日本地震工学会論文集　第13巻、第1号、2013

距離減衰式における地震間のばらつきを偶然的・認識論的不確定性に分離する試み

内山泰生[1)]、翠川三郎[2)]

1) 正会員　大成建設(株)技術センター、主任研究員　博士(工学)
e-mail : yasuo.uchiyama@sakura.taisei.co.jp
2) 正会員　東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻、教授　工博
e-mail : smidorik@enveng.titech.ac.jp

要　約

日本で発生した中小地震(4.5≦Mw≦6.0)を対象とした最大加速度および最大速度の距離減衰式における地震間のばらつきについて、これを偶然的・認識論的不確定性に分離する方法を検討した。分離には、空間的な共分散構造解析で用いられるセミバリオグラムを指標とした。この方法による偶然的不確定性の標準偏差と震源域と地震のタイプを限定して求められた既往研究による地震間のばらつきの標準偏差とを比較した。この結果、両者は同程度の値となることを示し、セミバリオグラムを指標とした本研究による結果の妥当性を確認した。また、偶然的不確定性の標準偏差は距離減衰式における地震間のばらつきの標準偏差に比べ、最大加速度はその60%程度、最大速度はその80%程度となることを示した。

キーワード：　距離減衰式、中小地震、地震間のばらつき、偶然的不確定性
認識論的不確定性、セミバリオグラム

1. はじめに

将来発生するであろう地震における地震動強さを予測することは、構造物の耐震設計や地域の防災計画立案のために重要である。地震動強さの予測手法は、決定論的手法と確率論的手法に大別される。決定論的手法では、対象地点への影響が大きい地震に対して、あるシナリオを想定し、これに基づく詳細な解析によって地震動評価を行う。一方、確率論的手法では、評価地点に影響のある全ての地震を対象として、ある期間内に発生する地震動強さとその発生確率を評価する。現状では、あるシナリオを想定した決定論的手法で地震動強さの予測が行われる場合が多い[1)]。しかし、原子力発電所やダム等の供用期間が長い重要構造物の設計用地震動、企業や施設のリスクマネジメントとしてのBCP策定等には決定論的手法だけではなく、確率論的手法による評価も重要であると考えられる。

確率論的手法に基づく地震動評価(以下、PSHA)では、評価地点に影響を与える全ての地震に対して、地震規模・評価地点までの距離・地震発生の確率をモデル化し、これと地震動強さの確率モデルから、対象期間内に、ある地震動強さを超える条件付超過確率を算定する。ここで、地震動強さの確率モデルは、強震記録の回帰分析から求められた距離減衰式とその標準偏差を用いた対数正規分布で表される。

ある地点における地震動強さの超過確率を求めるためには、本来であれば同一の場所で同じ規模の地

震が繰り返し発生した場合に、その地点で観測された地震動強さのばらつきの標準偏差を確率モデルに用いるべきである。しかし、このようなデータが得られる場合がほとんどないことから、実際にはエルゴード性を仮定し、多数の地震による多数の観測点で得られた様々な特性を含むデータに基づく距離減衰式の標準偏差が用いられている。これは、本来用いるべき値よりも大きな値を確率モデルに導入していることになり、これにより低超過確率において過大な地震動強さとなることが指摘されている[2)]。

地震動強さのばらつきは、認識論的不確定性（epistemic uncertainty）と偶然的不確定性（aleatory uncertainty）に分離することができる[2),3)]。認識論的不確定性は、より正確なモデル化や新しい知見・データを追加することで低減可能なばらつき、偶然的不確定性は新しい知見・データが追加されても低減不可能なばらつきである。本来、PSHAでは偶然的不確定性のみを用いるべきと指摘されている[2),4)]。つまり、PSHAの高精度化には、距離減衰式における地震動強さのばらつき（回帰誤差）を偶然的不確定性と認識論的不確定性に定量的に分離することが重要である[5)]。

距離減衰式の回帰誤差を、中央値に対する各地震における観測記録の偏差の平均値である地震間のばらつき、各地震の距離減衰式に対する各観測記録の偏差である地震内のばらつきに分離して評価することが多くなっている[6)]。ここで、地震間のばらつきは震源特性、地震内のばらつきは伝播経路・サイト特性がばらつきを与える主たる要因として指摘されている[5),7),8)]。距離減衰式の最も基本的な回帰モデルでは、震源特性をマグニチュード、伝播経路を震源からの距離、サイト特性を地盤種別などでモデル化するが、近年では予測精度向上（認識論的不確定性の低減）のために、震源深さ、地震・断層タイプ、深部地盤による増幅特性などを導入する場合もある[6)]。しかし、震源特性における震源メカニズムや破壊伝播方向、伝播経路における媒質（速度、減衰構造）の不均質性、サイト特性における地盤の不整形性や入射角などによる地震動強さの違いは予め想定することが困難であり、これらが地震間および地震内のばらつきにおける偶然的不確定性の要因になっていると考えられる。

地震間・地震内のばらつきの大きさとその要因分析は、距離減衰式の回帰誤差に基づいて検討される場合が多い。Lin et al.(2011)[9)]は台湾で得られた強震記録を用いて、空間的な共分散構造解析によって偶然的・認識論的不確定性の定量的な評価を行っている。この結果では、距離減衰式の回帰分析における地震間のばらつきの標準偏差の70%程度、地震内のばらつきの標準偏差の40~50%程度が偶然的不確定性によるばらつきであることを指摘している。しかし、台湾で発生した内陸地殻内地震のみを対象としているため、多様なタイプの地震が発生する日本においても同様の結果となるかは明らかではない。

ある地点で得られた複数の強震記録によるばらつきの標準偏差（single-station-sigma）[10)~12)]、ある地点に対して伝播経路が類似するとみなせる震源域で発生した複数の地震によるばらつきの標準偏差（single-path-sigma）[12)~14)]が検討されている。これらの検討から距離減衰式の標準偏差が自然対数で0.7~0.8であるのに対して、single-station-sigmaは0.6程度、single-path-sigmaは0.3~0.5程度となることが示されている。しかし、文献13)以外は地震間と地震内のばらつきの総和で論じられており、偶然的・認識論的不確定性についても言及されていない。

これに対して、池浦・野田(2005)[7)]は距離減衰式を介さず、ほぼ同一の震源位置・規模の複数の地震による同一観測点で得られた強震記録の分析を行い、周期1秒以下における地震間のばらつきの標準偏差が自然対数で0.4～0.5程度になること、震源における地震波の励起特性の違いが地震間のばらつきの主たる要因であると指摘している。なお、観測点・震源位置・規模が特定されるため、この結果は偶然的不確定性に対応すると考えられる。ただし、このような条件のデータは少ないため、より一般的な結果を得るためには、強震記録の更なる蓄積が必要であると考えられる。

本研究では日本で発生した多様なタイプの地震を対象に、Lin et al.(2011)[9)]と同様に空間的な共分散構造解析で用いられるセミバリオグラムを指標として、地震間のばらつきを偶然的・認識論的不確定性に分離する方法について、Lin et al.(2011)[9)]では明確に示されていない、得られた結果の妥当性の確認も含めた検討を行う。距離減衰式の適用目的を考えた場合、規模の大きな地震を対象とすることが望ましい。しかし、大地震を対象にした場合には、中小地震に比べてその震源位置の空間分解能が疎になることにより、統計的に有意な解が得られない可能性が考えられる。また、規模の大きな地震を対象とした場合にはディレクティビティ効果など、ばらつきに影響を与える要因が中小地震よりも多くなると考えられることから、ばらつきに影響を与える要因を減らし、その解釈をより明確にするために中小地震(4.5≦Mw≦6.0)を対象とした検討を行う。

