

超巨大地震に適用可能な地震動予測式に関する研究

加藤 裕也

1. はじめに

観測された地震記録を統計回帰分析することで得られる地震動予測式 (Ground Motion Prediction Equation: 以後 GMPE とする) は、地震動の平均的な特性をよく表し、計算も容易なことからハザードマップの作成等の様々な場面で利用される。

東北地方太平洋沖地震は M9 という超巨大地震であったが、それ以前の GMPE の作成のためのデータベースにはこのような超巨大地震は含まれておらず、適用範囲を超えていることを承知で M9 クラスの地震を評価すると GMPE は観測値を過大評価すると指摘されている²⁾。そのため、今後発生が危惧される超巨大地震の地震動の予測精度を向上させるためには、東北地方太平洋沖地震の観測記録を含むデータベースにより新たな GMPE を導出する必要がある。

また、震源から離れた地域で地震動が大きくなる異常震域現象は、精度の高い地震動分布の推定を行うためには重要な現象である。一般に東北日本における異常震域現象が注目を集めることが多いが、西南日本でも異常震域現象は見られる。しかしそれに対応した GMPE は少ない。

そこで本研究では、Kanno et al. (2006)³⁾ (以後 KN06) と同様に単純な回帰式を用いた基本モデルとその補正項を組み合わせる方法により、東北地方太平洋沖地震の観測記録を含むデータベースから新たな GMPE を構築する。また既往の GMPE で提案されている異常震域現象への対応方法を再検討し、東北日本だけでなく、西南日本の異常震域現象にも対応した補正項を導出する。

2. 地震動データベースの作成

GMPE を導出するためのデータベースは、KN06 で用いた観測記録に東北地方太平洋沖地震を含む 2011 年末までの日本における収集可能な全地震観測記録を加えたものを用いることとし、KN06 と同様の手法でデータの抽出を行った。

3. 基本モデルの導出

基本モデルは最も単純な形で表すものとし、説明変数は断層最短距離 X とモーメントマグニチュード M_w 、目的変数は最大加速度、最大速度 (以後 PGA、PGV)、減

衰 5% 加速度応答スペクトルとした。本研究では基本モデルとして、GMPE の絶対値を表す M_w 項を一次式で表現する式(1)と二次式で表現する式(2)を採用する。以後それぞれモデル 1、モデル 2 とする。

$$\log pre_1 = a_1 M_w + b_1 - c_1 X - \log(X + d_1 \cdot 10^{0.50 M_w}) \quad (1)$$

$$\log pre_2 = a_2' M_w^2 + a_2 M_w + b_2 - c_2 X - \log(X + d_2 \cdot 10^{0.50 M_w}) \quad (2)$$

ここで pre_1 、 pre_2 はそれぞれの基本モデルの目的変数、 a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1 、 a_2' 、 a_2 、 b_2 、 c_2 、 d_2 は回帰係数、 \log は常用対数を表す。導出した回帰係数を図 1 に示す。

