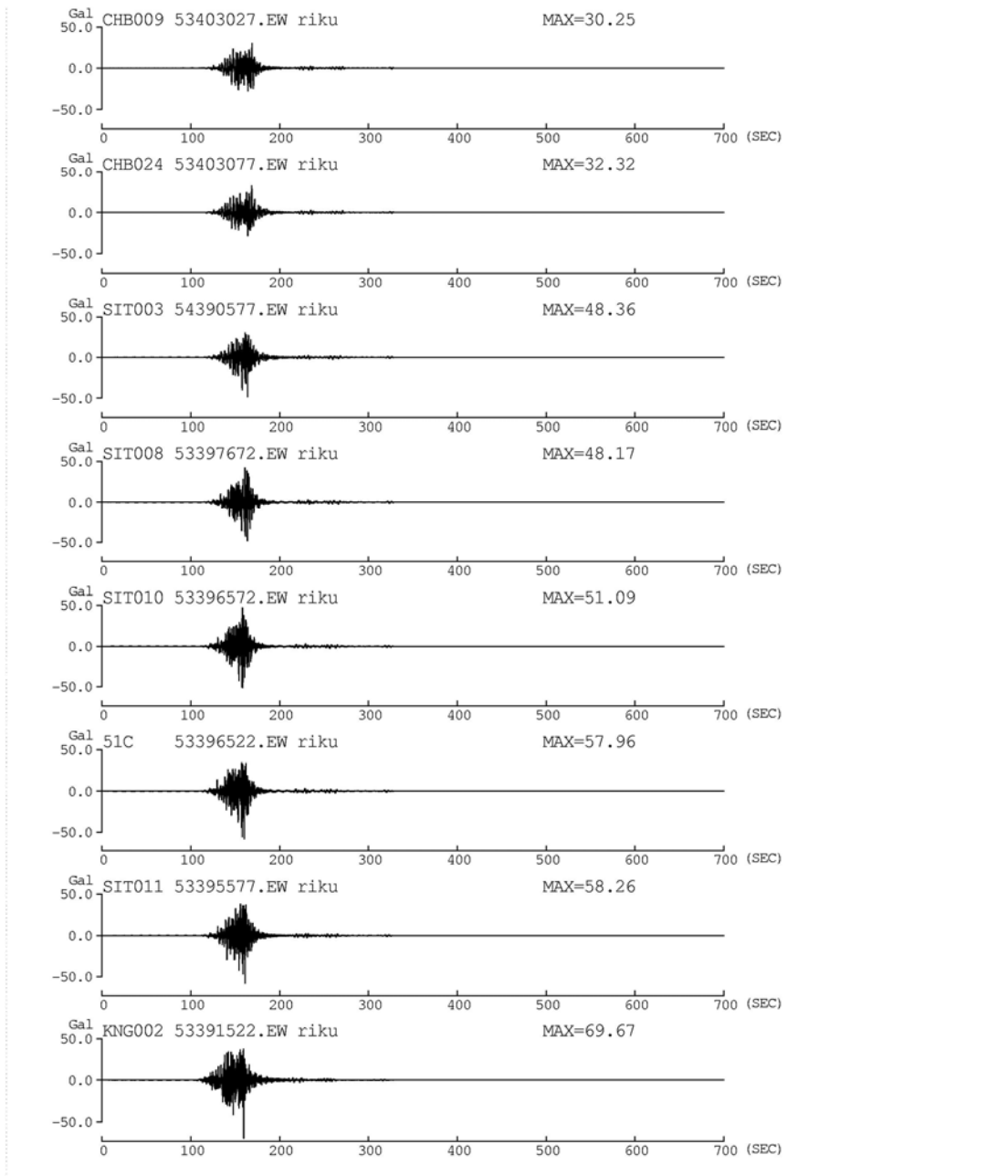
(b) EW 成分

図 2.4-20 関東平野の代表観測点以外での内閣府(2012)の基本ケースの0.1~10Hzの加速度フィルター波(続き)



(a) NS 成分

図 2.4-21 関東平野の代表観測点以外での内閣府(2012)の陸域ケースの 0.1~10Hz の加速度フィルター波



(b) EW 成分

図 2.4-21 関東平野の代表観測点以外での内閣府(2012)の陸域ケースの 0.1~10Hz の加速度フィルター波(続き)

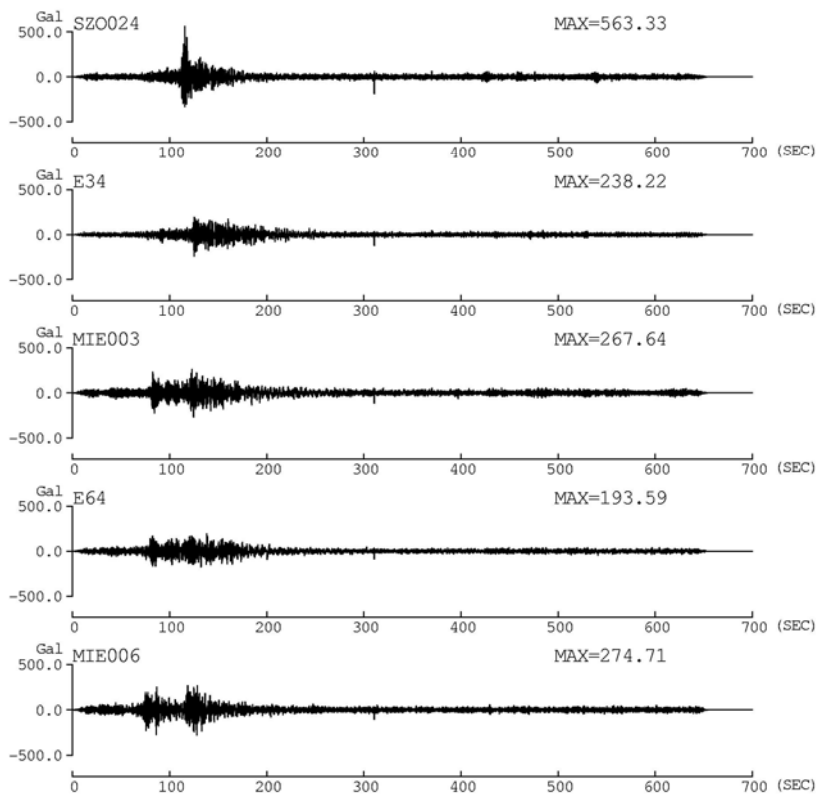
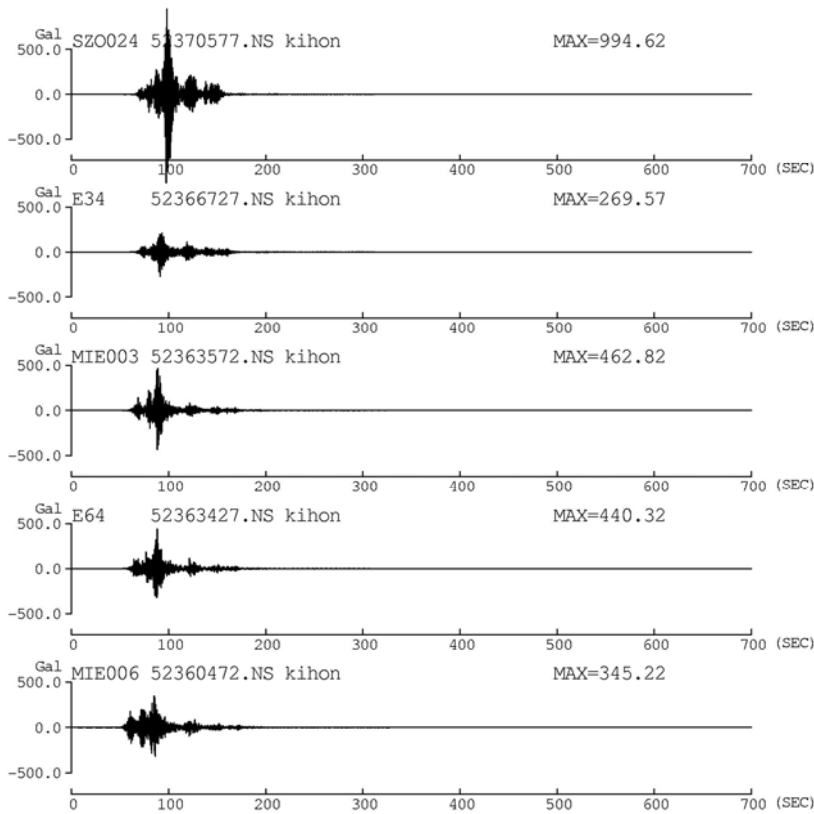
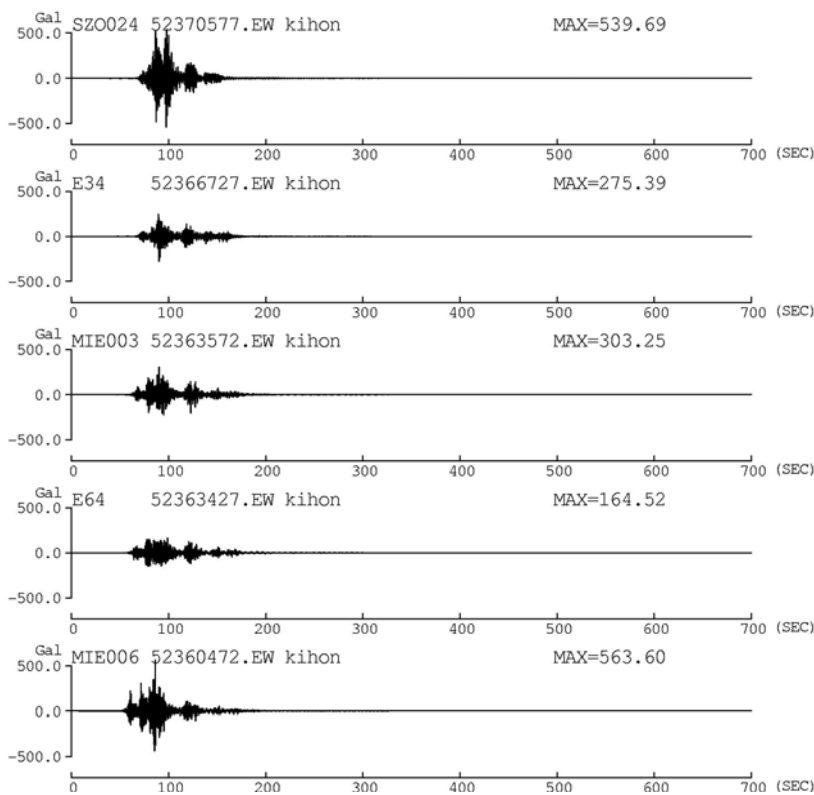


図 2.4-22 濃尾平野、東海地方の代表観測点以外での本業務の 0.1~10 秒の加速度フィルター波

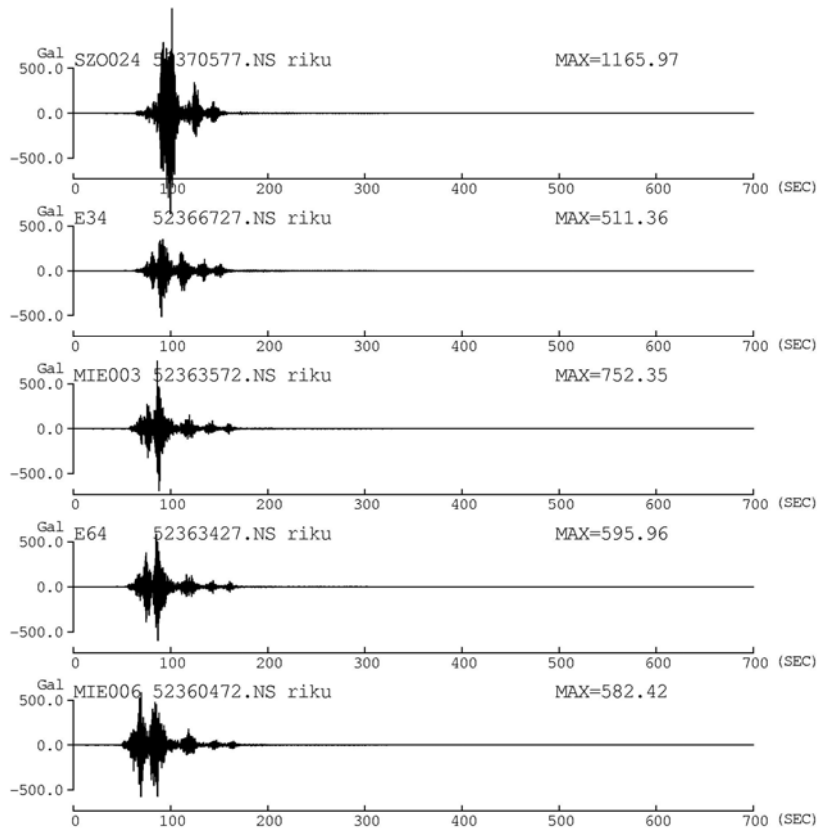


(a) NS 成分

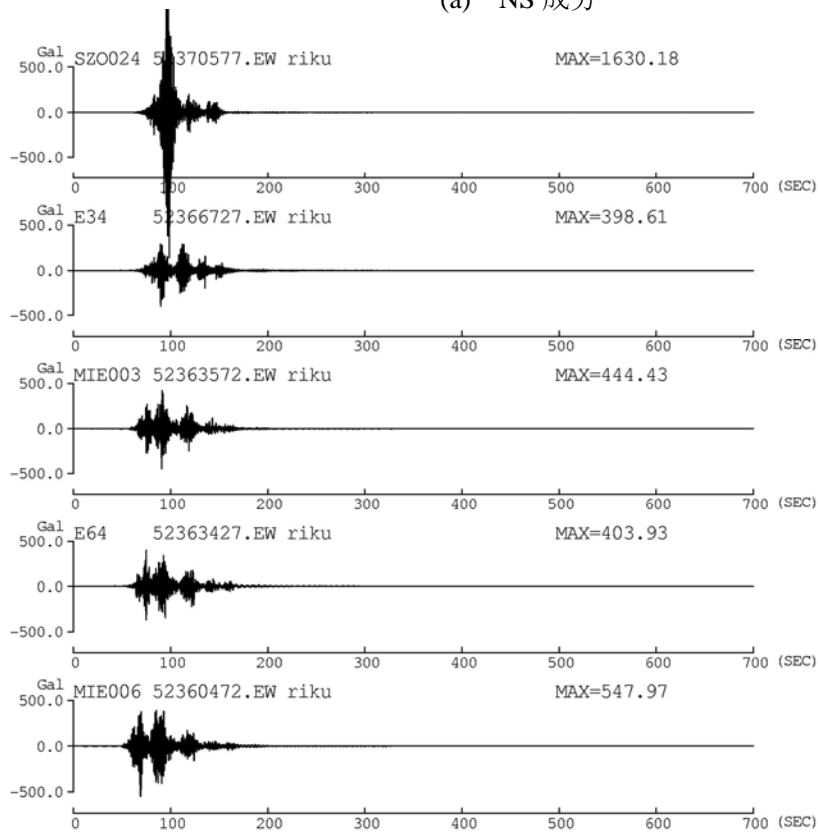


(b) EW 成分

図 2.4-23 濃尾平野、東海地方の代表観測点以外での内閣府(2012)の基本ケースの 0.1~10 秒の加速度フィルター波



(a) NS 成分



(b) EW 成分

図 2.4-24 濃尾平野、東海地方の代表観測点以外での内閣府(2012)の陸域ケースの 0.1~10 秒の加速度フィルター波

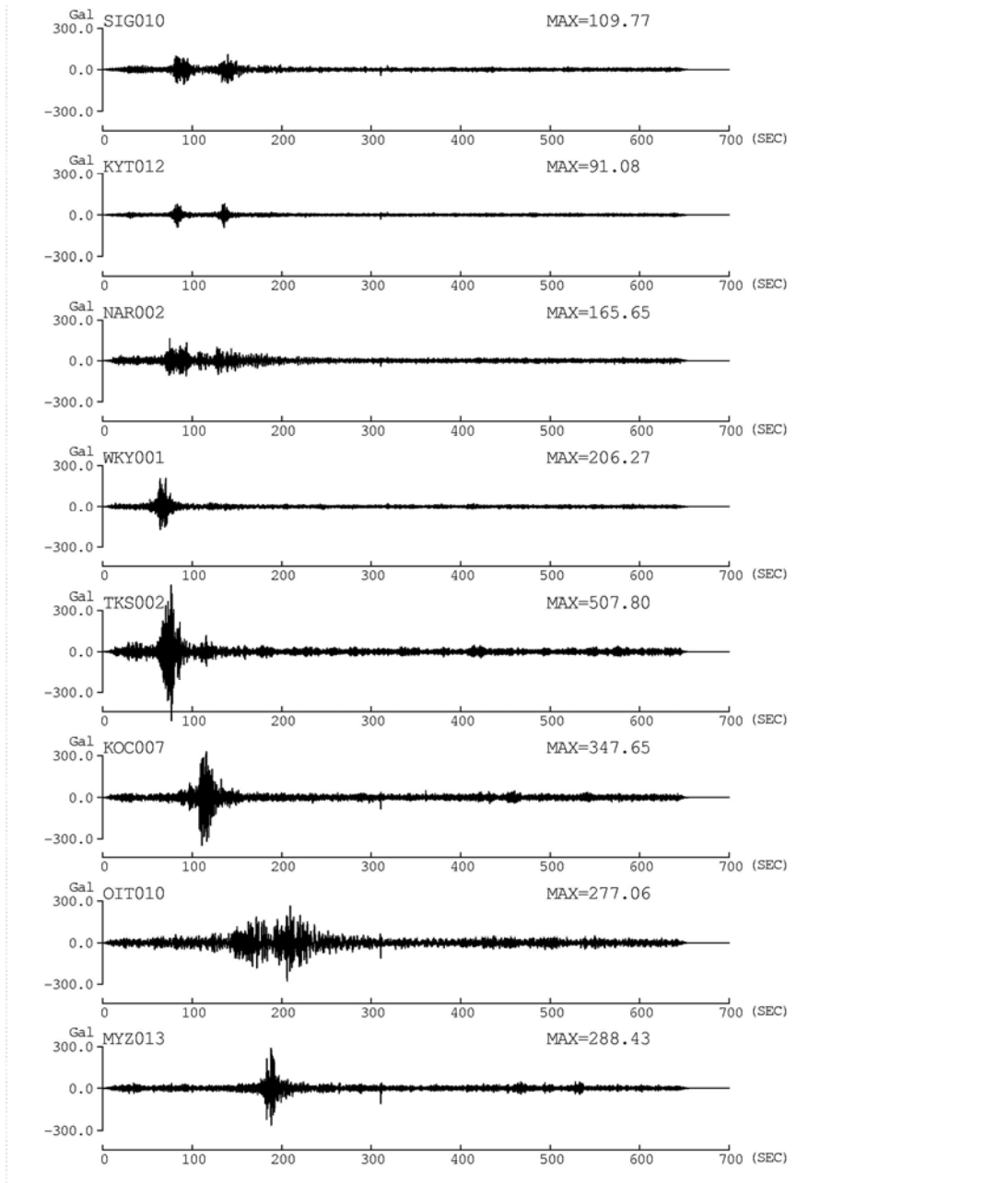
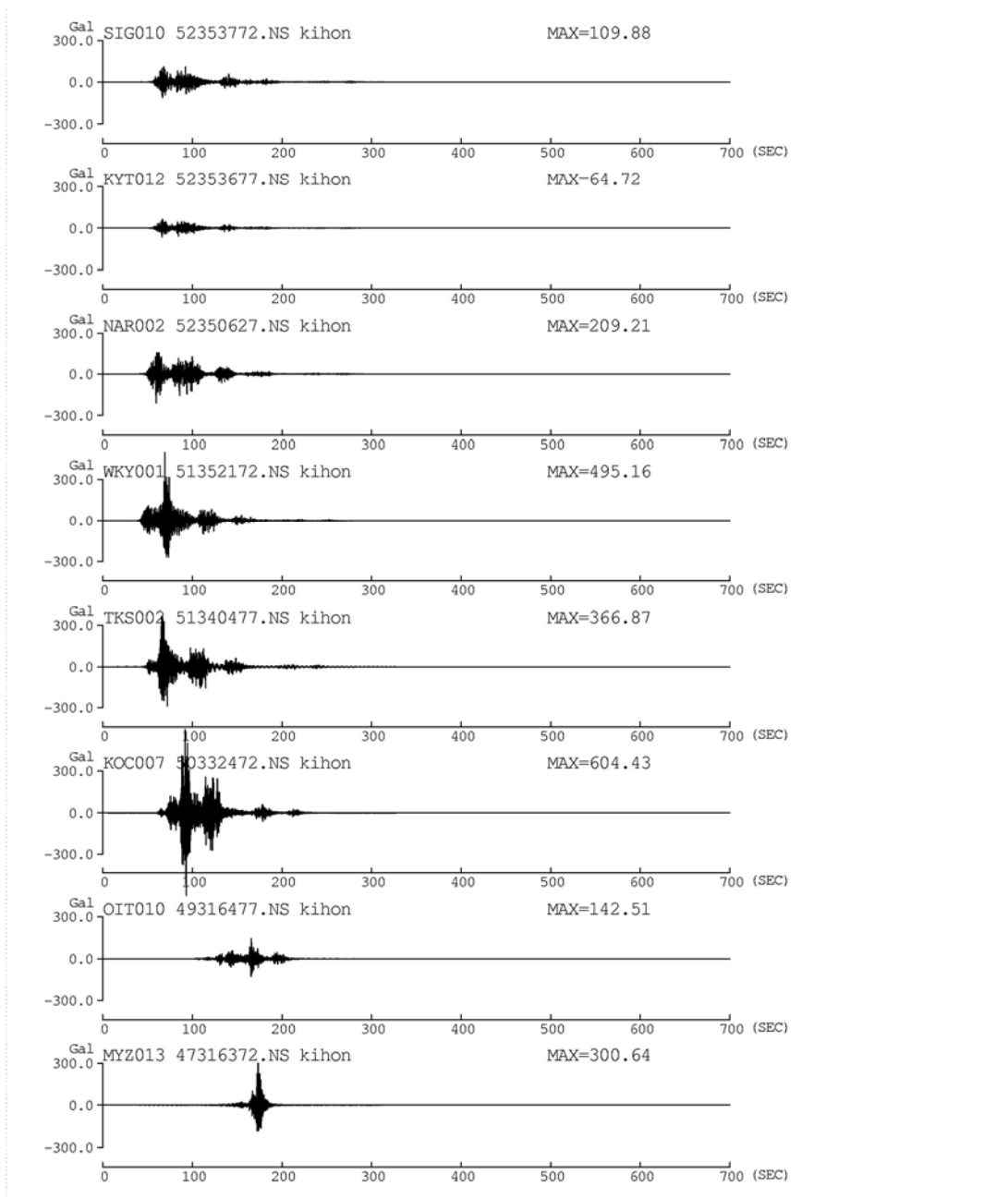
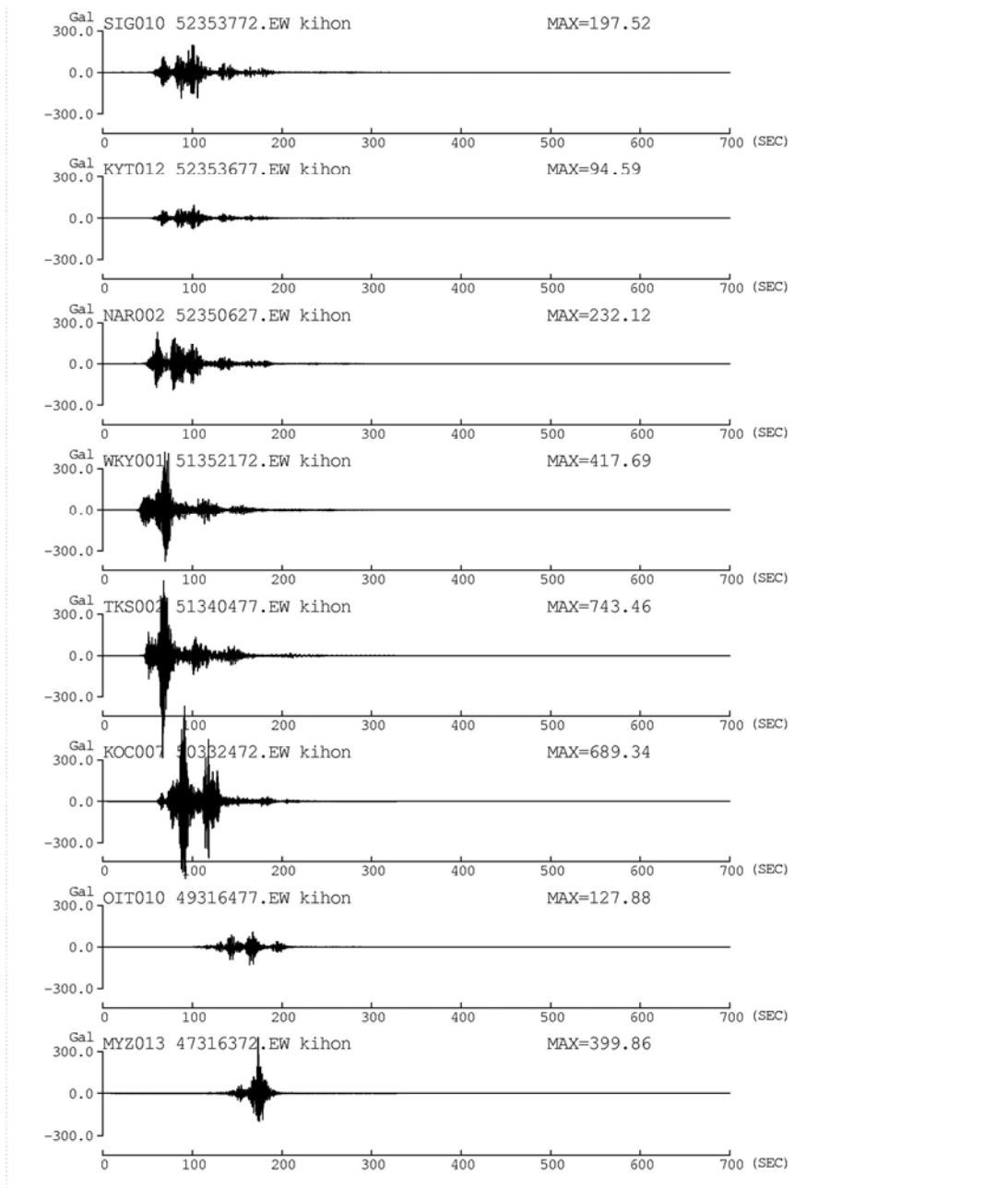


図 2.4-25 西日本の代表観測点以外での本業務の 0.1~10Hz の加速度フィルター波



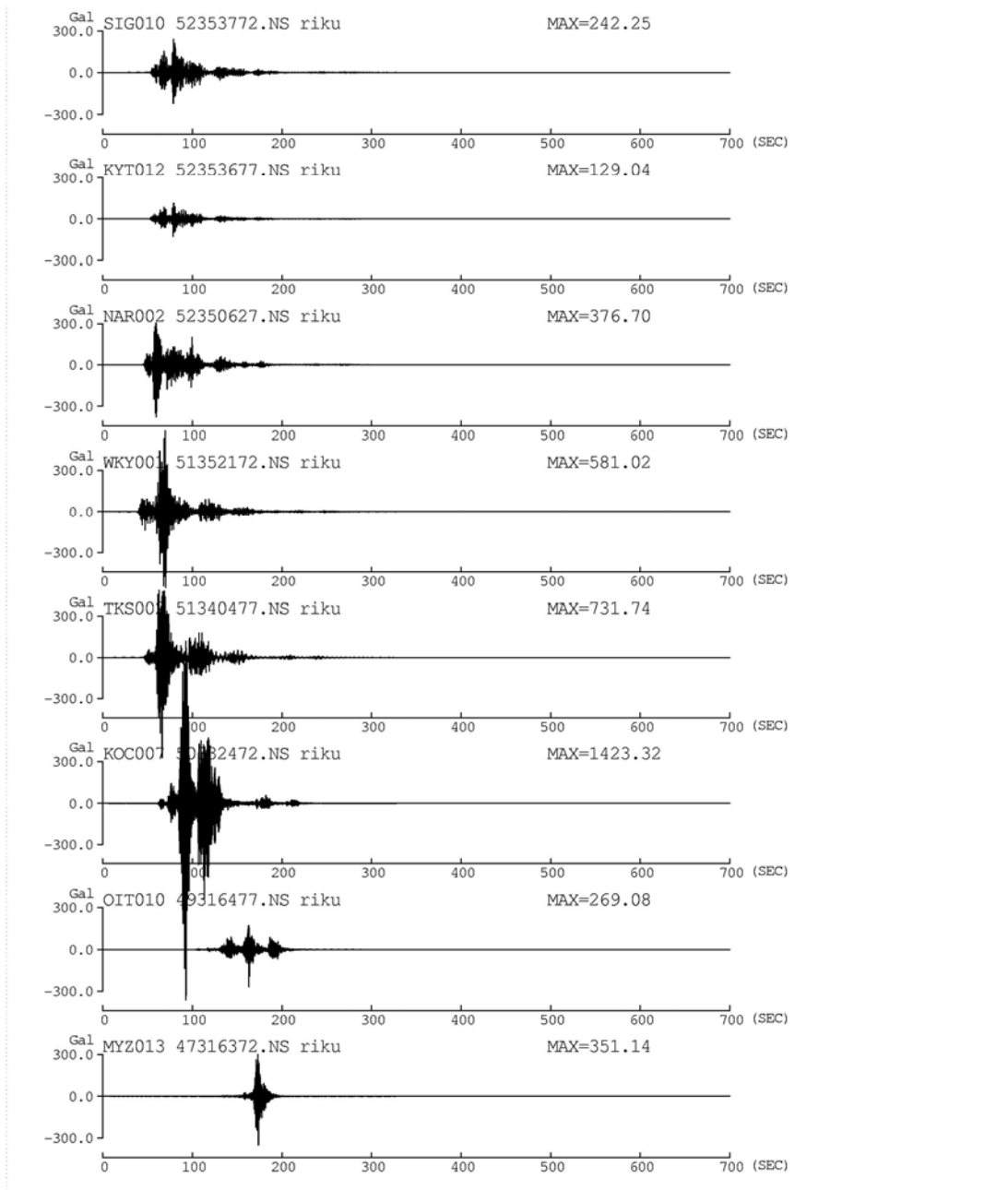
(a) NS 成分

図 2. 4-26 西日本の代表観測点以外での内閣府(2012)の基本ケースの 0.1~10Hz の加速度フィルター波



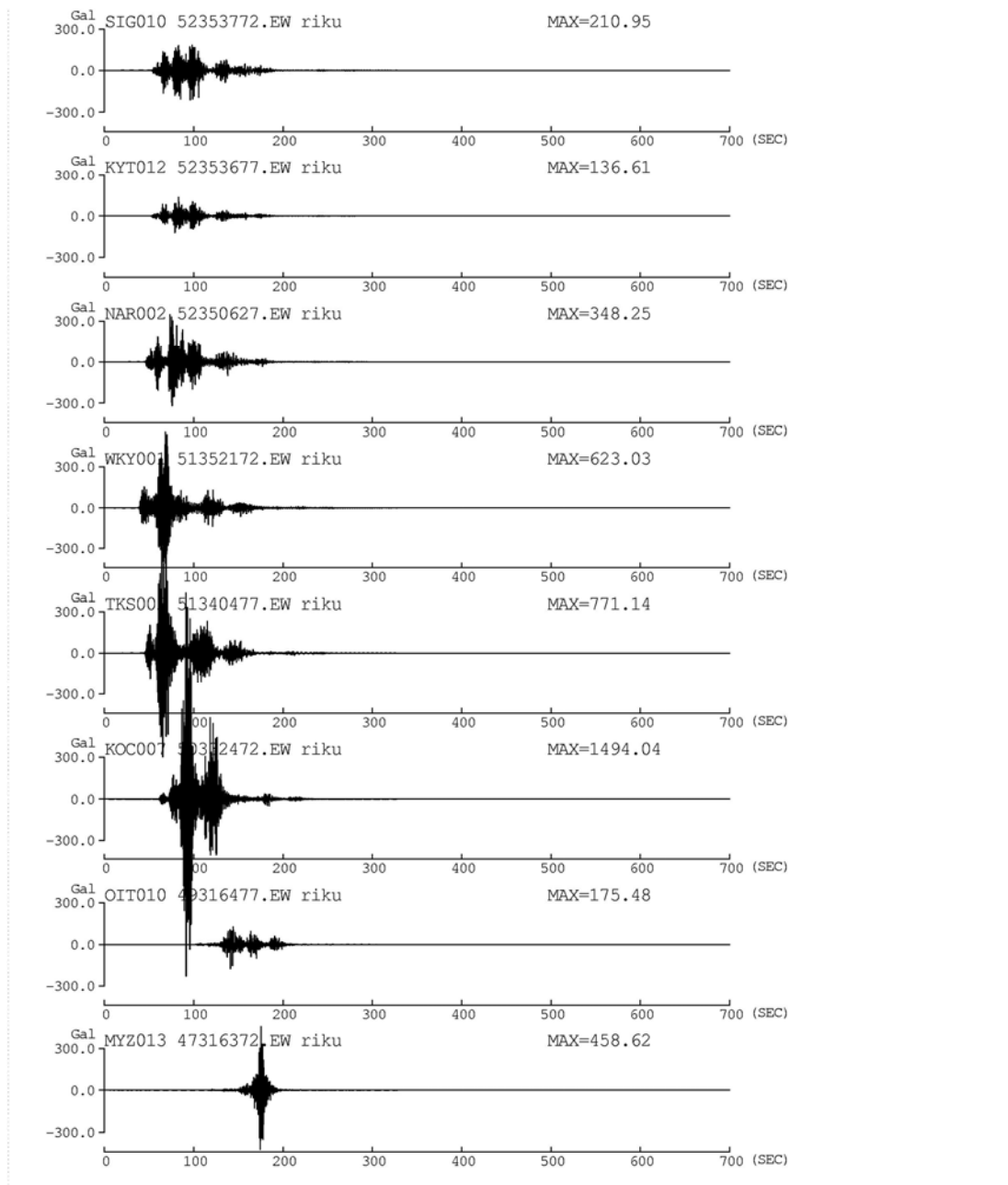
(b) EW 成分

図 2.4-26 西日本の代表観測点以外での内閣府(2012)の基本ケースの 0.1~10Hz の加速度フィルター波(続き)



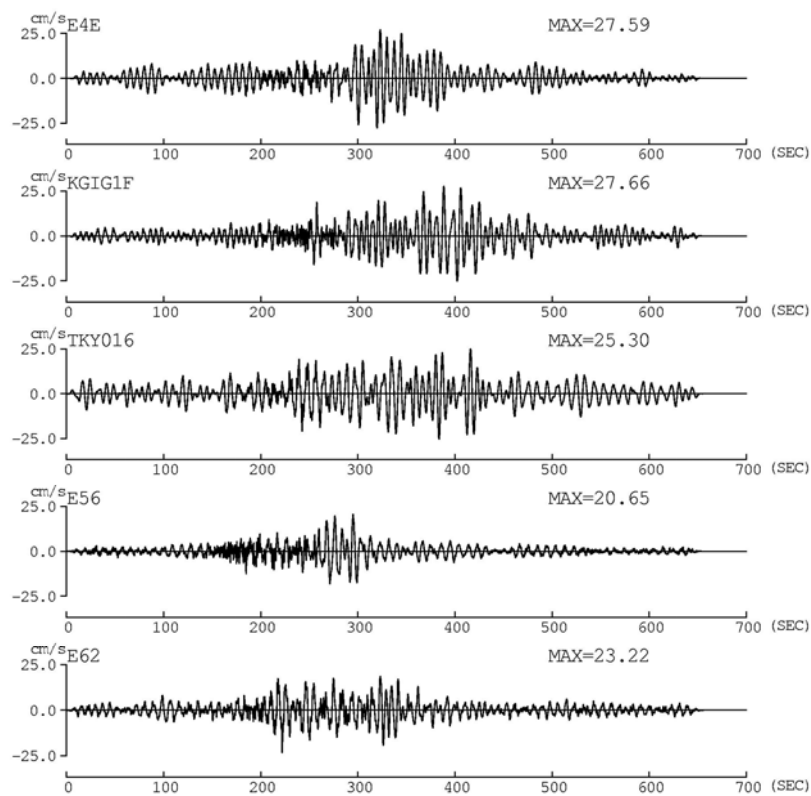
(a) NS 成分

図 2.4-27 西日本の代表観測点以外での内閣府(2012)の陸域ケースの 0.1~10Hz の加速度フィルター波

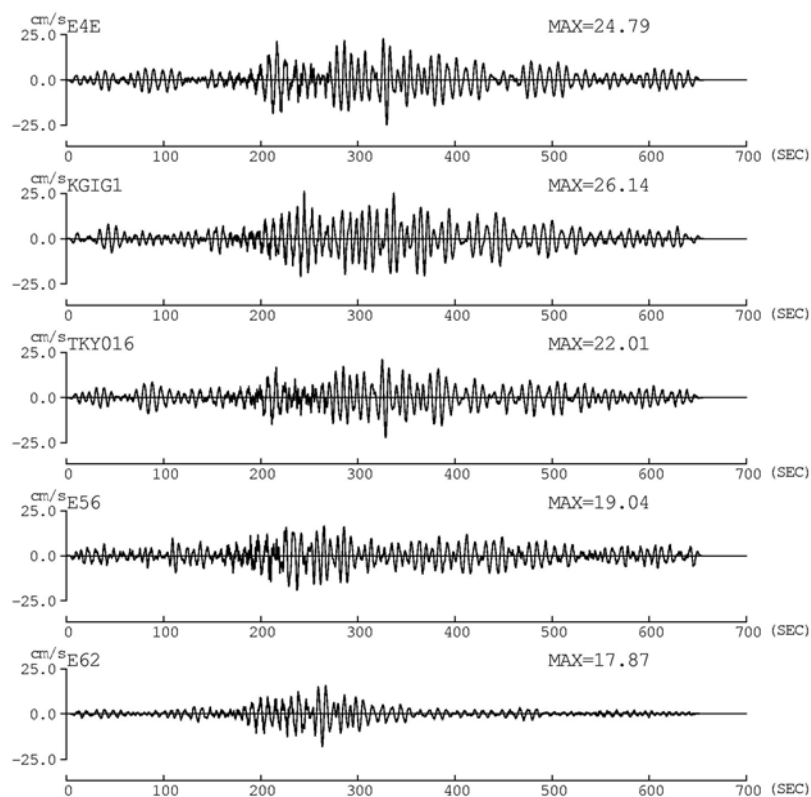


(b) EW 成分

図 2.4-27 西日本の代表観測点以外での内閣府(2012)の陸域ケースの 0.1~10Hz の加速度フィルター波(続き)

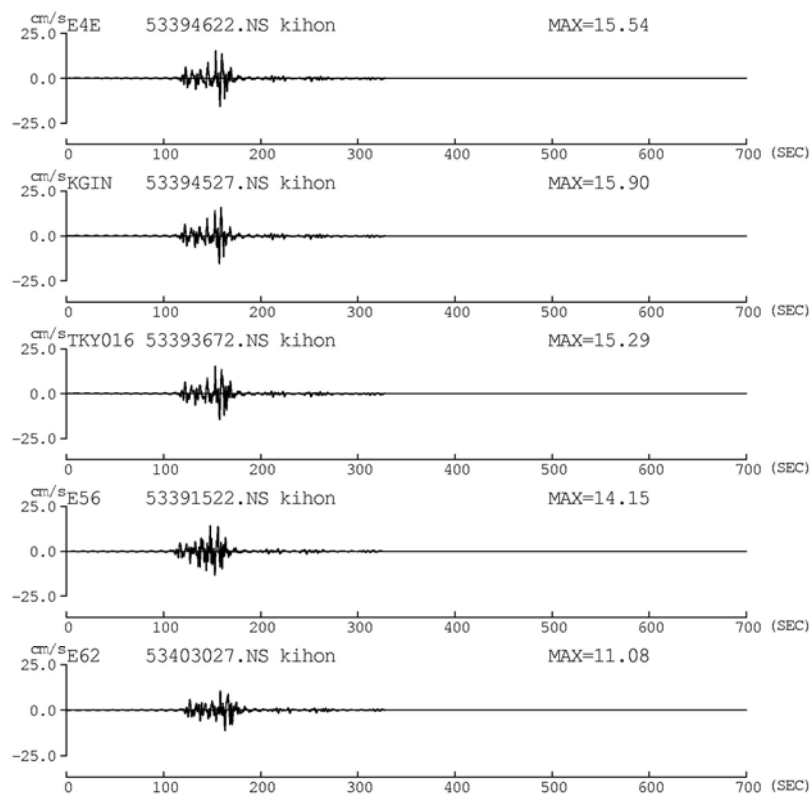


(a) 補間なし

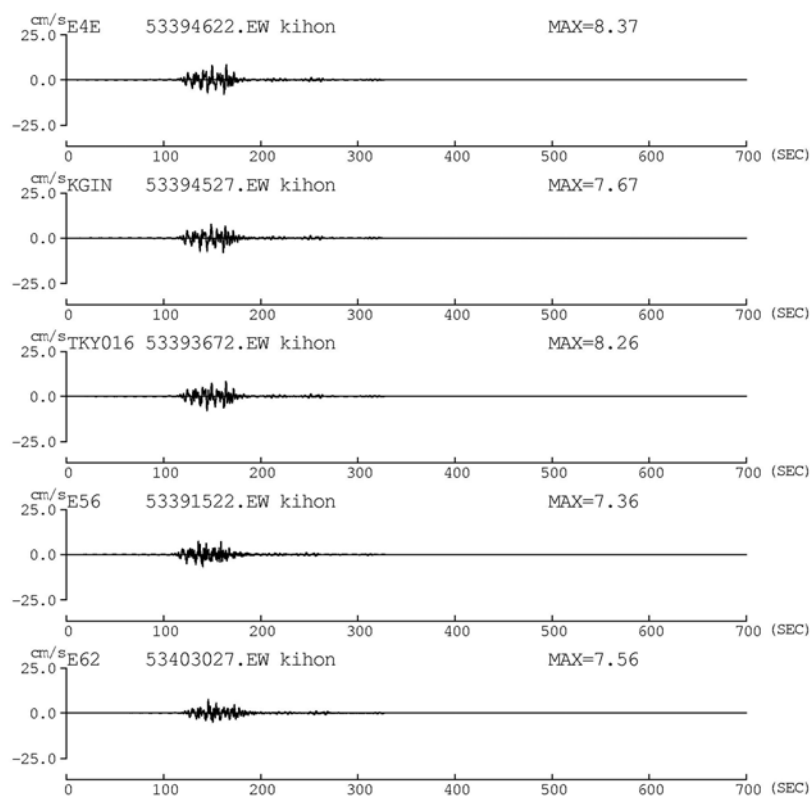


(b) 補間あり

図 2.4-28 関東平野の代表観測点での本業務の 0.1~10Hz の速度フィルター波

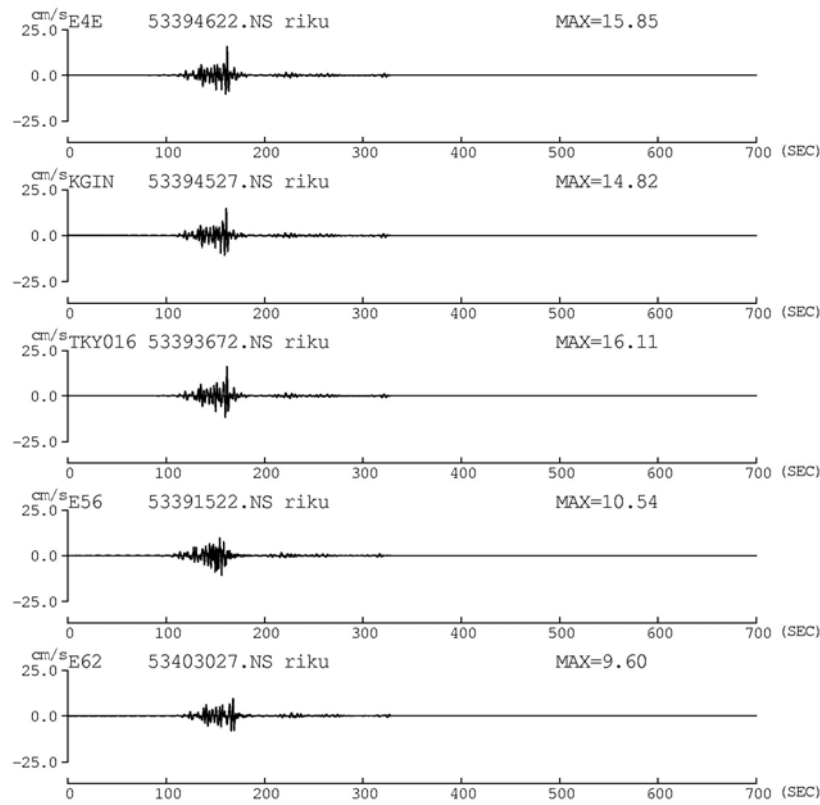


(a) NS 成分

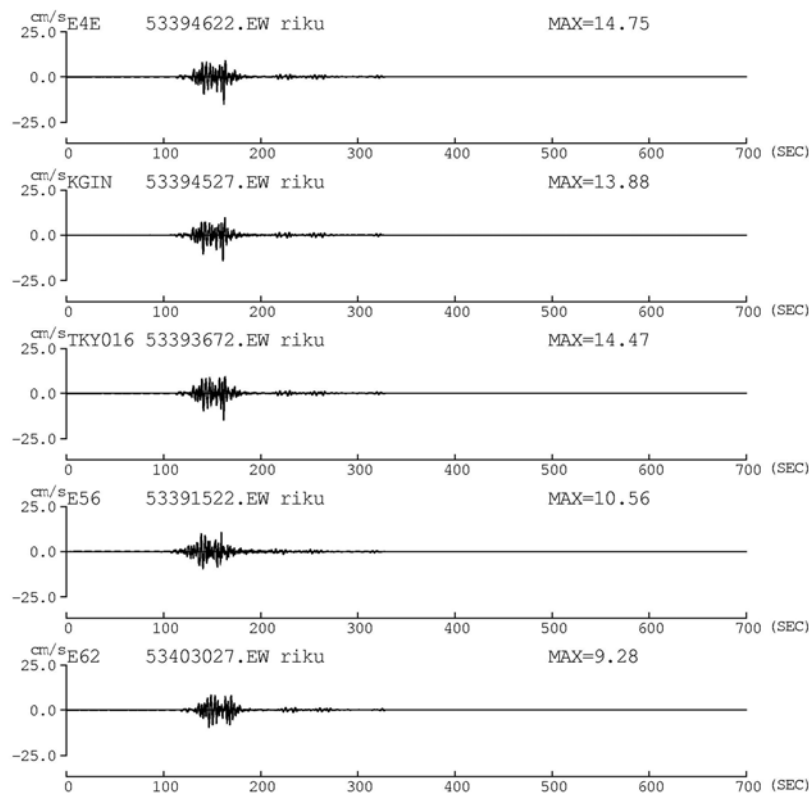


(b) EW 成分

図 2.4-29 関東平野の代表観測点での内閣府(2012)の基本ケースの0.1~10Hzの速度フィルター波

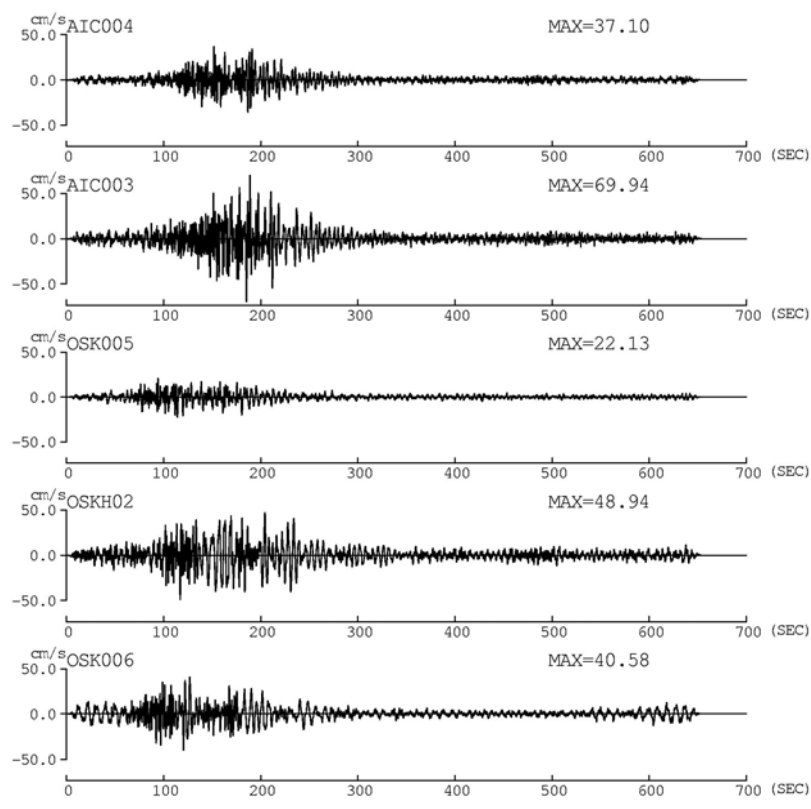


(a) NS 成分

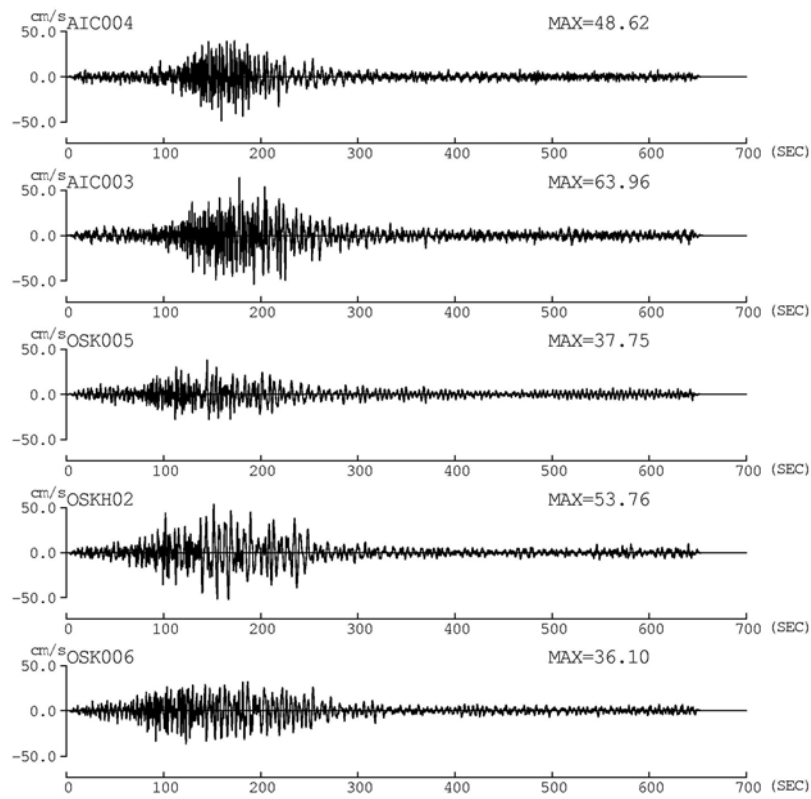


(b) EW 成分

図 2.4-30 関東平野の代表観測点での内閣府(2012)の陸域ケースの0.1~10Hzの速度フィルター波

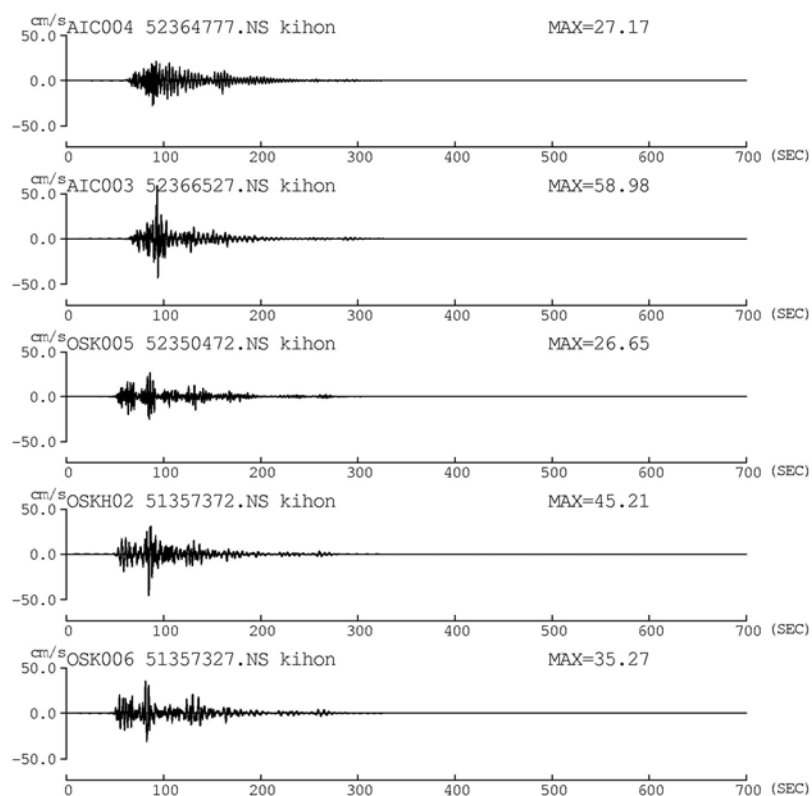


(a) 補間なし

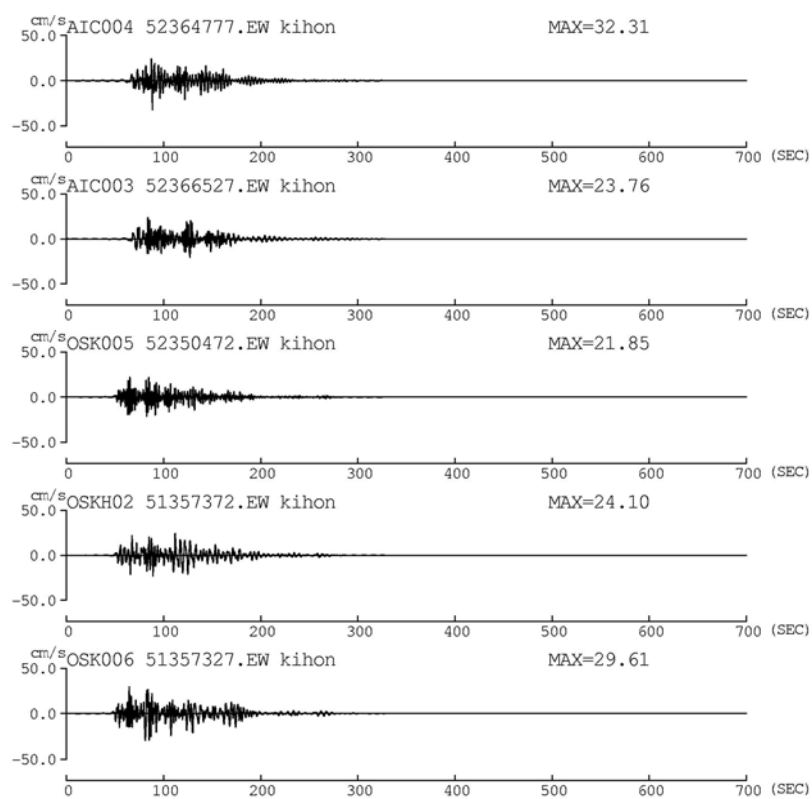


(b) 補間あり

図 2.4-31 濃尾平野・大阪平野の代表観測点での本業務の 0.1~10Hz の速度フィルター波

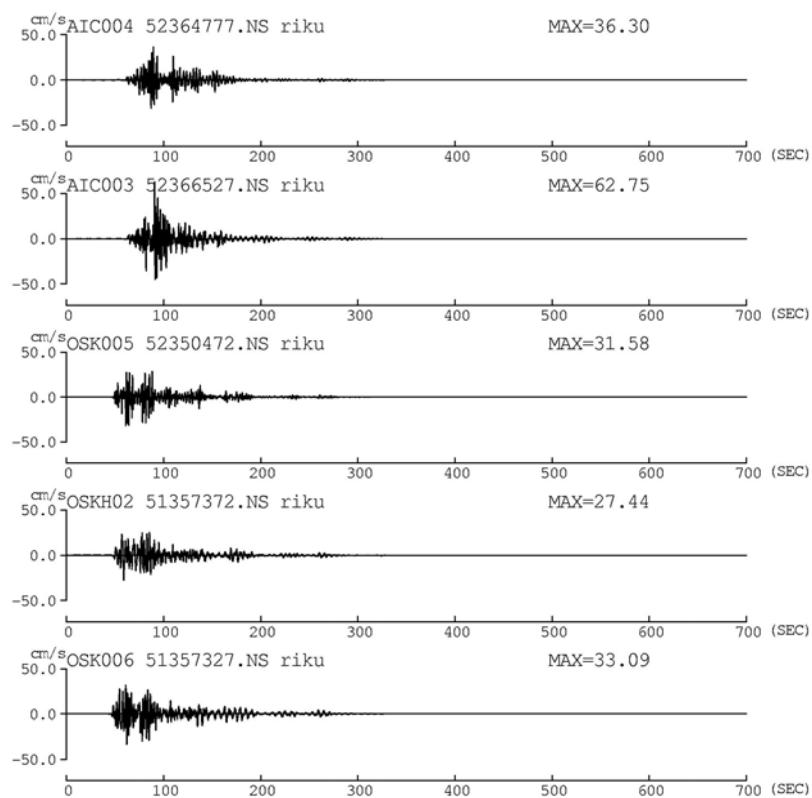


(a) NS 成分

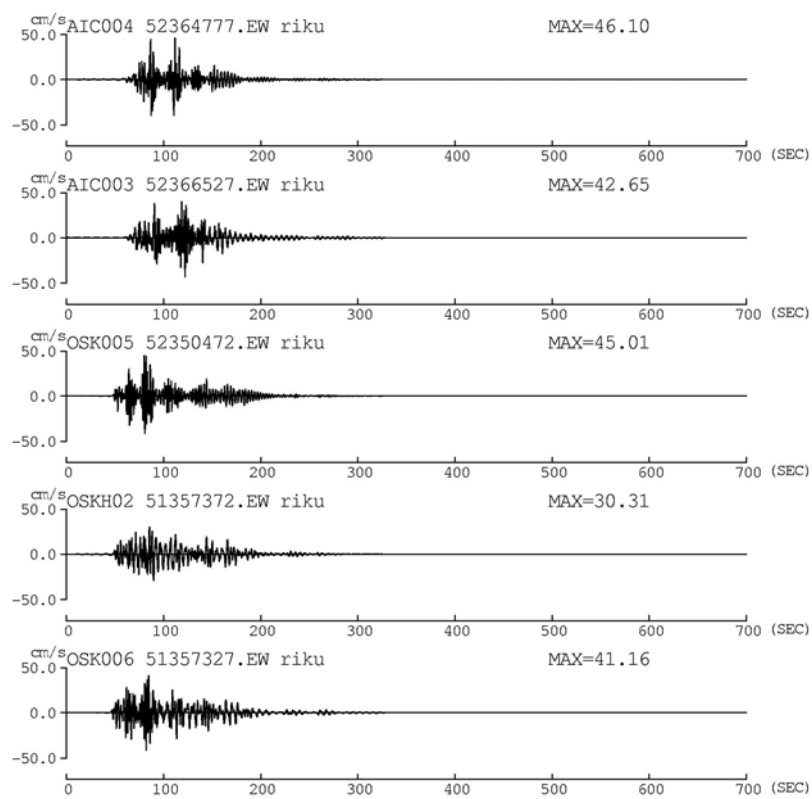


(b) EW 成分

図 2.4-32 濃尾平野・大阪平野の代表観測点での内閣府(2012)の基本ケースの 0.1~10Hz の速度フィルター波



(a) NS 成分



(b) EW 成分

図 2.4-33 濃尾平野・大阪平野の代表観測点での内閣府(2012)の陸域ケースの 0.1~10Hz の速度フィルター波

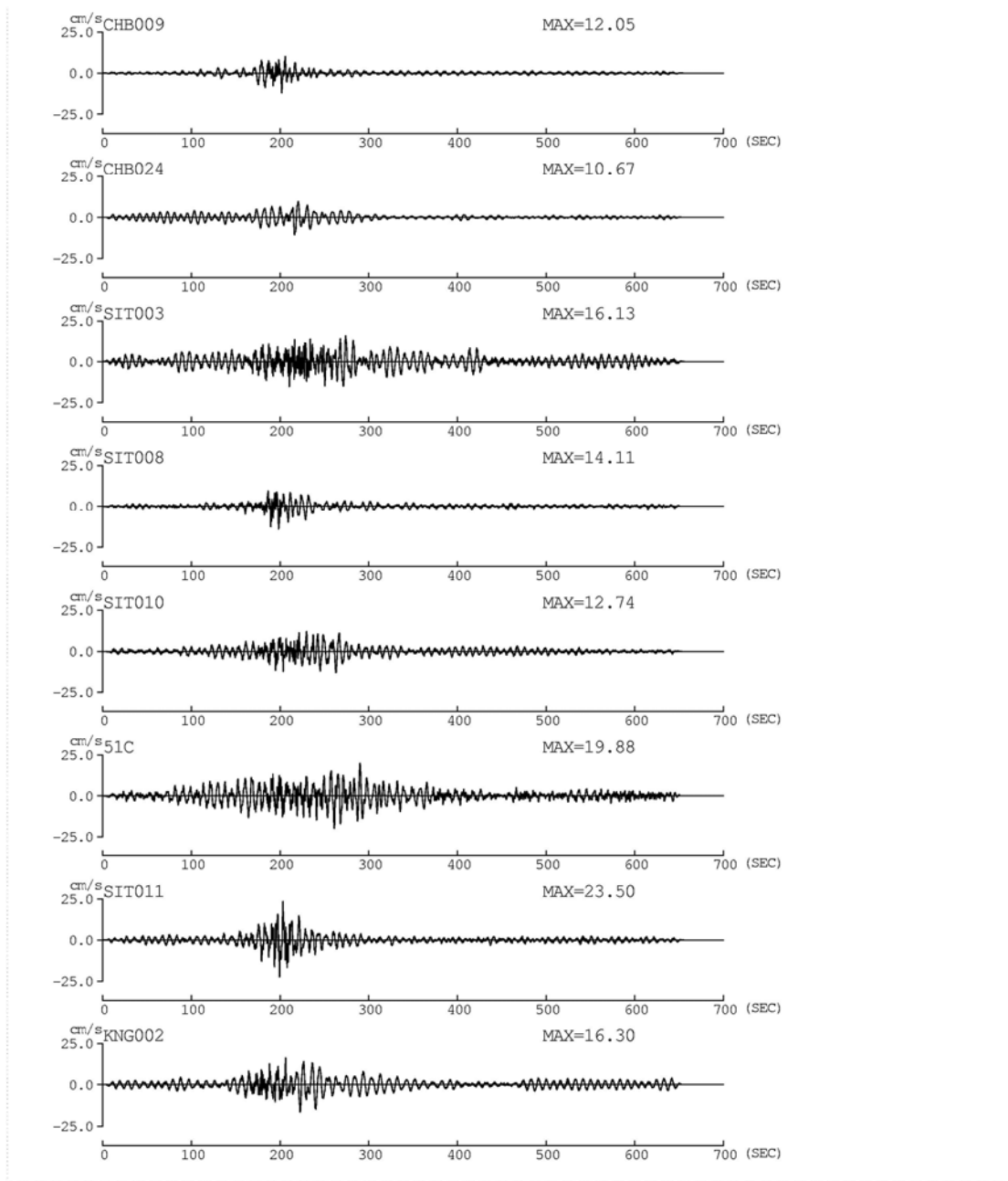
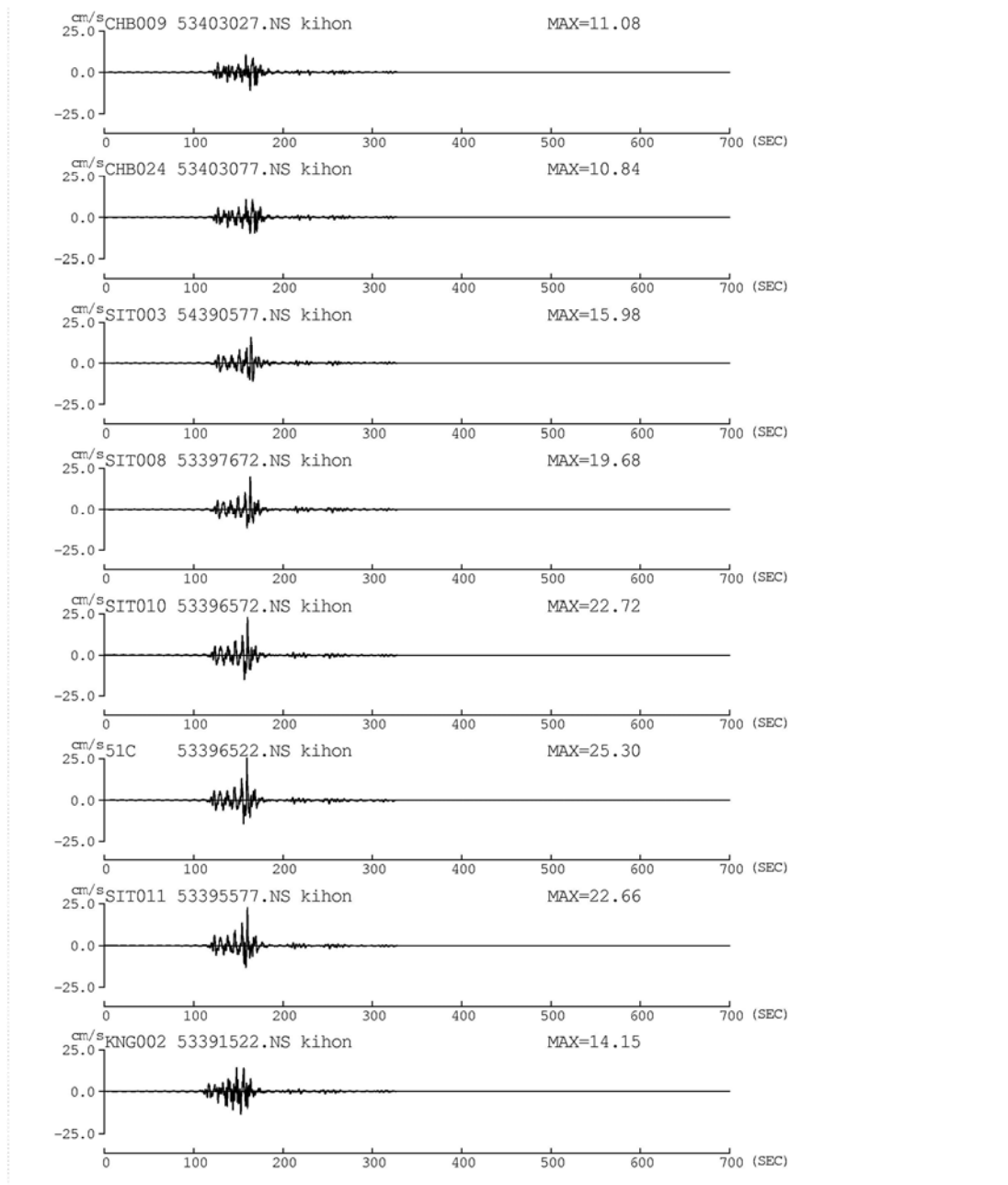
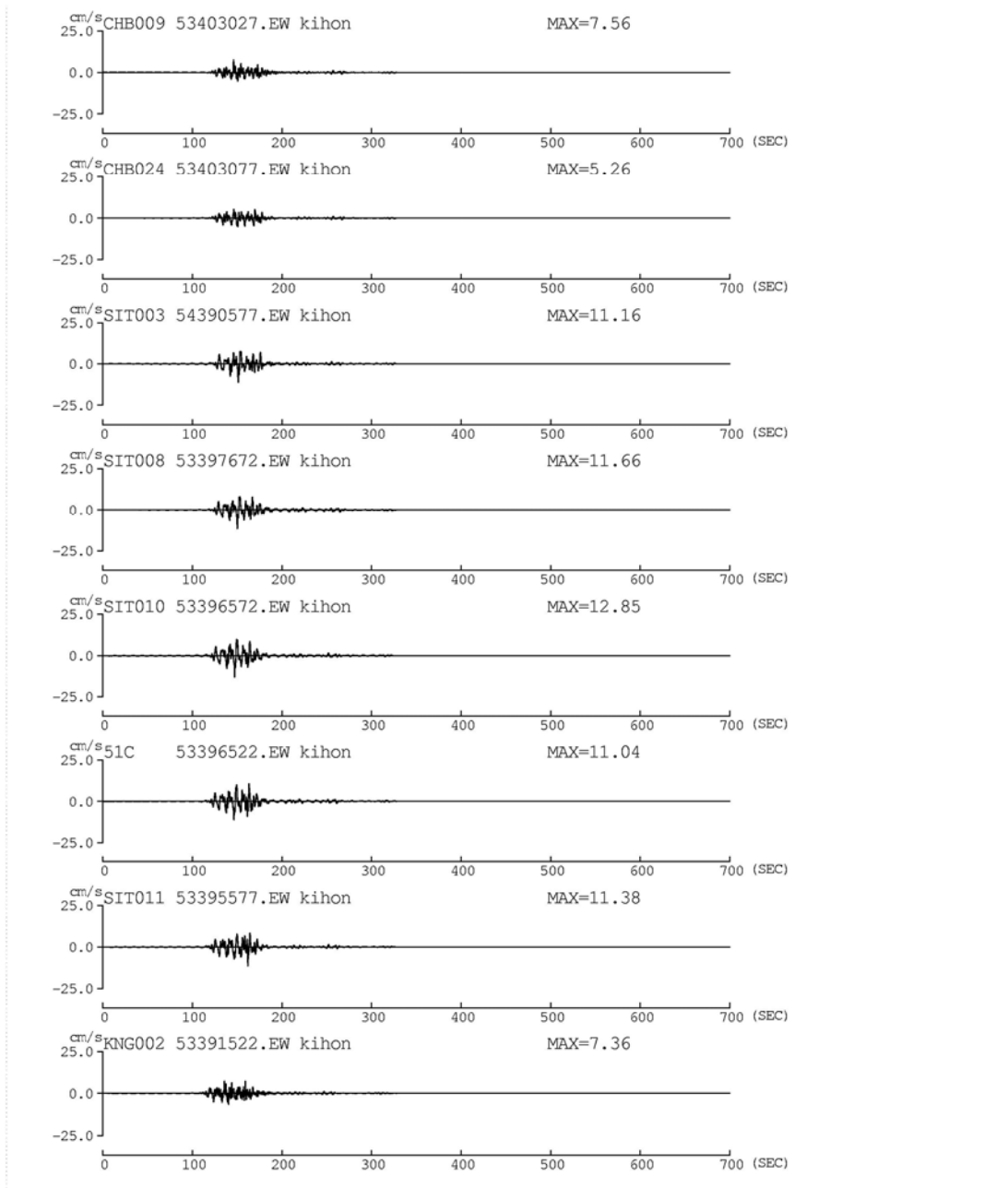


