

常時微動計測を利用した南海トラフ巨大地震におけるJRきのくに線沿いでの強震動の予測

秦 吉弥¹・山田 孝弘²・湊 文博³・飛田 哲男⁴・植田 裕也⁵・清野 純史⁶

¹ 正会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: hata@civil.eng.osaka-u.ac.jp

² 正会員 西日本旅客鉄道(株) 大阪工事事務所 (〒532-0011 大阪府大阪市淀川区西中島5-4-20)

E-mail: takahiro-yamada@westjr.co.jp

³ 学生会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: fminato@civil.eng.osaka-u.ac.jp

⁴ 正会員 関西大学 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

E-mail: tobita@kansai-u.ac.jp

⁵ 学生会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: yueda@civil.eng.osaka-u.ac.jp

⁶ フェロー会員 京都大学 大学院工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

E-mail: kiyono.junji.5x@kyoto-u.ac.jp

本稿では、南海トラフ巨大地震において強震動の作用が懸念されているJRきのくに線(和歌山県沿岸域)を対象に、強震動予測を行った。具体的には、まず、和歌山駅～新宮駅間の計54駅およびその周辺の既存強震観測点において常時微動計測を実施し、H/Vスペクトルを算定した。次に、各駅と強震観測点における常時微動H/Vスペクトルの比較に基づいて各駅でのサイト増幅特性を評価した。最後に、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した地震動評価手法を用いて、南海トラフ巨大地震においてJRきのくに線の各駅に作用する強震動を予測した。その際、既存強震観測点を対象とした強震動予測に関するベンチマークテストを実施することで、常時微動計測を利用した強震動予測の精度について確認を行った。

Key Words : *microtremor measurement, H/V spectrum, site amplification factor, observation station, strong motion estimation, benchmark test*

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震($M_w9.0$)では、巨大津波だけでなく強震動の作用による鉄道構造物の被災が数多く報告¹⁾²⁾³⁾されている。一方で、2011年東北地方太平洋沖地震の発生を受け、南海トラフにおいても $M_w9.0$ 程度の巨大地震が想定されていることから⁴⁾、南海トラフ巨大地震に対する鉄道構造物の耐震性評価を実施していくことは非常に重要⁵⁾である。このような大規模地震に対する鉄道構造物の耐震性の検討を地震応答解析などに基づいて実施する場合、入力地震動の設定が必要不可欠となる。この点に関して、著者らは、大阪市内⁶⁾および神戸市内⁸⁾の鉄道盛土を対象サイトとした南海トラフ巨大地震による強震動予測を行っている。しかしながら、想定震源域に近い和歌山県沿岸域の鉄道盛土を対象とした検討事例⁹⁾は数少ない。

そこで本稿では、南海トラフ巨大地震の想定震源域に

近いJRきのくに線(和歌山駅～新宮駅：図-1参照)を対象とした強震動予測を実施した結果について報告する。具体的には、まず、和歌山駅～新宮駅間の計54駅(図-2参照)およびその周辺の既存強震観測点(図-3参照)において常時微動計測を実施し、H/Vスペクトルを算定した。次に、JRきのくに線沿いに設置されている既存強震観測点を対象にした南海トラフ巨大地震における強震動予測(先行研究¹⁰⁾において一部実施済)を行った。ただしその際、JRきのくに線の各駅では基本的に地震観測記録がこれまで得られていないため、既存強震観測点のサイト増幅・位相特性として、地震観測記録に基づき評価したケースと常時微動H/Vスペクトルに基づき評価したケースを比較設定することで、強震動予測の精度に関するベンチマークテストを行った。最後に、常時微動H/Vスペクトルに基づき評価した各駅でのサイト増幅・位相特性に基づいた強震波形計算を行い、南海トラフ巨大地震におけるJRきのくに線沿いでの強震動の分布を予測した。

なお、本研究は、(公社)地盤工学会関西支部南海トラフ巨大地震に関する被害予測と防災対策研究委員会(委員長：三村衛(京都大学教授))の活動の一環として実施したものである。

2. 地震観測に基づくサイト増幅特性の評価

図-4は、JRきのくに線沿い周辺の既存強震観測点(図-3参照)におけるサイト増幅特性の比較である。ここに、本稿でのサイト増幅特性は、いずれも地震基盤～地表相当の地盤震動特性を表している。既存強震観測点(K-NETおよびKiK-net観測点¹¹⁾を除く)におけるサイト増幅特性は、推定点と基準点(表-1参照)でこれまで同時に得られた中小地震による観測記録に基づいて評価¹²⁾した。具体的には、中小地震観測記録を対象に、伝播経路特性¹³⁾¹⁴⁾の違いを考慮したフーリエスペクトルの比率(推定点／基準点)を各々の地震記録に対して計算し、この比率(観測記録における比率の平均値)を基準点における既存のサイト増幅特性¹⁵⁾に掛け合わせることで地震基盤～地表相当のサイト増幅特性を算定した。

図-4に示すように、サイト増幅特性の特徴(ピーク周波数やスペクトル形状など)は、JRきのくに線において一様であるとは言い難い。これは、南海トラフ巨大地震時において和歌山県沿岸域のJRきのくに線沿いに作用する強震動の特性にも大きな違いが生じる可能性が高いことを示唆するものである。

3. 常時微動計測に基づくサイト増幅特性の評価

(1) 常時微動H/Vスペクトルの評価

常時微動計測は、和歌山県沿岸域の既存強震観測点(計23地点：図-3参照)およびJRきのくに線(計54駅：図-2参照)において実施した。写真-1に常時微動計測状況の一例を示す。計測期間は、2015年11月21～23日(既存強震観測点)および2016年1月9～11日(JRきのくに線各駅)の計6日間である。計測は主に昼間に実施し、白山工業(株)製の一体型微動探査兼地震計機器¹⁶⁾を採用した。計測機器の諸元については、文献16)を参照されたい。計測方向は水平二成分と鉛直成分の計三成分であり、後述する常時微動H/Vスペクトルの計算では、水平二成分の平均をとった。計測時間は、一計測点あたり約30分間の単点計測とした。

図-5および図-6、図-7は、和歌山県沿岸域の既存強震観測点(計23地点：図-3参照)およびJRきのくに線(計54駅：図-2参照)における常時微動H/Vスペクトルを比較し

たものである。常時微動H/Vスペクトルの計算処理方法は、既往研究¹⁷⁾と同様である。具体的には、まず、微動

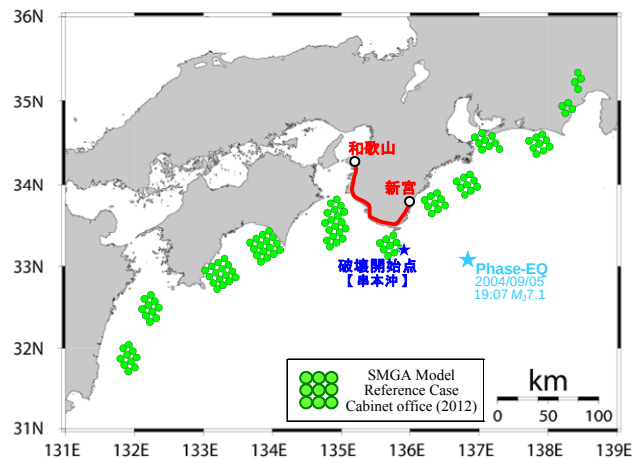


図-1 南海トラフ巨大地震の震源域とJRきのくに線

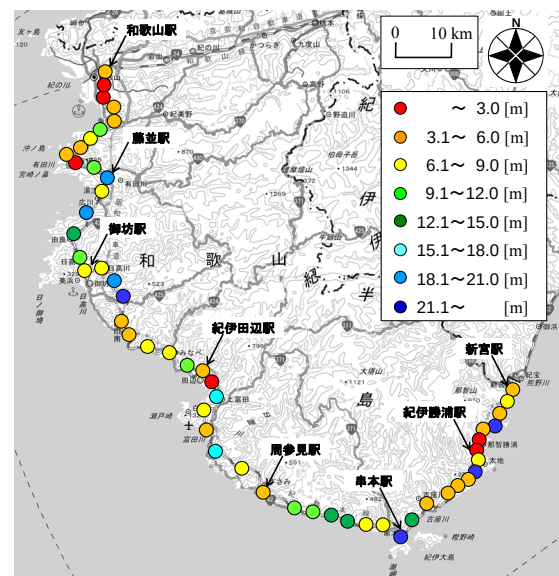


図-2 JRきのくに線の54駅における標高値の分布



図-3 JRきのくに線近くの既存強震観測点の分布

の加速度時刻歴に対して0.1Hzのハイ・パスフィルターを施し、163.84秒の区間(雑振動(望ましくないノイズ等)が小さい163.84秒間)を7区間抽出し、フーリエスペクトルの計算を行い、バンド幅0.05HzのParzen Windowで平滑化したのちに、H/Vスペクトルを算出し、7区間の平均をとった。評価振動数の範囲としては、使用した微動計測器の性能¹⁶⁾などを考慮して0.2~10Hzとした。図-8および図-9は、和歌山県沿岸域の既存強震観測点(計23地点：図-3参照)およびJRきのくに線(計54駅：図-2参照)における常時微動H/Vスペクトル(図-5および図-7参照)のピーク周波数を地形図上にプロットしたものである。