2. 解析に用いた中小地震データベース

防災科学技術研究所K-NETおよびKiK-netを対象とし、K-NETの運用が開始された1996年から2010年12月までに発生した4.5≦Mw≦6.0かつ震源深さ100km以浅の中小地震で得られた強震記録を収集した。ここで、各地震のMwはF-net、震源深さは気象庁による値を用いた。また、F-netによる震源メカニズム、震源深さ、プレート境界深度を参考に内陸地殻内地震、プレート境界地震、スラブ内地震に分類した。

K-NETとKiK-netで用いられている強震計はトリガー起動方式である。観測された地震動強さがトリガーレベルに近い遠距離では揺れの大きな観測点でのみデータが得られ、これが距離減衰式の評価に悪影響を与えることが指摘されている[15]。K-NET観測点のトリガー値は2～20cm/s^{2}程度に設定されており、2cm/s^{2}以下の観測点が約70%を占めている。そこで、Mw<5.5の地震については外挿となるが、司・翠川(1999)[16]の距離減衰式で5cm/s^{2}以上となる距離以内かつ震源距離150km以内で得られたデータを対象とした。ただし、北海道から東北、九州では火山フロントを通過したデータは検討対象から除外した。

上記の条件に適合しているデータであっても、S波初動が収録されていないデータや大きな振幅が継続しているにも関わらず収録が完了しているデータについても検討対象から除外した。この結果、756地震40193データで構成されるデータベースを構築した。なお、これらのうち165地震8431データが内陸地殻内地震、439地震22242データがプレート境界地震、152地震9520データがスラブ内地震に分類される。図1にデータベースに含まれる地震の震央位置、図2にデータのMwと震源距離の分布を示す。なお、このデータベースでは水平2成分のうち大きな方の値とした最大加速度と最大速度を整理している。

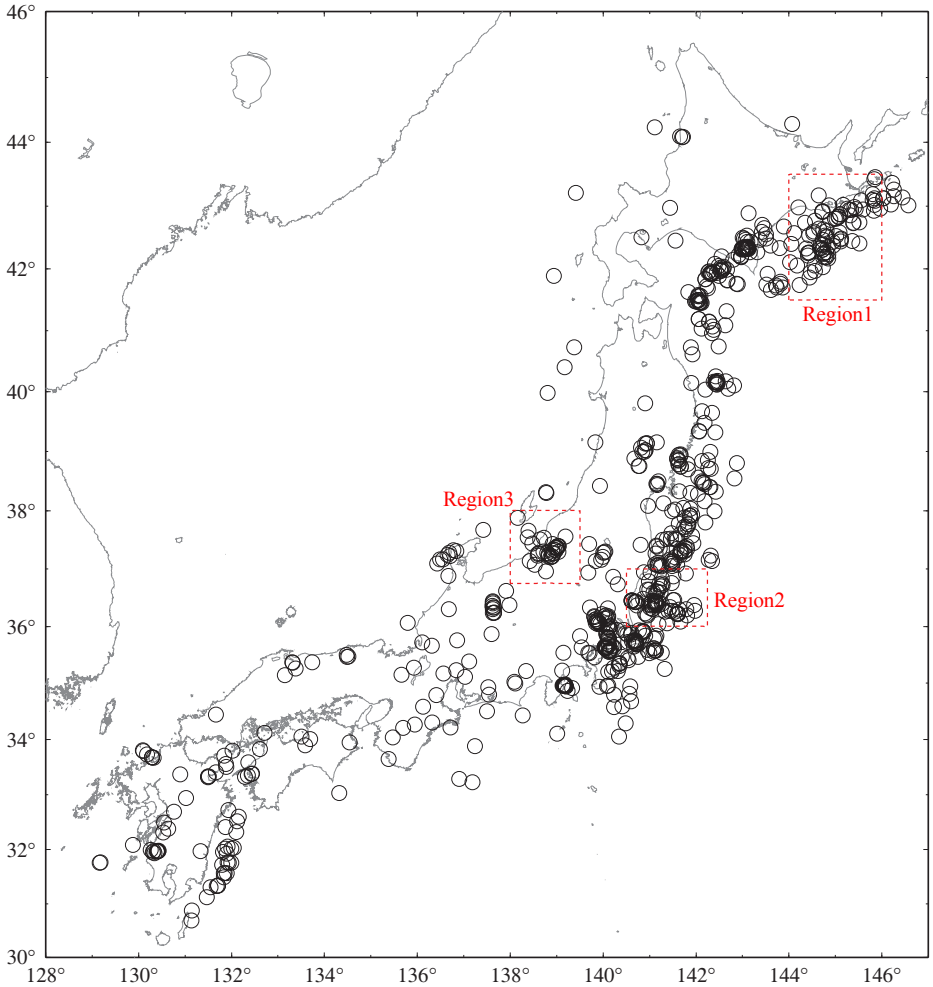


図1　震央分布

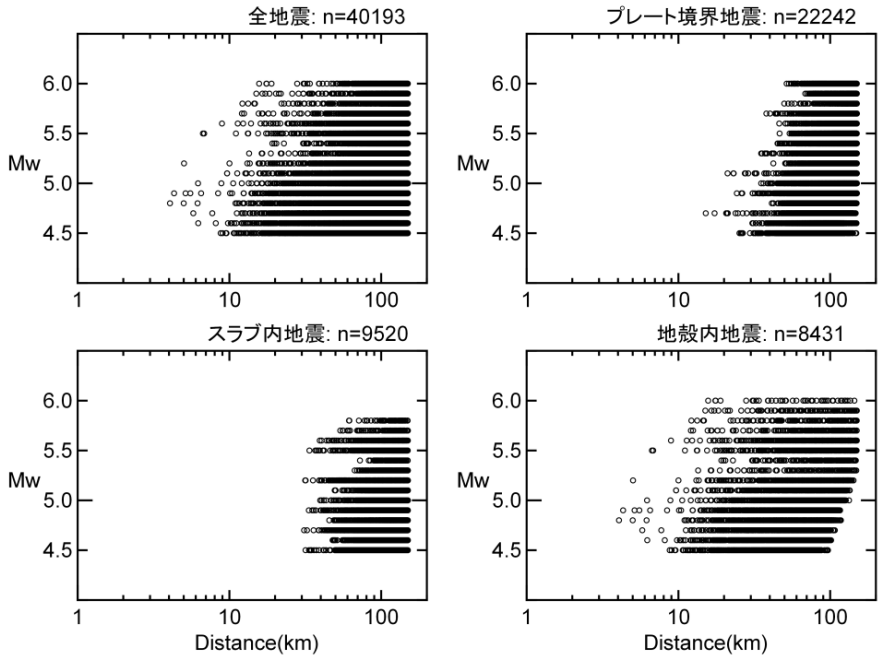


図2　M_wと震源距離の関係

本研究では、距離減衰式の回帰モデルに地表から深さ30mまでの平均S波速度(V_{S30})を説明変数として導入している（3.1で示す(1)式）。そこで、各観測点のPS検層結果に基づいてV_{S30}を求めた。ただし、PS検層の調査深度が30m未満の地点については、司・翠川(1999)[16]および松岡他(2005)[17]の判断基準に基づいて深さ30mまでのS波速度値を推定し、これに基づいてV_{S30}を評価した。これらの基準に一致しない観測点やPS検層結果が公開されていない地点については、防災科学技術研究所J-SHIS[18]の表層地盤データに収録されている、250mメッシュ地形分類に基づいて推定されたV_{S30}を用いた。図3にデータベースに含まれる1667観測点におけるV_{S30}の頻度分布を示す。大部分の観測点が、$V_{S30} \leq 500$(m/s)である。