図 2.4-34 関東平野の代表観測点以外での本業務の 0.1~10Hz の速度フィルター波



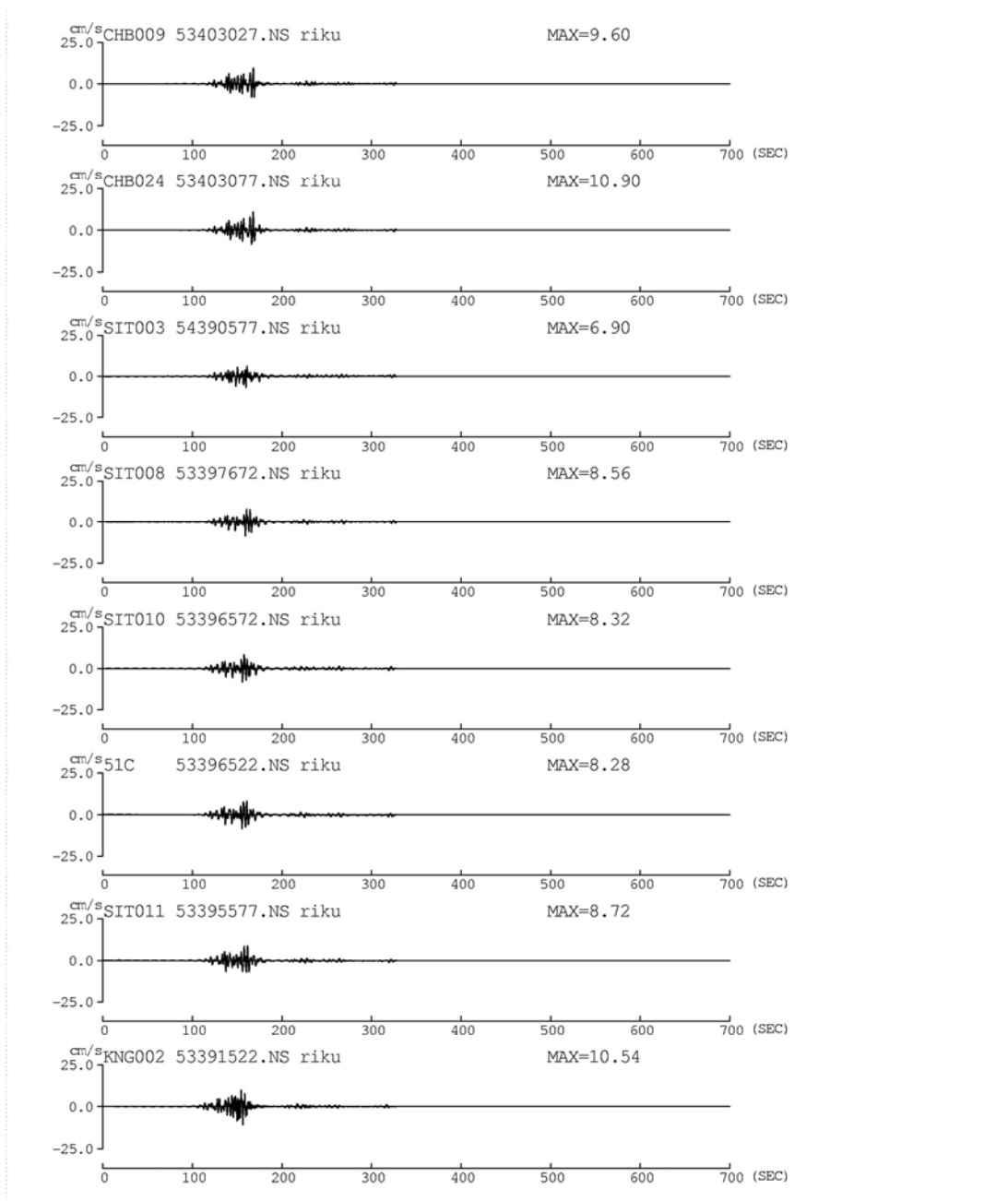
(a) NS 成分

図 2. 4-35 関東平野の代表観測点以外での内閣府(2012)の基本ケースの 0.1~10Hz の速度フィルター波



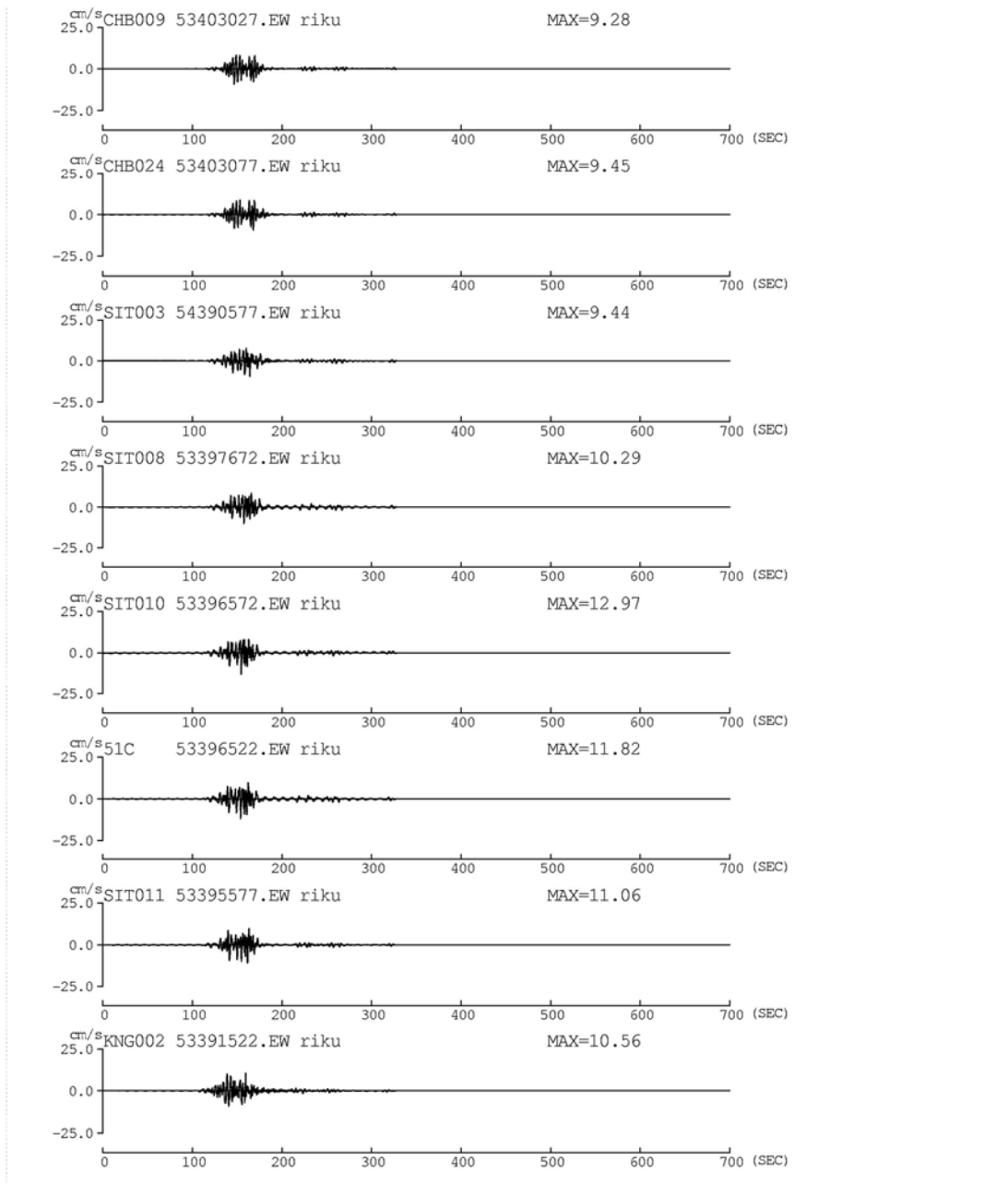
(b) EW 成分

図 2.4-35 関東平野の代表観測点以外での内閣府(2012)の基本ケースの0.1~10Hzの速度フィルター波(続き)



(a) NS 成分

図 2.4-36 関東平野の代表観測点以外での内閣府(2012)の陸域ケースの 0.1~10Hz の速度フィルター波



(b) EW 成分

図 2.4-36 関東平野の代表観測点以外での内閣府(2012)の陸域ケースの 0.1~10Hz の速度フィルター波(続き)

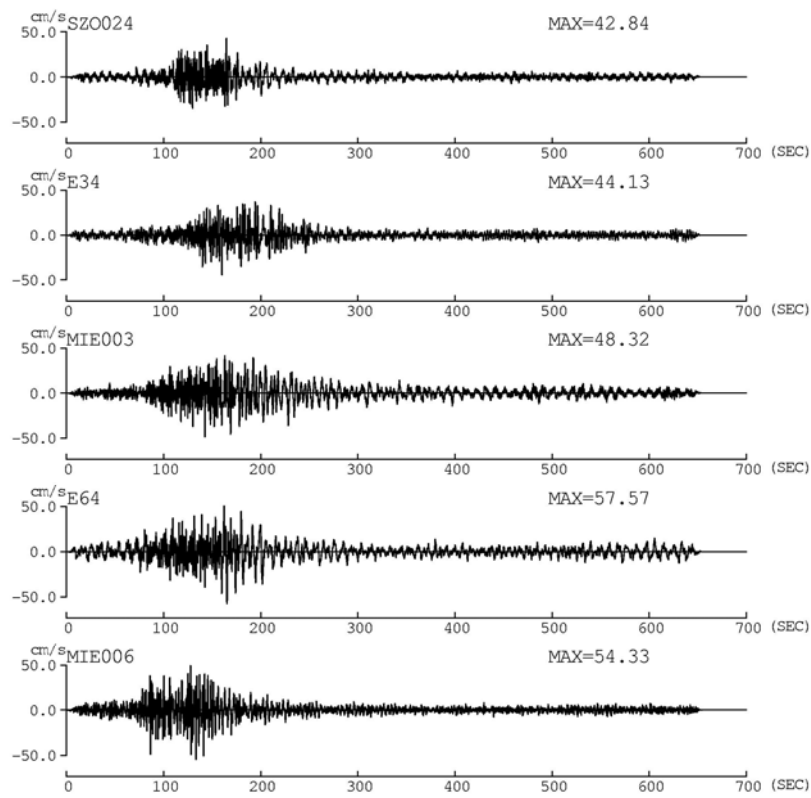
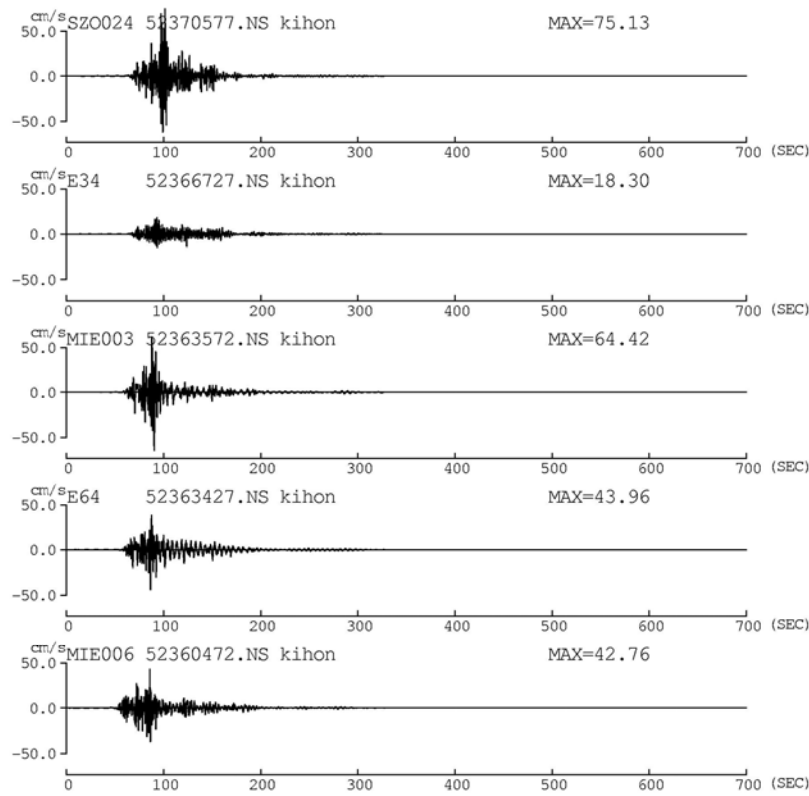
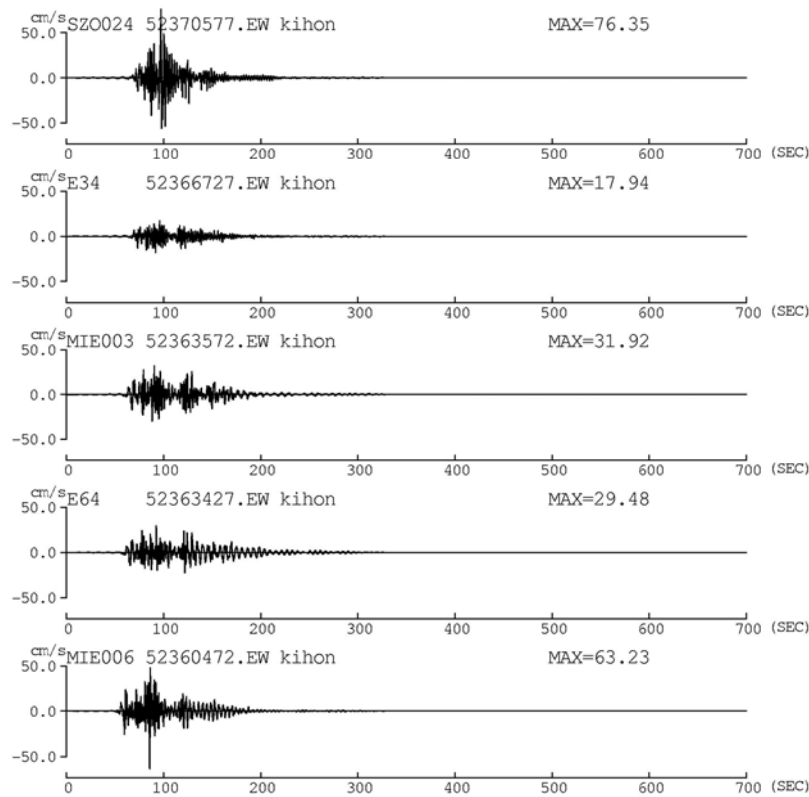


図 2.4-37 濃尾平野、東海地方の代表観測点以外での本業務の 0.1~10 秒の速度フィルター波

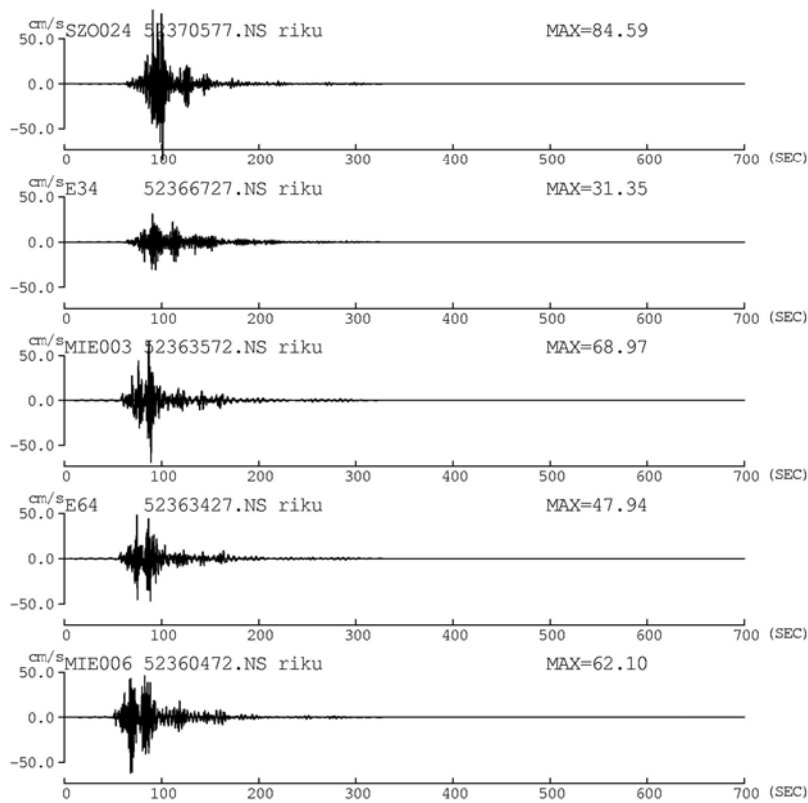


(a) NS 成分

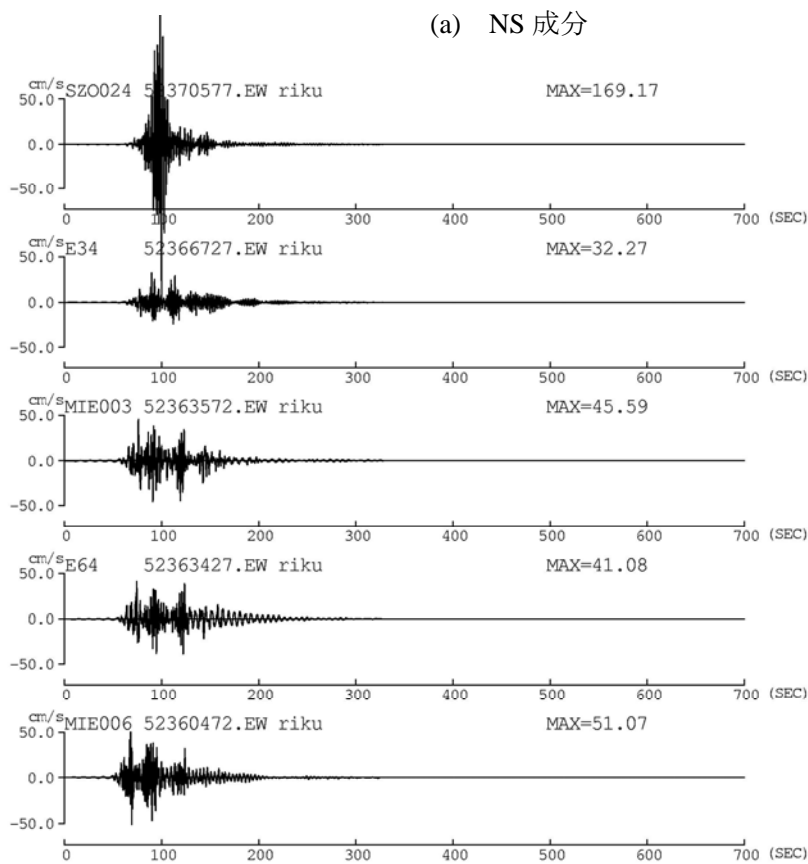


(b) EW 成分

図 2.4-38 濃尾平野、東海地方の代表観測点以外での内閣府(2012)の基本ケースの 0.1~10 秒の速度フィルター波



(a) NS 成分



(b) EW 成分

図 2.4-39 濃尾平野、東海地方の代表観測点以外での内閣府(2012)の陸域ケースの 0.1~10 秒の速度フィルター波

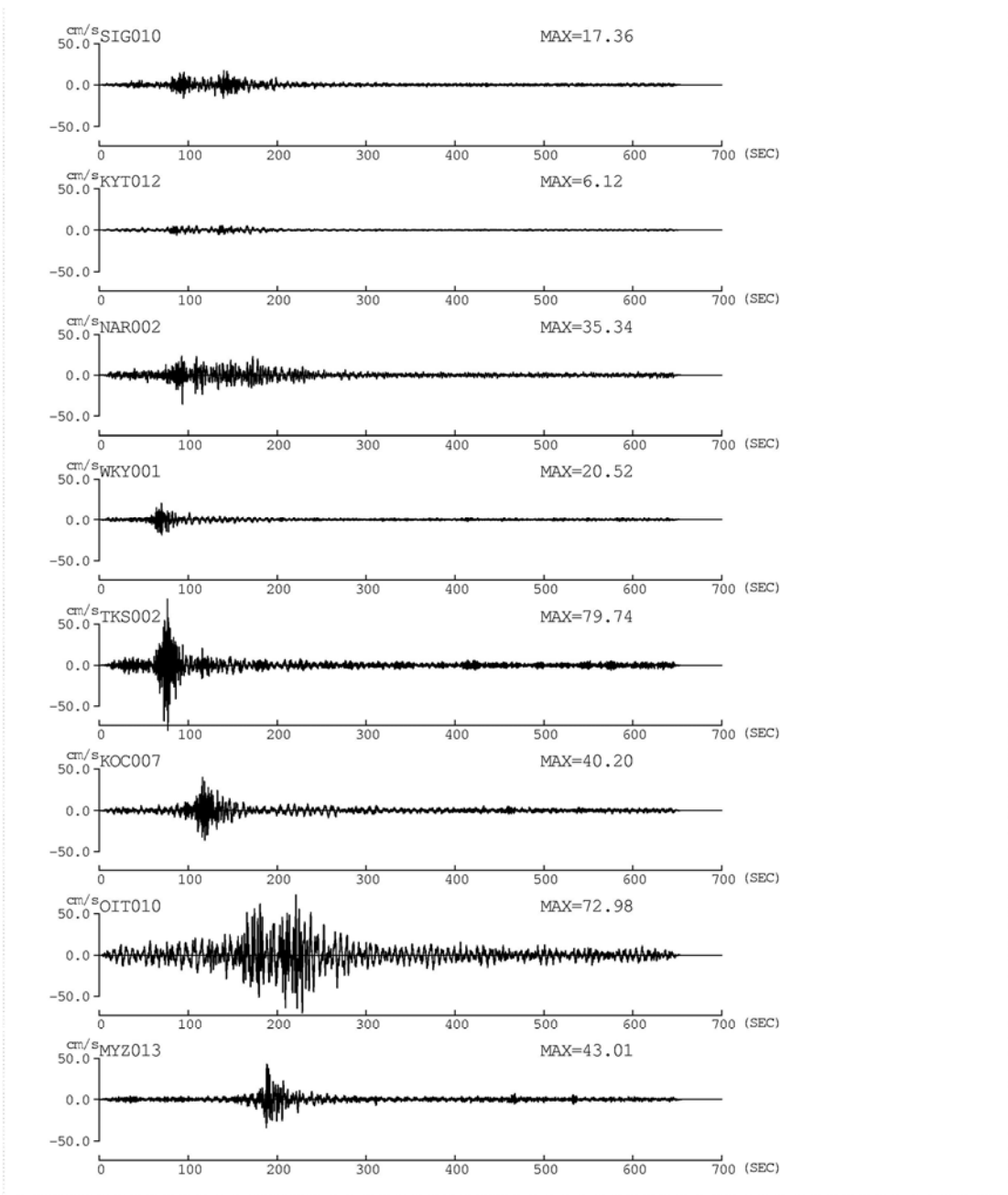
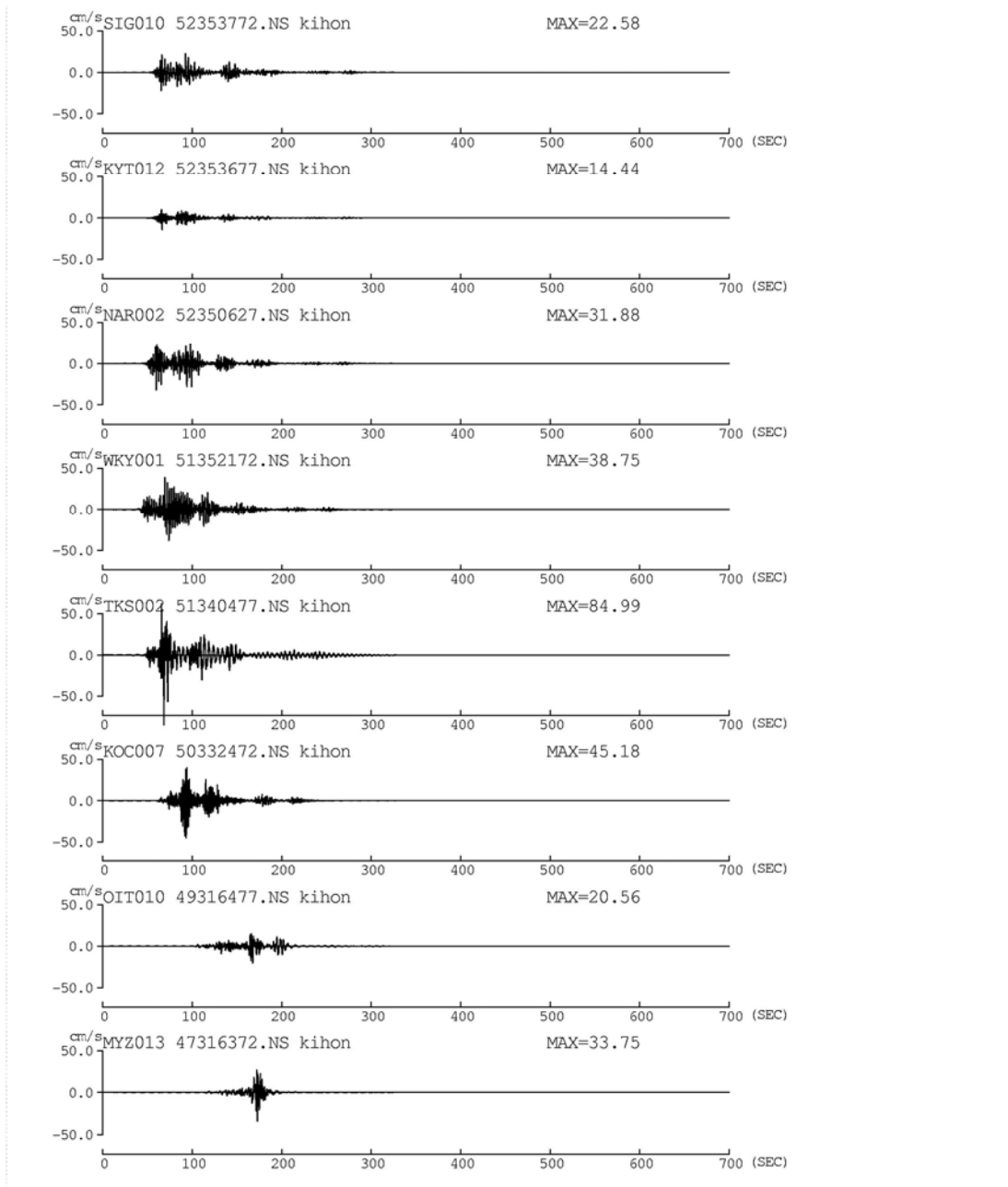
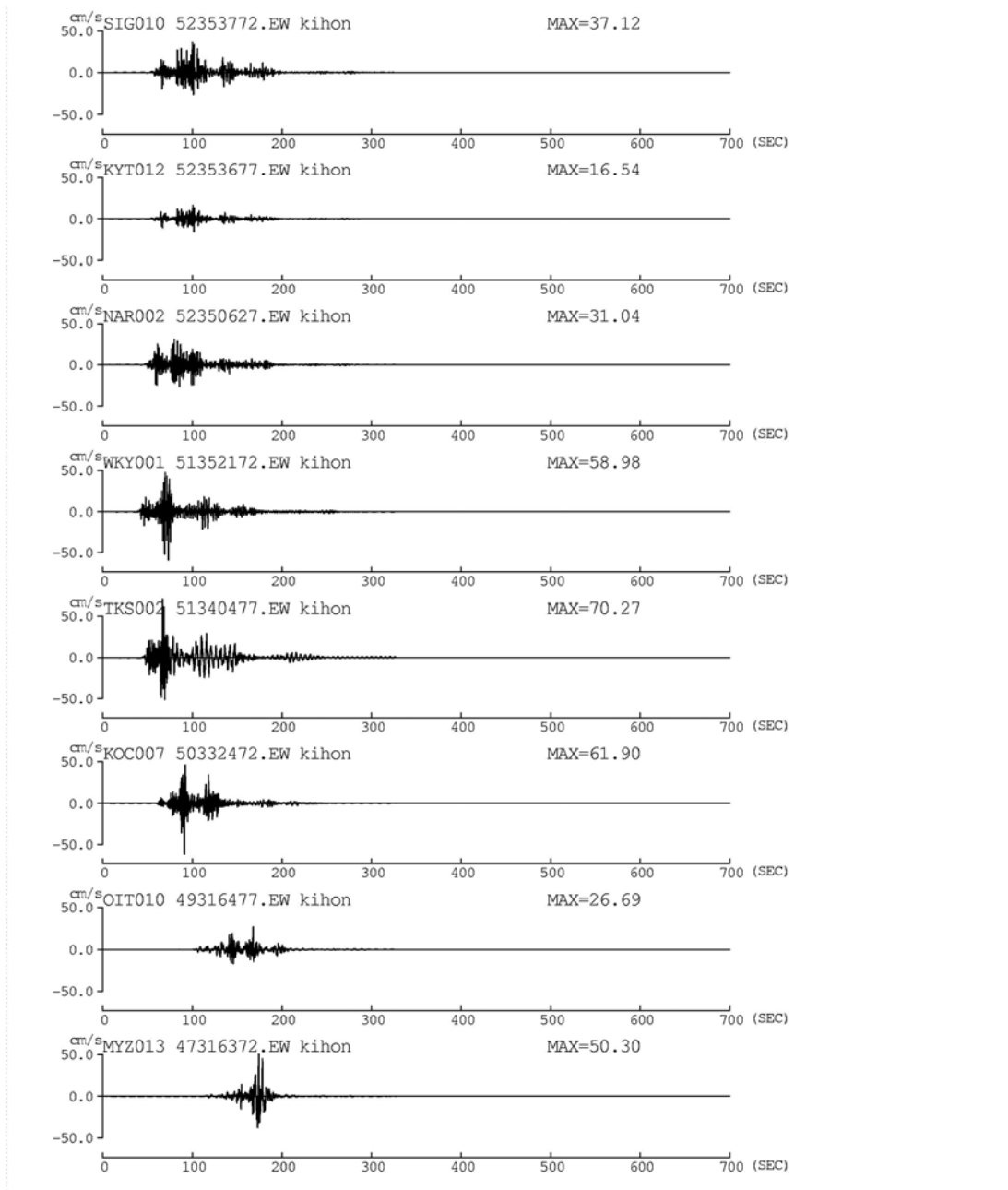


図 2.4-40 西日本の代表観測点以外の本業務の 0.1~10 秒の速度フィルター波



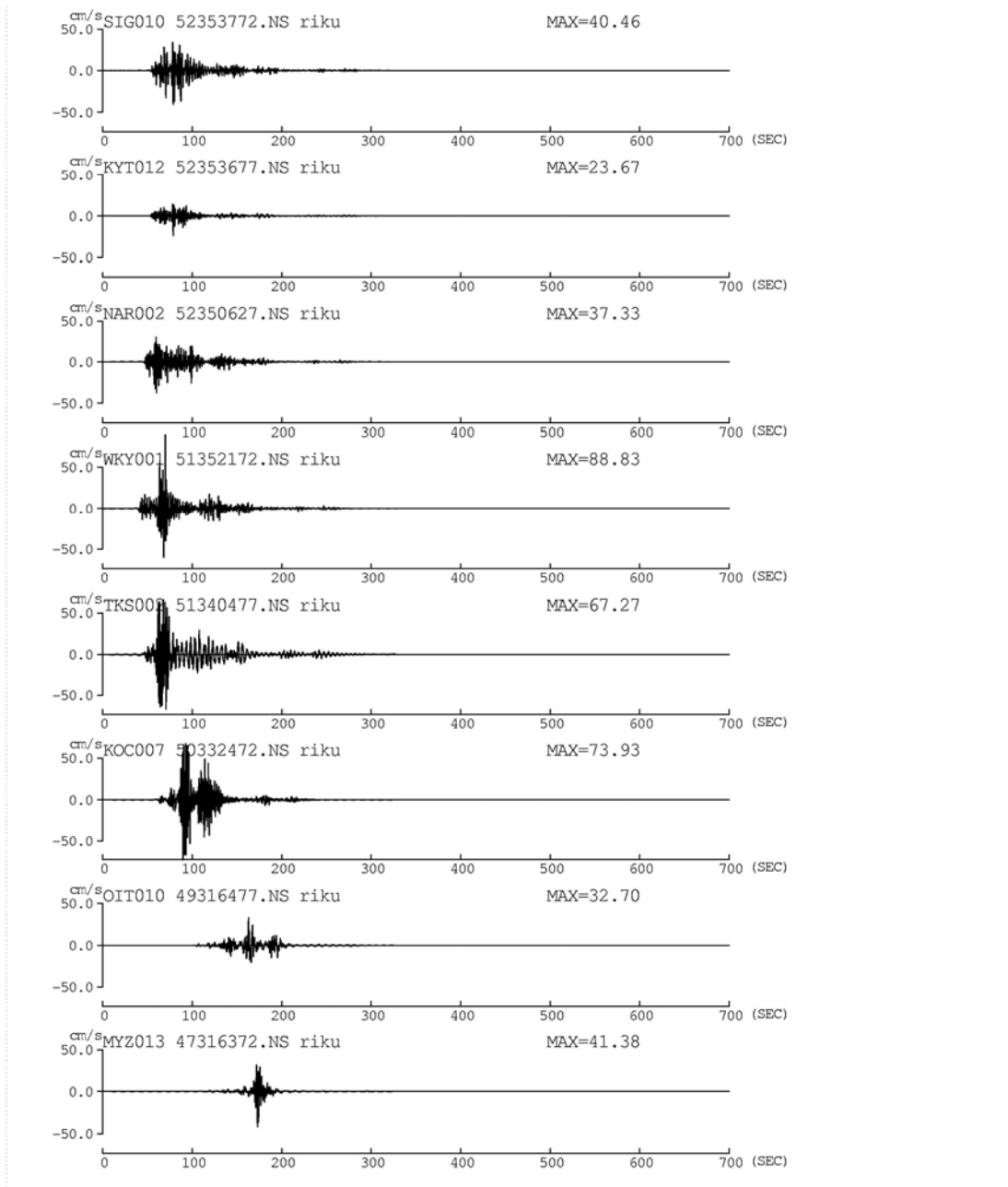
(a) NS 成分

図 2.4-41 西日本の代表観測点以外の内閣府(2012)の基本ケースの0.1~10秒の速度フィルター波



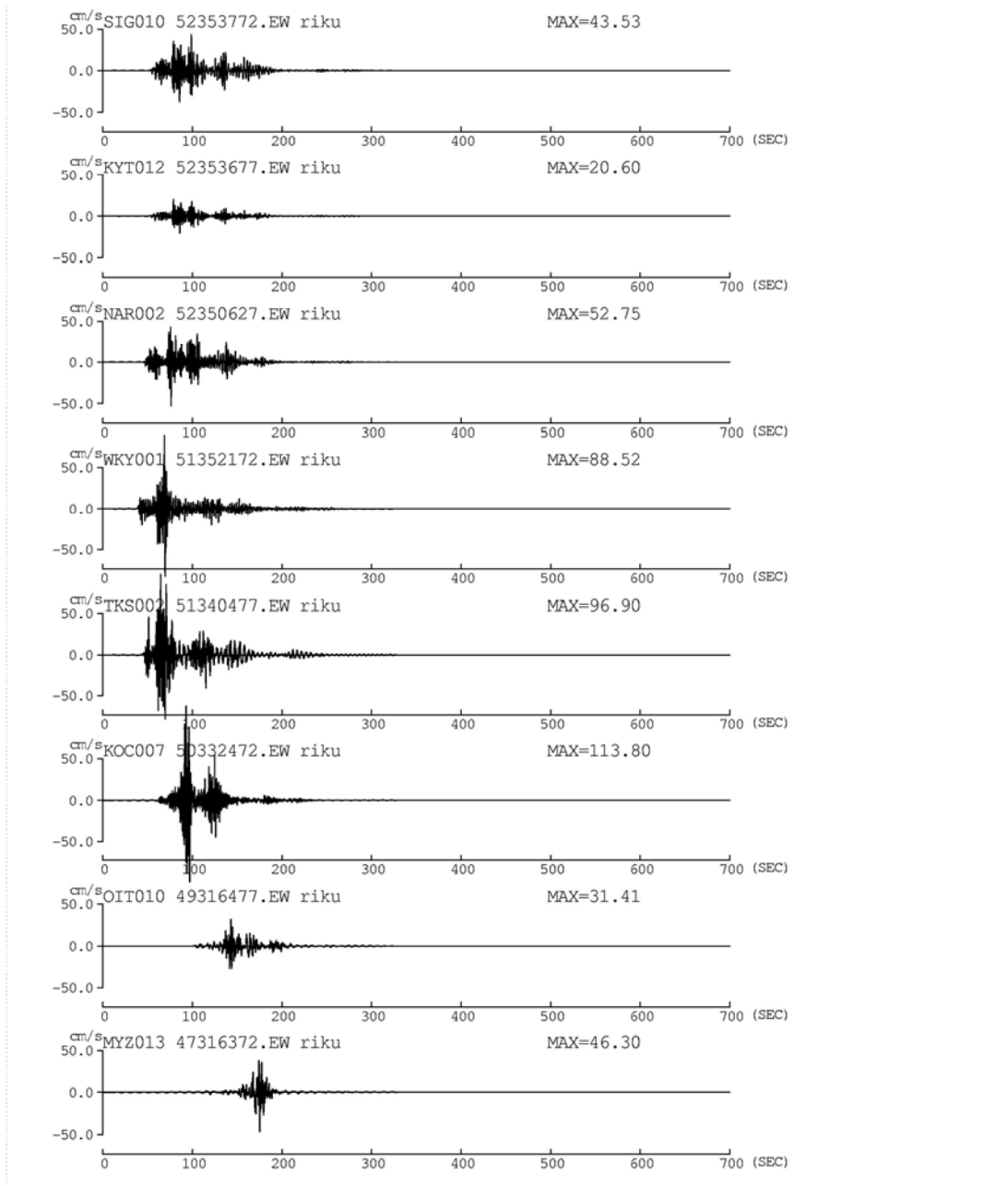
(b) EW 成分

図 2.4-41 西日本の代表観測点以外の内閣府(2012)の基本ケースの0.1~10秒の速度フィルター波(続き)



(a) NS 成分

図 2.4-42 西日本の代表観測点以外の内閣府(2012)の陸域ケースの0.1~10秒の速度フィルター波



(b) EW 成分

図 2.4-42 西日本の代表観測点以外の内閣府(2012)の陸域ケースの0.1~10秒の速度フィルター波(続き)

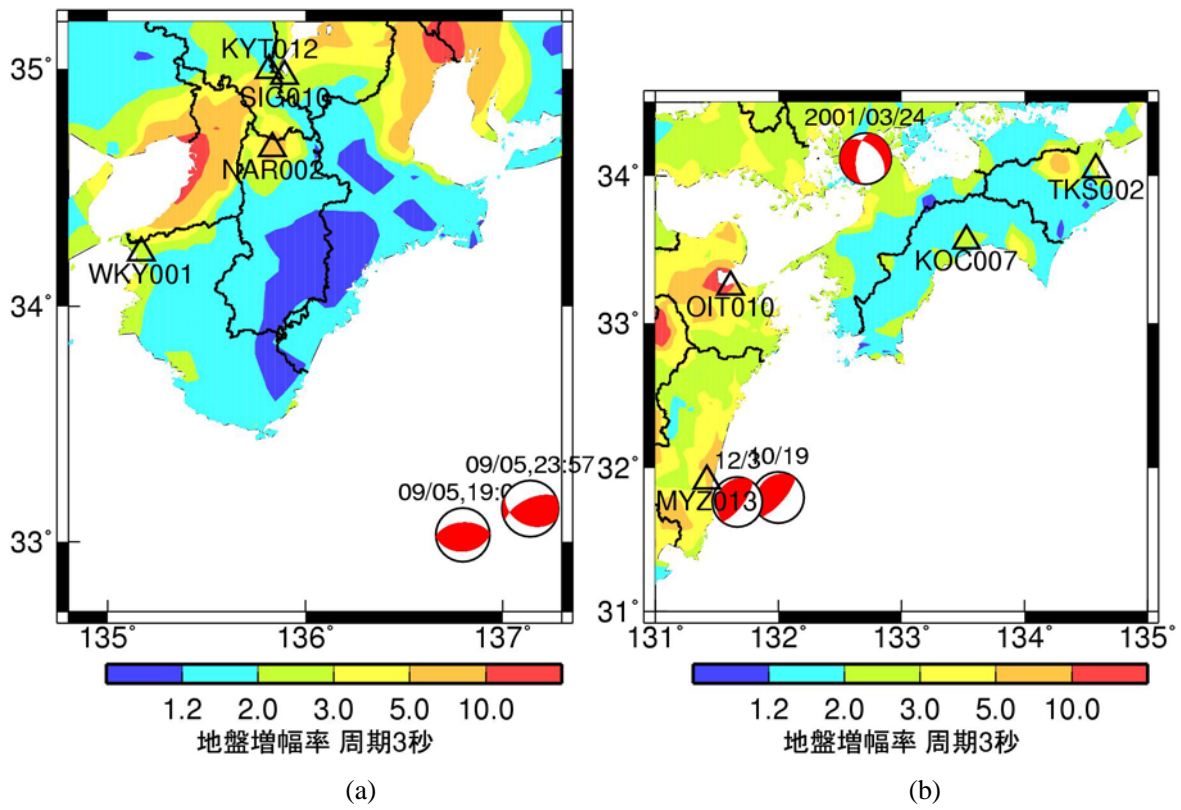


図 2.4-43 観測記録の比較を行う観測点と地震の震央位置とメカニズム解

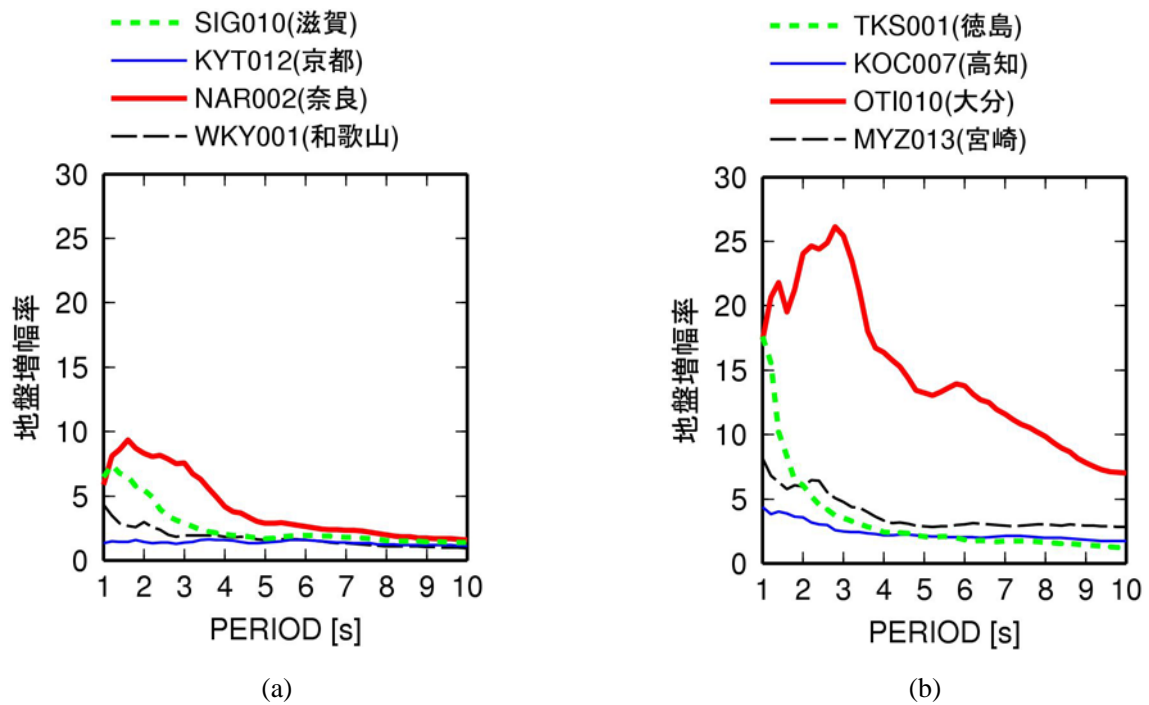


図 2.4-44 応答スペクトルの経験式の地盤増幅率

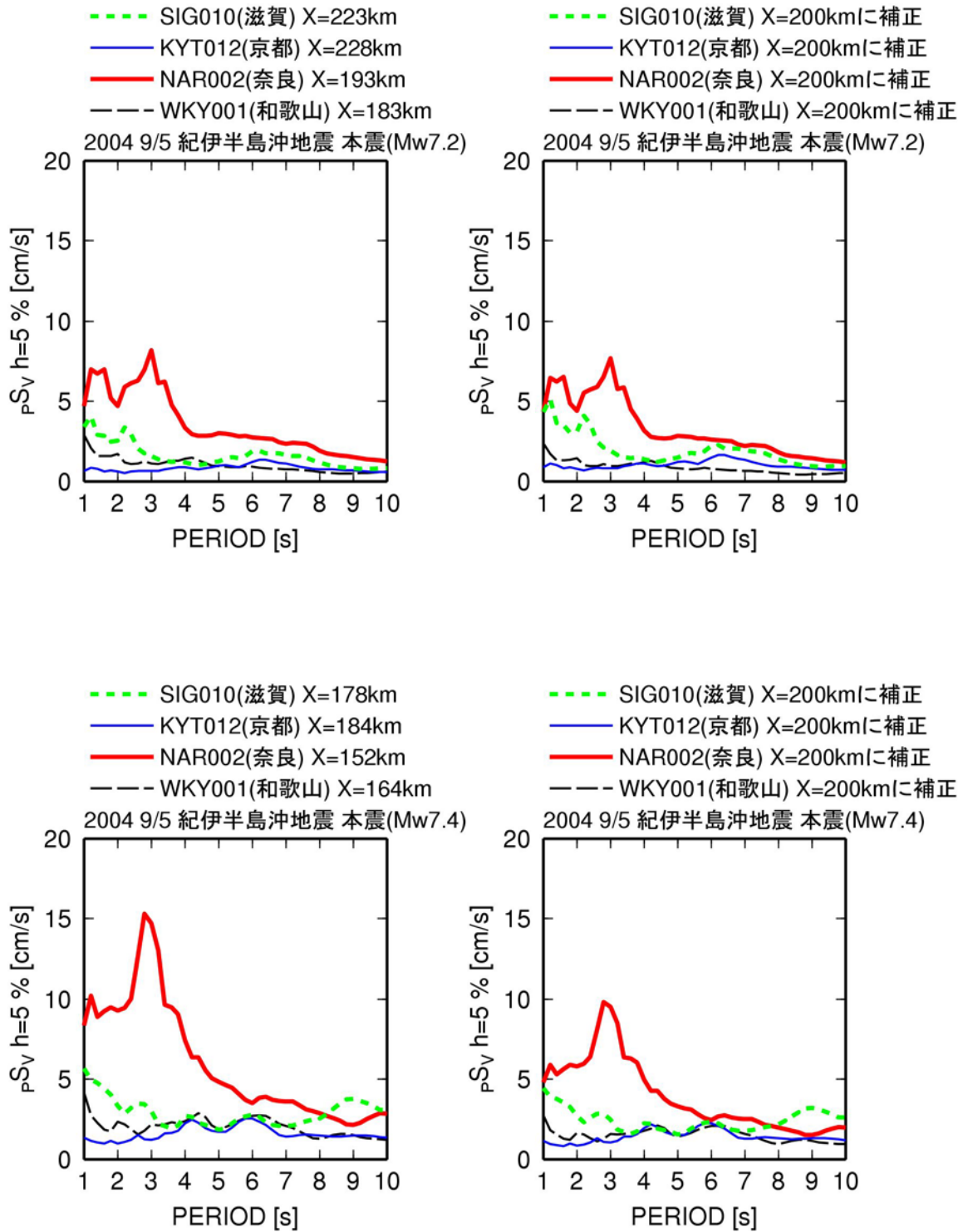


図 2. 4-45 4 観測点での 2004 年紀伊半島沖地震の前震と本震の観測擬似速度応答スペクトルと断層最短距離 200km に距離補正したスペクトル

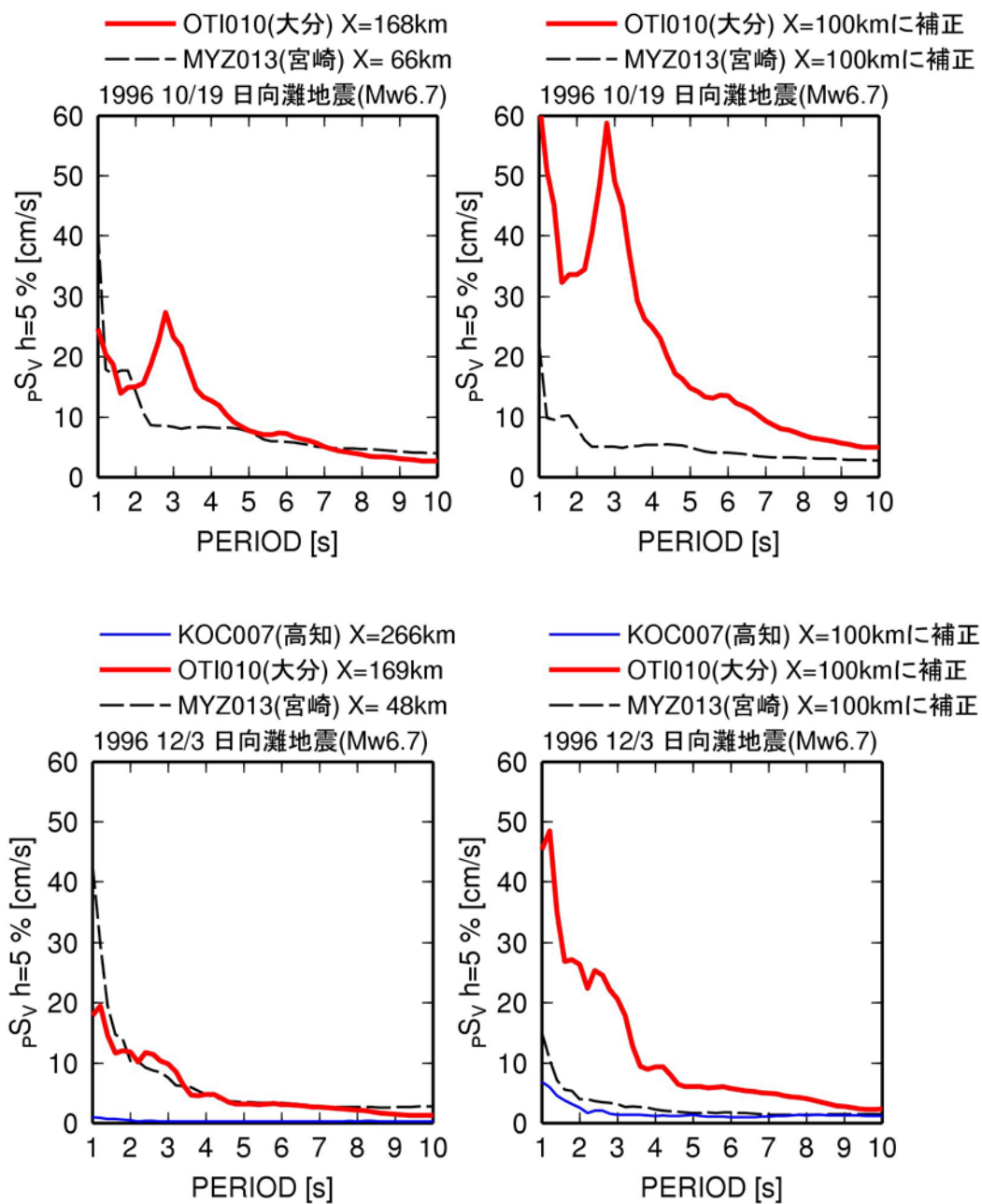


図 2. 4-46 4 観測点での 1996 年の 2 つの日向灘地震と 2001 年芸予地震の観測擬似速度応答スペクトルと断層最短距離 200km に距離補正したスペクトル

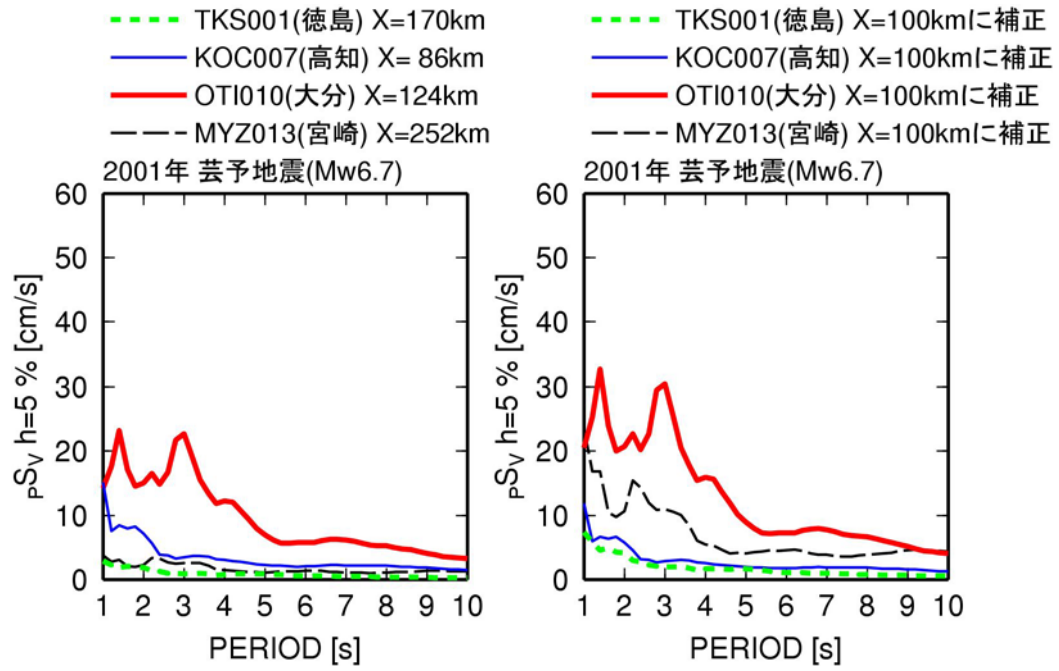
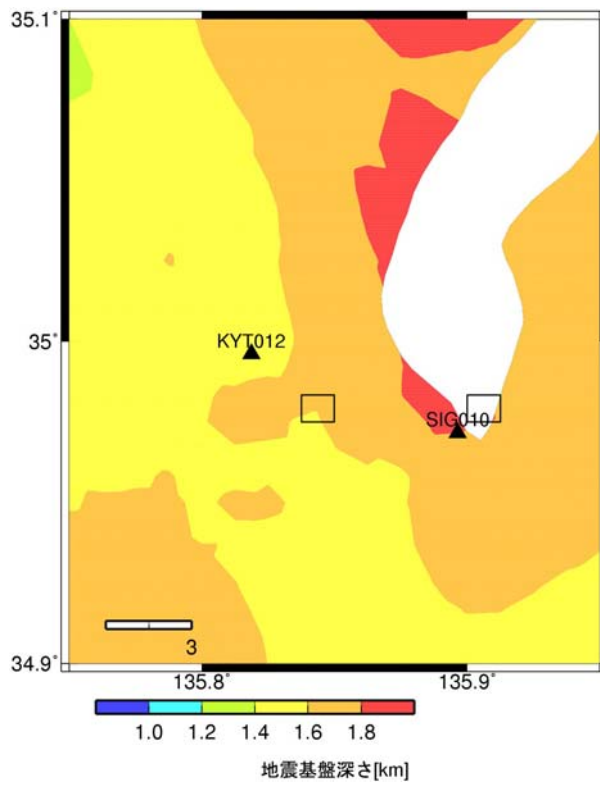
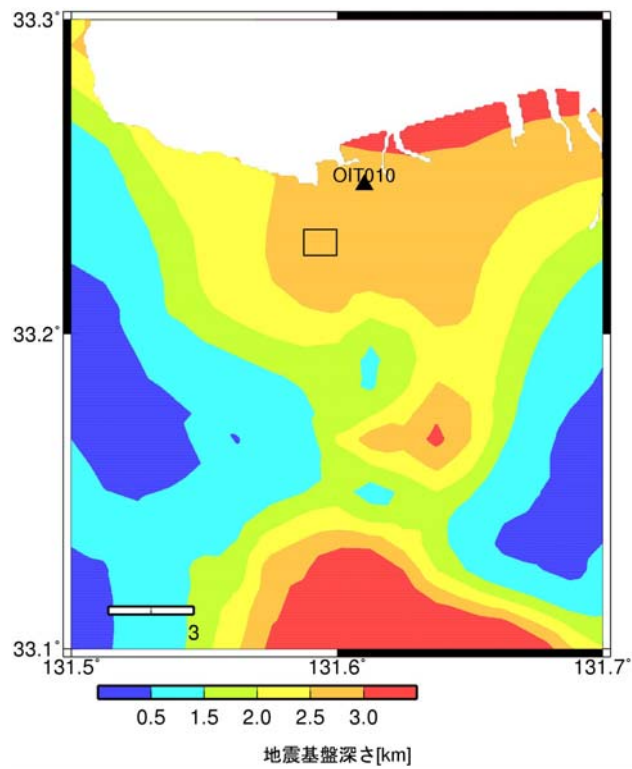


図 2. 4-46 4 観測点での 1996 年の 2 つの日向灘地震と 2001 年芸予地震の観測擬似速度応答スペクトルと断層最短距離 200km に距離補正したスペクトル(続き)



(a) 京都(KYT012)と大津(SIG010)



(b) 大分(OIT010)

図 2.4-47 観測点位置(▲)と波形が公開されている3次メッシュの範囲(□)の比較と地震本部(2012)に基づく地震基盤深さ

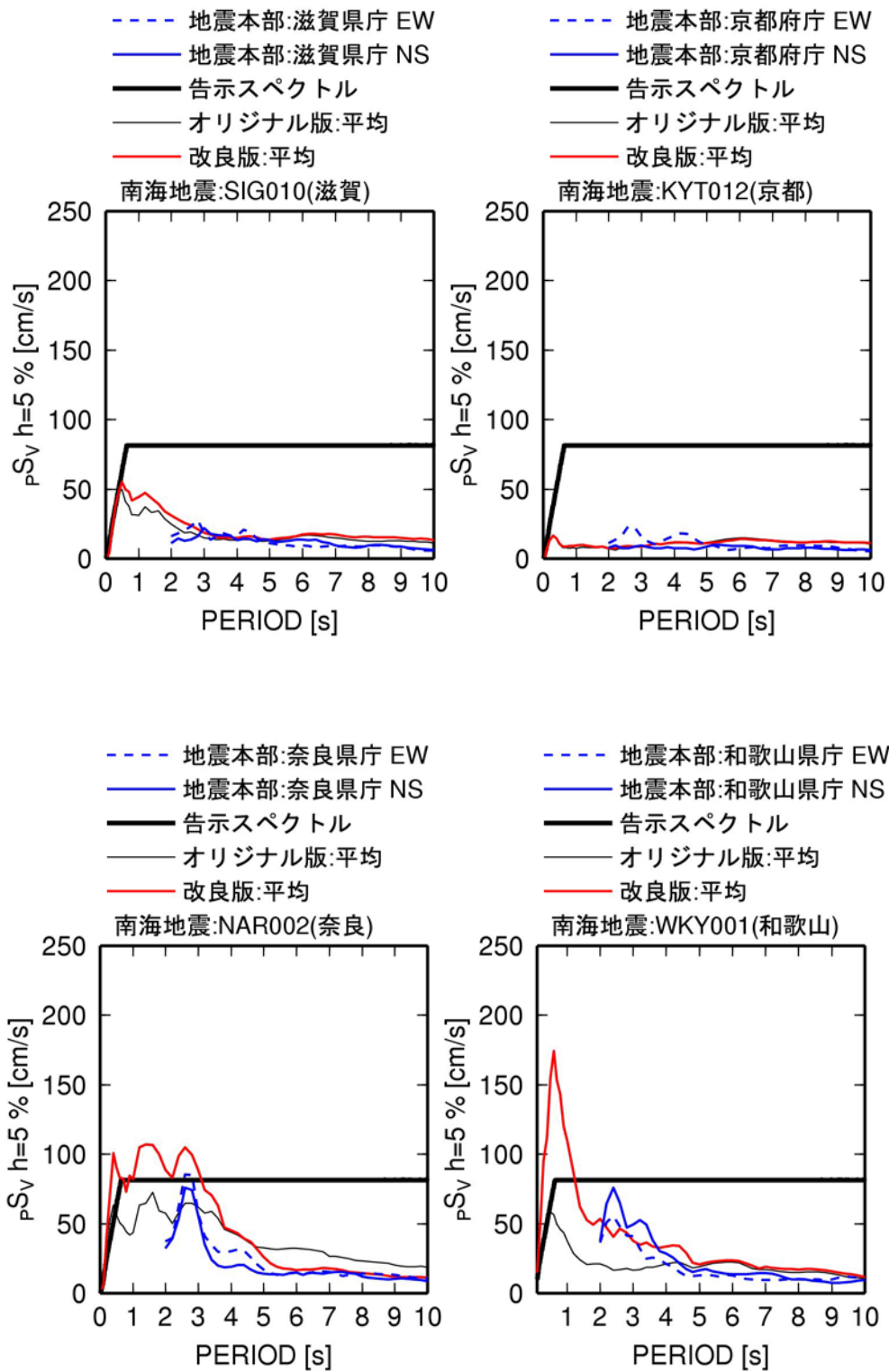


図 2.4-48 地震本部(2012)の南海地震(Mw8.4)の計算波形と、この震源モデルに基づく本業務の経験式(オリジナル版と改良版)の計算波形の擬似速度応答スペクトル(h=5%)の比較

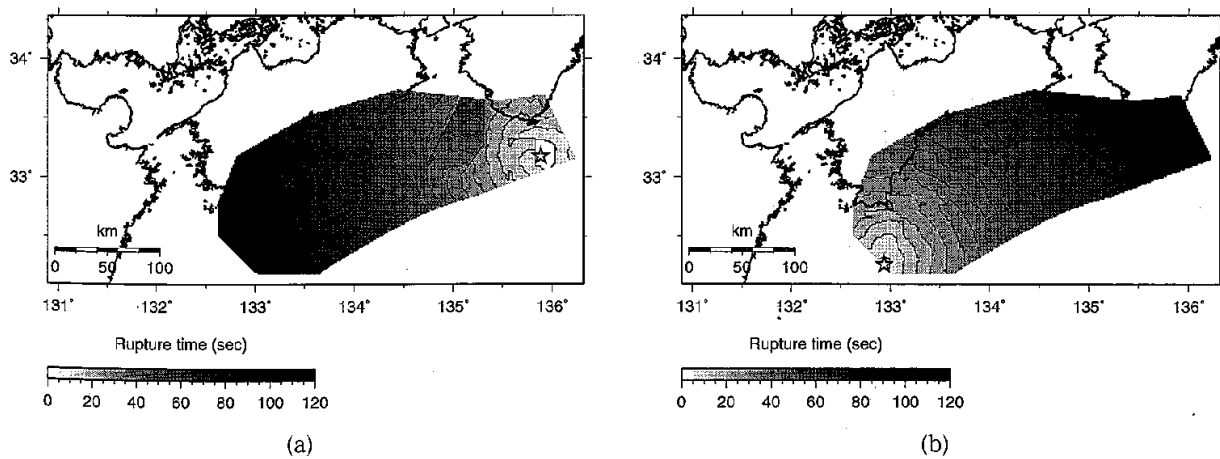


Fig. 10. Rupture time distribution for (a) the east-hypo model and (b) the west-hypo model. The stars indicate the rupture starting points.

