

ランダムフォレストを用いた地震動予測式の構築

Construction of ground motion prediction equation using random forest

久保久彦^{*1}
Hisahiko Kubo

功刀卓^{*1}
Takashi Kunugi

鈴木進吾^{*1}
Shingo Suzuki

鈴木亘^{*1}
Wataru Suzuki

青井真^{*1}
Shin Aoi

^{*1} 防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

In this study, we construct a new ground motion prediction equation, which empirically predicts peak ground acceleration, using a random forest method and strong-motion big data recorded in Japan. The obtained predictor can reproduce the features of observed ground motions, although we still have some problems such as the effect of imbalanced data-set.

1. はじめに

地震動予測式は地震による強い揺れ(強震動)を過去の記録に基づいて経験的に予測する手法の一つである[日本建築学会 2005][翠川 2009]. 地震動予測式では地震動の特性を地震規模(マグニチュード)・地震の震源からの距離・地盤の増幅率などによってモデル化しており, 地震動の強さが震源からの距離によって減衰していく様を表すことから距離減衰式とも呼ばれる. その簡便さから, 地震工学の分野では緊急地震速報や強震動予測などにおいて広く一般的に使われてきた.

本研究ではこの地震動予測式の構築を機械学習手法の一つであるランダムフォレストによって試みる. 先行研究では最小二乗法に基づく回帰によって地震動予測式を導出しており, 説明変数と目的変数の関係を表す関数の形を事前に仮定する必要があった[司 1999][Morikawa 2013]. それに対して本研究ではランダムフォレストに代表されるノンパラメトリックな機械学習手法を用いることにより, 関数形を事前に仮定することなく, 関数形も含めて過去のデータから直接求めることができる. ニューラルネットワークなどの機械学習手法を地震動予測式の構築に用いた研究は既に行われているが[Derras 2012], 本研究では機械学習手法の利点を最大限に生かしながら, より高い予測性能を持つ地震動予測式の構築を目指す.

2. データ・手法

データセットには, 防災科学技術研究所が維持・管理する陸海統合地震津波火山観測網 MOWLAS の全国強震観測網 K-NET・基盤強震観測網 KiK-net [功刀 2009][Aoi 2011]による強震ビックデータを使用する. これらの観測網は 1995 年兵庫県南部地震による阪神・淡路大震災を契機として日本全国を均質に網羅する形で整備され, 観測された強震動記録は web を通じて公開されている.

訓練データとしては 1997 年 4 月から 2015 年 12 月までに発生した地震 計 2177 イベントによる強震記録 計 288,644 記録を使用した. またテストデータには 2016 年 1 月から 10 月までに発生した地震 計 223 イベントによる強震記録 31,273 記録を使用した. ここでは, F-net モーメントテンソル解カタログ[福山 1998]および気象庁一元化震源カタログに存在し, 4.5 以上 7.5 以下のモーメントマグニチュード(Mw)を持ち, 深さ 200km より

浅い深さで発生した地震の記録のみを用いた. 地震の規模に上限を用いているが, 巨大地震(Mw 8 以上)は発生頻度が少なく, それらを学習データセットに組み入れると, 構築する地震動予測式において巨大地震の地震動予測が過去の数少ない記録に大きく引きずられる可能性があるためである.

本研究の予測対象である目的変数は地表最大加速度(PGA)である. PGA を予測するための説明変数として, 震源と予測地点の水平距離(震央距離, L), 震源の深さ(H), Mw, 予測地点の地下深さ 30m までの平均 S 波速度(Vs30), 予測地点の地下において S 波速度が 1400m/s に達するまで深さ(D1400)の 5 つを用いる. L の計算における地震の水平位置, H, Mw は F-net モーメントテンソル解カタログの情報を参照した. Vs30 については防災科学技術研究所の地震ハザードステーション J-SHIS (<http://www.j-shis.bosai.go.jp>)で公開されている表層地盤情報[松岡 2008][若松 2013]から各地点での値を参照した. D1400 については J-SHIS の深部地盤構造モデル[藤原 2009][藤原 2012]から各地点での値を参照した. 先行研究[Morikawa 2013]では浅部地盤および深部地盤による増幅を Vs30 および D1400 を用いてモデル化した上で, 地盤増幅の補正を行っており, 本研究でも同様の補正効果を見込んで Vs30 および D1400 を説明変数に加えた. 解析におけるデータセットの前処理として, PGA と L の対数値をとった上で, 各目的変数・説明変数それぞれについて標準化を行った.

