

常時微動計測および臨時地震観測の高密度化に基づく南海トラフ巨大地震における和歌山県 広川町津波来襲予想地域での強震動の評価

湊 文博¹・秦 吉弥²・常田 賢一³・鋤田 泰子⁴・小山 真紀⁵・植田 裕也⁶

¹ 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

² 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

³ フェロー会員 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: tokida@civil.eng.osaka-u.ac.jp

⁴ 正会員 神戸大学 大学院工学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1)

E-mail: kuwata@kobe-u.ac.jp

⁵ 正会員 岐阜大学 岐阜大学流域圏科学研究センター (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

E-mail: maki_k@gifu-u.ac.jp

⁶ 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

本稿では、南海トラフ巨大地震において巨大津波の来襲が懸念されている和歌山県広川町の街地・平地を対象地域として、強震動の作用が津波避難に及ぼす影響について基礎的な検討を行った。その際、当該地域において臨時地震観測ならびに常時微動計測を高密度に行い、得られた観測・計測結果に基づきサイト増幅特性を評価することで、南海トラフ巨大地震によって当該地域に作用する強震動を高密度に予測した。その結果、サイト増幅特性の差異に主に起因して、当該地域内での予測地震動の特性に有意な差異が見受けられること、強震動の作用が津波避難に及ぼす影響が比較的大きいことなどが明らかとなった。

Key Words : seismic observation, microtremor measurement, site amplification factor, H/V spectrum, strong motion estimation, tsunami evacuation

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震($M_w9.0$)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(南海トラフ巨大地震と呼ぶ)を想定した強震動の予測¹⁾が行われている。和歌山県広川町は、図-1に示すように、想定震源域の近傍に位置しており、南海トラフ巨大地震時に非常に大きな強震動の作用が予想される。さらに、広川町の街地では、2011年7月5日19時18分に発生した和歌山県北部を震源とする地震($M5.5$)による被害が報告²⁾されており、南海トラフ巨大地震時においても深刻な被害が唆される。したがって、広川町の街地・平地(以後、津波来襲予想地域³⁾もしくは対象地域と呼ぶ：図-2参照)を対象とした南海トラフ巨大地震による強震動の評価は、非常に重要⁴⁾である。対象地域では、南海トラフ巨大地震の発生後、巨大津波の早期来襲が予想^{3,5)}されており、津

波来襲前の強震動の作用が住民等の津波避難行動に大きな影響を及ぼすことも考えられる。

この点に関して、著者ほか^{6,7)}は、和歌山県串本町の街地・平地を対象に、南海トラフ巨大地震による強震動予測を高密度に実施⁸⁾し、予測地震動が津波避難に及ぼす影響について検討⁷⁾を行っている。しかしながら、高密度予測した地震動のサイト増幅特性は、串本町の街地・平地にある既存強震観測点(K-NET串本⁹⁾)と強震動予測地点(微動計測地点)間における常時微動H/Vスペクトルの特性の差異に基づいて補正評価しているため、K-NET串本と強震動予測地点の間において常時微動H/Vスペクトルの特性の差異が比較的大きい場合には強震動の予測精度を十分に確保するには至っていない可能性がある。

上述した背景を踏まえ、本稿では、和歌山県広川町の津波来襲予想地域を対象に、南海トラフ巨大地震による強震動の高密度予測を行った。具体的には、まず、広川

町の津波来襲地域において臨時地震観測ならびに常時微動計測を高密度に行い、得られた観測・計測結果に基づいてサイト増幅特性を評価した。次に、評価したサイト増幅特性および南海トラフ巨大地震のSMGAモデル¹⁾を用いて、強震動シミュレーションを実施し、対象地域に作用する強震動を微動計測点ごとに高密度に予測した。最後に、予測地震動に基づく気象庁計測震度⁹⁾および瞬間計測震度¹⁰⁾を算定することによって、強震動の作用が津波避難に及ぼす影響について検討を行った。

2. 高密度地震観測

(1) 臨時地震観測の実施

図-3に対象地域に設けた臨時地震観測点(地震アレー観測地点：計16地点)の分布¹⁾を示す。なお、広川町役場では、強震観測点(計測震度計)が既存設置²⁾されている。図-3に示す16地点において同時観測(アレー観測)としたのは、地震観測記録を16地点で同時に得ることでサイト増幅特性を評価(後述)し、16つの観測点間の地盤震動特性の差異を直接的に評価するためである。地震観測システムは、先行研究¹²⁾を参考に構築した。具体的には、観測期間は2014年10月4日～11月22日の50日間であり、地震計は加速度計(一体型微動探査兼地震計機器¹³⁾)を採用した。また、観測条件として、サンプリング周波数は100Hz、観測方向は3成分(N-S, E-W, U-D方向)とし、トリガー加速度レベルは設定せずに常時観測を継続するシステムを採用した。なお、上述した地震観測システム、観測期間、観測条件などは、16地点において共通である。

(2) サイト増幅特性の評価

図-4は、広川町役場(既存計測震度観測点)におけるサイト増幅特性¹¹⁾に対して、臨時地震観測点におけるサイト増幅特性を重ね合せたものである。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。臨時地震観測点におけるサイト増幅特性は、臨時観測点とK-NET有田⁸⁾で同時に得られた以下の中小地震による観測記録に基づいて評価した。

- ・2014/10/05 03:10 39km 紀伊水道(M3.9)
- ・2014/11/22 13:44 52km 和歌山県北部(M3.9)

上記の中小地震観測記録を対象に、伝播経路特性^{14),15)}の違いを考慮したフーリエスペクトルの比率(各臨時観測点/K-NET有田)を各地震記録に対して計算し、この比率(上記2つの観測地震におけるスペクトル比の平均)をK-NET有田における既存のサイト増幅特性¹⁰⁾に掛け合わせることによって、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、対象地域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対象地域に作用する強震動の特性にも大きな違い