図 2.4-49 岩城・他(2009)が3次元有限差分法による南海地震の計算に用いた破壊開始点が異なる2ケース

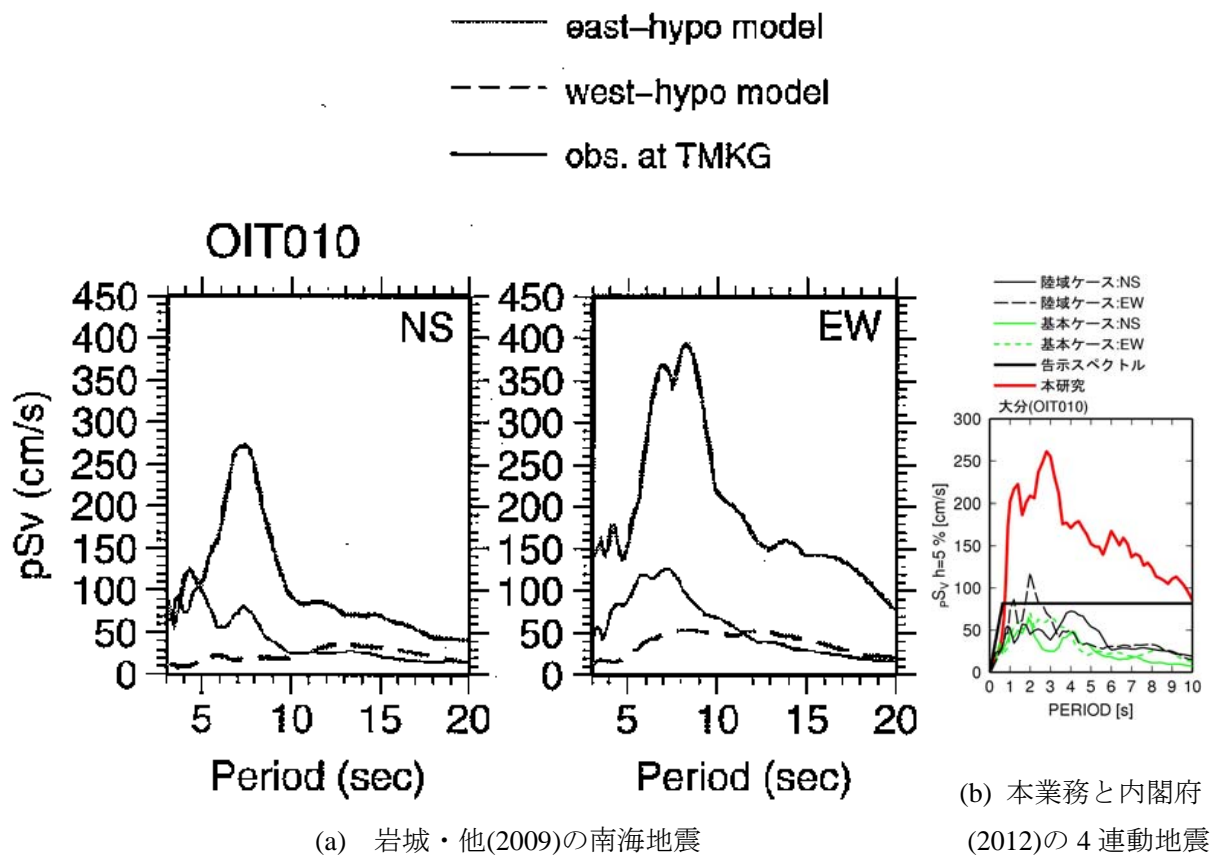


図 2.4-50 大分(OIT010)における岩城・他(2009)の3次元有限差分法による南海地震(Mw8.5)の計算波と、本業務と内閣府(2012)の4連動地震(Mw9.0)の計算波の擬似速度応答スペクトルの比較

2-5 東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーションの整理

2-5-1 はじめに

23年度、旧経験式と改良経験式を用いて、3月9日の前震と3月11日の最大余震と東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーションを行っている。24年度、改良経験式を用いて南海トラフの巨大地震(Mw9.0)の長周期地震動の計算を行ったが、23年度の東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーションを修正すべき点はないと考えられる。ここでは、23年度の内容に、一部加筆して整理した。この成果は、佐藤・他(2012)の論文中にもまとめられている。

2-5-2 震源モデルの設定

前震については、気象庁(2011)による震源モデルの M_0 と巨視的断層面を用いた。最大余震については、F-netの M_0 、走向、傾斜角を用いて断層面を設定した。断層面積は、静的応力降下量3MPa(Kanamori and Anderson, 1975; Kanamori and Brodsky, 2004; 中央防災会議, 2003)を仮定して計算し、正方形断層を仮定して断層長さや幅を決めた。破壊開始点は、気象庁の震源位置とし、断層面の中心になるように断層面をおいた。表2.5-1に、これら2つの地震の震源パラメータをまとめて示す。なお、ここで用いた静的応力降下量の3MPaという値は、世界の浅い地震の平均的値であり(Kanamori and Anderson, 1975; Kanamori and Brodsky, 2004)、プレート境界地震に限ってもほぼこの値前後に分布している(Kanamori and Brodsky, 2004)。中央防災会議(2003)の東海・東南海・南海地震の3連動地震の震源モデルでも3MPaが使われている。

本震の震源モデルは、経験的グリーン関数法に基づく佐藤(2012)の震源モデルと地震調査研究推進本部(2009)の強震動予測レシピに基づき設定した。表2.5-2に設定した震源パラメータを示す。図2.5-1には、設定した3つの巨視的断層面と佐藤(2012)の4つの強震動生成領域・破壊開始点を示す。また、観測波とシミュレーション波の比較を例示する6つの観測点位置と、改良経験式の周期3秒での地盤増幅率の分布も示している。工学的には、地震動が大きくなる地点でのシミュレーション結果が重要であるため、周期1~10秒で地盤増幅率が比較的大きく、東北地方太平洋沖地震の長周期地震動も大きい観測点を選択した。

強震動予測レシピ(地震調査研究推進本部, 2009)では、巨視的断層のパラメータを先に設定し、その後アスペリティのパラメータを設定するようになっている。本研究では、強震動予測レシピで使われている式を用いて、強震動生成領域のパラメータからカスケード的に巨視的断層のパラメータを設定する。強震動予測レシピには、地殻内地震については、「1つのセグメントに1つあるいは2つのアスペリティを設定する」と記述されているが、海溝型については、「アスペリティの個数は、アスペリティの位置が推定されている場合には、結果的に想定する震源域に含まれるアスペリティの数に相当する。」と記述されている。そこで、佐藤(2012)の震源モデルの第3と第4強震動生成領域(図2.5-1の青と緑の矩形

破線)は、ほぼ同じ時間に破壊していることから、1つの巨視的断層に2つの強震動生成領域があると仮定した。また、第1強震動生成領域(図2.5-1の赤の矩形破線)、第2強震動生成領域(図2.5-1の黒の矩形破線)に対しては、それぞれ1つずつの巨視的断層を仮定した。3つの巨視的断層の破壊開始点と破壊開始時間差は、佐藤(2012)の強震動生成領域1~3の破壊開始点、破壊開始時間差を用いて、3連動震源モデルを設定した。本研究では、予測ではなくシミュレーションを目的としているため、この地震以前に考えられていたセグメントの情報は用いない。

各断層のパラメータの設定方法は以下の通りである。佐藤(2012)の震源モデルには背景領域がないため、背景領域は考慮しない。各断層の巨視的断層の面積 S は、静的応力降下量 $\Delta\sigma$ を3MPaと設定して、強震動生成領域の面積 S_a と応力降下量 $\Delta\sigma_a$ を用いて、次式(Madariaga, 1979)により設定する。

$$S = \Delta\sigma_a S_a \quad (2.5-1)$$

断層3では、右辺は2つの強震動生成領域の $\Delta\sigma_a S_a$ の和となる。

断層は正方形を基本とした。ただし、長周期波形を用いた震源インバージョンで用いられている断層幅が200km程度である(例えば、鈴木・他, 2011)ことから、巨視的断層の幅の上限は200kmに設定した。巨視的断層の位置は、長さ方向は強震動生成領域が中心となるように設定し、幅方向は、深さ60kmとなる位置まで陸側に接するように設定した。この際の走向、傾斜角は強震動生成領域と同じ、 200° 、 15° とし、巨視的断層面上に強震動生成領域が載るように設定した。

巨視的断層の地震モーメント M_0 は、(2)式(Eshelby, 1957)により計算する。

$$M_0 = 16 / (7\pi^{3/2}) \Delta\sigma S^{3/2} \quad (2.5-2)$$

経験式のデータの最大 M_w は8.2であることから、 M_w 8.2以上では外挿となる。 M_w^2 項が考慮されていても、 M_w 8.2以上での拘束がない。そのため、上述のように震源パラメータを設定した場合、断層2の M_w は8.8となり、改良経験式でも長周期帯域でスペクトルを過大評価する結果が得られた。そこで、応答スペクトルの改良経験式に M_w の頭打ちを8.2~8.8まで0.1刻みで与えてシミュレーションを実施した。その結果、 M_w 8.4程度で、本震の長周期地震動がほぼ説明できることから、改良経験式では断層2の M_w を8.4とした。司・他(2011)は、東北地方太平洋沖地震(M_w 9.0)、2003年十勝沖地震(M_w 8.3)、2001年ペルー地震(M_w 8.4)、2010年チリ地震(M_w 8.8)の記録と司・翠川(1999)の最大速度の距離減衰式を用いて、 M_w 8.3程度で頭打ちを示している。司・他(2011)では、1枚の巨視的断層面を用いており、最大速度が対象であるが、本研究で推定した M_w 8.4はこの値に近い。

2-5-3 長周期地震動シミュレーション

図2.5-2には、前震(2011/3/9/11:45 M_w =7.4, 三陸沖)と最大余震(2011/3/11/15:15 M_w =7.8, 茨城県沖)の周期3秒での擬似速度応答スペクトル分布を、観測と、改良経験式、旧経験式に基づくシミュレーションで比較した結果を示す。図中の丸印が、観測記録が得られてい

るK-NET、KiK-net観測点である。いずれの図も、観測点での値を図化の際に空間補間した結果である。どちらの経験式もほぼ観測を再現しているが、旧経験式はやや過大評価である。

図2.5-3には、東北地方太平洋沖地震の周期3秒と周期5秒での擬似速度応答スペクトル分布を示す。前震と最大余震の結果と同様に、旧経験式ではやや過大評価であるのに対して、改良経験式は観測をほぼ再現している。旧経験式と改良経験式によるシミュレーション結果の違いをわかりやすくするため、図2.5-4には、周期3秒での観測に対するシミュレーションの擬似速度応答スペクトル比の分布を示す。周期3秒での回帰誤差 e から算出されるばらつきは、 $1/1.5 \sim 1.5$ 倍であるが、改良経験式ではほぼこのばらつきの範囲内にあるのに対して、旧経験式は平均的に過大評価となっていることが確認できる。

図2.5-1に示した6つの観測点における観測と改良経験式に基づく擬似速度応答スペクトル及び周期0.1~10秒の速度フィルター波の比較を図2.5-5、図2.5-6に示す。地盤の非線形性の影響が小さいと考えられる4つの観測点を図2.5-5に、影響が大きいと考えられる2つの観測点を図2.5-6に示している。なお、経験式による地震動は、同図凡例に示すように水平2成分の相乗平均という位置づけで作成されている。

地盤の非線形性の影響が大きいと考えられる観測点では、以下のようにして、地盤の非線形性の影響を考慮したシミュレーションも行った。気象庁の震度発表観測点で震度7は、MYG004(築館)のみであったが、TCGH16(芳賀)も震度7相当である。TCGH16での水平2成分の最大加速度は、約 1200 cm/s^2 、 800 cm/s^2 であり、地盤の非線形性の影響があるものと考えられる。MYG006でも水平2成分の最大加速度は、 440 cm/s^2 、 570 cm/s^2 であり、地盤の非線形性の影響が指摘されている(例えば、Nagashima et al., 2012)。そこで、TCGH16では、本震の地表の水平成分の加速度応答スペクトルを地中-112mの水平成分の加速度応答スペクトルで除した H/H を求め、これを改良経験式作成に用いたデータの H/H の平均値で除した値で、シミュレーション波の加速度応答スペクトルを補正した。そして、シミュレーション波の位相スペクトルを用いて、地盤の非線形性を考慮したシミュレーション波を作成した。本震の地表の水平成分の加速度応答スペクトルを地表の上下成分の加速度応答スペクトルで除した H/V でも、同様にして、地盤の非線形性を考慮したシミュレーション波を作成した。地表の観測点のみであるMYG006では H/V を用いて、地盤の非線形性を考慮したシミュレーション波を作成した。ただし、MYG006の観測波は、断層1と断層2から生成される2つの波群に分かれている。加速度が大きいのは、断層2から生成される波群であるため、断層2に対するターゲットスペクトルを H/V で補正することにより、地盤の非線形性を考慮したシミュレーション波を作成した。図2.5-7には、補正に用いたTCGH16での本震と本震以外の H/H 、 H/V 、MYG006での本震と本震以外の H/H を示す。本震では、ピークが長周期化しており、これは主に地盤の非線形性の影響と考えられる。

図2.5-5をみると、シミュレーション波は観測波をほぼ再現している。ただし、周期10秒付近で過大評価の傾向がある。図2.5-6に示した、地盤の非線形性の影響があると考えられ

る観測点では、H/VやH/Hで補正することにより地盤の非線形を考慮したシミュレーション波のスペクトルは、観測をほぼ再現できるようになっている。波形の形状は、必ずしも再現性がよくないが、これは、位相スペクトルに、地盤非線形性を考慮していないためである可能性がある。

周期10秒付近で過大評価という結果について、考察を行う。図2.5-8には、SIT003とTKY018での最大余震の観測とシミュレーションの擬似速度応答スペクトルの比較を示す。最大余震の観測スペクトルと図2.5-5の本震の観測スペクトルと比べると、周期10秒付近では、両地点とも、20cm/s程度と同じレベルになっている。最大余震からの断層最短距離と本震の断層3からの断層最短距離の差は小さく、最大余震の M_w は7.8、断層3の M_w は8.1である。したがって、周期10秒付近で本震と最大余震のスペクトルレベルが同程度であるのは、本震は最大余震に比べて、地震規模のわりに周期10秒付近の長周期地震動の励起が小さかったものと考えられる。

最後に、図2.5-9には、TKY018での旧経験式と改良経験式の地盤増幅率の比較を示す。改良経験式のフィリピン海プレート地震の増幅率 $10^{0.7}$ は太平洋プレート地震の増幅率 10^0 の2倍以上大きく、旧経験式の地盤増幅率はこれらの中間にある。図2.5-4、図2.5-5で示したように、同じ規模で同じ距離の場合には、周期5秒以上では、地震基盤におけるスペクトルレベルが太平洋プレート地震とフィリピン海プレート地震でほぼ同じであり、周期2秒でも2倍の違いはない。したがって、TKY018では、フィリピン海プレート地震の方が太平洋プレート地震よりスペクトルが大きくなる。したがって、南海トラフ沿いの海溝型地震に対する長周期地震動予測では、このような特徴が反映されることになる。

2-5-4 まとめ

本震については、経験的グリーン関数法に基づき推定されている強震動生成領域から、強震動予測レシピに基づき、3つの巨視的断層からなる3連動震源モデルを作成した。この震源モデルでは、断層1、2、3の M_w が8.4、8.8、8.1となり、2つの断層で経験式のデータセットの最大 M_w である8.2の外挿となる。そこで、シミュレーションに基づき改良経験式に M_w 8.4での頭打ちを導入した。

東北地方太平洋沖地震及び前震(M_w 7.4)、最大余震(M_w 7.8)とも、旧経験式では応答スペクトルが過大評価の傾向があったが、改良経験式では観測スペクトルをほぼ再現できることを示した。なお、改良経験式でも本震の周期10秒付近では過大評価であったが、本震の断層3(M_w 8.1)と最大余震と断層最短距離が同じである関東平野の観測点では、周期10秒付近で観測スペクトルがほぼ同じであることから、これは本震固有の特徴と考えられる。

参考文献

中央防災会議 東南海・南海地震等に関する専門調査会(2003). 第16回, 資料3図表集,

- pp.18-20. <http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai>
- Eshelby, J. D. (1957). The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, *Proceedings of the Royal Society*, A241, pp.376-396.
- Kanamori, H. and D. L. Anderson (1975). Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.65, pp.1073-1095.
- Kanamori, H. and E. E. Brodsky (2004). The physics of earthquakes, *Rep. Prog. Phys.* Vol.67, pp.1429-1496.
- 気象庁(2011). 3月9日 三陸沖の地震ー 遠地実体波および近地強震波形による震源過程解析(暫定), <http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/sourceprocess/event/20110309farandnear.pdf>
- Madariaga, R. : On the relation between seismic moment and stress drop in the presence of stress and strength heterogeneity, *J. Geophys. Res.*, Vol.84, 1979, pp.2243-2250.
- Nagashima, F., H. Kawase, S. Matsushima, F. J. Sanchez-Sesma, T. Hayakawa, T. Satoh and M. Oshima : Application of the H/V spectral ratios for earthquake ground motions and microtremors at K-NET sites in Tohoku Region, Japan to delineated soil nonlinearity during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the Giant Earthquake, 2012*, pp.361-370.
- 佐藤智美(2012). 経験的グリーン関数法に基づく2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデルー プレート境界地震の短周期レベルに着目してー, *日本建築学会構造系論文集*, 第675号, pp. 695-704.
- 佐藤智美・大川出・西川孝夫・佐藤俊明(2012). 長周期地震動の経験式の改良と2011年東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーション, *日本地震工学会論文集*, 第12巻, 第4号(特集号), pp. 354 - 373.
- 鈴木亘・青井真・関口春子(2011). 近地強震記録を用いた2011年03月11日東北地方太平洋沖地震の震源インバージョン解析(2011/08/12改訂版), http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/TohokuTaiheiyo_20110311/inversion/,
- 司宏俊・瀨瀨一起・三宅弘恵・翠川三郎(2011). 超巨大地震への地震動最大値距離減衰式の適用について-2011年東北地震と海外の超巨大地震の観測データに基づく検討-, *日本地震学会講演予稿集*, p. 63.
- 司宏俊・翠川三郎(1999). 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, *日本建築学会構造系論文集*, 第523号, pp. 63-70.
- 地震調査研究推進本部(2009). 全国を概観した地震動予測地図 2008年度版 付録3. 震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」) 平成20年4月11日改訂, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/08_yosokuchizu/a3.pdf

表 2.5-1 前震と最大余震の震源パラメータ

パラメータ	単位	3月9日の前震	3月11日の最大余震
M ₀	dyne・cm	1.34E+27	5.66E+27
M _w		7.4	7.8
面積	km ²	4900.0	5960.0
長さ	km	70.0	77.2
幅	km	70.0	77.2
走向	°	187.0	209.0
傾斜角	°	11.0	31.0

表 2.5-2 本震の震源パラメータ
(改良経験式ではカッコ内を使用)

	パラメータ	単位	本震
全体	M ₀	dyne・cm	2.97E+29 (1.20E+29)
	M _w		8.9(8.7)
	走向	°	200.0
	傾斜角	°	15.0
断層1	M ₀	dyne・cm	5.42E+28
	M _w		8.4
	面積	km ²	26844.8
	長さ	km	163.8
断層2	M ₀	dyne・cm	2.27E+29 (5.01E+28)
	M _w		8.8(8.4)
	面積	km ²	69795.0
	長さ	km	349.0
断層3	M ₀	dyne・cm	1.58E+28
	M _w		8.1
	面積	km ²	11815.5
	長さ	km	108.7
	幅	km	108.7

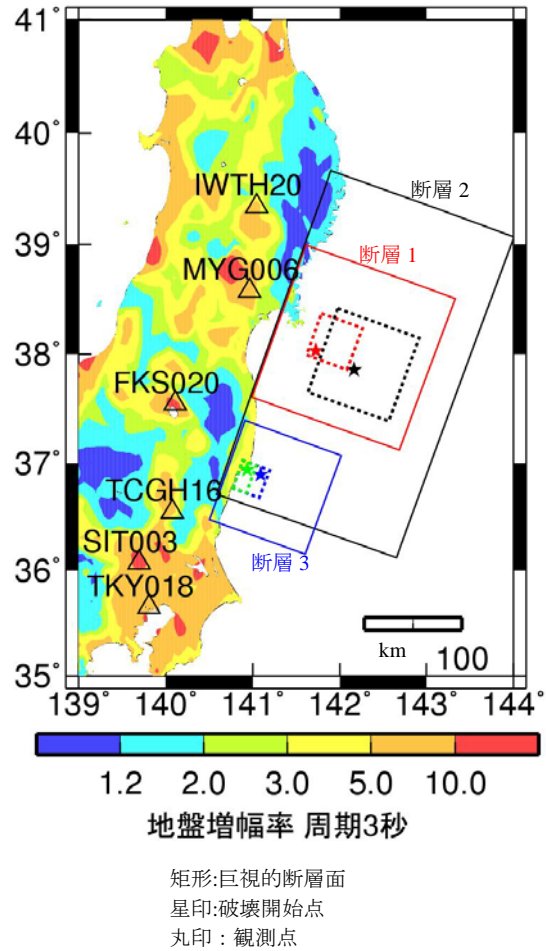
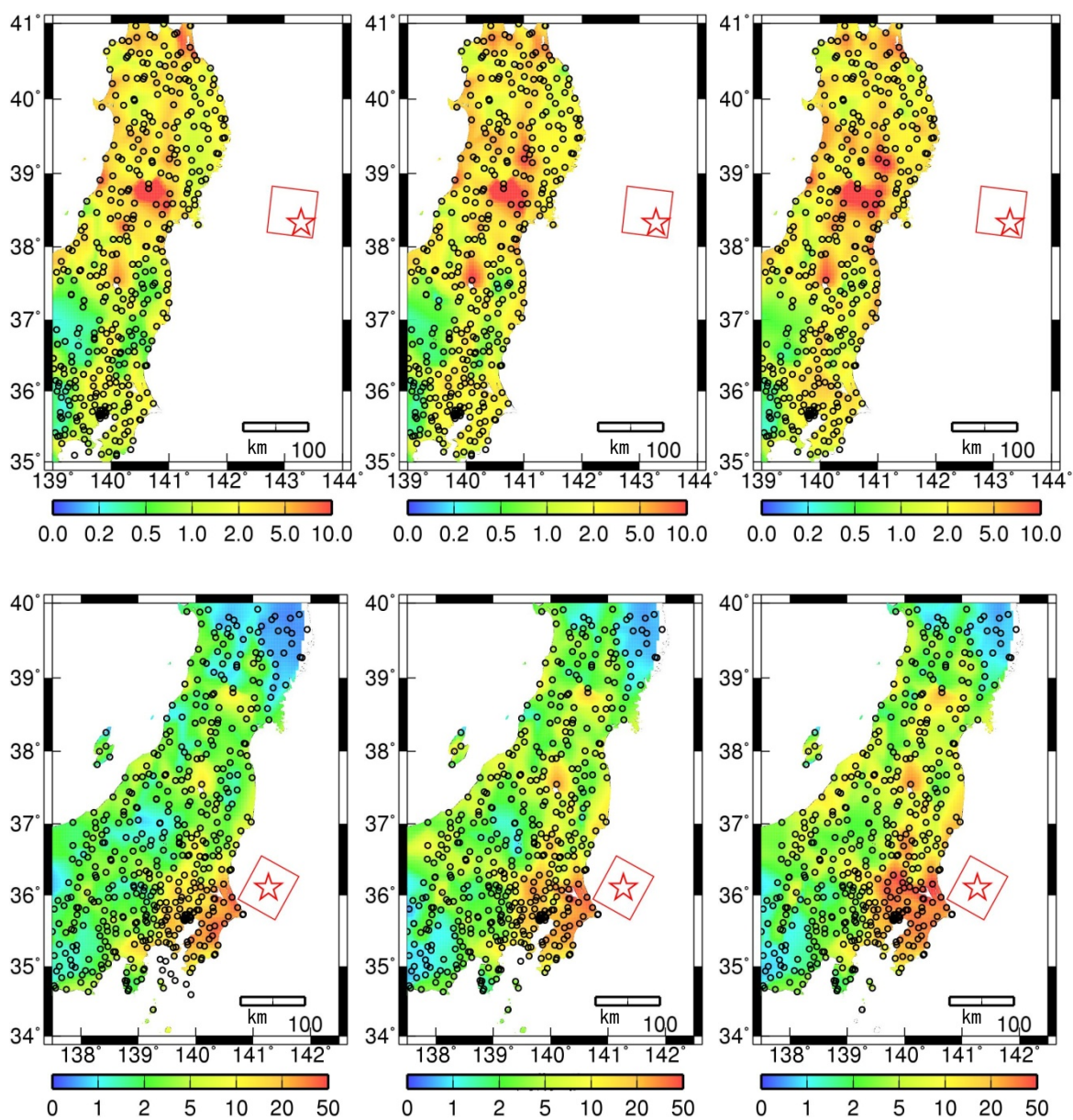


図 2.5-1 設定した 3 つの巨視的断層面(矩形実線)と佐藤(2012)の4つの強震動生成領域(矩形破線)・破壊開始点(星印)と観測波とシミュレーション波の比較を例示する観測点位置(三角印)及び周期 3 秒での改良経験式の地盤増幅率の分布



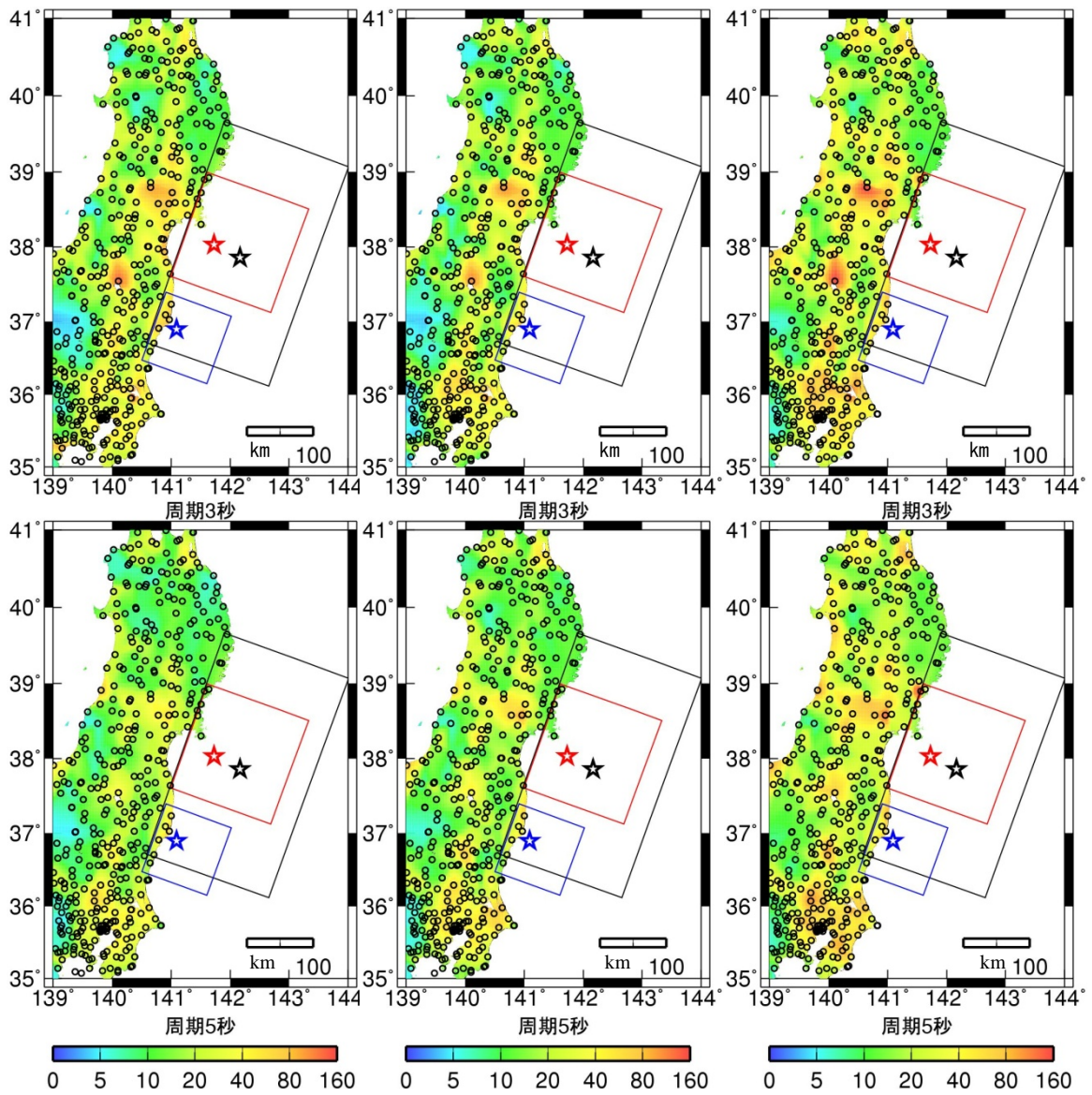
矩形:巨視的断層面、星印:破壊開始点、丸印:観測点

(a) 観測

(b) 改良経験式

(c) 旧経験式

図 2.5-2 前震(上段)と最大余震(下段)の観測とシミュレーションの周期 3 秒での擬似速度
応答スペクトル分布[cm/s]



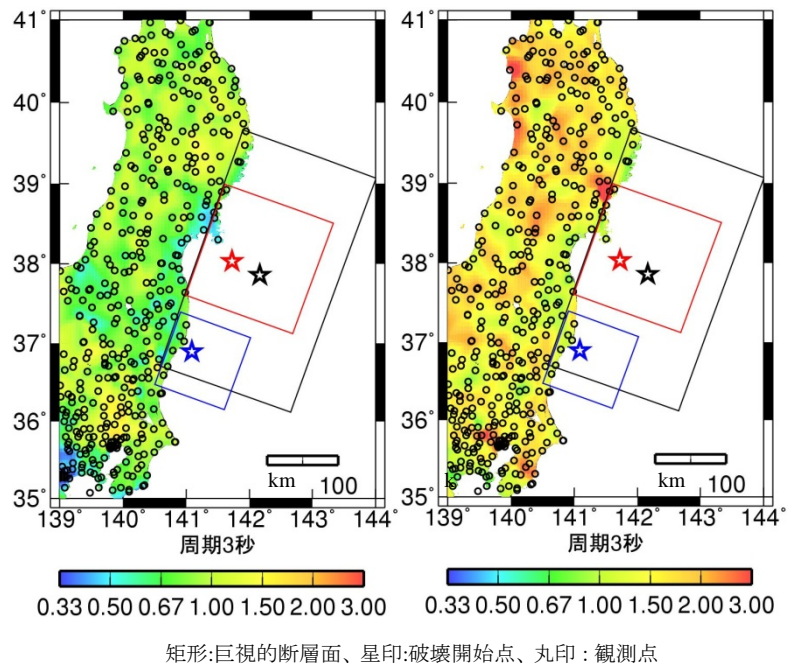
矩形:巨視的断層面、星印:破壊開始点、丸印:観測点

(a) 観測

(b) 改良経験式

(c) 旧経験式

図 2.5-3 本震の観測とシミュレーションの周期 3 秒と 5 秒での擬似速度応答スペクトル分布 [cm/s]



(a) 改良経験式

(b) 旧経験式

図 2.5-4 本震の観測に対するとシミュレーションの周期 3 秒での擬似速度応答スペクトル比分布

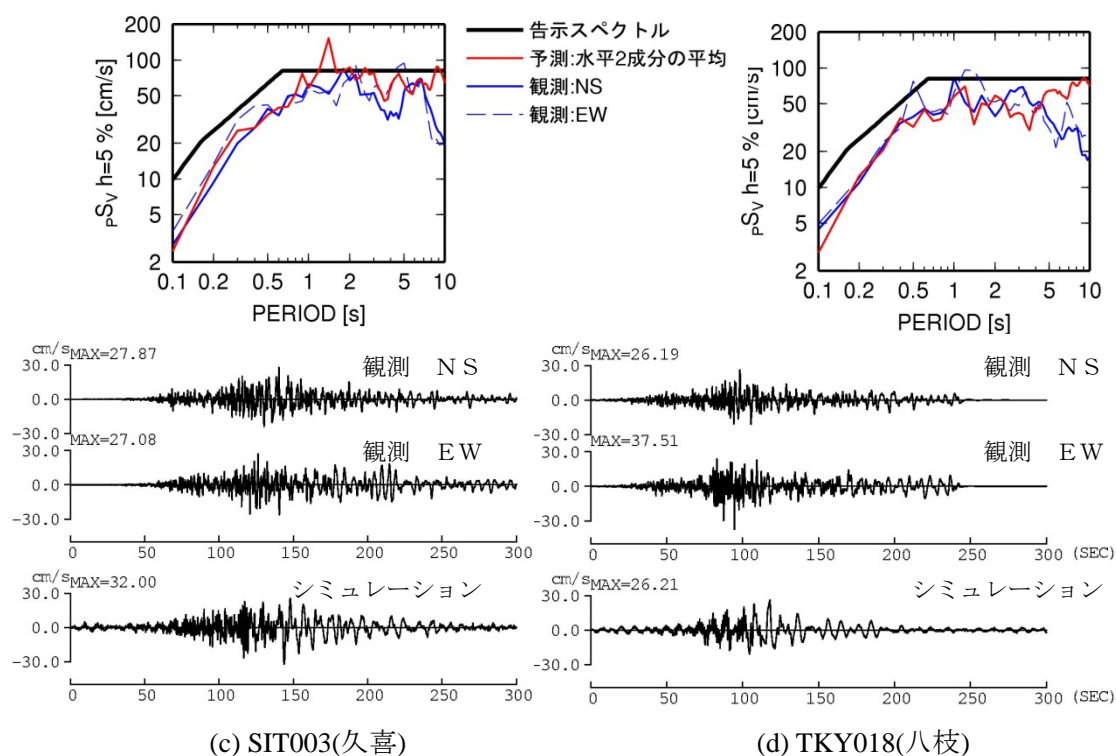
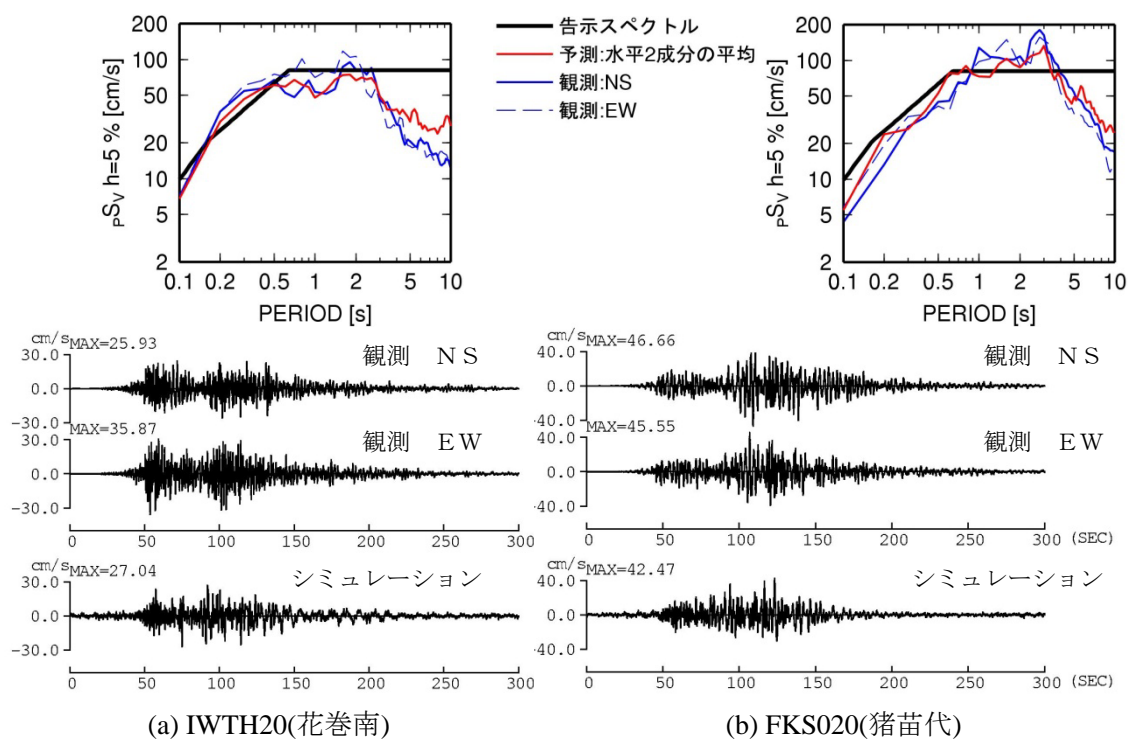


図 2.5-5 地盤の非線形性の影響がないと考えられる観測点における本震の観測と改良経験式に基づくシミュレーションの擬似速度応答スペクトルと速度波形

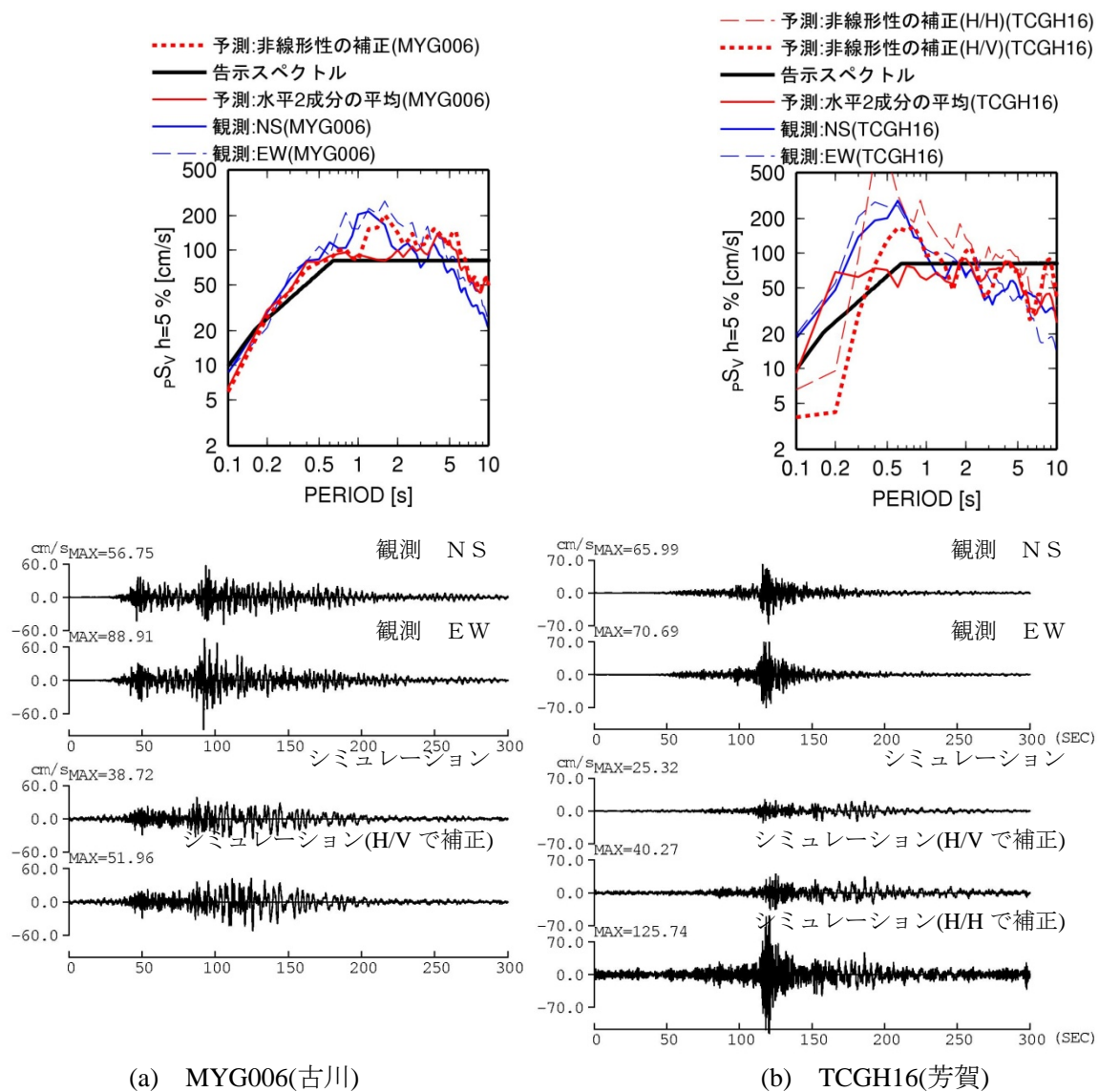


図 2.5-6 地盤の非線形性の影響があると考えられる観測点における本震の観測と改良経験式に基づくシミュレーションの擬似速度応答スペクトル pS_v と速度波形

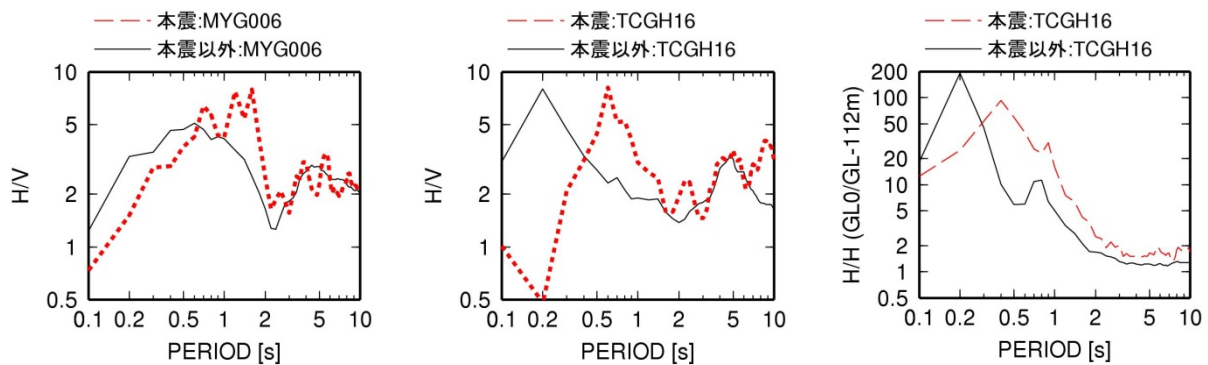


図 2.5-7 補正に用いた本震と本震以外の H/V 及び H/H (GL0/GL-112m)

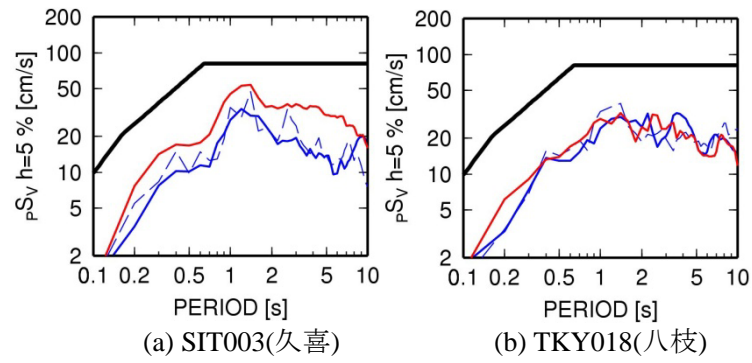


図 2.5-8 最大余震の観測と改良経験式に基づくシミュレーションの擬似速度応答スペクトル

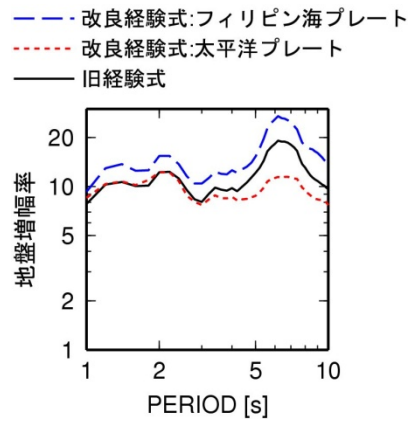


図 2.5-9 TKY018 での旧経験式と改良経験式の地盤増幅率の比較

2-6 考察とまとめ

第2章では、23年度作成した改良経験式が、大阪平野、濃尾平野、関東平野の任意地点で適用できるように、応答スペクトルの地盤増幅率と、群遅延時間の平均値・標準偏差のサイト係数の回帰式を作成した。また、内閣府(2012)の南海トラフ沿いの巨大地震(Mw9.0)の震源モデルに基づき、長周期地震動を作成した。内閣府(2012)がデジタル波形を公開している統計的グリーン関数法に基づく地震動(周期3秒程度以下が有効範囲)と比較した結果、震源近傍を除く多くの観測点で、応答スペクトルのレベルは同程度であった。任意地点での回帰式を用いた場合と用いない場合の波形のスペクトルの違いは、内閣府(2012)の計算波の基本ケースと陸側ケースとの違い程度であった。なお、内閣府(2012)の計算波には震源近傍では課題があることが明記されているため、震源近傍での比較は困難であった。継続時間は、内閣府(2012)の計算波は周期3秒程度以下が有効であることもあり、本業務の計算波の方が長い傾向があった。また、藤原・他(2012)の三次元有限差分法の計算波(周期5秒程度以上が有効範囲)の図面とも比較し、震源モデルが異なるため定量的な比較は困難であるが、両者のモデルの違いを考慮するとほぼ整合する結果となった。内閣府(2012)は、三次元有限差分法による計算を行う予定としていることから、今後、この計算波との比較が必要になると考えられる。また、計算波は乱数によりばらつくため平均的波の設定手法についても検討し、21波の応答スペクトルの平均値を用い、最大速度が中間の波形のフーリエ位相を用いる三の丸波作成方法を選択した。さらに、連動型地震の計算波の応答スペクトルと、それぞれの断層から計算される応答スペクトルのSRSS(二乗和平方根)との比較を行ったが、SRSSは簡便な方法であるが元の計算波の応答スペクトルより大きく、実用に資するには更なる検討が必要と考えられる。

第3章 超高層建物の地震応答計算

3-1 はじめに

(社)日本建築構造技術者協会(以降、JSCAと略す)は、平成23年度国土交通省建築基準整備促進事業において、事業主体である(株)大崎総合研究所、および(独)建築研究所、(社)日本免震構造協会との共同研究で、JSCA内にワーキンググループ「JSCA長周期地震動WG-II」を設け、事業主体が作成した東海・東南海・南海3連動地震による東京、大阪、名古屋で想定される長周期地震動(2011地震動と略す)平均波と平均+ σ (標準偏差)波に対してJSCA超高層建物モデルを用いた応答解析を行った。その成果は建築研究資料第144号で公表された。平成24年度同事業では、新たに内閣府(2012)が提示した南海トラフ沿いのMw9.0の巨大地震(4連動地震)モデルに基づき、東京、大阪、名古屋で想定される長周期地震動(2012地震動と略す)を計算した。その検討については第2章に示した。これらの4連動地震による2012地震動と3連動地震による2011地震動の平均波と平均+ σ (標準偏差)波の地震動レベルを相互評価するには、応答スペクトルやエネルギースペクトルのみでは不十分であり、超高層建物の応答解析を行い、応答値を比較検討する必要があることから、平成23年度の検討と同様に平成21年度建築基準整備促進事業で用いたJSCA作成の超高層建物モデルに4連動地震の2012地震動を入力する地震動応答解析を実施した。これらの比較検討により、3連動地震による2011地震動の平均波とばらつきを考慮した平均+ σ (標準偏差)波の関係と4連動地震の震源モデルから想定される長周期地震動の関係を明らかにすることを目的として検討を行った。これらの検討結果により地震動作成手法のばらつきと震源モデルのばらつき等を考慮した検討への道筋をつくることが期待される。

本章では、まず2節で、作成された4連動地震による長周期地震動9地点の応答スペクトルとエネルギースペクトルならびに加速度波形を示し、平成23年度に作成された2011地震動と比較する。さらに3節および4節でJSCA超高層建物モデルを用いた2012地震動および2011地震動による応答解析結果およびその比較を示す。

最後に、2011地震動の平均波と平均+ σ (標準偏差)波による応答値の関係、2011地震動の平均波と2012地震動による応答値の関係を明らかにして、地震動作成手法のばらつきと断層モデルのばらつきを考慮した検討を試みる。

3-2 地震動概要

内閣府(2012)の南海トラフ沿いの巨大地震の断層モデル(Mw9.0)に基づき4連動6セグメント震源モデルにより試算された9地点での長周期地震動(2012年度)の概要を整理し、2011年度における東海-東南海-南海3連動地震(Mw8.7)を想定した2011地震動と比較する。地震動の概要を表に示す。ここで、2011年度の地震動については、観測データによる方法の平均値による地震波を(2011年度 平均)、平均値に標準偏差 σ を考慮した地震波を(2011年度 平均+ σ)で表す。地震波の時間刻みはいずれも0.02秒で、波形長さは、2012年度地震動では655.36秒、2011年度地震動では739.82秒となっている。表中のf値は、地震波がEl Centro NS波を基準1.0として何波分の入力エネルギーを持つかを示す係数で、減衰定数 $h=0.1$ のときの周期0~10秒間のエネルギースペクトルの平均値 $\bar{V}_{E,h=0.1}$ と速度応答スペクトルの平均値 $\bar{S}_{V,h=0.1}$ から求める。(秋山他, 2006) また、地震動の加速度波形のパワーの累積値 $\int_0^t a^2(t)dt$ を求め全体のパワーの5%となる点と95%となる点の時間を継続時間と定義し示している。

各地震動の平均と平均+ σ の速度応答スペクトル($h=5\%$)とエネルギースペクトル($h=10\%$)および各地点の加速度時刻歴波形を次頁以降の図に示す。エネルギースペクトルは、総エネルギー入力 V_E と建物周期Tの関係で示され(秋山, 1999)、 V_E は次式により求められる。

$$V_E = \sqrt{2E/M}$$

ここに、 E ：総入力エネルギー入力、 M ：建物の総質量

次節に示す建物に対する応答検討は、平成23年度の検討に用いた2011地震動の此花波(OSKH02)、津島波(AIC003)、浜松波(SZ0024)、新宿波(KGIN)と同じ4地点の2012地震動により行った。応答結果は、比較のため2011地震動による結果とあわせて示す。なお、解析時間は残留変形を求めるため地震終了後の自由震動を十分な長さで行うように、地震波のデータ末尾に200秒程度0を追加した波形で時刻歴応答解析を行っている。

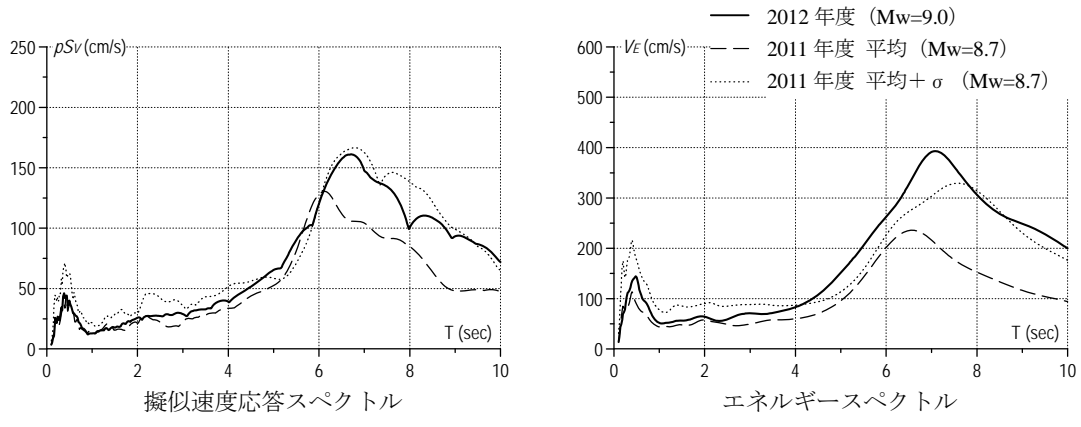
参考文献

秋山宏, 北村春幸: エネルギースペクトルと速度応答スペクトルの対応, 日本建築学会構造系論文集, 第608号, pp. 37-43, 2006年10月

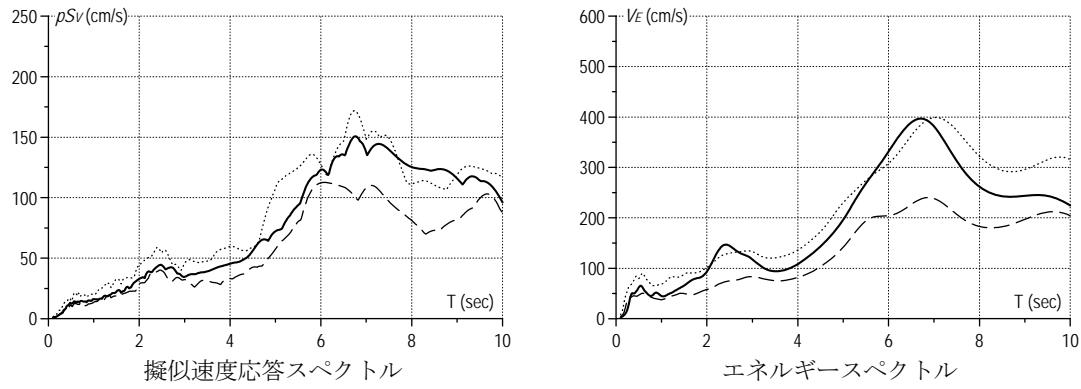
秋山宏: エネルギーの釣り合いに基づく建築物の耐震設計, 技報堂出版, 1999. 1

表 3. 2-1 2012 年度（四連動 Mw9.0）と 2011 年度（三連動 Mw8.7）の地震動概要

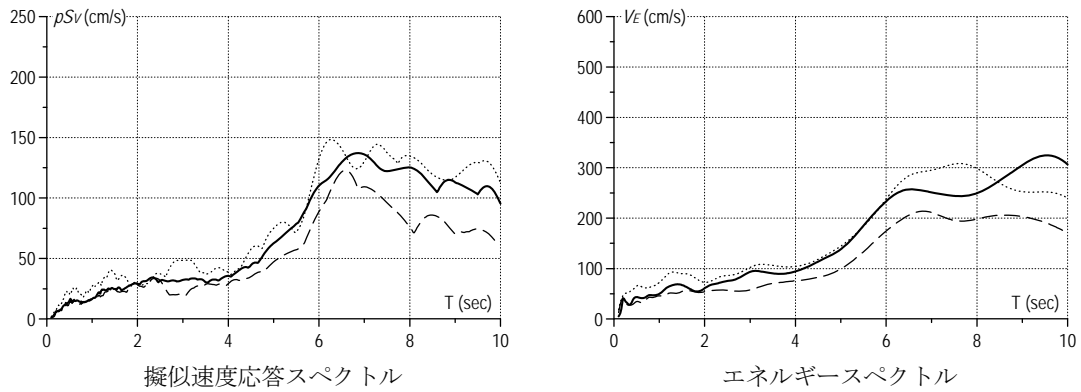
地点名	都市名	地震ケース	震源規模	最大加速度 (cm/s^2)	\overline{S}_V (cm/s)	\overline{V}_E (cm/s)	f 値	ϵt_0 (s)
E4E	大手町	2011 年度 平均	Mw=8.7	168.5	54.5	109.2	1.45	359.4
		2011 年度 平均+ σ		354.5	79.2	172.5	1.87	375.9
		2012 年度	Mw=9.0	185.3	72.1	179.5	2.73	410.2
KGIN	新宿	2011 年度 平均	Mw=8.7	42.1	59.9	136.7	2.23	417.9
		2011 年度 平均+ σ		77.2	86.9	220.9	2.77	429.2
		2012 年度	Mw=9.0	55.5	78.0	194.9	2.48	379.2
TKY016	東雲	2011 年度 平均	Mw=8.7	55.8	54.6	123.5	2.19	427.7
		2011 年度 平均+ σ		94.6	79.9	175.6	2.06	399.9
		2012 年度	Mw=9.0	66.7	71.1	167.2	2.18	431.1
E56	横浜	2011 年度 平均	Mw=8.7	232.1	47.3	97.6	1.79	338.9
		2011 年度 平均+ σ		402.2	70.3	158.5	2.05	344.4
		2012 年度	Mw=9.0	195.3	55.9	111.8	1.71	384.9
SZO024	浜松	2011 年度 平均	Mw=8.7	576.8	66.4	154.7	2.05	113.3
		2011 年度 平均+ σ		1069.4	101.2	263.0	2.58	247.2
		2012 年度	Mw=9.0	640.3	79.6	170.0	1.72	390.5
AIC004	名古屋	2011 年度 平均	Mw=8.7	494.9	45.2	109.1	2.20	254.7
		2011 年度 平均+ σ		1355.8	67.2	186.5	3.14	343.3
		2012 年度	Mw=9.0	784.2	80.8	221.8	2.82	417.4
AIC003	津島	2011 年度 平均	Mw=8.7	199.4	60.6	140.1	2.11	226.2
		2011 年度 平均+ σ		380.4	90.2	224.1	2.57	257.7
		2012 年度	Mw=9.0	545.4	134.5	359.3	2.98	401.5
OSK005	大阪	2011 年度 平均	Mw=8.7	127.8	29.9	74.5	2.23	244.4
		2011 年度 平均+ σ		246.6	45.0	118.9	2.60	323.1
		2012 年度	Mw=9.0	224.4	46.3	110.9	2.44	452.6
OSKH02	此花	2011 年度 平均	Mw=8.7	98.5	84.2	203.4	2.24	162.6
		2011 年度 平均+ σ		147.2	125.6	307.8	2.34	196.9
		2012 年度	Mw=9.0	133.0	125.8	286.5	2.07	380.4



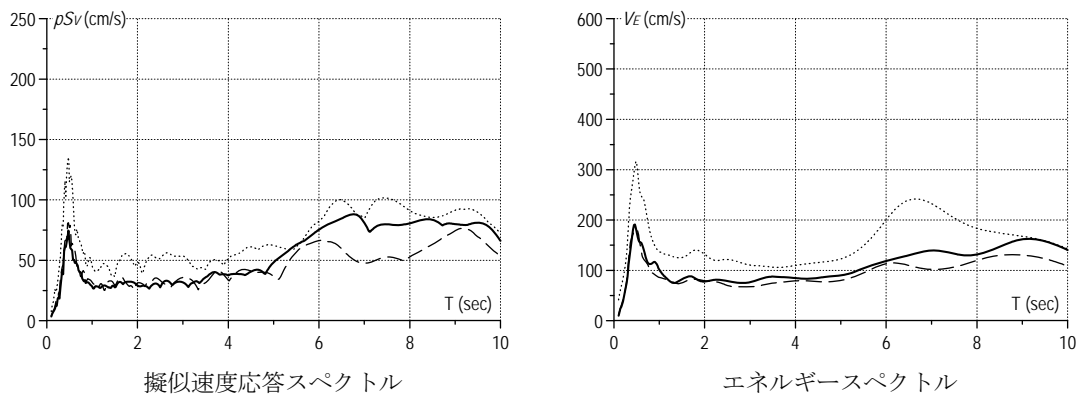
(a) E4E (大手町) 地点のスペクトル



(b) KGIN (新宿) 地点のスペクトル

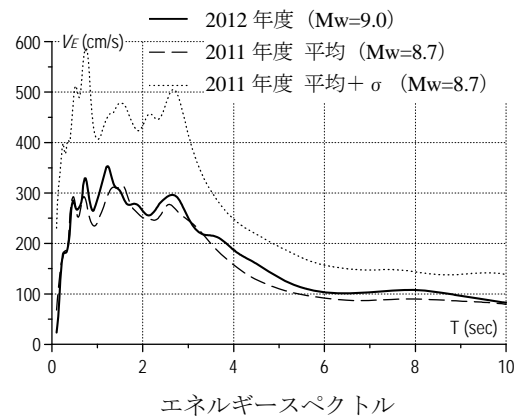
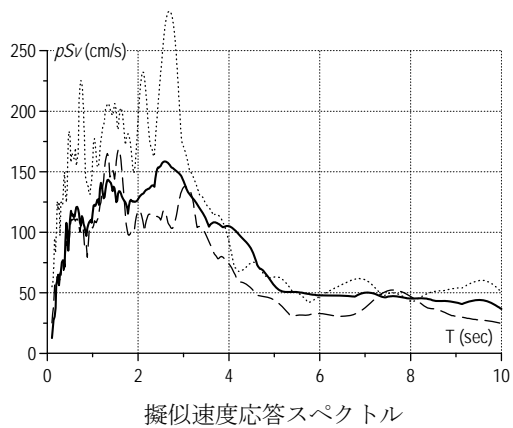


(c) TKY016 (東雲) 地点のスペクトル

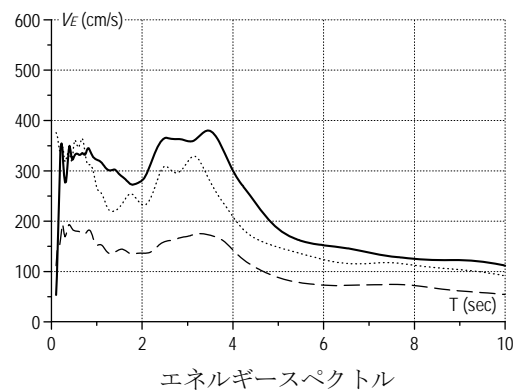
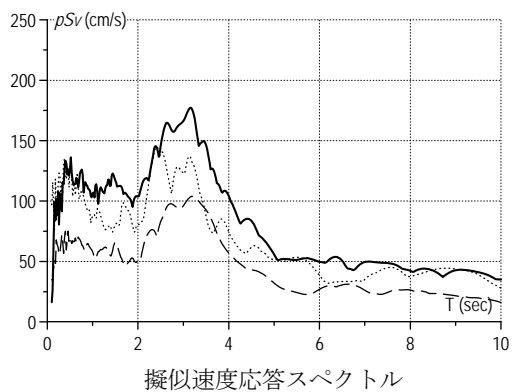


(d) E56 (横浜) 地点のスペクトル

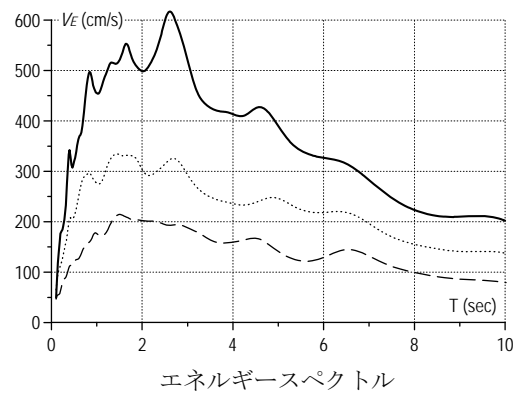
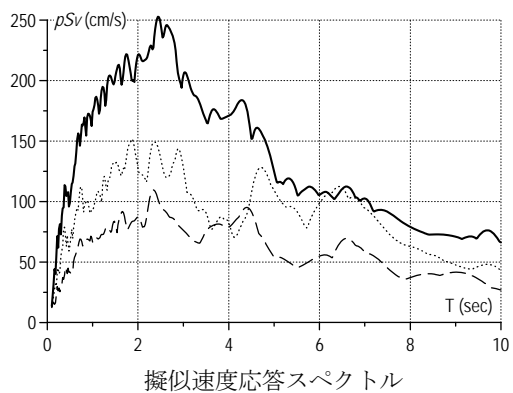
図 3.2-1 応答スペクトルとエネルギースペクトル (1)



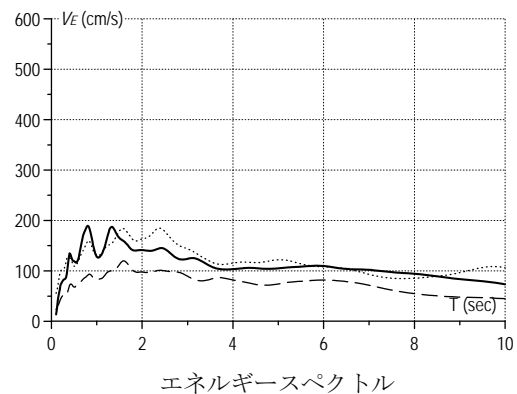
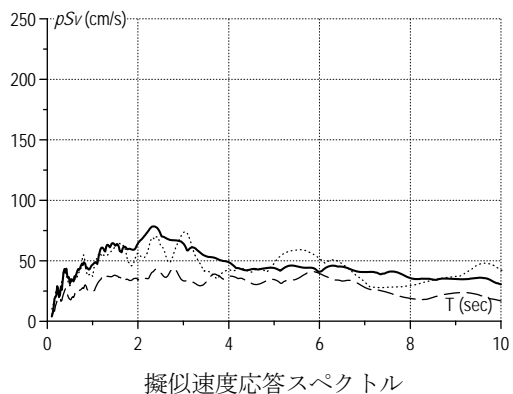
(e) SZO024 (浜松) 地点のスペクトル



(f) AIC004 (名古屋) 地点のスペクトル

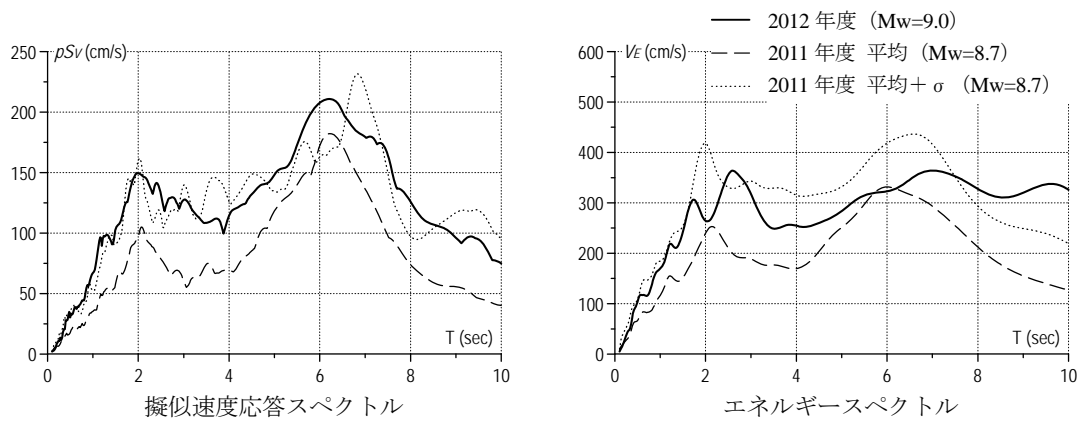


(g) AIC003 (津島) 地点のスペクトル



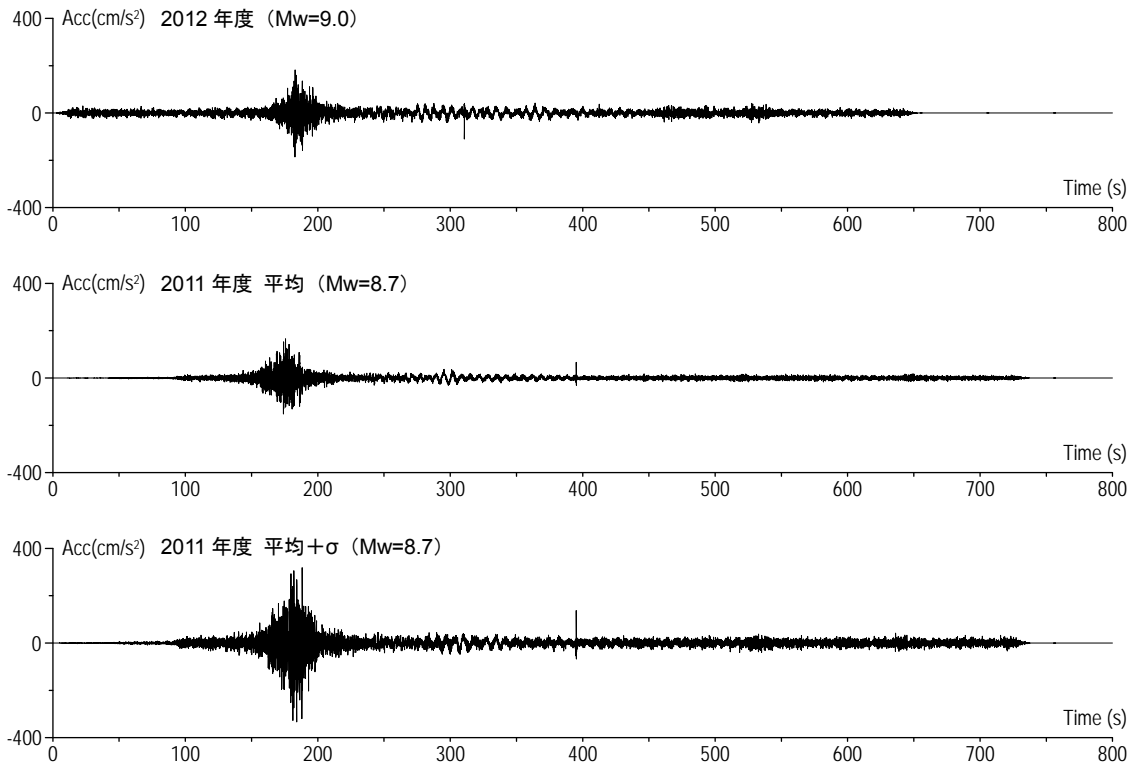
(h) OSK005 (大阪) 地点のスペクトル

図 3.2-1 応答スペクトルとエネルギースペクトル (2)

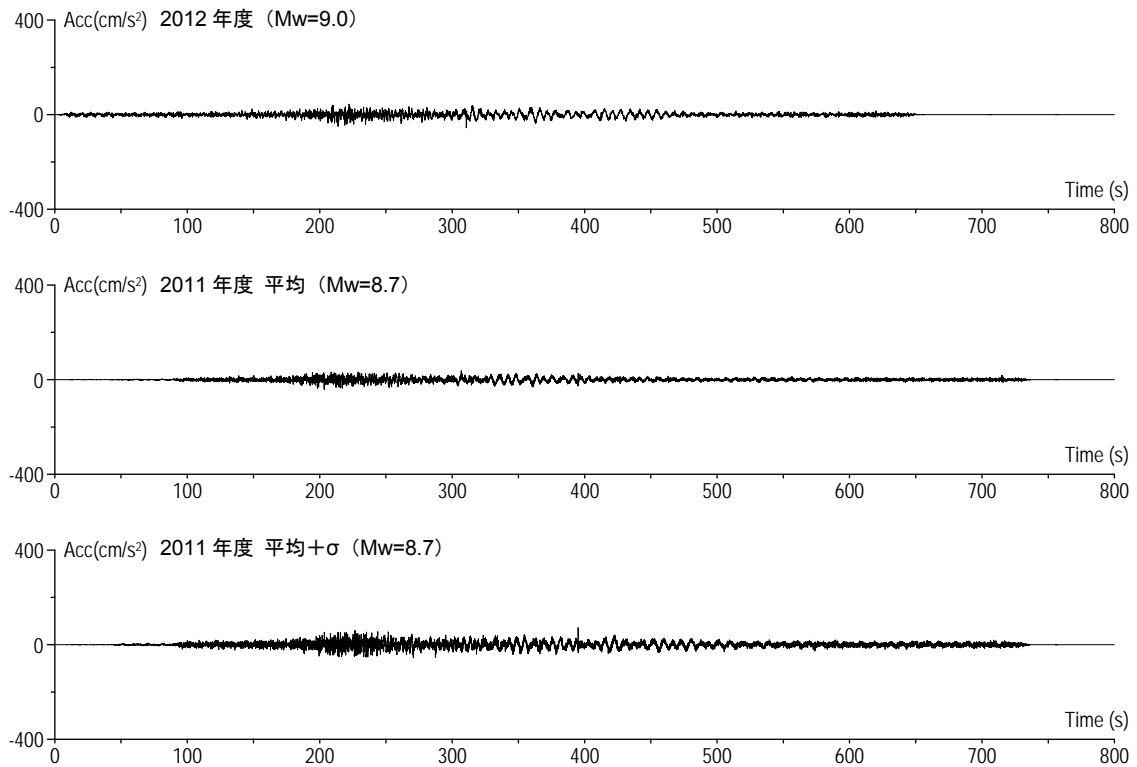


(i) OSKH02 (此花) 地点のスペクトル

図 3.2-1 応答スペクトルとエネルギースペクトル (3)

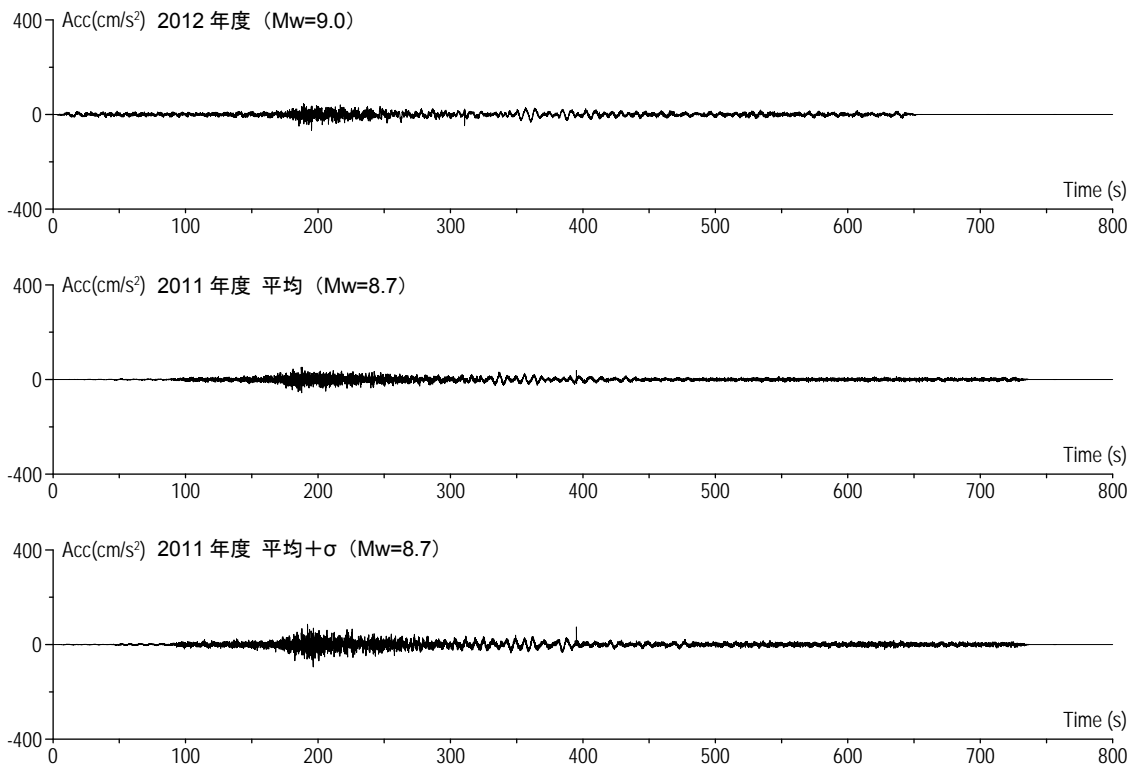


(a) E4E (大手町) 地点の加速度波形

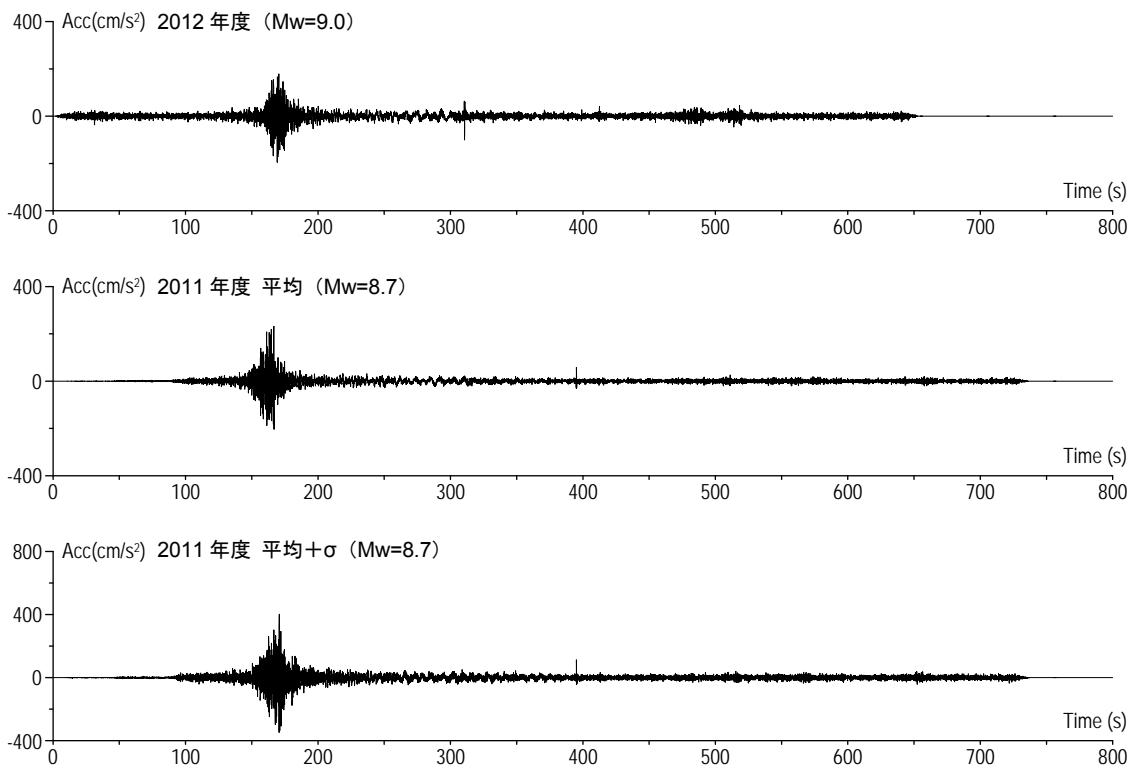


(b) KGIN (新宿) 地点の加速度波形

図 3.2-2 各地点の加速度波形 (1)

