

# 地盤増幅特性の広域的評価に向けた 応答スペクトル距離減衰式の 地点補正スペクトルの利用に関する基礎検討

酒本 真先<sup>1</sup>・丸山 喜久<sup>2</sup>・山崎 文雄<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 千葉大学大学院工学研究科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)  
E-mail:m-sake.18@chiba-u.jp

<sup>2</sup>正会員 千葉大学准教授 大学院工学研究科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)  
E-mail:yamaruyam@tu.chiba-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 千葉大学教授 大学院工学研究科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)  
E-mail:yamazaki@tu.chiba-u.ac.jp

本研究では、東北地方太平洋沖地震の前震、本震およびそれに誘発されて発生したとされる2地震で観測された K-NET, KiK-netの地震記録を使用して、速度応答スペクトルの距離減衰式を構築し、それによって得られる地点補正項を用いて地盤増幅特性の推定を行った。地点補正スペクトルとKiK-net観測点の地中と地表間の伝達関数を比較したところ、地点補正スペクトルが地盤増幅特性の推定に有効であることが示された。さらに、地点補正スペクトルを全国を網羅する地盤データとして整備されている微地形区分や平均S波速度に関して整理を行い、地盤増幅特性を広域に均質なデータで評価するための基礎的検討を行った。

**Key Words :** *attenuation relationship, response spectrum, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, transfer function, station correction factor*

## 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、震源に近い東北地方の宮城県栗原市で震度7の揺れを記録するなど、東日本の広範囲で震度5強以上の強い揺れが観測された<sup>1)</sup>。しかしながら、震度7を観測したK-NET築館の周辺では建物に大きな被害が見られなかったことが報告される<sup>2)</sup>など、震動被害はある程度限定的であった。観測された地震記録から得られる疑似速度応答スペクトルがピークを示す周期を見ると、K-NET古川、K-NET石巻、K-NET仙台などの一部を除けば、東北地方では周期が約0.5秒以下と短かった<sup>3)</sup>。そのため、建物被害の程度が震度に比べて小さかったものと考えられる。一方、首都圏では速度応答スペクトルのピーク周期がやや長い(約1.0秒以上)地震動が観測された<sup>4)</sup>。これを受けて、周期の長い揺れによって強い影響を受けると考えられる超高層マンションの住民を対象としたアンケート調査が実施されるなどしている<sup>5)</sup>。

最大加速度(PGA)、最大速度(PGV)、計測震度、SI値などの地震動指標値は、地震の強さを判断するのに有用なものであり、地震発生後の緊急対応体制の確立によく用いられている<sup>6)-8)</sup>。近年、我が国に設置されている地震計の数は飛躍的に増加し、

それらの観測値を用いて地震直後に面的な地震動分布が公表されている<sup>9),10)</sup>。このような地震動分布の指標としてPGA, PGV, 計測震度, SI値が用いられるが、地震動の周期特性によっては、計測震度が大きくとも構造物に顕著な被害が生じないことがあるのは従来から指摘されており<sup>11)</sup>、東北地方太平洋沖地震でも同様の現象が見られた地域も多い。

地表面で観測される地震動は、震源特性、伝播経路、表層地盤の増幅特性などの影響に支配される<sup>12)</sup>。このうち表層地盤の増幅特性については、国土数値情報の土地分類データ等を利用して、日本全国や特定地域の表層地盤の増幅度を推定する研究が行われており<sup>13)-15)</sup>、工学的基盤に対する地盤種別ごとの増幅率が提案されている。若松ら<sup>16)</sup>が構築した日本全国地形・地盤分類メッシュマップとそれから推定されるPGVの地盤増幅率<sup>17), 18)</sup>は、地震ハザードステーション(J-SHIS)にて公開され、地震動の面的な分布を推定する際によく用いられている<sup>19), 20)</sup>。しかし、PGVなどの指標の増幅率のみでは、地震動の周期特性を十分に考慮することは難しいこともある。山内ら<sup>21)</sup>は、気象庁の87型地震計で1988年から1996年までに観測された1020地震の記録を用いて、応答スペクトルの距離減衰式を構築し、その地点補正項を地形・表層地質ごとに整理し、揺れやすさの周期

表-1 本研究で観測記録を使用した地震

	発生日時	震源	モーメント マグニチュード (M <sub>w</sub> )	震源深さ (km)
前震	2011/3/9 11:45	三陸沖	7.3	8
本震	2011/3/11 14:45	三陸沖	9.0	24
地震1	2011/4/11 17:16	福島県浜通り	6.6	6
地震2	2011/4/12 8:08	千葉県東方沖	6.4	26

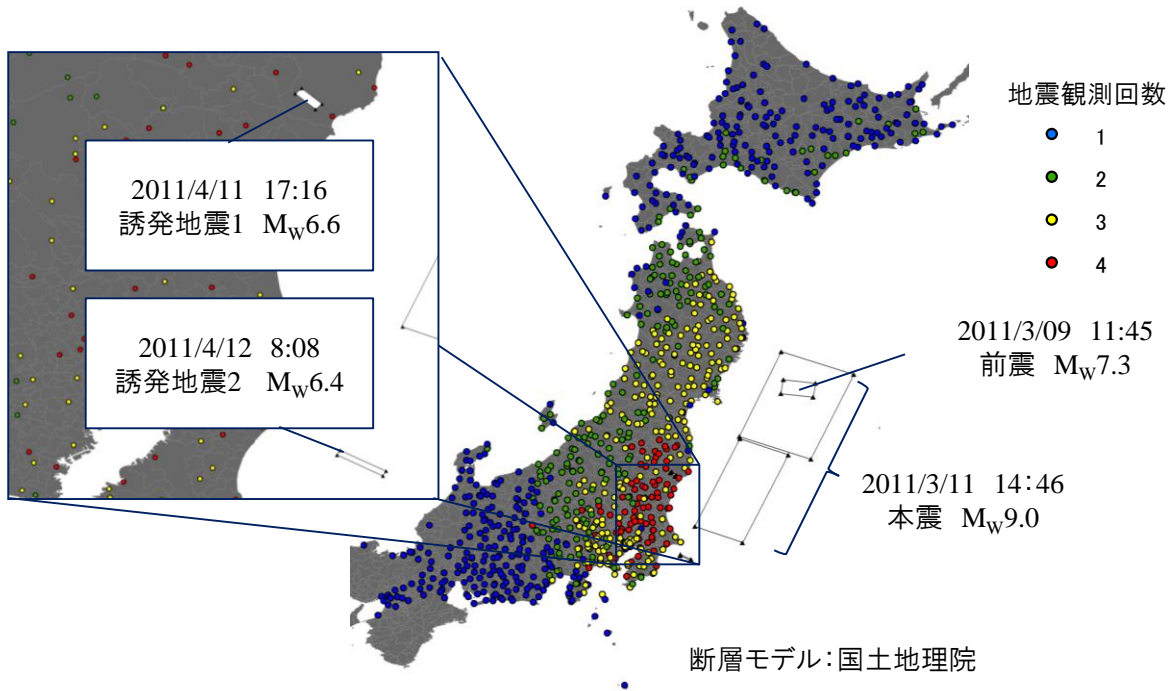


図-1 使用した地震の震源断層と K-NET, KiK-net 観測点

特性を評価している<sup>22), 23)</sup>. 研究当時, 気象庁87型地震計の総数は77箇所と多くなく, 平均的な傾向を把握するのに充分ではなかった. 現在では, K-NETやKiK-netが整備され, 東北地方太平洋沖地震でも稠密に地震動が観測された<sup>24)</sup>.

