

スペクトルインバージョン手法に基づく強震動特性の統計的性質に関する研究

仲野健一^{*1}・川瀬 博^{*2}・松島信一^{*2}

本研究の目的は、1996-2011年の期間にK-net, KiK-net, JMAで観測された日本全国の強震動記録の加速度フーリエスペクトルおよび加速度応答スペクトルを用いて、スペクトルインバージョン手法に基づき震源・伝播経路・サイト増幅特性を推定し、各特性について新たな知見を得ることである。フーリエスペクトルから分離された強震動特性は、どれも先行研究と非常に良い一致を示し、より安定した結果となった。応答スペクトルから分離された強震動特性は、約1Hz以上10Hz以下の振動数域においてフーリエスペクトルの分離特性と概ね一致する結果となったが、約1Hz以下の低振動数域および10Hz以上の高振動数域においては異なる挙動を示すことがわかった。

キーワード：スペクトルインバージョン、Qモデル、サイト増幅特性、応力降下量

1. はじめに

スペクトルインバージョン手法に基づいて強震動波形のフーリエスペクトルから強震動特性を分離する研究が、川瀬・松尾(2004)等により試みられている¹⁾²⁾³⁾。しかし応答スペクトルから同じように強震動特性を分離する研究はほとんど行われていない。これは応答スペクトルとフーリエスペクトルが異なると考えられているためであるが、両者に類似性があることが指摘されている⁴⁾。また彼らのデータは1996-2002年のものであり、それから約10年が経過している。2011年3月11日東北地方太平洋沖地震などの巨大地震時のサイト増幅特性の非線形化も指摘されている⁵⁾。そこで今回は1996-2011年までの弱震データを用いて、フーリエおよび応答スペクトルから強震動特性の分離・解析をおこない、得られた強震動の基本的特性について整理し強震動予測の高度化に役立てることを目的とする。

2. 分離手法・データ

2.1 分離手法

地震動伝播は、震源で発生した地震波(震源特性)が基盤以深を伝播し(経路特性)、基盤以浅の堆積地盤において増幅され(サイト増幅特性)、建物に入力されるシステムとして考えることができる。その考え方から、建物に入力される地震動に対して統計的な強震動特性を抽出するため、加速度フーリエスペクトルおよび加速度応答スペクトル(減衰定数 $h = 5\%$)に対して統計的な地震動特性を抽出するため、スペクトルを次のようにモデル化した。

$$\log F_{ij} = \log S_i - n_{l(i)} \log X_{ij} + \sum_k b_{l(i)k} X_{ijk} + \log G_j \quad (1)$$

$$X_{ij} = \sum_k X_{ijk} \quad (2)$$

i : 地震, j : 観測点, k : 地域, $l(i)$: 地震タイプ

ここで S_i は震源特性, G_j はサイト増幅特性である。 b は内部減衰+散乱減衰を表す減衰項であり、幾何減衰 n と併せて経路特性となる。

経路特性の b は以下の(3)式により Q 値に変換したものと取り扱う。

$$1/Q(f) = \frac{-b(f) \cdot V_s \cdot \ln 10}{\pi \cdot f} \quad (3)$$

ここで、 b は経路特性、 V_s はS波速度であり、本研究では3500m/sとした。 Q 値は品質係数と呼ばれる物理量であり、 Q^1 値が大きいほど減衰が大きいことを意味している。

2.2 データセット

1996年8月から2011年12月までの期間で、気象庁マグニチュード $M_{JMA} \geq 4.5$ 、震源深さ ≤ 60 km、震源距離 ≤ 200 km、最大加速度 ≤ 200 gal、同一地震トリガー地点数 ≥ 3 の条件にあうK-NET観測点、KiK-net観測点、JMA95型震度計観測点のいずれかの観測点で観測された時刻歴加速度波形記録でデータセットを構築した。本研究で用いた観測点は、K-NETで972地点、KiK-netで601地点であり(防災科学技術研究所; <http://www.kyoshin.bosai>).