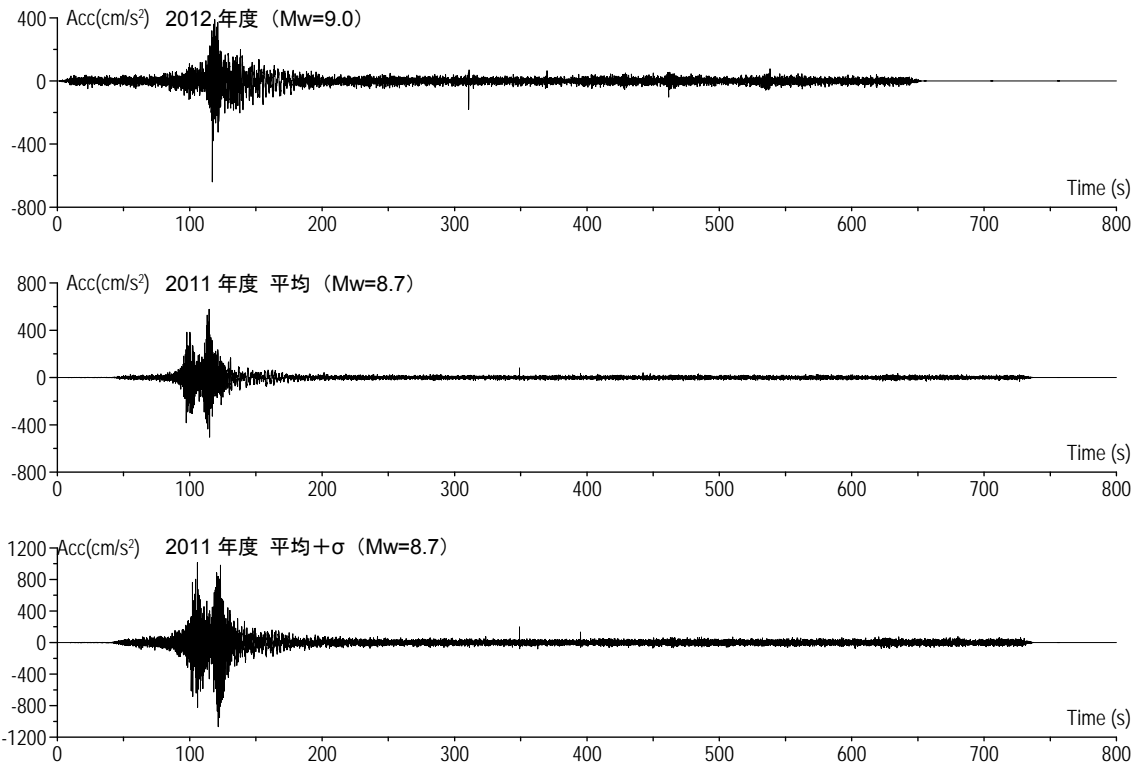


(c) TKY016 (東雲) 地点の加速度波形

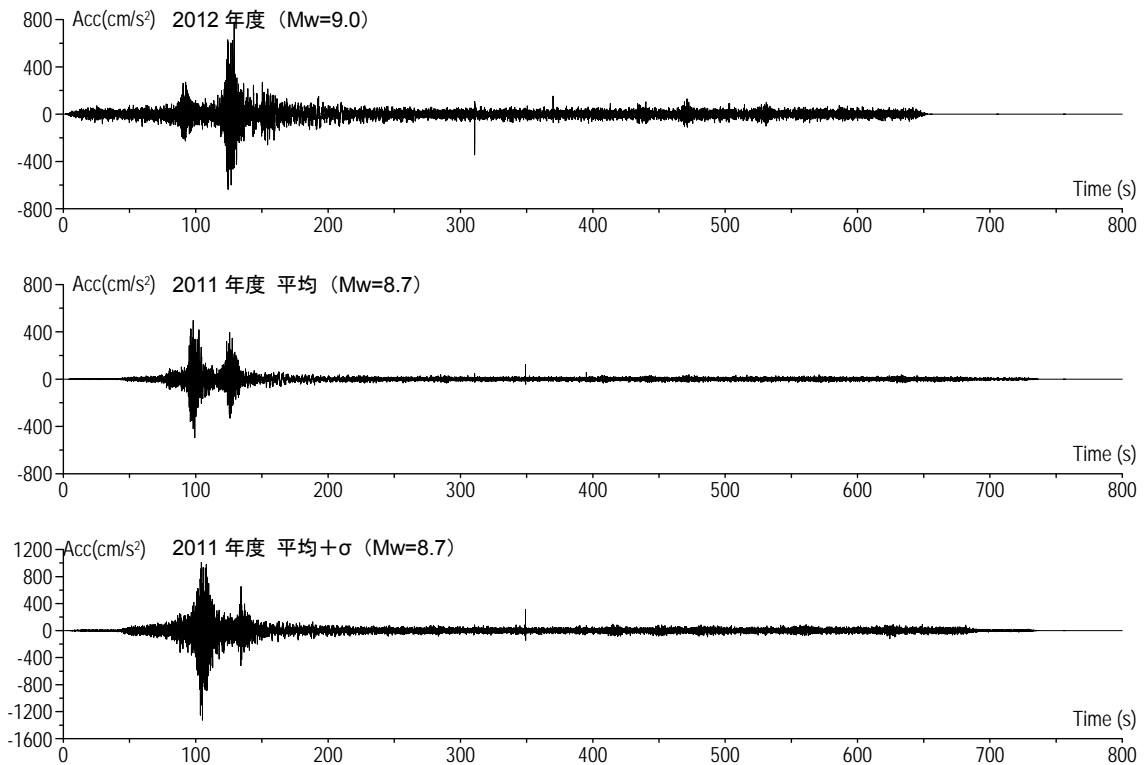


(d) E56 (横浜) 地点の加速度波形

図 3.2-2 各地点の加速度波形 (2)

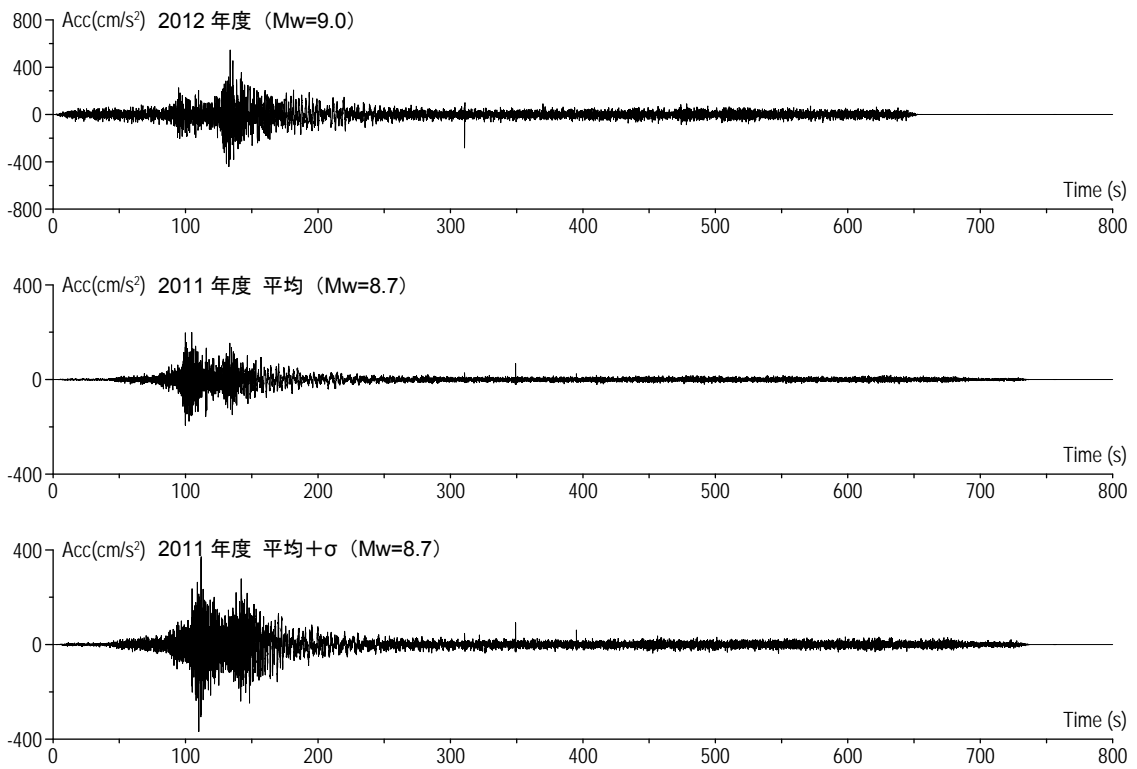


(e) SZO024 (浜松) 地点の加速度波形

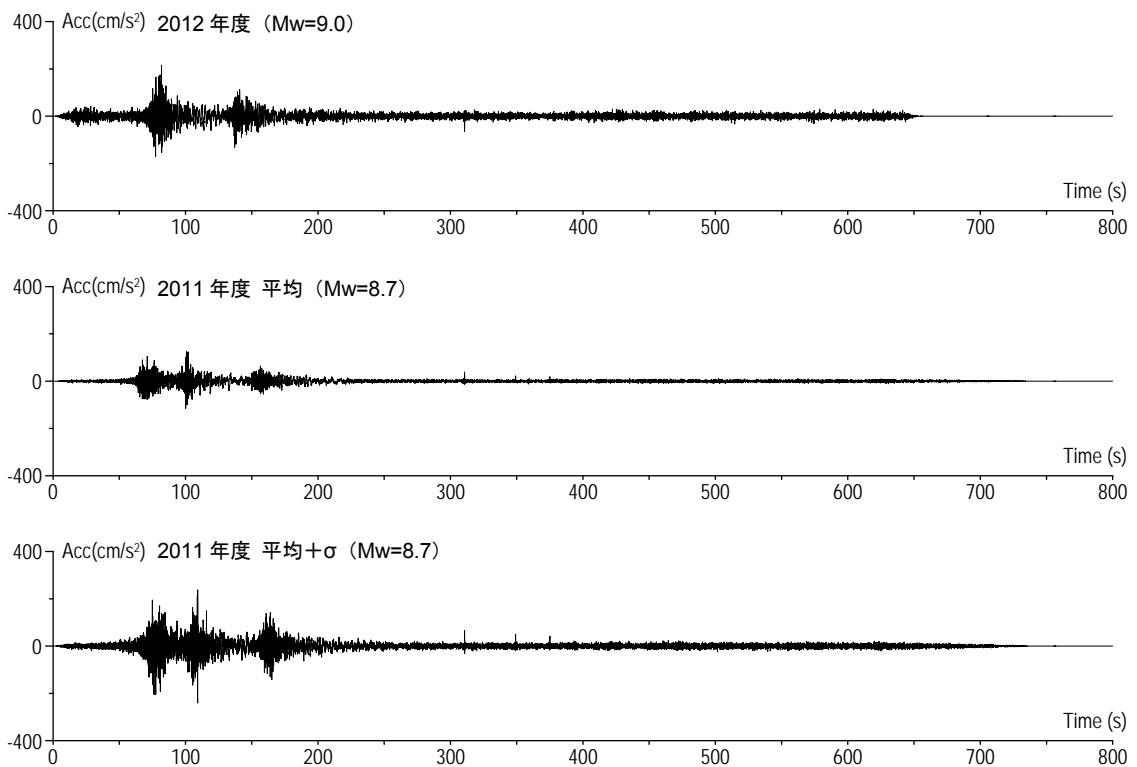


(f) AIC004 (名古屋) 地点の加速度波形

図 3.2-2 各地点の加速度波形 (3)

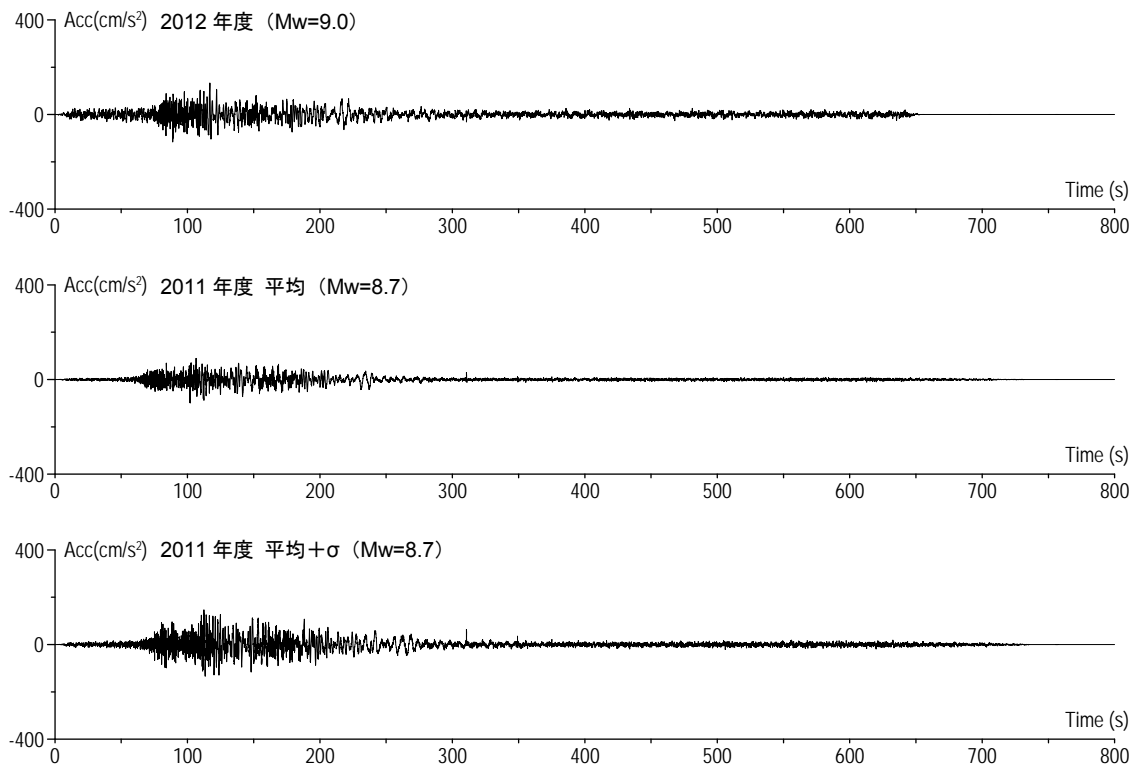


(g) AIC003 (津島) 地点の加速度波形



(h) OSK005 (大阪) 地点の加速度波形

図 3.2-2 各地点の加速度波形 (4)



(i) OSKH02 (此花) 地点の加速度波形

図 3.2-2 各地点の加速度波形 (5)

3-3 超高層建物の応答解析結果

2009 年度、2011 年度に検討を行った鉄骨造超高層建物 6 棟及び鉄筋コンクリート造超高層建物 7 棟による 2012 年度地震動に対する応答解析を実施した。

応答解析結果を表 3.3-1～表 3.3-17 に整理した。

まず、表 3.3-1 および表 3.3-2 には前記の作成地震動に対する鉄骨造超高層建物および RC 造超高層建物の最大層間変形角を、さらに表 3.3-3、表 3.3-4 には同建物の最大塑性率を方向毎に示した。

表 3.3-5～表 3.3-17 には 2011 年度作成した内閣府想定南海トラフ 3 連動地震および本検討での同 4 連動地震による想定地震動により、応答解析各ケースにおける頂部加速度、頂部変位、累積塑性変形倍率、および頂部残留変形について方向毎に示した。

これらの応答解析結果について次節で考察している。

3-3-1 応答結果のまとめ

(1) 鉄骨造建物

鉄骨造超高層建物 6 棟の 2012 年度地震動に対する応答結果のまとめを示す。

- ・ 2012 年度地震動の最大応答値は、層間変形角は $1/375 \sim 1/51$ 、層塑性率は $0.5 \sim 3.8$ とレベル 2 地震動に対するクライテリアを大きく上回る結果も多く、応答値に大きなばらつきを有することが確認される。此花(2012)、津島(2012)では大部分の建物で大きな応答値を示すが、浜松(2012)では 140m 級以下の建物が、新宿(2012)では 230m 以上の建物が大きな応答値を呈する。
- ・ 100m～140m 級建物（固有周期 2.3 秒～3.8 秒）では津島(2012)が最も大きな応答値を示し、200m～250m 級建物（固有周期 5.1 秒～6.5 秒）では此花(2012)と津島(2012)のいずれかで最大の応答値が発生している。
- ・ 此花(2012)の応答値は、120m 級建物を除き層間変形角が $1/100$ を上回っており、特に高さが高い建物ほど応答が大きくなる傾向にある。応答値は層間変形角 $1/164 \sim 1/51$ 、層塑性率 $1.3 \sim 3.4$ となっており、250m 級建物では層間変形角が $1/51$ に達している。
- ・ 津島(2012)の応答値は、全ての建物でレベル 2 クライテリアを上回っており、層間変形角 $1/91 \sim 1/51$ 、層塑性率 $1.9 \sim 3.8$ の範囲にある。いずれの建物においても上層階の最大応答せん断力・せん断力係数、最大応答加速度の増幅が見られ、高次モードによる応答増幅が確認される。
- ・ 浜松(2012)の応答値は、100m～140m 級建物ではレベル 2 クライテリアを上回り、層間変形角 $1/128 \sim 1/80$ 、層塑性率 $1.5 \sim 2.2$ の範囲にあるが、200m～250m 級建物では、いずれもレベル 2 クライテリア以下の応答値となっている。また、津島(2012)と同様に、高次モードによる上層階の増幅が顕著な応答を呈している。
- ・ 新宿(2012)の応答では、100m～200m 級建物では、いずれもレベル 2 クライテリア以下の応答値となっているが、230m、250m 級建物ではレベル 2 クライテリアを上回る応答値を示し、層間変形角 $1/75 \sim 1/95$ 、層塑性率 $1.2 \sim 2.3$ となっている。応答値では上層階の応答増幅はほとんど確認されず、入力波の長周期成分による一次モードの応答寄与が顕著である。
- ・ 2011 年度地震動との比較では、2012 年度地震動各波の応答値は、2011 年度地震動平均波の応答を概ね上回っている。また、此花(2012)、新宿(2012)では 2011 年度地震動平均 + σ 波と同程度の応答値を示し、津島(2012)では 2011 年度地震動平均 + σ 波を $1.3 \sim 2.0$ 倍程度に上回る応答を、浜松(2012)では 2011 年度地震動平均 + σ 波を $0.6 \sim 0.9$ 倍程度に下回る応答を呈している。

(2) 鉄筋コンクリート造建物

鉄筋コンクリート造超高層建物7棟の2012年度地震動に対する応答結果のまとめを示す。

- ・ 2012年度地震動の最大応答値は、層間変形角は $1/467\sim 1/42$ 、層塑性率は $0.3\sim 3.3$ と多くの建物でレベル2地震動に対するクライテリアを大きく上回る結果となっており、応答値に大きなばらつきが確認される。此花(2012)では130m級以上の建物で、津島(2012)では全ての建物でレベル2地震動に対するクライテリアを上回る応答値を示す。浜松(2012)では115m級建物が、新宿(2012)では180m級・240m級建物がレベル2地震動に対するクライテリアを上回る応答値を呈する。
- ・ 90m～150m級(1)建物(固有周期 $1.9\sim 3.5$ 秒)では主に津島(2012)が最も大きな応答値を示し、150m(2)～240m級建物(固有周期 $2.9\sim 5.4$ 秒)では此花(2012)と津島(2012)のいずれかが最大の応答値を示している。
- ・ 此花(2012)の応答値は、90m級・115m級建物を除き層間変形角が $1/100$ を上回っており、応答値は層間変形角 $1/84\sim 1/46$ 、層塑性率 $1.7\sim 3.3$ の範囲にある。
- ・ 津島(2012)の応答値は、全ての建物でレベル2クライテリアを上回っており、層間変形角 $1/90\sim 1/42$ 、層塑性率 $2.1\sim 3.2$ の範囲にある。いずれの建物においても上層階の応答値の増幅が顕著で、高次モードによる応答増幅が確認されており、150m級以上の建物では上層階において最大応答層間変形角や最大応答層塑性率が発生している。
- ・ 浜松(2012)の応答値は、115m級建物を除きいずれの建物もレベル2クライテリア以下の応答値となっている。150m級以上の建物では、層塑性率・部材塑性率とも 1.10 以下の範囲にあり、建物がほぼ弾性的な挙動をしていることが推測される。
- ・ 新宿(2012)の応答では、90m～150m級建物では、いずれもレベル2クライテリア以下の応答値となっているが、180m、240m級建物ではレベル2クライテリアを上回る応答値を示し、層間変形角 $1/74\sim 1/61$ 、層塑性率 $2.1\sim 2.3$ となっている。150m級(1)建物を除き90m～150m級建物の最大応答層塑性率・部材塑性率は 1.0 以下で建物は弾性的な挙動をしており、部材の塑性化による固有周期の長周期化により入力波の周期5秒以上の長周期成分の影響を受ける180m、240m級建物のみが大きな応答を呈している。
- ・ 2011年度地震動との比較では、2012年度地震動各波の応答値は、2011年度地震動平均波の応答を概ね上回っている。また、此花(2012)、新宿(2012)では2011年度地震動平均 $+\sigma$ 波と同程度の応答値を示し、津島(2012)では2011年度地震動平均 $+\sigma$ 波を $1.0\sim 2.0$ 倍程度に上回る応答を、浜松(2012)では2011年度地震動平均 $+\sigma$ 波を $0.6\sim 1.0$ 倍程度に下回る応答を呈している。

表 3.3-1 S 造建物の応答最大層間変形角一覧

	方向	周期 (s)	2011 平均波				2011 平均+σ波				2012 波			
			此花	津島	浜松	新宿	此花	津島	浜松	新宿	此花	津島	浜松	新宿
S100m 級	X	2.3	1/137	1/125	1/120	1/276	1/121	1/96	1/82	1/249	1/93	1/88	1/104	1/238
	Y	2.8	1/159	1/115	1/106	1/333	1/87	1/87	1/69	1/186	1/94	1/68	1/80	1/222
S120m 級	X	2.6	1/247	1/220	1/153	1/475	1/147	1/138	1/93	1/318	1/164	1/64	1/114	1/375
	Y	2.9	1/264	1/220	1/147	1/414	1/132	1/147	1/114	1/311	1/134	1/91	1/128	1/368
S140m 級	X	3.7	1/135	1/125	1/119	1/341	1/73	1/118	1/75	1/171	1/95	1/66	1/104	1/274
	Y	3.8	1/136	1/113	1/104	1/291	1/68	1/101	1/75	1/176	1/88	1/63	1/93	1/262
S200m 級	X	5.7	1/81	1/155	1/156	1/115	1/78	1/111	1/100	1/97	1/70	1/85	1/156	1/107
	Y	5.1	1/92	1/155	1/148	1/170	1/56	1/88	1/104	1/122	1/88	1/68	1/129	1/153
S230m 級	X	6.5	1/69	1/185	1/144	1/135	1/69	1/104	1/122	1/72	1/62	1/83	1/163	1/95
	Y	5.5	1/66	1/123	1/141	1/97	1/62	1/101	1/83	1/74	1/62	1/68	1/149	1/75
S250m 級	X	5.8	1/65	1/148	1/180	1/84	1/52	1/100	1/104	1/69	1/51	1/51	1/173	1/80
	Y	5.3	1/70	1/127	1/127	1/122	1/64	1/79	1/81	1/83	1/75	1/58	1/119	1/88

※網掛け：1/100 をこえるもの

表 3.3-2 RC 造建物の応答最大層間変形角一覧

	方向	周期 (s)	2011 平均波				2011 平均+σ波				2012 波			
			此花	津島	浜松	新宿	此花	津島	浜松	新宿	此花	津島	浜松	新宿
RC90m 級	X	2.0	1/231	1/215	1/151	1/649	1/121	1/115	1/79	1/347	1/142	1/74	1/106	1/402
	Y	1.9	1/247	1/221	1/159	1/745	1/142	1/136	1/89	1/386	1/134	1/66	1/108	1/467
RC115m 級	X,Y	2.2	1/191	1/193	1/138	1/450	1/64	1/127	1/68	1/323	1/111	1/48	1/82	1/388
RC130m 級	X	3.1	1/101	1/101	1/141	1/244	1/48	1/53	1/99	1/161	1/49	1/53	1/116	1/182
RC150m 級 (1)	X	2.4	1/213	1/183	1/183	1/559	1/63	1/164	1/94	1/303	1/84	1/47	1/332	1/108
	Y	3.5	1/104	1/164	1/142	1/375	1/59	1/92	1/125	1/167	1/64	1/42	1/212	1/162
RC150m 級 (2)	X	2.9	1/93	1/158	1/140	1/444	1/51	1/77	1/97	1/208	1/52	1/78	1/159	1/261
	Y	3.3	1/99	1/125	1/128	1/455	1/62	1/99	1/96	1/192	1/61	1/63	1/132	1/288
RC180m 級	X	4.2	1/67	1/199	1/179	1/101	1/48	1/101	1/91	1/51	1/46	1/72	1/183	1/65
	Y	4.3	1/68	1/195	1/172	1/95	1/53	1/104	1/84	1/51	1/47	1/51	1/181	1/61
RC240m 級	X,Y	5.4	1/133	1/199	1/163	1/123	1/91	1/142	1/106	1/77	1/70	1/90	1/166	1/74

※網掛け：1/100 をこえるもの

表 3.3-3 S 造建物の最大塑性率一覧

	方向	周期 (s)	2011 平均波				2011 平均+σ波				2012 波			
			此花	津島	浜松	新宿	此花	津島	浜松	新宿	此花	津島	浜松	新宿
S100m 級	X	2.3	1.1	1.3	1.4	0.6	1.4	1.7	2.1	0.7	1.8	1.9	1.6	0.7
	Y	2.8	1.0	1.3	1.4	0.5	1.8	1.8	2.3	0.8	1.6	2.4	1.9	0.7
S120m 級	X	2.6	0.9	1.0	1.5	0.5	1.6	1.6	2.6	0.7	1.4	3.8	2.0	0.6
	Y	2.9	0.7	0.8	1.3	0.4	1.4	1.5	1.8	0.6	1.4	2.3	1.5	0.5
S140m 級	X	3.7	1.6	1.7	1.8	0.6	3.0	1.8	3.0	1.2	2.3	3.4	2.1	0.8
	Y	3.8	1.4	1.7	1.9	0.6	3.1	2.0	2.8	1.0	2.3	3.6	2.2	0.7
S200m 級	X	5.7	2.2	1.1	1.1	1.7	2.4	1.6	1.8	2.0	1.3	2.3	1.1	1.8
	Y	5.1	2.5	1.1	1.2	1.2	4.1	2.0	1.6	1.8	2.6	2.6	1.4	1.4
S230m 級	X	6.5	3.1	1.1	1.5	1.5	3.0	2.1	1.8	2.8	3.4	2.6	1.3	2.1
	Y	5.5	2.7	1.3	1.3	1.7	2.9	1.7	2.4	2.4	2.8	2.7	1.2	2.3
S250m 級	X	5.8	2.5	0.9	0.7	1.9	3.2	1.6	1.2	2.4	3.3	3.3	0.6	2.1
	Y	5.3	1.6	0.9	1.0	0.8	1.8	1.5	1.4	1.3	1.5	2.0	1.0	1.2

※塑性率は層塑性率を示す。

網掛け：層塑性率 2.0 をこえるもの

表 3.3-4 RC 造建物の最大塑性率一覧

	方向	周期 (s)	2011 平均波				2011 平均+σ波				2012 波			
			此花	津島	浜松	新宿	此花	津島	浜松	新宿	此花	津島	浜松	新宿
RC90m 級	X	2.0	0.8	0.8	1.2	0.2	1.7	1.7	2.9	0.5	1.3	3.2	1.9	0.4
	Y	1.9	0.9	1.0	1.7	0.3	2.2	2.4	5.1	0.6	2.4	7.1	3.4	0.5
RC115m 級	X,Y	2.2	0.6	0.6	0.8	0.2	2.0	0.9	1.9	0.3	1.0	2.4	1.4	0.3
RC130m 級	X	3.1	1.5	1.6	1.2	0.6	3.3	3.2	1.5	1.0	3.3	3.2	1.3	0.9
RC150m 級 (1)	X	2.4	0.7	0.8	0.9	0.3	2.4	0.9	1.6	0.5	1.9	3.2	0.5	1.4
	Y	3.5	1.0	0.6	0.9	0.3	2.1	1.2	1.1	0.6	1.7	2.1	0.5	0.7
RC150m 級 (2)	X	2.9	1.7	1.0	1.3	0.4	3.0	2.0	1.8	0.9	2.9	2.6	1.1	0.7
	Y	3.3	2.0	1.0	1.2	0.4	3.0	1.9	1.7	0.9	2.6	2.8	1.1	0.7
RC180m 級	X	4.2	2.0	0.7	0.9	1.3	2.8	1.2	1.8	2.8	3.1	2.3	0.8	2.1
	Y	4.3	1.9	0.7	0.9	1.4	2.5	1.2	2.0	2.7	2.9	2.7	0.8	2.3
RC240m 級	X,Y	5.4	1.1	0.8	0.9	1.2	1.9	1.0	1.9	2.3	2.6	2.2	1.0	2.3

※RC90m 級・RC240m 級は部材塑性率を、その他は層塑性率を示す。

網掛け：層塑性率 2.0、部材塑性率 4.0 をこえるもの

3-3-3 各棟の応答一覧

表 3.3-5 S100m級 2012 地震動と 2011 地震動との応答値の比較

モデル	入力地震波	最大応答値 (X 方向)					
		頂部加速度 cm/s ²	頂部変位 cm	変形角	塑性率	累積塑性 変形倍率	頂部残留 変形 cm
S 100m級	此花(2011)平均	470.9	56.7	1/137	1.086	10.73	0.329
	津島(2011)平均	508.7	59.5	1/125	1.301	9.30	1.950
	浜松(2011)平均	457.7	61.5	1/120	1.376	7.61	3.190
	新宿(2011)平均	217.2	29.2	1/276	0.603	0.19	0.007
	此花(2011)平均+ σ	504.9	60.7	1/121	1.384	22.91	0.627
	津島(2011)平均+ σ	546.5	68.9	1/96	1.723	24.77	7.460
	浜松(2011)平均+ σ	862.8	72.9	1/82	2.094	71.83	4.050
	新宿(2011)平均+ σ	267.7	33.4	1/249	0.659	0.38	0.003
	此花(2012)	556.0	73.0	1/93	1.779	21.79	4.54
	津島(2012)	734.4	78.0	1/88	1.933	96.96	9.29
	浜松(2012)	548.1	65.5	1/104	1.589	20.91	0.08
	新宿(2012)	248.1	34.1	1/238	0.689	2.35	0.00

モデル	入力地震波	最大応答値 (Y 方向)					
		頂部加速度 cm/s ²	頂部変位 cm	変形角	塑性率	累積塑性 変形倍率	頂部残留 変形 cm
S 100m級	此花 (2011) 平均	264.6	50.8	1/159	0.960	2.31	0.019
	津島 (2011) 平均	363.6	65.9	1/115	1.319	10.58	2.009
	浜松 (2011) 平均	339.8	71.1	1/106	1.430	16.14	0.798
	新宿 (2011) 平均	136.7	24.5	1/333	0.459	0.00	0.001
	此花 (2011) 平均+ σ	466.1	81.1	1/87	1.757	32.97	0.222
	津島 (2011) 平均+ σ	495.1	77.9	1/87	1.766	37.16	0.418
	浜松 (2011) 平均+ σ	656.6	93.3	1/67	2.287	87.88	0.877
	新宿 (2011) 平均+ σ	231.4	43.9	1/186	0.815	0.55	0.022
	此花 (2012)	412.0	76.5	1/94	1.607	24.43	4.18
	津島 (2012)	674.6	97.5	1/68	2.425	112.80	6.29
	浜松 (2012)	449.7	84.8	1/80	1.919	28.03	3.23
	新宿 (2012)	200.7	36.6	1/222	0.692	32.97	0.00

注 1) 累積塑性変形倍率の定義：各層の塑性歪エネルギーを第一折れ点の層せん断力と層間変形の積で除した値

注 2) 塑性率の定義：第一折れ点からの変形増大倍率 ($\delta \max / \delta p$) なお、第一折れ点は静的弾塑性解析における層せん断力と層間変形関係において、当該層所属部材のいずれかが全塑性モーメントに達した時点とする。

表 3.3-6 S120m 級 2012 地震動と 2011 地震動との応答値の比較

	入力地震波	最大応答値(X 方向)					
		頂部加速度 cm/s ²	頂部変位 cm	変形角 rad	塑性率	累積塑性 変形倍率	頂部残留 変形 cm
S 120m 級	此花(2011)平均	252.2	40.1	1/247	0.92	187.3	0.27
	津島(2011)平均	380.0	46.0	1/220	1.03	209.4	0.30
	浜松(2011)平均	564.4	61.0	1/153	1.45	354.1	0.74
	新宿(2011) 平均	139.3	22.4	1/475	0.49	33.3	0.40
	此花(2011)平均+ σ	380.6	65.3	1/147	1.55	749.3	0.73
	津島(2011)平均+ σ	533.5	72.6	1/138	1.64	559.7	1.01
	浜松(2011)平均+ σ	795.0	86.3	1/93	2.58	830.5	2.84
	新宿(2011) 平均+ σ	197.9	31.1	1/318	0.70	105.4	0.07
	此花(2012)	328.8	57.3	1/164	1.371	651.7	0.28
	津島(2012)	627.2	108.1	1/64	3.754	1299.0	16.38
	浜松(2012)	574.1	74.8	1/114	2.045	378.2	3.52
	新宿(2012)	219.6	27.1	1/375	0.590	75.2	0.16

モデル	入力地震波	最大応答値(Y 方向)					
		頂部加速度 cm/s ²	頂部変位 cm	変形角 rad	塑性率	累積塑性 変形倍率	頂部残留 変形 cm
S 120m 級	此花(2011)平均	273.5	43.4	1/264	0.84	317.4	0.17
	津島(2011)平均	396.2	48.3	1/220	1.02	262.8	0.03
	浜松(2011)平均	648.5	71.6	1/147	1.52	293.5	1.26
	新宿(2011) 平均	170.7	28.3	1/414	0.56	117.8	0.24
	此花(2011)平均+ σ	401.7	76.1	1/132	1.75	789.2	1.97
	津島(2011)平均+ σ	552.2	78.7	1/147	1.62	526.5	0.98
	浜松(2011)平均+ σ	872.9	97.1	1/114	2.03	647.8	0.77
	新宿(2011) 平均+ σ	200.1	33.4	1/311	0.75	263.0	0.12
	此花(2012)	314.5	76.9	1/134	1.37	708.1	0.22
	津島(2012)	669.0	114.8	1/91	2.34	1238.6	9.97
	浜松(2012)	692.8	80.7	1/128	1.46	335.2	1.54
	新宿(2012)	222.4	32.2	1/368	0.51	202.4	0.04

注 1) 累積塑性変形倍率の定義：各層の塑性歪エネルギーを等価降伏耐力と等価降伏変形の積で除した値

注 2) 塑性率の定義：制振部材を除く主体架構の塑性率とする。第一折れ点からの変形増大倍率 ($\delta \max / \delta p$) とし、第一折れ点は静的弾塑性解析における層せん断力と層間変形関係において、当該層所属部材のいずれかが全塑性モーメントに達した時点とする。

表 3.3-7 S140m級 2012 地震動と 2011 地震動との応答値の比較

モデル	入力地震波	最大応答値(X 方向)					
		頂部加速度 cm/s ²	頂部変位 cm	変形角 rad	塑性率	累積塑性 変形倍率	頂部残留 変形 cm
S 140m級	此花(2011)平均	247.8	67.4	1/135	1.62	0.63	0.47
	津島(2011)平均	220.0	75.2	1/125	1.74	0.45	0.39
	浜松(2011)平均	406.1	76.1	1/119	1.82	1.16	3.61
	新宿(2011)平均	89.5	31.0	1/341	0.62	0.00	0.01
	此花(2011)平均 + σ	381.4	114.6	1/73	3.04	8.63	1.16
	津島(2011)平均 + σ	359.2	78.2	1/118	1.83	1.79	1.54
	浜松(2011)平均 + σ	652.7	108.9	1/75	2.98	2.51	2.23
	新宿(2011)平均 + σ	175.2	60.1	1/171	1.24	0.10	0.17
	此花(2012)	326.5	88.8	1/95	2.30	2.31	2.36
	津島(2012)	569.6	130.0	1/66	3.36	9.18	7.56
	浜松(2012)	402.6	85.5	1/104	2.09	1.94	0.98
	新宿(2012)	107.8	37.8	1/274	0.78	0.00	0.00

モデル	入力地震波	最大応答値(Y 方向)					
		頂部加速度 cm/s ²	頂部変位 m	変形角 rad	塑性率	累積塑性 変形倍率	頂部残留 変形 cm
S 140m級	此花(2011)平均	267.8	78.0	1/136	1.38	0.11	0.57
	津島(2011)平均	266.6	88.7	1/113	1.72	0.40	1.04
	浜松(2011)平均	538.9	93.9	1/104	1.90	0.86	2.22
	新宿(2011)平均	102.9	38.7	1/291	0.63	0.00	0.01
	此花(2011)平均 + σ	437.5	134.0	1/68	3.06	5.09	0.65
	津島(2011)平均 + σ	415.3	97.2	1/101	1.97	1.77	1.12
	浜松(2011)平均 + σ	846.5	119.8	1/75	2.76	1.19	1.88
	新宿(2011)平均 + σ	184.2	63.5	1/176	1.03	0.00	0.04
	此花(2012)	462.6	106.4	1/88	2.30	2.64	3.32
	津島(2012)	676.5	149.4	1/63	3.57	6.78	2.05
	浜松(2012)	509.0	105.4	1/93	2.16	1.14	1.21
	新宿(2012)	114.7	42.6	1/262	0.70	0.00	0.00

注 1) 累積塑性変形倍率の定義：静的荷重増分解析から得られる各層の荷重-変形関係を、限界層間変形 (R=1/75 程度) 時までの履歴面積が等しくなるように設定した、完全弾塑性型の復元力特性をもとに下式により算出する。

$$\eta_{eqi} = W_{pi} / (\delta_{eqi} \cdot Q_{eqi})$$

η_{eqi} : i 層の累積塑性変形倍率

W_{pi} : 時刻歴解析による i 層の塑性履歴エネルギー

δ_{eqi} : i 層の置換完全弾塑性型復元力特性の降伏変位

Q_{eqi} : i 層の置換完全弾塑性型復元力特性の降伏耐力

注 2) 塑性率の定義 : 曲げ変形成分とせん断変形成分を分離し、せん断変形成分を対象に、各層のいずれかの部材端が全塑性モーメントに達した時点の層間変位を基点として算出する。なお、曲げ変形成分 (曲げ剛性) は弾性とした。

表 3.3-8 S200m級 2012 地震動と 2011 地震動との応答値の比較

モデル	入力地震波	最大応答値 (X 方向)					
		頂部加速度 cm/s ²	頂部変位 cm	変形角 rad	塑性率	累積塑性 変形倍率	頂部残留 変形 cm
S 200m 級	此花(2011)平均	245.3	161.3	1/81	2.160	6.83	7.65
	津島(2011)平均	186.0	73.6	1/155	1.129	0.40	0.65
	浜松(2011)平均	215.3	49.5	1/156	1.134	0.43	0.56
	新宿(2011)平均	160.8	137.7	1/115	1.652	1.79	2.78
	此花(2011)平均+σ	262.6	183.1	1/78	2.423	8.24	2.35
	津島(2011)平均+σ	264.9	117.5	1/111	1.581	0.80	0.23
	浜松(2011)平均+σ	318.9	72.2	1/100	1.766	1.80	2.29
	新宿(2011)平均+σ	185.3	157.2	1/97	1.948	4.06	2.21
	此花(M9.0)	297.6	199.9	1/70	1.295	4.74	7.21
	津島(M9.0)	301.3	145.5	1/85	2.252	3.69	7.87
	浜松(M9.0)	238.0	70.4	1/156	1.135	0.48	0.30
	新宿(M9.0)	172.2	145.1	1/107	1.783	4.12	0.53

モデル	入力地震波	最大応答値 (Y 方向)					
		頂部加速度 cm/s ²	頂部変位 cm	変形角 rad	塑性率	累積塑性 変形倍率	頂部残留 変形 cm
S 200m 級	此花(2011)平均	270.7	129.6	1/94	1.939	4.57	16.35
	津島(2011)平均	247.0	75.9	1/155	1.138	0.50	0.06
	浜松(2011)平均	253.2	58.3	1/148	1.196	0.56	0.12
	新宿(2011)平均	139.0	91.6	1/170	1.215	0.61	0.69
	此花(2011)平均+σ	333.1	145.1	1/56	3.085	12.46	9.32
	津島(2011)平均+σ	337.0	122.6	1/88	1.993	3.90	5.05
	浜松(2011)平均+σ	341.6	87.2	1/104	1.615	1.91	0.80
	新宿(2011)平均+σ	203.2	122.6	1/122	1.815	4.77	1.03
	此花(M9.0)	315.9	159.8	1/88	2.561	5.83	11.16
	津島(M9.0)	354.5	130.8	1/68	2.559	7.29	7.92
	浜松(M9.0)	289.7	68.3	1/129	1.363	0.73	0.69
	新宿(M9.0)	156.0	101.6	1/153	1.412	1.19	0.56

注 1) 塑性率、累積塑性変形倍率は以下の通り定義する。

$$\text{塑性率 } f_{\mu i} = \delta m_i / \delta e_i$$

$$\text{累積塑性変形倍率 } f_{\eta i} = W_{mi} / (Q_{ei} \cdot \delta e_i)$$

$\delta e_i, Q_{ei}$: 静的増分解析から得られる i 層の復元力特性をトリリニアにモデル化したときの第 1 折点

δm_i : 時刻歴解析による i 層の最大応答層間変位

W_{mi} : 時刻歴解析による i 層の累積塑性履歴エネルギー

表 3.3-9 S230m 級 2012 地震動と 2011 地震動との応答値の比較

モデル	入力地震波	最大応答値(X 方向)					
		頂部加速度 cm/s ²	頂部変位 cm	変形角 rad	塑性率	累積塑性 変形倍率	頂部残留 変形 cm
S 230m級	2011 此花平均	306.2	196.4	1/69	3.1	11.2	0.7
	2011 津島平均	274.8	85.2	1/185	1.1	0.0	0.0
	2011 浜松平均	364.6	82.6	1/144	1.5	0.0	0.4
	2011 新宿平均	175.0	125.0	1/135	1.5	2.9	0.4
	2011 此花平均+σ	344.7	195.2	1/69	3.0	13.5	10.7
	2011 津島平均+σ	363.8	158.9	1/104	2.1	1.8	3.8
	2011 浜松平均+σ	426.0	109.5	1/122	1.8	4.9	1.1
	2011 新宿平均+σ	206.4	163.9	1/72	2.8	8.5	6.8
	2012 此花	334.8	198.6	1/62	3.4	7.6	14.7
	2012 津島	418.2	204.5	1/83	2.6	7.6	5.3
	2012 浜松	343.5	90.7	1/163	1.3	0.0	0.0
	2012 新宿	188.9	139.0	1/95	2.1	8.1	1.7

モデル	入力地震波	最大応答値(Y 方向)					
		頂部加速度 cm/s ²	頂部変位 cm	変形角 rad	塑性率	累積塑性 変形倍率	頂部残留 変形 cm
S 230m級	2011 此花平均	253.1	212.8	1/66	2.7	5.6	7.9
	2011 津島平均	221.5	143.2	1/123	1.3	0.4	1.1
	2011 浜松平均	330.9	89.0	1/141	1.3	0.0	0.0
	2011 新宿平均	166.0	161.8	1/97	1.7	2.5	1.5
	2011 此花平均+σ	323.4	241.1	1/62	2.9	10.8	17.8
	2011 津島平均+σ	287.6	172.2	1/101	1.7	2.4	2.9
	2011 浜松平均+σ	425.4	148.1	1/83	2.4	8.5	3.2
	2011 新宿平均+σ	183.5	188.3	1/74	2.4	8.9	0.4
	2012 此花	357.5	235.6	1/62	2.8	7.3	11.1
	2012 津島	395.5	220.0	1/68	2.7	8.7	4.6
	2012 浜松	279.1	97.0	1/149	1.2	0.0	0.0
	2012 新宿	179.6	189.4	1/75	2.3	12.5	5.1

注 1) 累積塑性変形倍率の定義：各層の荷重-変形関係を、最大層間変形 δ_{imax} 時の履歴面積が等しくなるように完全弾塑性型復元力特性に置換する。この等価降伏耐力を f_{Qeqi} 、等価降伏変形を $f_{\delta eqi}$ 、架構の塑性履歴エネルギーを f_{Wpi} として、累積塑性変形倍率 $f_{\eta i}$ を次式で定義する。

$$f_{\eta i} = f_{Wpi} / (f_{\delta eqi} \cdot f_{Qeqi})$$

なお δ_{imax} は、層間変形角を 1/80 としたときの変形とする。

注 2) 塑性率の定義：第一折れ点からの変形増大倍率 (δ_{max} / δ_p) なお、第一折れ点は静的弾塑性解析における層せん断力と層間変形関係において、当該層所属部材のいずれかが全塑性モーメントに達した時点とする。

表 3.3-10 S250m級 2012 地震動と 2011 地震動との応答値の比較

モデル	入力地震波	最大応答値(X 方向)					
		頂部加速度 cm/s ²	頂部変位 cm	変形角 rad	塑性率	累積塑性 変形倍率	頂部残留 変形 cm
S 250m級	此花(2011)平均	314.	173.	1/65	2.54	12.3	9.72
	津島(2011)平均	271.	88.	1/148	0.85	0.00	0.06
	浜松(2011)平均	640.	54.	1/180	0.68	0.00	0.04
	新宿(2011)平均	212.	158.	1/84	1.94	2.49	0.03
	此花(2011)平均 + σ	341.	185.	1/52	3.17	14.2	5.32
	津島(2011)平均 + σ	409.	150.	1/100	1.63	1.81	0.68
	浜松(2011)平均 + σ	1180.	78.	1/104	1.16	0.13	0.02
	新宿(2011)平均 + σ	251.	163.	1/69	2.38	7.57	5.03
	此花(2012)	332.	189.	1/51	3.25	6.61	8.35
	津島(2012)	703.	159.	1/51	3.30	5.50	15.1
	浜松(2012)	666.	69.	1/173	0.62	0.00	0.00
	新宿(2012)	218.	160.	1/80	2.05	8.01	2.20

モデル	入力地震波	最大応答値(Y 方向)					
		頂部加速度 cm/s ²	頂部変位 cm	変形角 rad	塑性率	累積塑性 変形倍率	頂部残留 変形 cm
S 250m級	此花(2011)平均	370.	211.	1/70	1.61	0.96	2.43
	津島(2011)平均	341.	77.	1/127	0.87	0.00	0.00
	浜松(2011)平均	642.	56.	1/127	0.95	0.00	0.00
	新宿(2011)平均	185.	137.	122.	0.83	0.00	0.04
	此花(2011)平均 + σ	494.	225.	1/64	1.84	1.73	2.29
	津島(2011)平均 + σ	466.	186.	1/79	1.47	0.05	1.77
	浜松(2011)平均 + σ	1270.	95.	1/81	1.40	0.00	3.25
	新宿(2011)平均 + σ	278.	202.	1/83	1.28	0.61	0.91
	此花(2012)	417.	221.	1/75	1.46	1.60	1.45
	津島(2012)	781.	201.	1/58	1.99	0.49	0.23
	浜松(2012)	652.	83.	1/119	0.99	0.00	0.02
	新宿(2012)	249.	189.	1/88	1.20	0.33	0.98

注 1) 累積塑性変形倍率の定義：静的荷重増分解析から得られる各層の荷重－変形関係を、限界層間変形 (R=1/75 程度) 時までの履歴面積が等しくなるように設定した、完全弾塑性型の復元力特性をもとに下式により算出する。

$$\eta_{eqi} = W_{pi} / (\delta_{eqi} \cdot Q_{eqi})$$

η_{eqi} : i 層の累積塑性変形倍率

W_{pi} : 時刻歴解析による i 層の塑性履歴エネルギー

δ_{eqi} : i 層の置換完全弾塑性型復元力特性の降伏変位

Q_{eqi} : i 層の置換完全弾塑性型復元力特性の降伏耐力

注 2) 塑性率の定義：曲げ変形成分とせん断変形成分を分離し、せん断変形成分を対象に、各層のいずれかの部材端が全塑性モーメントに達した時点の層間変位を基点として算出する。なお、曲げ変形成分 (曲げ剛性) は弾性とした。

表 3.3-11 RC90m級 2012 地震動と 2011 地震動との応答値の比較

モデル	入力地震波	最大応答値(X 方向)					
		頂部加速度 cm/s ²	頂部変位 cm	変形角 rad	部材端塑性率	累積塑性 変形倍率	頂部残留 変形 cm
RC 90m級	此花(2011)平均	177.8	30.98	1/231	0.78	—	0.392
	津島(2011)平均	197.3	33.03	1/215	0.82	—	0.326
	浜松(2011)平均	302.9	47.32	1/151	1.19	—	0.602
	新宿(2011)平均	84.0	10.19	1/649	0.24	—	0.315
	此花(2011)平均 + σ	275.4	56.53	1/121	1.65	—	0.050
	津島(2011)平均 + σ	393.0	55.48	1/115	1.74	—	1.826
	浜松(2011)平均 + σ	535.5	77.23	1/79	2.93	—	4.154
	新宿(2011)平均 + σ	108.7	19.80	1/347	0.48	—	0.289
	此花(2012)	286.8	49.14	1/142	1.30	—	0.620
	津島(2012)	470.5	83.38	1/74	3.19	—	9.266
	浜松(2012)	315.5	63.13	1/106	1.87	—	1.844
	新宿(2012)	111.4	15.91	1/402	0.41	—	0.365

モデル	入力地震波	最大応答値(Y 方向)					
		頂部加速度 cm/s ²	頂部変位 cm	変形角 rad	部材端塑性率	累積塑性 変形倍率	頂部残留 変形 cm
RC 90m級	此花(2011)平均	199.5	28.65	1/247	0.89	—	0.429
	津島(2011)平均	241.8	32.28	1/221	0.95	—	0.358
	浜松(2011)平均	317.1	43.76	1/159	1.69	—	0.465
	新宿(2011)平均	76.7	8.36	1/745	0.31	—	0.221
	此花(2011)平均 + σ	294.2	50.02	1/142	2.24	—	1.027
	津島(2011)平均 + σ	380.6	49.14	1/136	2.36	—	1.369
	浜松(2011)平均 + σ	513.2	75.80	1/89	5.07	—	1.731
	新宿(2011)平均 + σ	141.9	17.51	1/386	0.55	—	0.640
	此花(2012)	325.4	48.72	1/134	2.38	—	0.581
	津島(2012)	572.0	83.77	1/66	7.12	—	8.527
	浜松(2012)	326.0	63.26	1/108	3.42	—	1.603
	新宿(2012)	113.5	13.80	1/467	0.47	—	0.094

注) 塑性率の定義：部材レベルの材端曲げ塑性率を採用し、第二折れ点（曲げ降伏時材端回転角）からの変形増大倍率（ δ_{max}/δ_y ）とする

表 3.3-12 RC115m級 2012 地震動と 2011 地震動との応答値の比較

モデル	入力地震波	最大応答値 (X,Y 方向)					
		頂部加速度 (cm/s ²)	頂部変位 (cm)	層間 変形角 (rad)	層塑性率	累積塑性 変形倍率	頂部 残留変形 (cm)
RC 115m 級	此花(2011)平均	150	44.9	1/191	0.57	—	8.4
	津島(2011)平均	206	45.9	1/193	0.58	—	3.7
	浜松(2011)平均	254	60.4	1/138	0.79	—	13.0
	新宿(2011)平均	94	19.0	1/450	0.24	—	0.6
	此花(2011)平均 + σ	306	108.3	1/ 64	2.00	—	22.8
	津島(2011)平均 + σ	302	60.1	1/127	0.94	—	6.3
	浜松(2011)平均 + σ	409	90.6	1/ 68	1.90	—	5.5
	新宿(2011)平均 + σ	105	25.6	1/323	0.33	—	4.0
	此花(2012)	259	80.3	1/111	0.98	—	8.7
	津島(2012)	389	125.2	1/ 48	2.44	—	0.1
	浜松(2012)	270	80.9	1/ 82	1.41	—	11.9
	新宿(2012)	99	21.9	1/388	0.30	—	6.1

注) 塑性率の定義 : Tri linear 第 2 折れ点

曲げ変形成分とせん断変形成分を分離し、せん断変形成分をトリリニア型に置換した第 2 折れ点の層間変位 (曲げ+せん断) を基点として算出。

表 3.3-13 RC130m級 2012 地震動と 2011 地震動との応答値の比較

モデル	入力地震波	最大応答値(X,Y 方向共通)				
		頂部加速度 (cm/s ²)	頂部変位 (cm)	変形角 (rad)	塑性率	頂部残留変形 (cm)
RC 130m級	此花(2011)平均	192	90	1/101	1.52	1.1
	津島(2011)平均	242	95	1/101	1.56	1.0
	浜松(2011)平均	295	55	1/141	1.15	0.5
	新宿(2011)平均	61	30	1/244	0.56	0.1
	此花(2011)平均+ σ	284	148	1/48	3.34	0.2
	津島(2011)平均+ σ	287	124	1/53	3.16	0.5
	浜松(2011)平均+ σ	367	80	1/99	1.51	0.9
	新宿(2011)平均+ σ	113	57	1/161	1.02	0.0
	此花(2012)	244	142	1/49	3.34	0.4
	津島(2012)	426	132	1/53	3.15	2.9
	浜松(2012)	272	81	1/116	1.34	0.1
	新宿(2012)	103	51	1/182	0.90	1.0

表 3.3-14 RC150m級(1) 2012地震動と2011地震動との応答値の比較

モデル	入力地震波	最大応答値(X方向)				
		頂部加速度 (cm/s ²)	頂部変位 (cm)	変形角 (rad)	塑性率	頂部残留変形 (cm)
RC 150m級	此花(2011)平均	167.0	51.9	1/213	0.71	9.08
	津島(2011)平均	158.3	61.5	1/183	0.82	6.69
	浜松(2011)平均	73.3	16.8	1/559	0.25	1.32
	新宿(2011)平均	270.2	64.1	1/183	0.87	3.96
	此花(2011)平均+ σ	285.5	112.3	1/63	2.36	11.99
	津島(2011)平均+ σ	255.0	67.1	1/164	0.93	9.29
	浜松(2011)平均+ σ	91.6	30.9	1/303	0.51	2.06
	新宿(2011)平均+ σ	386.7	91.6	1/94	1.57	7.11
	此花(2012)	248.3	92.1	1/84	1.88	14.60
	津島(2012)	385.6	146.2	1/47	3.23	14.20
	浜松(2012)	89.8	30.1	1/332	0.46	6.88
	新宿(2012)	251.8	90.8	1/108	1.36	10.10

モデル	入力地震波	最大応答値(Y方向)				
		頂部加速度 (cm/s ²)	頂部変位 (cm)	変形角 (rad)	塑性率	頂部残留変形 (cm)
RC 150m級	此花(2011)平均	198.5	121.9	1/104	0.99	8.20
	津島(2011)平均	163.0	69.5	1/164	0.60	5.50
	浜松(2011)平均	63.4	30.9	1/375	0.27	2.57
	新宿(2011)平均	274.6	54.9	1/142	0.87	5.54
	此花(2011)平均+ σ	305.0	158.1	1/59	2.10	9.59
	津島(2011)平均+ σ	264.3	121.2	1/92	1.19	3.45
	浜松(2011)平均+ σ	118.0	72.5	1/167	0.62	4.78
	新宿(2011)平均+ σ	356.0	72.1	1/125	1.13	9.61
	此花(2012)	259.3	168.4	1/64	1.71	18.60
	津島(2012)	354.3	156.2	1/42	2.06	7.84
	浜松(2012)	89.7	54.7	1/212	0.49	4.36
	新宿(2012)	251.7	71.8	1/162	0.71	0.76

注) 層の塑性率は、第2折点を起点として算出している。

表 3. 3-15 RC150m級(2) 2012 地震動と 2011 地震動との応答値の比較

モデル	入力地震波	最大応答値 (X 方向)					
		頂部加速度 (cm/s ²)	頂部変位 (cm)	層間 変形角 (rad)	層塑性率	累積塑性 変形倍率	頂部 残留変形 (cm)
RC 150m 級 (2)	此花(2011)平均	132.	84.	1/ 93	1.7	—	0.8
	津島(2011)平均	167.	67.	1/ 158	1.0	—	0.4
	浜松(2011)平均	224.	21.	1/140	1.3	—	1.2
	新宿(2011)平均	79.	70.	1/ 444	0.4	—	0.03
	此花(2011)平均 + σ	208.	140.	1/51	3.0	—	1.0
	津島(2011)平均 + σ	200.	84.	1/ 77	2.0	—	1.0
	浜松(2011)平均 + σ	255.	65.	1/ 97	1.8	—	1.5
	新宿(2011)平均 + σ	95.	44.	1/ 208	0.9	—	0.8
	此花(2012)	208.	142.	1/52	2.9	—	2.9
	津島(2012)	260.	117.	1/ 78	2.6	—	0.9
	浜松(2012)	203.	66.	1/ 159	1.1	—	0.7
	新宿(2012)	100.	33.	1/ 261	0.7	—	0.8

モデル	入力地震波	最大応答値 (Y 方向)					
		頂部加速度 (cm/s ²)	頂部変位 (cm)	層間 変形角 (rad)	層塑性率	累積塑性 変形倍率	頂部 残留変形 (cm)
RC 150m 級 (2)	此花(2011)平均	167.	112.	1/ 99	2.0	—	0.4
	津島(2011)平均	171.	71.	1/ 125	1.0	—	0.6
	浜松(2011)平均	224.	53.	1/128	1.2	—	2.4
	新宿(2011)平均	87.	24.	1/ 455	0.4	—	1.0
	此花(2011)平均 + σ	248.	173.	1/ 62	3.0	—	0.4
	津島(2011)平均 + σ	216.	97.	1/ 99	1.9	—	2.0
	浜松(2011)平均 + σ	261.	65.	1/ 96	1.7	—	3.0
	新宿(2011)平均 + σ	102.	59.	1/ 192	0.9	—	0.4
	此花(2012)	201.	169.	1/ 61	2.6	—	2.4
	津島(2012)	287.	129.	1/ 63	2.8	—	1.5
	浜松(2012)	225.	71.	1/ 132	1.1	—	1.9
	新宿(2012)	87.	39.	1/ 288	0.7	—	0.1

表 3.3-16 RC180m級 2012 地震動と 2011 地震動との応答値の比較

モデル	入力地震波	最大応答値(X 方向)				
		頂部加速度 (cm/s ²)	頂部変位 (cm)	変形角 (rad)	塑性率	頂部残留変形 (cm)
RC 180m級	此花(2011)平均	213.1	197.6	1/67	2.00	11.99
	津島(2011)平均	139.5	59.2	1/199	0.69	1.94
	浜松(2011)平均	183.0	45.7	1/179	0.88	3.56
	新宿(2011)平均	145.6	138.7	1/101	1.34	2.98
	此花(2011)平均+ σ	215.4	209.2	1/48	2.80	12.21
	津島(2011)平均+ σ	207.6	139.6	1/101	1.21	5.62
	浜松(2011)平均+ σ	251.9	67.2	1/91	1.83	12.00
	新宿(2011)平均+ σ	172.7	179.5	1/51	2.82	10.93
	此花(2012)	210.4	207.1	1/46	3.14	16.88
	津島(2012)	261.0	137.9	1/72	2.27	8.98
	浜松(2012)	187.2	68.7	1/183	0.80	6.08
	新宿(2012)	147.9	156.3	1/65	2.08	5.85

モデル	入力地震波	最大応答値(Y 方向)				
		頂部加速度 (cm/s ²)	頂部変位 (cm)	変形角 (rad)	塑性率	頂部残留変形 (cm)
RC 180m級	此花(2011)平均	215.1	202.6	1/68	1.92	5.88
	津島(2011)平均	142.3	62.1	1/195	0.70	2.00
	浜松(2011)平均	182.3	46.6	1/172	0.89	2.05
	新宿(2011)平均	153.9	149.2	1/95	1.42	2.37
	此花(2011)平均+ σ	214.3	214.7	1/53	2.52	13.57
	津島(2011)平均+ σ	206.0	139.5	1/104	1.23	1.79
	浜松(2011)平均+ σ	247.2	70.8	1/84	1.98	12.26
	新宿(2011)平均+ σ	172.9	183.7	1/51	2.71	12.14
	此花(2012)	214.8	207.0	1/47	2.93	25.45
	津島(2012)	265.1	137.2	1/51	2.65	2.78
	浜松(2012)	186.8	70.1	1/181	0.83	4.14
	新宿(2012)	157.3	167.3	1/61	2.25	1.59

注) 塑性率の定義：せん断成分トリリニアカーブの第2折れ点を基点とする。

表 3.3-17 RC240m級 2012 地震動と 2011 地震動との応答値の比較

モデル	入力地震波	最大応答値(X,Y 方向共通)				
		頂部加速度 (cm/s ²)	頂部変位 (cm)	変形角 (rad)	塑性率	頂部残留 変形 (cm)
RC 240m級	此花(2011)平均	126.6	143.7	1/133	1.10	0.39
	津島(2011)平均	111.6	80.7	1/199	0.75	0.13
	浜松(2011)平均	129.9	93.2	1/163	0.93	0.24
	新宿(2011)平均	100.3	155.4	1/123	1.22	0.58
	此花(2011)平均 + σ	164.8	186.2	1/91	1.90	2.46
	津島(2011)平均 + σ	146.5	116.9	1/142	1.04	0.26
	浜松(2011)平均 + σ	206.4	79.1	1/106	1.86	1.07
	新宿(2011)平均 + σ	117.7	192.2	1/77	2.29	1.35
	此花(2012)平均	171.3	171.0	1/70	2.64	2.78
	津島(2012)平均	234.4	151.6	1/90	2.23	2.70
	浜松(2012)平均	152.7	87.8	1/166	1.00	0.21
	新宿(2012)平均	130.8	217.7	1/74	2.30	6.86

注) 塑性率の定義：部材レベルの材端曲げ塑性率を採用し、第二折れ点（曲げ降伏時材端回転角）からの変形増大倍率（ δ_{max}/δ_y ）とする

3-4 S80m 級モデル建物の部材損傷評価

ここでは、新たに作成された $M_w=9.0$ の 6 セグメント 4 連動地震に対して、高さ約 80m の鋼構造超高層建物を対象に立体フレームモデルによる応答解析を行い、部材の損傷について検討する。応答結果は、前節と同様に 2011 年度の $M_w=8.7$ の三連動地震と合わせて比較する。

3-4-1 対象建物概要

表 3.4-1 検討建物概要

構造種別	設計年	階数	軒高	固有周期	解析方向	構造上の特徴
S 造	—	21 階	80.5m	2.41 秒	X 方向	純ラーメン構造
S 造	—	21 階	80.5m	1.75 秒	X 方向	制振部材付きラーメン構造

(下に概略伏図と軸組図を示す)

検討に用いた建物は、地上 21 階建、軒高約 80m の S 造超高層建物とする。検討は、純ラーメン架構による耐震モデルと、同じ架構にブレース型制振部材を付加した制振モデルを設定し、X 方向を対象に検討した。X 方向の架構は、5m×6 スパンの均等スパンで、4 構面で構成される架構形式となっている。基準階高は 3.8m で、1 階の階高のみ 4.5m である。

主架構の耐震性能は、弾性限界時のベースシヤ係数で $C_y=0.195$ 、保有水平耐力時のベースシヤ係数は $C_u=0.235$ となるものである。同架構による耐震モデルの一次固有周期は $T_1=2.41s$ であった。制振モデルは、耐震モデルの各層に履歴型ダンパー(座屈拘束ブレース)を取付け、ダンパーの投入量は第 1 層でのダンパーの降伏層せん断力係数、 $d\alpha_{y1}$ を用いて、 $d\alpha_{y1}=0.064$ とし、Ai 分布を基本に高さ方向の投入量を設定した。制振モデルの一次固有周期は $T_1=1.75s$ であった。耐震モデル、制振モデルの伏図、軸組図をそれぞれ示す。

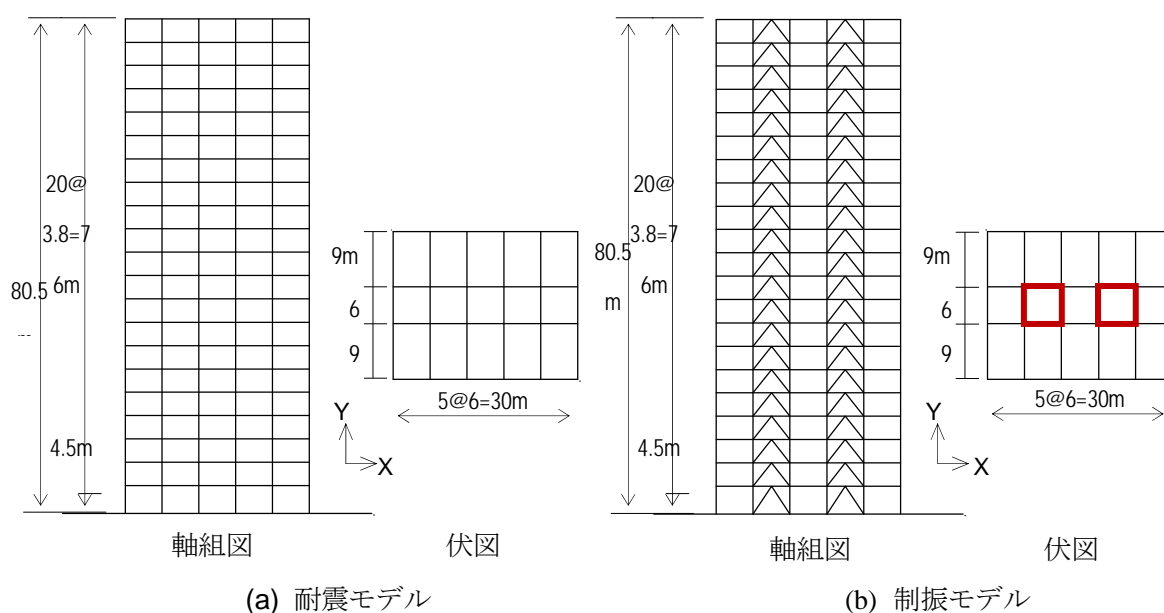


図 3.4-1 検討用建物の伏図、軸組図

3-4-2 モデル化の方針

解析モデルは、柱、梁、ダンパー部材を線材とした3次元立体骨組モデルで、減衰は主架構のみに与え、減衰定数 $h=2\%$ の初期剛性比例型とした。なお本解析では、 $P-\delta$ 効果は考慮していない。

3-4-3 静的漸増解析結果

静的弾塑性解析の結果から制振モデルでは、層間変形角 $R=1/200$ より小さな層間変形角において、ブレース状に配置した履歴型制振ダンパーが降伏している。

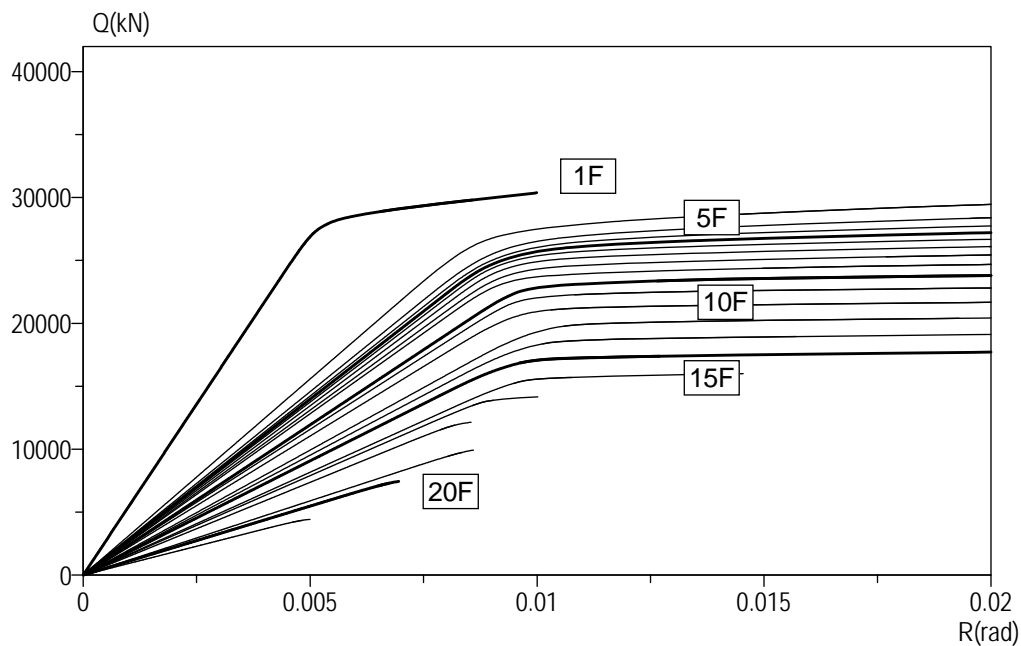


図 3.4-2 耐震モデル (X 方向) 荷重変形関係図

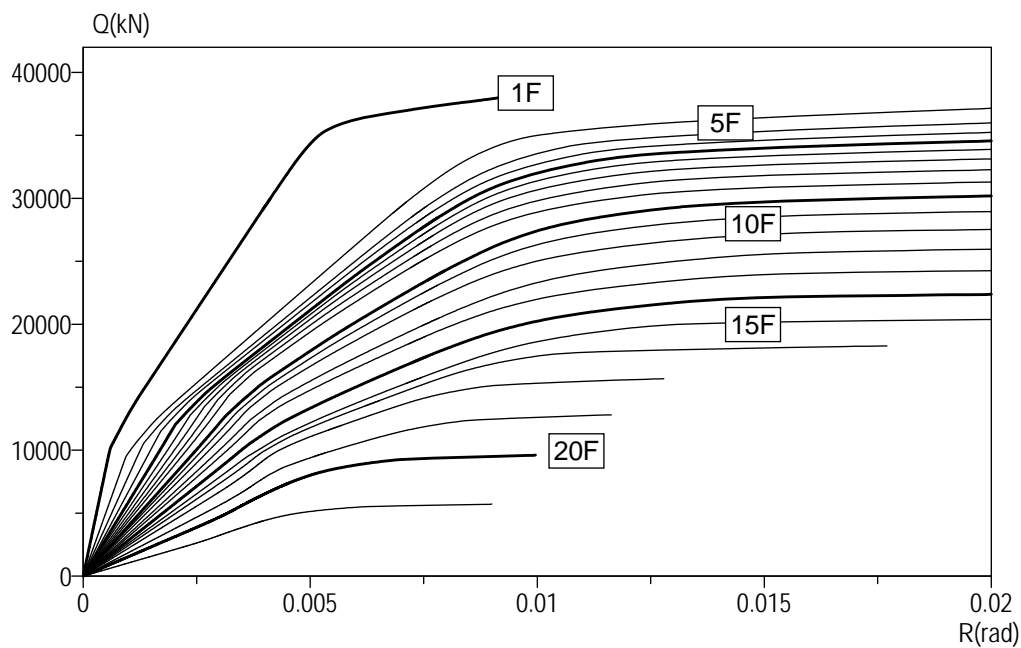


図 3.4-3 制振モデル (X 方向) 荷重変形関係図

3-4-4 3連動平均波, 3連動平均+σ波, 4連動地震波 地震応答解析結果

層および梁, ダンパー部材の最大応答値の一覧を以下に示す。

表 3.4-2 各地震動ケースの最大応答値(層レベル)