以上のような背景をふまえて, 本研究では, 震動の周期ごとに表層地盤の増幅特性を広域に評価するための基礎検討として, 応答スペクトルの距離減衰式の地点補正スペクトルの利用について議論する. Shabestari and Yamazaki<sup>25)</sup>は, 1996年5月から1998年12月の間に, K-NETによって観測されたM5.0~6.6の94地震の記録をもとに応答スペクトルの距離減衰式を構築し, 地点補正スペクトルを得ている. しかし, K-NETの観測記録は地表面のものに限られるため, 地点補正スペクトルが周期に対して示す振幅形状が表層地盤の増幅特性とどのように対応するのか, 実際の観測記録をもとに議論することが難しかった. このことから, 本研究ではK-NET観測記録に加えて, 地中地震計も配備されているKiK-netによる観測記録も検討に用いることとした. これによって, 地中—地表間の地震動の増幅特性を地点補正スペクトルと直接比較し, 地点補正スペクトルの有用性につい

て検討を行うことが可能となる. そこで, K-NETとKiK-net(地表)の地震観測記録を用いて, 応答スペクトルの距離減衰式を構築し, 地点補正スペクトルに関する検討を行う. 具体的には, KiK-net観測点における地中—地表間の伝達関数と地点補正スペクトルを比較し, 周期ごとの増幅率が地点補正スペクトルによって推定可能かどうか議論する. また, 全国を均質な精度で網羅している微地形区分<sup>16)</sup>や平均S波速度<sup>18)</sup>にもとづいて整理し, 広域的な地盤増幅特性の評価に向けた基礎検討を行う.

地点補正スペクトルのもつ性質について検討するにあたり, 表-1, 図-1に示す東北地方太平洋沖地震の本震, その前震といわれる2011年3月9日の三陸沖を震源とする地震および東北地方太平洋沖地震によって誘発されたといわれる2地震の観測記録を用いて速度応答スペクトルの距離減衰式を構築することとした. これらの地震を選んだのは, 震源断層モデルが提案されているためである. 距離減衰式を構築するには, より多くの地震時の観測記録を用いて統計解析の母集団に偏りがないようにするべきである. しかし, 本研究の目的は, 地点補正スペクトルが有する特徴を分析し, これを広域的な地盤増幅特性の



図-2 距離減衰式の比較に使用した断層モデル

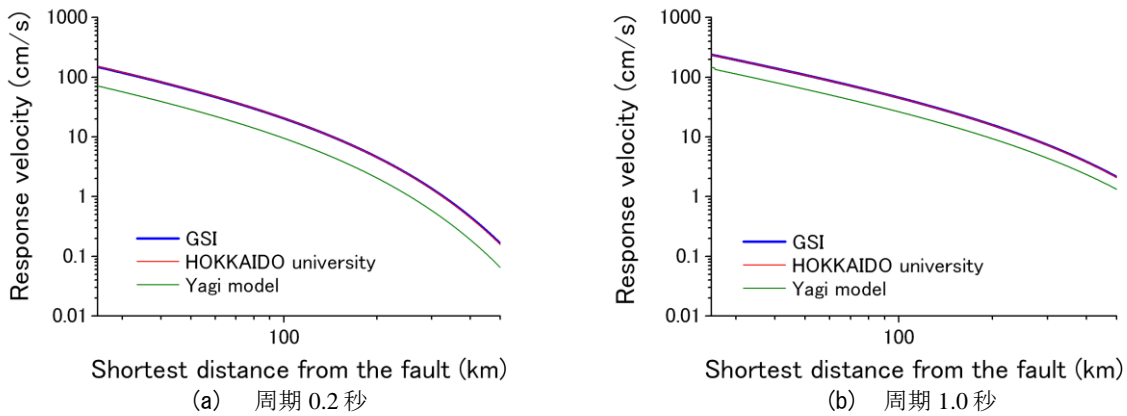


図-3 断層モデルごとの速度応答スペクトル(減衰定数 5%)の距離減衰式の比較

推定に用いることができるかどうかを検討することとしている。本研究によって、地点補正スペクトルがもつ性質を明らかにしたうえで、将来的には距離減衰式の構築に用いる地震記録の数を増やして、広域的な周期ごとの地盤増幅率を提案することを考えている。なお、山内ら<sup>21)</sup>によって、加速度応答スペクトルと速度応答スペクトルのそれぞれの地点補正スペクトルの振幅形状がよく似ていることが示されていることから、速度応答スペクトル(減衰定数 5%)の距離減衰式を求め、それによって得られる地点補正スペクトルについて検討を行うこととする。

## 2. 速度応答スペクトルの距離減衰式

### (1) 本震の速度応答スペクトルの距離減衰式

まず、本研究では、東北地方太平洋沖地震の本震記録のみを用いて、速度応答スペクトルの距離減衰式を構築し、使用する断層モデルが地点補正項に与える影響を評価する。3成分を合成した最大加速度が  $5\text{cm/s}^2$  以上を記録した計 932 地点の K-NET, KiK-net の観測記録を用いた。回帰に用いた関数形は式(1)のとおりである。ここで、最大加速度  $5\text{cm/s}^2$  以上の地震記録を検討対象としたのは、遠距離のデータを用いて回帰分析を行うと本来の距離減衰式の傾きよりも小さな傾きが回帰によって得られることが指摘されている<sup>26)</sup>ことをふまえて、使用

した地震記録の断層最短距離が概ね 500km 以内に収まるようにしたためである。

$$\log_{10} y(T) = a_0(T) + a_1(T)r + a_2(T)\log_{10} r \quad (1)$$

ここで、 $y(T)$ は速度応答スペクトルの水平 2 成分のベクトル合成値、 $r$ は断層最短距離、 $a_i(T)$ は周期  $T$  ごとの回帰係数である。ただし、幾何減衰  $a_2$  は-1 に固定する<sup>22)</sup>。

東北地方太平洋沖地震の断層モデルはいくつか提案されている。本研究が着目する地点補正スペクトルは、距離減衰式の補正項として導入されるものであり、本地震の断層モデルの違いがこの地点特性項に与える影響を評価しておく必要がある。そこで、本研究では図-2 に示す 3 つの断層モデルを用いて、速度応答スペクトルの距離減衰式を構築する。図-2(a)は国土地理院(GSI)が電子基準点で観測された地殻変動データから推定した断層モデル<sup>27)</sup>、図-2(b)は北海道大学地震火山研究観測センターが DART(Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis)<sup>28)</sup>で観測された津波観測波形との整合性をとるように国土地理院の断層モデルを修正したものの<sup>29)</sup>である。図-2(c)は、八木による震源過程の解析結果<sup>30)</sup>を矩形でモデル化したものである。

