

既往の距離減衰式を巨大地震に対応させるための補正項の導出

加藤, 裕也
九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻 : 修士課程

神野, 達夫
九州大学人間環境学研究院都市・建築学部門

<https://doi.org/10.15017/1515824>

出版情報 : 都市・建築学研究. 26, pp. 49-54, 2014-07-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門
バージョン :
権利関係 :



既往の距離減衰式を巨大地震に対応させるための補正項の導出

Additional Correction Terms for Existing Ground Motion Prediction Equation Corresponding M9 Earthquake

加藤裕也*, 神野達夫**

Yuya KATOU and Tatsuo KANNO

In this study, we suggest correction terms for an existing ground motion prediction equation corresponding magnitude 9 earthquake. After the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, the importance of accurate prediction of seismic motion has been reconfirm. However, the existing ground motion prediction equation would overestimate seismic motion by the huge earthquake of magnitude 9 classes. Therefore, in order to improve the accuracy of it, correction terms for the existing ground motion prediction equation are obtained by regression analysis.

Keywords : *Ground Motion Prediction Equation, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Seismic Motion, Magnitude*
距離減衰式, 東北地方太平洋沖地震, 地震動, マグニチュード

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（東日本大震災）により我が国は未曾有の被害を被った。この地震以降、阪神淡路大震災から15年以上が過ぎ薄れかけていた地震防災対策に関する意識は非常に高まっている。

1995年の阪神淡路大震災以降、我が国ではK-NET、KiK-net¹⁾等の強震観測網の整備が防災科学研究所などの研究機関を中心に進められてきた。それにより我が国は世界でも有数の高密度地震観測網を有し、その観測網で得られた強震記録の統計回帰分析によって、地震調査委員会による地震動予測地図にも用いられる距離減衰式である司・翠川(1999)²⁾をはじめ数多くの距離減衰式が提案されている。距離減衰式は、最大加速度(PGA)や最大速度(PGV)、加速度応答スペクトルなどを簡便な式を用いて予測する経験式であり、計算が容易で強震動の平均的な特性をよく表すことから、強震動予測の経験的な手法の一つとして、地震被害想定のための地震動評価や詳細な地震動シミュレーション結果の検証など様々な場面で利用されている。

一方、これまでに観測された巨大地震や東北地方太平洋沖地震の観測記録の分析からは、モーメントマグ

ニチュード(M_w)が増加してもPGAやPGVはそれほど大きくなり、巨大地震がこれまでに提案されている多くの距離減衰式の適用範囲外であることを承知の上で、既存の距離減衰式で $M_w=9.0$ の地震動を計算すると、その予測値は観測値を大きく上回ることが司・他(2011)³⁾において指摘されている。

そこで本研究では、観測された強震記録に基づいて、距離減衰式によるM9クラスの地震動の予測値が観測値を過大評価する原因について、マグニチュードに関連する項に注目し、既存の距離減衰式を用いてM9クラスを含む巨大地震の地震動を予測することを可能にするために必要な補正項の検討を行う。

2 地震動データベース

本研究で用いた地震動データベースの構築に当たってはKanno et al. (2006)⁴⁾に準拠している。すなわち、Kanno et al. (2006)で用いた2003年までのデータベースにK-NET、KiK-net、気象庁で観測された2011年までの地震を加えて構築されている。震源位置は気象庁による一元化震源情報を用いており、防災科学研究所のF-net⁵⁾で決められた値を用いた。ここで速度波形の算出では、データのSN比を考慮する必要があるため、本研究では周期10秒のローカットフィルターを用いた。また、震源から観測点までの距離に関しては、断層モ