*1 建築研究第一部 *2 京都大学防災研究所

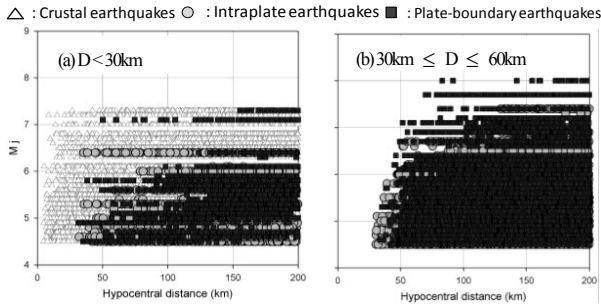


図-1 地震規模別データ分布

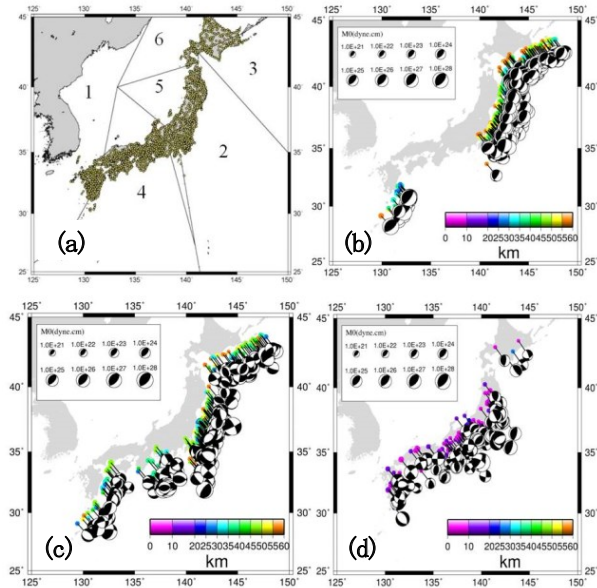


図-2 観測点および領域分布と震源メカニズム解

go.jp/kyoshin/), JMA (気象庁 ; <http://www.jma.go.jp/jp/quake/>) で 532 地点の合計 2105 地点である。データ数は、地震数で 967 イベント、地震 - 観測点ペアは 77213 ペアである (地震波はこの 2 倍)。このデータ数は川瀬・松尾^{3) 4)}の約 4 倍になる。データセットの地震規模分布を、震源距離 X_{ij} と気象庁マグニチュード M_{JMA} の関係として図-1 に示す。図-1 (a) は震源深さが 30km 未満のもの。図-1 (b) は 30km 以上 60km 以下のものを示している。図をみれば地震の分布は概ね均一であること、海溝型地震のほうが大きな規模の地震が含まれていることがわかる。

本研究で用いた地震観測点位置、各地震の震源分布および震源メカニズム解を図-2 に示す。図-2 (a) に、K-NET, KiK-net, JMA の強震動観測点を黄色の丸印で、 Q 値が異なると仮定した 6 つの領域をそれぞれの数字で示してある。図-2 (b), (c), (d) はプレート境界地震 (448 地震)、プレート内地震 (294 地震)、地殻内地震 (225 地震) のものをそれぞれ示している。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 地域に分割し (図-2a)、地震タイプをプレート境界地震、プレート内地震、地殻内地震の 3 つにわけた。

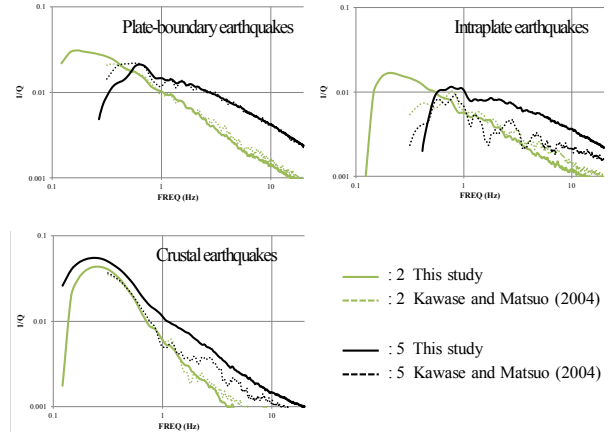


図-3 経路特性としての Q 値

3. フーリエスペクトルから分離した強震動特性

3.1 経路特性

フーリエスペクトルから分離し求めた減衰項 b を (3) 式を用いて Q 値に変換し先行研究と比較したものを図-3 に示す。ここでは代表的な領域 2, 5 のものだけを示す。図-3 (a), 3 (b), 3 (c) はそれぞれプレート間地震、プレート内地震、地殻内地震の Q 値を示している。点線は川瀬・松尾^{3) 4)}のもの、実線はフーリエスペクトルから求めた本研究のものを示す。領域 2, 5 は火山フロントのそれぞれ前弧側、背弧側であり、本研究では前弧側が低 Q 値であることが示され、それは既往の研究と対応するものである。

各図において、点線より実線のほうが高振動数域で安定した線形の減衰傾向をみせており、特にプレート内地震の領域 5 において非常に安定した結果となった。また図-3 に示していないが、地殻内地震で従来求められていなかった北海道周辺の Q 値 (領域 3, 6) が本研究で新たに得られた。

