

1988年から2016年までに観測された強震記録から分離した サイト特性に関する研究

A Study on the Site Amplifications Estimated by Generalized Inversion Technique

仲野健一・川瀬 博・松島信一

Kenichi NAKANO, Hiroshi KAWASE, and Shinichi MATSUSHIMA

Synopsis

Strong ground motions are composed of source terms, path effects, and site amplifications. These are well known characteristics for strong ground motions. Generalized inversion technique (GIT) proposed by Andrews (1982) is an effective tool to evaluate the characteristics. In this study, first we collected the waveforms distributed by NIED (K-NET, KiK-net), JMA, and CEORKA from 1988 to 2016 and performed GIT by using the Fourier amplitudes of their waveforms. We confirmed that the characteristics estimated by GIT were stable and match the theoretical model as shown in the previous study. As for the site amplifications, we found that we could explain the S-wave site amplifications estimated by GIT with 1D-theory, and that the full-wave site amplifications have some correlation with AVS10, AVS30, AVSz, and Tz. Furthermore, we found that the site amplifications recalculated by using the whole duration of the waveforms could explain the predominant period in sedimentary basins in Kanto and Kinki areas.

キーワード: スペクトルインバージョン, 強震観測記録, サイト特性

Keywords: generalized inversion technique, strong motion record, site amplification

1. はじめに

地震によって引き起こされた揺れ(地震動)は,主に震源,伝播,サイト特性によって構成される.震源特性は断層破壊現象に伴う地震動生成過程を,伝播特性は震源から放出された地震波の波動伝播に伴う減衰を,サイト特性は地盤増幅の影響を意味している(日本建築学会,2005).地震動にはこれら3つの特性が複雑に寄与していることから,地震動予測のためにはこれらを総合的に考慮しなければならない.地震動の中でも,人的/物的な被害を発生させるような地震動は特に強震動と呼ばれ,強震動に関する研究分野は理工学の双方から積極的に研究が進められている.なお,上記3つの特性は地震動特性もしくは強震動特性と呼ばれることがある.

強震動を被った同じ地域に建つ同様の建築物でも,数十m程度離れているだけで,地震被害が大きく異

なる事例が報告されている(後藤ら,2014).この原因として,強震動特性の内,サイト特性(地盤増幅特性)が最も大きく影響していることが指摘されている(Hisada et al., 2017; Kawase et al., 2017).これらの知見の多くは,被害地域の悉皆調査,地震観測記録(強震観測記録)の蓄積とそれらの詳細な分析によって明らかにされてきた.

強震観測の歴史は古く,SMAC型強震計が東京大学地震研究所に設置された1953年7月29日が強震観測の始まりとされている.しかし,今日一般的に認知されている日本全国をカバーしたデジタル強震計による地震観測網は,気象庁が1988年に運用を開始した87型電磁式強震計の登場を待たなければならなかった(功刀ら,2009).

1995年兵庫県南部地震を契機に,防災科学技術研究所(NIED)によって1996年から地表(自由地盤)における全国強震観測網K-NETの運用が開始され

(Kinoshita, 1997), 2000年からは地表と基盤の2点鉛直アレーを有する基盤強震観測網KiK-net (Hi-netと併用)が稼働している(Aoi et al., 2004). 気象庁(JMA)は1995年兵庫県南部地震以降, 87型強震計の観測を95型強震計の観測に置き換えた. このJMAのデータは気象庁業務支援センターによって頒布され, 防災科学技術研究所(NIED)のデータはWebページにおいて発震後数時間程度で公開されている. 関西地震観測研究協議会(CEORKA)では, 1995年兵庫県南部地震以前の1994年4月から関西圏での地震観測を開始しており, 1995年兵庫県南部地震の震源域等の貴重なデータが得られている.

地震観測記録をターゲットにして, 地震動を構成する3つの特性を評価するための強力な手法がAndrews(1982)により考案された. これはGeneralized Inversion Technique (GIT)と呼ばれている. 日本では岩田・入倉(1986)によって広く認知された. その後, 1995年兵庫県南部地震以降の地震観測網の充実, および, 日本全体の地震活動度の活発化に伴う地震観測記録の増加によって, GIT実施例は国内外問わず増加している(佐藤・巽, 2002; 川瀬・松尾, 2004; 野津・長尾, 2005; 野津ら, 2007; Oth et al., 2011a; Oth et al., 2011b). 筆者らもGITを日本全国で得られた強震記録に適用し, その有効性を確認している(Nakano et al., 2015). この手法で求められた強震動特性は地震動の生成要因を理解するのに重要であると同時に, 統計的グリーン関数法のための要素地震波を生成することにも用いられる(Kawase et al., 2000).

国土交通省は, 2003年十勝沖地震等で発生した長周期地震動による被害を受け, 建築基準整備促進事業において長周期地震動の評価とその対応策について検討を進め, 2010年と2015年にパブリックコメントにより意見募集を行った後, 2017年4月から評定物件に対して長周期地震動に対する構造安全性評価を事実上義務付けた(国土交通省, 2016). 彼らの推奨する長周期地震動評価手法は, 佐藤ら(2010, 2012)が提案した強震動予測式の一つであるが, 特定サイト固有の地盤震動特性が考慮されている点が重要である. この手法が国土交通省に採用されたということは, サイト固有の地盤震動特性を工学的に利用する必要性が認知されてきたことを示唆していると考えられる. しかしこの地震動評価手法は応答スペクトルをターゲットにしており, 物理的解釈が困難である. 物理的な意味付けの観点からはフーリエ振幅をターゲットにしたGITを用いる必要がある.

以上のことから, 本研究では, 1988年から2016年までの29年間に公的機関等で収集された地震動記録に対してGITを適用し, 強震動特性を評価する. そして, 地震被害に大きな影響を与える可能性があるサ

イト固有のサイト特性に関して詳細に分析し, 既知の地盤構造との関係について考察する.

2. スペクトルインバージョン解析

2.1 解析手法

地表面で観測される地震動は, 一般的に震源, 伝播, サイト特性の主に3つの特性で構成されている. これを数理的に表現すれば, 地震波形のフーリエスペクトル振幅を $F(\omega)$, 震源特性を $S(\omega)$, 伝播特性を $P(\omega)$, サイト特性を $G(\omega)$ とおけば, これらの関係は式(1)のように表現される.

$$F(\omega) = S(\omega) \times P(\omega) \times G(\omega) \quad (1)$$

地震観測網が整備される以前のGITに関する既往研究の多くは解析対象領域や地震観測記録数が限定的であったが, 地震観測網の整備が進むにつれて, 長期間の多数のデータを扱って日本全国を対象とした研究も実施されている. 時空間的に広範囲なデータを対象とする場合, 伝播特性(波動伝播に伴う減衰)は地域や地震タイプによって異なると考えられるため, 地震タイプ別に対象領域を複数の地域に分割した上で伝播特性を評価する必要がある(川瀬・松尾, 2004; Oth et al., 2011a, 2011b). これらの研究では, 地域と地震タイプ別に伝播特性が明確に異なることが示されている.

本研究では, 伝播特性について地域依存と地震タイプ依存を仮定し, 日本全国を対象としてGITを実施する. ここでは, Nakano et al. (2015)に従って式(2), (3)のように定式化する.

$$\log F_{ij} = \log S_i - n_{l(i)} \log X_{ij} + \sum_k b_{l(i)k} X_{ijk} + \log G_j \quad (2)$$

$$X_{ij} = \sum_k X_{ijk} \quad (3)$$

ここで S_i は*i*番目の地震の震源特性, G_j は*j*地点のサイト増幅特性である. また n は幾何減衰を表しており, フーリエスペクトルの場合, 理論的には実体波で1.0, 表面波では0.5となる. b は内部減衰+散乱減衰を表す項である. 本研究において, 減衰項 b には地域性を考慮して第四紀の火山の分布や糸魚川-静岡構造線などで6地域(その番号が*k*)に分割し, 地震タイプをType B (Plate-boundary earthquakes; プレート境界地震), Type I (Intra-plate earthquakes; プレート内地震), Type C (Crustal earthquakes; 地殻内地震)の3つにわけた. なお, 減衰項に乘じられている X_{ij} は震源距離であり, X_{ijk} はそのうち領域*k*を通る見かけの

距離である。

これまでの我々の研究では上述のように点震源からの遠地S波の生成と伝播を検討対象としてきており、解析対象波形は後述の通りS波の到達から5~15秒の短い区間としてきた。そのため、長周期の盆地生成表面波成分は除外されてきたが、本研究では全波形タイプの寄与を考慮した観測波形全体を用いた解析も行う。

式(2)を解くためには拘束条件が必要であるが、ここでは、川瀬・松尾(2004)やNakano et al. (2015)と同様にYMGH01(防府)を基準点とし、同地点の地表で観測された地震観測記録からサイト特性を剥ぎ取り露頭岩盤相当(2E)のスペクトルに補正する。なお、サイト特性の剥ぎ取りのため、ボアホール底と地表でのスペクトル比により地盤構造同定で得られた最適モデルから、次元重複反射理論に基づいて露頭岩盤相当から地表面までの地盤増幅率(伝達関数)を別途計算している。従って、他地点のサイト特性は、この基準観測点に対する増幅比として求まる(2E/2E)。剥ぎ取り後の基準観測点(YMGH01)のS波速度は3,450m/sに達しており、ここでのサイト特性は地震基盤に対する地表面までの地盤増幅率とみなせる。

伝播特性は主に減衰に関わる項である。波動伝播に伴う減衰は、主に幾何減衰、内部減衰、散乱減衰で表現され、式(2)では幾何減衰項と内部減衰+散乱減衰の2つの項で構成されている。内部減衰+散乱減衰は式(2)のbで表現されているが、これは式(4)により物理値であるQ値に変換することができる。

$$1/Q(f) = \frac{-b(f) \cdot V_s}{\pi \cdot f} \quad (4)$$

ここで、bは内部減衰+散乱減衰を表す項、 V_s は伝播する岩盤内のS波速度であり、本研究では3,500m/sとした。Q値は一般に品質係数(Quality Factor)と呼ばれる物理量であり、媒質の吸収によるエネルギーの減少に関係する値である。

2.2 データセットの構築

気象庁は、大地震でも振り切れない地震計を目的として開発された87型電磁式強震計を用いて広域地震観測網を整備し、1988年から運用を開始した。これによって、広域かつ広帯域の地震記録を迅速に得ることが可能になった。その後、1995年兵庫県南部地震を受けて、既設震度計の機能強化、および、都市部等の観測体制を目的として、95型震度計が全国市町村の庁舎を中心に設置された(功刀ら, 2009)。

GITは回帰分析による統計解析手法であることか

ら、その解析結果はインプットデータに強く依存するため、目的に応じて適切にデータセットを構築しなければならない。Nakano et al. (2015)では、JMA95型震度計ネットワーク、K-NET、KiK-netで観測された1995年~2011年の地震記録を収集し、デジタルデータの書式を統一した上で日本全国を対象としたデータセットを構築している。

本研究では、Nakano et al. (2015)のデータセットに、前述のJMA87型、JMA95型、K-NET、KiK-net、CEORKAの地震記録を追加し、1988年~2016年12月のデータセットを構築した(JMA95型、K-NET、KiK-netについてはNakano et al. (2015)の当該期間以降に観測された地震波形を追加)。なお、当該期間・機関の地震記録に対して、気象庁マグニチュード $M_{JMA} \geq 4.5$ 、震源深さ ≤ 60 kmのデータを選定した。ただし、地殻内地震については余震記録等を含めるため一部 $4.0 \leq M_{JMA} \leq 4.5$ のデータも含んでいる(F-netによるCMT解があるもの)。この時、インバージョン解析の事前処理として、地震波記録は全てK-NET形式の書式に統一した。また、JMA95型については、気象庁による修正済の2012年から2016年までのデータ(気象庁, 2015)のみを用いた。