* 都市共生デザイン専攻 修士課程

** 都市・建築学部門

デルが明らかな地震については断層最短距離、それ以外の地震については震源距離を用いた。

3 東北地方太平洋沖地震の観測記録と既存の距離減衰式の対応

既存の距離減衰式が巨大地震を過大評価する要因について考察するために、図1に我が国で観測された $M_w=6.0$ 、 7.0 、 8.0 、 9.0 の地震記録の PGA および PGV と既存の距離減衰式による距離減衰曲線の比較を示す。本検討では本論文で構築したデータベースから地震を抽出した。比較するために用いた地震を表1に示す。用いた距離減衰式は、司・翠川 (1999)、Kanno et al. (2006)、佐藤 (2010) ⁶⁾ である。司・翠川 (1999) は日本で最も使用されている距離減衰式で、震源深さや地盤タイプを考慮した距離減衰式である。Kanno et al. (2006) はそれまでにない非常に膨大なデータから導き

出された加速度応答スペクトルにも対応した距離減衰式であり、司・翠川 (1999) とは違い震源深さや断層タイプのパラメータを設定していない。佐藤 (2010) は比較的新しい距離減衰式の一つで、プレート間、スラブ内 (プレート内) 地震を対象とし、上下動にも対応する特徴を持つ。以下にそれぞれの式を示す。

1. 司・翠川 (1999)

$$\log pre = aM_w + hD + \sum d_i S_i + e - kX - \log(X + c) \quad (1)$$

2. Kanno et al. (2006)

$$\log pre = a_1 M_w + b_1 X + c_1 - \log(X + d_1 10^{e_1 M_w}) \quad (D \leq 30 \text{ km}) \quad (2)$$

$$\log pre = a_2 M_w + b_2 X + c_2 - \log(X) \quad (D > 30 \text{ km}) \quad (3)$$

