



応答スペクトルの単一サイト予測式(SS-GMPE)

—三陸沖アウターライズ地震における検討—

高井伸雄¹⁾、前田宜浩²⁾、重藤迪子³⁾、笹谷努⁴⁾

1) 正会員 北海道大学大学院工学研究院、准教授 博士 (工学)

e-mail : tki@eng.hokudai.ac.jp

2) 正会員 防災科学技術研究所、主任研究員 博士 (理学)

e-mail : tmaeda@bosai.go.jp

3) 正会員 北海道大学大学院理学研究院、博士研究員 博士 (工学)

e-mail : m.shigefuji@eng.hokudai.ac.jp

4) 正会員 理博

e-mail : sasatani@eng.hokudai.ac.jp

要 約

本論文は、三陸沖で発生するアウターライズ地震による地震動特性を研究したものである。最初に、5つのアウターライズ地震 (M_w 6.0-7.6) による擬似速度応答スペクトルに対して、火山フロントを境にした伝播経路特性を考慮した既往のスラブ内地震を対象とする距離減衰式による予測値と観測値との比較を行った。本研究のデータセットの距離範囲はこの距離減衰式の適用範囲外であるが、距離を外挿したこの距離減衰式はアウターライズ地震における観測値を定性的に説明している。しかし、依然として予測値と観測値は大きな残差を有しており、この残差にはサイトの地盤増幅特性、震源特性が含まれると考えられる。これは、用いた距離減衰式に限らず、一般的な既往の距離減衰式が、複数の地域で発生した多くの地震からの複数サイトの記録を用いた回帰分析によって作成されているためである。そこで、本研究では、三陸沖の特定の震源域を対象とした単一サイトにおける地震動予測式 (SS-GMPE: Single-Site Ground Motion Prediction Equations) を提案した。ここで提案した三陸沖アウターライズ地震に対するSS-GMPEは、サイトごとに擬似速度応答スペクトルを予測するもので、 M_w と震源距離をパラメーターとした回帰分析によって構築した。構築した予測式には、伝播経路特性、サイト特性、震源特性が適切に取り込まれており、回帰に含まれない地震を対象とした検証の結果、残差の大幅な低減が確認できた。

キーワード: 地震動予測式、アウターライズ地震、擬似速度応答スペクトル

1. はじめに

一般に地震動予測式 (GMPE: Ground Motion Prediction Equation) は震源距離・規模から簡便に地震動指標を推定できるため、古くより多くの予測式が構築されてきている。震源特性として地震タイプ・震

源深さを考慮するものから¹⁾、応答スペクトルの地盤増幅特性を各サイトの地盤種別を考慮して評価するもの²⁾や深部地下構造により地盤増幅特性の補正を行うもの³⁾も見られるようになった。しかし、それらの多くは、複数地震に対する複数サイトの記録を用いた回帰分析により得られたものであり、地震の発生地域の違いによる伝播経路特性の地域性や各サイト個別の地盤増幅特性が適切に取り込まれているとは言い難い。伝播経路特性の地域性として、火山フロントの前弧側・背弧側での減衰性状の違いを取り入れ、補正項を導入したもの⁴⁾、前弧側・背弧側の伝播距離を考慮して回帰したもの⁵⁾も提案されているが、地震発生地域とサイト間の組み合わせが多様な場合には、この伝播経路特性の考慮は解析に用いた地域全体の平均的なものであると言える。

一方、古くは Kanai and Yoshizawa⁶⁾により、単一サイトにおける複数地震の変位スペクトルの周期と振幅に関する検討がなされている。また、同一サイトで地震発生地域を考慮してやや長周期帯域の加速度応答スペクトルを検討した事例^{7,8)}もみられる。これらの研究では伝播経路特性の地域性が取り込まれていると考えられるものの、検討サイト数は少なく、その結果、地震動振幅値の空間分布の検討等はなされておらず、空間分布の検討を基にした予測式の構築にはデータセットの充実が不可避であった。

1996年以降整備された K-NET、KiK-net 等により、観測点数は飛躍的に増加し、それらのデータを用いた GMPE の更新が実施されてきた。また、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震以降、日本周辺での地震活動が非常に活発になり、大地震を含めた多くの観測記録が蓄積されてきている。データセットの充実に伴い、これまで多くの地震に対して、多数のサイトで回帰して作成された GMPE を、地震タイプ・発生地域を限定し、1サイトで回帰することで、減衰特性の地域性や各サイトの地盤増幅特性の影響が反映された GMPE をサイトごとに構築できる可能性が有る。本論文では、このような GMPE を、Single-Site Ground Motion Prediction Equation (SS-GMPE) と呼ぶことにする。本論文では特定の地域で発生した地震群に対して、高密度観測網の各サイトでの観測記録の応答スペクトルを地震規模等で検討することにより、各サイトでその特定地域で発生する地震に対する SS-GMPE を構築しようと試みるものである。

ところで、日本海溝プレート境界で発生した2011年東北地方太平洋沖地震 (M_w 9.0) 以降、日本付近ではプレート境界地震のみならず、内陸地殻内地震、プレート内地震、アウターライズ地震が頻発している。これまでの距離減衰式に関する構築事例として、プレート境界で発生する地震、内陸地殻内地震、沈み込むプレート内で発生するスラブ内地震に関しては比較的多くあるが、海溝付近の沈み込む前のプレート内で発生するアウターライズ地震に関してはその研究は少ない。これは、1933年3月3日に発生した昭和三陸地震 (M_w 8.4) から2005年11月15日三陸沖の地震 (M_w 7.0) までアウターライズ地震の活動が極めて低かったことによる。日本付近で発生したアウターライズ被害地震である昭和三陸地震では、主に津波により多くの被害が発生し、震源から遠方であるため、地震動被害が多くは指摘されていない。しかし、アウターライズ地震は浅い地震であるにもかかわらず、スラブ内地震と同様に短周期地震動が強く励起される^{9,10)}ことが明らかになってきており、建造物の周期特性が多様化している現在では軽視できない。さらに、太平洋、フィリピン海のそれぞれのプレートで発生するアウターライズ地震での短周期帯域の地震動の励起特性が異なっており¹¹⁾、各地域で発生するアウターライズ地震の観測結果に関する検討は大規模アウターライズ地震の地震動予測にとって重要である。

そこで、本研究では、まず始めに三陸沖において1933年以降で初めて発生した M_w 7 級のアウターライズ地震である2005年の地震と、東北地方太平洋沖地震以降に三陸沖のほぼ同一地域で発生した計5つのアウターライズ地震の強震観測記録を用いて、既往の距離減衰式における擬似速度応答値の予測値と観測値の比較を行う。次に、 M_w を用いた回帰分析により三陸沖で発生するアウターライズ地震に対する SS-GMPE を各サイトで構築し、さらに、予測式構築に用いていない地震に適用してその有用性を検証する。

2. 使用するデータ

2011年3月11日14:46に発生した東北地方太平洋沖地震 (M_w 9.0) の後1時間以内に、15:08に M_w 7.4、15:15に M_w 7.7、15:26に M_w 7.6の大地震が発生したが、そのうち、15:26の地震(表1のNo.2地震)が震源位置よりアウターライズ地震と考えられる。以降、3月22日 (M_w 6.4: No.3地震)、5月5日 (M_w 6.1: No.4地震)、

6月3日 (M_w 6.1: No.5地震) に M_w 6級のアウターライズ地震が発生している。本研究では、これらの地震に併せ、2005年11月15日に発生した M_w 7.0の地震 (No.1地震) の計5地震を対象として解析を行う。本研究で用いた地震を図1および表1に示す。震源位置が日本列島に対して東遠方にあるため気象庁の決定し

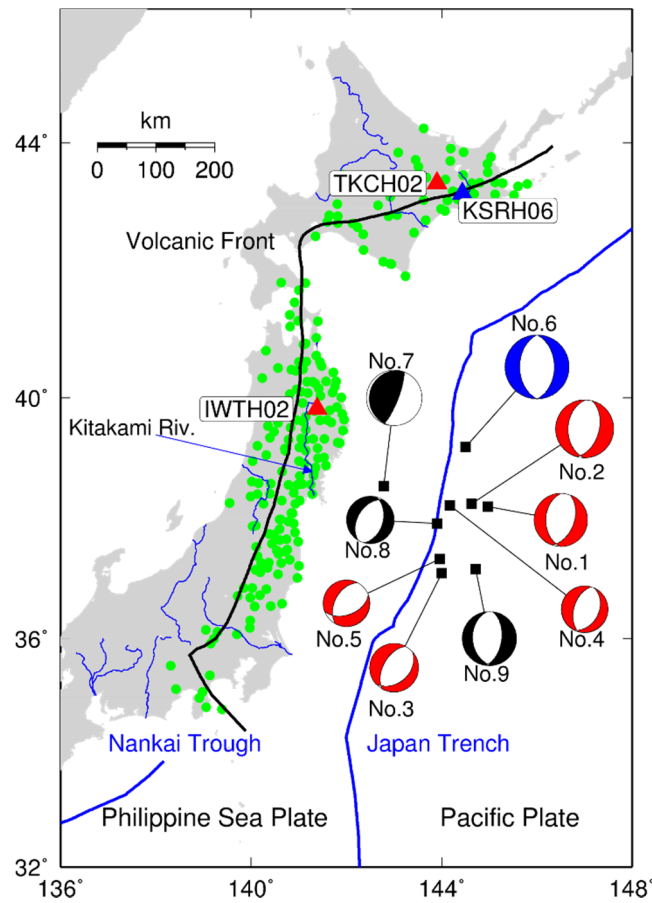


図1 解析対象地震の震央分布とメカニズム解

(地震のNo.は表1に対応、メカニズム解の色(赤、黒、青)はそれぞれ、SS-GMPE構築に使用した地震、その他の検討に用いた地震、昭和三陸地震に対応、緑点はSS-GMPE構築に使用した観測点、青三角は図2、3で、赤三角は図12、13、21、25で用いた観測点)

表1 解析対象地震(震源情報はGlobal-CMTによる。ただし、*はKanamori¹²⁾による。)

| Eq. No. | Date (JST) | Time (JST) | M_w | Depth (km) | Data |
|---------|------------|------------|-------|------------|------|
| 1 | 2005/11/15 | 06:38 | 7.0 | 18.0 | 659 |
| 2 | 2011/03/11 | 15:26 | 7.6 | 21.1 | 867 |
| 3 | 2011/03/22 | 16:18 | 6.4 | 12.3 | 455 |
| 4 | 2011/05/05 | 23:58 | 6.1 | 13.9 | 305 |
| 5 | 2011/06/03 | 09:05 | 6.1 | 20.5 | 408 |
| 6* | 1933/03/03 | 02:31 | 8.4 | 10 | - |
| 7 | 2011/03/09 | 11:45 | 7.3 | 14.1 | 742 |
| 8 | 2012/12/07 | 17:31 | 6.2 | 24.9 | 433 |
| 9 | 2013/10/26 | 02:10 | 7.1 | 24.9 | 814 |

た震源では誤差が大きい。そこで、すべての震源情報はGlobal-CMTにより決定されたセントロイドを用いた。これらの5地震は半径約100kmの範囲内に分布している。図1、表1には同地域で記録に残る最大地震である昭和三陸地震（1933年3月3日 M_w 8.4:No.6地震）と、検討に用いる2011年3月9日のプレート境界地震（ M_w 7.3:No.7地震）、検証に用いる2012年12月7日（ M_w 6.2:No.8地震）と2013年10月26日（ M_w 7.1:No.9地震）のアウトターライズ地震も同時に示した。