3.2 サイト増幅特性

図-4 にフーリエスペクトルから分離して求めたサイト増幅特性を、K-NET, KiK-net, JMA の計 3 つのサイトで川瀬・松尾^{3) 4)}と比較した。実線が本研究、点線が彼らのものを示す。彼らが用いたデータは 1996-2002 年のもので、本研究では 1996-2011 年のものを用いている。両者はどのサイトでも非常によく一致しており、サイト増幅特性はデータ期間によらず安定して求められていることがわかった。

3.3 震源特性

震源特性は以下に示す (4) 式で、一般によく用いられる Brune の応力降下量⁶⁾として評価する。

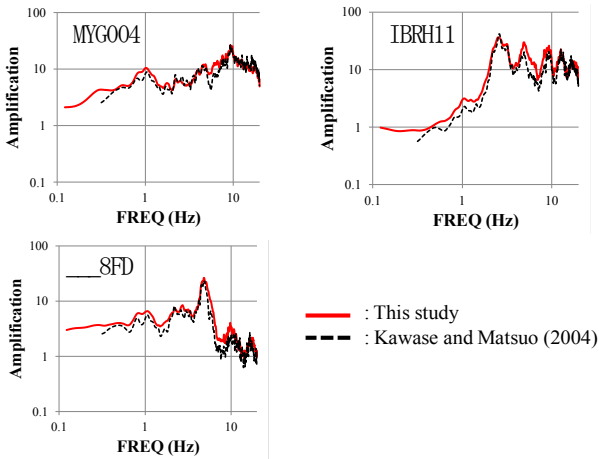


図-4 サイト増幅特性

$$\Delta\sigma = \frac{7}{16} \cdot M_0 \cdot \left(\frac{fc}{0.37 \cdot V_s} \right)^3 \quad (4)$$

ここで、 $\Delta\sigma$ は応力降下量、 M_0 は地震モーメント、 fc はコーナー周波数、 V_s はS波速度である。 M_0 はF-netで公開されている値を、該当しない地震の場合、 M_{JMA} から M_0 を推定しその値を使用した。 fc は分離された震源スペクトルから ω^{-2} モデルに従うと仮定して推定した。

図-5に、震源特性を(4)式を用いてBruneの応力降下量⁶⁾に変換して川瀬・松尾³⁾⁴⁾のものと比較した。四角形の白抜きのは本研究の東北地方太平洋沖地震までのデータの応力降下量、赤四角はそれ以降の応力降下量、丸印は彼らのものである。これらを比較すれば、彼らの応力降下量と本研究で推定したそれとは M_0 の小さなものを除きよく一致しており、顕著に異なっていないこと、東北地方太平洋沖地震の前後でその応力降下量の値に違いは見られないことがわかる。また本研究で求めた応力降下量の平均値は、海溝型地震で約6MPa、地殻内地震で約1MPaと一般的な応力降下量の推定値となった。