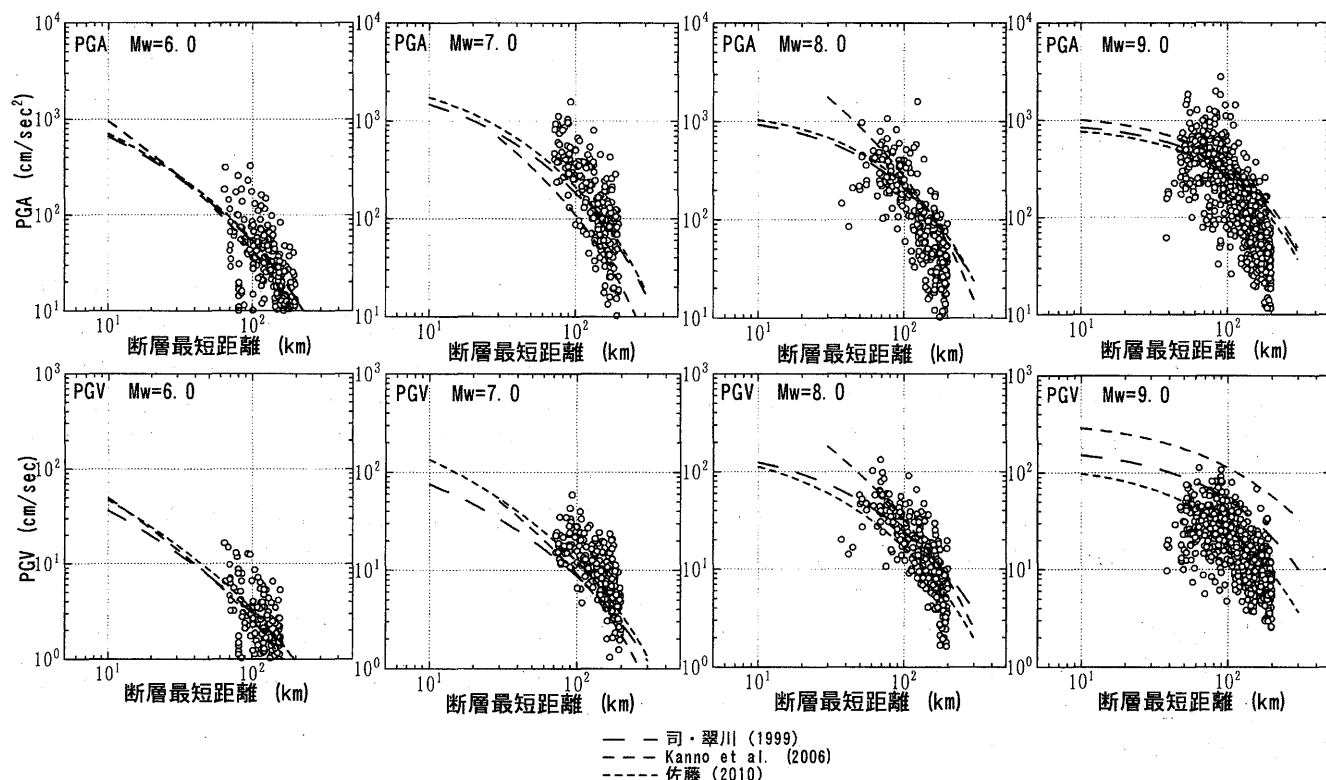


図1 $M_w 6.0 \sim 9.0$ の地震記録における3式の比較

表1 比較に用いた地震

| Mw | 震源時間 | 震央 | | 震源深さ (km) | 地震タイプ | 観測点数 |
|-----|-------------------|-------|--------|-----------|-------|------|
| | | 経度 | 緯度 | | | |
| 6.0 | 2000年07月21日03時39分 | 31.95 | 130.30 | 9.24 | プレート内 | 241 |
| 7.0 | 2003年05月26日18時24分 | 38.82 | 141.65 | 72.03 | プレート内 | 209 |
| 8.0 | 2003年09月26日04時50分 | 41.78 | 144.08 | 45.07 | プレート間 | 282 |
| 9.0 | 2011年03月11日14時46分 | 35.60 | 141.50 | 23.7 | プレート間 | 622 |

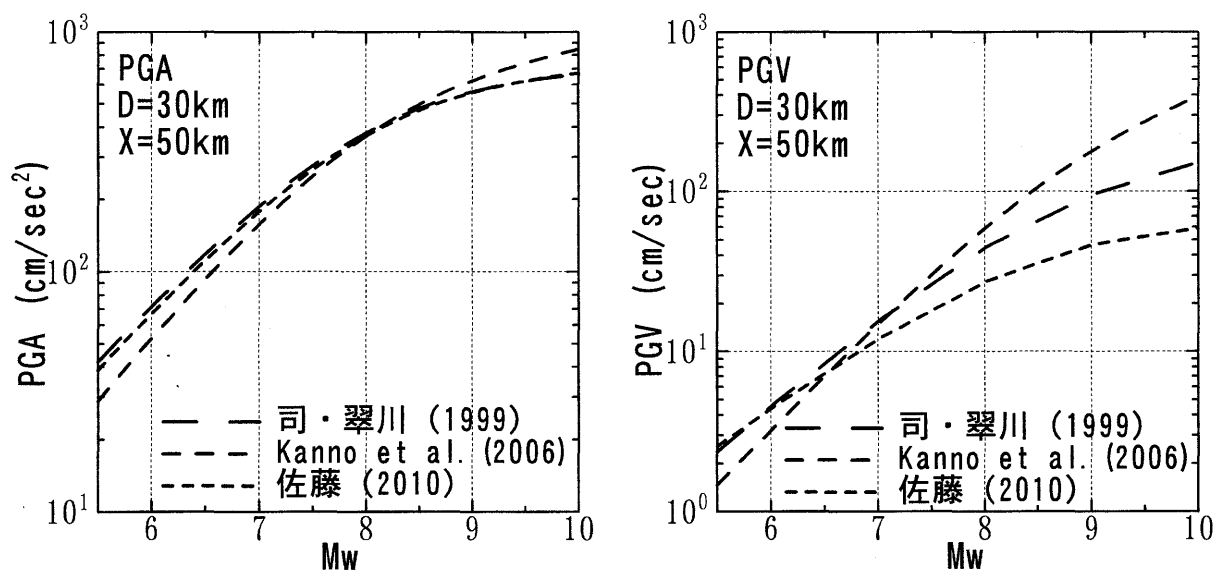


図2 距離減衰式による予測値と M_w の関係

3. 佐藤 (2010)

$$\log pre = a_3 M_w + h_{sub} \log D + h_{sla} \log D - b_3 X - \log(X + d_3 10^{0.50 M_w}) + c_3 \quad (4)$$