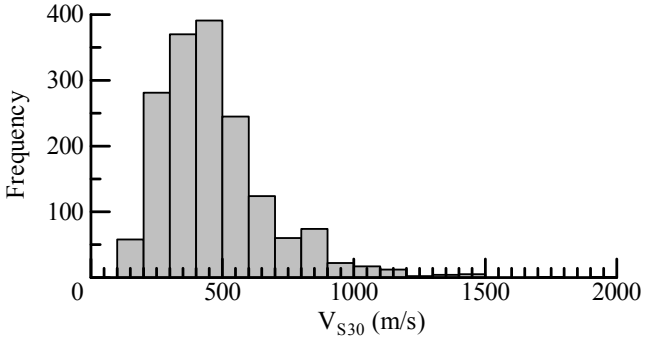


図3　V_{S30}の頻度分布

3. 地震間のばらつきの分析

3.1 最大加速度・最大速度の距離減衰式の評価

作成したデータベースを用いて、距離減衰式の回帰分析を行う。ここでは、距離減衰式による予測値（$\ln Y_{pre}$）と観測値（$\ln Y_{obs}$）の残差（$\ln Y_{obs} - \ln Y_{pre}$）を地震間のばらつき$\eta_i$（inter-event residuals）と地震内のばらつきε_{ij}（intra-event residuals）に分離した線形混合モデルを用い、各回帰係数を最尤法による一段階回帰分析[19]によって評価した。なお、本研究では、地震規模、震源距離、震源深さ、地表から深さ30mまでの平均S波速度を説明変数とした(1)式に示す回帰モデルを設定した。

$$\ln Y_{ij} = aM_i - \ln X_{ij} + bX_{ij} + dD_i + e\ln\frac{V_{S30j}}{V_{ref}} + c + \eta_i + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

ここで、iとjは地震と観測点を示す添え字、Y_{ij}は最大加速度(cm/s^2)または最大速度(cm/s)、M_iは各地震のM_w、X_{ij}は震源距離(km)、V_{S30j}は地表から深さ30mまでの平均S波速度(m/s)、V_{ref}はサイト特性を評価する際に基準とする地盤のV_{S30}(m/s)であり、工学的基盤に相当し、図3の頻度分布において観測点数も比較的多いことから$V_{ref} = 500$(m/s)とした。また、a～eは回帰係数を示している。地震間のばらつきη_iと地震内のばらつきε_{ij}は地震ごと、記録ごとに独立な期待値0の正規ランダム変数と仮定し、地震間のばらつきη_iの対数標準偏差をτ、地震内のばらつきε_{ij}の対数標準偏差をσとする。以下、本研究における標準偏差は全て自然対数で示している。

表1に各回帰係数、地震間のばらつきと地震内のばらつきの標準偏差を示す。Mw5.5以上の地震を対象としている既往の最大加速度・最大速度の距離減衰式[20)~23)]では、τが0.2~0.4程度、σが0.5~0.6程度となる場合が多く、表1に示す結果はこれらよりも大きな値となっている。一方、本研究と同様にMw5.5以下の中小地震を対象とした距離減衰式[24)]では、最大加速度においてτ =0.448、σ =0.670、最大速度ではτ =0.362、σ =0.622となることが示されている。地震内のばらつきの標準偏差は、この結果と同程度となるが、地震間のばらつきの標準偏差は本研究による結果が大きめの値となる。これは、文献24)では内陸地殻内地震のみを対象としているのに対して、本研究ではプレート境界地震やスラブ内地震も対象としているため、対象とした地震の多様性による差異が表れているためと考えられる。

表1　距離減衰式の回帰係数と標準偏差

地震動強さ	回帰係数					標準偏差	
Y	a	b	c	d	e	τ	σ
PGA	1.312	-0.012	0.482	0.021	-0.080	0.522	0.672
PGV	1.701	-0.011	-4.859	0.017	-0.487	0.447	0.625

3.2 地震間のばらつきの基本的な特徴

回帰分析から得られた地震間のばらつきη_iについて基本的な特徴を整理する。図4にη_iの頻度分布と対数正規分布に適合させた結果を示す。本研究による最大加速度および最大速度のη_iとも既往研究[25)]と同様に対数正規分布とみなせることとした。しかし、対数正規分布を仮定することの妥当性を確認する必要性も指摘[26)]されていることから、その確率分布については、より詳細な検討が今後必要である。

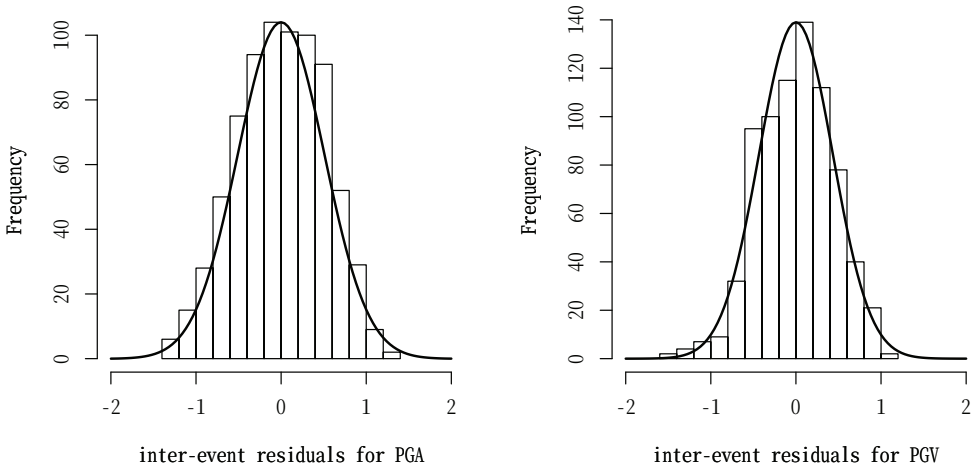


図4　地震間のばらつきの頻度分布

図5にη_iと地震規模（M_w）の関係を示す。図の上段は各地震のη_i、下段はM_wごとのη_iの標準偏差を示している。ただし、M_w≧5.5は地震数が少ないことから、5.5≦M_w≦6.0を計算区間とした標準偏差の値

を示している。τのM_w依存性については、M_wが大きいほどτが小さくなる傾向[27]、その依存性は明瞭ではない[8]ことが指摘されている。図5に示す結果では、文献8)と同様に明瞭なM_w依存性はみられない。

