

PGA 距離減衰特性のガウス過程回帰に関する基礎的検討

東電設計(株) 正会員 ○栗田 哲史

1. はじめに

地震動強さを経験式でモデル化した地震動予測式（あるいは距離減衰式）は、設計用入力地震動評価や確率論的地震ハザード解析などで用いられている。この経験的手法は地震観測データの蓄積に伴って発展しており、次第に複雑なモデルが提案されるようになってきた^{例えば 1)}。これは、地震動予測式がパラメトリックな回帰式でモデル化されているからである。一方、各分野でデータ駆動型のモデル化が推進されてきており、複雑な入出力の関係についてノンパラメトリックなモデル化が行われている。ノンパラメトリックなアプローチの利点は予めモデルを選択する必要がないことである。そこで、本研究ではノンパラメトリックなモデル化の一手法であるガウス過程回帰²⁾により、地表最大加速度の距離減衰特性についてモデル化を試みる。

2. ガウス過程回帰

いま、N 個の観測値の組合せ $\mathcal{D} = \{\mathbf{x}, \mathbf{y}\} = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots, (x_N, y_N)\}$ を考え、M 個の予測したい点及び出力を $\mathbf{x}^* = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_M^*\}$ 及び $\mathbf{y}^* = \{y_1^*, y_2^*, \dots, y_M^*\}$ と表すと、ガウス過程の予測分布は以下の通り得られる。

$$p(\mathbf{y}^* | \mathbf{x}^*, \mathcal{D}) = \mathcal{N}\{\boldsymbol{\mu}(\mathbf{x}^*), \boldsymbol{\sigma}^2(\mathbf{x}^*)\} \quad (1)$$

ここで、 $\boldsymbol{\mu}(\cdot)$: 予測値の平均、 $\boldsymbol{\sigma}^2(\cdot)$: 予測値の分散である。また、予測分布を得るために必要な共分散行列（カーネル行列）を構成するカーネル関数として次式を考えた。

$$k(x, x' | \boldsymbol{\theta}) = \theta_1 \exp\left(-\frac{|x - x'|^q}{\theta_2}\right) + \frac{1}{\theta_3} \delta(x, x') \quad (2)$$

ここで、 $q \in [1, 2]$ 、 $\boldsymbol{\theta} = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}$: ハイパーパラメータ、 $\delta(\cdot)$: クロネッカーのデルタである。

3. PGA 距離減衰特性のガウス過程回帰結果

解析例として、2016 年熊本地震 (Mj7.3) の K-NET 及び KiK-net で観測された PGA（水平 2 成分の幾何平均値）と断層最短距離とのデータセットにガウス過程回帰を適用した。図-1 に本検討で使用した観測地点の分布図を示す。カーネル関数の冪乗項 (q) の値を変えてガウス過程回帰した結果（予測平均値及び平均値±標準誤差）を図-2～図-4 に示す。なお、各解析でハイパーパラメータは最尤法で決定している。また、比較のため幾何減衰の頭打ち項を有するパラメトリックモデルの結果も示している。パラメトリックモデルは最小二乗法で求めている。ガウス過程回帰の結果は、震源近傍の頭打ちの現象に追従できている。また、データ数の多い遠方の推定値は不確実性が小さく、データ数の少ない近傍で逆の傾向が見られる。図-5 にはカーネル関数の冪乗項と最大対数尤度との関係を示す。図より、カーネル関数の冪乗項が 2.0 の場合（ガウス型関数の場合）に対数尤度の最大値を生じており、観測データと適合していることが分かる。

4. まとめ

本研究ではガウス過程回帰を PGA の距離減衰特性モデル化に適用した。その結果、対数尤度が最大となるモデルは観測データ分布状況を良く再現しており、パラメトリックモデルに比較的近いものとなった。

謝辞

本研究では、地震動記録及び地盤情報として防災科学技術研究所の強震観測網 (K-NET, KiK-net)、doi:10.17598/NIED.0004 のデータを使用させて頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Douglas, J.: Ground-motion prediction equations 1964-2010, PEER Report 2011/102, U.C. Berkeley, 2011.
- 2) Rasmussen, C. E. and Williams, C. K.: *Gaussian Processes for Machine Learning*, MIT Press, 2006.