2011年度 3連動平均波(層レベル)

モデル	入力地震波	層の最大応答値					
		頂部加速度 (cm/s ²)	頂部変位 (cm)	変形角 (rad)	塑性率	累積塑性 変形倍率	頂部残留 変形(cm)
S80m級 耐震モデル	津島(2011)平均	529.5	69.5	1/90	1.22	0.60	3.35
	浜松(2011)平均	569.8	70.0	1/78	1.39	2.06	2.29
S80m級 制振モデル	津島(2011)平均	513.8	29.1	1/203	0.66	0.00	0.21
	浜松(2011)平均	852.0	36.1	1/164	0.78	0.01	0.19

2011年度 3連動平均+σ波(層レベル)

モデル	入力地震波	層の最大応答値					
		頂部加速度 (cm/s ²)	頂部変位 (cm)	変形角 (rad)	塑性率	累積塑性 変形倍率	頂部残留 変形(cm)
S80m級 耐震モデル	津島(2011)平均+σ	675.7	83.2	1/73	1.45	2.55	7.56
	浜松(2011)平均+σ	953.8	77.9	1/62	1.75	8.65	6.42
S80m級 制振モデル	津島(2011)平均+σ	700.4	38.5	1/137	1.00	0.03	0.32
	浜松(2011)平均+σ	1245.9	57.1	1/96	1.22	0.57	0.40

2012年度 4連動地震波(層レベル)

モデル	入力地震波	層の最大応答値					
		頂部加速度 (cm/s ²)	頂部変位 (cm)	変形角 (rad)	塑性率	累積塑性 変形倍率	頂部残留 変形(cm)
S80m級 耐震モデル	津島(2012)	874.6	99.5	1/46	2.34	16.2	18.89
	浜松(2012)	676.1	79.9	1/69	1.56	4.44	2.27
S80m級 制振モデル	津島(2012)	845.4	58.0	1/87	1.30	0.95	1.38
	浜松(2012)	676.0	35.0	1/149	0.93	0.00	0.69

注1) 累積塑性変形倍率 $f\eta_i$ は, 次式で定義する。

$$f\eta_i = fW_{pi} / (fQ_{eqi} \cdot f\delta_{eqi})$$

ここに, fW_{pi} は各層の塑性歪みエネルギー, fQ_{eqi} は等価降伏耐力, $f\delta_{eqi}$ は等価降伏変形である。

fQ_{eqi} と $f\delta_{eqi}$ は, それぞれ各層の荷重-変形関係を, 最大層間変形角 δ_{imax} (今回は $R=1/80$ と定めた) に達するまでの履歴面積が等価になるように, 完全弾塑性型復元力に置換して得る。

注2) 塑性率 $f\mu_i$ は, 第1折れ点からの変形増大率であり, 次式で定義する。

$$f\mu_i = \delta_{imax} / \delta_p$$

ここに δ_p は, 第1折れ点で, 静的弾塑性解析における層せん断力-層間変形関係において, 当該層所属部材のいずれかが全塑性モーメントに達した時点とする

表 3.4-3 各地震動ケースの最大応答値(部材レベル)

2011 年度 3 連動平均波 (部材レベル)

モデル	入力地震波	梁部材の最大応答値		履歴型ダンパーの最大応答値	
		塑性率	累積塑性 変形倍率	塑性率	累積塑性 変形倍率
S80m 級 耐震モデル	津島(2011)平均	1.96	2.48	—	—
	浜松(2011)平均	2.56	9.78	—	—
S80m 級 制振モデル	津島(2011)平均	弾性	0.00	7.59	156.4
	浜松(2011)平均	弾性	0.00	8.95	254.6

2011 年度 3 連動平均+ σ 波 (部材レベル)

モデル	入力地震波	梁部材の最大応答値		履歴型ダンパーの最大応答値	
		塑性率	累積塑性 変形倍率	塑性率	累積塑性 変形倍率
S80m 級 耐震モデル	津島(2011)平均+ σ	2.69	12.17	—	—
	浜松(2011)平均+ σ	3.69	35.61	—	—
S80m 級 制振モデル	津島(2011)平均+ σ	弾性	0.00	11.40	379.6
	浜松(2011)平均+ σ	2.37	7.90	14.45	672.0

2012 年度 4 連動地震波 (部材レベル)

モデル	入力地震波	梁部材の最大応答値		履歴型ダンパーの最大応答値	
		塑性率	累積塑性 変形倍率	塑性率	累積塑性 変形倍率
S80m 級 耐震モデル	津島(2012)	5.47	66.57	—	—
	浜松(2012)	3.05	19.53	—	—
S80m 級 制振モデル	津島(2012)	2.53	12.43	17.41	747.4
	浜松(2012)	弾性	0.00	10.69	319.5

各層の最大応答値の高さ方向の分布を以下に示す。

- △— 浜松(2011)平均
- ▲— 浜松(2011)平均+ σ
- 浜松(2012)

- 津島(2011)平均
- 津島(2011)平均+ σ
- 津島(2012)

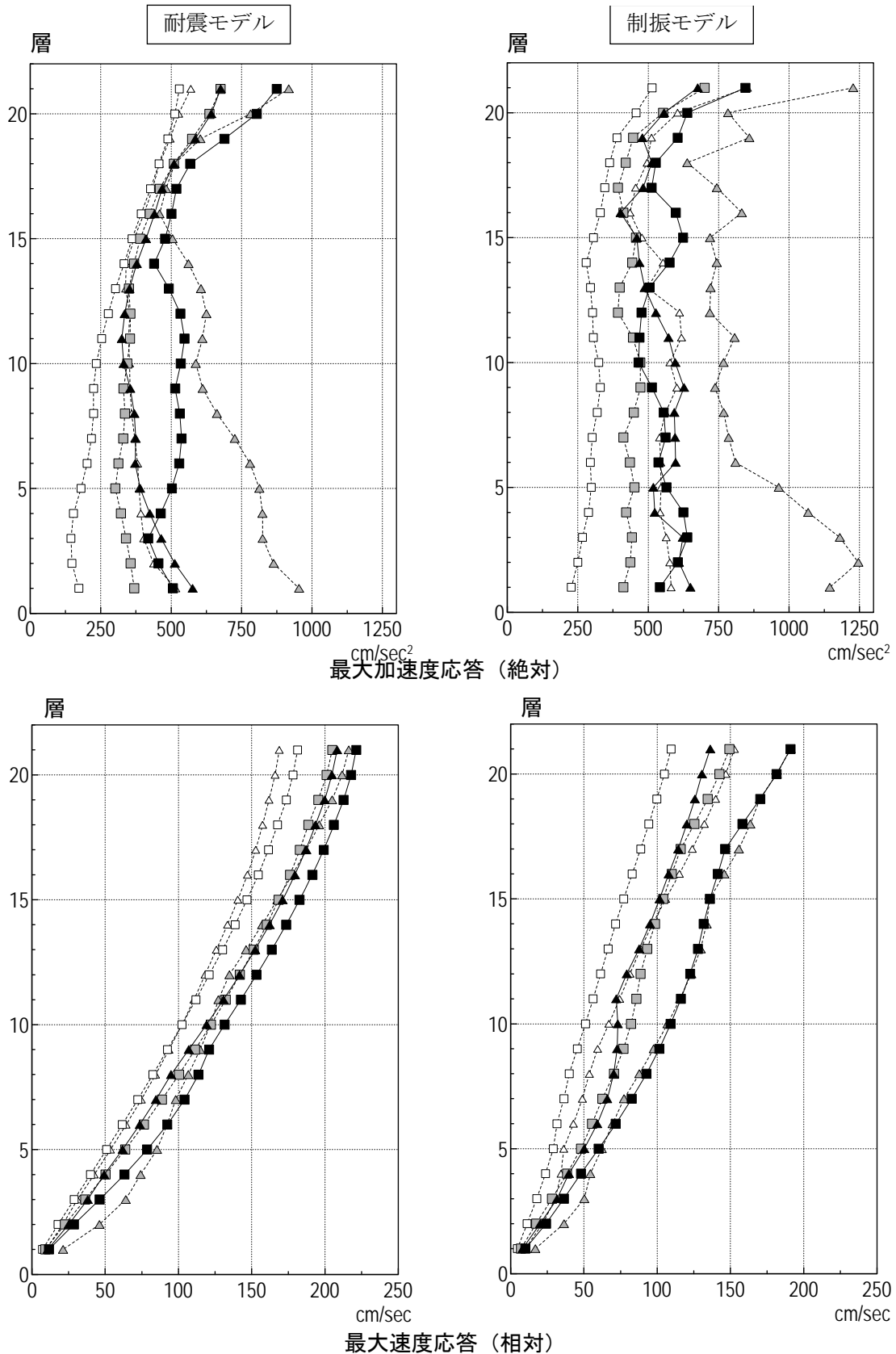
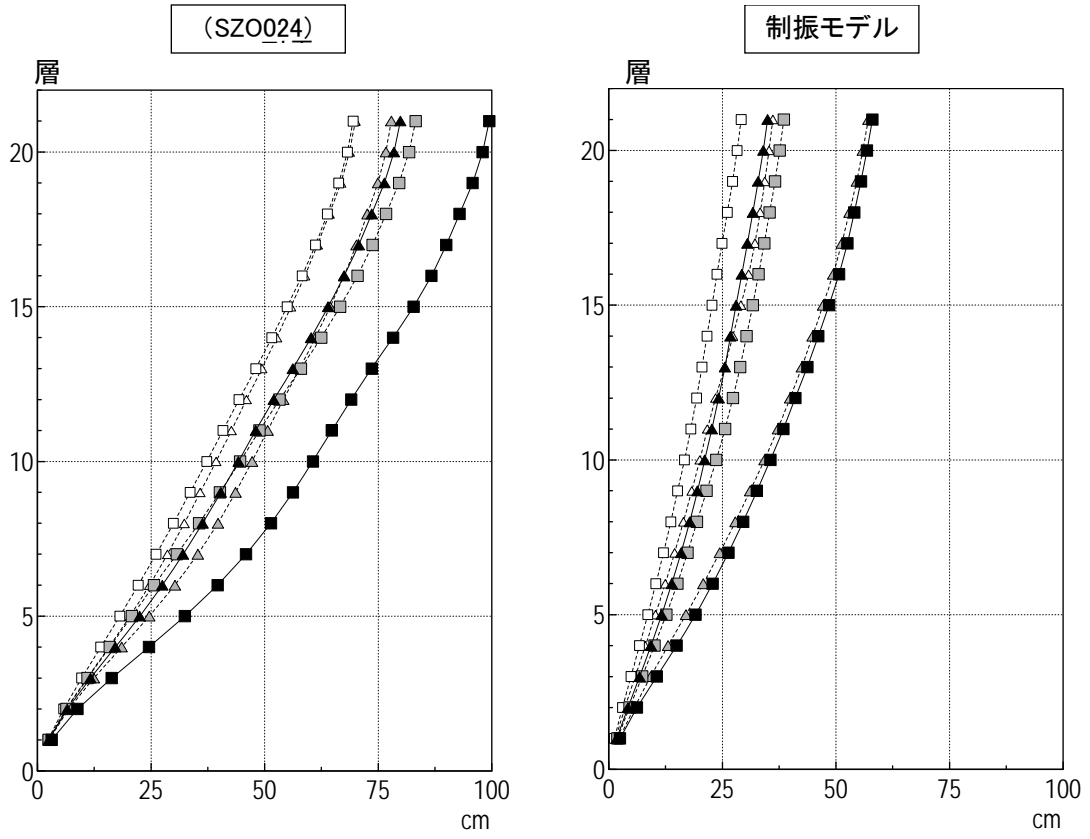


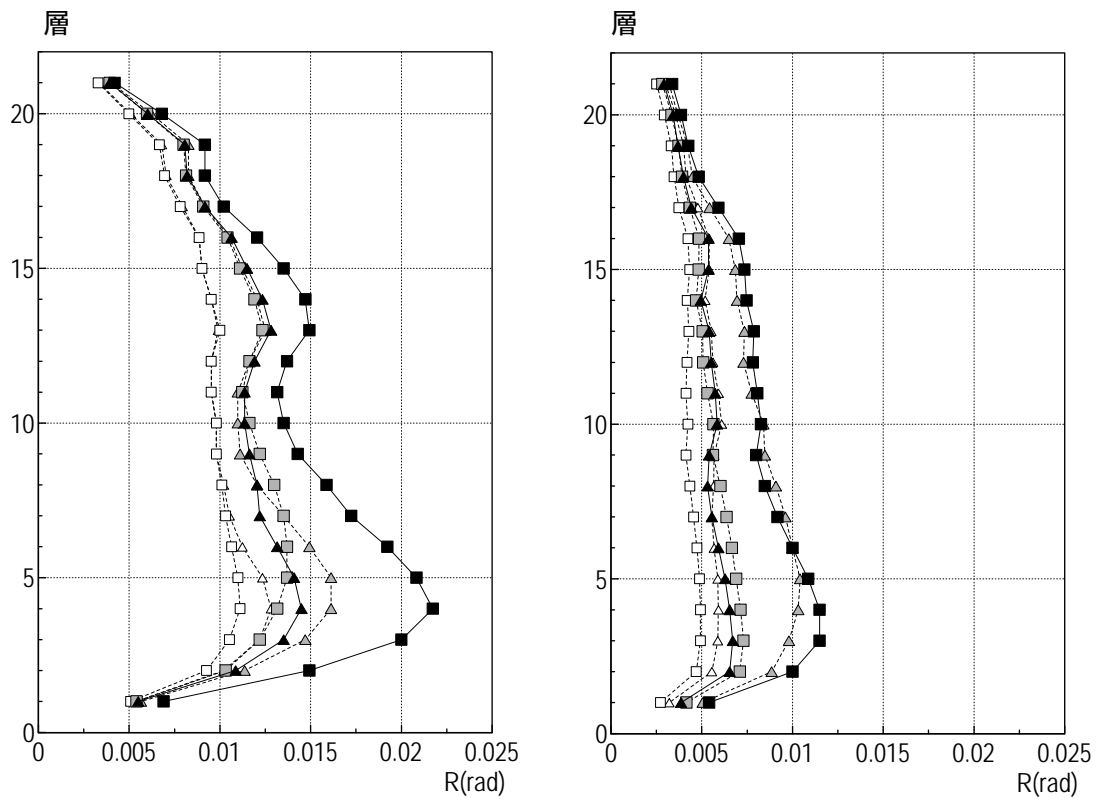
図 3. 4-4 S80m 級モデル建物の最大応答値(1)

△ 浜松(2011)平均
 ▲ 浜松(2011)平均+ σ
 ▲ 浜松(2012)

□ 津島(2011)平均
 ■ 津島(2011)平均+ σ
 ■ 津島(2012)



最大変形 (相対)

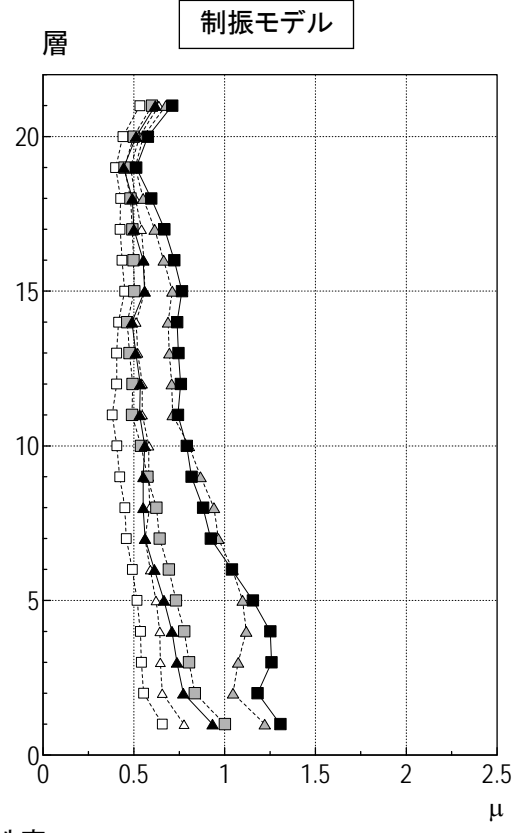
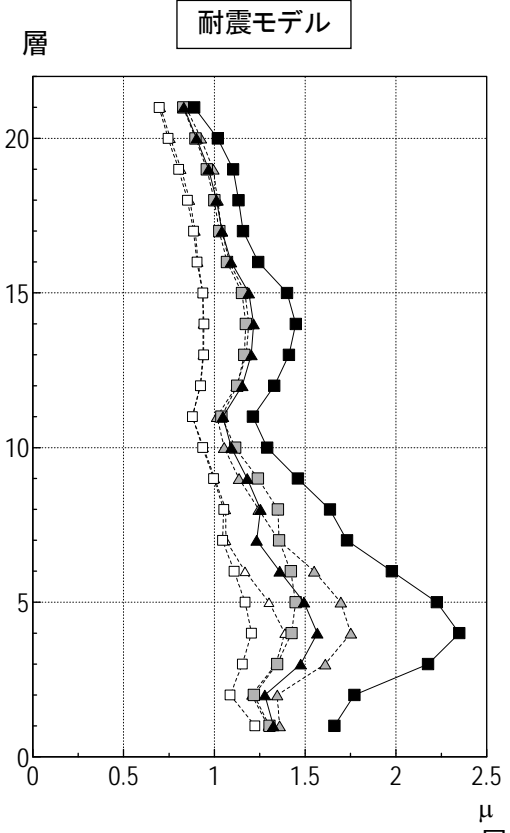


最大層間変形角

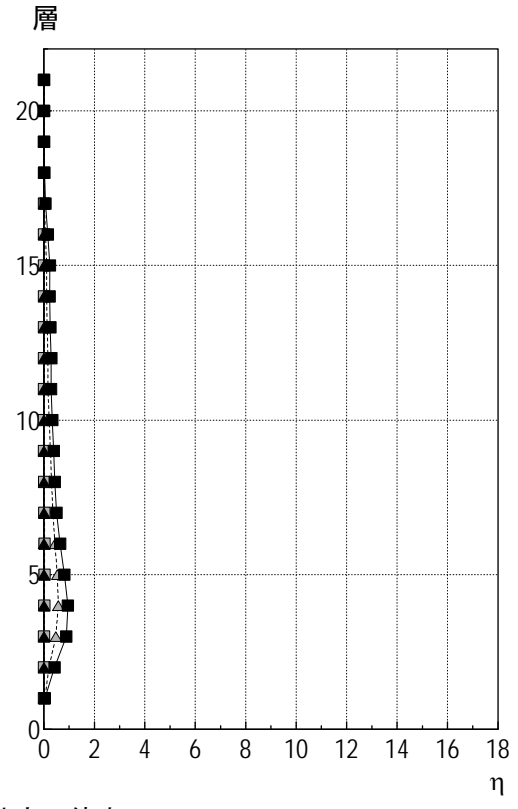
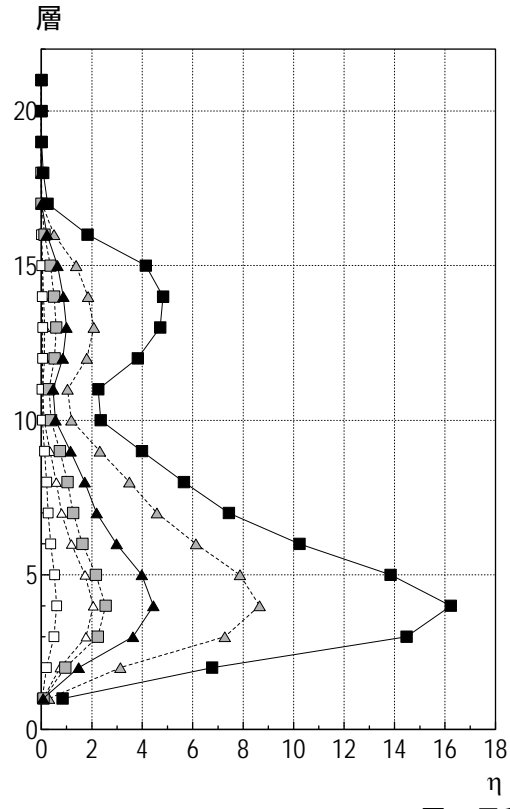
図 3. 4-5 S80m 級モデル建物の最大応答値 (2)

- △ 浜松(2011)平均
- ▲ 浜松(2011)平均+ σ
- ▲ 浜松(2012)

- 津島(2011)平均
- 津島(2011)平均+ σ
- 津島(2012)



層の塑性率



層の累積塑性変形倍率

図 3.4-6 S80m 級モデル建物の最大応答値 (3)

各層に所属する梁部材の最大応答値を高さ方向分布で以下に示す。

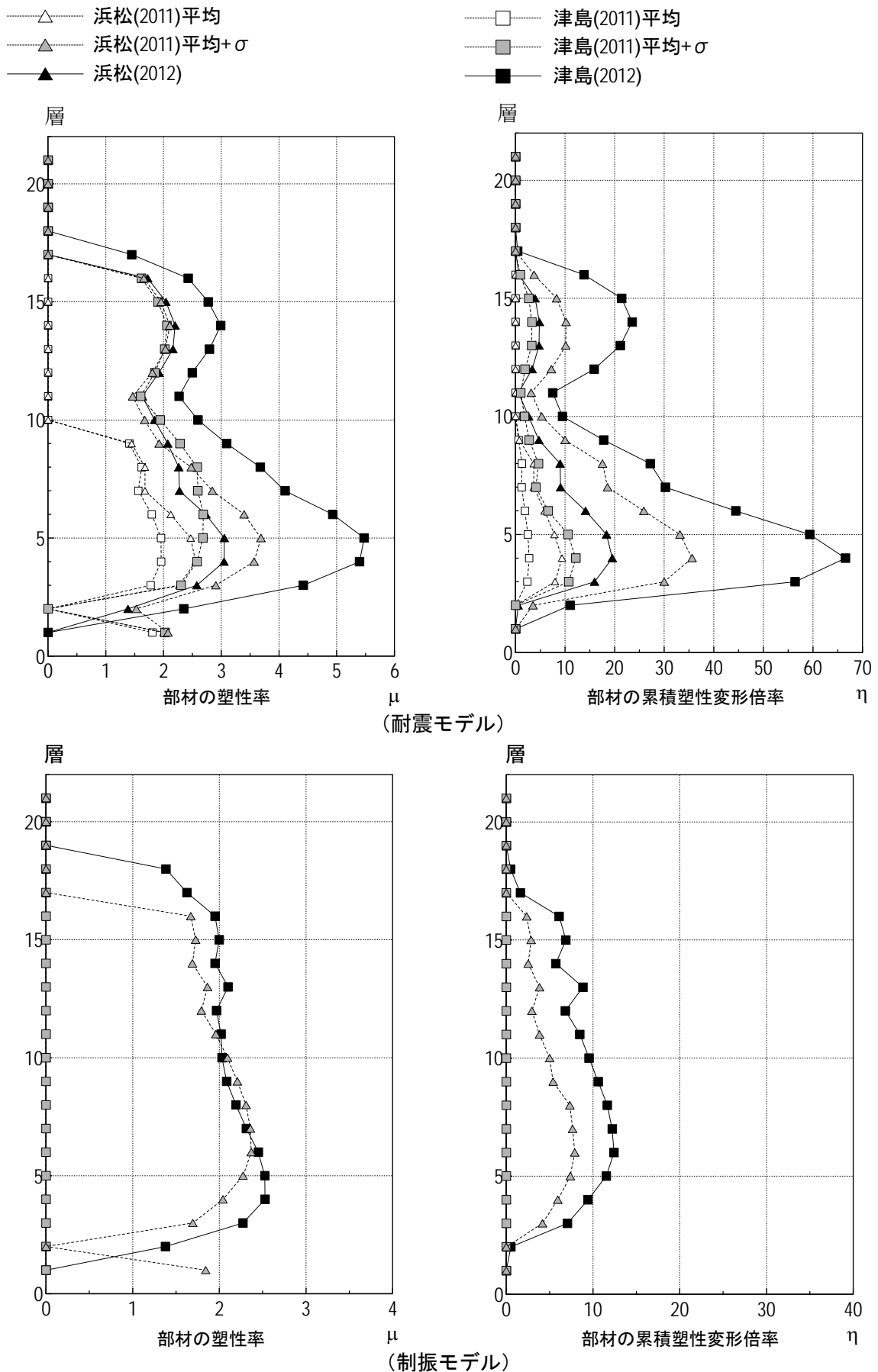
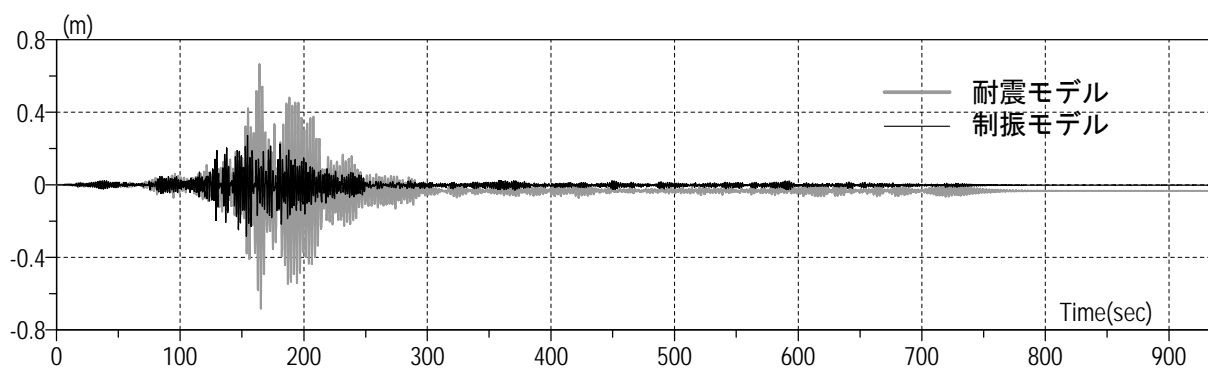
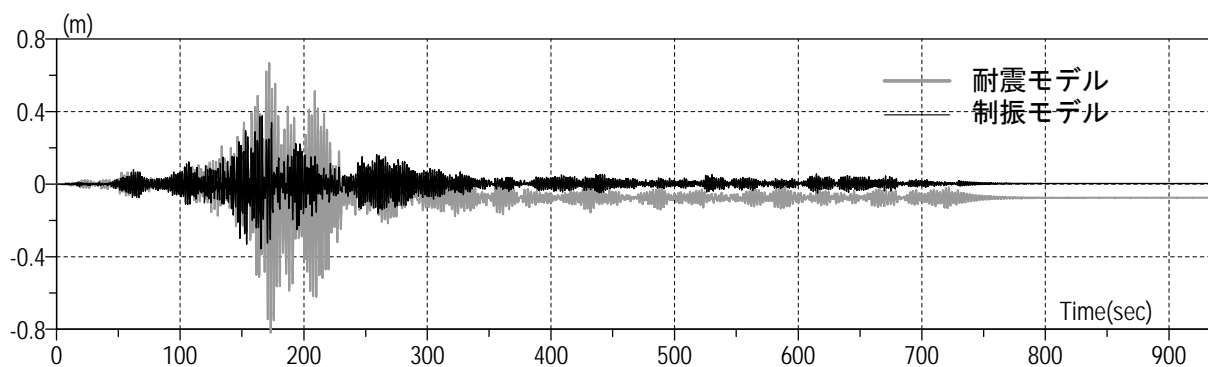


図 3. 4-7 S80m 級モデル建物の最大応答値(4)

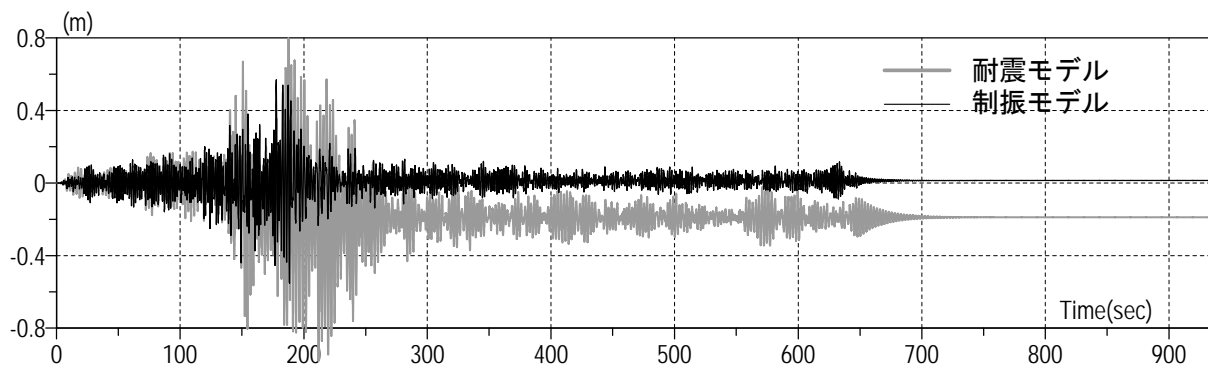
頂部変位の時刻歴を以下に示す。



津島(2011)平均波 入力時の頂部変位の時刻歴波形

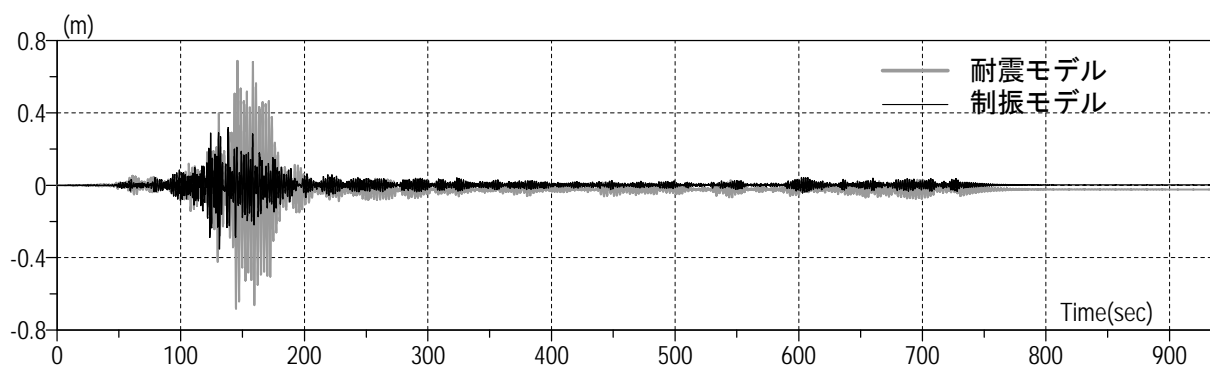


津島(2011)平均+σ波 入力時の頂部変位の時刻歴波形

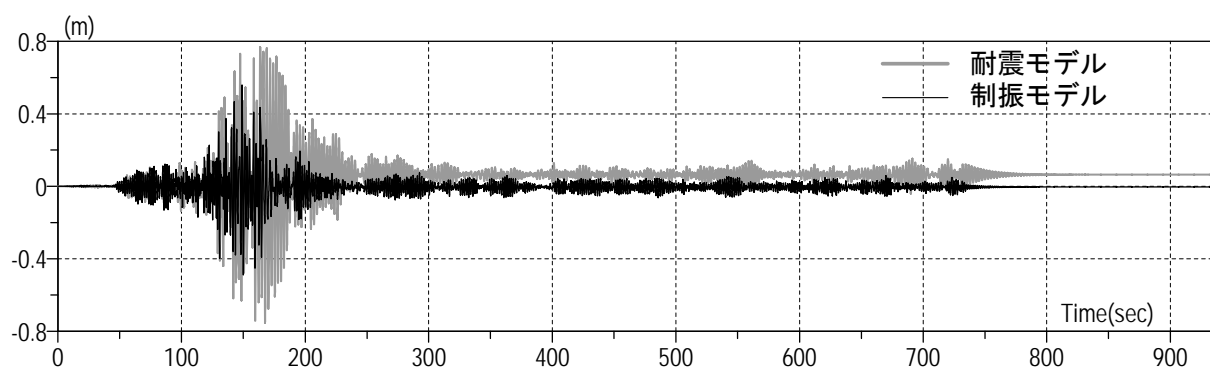


津島(2012) 入力時の頂部変位の時刻歴波形

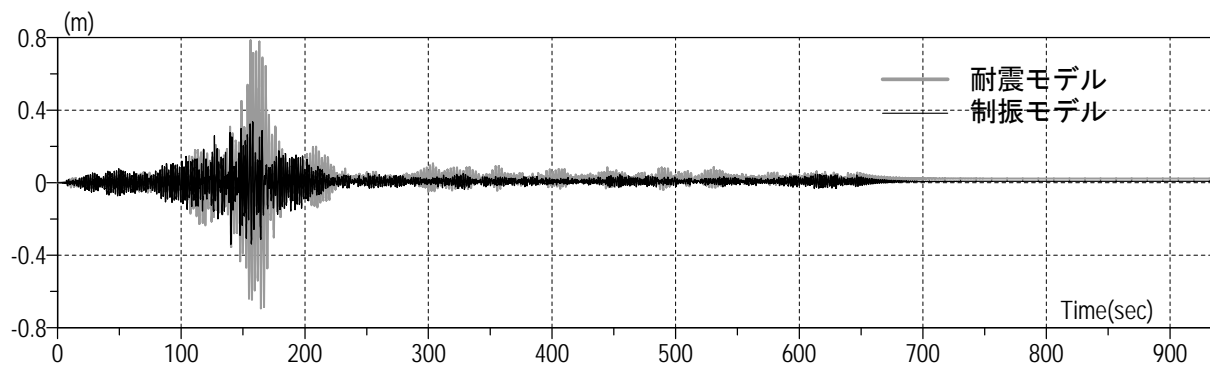
図 3. 4-8 S80m 級モデル建物の頂部応答変位波形値(1) (津島波形入力)



浜松(2011)平均波 入力時の頂部変位の時刻歴波形



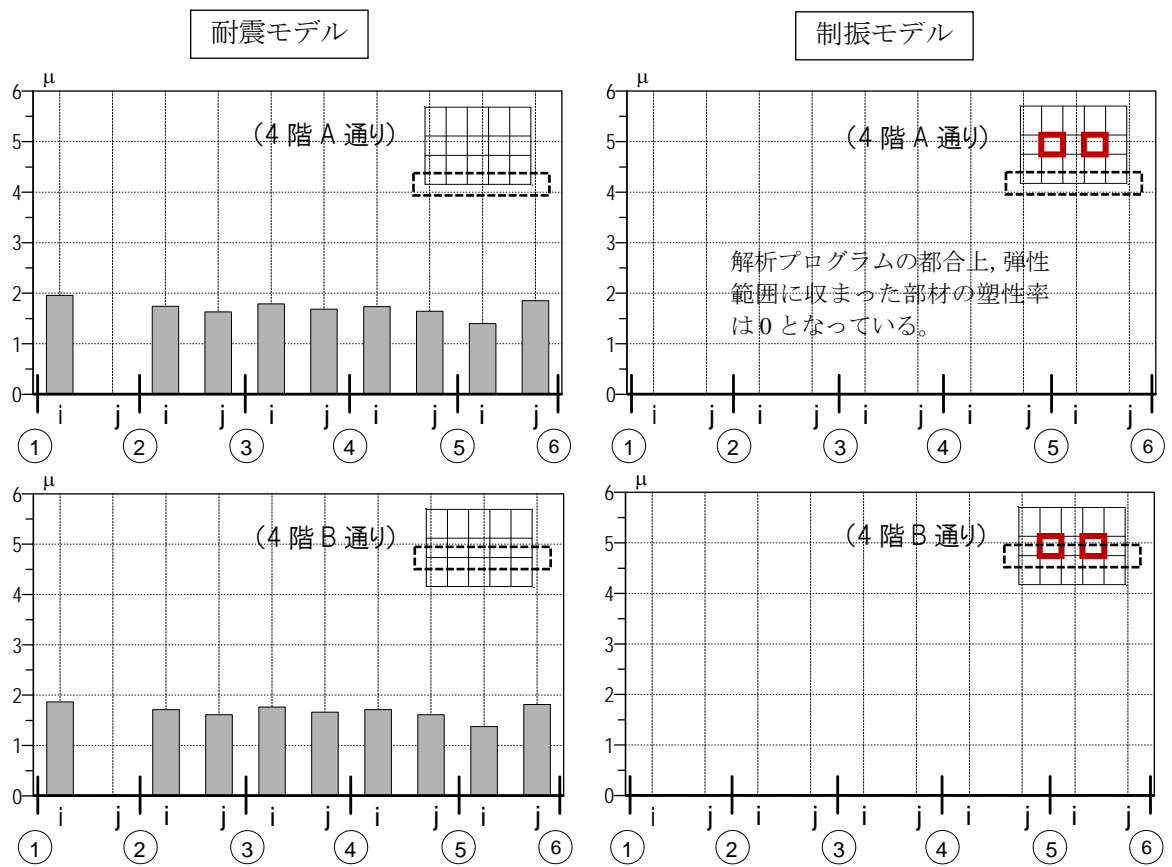
浜松(2011)平均+ σ 波 入力時の頂部変位の時刻歴波形



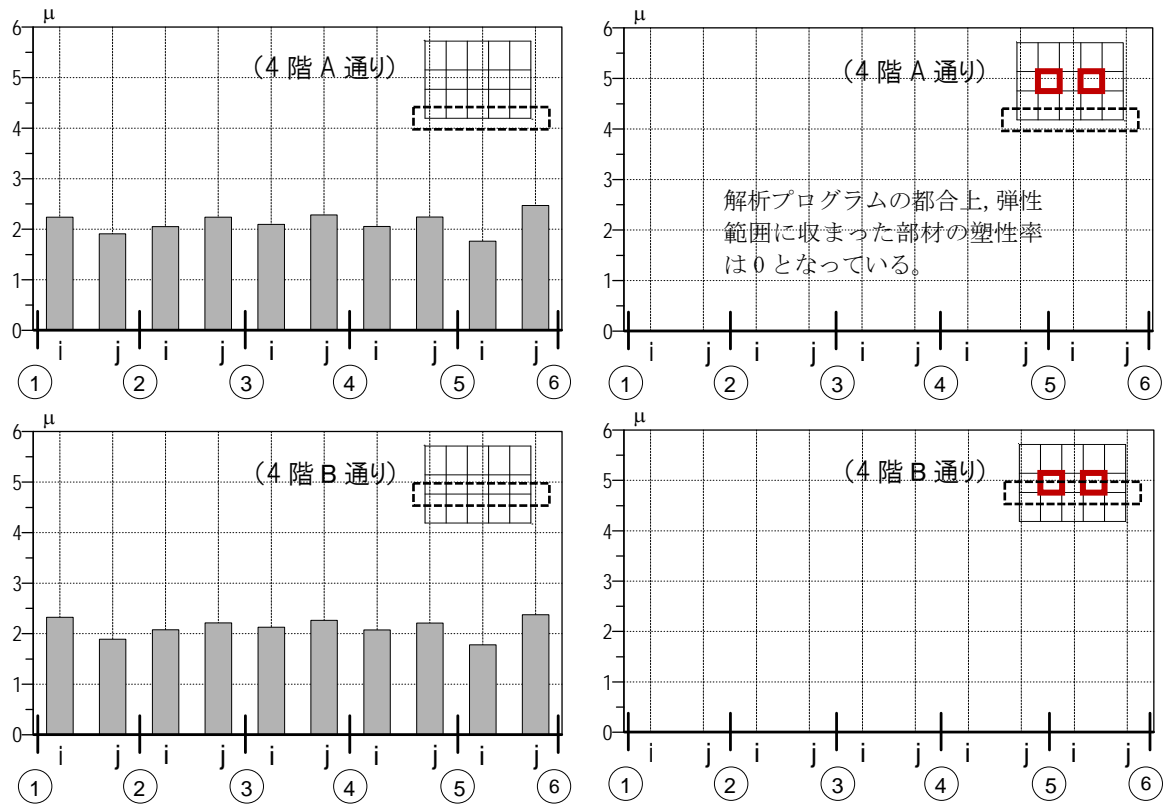
浜松(2012) 入力時の頂部変位の時刻歴波形

図 3. 4-9 S80m 級モデル建物の頂部応答変位波形値(2) (浜松波形入力)

梁部材の損傷評価（第4層）を以下に示す。なお、解析プログラムの都合上、弾性範囲に収まった部材の塑性率は0となっている。



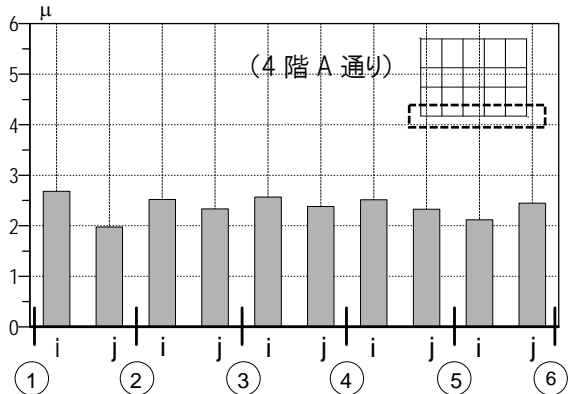
津島(2011)平均波 での梁端の塑性率



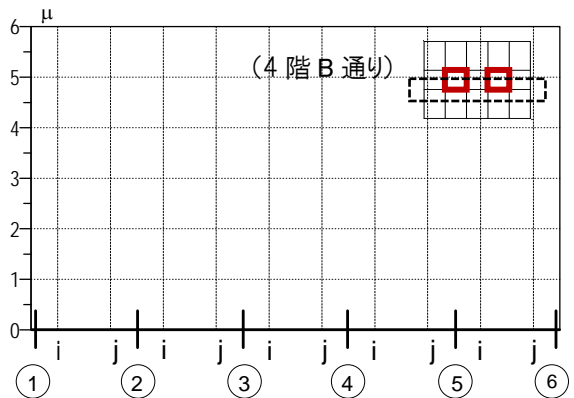
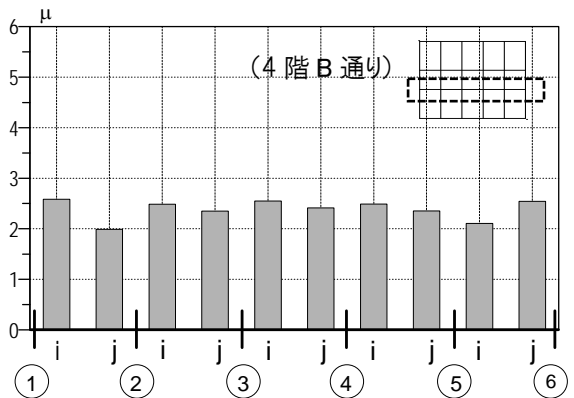
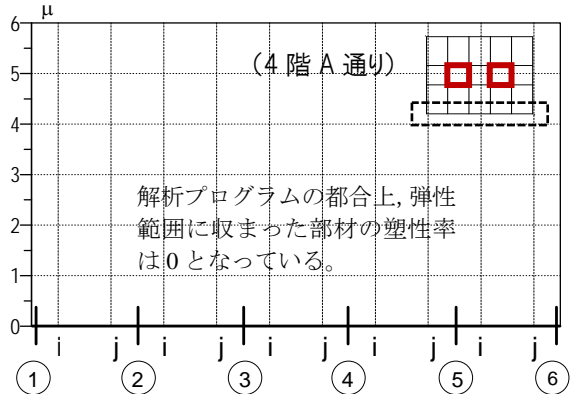
浜松(2011)平均波 での梁端の塑性率

図 3.4-10 梁端の塑性率(1) (3連動平均)

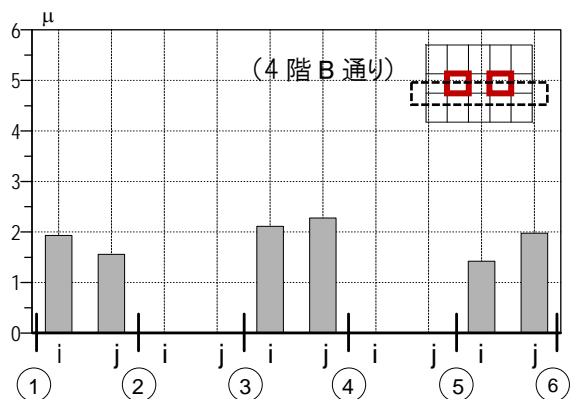
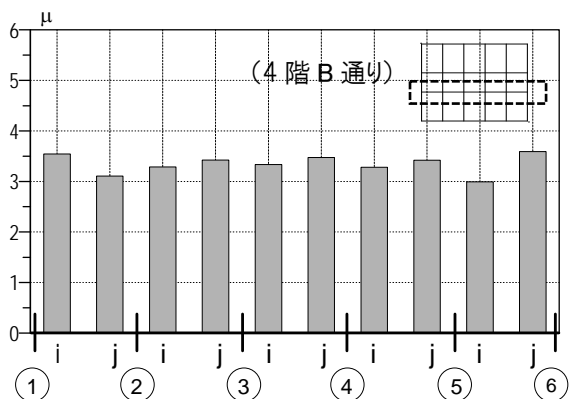
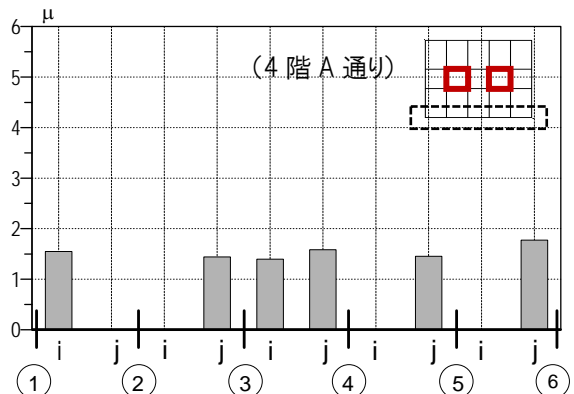
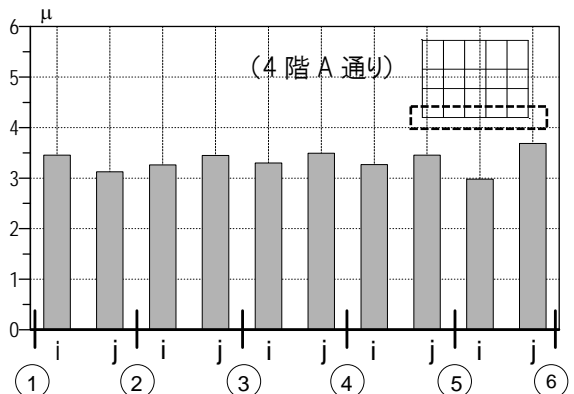
耐震モデル



制振モデル

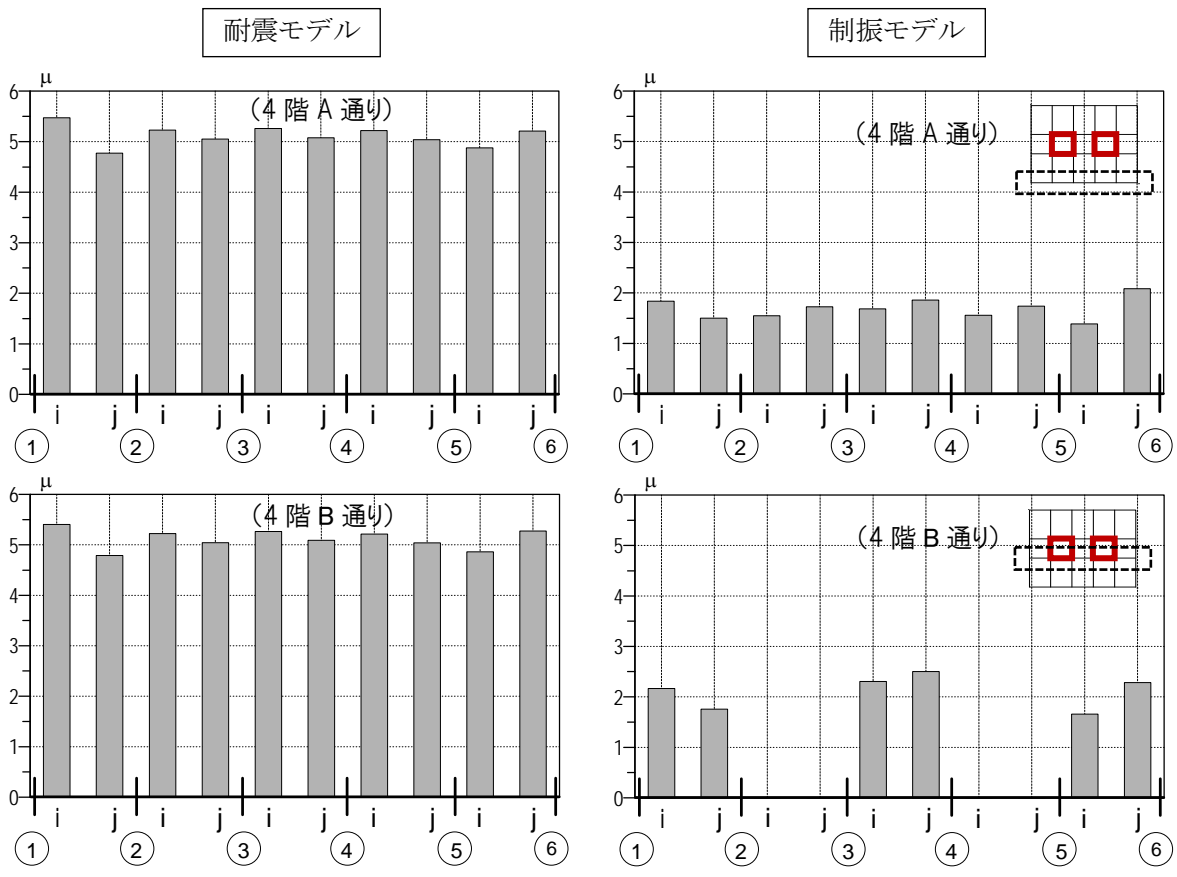


津島(2011)平均+σ波 での梁端の塑性率

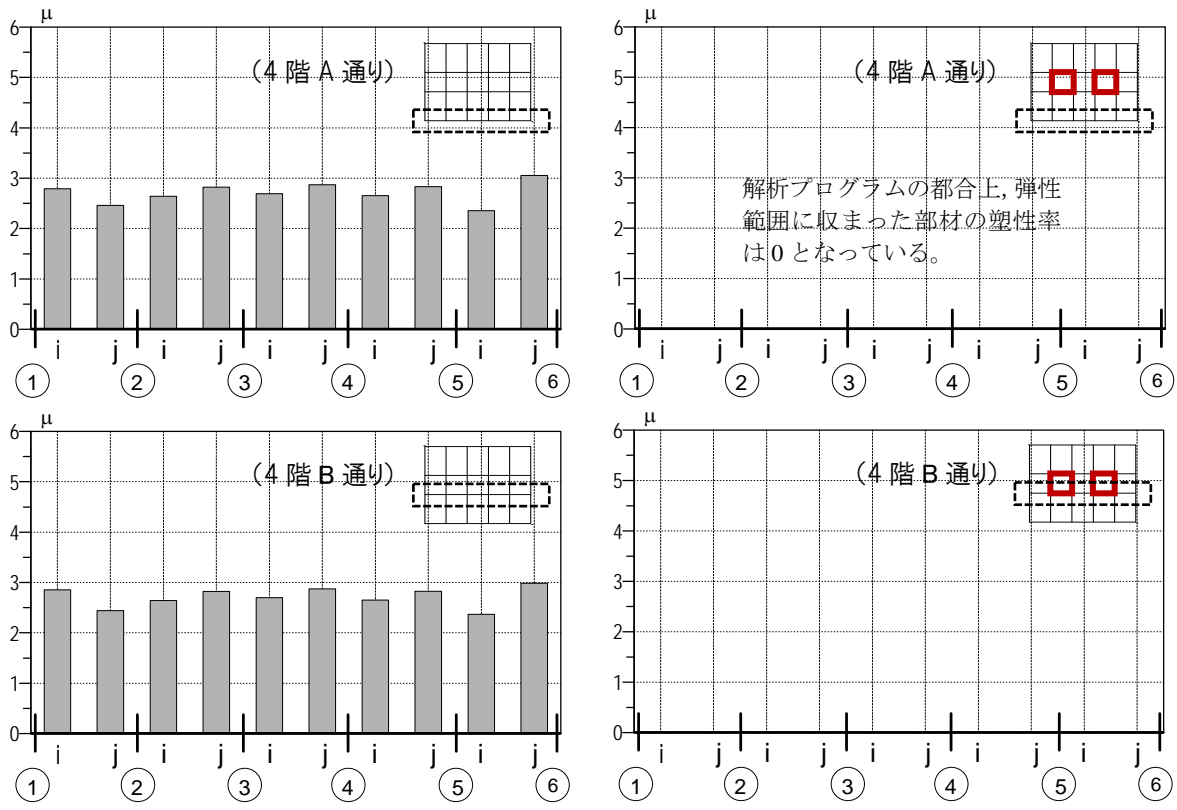


浜松(2011)平均+σ波 での梁端の塑性率

図 3.4-11 梁端の塑性率 (2)



津島(2012) での梁端の塑性率



浜松(2012) での梁端の塑性率

図 3.4-12 梁端の塑性率(3)

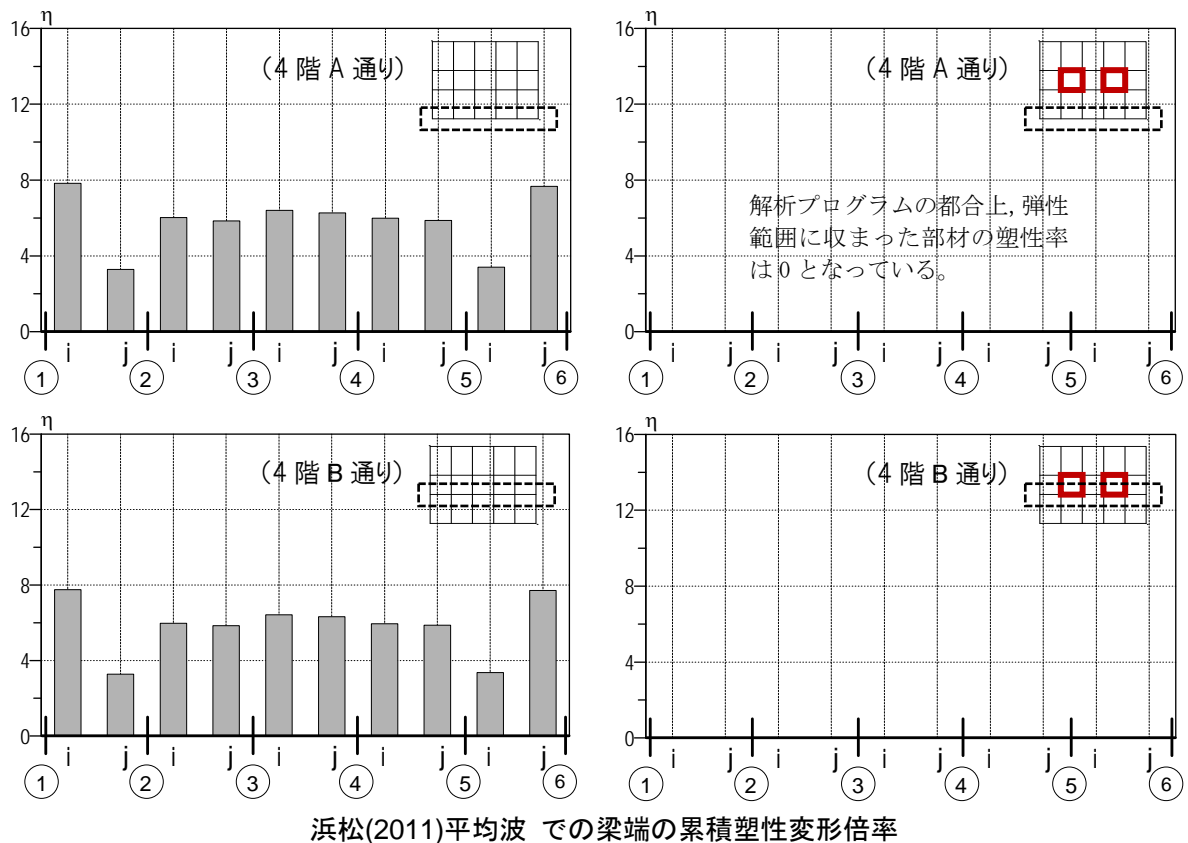
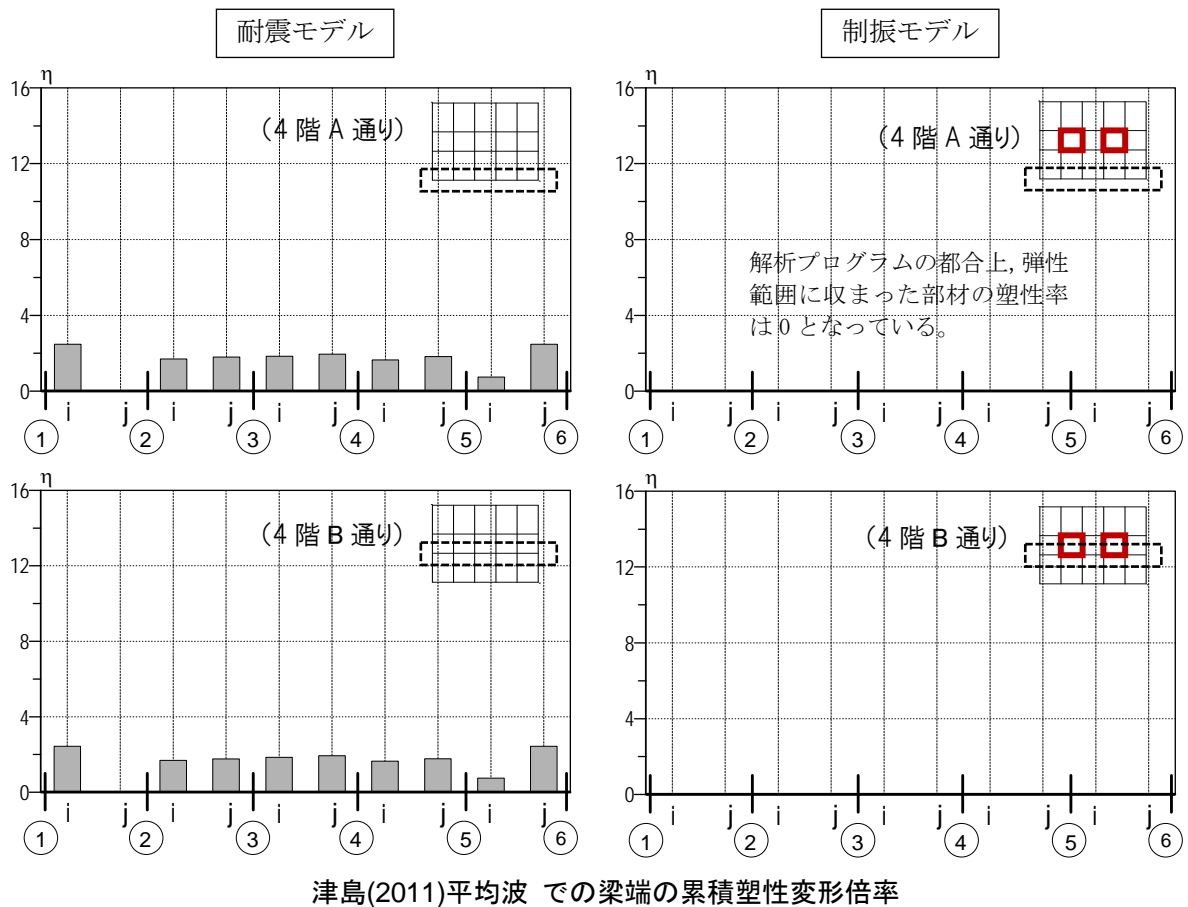


図 3.4-13 梁端の累積塑性変形倍率(1)

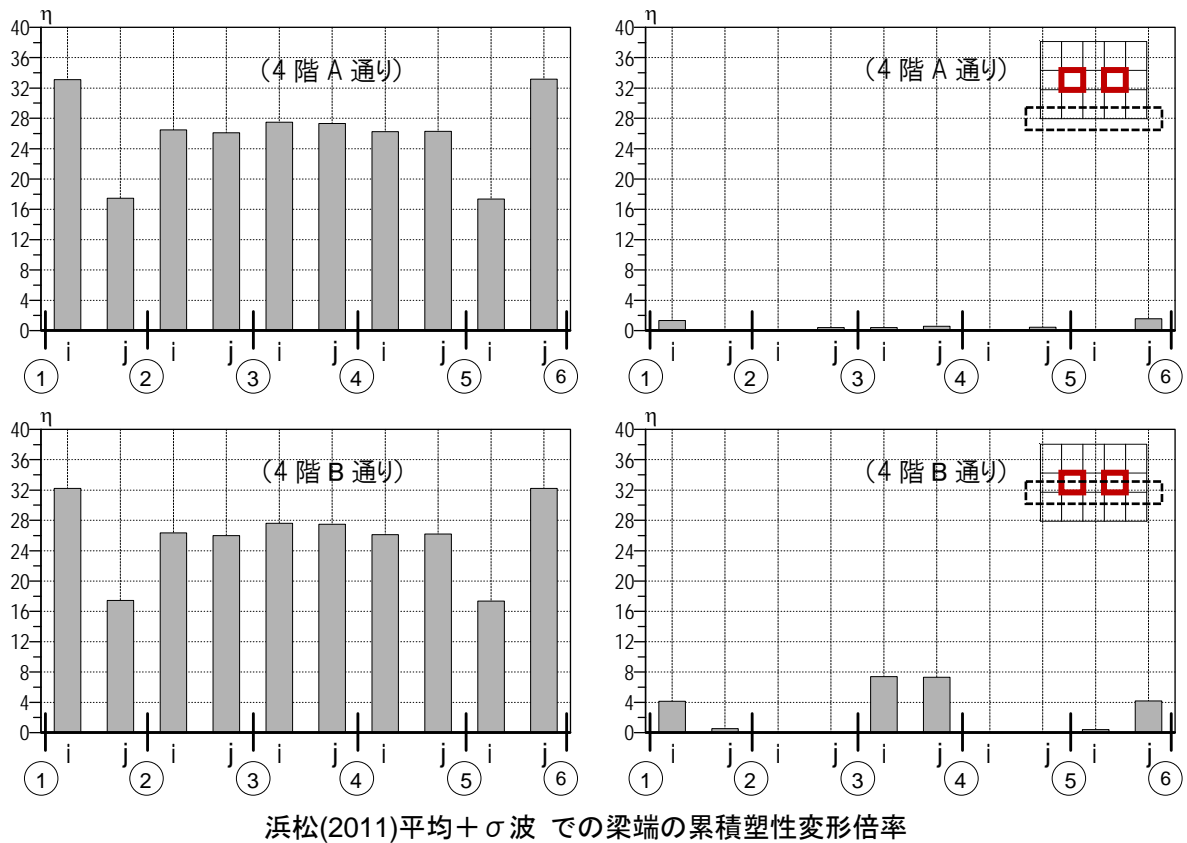
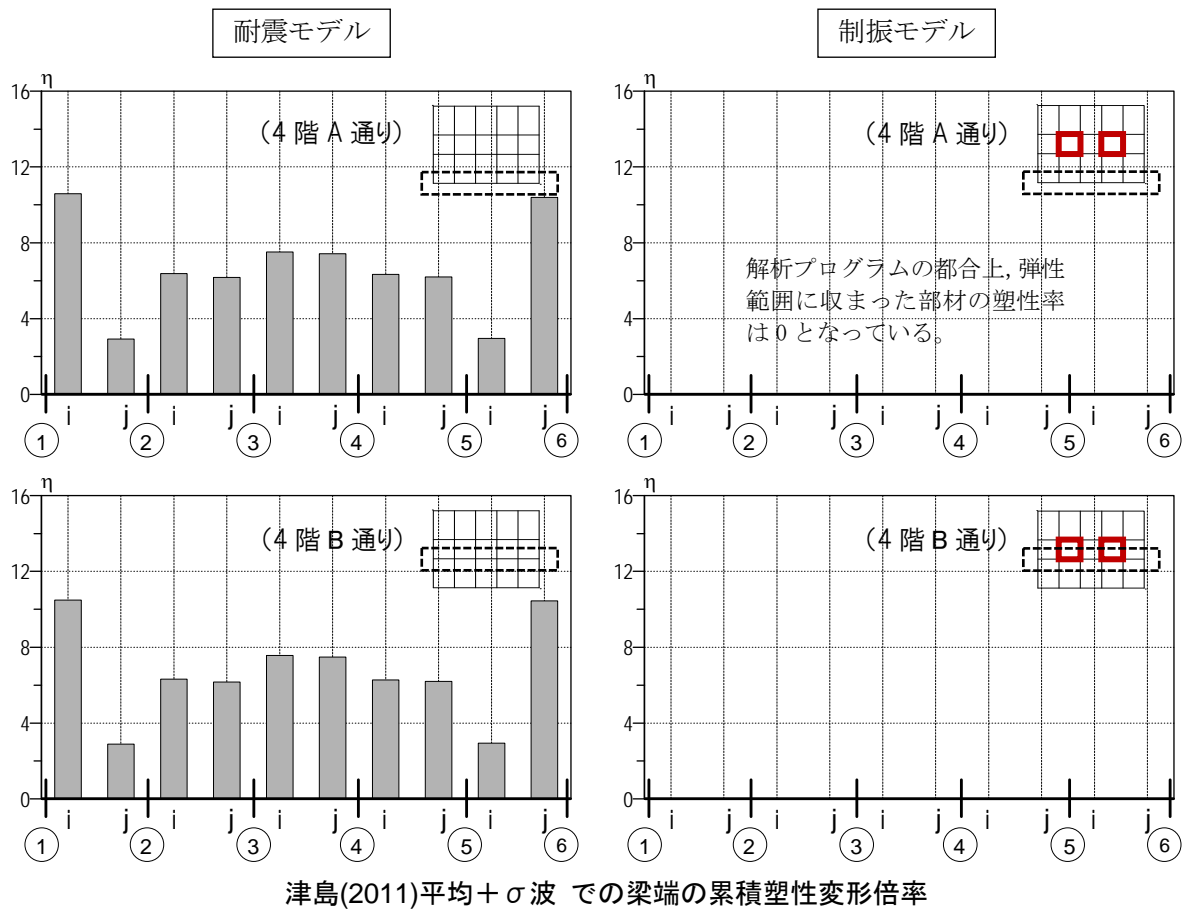


図 3. 4-14 梁端の累積塑性変形倍率 (2)

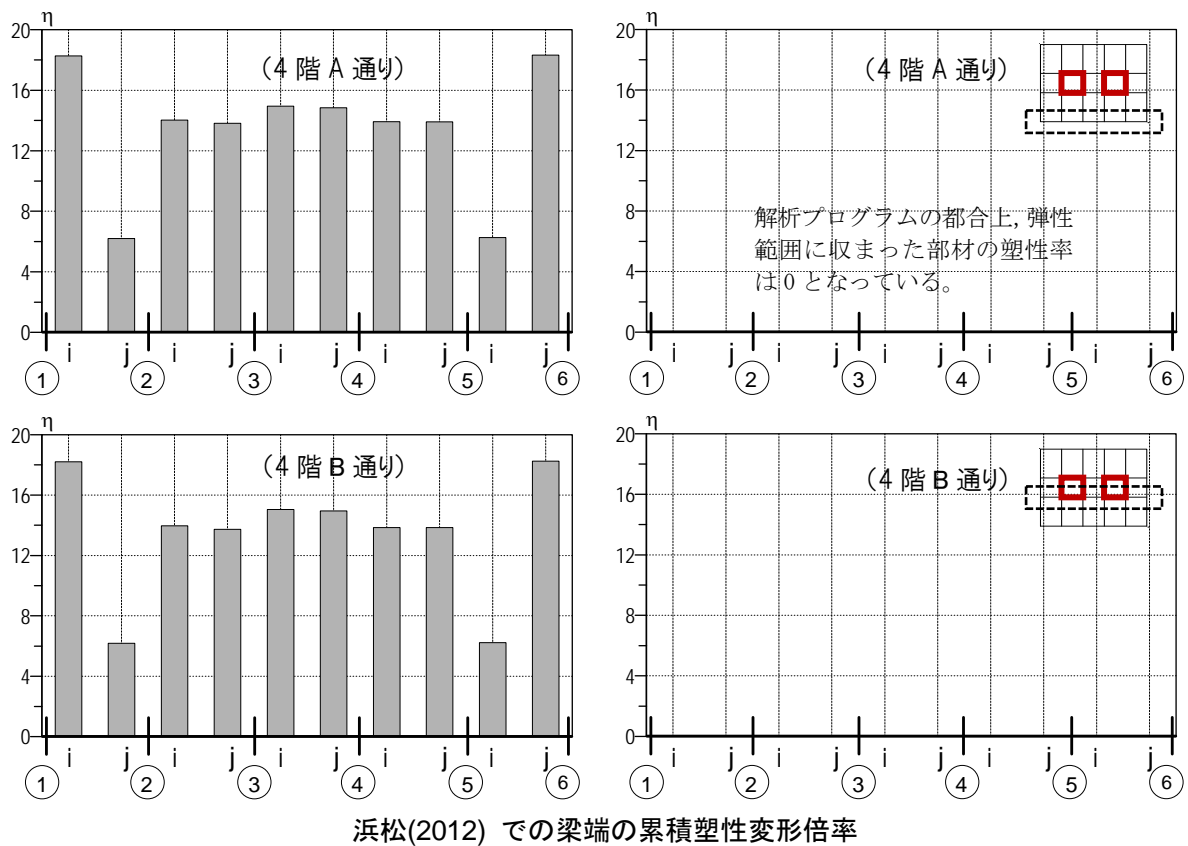
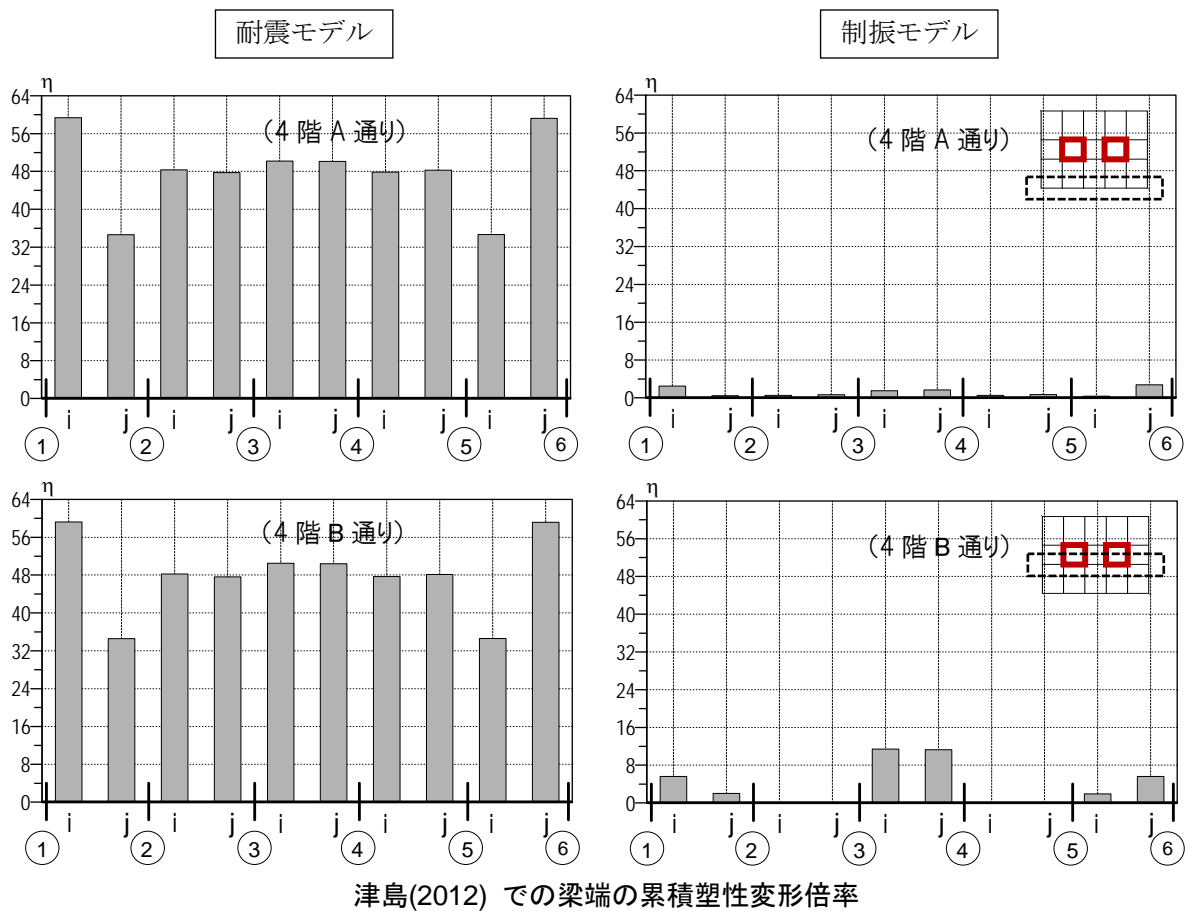