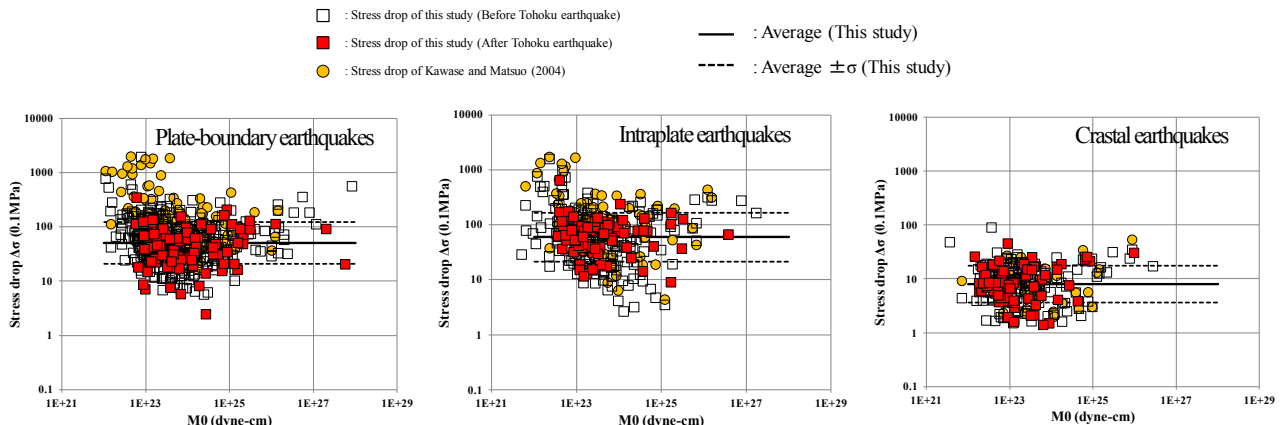


図-5 応力降下量の比較

3.4 応力降下量の深さ依存性

図-6に、応力降下量の深さ依存性について、地震タイプ毎に示す。図を見れば明らかなように、地殻内地震は比較的まとまっているが、海溝型地震は大きな幅を持つこと、深さ依存は全地震タイプで深さ別に平均をとれば徐々に増加する傾向があることがわかった。この図は、データ数の少ない一部の地殻内地震を除くと、地殻内地震の低い平均応力降下量と海溝型地震の高い平均応力降下量はその震源深さの影響として説明できることを示している。

3.5 短周期レベルA

強震動予測において重要な指標の一つである短周期レベルAについて、一般に用いられる壇・他⁷⁾および佐藤⁸⁾のものと本研究の結果をそれぞれ比較した(図-7,8)。各図に、彼らの回帰式を点線で、我々のものを実線で示している。その結果、壇・他⁷⁾の回帰式とは地殻内地震では異なるが、海溝型地震においてはほぼ同じ結果となった。佐藤⁸⁾のものはプレート内地震では若干異なるが他2つの地震タイプでは非常に近い回帰式が得られることがわかった。

4. 応答スペクトルから分離した強震動特性

4.1 経路特性

応答スペクトルから分離して(3)式により求めた Q 値を図-9に示す。フーリエスペクトルから求めた Q 値を点線で、応答スペクトルから求めたものを実線で示す。先と同様に領域2, 5のものだけ示す。両者を比較すれば、地震タイプ・領域によらず1Hz以上ではよく一致している。しかし、約1Hz以下の低振動数域においてその傾向は異なり、応答スペクトルから求めた Q 値は線形の減少傾向を続けるのに対し、フーリエスペクトルから求めた Q 値は増大に転じる傾向がみられる。