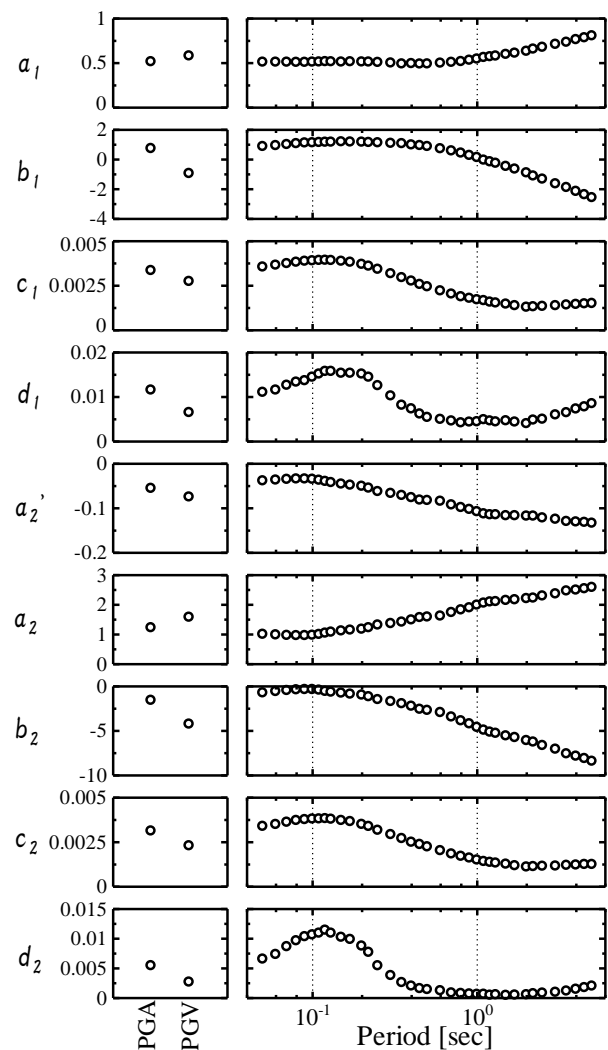


図 1 回帰分析により得られた各係数

4. 震源特性に関する補正項

観測される地震動には、地震タイプ（地殻内地震、プレート間地震、スラブ内地震）による違いがあり司・翠川（1999）⁴⁾でも考慮されている。そこで、式(3)にしたがって地震ごとの地震間誤差 σ_{inter} を算出し、地震タイプごとにその平均を求め、これを地震タイプの違いによる震源特性に対する補正項とした。また、式(4)はこの補正項を加味した予測式を示す。

$$\sigma_{inter} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\log obs_i - \log pre_i) \quad (3)$$

$$\log pre_E = \log pre + \bar{\sigma}_{inter} \quad (4)$$

ここで、 pre_E は地震タイプの補正項を加味した予測値、 $\bar{\sigma}_{inter}$ は各地震で計算された地震間誤差の地震タイプごとの平均値である。

5. 地盤特性に関する補正項

地表で得られた観測記録は表層地盤の増幅特性の影響を大きく受ける。その地盤特性は AVS30（表層 30m までの平均 S 波速度）で表現されることが多い。本研究でも AVS30 を用いて地盤特性の補正項を導出した。また対象とする観測記録は作成したデータベースの中でも以下の条件を満たすものとした。

1. AVS30 の観測記録が得られている
2. AVS20（表層 20m までの平均 S 波速度）までの観測記録が得られており、KN06 により提案された以下の式(5)に示す推定式で AVS30 の推定が可能である

$$AVS30 = 1.13AVS20 + 19.5 \quad (5)$$

観測点ごとに観測値と予測値の平均偏差を求め、式(6)に示す関係式で補正項を導出した。

$$G = \log(obs/pre_E) = p \log AVS30 + q \quad (6)$$

ここで、 G は地盤特性の補正項、 $\log(obs/pre_E)$ は観測点ごとの平均偏差、 p 、 q は回帰係数を表す。 G を加味した予測式を式(7)に示す。

$$\log pre_G = \log pre_E + G \quad (7)$$

ここで、 pre_G は G を加味した予測値を表す。なお、表層地盤が軟弱な観測点で大きな振幅が得られた場合には、地盤の非線形性の考察が必要であるが、本データベースでは分析に大きく影響のある非線形性は明確には見られなかったため無視することとした。

6. 東北日本の異常震域に関する補正項

東北日本のスラブ内地震では、日本海側に比べて太平洋側で大きな振幅の観測記録が得られる異常震域現象がみられる。これは図 2 に示す東北日本の地下の減衰 (Q 値) 構造の違いによる伝播経路特性の影響であるとされる。森川・他 (2006)⁵⁾では GMPE に異常震域の影響を考慮するために、火山フロントから観測点ま

での最短距離 X_{vf} を導入している。本研究でも X_{vf} を用いて異常震域現象の補正項を導出することとした。なお X_{vf} は図 2 に示すように火山フロントを境として太平洋側で正、日本海側で負の値とする。

また、GMPE の伝播経路特性の影響を正確に評価するためには震源特性および表層地盤の増幅特性の排除が重要である。さらに、明確な異常震域現象がみられるのはおよそ東経 138° 以東であるため、対象とする観測記録は以下を満たすものとする。

1. pre_G を求めることが可能である
2. 138° 以東で発生したスラブ内地震である
3. 138° 以東で得られた観測記録である

本研究では、 X_{vf} が -125km 付近および 75km 付近を境に $\log(obs/pre_G)$ の傾きが異なる傾向がみられた。そこで以下の式(8)のモデルを用いて東北日本の異常震域の補正項を導出した。

$$A_{NE} = \log(obs/pre_G) = \begin{cases} \alpha_{75NE}(X_{vf} - 75)D + 75\alpha_{NE}D + \beta_{NE} & (X_{vf} > 75\text{km}) \\ \alpha_{NE}X_{vf}D + \beta_{NE} & (-125 < X_{vf} \leq 75) \\ \alpha_{-125NE}(X_{vf} + 125)D - 125\alpha_{NE}D + \beta_{NE} & (-125 \leq X_{vf}) \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 A_{NE} は東北日本の異常震域に対する補正項を表し、 D は震源深さ、 α_{75NE} 、 α_{NE} 、 α_{-125NE} 、 β_{NE} は回帰係数を表す。また、 A_{NE} を加味した予測式は式(9)で表す。