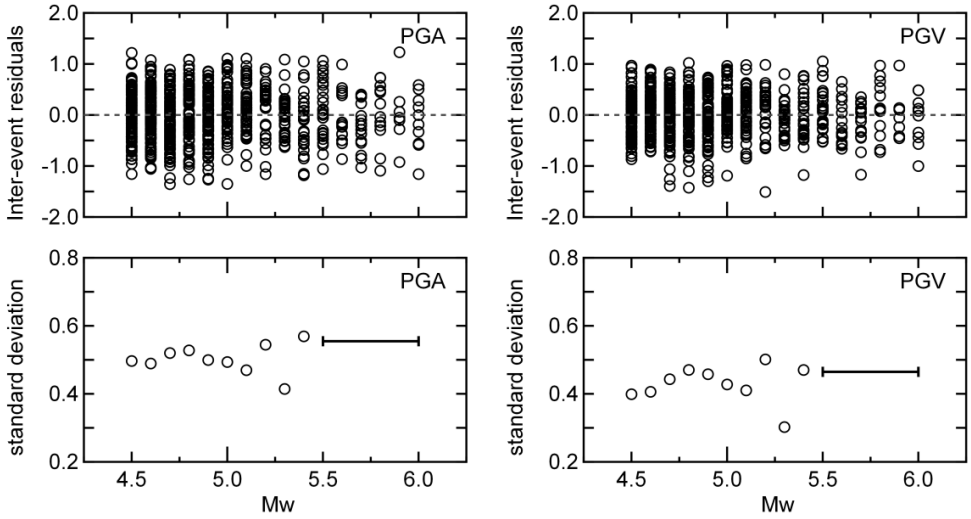


図5　地震間のばらつきと地震規模の関係

図6にη_iと震源深さの関係を示す。図の上段は各地震におけるη_i、下段は震源深さ10kmごとに求めたη_iの標準偏差を示している。ただし、震源深さ80km以深のデータが少ないことから、深さ80km以上については計算区間を20kmとした場合の値を示している。図から、震源が深くなるほどτが大きくなる傾向がみられ、最大加速度値でその傾向が顕著である。池浦・野田(2005)[7]は、地震間のばらつきの要因として伝播経路の違いと震源における地震波の励起特性の違いがあり、後者の影響が支配的であることを指摘している。震源が深い地震は、必然的に伝播距離が長くなるため、浅い地震に比べて速度構造や減衰構造の不均質性の影響をより受けることになり、これにより地震間のばらつきが大きくなることが予測される。また、中小地震の応力降下量に関する分析結果[28]では、スラブ内地震はプレート境界地震よりも応力降下量のばらつきが大きいこと、スラブ内地震については太平洋プレートとフィリピン海プレートに分類した場合に応力降下量の地域性が明瞭にみられることが指摘されており、これにより深い地震ほど地震間のばらつきが大きくなることが予測される。今後、詳細な分析が必要ではあるが、図6に示す結果は、上記のような要因によって生じている可能性が考えられる。

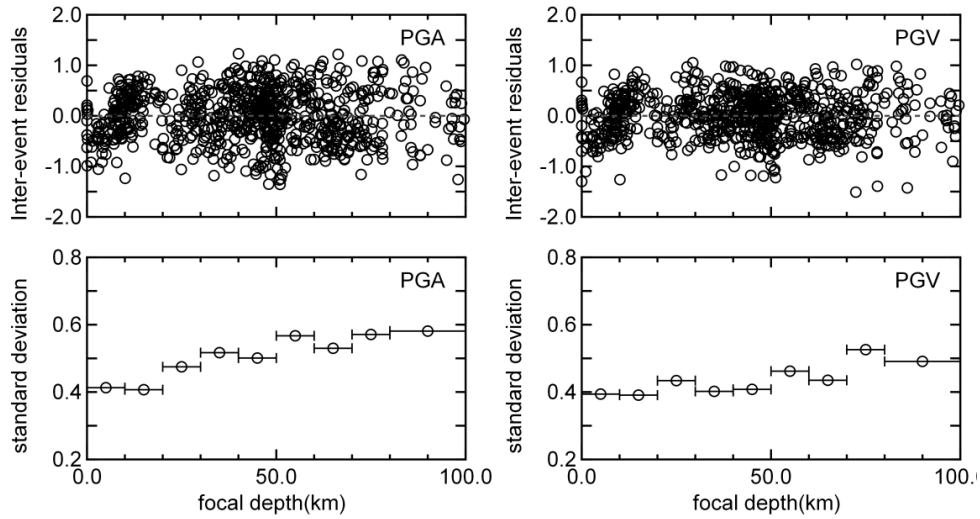


図6　地震間のばらつきと震源深さの関係

4. 地震間のばらつきの偶然的・認識論的不確定性への分離

4.1 分離方法

地震間のばらつきの偶然的・認識論的不確定性への分離は、地球統計学等の分野で多く用いられている、対をなす標本間の非類似度を評価するセミバリオグラム[9),29),30)]を用いて行う。

領域$D \subset R^d$上の確率場を考え、観測点$s \in D$における確率変数$Z(s)$の実現値が観測データであるとし、これが本質的定常性を持つものと仮定する。すなわち、任意の2地点s_1、s_2に対する期待値および分散が$E[Z(s_1) - Z(s_2)] = 0$、$Var[Z(s_1) - Z(s_2)] = 2\gamma(s_1 - s_2)$が仮定される。ここで、距離の差分$h = s_1 - s_2$のみに依存する関数$\gamma(h)$がセミバリオグラムと呼ばれ、未観測地点$s_0$における$Z(s_0)$の予測を行うための通常型クリギング法における係数行列として用いられることで知られている。なお、確率場が二次定常（期待値が空間領域で一定値、2地点の共分散が距離差分のみに依存）ならば本質的定常であることから、同様に$\gamma(h)$が定義できる。

地震$S_i(i = 1{\sim}N)$の震源位置（北緯、東経、深さ）を$u_\alpha(\alpha = 1{\sim}N)$、各地震の地震間のばらつきを$\eta(u_\alpha)$とする。この時、地震間のばらつきの確率場$Z = \{\eta(u_1), \eta(u_2), \cdots, \eta(u_N)\}$が本質的定常性を持つと仮定すると、2地震間の距離の差分hのみに依存する関数としてセミバリオグラム$\gamma(h)$が(2)式で定義される。ここで、セミバリオグラムは、2地震間の共分散に対応する値である。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} Var[\eta(u_\alpha) - \eta(u_{\alpha+h})] = \frac{1}{2}[E\{\eta(u_\alpha) - \eta(u_{\alpha+h})\}^2] \tag{2}$$

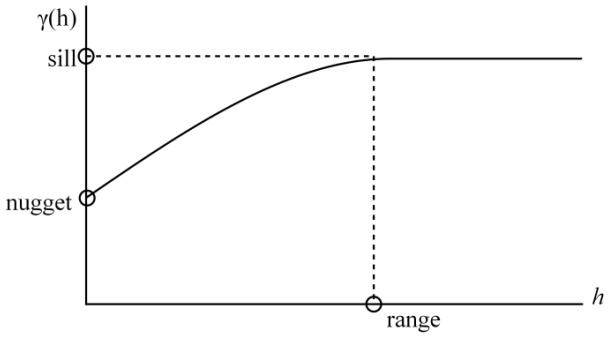


図7　セミバリオグラムの模式図

一般的なセミバリオグラムは図7のようになる。ここで、ナゲット(nugget)は$h = 0$の時の$\gamma(h)$であり、サンプリング間隔よりも小さなスケールでの変動や測定誤差を含む、データから把握不可能な微小な変動で生じる不確定性を示すパラメータ、シル(sill)は$\lim_{h\to\infty}\gamma(h)$に相当するパラメータ、レンジ(range)は空間的な自己相関がなくなる距離を示すパラメータである[29), 30)]。つまり、震源位置がほぼ同じ地震（$\lim_{h\to 0}\gamma(h)$）の場合には、震源や伝播経路がほぼ同じ特性になると仮定すれば、(2)式から求められるナゲットが偶然的不確定性に対応する値と考えることができる。