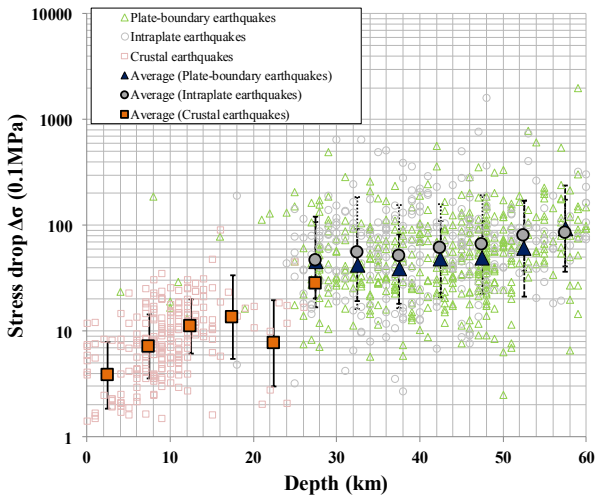


図-6 応力降下量の深さ依存

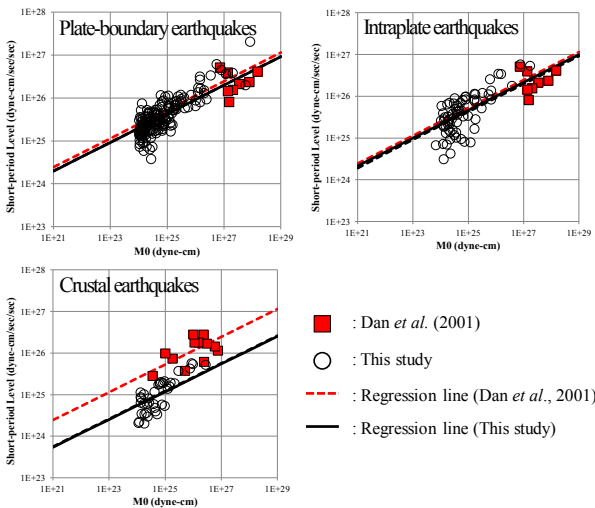


図-7 壇・他⁷⁾の短周期レベルAとの比較

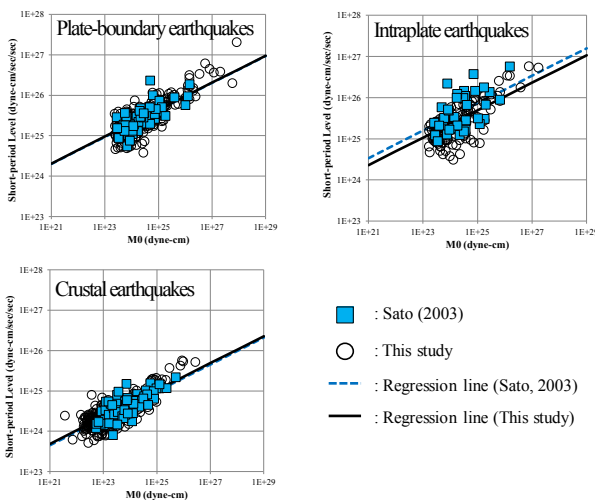


図-8 佐藤⁸⁾の短周期レベルAとの比較

4.2 サイト増幅特性

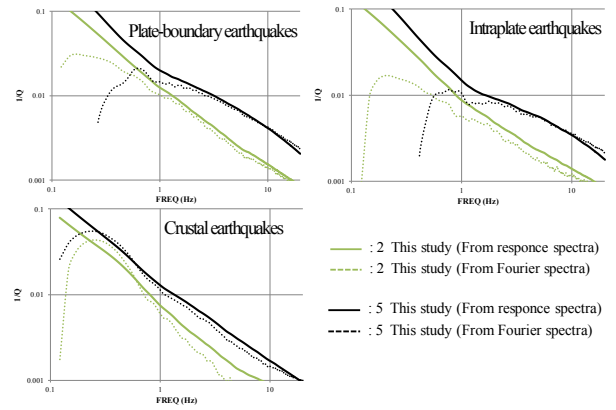


図-9 応答スペクトルから求めたQ値

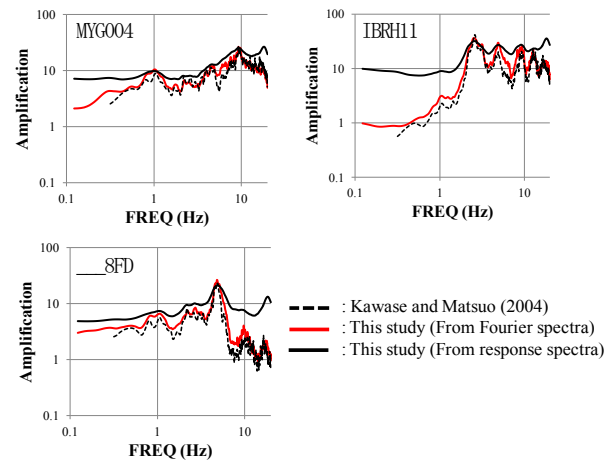


図-10 応答スペクトルから求めたサイト増幅特性

図-10に 応答スペクトルから求めたサイト増幅特性とフーリエスペクトルから求めたものとの比較を示す。黒色の太い実線は 応答スペクトルから求めたサイト増幅特性、赤色の細い実線と黒色の点線は、それぞれフーリエスペクトルから求めたもの、川瀬・松尾³⁾⁴⁾のものである。応答スペクトルから求めたサイト増幅特性は、振幅レベルおよび卓越する振動数等はよく一致している一方で、約 1Hz 以下の低振動数域において、異なる挙動を示し、他 2 つに比べて高い値を保ったままでフラットな傾向を示した。

4.3 震源特性

異なる 6 つの地震に対して、加速度応答スペクトルから分離した震源特性である変位震源スペクトルを擬似速度震源スペクトル化したものと加速度フーリエスペクトルから求めた震源スペクトルを図-11で比較した。点線が 応答スペクトルから求めたもの、実線がフーリエスペクトルから求めたものである。 M_{JMA} 7 程度の地殻内地震はよく似た傾向を示し、海溝型地震の 2 つと M_{JMA} 6 程度の地殻内地震もよく似た傾向を示したが、後者において約 1Hz