SS-GMPEの構築に用いる強震動データは防災科学技術研究所のK-NETおよびKiK-netで得られた地表の加速度記録とし、No.1-5の5地震すべてで記録が得られている217サイトを対象として解析を行った。図1にSS-GMPEの構築に使用したサイトを併せて示す。

予測対象に用いる速度応答値は既往研究⁹⁾との比較検討も行うため擬似速度応答値とした。擬似速度応答値は、既往研究⁹⁾に倣い観測記録の水平2成分の全区間から計算した各周期の加速度応答時刻歴をベクトル合成して得られる最大値を角周波数 ω で除すことで求めた。アウトターライズ地震に関しては前述の通り、短周期帯域の地震動の励起が特徴的であるため、固有周期 $T=0.1-3.0\text{sec}$ に関して検討を行う。

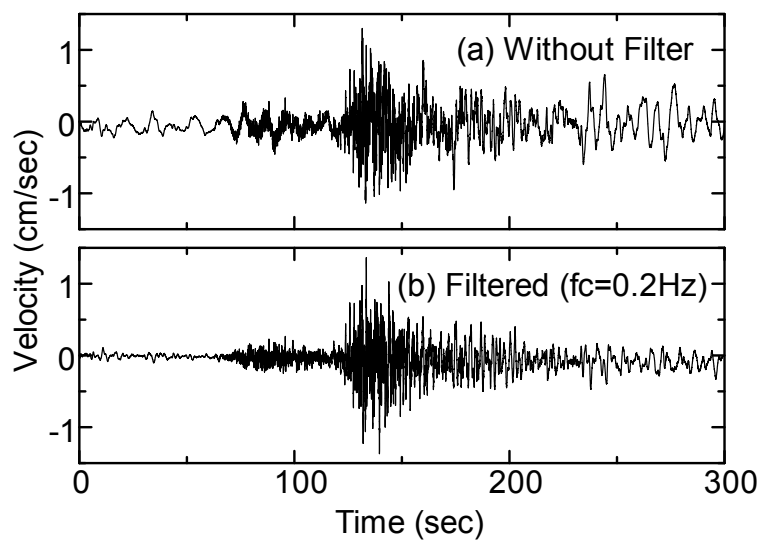


図2 No.2地震のKiK-net鶴居東（KSRH06）の地表NS成分の強震記録(a)とローカットフィルター処理波形(b)

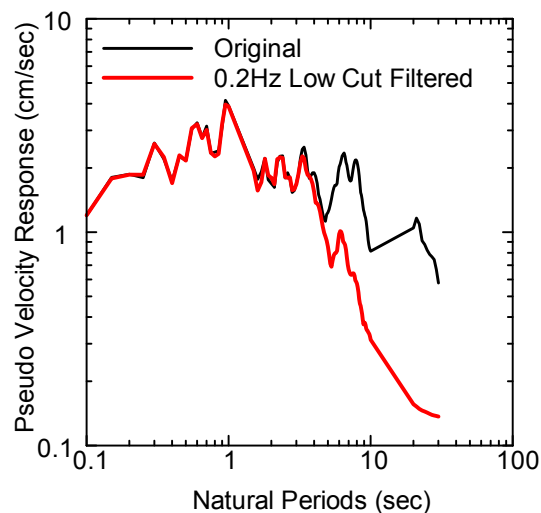


図3 No.2地震のKiK-net鶴居東（KSRH06）における擬似速度応答スペクトル（黒線が図2a、赤線が図2bのスペクトル）

回帰に用いる地震のうち、最も規模の大きいNo.2地震では約40分前に発生した M_w 9.0の地震の影響により、図2aに見られるように、P波到達以前より周期約7秒の長周期帯域の地震動が記録されている。そこで0.2Hz（5秒）のローカットフィルターを施した地震動（図2b）を用いて計算した擬似速度応答スペクトルと原波形を用いて計算した擬似速度応答スペクトルの比較を行った。図3に示すように周期5.0秒以下の応答においては両スペクトルがほぼ同等であることが分かる。本研究ではアウターライズ地震の短周期帯域の地震動の励起が強い事に注目しており、周期5.0秒以下の擬似速度応答スペクトルであれば、 M_w 9.0の本震が励起した長周期帯域の地震動による影響は少ないと考えられる。

3. アウターライズ地震の擬似速度応答値の空間分布および距離減衰特性

ここでは、既往の距離減衰式の中から、火山フロントを境界とした地震波減衰特性の違いが考慮されているDhakai *et al.*⁵⁾（以降、Dhakai式）を用いて、アウターライズ地震の距離減衰特性を検討する。Dhakai式はアウターライズ地震を解析対象としていないものの、三陸沖から北海道東方沖の地震に対して、本研究の対象地域のサイトに対して構築されたものであり、三陸沖アウターライズ地震の検討にも適していると考えられる。次章以降でSS-GMPE構築の対象とするサイトは図1に見られるように、火山フロントの前弧側に多くが位置しているが、ここでは各地震における全記録を対象とした検討を行うため、前弧側・背弧側を考慮しての検討を行う。Dhakai式は火山フロントの前・背弧側の減衰特性の違いを反映させるため、震源距離を前弧側と背弧側の距離に分割した予測式である。各距離は図4のように定義され、距離減衰式は以下の(1)式で与えられる。

$$\log(pSv) = c + a M_w - \log(R) - b_1 R_1 - b_2 R_2 \quad (1)$$

ここで pSv : 擬似速度応答値、 R : 震源距離、 R_1 : 震源から火山フロントまでの距離、 R_2 : 火山フロントからサイトまでの距離（図4）、 c 、 a 、 b_1 、 b_2 : 回帰係数である。これにより、図4中に示す距離の比（Distance Ratio）に依存する距離減衰式が決定される。No.2地震に対して計算したDistance Ratioを例として図5に示す。このDistance Ratioは震源とサイトの位置関係により変化する値である。No.2地震に対する $T=0.1$ secと 1.0 secにおける距離減衰曲線を図6に示す。図6より、火山フロント前弧側のサイト（Distance Ratio=1.0）で減衰が小さく、背弧側で減衰が大きいこと、及び長周期帯域ではその違いが小さくなるのがこの距離減衰曲線で表現されていることが理解できる。なお、Dhakai式の適用範囲は300kmまでのため、300km以遠は点線で示してある。

Dhakai式ではプレート境界地震（解析に用いた地震の深さ範囲: 20-50km）とスラブ内地震（同: 60-130km）の2つの地震タイプに関しての距離減衰式が提案されている。アウターライズ地震はスラブ内地震と同じ海洋プレート内で発生していることから、図6ではスラブ内地震に対する式によるDistance Ratioごとの減衰曲線を示している。また、地震タイプによる距離減衰特性の違いを示すため、プレート境界地震の減衰曲線（Distance Ratio=1.0: 火山フロント前弧側）も同時に示した。さらに、アウターライズ地震の深さを考慮し、良く用いられるKanno *et al.*¹³⁾による浅い地震（30km以浅）に対する距離減衰曲線も同時に示した（以降、Kanno式）。Kanno式はAVS30をパラメーターとしてサイト特性を補正する加速度応答スペクトルの予測式であるが、ここではAVS30が約300m/sに相当する地盤を対象とした基本式を基に、角周波数 ω で除することにより擬似速度応答スペクトルへ変換している。なお、両式ともに、300kmまでの適用範囲であるが、図6では300km以遠の適用範囲外を点線で示している。図6より、Dhakai式において、 $T=0.1$ secの短周期帯域でのプレート境界地震の応答値はスラブ内地震と比較して小さく、またKanno式においては、さらに小さくなっている。一方、 $T=1.0$ secではDhakai式において地震タイプによる応答値の差異は小さくなり、それはKanno式とも良く合致している。

ここで、プレート境界地震とアウターライズ地震の距離減衰特性の比較のため、No.7地震（ M_w 7.3）とNo.1地震（ M_w 7.0）の $T=0.1$ 、0.3、1.0、3.0secにおける擬似速度応答値の空間分布（図7、8）および距離減衰関係とDhakai式との比較（図9、10）を示す。空間分布（図7、8）からは、いずれの地震においても、ほぼ同一の震源距離で比べると、 $T=0.1$ secでは火山フロントの前弧側のサイトでの応答値が大きく、背弧側で小さくなる特徴が見られる。一方、長周期帯域になるにつれて前弧側と背弧側の応答値の

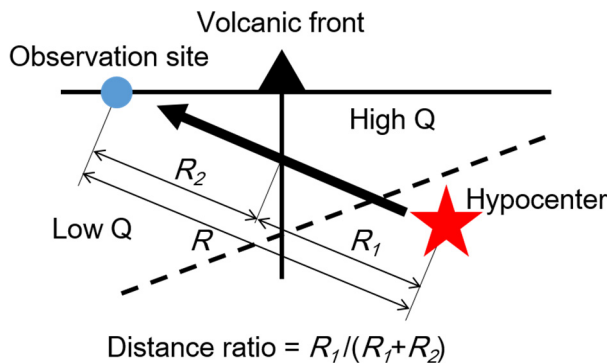


図4 火山フロントによる震源距離の分割

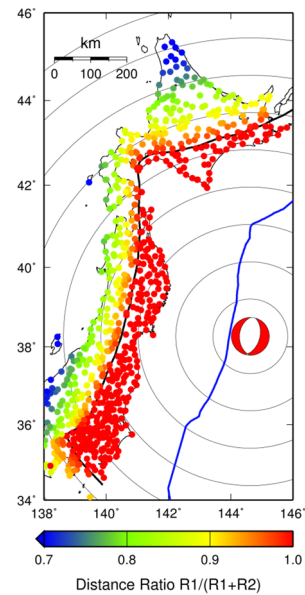


図5 No.2地震のDistance Ratioの空間分布
(黒線: 火山フロント、青線: 海溝、震央からの同心円は100km間隔)

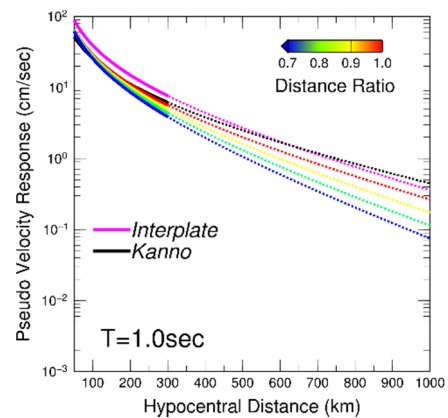
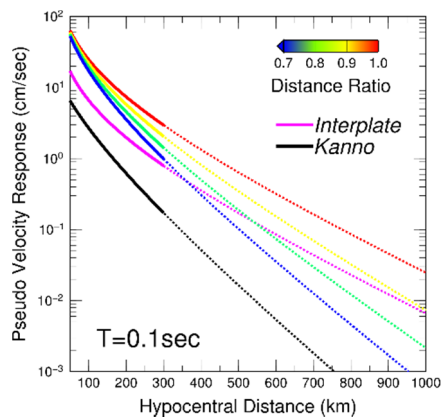