図 3. 4-15 梁端の累積塑性変形倍率 (3)

履歴型ダンパーの最大塑性率と最大累積塑性変形倍率を高さ方向分布で示す。

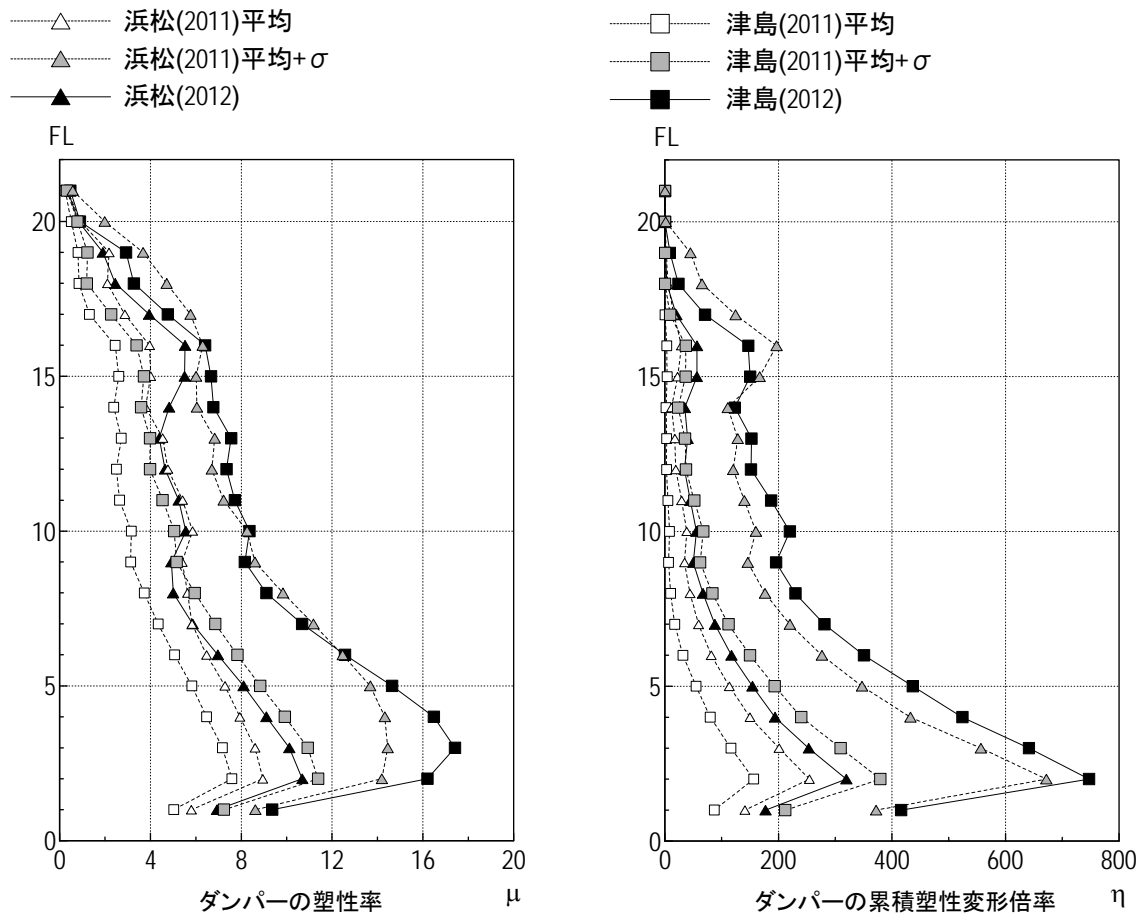


図 3.4-16 履歴型制振ダンパーの損傷評価

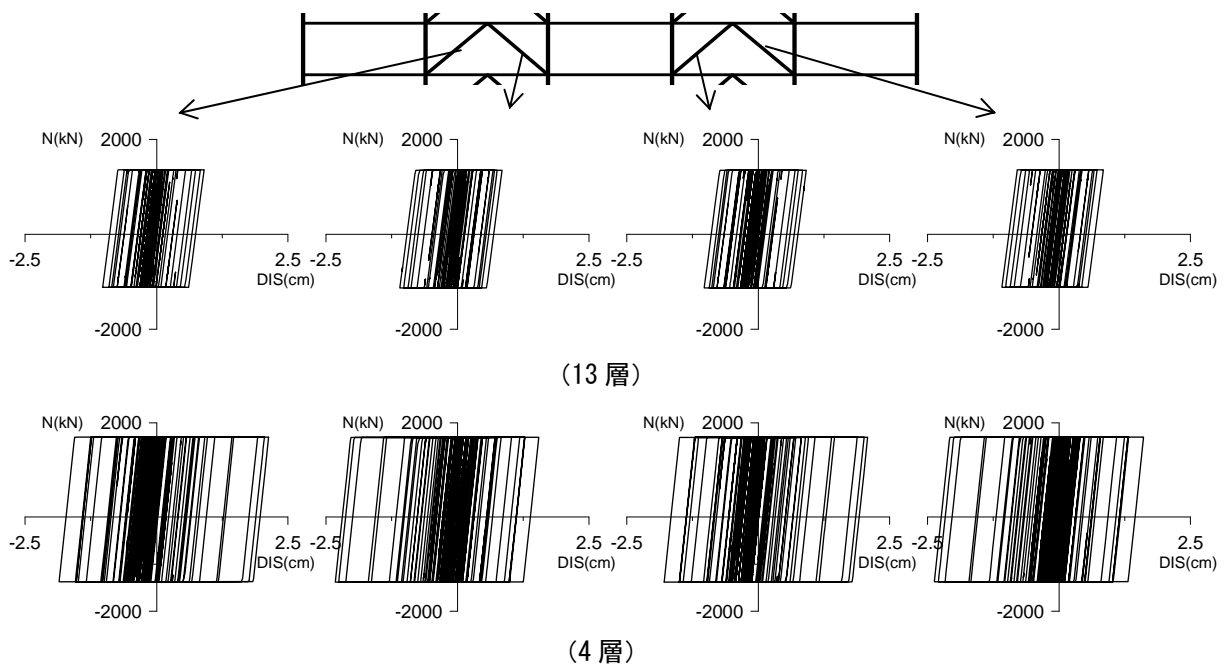


図 3.4-17 津島(2012) 入力時の履歴型ダンパーの履歴曲線

梁部材と履歴型ダンパーに対し、塑性率と累積塑性変形倍率の関係を示す。

図から、梁部材や履歴型制ダンパーの塑性率、累積塑性変形倍率に相関性がみられる。

- △— 浜松(2011)平均
- △— 浜松(2011)平均+ σ
- ▲— 浜松(2012)
- 津島(2011)平均
- 津島(2011)平均+ σ
- 津島(2012)

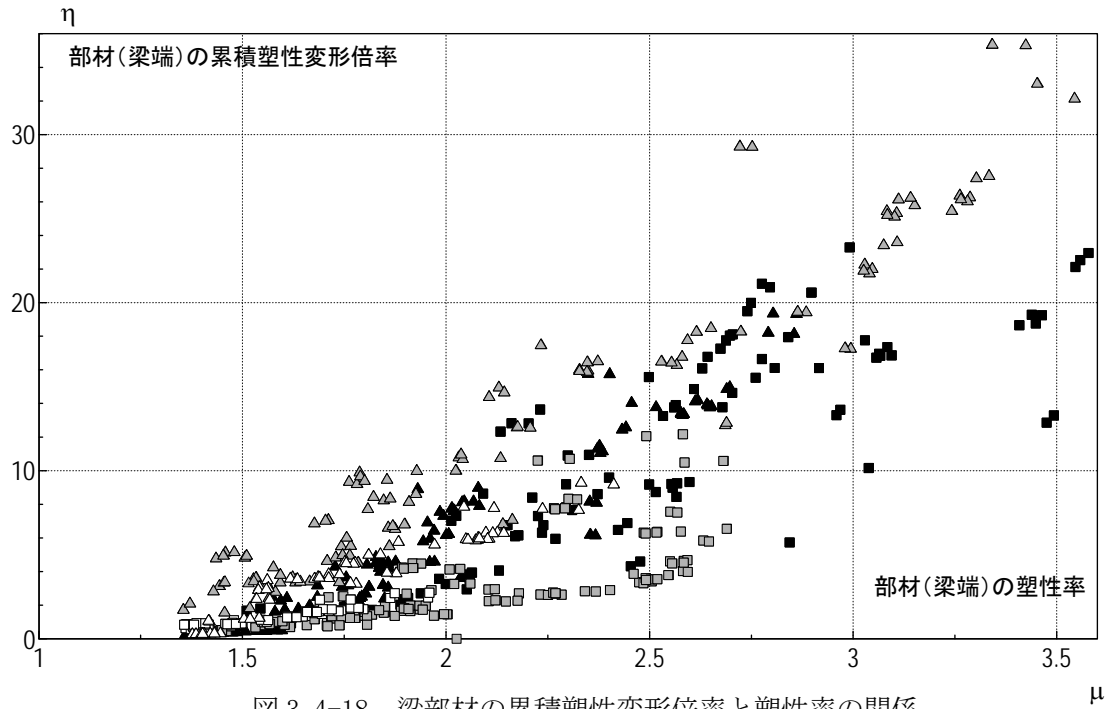


図 3. 4-18 梁部材の累積塑性変形倍率と塑性率の関係

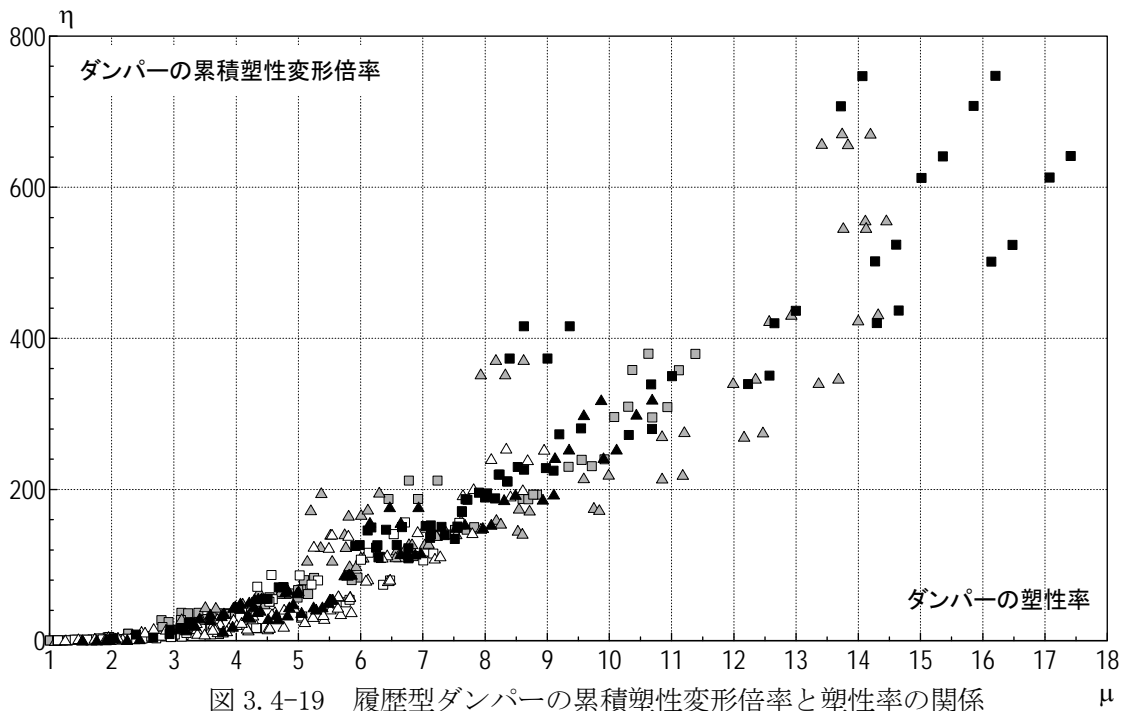


図 3. 4-19 履歴型ダンパーの累積塑性変形倍率と塑性率の関係

層塑性率と梁部材の最大塑性率の関係と、層と梁部材の累積塑性変形倍率の関係を示す。
 図から、層塑性率と梁部材の塑性率に相関関係を見られ、層の累積塑性変形倍と梁部材の累積塑性変形倍率は、さらに高い相関関係を示していることが分かった。

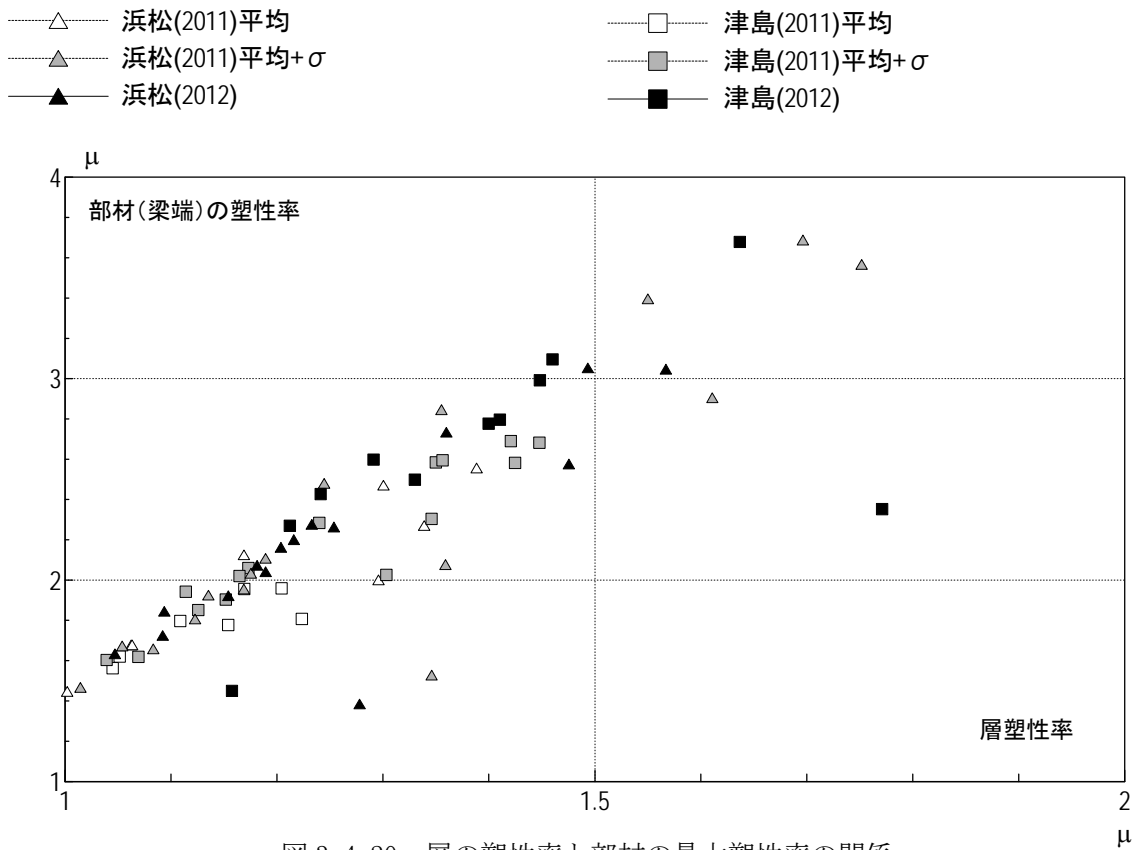


図 3. 4-20 層の塑性率と部材の最大塑性率の関係

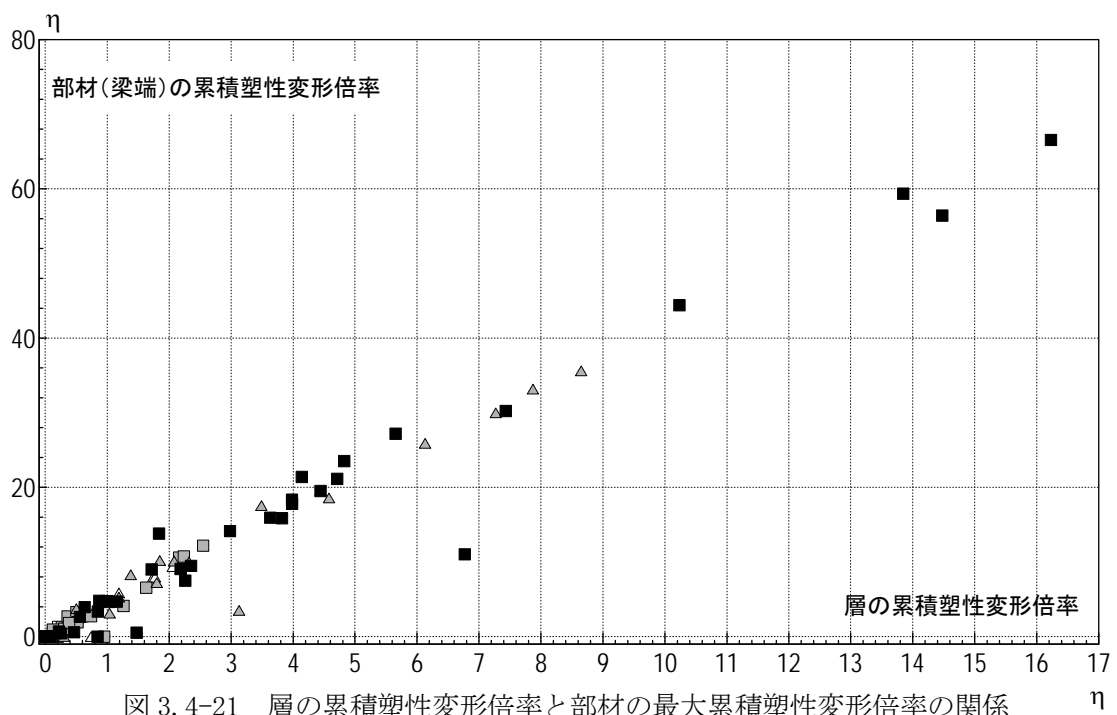


図 3. 4-21 層の累積塑性変形倍率と部材の最大累積塑性変形倍率の関係

3-4-5 まとめ

S造80m級の耐震・制振モデルを用いて、浜松、津島地点における三連動地震と四連動地震に対する予測波を用いた応答解析を行った。得られた結果を以下に要約する。

(1) 耐震モデルの応答結果を用いた、三連動地震 ($M_w=8.7$) と四連動 ($M_w=9.0$) の比較

・津島地点

四連動地震の予測波に対する応答結果が三連動地震の平均+ σ 波の応答結果を上回り、最も大きくなった。四連動地震での最大層間変形角は $R=1/50$ を上回り、三連動地震の平均+ σ 波に比べ、1.3倍程度大きくなっている。また、梁部材の最大累積塑性変形倍率は、四連動地震で $\epsilon\eta=60$ を超え、三連動地震の平均+ σ 波の約6倍程度に増大していた。したがって、津島地点においては、四連動地震が最も大きく、三連動地震の平均+ σ 波と比べても累積値の評価が非常に厳しくなるといえる。

・浜松地点

四連動地震の予測波に対する応答結果は、三連動地震の平均+ σ 波と比べると小さい結果となった。四連動地震での最大層間変形角は $R=1/70$ を上回ったが、三連動地震の平均+ σ 波に比べると小さくなっている。また、梁部材の最大累積塑性変形倍率も、四連動地震で $\epsilon\eta$ =約20に達したが、三連動地震の平均+ σ 波に対して60%程度の大きさであった。ただし、三連動地震の平均波に対しては、層間変形で約10%大きく、部材の累積塑性変形倍率では約2倍大きくなっている。

(2) 層応答と部材応答の関係

層の塑性率と、該当層に所属する梁部材の最大塑性率の関係に相関がみられ、部材の最大塑性率は、層の塑性率の2倍程度の値となった。

層の累積塑性変形倍率と該当層に所属する梁部材の最大累積塑性変形倍率の関係は、明確な相関関係を示し、部材の最大累積塑性変形倍率が、層の累積塑性変形倍率の約4前後の値をとることが分かった。

(3) 制振モデルによる制振効果の評価

耐震モデルで最大層間変形角が $R=1/46$ となった津島四連動波に対して、制振モデルは $R=1/87$ となり、履歴型ダンパーによる応答低減効果が確認できた。

梁部材の累積塑性変形倍率に着目すると、制振モデルでは浜松の三連動平均+ σ 波と、津島の四連動地震を除いて、全部材が弾性範囲に収まっていた。主架構が塑性化した上記の2ケースにおいても、耐震モデルと比較すれば、最大で80%程度の低減が見られ、大幅な損傷低減効果が確認できた。

第4章 免震建築物の地震応答計算

4-1 検討用入力地震動

検討に用いた地震動は内閣府（2012）の南海トラフ沿いの巨大地震の断層モデル(Mw9.0)に基づき設定された4連動6セグメント震源モデル（日向灘域、南海域、東海域、駿河湾域）を用い、改良経験式により作成された長周期地震動（平均波）である。この地震動は9地点で試作されているが、昨年度と同様に、大阪市此花、愛知県津島市、東京都新宿、静岡県浜松市の4地点の地震動を用いて検討を行った。地震動の作成においては、乱数の異なる21波から1波選定しているが、選定方法として、擬似速度応答スペクトルの対数平均値と21波の速度波形のうち最大速度が中央値の位相スペクトルを用いて再作成した地震動（三の丸波作成手法）を用いた。表4.1-1に地震動の諸元を示す。図4.1-1に速度応答スペクトルを、図4.1.2にエネルギースペクトルを、昨年度の採用波とともに示す。2011年までは回帰式作成上のばらつきを考慮し、平均波（AV波）と平均+標準偏差波（SD波）があったが、2012年度は平均波しか作成されていない。ここにおいて、赤の破線は2012年度の波、青の実線が2011年度のSD波、赤の実線が2011年度のAV波である。これらの入力地震動は、第3章で用いたものと同じであり、内閣府南海トラフ3連動の平均波を本章ではAV波、同平均+標準偏差の波を、SD波と呼んでいる。また、本検討2章で示した内閣府南海トラフ4連動（Mw=9）に対する長周期地震動（平均波）を2012波と呼んでいる。

それぞれの地震動の卓越する周期帯は昨年度の波と概ね同様であるが、此花では2011年度は6秒付近にあったピークが7秒付近に出ている。また、津島では2011年度の波に見られた4秒付近のスペクトルの落ち込みがなくなっている。

応答スペクトルの大きさは、此花では速度応答スペクトルは2011年度のSD波と2012年度の波（AV波）がほぼ同じになっているが、エネルギースペクトルでは2012年度の波は2011年度のSD波よりもやや小さい。津島では速度応答スペクトル、エネルギースペクトルともに2012年度の波は2011年度のSD波よりもはるかに大きく、1.5～2倍程度になっている。ピークでは速度応答で最大240cm/s程度、エネルギー等価速度で600cm/s程度と非常に大きい。新宿は速度応答スペクトル、エネルギースペクトルともに、周期5秒以上では今年度の波は2011年度のSD波とほぼ同じであるが、5秒以下では2011年度のSD波よりもやや大きい。浜松は速度応答スペクトル、エネルギースペクトルともに、2011年度のAV波とほとんど同じである。

表 4.1-1 検討用地震動一覧

略称	対象地震・評価地点など	加速度 cm/s ²	速度 cm/s	継続時間 s
OSKH02	南海トラフ4連動地震(Mw9.0) 此花 平均	133.0	46.5	655.0
AIC003	南海トラフ4連動地震(Mw9.0) 津島 平均	545.4	67.9	655.0
KGIN	南海トラフ4連動地震(Mw9.0) 新宿 平均	55.5	31.7	655.0
SZO024	南海トラフ4連動地震(Mw9.0) 浜松 平均	640.3	42.8	655.0

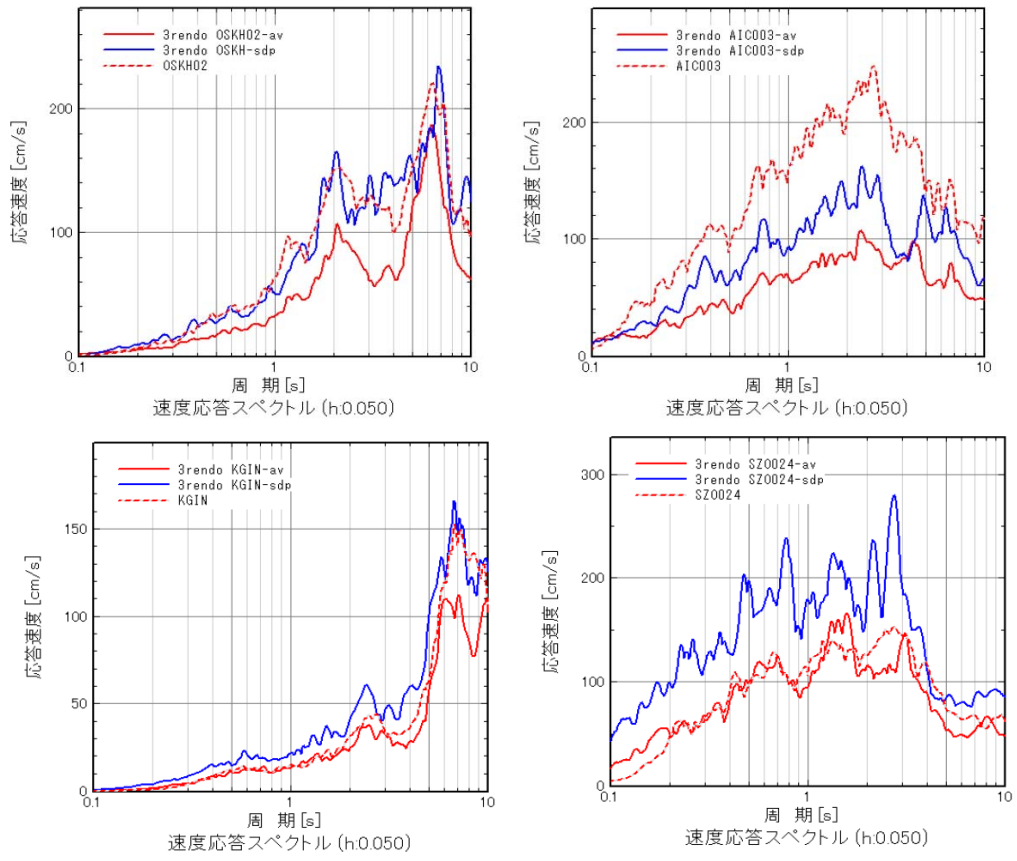


図 4.1-1 速度応答スペクトル ($h=0.05$)

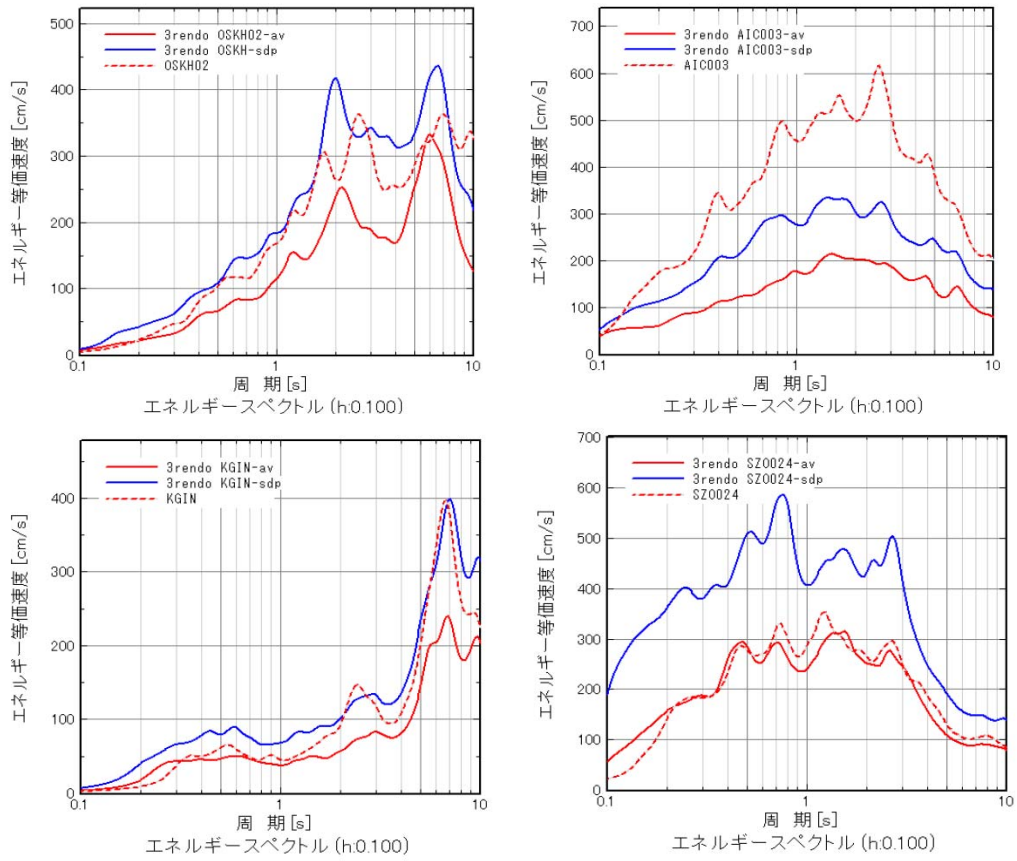


図 4.1-2 エネルギースペクトル ($h=0.10$)

4-2 検討用建物

検討に用いた建物は2011年度用いた22棟に2棟追加した全24棟であり、このうち12棟についてはエネルギーの検討も行った。これらのモデルは、設計時期・建物高さ・免震システムなどがバランスよく網羅されるように選定している。ここにおいて、設計時期は第一期（1994年以前）、第二期（1995年～1999年）、第三期（2000年以降）の3期に分類し、建物高さは低層（20m未満）、中高層（20m～60m未満）、超高層（60m以上）の3つに分類している。

表4.2-1に検討建物の諸元を示す。ここにおいて、網掛したモデルはエネルギーの検討を行ったモデルである。また、図4.2-1に検討建物の建物高さとし積層ゴム200%ひずみ時の固有周期を示す。高さが高いほど固有周期は長くなっているが、選定した建物は周期2～7秒の範囲で幅広く分布している。

表 4.2-1 検討建物諸元

記号	分類	軒高 (m)	設計年	構造種別	免震システム	固有周期	
						基礎固定 (s)	200%ひずみ時 (s)
A-1	低層第1世代	13.4	1987	RC	LRB+NR	0.41	1.77
A-3	中高層第3世代	34.6	2003	RC	HDR+NR	0.73	3.25
B-3	低層第3世代	13.1	2000	RC	NR+SL+OD	0.217	3.36
B-4	超高層第3世代	120.9	2006	RC	NR+SL+OD	3.16	6.19
C-2	中高層第1世代	36.1	1994	SRC、S	LRB	0.82	2.99
C-4	超高層第3世代	88.5	2008	RC	LRB+NR	2.27	4.93
D-2	中高層第3世代	29.9	2007	RC	LRB+NR	0.863	3.45
D-4	超高層第3世代	144.0	2006	RC	LRB+CLB+OD	3.45	6.43
E-1	中高層第2世代	30.6	1996	RC	LRB+NR	0.79	3.4
E-2	中高層第2世代	26.1	1996	RC	NR+鉛D+鋼棒D	0.68	2.56
E-3	超高層第3世代	67.4	2004	RC	LRB+CLB	1.78	5.24
E-4	中高層第3世代	34.0	2004	RC	LRB	0.87	3.87
F-3	中高層第3世代	31.0	2006	S	NR+SL	1.81	4.3
F-4	超高層第3世代	140.0	2006	RC	NR+SL	3.49	5.55
G-3	中高層第2世代	28.7	1997	CFT+S	NR+OD	1.32	4.027
G-4	中高層第3世代	24.2	2001	S	NR+OD	1.039	3.573
H-1	低層第1世代	11.9	1990	RC	NR+鉛D	0.27	2.23
H-4	超高層第3世代	60.4	2002	S	NR+鉛D+鋼D	1.82	4.02
I-1	中高層第2世代	31.3	1996	RC	HDR	1.1	4.27
I-2	中高層第3世代	41.2	2000	RC	NR+SL+鉛D+鋼D	1.57	5.09
J-1	中高層第2世代	44.3	1999	RC	NR+CLB+鋼D+OD	0.5	3.04
J-3	中高層第2世代	29.2	1998	RC	LRB+SL	0.095	2.75
K-1	中高層第3世代	60.0	2001	RC	NR+LRB+鋼棒D	1.05	3.67
K-2	中高層第3世代	56.6	2010	RC	LRB+NR+SL+CL+OD	0.97	4.85

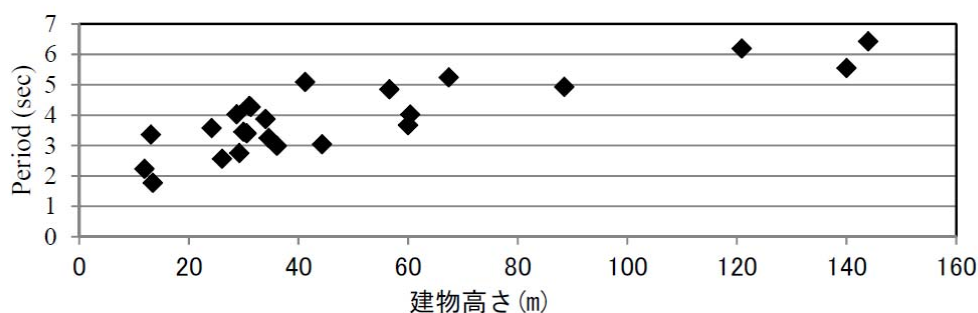


図 4.2-1 検討建物の建物高さとし積層ゴム200%ひずみ時の固有周期

4-3 応答解析結果

応答結果は上部構造については最大加速度、最大層間変形角、ベースシア係数、建物の状態を、免震層については最大変位、最大速度、せん断力係数、免震層の状態を整理した。

ここにおいて、

建物の状態とは、上部建物の応力状態で、下記の4つに分類している。

- ・ 短期許容応以下 主要構造体がすべて短期許容応力度以下となっている状態
- ・ 弾性限以下 主要構造体が短期許容応力度を超えているが、降伏していない状態
- ・ 保有耐力以下 主要構造体が一部降伏しているが、建物の保有水平耐力以下の状態
- ・ 保有耐力以上 建物の保有水平耐力を超えている状態

免震層の状態とは、最大変位時における免震部材の状態で、下記の3つに分類している。

- ・ 許容変形以下 応答変形が免震部材の許容変形以内となっている状態
- ・ 限界変形以下 応答変形が免震部材の許容変形を超えているが、限界変形（またはピットクリアランス）以内となっている状態
- ・ 限界変形以上 応答変形が免震部材の限界変形（またはピットクリアランス）を超えていると状態

解析結果の一部を一覧表にしたものを、表 4.3-1 (1)～(2)に示す。図 4.3-1 に総エネルギー入力の変換値としての $h=0.1$ のエネルギースペクトルとともに示す。図 4.3-2 に上部構造のベースシア係数を $h=0.2$ の加速度応答スペクトルを重力加速度 g で除した S_a/g とともに示す。図 4.3-3 に免震層の応答変位を $h=0.2$ の変位応答スペクトル S_d とともに示す。なお、I-1 棟は AIC003 の場合、応答変位が解析モデルの上限を超えており、解析できていない。

エネルギーの変換値は概ねエネルギースペクトルと一致している。また、ベースシア係数や免震層の変位も概ね S_a/g や S_d と一致している。

応答ベースシア係数は OSKH02 波で 0.07～0.15 程度であるが、スペクトルのピークである周期 2 秒付近では 0.2～0.25 程度と非常に大きくなっている。また、周期 5 秒付近の応答も大きい。AIC003 波では周期 3 秒～5 秒の範囲で 0.13～0.20 程度と大きく、周期 2.5～3 秒付近では 0.2～0.25 と非常に大きくなっている。KGIN 波では全般的に 0.05 程度と小さい。SZ002 波では AV では周期 3 秒以上では 0.05～0.12 程度だが 3 秒以下となると 0.15～0.20 と大きくなる。

免震層の応答変位は OSKH02 波では周期 4 秒以下では 0.4m 程以下、周期 4 秒以上では 0.4～0.6m と非常に大きく、周期 6 秒付近では 0.8m 程度のものもある。AIC003 波では周期 3～5 秒の範囲で 0.4～0.7m と非常に大きく、周期 2.5 秒付近では 0.8m 程度のものもある。KGIN 波では 0.2m 程度がほとんどであるが、周期 5 秒以上では 0.4m 程度とやや大きくなっている。SZ002 波では AV では全体的に 0.2m～0.4m 程度である。

図 4.3-4～図 4.3-6 にエネルギーの変換値、ベースシア係数、応答変位を前回の解析結果とともに示す。前回の結果と比較すると、OSKH02、KGIN、SMZ024 は概ね前回の SD 波と同程度であり、AIC003 は前回の SD よりも遥かに大きくなっている。

図 4.3-7 に上部構造の状態、層間変形角および免震層の状態を示す。図 4.3-8～図 4.3-9 に固有周期ごとの上部構造の状態、免震層の状態を示す。なお、ここにおいて、I-1 棟の AIC003

波は応答が大きく、免震部材の解析モデルの適用範囲を超えているため、件数から除外している。

建物の状態は、OSKH02 は保有耐力以上が 1 棟、弾性限以上-保有耐力以下が 2 棟、短期許容以上-弾性限以下が 4 棟である。AIC003 は保有耐力以上が 2 棟、弾性限以上-保有耐力以下が 6 棟、短期許容以上-弾性限以下が 13 棟であり、損傷の大きい建物が非常に多い。KGIN はすべて短期許容以下であり、SZ0024 は弾性限以上-保有耐力以下が 1 棟、短期許容以上-弾性限以下が 2 棟であり全般的には大きな損傷となっていない。

上部構造の層間変形角は、OSKH02 は 1/100 以上が 1 棟、1/100-1/200 が 5 棟である。AIC003 は 1/100 以上が 1 棟、1/100-1/200 が 7 棟である。KGIN はすべて 1/200 以下であり、SZ0024 は 1/100 以上が 1 棟、1/100-1/200 が 1 棟である。

免震層の状態は、OSKH02 では、限界変位を超えているものが 2 棟、限界変位以下-許容変位以上が 4 棟となっている。AIC003 は限界変位を超えているものが 10 棟、限界変位以下-許容変位以上が 3 棟となっており、約半数が限界変位を超えてしまっている。KGIN はすべて許容変位以下であり、SZ0024 は限界変位以下-許容変位以上が 4 棟あるが限界変位を超えているものは無い。

固有周期ごとに分析すると、OSKH02 では上部構造の状態は周期 2.5 秒未満と 5.0 秒以上で損傷の大きいものが多く、免震層の状態は周期 5 秒以上で限界変位を超えているものが半数ある。AIC003 では周期 2.5 秒未満と 5.0 秒以上で損傷の大きいものが多いが 2.5~4.0 秒でも弾性限を超えているものが多数あり、免震層の状態はほとんどすべての周期で限界変位を超えているものが半数ある。

図 4.3-10~図 4.3-12 に OSKH02 と AIC003 に関して前回との比較を示す。OSKH02 では前回の SD とほぼ同程度であり、AIC003 では前回の SD よりもはるかに上部構造の損傷は大きく、応答変位も限界変位を超えているものが多い。

なお、本検討は積層ゴムのハードニングは考慮されていないので、応答変位が大きい (0.5m 程度以上) の場合は、ハードニングを考慮すれば建物の応答はもっと大きくなっている可能性がある。また、長時間の繰返しによる免震部材の性能変動は考慮していないので、応答変位はもっと大きくなる可能性がある。これに関しては「4.4. エネルギー吸収に関する検討」で考察する。

表 4.3-1(1) 解析結果一覽(1)

記号	分類	軒高 (m)	設計年	構造種別	免震システム	解析方向	固有周期(S)		Ve (m/s)	最大加速度 (m/s ²)	最大層間変形角	ベースシア係数	状態	最大変位 (m)	最大速度 (m/s)	状態
							基礎固定	200%心ずみ時								
OSHK02																
A-1	低層 第1世代	13.4	1987	RC	LRB+NR	Y	0.41	1.77	2.59	2.87	1.61	0.26	0.17	0.67	保有耐力以上	許容変形以下
A-3	中高層 第3世代	34.6	2003	RC	HDR+NR	X	0.23	3.25	2.82	1.33	1.755	0.10	0.30	0.68	短期許容以下	限界変形以下
B-3	低層 第3世代	13.0	2000	RC	NR+SL+オイルD	X	0.22	3.36	2.72	0.92	1.7033	0.09	0.22	0.61	短期許容以下	許容変形以下
B-4	超高層 第3世代	121.0	2006	RC	NR+SL+オイルD	X	3.16	6.19	2.76	2.08	1.174	0.08	0.74	0.85	保有耐力以下	限界変形以上
C-2	中高層 第2世代	36.1	1994	SRC.S	LRB	X	0.82	2.99	2.79	3.01	1.538	0.19	0.30	0.89	弾性限以下	許容変形以下
C-4	超高層 第3世代	88.5	2008	RC	LRB+NR	X	2.27	4.93	3.41	1.89	1.108	0.12	0.53	0.79	弾性限以下	許容変形以下
D-2	中高層 第3世代	29.9	2007	RC	LRB+NR	Y	0.86	3.45	2.78	1.86	1.680	0.09	0.31	0.70	短期許容以下	許容変形以下
D-4	中高層 第3世代	144.0	2006	RC	LRB+CLB+OD	Y	3.45	6.43	1.69	1.47	1.194	0.07	0.55	0.62	短期許容以下	限界変形以下
E-1	中高層 第2世代	30.6	1996	RC	LRB+NR	X	0.79	3.40	2.74	1.37	1.486	0.10	0.24	0.71	短期許容以下	許容変形以下
E-2	中高層 第2世代	26.1	1996	RC	NR+鉛D+鋼林D	X	0.68	2.56	2.51	1.72	1.263	0.13	0.22	0.70	短期許容以下	許容変形以下
E-3	超高層 第3世代	67.4	2004	RC	LRB+CLB	X	1.78	5.24	2.98	1.83	1.120	0.15	1.24	1.30	保有耐力以下	限界変形以上
E-4	中高層 第3世代	34.0	2004	RC	LRB	X	0.87	3.87	2.78	1.27	1.630	0.09	0.29	0.65	短期許容以下	許容変形以下
F-3	中高層 第3世代	31.1	2006	S+CFT	NR+SL	X	1.34	4.17	2.69	2.16	1.349	0.08	0.25	0.64	短期許容以下	許容変形以下
F-4	超高層 第3世代	139.6	2006	RC+Pca	NR+SL	Y	3.21	5.45	2.66	1.95	1.160	0.08	0.51	0.66	弾性限以下	許容変形以下
G-3	中高層 第3世代	28.7	1997	CFT+S	NR+オイルD	Y	1.32	4.03	2.62	1.28	1.386	0.12	0.43	0.59	短期許容以下	限界変形以下
G-4	中高層 第3世代	24.2	2001	S	NR+オイルD	Y	1.04	3.57	2.87	1.20	1.490	0.11	0.21	0.57	短期許容以下	許容変形以下
H-1	低層 第1世代	11.9	1990	RC	NR+鉛D	Y	0.27	2.23	2.55	1.93	1.1724	0.20	0.23	0.77	弾性限以下	許容変形以下
H-4	超高層 第3世代	60.4	2002	S	NR+鉛D+鋼D	X	1.82	4.02	2.70	2.23	1.371	0.10	0.28	0.52	短期許容以下	許容変形以下
I-1	中高層 第2世代	31.3	1996	RC	HDR	X	0.50	3.04	2.82	1.60	1.1796	0.14	0.32	0.88	短期許容以下	許容変形以下
I-2	中高層 第3世代	41.2	2000	RC	NR+SL+鉛D+鋼D	Y	0.98	3.53	2.59	1.51	1.1468	0.11	0.28	0.74	短期許容以下	許容変形以下
J-1	中高層 第2世代	44.3	1999	RC	NR+CLB+オイルD+鋼D	X	1.10	4.27	2.85	1.46	1.369	0.12	0.52	0.62	短期許容以下	許容変形以下
J-3	中高層 第2世代	29.2	1998	RC	LRB+SL	X	0.59	3.90	2.41	1.43	1.1085	0.09	0.24	0.62	短期許容以下	許容変形以下
K-1	中高層 第2世代	60.0	2001	RC	NR+LRB+鋼D	X	1.05	3.67	2.76	1.50	1.410	0.09	0.27	0.58	短期許容以下	許容変形以下
K-2	中高層 第3世代	56.6	2010	RC	LRB+NR+SL+CLB+OD	X	0.97	4.85	2.89	1.09	1.831	0.09	0.46	0.59	短期許容以下	許容変形以下
AIC003																
記号	分類	軒高 (m)	設計年	構造種別	免震システム	解析方向	基礎固定	200%心ずみ時	Ve (m/s)	最大加速度 (m/s ²)	最大層間変形角	ベースシア係数	状態	最大変位 (m)	最大速度 (m/s)	状態
A-1	低層 第1世代	13.4	1987	RC	LRB+NR	Y	0.41	1.77	5.34	4.89	1.32	0.34	0.25	0.88	保有耐力以上	許容変形以下
A-3	中高層 第3世代	34.6	2003	RC	HDR+NR	X	0.73	3.25	4.22	3.21	1.301	0.17	0.60	1.05	保有耐力以下	限界変形以上
B-3	低層 第3世代	13.0	2000	RC	NR+SL+オイルD	X	0.22	3.36	4.69	1.49	1.4074	0.15	0.41	0.82	弾性限以下	許容変形以下
B-4	超高層 第3世代	121.0	2006	RC	NR+SL+オイルD	X	3.16	6.19	3.36	2.23	1.165	0.06	0.45	0.71	弾性限以下	許容変形以下
C-2	中高層 第2世代	36.1	1994	SRC.S	LRB	X	0.82	2.99	5.49	3.65	1.403	0.25	0.53	1.13	弾性限以下	限界変形以上
C-4	超高層 第3世代	88.5	2008	RC	LRB+NR	X	2.27	4.93	4.73	2.96	1.147	0.10	0.45	0.73	弾性限以下	限界変形以下
D-2	中高層 第3世代	29.9	2007	RC	LRB+NR	Y	0.86	3.45	4.18	3.35	1.334	0.13	0.57	1.06	短期許容以下	限界変形以下
D-4	中高層 第3世代	144.0	2006	RC	LRB+CLB+OD	Y	3.45	6.43	2.54	1.95	1.182	0.06	0.31	0.61	弾性限以下	許容変形以下
E-1	中高層 第2世代	30.6	1996	RC	LRB+NR	X	0.79	3.40	4.41	2.09	1.235	0.17	0.62	1.11	保有耐力以下	限界変形以上
E-2	中高層 第2世代	26.1	1996	RC	NR+鉛D+鋼林D	X	0.68	2.56	4.86	3.00	1.133	0.20	0.38	0.85	保有耐力以下	許容変形以下
E-3	超高層 第3世代	67.4	2004	RC	LRB+CLB	X	1.78	5.24	3.37	1.82	1.194	0.09	0.64	0.90	短期許容以下	限界変形以上
E-4	中高層 第3世代	34.0	2004	RC	LRB	X	0.87	3.87	4.19	2.47	1.367	0.13	0.55	0.97	短期許容以下	許容変形以下
F-3	中高層 第3世代	31.1	2006	S+CFT	NR+SL	Y	1.81	4.30	4.06	3.56	1.141	0.13	0.50	1.03	弾性限以下	限界変形以上
F-4	超高層 第3世代	139.6	2006	RC+Pca	NR+SL	Y	3.21	5.45	3.65	3.16	1.107	0.06	0.28	0.60	保有耐力以上	許容変形以下
G-3	中高層 第3世代	28.7	1997	CFT+S	NR+オイルD	Y	1.32	4.03	4.25	2.19	1.243	0.19	0.63	1.06	弾性限以下	限界変形以上
G-4	中高層 第3世代	24.2	2001	S	NR+オイルD	Y	1.04	3.57	4.82	2.69	1.317	0.17	0.63	0.76	弾性限以下	許容変形以下
H-1	低層 第1世代	11.9	1990	RC	NR+鉛D	Y	0.27	2.23	4.02	4.24	1.785	0.43	0.81	1.89	保有耐力以下	限界変形以上
H-4	超高層 第3世代	60.4	2002	S	NR+鉛D+鋼D	Y	1.82	4.02	4.12	3.53	1.231	0.16	0.44	1.14	弾性限以下	許容変形以下
I-1	中高層 第2世代	31.3	1996	RC	HDR	X	0.50	3.04	4.21	2.44	1.945	0.17	0.57	1.09	短期許容以下	限界変形以上
I-2	中高層 第3世代	41.2	2000	RC	NR+SL+鉛D+鋼D	Y	0.98	3.53	3.85	1.89	1.280	0.14	0.65	1.11	弾性限以下	限界変形以下
J-1	中高層 第2世代	44.3	1999	RC	NR+CLB+オイルD+鋼D	X	1.10	4.27	4.21	2.42	1.508	0.13	0.51	0.93	短期許容以下	許容変形以下
J-3	中高層 第2世代	29.2	1998	RC	LRB+SL	X	0.59	3.90	4.40	2.13	1.219	0.13	0.48	1.02	弾性限以下	限界変形以下
K-1	中高層 第3世代	60.0	2001	RC	NR+LRB+鋼D	X	1.05	3.67	4.40	2.13	1.219	0.13	0.48	1.02	弾性限以下	限界変形以下
K-2	中高層 第3世代	56.6	2010	RC	LRB+NR+SL+CLB+OD	X	0.97	4.85	4.02	1.91	1.548	0.11	0.61	0.85	弾性限以下	限界変形以上

表 4.3-1(2) 解析結果一覽(1)

記号	分類	軒高 (m)	設計年	構造種別	免震システム	解析方向	固有周期(S)		αy	Ve (m/s)	最大加速度 (m/s ²)	最大閉間 変形角	ベースシニア 係数	状態	最大変位 (m)	免震層 最大速度 (m/s)	状態
							基礎 固定	200% ひずみ時									
							基礎 固定	200% ひずみ時									
KGIN																	
A-1	低層 第1世代	13.4	1987	RC	LRB+NR	Y	0.41	1.77	0.053	0.61	1.03	1/2068	0.08	0.01	0.08	許容変形以下	許容変形以下
A-3	中高層 第3世代	34.6	2003	RC	HDR+NR	X	0.73	3.25	0.028	0.99	0.85	1/2010	0.05	0.06	0.17	許容変形以下	許容変形以下
B-3	低層 第3世代	13.0	2000	RC	NR+SL+オイルD	X	0.22	3.36	0.017	0.92	0.41	1/4632	0.04	0.09	0.10	許容変形以下	許容変形以下
B-4	超高层 第3世代	121.0	2006	RC	NR+SL+オイルD	X	3.16	6.19	0.024	2.01	0.73	1/338	0.05	0.32	0.40	許容変形以下	許容変形以下
C-2	中高層 第3世代	36.1	1994	SRC.S	LRB	X	0.82	2.99	0.053	0.63	1.15	1/1572	0.07	0.03	0.10	許容変形以下	許容変形以下
C-4	超高层 第三世代	88.5	2008	RC	LRB+NR	X	2.27	4.93	0.028	1.39	1.09	1/384	0.05	0.15	0.24	許容変形以下	許容変形以下
D-2	中高層 第三世代	29.9	2007	RC	LRB+NR	Y	0.86	3.45	0.032	0.64	1.22	1/1340	0.05	0.04	0.10	許容変形以下	許容変形以下
D-4	中高層 第3世代	144.0	2006	RC	LRB+CLB-OD	Y	3.45	6.43	0.016	0.39	0.82	1/277	0.06	0.34	0.45	許容変形以下	許容変形以下
E-1	中高層 第2世代	30.6	1996	RC	LRB+NR	X	0.79	3.40	0.035	0.61	0.94	1/1952	0.04	0.04	0.10	許容変形以下	許容変形以下
E-2	中高層 第2世代	26.1	1996	RC	NR+鉛D+鋼棒D	X	0.68	2.56	0.068	0.53	0.89	1/1968	0.06	0.03	0.10	許容変形以下	許容変形以下
E-3	超高层 第3世代	67.4	2004	RC	LRB+CLB	X	1.78	5.24	0.024	2.07	0.80	1/343	0.06	0.37	0.41	許容変形以下	許容変形以下
E-4	中高層 第3世代	34.0	2004	RC	LRB	X	0.87	3.87	0.039	0.60	0.86	1/2137	0.04	0.03	0.10	許容変形以下	許容変形以下
F-3	中高層 第3世代	31.1	2006	S-CFT	NR-SL	Y	1.81	4.30	0.040	1.48	1.42	1/300	0.06	0.13	0.21	許容変形以下	許容変形以下
F-4	超高层 第3世代	139.6	2006	RC+Pca	NR+SL	X	3.49	5.55	0.032	0.95	0.80	1/479	0.04	0.12	0.20	許容変形以下	許容変形以下
G-3	中高層 第3世代	28.7	1997	CFT+S	NR+オイルD	Y	1.32	4.03	0.041	1.26	0.56	1/863	0.06	0.20	0.26	許容変形以下	許容変形以下
G-4	中高層 第3世代	24.2	2001	S	NR+オイルD	Y	1.04	3.57	0.094	1.31	0.54	1/1094	0.05	0.12	0.15	許容変形以下	許容変形以下
H-1	低層 第1世代	11.9	1990	RC	NR+鉛D	Y	0.27	2.23	0.042	0.58	0.66	1/5955	0.06	0.03	0.09	許容変形以下	許容変形以下
H-4	超高层 第3世代	60.4	2002	S	NR+鉛D+鋼D	Y	1.82	4.02	0.035	1.06	1.33	1/755	0.05	0.05	0.11	許容変形以下	許容変形以下
I-1	中高層 第2世代	31.3	1996	RC	HDR	X	0.50	3.04	0.030	0.63	0.62	1/4653	0.06	0.04	0.14	許容変形以下	許容変形以下
I-2	中高層 第3世代	41.2	2000	RC	NR+SL+鉛D+鋼D	Y	0.98	3.53	0.036	0.81	0.92	1/2434	0.06	0.05	0.15	許容変形以下	許容変形以下
J-1	中高層 第2世代	44.3	1999	RC	NR+CLB+オイルD+鋼D	X	1.10	4.27	0.017	1.29	0.66	1/1962	0.04	0.10	0.16	許容変形以下	許容変形以下
J-3	中高層 第2世代	29.2	1998	RC	LRB+SL	X	0.59	3.90	0.043	0.54	0.83	1/3091	0.05	0.04	0.12	許容変形以下	許容変形以下
K-1	中高層 第3世代	60.0	2001	RC	NR+LRB+鋼D	X	1.05	3.67	0.039	0.69	1.16	1/1034	0.05	0.04	0.11	許容変形以下	許容変形以下
K-2	中高層 第3世代	56.6	2010	RC	LRB+NR+SL+CLB+OD	X	0.97	4.85	0.032	1.26	0.58	1/3749	0.04	0.13	0.14	許容変形以下	許容変形以下
SZO024																	
記号	分類	軒高 (m)	設計年	構造種別	免震システム	解析方向	基礎 固定	200% ひずみ時	αy	Ve (m/s)	最大加速度 (m/s ²)	最大閉間 変形角	ベースシニア 係数	状態	最大変位 (m)	免震層 最大速度 (m/s)	状態
A-1	低層 第1世代	13.4	1987	RC	LRB+NR	Y	0.41	1.77	0.053	3.00	3.42	1/136	0.20	0.14	0.65	許容変形以下	許容変形以下
A-3	中高層 第3世代	34.6	2003	RC	HDR+NR	X	0.73	3.25	0.028	2.21	2.67	1/707	0.11	0.38	0.57	許容変形以下	限界変形以下
B-3	低層 第3世代	13.0	2000	RC	NR+SL+オイルD	X	0.22	3.36	0.017	2.55	1.03	1/5936	0.10	0.27	0.44	許容変形以下	許容変形以下
B-4	超高层 第3世代	121.0	2006	RC	NR+SL+オイルD	X	3.16	6.19	0.024	1.43	1.83	1/268	0.04	0.28	0.36	許容変形以下	許容変形以下
C-2	中高層 第3世代	36.1	1994	SRC.S	LRB	X	0.82	2.99	0.053	3.10	3.00	1/656	0.17	0.29	0.67	許容変形以下	許容変形以下
C-4	超高层 第三世代	88.5	2008	RC	LRB+NR	X	2.27	4.93	0.028	2.51	3.26	1/216	0.07	0.27	0.46	許容変形以下	許容変形以下
D-2	中高層 第3世代	29.9	2007	RC	LRB+NR	Y	0.86	3.45	0.032	2.31	2.83	1/406	0.09	0.35	0.54	許容変形以下	許容変形以下
D-4	中高層 第3世代	144.0	2006	RC	LRB+CLB-OD	Y	3.45	6.43	0.016	1.40	1.62	1/238	0.04	0.19	0.28	許容変形以下	許容変形以下
E-1	中高層 第2世代	30.6	1996	RC	LRB+NR	X	0.79	3.40	0.035	2.48	1.88	1/420	0.11	0.33	0.53	許容変形以下	許容変形以下
E-2	中高層 第2世代	26.1	1996	RC	NR+鉛D+鋼棒D	X	0.68	2.56	0.068	2.70	2.42	1/240	0.13	0.18	0.46	許容変形以下	許容変形以下
E-3	超高层 第3世代	67.4	2004	RC	LRB+CLB	X	1.78	5.24	0.024	1.72	1.99	1/319	0.06	0.36	0.59	許容変形以下	許容変形以下
E-4	中高層 第3世代	34.0	2004	RC	LRB	X	0.87	3.87	0.039	2.36	2.11	1/570	0.09	0.31	0.53	許容変形以下	許容変形以下
F-3	中高層 第3世代	31.1	2006	S-CFT	NR-SL	Y	1.81	4.30	0.040	2.15	3.12	1/305	0.09	0.37	0.60	許容変形以下	許容変形以下
F-4	超高层 第3世代	139.6	2006	RC+Pca	NR+SL	X	3.49	5.55	0.032	1.90	3.21	1/235	0.05	0.16	0.34	許容変形以下	許容変形以下
G-3	中高層 第3世代	28.7	1997	CFT+S	NR+オイルD	Y	1.32	4.03	0.041	1.98	1.27	1/440	0.10	0.34	0.59	許容変形以下	限界変形以下
G-4	中高層 第3世代	24.2	2001	S	NR+オイルD	Y	1.04	3.57	0.094	2.40	2.34	1/449	0.12	0.25	0.42	許容変形以下	許容変形以下
H-1	低層 第1世代	11.9	1990	RC	NR+鉛D	Y	0.27	2.23	0.042	0.93	1.69	1/1960	0.17	0.28	0.66	許容変形以下	許容変形以下
H-4	超高层 第3世代	60.4	2002	S	NR+鉛D+鋼D	Y	1.82	4.02	0.035	2.23	3.37	1/340	0.10	0.43	0.80	許容変形以下	限界変形以下
I-1	中高層 第2世代	31.3	1996	RC	HDR	X	0.50	3.04	0.030	2.91	2.26	1/1033	0.20	0.33	0.53	許容変形以下	許容変形以下
I-2	中高層 第2世代	41.2	2000	RC	NR+SL+鉛D+鋼D	X	0.98	3.53	0.036	2.32	2.47	1/1119	0.12	0.38	0.58	許容変形以下	許容変形以下
J-1	中高層 第2世代	44.3	1999	RC	NR+CLB+オイルD+鋼D	Y	1.10	4.27	0.017	2.06	1.72	1/588	0.10	0.33	0.53	許容変形以下	許容変形以下
J-3	中高層 第2世代	29.2	1998	RC	LRB+SL	X	0.59	3.90	0.043	2.45	2.16	1/654	0.09	0.28	0.48	許容変形以下	許容変形以下
K-1	中高層 第3世代	60.0	2001	RC	NR+LRB+鋼D	X	1.05	3.67	0.039	2.18	1.85	1/327	0.10	0.26	0.53	許容変形以下	許容変形以下
K-2	中高層 第3世代	56.6	2010	RC	LRB+NR+SL+CLB+OD	X	0.97	4.85	0.032	2.43	2.20	1/1223	0.07	0.33	0.48	許容変形以下	許容変形以下

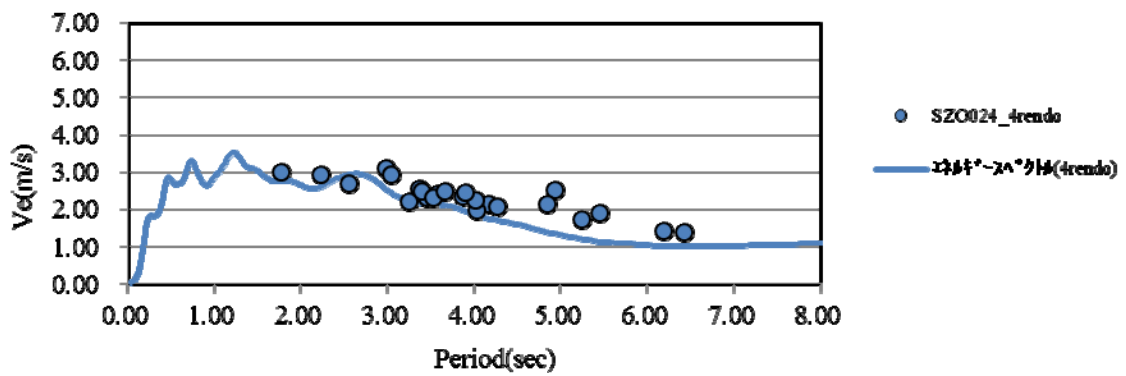
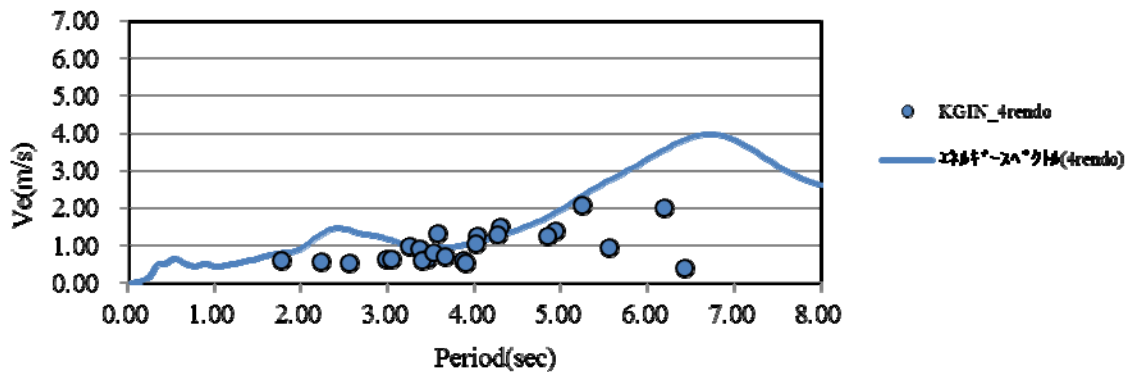
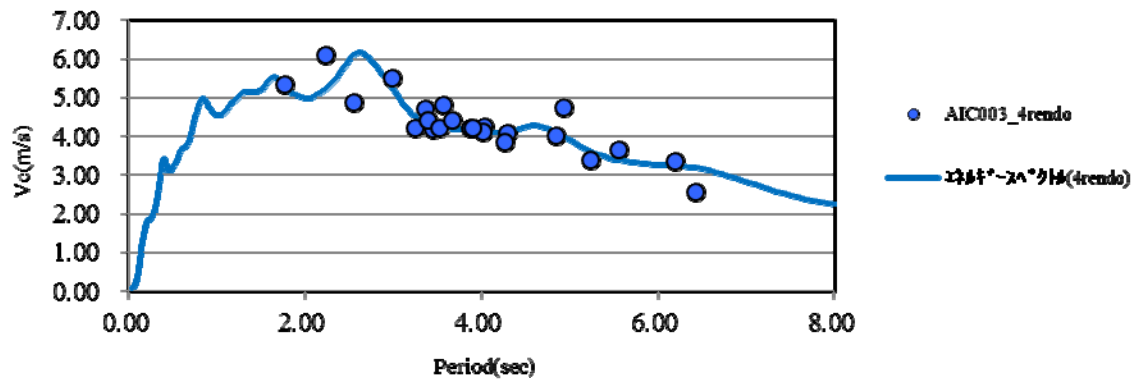
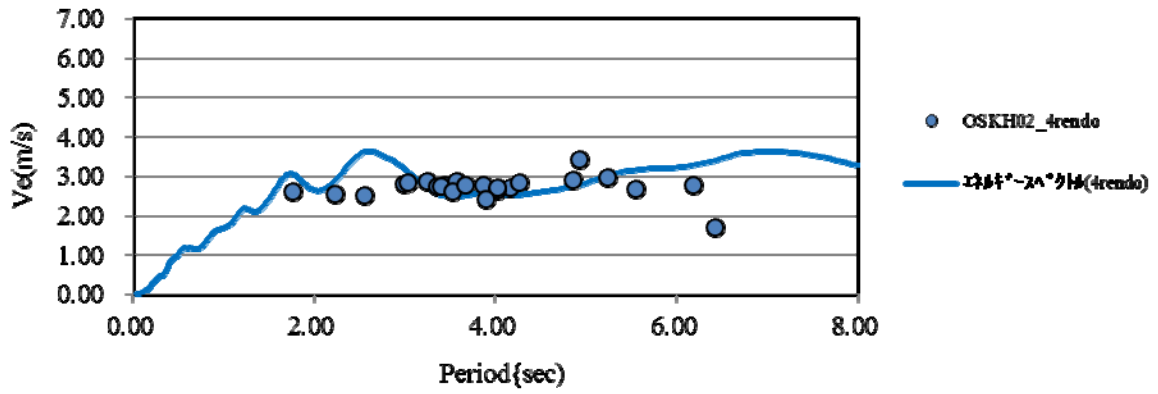