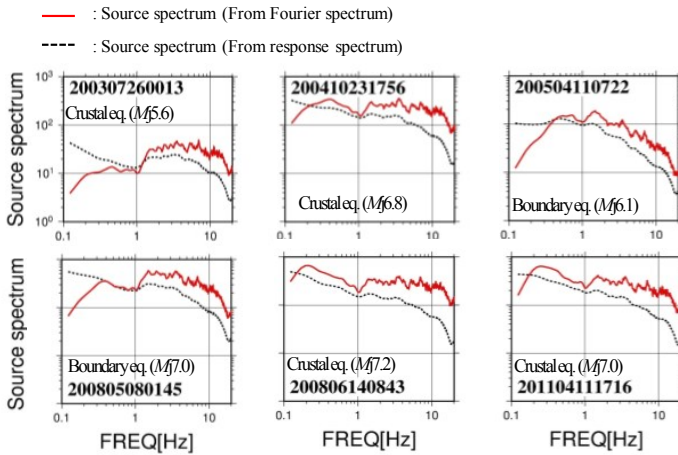


図-11 震源スペクトルの比較

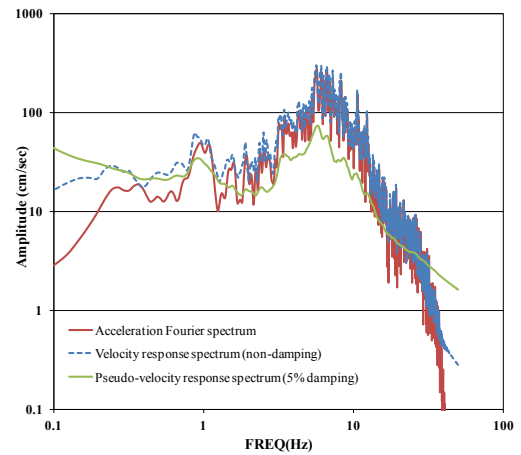


図-12 MYG004 で観測されたスペクトル比較

以下で応答スペクトルから求めたもののほうが顕著に大きくなる傾向を示した。

4.4 フーリエスペクトルと応答スペクトルの関係

上述の約 1Hz 以下の長周期域での顕著な差を説明するため、MYG004 で観測された、2005 年宮城県沖地震の各スペクトル形状の比較を図-12 に示す。濃い赤の実線は加速度フーリエスペクトル、薄い緑の実線は加速度応答スペクトルを擬似速度化したもの、青色の点線は非減衰速度応答スペクトルを意味する。この図をみれば、応答スペクトルはフーリエスペクトルより約 1Hz 以下の低振動数域で高い値となることがわかり、これが約 1Hz 以下の低振動数域での顕著な差の原因であると考えられる。このような傾向は他のほとんどの地点でもみられた。この傾向の理由としては、フーリエスペクトル振幅の大きい高振動数成分がインパルス入力として応答スペクトルの低振動数域に影響しているためだと考えられる。

5. 分離結果の検証

図-13 に、フーリエスペクトルから分離したサイト増幅特性（赤色の実線）と、各地震のフーリエスペクトルをフーリエスペクトルから分離した震源特性と経路特性の積で除して求めた各地震の逆算サイト増幅特性（灰色の実線）との比較を示す。フーリエスペクトルはいずれも水平 2 成分の RMS 値である。なお、黒色の実線は灰色の実線の平均値を、波線はその $\pm \sigma$ を示す。比較のため、K-NET から MYG004（築館）・TKY007（新宿）、KiK-net から FKSH10（西郷）・IBRH11（岩瀬）、JMA から E4E（東京千代田区大手町）・8FD（茨城鹿嶋市鉢形）の各 2 地点、計 6 地点を選んだ。図を見れば明らかなように、分離して求めた

サイト増幅特性と逆算して求めたその平均値は非常によく一致している。このことから、ばらつきの幅は大きいですが、平均的なサイト増幅特性（本研究では $4.5 \leq M_{JMA} \leq 8.0$ のデータを用いている）がスペクトル分離により数値計算しきちんと求められており、他の強震動特性と合わせて観測フーリエスペクトルの再現が可能であることを確認した。また、各サイトにおいて、逆算サイト増幅特性のスペクトルの形は共通であり、特に高周波域では振幅の大きさの幅は大きいですが、その形に差異はあまりみられない。このことは、地震基盤が浅のサイト固有の地盤構造が反映されていることを意味している。ここで図-14 に、これら 6 地点でのサイト増幅特性の標準偏差 σ を示す。この図から、ばらつきはサイトによらずほぼ一定で（概ね標準偏差 0.2-0.3 の範囲に収まっている）、その周波数依存も小さいことがわかる。

今後、ばらつきへの震源や伝播経路による影響について分析し、低振動数域での逆算サイト増幅特性のスペクトル形状の変動が何に起因するものなのか検証したい。発展的取り組みとして、現在 S 波主要動に着目しているが、計算に用いる地震波の継続時間を延ばした解析も行い各特性に与える影響について検討したい。また、200gal 以上の強震動も含めたサイト増幅特性を求め、非線形評価手法の一つで、0.5-20Hz の広い周波数帯域に適用が可能な DNL¹⁰⁾を用いた検討を実施したい。