地震タイプの判定は、地殻内地震では震源深さが基本的に25km以下で震源が内陸部にあるもの(海域にあるが地殻内地震であると明らかなものも含む)、海溝型地震について、プレート内地震は震源深さが基本的に25km以下で沈み込むプレートの内部に位置するもの、さらにプレート境界地震は、沈み込むプレート上面に位置し、かつCMTの発震機構解(1997年以前はHarvard(Dziewonski et al., 1981; Ekström et al., 2012)、それ以後はFreesia(福山ら, 1998)を参照)が低角逆断層であるものとして分類した。ただし、既往研究等から別途地震タイプを判別した場合はその限りではない。また、本研究で用いる地震モーメント M_0 は上記いずれかのCMT解を参照したが、いずれにも該当しない場合は武村(1990)の関係式を用いて M_{JMA} から換算した。

データセットに含まれる地震波形の震源距離と地震規模の分布をFig.1に示す。震源距離は震源位置と各観測地点を結ぶ直線距離とした。Fig.1(A)は震源深さ30km以下、同図(B)は震源深さ30kmより深いものを示す。これらをみれば、地殻内地震は震源深さ30kmより浅いものだけ含まれていることがわかる。また、震源距離・地震規模について非常に幅広い範囲の地震波形が含まれていることがわかる。なお、マグニチュード M_{JMA} や発震位置等の震源情報は、気象庁震源カタログを参照した(気象庁)。

Fig.2に、地震タイプ別のCMT解と震央位置を示す。また、震源深さをカラーコンターで示す。これらを

見れば海溝型の地震 (Type BとType I) は太平洋プレートやフィリピン海プレートに集中していること、地殻内地震 (Type C) は日本全国の浅い場所で広範囲に発生していることがわかる。なお、Fig.2(A)において、三重県沖で1つだけプレート境界地震が含まれているが、これは2016年4月1日に発生した三重県南東沖地震 $M_{JMA}6.5$ である。本地震は、南海トラフ地震で想定されている震源域で発生した規模の大きいプレート境界地震として重要なものである。

■ Plate-boundary earthquakes (Type B) ▲ Crustal earthquakes (Type C)
● Intra-plate earthquakes (Type I)

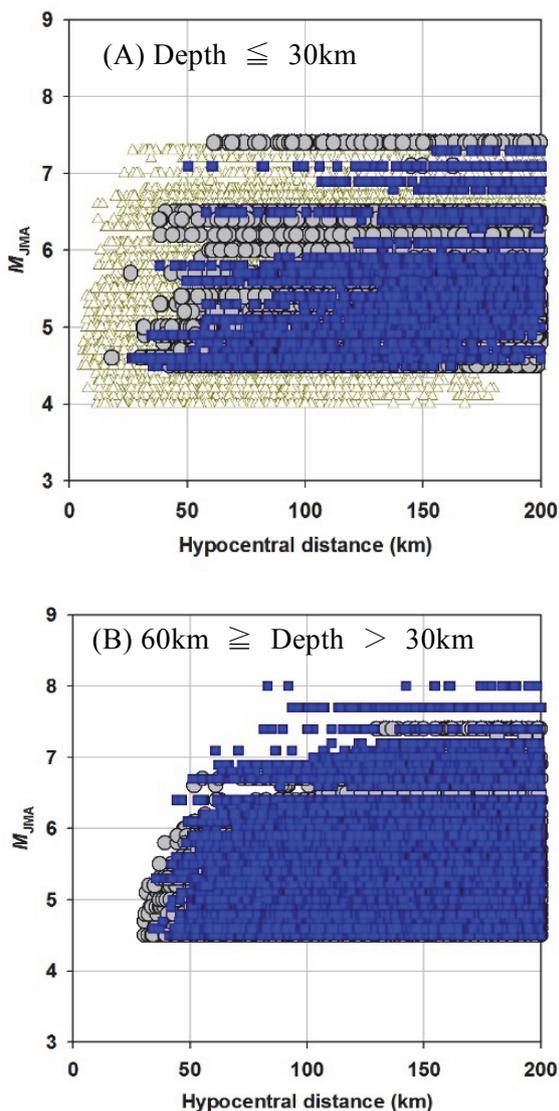


Fig. 1 Distribution of waveforms depend on M_{JMA} and hypo-central distance in our dataset.

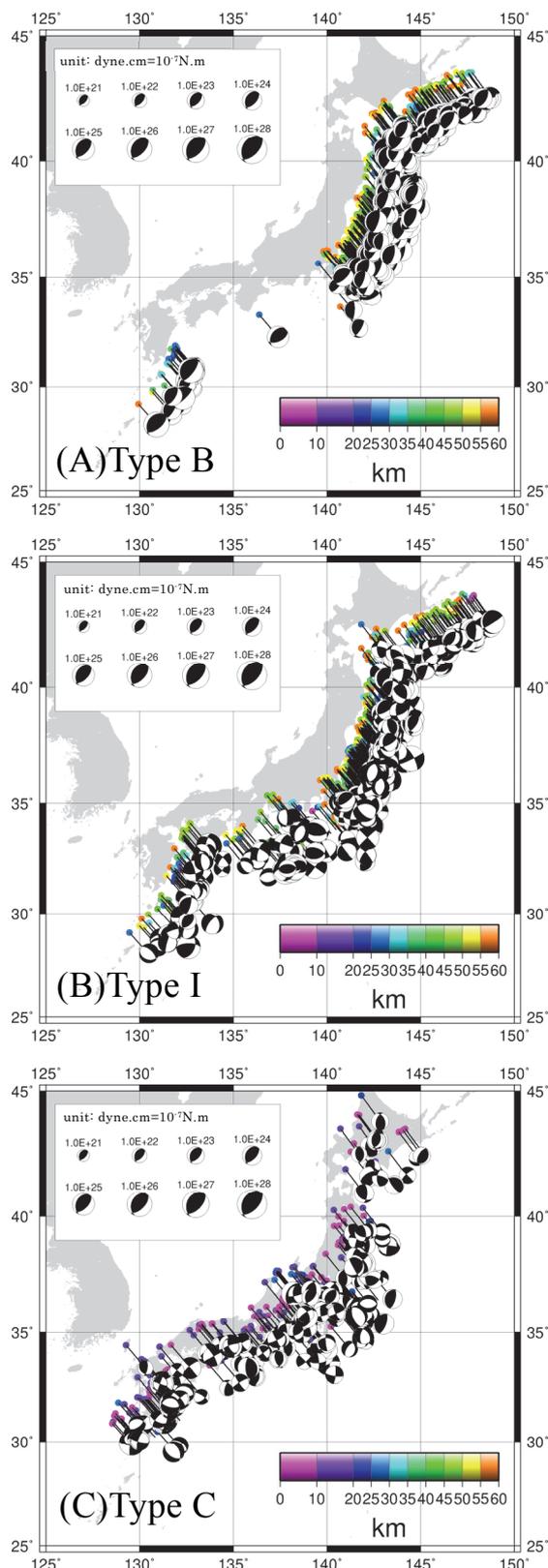


Fig. 2 Earthquake mechanisms and epicenters. Panel (A) shows the case of plate-boundary earthquake, panel (B) shows the case of intra-plate earthquake, panel (C) shows the case of crustal earthquake.

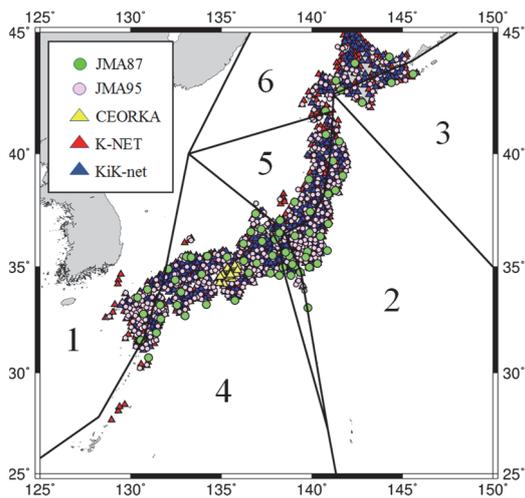


Fig. 3 Observations and regions divided in this study. The regions which are divided into 6 regions are used for considering the difference of pass effects in each attenuation characteristics.

Fig.3に、本研究で対象とした地震観測地点を機関毎に示す。また、2.1節で述べたように、地域ごとに異なる伝播特性を考慮するために区分けした領域を併せて示す。図中の凡例が地震観測地点位置、数字が分割した領域番号を示している。

2.3 解析条件

解析条件は、基本的にNakano et al., (2015)と同様であり、震源距離 ≤ 200 km, 最小加速度 ≥ 0.2 cm/s², 最大加速度 ≤ 200 cm/s², 同一地震トリガー地点数 ≥ 3 の条件に合う、K-NET 観測点, KiK-net 観測点, CEORKA, JMA87電磁式強震計および95 型震度計観測点のいずれかの観測点で観測された加速度時刻歴波形を用いる。ただし、CEORKAについては提供されているのが速度時刻歴波形であるから、別途FFTによる1階微分で加速度時刻歴波形に変換している。

上記に該当するデータに対して、まず日本付近のS波の走時表（1997年10月以前は83A走時表、それ以降はJMA2001走時表）を用いて、S波初動以降をマグニチュードに応じた時間区間 ($M_{JMA} \leq 6$ で5秒, $6 < M_{JMA} \leq 7$ で10秒, $7 < M_{JMA}$ で15秒) で切り出し、前後に2 秒のコサインテーパをつけた。走時表を切り替えているのは、本データセットには1997年以前の地震波形データ (JMA87型等) が含まれており、当時決定された発震機構と観測記録を用いているので両者で整合をとるためである。また、波形やスペクトルを重ね描くなどして、S 波初動以降が切り出されているか確認した。うまく切り出されていないと判断された波形はデータセットから取り除いた。なお、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震本震の記録は継続時間が非常に長く、上記で示した

S波初動での切り出し時間に対応させるのが難しいこと、震源域が巨大で震源仮定が成立しないことから、本研究では取り扱わない。ここでは断層最短距離や等価震源距離は用いず、破壊開始点から各観測点までの直線距離をとる震源距離 X_{ij} を採用した。ターゲットとなる水平動スペクトル F_{ij} に対しては、地震波形に含まれる震源の放射特性の影響を小さくするため、NSとEW 成分のRMS値を用いる。フーリエスペクトルはバンド幅0.1 HzのParzen windowにより平滑化する。なお、本研究では水平動と上下動の同時インバージョンを実施するが、以下の議論ではサイト特性は水平動のみを対象とする。上記条件に合致する波形データは合計で146,948震源-観測点ペア（水平動と上下動合わせて計440,844波形）、地震数は1696イベント、サイト数は2573地点となった。データ数はNakano et al. (2015)の約2倍に相当する。

式(2)に基づくインバージョン解析で直接的に評価されたサイト特性は、実体波がメインの主要動 (S波部) から推定されたものであるから、物理的には地震基盤に入射したS波の堆積層での地盤増幅率を意味する。ただし、野津・長尾(2005)で指摘されているように、S波部分のみからインバージョン解析で評価されたサイト特性には、盆地生成表面波 (川瀬, 1993) 等が除かれていることになる。従って、このS波サイト特性を地震動予測に用いる場合、地震動の後続波群が有する長周期のパワーを再現できない可能性がある。野津・長尾(2005)は上記の問題を解決するため、まずS波部分を切り出して震源スペクトルを評価し、その後、S波到達後の後続波群を含めた観測スペクトルをターゲットとし、既知の Q 値を与えインバージョン解析を実施した。具体的には、まずS波部として継続時間40秒の波形を切り出し、インバージョン解析を実施した (1段階目)。その後、1段階目で推定された震源スペクトルと既知の Q 値を拘束条件として160秒間のスペクトルを対象として再度解析することで、S波部と後続波群の影響を含んだサイト特性を評価した (2段階目)。このサイト特性を用いることで、地震動予測におけるフーリエスペクトル振幅の再現性が向上することが確認されている。

本研究では野津・長尾(2005)と同様に、下記の手順で後続波群の影響を含めたサイト特性を評価する。ただし、 Q 値については1段階目で評価された減衰項を2段階目で直接的に用いる。

- 1) S波走時表を参照して観測記録のS波部を M_{JMA} に応じた短い継続時間の波形を対象に切り出した観測スペクトルに対してインバージョン解析を実施し、震源スペクトル、伝播特性、サイト特性をまず推定する。