図 4.3-1 エネルギーの速度換算値

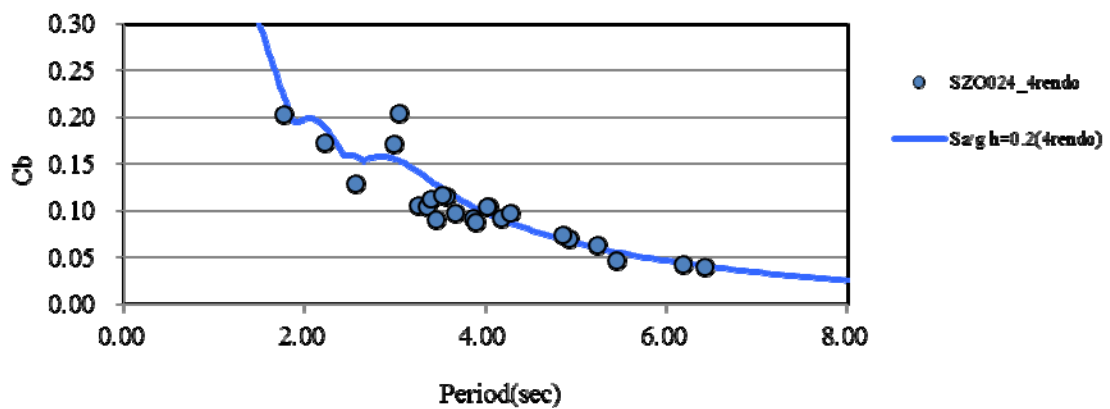
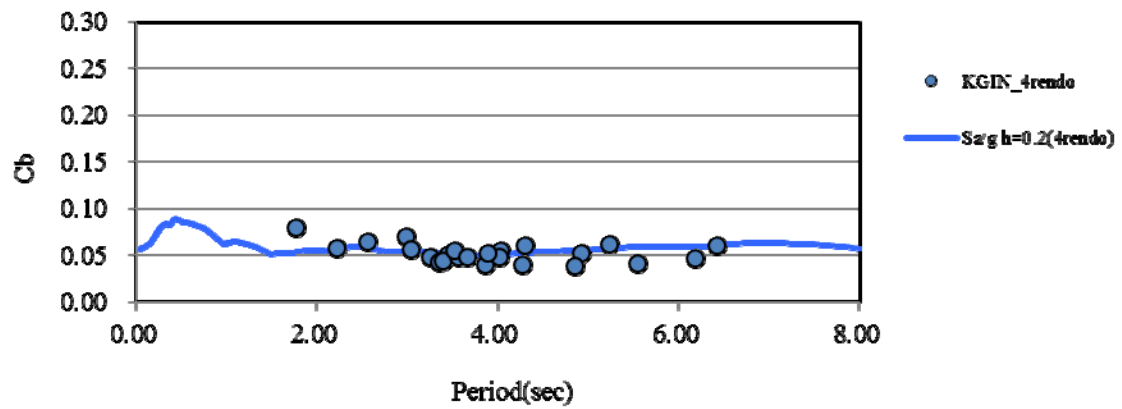
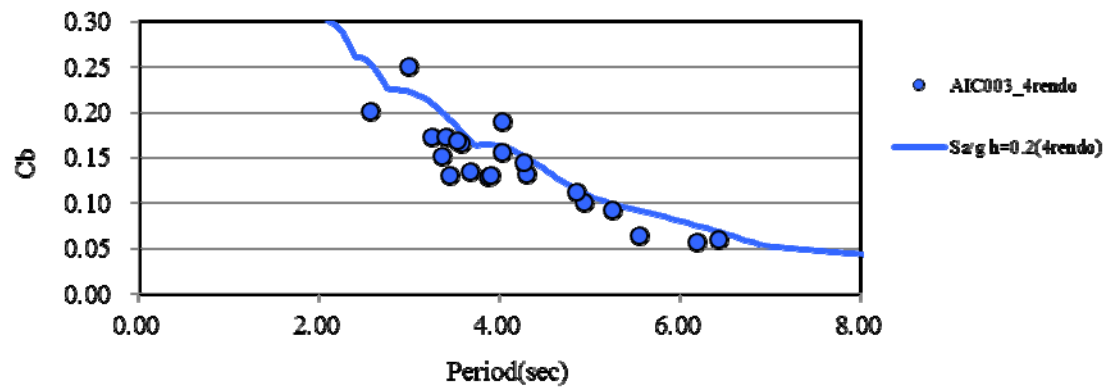
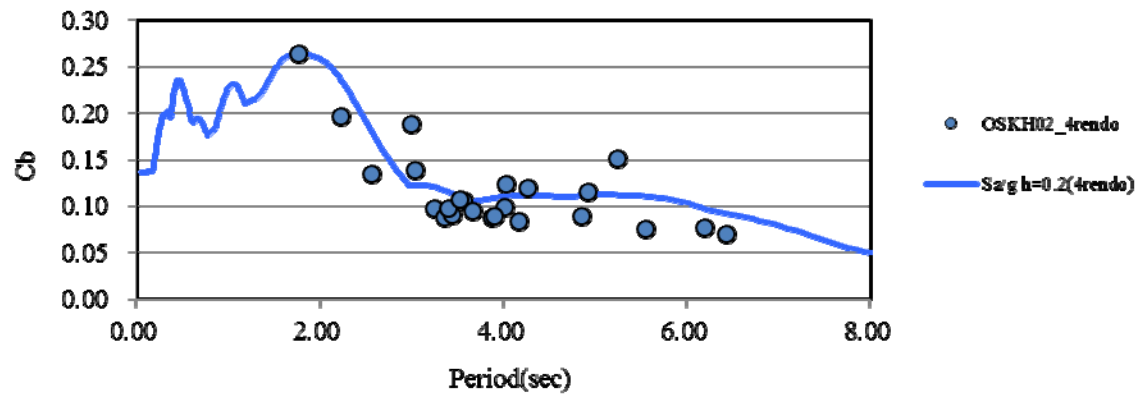


図 4.3-2 上部構造のベースシア係数

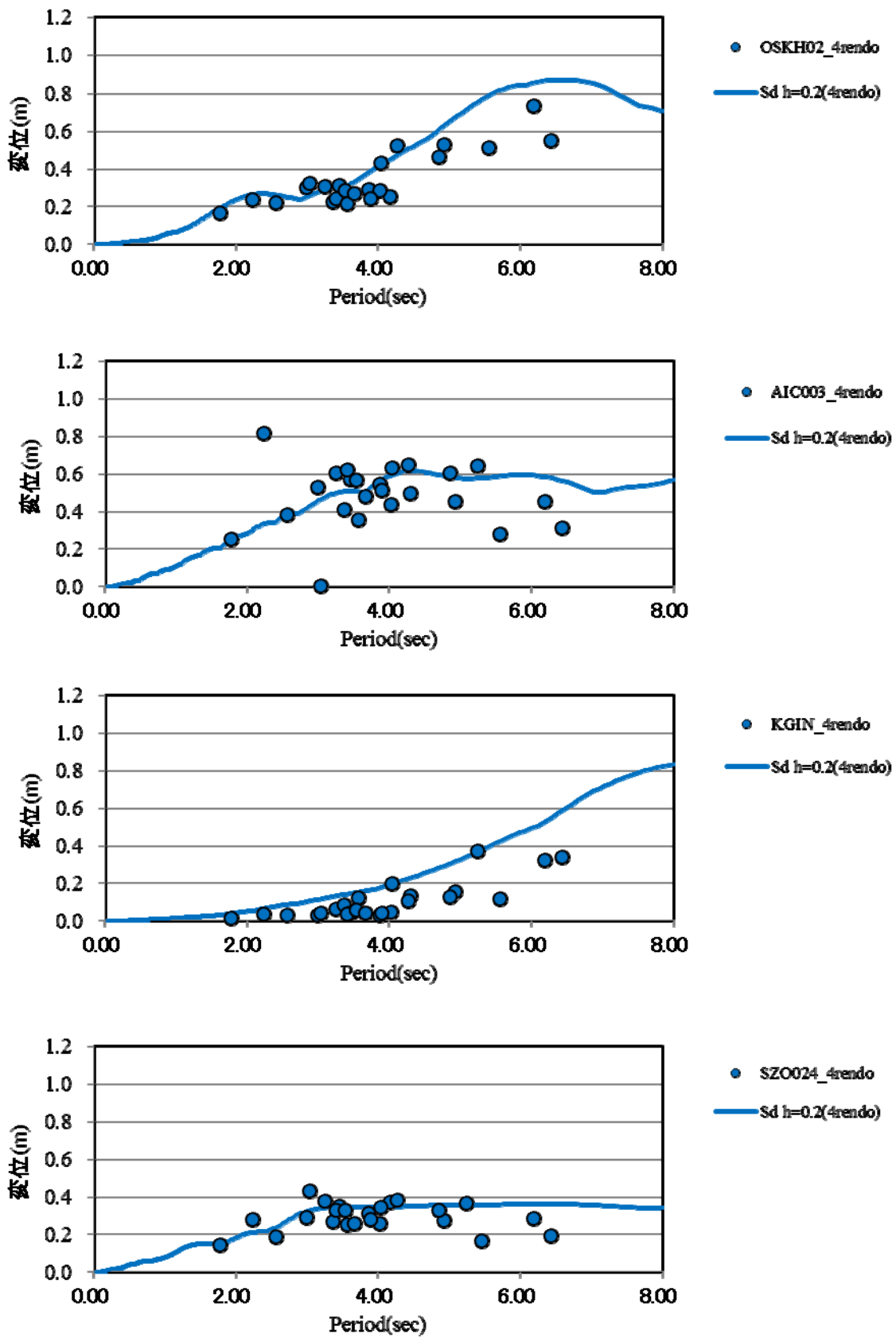


図 4.3-3 免震層の応答変位

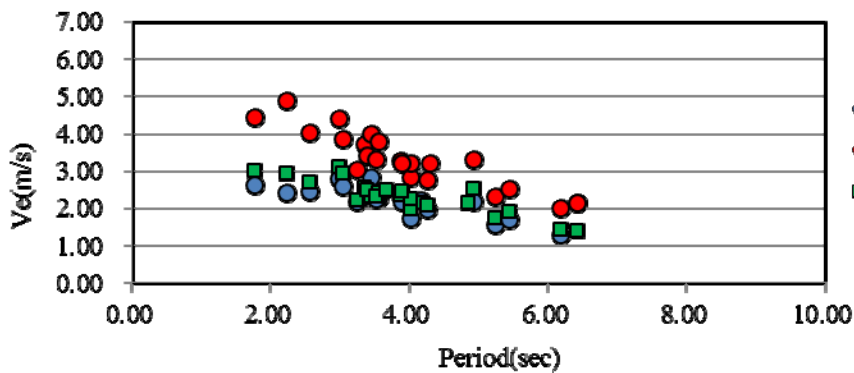
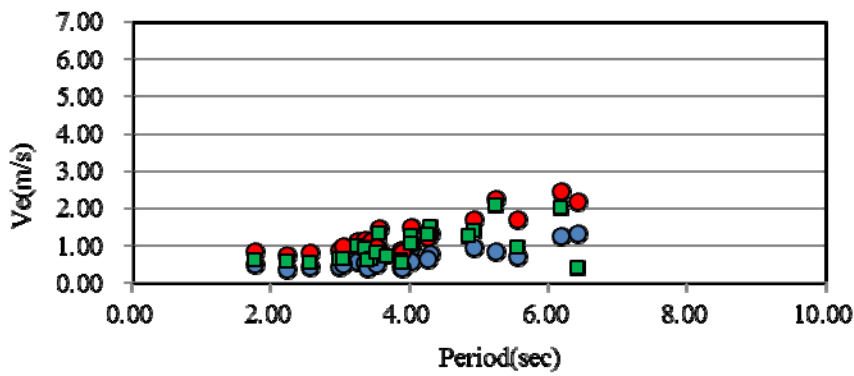
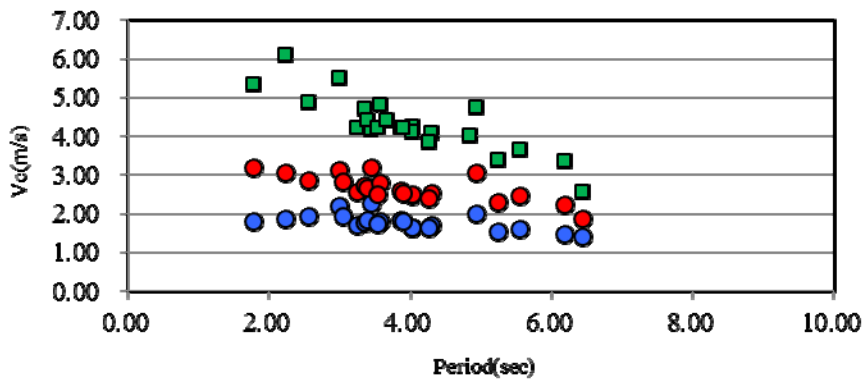
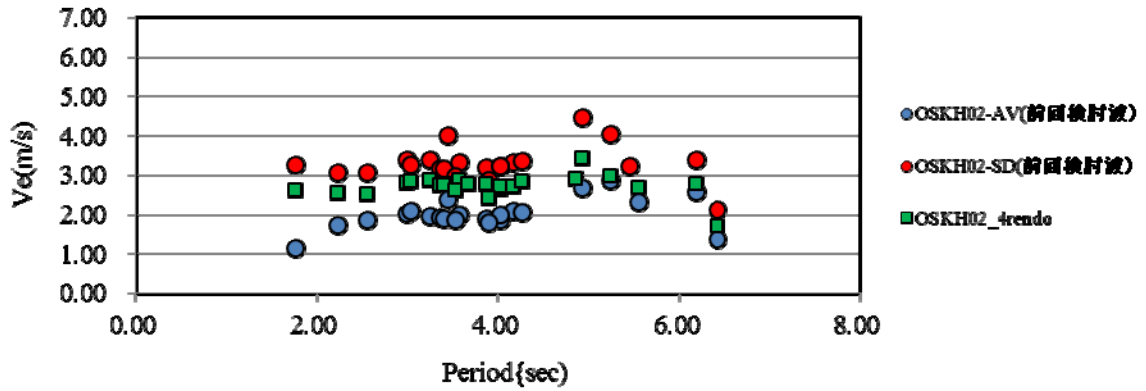


図 4.3-4 エネルギーの速度換算値の前回との比較

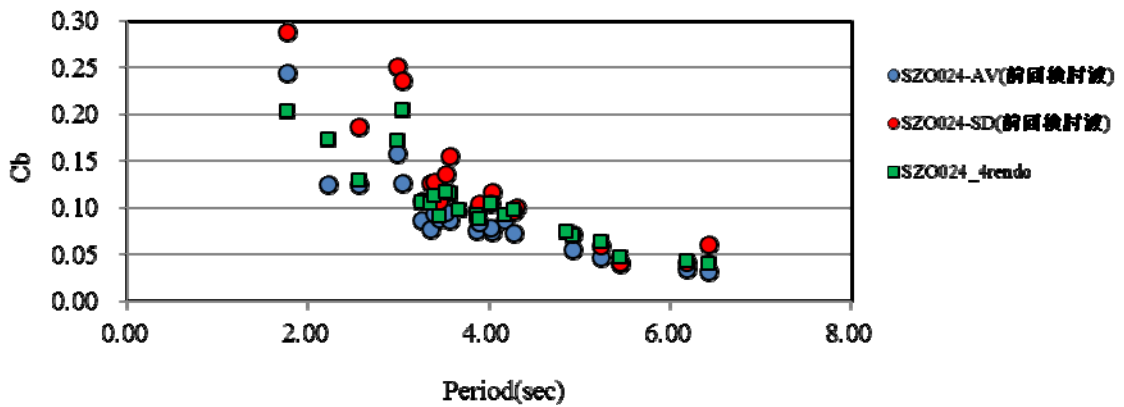
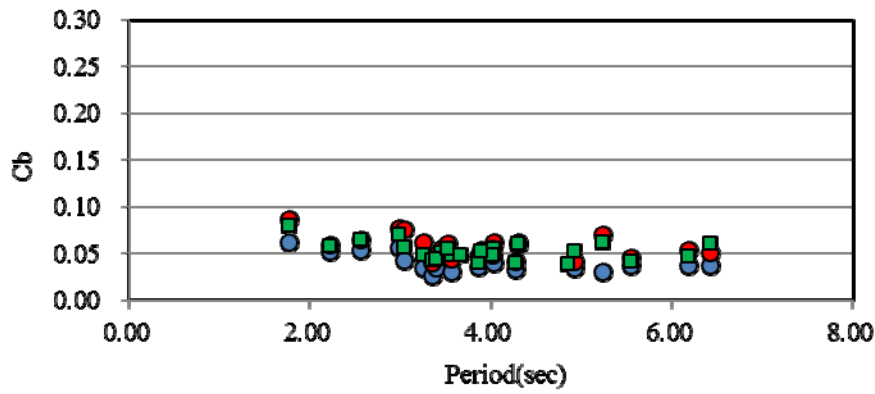
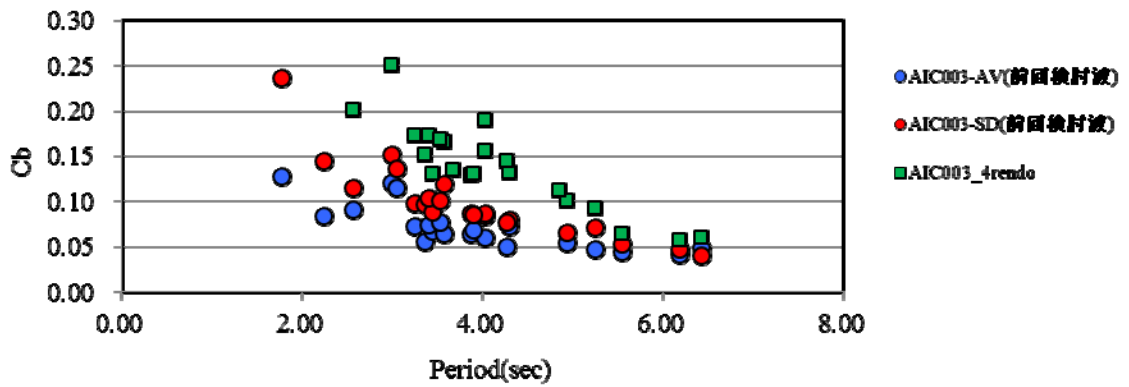
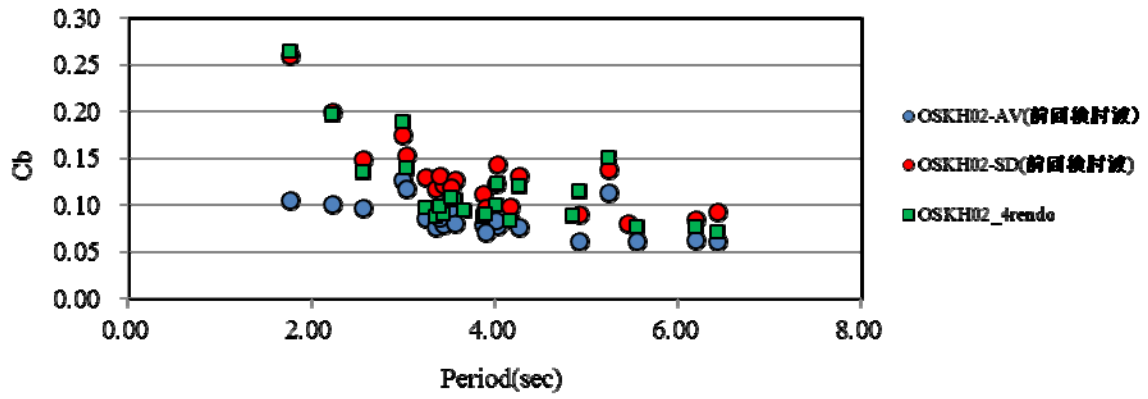


図 4.3-5 上部構造のベースシア係数の前回との比較

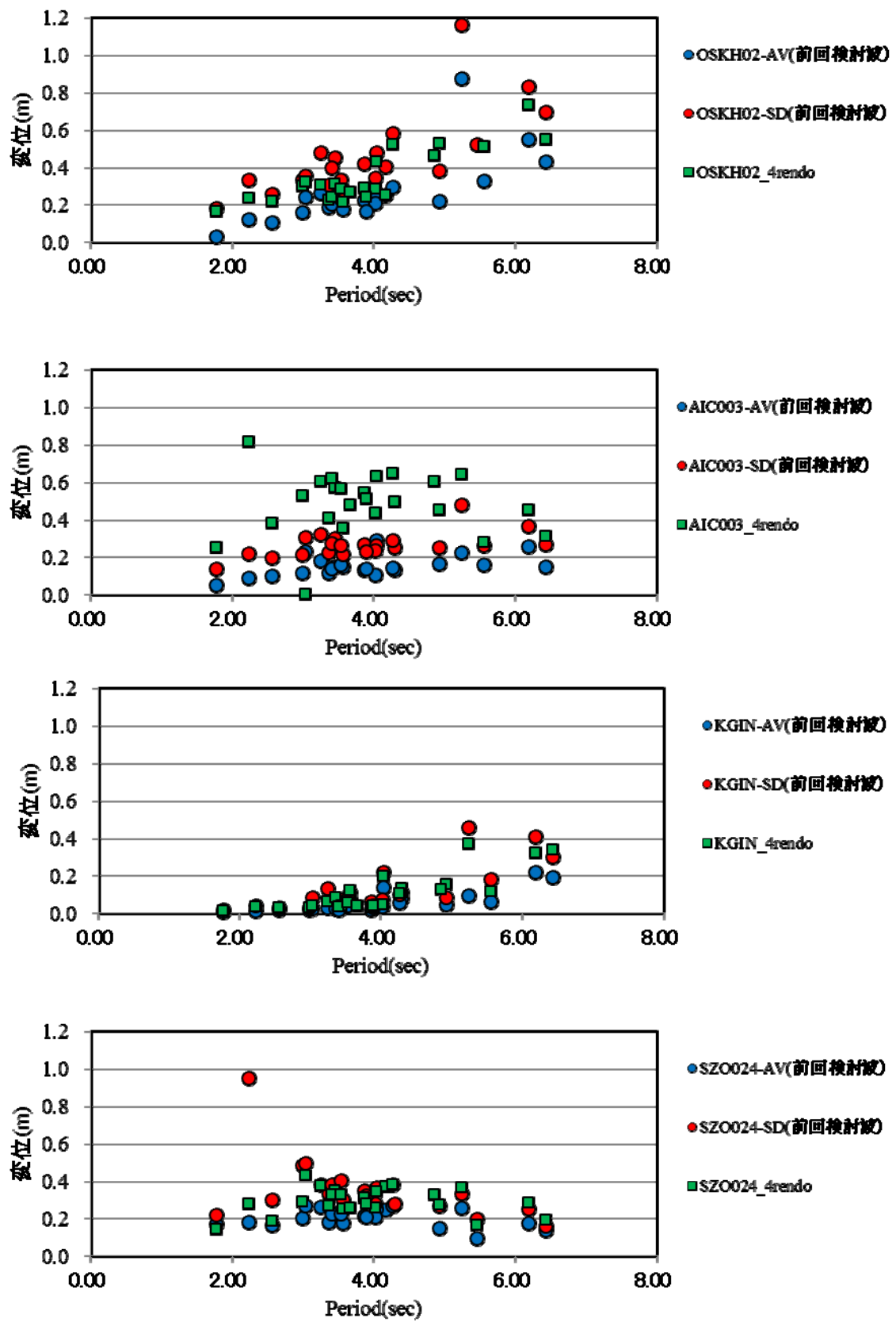


図 4.3-6 免震層の応答変位の前回との比較

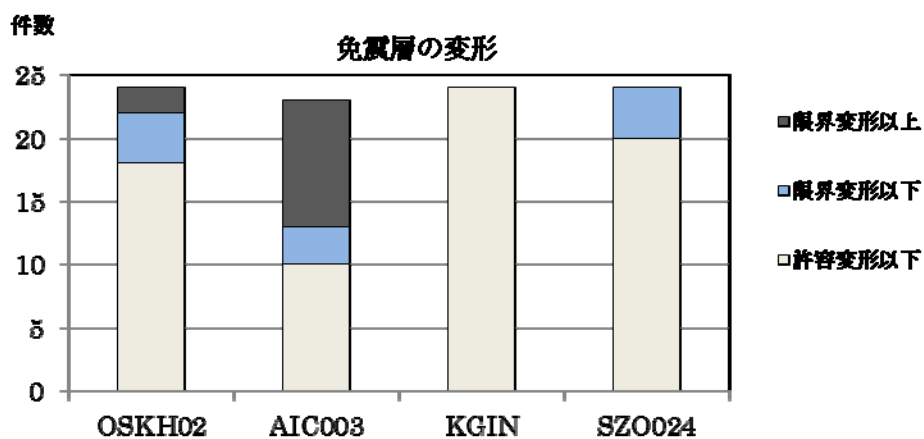
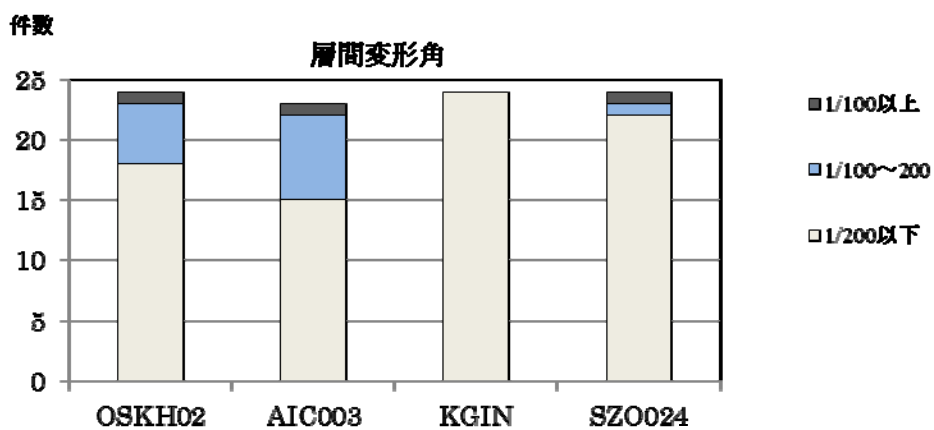
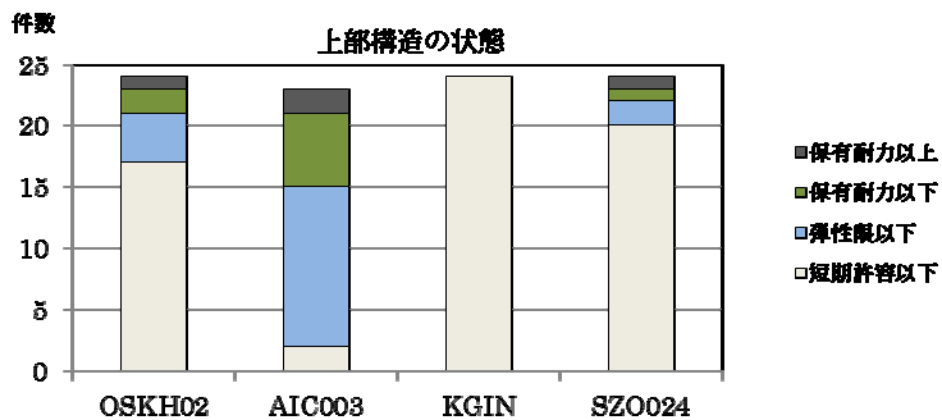


図 4.3-7 上部構造の状態、層間変形角および免震層の状態

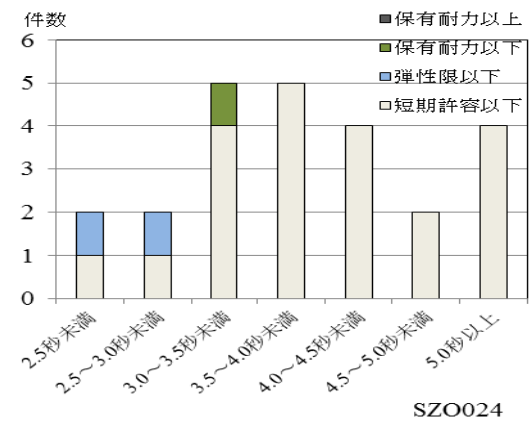
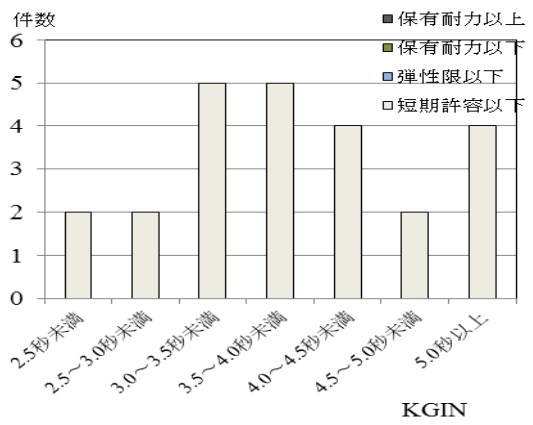
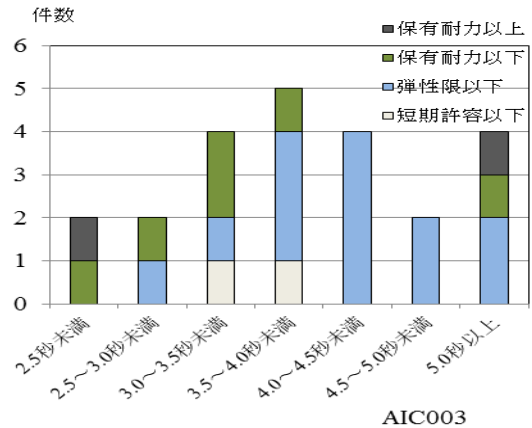
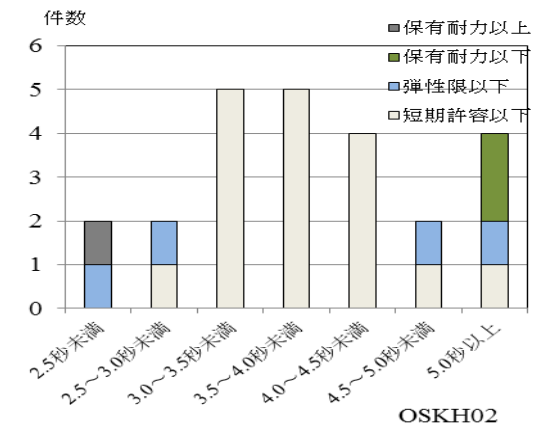


図 4.3-8 固有周期ごとの上部構造の状態

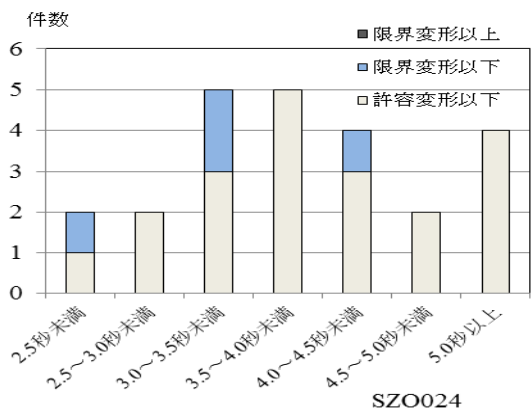
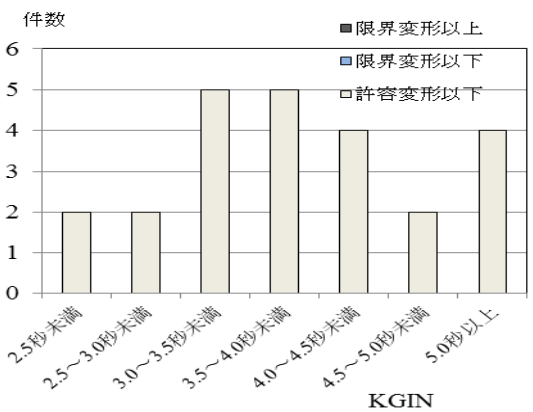
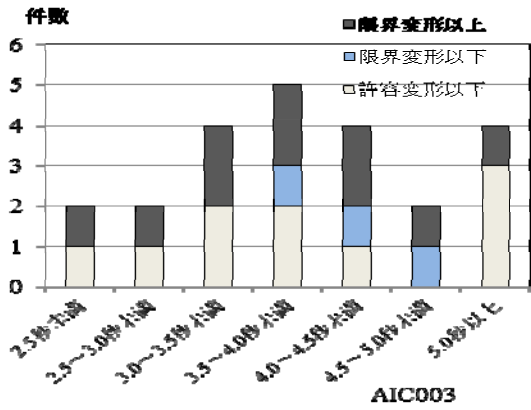
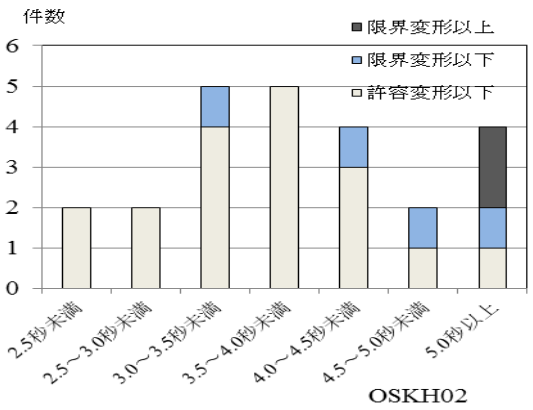


図 4.3-9 固有周期ごとの免震層の状態

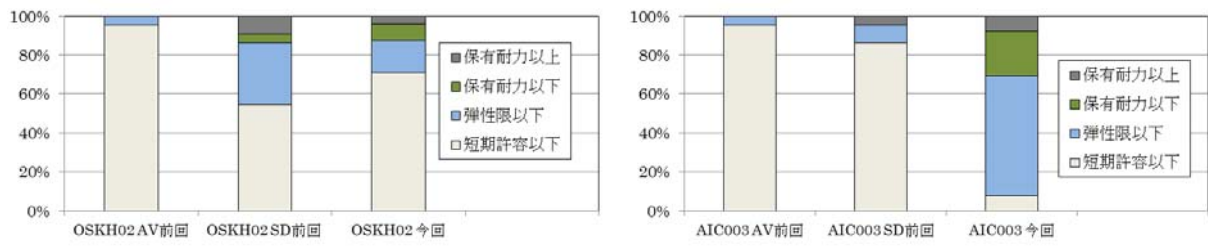


図 4.3-10 上部構造の状態の前回との比較

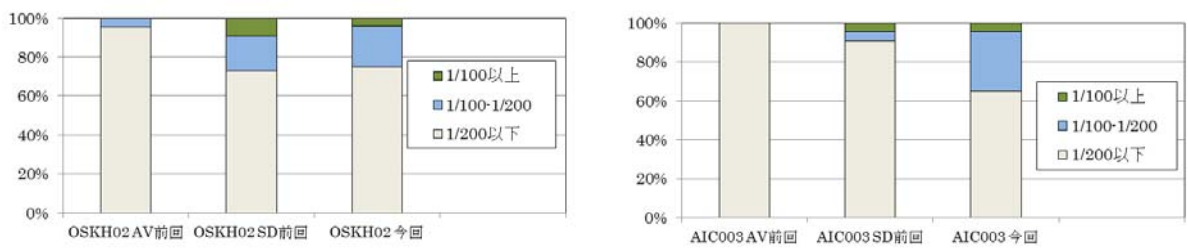


図 4.3-11 上部構造の層間変形角の前回との比較

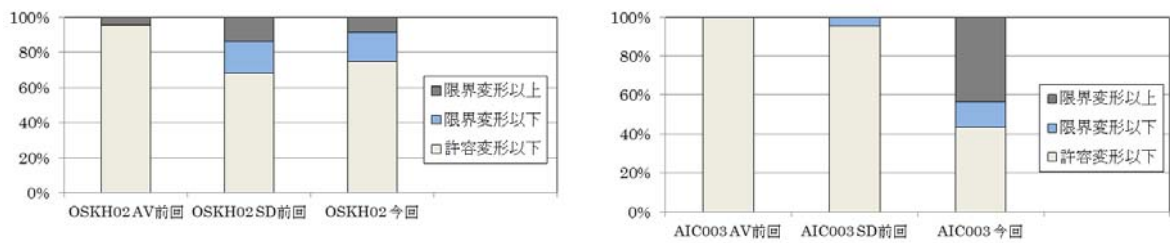


図 4.3-12 免震層の状態の前回との比較

4.4 エネルギー吸収に関する検討

長周期地震動は非常に継続時間が長く、免震部材で吸収するエネルギーは非常に大きくなる。これまでの知見では免震部材に長時間の繰返し変形が作用すると温度上昇を生じ、剛性や減衰性能が変動することが明らかになっている。また、履歴系のダンパーでは金属疲労によるクラックや破壊が生じる可能性もある。ここでは、モデル建物の免震部材が吸収したエネルギーを把握し、免震部材の状態に関して考察する。

(1) モデル建物の免震部材の吸収エネルギー量

検討にあたっては、建物モデル 24 棟の中から、すべての種類の免震部材を網羅できるように 12 棟を選択し、検討を行った。

これらの建物について、免震層の最大変位、最大速度、総変位距離、総吸収エネルギーを求めたほか、各免震部材ごとに吸収エネルギーや累積塑性変形などのエネルギー吸収に係わると思われる値を求めた。エネルギー吸収に係わる指標として、鉛プラグ入り積層ゴムでは、吸収エネルギー E を鉛プラグの体積 V_p で除した E/V_p とした。高減衰積層ゴムは E をゴム体積 V_r で除した E/V_r とした。また、すべり支承では総滑動距離、鋼材ダンパーや鉛ダンパーでは 1 台あたりの吸収エネルギー E の他に、累積塑性変形を求めた。オイルダンパーに関しては吸収エネルギー E とダンパーの鉄部の重量を示した。免震層の総変位距離に関しては、解析終了時（地震動継続時間 720 秒）のものと、免震層の吸収エネルギーが最終値の 95% になる時点のものを示した。これは、主要動の後の小さい揺れが継続する際に、履歴系のダンパーは弾性範囲となり減衰がなくなるために、弾性変形が長時間継続することにより総変位距離が大きくなってしまい、解析終了時の総変位距離は値としてあまり意味をなさないと思われることによる。

表 4.4-1 にエネルギー吸収量を一覧表にまとめたものを示す。図 4.4-1～図 4.4-6 に各免震部材ごとの単位体積あたりや 1 台あたりの吸収エネルギーを示す

LRB の鉛単位体積あたりの吸収エネルギーは AIC003 では非常に大きく、最大で $1121\text{N}/\text{mm}^2$ でありほとんどが $800\text{N}/\text{mm}^2$ 以上である。OSKH02 でも $400\sim 600\text{N}/\text{mm}^2$ となっている。

高減衰積層ゴムのゴム単位体積あたりの吸収エネルギーは AIC003 では $41\text{N}/\text{mm}^2$ と非常に大きく（I-2 棟は解析不能）、OSKH02 では $15\sim 20\text{N}/\text{mm}^2$ 程度となっている。

弾性すべり支承の総すべり距離は AIC003 では最大 30.2m と大きく、OSKH02 では 10m 程度となっている。

鋼材ダンパーの 1 台あたりの吸収エネルギーは AIC003 では最大 6,473kNm と非常に大きく、OSKH02 では 3,000kNm 程度となっている。

鉛ダンパーの 1 台あたりの吸収エネルギーは AIC003 では最大 5,261kNm と非常に大きく、OSKH02 では 1,000～2,000kNm 程度となっている。

オイルダンパーの 1 台あたりの吸収エネルギーは AIC003 では最大 75,292kNm と非常に大きく、OSKH02 では最大 40,000kNm 程度となっている。

表 4.4-1 エネルギー検討結果の一覧

記号	分類	軒高 (m)	免震システム	固有周期 (s)		α	地震動	免震層の総 吸収E (kNm)	V _e (m/s)	最大変位 (m)	総変位距離 (m)	E95%時 総変位量 (m)	LRB E/Vp (N/mm ²)	HDR E/Vr (N/mm ²)	滑り支承 総すべり 距離(m)	鋼材D E/台 (kNm)	鉛D E/台 (kNm)	オイルD E/台 (kNm)						
				基礎 固定	200% ひずみ																			
A-3	中高層 第3世代	34.6	HDR+NR	0.73	3.25	0.028	OSKH02	2.00.E+05	2.87	0.30	30.6	22.8		18.9										
							AIC003	4.33.E+05	4.22	0.60	55.3	44.6		41.0										
							KGIN	2.34.E+04	0.99	0.07	7.7	6.3		2.2										
B-3	低層 第3世代	13.0	NR+SL +オイル D	0.22	3.36	0.017	OSKH02	7.17.E+03	2.72	0.22	13.5	12.8			13.5			1.637						
							AIC003	2.14.E+04	4.69	0.41	30.2	27.9		30.2						6.328				
							KGIN	8.18.E+02	0.92	0.09	2.1	2.0		2.1						109				
C-4	超高層 第3世代	88.5	HDR+NR	2.27	4.39	0.028	SZ0024	6.30.E+03	2.55	0.27	10.3	9.9			10.3			1.667						
							OSKH02	7.47.E+04	3.41	0.53	16.9	13.9		134.0										
							AIC003	1.44.E+05	4.73	0.45	30.9	25.7		259.0										
D-2	中高層 第3世代	29.9	LRB+NR	0.86	3.45	0.032	KGIN	9.97.E+03	1.39	0.15	7.7	2.0												
							SZ0024	3.26.E+04	2.51	0.27	15.7	8.3		59.0										
							OSKH02	1.20.E+05	2.78	0.31	26.8	19.2		348.9										
E-2	中高層 第2世代	26.1	NR+鋼棒 D +鉛D	0.68	2.56	0.068	AIC003	2.70.E+05	4.18	0.57	44.6	36.6					596	679						
							KGIN	3.01.E+02	0.53	0.03	5.1	3.9							2.911	2.008				
							SZ0024	8.51.E+03	2.70	0.18	18.4	14.1								3	41			
F-3	中高層 第3世代	31.1	NR+SL	1.81	4.30	0.040	OSKH02	3.52.E+04	2.69	0.25	27.3	25.9			8.7									
							AIC003	7.38.E+04	4.06	0.50	46.0	43.7												
							KGIN	8.98.E+03	1.48	0.13	17.8	16.9												
G-4	中高層 第3世代	24.2	NR +オイル D	1.04	3.57	0.094	SZ0024	2.08.E+04	2.15	0.37	29.2	27.8			5.1									
							OSKH02	1.25.E+05	2.87	0.21	27.2	21.8									3.905			
							AIC003	3.51.E+05	4.82	0.35	43.5	34.0										10.970		
H-4	超高層 第3世代	60.4	NR+鉛D +鋼D	1.82	4.02	0.035	KGIN	2.62.E+04	1.31	0.12	14.3	12.3												
							SZ0024	8.69.E+04	2.40	0.25	18.4	12.9										818		
							OSKH02	5.32.E+04	0.04	0.28	16.5	13.1										2.715		
I-1	中低層 第2世代	31.3	HDR	0.50	3.04	0.030	AIC003	1.23.E+05	0.08	0.44	34.1	29.1					2.768	2.341						
							KGIN	6.54.E+03	0.01	0.05	6.1	4.8										6.415	5.261	
							SZ0024	3.63.E+04	0.02	0.26	16.4	13.4											98	384
J-1	中高層 第2世代	44.3	NR+CLB +オイルD +鋼D	1.10	4.27	0.020	OSKH02	3.43.E+04	2.82	0.32	47.3	23.1			14.9									
							AIC003	1.64.E+03	0.63	0.5以上														
							KGIN	3.46.E+04	2.91	0.04	24.4	22.4											15.0	
K-1	中高層 第3世代	59.99	NR+LRB +鋼D	1.05	3.67	0.039	OSKH02	4.31.E+05	2.85	0.52	30.7	23.3					2.964							
							AIC003	7.87.E+05	3.85	0.65	48.7	41.7											2.964	
							KGIN	8.88.E+04	1.29	0.10	14.1	11.6												5.460
K-2	中高層 第3世代	56.59	LRB+NR +SL+CLB +OD	0.97	4.85	0.032	SZ0024	2.25.E+05	2.06	0.38	21.6	16.2					1.383							
							OSKH02	1.48.E+05	2.76	0.27	22.5	17.0											2.267	
							AIC003	3.76.E+05	4.40	0.48	39.4	32.7												6473
							KGIN	9.37.E+03	0.69	0.04	5.5	3.8					27							
							SZ0024	1.20.E+05	2.48	0.26	19.3	13.5												1627
							OSKH02	1.92.E+05	2.89	0.46	26.9	20.3												8.030
							AIC003	3.71.E+05	4.02	0.61	42.4	35.6												
							KGIN	3.62.E+04	1.26	0.13	9.9	8.1												1.098.8
							SZ0024	1.04.E+05	2.13	0.33	19.4	12.8												156.6
							OSKH02	1.04.E+05	2.13	0.33	19.4	12.8												
							AIC003	1.04.E+05	2.13	0.33	19.4	12.8												312.3
							SZ0024	1.04.E+05	2.13	0.33	19.4	12.8												4.600

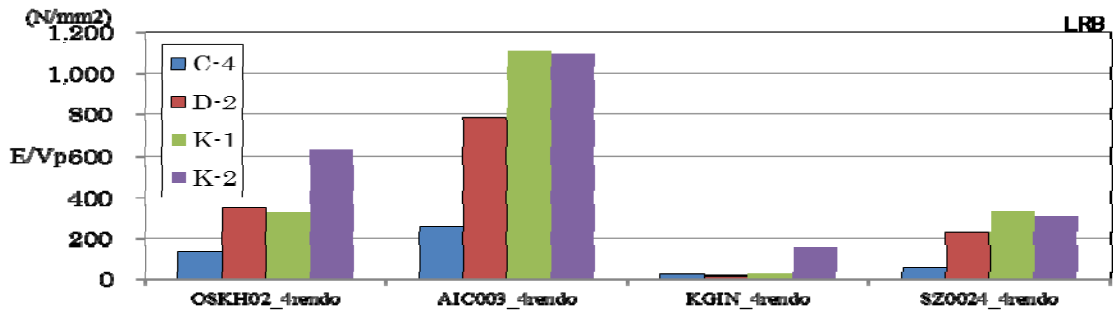


図 4.4-1 LRB のエネルギー吸収量

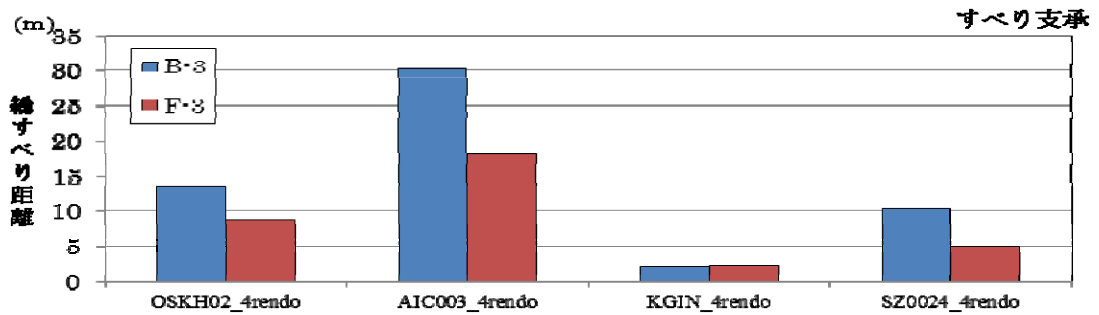
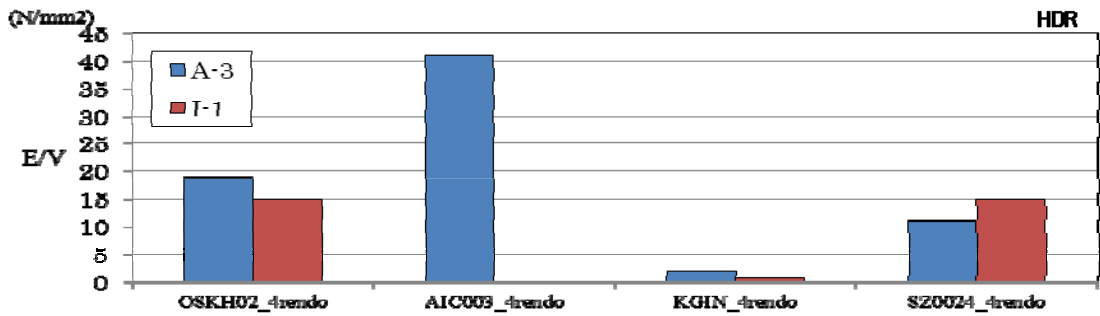


図 4.4-3 すべり支承の総すべり量

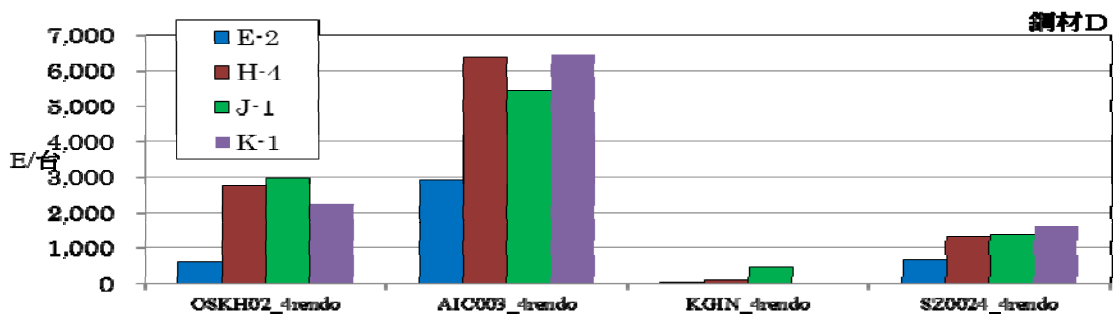


図 4.4-4 鋼材ダンパーのエネルギー吸収量

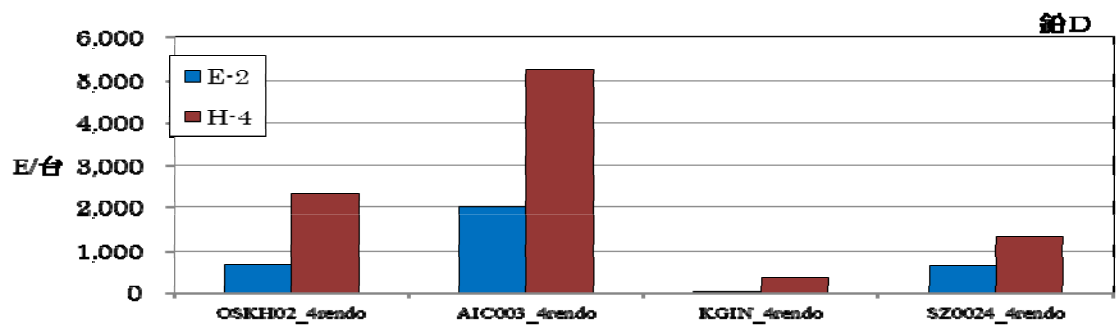


図 4.4-5 鉛ダンパーのエネルギー吸収量

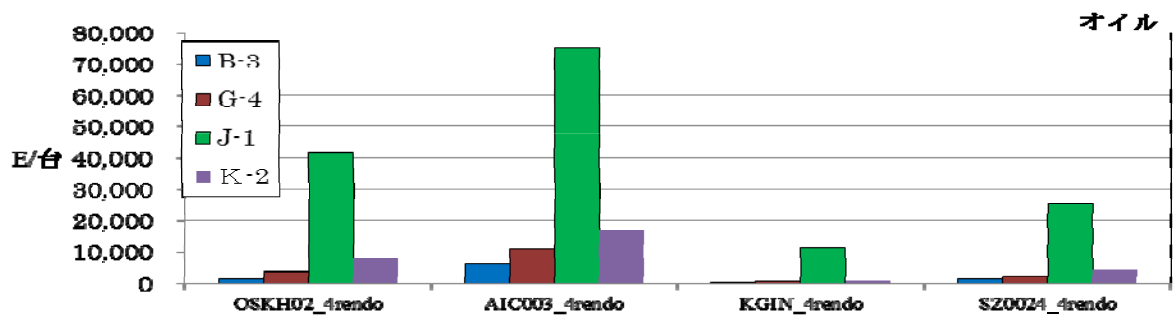


図 4.4-6 オイルダンパーのエネルギー吸収量

(2) 免震部材の吸収エネルギー量に対する考察

1) 鉛プラグ入り積層ゴム

既往の実験によると鉛プラグ入り積層ゴム(LRB)は長周期地震動により、破損等の損傷が生じることはないと考えられるが繰り返し加力による温度上昇に伴い、降伏荷重が低下する。これまでの研究によると、降伏荷重の低下率 ${}_{LRB}k_{min}$ は LRB が吸収するエネルギー ${}_{LRB}W_p$ を鉛プラグの体積 V_p で除した ${}_{LRB}W_p/V_p$ の関数として式 5.3-1 で評価できるとされている (T.Honma et al, 2010)。

$${}_{LRB}k_{min} = -0.06 + 1.25 \times \exp\left(-\frac{{}_{LRB}W_p}{V_p} \times \frac{1}{360}\right) \quad (4.4-1)$$

図 4.4-7 に実験結果と式 4.4-1 の比較を示す。なお、図中の(1)式は式 4.4-1 を意味する。

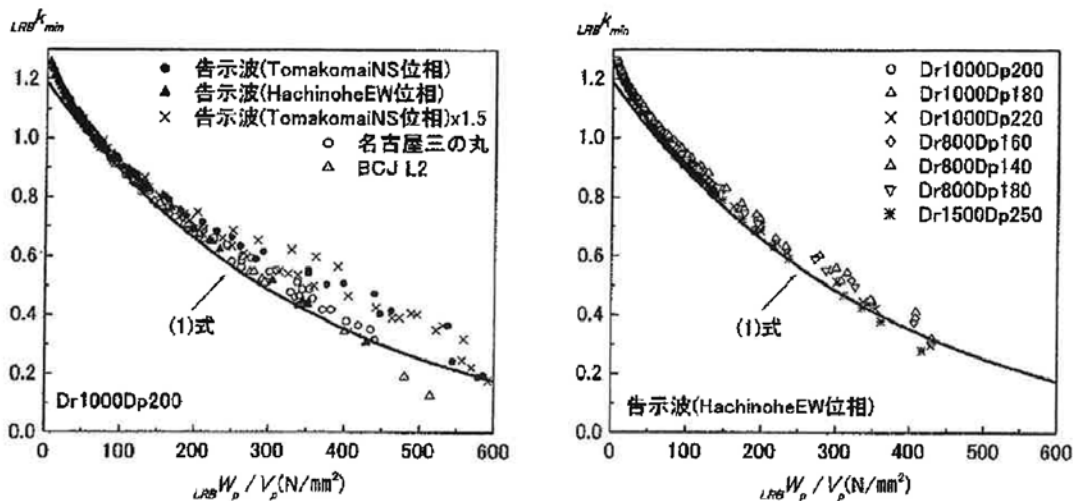


図 4.4-7 ${}_{LRB}k_{min}$ と ${}_{LRB}W_p$ の関係

今回の解析において、鉛単位体積当たりの吸収エネルギーは AIC003 では最大 1121N/mm^2 で、図 4.4-1 に示されている実験の範囲を超えてしまっている。また、OSKH02 でも 4 棟中 3 棟は $400\sim 600\text{N/mm}^2$ となっており、降伏荷重の低下率 ${}_{LRB}k_{min}$ は 0.2 程度になっている。このことから、AIC003 や OSKH02 では降伏荷重の低下を考慮すると変位はかなり大きくなると思われる。そこで、モデル建物 D-2 の降伏荷重の低下を考慮した検討を行った。

繰り返し加力による鉛プラグの温度上昇に伴い、LRB の降伏荷重が低下する特性を考慮した地震応答解析方法として、熱伝導解析を行いながら鉛プラグ部の温度によって LRB の降伏荷重 Q_d を変化させながら行う手法がある (竹中他、2008)。また、簡便に応答変位の増大を予測する応答予測式も提案されている (嶺脇、2011) 他。以下にその 2 つの手法を用いた検討結果を示す

a) 熱伝導解析により降伏荷重が低下する特性を考慮した時刻歴応答解析

このモデル建物は 8 階建てだが、解析の都合で 1 質点系として検討した。鉛プラグ入り積層ゴムはゴム種 G4、外径 $\phi 800\text{mm}$ とし、免震周期 T_f やダンパーの降伏せん断力係数 α_s が 8

階建てモデルと同等になるように設定した。

表 4.4-2(a) 対象建物諸元

上部構造 重量 (kN)	LRB 平均面圧 (N/mm ²)	LRB φ 800 基数	Tf (sec)	α s
320600	13.6	49.4	4.84	0.033

Tf: ゴム剛性による免震周期
α s: 鉛プラグ降伏せん断力係数

表 4.4-2 (b) 積層ゴム諸元 (1 基当たり)

ゴム種類	外径 (mm)	鉛径 (mm)	ゴム総厚 (mm)
G4	800	180	168

表 4.4-3、図 4.4-7 に鉛プラグの温度上昇による特性変化について非考慮とした場合、考慮した場合についての結果を示す。解析において初期温度は 15℃とした。

鉛プラグの温度上昇による降伏荷重の低下を考慮した場合の免震層水平変位は、考慮しない場合と比較して 0.77~2.63 倍、免震層における吸収エネルギーは 0.86~1.40 倍となった。ただし愛知・津島での地震動 (AIC003) では温度上昇を考慮した場合の鉛プラグの温度上昇が実験で確認されている 200℃を超えているため解析対象範囲外と考えられる。

大阪・此花(OSKH02)の場合、入力地震動の周期特性として 4 秒以降 6 秒程度にかけて大きなピークを持つことから、温度上昇による降伏荷重の低下とそれに伴う周期変化における入力増大の相乗効果により応答値の増大率が大きくなったものと考えられる。非考慮の場合は許容変位以下となっているが、降伏荷重の低下を考慮すると限界変位を超えてしまっている。

表 4.4-3(a) 地震応答解析結果 (免震層水平変位)

入力 地震動	免震層水平変位(cm)		
	非考慮時	考慮時	考慮/非考慮
OSKH02	28.5	74.8	2.63
AIC003	59.6	89.0*1	1.49*1
SZO024	32.9	38.6	1.17
KGIN	4.7	3.6	0.77

*1 解析適用範囲外のため参考値

表 4.4-3(b) 地震応答解析結果 (免震層吸収エネルギー)

入力 地震動	免震層吸収エネルギー(kN.m)		
	非考慮時	考慮時	考慮/非考慮
OSKH02	1.141x10 ⁵	1.602x10 ⁵	1.40
AIC003	2.801x10 ⁵	2.324x10 ⁵ *1	0.83*1
SZO024	9.222x10 ⁴	8.917x10 ⁴	0.97

KGIN	5.643×10^3	4.839×10^3	0.86
------	---------------------	---------------------	------

*1 解析適用範囲外のため参考値

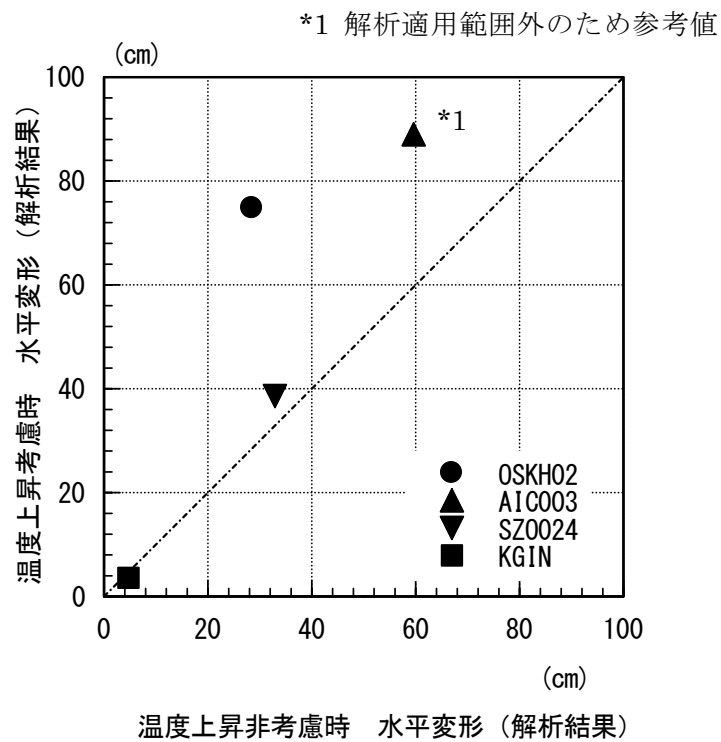
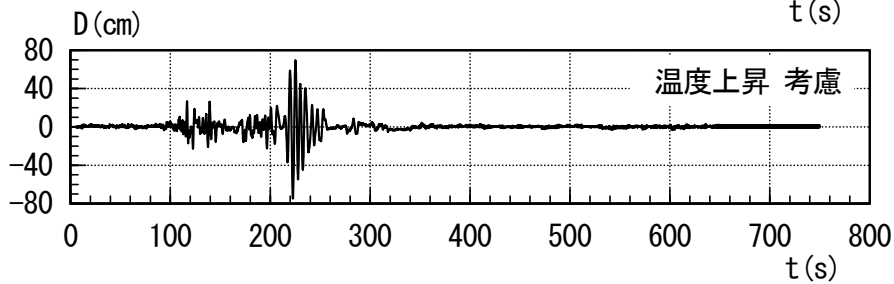
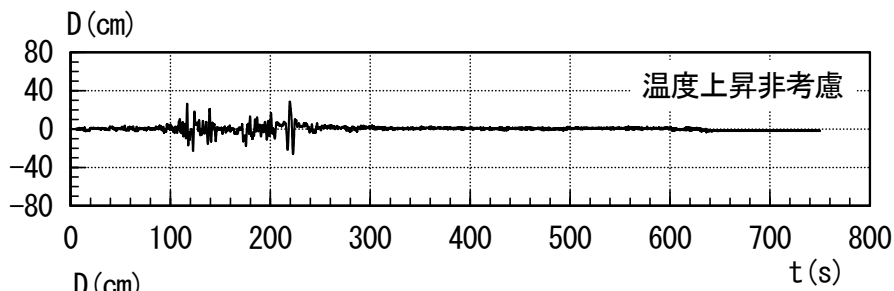


図 4.4-7 免震層水平変位解析結果

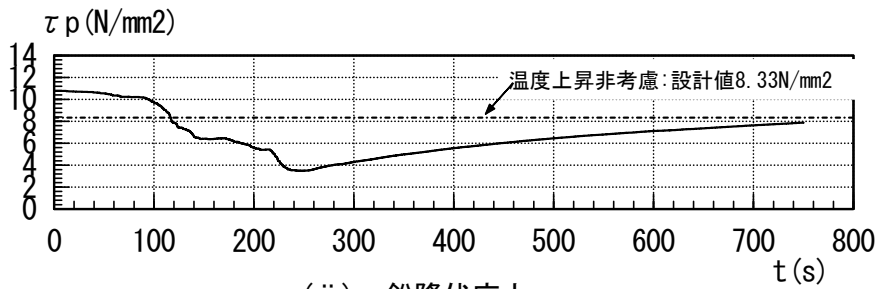
図 4.4-8(a)～図 4.4-8(d)に各入力地震動における解析結果を示す。

- 図 4.4.8(a) 地震応答解析結果(OSKH02)
- 図 4.4.8(b) 地震応答解析結果(AIC003)
- 図 4.4.8(c) 地震応答解析結果(SZ0024)
- 図 4.4.8(d) 地震応答解析結果(KGIN)

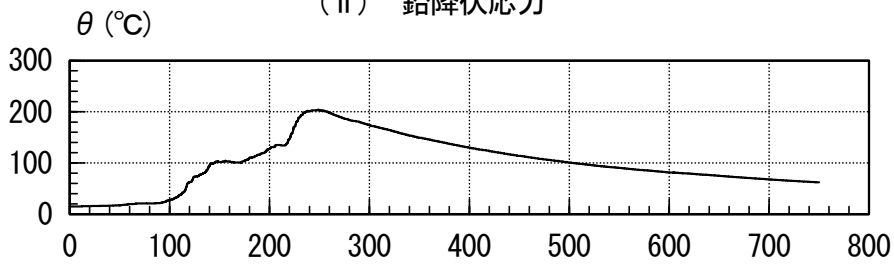
図中、(i) 免震層水平変位時刻歴、(ii) 鉛降伏応力時刻歴、(iii) 鉛プラグ平均温度時刻歴、(iv) 免震層荷重変形関係を示す。



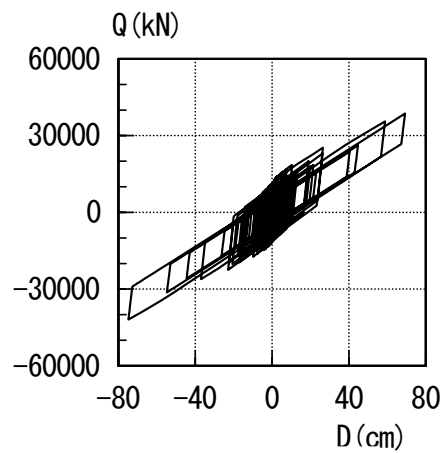
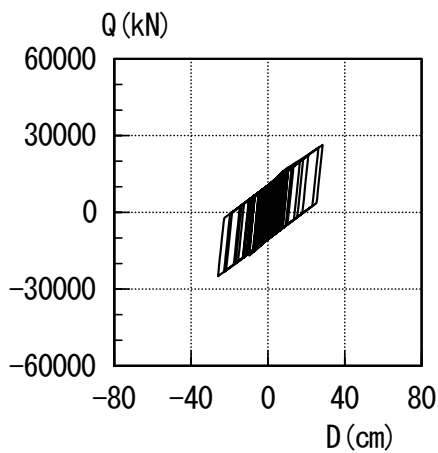
(i) 免震層水平変位



(ii) 鉛降伏応力

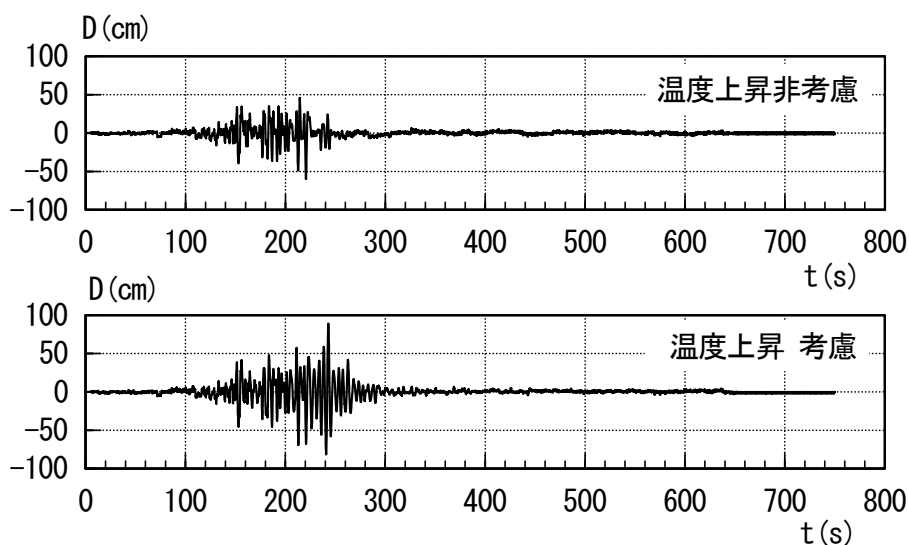


(iii) 鉛プラグ平均温度

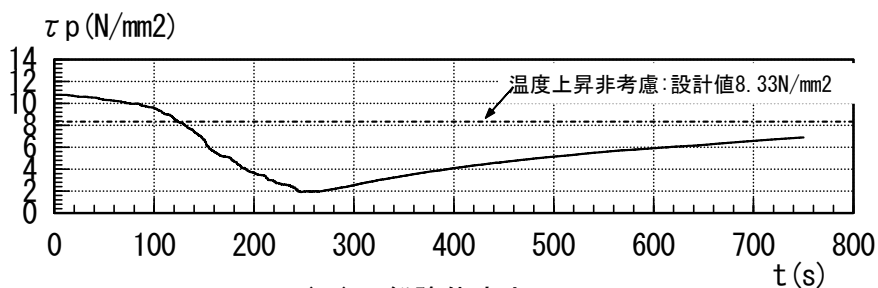


(iv) 荷重変形関係

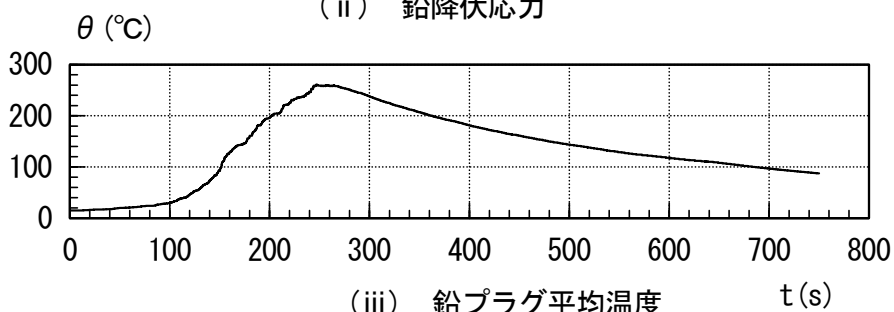
図 4.4-8(a) 地震応答解析結果(OSKH02)



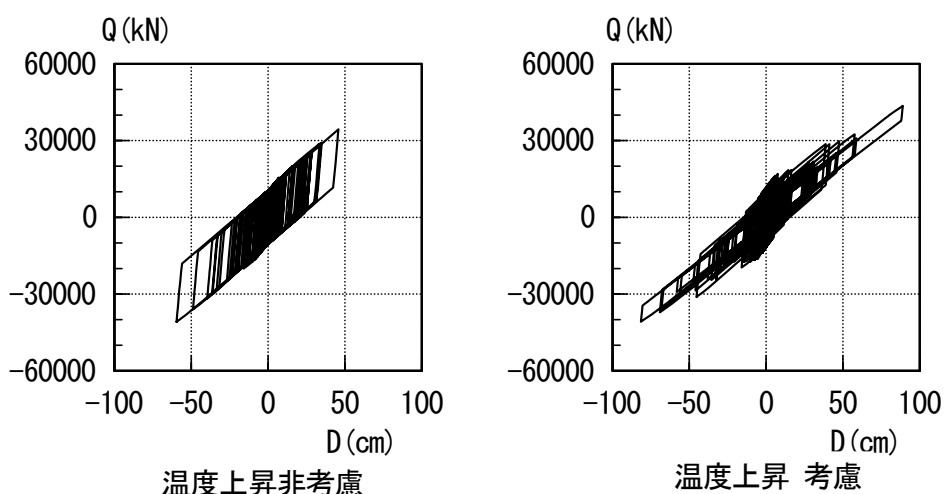
(i) 免震層水平変位



(ii) 鉛降伏応力

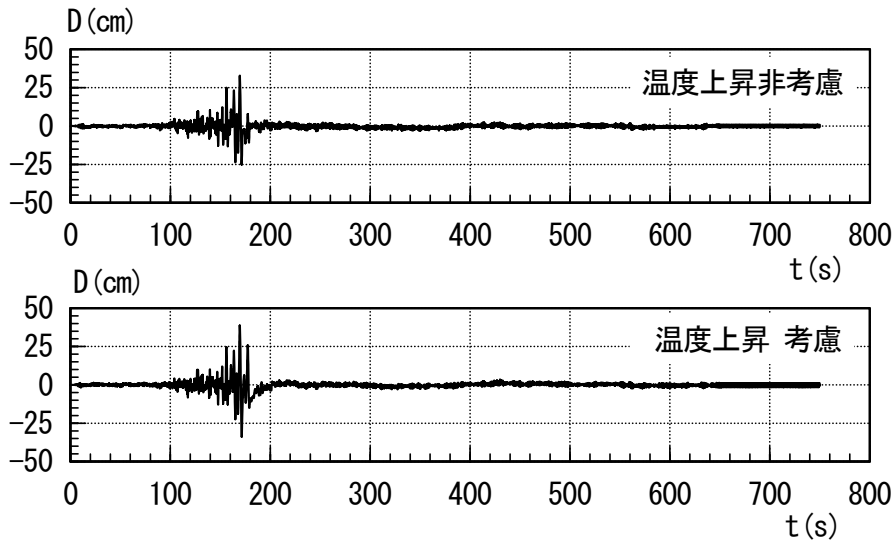


(iii) 鉛プラグ平均温度

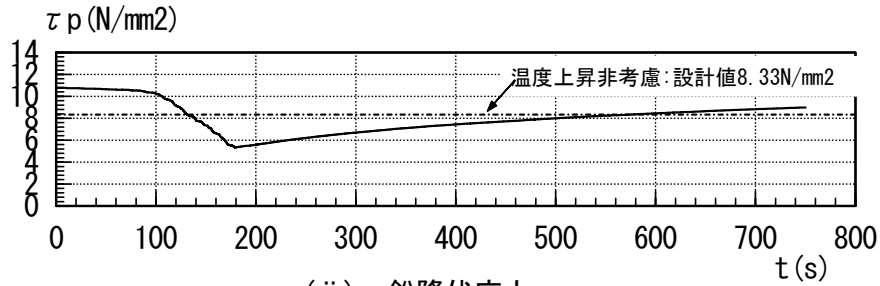


(iv) 荷重変形関係

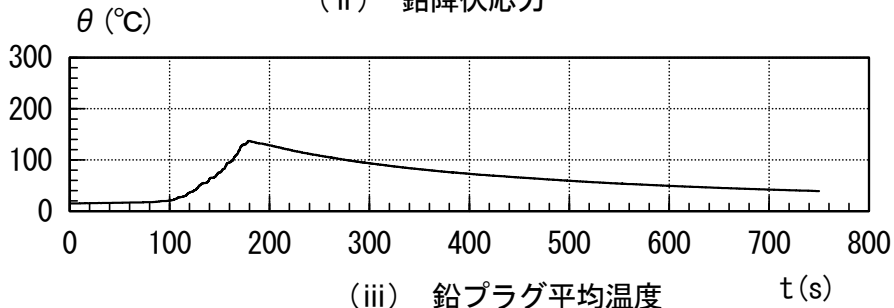
図 4. 4-8 (b) 地震応答解析結果 (AIC003)