図-3 に、それぞれの断層モデルをもとにした断層最短距離を用いて構築した速度応答スペクトル(減衰定数 5%)の距離減衰式を比較する。国土地

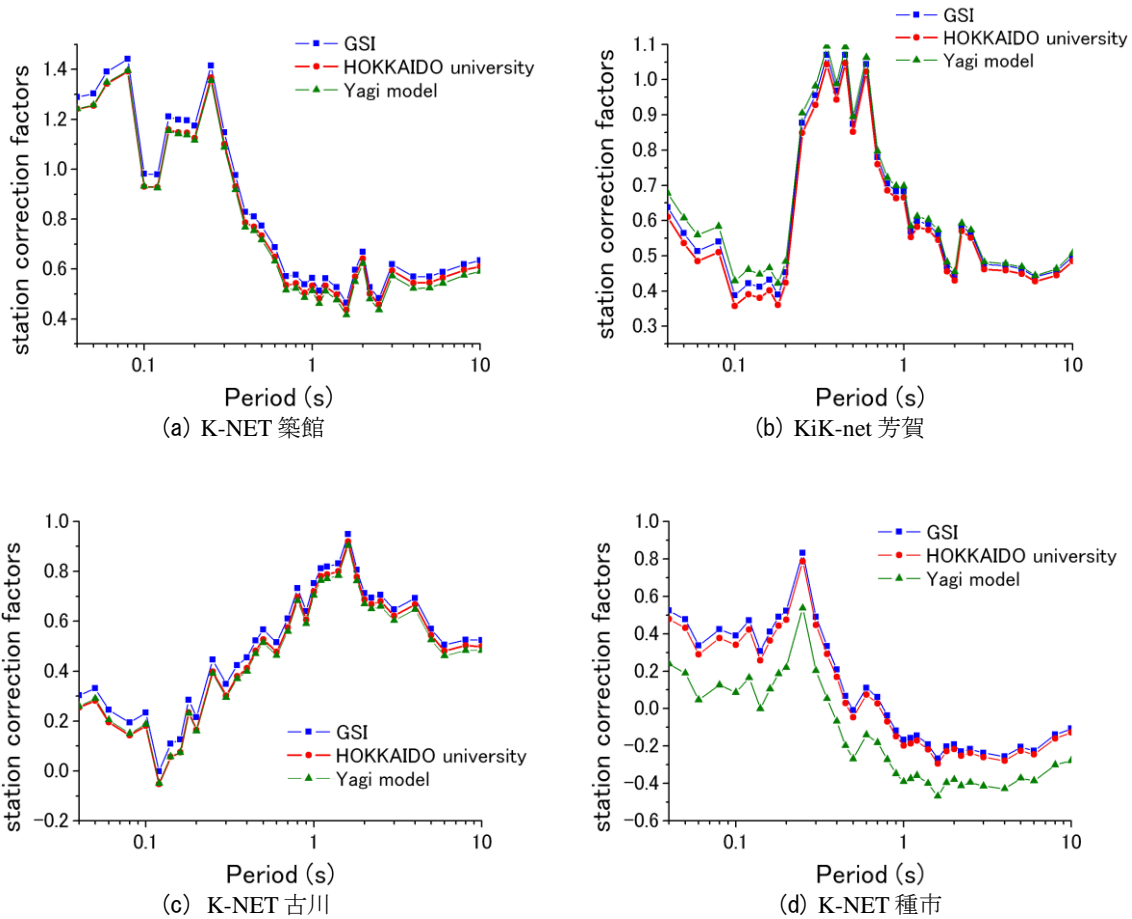


図-4 断層モデルごとの地点補正スペクトルの比較

理院とそれを修正した北海道大学地震火山研究観測センターの断層モデルを使用した場合の距離減衰式は、周期 0.2 秒，周期 1.0 秒のどちらの場合もほぼ一致しているが、八木モデルを使用した場合は、ほかの 2 つのモデルと比べて断層最短距離が大きく異なるために構築された距離減衰式に違いが生じる。このように本地震の結果を加味した距離減衰式を構築する際には、震源モデルについて留意する必要がある<sup>31)</sup>。

図-4 に、本研究が着目している地点補正スペクトルについて比較する。ここでは、観測値と距離減衰式との残差を地点補正項とみなすこととする。これによると、地点補正の周期特性は、断層モデルに依らずほぼ一致していることがわかる。K-NET 種市については、断層最短距離が GSI の断層モデルでは 160.8 km，八木モデルでは 75.1 km であり、それぞれの断層モデルで構築した距離減衰式による予測値の比（八木モデルの予測値/GSI の予測値）が最も大きな観測点であった。そのため、全周期で 0.2 程度の差を示しているが、周期特性には違いが見られなかった。これは、多点の観測値から回帰分析によって得られる平均値（距離減衰式）は仮定する震源モデルによって大きく異なる場合があるが、観測値と平均値の比（地点補正項）は相対評価であるた

め震源モデルにあまり依存しないことを意味するものと考えられる。

#### (2) 4 地震の記録を用いた速度応答スペクトルの距離減衰式

表-1 に示した 4 地震の K-NET, KiK-net における観測記録を用いて、速度応答スペクトル（減衰定数 5%）の距離減衰式を構築する。前節での検討と同様に、最大加速度が  $5\text{cm/s}^2$  以上を記録した計 941 地点の K-NET, KiK-net 観測点（図-1）で得られた 1870 個の地震記録を回帰分析し、距離減衰式を構築する。回帰分析には以下の関数形を用いた。

$$\log_{10} y(T) = b_0(T) + b_1(T)Mw + b_2(T)r + b_3(T)\log_{10} r + b_4(T)H + c_i(T) \quad (2)$$

ここで、 $y(T)$  は速度応答スペクトルの水平 2 成分の合成値 (cm/s)， $r$  は断層最短距離 (km)， $H$  は震源深さ (km)， $b_i(T)$  は周期  $T$  ごとの回帰係数である。ただし、 $b_3$  は -1 に固定する<sup>22)</sup>。また、 $c_i(T)$  は観測点  $i$  の地点補正項であり、その観測点における地盤条件、地形効果、地震計の設置条件などの影響が重なったものと考えられる<sup>22)</sup>。なお、地点補正の平均値は 0 となる。

表-2 岩盤サイトの深さ30mの平均S波速度と表層のS波速度および層厚

観測点コード	AVS30(m/s)	第一層 S 波速度 (m/s)	第一層厚 (m)	第二層 S 波速度(m/s)
CHBH20	1909.1	1800	18	2100
TCGH17	1432.8	700	6	1450
IWTH27	1269.8	240	2	1500
SZOH24	1126.2	360	4	1200
TKYH13	1110.1	130	1	1500

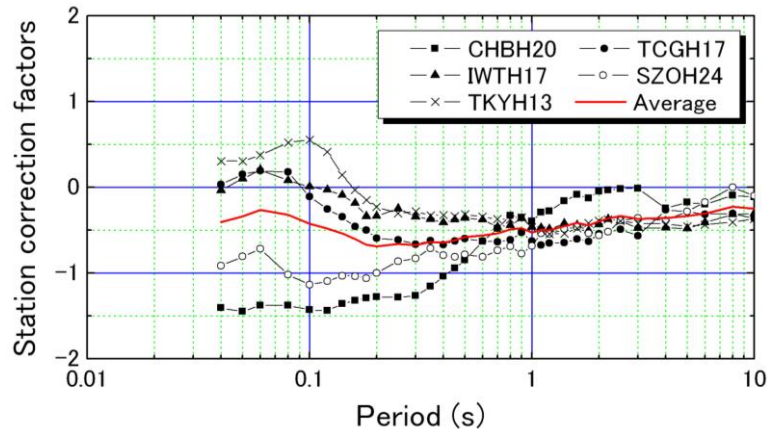


図-5 岩盤サイトの平均地点補正スペクトル (赤線)

式(2)では、震源近傍で振幅が飽和する<sup>32)</sup>ことを表現できないが、使用する4地震のうち3地震が震源を海底に有しており、地震記録(1870)のうち例えば断層最短距離が30km以下の観測数は10、50km以下の観測数は32しかないことをふまえて、この関数形を使用した。前節での検討結果をふまえて、本研究の主目的は距離減衰式を提案することではなく、地点補正スペクトルを推定することであるので、ここではこれら4地震の断層モデルは国土地理院が構築したモデル<sup>27), 33)-35)</sup>を使用する(図-1)。通常の距離減衰式の回帰の方法としては、Joyner and Boore<sup>36)</sup>による2段階回帰がよく用いられている。ここでは、地点ごとに異なる補正項を決定する際にその分のダミー変数も必要となるため、Molas and Yamazaki<sup>22)</sup>による3段階回帰法によって係数を求めた。