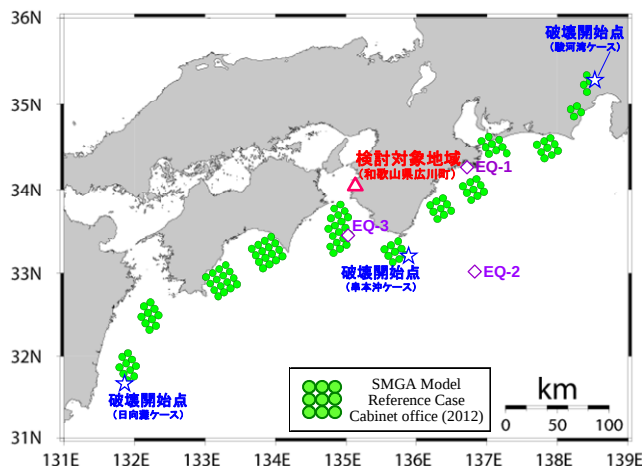


図-1 南海トラフ巨大地震の想定震源域¹⁾と和歌山県広川町

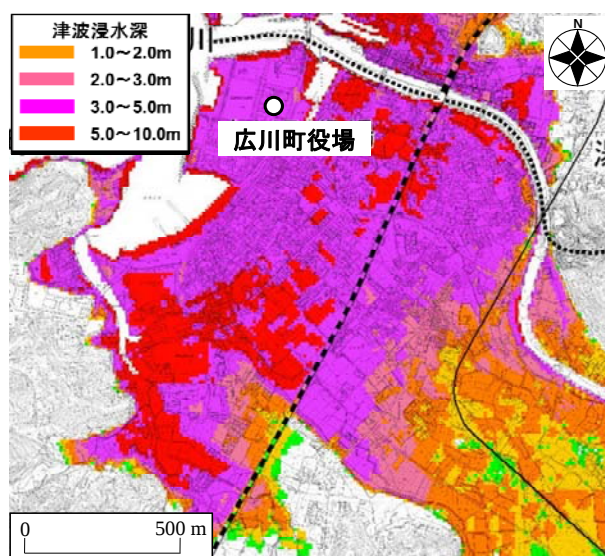


図-2 広川町における津波来襲予想地域とその浸水深³⁾

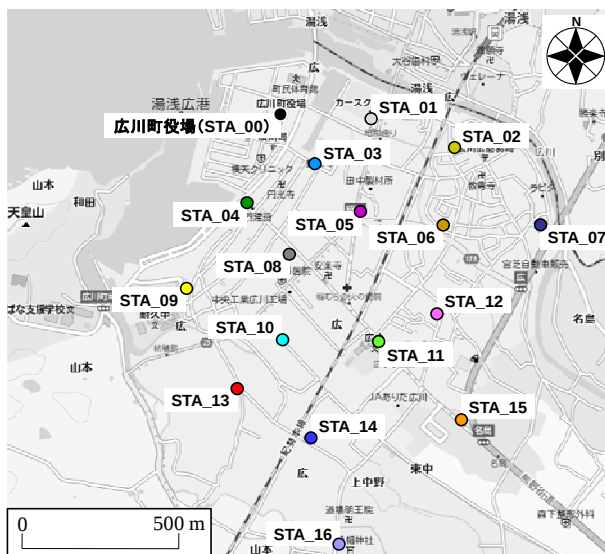


図-3 広川町における既存強震観測点と臨時地震観測点の分布

が生じる可能性が高いことを示唆するものである。

図-5～図-13は、(イ)上空写真、(ロ)地形現況図¹⁷⁾、(ハ)新旧地形の比較図、(ニ)安政南海地震による津波浸水域¹⁸⁾、(ホ)昭和南海地震による津波浸水域¹⁹⁾、(ヘ)産総研地質図¹⁹⁾、(ト)国交省表層地質図²⁰⁾、(チ)国交省地形分類図²⁰⁾、(リ)国交省土壌図²⁰⁾による分類に対して、対象地域に設けた16つの臨時地震観測点の位置情報を重ね合せたものである。図-4に対して図-5～図-13を比較すると、各種分類図(図-5～図-13参照)の中で、評価したサイト増幅特性(地震基盤～地表)に対して明らかな関係性を示すものを読み取ることはできない。

3. 高密度常時微動計測

(1) 常時微動計測の実施

常時微動計測は、対象地域における計476地点(図-14参照)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3月27～28日、3月31日、4月2日、4月25日の計5日間である。計測は主に昼間に実施し、同型の7台の微動計(7台ともに白山工業(株)製の一体型微動探査兼地震計機器¹³⁾)を採用した。計測機器の諸元については、文献13)を参照されたい。計測方向は水平2成分と鉛直成分の計3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2成分の平均をとった。計測時間は、1計測点あたり約30分間の単点計測とした。

(2) H/Vスペクトルの評価

図-15は、対象地域内に設けた476地点における常時微動H/Vスペクトルを重ね合せたものである。常時微動H/Vスペクトルの計算処理方法としては、まず、微動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¹³⁾などを考慮して0.2～10Hzとした。図-15に示すとおり、同じ対象地域内においても、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)に違いが生じているのが確認でき、対象地域における地盤震動特性が様々であると言い難い。

図-16は、広川町の街地・平地における常時微動H/Vスペクトル(図-15参照)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-16と図-7(新旧地形の比較図)を比較すると、埋立地や沿岸域では、H/Vスペクトルのピーク周波数が比較的低周波数帯域(概ね4Hz以下)に分布しているのがわかる。さらに、図-16と図-12(地形分類図)を比較すると、自然堤防・砂洲・砂丘で分類されている区域では、比較的低周波数帯域(概ね4Hz以下)に分