図6 No.2地震 ($M_w 7.6$) に対する擬似速度応答値の距離減衰曲線

No.2地震を例に、スラブ内地震のDhakal式を用いた場合(曲線の色と図5の観測点の色が対応している)。図中の紫線はプレート境界地震のDhakal式、黒線は浅い地震のKanno式。

違いが小さくなり、 $T=3.0\text{sec}$ では堆積盆地構造を有する関東平野や石狩・勇払平野等での応答値が大きくなるのが理解できる。また、内陸部では $T=1.0\text{sec}$ にて北上川流域での応答値が大きく、この傾向は他の地震においても認められる。これは、この地域に分布している第四系河岸平野堆積物の影響と指摘されている¹⁴⁾。短周期帯域において2地震を比較すると、 $M_w 7.0$ にもかかわらずアウターライズ地震であるNo.1地震は、ほぼ同一距離で比べると、 $M_w 7.3$ のプレート境界地震よりも大きい応答値を有している。これは、図9と図10を比較することで容易に理解できる。

距離減衰関係とDhakal式との比較(図9、10)では、Distance Ratioごとに応答値を色分けして示しており、Dhakal式による距離減衰曲線もそれに対応している。図9より、プレート境界地震であるNo.7地震では距離減衰関係とDhakal式は良い合致を見せている。特に、図7、8で指摘できた列島の前弧側と背弧側の減衰性状の違いは、Distance Ratioで分類することでより明瞭となり、短周期帯域において前弧側での減衰の小ささが理解でき、それはDhakal式と対応している。さらに、Dhakal式は、300km以遠への適用においても有効であることが示された。

アウターライズ地震であるNo.1地震では、地震規模が小さいにもかかわらず短周期帯域で応答値が大

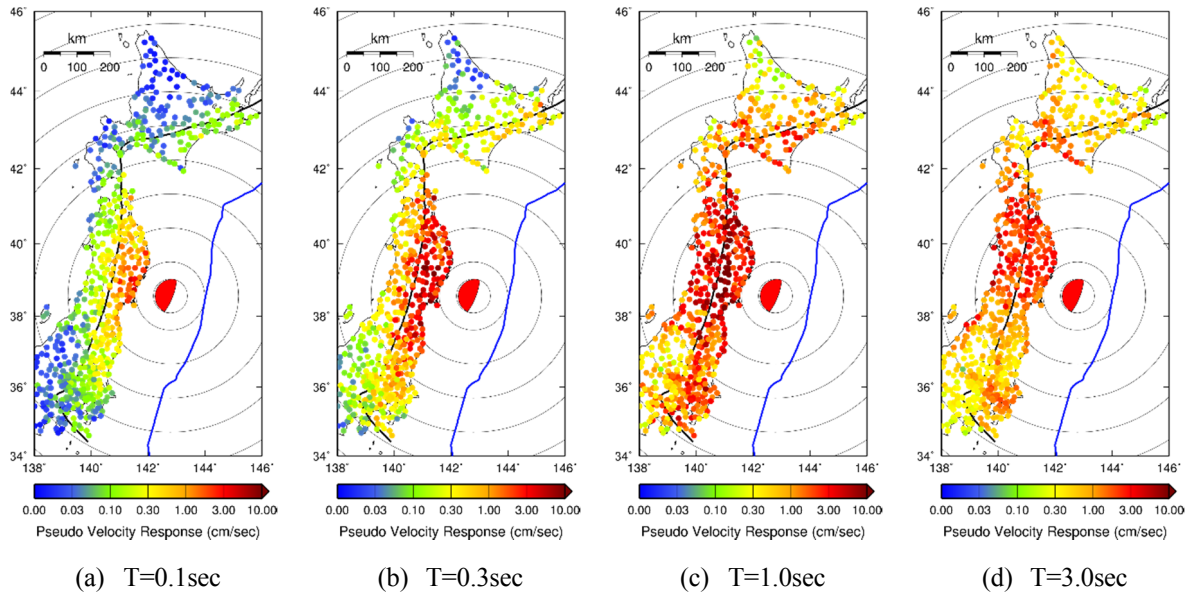


図7 No.7地震（プレート境界地震: M_W 7.3）による擬似速度応答値（観測）の空間分布

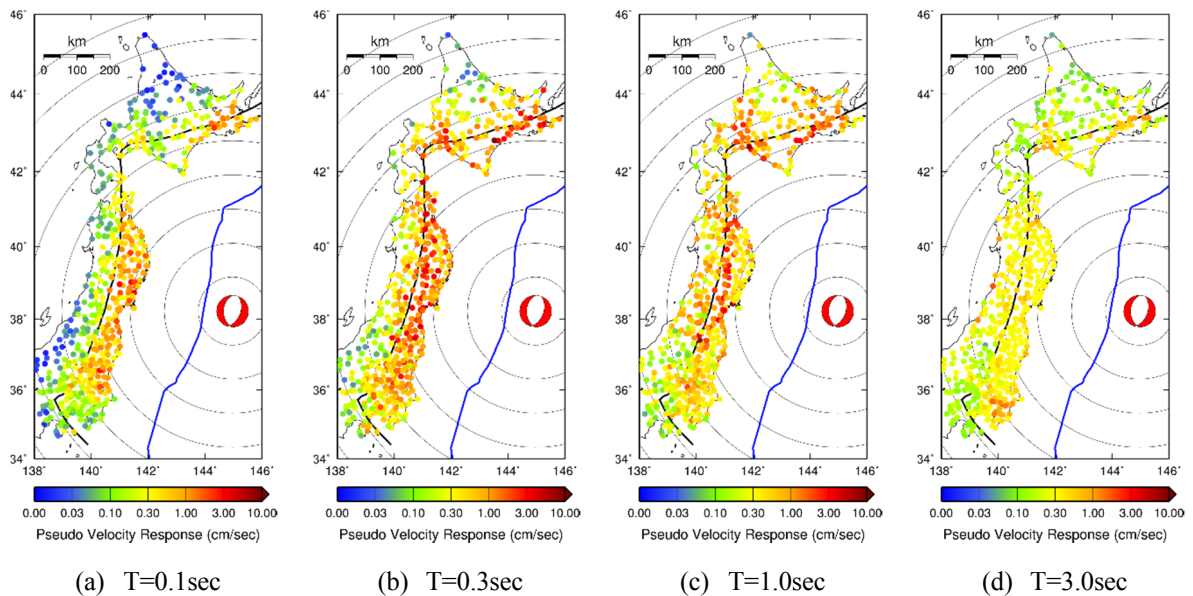


図8 No.1地震（アウターライズ地震: M_W 7.0）による擬似速度応答値（観測）の空間分布

きいが、そのばらつきも大きい。Dhakai式はスラブ内地震に対して構築されたものであるが、 $T=0.1, 0.3\text{sec}$ の短周期帯域においては比較的良くアウターライズ地震の観測値を説明している。一方、長周期帯域に関してDhakai式は $T=1.0\text{sec}$ では平均値よりやや大きい値を予測し、 $T=3.0\text{sec}$ では過大評価である。スラブ内地震に対するDhakai式をそのままアウターライズ地震に適用するには課題もあるが、短周期帯域に対しては適用性があると考えられる。

最後に、No.1地震を例に周期 $T=0.1$ と 1.0sec での観測値とDhakai式による予測値を比較する（図11）。Dhakai式による予測は火山フロントを境界とした不均質な減衰構造を考慮したものであるが、それは10倍程度の大きなばらつきを持った予測となっており、同時に示したDhakai式の標準偏差から大きく外れる観測点も多い。これは、各サイトにおける増幅特性と地震の発生地域の違いによる伝播経路特性の違いが依然として十分に予測式に反映されていないことが要因であると思われる。