### 3. 広域地盤増幅特性の評価に向けた地点補正スペクトルに関する検討

#### (1) 地点補正スペクトルと地中-地表間の地震動伝達関数の比較

式(2)の地点補正 $c_i(T)$ のもつ特徴について検討を行う。Yamazaki and Ansary<sup>37)</sup>は、水平成分と鉛直成分の応答スペクトルの地点補正から地震動のH/Vスペクトル比を予測し、ボーリングデータに基づく1次元地盤モデルによって推定される伝達関数と比較するなどしてその整合性を検証している。本研究では、地点補正が各地点の震動特性を表わすものとして妥

当であるか、KiK-net観測点における地中-地表間の地震動伝達関数と比較することで検討を行う。なお、本研究の地点補正スペクトルは速度応答スペクトルに関するものであるが、速度応答スペクトル比と平滑化したフーリエスペクトルの振幅比が似た形状を示す<sup>38)</sup>ため、ここでは伝達関数と比較した。

地点補正スペクトルの基準となる層を物理的に明確に規定することは難しい。そこで、表-2に示す5地点の地点補正の平均値(図-5の赤線)を岩盤サイトの地点補正 $c_r(T)$ とし、以下の式で基準化した各観測点の地点補正 $c'(T)$ と地震動伝達関数の比較を行う。

$$c'(T) = c_i(T) - c_r(T) \quad (3)$$

なお、岩盤サイトは、本研究で使用した4地震全てで地震動を観測した観測点のうち、微地形区分<sup>16)</sup>が山地に属し、地表から深さ30mまでの地盤の平均S波速度(AVS30)の値が1000 m/s以上、かつ第一層が非常に硬いと推定されるか、第一層が十分薄く第二層が非常に硬いと推定される観測点を選定した(表-2)。AVS30については各観測点のボーリングデータから松岡ら<sup>17)</sup>の算出方法に従い、以下の式(4)<sup>39)</sup>を用いて算出した。

$$AVS30 = 30 / \sum_{i=1}^n (H_i / V_{Si}) \quad (4)$$

ここで、 $H_i$ は第*i*層の層厚(m)、 $V_{Si}$ は第*i*層の平均S波速度(m/s)である。また、伝達関数 $H(f)$ は、以下の式

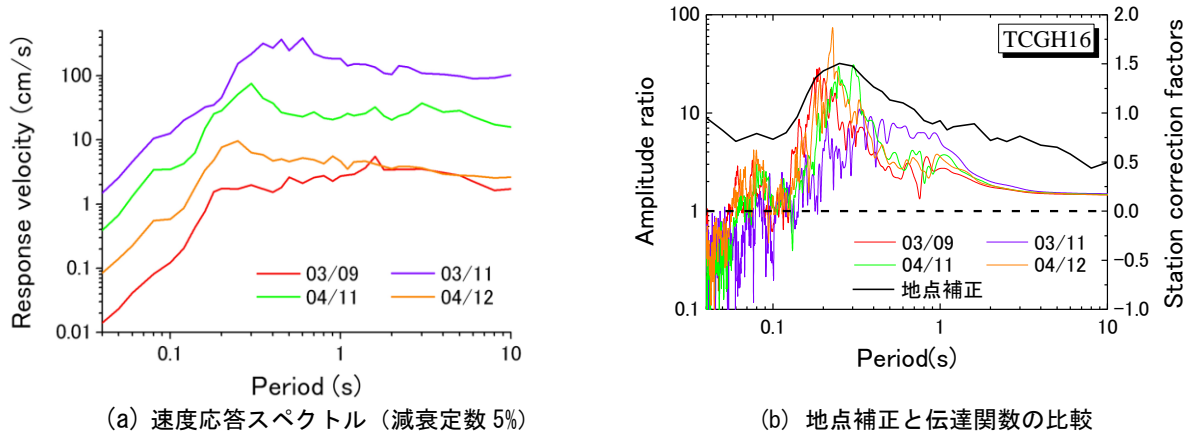


図-6 KiK-net 芳賀における基準化した地点補正と伝達関数 (地中-地表) の比較

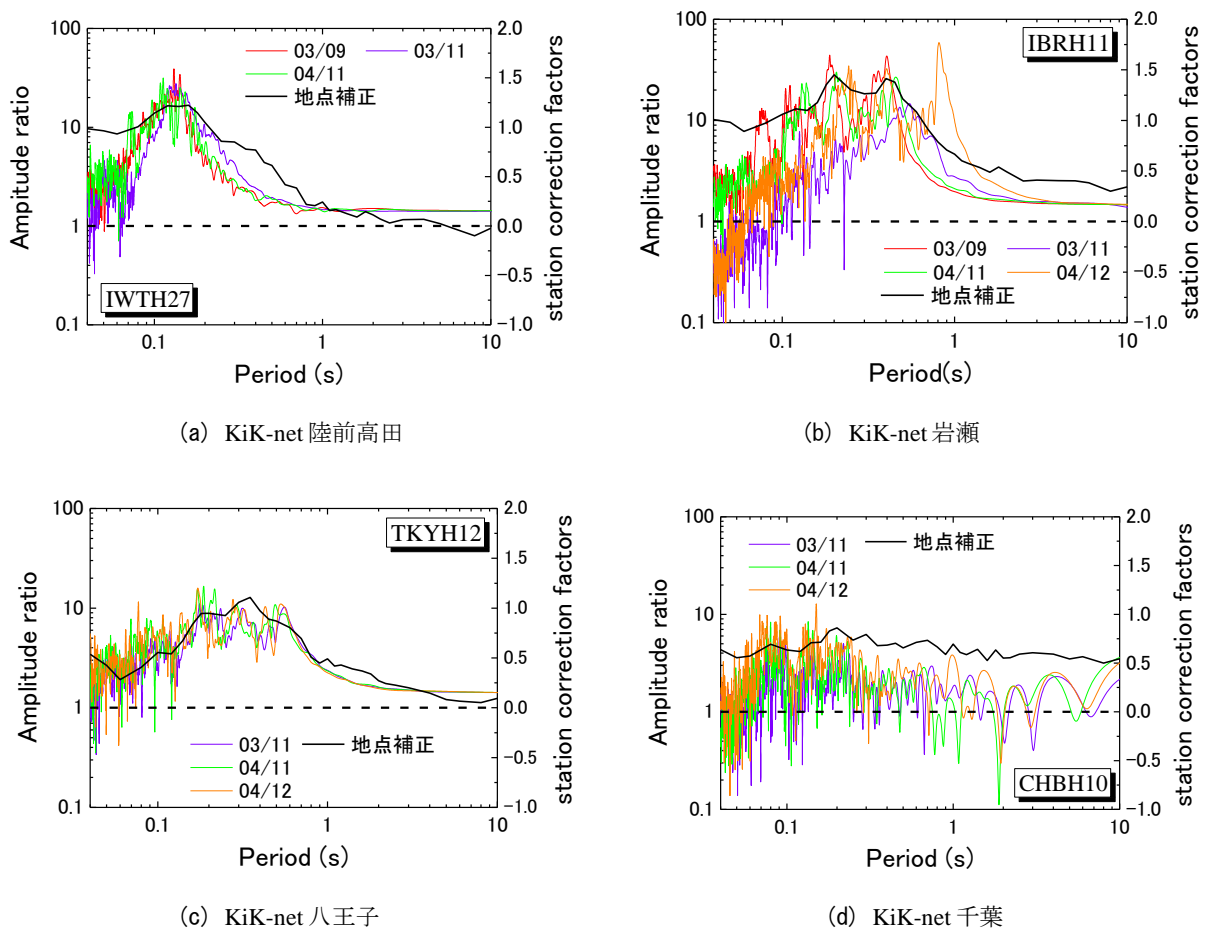


図-7 基準化した地点補正スペクトルと伝達関数 (地中-地表) の比較

で記録された加速度波形の全継続時間について算出した<sup>40)</sup>.