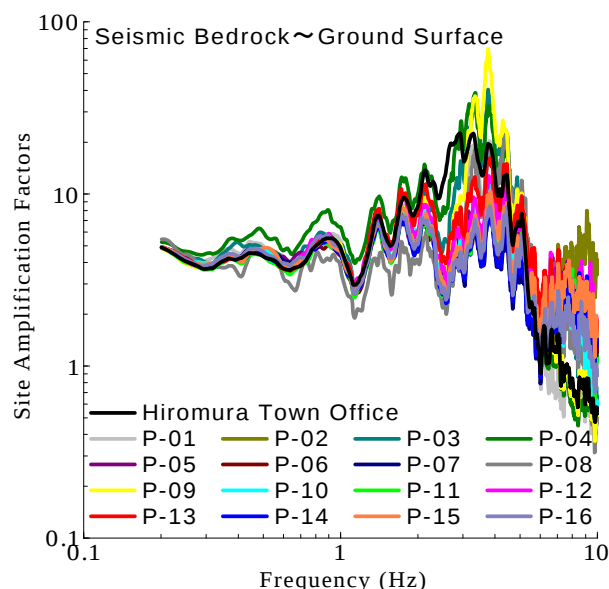


図-4 サイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較

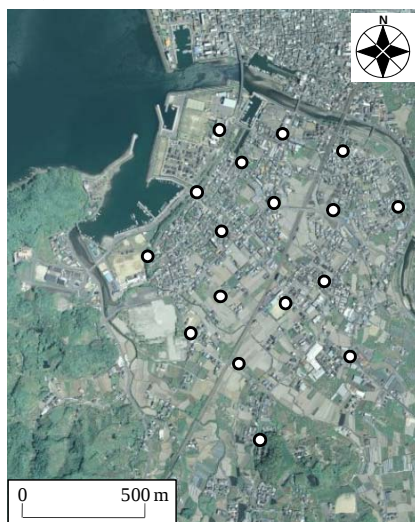


図-5 上空写真



図-6 地形現況¹⁷⁾

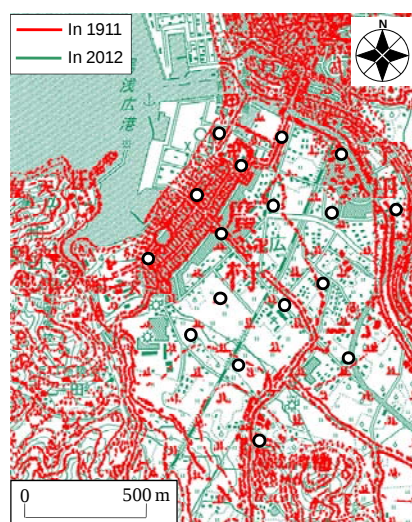


図-7 新旧地形の比較

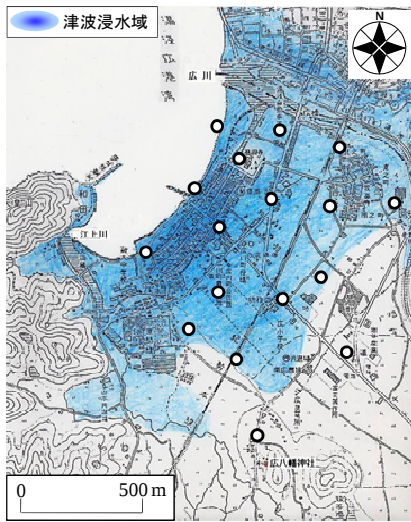


図-8 安政南海地震による津波浸水域¹⁸⁾

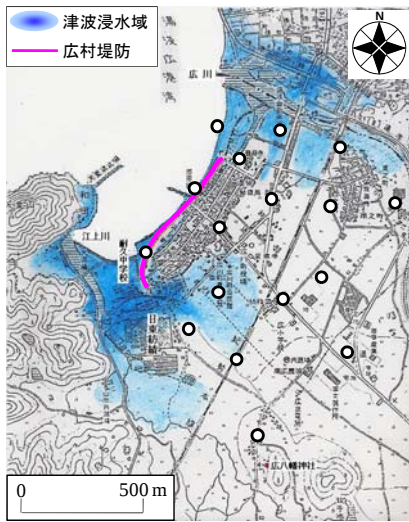


図-9 昭和南海地震による津波浸水域¹⁸⁾

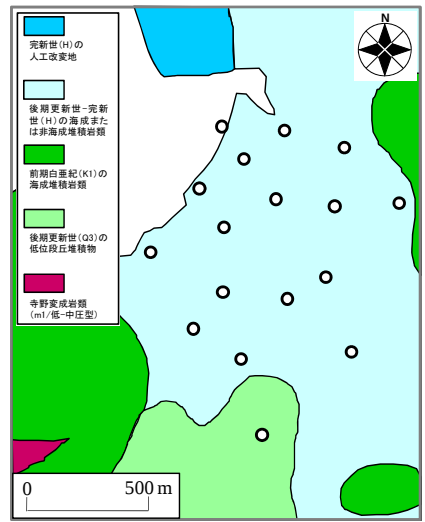


図-10 産総研地質図¹⁹⁾

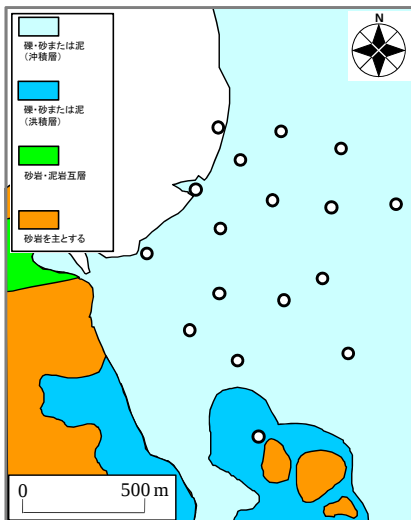


図-11 国交省表層地質図²⁰⁾

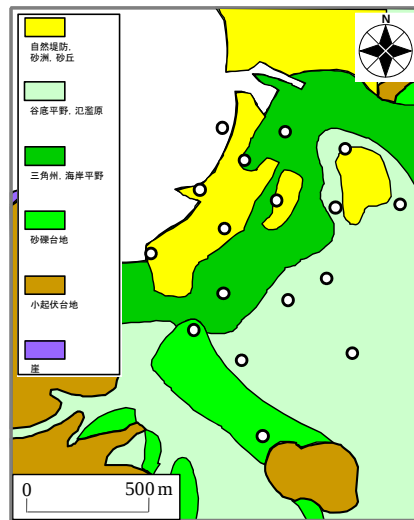


図-12 国交省地形分類図²⁰⁾

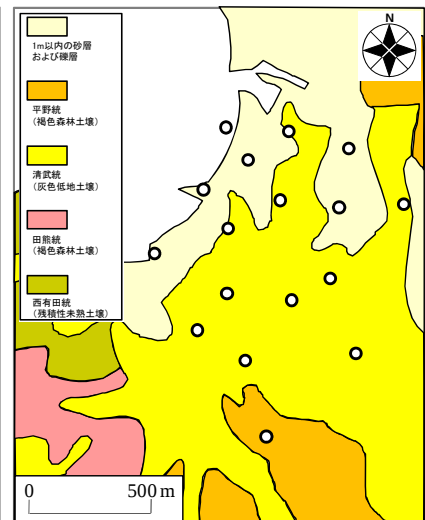


図-13 国交省土壌図²⁰⁾

布しているのに対して、それ以外の区域では、比較的高周波帯域(概ね4Hz以上)に分布しているのが読み取れる。

4. サイト増幅特性の広域評価

(1) ゾーニング

本検討では、図-17に示すように、広川町の街地・平地での常時微動H/Vスペクトルの特性に基づいて、地盤震動特性によるゾーニングを実施した。ゾーニングの方法としては、DGS値²⁰⁾を用いた定量的方法²²⁾を採用した。DGS値は、常時微動H/Vスペクトルの二地点間(臨時余震観測点STAと常時微動計測地点P)の比率の常用対数を取り、周波数範囲内(0.2–10Hz：図-15参照)において積分した値²⁰⁾であり次式で表わされる。

$$DGS = \sum \left| \log \left(\frac{R_{P_001-476}(f)}{R_{STA_00-16}(f)} \right) \right| \cdot \Delta f \quad (1)$$

ここに、P_001–476は対象地域における常時微動計測地点(計476点：図-14参照)、STA_00–16は対象地域における既存震度観測点・臨時地震観測点(計17点：図-3参照)である。よって、式(1)に基づけば、既存震度観測点・臨時地震観測点では、DGS値は0.0となる。式(1)を用いて、まず、常時微動の各計測点(P_001–476)におけるDGS値を17つの地震観測点(STA_00–16)に対してそれぞれ計算し(すなわち、微動計測点毎に17つのDGS値を持つことになる)、次に、17つの地震観測点にそれぞれ対応する17つのDGS値の中から最も小さな値となる地震観測点を微動計測点毎に選択し、図-17に示すように、広川町の街地・平地(津波来襲予想地域)を17つのゾーン(ZONE_00–16)に分割した。

(2) 経験的補正

サイト増幅特性は、各ゾーン(ZONE_00–16)にそれぞれ対応する地震観測点(STA_00–16)において評価したもの(図-4参照)を参照した。ただし、2.(2)および3.(2)



図-14 常時微動計測地点の分布

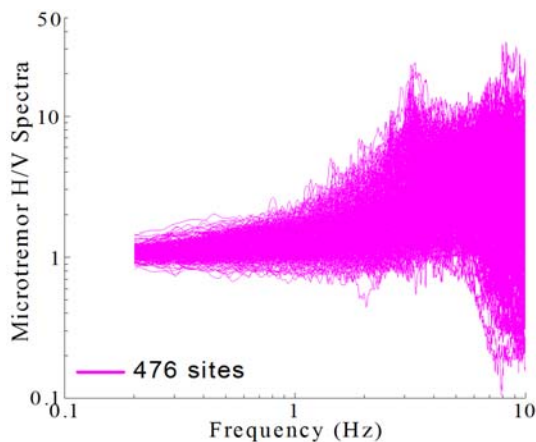


図-15 常時微動H/Vスペクトルの比較

で述べたとおり、同じ対象地域内ならびに同一ゾーン内においても常時微動H/Vスペクトルの特性には差異が見受けられる。そこで本検討では、既往の研究²²⁾²³⁾で行ったように、同一ゾーン内における地震観測点(STA_00-16)と微動計測地点(P_001-476)での常時微動H/Vスペクトルの比較に基づき、各ゾーンでの地震観測点(STA_00-16)におけるサイト増幅特性(図-4参照)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)²⁴⁾²⁵⁾を加えることによって、対象地域における微動計測地点(P_001-476：図-14参照)におけるサイト増幅特性(地震基盤～地表)を評価した。