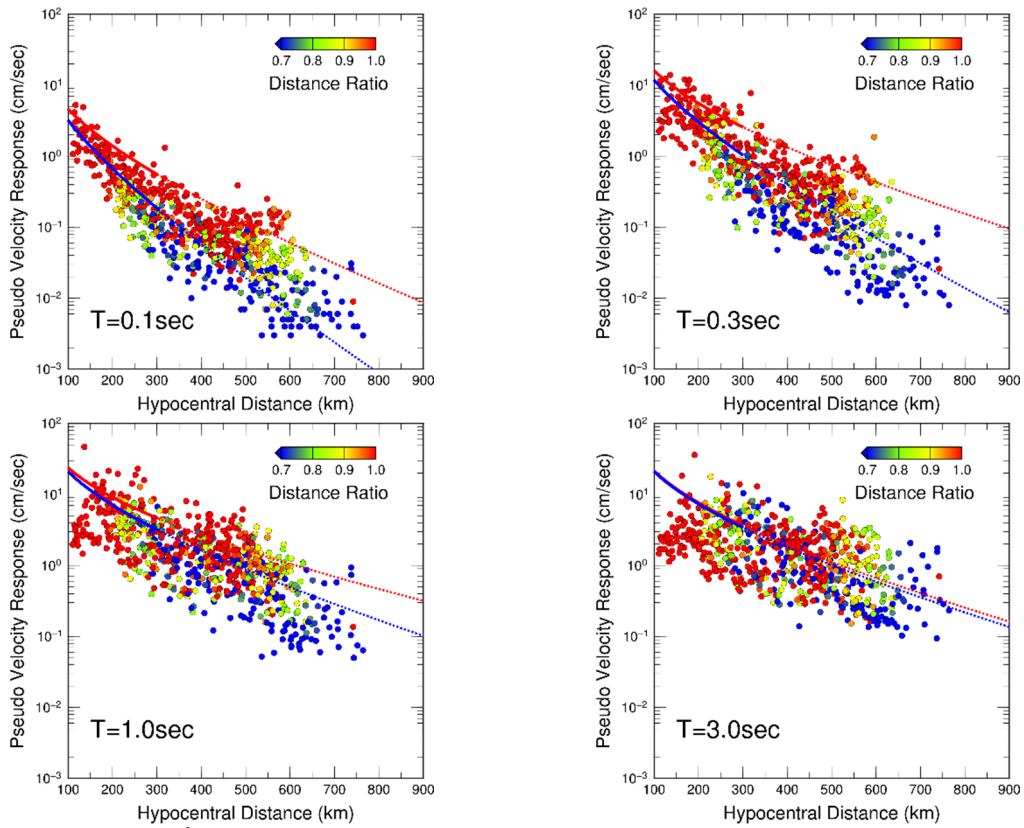


図9 No.7地震（プレート境界地震: M_W 7.3）による擬似速度応答値（観測）の距離減衰特性（赤・青線はDhakai式による予測値）

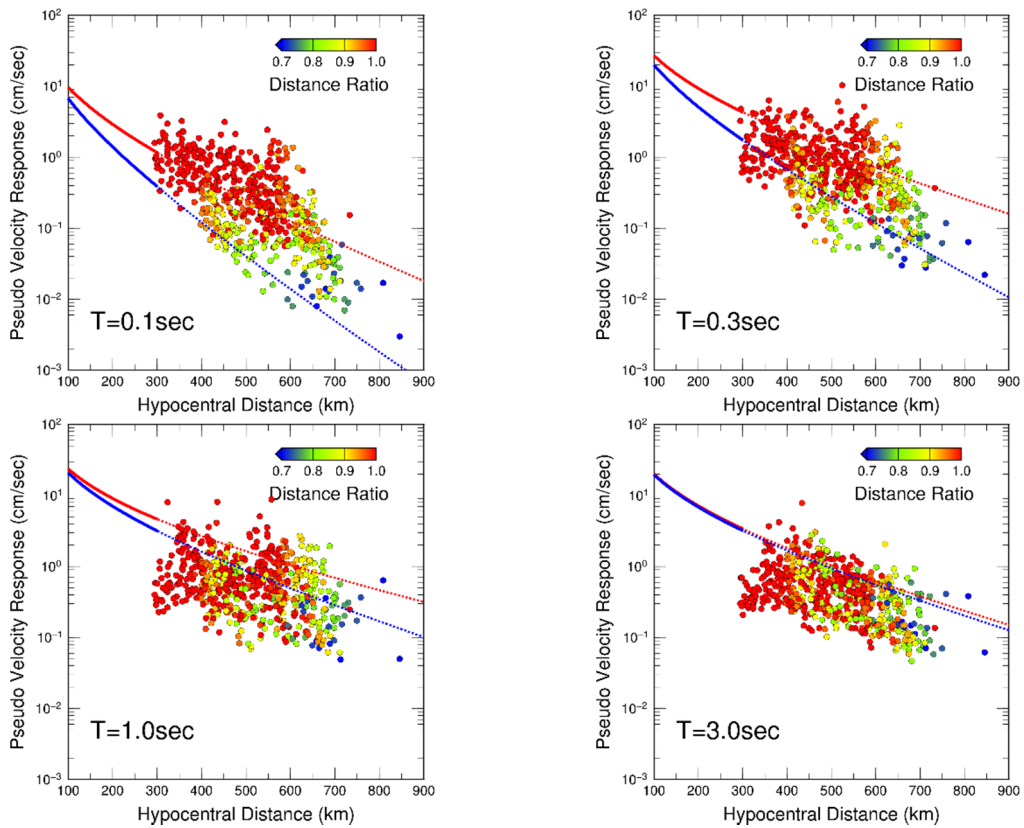


図10 No.1地震（アウターライズ地震: M_W 7.0）による擬似速度応答値（観測）の距離減衰特性（赤・青線はDhakai式による予測値）

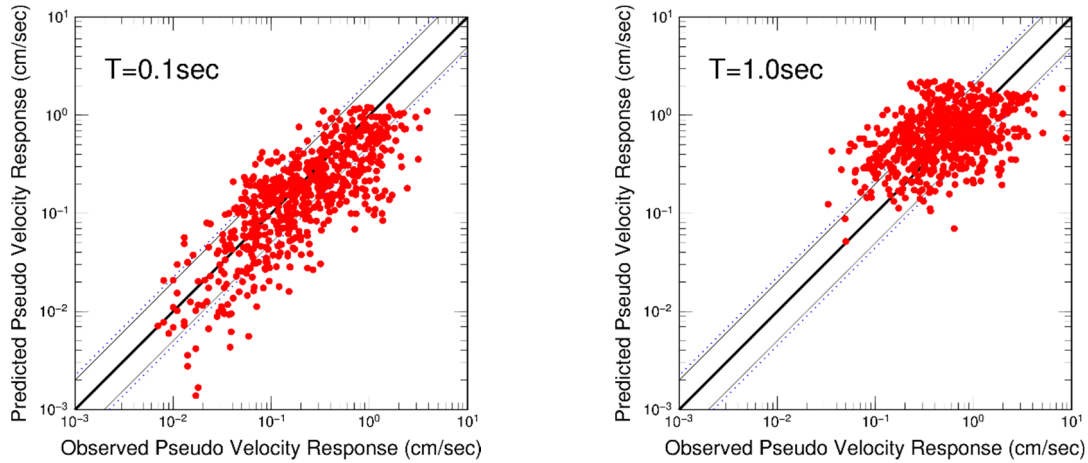


図11 No.1地震（アウターライズ地震: M_w 7.0）による擬似速度応答値（観測）とDhakal式による予測値（太実線は $y=x$ 、細実線は $y=2x$ 、 $y=1/2x$ 、青点線は Dhakal式の $\pm\sigma$ ）

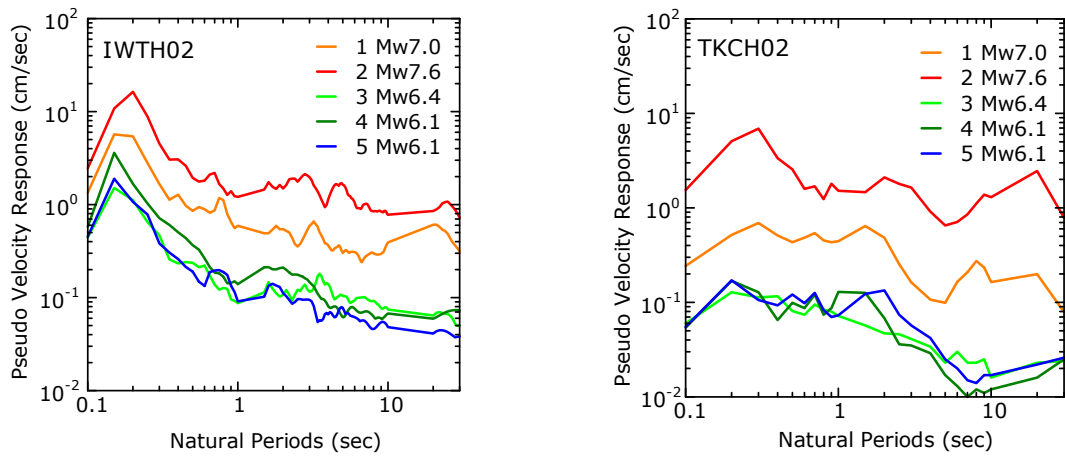


図12 2観測点における5地震による擬似速度応答スペクトル

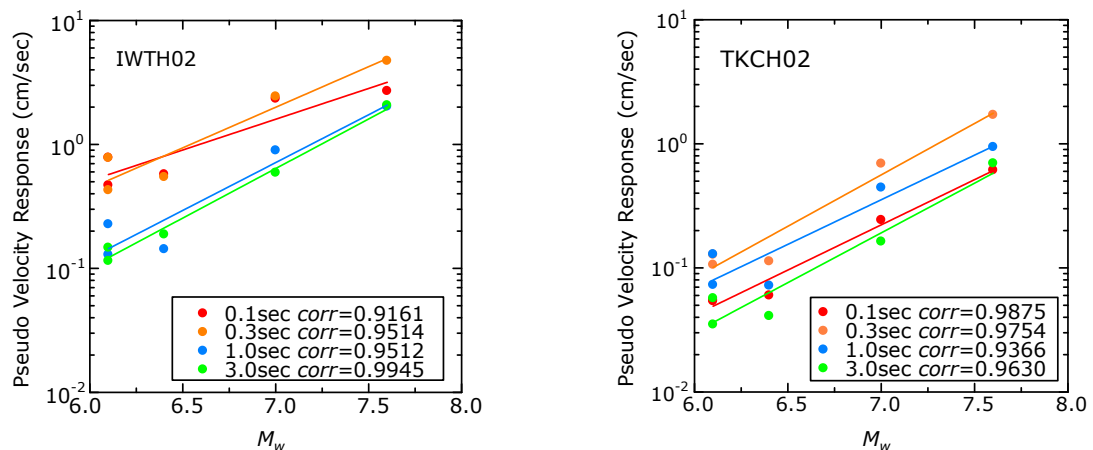


図13 2観測点における5地震の M_w と擬似速度応答値の関係（実線は回帰直線であり、色が固有周期に対応している。）

4. 各サイトでの回帰式の構築

3章の検討から Dhakal 式がアウターライズ地震による短周期地震動に対する適用性を有することが示されたが、本章では各サイトにおける増幅特性と地震発生地域の違いによる伝播経路特性を考慮した予測式の構築の可能性を探るべく、地震を三陸沖アウターライズ地震に限定し、特定のサイトを例に、 M_w の異なる 5 地震での応答値を比較する。ここでは三陸沖アウターライズ地震発生域からの方位が異なる KiK-net 玉山 (IWTH02) と足寄東 (TKCH02) 観測点における各地震による擬似速度応答スペクトルを検討する (図 12)。図 12 より、 M_w と応答スペクトル振幅の大小が対応しており、発生地域・地震タイプを限定した地震群においては M_w による回帰が有効と思われる。そこで、両サイトにおける、 $T=0.1, 0.3, 1.0, 3.0$ sec での M_w と応答値との関係を見る (図 13)。5 地震は震央が比較的集中して分布しており、ここでは距離による振幅補正等は実施していない。いずれの周期においても応答値の対数と M_w の関係は、傾きは異なるものの線形な関係を有しており、同時に示す M_w と応答値の相関係数 $corr$ も非常に高い値を示している。よって、各サイトで応答値を M_w で回帰することで、 M_w に対するサイトごとの予測式が構築されると考えられる。

上記2観測点での検討では震源距離による補正は行っていないが、サイトによっては地震間の震源距離が100km以上異なるため、その影響も考慮しなければならない。しかし、ほぼ同一震源距離のサイトも多く、回帰時の震源距離 R に対する決定精度が非常に低い。ところで、Dhakal *et al.*⁵⁾では(1)式に示した火山フロントにより震源距離を分割した距離 R_1, R_2 を用いる予測式 (Model-2) と震源距離 R のみを用いる予測式 (Model-1) が構築されている。ここで用いるデータセットでは5地震全てで記録を有するサイトが火山フロント前弧側に多くが存在すること (図1)、背弧側であっても震源距離の関係でDistance Ratioは1.0に近いこと、および予測の簡便性を考慮し、震源距離 R のみを用いて構築されたModel-1の減衰項 b (Dhakal *et al.*⁵⁾のTable III) を用いて、他の係数を求める回帰を実施する。ここで、回帰式は

$$\log(pSv) = c + aM_w - \log(R) - bR \quad (2)$$

であり、実質的には

$$Y = \log(pSv) + \log(R) + bR \quad (3)$$

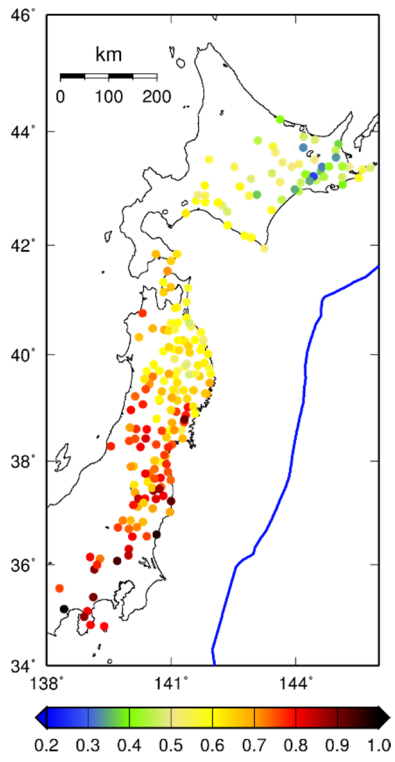
を M_w で回帰することになる。

なお、係数 b を固定しての回帰に先立ち、Dhakal 式の係数 a を用いて残りの係数を求めた場合、全ての係数を固定せずに求めた場合の回帰も各地点で試行しており、係数 b が負になる (距離により振幅が増大) 地域が現れることを確認している。これは震央領域を限定したことで震源距離範囲が狭くなったために生じたことであり、そのため本研究では係数 b を固定するに至った。