ここで、 pre は予測値、 M_w はモーメントマグニチュード、 D は震源深さ (km)、 S_i は断層タイプ、 X は断層最短距離 (km) を表し、司・翠川 (1999) における a 、 h 、 d_i 、 e 、 k 、 c 、そして Kanno et al. (2006) における a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1 、 e_1 、 a_2 、 b_2 、 c_2 、佐藤 (2010) における a_3 、 h_{sub} 、 h_{sla} 、 b_3 、 c_3 、 d_3 はそれぞれの式における回帰係数を示す。

それぞれの計算条件は司・翠川 (1999) は PGA を地表の予測値とし、PGV は Midorikawa et al. (1994)⁷⁾ において提案された地盤増幅率と平均 S 波速度 ($AVS30$) の関係式を用いて標準的地盤の最大速度としている。Kanno et al. (2006) は PGA、PGV とともに地表における予測値としており、佐藤 (2010) は PGA、PGV とともに佐藤 (2010) にて求められる全観測点のサイト係数の平均値について算出している。なお、 $M_w=9.0$ はそれぞれの距離減衰式の適用範囲外であることに留意されたい。

PGA の距離減衰曲線は既存の距離減衰式の間でそれほど大きな違いは見られないが、 M_w が大きくなるにつれて観測値を過大評価する。一方、PGV では、佐藤 (2010) は比較的良好に観測値を再現しているが、司・翠川 (1999) や Kanno et al. (2006) では、 $M_w=9.0$ の場合の観測値を大きく上回り、司・他 (2011) での指摘されている M_w が大きくなると観測値を過大評価するという研究と調和的である。

図2は、プレート間地震、断層最短距離 $X=50\text{km}$ 、震源深さ $D=30\text{km}$ 、標準的な地盤 ($AVS30=300\text{m/s}$) におけるそれぞれの距離減衰式による予測値と M_w の関係を表す。

PGA、PGV いずれの場合においても M_w が大きくなるにしたがって予測値が大きくなる傾向は変わらず、PGA では佐藤 (2010) の予測値が他に比べて大きい、その傾きについて、それぞれの距離減衰式で特に大きな差は見られない。一方、PGV では、佐藤 (2010) に比べて司・翠川 (1999) や Kanno et al. (2006) の傾きが大きくなっている。つまり、これら2つの距離減衰式は M_w の大きさに予測値の大きさの依存度が高く、過大評価した原因であると推察される。

以上のことから、本研究では距離減衰式の M_w に関する項について補正項の導出を試み、考察を行う。

4 回帰分析

本研究では現在日本において最も有名で、確率論的地震動予測地図⁸⁾の作成など広範に利用されている司・翠川 (1999) により提案される(1)式で表される距離減衰式を使用する。

回帰分析に用いた地震データは先のデータベースから、司・翠川 (1999) に準拠して、以下の条件で選別した。

- 1) M_w が 5.8 以上である。
- 2) 地表の記録である。
- 3) 直交する水平動2成分が記録されている。
- 4) 断層最短距離が 200km 以下である。
- 5) 震源深さが 6~120km までである。
- 6) 10 以上の観測点で記録された地震である。

また、PGV は $AVS30$ を用いて、司・翠川 (1999) と同様に Midorikawa et al. (1994) で提案される補正により硬質地盤上のものとしている。本研究において地震タイプは、地殻内地震、プレート間地震およびプレート内地震の3種類としている。なお、本研究のデータバ

ースにおける PGA および PGV は、それぞれ加速度および速度波形の水平動の直交する 2 成分の時間領域におけるベクトル合成波形から算出している。一方、司・翠川（1999）では PGA、PGV のデータの最大振幅値として、水平 2 成分の内の大きな方の値を最大振幅値として採用している。前者の方法による PGA、PGV は後者に比べて経験的に 1 割程度大きいと思われるが、本研究では同等であると仮定した。