図-18(b)～(r)にその評価結果を各ゾーン(ZONE_00-16)について示す。図-18に示すように、同じ対象地域および同一ゾーン内においても評価したサイト増幅特性がバラツキを有していることがわかる。これは、2.2)でも述べたように、南海トラフ巨大地震時に対象地域に作用する地震動の特性が大きく異なってくる可能性が高いことをあらためて示唆するものである。



写真-1 常時微動計測状況の一例

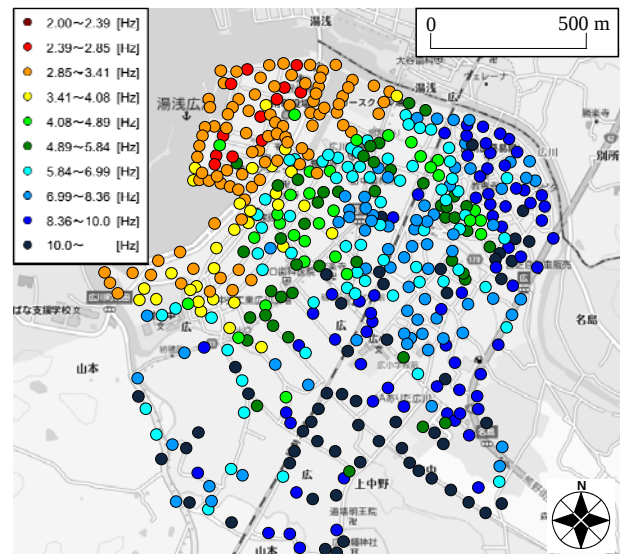


図-16 常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数の分布

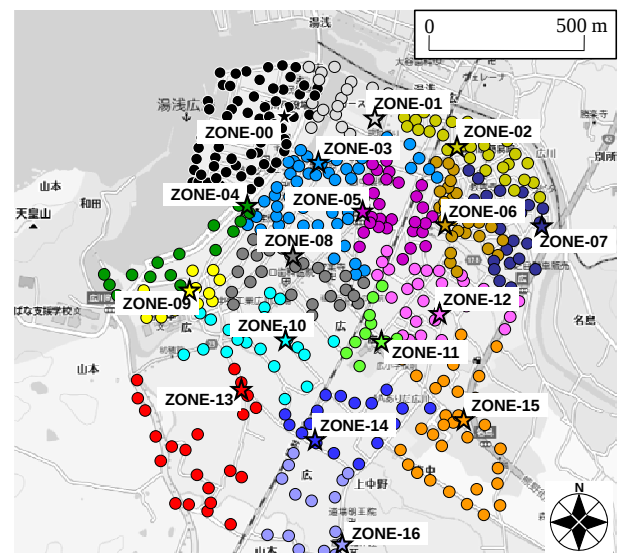


図-17 DGS値に基づくゾーニング

5. 強震動の評価

(1) 震源モデルと強震波形計算手法

南海トラフ巨大地震による地震動の推定には、内閣府南海トラフの巨大地震モデル検討会¹⁾によるSMGAモデ

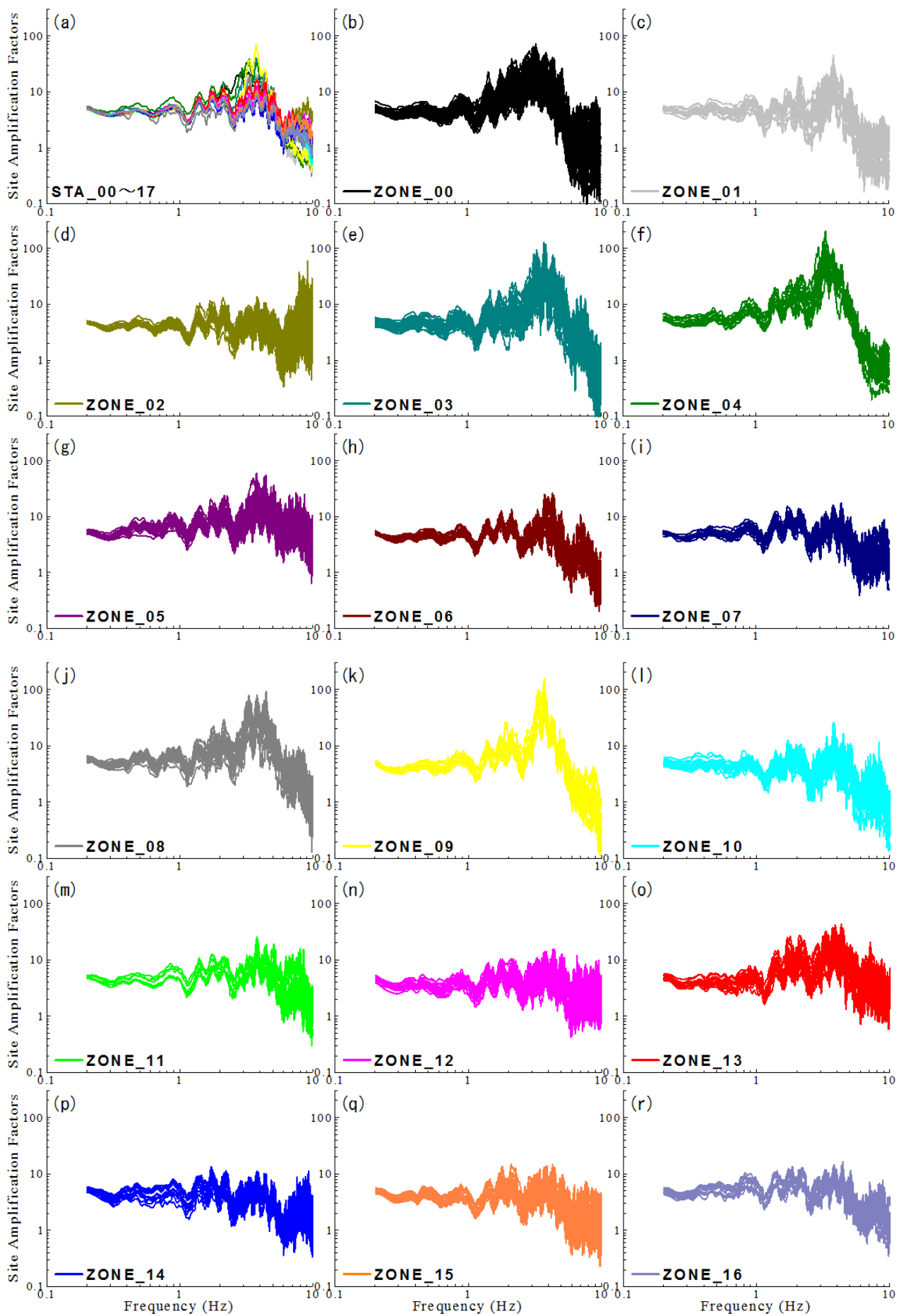


図-18 DGS値による地盤震動特性に関するゾーニングに基づく常時微動計測点でのサイト増幅特性(地震基盤～地表)の評価

ル(基本ケース)を採用した。図-1に静岡県駿河湾～宮崎県日向灘のサブイベント(12個のSMGAで構成)と対象地域の位置関係を示す。モデルパラメータの詳細については、文献1)を参照されたい。なお、 Q 値については、Petukhinほかによる推定値¹⁰⁾を採用した。本稿では、図-1に示すとおり、先行研究⁷⁾と同様に破壊開始点の位置を、①駿河湾(以後、駿河湾ケースと呼ぶ)、②串本沖(以後、串本沖ケースと呼ぶ)、③日向灘(以後、日向灘ケースと呼ぶ)に配置した計3ケースを設定した。