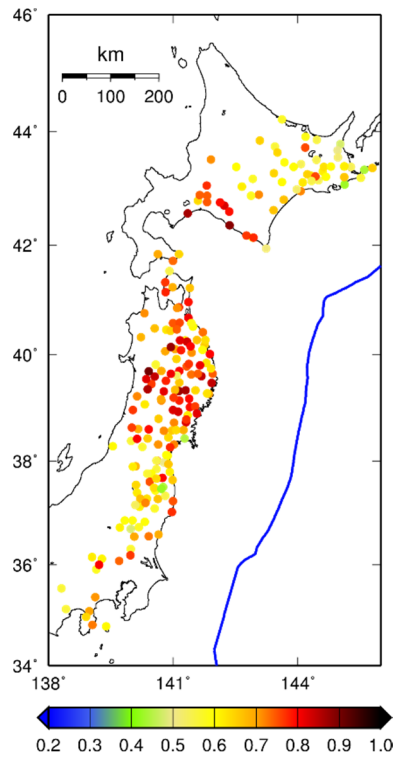
回帰により得られた係数 a, c の空間分布を $T=0.1, 1.0$ secを例に図14に示す。 $T=0.1$ secにおける係数 a (図14a) に関しては北海道東部では他地域と比較して低い値を呈しており、 M_w への依存が小さい。これに対し、 $T=0.1$ secの c 値 (図14c) では北海道東部で非常に大きい値が分布している。北海道東部は対象とした5地震の震源距離の変化が最も大きく、他地域に比べ係数 b の影響を強く受けている。Dhakal 式の係数 b は東北から北海道までの領域の平均的な値であり、係数 a, c の空間分布には係数 b が有している地域性 (方位依存性) の影響も含まれていると考えられる。

一方、 $T=1.0$ secにおける係数 a, c (図14b, d) は短周期帯域と比較して地域による変化が小さくなり、図7に示す長周期帯域での距離減衰傾向が短周期帯域と比較して同心円的性状を示す事と対応している。

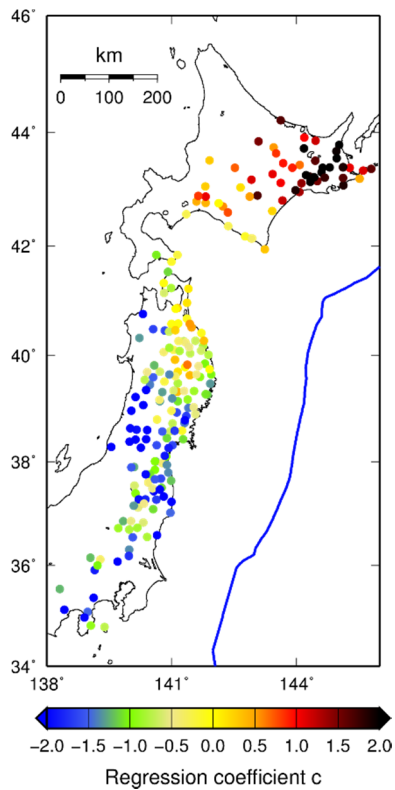
ここで、上記までに構築されたSS-GMPEを用いたNo.1地震に対する予測値の空間分布 (図15) と観測値の空間分布 (図8)、および図11と同様に観測値との比較を行った (図16)。空間分布では図8と比較してサイト数は少ないものの、火山フロントの前弧側での高振幅と背弧側での低振幅、また $T=1.0$ sec以上で北上川沿いにおいて高振幅となる様子が良く再現されている。図16では、同時に示したDhakal式による予測値と比較し、ばらつきが非常に小さくなっており、予測精度の向上が期待できる。



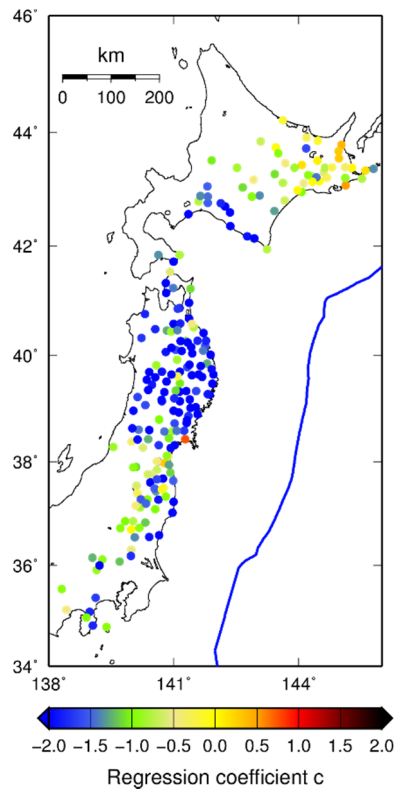
(a) 回帰係数 a ($T=0.1\text{sec}$)



(b) 回帰係数 a ($T=1.0\text{sec}$)



(c) 回帰係数 c ($T=0.1\text{sec}$)



(d) 回帰係数 c ($T=1.0\text{sec}$)

図14 回帰係数 a 、 c の空間分布

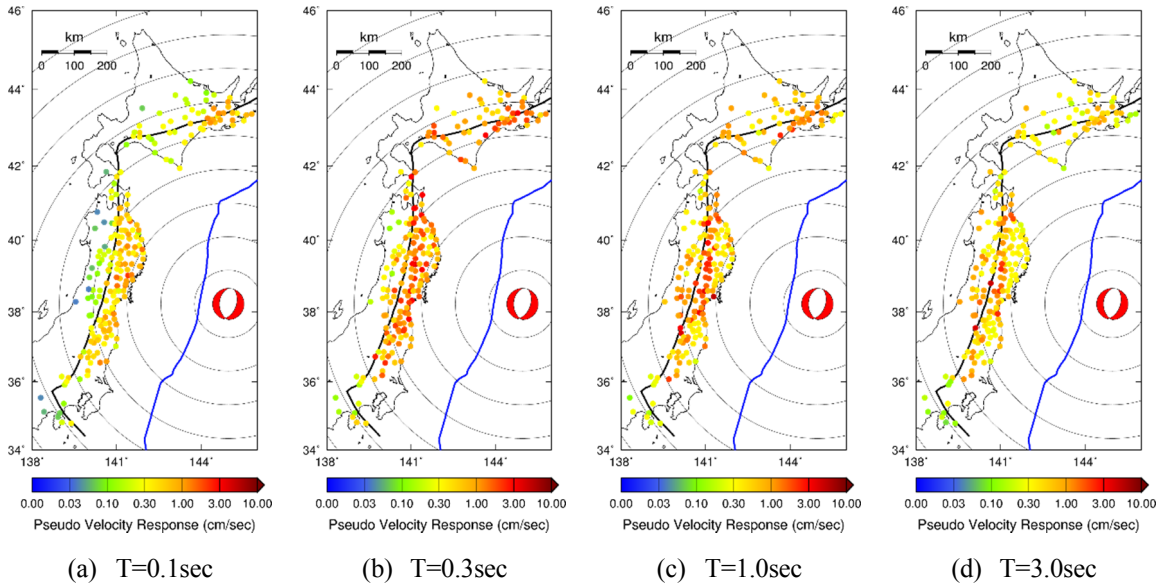


図15 No.1地震のSS-GMPEによる擬似速度応答値（予測）の空間分布

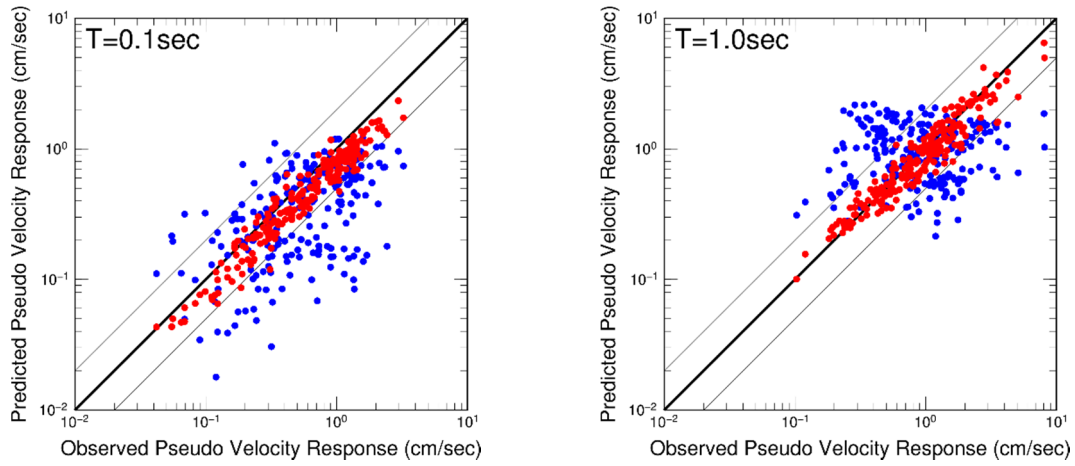


図16 No.1地震の擬似速度応答値（観測）とGMPEによる予測値の比較

(赤点がSS-GMPE、青点がDhakal式による予測、太実線は $y=x$ 、細実線は $y=2x$ 、 $y=1/2x$)

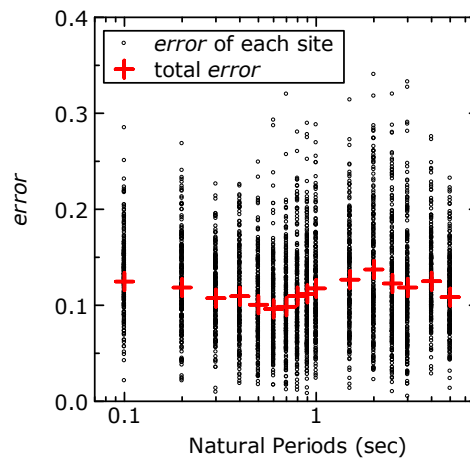


図17 観測値とSS-GMPEによる予測値の誤差（標準偏差）
(黒丸が各点における誤差、赤十字が全観測点に対する誤差)

回帰に用いた5地震の観測値 (pSv_{obs}) と予測値 (pSv_{pre}) の残差 x を

$$x = \log(pSv_{obs} / pSv_{pre}) \quad (4)$$

として求め、さらにその残差 x の標準偏差 σ を以下によって求める。

$$\sigma = \left(\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

ここで、各地点で標準偏差を求める場合は $n=5$ 、全サイトで求める場合は $n=1085$ であり、この標準偏差を森川・ほか⁴⁾にならって誤差として図17に示す。各サイトの誤差は周期によって異なるものの、おおよそ0.35以下となっており、全サイトの誤差は0.15以下に収まっている。データセット、パラメターの違いがあるため直接的な比較は出来無いが、森川・ほか⁴⁾による伝播経路特性・サイト特性・震源特性を補正した予測値と観測値の誤差 (*error*) が0.3-0.4に分布している事を考えると、SS-GMPEでは誤差が非常に小さいことが理解できる。