$$\log pre_{A_{NE}} = \log pre_G + A_{NE} \quad (9)$$

ここで $pre_{A_{NE}}$ は A_{NE} を加味した予測値を示す。

7. 西南日本の異常震域に関する補正項

西南日本において 2006 年 6 月 12 日に大分県中部で発生した深発地震では、異常震域現象が明確に確認されている。しかしながら西南日本の異常震域現象を取り扱った GMPE の研究は多くはないため、本研究で西南日本の異常震域に対応する補正項を導出した。対象とする観測記録は東北日本と同様の理由から、データベース内から以下を満たすものとする。

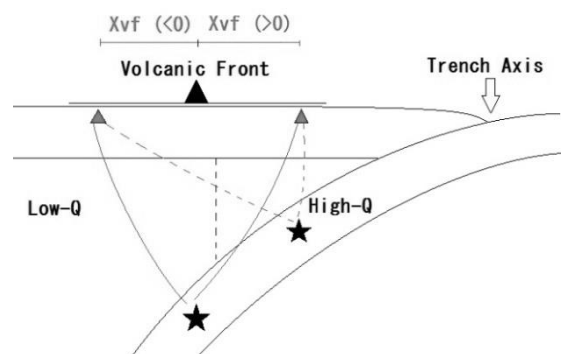


図 2 東北日本の減衰構造模式図 (KN06 参照)

1. pre_G を求めることが可能である
2. 137° 以西で発生したスラブ内地震である
3. 137° 以西で得られた観測記録である

森川ら(2006)⁶⁾では KN06 への補正項導出の際に、西南日本で観測された異常震域現象の傾向は X_{vf} が 75km を境として頭打ちする傾向があるとしており、Morikawa and Fujiwara(2013)⁷⁾でも 75km までのデータセットで評価している。しかし、本研究では 75km より大きい領域で傾きが異なる傾向がみられたため、次の式(10)に示すモデルを用いた。

$$A_{SW} = \log(obs/pre_G) = \begin{cases} \alpha_{75SW}(X_{vf} - 75)D + 75\alpha_{SW}D + \beta_{SW} & (X_{vf} > 75km) \\ \alpha_{SW}X_{vf}D + \beta_{SW} & (X_{vf} \leq 75km) \end{cases} \quad (10)$$

ここで、 A_{SW} は西南日本の異常震域に対する補正項を表し、 D は震源深さ、 α_{75SW} 、 α_{SW} 、 β_{SW} は回帰係数を表す。 A_{SW} を加味した予測式は東北日本における異常震域と同様の形式で式(11)として表す。

$$\log pre_{A_{SW}} = \log pre_G + A_{SW} \quad (11)$$

ここで、 $pre_{A_{SW}}$ は A_{SW} を加味した予測値である。

8. 本研究で導出した GMPE の考察

本研究で導出した GMPE の基本モデルから算出した予測値と東北地方太平洋沖地震の観測記録の比較を図3に示す。なお、同図には、KN06 による予測値も併せて表示している。KN06 は PGV、加速度応答スペクトル

の長周期帯で過大評価がみられ、既往の指摘と一致する。一方で、本研究の GMPE は特に M_w 項に二次式を用いたモデル2が観測記録を適切に説明している。

モデル1とモデル2の基本モデルの全体誤差の比較を図4に示す。加速度応答スペクトルの長周期帯でモデル2の誤差が小さく、図3の結果と調和的である。また、モデル2に関して補正項を加味する前後の全体誤差の比較を図5に示す。また、比較のために本データベースに KN06 の基本モデルを適用した誤差も示す。なお、全体誤差は以下の式(12)の通りである。

$$\sigma_{total} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\log obs - \log pre)^2} \quad (12)$$

震源特性の補正項の適用効果はそれほど大きくないが、短周期側でやや効果が見られる。地盤特性の補正項は長周期帯で効果がみられた。これは $AVS30$ が長周期帯に影響があることを意味しており、短周期帯に対する地盤特性の補正にはより浅い平均 S 波速度を用いる必要があると思われる。異常震域の補正項は短周期帯に効果がみられる。これは短周期の地震波の方が、減衰が大きいという力学的な特性とも整合する。