本研究では、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震波形計算手法²⁰⁾²⁷⁾を適用した。この方法では、まず式(1)により統計的グリーン関数を生成する。

$$A(f) = S(f) \cdot P(f) \cdot G(f) \cdot \frac{O(f)}{|O(f)|_p} \quad (2)$$

ここに、 $A(f)$ は地表における統計的グリーン関数のフーリエ変換で複素数、 $S(f)$ は小地震の震源スペクトルで実数、 $P(f)$ は伝播経路特性¹⁴⁾で実数、 $G(f)$ はサイト増幅特性(図-8参照)で実数、 $O(f)$ は現地で観測された地震記録のフーリエ変換で複素数、 $|O(f)|_p$ 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¹⁴⁾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PRITIN¹⁴⁾水平2成分ともに0.71とした。

式(2)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(2)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²⁰⁾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²⁷⁾。

サイト位相特性(式(2)における中小地震観測記録のフーリエ変換 $O(f)$)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)選定した。具体的には、図-1に示すように、①駿河湾ケースではEQ-1(2000/10/31 01:42 39km 三重県南部を震源とする地震($M_{5.7}$)), ②串本沖ケースではEQ-2(2004/09/05 19:07 38km 三重県南東沖を震源とする地震($M_{7.1}$)), ③日向灘ケースではEQ-3(2001/03/02 07:30 42km 和歌山県南方沖を震源とする地震($M_{4.0}$))によって、K-NET御坊(図-19参照)で得られた観測波形を対象地域内に設けた微動計測点(476地点)において共通採用した。ここに、既往研究の成果²⁰⁾を参考に海溝型地震による波形の時間軸の伸縮補正は実施していない。

なお、サイト位相特性の評価地震(EQ-1, EQ-2, EQ-3)による記録は、対象地域内の臨時観測観測点(広村町役場の震度計を含む)で得られていないため、サイト増幅特性とサイト位相特性の相関性³⁰⁾を考慮して(図-20に示すように、対象地域に対するDGS値²¹⁾に基づくサイト増幅特性の類似性が最も高いことを考慮して)、K-NET御坊で観測された地震記録を対象地域におけるサイト位相特性として転用した。

(2) 強震動予測結果

図-21、図-22、図-23は、①駿河湾ケース、②串本沖ケース、③日向灘ケースにおける対象地域での予測地震動の分布である。ここでは、SMGAモデルを震源モデルとして採用しているため、一定の信頼性があると考えられる気象庁計測震度⁹⁾の分布に着目した。なお、SMGAモ