- 2) 観測記録から後続波形を含む327.68s区間（記録長不足の場合0詰め）を切り出した観測スペクトルを、1)で評価した震源スペクトルと伝播特性の積で割り込むことで、個別地震時サイト特性を計算する。
- 3) 特定のサイトでイベント毎に評価された個別地震時サイト特性を対数平均することで、主要動部と後続波形を含む観測記録からサイト特性を改めて推定する。

なお、本稿では、1)で求められたサイト特性を「S波サイト特性 (Site Amplification with S-wave; SA-S)」, 3)で求められたそれを「全波サイト特性 (Site Amplification with full-waves; SA-SS)」と表記する。ここで後者は物理的には、①すべての後続動はサイト直下の基盤入射S波に対する付加的増幅として評価できる、②その付加的増幅をもたらす波動の盆地内の伝播特性は基盤を伝播するS波と同じである、と仮定したことに相当する。

3. 震源・伝播・サイト特性の分離確認

3.1 震源特性

本章ではスペクトルインバージョンで分離した強震動特性の妥当性について確認する。ここでは震源特性として、震源スペクトルの ω^{-2} モデルで支配的なパラメータであるコーナー振動数 f_c と遮断振動数 f_{max} を評価する。評価手順としては、まず分離された震源項を式(5)で変位震源スペクトルに変換する。そして、式(6)に示すような ω^{-2} モデルにフィッティングさせ、グリッドサーチ的に f_c と f_{max} を同時推定する。

$$M_i = \frac{4\pi\rho V_S^3}{\omega^2 R_{\theta\phi} F_S P_R} S_i \quad (5)$$

$$M_i^{(m)} = \frac{M_0}{[1 + (f/f_c)^2][1 + (f/f_{max})^2]} \quad (6)$$

ここで、 M_i は物理値換算した変位震源スペクトル、 $M_i^{(m)}$ は ω^{-2} モデルによる変位震源スペクトルである。 M_0 はCMT解の地震モーメント、 $R_{\theta\phi}$ は放射特性であり0.55、 F_S は地表面の効果を表す係数で2、 P_R はエネルギーの分配係数で $1/\sqrt{2}$ とした。 V_S は地殻内地震では3.6km/s、海溝型地震では4.0km/sと設定した。

Fig.4に、分離して得られた震源項のスペクトル(式(5)で変位震源スペクトルに変換したもの) M_i と式(6)に基づくグリッドサーチで求めた最適パラメータから計算した ω^{-2} モデルに従うそれ $M_i^{(m)}$ の比較を示す(前者は点線、後者は実線)。ここでは、1995年兵庫県南部地震本震、2003年十勝沖地震本震、2007年新

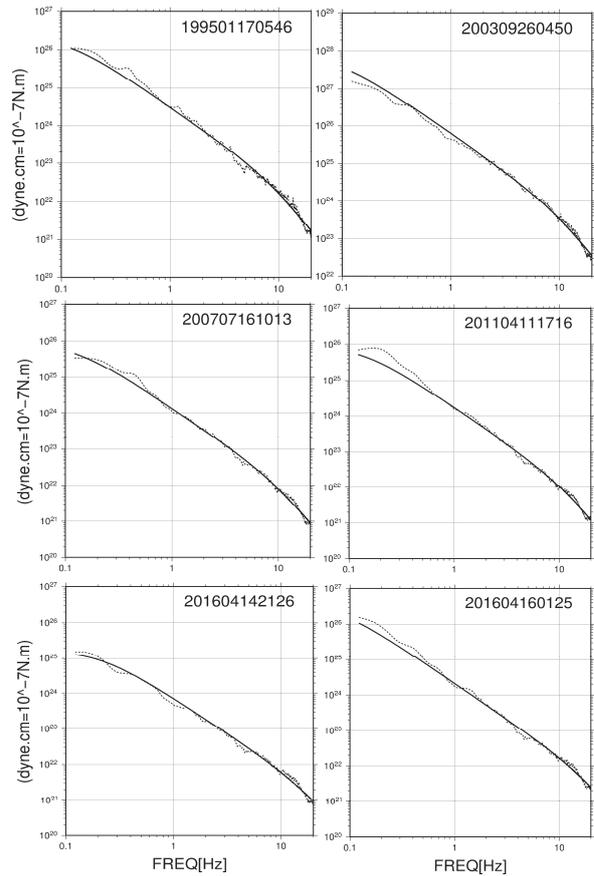


Fig. 4 Comparison of dis. Source spectra M_i estimated by source term S_i and dis. source spectra $M_i^{(m)}$ calculated by ω^{-2} -model.

潟県中越沖地震、2011年福島県浜通り地震、2016年熊本地震の前震と本震をそれぞれ比較した。ここで比較に用いたイベントは地震規模 $M_{JMA}6.5\sim 8.0$ の地震である。これらを見れば、どのイベントにおいても ω^{-2} モデルと $M_i^{(m)}$ はよく一致していることがわかる。

3.2 伝播特性

本節では分離された伝播特性について示す。伝播特性は減衰に関わる項であるが、式(2)では右辺第2項と第3項が該当する。前者は幾何減衰、後者は内部減衰+散乱減衰の影響を仮定して導入した項である。

Fig.5では、分離された減衰項 b を式(4)によって物理値換算した $1/Q_s$ と、Nakano et al. (2015)で評価されたそれとを比較する。前者を実線、後者を破線で表している。また、各線の各色はFig.3の領域1~6を示している。これらの比較から、本研究で評価した $1/Q_s$ とNakano et al. (2015)のそれは全体的に整合していることがわかり、子細にみれば長周期域の安定性が向上していることも確認できる。

3.3 サイト特性

Fig. 6 に、推定された水平動のS波サイト特性 (SA-S) を示す。また、一次元重複反射理論による地震基盤に対する地表までの理論地盤増幅率 ($2E/2E$) を併せて示す。前者は黒色の実線、後者は赤色の実線である。理論地盤増幅率の計算にあたっては、地震調査研究推進本部の深部地盤構造モデル (地震本部, 2012) とボーリング調査により得られているK-NETの浅部地盤構造を、 V_s が連続的に繋がるように接続して地盤モデルを作成した。なお、浅層地盤の減衰定数は与えられていないため、堆積層地盤で経験的に用いられる $Q_s = V_s/15$ の関係から略算的に算定した。ちなみに減衰モデルは振動数依存させていない。近畿地方の地震基盤は $V_s=2,900\text{m/s}$ 程度とされているが、インバージョン解析の基準サイトにおける解放基盤面の V_s は $3,450\text{m/s}$ であるため、ここでは $V_s=3,400\text{m/s}$ の層を基盤面として一次元重複反射理論による理論地盤増幅率を計算した。なお、地震本部 (2012) の深部地盤構造は約 1km メッシュで与えられているため、ここでは各サイトの緯度経度情報から当該サイトを囲む近傍4点を参照し、各点までの距離に応じて重みづけ平均したモデルをサイト直下の地盤構造とした。

Fig. 6の比較から、インバージョン解析で推定されたサイト特性は、一次元重複反射理論で計算される理論地盤増幅率と概ね整合していることがわかる。このことは、地震観測記録が面的および量的に蓄積していくことで、地盤構造が不明な場所であっても、GITによって精度の高い地盤増幅率を直接得ることが可能であることを示唆している。

4. サイト特性に関する考察

4.1 継続時間の影響

ここでは、2.3節で示した2種類のサイト特性について比較し、地震波形の後続波群の有無がサイト特性評価に与える影響について考察する。

Fig.7にサイト特性の比較例を示す。赤色の実線はS波サイト特性 (SA-S)、黒色の実線は全波サイト特性 (SA-SS)、黒色の点線は全波サイト特性 (SA-SS) のばらつきを示す (平均 $\pm \sigma$)。灰色の実線は全波サイト特性 (SA-SS) の計算に用いた個別地震時サイト特性である。全体的な傾向として、赤色の実線に比べて黒色の実線は振幅値が大きくその傾向は短周期に比べて長周期で顕著であること、しかし両者のスペクトルの変動性状はよく似通っていることがわかる。この傾向は、特にAIC004, AIC011, OSK004, OSK005, OSKH02で明瞭である。特に、OSKH02では、S波サイト特性 (SA-S) の長周期側で明瞭なピークは

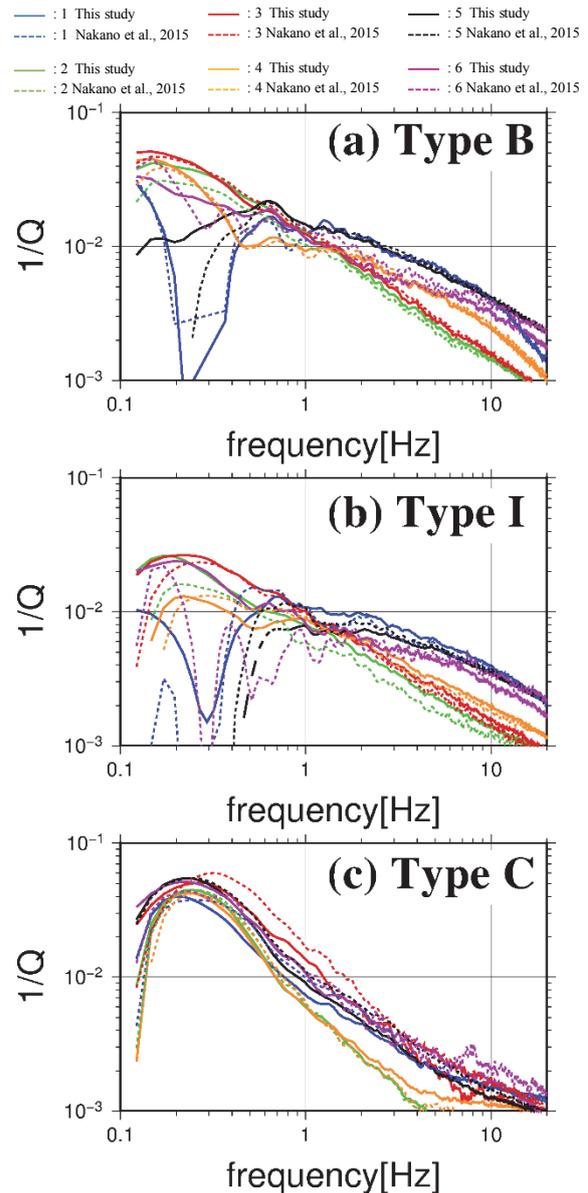


Fig. 5 Comparison of the Q^{-1} estimated by this study and previous ones (Nakano et al., 2015)

見えていないが、全継続時間波形から計算した全波サイト特性 (SA-SS) では周期3~4秒で明瞭なピークがあり、周期7秒程度にもややピークのような形状が見られる。一方、気象庁震度計KUSやFKS011のように、S波サイト特性 (SA-S) が全波サイト特性 (SA-SS) の平均 -1σ にほぼ等しく差が小さい観測点も存在する。これらの観測点では盆地生成表面波の影響は小さいと考えられる。

堆積盆地の卓越周期は当該地点の基盤深度や伝播経路 (波動到来方位) に依存するため一概には言えないが、濃尾平野の卓越周期は約 $1.5\sim 5$ 秒とする研究 (多賀ら, 1982) があり、OSKH02がある大阪平野の此花地区では周期7秒に表面波に起因する卓越周期

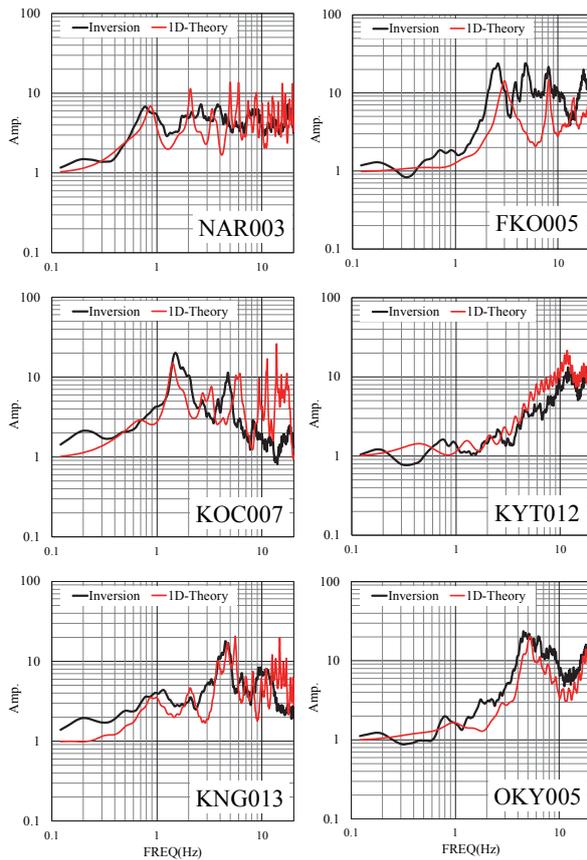


Fig. 6 Comparison of the S-wave site amplifications (SA-S) and the transfer function calculated by 1D-theory.