6. まとめ

以上のように、フーリエスペクトル・応答スペクトルから分離して求めた強震動特性について新たな知見が得られた。その内容をまとめると以下の通りである。

- 1) 分離した各強震動特性は、フーリエスペクトル・応答スペクトルとも 1Hz-10Hz において、おおむね一致

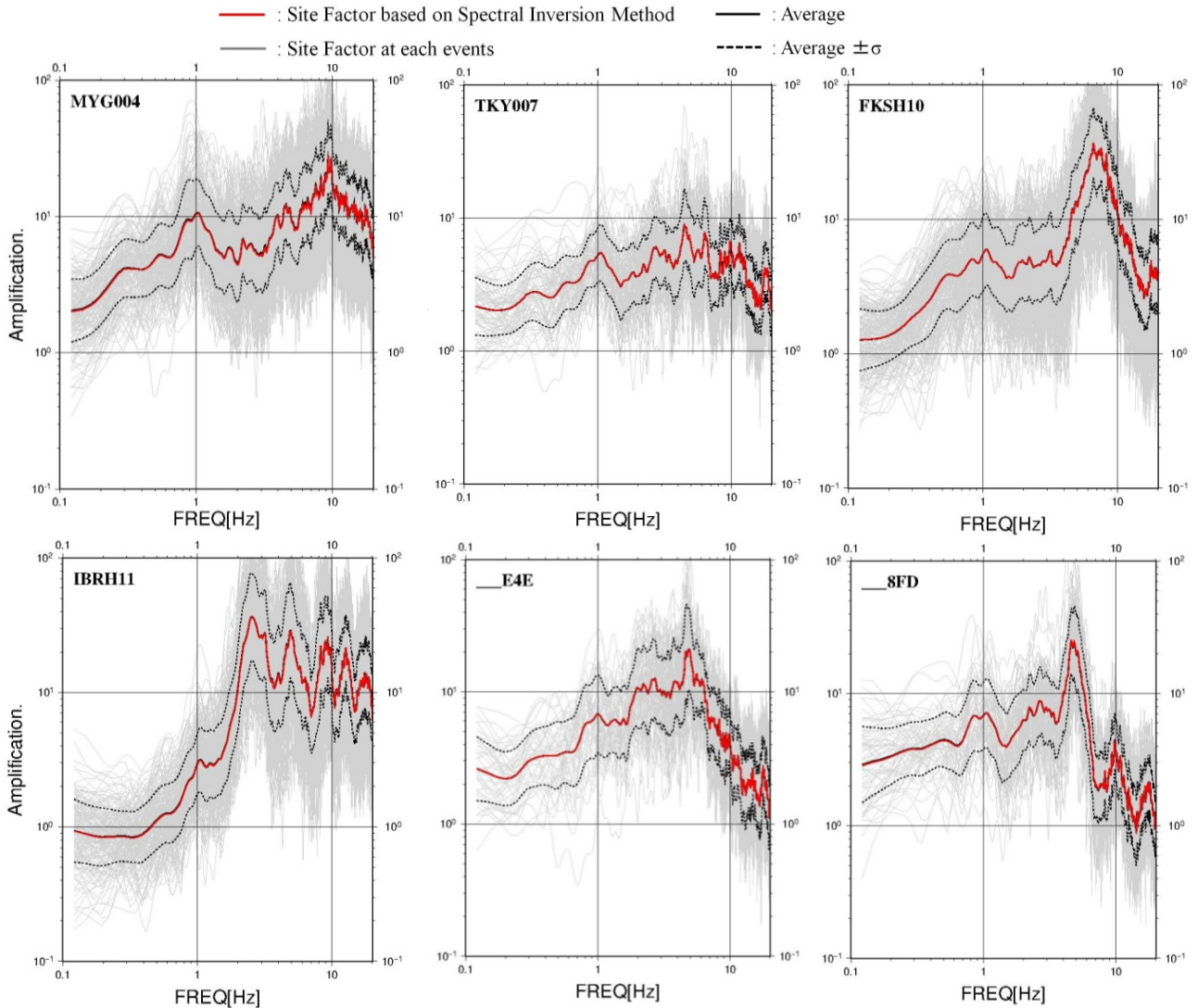


図-13 分離したサイト増幅特性と逆算して求めたサイト増幅特性の比較

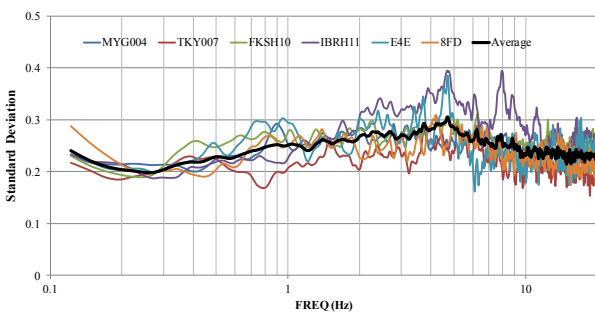


図-14 各サイト増幅特性の標準偏差の比較

した。

- 2) しかし、他の周波数範囲においては一致しないこと、特に1Hz以下の低振動数域では一般に一致しないことがわかった。
- 3) 低振動数域において、観測フーリエスペクトルとそれの応答スペクトルの値の差が大きいことから、分離した各特性が異なっていると考えられる。

- 4) 応答スペクトルの低振動数域では対応する入力レベルは小さいので、別の卓越する高振動数域の入力がインパルスとして1自由度系に入力され応答スペクトルの低振動数側の振幅を増大させていると考えられる。

今後、今回新たに得た強震動特性を用いて強震動予測の高精度化に寄与するように設定パラメータを提案すること、震源特性を M_{JMA} もしくは M_w で、サイト増幅特性をAVS30等で帰帰することで、より簡便なスペクトル予測式を構築することが今後の展望・課題である。

謝辞:本研究の実施にあたり、防災科学技術研究所および気象庁の強震観測ネットワーク(K-NET, KiK-net, JMA)により観測・収集された加速度時刻歴波形記録を使用させていただきました。本稿は著者の修士論文の内容を一部加筆修正したものを基にしています。記して感謝の意を表します。一部の図の作成にはGMT(General Mapping Tools)¹¹⁾を使用しています。

参 考 文 献

- 1) Andrews, D. J.: Separation of Source and Propagation Spectra of Seven Mammoth Lakes Aftershocks. Proceedings of Workshop 16, Dynamic Characteristics of Fault, *U. S. Geological Survey Open File Report*, 82-591, USGS, pp. 437, 1982.
- 2) 川瀬博・松尾秀典：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, 33-52, 2004.
- 3) 川瀬博・松尾秀典：K-NET, KiK-Net, JMA 震度計観測網による強震記録から分離したサイト増幅特性とS波速度構造との対応, 日本地震工学会論文集, 第4巻, 第4号, 126-145, 2004.
- 4) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994.
- 5) Noguchi, S., H. Sato and T. Sasatani : Characterization of Nonlinear Site Response Based on Strong Motion Records at K-NET and KiK-net Stations in the East of Japan, 15th WCEE, Lisbon, September 24-28, No. 3846, 2012.
- 6) Brune, J. N.: Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, pp. 4997-5009, 1970.
- 7) 壇一男, 渡辺基史, 佐藤俊明, 石井透 : 断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, 第545号, pp. 51-62, 2001.