$$H(f) = \frac{S_{xy}(f)}{S_{xx}(f)} \quad (5)$$

ここで、 $S_{xx}(f)$ は地中における加速度波形のパワースペクトル、 $S_{xy}(f)$ は地中と地表加速度のクロス

スペクトルであり、バンド幅0.2HzのParzenウィンドウ<sup>41)</sup>で平滑化している。

本研究では、距離減衰式を構築する際に、東北地方太平洋沖地震の本震を含む4地震における観測記録のうち最大加速度が $5\text{cm/s}^2$ 以上の記録を使用している。そのため、図-1に示すように、観測点ごとに使用した地震記録の数は異なっている。ここでは、KiK-net観測点のうち3~4記録を距離減衰式の構築

に使用した観測点を抽出し、それらの観測点について地点補正スペクトルを伝達関数の振幅(水平2成分の平均)と比較した(図-6, 図-7)。なお, KiK-netの観測記録から算出される伝達関数は, 地中地震計が設置されている硬質地盤を基準とする増幅特性を表しており, それぞれの地点の最下層のS波速度は, 680 m/s (KiK-net芳賀), 2790 m/s (KiK-net陸前高田), 2100 m/s (KiK-net岩瀬), 1800 m/s (KiK-net八王子), 1070 m/s (KiK-net千葉)である。公開されているS波速度構造を用いて1次元地盤震動解析を行ったところ, 理論伝達関数の示す卓越周期は, 各地点の表層の増幅特性で概ね決まっていることを確認している。前述のとおり, 地点補正スペクトルの基準となる層を物理的に明確に規定することは現時点では困難であり, 各地点の観測記録の伝達関数が基準とする層と必ずしも一致しないため, 絶対値そのものの議論は難しい可能性もある。しかし, 図-6, 図-7では, 伝達関数の振幅比と地点補正スペクトルの値に整合性が取れるように両者の縦軸の範囲を設定し, 図化している。KiK-netの観測記録から得られる伝達関数と比較して周期特性の類似した傾向が見られるのであれば, 地点補正スペクトルは表層地盤の増幅における周期特性を表す一つの指標として有用なものと考えられる。

KiK-net芳賀(TCGH16)は, 本震で最大加速度(3成分合成値)  $1196.7 \text{ cm/s}^2$ , 計測震度6.5を観測した地点である。図-6に示す通り, 地点補正と伝達関数の周期特性は概ね一致しているが, その絶対値には差が見られ, それぞれの基準としている層が異なっていることが示唆される。さらに, 東北地方太平洋沖地震の本震記録から得られる伝達関数は周期特性がやや異なる。これは, 図-6(a)の本震時の速度応答スペクトルのピーク周期が長くなっていることなどをふまえると, 地盤の非線形応答が影響しているものと考えられる。KiK-net陸前高田(IWTH27), KiK-net岩瀬(IBRH11), KiK-net八王子(TKYH12), KiK-net千葉(CHBH10)についても同様に地点補正と伝達関数の比較を行った(図-7)。いずれの地点でも, 地点補正スペクトルと伝達関数の周期特性は概ね一致している。KiK-net千葉に関しては, 伝達関数の振幅比と地点補正スペクトルの絶対値に差が生じているが, 周期に対する振幅形状は比較的似ている。

このことから, 周期特性を考慮した地盤増幅特性の推定には, 地点補正を適切な層で基準化し利用すれば, 有効であると考えられる。しかしながら, KiK-net芳賀における東北地方太平洋沖地震の本震や, KiK-net岩瀬における2011年4月12日の地震(図-7(b)のオレンジ色)など, 地盤の非線形性の程度が高い場合の適用性については議論の余地が残る。地盤の非線形性が強いときの地点補正を推定するために, 非線形性が確認された場合に同一観測点であっても異なる観測点として回帰分析を行っている事例もある<sup>27)</sup>ことから, 今後は地震数を増やすとともに観測記録ごとに地盤が非線形性状を示しているか

判別した上で地点補正項を推定することを考えている。

## (2) 微地形区分ごとの地点補正スペクトル

図-8に, 本研究で推定された地点補正スペクトルを250mメッシュ単位の微地形区分<sup>16)</sup>ごとに整理する。なお, 図中の赤線は地点補正スペクトルの平均を示している。ここでは, 4地震全ての観測値を検討に使用した地点の結果を示した。図-1を鑑みると, 主として福島県と関東地方のK-NET, KiK-net観測点の結果をまとめたことになる。

微地形区分ごとの平均的な傾向としては, 山地, 丘陵, 砂礫質台地は, 周期約0.5秒以下の範囲で地点補正が正の値を示している。このことから短周期成分について平均的に揺れやすいと解釈され, 実現象と一致する。一方, 後背湿地, 三角州・海岸低地, 干拓地, 埋立地の平均的な傾向は, 周期約1.0秒付近にピークを有する形状を示している。さらに, 周期約0.5秒以上の範囲で地点補正が正の値を示しており, 平均的にはこの周期帯で揺れやすいことが示唆される。扇状地, 自然堤防に関しては, 山地等よりは長く, 後背湿地等よりは短い周期帯で揺れやすいものと考えられる。ローム台地の平均的な傾向に関しては, ほぼ全ての周期帯で地点補正が正の値を示している。ローム台地は, 関東地方に広く見られる微地形区分である。これは, 単に東北地方太平洋沖地震において関東地方で観測された震動の特徴を反映しているだけの可能性もあり, 今後, 分析に使用する地震の数を増やす必要がある。また, 谷底低地についても同様であるが, とくに周期0.3秒以下の範囲で地点ごとのバラツキが大ききように見える。

若松ら<sup>16)</sup>によると, メッシュ内に複数の微地形区分が存在する場合は, 原則として最も広い微地形区分を属性として与えているが, 両側を山地, 丘陵等に挟まれた谷底低地に関しては, メッシュ内の谷底低地が占める割合が1/3以上の場合に谷底低地として区分している。このことから, とくに谷底低地のような比較的局所的な地形区分については, 地震計設置位置の地形区分と異なっている可能性もあると想像され, 今後は地震計設置位置の微地形区分を地形図等から詳細に判読する必要があるものと考えられる。

## (3) 地点補正スペクトルとAVS30との相関

図-9に本研究で得られた地点補正スペクトルと各観測点のAVS30の関係を示す。強震観測記録の地盤増幅特性がAVS30と相関が高い<sup>42), 43)</sup>ことが示されており, 地点補正スペクトルとAVS30に相関が見られれば, 地点補正を用いた周期ごとの地盤増幅率のゾーニングを行う上で, AVS30が説明変数となり得るものと考えられる。なお, AVS30は各観測点のボーリングデータから, 松岡ら<sup>17)</sup>の算出方法に従い, 前述の式(4)を用いて算出している。