5. 検証と議論

5.1 2012年12月7日に発生した M_w 6.2のアウトサイズ地震に関する検証

2012年12月7日に M_w 7.3 (F-net¹⁵⁾)、 M_w 6.2 (No.8地震) のアウトサイズ地震が三陸沖で連続して発生している。このうち M_w 7.3地震の震源過程は複雑で、Global-CMTでは M_w 7.2の地震がほぼ同時に2回発生したと考えられているが、その各イベントの規模には議論があり^{16,17)}、SS-GMPEによるこの地震の検討は今後の課題とし、ここでは震源過程が比較的単純な M_w 6.2の地震を例に検証を行う。図18に観測された擬似速度応答値の空間分布を示す。T=0.1secでは太平洋側のサイトにおいて応答値が大きく、背弧側では小さくなっている。また、No.1地震と同様に、周期が長くなるにつれてその傾向は弱まり、T=1.0secでは堆積盆地構造を有する平野部と北上川流域での応答値が大きくなっている。

本研究で構築した三陸沖アウトサイズ地震に対するSS-GMPEにより予測されるNo.8地震の擬似速度応答値の空間分布を図19に示す。短周期帯域での前弧側と背弧側の応答値の大小関係や、北上川流域で高振幅となる様子が空間分布として良く再現されている。図18と図19で対象サイト数は異なるが、予測サイトを対象として、図20に観測値と予測値の比較を示す。T=0.1secでは予測値が系統だっずれており、若干大きい、同時に示したDhakal式による予測値と比較して、どの周期でもばらつきは小さい。IWTH02とTKCH02の両サイトを例に、観測と予測の擬似速度応答スペクトルを比較すると (図21)、振幅レベル、スペクトル形状ともに、再現性が高い。

5.2 2013年10月26日に発生した M_w 7.1のアウトサイズ地震に関する検証

2013年10月26日に M_w 7.1のアウトサイズ地震 (No.9地震) が三陸沖で発生した。No.9地震における観測された擬似速度応答値の空間分布を図22に示す。他のアウトサイズ地震と同様にT=0.1secでは太平洋側のサイトにおいて応答値が大きく、火山フロント背弧側では小さくなっている。また、周期が長くなるにつれてその傾向は弱まり、T=1.0secでは堆積盆地構造を有する平野部での応答値が大きくなっており、他の地震同様に北上川流域の応答値が大きい。

SS-GMPEにより予測される本地震の擬似速度応答値の空間分布を図23に示す。短周期帯域での前弧側と背弧側の応答値の大小関係や、北上川流域で高振幅となる様子が空間分布として良く再現されている。No.8地震と同様に観測サイト数と予測サイト数は異なるが、予測サイトを対象として図24に観測値と予測値の比較をDhakal式による予測と併せて示す。どの周期でもDhakal式と比較してばらつきは小さいものの、T=0.1、0.3secでは予測値が系統だっずれている。図17に示した全観測点の標準偏差を予測値の母集団の標準偏差0.125 (T=0.1sec)、0.107 (T=0.3sec) と仮定し、(4)式による本地震の予測値と観測値の残差の平均値0.322 (T=0.1sec)、0.271 (T=0.3sec) を基にt検定 (両側棄却5%) を実施すると有意な差が認められる。

No.8地震と同様にIWTH02、TKCH02の両サイトを例に、観測と予測の擬似速度応答スペクトルを比較する(図25)。予測値は短周期帯域において過小評価であるものの、およその振幅レベル、スペクトル形状ともに、再現性が高い。

5.3 議論

三陸沖で発生するアウターライズ地震に対して構築したSS-GMPEを、対象とする地域で発生した回帰に用いていない2地震に適用した結果、観測値の空間分布の特徴、各サイトでのスペクトル形状が良く再現されており、4章において示した回帰に用いた地震に対する高精度な予測が、他の地震に対しても示されていると言える。これは、SS-GMPEが震源から各サイトまでの伝播経路特性と各サイトの地盤増幅特性を適切に評価したGMPEであるためであり、座間・ほか⁸⁾が気象官署等の記録を用いて加速度応答スペクトルの長周期帯域に関して地震発生地域を地震地体構造区分ごとに評価した結果と整合する。ただし、発生地域・地震タイプの異なる地震に対しては適用範囲外であり、座間・ほか⁸⁾が用いた震源地区分等を参考に、適用可能な領域の設定に関して、他地域での適用とその結果の検討を通して今後議論する。

2地震に対するSS-GMPEによる予測が、短周期帯域に関して、No.8地震では約1.5倍の過大評価、No.9地震では約1/2倍の過小評価となっている。一方で長周期帯域においては両地震ともに観測値と予測値の合致度は非常に高い。本研究では観測で得られた応答値を各地震の M_w のみで回帰しているが、菅原・植竹¹⁸⁾は、近接して発生した地震を対象とした解析において、 M_w の同じ地震であっても震源の応力降下量

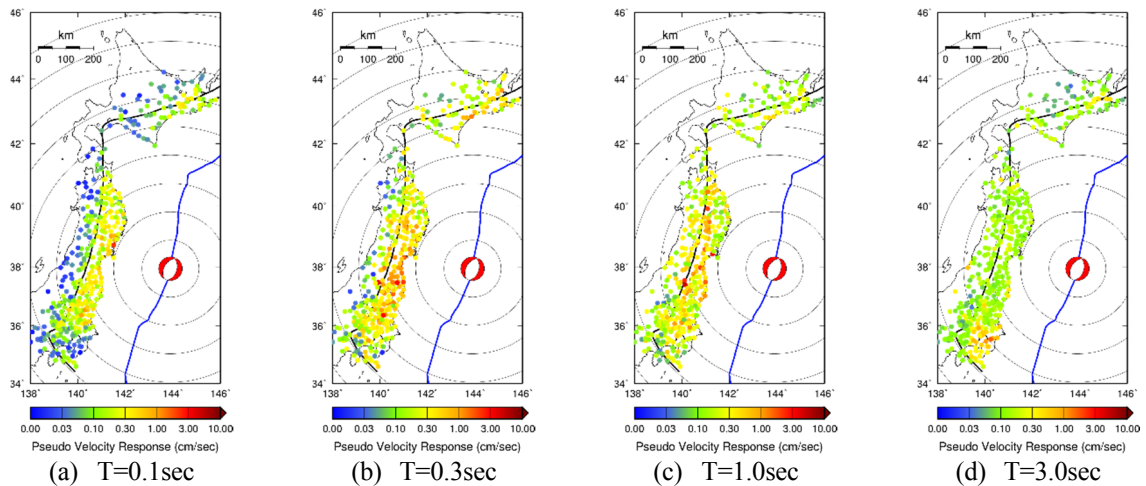


図18 No.8地震 (M_w 6.2) による擬似速度応答値 (観測) の空間分布

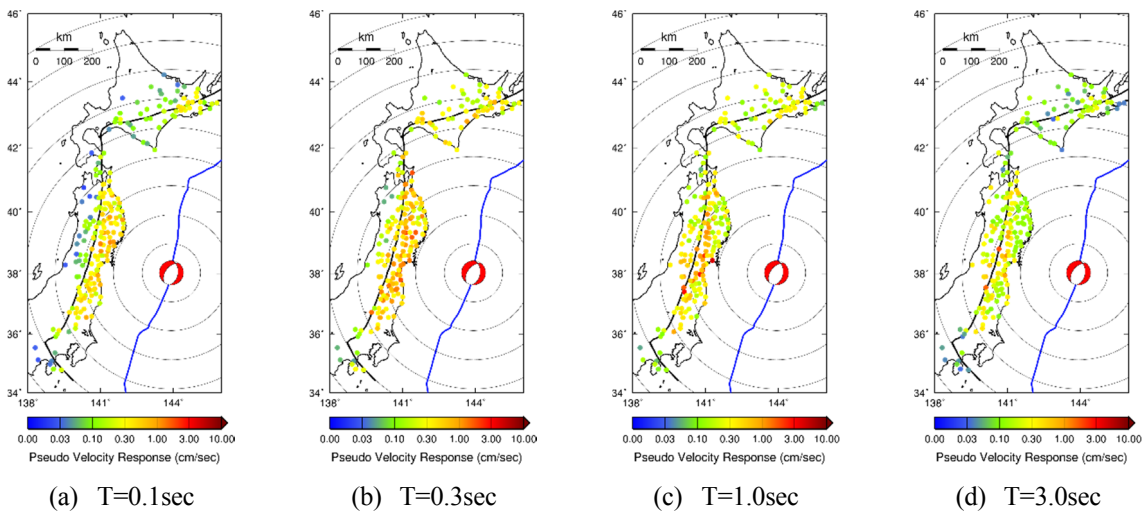


図19 No.8地震 (M_w 6.2) のSS-GMPEによる擬似速度応答値 (予測) の空間分布

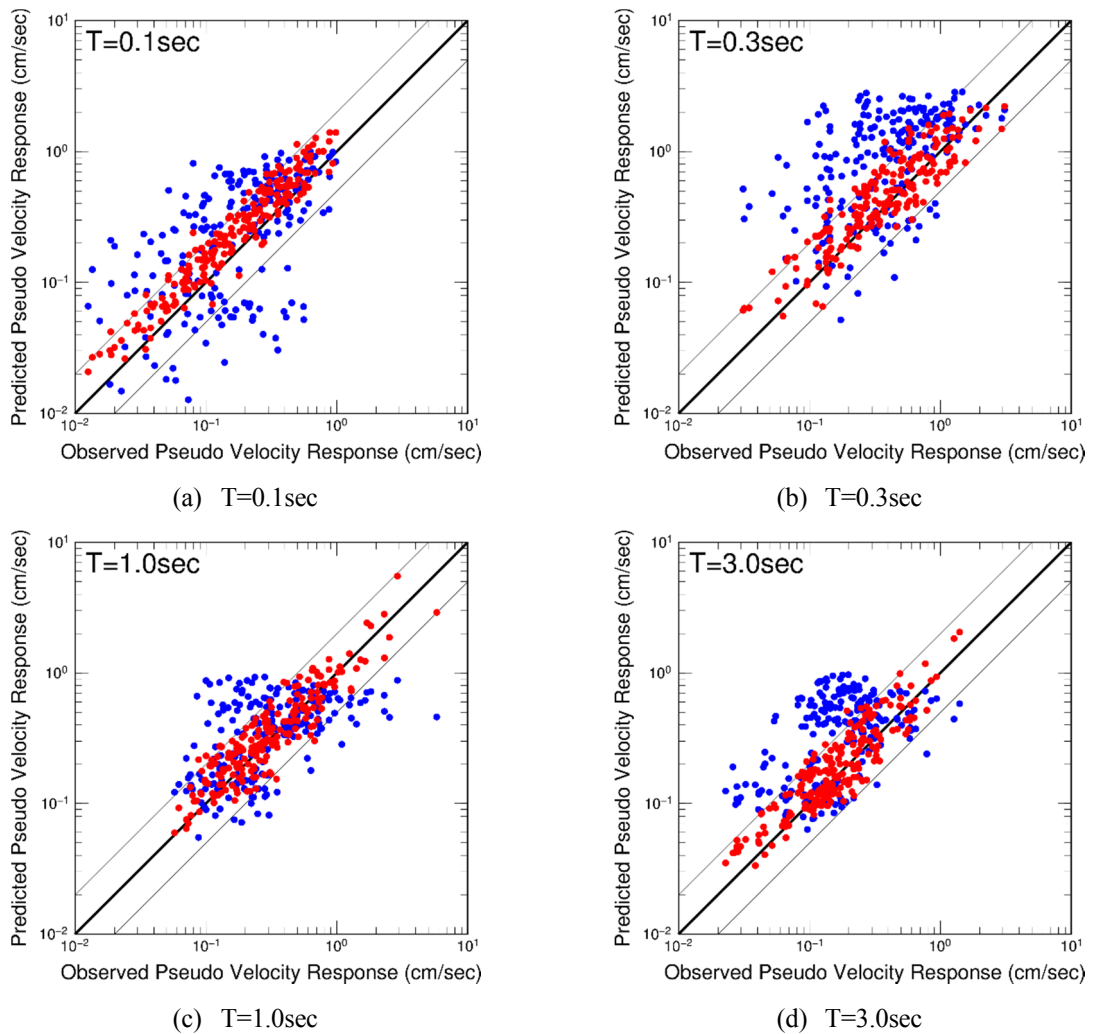


図20 No.8地震 (M_w 6.2) 地震の擬似速度応答値 (観測) とGMPEによる予測値の比較 (赤点がSS-GMPE、青点がDhakal式による予測、太実線は $y=x$ 、細実線は $y=2x$ 、 $y=1/2x$)