- 8) 佐藤智美 : 中小地震の応力降下量の断層タイプ・震源深さ依存性及び地域性に関する研究, 土木学会地震工学論文集, CD-ROM, No. 48, 2003.
- 9) 国土交通省関東地方整備局: 東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態調査結果について, http://www.ktr.mlit.go.jp/kisha/kyoku_00000373.html, 2011.
- 10) Noguchi, S. and T. Sasatani, Quantification of Degree of Nonlinear Site Response, 14th WCEE, Beijing, October 12-17, 2008, 03-03-0049.
- 11) Wessel, P. and W. H. F. Smith. : New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, 79, p. 579, 1998.

 Statistical Properties of Strong Ground Motions Based on the Spectral Inversion Method

Kenichi NAKANO, Hiroshi KAWASE and Shinichi MATSUSHIMA

The objective of this study is to investigate the characteristics of strong ground motions separated from Fourier and response spectra based on a generalized spectral inversion method applied to the data observed by K-NET, KiK-net, and JMA Shindokey Network in Japan. The separation method that we used here is the same method proposed by Kawase and Matsuo (2004). We include all sources larger than $M_{JMA} 4.5$ observed from 1996 to 2011. Our results are in good agreement with the results by Kawase and Matsuo (2004) on the characteristics estimated from Fourier spectra, but ours show higher stability. By using the same method, we also separated strong motion characteristics based on acceleration response spectra, successfully. However, the separated characteristics of strong ground motions of both results are different, especially in the frequency range lower than 1 Hz. These differences come from the difference between Fourier spectra and response spectra found in the observed data; that is, predominant components in the high frequencies of Fourier spectra contribute to increasing the response in lower frequencies with small Fourier amplitude because strong high-frequency components act as an impulse.