図-9に示す通り, 地点補正值とAVS30の関係についてはいずれの周期でもAVS30の値が大きくなるに

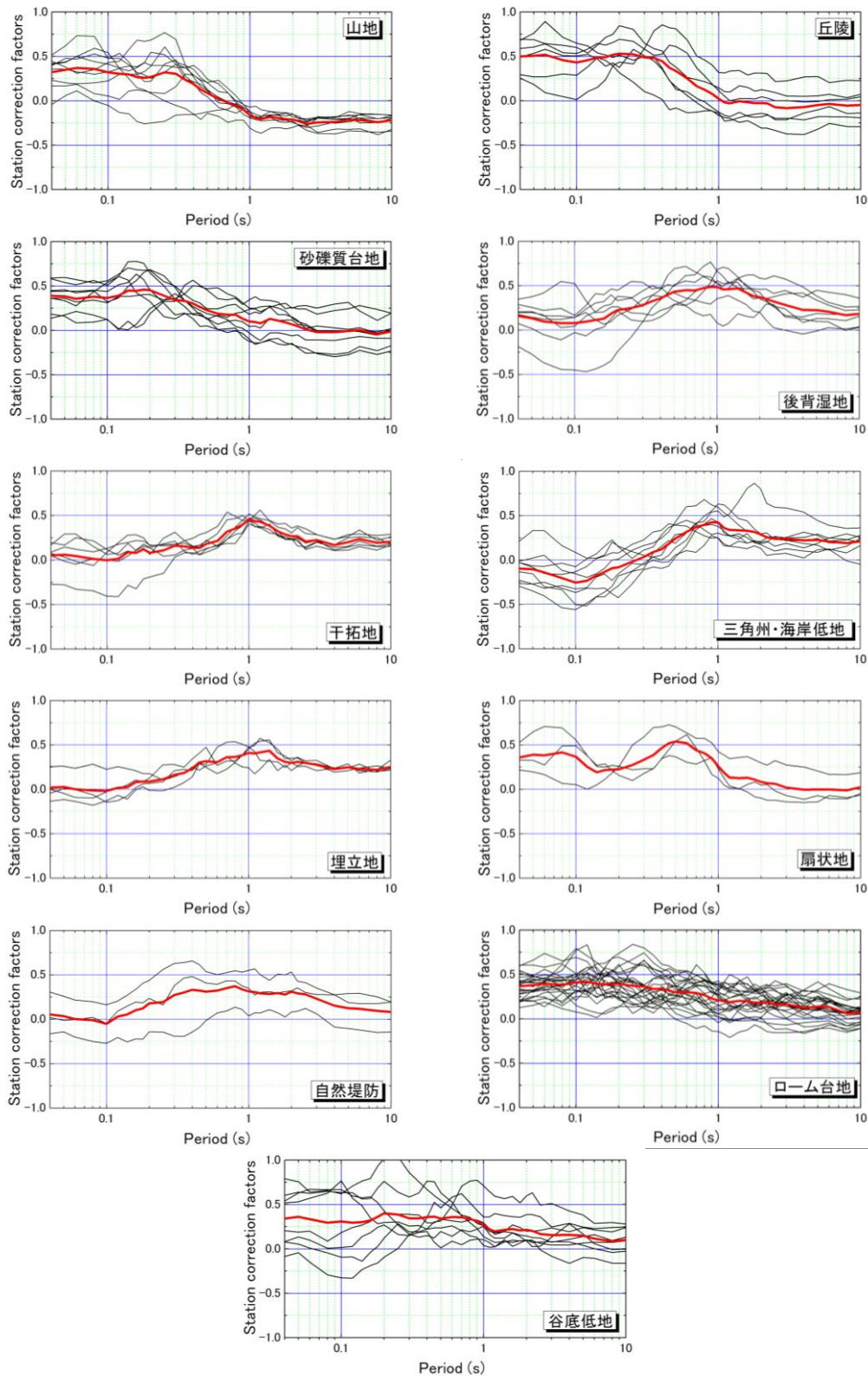


図-8 微地形区分ごとの地点補正スペクトル (赤線は地点補正スペクトルの平均)

つれて地点補正の値が小さくなる。とくに周期0.5秒以上では、地点ごとの補正値が $\pm\sigma$ の範囲に概ね収まっている。さらに、標準偏差を周期ごとに評価すると、周期0.3秒程度から標準偏差の値が周期によらず約0.3を示すようになり、さらに周期が長くなるのに従って小さな値を示した。これは地点補正