本研究では、(1) 式における M_w 項 (aM_w) および定数項 (e) の和を A とおき、地震毎に回帰分析を行い、 A の値を求めた。その際、震源近傍のデータの影響を強く反映させるために、翠川・大竹（2002）⁹⁾ で提案される断層最短距離による重み付け ($6.0 (X \leq 25\text{km})$ 、 $3.0 (25\text{km} < X \leq 50\text{km})$ 、 $1.5 (50\text{km} < X \leq 75\text{km})$ 、 $1.0 (X > 75\text{km})$) を行う。

回帰分析の対象は A であり、それ以外の係数は司・

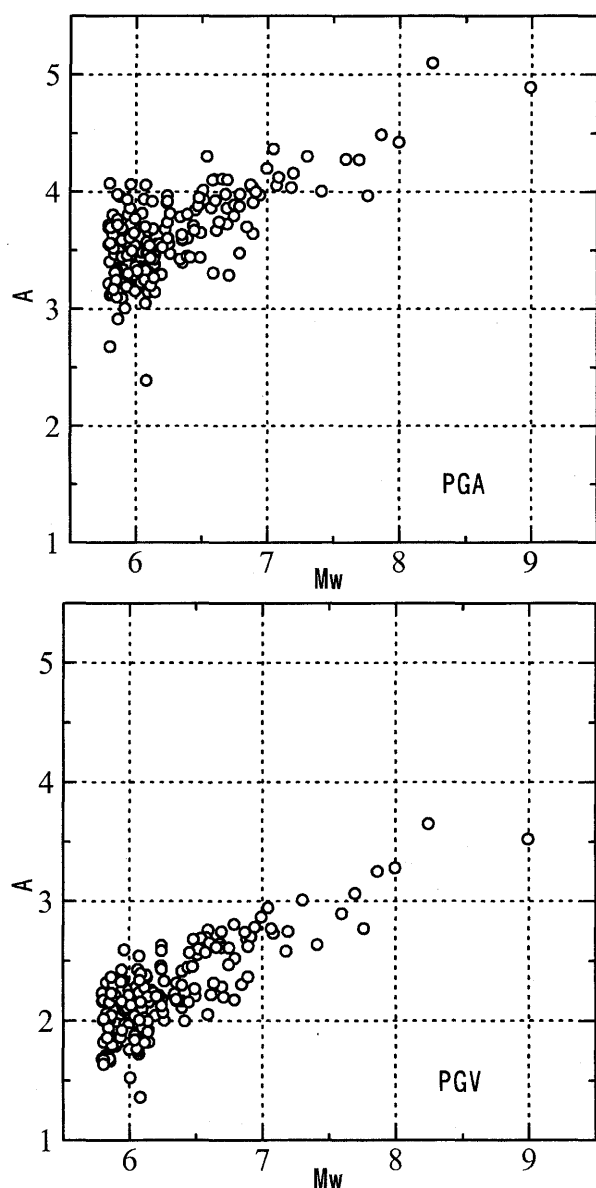


図3 係数 A と M_w

翠川（1999）の係数をそのまま用いている。算出された A と M_w の関係を合わせて図3に示す。

PGA、PGV ともに M_w が 7~7.5 程度までは、係数 A は直線的に増加するが、特に PGA において M_w が 8 で頭打ちする傾向が見られる。 $M_w=9$ の地震が観測される以前はこの頭打ちの傾向が明確ではなかったため、既存の距離減衰式の研究では M_w と係数 A に対して一定の関係、すなわち一次式の関係を保定して回帰分析を行っていた。そのため、 $M_w=9$ に適用すると係数 A は過大に評価されることになり、予測値が観測値を大きく上回る要因となる場合がある。また、PGV に比べて PGA は $M_w=6$ 前後の係数 A の値に大きなばらつきが見られた。

5 M_w に関する補正項の導出

定式化を行う際のモデル関数には、

$$A = \alpha_1 M_w + \beta_1 \quad (5)$$

$$A = \alpha_2 M_w^2 + \beta_2 M_w + \gamma_2 \quad (6)$$

の 2 種類を用いた。なお、ここで、 α_1 、 β_1 、 α_2 、 β_2 、 γ_2 は回帰係数である。なお、(6) 式の場合は、想定される最大のマグニチュードを 10 とし、マグニチュード 10 までモデル関数が単調に増加するという条件、つまり、 $\beta_2 / (2\alpha_2) < -10$ (7)