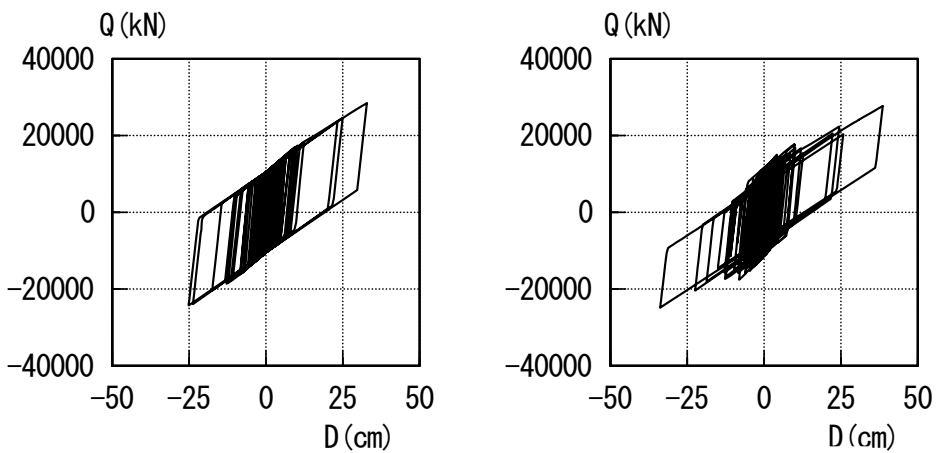
(i) 免震層水平変位



(ii) 鉛降伏応力

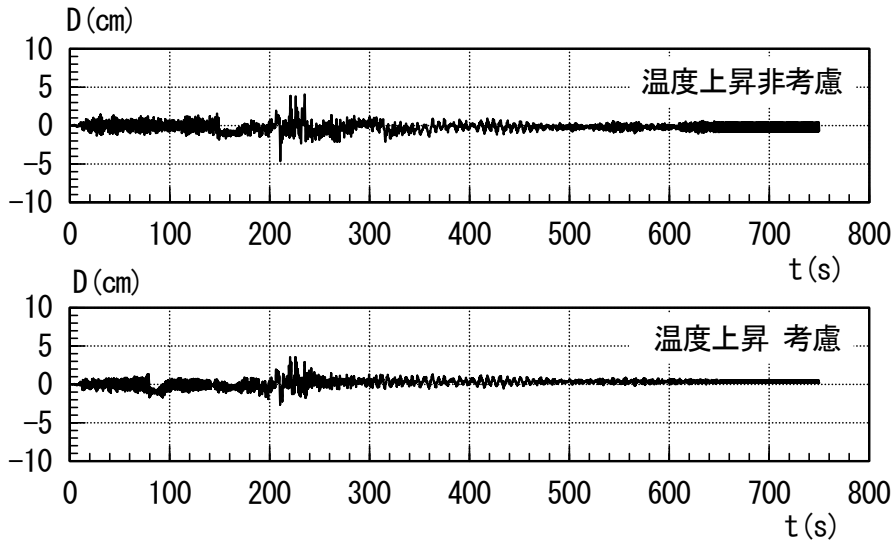


(iii) 鉛プラグ平均温度

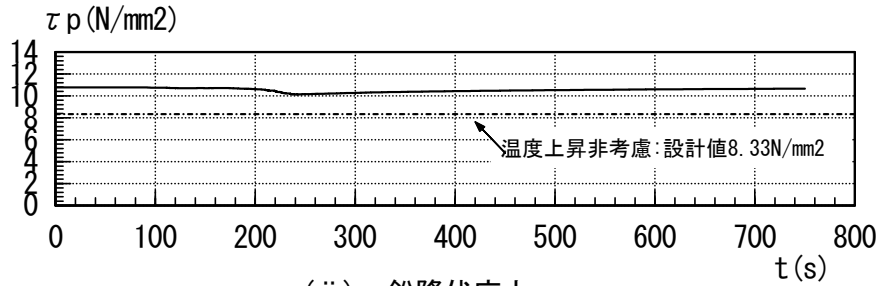


(iv) 荷重変形関係

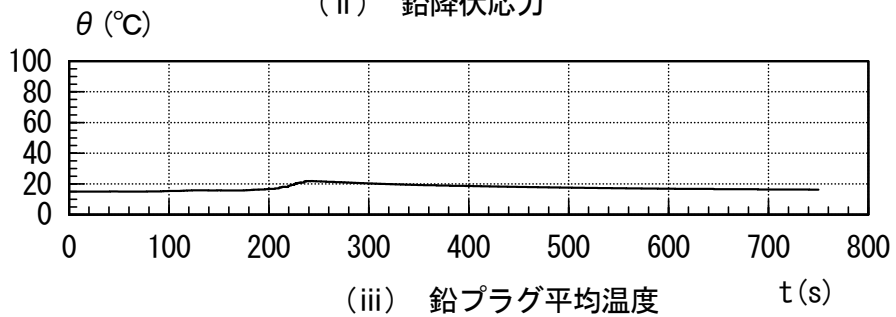
図 4.4-8(c) 地震応答解析結果(SZ0024)



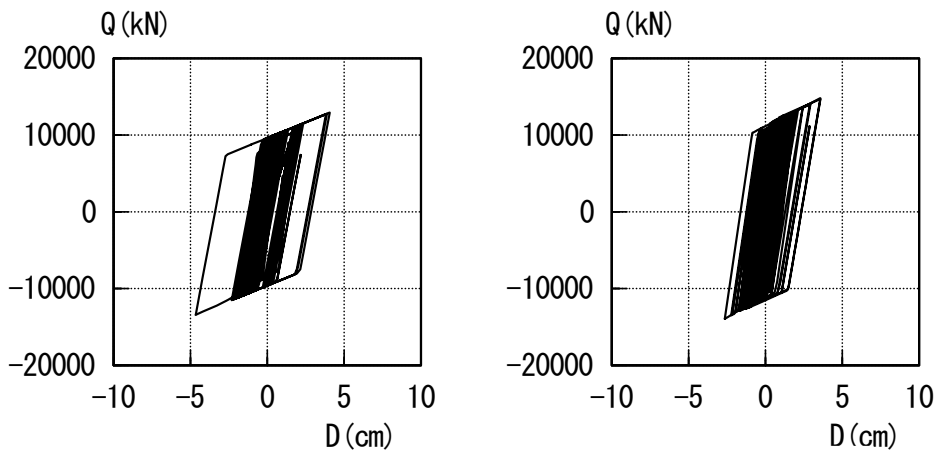
(i) 免震層水平変位



(ii) 鉛降伏応力



(iii) 鉛プラグ平均温度



(iv) 荷重変形関係

図 4. 4-8(d) 地震応答解析結果(KGIN)

b) 応答予測式による検討

表 4. 4-4、図 4. 4-9 に式(4. 4-1)より得られる単位体積当たりのエネルギー吸収量($LRB W_p/V_p$)と LRB 降伏荷重低下率 ($LRB k_{min}$) の値を示す。

表 4. 4-4 解析結果と予測式との比較 (免震層水平変位)

	$LRB W_p/V_p$ (N/mm ²)	$LRB k_{min}$
OSKH02	293.6	0.493
AIC003	720.9*1	0.109*1
SZO024	237.3	0.587
KGIN	14.5	1.141

*1 解析適用範囲外のため参考値

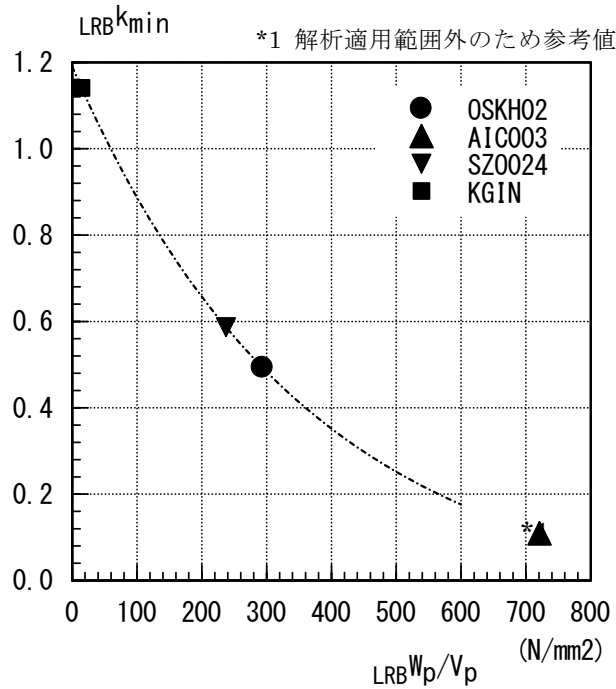


図 4. 4-9 単位体積当たりエネルギー吸収量と降伏荷重低下率

表 4. 4-5、図 4. 4-10 に温度上昇考慮時の免震層の水平変位について、地震応答解析結果と応答予測式による評価結果とを比較して示す。

応答予測式における免震層最大応答の評価においては鉛プラグ入り積層ゴムの温度上昇を考慮した場合の入力エネルギーと考慮しない場合の入力エネルギーを同量と仮定してエネルギーの釣り合いによる応答評価法を適用して、温度上昇を考慮した場合の免震層最大変位 δ'_{max} を温度上昇による特性変化を考慮しない時刻歴応答解析から得られた免震層最大変位 δ_{max} および降伏荷重 Q_d の低下率 $LRB k_{min}$ と LRB の全履歴吸収エネルギー $LRB W_p$ 、及び免震層積層ゴムによる剛性 k_f から、次式により予測する^{4.1)}。

$$\delta'_{\max} = \frac{1}{k_f} \left\{ -\frac{(1+LRB k_{\min}) LRB W_p}{2\delta_{\max}} + \sqrt{\left(\frac{(1+LRB k_{\min}) LRB W_p}{2\delta_{\max}}\right)^2 + k_f^2 \cdot \delta_{\max}^2 + 2k_f \cdot LRB W_p} \right\} \quad (4.4-2)$$

表 4.4-5 解析結果と予測式との比較（免震層水平変位）

	免震層水平変位(cm)		
	地震応答 解析結果	予測式による 評価	予測式 解析結果
N-OSKH02_AV	74.8	38.1	0.51
N-OSKH02_SD	89.0*1	107.3*1	1.21*1
T-TN-AIC003_AV	38.6	41.4	1.07
T-TN-AIC003_SD	3.6	4.4	1.22

*1 解析適用範囲外のため参考値

*

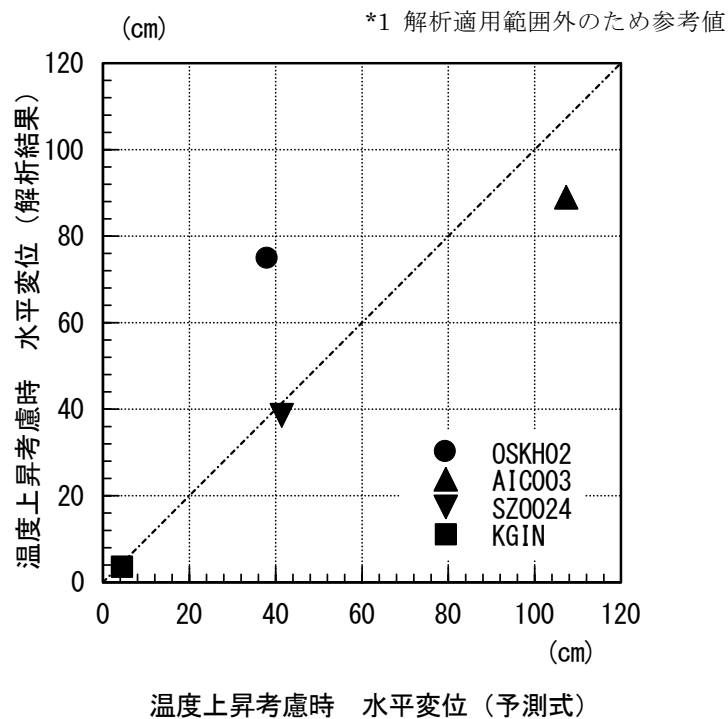


図 4.4-10 免震層水平変位比較

c) 結果のまとめ

免震装置として鉛プラグ入り積層ゴム (LRB) を適用した免震建物を対象として、鉛プラグの温度上昇による降伏荷重の低下を考慮した地震応答解析を実施し、その影響評価を行った。対象とした入力地震動において、降伏荷重の低下を評価した場合には評価しない場合と比較して、免震層の水平変位が 0.77~2.63 倍程度となった。ただし愛知・津島での地震動では温度上昇を考慮した場合の鉛プラグの温度上昇が大きく、免震層の水平変位が 80cm ($\gamma=400\%$) を超えているため解析対象範囲外である。水平変位の増大率が大きい大阪・此花 (OSKH2) の地震動については入力地震動の周期特性の影響が大きいと考えられる。また、降伏荷重の低下を考慮した場合の免震層水平変位の予測式による評価と地震応答解析による評価は大阪・此花 (OSKH02) の地震動を除いてほぼ一致している。

2) 高減衰積層ゴム

既往の実験によると高減衰積層ゴムも LRB と同様に長周期地震動により、破損等の損傷が生じることはないと考えられるが繰り返し加力による温度上昇に伴い、等価剛性や等価減衰定数が低下する。平成 24 年度基準整備事業 27-3 では、等価剛性の低下率や等価減衰定数の低下率は高減衰積層ゴムが吸収するエネルギー E (地震終了時) を高減衰積層ゴムの体積 V で除した E/V に基づいて低減することで、簡易的に温度上昇による影響を考慮した応答評価ができるとしている。表 4.4-6 に提案されている低減率を示す。

表 4.4-6 繰返し依存性を考慮した低減率

	$5\text{N/mm}^2 \geq E/V \geq 10\text{N/mm}^2$	$10\text{N/mm}^2 \geq E/V \geq 30\text{N/mm}^2$	$E/V \geq 30\text{N/mm}^2$
等価剛性	-5%	-10%	-
等価減衰定数	-	-5%	-5%

モデル建物 A-3 についてこの手法に基づいて検討した結果を以下に示す。

表 4.4-7 に A-3 建物の E/V の値及び低減率を示す。これに基づき解析した結果を、繰返しの影響を考慮しない場合ともに、表 4.4-8 に示す。なお、KGIN は低下の影響がないため検討を行わない。

表 4.4-7 A-3 建物の E/V および低減率

地震動	OSKH02	AIC003	KGIN	SZ024
E/V (N/mm ²)	18.9	41.0	2.2	11.0
等価剛性低減率	-10%	-15%	-	-10%
等価減衰定数低減率	-5%	-5%	-	-5%

表 4.4-8 地震応答解析結果（免震層水平変位）

入力 地震動	免震層水平変位(cm)		
	非考慮時	考慮時	考慮/非考慮
OSKH02	30.3	40.4	1.33
AIC003	60.4	解析不能	-
SZO024	37.6	40.1	1.07

繰返しによる影響を考慮した場合、OSKH02 で 1.33 倍に応答変位が大きくなり、AIC003 では積層ゴムのひずみが大きくなりモデルの適用範囲を超えたため解析できなかった。この検討は簡易的なものであり、地震終了時の吸収エネルギーにより剛性や減衰を低下させるという非常に安全側の評価であるが、高減衰積層ゴムでも繰返しによる影響はかなり大きいと考えられる。

3) 弾性すべり支承

弾性すべり支承には、高摩擦タイプ（摩擦係数 $\mu=0.13$ 程度）、中摩擦タイプ（ $\mu=0.075$ 程度）、低摩擦タイプ（ $\mu=0.015$ 程度）の 3 タイプある。これまでに、それぞれのタイプの弾性すべり支承の繰返し実験が行われているが、いずれも繰返しによりすべり材の温度が上昇し、それにもとない摩擦係数が変動している。本検討では、モデル B-3 は低摩擦、モデル F-3 は中摩擦を使用している。

図 4.4-11 に低摩擦タイプの累積すべり変位と摩擦係数の関係を示す（嶺脇他、2011）。繰返しにより摩擦係数は低下するが、40 サイクル（累積すべり変位 24m）程度からは安定している。低下した摩擦係数は設計値の約 70%程度である。図 4.4-12 に中摩擦タイプの累積すべり変位と摩擦係数の関係を示す。累積変位が 10 m 程度まで、急激に摩擦係数が低下し約 70%程度となるが、10 m を越えると低下は著しく減少する。また、時間をおいて再度加振すると特性はほぼ、元に戻っている。

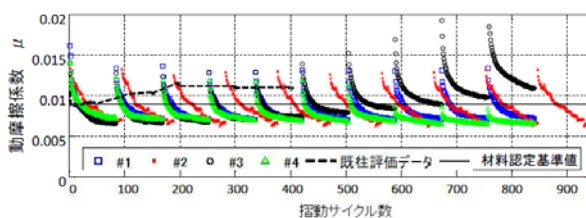


図 4.4-11 累積すべり変位と摩擦係数
(低摩擦)

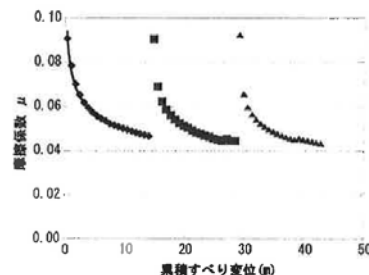


図 4.4-12 累積すべり変位と摩擦係数
(中摩擦)

今回の解析において、累積すべり距離は低摩擦タイプの B-3 モデルで OSKH02 で 13.5m、AIC003 で 30.2m となっている。図 4.4-11 より摩擦係数の低下はややあるが、低摩擦タイプは摩擦係数が非常に小さく、すべり支承が建物の減衰性能に占める割合は非常に小さいため応答には大きな影響はないものと思われる。中摩擦タイプの F-3 モデルでは OSKH02 で 8.7m、AIC003 で 13.2m となっている。図 4.4-12 より摩擦係数は 50%程度まで小さくなっており、これを考慮すると応答変位はかなり大きくなると思われる。

4) 鋼材ダンパー

鋼材ダンパーは鋼材の塑性変形によりエネルギーを吸収するものであり、長時間の繰り返し荷重をうけると疲労破壊する。疲労特性については、定振幅繰り返し荷重試験をもとに疲労曲線が求められており、ダンパーの時刻歴応答変位をもとにマイナー則により疲労予測を行うことが出来る。U型ダンパーの疲労曲線を図 4. 4-13 に示す。

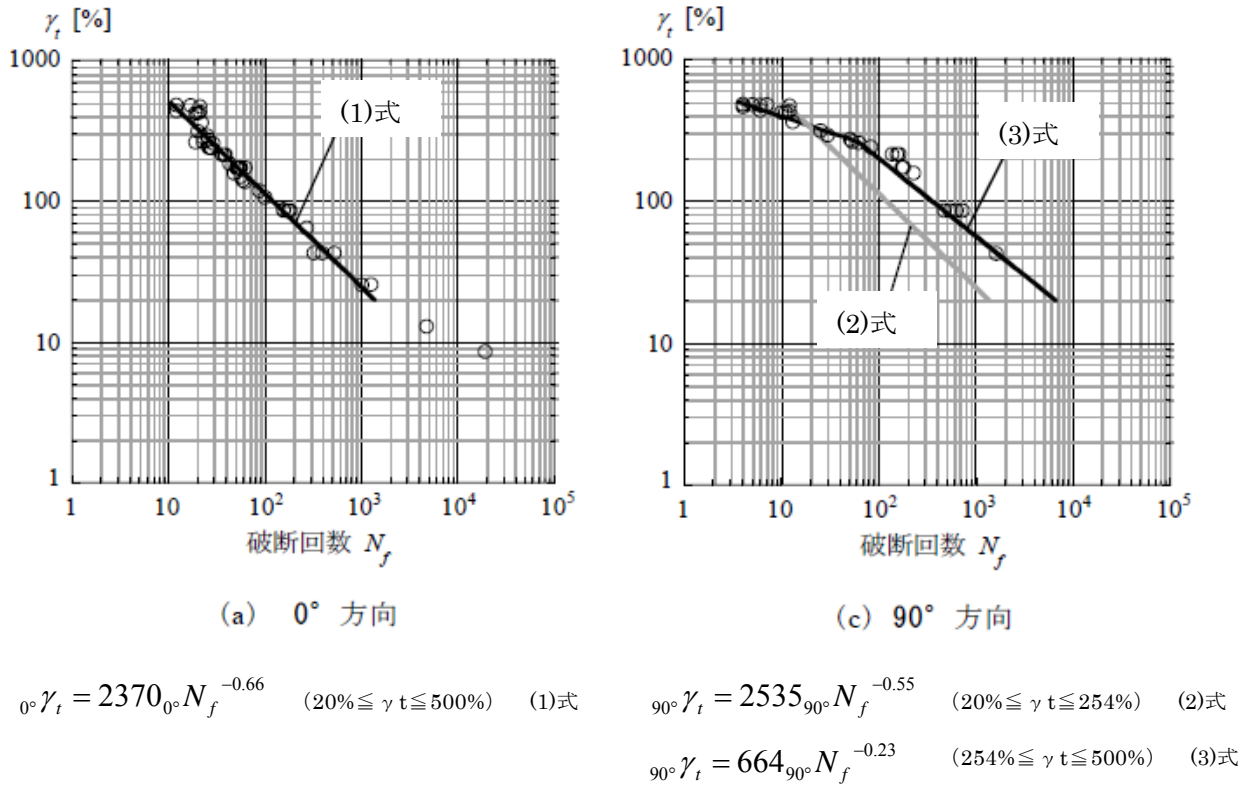


図 4. 4-13 U型ダンパーの疲労曲線(吉敷他、2012)

また、鋼棒ダンパーの疲労曲線の式を下記に示す。

接線方向 $y=49450 \cdot 1.930$ 中心方向 $y=36010 \cdot 2.062$

ここにおいて、y=破断までの繰り返し回数 x=方振幅(cm) である。

ダンパーの時刻歴応答変位をレインフロー法により、振幅毎のサイクル数を計数し、振幅毎の疲労損傷度 Di を下式により算定する。その後、全振幅に渡り Di を累積しダンパーの疲労損傷度を求める。

$D_i = n_i / N_i$

Di : 振幅 δi における疲労損傷度

ni : 時刻歴応答変位に含まれる振幅 δi のサイクル数

Ni : 振幅 δi における破断までの繰り返し回数 (疲労曲線の各式により算定)

今回の解析モデルによる検討結果に対する累積疲労損傷度の結果を表 4. 4-9 に示す。

表 4. 4-9 鋼材ダンパーの累積疲労損傷度

モデル名	H-4			
地震動	OSKH02	AIC003	KGIN	SZO024
免震層の最大変位(cm)	28.4	51.4	4.7	26.6
ダンパー	UD45×4			
疲労曲線	0 度方向			
D 値	0.182	0.453	0.032	0.034
モデル名	J-1			
地震動	OSKH02	AIC003	KGIN	SZO024
免震層の最大変位(cm)	52.1	64.8	10.4	38.4
ダンパー	UD45×4			
疲労曲線	0 度方向			
D 値	0.355	0.686	0.082	0.200
モデル名	J-1			
地震動	OSKH02	AIC003	KGIN	SZO024
免震層の最大変位(cm)	52.1	64.8	10.4	38.4
ダンパー	UD50×4			
疲労曲線	0 度方向			
D 値	0.277	0.534	0.155	0.064
モデル名	K-1			
地震動	OSKH02	AIC003	KGIN	SZO024
免震層の最大変位(cm)	27.0	47.7	3.9	25.9
ダンパー	UD45×4			
疲労曲線	0 度方向			
D 値	0.170	0.470	0.025	0.143
モデル名	E-4			
地震動	OSKH02	AIC003	KGIN	SZO024
免震層の最大変位(cm)	21.9	37.9	2.8	18.5
ダンパー	70φR285(L)			
疲労曲線	中心方向			
D 値	0.052	0.327	0.003	0.055

鋼材ダンパーの累積疲労損傷度は OSKH02 で最大 0.355、AIC003 で最大 0.686 とかなり大きい
が 1.0 以下となっており破断には至っていない。

鋼材ダンパーも繰返し変形を受けるとやや降伏耐力は低下するが、その程度は小さく、特に
考慮する必要はないと思われる。

5) 鉛ダンパー

鉛ダンパーは鉛の塑性変形によりエネルギーを吸収するものであり、長時間の繰り返し載荷をうけると破断する。破断と繰り返し回数の関係については、定振幅繰り返し載荷試験をもとに式が求められており、ダンパーの時刻歴応答変位をもとにマイナー則により疲労予測を行うことが出来る。

図 4.4-14 に鉛ダンパーの振幅と破断時繰り返し回数の関係を示す。鉛ダンパーには U180 タイプと U2426 タイプがあるが、ダンパー種類にかかわらず破断時繰り返し回数は図中の式で表現できる。

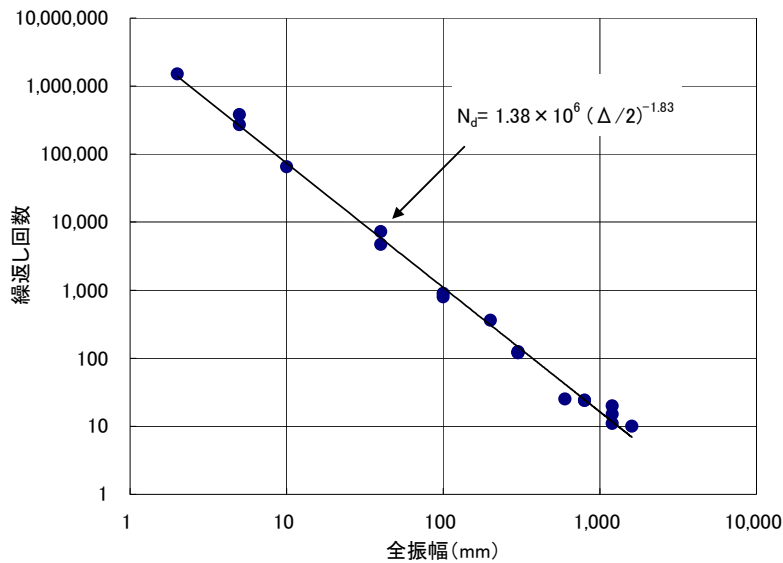


図 4.4-14 鉛ダンパーの疲労曲線

鋼材ダンパーと同様の方法で今回の解析モデルによる検討結果に対する、鉛ダンパーの累積疲労損傷度の結果を表 4.4-10 に示す。

表 4.4-10 鋼材ダンパーの累積疲労損傷度

モデル名	E-2			
地震動	OSKH02	AIC003	KGIN	SZO024
免震層の最大変位(cm)	21.9	37.9	2.8	18.5
ダンパー	U180			
D 値	0.061	0.294	0.006	0.065
モデル名	H-4			
地震動	OSKH02	AIC003	KGIN	SZO024
免震層の最大変位(cm)	28.4	43.7	4.7	25.6
ダンパー	U2426			
D 値	0.119	0.365	0.011	0.076

鉛ダンパーの累積疲労損傷度は OSKH02 で最大 0.119、AIC003 で最大 0.365 とやや大きい
が 1.0 以下となっており破断には至っていない。

鉛ダンパーは繰返し変形を受けると発熱の影響で降伏耐力が低下する。図 4.4-15 に実験に鉛
ダンパーの累積吸収エネルギーと降伏荷重の変化率を示す(西村他、2012)。

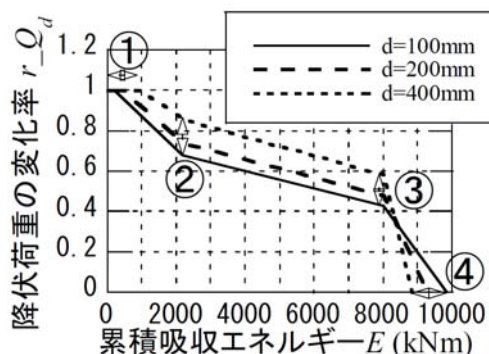


図 4.4-15 鉛ダンパーの累積吸収エネルギーと降伏荷重の変化率

今回の解析モデルによる検討では、鉛ダンパーの 1 台あたりの吸収エネルギーは AIC003 で最
大 5,261kNm、OSKH02 で最大 2,341 kNm であり、降伏耐力は 50%程度低下すると思われ、最大
応答変位はかなり増大すると考えられる。

6) オイルダンパー

オイルダンパーは、温度上昇や繰返し回数によって、エネルギー吸収性能は変化しないこと
は知られている。しかし、単位時間当たりの入力熱量がオイルダンパーの熱容量を超え、外壁
温度が上昇していくと作動油の滲み出しが生じるという知見がある。

設計限界温度は、タンク室の油量は余裕があるので直ちに減衰低下は生じないので、現状は
余裕を見て外壁温度 80℃を許容値としている。また、パッキンについては熱劣化試験を行い温
度と寿命の関係データから安全を確認している。

オイルダンパーの温度上昇については、地震動は瞬間的であり、放熱量が小さいため、入力
エネルギーのほとんどが温度上昇に反映されると考えると、下式により推定することができる。

$$T_m = \frac{Q_m}{V_s \rho_s C_s + V_o \rho_o C_o} + t_a \dots \dots \dots (4.4-3)$$

ここで、 Q_m : オイルダンパへの総入力熱量、 T_m : 表面温度

V_s : 鉄鋼部品の体積、 V_o : オイル体積、 ρ_s : 鉄鋼部品の密度、

C_s : 鉄鋼部品の比熱比、 ρ_o : オイル密度、 C_o : オイルの比熱比

今回のモデル建物のうち B-3 棟と J-1 棟についてオイルダンパーの温度を式 4.4-3 により
算定した結果を表 4.4-11 に示す。これによると、オイルダンパーの最大温度は 69.2℃であり
80℃以下となっている。

表 4. 4-10 オイルダンパーの温度上昇

モデル	B-3		J-1	
ダンパー種類	限界荷重 1000kN		限界荷重 2000kN	
	吸収エネルギー (kNm/台)	T (°C)	吸収エネルギー (kNm/台)	T (°C)
OSKH02	1,637	23.2	41,712	39.3
AIC003	6,328	31.7	75,292	69.2

参考文献

T.Honma, A.Kondo, Y.Takenaka, H.Kitamura : Seismic Response Prediction Method Considering Heat-Mechanics Interaction Behavior of Lead Rubber Bearing、Fifth World Conference on Structural Control and Monitoring(5WCSCM), Tokyo, 12-14 July 2010.

竹中康雄他：大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究（その9 熱伝導解析による実験結果のシミュレーション、その10 鉛入り積層ゴムにおける鉛温度～降伏応力関係の提案、その11 LRBの温度上昇を考慮した地震応答解析）、AIJ大会（中国）、2008.9.

嶺脇重雄他：長周期地震動に対する免震部材の多数回繰返し実験（その5 弾性すべり支承（低摩擦））、日本建築学会大会梗概集、2011.8

吉敷祥一他：水平2方向載荷下における繰返し変形性能に関する実験－免震構造用U字型鋼材ダンパーの水平2方向特性 その1－、巻、第680号、pp.1579-1588、2012.10

西村拓也他：長周期地震動に対する免震部材のモデル化と免震建築物の応答評価 その5：鉛ダンパーのモデル化と地震応答解析、日本建築学会大会梗概集、2012.9

4-5 地震動のばらつきに関する検討

本検討に用いている地震動の作成方法では、作成時に用いた乱数の値によって異なった波が無数に作成される。連動地震の場合には、複数の波を足し合わせるため、地震動のばらつきは大きくなると思われる、2011年度の地震動の作成にあたっては、乱数を変えた21波を作成し、5%減衰の擬似応答スペクトルの平均値に対し周期1~10秒の残差の和が最少、かつエネルギースペクトルの平均に対する残差の和が正で残差の絶対値が最小の1波を選定したが、2011年度の報告書に記載しているように、選定した地震動による応答値は21波の応答値の平均ではなく、平均をかなり下回るものが多かった。

2012年度は、地震動の作成において、擬似速度応答スペクトルの対数平均値と21波の速度波形のうち最大速度が中央値の位相スペクトルを用いて再作成した地震動(三の丸波作成手法)を用いている。

本章では、1質点系のモデルを用いて免震周期 T_f や降伏せん断力係数 α_s を変えたパラメトリックスタディを行い、乱数の影響により応答値がどの程度ばらつくか、今回の検討に用いた地震動が、21波の平均的な応答値か否かを検討した。

解析には図4.5-1に示すように1質点系モデルを用いた。

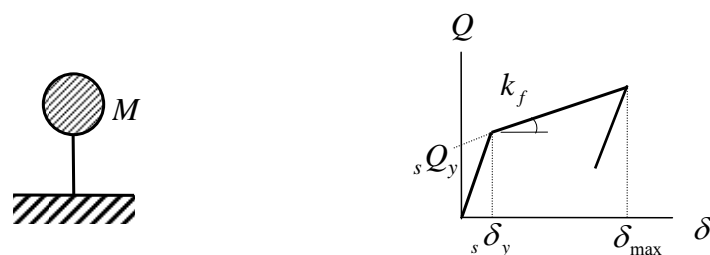


図 4.5-1 解析モデル

免震層はノーマルバイリニア型で降伏変位 δ_y は1cmで固定している。降伏後剛性 K_f は、免震周期から逆算した。免震周期は約1秒から10秒まで変化させた。降伏せん断力(切片荷重) sQ_y は、ダンパーの降伏せん断力係数 α_s が0.02、0.03、0.04となるように設定した。

入力地震動はモデル建物の解析に用いた津島(AIC003)・新宿(KGIN)・此花(OSKH02)・浜松(SZ0024)の4地点において、地震動の乱数を変えて作成された21波と、その最大速度が中央値の地震動の位相を用いて再作成された地震動1波の各22波を用いた。

図4.5-2~図4.5-4に最大応答変位と免震周期の関係を、ダンパーの降伏せん断力係数(α_s)ごとに示す。黒線が位相の異なる21波の応答結果を示し、赤線が平均波による応答を示している。津島では、免震周期2~3秒で最大応答を示し、それ以降の免震周期ではほぼ一様の最大応答と示している。 α_s が大きくなると最大応答は若干減少するものの、最大応答変位は40~70cm程度の応答を示している。新宿では、 α_s が0.02と小さい場合では、免震周期7秒以上で非常に大きな変位応答になるケースもあるものの、 α_s が大きくなると急激に変位応答は小さくなっている。此花では、免震周期2秒と6秒前後にピークをもつ応答特性を示す。特に免震周期6秒

前後では非常に大きな応答変位となるケースもあるものの、応答のばらつきも大きい。ただ免震周期4秒付近では応答変位が小さくなっている。平均波（赤線）による応答変位は、 α_s が0.03以上であればすべての免震周期で50cm以下となっている。浜松では、免震周期3秒前後にピークを示し、それ以降の免震周期での応答は周期の影響はあまり受けていない。免震周期が4秒以上であれば、最大応答変位は60cm以下となっている。また、今回選定した地震動は概ね21波の平均的な応答となっている。

図4.5-5～図4.5-7 にエネルギーの等価速度（ EV ）と免震周期の関係を、ダンパーの降伏せん断力係数（ α_s ）ごとに示す。津島では、 EV の変動は小さく、免震周期3秒以上では400～500cm/s程度となっている。同じく、浜松でも EV の変動は小さく200～300cm/s程度となっている。新宿では、 EV は α_s が大きくなるにしたがい減少している。此花では、免震周期2秒と6秒付近にピークが見られるものの、平均波による EV は比較的安定しており、250～300cm/s程度となっている。

図4.5-8～図4.5-10 に等価繰り返し回数（ eqn ）と免震周期の関係を、ダンパーの降伏せん断力係数（ α_s ）ごとに示す。等価繰り返し回数は、次式により算出した。

$$n_{eq} = \frac{\eta}{4\mu_m}$$

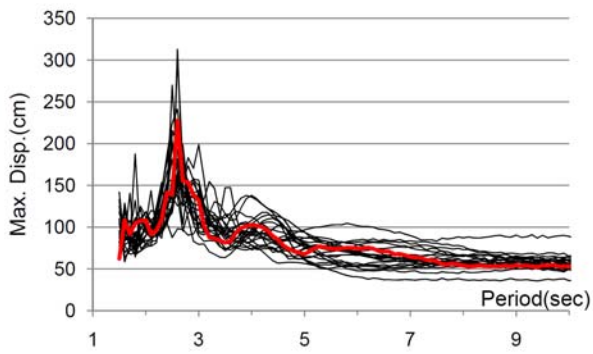
ここで、 η ：累積塑性変形倍率 $\left(= \frac{\delta_p}{\delta_y} \right)$ ， μ_m ：塑性変形倍率 $\left(= \frac{\delta_{max}}{\delta_y} - 1 \right)$ ，
 δ_p ：累積塑性変形， δ_{max} ：最大変形， δ_y ：降伏変形

津島では、免震周期3秒以上であれば α_s にかかわらず、 eqn はほぼ10～15の範囲にある。同様に、浜松でも免震周期3秒以上であれば、 eqn は5～10程度となっている。浜松は多少ばらつきが大きいものの、 eqn は5～10程度といえる。ただし、 α_s が0.02の場合は免震周期が5秒以下では大きくなる。新宿での eqn はもっとも小さく6以下である。

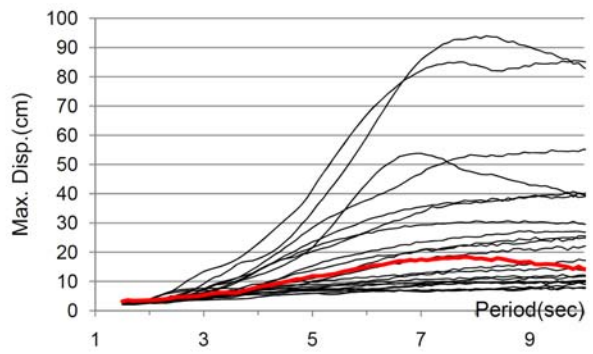
表4.5.1 に免震周期4秒での応答値のばらつきを示す。津島と浜松の応答変位の最小値と最大値は、2倍程度の差が見られる。此花では最小と最大の差は3倍程度となっている。エネルギー入力の等価速度は、津島と浜松では比較的安定した値を示しているものの、他の地震動では多少ばらつきが大きい。等価繰り返し数はダンパーの降伏せん断力係数の影響をそれほど受けず安定しており、津島が最も大きな値を示し、此花と浜松がそれに続いている。

表 4.5-1 免震周期 4 秒での応答値のばらつき

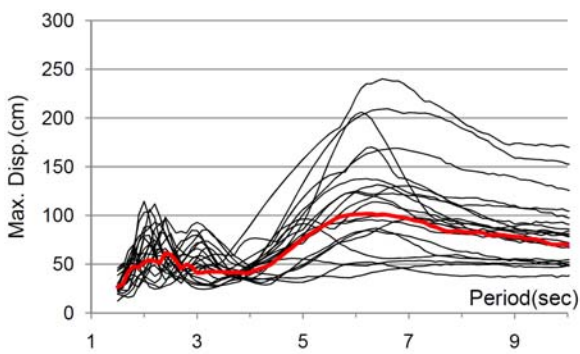
応答値	α_s	津島	新宿	此花	浜松
最大変位 (cm)	0.02	73～138	5～23	33～90	27～58
	0.03	49～97	2～13	22～78	23～52
	0.04	39～69	2～4	16～62	20～42
エネルギー入力 の等価速度 (cm/s)	0.02	381～460	60～108	235～302	215～253
	0.03	388～485	33～77	222～304	230～263
	0.04	404～488	37～56	207～292	242～276
等価繰り返し数	0.02	10～16	3～8	7～13	6～12
	0.03	9～17	2～5	5～14	5～11
	0.04	10～19	2～6	5～11	5～11



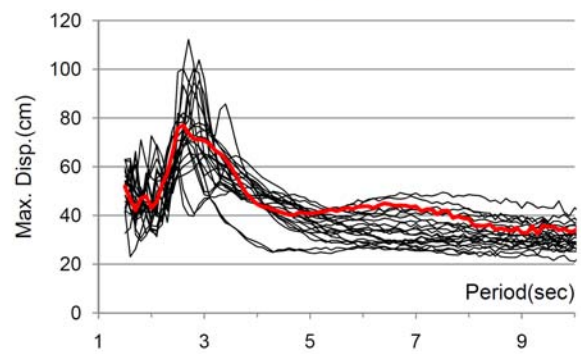
(a) 津島 (AIC003)



(b) 新宿 (KGIN)

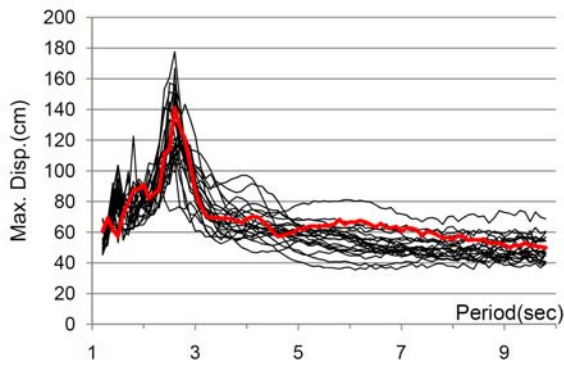


(c) 此花 (OSKH02)

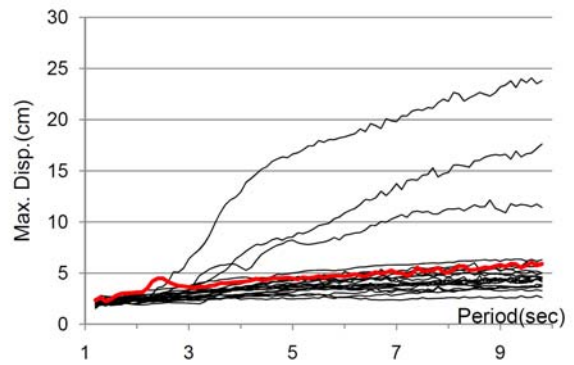


(d) 浜松 (SZO024)

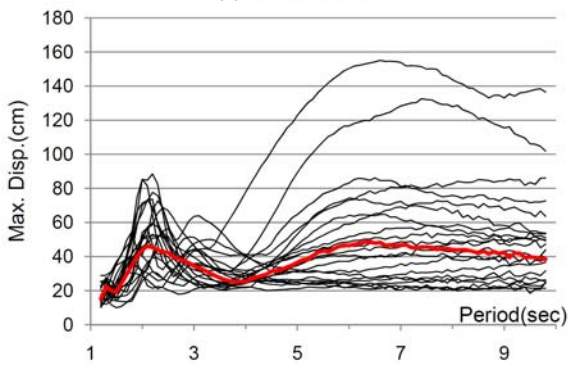
図 4.5-2 最大応変位 ($\alpha_s = 0.02$)



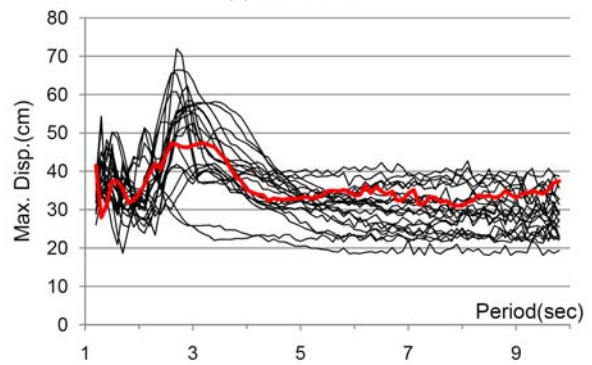
(a) 津島 (AIC003)



(b) 新宿 (KGIN)



(c) 此花 (OSKH02)



(d) 浜松 (SZO024)

図 4.5-3 最大応変位 ($\alpha_s = 0.03$)

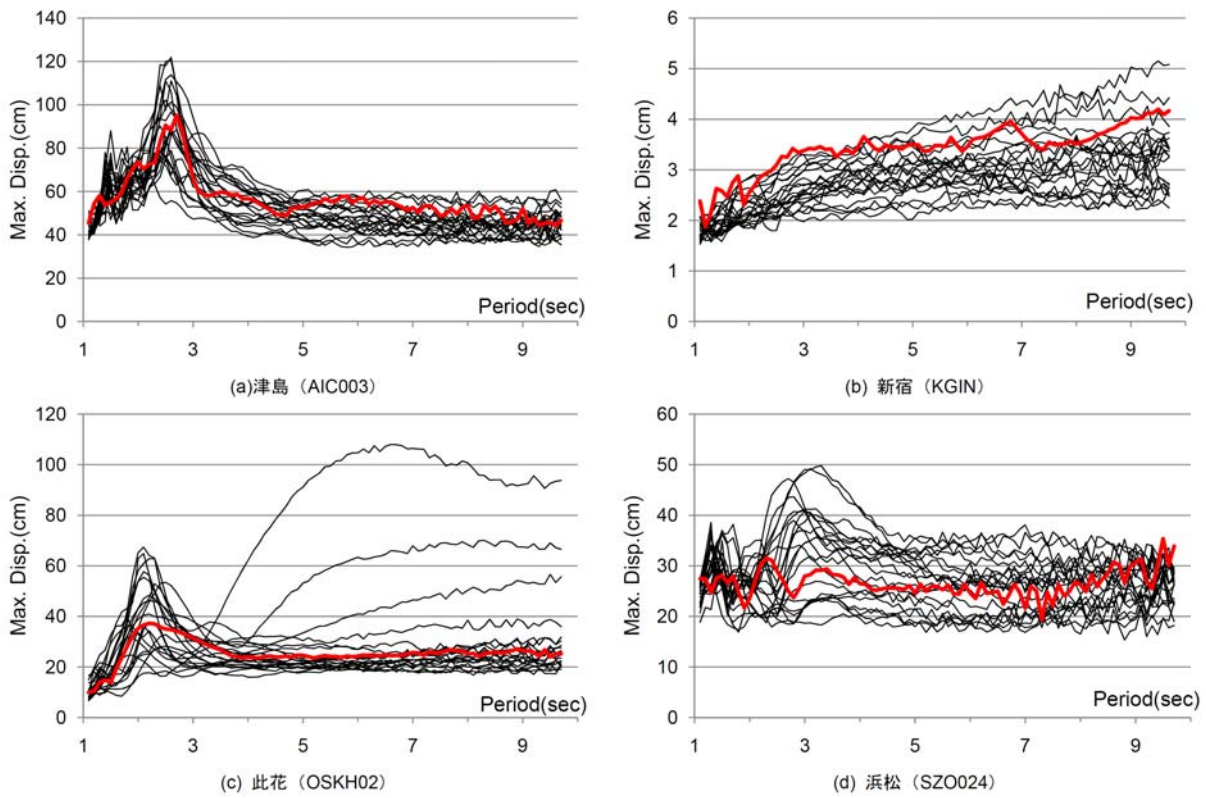


図 4.5-4 最大応変位 ($\alpha_s = 0.04$)

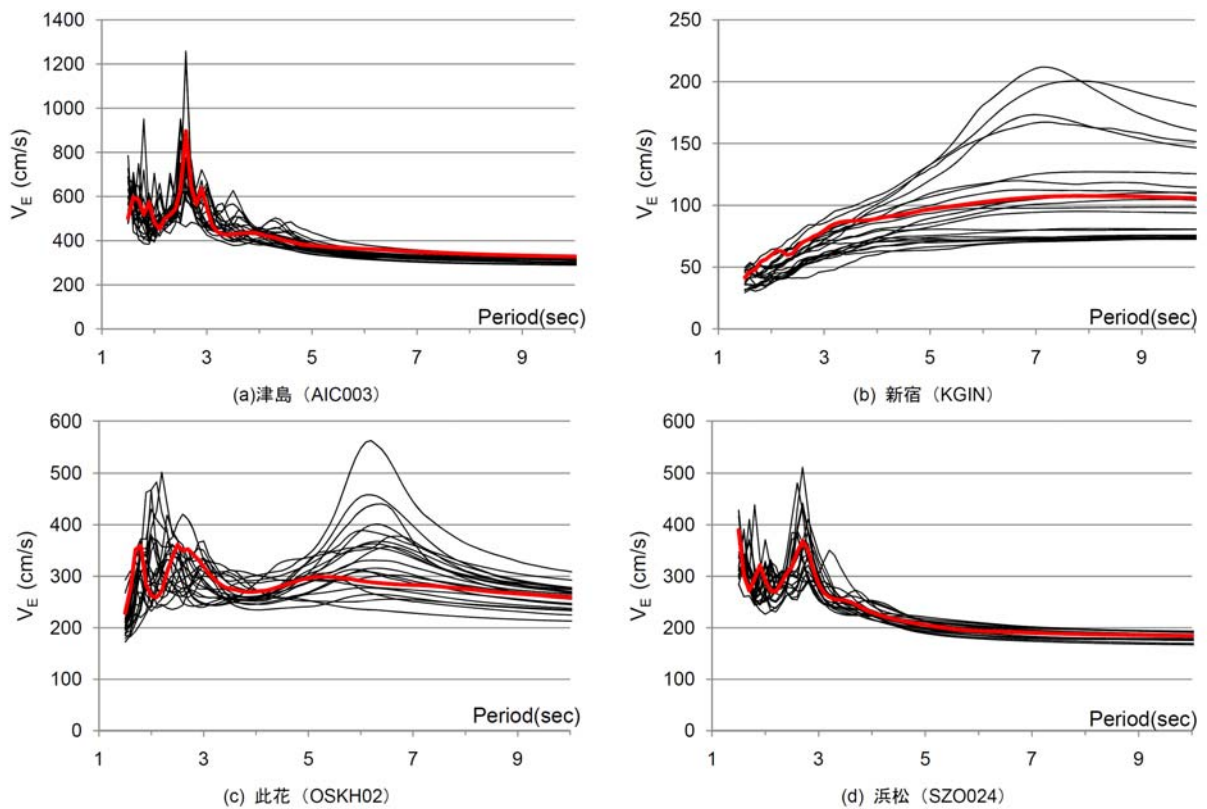


図 4.5-5 エネルギー入力 of 等価速度 ($\alpha_s=0.02$)

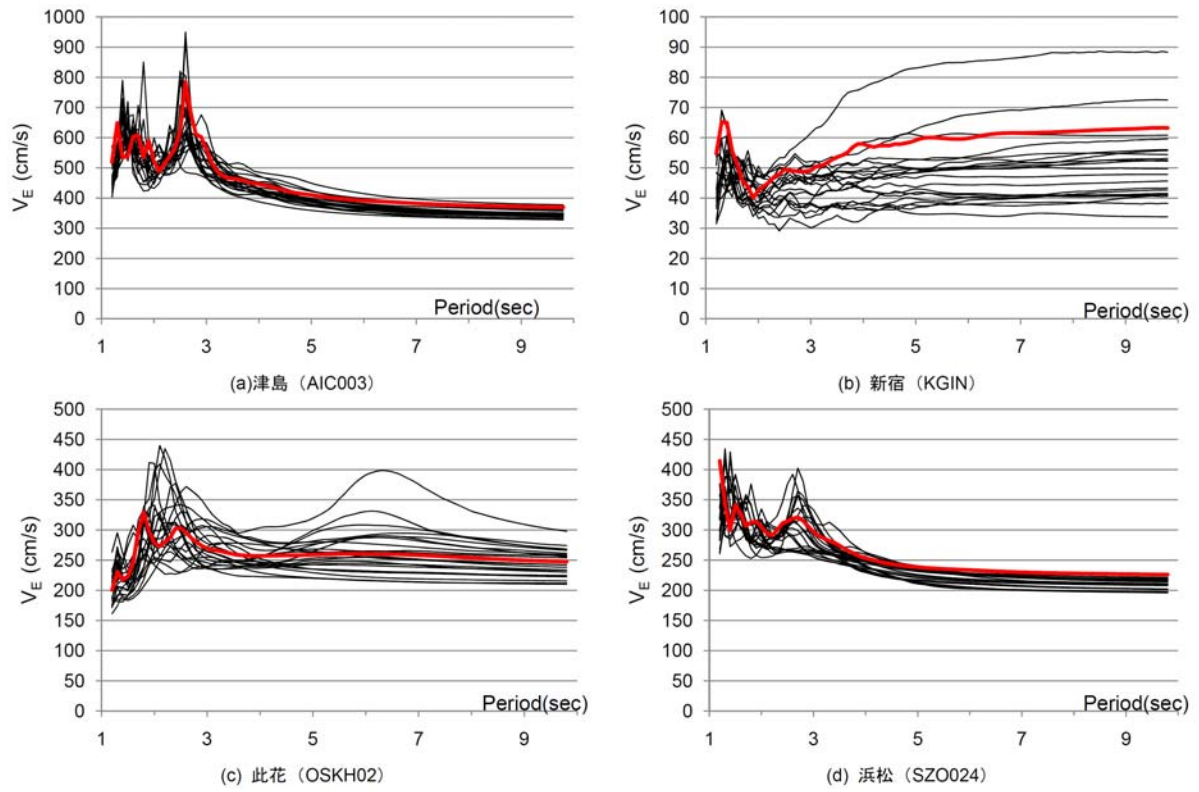


図 4.5-6 エネルギー入力 of 等価速度 ($\alpha_s=0.03$)

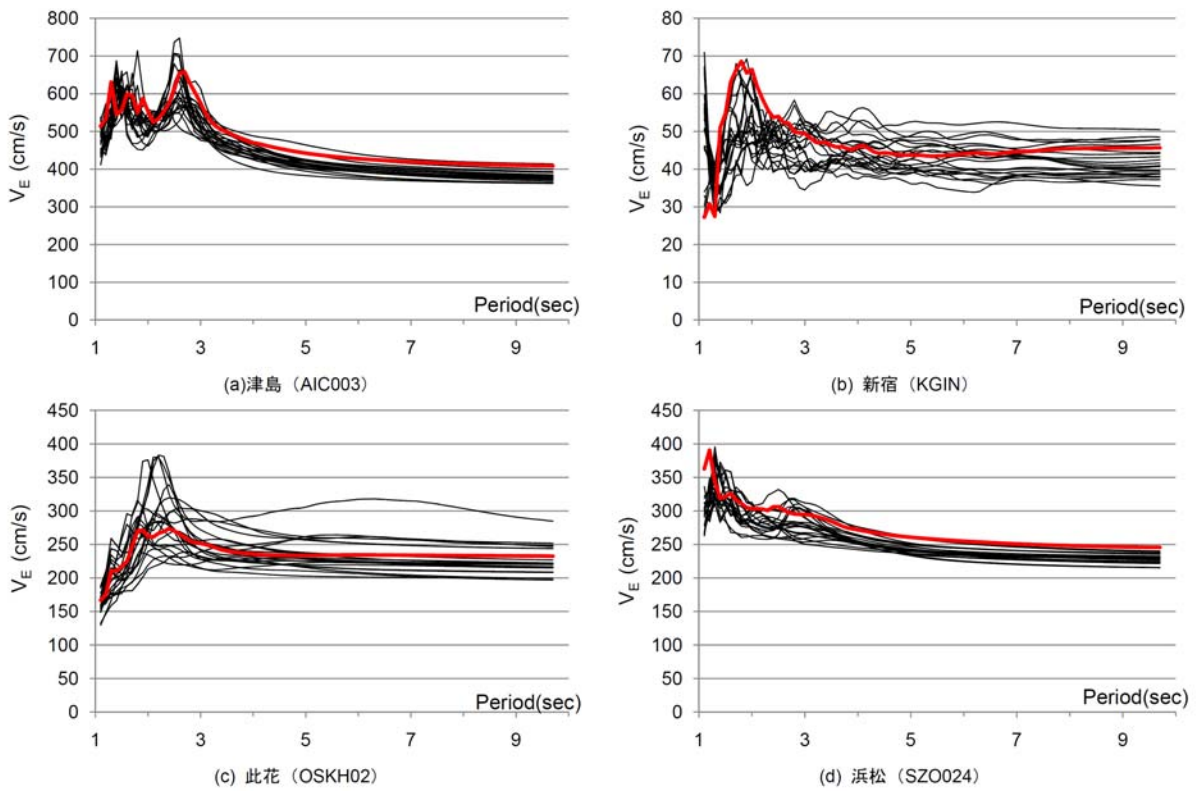


図 4.5-7 エネルギー入力の等価速度 ($\alpha s=0.04$)

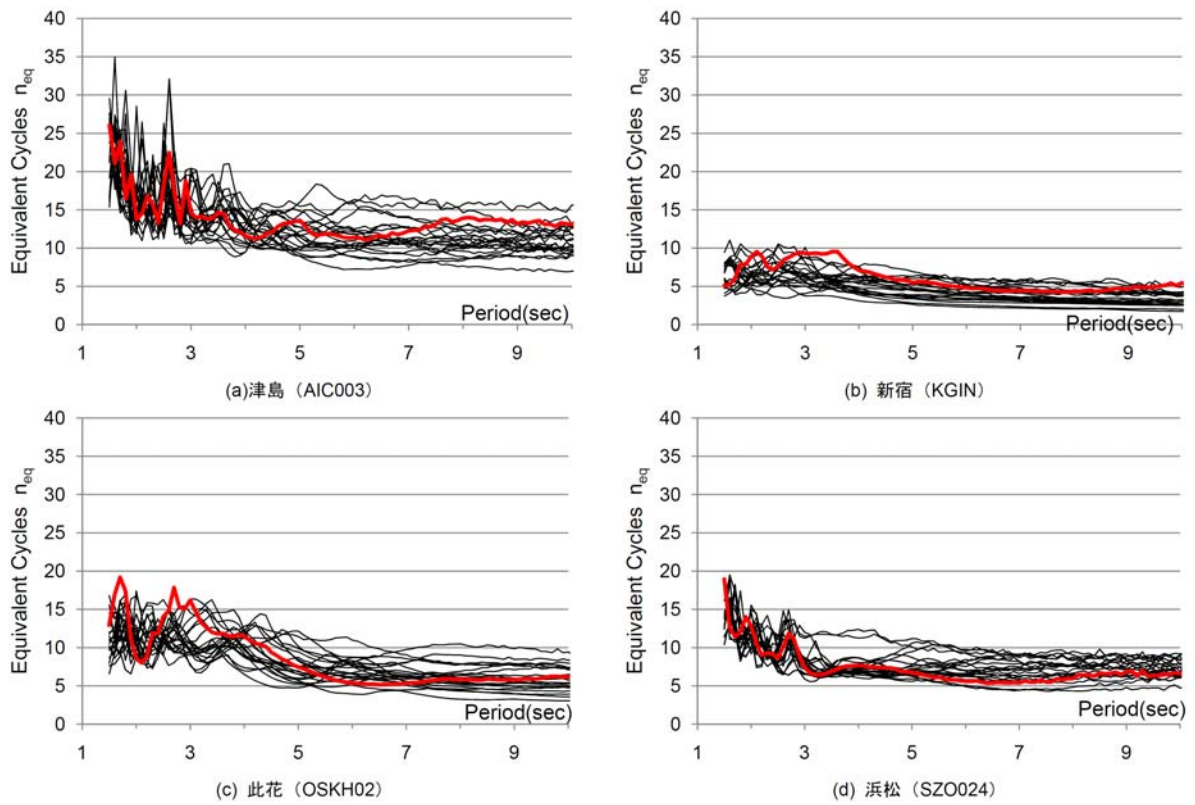


図 4.5-8 等価繰返し回数 ($\alpha s=0.02$)

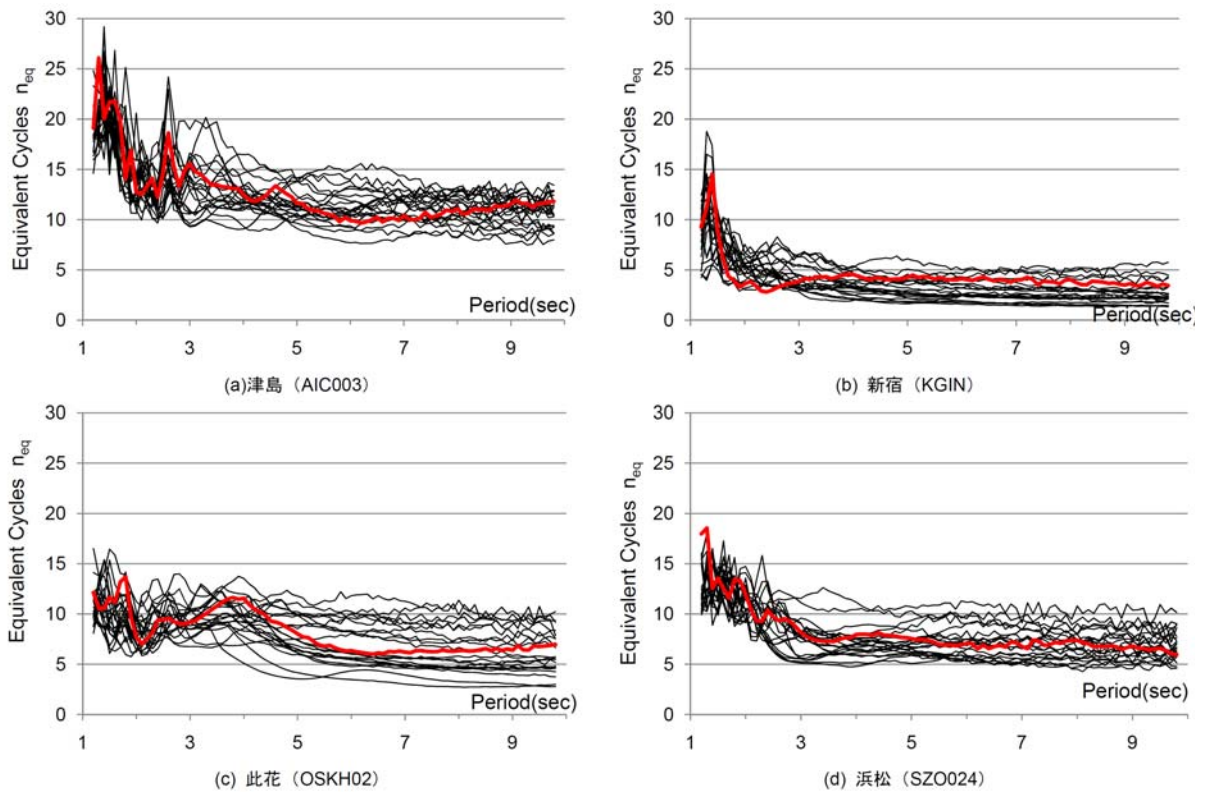


図 4.5-9 等価繰返し回数 ($\alpha_s=0.03$)

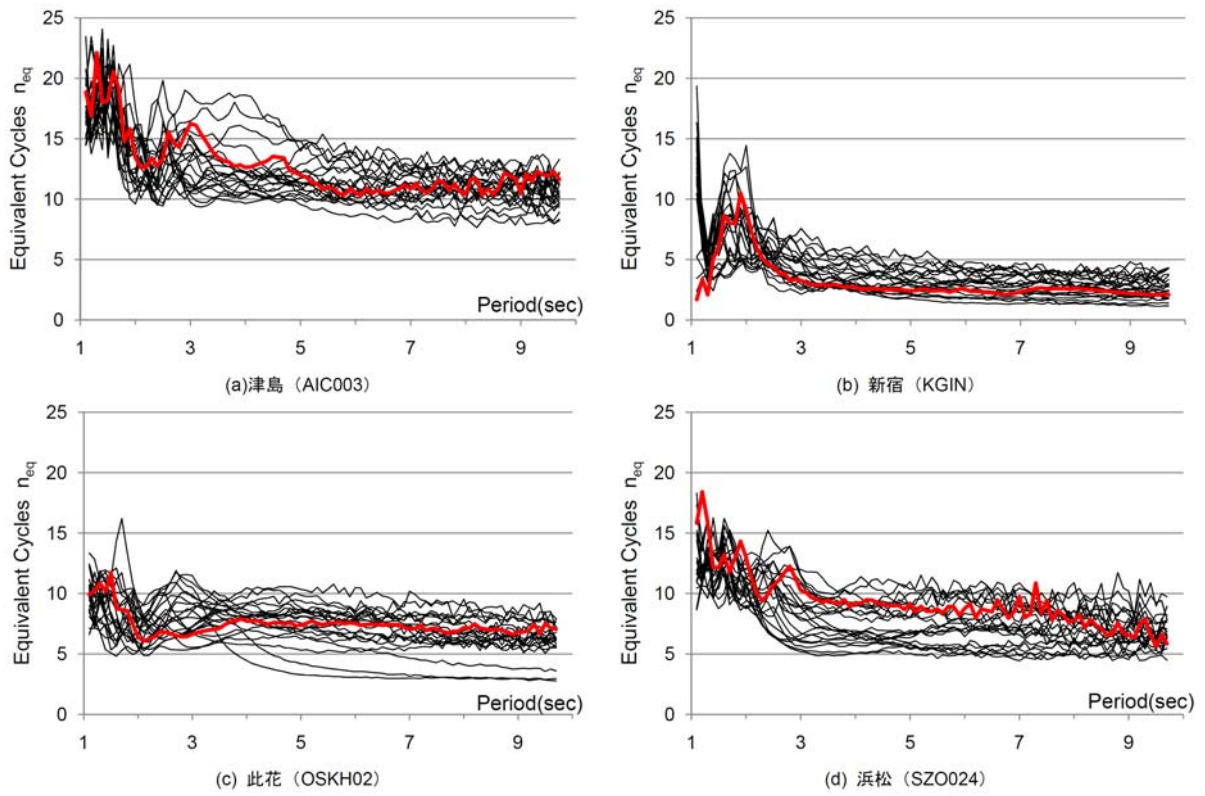


図 4.5-10 等価繰返し回数 ($\alpha_s=0.04$)

4-6 まとめ

- 2012年度の検討波は平均波であるが、津島(AIC003)を除き、2011年度に検討を行った3連動地震の地震動に比べ大きく、概ね2011年度の平均+標準偏差波と同程度になっている。津島(AIC003)は2011年度の平均+標準偏差波よりも大きく、1.5~2倍程度になっている。これは、4連動地震になり断層の大きさが大きくなったことに加え、断層までの最短距離が近くなった影響が大きい。
- 津島(AIC003)の地震動による応答値は非常に大きく、約半数のモデル建物の応答変位が限界変位を超えている。この検討では、繰返しによる降伏耐力の低下などの品質変動は考慮していないため、それを考慮すると応答変位はかなり大きくなり、限界変位を超えるものがもっと多くなると思われる。
- 此花(OSKH02)でも、応答変位が限界変位を超えているものが2棟、設計許容変位を超えているものが4棟あり、繰返しによる品質変動を考慮すると応答変位はかなり大きくなり、限界変位を超えるものがもっと多くなると思われる。
- 新宿(KGIN)は、応答変位がすべて設計許容変位以下となっており、問題はなさそうである。浜松(SZ0024)は、応答変位が限界変位を超えているものはないが、設計許容変位を超えているものが4棟ある。
- 2012年度の地震動は非常に大きく、津島や此花では通常のレベル2のクライテリア以下とするのには、減衰量をかなり大きくしないと困難であると思われる。特に津島は非常に地震動のレベルが大きいため、減衰量を大きくすれば限界変位以下とすることは可能かもしれないが、レベル2のクライテリア以下にすることは困難であると思われる。
- LRBの場合は、繰返しにより降伏耐力が大きく低下するため、入力エネルギーが大きい場合には、この品質変動を考慮すれば応答値はかなり大きくなる可能性がある。高減衰積層ゴムは、繰返しによる品質変動は小さいが、それを考慮すると応答変位がやや大きくなる場合がある。
- 鋼材ダンパーや鉛ダンパーの累積疲労損傷は、今回の地震動では最もエネルギーの大きい津島の地震動でも、限界値以下であった。オイルダンパーの温度は、今回の地震動ではエネルギーの大きい津島の地震動でも、80℃以下であった。
- 今回の地震動は、乱数を変えて作成された21波のうち、擬似速度応答スペクトルの対数平均値と21波の速度波形のうち最大速度が中央値の位相スペクトルを用いて再作成した地震動（三の丸波作成手法）を用いているが、免震周期や降伏せん断力係数を変えたパラメトリックスタディを行ったところ、その応答変位は概ね21波の平均的な値となっていた。

第5章 おわりに

本検討で用いた長周期地震動の算定方法は、地震諸元（想定地震の規模、震源断層の大きさ、震源位置）と評価地点位置を入力とし、地震動指標（加速度応答スペクトル、継続時間、エネルギースペクトル）やそれらの指標から合成される模擬地震動の時刻歴波形を出力とする簡便な経験的地震動予測式として表される。予測式の各回帰係数は、既往の多数の地震観測データを用いた統計回帰により求められているので、予測式の出力結果としては、入力パラメータに対する地震動指標の平均値だけでなくばらつきも簡便に評価できることが一つの特徴である。この特徴を踏まえ、本検討の地震動の算定事例では、平均値ならびに平均値に回帰誤差を加味した値を平均値+標準偏差としてその2つをペアで示している。

本資料では、建築研究資料第144号で示した長周期地震動に関する評価手法において、回帰に用いた地震動データが得られた観測点以外の任意地点にも適用できるように、地震本部から公開されている地震基盤以浅の地盤構造データ（2009年版）を援用した地盤増幅率とサイト係数の評価法を提案し、その提案方法の妥当性を確認した。また、この改良評価手法を内閣府が想定した南海トラフ巨大地震（ $M_w=9$ ）に適用し、主要地点の地震動の算定を行い、内閣府が算定した地震動と比較した。内閣府が算定した地震動は主に周期数秒以下の短周期成分を対象としたものであり、周期数秒以上の長周期成分を直接比較することはできなかったが、周期数秒以下の短周期成分に関しては両者の整合性は良好であった。さらに、算定した地震動を、建築研究資料127号、同144号および本検討に共通して用いた、超高層建築物（S造、RC造）、免震建築物（年代、上部構造規模、免震装置が異なる既存モデル群）の各解析モデルに入力して、その応答特性について整理した。その結果、今回検討した内閣府 M_w9 クラス巨大地震の最大級の地震に対しては、地点によっては相当大きい地震動レベルを示し、当該地域の建築物では、現行の設計クライテリアを大きく上回る可能性があることがわかった。

これらの検討結果を、超高層建築物や免震建築物の構造設計実務での耐震計算に活用するためには、本検討の位置付けや結果を踏まえ、さらにさまざまな観点から踏み込んだ検討を行う必要があると考えられる。例えば、設計実務に適用する際には、本検討の提案手法における特定の周期帯についてのスペクトルの解釈、また異なる手法で作成された地震動についても提案手法を一つの目安としてどのように対比して取り扱っていくか等が課題となる。

© 建築研究資料 第147号

平成25年 9月 27日 印刷

平成25年 9月 27日 発行

編集
発行 独立行政法人建築研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは下記まで

独立行政法人建築研究所企画部企画調査課

〒305-0802 茨城県つくば市立原1番地

電話(029) 864-2151 (代)