を用いて周期ごとの地盤増幅率のゾーニングを行っていく上で、AVS30が説明変数となり得ることを示唆しているものと考えられる。



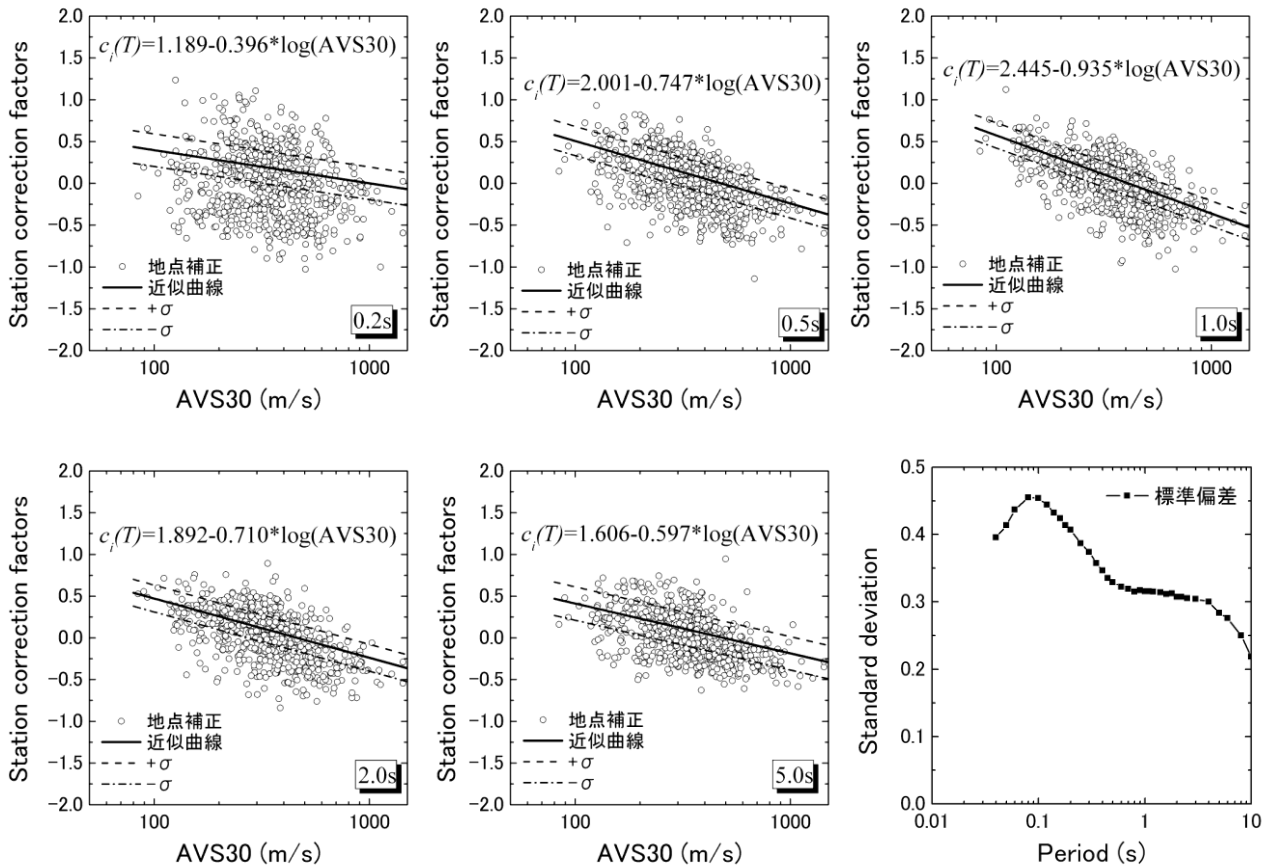


図-9 地点補正スペクトルと AVS30 の関係と標準偏差

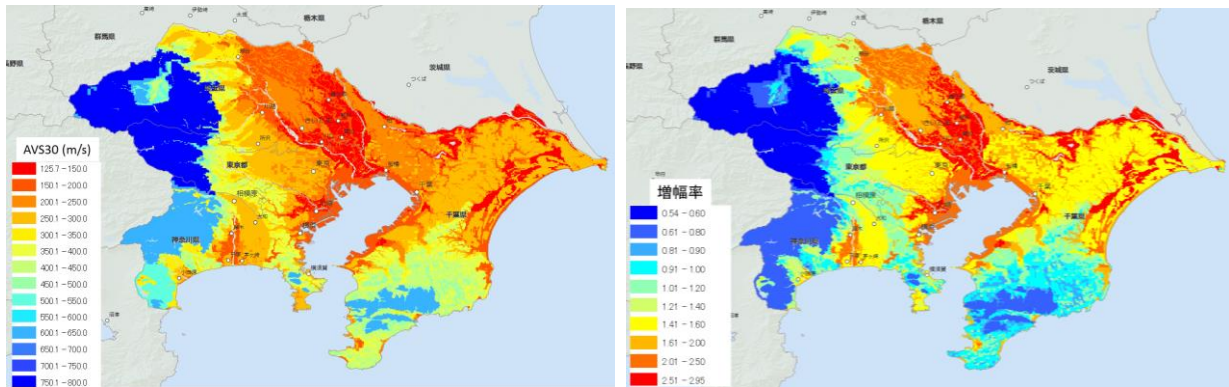


図-10 AVS30の分布(左)と本研究で推定した周期1.0秒の速度応答スペクトルの増幅率(右)

(4) 地点補正スペクトルを用いた広域地盤増幅特性の評価に関する一案

本章での検討結果によれば、地点補正スペクトルが周期に対して示す振幅形状は、地中—地表間の伝達関数の振幅形状と比較的似たものとなった。さらに、微地形区分ごとにその形状を見ると、平均的な傾向は実現象と調和的なものとなった。また、地点補正スペクトルの値は、周期0.3秒以上の範囲に限れば、AVS30とある程度の相関があることが分かった。一方で、地点補正スペクトルの基準層が明確でないため、伝達関数の振幅の絶対値と差が見られることがあった。

以上のことをふまえると、地点補正スペクトルの基準層を人為的に明確にすることによって、周期ごとの増幅率を評価することができるものと考えられる。そこで、J-SHISによって公開されているPGVの増幅率がS波速度400m/sの層を基準としていることを参考にして、地点補正スペクトルを基準化することを試みる。具体的には、図-9に示した地点補正とAVS30の関係式の切片を、AVS30が400m/sのときに地点補正が0(増幅率1.0)となるように調整する。このようにして基準化した地点補正 $c_i(T)$ とAVS30の関係式を用いて、増幅率(=  $10^{c_i(T)}$ )を広域的に評価する。図-10は、J-SHISが公開しているAVS30の分

布と推定された周期1.0秒の速度応答スペクトルの増幅率の分布を示している。ここでは東京、神奈川、埼玉、千葉の1都3県を事例として推定した。

本研究は地点補正スペクトルが有する特徴を分析することに主眼をおいたものであり、使用している地震記録が少ない。三陸沖から千葉県東方沖を震源とする地震のみを用いているので、平均的な距離減衰式が構築されているとは言い難い。このため、距離減衰式の誤差が地点補正スペクトルに含まれていることも考えられる。したがって、図-10のような周期ごとの広域的な増幅率を提案する際には、より多数の地震時の観測記録を用いて地点補正スペクトルを評価する必要がある。

#### 4. 結論

本研究では、東北地方太平洋沖地震の本震、前震およびそれによって誘発されたといわれる2地震におけるK-NET, KiK-net観測点の地震記録を使用して速度応答スペクトルの距離減衰式を構築し、それによって得られる地点補正スペクトルの検討を行った。

断層モデルの違いが距離減衰式と地点補正に与える影響についての考察を行った。断層最短距離を説明変数とした距離減衰式を構築すると、使用した断層モデルによって異なる距離減衰式が得られた。しかし、観測値と距離減衰式による予測値の比である地点補正の周期特性については、いずれの断層モデルを使用した場合も周期特性はほぼ一致していた。このことから、断層モデルの違いが地点補正に与える影響はあまり大きくないと考えられる。そのため、本研究では、国土地理院が電子基準点で観測された地殻変動データから推定した断層モデルを使用することとした。

本研究で得られた地点補正をKiK-net観測点の地中一地表間の伝達関数と比較したところ、概ね周期特性は一致していたが、地点補正スペクトルの基準層を明確にすることが難しいため、伝達関数の振幅の絶対値と地点補正スペクトルの値は一致しないことがあった。このことから、地点補正スペクトルは地震観測点の増幅特性を周期ごとに評価するのに有用であるものと考えられるが、その際には基準層を定義する必要がある。また、地盤の非線形性の影響が強い場合は、その推定精度は低下することが懸念されることもあるため、適用範囲を定めることは今後の検討課題と考えている。

微地形区分ごとに地点補正スペクトルを整理することで各微地形区分ごとの揺れやすさの平均的な傾向を把握することができた。また、地点補正スペクトルとAVS30の関係性を評価したところ、いずれの周期でもAVS30の値が大きくなるにつれて地点補正の値が小さくなる傾向が見られた。以上の検討結果をふまえて、地点補正スペクトルを用いた広域地盤増幅特性の評価に関する一案として、S波速度が

400m/sの層を基準とする速度応答スペクトルの増幅率を推定した。

しかし、本研究で使用した地震記録は、既往の研究と比較して非常に少ない。そこで今後は使用する地震記録の数を増やし、同様の検証を行うことで、全国を対象とした周期ごとの地盤増幅率のゾーニングを行っていきたいと考えている。

謝辞：本研究では防災科学技術研究所のK-NET, KiK-netの地震記録を使用させていただいた。また、国土地理院、北海道大学火山地震研究観測センター、筑波大学八木勇治准教授の断層モデルを使用させていただいた。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 気象庁：平成23年3月地震・火山月報（防災編），2011。
- 2) 飯塚裕暁，林佑樹，境有紀，神田和紘：2011年東北地方太平洋沖地震で発生した地震動と建物被害（その1）強震記録と観測点周辺の被害，日本地震工学会・大会-2011梗概集，pp.40-41, 2011。
- 3) 後藤浩之：地震及び地震動の特性，土木学会東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告書，第4章，2011。
- 4) 盛川仁，後藤浩之：地震動と地震動による被害の全般的特徴，土木学会東日本大震災特別委員会総合調査団 調査速報会資料，2011。
- 5) 翠川三郎，三浦弘之，堀苑子，鹿嶋俊英：2011年東北地方太平洋沖地震における東京の超高層マンションでの揺れに関するアンケート調査，地域安全学会梗概集，No.28，pp.95-96, 2011。
- 6) 垂水祐二，佐藤亜樹男：地震時通行止め基準値の見直し—NEXCO 東日本—，EXTEC，No.79，pp.8-11, 2006。
- 7) 島村誠：鉄道防災技術の進化と課題，予防時報，No.241，pp.43-49, 2010。
- 8) Shimizu, Y., Yamazaki, F., Yasuda, S., Towhata, I., Suzuki, T., Isoyama, R., Ishida, E., Suetomi, I., Koganemaru, K., and Nakayama, W.: Development of real-time control system for urban gas supply network, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 2, pp. 237-249, 2006。
- 9) 気象庁：推計震度分布図の迅速な発表について，<http://www.jma.go.jp/jma/press/0801/10b/200801101400.html>（2011年11月9日閲覧）。
- 10) 産業総合技術研究所：地震動マップの即時推定システム(QuiQuake)，<http://qq.ghz.geogrid.org/QuakeMap/>（2011年11月9日閲覧）。
- 11) 翠川三郎，伊東佑記，三浦弘之：兵庫県南部地震以降の被害地震データに基づく建物被害関数の検討，*日本地震工学会論文集*，Vol. 11, No. 4, pp. 34-47, 2011。
- 12) 山中浩明編著：地震の揺れを科学する，東京大学出版会，2006。
- 13) 松岡昌志，翠川三郎：国土数値情報を利用した広域震度分布予測，*日本建築学会構造系報告集*，No. 447, pp. 51-56, 1993。
- 14) 福和伸夫，荒川政知，西阪理永：国土数値情報を活用した地震時地盤増幅度の推定，*構造工学論文集*，Vol. 44B, pp. 77-84, 1998。