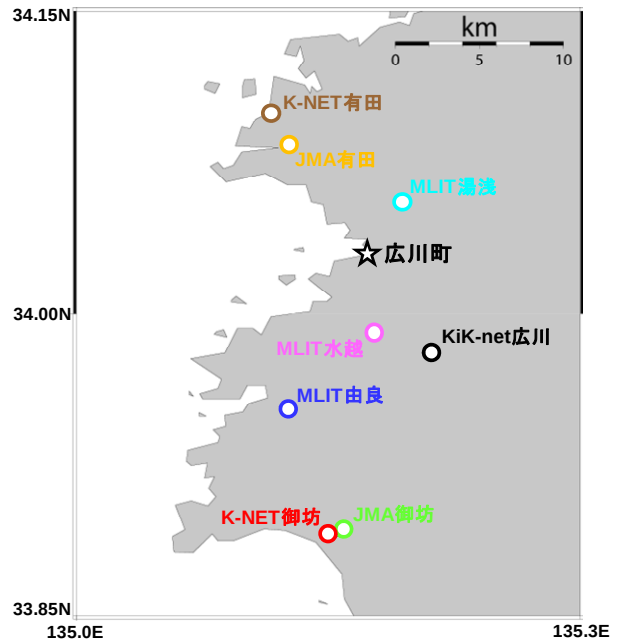


図-19 広川町周辺の既存強震観測点の分布

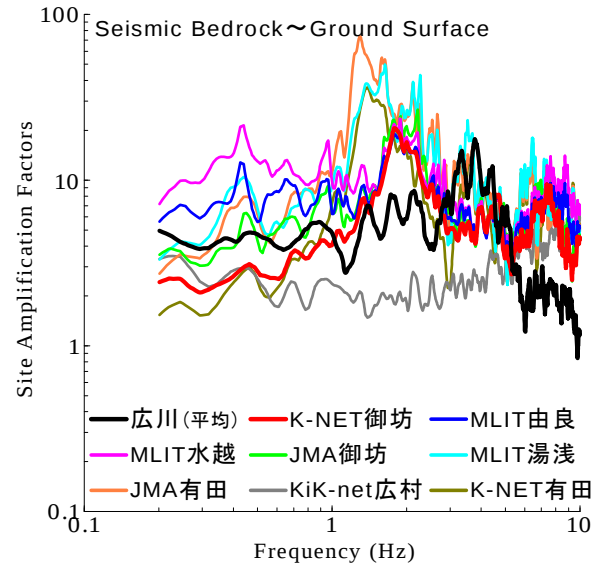


図-20 サイト増幅特性の類似性評価に基づく観測点の抽出

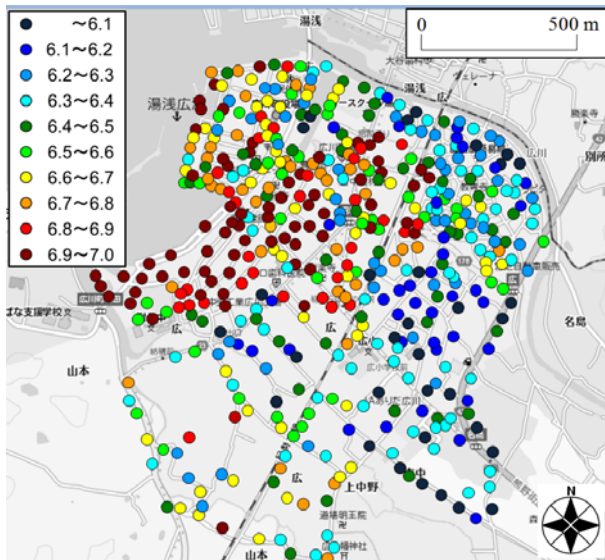


図-21 気象庁計測震度の分布（駿河湾ケース）

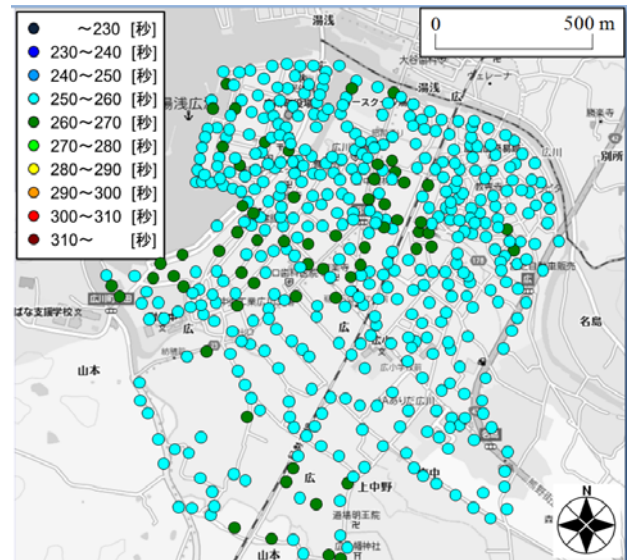


図-24 避難不可能時間の分布（駿河湾ケース）

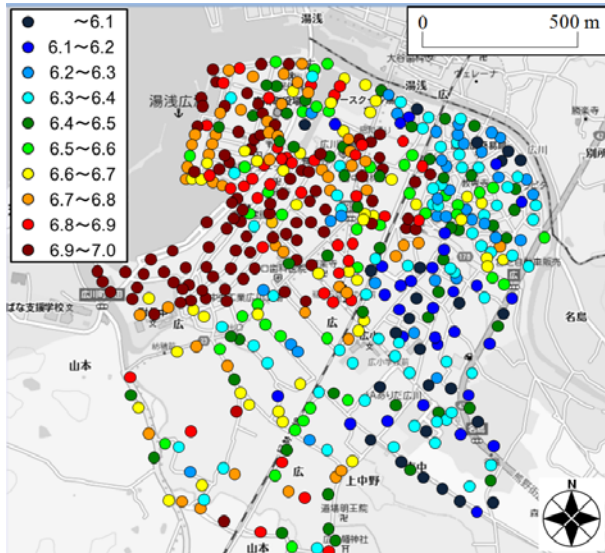


図-22 気象庁計測震度の分布（串本沖ケース）

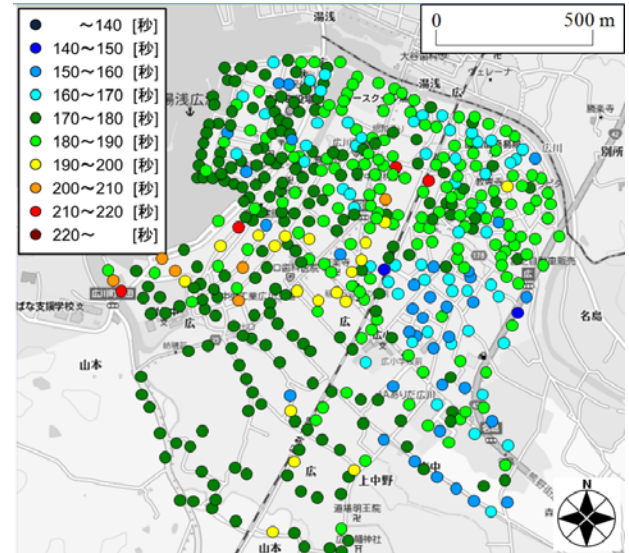


図-25 避難不可能時間の分布（串本沖ケース）

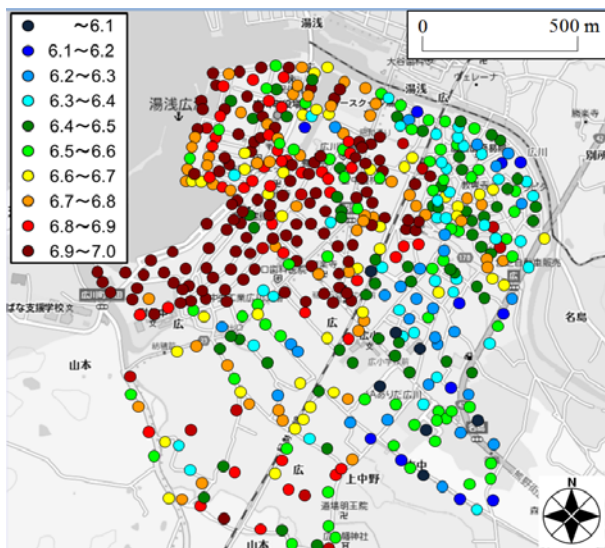


図-23 気象庁計測震度の分布（日向灘ケース）

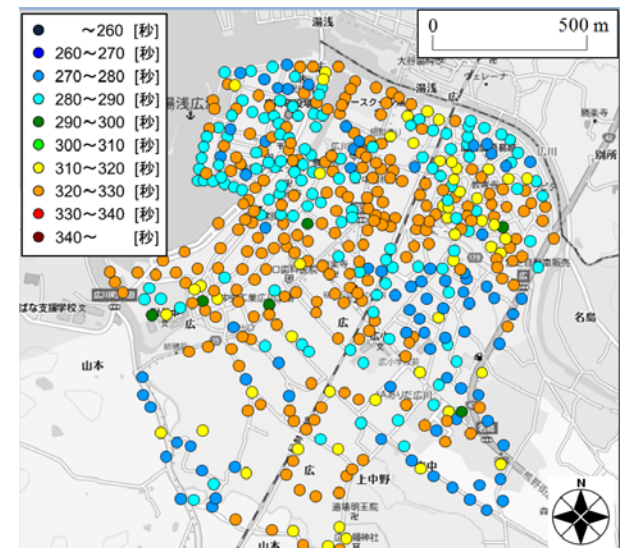


図-26 避難不可能時間の分布（日向灘ケース）

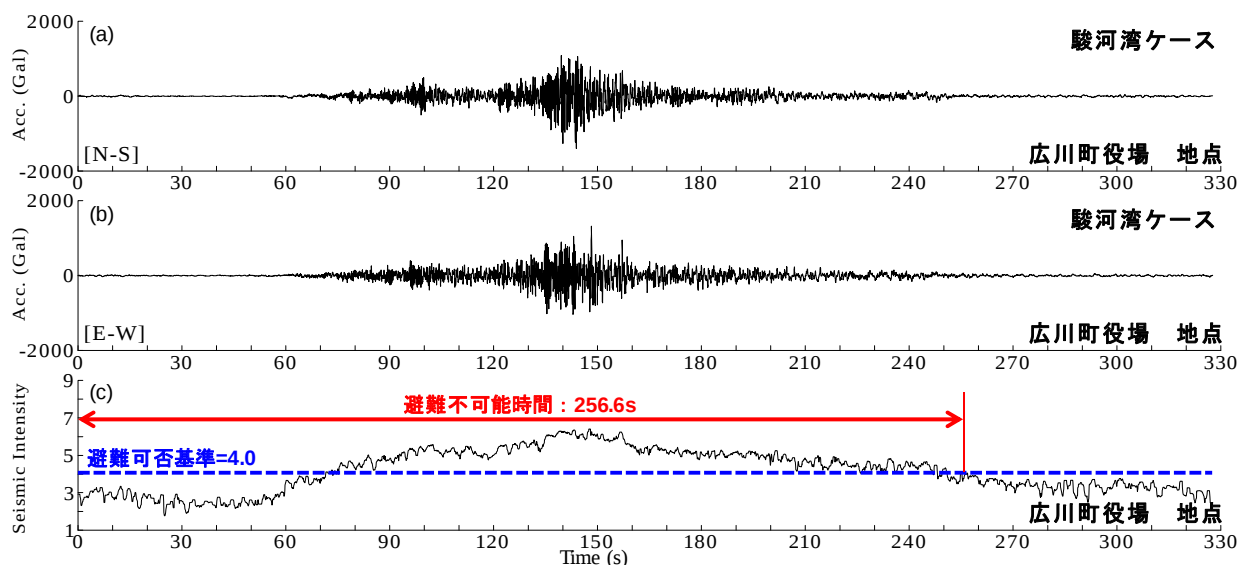


図-27 瞬間計測震度の時刻歴に基づく避難不可能時間の算定例（駿河湾ケース）

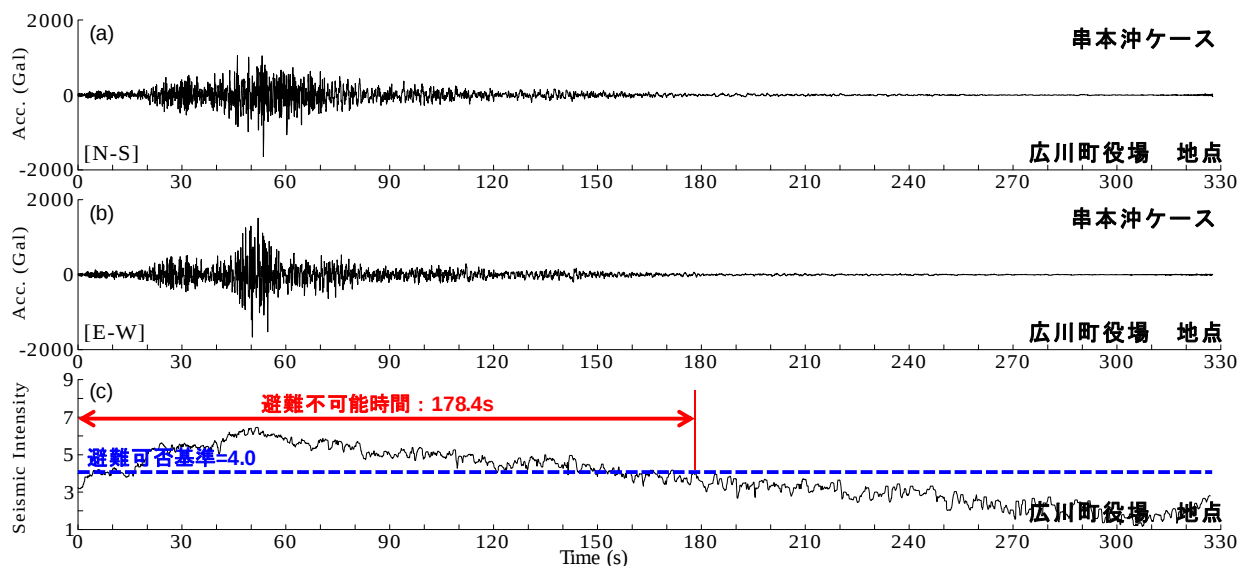


図-28 瞬間計測震度の時刻歴に基づく避難不可能時間の算定例（串本沖ケース）

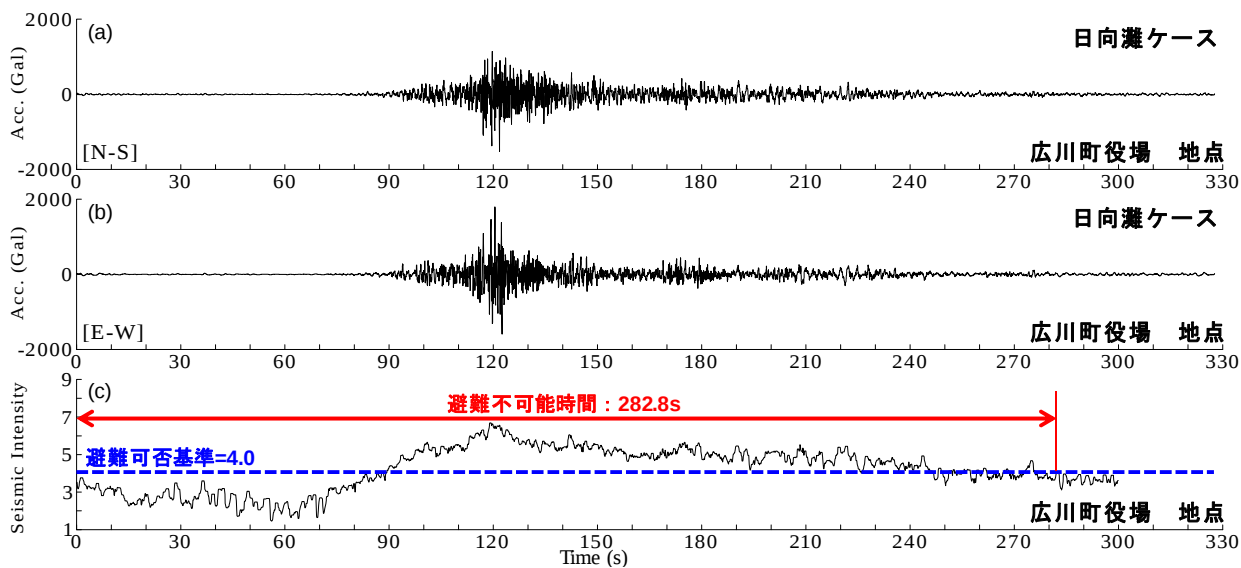


図-29 瞬間計測震度の時刻歴に基づく避難不可能時間の算定例（日向灘ケース）

デルは、震度の再現に主眼を置いた特性化震源モデルであり¹³⁾、全ての地震動指標値の再現に適した断層モデルであるとは言い難い面もあることを付記しておく。

図-21、図-22、図-23に示すとおり、駿河湾ケース、串本沖ケース、日向灘ケースの順に気象庁計測震度の値が大きくなっていく傾向がある。また、サイト増幅特性の差異(図-4および図-18参照)に主に起因して、本震時に予測される対象地域内の気象庁計測震度が一様な値とはなっておらず有意な差異が見受けられる。震度7相当が予想される地域は北西部に存在する埋立地や沿岸域、地形分類図(図-12参照)において自然堤防・砂洲・砂丘で分類されている区域に比較的集中する傾向にある。