図-5、図-7および図-8、図-9にそれぞれ示すとおり、和歌山県沿岸域にあるJRきのくに線とその周辺の既存強震観測点では、常時微動H/Vスペクトルの特性(ピーク周波数やスペクトル形状など)がばらついているのが確認でき、和歌山県沿岸域における地盤震動特性は一樣であるとは言い難い。

(2) サイト増幅特性の評価

図-10は、常時微動H/Vスペクトルに基づき評価した既

表-1 推定点と基準点の関係一覧
(地震観測に基づくサイト増幅特性の評価)

推定点	基準点
JMA有田	K-NET有田
MLIT湯浅	
MLIT水越	
MLIT由良	K-NET御坊
JMA御坊	
MLIT印南	KiK-net印南
JMA白浜	K-NET田辺
MLIT日置	K-NETすさみ
MLIT見老津	
CRIEPI串本	K-NET串本
MLIT串本	
JMA古座川	
MLIT太地	K-NET太地
JMA新宮	K-NET新宮



写真-1 常時微動計測状況 (MLIT印南での一例)

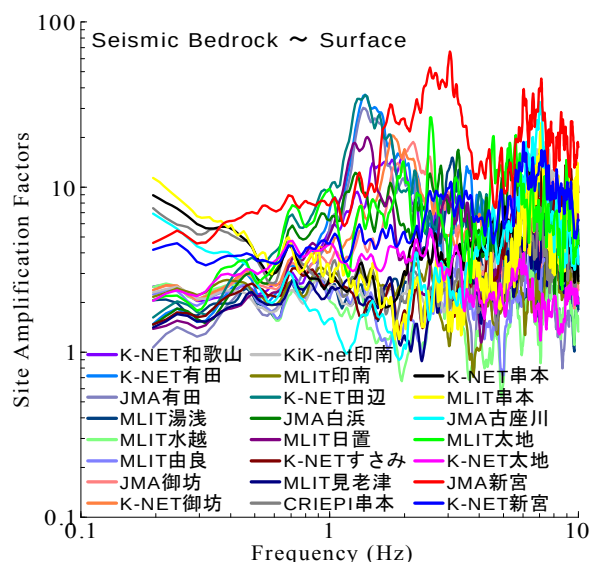


図-4 地震観測に基づくサイト増幅特性の比較
(強震観測点)

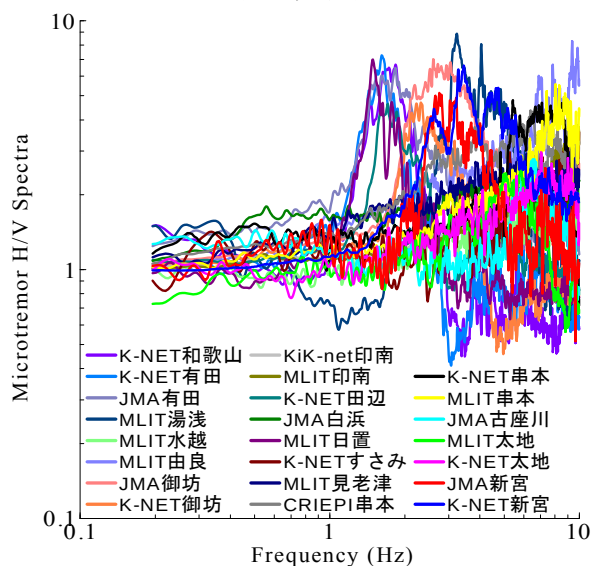


図-5 常時微動H/Vスペクトルの比較(強震観測点)

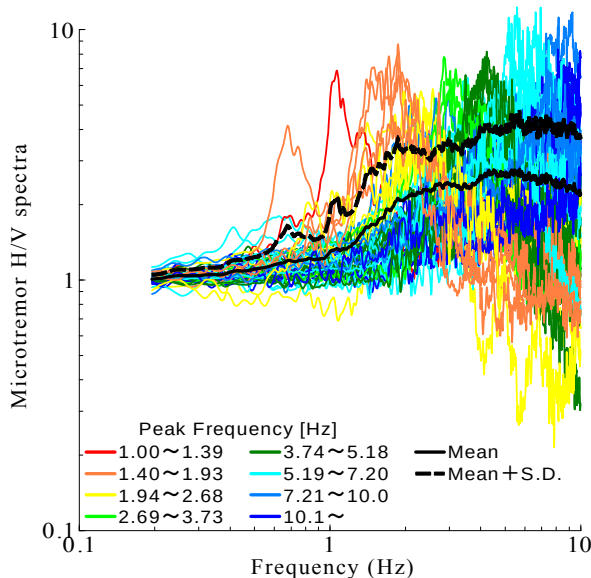


図-6 常時微動H/Vスペクトルの比較(JRきのくに線各駅)

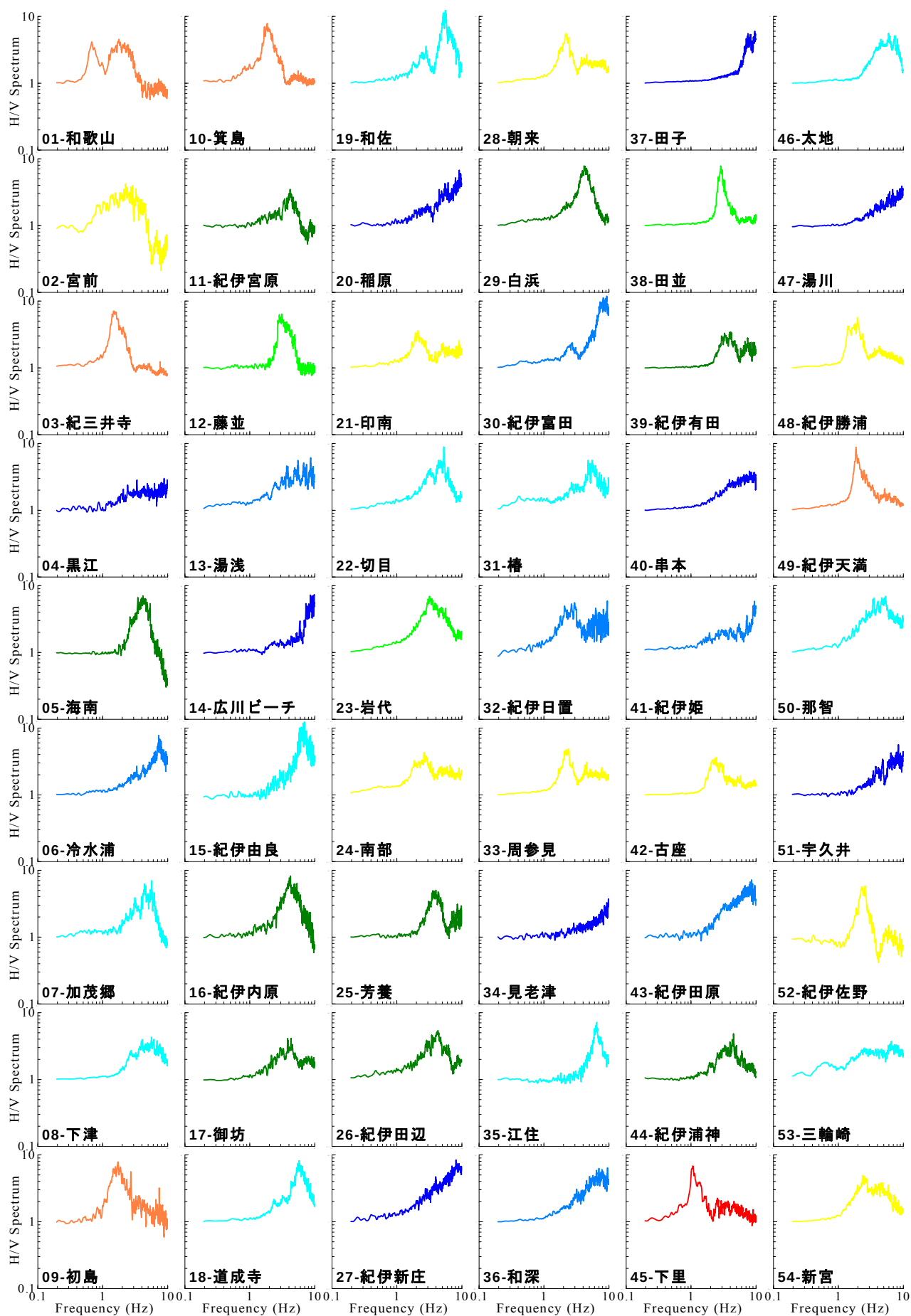


図-7 JRきのくに線54駅における常時微動H/Vスペクトルの一覧

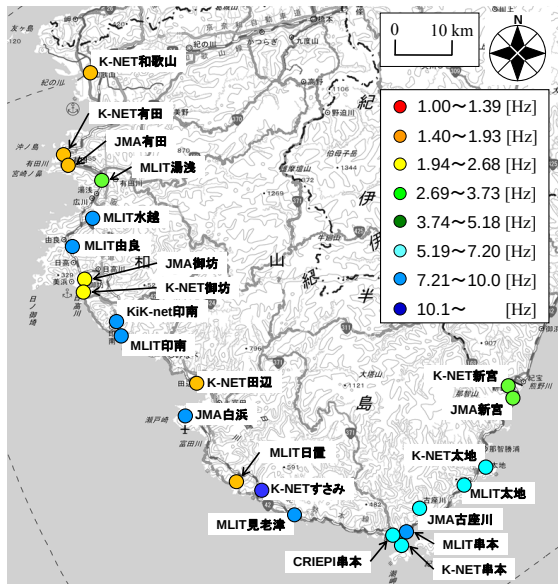


図-8 常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数の分布
(強震観測点)