を概ね満たすものとする。

また、補正項を導出するにあたり、司・翠川（1999）において地震タイプによる場合分けがなされているため、本研究においても地震タイプ毎に補正項を導き出すこととする。定式化を行うに当たって、 M_w ごとに地震数に大きな偏りがあるため、回帰分析結果には地震数が多い小さな地震の影響が強く反映される。そこで、データベース内の地震数の分布を参考にデータに重み付けを行った。重み付の係数は $1.0 (5.8 \leq M_w < 6.5)$ 、 $2.0 (6.5 \leq M_w < 7.5)$ 、 $4.0 (7.5 \leq M_w < 8.5)$ 、 $8.0 (8.5 \leq M_w)$ とした。回帰分析の結果得られた係数を表2に示す。

表2 回帰分析により得られた各係数

| | α_1 | β_1 | α_2 | β_2 | γ_2 |
|-------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
| PGA | | | | | |
| 地殻内 | 0.41 | 1.19 | 0.01 | 0.21 | 1.88 |
| プレート間 | 0.49 | 0.58 | -0.02 | 0.71 | -0.21 |
| プレート内 | 0.54 | 0.14 | -0.20 | 3.23 | -8.82 |
| PGV | | | | | |
| 地殻内 | 0.54 | -1.00 | -0.07 | 1.45 | -4.10 |
| プレート間 | 0.53 | -1.08 | -0.06 | 1.47 | -4.43 |
| プレート内 | 0.60 | -1.65 | -0.22 | 3.51 | -11.32 |

6 マグニチュード補正項の考察

本研究で求めた M_w の一次式を用いた場合の M_w 項を $g_1(M_w)$ 、二次式を用いた場合を $g_2(M_w)$ 、司・翠川 (1999) の M_w 項を $g_0(M_w)$ とすると、一次式を用いた場合の補正項は、

$$R_1 = g_1(M_w) - g_0(M_w) \quad (8)$$

二次式を用いた場合の補正項は、

$$R_2 = g_2(M_w) - g_0(M_w) \quad (9)$$

となり、補正項を加味した予測式は以下のようになる。

$$\log pre_1 = \log pre + R_1 \quad (10)$$

$$\log pre_2 = \log pre + R_2 \quad (11)$$

ここで、 pre_1 、 pre_2 はそれぞれ補正項を加味した予測値を表す。

図 4 は補正項適用前後の距離減衰曲線と東北地方太平洋沖地震の観測記録の比較である。PGA、PGV ともに補正項適用前に比べ、適用後の距離減衰曲線が観測値をよく説明できている。

ここで、PGV に比べて PGA は東北地方太平洋沖地震に対する補正項による適用効果が小さい。図 5 はプレート間地震について M_w 項を表す係数 A を回帰分析した結果である。図 5 において、PGV は $M_w=9$ の地震に対して元の司・翠川 (1999) の M_w 項の値が大きく改善されている。一方、PGA では元の M_w 項は補正項導入前から比較的 $M_w=9$ を表現しており改善は小さく、このような違いが東北地方太平洋沖地震への適用効果に影響したと思われる。図 3 からわかるように PGA の係数 A はばらつきが大きく、回帰分析の際ばらつきの大きな $M_w=6$ 前後のばらつきによる影響が強く、PGV ほど巨大地震に対する適用効果があまり表れなかったものと考えられる。

また、一次式を用いた R_1 と二次式を用いた R_2 を適用した場合を比較した場合、特に PGV において東北地方太平洋沖地震の観測記録をより過大評価を抑え説明している。これは図 3 で確認されたマグニチュード項による頭打ちを二次式による非線形の M_w 項の場合がより適切に表現しているためと考えられる。

しかし、数の少ない巨大地震の内の一つである東北地方太平洋沖地震の観測記録だけでなく、他の巨大地震の観測記録の多くをうまく説明できているかも重要である。

そこで、表 3 に M_w が 7 以上の地震に対する全対誤差を示す。全体誤差を式 (12) に示す。

$$E_{\text{all}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n \{\log(\text{obs}) - \log(\text{pre})\}^2} \quad (12)$$