(1)式の回帰分析から得られた地震間のばらつきを用いたセミバリオグラムの計算は、以下の手順で行う。最初に、震源位置の距離差分をhとして、全ての地震の組合せに対してセミバリオグラム$\hat{\gamma}(h)$を求める。$\hat{\gamma}(h)$は、距離差分hとなる地震のペア数$N(h)$とその地震間のばらつき$\eta(u_\alpha)$および$\eta(u_{\alpha+h})$に基づいて(3)式で定義される。しかし、実際にはhが同じとなる地震の組合せはほとんどなく、(3)式から求められる値は不安定となる。そこで、推定に用いる距離差分の最大値$h_{\max}$を設定し、さらに距離差分hをいくつかの距離区間（h_{w}）に分け、距離区間内に属する$\hat{\gamma}(h)$の平均値を求め、これを標本バリオグラムとする。本研究では、20以上のペアがあるように距離区間を設定した。次に、標本バリオグラムに適合する理論バリオグラム$\gamma(h)$を重み付き最小二乗法によって評価する。本研究では、理論バリオグラムに地球統計学の分野で多く用いられている(4)式に示す球形モデルを用い、hが小さい範囲での適合度を良くするために重み係数を$N(h)/h^2$として評価した。

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \left(\eta(u_\alpha) - \eta(u_{\alpha+h})\right)^2 \tag{3}$$

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1[1.5(h/b) - 0.5(h/b)^3] & 0 < h < b \\ C_0 + C_1 & h \geq b \end{cases} \tag{4}$$

ここで、C_0はナゲット、C_1はシル、bがレンジをそれぞれ示している。

地震間のばらつきの確率場が本質的定常性（あるいは、二次定常性）を持つと仮定した場合、その定理によりバリオグラム関数と共分散関数が同時に考えられることから、(2)式によるセミバリオグラムは相関関数ρを用いて(5)式で表すことができる。(5)式は、$h = 0$では2地点におけるデータの相関が高くなる（$\rho \to 1$）ため$\gamma(h) = \tau_1^2/2$となり、2地点におけるデータが遠く離れている場合（$h \to \infty$）には相関が低下する（$\rho \to 0$）ことで$\gamma(h) = (\tau_1^2 + \tau_2^2)/2$となることを意味している。

$$\gamma(h) = \gamma\left(\eta(u_\alpha), \eta(u_{\alpha+h})\right) = \frac{1}{2}\left[\tau_1^2 + \left[1 - \rho\left(\eta(u_\alpha), \eta(u_{\alpha+h})\right)\right]\tau_2^2\right] \tag{5}$$

偶然的不確定性による地震間のばらつきの標準偏差τ_Aと認識論的不確定性による地震間のばらつきの標準偏差τ_Eとすると、前述したセミバリオグラムの特性から$\tau_1 = \tau_A$、$\tau_2 = \tau_E$と考えることができる。そこで、(5)式および(4)式に示す理論バリオグラムから、τ_Aとτ_EはナゲットC_0およびシルC_1を用いて、(6)および(7)式で求めることができる。また、地震間のばらつき全体での標準偏差τ_Tは、τ_Aとτ_Eが互いに独立であるとした場合に、(8)式で求めることができる。ただし、τ_Aとτ_Eは$h_{\max}$を設定した理論バリオグラムに基づいて求めているため、τ_Tは表1に示すτとは一致しない。

$$\tau_A^2 = 2C_0 \tag{6}$$

$$\tau_E^2 = 2\{(C_0 + C_1)^2 - C_0^2\} \tag{7}$$

$$\tau_T^2 = \tau_A^2 + \tau_E^2 \tag{8}$$

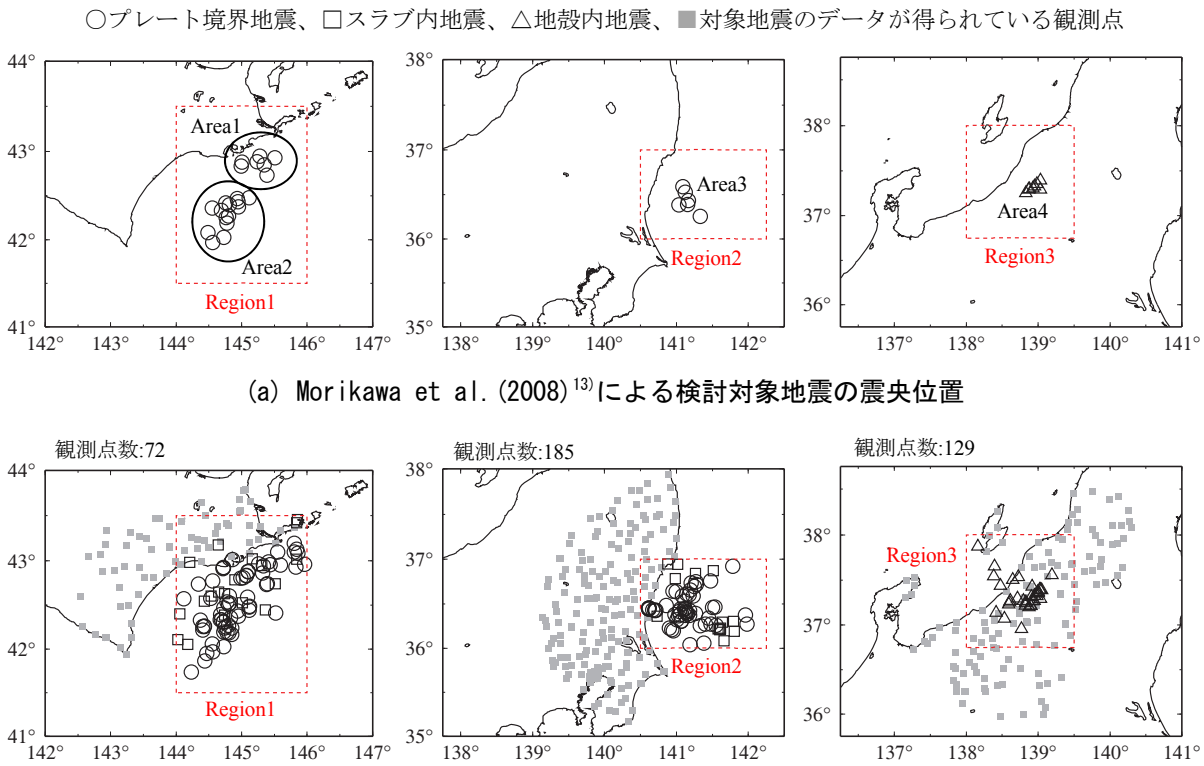
4.2 分離結果の妥当性の確認

Morikawa et al.(2008)[13)]では、6つの狭い震源域内で発生した類似するメカニズムの地震を対象とした検討を行っている。この検討では、震源域と地震のタイプが限定されるため、求められた地震間のばらつきは偶然的不確定性に対応すると考えられる。そこで、これら6つの震源域のうち、本研究で対象とする地震が多く含まれる4つの震源域について、セミバリオグラムに基づいて求めたτ_AとMorikawa et al.(2008)[13)]の結果を比較し、手法の妥当性を確認する。

検討対象とする震源域は、図8(a)に示すMorikawa et al.(2008)[13)]によるArea1~4とする。ここで、Area1は主として2004年11月29日釧路沖の地震(Mj7.1)の余震であり、全てがプレート境界地震である。Area2は、主として2003年十勝沖地震(Mj8.0)の余震であり、全てがプレート境界地震である。Area3は全てがプレート境界地震、Area4は全てが2004年新潟県中越地震の余震である。本研究では、これら各震源域を包絡するように図1および図8(b)に示す3つの解析領域（Region1~3）を設定した。ここで、Area1とArea2は統合し、Region1としている。表2に本研究とMorikawa et al.(2008)[13)]で対象とした地震の比較を示す。