を持つことが指摘されており（寺島ら, 2012）, S波サイト特性 (SA-S) に比べて全波サイト特性 (SA-SS) では, 継続時間全体の長周期のスペクトル振幅が評価できると推察される。

以上から, 主要動部だけでなく後続波群を含めることで, 長周期域の相対的な増幅特性を把握できたと考える。後続波群には前述の通り盆地生成表面波が多く含まれているため, 全波サイト特性 (SA-SS) を用いることはその影響を考慮することになる。

Fig. 8 に, 本研究で推定した全波サイト特性 (SA-SS) と野津・長尾(2005)で公開されているサイト増幅特性の比較を示す。黒実線が野津・長尾(2005), 赤実線が本研究の全波サイト特性 (SA-SS) であり, 赤点線は後者の平均 $\pm\sigma$ を示している。図をみれば明らかのように, スペクトル形状はよく似通っていること, 本研究の方がスペクトル振幅はやや大きく明瞭であることが確認できる。なお, 他のサイトでも同様の傾向が見られることを別途確認している。

4.2 観測地点移設の影響

公的機関の地震観測地点は, 同機関所有敷地内に設置されることが多い。そのため, 所有者の都合によって観測地点が移設されることがしばしばある。

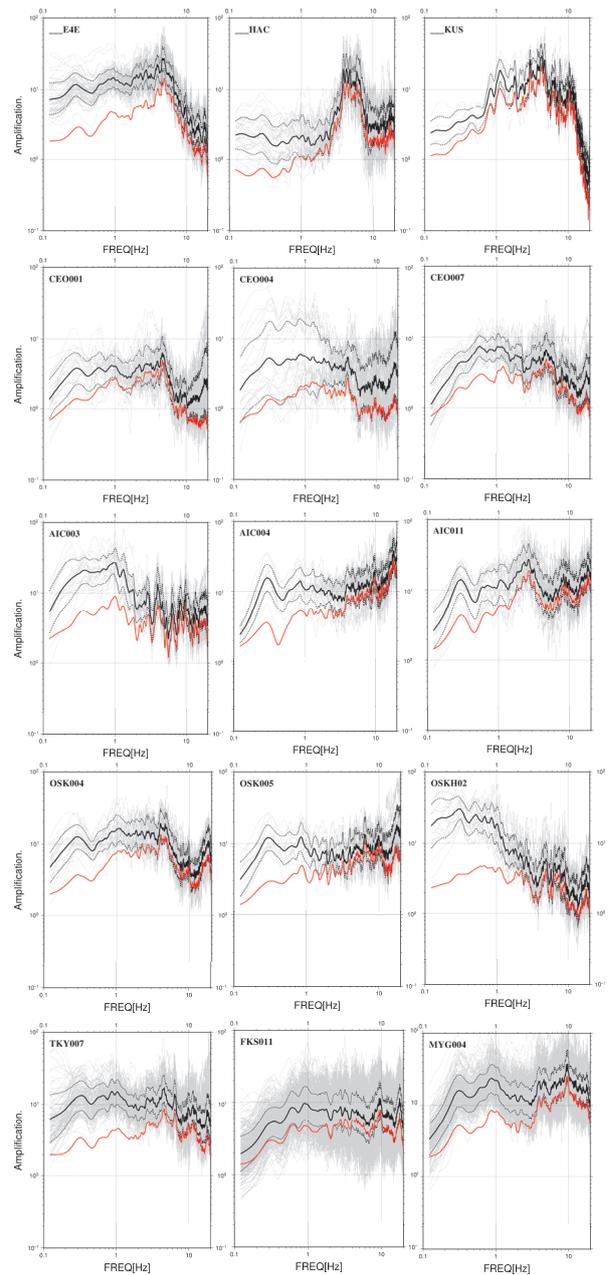


Fig. 7 Comparison of the site amplifications (Red line: SA-S, Black line: SA-SS).

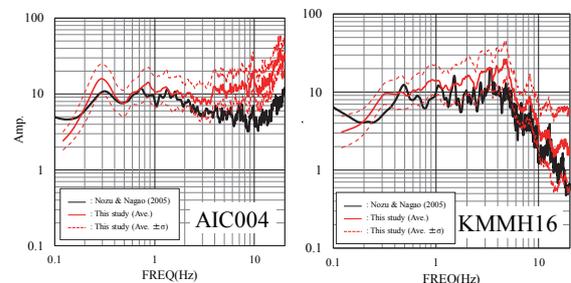
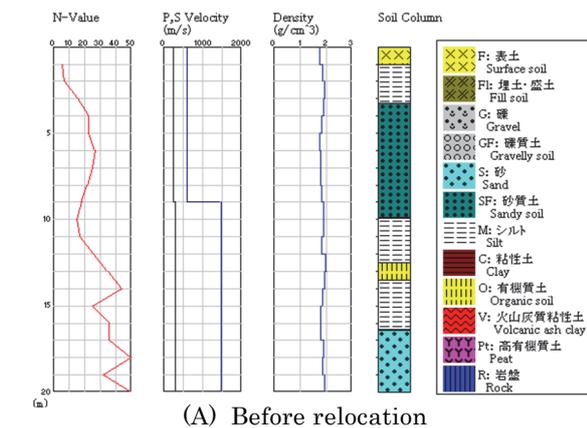
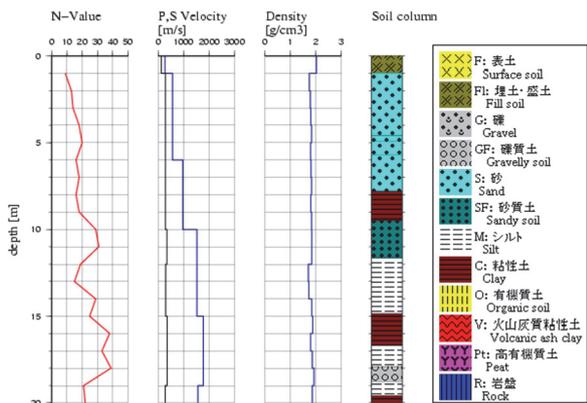


Fig. 8 Comparison of the full-wave site amplifications between this study and Nozu & Nagao (2005). The black solid line shows the site amplification published by Nozu & Nagao (2005). The red solid line shows the site amplification (SA-SS) estimated in this study.



(A) Before relocation



(B) After relocation

Fig. 9 Soil-profile before and after relocation at AIC004 in K-NET (published by NIED).

一般に数十m程度地震観測地点が離れば、スペクトル特性は特に数Hz以上の高振動数域で大きく変化する。免震建物や高層建物を除く低層住宅や耐震性の高いRC建造物の一次固有周期は数Hz~10Hz程度であるから（日本建築学会,2000）、短周期の地盤増幅に関するスペクトル特性を適切に評価することは耐震工学上重要である。従って、ここでは観測点移設がサイト特性評価に与える影響について考察する。

K-NETの移設観測地点については、NIEDのWebページで履歴が公開されており、これまで127地点が移設されている(2018年5月23日現在)。例えば、AIC004(名古屋)においては1996年6月1日から地震観測がスタートしたが、2004年10月27日に近傍に移設されている。Fig.9に、AIC004における移設前後の土質柱状図を示す。これらを見れば、表層地盤の地質が大きく異なっていることがわかる。なお、移設前後の緯度経度情報(世界測地系)から移設距離を計算すると約20m程度となる。一方、例えばCHB016(岬)では、移設前後で土質柱状図の変更は無いとされている。同サイトはいすみ市役所敷地内に設置されており、移設距離自体はAIC004のそれと同程度であるが同一敷地内であるため、新しくボー

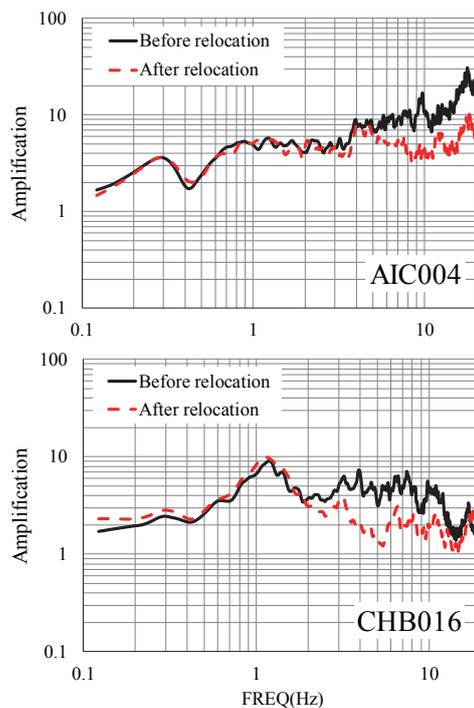


Fig. 10 Comparison of the S-wave site amplifications (SA-S) before and after relocation of observation point (Upper : AIC004, Bottom : CHB016).

リング調査は行われなかったと推察される。

紙面の都合から、ここでは上記の2地点における移設前後のS波サイト特性(SA-S)を比較する。Fig.10に、スペクトルインバージョン解析によって評価した、移設前後でのAIC004(名古屋)とCHB016(岬)のサイト特性を示す。これらは、同サイトで得られた地震観測記録を移設前後で分けて、それぞれ独立にインバージョン解析で求めた。

AIC004(名古屋)では、移設前後で約5Hz以下の長周期域ではほぼ同様のスペクトル特性を有しているが、それより高振動数域では異なっており、移設後の方が振幅値は低くなっている。サイト特性の長周期域は地下構造の中でも工学的基盤以下の深い構造が反映されていると考えられ、このサイトでは移設距離が短いことから、両者はよく一致していると推察される。一方、10Hz以上では3~4倍程度の差異があることが確認できる。このことは、土質柱状図を見れば明らかのように、移設に伴って観測地点直下の表層地盤が異なるためと考えられる。

CHB016(岬)では、約3Hz~12Hzにおいて移設後のサイト特性が半分以下に減少している傾向が見られる。このサイトでは土質柱状図が変更されてなく共通の表層地盤とされているが、この結果から推察すれば、例え同一敷地で短い移設距離であっても、表層地盤は複雑に変化していると考えられる。別の解釈としては、地盤構造が地質的には同一でも、隣