解析には Python のオープンソース機械学習ライブラリ scikit-learn において実装されているランダムフォレストを用いる. 最大深さ 100 で, 最小説明変数が 1 つである決定木が計 2000 で構成されるランダムフォレストを使用した. これらの最大深さ・最小説明変数・決定木数は交差検定の結果から決定した.

3. 結果

図 1 と図 2 に構築した地震動予測式による予測値の距離減衰の様子を, 三つ異なるマグニチュードの場合の予測距離減衰について示している. また図1は深さ 8km と浅い地震, 図 2 は深さ 44km とやや深めの地震の場合である. それぞれにおいて距離が大きくなるに伴い PGA が小さくなる傾向, また地震の規模が大きいほど PGA が大きくなる傾向が見て取れる. この傾向は先行研究で構築された地震動予測式と調和的であり, 地震動の物理的特性と整合している.

また異なるマグニチュードにおける予測距離減衰を比べると, 地震の規模によって異なっており, またその違いが線形で表すことができないことも分かる. これは地震規模(震源継続時間)の

連絡先: 久保久彦, 防災科学技術研究所, 茨城県つくば天王台 3-1, 029-863-7304, hkubo@boai.go.jp

違いが実体波と表面波という距離減衰が異なる 2 種類の地震の励起に与える影響の違いを反映しているためだと考えられる。回帰식을事前に仮定せずに、機械学習によって直接的に地震動予測式を求めた利点が出ていていると考える。ただし規模の大きな地震はデータセットの中で記録数があまり多くなく、更なる検証が必要である。

図 1 と図 2 では予測対象としている地震の深さが異なるが、深さの違いが地震動予測式に与える影響も異なっていることが分かる。浅い地震(図 1, 深さ 8km)の方が震源直近で大きな PGA が予測されているが、やや深い地震(図 2, 深さ 44km)ではより遠方まで比較的強い PGA が予測される結果となっている。この違いは線形で表すことができるような関係でないことも見て取れ、この点にもノンパラメトリックな手法を用いた本研究のメリ

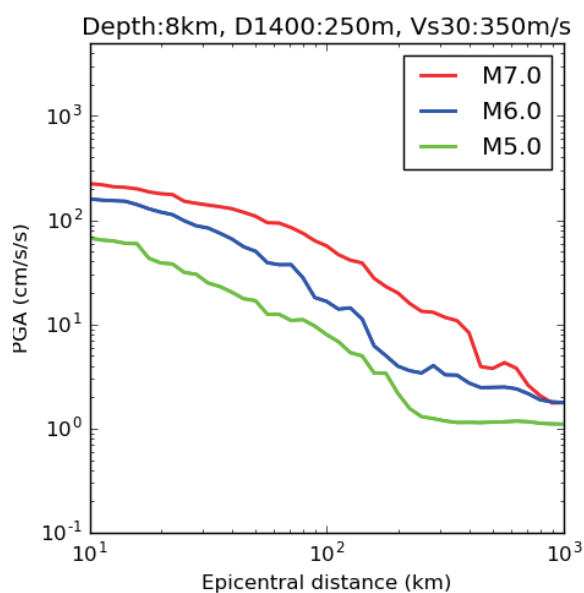


図 1 震源の深さ 8km・Vs30 350m/s・D1400 250m の場合における予測距離減衰。赤線が Mw7.0, 青線が Mw 6.0, 緑線が Mw 5.0 の場合の予測を示す。

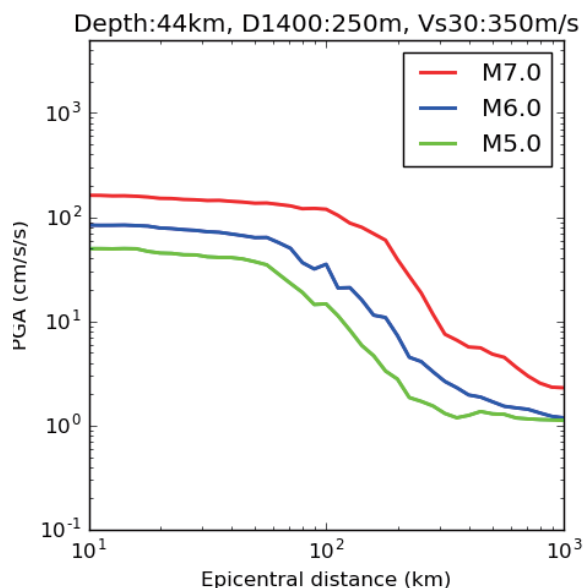


図 2 震源の深さ 44km・Vs30 350m/s・D1400 250m の場合における予測距離減衰。赤線が Mw7.0, 青線が Mw 6.0, 緑線が Mw 5.0 の場合の予測を示す。