表3に理論バリオグラムの係数、図9にRegion1~3における標本バリオグラムと理論バリオグラムを示す。また、図9にはRegion1と2について、プレート境界地震のみを対象として計算した結果も併せて示している。ただし、スラブ内地震についてはデータが少なく、安定した解が得られないことから評価を行っていない。図9からRegion2の最大加速度において全データによるC_1がプレート境界地震のみによる値よりも大きくなる。これは、図10に示すように、Region2の最大加速度のセミバリオグラムではh =10~15km

におけるスラブ内地震で$\hat{\gamma}(h)$の大きなペアが複数あること、理論バリオグラムに適合させる際にhが小さい範囲に大きな重みを付けて評価しているためと考えられる。一方、Regioin1およびRegion2の最大速度では全データとプレート境界地震のC_0とC_1はほぼ同程度となる。なお、各領域ともプレート境界地震によるデータが大部分を占めていることから、地震タイプによるバリオグラムの違いについては今後の検討課題である。



(a) Morikawa et al.(2008)[13]による検討対象地震の震央位置

(b) 本研究による検討対象地震の震央位置

図8 Morikawa et al.(2008)[13]と本研究の解析対象地震との比較

表2 検討対象地震の比較

No.	解析領域	データの内容
1	Region1	85地震(スラブ内19地震、プレート境界66地震)
	Area1	7地震(2004/11/29のとその余震、全てプレート境界地震)
	Area2	14地震(2003/9/26十勝沖地震の余震、全てプレート境界地震)
2	Region2	71地震(スラブ内14地震、プレート境界57地震)
	Area3	6地震(全てプレート境界地震)
3	Regino3	36地震(全て地殻内地震、2004年新潟県中越・2007年新潟県中越沖地震の余震)
	Area4	8地震(全て地殻内地震、2004年新潟県中越地震の余震)

表3 理論バリオグラムの係数

	Region1		Region2		Region3	
	PGA	PGV	PGA	PGV	PGA	PGV
C_0	0.054	0.062	0.049	0.055	0.018	0.012
C_1	0.087	0.066	0.111	0.087	0.093	0.089
b	45.957	37.904	28.008	24.556	33.804	35.544

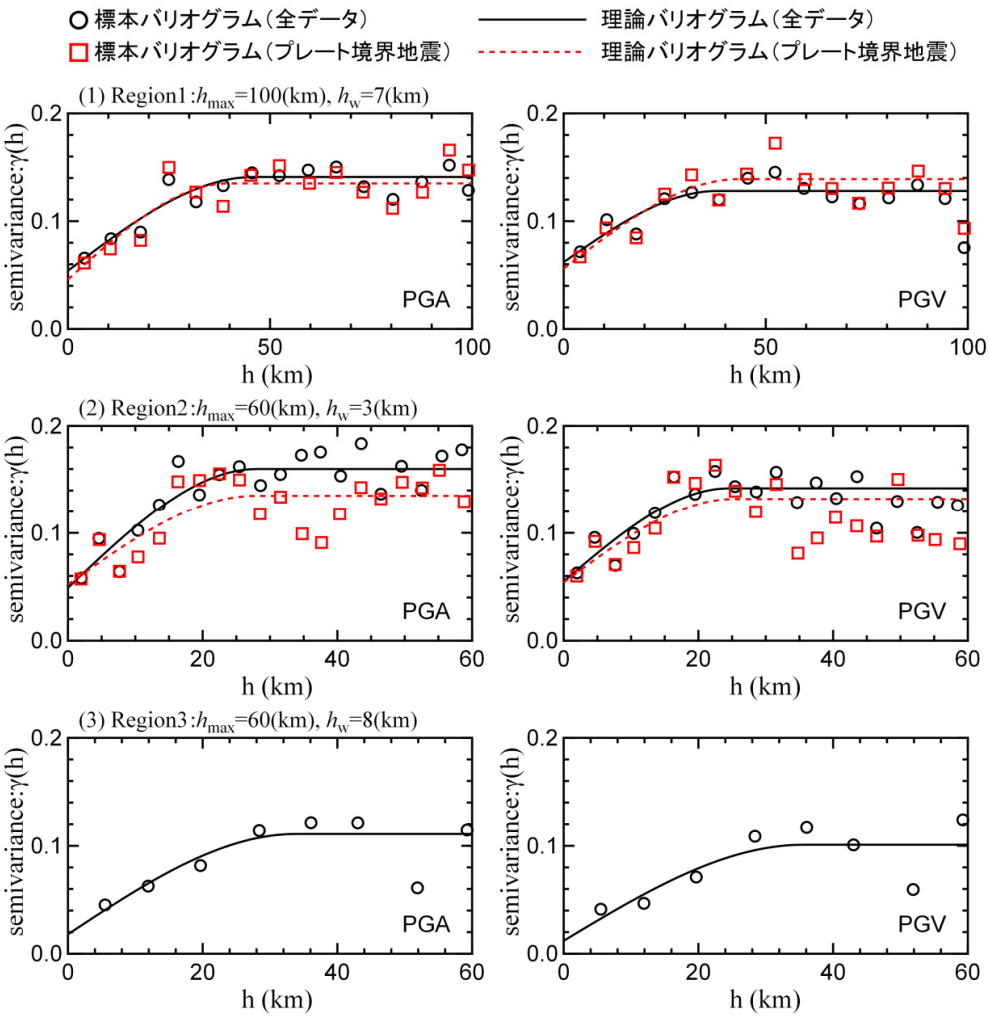


図9　標本バリオグラムと理論バリオグラム

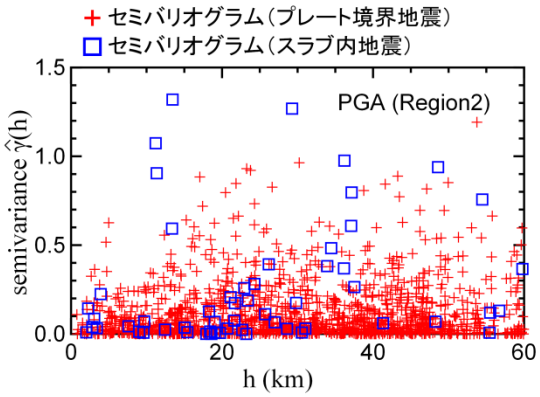


図10　Region2における最大加速度のセミバリオグラム

表4に本研究によるτ_Aおよびτ_EとMorikawa et al.(2008)[13]による地震間のばらつきの標準偏差の比較を示す。τ_Aは最大加速度、最大速度とも解析領域が狭くなるほど小さな値となり、距離減衰式の回帰分析によるτに対して30～80%程度小さな値（0.3τ～0.8τ）となる傾向がみられる。これは、解析領域が狭いほど、そこに含まれる地震の伝播経路や震源特性が類似してくることにより、認識論的不確定性が大きく低減するためと考えられる。

Region1~3の最大加速度、最大速度ともτ_AがMorikawa et al.(2008)[13)]の結果に比べて、同程度あるいはやや大きな値となっている。これは、Morikawa et al.(2008)[13)]では、ある特定の地震の余震や同じ地震タイプのデータに限定して分析しているのに対して、本研究はこれを限定せずに多様なデータを用いているためと考えられる。しかし、両結果はおおむね整合していることから、セミバリオグラムに基づく方法は、Morikawa et al.(2008)[13)]で用いられている方法と異なり、震源域を設定することなく距離の差分のみで簡便に評価可能であり、偶然的・認識論的不確定性の分離に有効な手法であると考えられる。