接建物等の影響から到来する波動が異なり、見かけ上スペクトル特性が変化している可能性もある。

4.3 サイト特性と地盤構造パラメータの関係

3.3節では、S波サイト特性 (SA-S) は一次元重複反射理論に基づく理論地盤増幅率と概ね整合することを示した。また、4.1節では、S波サイト特性 (SA-S) と全波サイト特性 (SA-SS) を比較し、地震波形の後続波群を含めることで、実体波のみから評価されたS波サイト特性 (SA-S) に比べて、全波サイト特性 (SA-SS) において大きな長周期のピークを得られることを示した。以下では、サイト特性と地盤構造の関係について考察する。ここでは、全波サイト特性 (SA-SS) を対象とし、地盤構造パラメータとしては、10mおよび30m以深までの平均S波速度AVS10およびAVS30、S波の堆積層伝播時間 T_z 、さらに地震基盤上面深さ Z を T_z で除した堆積層平均S波速度AVSzを採用する。K-NETサイトでは表層20mまでの情報しか無いため、Kanno et al. (2006)の関係式を用いてAVS20からAVS30に換算した。なお、 T_z は鉛直下方入射したS波が堆積層内を伝播する時間として、式(7)で定義される。本研究では、関東地方では地震基盤面を $V_s=3.2\text{km/s}$ 、近畿地方では $V_s=2.9\text{km/s}$ とし、当該層上面から工学的基盤相当層上面までの伝播時間とした。

$$T_z = \sum_{i=1}^N \frac{H_i}{V_{Si}} \quad (7)$$

ここで、 H_i 、 V_{Si} は、それぞれ i 層の層厚、S波速度であり、 N は基準とする層からの層数である。

Fig.11とFig.12に、関東地方と近畿地方での全波サイト特性 (SA-SS) と T_z の関係をそれぞれ示す。なお、関東地方では全体的な傾向を掴むため、関東地方のサイトには千葉県、東京都、神奈川県、栃木県、群馬県、埼玉県、茨城県の各サイトを選択し、近畿地方では詳細に検討するため、大阪堆積盆地(大阪湾周辺)内と考えられるCEORKAと大阪府内のK-NETおよびKiK-netのサイトを選定した。ここでは、0.2Hz(5秒)、0.3Hz(3.3秒)、0.5Hz(2秒)、1Hz(1秒)、5Hz(0.2秒)での全波サイト特性 (SA-SS) を示している。また、全体的な相関関係を把握するため、回帰式とその相関係数 R^2 を併記している。これらの比較から、全波サイト特性 (SA-SS) は T_z と正の相関を有していることがわかる。ただし、その傾向は比較的長周期側(0.2Hz~0.5Hz)の周期帯で見られ、対象を盆地内地点に限定した近畿地方でより明瞭に見られる。

Fig.13とFig.14に、関東地方と近畿地方での全波サイト特性 (SA-SS) とAVSzの関係を示す。

これらを見れば、関東地方では T_z の場合と同様に正の相関を有していることがわかり、相関係数だけを見れば、近畿地方より関東地方で高いこと、短周期域になるほど相関が弱いことが確認できる。ただし、Fig.13に見える相関は、関東地方1都6県を一括りにしたみかけのものであり、AVSz=800m/sを境に2つのグループに分ければ、800m/s以下は関東堆積盆地外、800m/s以上は関東堆積盆地内の観測点であることを別途確認している。一方、近畿地方でも同様にして、AVSz=800m/sを境に2つのグループに分けると、800m/s以下は大阪堆積盆地内、800m/s以上は大阪堆積盆地境界部もしくは盆地外の観測点であることを別途確認している。その結果、AVSzが600~800m/sの範囲では増幅率の平均値はほぼ一定とみなせる一方、それ以上の範囲では、AVSzが大きくなるほど増幅率が下がる逆相関となったものと考えられる。

Fig.15とFig.16に、関東地方と近畿地方での全波サイト特性 (SA-SS) とAVS10の比較をそれぞれ示す。図を見れば明らかであるが1Hz以下で相関自体はやや弱い負の相関を有している。同様にFig.17とFig.18には、関東地方と近畿地方での全波サイト特性 (SA-SS) とAVS30の比較をそれぞれ示す。先のAVS10との比較の場合と概ね同様の傾向を示しているが、近畿地方においてやや相関が強くなっていることがわかる。ただしAVS10では関東と近畿の傾向がほぼ同じとなっていることは注目すべきである。

なお、近畿地方の比較で T_z に比べAVS10とAVS30ではデータ数が大きく減少しているが、それはCEORKAではボーリング情報が公開されていないためである。また、AVS10とAVS30の比較ではKiK-netサイトは用いていない。

5. サイト特性と堆積地盤の卓越周期に関する理論的解釈

ここまでの議論で、サイト特性は長周期域では T_z やAVSzとの間に強い相関があり、AVS10やAVS30ともやや短周期域よりの長周期側においてある程度の相関を有していることがわかった。ここでは、サイト特性が示す長周期域でのピークと堆積地盤の卓越周期(パラメータとしては T_z)に着目して、4.3節の結果についてももう少し踏み込んで議論する。

Fig.19に、関東地方と近畿地方のサイトについて1次元重複反射理論で理論地盤増幅率を計算し、各サイト直下の堆積層伝播時間 T_z で整理したものを示す。理論地盤増幅率の計算には、堆積層伝播時間 T_z との直接的な比較のため、地震本部(2012)の深部地盤構造のみ用いた。0.2Hz(周期5秒)の場合、 T_z が1.8秒程度まで明瞭な相関関係が存在する。ただし、関東地

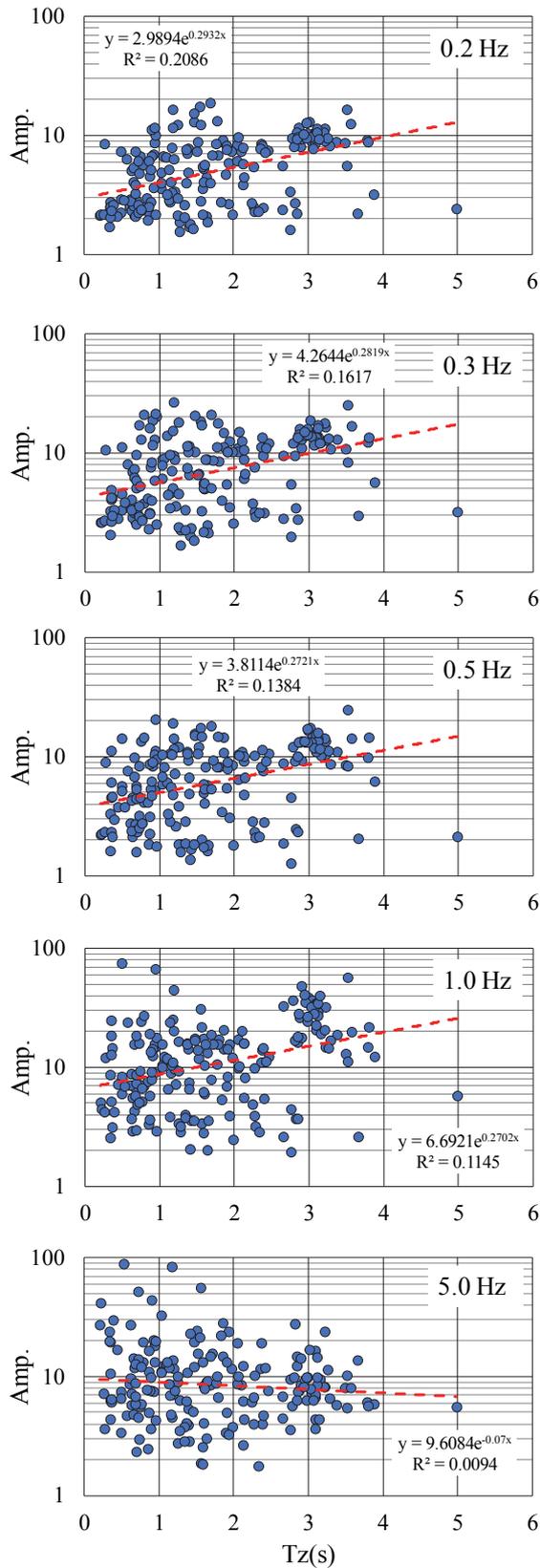


Fig. 11 The full-wave site amplification (SA-SS) depending on Tz in Kanto area. We selected the sites are the observations at K-NET and KiK-net in Tokyo, Kanagawa, Chiba, Saitama, Tochigi, Gunma, Ibaraki prefecture. The red line shows regression analysis.

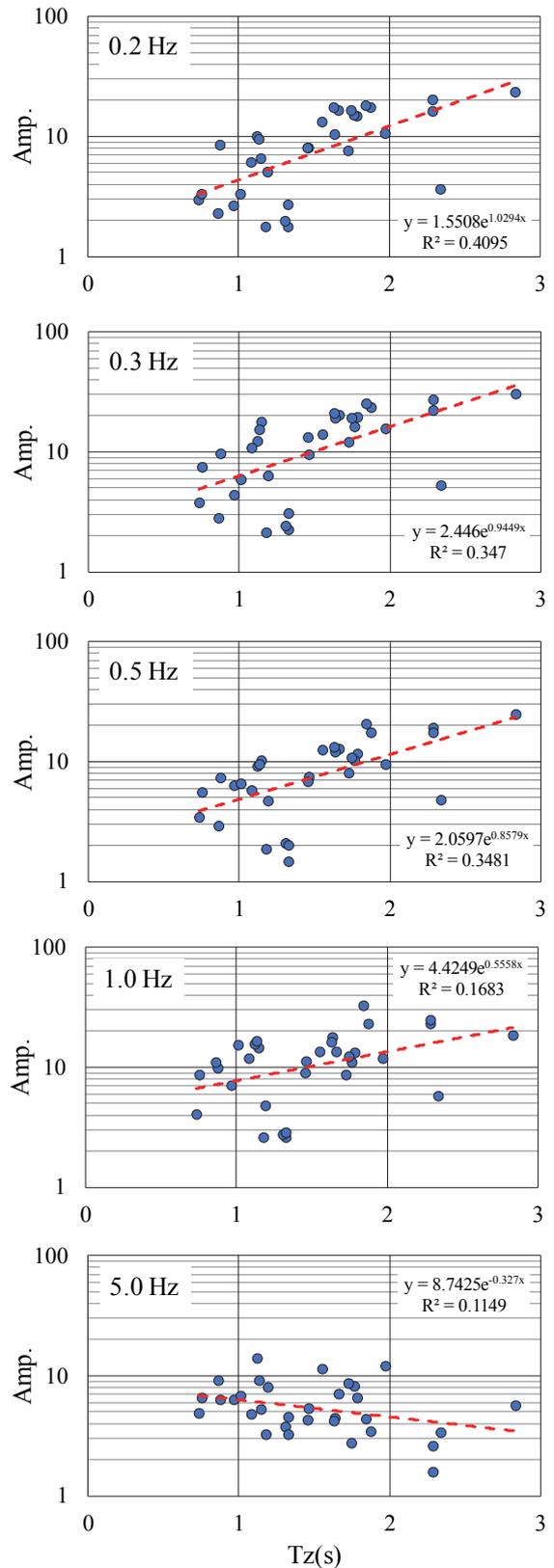


Fig. 12 The full-wave site amplification (SA-SS) depending on Tz in Kinki area. We selected the sites for Kinki area are the observations at K-NET and KiK-net in Osaka prefecture, and CEORKA. The red line shows regression analysis.

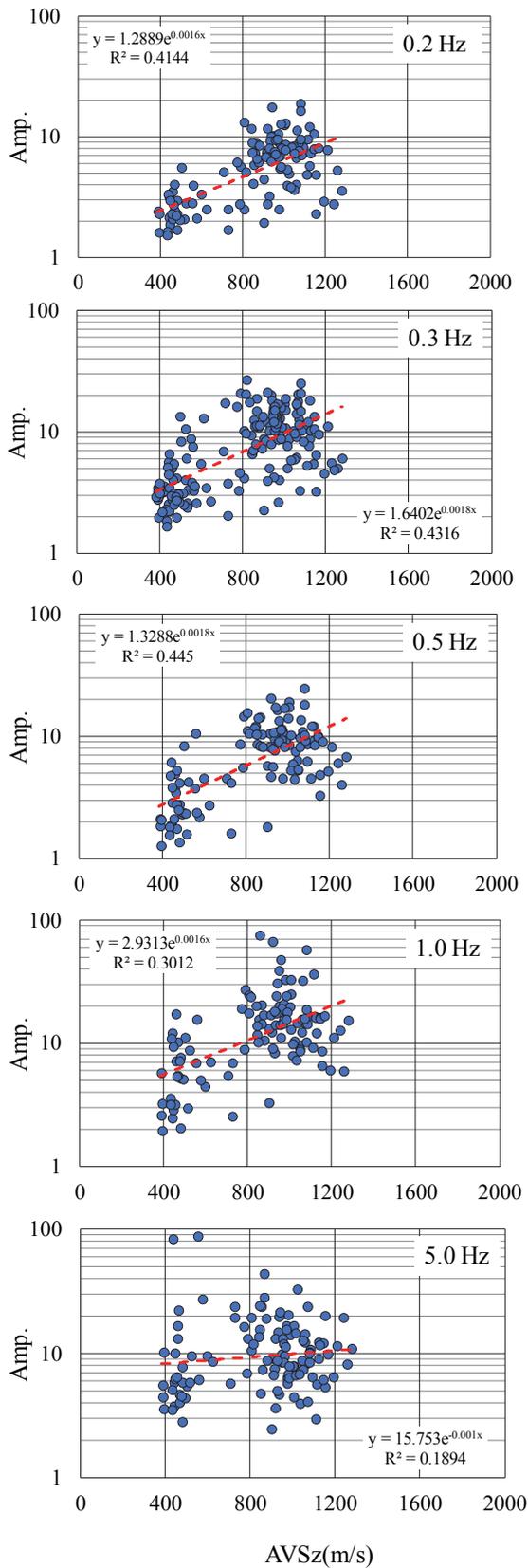


Fig. 13 The full-wave site amplification (SA-SS) depending on AVSz in Kanto area. The sites we selected such as Fig.11. AVSz is calculated by the depth of sedimentary layer and Tz until seismological bedrock ($V_s=3.2\text{km/s}$).