図-24、図-25、図-26は、①駿河湾ケース、②串本沖ケース、③日向灘ケースにおける対象地域での強震動作用中の避難不可能時間の分布である。避難不可能時間は、図-27、図-28、図-29に一例を示すように、予測地震動の加速度波形において瞬間計測震度¹⁰⁾(水平2成分合成)の時刻歴を計算し、先行研究³²⁾による知見を参考に、瞬間計測震度が4.0を下回るまでの連続時間とした。

ここに、5.(1)で紹介した経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震波形計算手法³²⁾に基づいた統計的グリーン関数法による予測地震動には、位相波(EQ-1, EQ-2, EQ-3)によってK-NET御坊で得られた観測波)の時刻遅れが入力されているため、本来、震源(破壊開始点)からの絶対時刻とはならない。なお、避難不可能時間の原点として、緊急地震速報等による覚知時間あるいは初期微動の覚知時間などを採用することも考えられるが、既往の研究成果³³⁾によれば、緊急地震速報や初期微動によって避難を開始するとは考えにくい。

そこで本検討では、破壊開始点に最も近い陸地において同じサイト位相波を用いて予測した地震動との相対時間を予測地震動の時刻歴(例えば、図-27、図-28、図-29の時間軸)として採用した。なお、震度の算定に適したSMGAモデル¹³⁾を用いていることから、図-27、図-28、図-29において同図(a),(b)の推定地震動の加速度時刻歴に基づいて算定した瞬間計測震度の時刻歴(同図(c))とその最大値(気象庁計測震度の値)には一定の信頼性があるものと考えられる。

図-24、図-25、図-26に示すとおり、震源(破壊開始点)が津波来襲地域の比較的近傍にある串本沖ケースでは、避難不可能時間が短くなっている。一方で、駿河湾ケースおよび日向灘ケースでは、避難不可能時間が比較的長くなる傾向にあり、日向灘ケースではその傾向が顕著に表れている。また、対象地域内での高密度地震観測・常時微動計測に基づくサイト増幅特性が避難不可能時間に及ぼす影響に着目すると、駿河湾ケースではその影響が比較的小さいのに対し、串本沖ケースおよび日向灘ケー