表4　偶然的不確定性による標準偏差τ_Aおよび認識論的不確定性による標準偏差τ_E

(1)　最大加速度(PGA)

	本研究 Region 1	Morikawa et al. Area 1&2	本研究 Region 2	Morikawa et al. Area 3	本研究 Region 3	Morikawa et al. Area 4
τ_A	0.328	0.273	0.314	0.305	0.190	0.173
τ_E	0.184	-	0.216	-	0.154	-

(2)　最大速度(PGV)

	本研究 Region 1	Morikawa et al. Area 1&2	本研究 Region 2	Morikawa et al. Area 3	本研究 Region 3	Morikawa et al. Area 4
τ_A	0.353	0.351	0.332	0.336	0.157	0.114
τ_E	0.159	-	0.216	-	0.142	-

図1に示す756地震を用いて、(1)式に示す距離減衰式の回帰分析から得られた地震間のばらつきη_iについて、偶然的・認識論的不確定性の分離を行う。表5に理論バリオグラムの係数と標準偏差τ_Aおよびτ_E、図11に標本バリオグラムと理論バリオグラムを示す。なお、表5にはLin et al.(2011)[9)]が台湾における内陸地殻内地震を対象として検討した結果も示している。ただし、Lin et al.(2011)[9)]の最大速度の標準偏差は、周期1秒における擬似加速度応答スペクトルでの値としている。

表5から、本研究による最大加速度および最大速度のτ_Aは表1に示す距離減衰式のτに比べて最大加速度は0.60τ、最大速度は0.78τとなる。Lin et al.(2011)[9)]では、偶然的不確定性の標準偏差は最大加速度、最大速度とも距離減衰式のτよりも30%程度低減することが示されており、本研究と同様の傾向となっている。しかし、本研究とLin et al.(2011)[9)]のτ_Aを比較すると、本研究の方が最大加速度、最大速度とも大きな値となっている。これは、Lin et al.(2011)[9)]が内陸地殻内地震のみを用いているのに対して、本研究ではプレート境界・スラブ内地震も対象としていることによるデータの多様性の違いが表れているためと考えられる。本研究のように、距離減衰式を介した回帰誤差の検討では、用いたデータベースの特性が解析結果に大きな影響を与えると考えられる。PSHAでは、地域特性（例えば、地震活動モデルや地震動強さの距離減衰式とその標準偏差など）を適切に反映させる必要[4),31)]があることから、日本周辺で発生した多様な地震を対象とした本研究による偶然的不確定性による地震間のばらつきの標準偏差は、日本国内を対象としたPSHAを行うために有用な結果であると考えられる。

表5に示すように距離減衰式のτに対するτ_Aの低減率は最大速度よりも最大加速度の方が大きい。池浦・野田(2005)[7)]では、震源地を限定した場合には地震間のばらつきは長周期よりも短周期でより低減することを指摘しており、本研究による結果もこの傾向と一致する。Rhoades(2007)[32)]は、地震間のばらつきにマグニチュードの不確定性(推定精度)が大きな影響を与えていることを指摘している。また、Abrahamson and Silva(2007)[33)]は、マグニチュードの不確定性が長周期における地震間のばらつきに大きな影響を与えることを指摘している。より詳細な要因分析が今後必要ではあるが、これらの結果から、最大加速度と最大速度におけるτに対するτ_Aの低減率の違いは、マグニチュードの不確定性がその要因の一つであると考えることが可能である。

表5　理論バリオグラムの係数と標準偏差τ_Aおよびτ_E

(1) 理論バリオグラムの係数

	PGA	PGV
C_0	0.049	0.062
C_1	0.210	0.123
b	120.687	95.789

(2) 標準偏差τ_Aおよびτ_E

	PGA		PGV	
	本研究	Lin et al.(2011)	本研究	Lin et al.(2011)
τ_A	0.315	0.247	0.354	0.314
τ_E	0.361	0.254	0.247	0.323

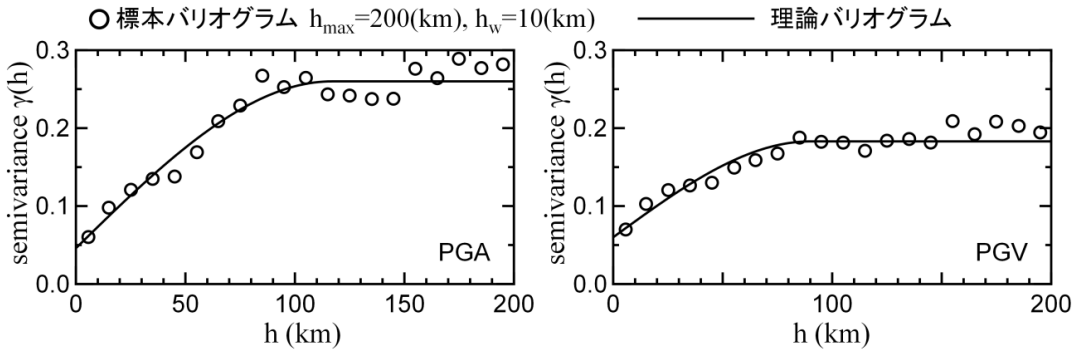


図11　全地震を対象とした標本バリオグラムと理論バリオグラム

5. まとめ

本研究では、日本で発生した中小地震(4.5≦Mw≦6.0)における最大加速度、最大速度を対象とした距離減衰式を求め、この回帰分析から得られる地震間のばらつきηとその標準偏差τの基本的な特徴を整理するとともに、セミバリオグラムを用いた偶然的・認識論的不確定性への分離方法について検討を行った。結果を以下にまとめる。

1) 距離減衰式における地震間のばらつきηは対数正規分布に従う。また、地震間のばらつきの標準偏差τには明瞭な地震規模依存性はみられないが、震源が深いほど値が大きくなる傾向がみられた。震源深さ依存性の要因については今後詳細な分析が必要であるが、伝播経路の不均質性や既往研究で指摘されている震源が深い地震ほど応力降下量のばらつきが大きくなる特性に影響を受けている可能性が考えられる。
2) セミバリオグラムを用いた偶然的・認識論的不確定性の分離方法を3つの震源域に適用し、偶然的不確定性の標準偏差τ_Aと認識論的不確定性の標準偏差τ_Eを評価した。これと同じ震源域を対象とした既往研究の分析結果と本研究によるτ_Aは同程度の値となることを示し、セミバリオグラムに基づいた分離方法の妥当性を確認した。
3) 距離減衰式の回帰分析から得られた地震間のばらつきにおけるτ_Aは、最大加速度で0.315、最大速度で0.354となる。この値は、距離減衰式における地震間のばらつきの標準偏差τに対して最大加速度でその60%程度、最大速度でその80%程度となる。

PSHAでは偶然的不確定性のみを考慮するべきであるが、実際にはエルゴード性を仮定して距離減衰式の標準偏差を確率モデルに用いている。本研究で求めた地震間のばらつきの偶然的不確定性による標準偏差は距離減衰式の標準偏差よりも小さな値となり、PSHAの高精度化のために有用な結果であると考えられる。今後は、地震内のばらつきについても同様の分析を行う予定である。

謝　辞

本研究では、気象庁による震源情報、防災科学技術研究所K-NETおよびKiK-netで得られた強震記録と地盤データ、F-netによる震源メカニズム解、J-SHISによる表層地盤データを利用しました。防災科学技

術研究所の森川信之博士には文献13)における解析結果を提供していただきました。関係各位に記して謝意を表します。また、一部の図の作成にはGMT[34)]を用いました。