誤差を算出するにあたり、司・翠川 (1999) と本研究は先に述べたように使用した最大振幅値の算出方法に違いがある。なお、先述の通り、本研究の PGA と PGV

はその求め方において厳密には司・翠川 (1999) とは異なる方法を用いており、その差は 1 割程度であると考えられる。つまり本研究で求める誤差には、この求め方の違いによるものが含まれていることになるが、その大きさは 0.03 程度と大きな影響ではないと判断できる。

表 3 より、 M_w が 7 以上の地震に対する全体誤差は補正項導入により、誤差が小さくなっている。特に二次式の補正項を導入した際の誤差が最も小さくなった。

また、全地震記録に対する全体誤差を表 4 に示す。表 4 より、全地震記録に対しても補正項導入後は全体誤差が減少している。また、全地震記録に対する全体誤差では一次式と二次式の補正項の明確な違いは見られなかった。

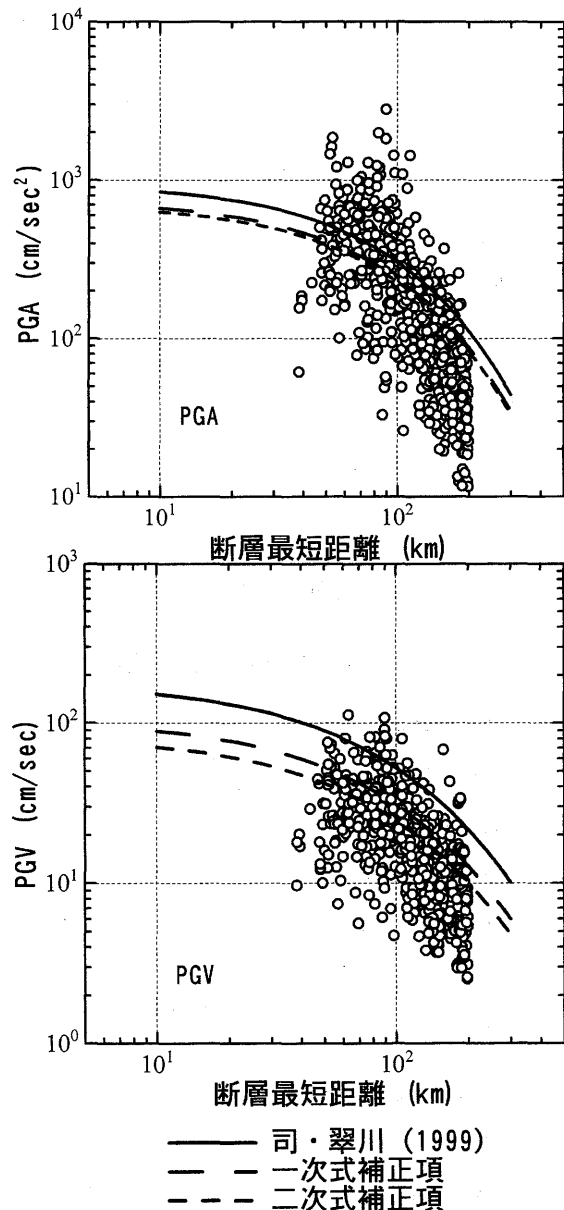


図 4 補正項適用前後の距離減衰曲線と東北地方太平洋沖地震の観測記録の比較

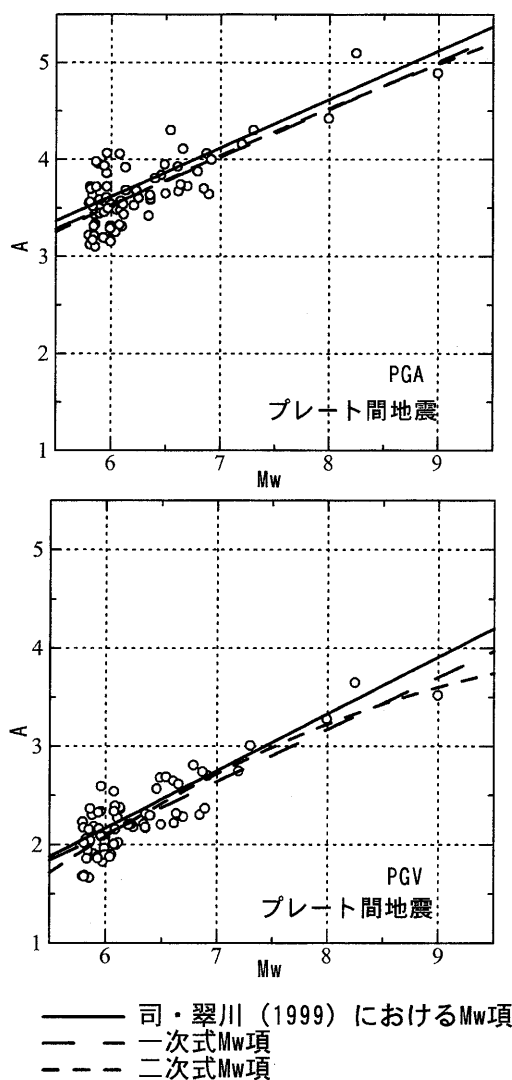


図5 プレート間地震における
係数Aの回帰分析結果

表3 M_w が7以上の地震に対する全体誤差

| M_w が7以上の地震に対する 全体誤差 | PGA | PGV |
|---------------------------|------|------|
| 司・翠川(1999) | 0.33 | 0.30 |
| 一次式補正項 | 0.30 | 0.25 |
| 二次式補正項 | 0.28 | 0.22 |

表4 全データに対する全体誤差

| 全体誤差 | PGA | PGV |
|-------------|------|------|
| 司・翠川 (1999) | 0.32 | 0.28 |
| 一次式補正項 | 0.29 | 0.25 |
| 二次式補正項 | 0.29 | 0.25 |

7 まとめ

本研究では司・翠川（1999）について、M9クラスを含む巨大地震に適用させるための補正項の導出を行った。以下に本研究で得られた知見をまとめる。

- ① 導出したマグニチュード補正項の適用前後を比較したところ、補正項を導入することで適切に規模の大きな地震を説明できる。
- ② 一次式および二次式による補正項のいずれの場合も、特に $M_w=7$ 以上の地震において PGA よりも PGV に補正項の適用効果がみられる。