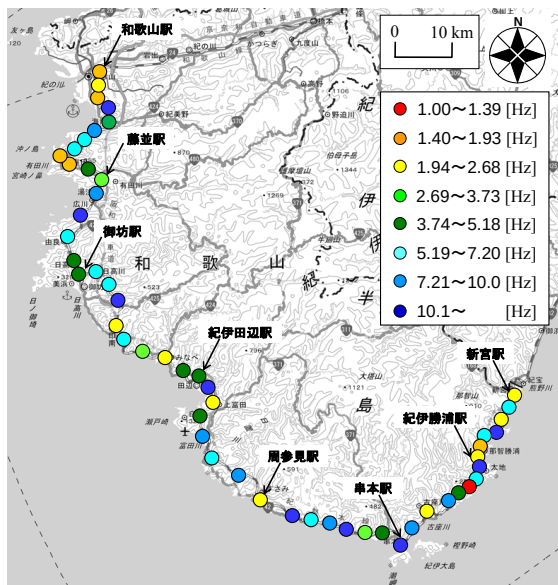


図-9 常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数の分布
(JRきのくに線各駅)

(2) サイト増幅特性の評価

図-10は、常時微動H/Vスペクトルに基づき評価した既存強震観測点(推定点：表-1参照)におけるサイト増幅特性である(ここに、基準点(表-1参照)におけるサイト増幅特性は上述した地震観測に基づくもの(図-4参照)と同様である)。一方で、図-11および図-12は、常時微動H/Vスペクトルに基づき評価したJRきのくに線(計54駅：図-2参照)におけるサイト増幅特性である。

和歌山県沿岸域の既存強震観測点(推定点：表-1参照)におけるサイト増幅特性は、推定点と対応する基準点(表-1参照)における常時微動H/Vスペクトルの比較に基づき、基準点での地震観測に基づくサイト増幅特性(図-4のう

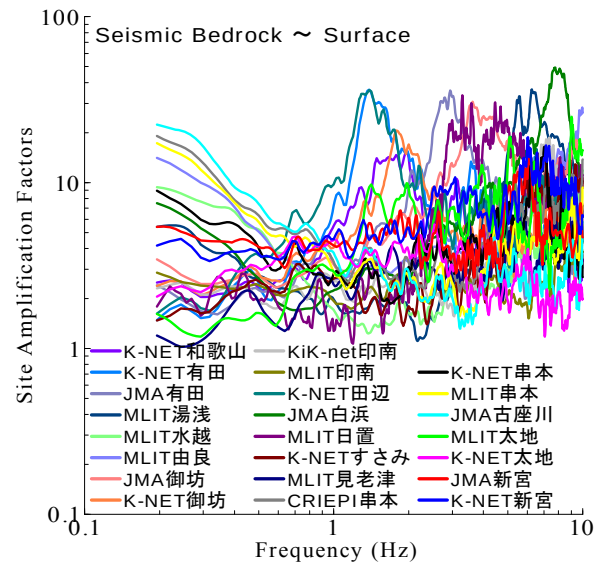


図-10 常時微動計測に基づくサイト増幅特性の比較
(強震観測点)

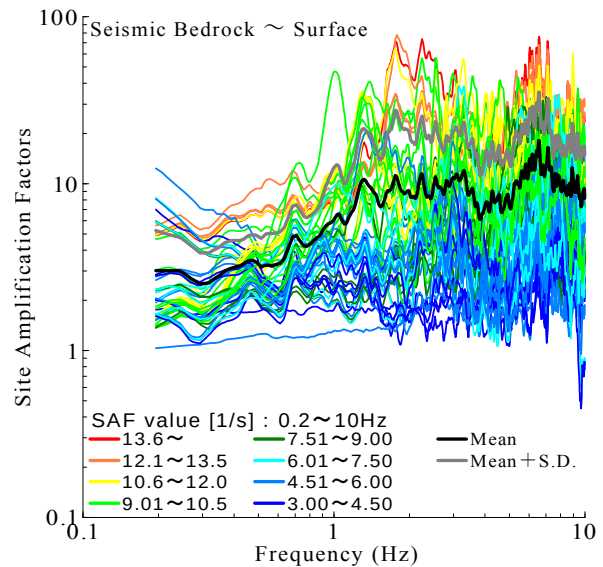


図-11 常時微動計測に基づくサイト増幅特性の比較
(JRきのくに線各駅)

ちK-NET/KiK-net観測点参照¹⁵⁾に対して、常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数およびピーク振幅の違いに着目した経験的補正(微修正)¹⁸⁾²¹⁾を加えることによって評価した(図-10参照)。

一方で、JRきのくに線(計54駅：図-2参照)におけるサイト増幅特性(図-11および図-12参照)は、以下に示す手順にしたがって算定した。まず、JRきのくに線の各駅(推定点)に対応する基準点を表-2に示すように選定した。選定方法としては、DGS値²²⁾を用いた定量的方法³⁾²³⁾を採用した。DGS値は、常時微動H/Vスペクトルの二地点間(基準点と推定点：表-2参照)の比率の常用対数を取り、表示周波数範囲内(0.2~10Hz：図-5および図-6参照)において積分した値²²⁾であり次式で表わされる。

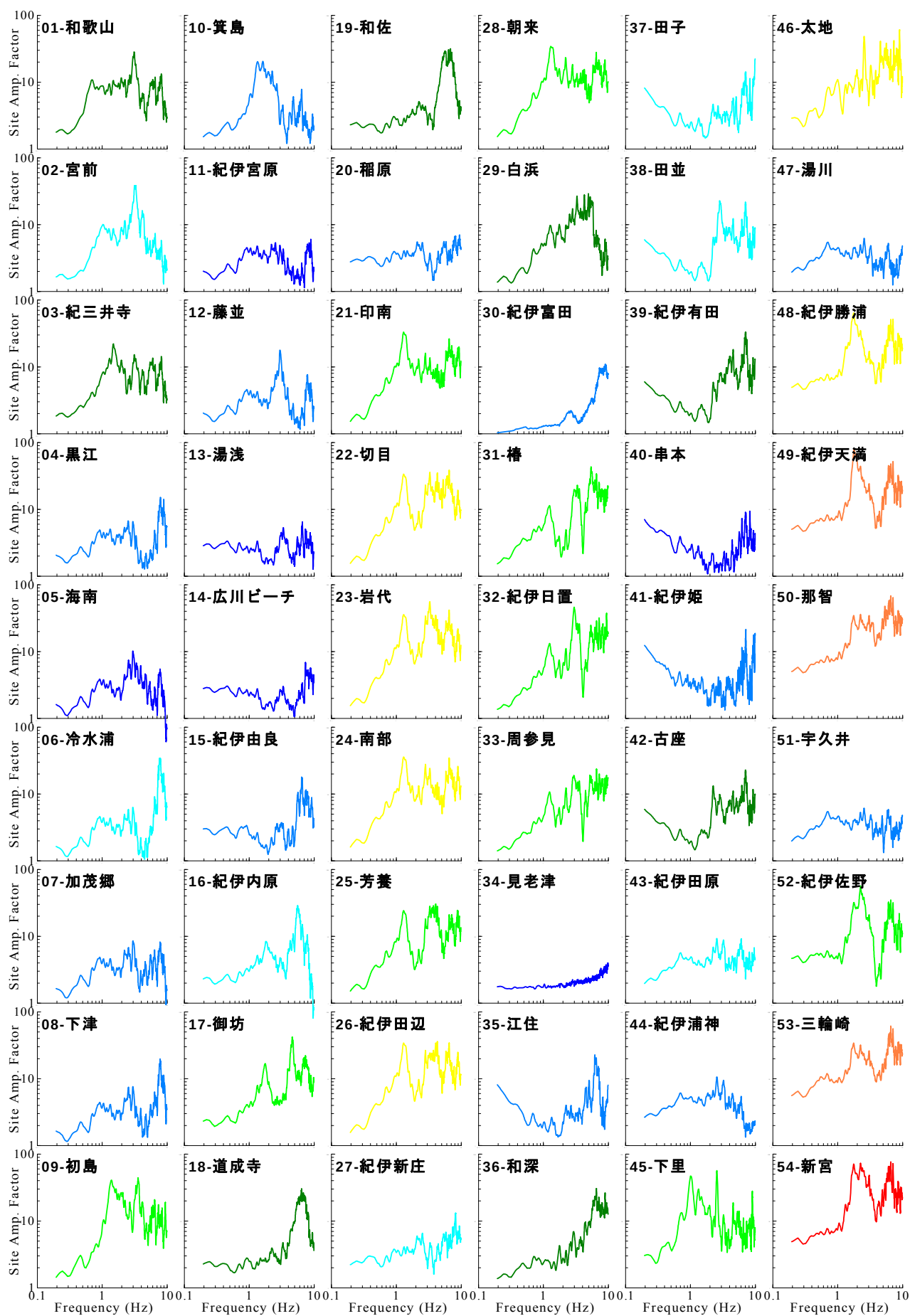


図-12 JRきのくに線54駅における常時微動計測に基づくサイト増幅特性の一覧

表-2 推定点と基準点の関係一覧
(常時微動計測に基づく各駅でのサイト増幅特性の評価)