- 15) 大西淳一, 山崎文雄, 若松加寿江: 気象庁記録の距離減衰式に基づく地盤増幅特性と地形分類との関係, 土木学会論文集, No. 626/I-48, pp. 79-91, 1999.
- 16) 若松加寿江, 松岡昌志, 久保純子, 長谷川浩一, 杉浦正美: 日本全国地形・地盤分類メッシュマップの構築, 土木学会論文集, No.759/I-67, pp.213-232, 2004.
- 17) 松岡昌志, 若松加寿江, 藤本一雄, 翠川三郎: 日本全国地形・地盤分類メッシュマップを利用した地盤の平均 S 波速度分布の推定, 土木学会論文集, No.794/I-72, pp.239-251, 2005.
- 18) 藤本一雄, 翠川三郎: 近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均 S 波速度の関係, 日本地震工学会論文集, Vol. 6, No. 1, pp. 11-22, 2006.
- 19) 丸山喜久, 山崎文雄, 用害比呂之, 土屋良之: 新潟県中越地震の被害データに基づく高速道路盛土の被害率と地震動強さの関係, 土木学会論文集 A, Vol. 64, No. 2, pp. 208-216, 2008.
- 20) 庄司学, 櫻井俊彰: 2008年岩手・宮城内陸地震における斜面に関わる道路構造物の損傷モード分析とそれを踏まえた被害関数の構築, 日本地震工学会論文集, Vol. 11, No. 5, pp. 94-106, 2011.
- 21) 山内洋志, 山崎文雄, 若松加寿江, Shabestari, K.T.: 応答スペクトルの距離減衰式に基づく地点増幅特性と地形・表層地質分類との関係, 土木学会論文集, No.682/I-56, pp.195-205, 2001.
- 22) Molas, G. L. and Yamazaki, F.: Attenuation of earthquake ground motion indices in Japan including deep focus event, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 85, pp. 1343-1358, 1995.
- 23) 片岡正次郎, 松本俊輔, 日下部毅明, 遠山信彦: やや長周期地震動の距離減衰式と全国の地点補正倍率, 土木学会論文集 A, Vol. 64, No. 4, pp. 721-738, 2008.
- 24) 青井真, 功刀卓, 鈴木亘, 森川信之, 中村洋光, 藤原広行: 東北地方太平洋沖地震で観測された強震動, 日本地震工学会誌, No.15, pp. 25-28, 2011.
- 25) Shabestari, K. T. and Yamazaki, F.: Attenuation relation of response spectra in Japan considering site-specific term, Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, ref. No. 1432, 2000.
- 26) 松崎伸一, 久田嘉章, 福島美光: 断層近傍まで適用可能な震度の距離減衰式の開発, 日本建築学会構造系論文集, No. 604, pp. 201-208, 2006.
- 27) 国土地理院: 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動と震源断層モデル, <http://www.gsi.go.jp/cais/topic110422-index.html> (2011年11月9日閲覧).
- 28) NOAA Center for Tsunami Research: DART® (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis), <http://nctr.pmel.noaa.gov/Dart/> (2011年11月9日閲覧).
- 29) 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター: 2011年3月11日東北地方太平洋沖地震(M9.0)について, <http://www.sci.hokudai.ac.jp/isv/ev-news-flash/2011311-1.html> (2011年11月9日閲覧).
- 30) 筑波大学八木研究室ホームページ: 2011年3月11日東北地方太平洋沖地震(Ver. 4), <http://www.geol.tsukuba.ac.jp/~yagi-y/index.html> (2011年11月9日閲覧).
- 31) 西村利光, 宮腰研, 羽田浩二: 2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)の距離減衰特性, 日本地震工学会・大会-2011梗概集, pp. 404-405, 2011.
- 32) 司宏俊, 翠川三郎: 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, No. 523, pp. 63-70, 1999.
- 33) 国土地理院: 三陸沖の地震(2011年3月9日)の震源断層モデル, <http://www.gsi.go.jp/common/000060189.pdf> (2011年11月9日閲覧).
- 34) 国土地理院: 2011年4月11日福島県浜通りの地震(M7.0)の震源断層モデル(暫定), <http://www.gsi.go.jp/common/000060655.pdf> (2011年11月9日閲覧).
- 35) 国土地理院: 2011年4月12日千葉県東方沖の地震(M6.4)の震源断層モデル(暫定), <http://www.jishin.go.jp/main/chousa/11may/p26.htm> (2011年11月9日閲覧).
- 36) Joyner, W. and Boore, D. M.: Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley California earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 71, pp. 2011-2038, 1981.
- 37) Yamazaki, F. and Ansary, M. A.: Horizontal-to-Vertical spectrum ratio of earthquake ground motion for site characterization, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, No. 7, pp. 671- 689, 1997.
- 38) 村岡七重, 丸山喜久, 山崎文雄: 余震および常時微動のフーリエ振幅比を用いた本震の応答スペクトルと計測震度の推定, 日本建築学会構造系論文集, No. 603, pp. 179-186, 2006.
- 39) 藤本一雄, 翠川三郎: 日本全国を対象とした国土数値情報に基づく地盤の平均 S 波速度分布の推定, 日本地震工学会論文集, Vol.3, No.3, pp.13-27, 2003.
- 40) Lu, L., Yamazaki, F. and Katayama, T.: Soil amplification based on seismometer array and microtremor observations in Chiba, Japan, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 21, pp. 95-108, 1992.
- 41) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1996.
- 42) Joyner, W. B. and Fumal, T. E.: Use of Measured Shearwave Velocity for Predicting Geologic and Site Effects on Strong Ground Motion, Proc. 8th World Conference on Earthquake Engineering, Vol.2, pp.777-783, 1984.
- 43) Midorikawa, S., Matsuoka, M. and Sakugawa, K.: Site Effects on Strong-motion Records Observed during the 1987 Chiba-Ken-Toho-Oki, Japan Earthquake, Proc. 9th Japan Earthquake Engineering Symposium, Vol.3, pp.85-90, 1994.

(2012.11.14 受付, 2013.2.4 修正, 2013.2.23 受理)

USE OF STATION CORRECTION FACTORS OF ATTENUATION  
RELATIONSHIP OF RESPONSE SPECTRUM FOR EVALUATION OF SITE  
AMPLIFICATION CHARACTERISTICS

Masaki SAKEMOTO, Yoshihisa MARUYAMA and Fumio YAMAZAKI

In this study, the site amplification characteristics at seismic observation stations were estimated based on the attenuation relationship of response spectrum after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. The station correction factors were compared with the transfer function at KiK-net stations to investigate the periodical amplification characteristics. The station correction factors were also compiled with respect to the geomorphologic classifications and average S-wave velocities to evaluate the site response characteristics.