- ③ M_w 項に関する補正項は一次式で表現するよりも二次式で表現する方が規模の大きい地震の観測記録をより適切に説明できる。

参考文献

- 1) 防災科学技術研究所：K-NET、KiK-net
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 2) 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、63-70、1999
- 3) 司宏俊・額田一起・三宅弘恵・翠川三郎：超巨大地震への地震動最大値距離減衰式の適用について - 2011年東北地震と海外の超巨大地震の観測データに基づく検討 -、日本地震学会講演予稿集、2011年秋季大会、B22-08、2011
- 4) Tatsuo Kanno, Akira Narita, Nobuyuki Morikawa, Hiroyuki Fujiwara and Yoshimitsu Fukushima: A New Attention Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 96, No. 3, pp. 879-897, June 2006
- 5) 防災科学技術研究所：F-net
<http://www.fnet.bosai.go.jp>
- 6) 佐藤智美：日本のスラブ内地震とプレート境界地震の水平・上下動の距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、第75巻、第647号、pp. 67-76、2010
- 7) Midorikawa, S., M. Matsuoka, and K. Sakugawa: Site Effects on Strong-Motion Records during the 1987 Chiba-ken-toho-oki, Japan Earthquake, The 9th Japan Earthquake Engineering Symposium, Vol. 3, pp. 85-90, 1994
- 8) 地震調査研究推進本部：確率論的地震動予測地図、<http://www.jishin.go.jp/main/yosokuchizu/>
- 9) 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11回日本地震工学シンポジウム論文集、pp. 609-614、2002

(受理：平成26年5月29日)