西南日本の異常震域現象のみられる観測記録は非常に少ないため、全データに対する全体誤差に対して補正項適用前後の違いが影響を与えにくい。そこで、モデル2について西南日本の異常震域現象のみられる観測点を対象として全体誤差を導出し図6に示す。本研究の西南日本の異常震域に対する補正項は特に加速度

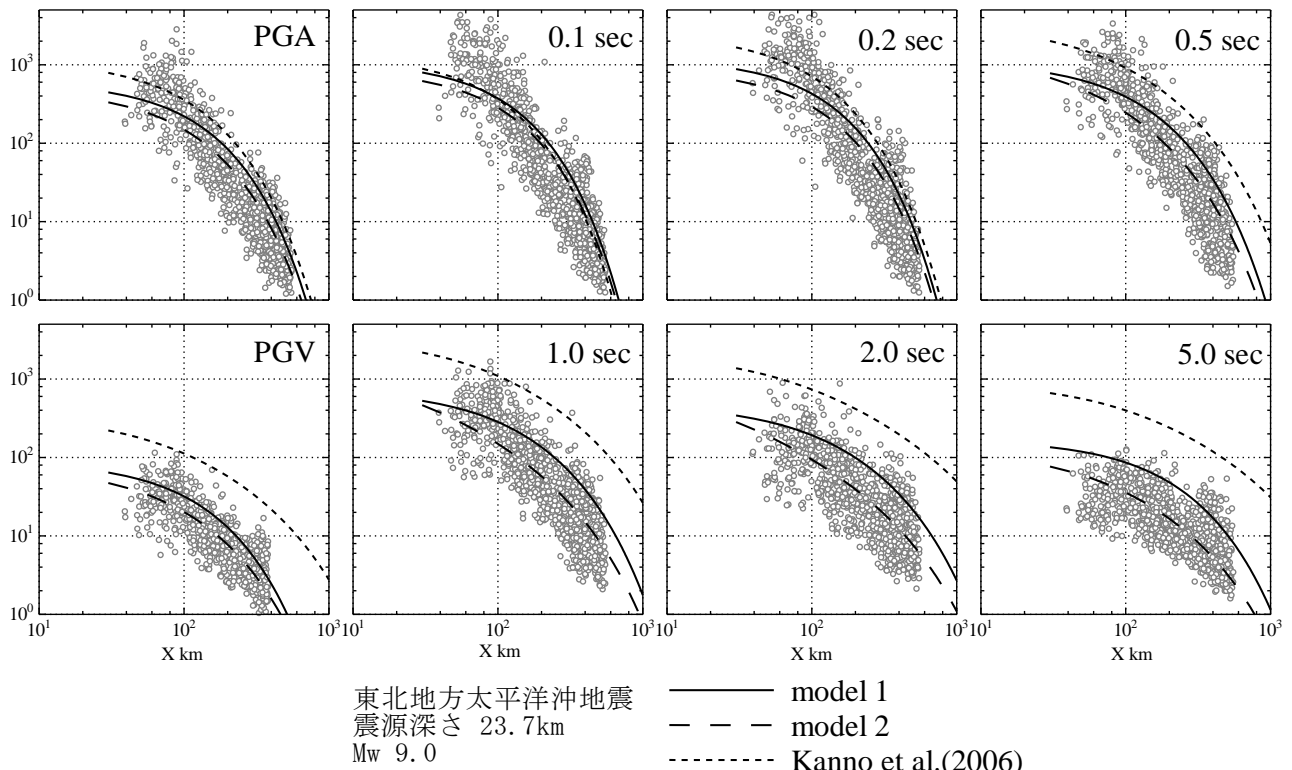


図3 東北地方太平洋沖地震の観測記録と本研究の地震動予測式の比較

応答スペクトルの短周期帯に効果がみられることがわかる。

9. まとめ

本研究では、東北地方太平洋沖地震の観測記録を含むデータベースを構築、GMPEを導出し、震源特性・地盤特性・東北日本および西南日本の異常震域の補正項を導出し精度向上を図った。

- ① 一次式と二次式の M_w 項のモデルを導出した結果、二次式の方が M9 の観測記録を適切に説明できる。
- ② 導出した補正項により誤差が小さくなることを確認し、力学的な整合性も確認した。
- ③ 西南日本の異常震域現象の補正項は加速度応答スペクトルの短周期帯に有効であった。
- ④ 異常震域の補正項を場合分けすることで X_{vr} の全範囲に対応する補正項を導出した。