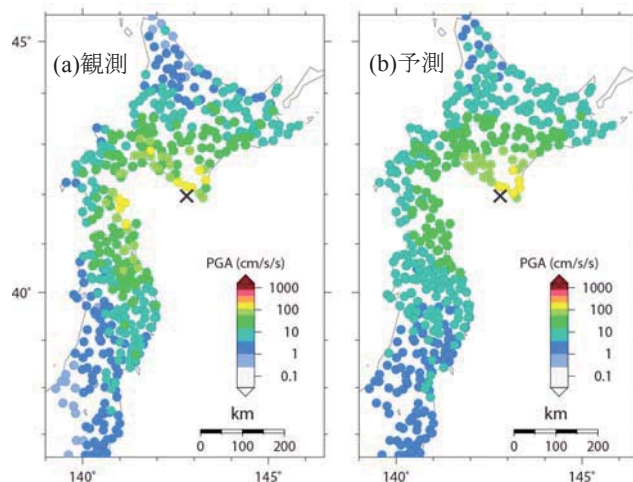


図 3 2016 年 1 月 14 日 12 時 25 分に浦河沖で発生した地震(Mw 6.6, 深さ 56km)における(a) 観測値と(b)予測値の分布。×は震央(震源の水平位置)を表す。

ットが出ていていると考えられる。

また、これまでの地震動予測式は比較的大きな規模(M6 以上)の地震を対象とする場合が多かった。これは従来の手法では実体波(S 波)のみをターゲットとしており、同じ距離減衰パラメータで異なる規模の地震全てに対応することが難しかったためである。本研究はランダムフォレストを活用することにより、M5 程度の規模までをカバーする地震動予測式を構築することができた。

図 3 では 2016 年 1 月 14 日 12 時 25 分に浦河沖で発生した地震(Mw 6.6, 深さ 56km)における 観測と予測の比較を行っている。この地震は訓練データには含まれておらず、テストデータの一つである。距離に対する地震動強度の広がりを含め、大まかな地震動の分布は再現できており、実用レベルの地震動予測式が得られたと考える。しかしながら、東日本では前弧(火山フロントの東側)と背弧(火山フロントの西側)で地下の減衰構造が異なることに起因して同じ距離でも前弧の方がより強い地震動が観測されるということが分かっており[宇津 2001][森川 2006], この地震の観測記録(図 3a)でも見られるそのような傾向は予測結果(図 3b)では再現できていない。このような地域ごとの地震動特性を加味した地震動予測式へとするためには、説明変数に地震の発生位置座標や観測地点の座標位置を加えていくことが考えられる。

構築したランダムフォレストの各決定木における説明変数へのアクセス数から算出した重要度は[L, Mw, H, Vs30, D1400]=[0.489, 0.190, 0.072, 0.136, 0.125]である。震源距離 L と Mw の重要度がほかの 4 つに比べて飛びぬけて大きく、二つを合わせると全体の約 7 割を占める。それらに比べると他の説明変数の重要度は相対的に低い。これらを考慮することによって地震動予測式の予測性能が向上することを確認している。

図 4 は訓練データとテストデータについて、本研究で用意した観測値と予測値の比較を示しており、観測と予測が完全に一致すれば対角線上に位置することとなる。全体的には対角線上にのっているが、観測値が大きいほど過小評価する傾向も見られた。これは、学習データセットに偏りがある(小さな PGA の記録が多く、大きな PGA の記録が少ない)ために生じていると考えられる。今後、気象庁や自治体などが持つ地震動記録を追加し、データセットをさらに充実させていくとともに、不均衡データに対応した手法に改良していく必要がある。