推定点 (きのくに線駅)	基準点 (既存強震観測点)
和歌山	K-NET和歌山
宮前	K-NET和歌山
紀三井寺	K-NET和歌山
黒江	MLIT湯浅
海南	MLIT湯浅
冷水浦	MLIT湯浅
加茂郷	MLIT湯浅
下津	MLIT湯浅
初島	K-NET有田
箕島	JMA有田
紀伊宮原	MLIT湯浅
藤並	MLIT湯浅
湯浅	MLIT由良
広川ビーチ	MLIT由良
紀伊由良	MLIT水越
紀伊内原	JMA御坊
御坊	K-NET御坊
道成寺	KiK-net印南
和佐	KiK-net印南
稲原	MLIT印南
印南	K-NET田辺
切目	K-NET田辺
岩代	K-NET田辺
南部	K-NET田辺
芳養	K-NET田辺
紀伊田辺	K-NET田辺
紀伊新庄	MLIT印南
朝来	K-NET田辺
白浜	JMA白浜
紀伊富田	KiK-net印南
椿	KiK-net上富田
紀伊日置	MLIT日置
周参見	MLIT日置
見老津	MLIT見老津
江住	K-NET串本
和深	K-NETすさみ
田子	K-NET串本
田並	JMA古座川
紀伊有田	JMA古座川
串本	CRIEPI串本
紀伊姫	MLIT串本
古座	JMA古座川
紀伊田原	K-NET太地
紀伊浦神	K-NET太地
下里	JMA古座川
太地	MLIT太地
湯川	K-NET太地
紀伊勝浦	JMA新宮
紀伊天満	JMA新宮
那智	JMA新宮
宇久井	K-NET太地
紀伊佐野	JMA新宮
三輪崎	JMA新宮
新宮	JMA新宮

$$DGS = \sum \left| \log \left(\frac{R_{RAILWAY}(f)}{R_{REFERENCE}(f)} \right) \right| \cdot \Delta f \quad (1)$$

ここに、 $RAILWAY$ はJRきのくに線の各駅(図-2参照)、 $REFERENCE$ はその周辺の既存強震観測点(図-3参照)である。式(1)を用いて、各駅における DGS 値を既存強震観測点に対してそれぞれ計算し、最も小さな値を示す既存強震観測点(基準点)を各駅(各推定点)についてそれぞれ選定した(表-2参照)。そして、推定点と対応する基準点(表-2参照)における常時微動H/Vスペクトルの比較に基づき、基準点での地震観測に基づくサイト増幅特性(図-4参照)に対して、上記と同様に、常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数およびピーク振幅の違いに着目した経験的補正(微修正)¹⁸⁾²¹⁾を加えることによって、JRきのくに線(計54駅：図-2参照)におけるサイト増幅特性を評価した(図-11および図-12参照)。

4. SAF値の評価とその分布特性

本検討では、2.および3.(2)で評価したサイト増幅特性の指標値として、 SAF (Site Amplification Factor)値²⁴⁾²⁵⁾を採用した。 SAF 値は、サイト増幅特性の二深度間(基準地盤 B と地震動推定深度 G)における比率の常用対数を取り、所定の周波数範囲内において積分した値²⁴⁾²⁵⁾であり、 DGS 値(1)式参照)を参考に次式で表される。

$$SAF = \sum \log \left(\frac{G(f)}{B(f)} \right) \cdot \Delta f \quad (2)$$

ここに、 $B(f)$ は任意の周波数帯における地震基盤でのサイト増幅特性の値(=1(固定値))、および $G(f)$ は任意の周波数帯における地盤地表面でのサイト増幅特性の値である。本検討では、積分区間となる周波数範囲として、サイト増幅特性(図-4 および図-12 参照)の表示区間(0.2－10Hz：図-13 および図-14 参照)、やや短周期帯域²⁶⁾²⁷⁾に着目した区間(0.5－2Hz：図-15 および図-16 参照)をそれぞれ採用した。

図-13、図-15 および図-14、図-16 に和歌山県沿岸域の既存強震観測点(計23地点：図-3参照)およびJRきのくに線(計54駅：図-2参照)における SAF 値の分布を着目する推定地震動の周波数範囲について示す。図-13 および図-15 に示すように、有田・田辺・新宮付近の強震観測点において SAF 値が比較的大きくなる傾向が表れている。この傾向に依存して、図-14 および図-16 に示すように、主要駅である紀伊田辺駅および新宮駅付近において SAF 値が比較的大きな値を示しているのが読み取れる。これらは、南海トラフ巨大地震時においてJRきのくに線に作用する地震動の特性が一様と見なせる可能

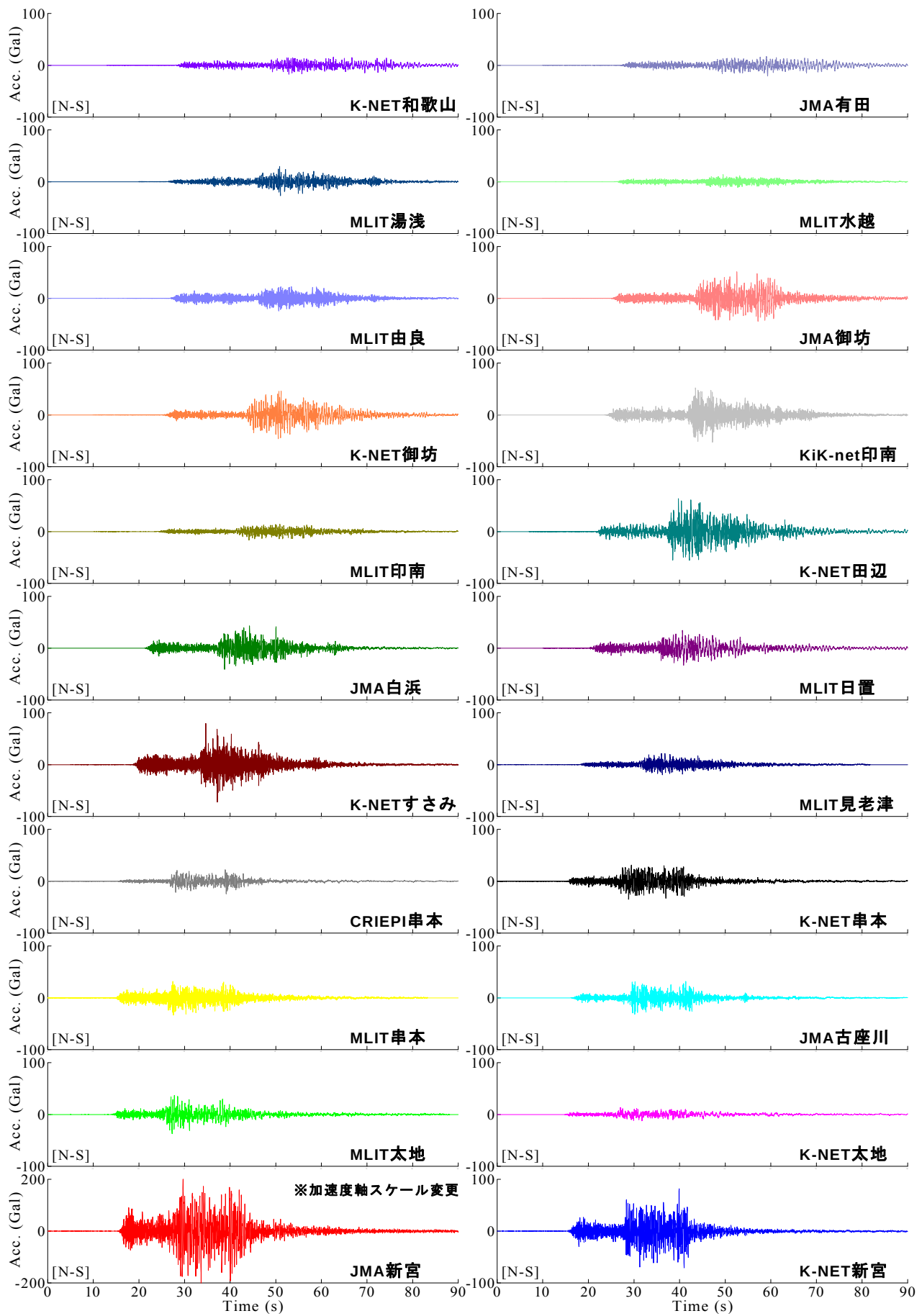


図-17 サイト位相特性として採用した2004年9月5日に発生した三重県南東沖を震源とする地震($M_7.1$)による観測波形(N-S成分)