参考文献

1) (独)防災科学技術研究所：地震動予測地図の工学利用－地震ハザードの共通情報基盤を目指して－，地震動予測地図工学利用検討委員会報告書，防災科学技術研究所研究資料，第258号，2004.
2) Anderson, J.G. and J.N. Brune : Probabilistic Seismic Hazard Analysis without the Ergodic Assumption, Seism. Res. Let., Vol.70, No.1, pp.19-28, 1999.
3) Toro, G.R, N.A. Abrahamson, and J.F. Schneider : Model of Strong Ground Motions from Earthquakes in Central and Eastern North America : Best Estimates and Uncertainties, Seism. Res. Let., 68, pp.41-57, 1997.
4) Senior Seismic Hazard Analysis Committee : Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts, NUREG/CR-6372, 1997.
5) Atik, L.A., N. Abrahamson, J.J. Bommer, F. Scherbaum, F. Cotton, and N. Kuehn : The Variability of Ground-Motion Prediction Models and Its Components, Seism. Res. Let., Vol.81, pp.794-801, 2010.
6) Douglas, J. : Ground-motion prediction equations 1964-2010, PEER Report 2011/102, Pacific Earthquake Engineering Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, 2011.
7) 池浦友則・野田静男：同一地点における地震動応答スペクトルのばらつき　－地震規模と震源距離がそれぞれ等しい強震記録ペアの分析－，日本地震工学会論文集，第5巻，第3号，pp.12-30，2005.
8) 翠川三郎・大竹雄：地震動強さの距離減衰式にみられるバラツキに関する基礎的分析，日本地震工学会論文集，第3巻，第1号，pp.59-70，2003.
9) Lin, P-S., B. Chiou, N. Abrahamson, M. Walling, C-T. Lee, and C-T. Cheng : Repeatable Source, Site, and Path Effects on the Standard Deviation for Empirical Ground-Motion Prediction Models, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.101, pp.2281-2295, 2011.
10) Chen, Y-H., and C-C. P. Tsai : A New Method for Estimation of the Attenuation Relationship with Variance Components, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.92, pp.1984-1991, 2002.
11) Atkinson, G.M. : Single-Station Sigma, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.96, pp.446-455, 2006.
12) Rodriguez-Marek, A., G.A. Montalva, F. Cotton, and F. Bonilla : Analysis of Single-Station Standard Deviation Using the KiK-net Data, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.101, pp.1242-1258, 2011.
13) Morikawa, N., T. Kanno, A. Narita, H. Fujiwara, T. Okumura, Y. Fukushima, and A. Guerpinar : Strong motion uncertainty determined from observed records by dense network in Japan, J. Seismol., 12, pp.529-546, 2008.
14) Anderson, J.G., and Y. Uchiyama : A Methodology to Improve Ground-Motion Prediction Equations by Including Path Corrections, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.101, pp.1822-1846, 2011.
15) Fukushima, Y., and T. Tanaka : A New Attenuation Relation for Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.80, pp.757-783, 1990.
16) 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，第523号，pp.63-70，1999.
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) 防災科学技術研究所：地震ハザードステーションJ-SHIS，http://www.j-shis.bosai.go.jp/
19) Abrahamson, N.A. and R.R. Youngs : A Stable Algorithm for Regression Analyses Using the Random Effects Model, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.82, pp.505-510, 1992.
20) 翠川三郎・大竹雄：震源深さによる距離減衰特性の違いを考慮した地震動最大加速度・最大速度の距離減衰式，第9回日本地震工学シンポジウム論文集(CD-ROM)，論文番号117，2002.
21) Zhao, J.X., J. Zhang, A. Asano, Y. Ohno, T. Oouchi, T. Takahashi, H. Ogawa, K. Irikura, H.K. Thio, P.G. Somerville, Y. Fukushima, and Y. Fukushima : Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.96, pp.898-913, 2006.
22) Boore, D.M., and G.M. Atkinson : Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal

Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01s and 10.0s, Earthquake Spectra, Vol.24, pp.99-138, 2008.
23) Campbell, K.W., and Y. Bozorgnia : NGA Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damped Linear Elastic Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10s, Earthquake Spectra, Vol.24, pp.139-171, 2008.
24) Chiou, B., R. Youngs, N. Abrahamson, and K. Addo : Ground-Motion Attenuation Model for Small-To-Moderate Shallow Crustal Earthquakes in California and Its Implications on Regionalization of Ground-Motion Prediction Models, Earthquake Spectra, Vol.26, pp.907-926, 2010.
25) Jayaram, N., and J.W. Baker：Statistical Tests of the Joint Distribution of Spectral Acceleration Values, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.98, No.2231-2243, 2008.
26) (独)防災科学技術研究所：全国を概観した確率論的地震動予測地図作成手法の検討，防災科学技術研究所研究資料，第275号，2005.
27) Youngs, R.R., N. Abrahamson, F.I. Makdisi, and K. Sadigh : Magnitude-Dependent Variance of Peak Ground Acceleration, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.85, pp.1161-1176, 1995.
28) 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，Vol.27，2003.
29) Goovaerts, P.：Geostatistics for Natural Resources Evaluation, Oxford University Press, New York, 1997.
30) Cressie, N.A.C.：Statistics for Spatial Data, revised edition, John Wiley and Sons, New York, 1993.
31) International Atomic Energy Agency : Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations, IAEA Safety Standards, Specific Safety Guide No.SSG-9, 2010.
32) Rhoades, D.A. : Estimation of Attenuation Relations for Strong-Motion Data Allowing for Individual Earthquake Uncertainties, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.87, pp.1674-1678, 1997.
33) Abrahamson, N.A. and W.J. Silva：Abrahamson and Silva NGA Ground Motion Relations for the Geometric Mean Horizontal Component of Peak and Spectral Ground Motion Parameters, Preliminary PEER Report dated July 9, 2007. Berkeley, CA: Pacific Earthquake Engineering Research Center.
34) Wessel, P., and W.H.F. Smith : New, improved version of Generic Mapping Tools released, EOS, AGU, 1998.

（受理：2012年8月31日）
（掲載決定：2012年12月17日）

Separation of Aleatory and Epistemic Uncertainty from Inter-Event Residuals in Ground Motion Prediction Equations

UCHIYAMA Yasuo [1)] and Midorikawa Saburoh [2)]

1) Member, Senior Research Engineer, Technology Center, Taisei Corporation, Dr. Eng.
2) Member, Professor, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

ABSTRACT

Ground-motion prediction equations are developed by regression analysis based on datasets of recorded ground-motion parameters at multiple stations during different earthquakes and in various source regions. The present probabilistic seismic hazard analysis applies the standard deviation of these equations to evaluate the hazard at a specific site (the ergodic assumption). The standard deviation has a strong influence on the results of

probabilistic seismic hazard analysis at long return period. In the ground motion prediction equations, there is inevitably some mixing of epistemic uncertainty into the model of aleatory uncertainty. To improve the results of hazard analysis, it is important to quantify the aleatory uncertainty by removing the ergodic assumption. In this paper, the semivariogam procedure is adopted to separate of aleatory and epistemic uncertainty from the inter-event residuals in ground motion prediction equations for small-to-moderate earthquakes. The standard deviations of aleatory uncertainty in inter-event residuals are 0.315 for PGA and 0.354 for PGV. These values are about 40% smaller for PGA and about 20% smaller for PGV when compared the standard deviations of the whole data set.

Key Words: Ground Motion Prediction Equations, Small-to-Moderate Earthquakes, Inter-event Residuals, Aleatory Uncertainty, Epistemic Uncertainty, Semivariogram