4. 結論

本研究ではランダムフォレストと強震ビックデータを用いた地震動予測式の構築を図った。得られた地震動予測式は実用レベルの予測が可能であることを確認し、また機械学習手法を適用したことによるメリットも見られた。強震データの偏りに起因する問題や地震の地域特性の取り込み方については今後検討していく必要があると考える。

参考文献

- [Aoi 2011] Aoi, S., Kunugi, T., Nakamura, H., and Fujiwara, H.: Deployment of new strong motion seismographs of K-NET and KiK-net, in Earthquake Data in Engineering Seismology, Geotech. Geol. Earthquake Eng., Vol.14, pp.167-186, Springer, Dordrecht, Netherlands (2011)
- [Derras 2012] Boumédiène Derras, Pierre-Yves Bard, Fabrice Cotton, and Abdelmalek Bekkouche: Adapting the neural network approach to PGA prediction: an example based on the KiK-net data, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 102, pp. 1446-1461 (2012)
- [福山 1998] 福山英一, 石田瑞穂, Douglas, S. Dreger, 川井啓廉: オンライン広帯域地震データを用いた完全自動メカニズム決定, 地震 2 (1998)
- [藤原 2009] 藤原広行, 河合伸一, 青井真, 森川信之, 先名重樹, 工藤暢章, 大井昌弘, はお憲生, 早川譲, 遠山信彦, 松山尚典, 岩本鋼司, 鈴木晴彦, 劉瑛: 強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料, 第 337 号 (2009)
- [藤原 2013] 藤原広行, 河合伸一, 青井真, 森川信之, 先名重樹, 東宏樹, 大井昌弘, はお憲生, 長谷川信介, 前田宜浩, 岩城麻子, 若松加寿江, 井元政二郎, 奥村俊彦, 松山尚典, 成田章: 東日本大震災を踏まえた地震ハザード評価の改良に向けた検討, 防災科学技術研究所研究資料, 第 379 号, pp. 197-200 (2012)
- [刃刀 2009] 刃刀卓, 青井真, 藤原広行: 強震観測—歴史と展望一, 地震 2, S19-S24 (2009)
- [松岡 2008] 松岡昌志・若松加寿江(2008): 地形・地盤分類 250m メッシュマップ全国版に基づく地盤のゆれやすさデータ, 産業技術総合研究所, 知的財産管理番号 H20PRO-936 (2008)
- [翠川 2009] 翠川三郎: 地震動強さの距離減衰式, 地震 2, S471-S478 (2009)
- [森川 2006] 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, 第 6 巻第 1 号, pp. 23-3, (2006)
- [Morikawa 2013] Morikawa, N. 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, pp.878-888 (2013)
- [日本建築学会 2005] 日本建築学会: 地盤震動一(日本建築学会・編集), 丸善, 408pp (2005).
- [司 1999] 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)
- [宇津] 宇津徳治: 地震学第 3 版, 共立出版, 2001, 310pp.
- [若松 2013] 若松加寿江, 松岡昌志: 全国統一基準による地形・地盤分類 250m メッシュマップの構築とその利用, 地震工学会誌, No.18, pp.35-38 (2013)

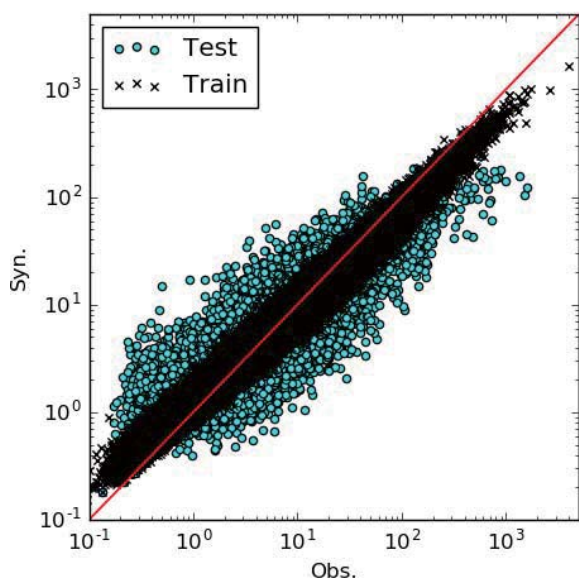


図 4 観測値と予測値の比較. ○が訓練記録を, ×がテスト記録を示す。