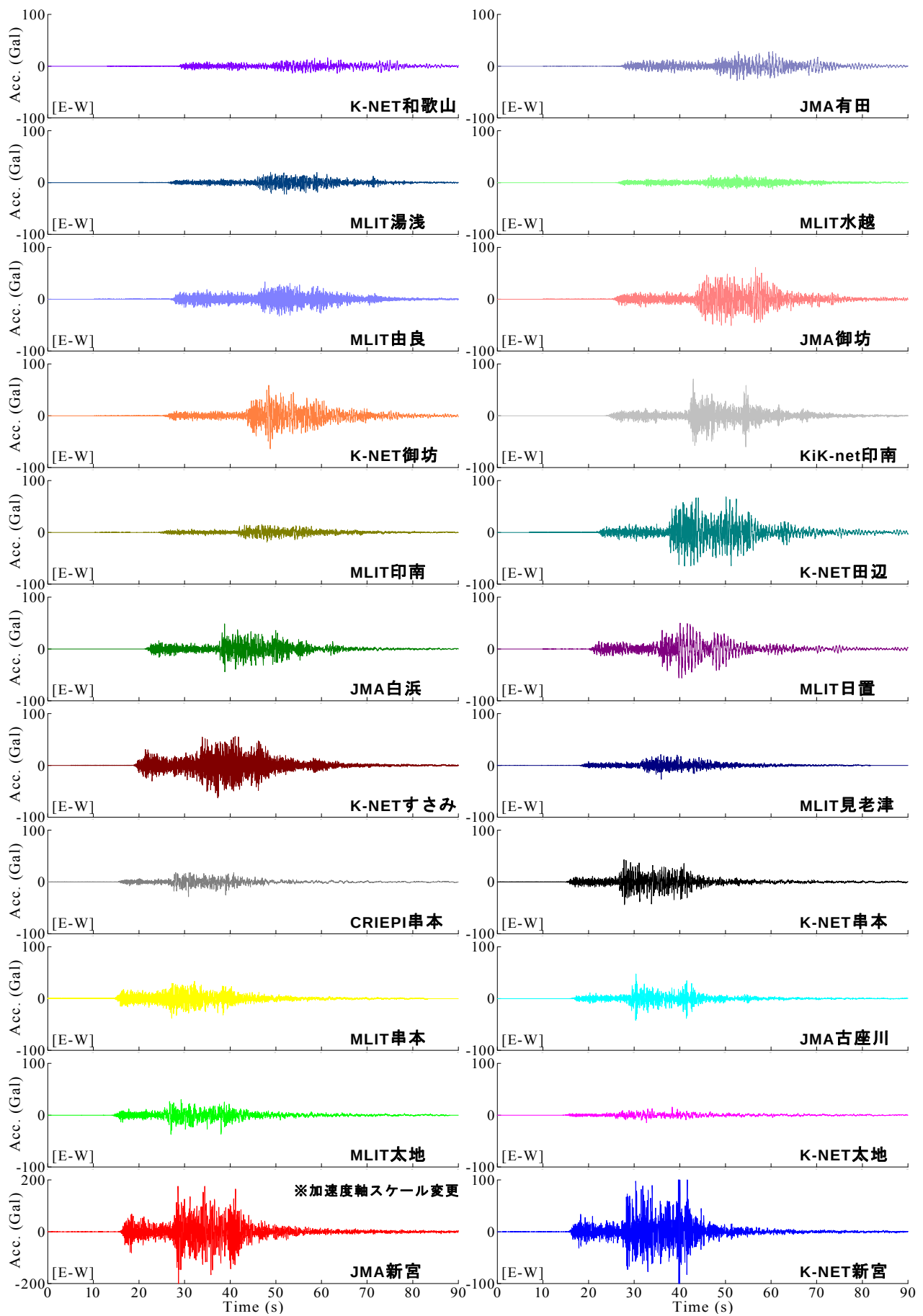


図-18 サイト位相特性として採用した2004年9月5日に発生した三重県南東沖を震源とする地震($M_j7.1$)による観測波形(E-W成分)

参照：6.および7.で詳述)のフーリエ変換で複素数、 $|Q(f)|_p$ はその絶対値に対してバンド幅0.05HzのParzen Windowを適用したものである。震源特性を計算する際、ラディエーション係数¹³⁾としては、全方位への平均値である0.63を用いた。また、地震動エネルギーの水平2成分への分散を表す係数である $PRITIN$ ¹³⁾は、水平2成分ともに0.71とした。

式(3)からわかるように、本手法では、統計的グリーン関数のフーリエ振幅は震源特性・伝播経路特性・サイト特性の積として求め、統計的グリーン関数のフーリエ位相としては、現地で得られた地震記録のフーリエ位相を用いる。式(3)をフーリエ逆変換し、経験的グリーン関数法と同様の重ね合わせ³⁰⁾を行うことで、大地震による波形が求まる。なお、Parzen Window(式(2))において添字 p で表示)は、因果性を満足する地震波を生成する目的で用いられている²⁹⁾。また、サイト位相特性(式(2))において $Q(f)$ で表示)の取り扱いについては、入射角およびback azimuthが各サブイベントとできるだけ共通となるように(堆積層が地震動の位相に及ぼす影響をより適切に考慮できるように)Phase-EQ(図-1参照)による観測記録のフーリエ変換を選定した。ここに、既往研究の成果³¹⁾を参考に海溝型地震(ここではPhase-EQ(図-1参照))による波形の時間軸の伸縮補正は実施していない。

和歌山県沿岸域では、南海トラフ巨大地震時に地盤の非線形挙動が生じる可能性が高いと考えられるため、表層地盤の非線形挙動の効果を考慮してグリーン関数を補正する方法³²⁾を採用し、S波速度の低下率を表すパラメータ v_1 (非線形性の影響が大きいほど低下)と堆積層における平均的な減衰定数の増分を表すパラメータ v_2 (非線形性の影響が大きいほど増加)を2011年東北地方太平洋沖地震における実績³³⁾³⁴⁾に基づきそれぞれ設定した。

6. 既存強震観測点でのベンチマークテスト

JRきのくに線の各駅では基本的に地震観測記録がこれまで得られていないため、常時微動計測結果に基づきサイト増幅・位相特性を評価した上で強震動を予測する手法(以後、常時微動計測に基づく手法と呼ぶ)を採用することとなる。常時微動計測に基づく手法は、地震観測記録に基づきサイト増幅・位相特性を評価した上で強震動を予測する手法(以後、地震観測に基づく手法と呼ぶ)と比較して、予測精度が低下することが懸念される。そこで本章では、和歌山県沿岸域の既存強震観測点(図-3参照)を対象に、地震観測に基づく手法を用いて予測した地震動と常時微動計測に基づく手法を用いて予測した地震動を比較することによって、強震動予測の精度に関す

表-3 推定点と基準点の関係一覧
(常時微動計測に基づくサイト位相特性の評価)

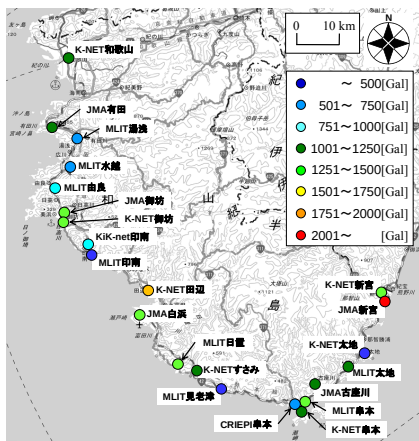
推定点	基準点
JMA有田	K-NET和歌山
MLIT湯浅	
MLIT水越	K-NET御坊
MLIT由良	
JMA御坊	
MLIT印南	KiK-net印南
JMA白浜	K-NET田辺
MLIT日置	
MLIT見老津	K-NETすさみ
CRIEPI串本	
MLIT串本	K-NET串本
JMA古座川	
MLIT太地	K-NET太地
JMA新宮	K-NET新宮

るベンチマークテストを行った。

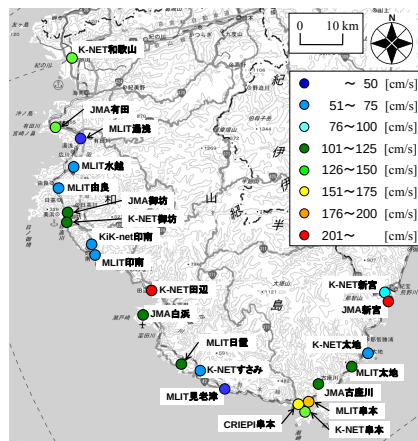
具体的には、地震観測に基づく手法では、2で評価したサイト増幅特性(図-4参照)、およびサイト位相特性としてPhase-EQによって各々の強震観測点で得られた波形(図-17および図-18参照)をそれぞれ採用した。これに対して、常時微動計測に基づく手法では、3で評価したサイト増幅特性(図-10参照)、およびサイト位相特性としてPhase-EQによって基準となるK-NET/KiK-net観測点(表-3参照)で得られた波形(図-17および図-18参照)をそれぞれ採用した。なお、使用した震源モデルや強震波形計算手法(5.参照)は、両手法において共通である。

図-19は、地震観測に基づく手法を用いて予測した地震動指標値の分布である。ここに、地震動指標としては、最大加速度 PGA 、最大速度 PGV 、気象庁計測震度³⁵⁾、SI値(水平二成分合成)³⁶⁾、速度PSI値(N-SおよびE-W成分)³⁷⁾³⁸⁾をそれぞれ採用した。図-19に示すように、和歌山県沿岸域の既存強震観測点の位置相当では、サイト増幅・位相特性の差異に主に起因して、予測地震動の指標値に有意な差異が見受けられる。