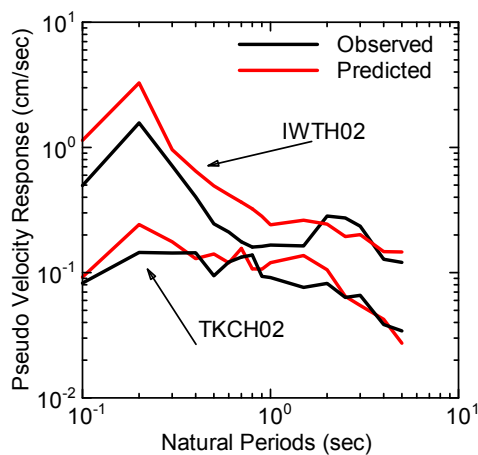


図21 No.8地震 (M_w 6.2) の擬似速度応答スペクトルの観測値とSS-GMPEによる予測値の比較 (IWTH02、TKCH02の例)

が地震動の最大加速度のばらつきに影響を与えるとしている。また、加速度震源スペクトルの短周期レベルのスケーリング則はスラブ内地震¹⁹⁾と内陸地殻内地震²⁰⁾において倍半分の範囲内にばらつく事が知られている。これらは、短周期帯域での予測式の構築が M_W のみでは十分でない事を指摘していることに他ならない。これが、No.8地震とNo.9地震での短周期帯域での過大および過小評価の要因として考えられる。周期帯域ごとの係数 a の検討と併せ、今回見られたSS-GMPEの予測値の系統的なずれを震源の応力降下量等から定量的に議論し、同じく三陸沖で実施された短周期レベルに関する既往研究²¹⁾との比較を行い、ずれの要因を検討する必要がある。

提案したSS-GMPEは既往の距離減衰式の減衰項の係数 (Dhokal式のModel-1) を用いているが、今後のデータの蓄積によっては前弧側・背弧側を分類したModel-2による構築によって精度が更に向上すると考えられる。本研究では M_W の係数 a が地域性を有するサイト固有の結果となっているが、Dhokal式と同様に第一段階の回帰で係数 b を全地点に共通で決定することで、第二段階で全サイト共通の係数 a を決定することができる。この方法をとることで、Dhokal式では対象としていないアウターライズ地震に対する距離係数も再決定する事ができるが、震央が集中しているデータセットでは係数 b の決定精度が低い。一方で、特定の震央領域を限定したことにより係数 b は方位依存性を有していると考えられる。これは、係数 b を固定したことで係数 a 、 c に広域的な地域性がみられることから示唆される (図13)。本稿のデータセットからは、係数 a の地域性の要因を明らかにするには至らなかったが、本式の一般化のためには重要な課題である。これに関しては、対象地域のアウターライズ地震の伝播経路特性と震源特性を、データを多く有し、多くの既往の距離減衰式が対象としているプレート境界地震と比較し²²⁾、係数 c のサイト

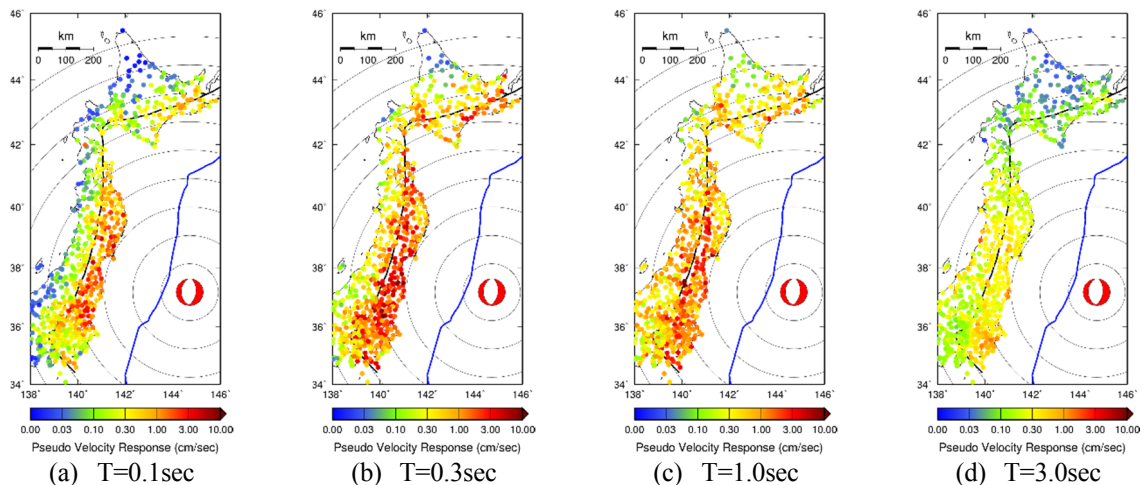


図22 No.9地震 (M_W 7.1) による擬似速度応答値 (観測) の空間分布

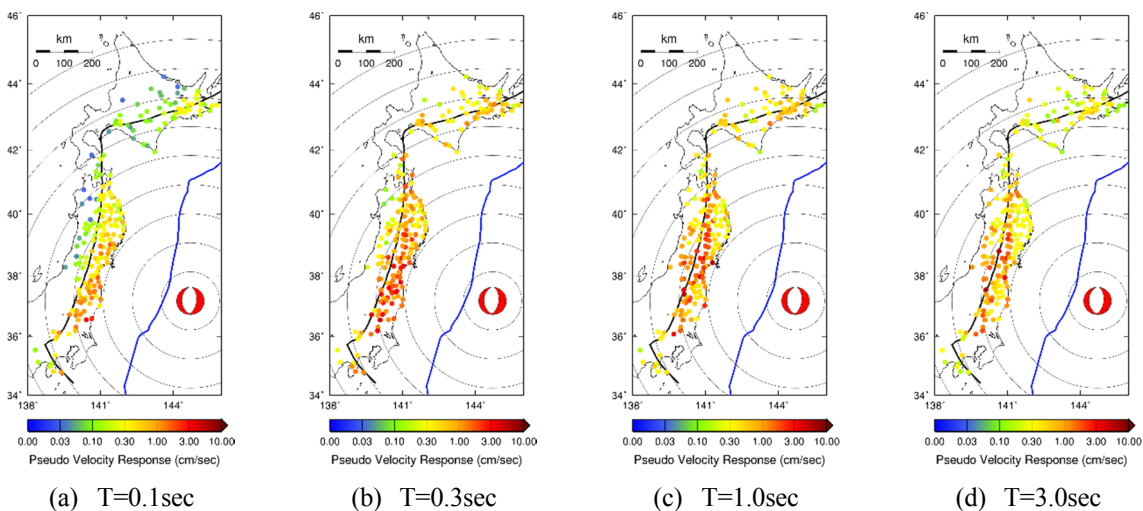


図23 No.9地震 (M_W 7.1) のSS-GMPEによる擬似速度応答値 (予測) の空間分布

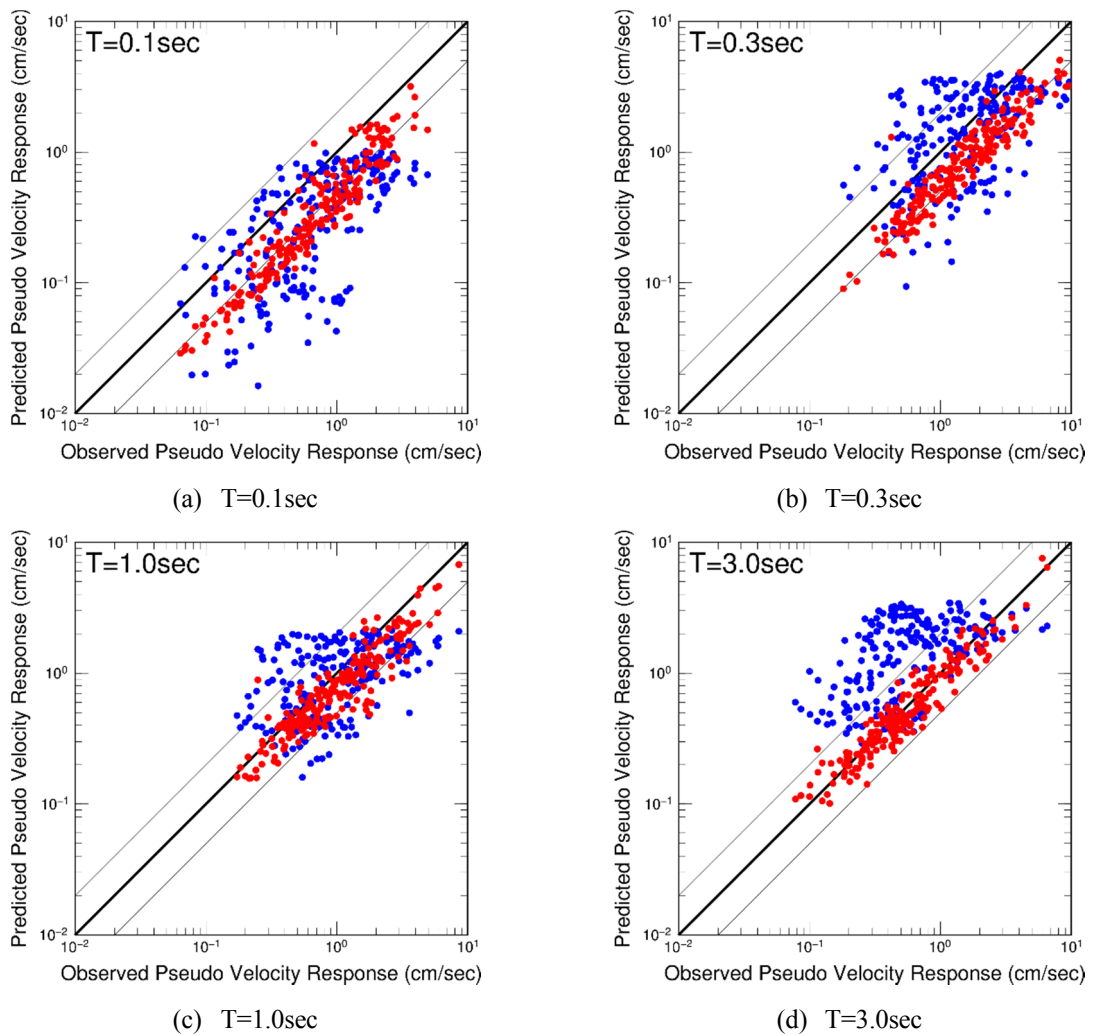


図24 No.9地震 ($M_w 7.1$) の疑似速度応答値 (観測) とSS-GMPEによる予測値の比較 (赤点がSS-GMPE、青点がDhakal式による予測、太実線は $y=x$ 、細実線は $y=2x$ 、 $y=1/2x$)