【参考文献】

- 1) 防災科学研究所：強震観測網 K-NET、KiK-net <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 2) 司・他：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

- 3) Kanno et al.: A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data, Bull. Seism. Soc. Am., 96, pp. 879-897, 2006
- 4) 司・翠川：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
- 5) 森川・他：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
- 6) 森川・他：西南日本の異常震域に対応するための距離減衰式補正係数、日本地震学会秋季大会予稿集、2006
- 7) Morikawa and Fujiwara, H.: A New Ground Motion Prediction Equation for Japan Applicable up to M9 Mega-Earthquake, Journal of Disaster Research Vol. 8, No. 5, 2013

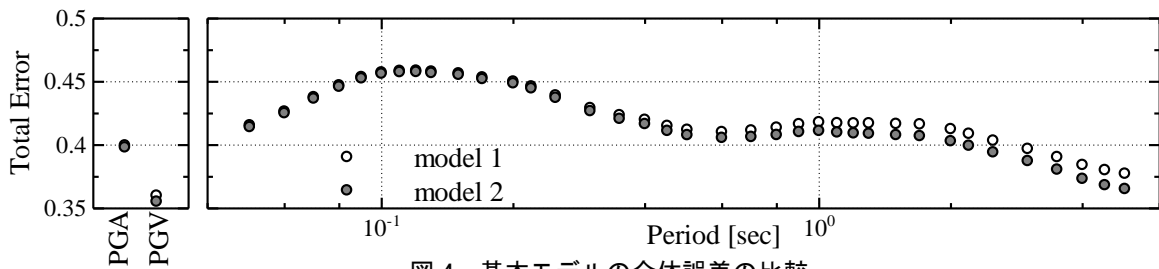


図4 基本モデルの全体誤差の比較

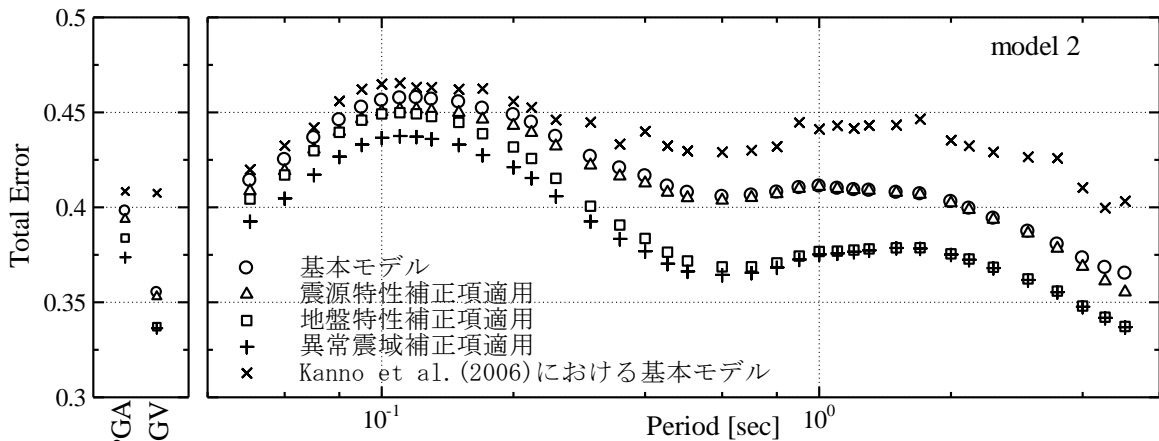


図5 補正項適用前後の全体誤差の比較

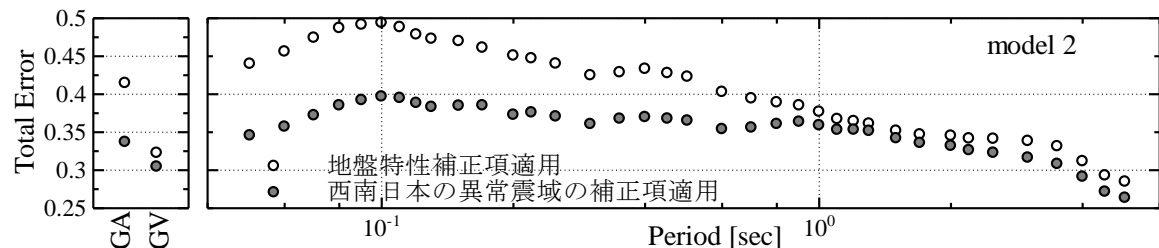


図6 西南日本の異常震域補正項対象観測記録に対する全体誤差の比較