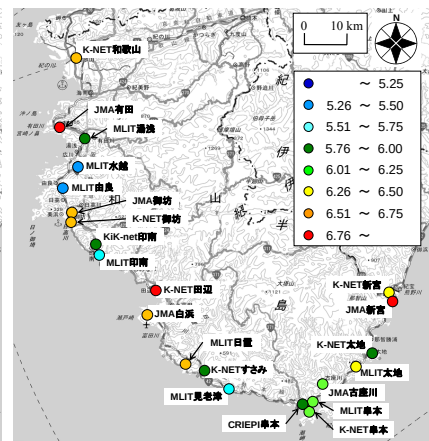
表-4および図-20は、地震観測に基づく手法を用いて予測した地震動指標値と常時微動計測に基づく手法を用いて予測した地震動指標値を比較したものである。ここに、比較対象とした強震観測点は、基準としたK-NET/KiK-net観測点(表-3参照)¹¹⁾を除く、JMA観測点³⁹⁾・MLIT観測点³⁹⁾・CRIEPI観測点⁴⁰⁾である。表-4および図-20に示すとおり、両手法による予測地震動の指標値は一致していないものの、常時微動計測に基づく手法による予測地震動は、地震観測に基づく手法による予測地震動に対して一定の精度を有していることが確認できる。これは、常時微動計測に基づく手法を用いて予測したJRきのくに線(計54駅)の地震動(7.で後述)に対する信頼性を示唆するものである。



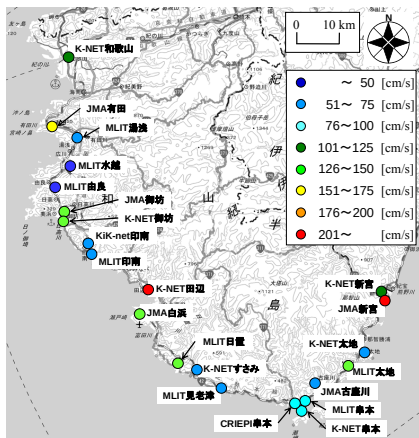
(a) 最大加速度PGA



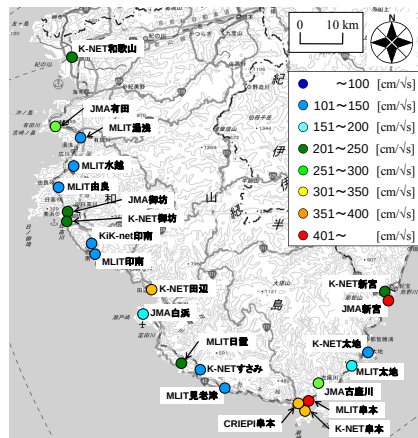
(b) 最大速度PGV



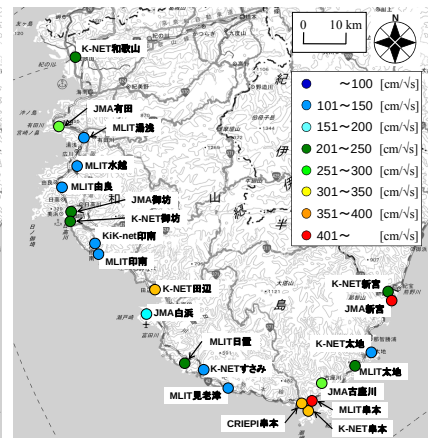
(c) 気象庁計測震度



(d) SI値



(e) 速度PSI値(N-S成分)



(f) 速度PSI値(E-W成分)

図-19 ベンチマークテストに基づく和歌山県沿岸における既存強震観測点での推定地震動指標値の分布

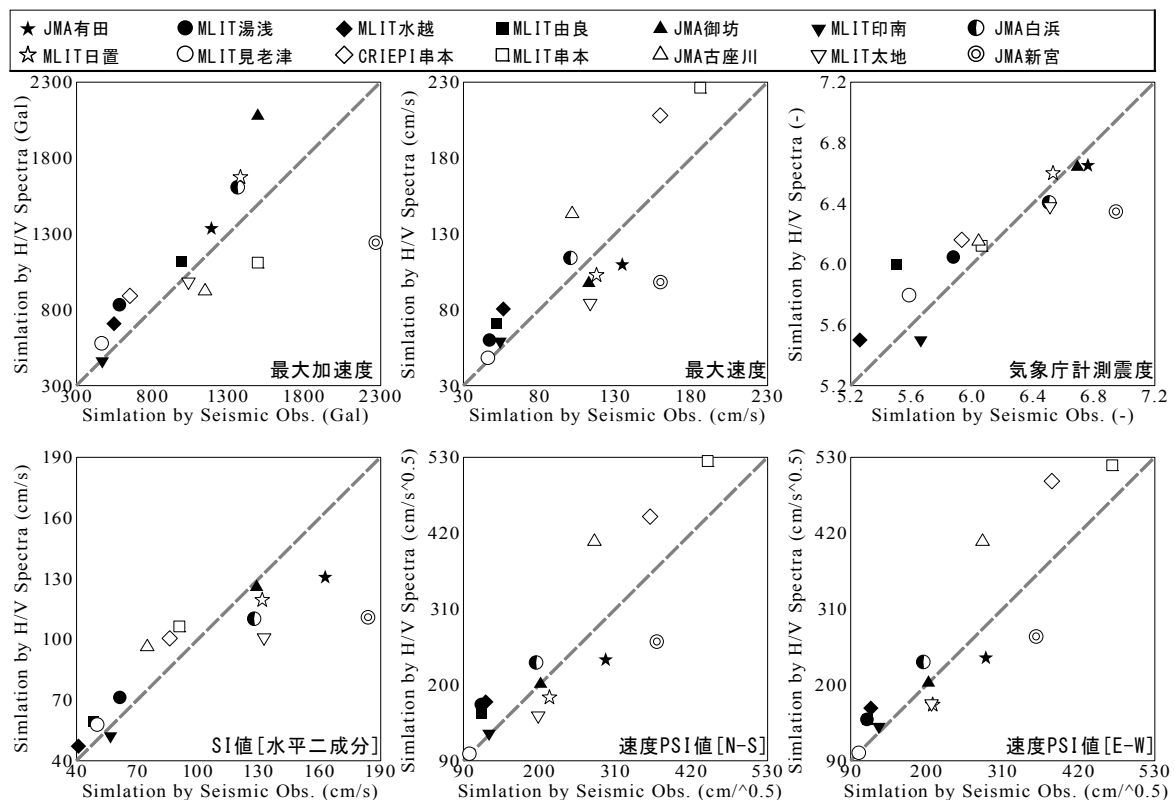
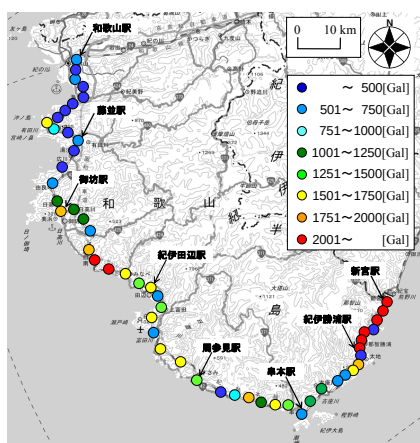


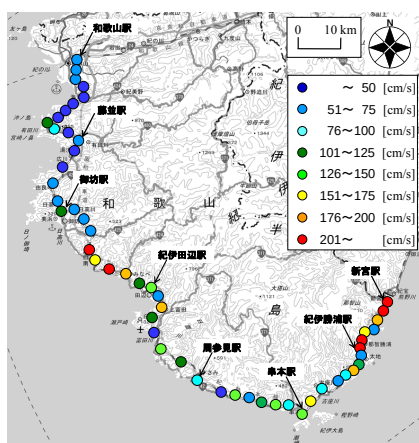
図-20 ベンチマークテストによる常時微動計測を利用した地震動推定手法の適用性の確認

表4 ベンチマークテストによる常時微動計測を利用した地震動推定手法の適用性の確認

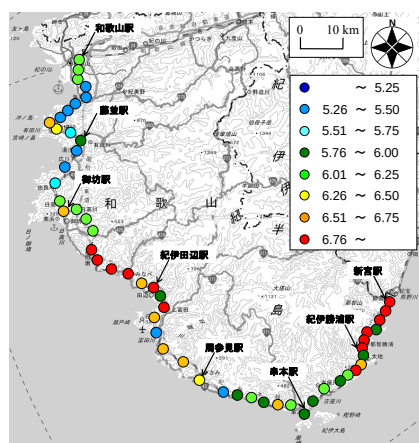
強震観測点名	PGA (Gal) [水平二成分]			PGV (cm/s) [水平二成分]			計測震度 [水平二成分]			SI値 (cm/s) [水平二成分]			速度PSI値 (cm/s/0.5) [N-S]			速度PSI値 (cm/s/0.5) [E-W]		
	地震観測	微動計測	推定割合	地震観測	微動計測	推定割合	地震観測	微動計測	推定割合	地震観測	微動計測	推定割合	地震観測	微動計測	推定割合	地震観測	微動計測	推定割合
JMA有田	1,187	1,334	1.12	134	110	0.82	6.76	6.65	-0.11	163	131	0.80	296	236	0.80	286	239	0.84
MLIT湯浅	588	827	1.41	48	59	1.25	5.88	6.04	+0.16	62	71	1.14	117	170	1.46	115	149	1.30
MLIT水越	547	708	1.30	56	81	1.43	5.26	5.50	+0.24	41	47	1.15	122	175	1.43	119	166	1.39
MLIT由良	987	1,117	1.13	52	71	1.37	5.50	6.00	+0.50	49	59	1.22	116	158	1.36	115	150	1.31
JMA御坊	1,491	2,076	1.39	112	98	0.87	6.69	6.64	-0.05	129	126	0.98	201	201	1.00	203	203	1.00
MLIT印南	470	462	0.98	54	59	1.09	5.66	5.50	-0.16	57	52	0.92	127	130	1.02	131	140	1.07
JMA白浜	1,365	1,602	1.17	101	113	1.12	6.51	6.40	-0.11	128	110	0.86	196	231	1.18	196	232	1.18
MLIT日置	1,377	1,672	1.21	118	103	0.87	6.53	6.60	+0.07	132	119	0.91	214	182	0.85	209	171	0.82
MLIT見老津	471	573	1.22	47	48	1.02	5.59	5.79	+0.20	51	57	1.14	100	99	0.99	103	100	0.97
CRIEPI串本	650	892	1.37	159	208	1.31	5.93	6.16	+0.23	86	100	1.17	360	444	1.23	381	495	1.30
MLIT串本	1,491	1,110	0.74	186	226	1.22	6.06	6.12	+0.06	91	106	1.17	443	524	1.18	468	518	1.11
JMA古座川	1,145	923	0.81	102	143	1.41	6.04	6.15	+0.11	75	96	1.29	279	408	1.46	281	408	1.45
MLIT太地	1,035	984	0.95	113	84	0.74	6.51	6.38	-0.13	132	101	0.76	198	155	0.78	207	173	0.84
JMA新宮	2,274	1,236	0.54	160	98	0.61	6.95	6.34	-0.61	184	110	0.60	371	261	0.70	360	269	0.75