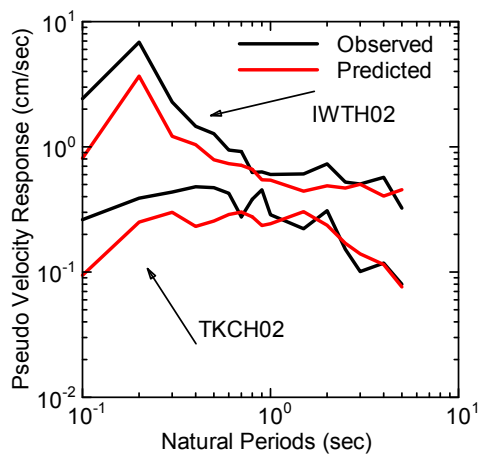


図25 No.9地震 ($M_w 7.1$) の疑似速度応答スペクトルの観測値とSS-GMPEによる予測値の比較 (IWTH02、TKCH02観測点の例)

依存性・地域性の議論と併せ明確にする必要がある。

検討に用いた地震は正断層のアウトサイズ地震のみであるが、地域や深さの違いにより逆断層の地震も存在する²³⁾。2012年12月7日の M_w 7.3の地震ではほぼ同時に正断層と逆断層の地震が発生し^{15,23)}、短周期における振幅の違いも指摘されており²⁴⁾、断層タイプの違いをも考慮した各係数の詳細な議論が今後必要となる。

6. まとめ

本研究では、高密度強震観測網のデータを用いて三陸沖で発生するアウトサイズ地震の地震動特性（擬似速度応答値）を既往のスラブ内地震GMPEと比較し、その適用性に関して検討した。スラブ内地震に対するDhakai式は短周期帯域に対してはアウトサイズ地震への適用性を有するが、しかし、依然として観測値と予測値間の残差はかなりのばらつきを有していた。この残差は、既往の距離減衰式が複数の地域で発生した多くの地震の複数サイトの記録を用いた回帰分析によって作成されているため、サイト特性と震源特性を適切に評価出来ていないことが原因である。そこで、この両特性を適切に含んだ予測式構築のため、三陸沖のほぼ同一地域で発生した5地震（ M_w 6.0-7.6）の擬似速度応答値を用い、既往の距離減衰式の減衰項とこれらの M_w をパラメータとする三陸沖で発生するアウトサイズ地震に対する各サイトでのGMPE（SS-GMPE）を構築した。構築に用いた地震の観測値と予測値の残差を比較すると既往のGMPEと比較して、非常に小さな残差を示し、精度の向上が示された。狭い震央領域、同じ地震タイプ、サイトごとに構築されたSS-GMPEでは、伝播経路特性、サイト特性、震源特性が適切に考慮されているためである。最後に、構築したSS-GMPEを用いて、構築に用いなかった対象範囲内で発生した M_w 6.2、 M_w 7.1の地震に対して予測を実施し、その有効性を確認した。

今後、震央領域の範囲設定に関する議論をプレート境界地震に対するSS-GMPEの構築を通して実施し、各サイトで得られた回帰係数を地下構造により精査することで、SS-GMPEの精度の向上と面的評価への拡張を図る。

謝 辞

本研究では、防災科学技術研究所の強震観測網（K-NET）、基盤強震観測網（KiK-net）より提供されたデータ、Global CMT Projectによるメカニズム解を使用させて頂きました。一部の図の作成にはGMT²⁵⁾を用いました。また、3名の査読者には、本稿を改善するにあたり、大変有意義な指摘を頂きました。記して感謝の意を表わします。

なお、本研究の一部は科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）（挑戦的萌芽研究）25560171（研究代表者：高井伸雄）および戸田育英財団・研究助成金による成果である。

参考文献

- 1) 司宏俊、翠川三郎: 断層タイプおよ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、第523号、1999年、pp.63-70.
- 2) 内山泰生、翠川三郎: 地盤分類別の地盤増幅率を用いた基盤地震動スペクトルの簡便な評価方法、日本建築学会構造系論文集、第571号、2003年、pp.87-93.
- 3) 糸井達哉、高田毅士: 深部地下構造における地震動増幅特性を考慮した内陸直下地震に対する硬質地盤上の地震動応答スペクトル予測式の簡易補正法、日本地震工学会論文集、第12巻、第1号、2012年、pp.43-61.
- 4) 森川信之、神野達夫、成田章、藤原広行、福島美光: 東北日本の異常震域に対応するための最大振幅および応答スペクトルの新たな距離減衰式補正係数、日本地震工学会論文集、第6巻、第1号、2006年、pp.23-41.
- 5) Dhakal, Y., Takai, N., and Sasatani, T.: Empirical analysis of path effects on prediction equations of pseudo-velocity response spectra in northern Japan, Earthquake Engng. Struct. Dyn. 39, 2010, pp.443-461.
- 6) Kanai, K. and Yoshizawa, S.: The amplitude and the period of earthquake motions. II., 東京大学地震研究所彙報、第36冊第3号、1958年、pp.275-293.

- 7) 座間信作: 東北日本東方沖の地震によるやや長周期地震動特性、消防研究所報告、第88号、1999年、pp.11-24.
- 8) 座間信作、細川直史、畑山健、遠藤真: やや長周期地震動の早期予測システムの構築、第11回日本地震工学シンポジウム論文集、2002年、pp.2307-2312.
- 9) Sasatani, T., Takai, N., Shigefuji, M., Kawabata, W., Okazaki, Y., and Miyahara, Y.: Source characteristics of large outer rise earthquakes in the Pacific plate, Proceedings of 15th WCEE, 2012, PID-4029.
- 10) Kawabata, W., Sasatani, T., Takai, N., and Shigefuji, M.: Short-period source characteristics of a great earthquake doublet in the central Kurile Islands, Proceedings of 15th WCEE, 2012, PID-3607.
- 11) 岡崎由佳、笹谷努、高井伸雄: 2005年三陸沖アウターライズ地震 (M_w 7.0) による強震動特性、第13回地震工学シンポジウム論文集、2010年、pp.281-288.
- 12) Kanamori, H.: Seismological evidence for a lithospheric normal faulting the Sanriku earthquake, Phys. Earth Planet. Interiors, 4, 1971, pp.289-300.
- 13) Kanno, T., Narita, A., Morikawa, N., Fujiwara, H., and Fukushima, Y.: A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data, BSSA, Vol. 96, No. 3, 2006, pp.879-897.
- 14) 齋藤徳美、中村操、野越三雄: 1987年岩手県中部沿岸地震における岩手県内の高密度震度分布と地質構造との関係、地震、42巻、1989年、pp.81-90.
- 15) F-NET: <http://www.fnet.bosai.go.jp/event/tgmt.php?LANG=ja&ID=20121207081700>
- 16) Harada, T., Murotani, S., and Satake, K.: A deep outer-rise reverse-fault earthquake immediately triggered a shallow normal-fault earthquake: The 7 December 2012 off-Sanriku earthquake (M_w 7.3), Geophysical Research Letters, 40, 16, 2013, pp.4214-4219.
- 17) Lay, T., Duputel, Z., Ye, L., and Kanamori, H.: The December 7, 2012 Japan Trench intraplate doublet (M_w 7.2, 7.1) and interactions between near-trench intraplate thrust and normal faulting, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 220, 2013, pp.73-78.
- 18) 菅原正晴、植竹富一: 震源の応力降下量が地震動の最大加速度のばらつきに及ぼす影響、日本地震工学会論文集、第13巻、第4号、2013年、pp. 68-84.
- 19) 笹谷努、森川信之、前田宜浩: スラブ内地震の震源特性、北海道大学地球物理学研究報告、No.69、2006年、pp.123-134.
- 20) 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、No.545、2001年、pp.51-62.
- 21) 佐藤智美: 東北地方のアウターライズ地震、スラブ内地震、プレート境界地震の短周期レベルと f_{max} および距離減衰特性、日本建築学会構造系論文集、第689号、2013年、pp. 1227-1236.
- 22) 新村明広、重藤迪子、高井伸雄、笹谷努: スペクトル比を用いた地震タイプ毎の高周波数強震動特性の比較、日本建築学会大会学術梗概集、構造II、2014年、pp. 341-342.
- 23) Craig, T. J., Copley, A., and Jackson, J.: A reassessment of outer-rise seismicity and its implications for the mechanics of oceanic lithosphere, Geophysical Journal International, 197, 2014, pp.63-89.
- 24) 重藤迪子、笹谷努、高井伸雄: 2012年12月7日三陸沖アウターライズ地震(M_w 7.2)の短周期地震波励起、日本建築学会大会学術梗概集、構造II、2014年、pp. 233-234.
- 25) Wessel, P. and Smith W.H.F : New, improved version of Generic Mapping Tools released, EOS, AGU, 1998.

(受理 : 2014年6月17日)
(掲載決定 : 2014年11月6日)

Single-Site Ground Motion Prediction Equations (SS-GMPE) of Response Spectra

- Case Study for the Off-Sanriku Outer-Rise Earthquakes -

TAKAI Nobuo ¹⁾, MAEDA Takahiro ²⁾, SHIGEFUJI Michiko ³⁾
and SASATANI Tsutomu ⁴⁾

1) Member, Associate Professor, Hokkaido University, Dr. Eng.

2) Member, Senior Researcher, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Sci.

3) Member, Researcher, Hokkaido University, Dr. Eng.

4) Member, Dr. Sci.

ABSTRACT

We studied characteristics of strong ground motions from the Off-Sanriku outer-rise earthquakes; these earthquakes are activated after the 2011 Tohoku earthquake (M_w 9.0). First, we calculated pseudo velocity responses for five outer-rise earthquakes (M_w 6.0-7.6) and compared them with the attenuation formulae which were constructed for the intraslab earthquake. In spite of outer-rise's data being over the distance range of these formulae, the extrapolated formulae generally explained the attenuation relations of these observed data. However, there were considerable residuals between the observed and predicted values. These residuals result from the site and source effects, because the previous attenuation formulae were constructed based on many site's strong motion records from many earthquakes occurring at various source areas. Second, in order to overcome the weakness of the previous attenuation equations, we proposed empirical ground motion prediction equations for a single site; we named these equations "Single-Site GMPE (SS-GMPE)". Our data for regression analysis were strong motion records at a single observation site from the five outer-rise earthquakes occurring at the narrow source area with the radius of about 100km. We carried out a regression analysis with respect to M_w for each site assuming the previously estimated internal attenuation for intraslab earthquakes. The earthquake source, propagation path and site effects were well incorporated into these equations, and as a result, the residuals between the observed and predicted values were considerably decreased. Finally, we applied the SS-GMPE to earthquakes not used in the regression analysis and found the good correspondence of predicted and observed spectra.

Key Words: Ground Motion Prediction Equation, Outer-Rise Earthquake, Pseudo Velocity Response Spectrum