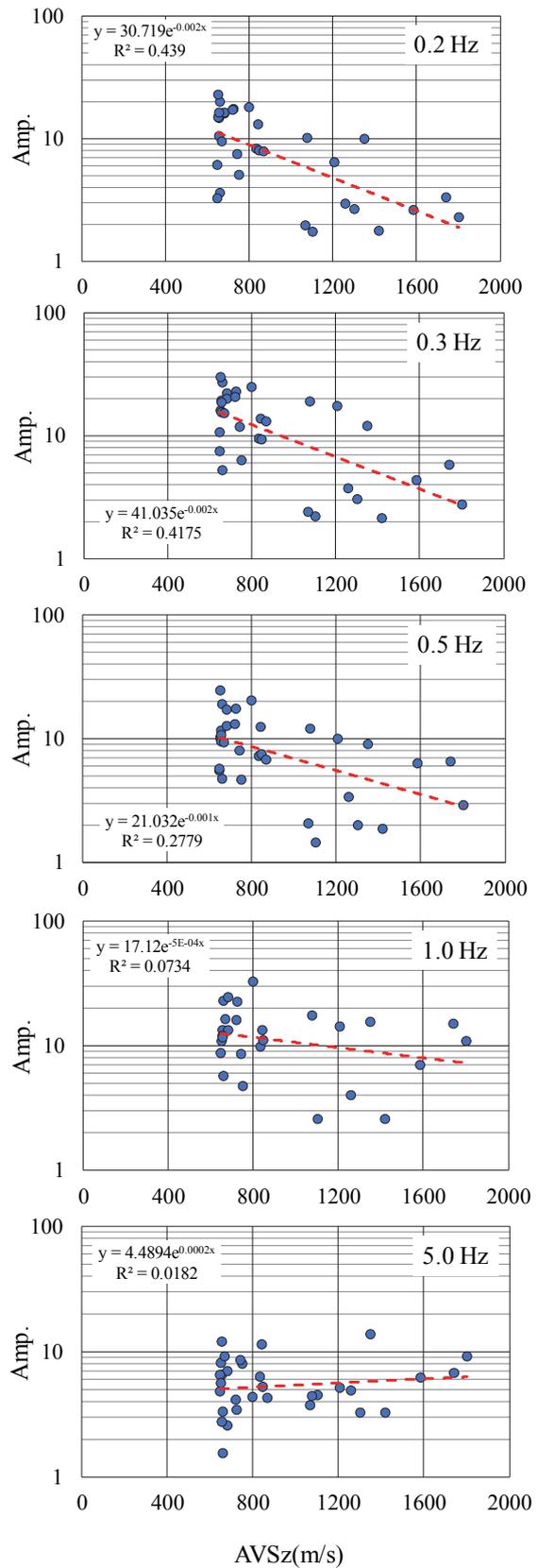


Fig. 14 The full-wave site amplification (SA-SS) depending on AVSz in Kanto area. The sites we selected such as Fig.12. AVSz is calculated by the depth of sedimentary layer and Tz until seismological bedrock ($V_s=2.9\text{km/s}$).

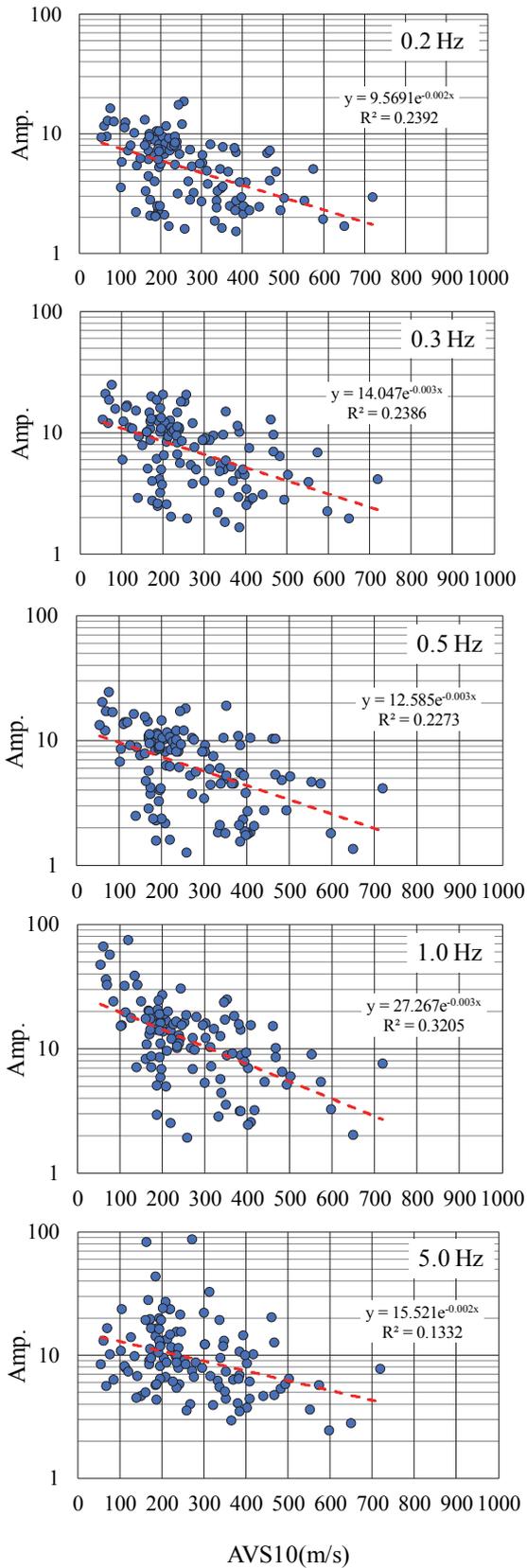


Fig. 15 The full-wave site amplification (SA-SS) depending on AVS10 in Kanto area. The sites we selected such as Fig.11, but excluding the site in KiK-net. The red line shows regression analysis.

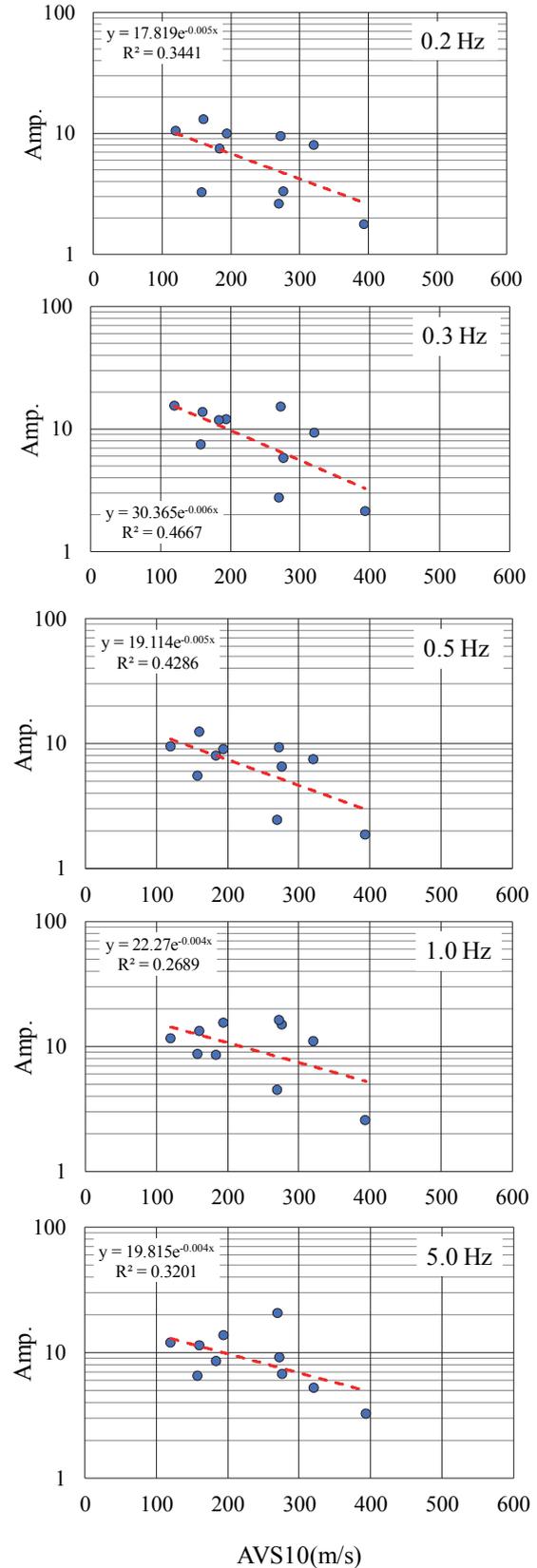


Fig. 16 The full-wave site amplification (SA-SS) depending on AVS10 in Kinki area. The sites that we selected are the same as Fig.12, but excluding the site in KiK-net. The red line shows regression analysis.

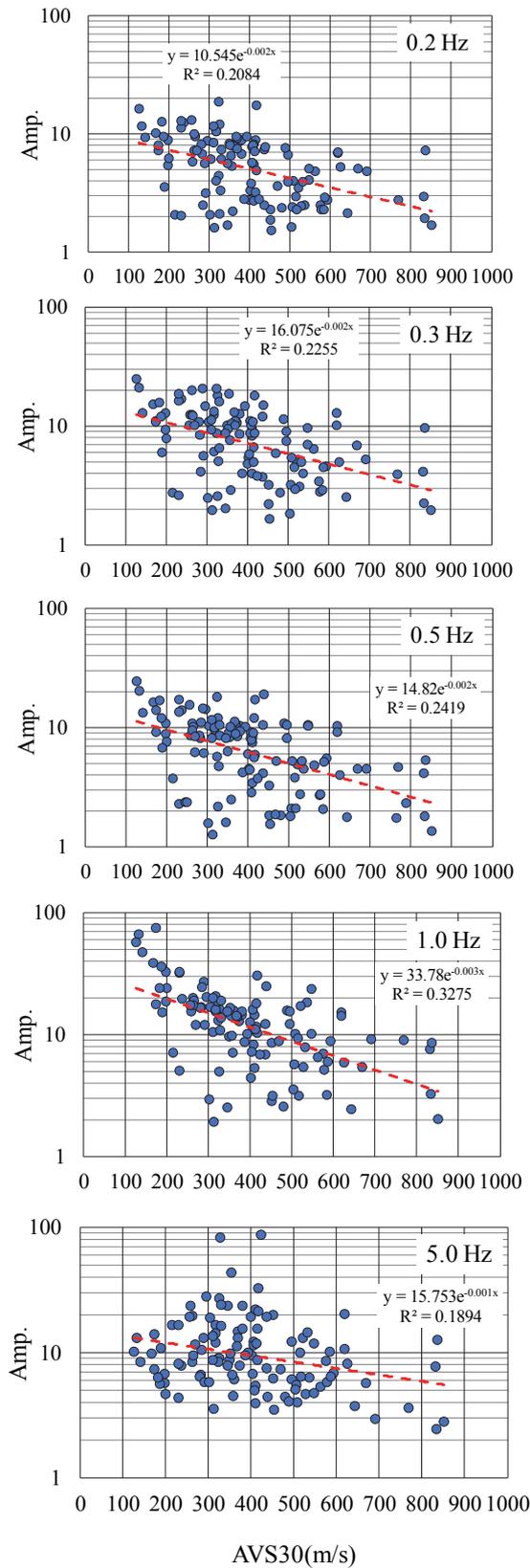


Fig. 17 The full-wave site amplification (SA-SS) depending on AVS30 in Kanto area. The sites that we selected are the same as Fig.11, but excluding the site in KiK-net. The red line shows regression analysis.