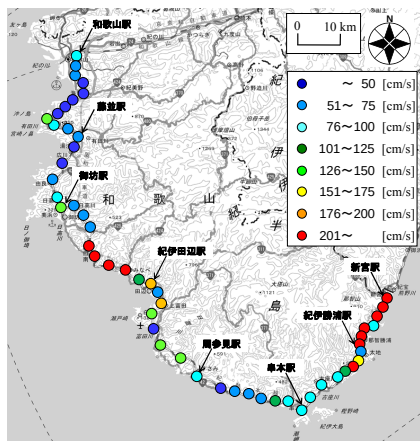
(a) 最大加速度PGA



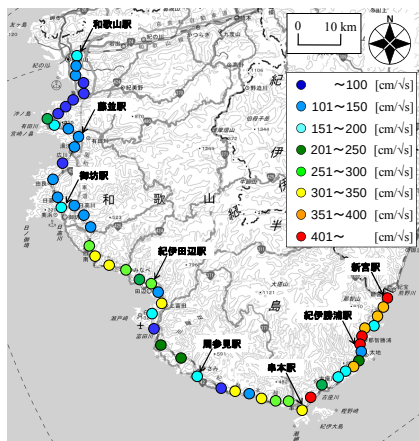
(b) 最大速度PGV



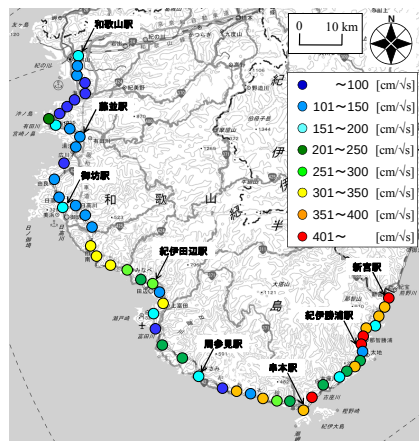
(c) 気象庁計測震度



(d) SI値



(e) 速度PSI値(N-S成分)



(f) 速度PSI値(E-W成分)

図-21 南海トラフ巨大地震におけるJRきのくに線各駅での推定地震動指標値の分布

7. JRきのくに線における強震動予測

JRきのくに線における強震動予測では、常時微動計測に基づく手法を採用した。具体的には、3.で評価したサイト増幅特性(図-12参照)、およびサイト位相特性としてPhase-EQによって各駅に対応する基準観測点(サイト増幅特性とサイト位相特性の相関性⁴⁾)を踏まえて表-2を参考に設定：表-5参照)で得られた波形(図-17および図-

18参照)をそれぞれ採用した。

図-21は、JRきのくに線の各駅において予測した地震動指標値の分布である。図-21に示すように、4.で述べた示唆と同様に、南海トラフ巨大地震時においてJRきのくに線に作用する地震動の特性は様々ではなく、局所的に大きな予測地震動を示している区間がある。具体的には、地震観測と常時微動計測に基づく手法による予測地震動の類似性が最も高い気象庁計測震度(図-20参照)に

表-5 推定点と基準点の関係一覧
(常時微動計測に基づく各駅でのサイト位相特性の評価)

推定点 (きのくに線駅)	基準点 (既存強震観測点)
和歌山	K-NET和歌山
宮前	K-NET和歌山
紀三井寺	K-NET和歌山
黒江	MLIT湯浅
海南	MLIT湯浅
冷水浦	MLIT湯浅
加茂郷	MLIT湯浅
下津	MLIT湯浅
初島	JMA有田
箕島	JMA有田
紀伊宮原	MLIT湯浅
藤並	MLIT湯浅
湯浅	MLIT由良
広川ビーチ	MLIT由良
紀伊由良	MLIT水越
紀伊内原	JMA御坊
御坊	K-NET御坊
道成寺	KiK-net印南
和佐	KiK-net印南
稲原	MLIT印南
印南	K-NET田辺
切目	K-NET田辺
岩代	K-NET田辺
南部	K-NET田辺
芳養	K-NET田辺
紀伊田辺	K-NET田辺
紀伊新庄	MLIT印南
朝来	K-NET田辺
白浜	JMA白浜
紀伊富田	KiK-net印南
椿	KiK-net上富田
紀伊日置	MLIT日置
周参見	MLIT日置
見老津	MLIT見老津
江住	K-NET串本
和深	K-NETすさみ
田子	K-NET串本
田並	JMA古座川
紀伊有田	JMA古座川
串本	CRIEPI串本
紀伊姫	MLIT串本
古座	JMA古座川
紀伊田原	K-NET太地
紀伊浦神	K-NET太地
下里	JMA古座川
太地	MLIT太地
湯川	K-NET太地
紀伊勝浦	JMA新宮
紀伊天満	JMA新宮
那智	K-NET太地
宇久井	K-NET太地
紀伊佐野	K-NET太地
三輪崎	JMA新宮
新宮	K-NET太地

着目すると、JRきのくに線の主要駅である紀伊田辺駅、紀伊勝浦駅、新宮駅周辺の区間において予測地震動が比較的大きな値を示していることが読み取れる。

8. まとめ

本稿では、南海トラフ巨大地震時に非常に大きな強震動の作用が懸念される和歌山県沿岸域を走るJRきのくに線の各駅とその周辺の既存強震観測点において常時微動計測を行い、得られた結果に基づいてサイト増幅・位相特性を評価した。そして、評価したサイト特性を用いて南海トラフ巨大地震による強震動シミュレーションを行うことで、JRきのくに線の各駅に作用する強震動を予測した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 和歌山県沿岸域(JRきのくに線の各駅とその周辺の既存強震観測点)では、サイト増幅特性および常時微動H/Vスペクトルの特性(ピーク周波数やスペクトル形状など)に有意なバラツキが確認できることから、地盤震動特性が同様であるとは言い難い。
- (2) 地震観測記録に基づきサイト増幅・位相特性を評価した上で予測した地震動と、常時微動計測結果に基づきサイト増幅・位相特性を評価した上で予測した地震動による比較(ベンチマークテスト)を、既存強震観測点を対象に行った結果、予測地震動の指標値(特に、気象庁計測震度)は概ね類似している。
- (3) 南海トラフ巨大地震時においてJRきのくに線に作用する地震動の特性は一樣ではなく、紀伊田辺駅、紀伊勝浦駅、新宮駅周辺の区間において局所的に大きな気象庁計測震度を示す。

本稿で予測したJRきのくに線沿い(各駅相当)の強震動波形は、南海トラフ巨大地震を対象とした個別の鉄道構造物の耐震性評価に利活用することができる。今後は、本稿で評価した予測地震動の指標値の分布等を踏まえて、JRきのくに線による公共輸送が途絶する危険性を最小化する耐震補強戦略や地震後の早期復旧計画について合理的な議論・検討を行っていきたいと考えている。

謝辞：国土交通省MLIT、(一財)電力中央研究所露頭岩盤上強震観測網RK-net、気象庁JMA、(国研)防災科学技術研究所K-NET/KiK-netで得られた地震観測データを使用させていただきました。(公社)地盤工学会関西支部南海トラフ巨大地震に関する被害予測と防災対策研究委員会の委員の皆様には、本研究の遂行に関して有意義なご意見をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Hata, Y., Nozu, A., Nakamura, S., Takahashi, Y. and Goto,