スではその影響が比較的大きい。さらに、日向灘ケースでは、避難不可能時間が長時間に及んでいる。上述した結果を踏まえれば、対象地域内でのサイト増幅特性の差異や南海トラフ巨大地震の発生シナリオ(破壊開始点)の差異などによって、対象地域が有する津波避難パフォーマンスには有意な差異があることが示唆される。

4. まとめ

本稿では、南海トラフ巨大地震時に津波の来襲が予想される和歌山県広川町の街地・平地において高密度地震観測ならびに高密度常時微動計測を行い、得られた結果に基づいて当該地域でのサイト増幅特性を評価した。そして、南海トラフ巨大地震を対象とした強震動シミュレーションを行うことで、当該地域に作用する強震動を高密度に予測した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 広川町の街地・平地(津波来襲予想地域)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)に差異が確認できることから、同地域内における地盤震動特性が一様であるとは言い難い。
- (2) 上記(1)による知見を踏まえれば、広川町役場内の既存強震観測点(計測震度観測点)で得られた記録に基づく地盤震動特性は、広川町内(津波来襲予想地域内)全体の地盤震動特性を代表するものではない。
- (3) 広川町の街地・平地(津波来襲予想地域)において、サイト増幅特性(地震基盤～地表)は、各種地図(上空写真、地形図、歴史地震による津波浸水域図、地質・地形・土壌による分類図)に対して、明らかな関係性を見出すことはできない。
- (4) 広川町の街地・平地(津波来襲予想地域)内における埋立地、沿岸域、自然堤防・砂洲・砂丘区域では、常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数が比較的低周波数帯域(概ね4Hz以下)に分布する。
- (5) 常時微動H/Vスペクトルの特性に基づくDGS値を用いたゾーニング結果を踏まえて評価した広川町の街地・平地(津波来襲予想地域)内におけるサイト増幅特性は、一定のパラツキを有している。
- (6) 広川町の津波来襲予想地域では、同地域内での地盤震動特性の差異などに起因して、本震時に予想される気象庁計測震度等の強震動の特性が大きく異なる。
- (7) 広川町の津波来襲予想地域では、同地域内での地盤震動特性の差異や南海トラフ巨大地震の発生シナリオの差異などによって、同地域が有する津波避難パフォーマンス(瞬間計測震度の時刻歴に基づく避難不可能時間)に有意な差異が存在する。

今後は、和歌山県内の串本町や広川町以外の地域を対象として、強震動の作用が津波避難に及ぼす影響について同様の検討を行っていきたい。

謝辞：和歌山県および(国研)防災科学技術研究所K-NETによる地震観測記録を利用しました。現地踏査、臨時地震観測、常時微動計測の実施にあたっては、広川町の住民の皆様に大変お世話になりました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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: 2015/08/15)
- 2) 気象庁：平成 23 年 7 月 5 日 19 時 18 分の和歌山県北部の地震に関する現地調査について、和歌山地方気象台防災業務課平成 23 年 7 月 7 日報道発表資料、2011.
- 3) 和歌山県地震・津波被害想定検討委員会：「南海トラフの巨大地震」及び「東海・東南海・南海 3 連動地震による津波浸水想定について、和歌山県総務部危機管理局総合防災課ホームページ、2013. (last accessed: 2015/08/15)
- 4) 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.
- 5) 稲田健二：和歌山県の津波避難困難地域と津波対策について、平成 27 年度近畿地方整備局研究発表会論文集、防災・保全部門 No.11, 2015.
- 6) 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.
- 7) 湊文博、秦吉弥、山田雅行、常田賢一、鍛田泰子、魚谷真基：高密度常時微動計測に基づく和歌山県串本町における南海トラフ巨大地震の強震動評価と津波避難に及ぼす影響、土木学会論文集 A1, Vol.71, No.4, 2015. [in press]
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) Kuwata, Y. and Takada, S.: Instantaneous instrumental seismic intensity and evacuation, *Journal of Natural Disaster Science*, Vol.24, No.1, pp.35-42, 2002.
- 11) 秦吉弥、常田賢一、湊文博：高密度中小地震観測に基づく和歌山県広川町でのサイト増幅特性の評価、第 50 回地盤工学研究発表会講演概要集、pp.2017-2018, 2015.
- 12) Hata, Y. and Yamada, M.: Evaluation of site amplification and phase effects in Kushimoto Town, Wakayama Prefecture, Japan, *Proc. of the Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Paper No.631, Istanbul, Turkey, 2014.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 国土交通省国土地理院：地理院地図(電子国土 Web)、2015. (last accessed: 2015/08/15)
- 18) 気象庁：「稲むらの火」と史蹟広村堤防、西太平洋地震・津波防災シンポジウム資料集、2013.
- 19) 産業技術総合研究所：地質図表示システム(地質図 Navi)、地質調査総合センターホームページ、2013. (last accessed: 2015/08/15)
- 20) 国土交通省国土政策局：5 万分の 1 都道府県土地分類基本調査(海南)、国土政策局国土情報課ホームページ、2003. (last accessed: 2014/08/15)
- 21) 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.
- 22) 秦吉弥、酒井久和、野津厚、一井康二、丸山喜久、角田光法：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動推定手法に基づく既往の大規模地震における鳴瀬川堤防沿いでの強震動の評価、第 32 回地震工学研究発表会講演論文集、土木学会、Paper No.2-240, 2012.
- 23) 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.
- 24) 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.
- 25) 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.
- 26) 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.
- 27) 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一, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.3, pp.808-813, 2009.
- 28) 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.
- 29) 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.
- 30) 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.
- 31) Miyake, H., Iwata, T. and Irikura, K.: Source characterization for broadband ground-motion simulation: Kinematic heterogeneous source model and strong motion generation area, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.93, No.6, pp.2531-2545, 2003.
- 32) 楢田泰子, 齊藤栄: 瞬間計測震度を用いた揺れ最中の避難行動可能時間の定量化, 日本地震工学会論文集, Vol.10, No.5, pp.52-65, 2010.
- 33) 土肥裕史, 奥村与志弘, 小山真紀, 湯浅亮, 清野純史: 津波避難初期過程におけるコミュニティのシミュレーションモデルの構築, 土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集, I-350, pp.699-700, 2014.
- 31) Miyake, H., Iwata, T. and Irikura, K.: Source character-

(2015. 9. 4 受付)

STRONG MOTION PREDICTION WITH HIGH DENSITY
IN TSUNAMI ATTACK AREA, HIROKAWA TOWN,
WAKAYAMA PREFECTURE, JAPAN
DURING A SCENARIO EARTHQUAKE WITH $M_w9.0$
ALONG THE NANKAI TROUGH BASED ON THE SMGA MODELS
CONSIDERING LOCAL SITE EFFECTS

Fumihiro MINATO, Yoshiya HATA, Ken-ichi TOKIDA,
Yasuko KUWATA, Maki KOYAMA and Yuya UEDA

During a scenario earthquake with $M_w9.0$ along the Nankai Trough, not only strong motion but also huge tsunami is predicted in Hirokawa Town, Wakayama Prefecture, Japan. In this study, first, based on the empirical relationship between microtremor H/V spectrum and site amplification factor, the site amplification factors from seismic bedrock to ground surface at the 476 sites in the tsunami attack area were evaluated. Seismic waveforms in the area were then predicted with very high density based on the SMGA models considering the empirical site amplification factors. Using the detailed distribution of JMA seismic intensity and difficult time for tsunami evacuation due to the predicted seismic waveforms, finally, we discussed the influence which the action of the strong motion has on evacuation.