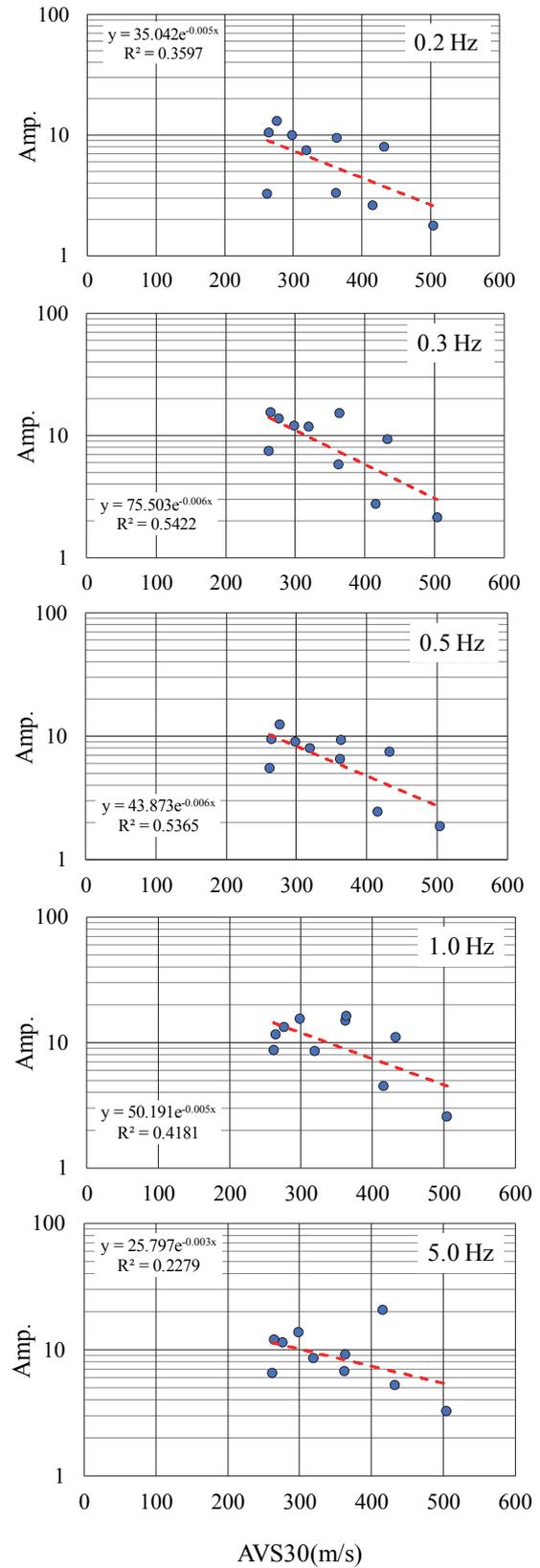


Fig. 18 The full-wave site amplification (SA-SS) depending on AVS30 in Kinki area. The sites that we selected are the same as Fig.12, but excluding the site in KiK-net. The red line shows regression analysis.

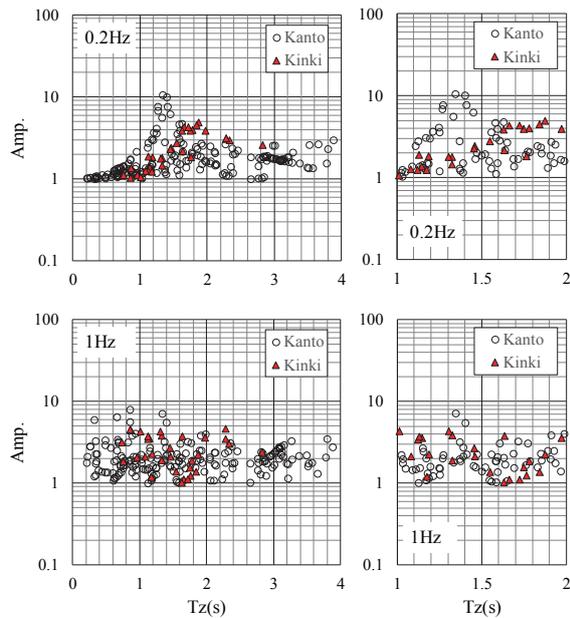


Fig. 19 The site amplifications calculated by 1D-theory with JIVSM structures in Kanto area and Kinki area at 0.2Hz and 1Hz with respect to Tz. Note that we selected the site in Osaka basin of CEORKA, K-NET and KiK-net for Kinki area. Right panels are close-ups of the left ones.

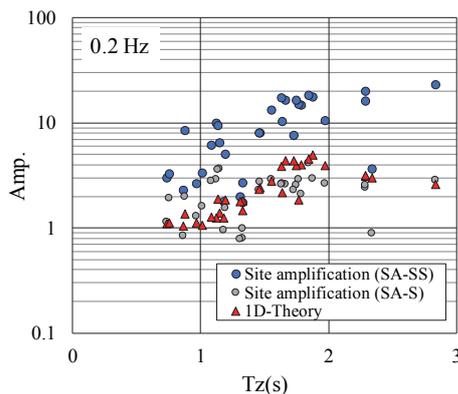


Fig. 20 Comparison of the site amplifications (SA-S and SA-SS) and the site amplifications calculated by 1D-theory in Kinki area at 0.2Hz. Note that we selected the site in Osaka basin of CEORKA, K-NET and KiK-net for Kinki area as in Fig. 19.

方ではTzが1.4秒程度まで明瞭な相関を持つグループも見られる。Tzを拡大した各段右図を子細に見れば、対象とした周期に対応するTzで振幅が頭打つことがわかる。1Hz（周期1秒）の場合、全体的には明瞭な相関は見られない。

Fig.20では、0.2Hz（周期5秒）での近畿地方のサイト特性（SA-SおよびSA-SS）と理論地盤増幅率（Fig.19で示した近畿地方のそれと同じ）を直接比較した。これを見れば明らかであるが、S波サイト特性（SA-S）と理論地盤増幅率はよく対応しており、S波サイ

ト特性をS波の一次元地盤増幅で理論的に説明できることを改めて支持する結果となっている。一方、全波サイト特性（SA-SS）は概ねサイト特性（SA-S）と相似形ではあるが、その振幅値が2倍～10倍も異なっていることがわかる。ただし、両者とも特定の相関関係を有していることは明らかであるから、Tz等によって理論的に解釈することが可能であることを示唆している結果と言える。

堆積層伝播時間Tzは、基盤にS波が鉛直入射した場合の堆積層内伝播にかかる時間として定義されており、1/4波長則に従えば、Tzの4倍（ $=4.0 \cdot Tz$ ）が地盤の卓越周期を表す（佐藤ら, 2011）。Fig.19の0.2Hz（周期5秒）での理論地盤増幅率について、Tzと強い相関関係が見られる範囲はTzが1.8秒程度以下であり、その4倍の値は約7秒となる。堆積盆地の卓越周期は、波動の伝播経路や基盤深度（堆積層の厚さ）等によって大きく変化することが指摘されており一概には言えないが、関東平野では約7秒前後を上限とする研究（Yoshimoto and Takemura, 2014）が、大阪平野では地震観測記録分析と表面波の解析的検討から約2～6秒程度とする研究があり（宮腰・堀家, 2006）、それらと比較すると概ね調和的であると言える。

Fig.20等で示したように、全波サイト特性（SA-SS）は、一次元重複反射理論に基づくS波の理論地盤増幅率と同様に、Tzが1.8秒以上の長周期域で頭打ちとなっている。佐藤ら(2011)が評価したサイト係数Cは応答スペクトルの残差項であって、その振幅値は物理的な意味が明確ではない。一方で、本研究ではフーリエスペクトルを扱い、地震動の基礎的な理論モデル（式(1)）を用いて、基盤入射波振幅に対する相対的な地盤増幅率として直接的にサイト特性を評価している。従って、物理的意味が明快であり、特にS波サイト特性(SA-S)は理論的にS波の一次元地盤増幅で直接的に解釈できるため、様々な工学的利用が期待できる（例えば、Kawase et al., 2018）。また、本研究は強震記録を対象として有効振動数帯域が0.1Hz～20Hzと広いため、多くの構造物に対して重要な周期帯を含んでおり、それらに対して適切な地盤震動特性を提供できる。

次に基盤深度と強い相関がある地盤の卓越周期付近の地盤増幅について考察する。Fig.21に、関東地方と近畿地方の地震基盤（近畿地方はVs=2.9km/s、関東地方ではVs=3.2km/s）の上面深度と周期3秒での全波サイト特性（SA-SS）を併せて示す。同図上が関東地方で同図下が近畿地方のそれである。関東地方の比較から、明らかに基盤深度が深いほど増幅率が大きい傾向が確認できる。特に、東京湾周辺から北西にかけて深い部分があり、そこに沿って増幅が大きく、それより浅い部分では増幅が小さい。子細にみれば、

この傾向は茨城県南部から栃木県南部にかけて基盤がそれほど深くないのに増幅が大きくなっている領域が見られる。これらの地域では、関東ローム層が厚く堆積していると考えられ、堆積層厚だけでなく低速度層の影響が大きく表れているものと推察される。一方、近畿地方においては、大阪湾周辺の基盤深度が深い領域において地盤増幅が大きい、その他の基盤深度が深い領域ではそれほど地盤増幅は大きくない。このことは、先と同様に基盤深度だけでなく、堆積層の速度構造がサイト特性に影響していることを意味しており、地盤増幅の影響をモデル化するには留意する必要がある。

最後に、本稿では水平動のRMS値のサイト特性についてのみ議論したが、上下動についても、Tz (P波の堆積層伝播時間として定義したもの) 等に対して相関関係が見られることを補足しておく。

6. まとめ

本研究のまとめは以下の通りである。

- 1988年～2016年の29年間に、気象庁 (JMA), 防災科学技術研究所 (NIED), 関西地震観測研究協議会 (CEORKA) で観測された強震記録を収集し、それらを統一の書式で再整理した上でデータセットを構築した。
- 同データセットにGITを適用して強震動特性を評価し、各特性が理論モデルとよく整合していること、かつ、安定したパラメータとして推定されていることを確認した。
- サイト特性に着目して、S波サイト特性 (SA-S) に比べて全波サイト特性 (SA-SS) は盆地生成表面波の寄与を含む長周期域の地盤増幅特性を反映していることがわかった。特に、OSKH02 (此花) のような約5~7秒に卓越周期を有するサイトにおいては、S波サイト特性 (SA-S) では長周期増幅特性を十分に評価できなかったが、全波サイト特性 (SA-SS) では盆地生成表面波等の寄与を評価できることを確認した。
- 地震観測点移設前後のサイト特性を比較したところ、約2~3Hz程度以下では両者のスペクトルは一致しているが、それ以上の振動数帯域では大きく異なることがわかった。たとえ同一敷地内で数十mの移設であっても、サイト特性は大きく変化する可能性があり注意が必要である。
- 特定振動数における全波サイト特性 (SA-SS) をAVS10, AVS30, 堆積層伝播時間Tzで整理したところ、周期に関わらずAVS10やAVS30に対して負の相関を有していることがわかった。長周期