- H.: Strong motion estimation at the elevated bridges of the Tohoku Shinkansen damaged by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake based on extended site effects substitution method, *Proc. of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, Tokyo, Japan, pp.418-429, 2012.
- 2) 秦吉弥, 高橋良和, 後藤浩之, 野津厚: スーパーアスペリティモデルと経験的サイト増幅・位相特性を考慮した 2011 年東北地方太平洋沖地震における岩切線路橋での地震動の評価, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.383-395, 2013.
- 3) 秦吉弥, 秋山充良, 高橋良和, 後藤浩之, 野津厚, 一井康二: SPGA モデルと経験的サイト増幅・位相特性を考慮した 2011 年東北地方太平洋沖地震における長町高架橋での地震動とフラジリティカーブの評価, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.60A, pp.214-227, 2014.
- 4) 南海トラフの巨大地震モデル検討会: 南海トラフの巨大地震モデル検討会(第二次報告), 強震断層モデル編—強震断層モデルと震度分布について—, 内閣府防災情報ホームページ, 2012. (last accessed: 2016/09/01)
- 5) 野津厚, 一井康二: 性能設計の発展型としての Evidence-Based Design の提案とその実現に向けた課題, 第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集, 日本地震工学会, pp.3073-3080, 2010.
- 6) 吉川登代子, 湊文博, 秦吉弥, 山田孝弘, 常田賢一, 飛田哲男: 南海トラフ巨大地震における大阪市内の鉄道盛土の耐震性評価事例, *Kansai Geo-Symposium 2015 論文集*, 地盤工学会, pp.215-220, 2015.
- 7) 吉川登代子, 湊文博, 秦吉弥, 山田孝弘, 常田賢一, 飛田哲男: 各種 Newmark 法に基づく鉄道盛土の耐震性評価—南海トラフ巨大地震における大阪市街地を例として—, 地域安全学会梗概集, No.37, pp.1-4, 2015.
- 8) 吉川登代子, 魚谷真基, 秦吉弥, 常田賢一, 土井達也, 嶋川純平: 経験地震を考慮した南海トラフ巨大地震による鉄道盛土の残留変形量の評価, 平成 27 年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, No.0302, 2015.
- 9) 吉川登代子, 魚谷真基, 秦吉弥, 常田賢一: 南海トラフ巨大地震($M_w9.0$)による土構造物の耐震性評価事例, *Kansai Geo-Symposium 2014 論文集*, 地盤工学会, pp.89-94, 2014.
- 10) 秦吉弥, 吉田武, 吉川登代子, 山田孝弘, 湊文博, 常田賢一, 飛田哲男: 南海トラフ巨大地震における JR のくに線沿いの強震動評価, 地域安全学会梗概集, No.37, pp.5-8, 2015.
- 11) Aoi, S., Kunugi, T., and Fujiwara, H.: Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.65-74, 2004.
- 12) (公社)日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻), 国土交通省港湾局監修, pp.336-341, 2007.
- 13) Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of theradiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, No.6A, pp.1865-1894, 1983.
- 14) Petukhin, A., Irikura, K., Ohmi, S. and Kagawa, T.: Estimation of Q -values in the seismogenic and aseismic layers in the Kinki Region, Japan, by elimination of the geometrical spreading effect using ray approximation, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.93, No.4, pp.1498-1515, 2003.
- 15) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行: スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例, 日本地震工学会論文集, Vol.7, No.2, pp.215-234, 2007.
- 16) 先名重樹, 安達繁樹, 安藤浩, 荒木恒彦, 飯澤清典, 藤原広行: 微動探査観測システムの開発, 第 115 回物理探査学会学術講演会講演論文集, pp.227-229, 2006.
- 17) 秦吉弥, 湊文博, 山田雅行, 常田賢一, 魚谷真基: 和歌山県串本町における高密度常時微動計測, 物理探査, Vol.68, No.2, pp.83-90, 2015.
- 18) 長尾毅, 平松和也, 曾根照人, 野津厚: 撫養港における入力地震動のゾーニングに関する研究, 海洋開発論文集, 土木学会, Vol.23, pp.805-810, 2007.
- 19) 長尾毅, 山田雅行, 野津厚: 常時微動 H/V スペクトルを用いたサイト増幅特性の経験的補正方法に関する研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.56A, pp.324-333, 2010.
- 20) 丸山喜久, 山崎文雄, 本村均, 浜田達也: 常時微動の H/V スペクトル比を用いた地震動推定法の提案, 土木学会論文集, No.675/I-55, pp.261-272, 2001.
- 21) 秦吉弥, 常田賢一, 林健二: 常時微動 H/V スペクトルを用いたサイト増幅特性の評価に関する試み, 地盤と建設, 地盤工学会, Vol.31, No.1, pp.125-131, 2013.
- 22) Hata, Y., Nozu, A. and Ichii, K.: Variation of earthquake ground motions within very small distance, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.66, pp.429-442, 2014.
- 23) 湊文博, 秦吉弥, 常田賢一, 鎌田泰子, 小山真紀, 植田裕也: 高密度常時微動計測・臨時地震観測に基づく南海トラフ巨大地震における和歌山県広川町での津波避難不可能時間算出のための強震動評価, 土木学会論文集 A1, Vol.72, No.4, pp.I_68-81, 2016.
- 24) 藤木昂, 秦吉弥, 村田晶, 古川愛子, 一井康二, 常田賢一, 湊文博, 吉川登代子: 高密度常時微動計測に基づく長野県白馬村神城地区における地盤震動特性の評価, 土木学会論文集 A1, Vol.72, No.4, pp.I_984-992, 2016.
- 25) Hata, Y., Ueda, Y., Minato, F., Ikeda, T., Fukushima, Y., Tokida, K. and Yoshida, T.: Evaluation of 'SAF value' at reclaimed land in residential area based on seismic array observation with very high dense spatial location, *Proc. of the 5th International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Taipei, Taiwan, Paper No. P125A, 2016.
- 26) 川瀬博: 震源近傍強震動の地下構造による増幅プロセスと構造物破壊能—1995 年兵庫県南部地震での震災帯の成因に学ぶ—, 第 10 回日本地震工学シンポジウムパネルディスカッション資料集, pp.29-34, 1998.
- 27) 秦吉弥, 中村晋, 野津厚: 本震観測記録を利用した地震動推定手法の精度とその向上策—2008 年岩手・宮城内陸地震における震源域を対象として—, 土木学会論文集 A1, Vol.69, No.2, pp.186-205, 2013.
- 28) 古和田明, 田居優, 岩崎好規, 入倉孝次郎: 経験的

- サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, No.512, pp.97-104, 1998.
- 29) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良—因果性を満足する地震波の生成—, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.3, pp.808-813, 2009.
- 30) 入倉孝次郎, 香川敬生, 関口春子: 経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良, 日本地震学会秋季大会講演予稿集, No.2, B25, 1997.
- 31) 長尾毅, 山田雅行, 野津厚: 設計用入力地震動評価における位相特性の補正方法に関する研究, 土木学会論文集 A1, Vol.68, No.4, pp.I_13-19, 2012.
- 32) 野津厚, 盛川仁: 表層地盤の多重非線形効果を考慮した経験的グリーン関数法, 地震, 第 2 輯, Vol.55, pp.361-374, 2003.
- 33) 若井淳, 野津厚: 2011 年東北地方太平洋沖地震の際に見られた表層地盤の非線形挙動の概略的傾向, 港湾空港技術研究所資料, No.1272, pp.1-32, 2013.
- 34) 秦吉弥, 秋山充良, 高橋良和, 後藤浩之, 野津厚, 幸左賢二: スーパーアスペリティモデルと経験的サイト増幅・位相特性を考慮した 2011 年東北地方太平洋沖地震による南三陸町志津川での強震動の評価, 土木学会論文集 B3, Vol.69, No.2, pp.I_161-166, 2013.
- 35) Nishimae, Y.: Observation of seismic intensity and strong ground motion by Japan Meteorological Agency and local governments in Japan, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.75-78, 2004.
- 36) Housner, G. W.: Intensity of earthquake ground shaking near the causative fault. *Proc. of 3rd World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, pp.94-115, 1965.
- 37) 野津厚, 井合進: 岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に関する一考察, 第 28 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, pp.18-19, 2001.
- 38) Hata, Y., Yoshida, T., Fukushima, Y., Ikeda, T. and Tokida, K.: Evaluation of velocity power spectrum intensity with very high dense spatial location in residential valley-filling area during a future large-scale earthquake, *Proceedings of 16th World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago, Chile, Paper No. 282, 2017.
- 39) Uehara, H. and Kusakabe, T.: Observation of strong earthquake motion by National Institute for Land and Infrastructure Management, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.90-96, 2004.
- 40) Shiba, Y. and Yajima, H.: Observation network for strong motions operated by CRIEPI, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.108-111, 2004.
- 41) 澤田純男, 盛川仁, 土岐憲三, 横山圭樹: 地震動の位相スペクトルにおける伝播経路・サイト特性の分離, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.915-920, 1998.

(2016.9.1 受付)

STRONG MOTION ESTIMATION AT RAILWAY STATION SITES ALONG JR KINOKUNI LINE DURING A SCENARIO EARTHQUAKE WITH $M_w9.0$ ALONG THE NANKAI TROUGH BASED ON THE SMGA MODELS CONSIDERING LOCAL SITE EFFECTS

Yoshiya HATA, Takahiro YAMADA, Fumihiro MINATO,
Tetsuo TOBITA, Ken-ichi TOKIDA and Junji KIYONO

During a scenario earthquake with $M_w9.0$ along the Nankai Trough, strong ground motion is expected in the focal area, Wakayama Prefecture, Japan. In order to simulate the seismic damage of railway structures, it is necessary to estimate strong motions at the sites of interest with sufficient accuracy, taking into account local site effects. In this study, seismic waveforms at 54 sites for permanent railway station along JR Kinokuni Line were predicted based on the SMGA models considering the empirical site amplification and phase effects. The predicted seismic waveforms will be useful for rational safety assessment of a railway structure.