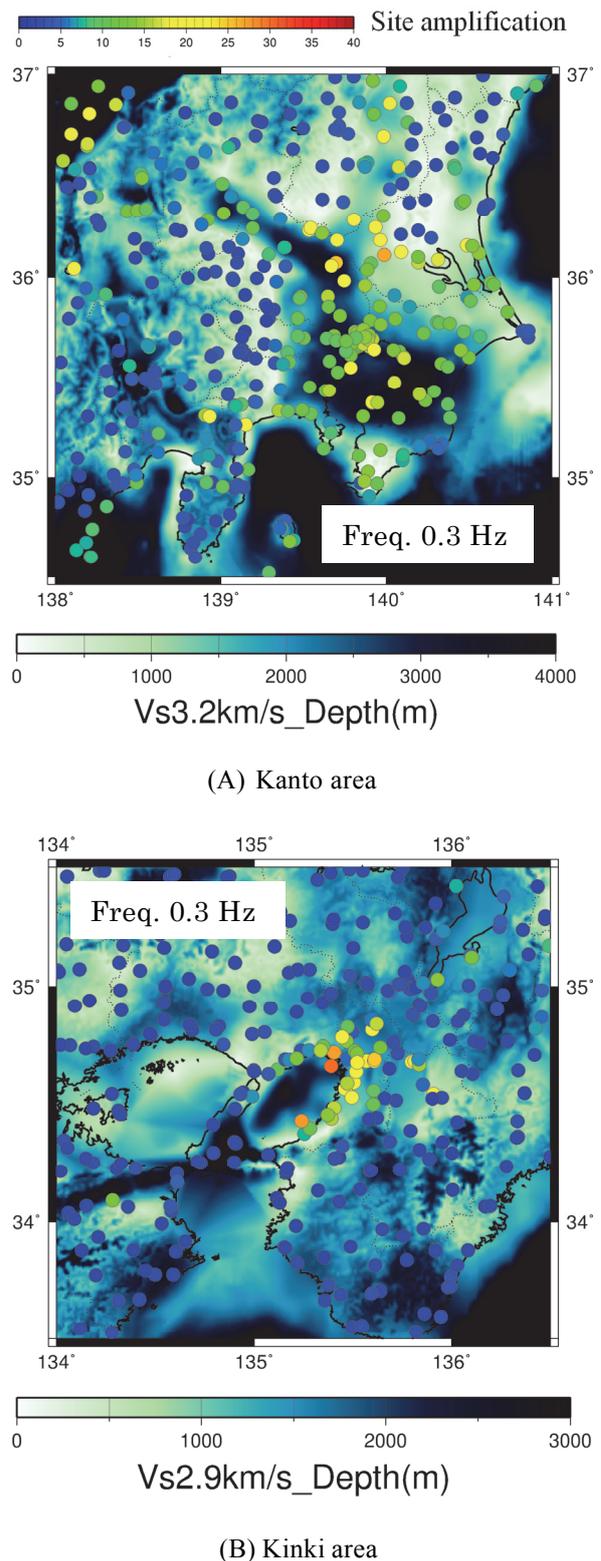


Fig. 21 Comparison of the thickness of sedimentary layer down to the seismological bedrock (Kanto area: Vs=3.2km/s, Kinki area: Vs=2.9km/s) to the full-wave site amplifications (SA-SS) at 3 s in period (Upper: Kanto area, Bottom: Kinki area).

域（1秒以上）では、全波サイト特性（SA-SS）とTzには正の相関が見られるが、関東地方に比べて近畿地方の方がその傾向は強いことがわかった。これは、関東地方では関東堆積盆地内の観測点に限定していないことが原因と考えられる。

- 一方、AVSzの場合は、関東地方ではTzの場合と同様に正の相関を有していること、近畿地方より関東地方で相関が強いこと、全体的な傾向としては長周期域で相関が強く、短周期域になるほど相関が弱いことが確認できた。しかしながら、AVSz=800m/sを境に相関の強い2つのグループが見られ、800m/s以下は関東堆積盆地外、800m/s以上は関東堆積盆地内の観測点であることから、先の相関はみかけのものであることに注意が必要である。これに対して近畿地方では、同様にしてAVSz=800m/sを境に2つのグループに分けると、800m/s以下は大阪堆積盆地内、800m/s以上は大阪堆積盆地の境界部もしくは盆地外の観測点となっており、その結果前者では平均増幅率はほぼ一定であるのに対し、後者ではAVSzが大きいほど増幅が小さくなる逆相関の関係が見られた。
- 全波サイト特性と基盤深度の関係を周期3秒について整理したところ、長周期域においてこれらの間には強い相関関係があることが確認できる。一方で、上記の議論からAVSz等のS波速度の違いもサイト特性に強く影響していると考えられるため、対象とする地域ごとに、これらをセットで議論する必要があることが示唆される。

今後、インバージョン分離によって得られた様々な強震動特性の詳細分析を継続して進めていく。また、サイト特性と地盤構造パラメータ（AVS30やTz等）の関係を精査すると共に、地盤構造パラメータとの相関を向上させるため、近畿地方と同様に関東地方のサイトについても堆積盆地や微地形区分等を参照しつつ注意深く検討していきたい。

謝 辞

本研究では気象庁、防災科学技術研究所、関西地震調査研究協議会によって公開されている地震観測記録を使用させて頂きました。また、一部の作図にはGMT（Wessel and Smith, 1998）を用いています。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 岩田知孝・入倉考次郎(1986)：観測された地震波から震源特性・伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み，地震 第2輯，第39巻，pp.579-593.
- 川瀬 博(1993)：表層地質による地震波の増幅とそのシミュレーション，地震 第2輯，第46巻，pp.171-190.
- 川瀬 博・松尾秀典(2004)：K-NET, KiK-net, JMA震度計観測網による強震動波形を用いた震源・パス・サイト各特性の分離解析，日本地震工学会論文集，第4巻，第1号，pp.33-52.
- 気象庁：地震月報（カタログ編）震源データ：
<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/hypo.html>（閲覧日：2018年2月13日）
- 気象庁(2015)：「強震波形データ」及び「強震観測報告」の一部データの誤りについて，
http://www.jmbc.or.jp/jp/offline/info/info_jishinhakei151204.pdf（閲覧日：2018年5月25日）.
- 功刀 卓・青井 真・藤原広行(2009)：強震観測一歴史と展望一，地震 第2輯，第61巻，pp.19-34.
- 国土交通省(2016)：国住指第1111号 超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動対策について（技術的助言），
http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/jutakukentiku_house_fr_000080.html（閲覧日：2018年5月24日）.
- 後藤浩之・澤田純男・吉田 望・羽田浩二(2014)：2011年東北地方太平洋沖地震の地震動による福島県浪江町建築被害の悉皆調査，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.70, No.4（地震工学論文集第33巻），I_1061-I_1070.
- 佐藤智美・巽 誉樹(2002)：全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性，日本建築学会構造系論文集，第556号，pp.15-24.
- 佐藤智美・大川 出・西川孝夫・佐藤俊明・関 松太郎(2010)：応答スペクトルと位相スペクトルの経験式に基づく想定地震に対する長周期時刻歴波形の作成，日本建築学会構造系論文集，第75巻，第649号，pp.521-530.
- 佐藤智美・大川 出・西川孝夫・佐藤俊明(2011)：長周期応答スペクトルの地盤増幅率の経験予測式とその理論的解釈，日本建築学会構造系論文集，第76巻，第669号，pp.1905-1914.
- 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，pp.354-373.
- 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 付録2. 全国1次地下構造モデル（暫定版），<https://www.jishin.go.jp/>（閲覧日：2018

- 年2月13日) .
- 多賀直恒・富樫 豊・宮崎 正(1982): 濃尾平野周縁部の長周期微動特性: たい積地盤と振動源の特性の分離, 日本建築学会構造系論文集, 第324号, pp.95-103.
- 武村雅之(1990): 日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係, 地震 第2輯, 第43巻, pp.257-265.
- 寺島芳洋・高橋広人・福和伸夫・護 雅史(2012): 堆積盆地における地盤と超高層建物との共振現象に関する研究: その1 大阪平野の地盤周期の分析と強震動予測, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造II, pp.151-152.
- 日本建築学会(2000): 建築物の減衰, 日本建築学会, 278 pp.
- 日本建築学会(2005): 地盤震動—現象と理論—, 日本建築学会, 408 pp.
- 野津 厚・長尾 毅(2005): スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト増幅特性, 港湾空港技術研究所, 資料, No.1112.
- 野津 厚・長尾 毅・山田雅行(2007): スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測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, 第7巻, 第2号(特集号), pp.215-234.
- 福山英一・石田瑞穂・D., S., Dreger・川井啓廉(1998): オンライン広帯域地震 波形を用いた完全自動メカニズム決定, 地震 第2輯, 第51巻, 第1号, pp.149-156.
- 防災科学技術研究所: 強震観測網(K-NET, KiK-net), <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/> (閲覧日: 2018年4月20日) .
- 宮腰 研・堀家正則(2006): 大阪平野におけるやや長周期地震動の周期特性, 物理探査, 第59巻, 第4号, pp.327-336.
- Aoi, S., Kunugi, T. and Fujiwara, H. (2004): Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, J. Japan Assoc. Earth. Eng., Vol. 4, Issue 3, pp. 65-74, doi:10.5610/jaee.4.3_65.
- Andrews, D.J. (1982): Separation of source and propagation spectra of seven Mammoth Lakes aftershocks, Proc. of Workshop 16, Dynamic Characteristics of Fault, U. S. Geol. Sur. Open File Rep., pp.82-591, USGS, pp.437-454.
- Dziewonski, A.M., Chou, A.T. and Woodhouse, H.J. (1981): Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity, J. Geophys. Res., Vol.86, pp.2825-2852, doi:10.1029/JB086iB04p02825.
- Ekström, G., Nettles, M. and Dziewonski, M.A. (2012): The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes, Phys. Earth Planet. Inter., pp.200-201, 1-9. doi:10.1016/j.pepi.2012.04.002.
- Hisada, Y., Kaneda, J., Teramoto, A., Murakami, M., Masuzawa, Y., Yanagida, Y., Shindo, T., Suzuki, H., Sakai, S., Mori, K., Nakano, K., Tojo, Y., Kimoto, K., Tanaka, S. and Kobayashi, W. (2017): Strong ground motions and damage investigation of buildings near the surface faulting of the 2016 Kumamoto earthquake in Japan, 16th World Conference on Earthquake Engineering, No.5001.
- Kanno, T., Narita, A., Morikawa, N., Fujiwara, H. and Fukushima, Y. (2006): A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 96, No. 3. pp.879-897, doi:10.1785/0120050138.
- Kawase, H., Ito, S. and Kuhara, H. (2000): Strong motion prediction for Fukuoka city based on distinctive asperities and statistical Green's functions. Proc. 6th Int. Conf. Seism. Zona., Palm Springs, California, CD-ROM, pp.6.
- Kawase, H., Matsushima, S., Nagashima, F., Baoyintu and Nakano, K. (2017): The cause of heavy damage concentration in downtown Mashiki inferred from observed data and field survey of the 2016 Kumamoto earthquake, Earth, Planets and Space, Vol. 69, No.3, doi:10.1186/s40623-016-0591-1.
- Kawase, H., Nagashima, F., Nakano, K. and Mori, Y. (2018): Direct evaluation of S-wave amplification factors from microtremor H/V ratios: Double empirical corrections to "Nakamura" method, Soil Dyna. Earth. Eng., doi:10.1016/j.soildyn.2018.01.049.
- Kinoshita, S. (1998): Kyoshin net (K-NET), Bull. Seismol. Soc. Am., Vol.69, No.4, pp.309-332, doi:10.1785/gssrl.69.4.309.
- Nakano, K., kawase, H. and Matsushima, S. (2015): Statistical properties of strong ground motions from the generalized spectral inversion of data observed by K - NET, KiK - net, and the JMA shindokey network in Japan, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol.105, No.5, pp.2662-2680, doi: 10.1785/0120140349.
- Oth, A., Parolai, S. and Bindi, D., (2011a). Spectral analysis of K-NET and KiK-net data in Japan, Part I: Database compilation and peculiarities, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol.101, No. 2, pp.652-666, doi: 10.1785/0120100134.
- Oth, A., Bindi, D., Parolai, S. and Giacomo, D.D. (2011b):

Spectral analysis of K-NET and KiK-net data in Japan, Part II: On attenuation characteristics, source spectra, and site response of borehole and surface stations, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol.101, No. 2, pp.667-687, doi: 10.1785/0120100135.

Wessel, P. and Smith, H.F.W. (1998): New, improved version of Generic Mapping Tools released, Eos Trans.

AGU, Vol.79, No.47, p.579.

Yoshimoto, K. and Takemura, S. (2014): A study on the predominant period of long-period ground motions in the Kanto Basin, Japan, Earth, Planets and Space, Vol.66, No.100, doi: 10.1186/1880-5981-66-100.

(論文受理日 : 2018年6月13日)