キーワード 地盤震動, 地表最大加速度, 距離減衰特性, ガウス過程回帰, カーネル関数

連絡先 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-7-12 KDX 豊洲グランスクエア 9F 東電設計(株)技術開発部 TEL 03-6372-5111

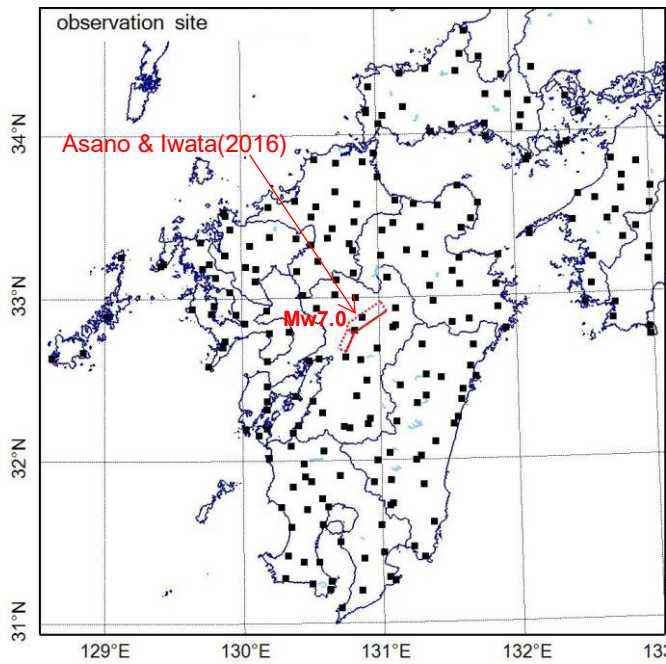


図-1 観測地点分布図

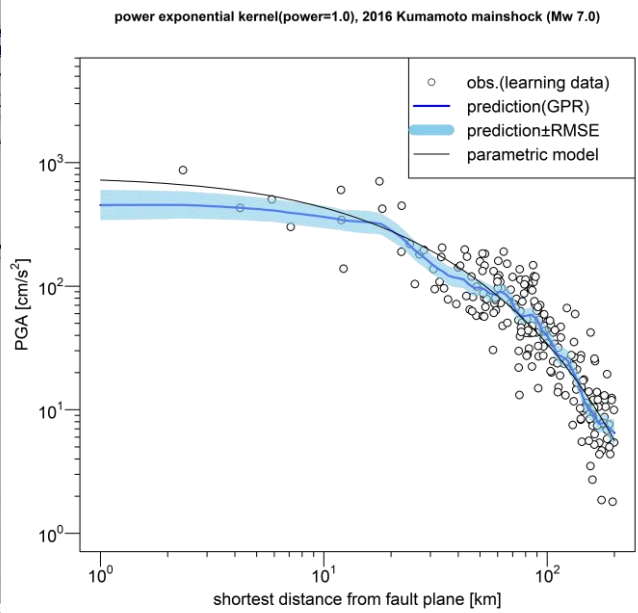
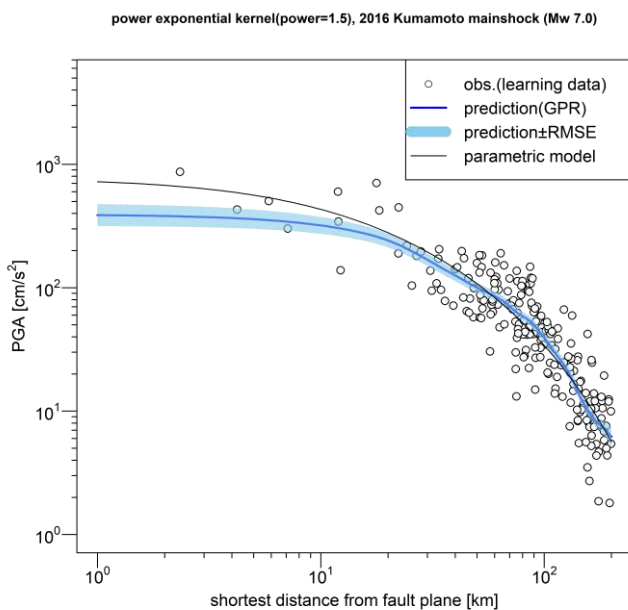
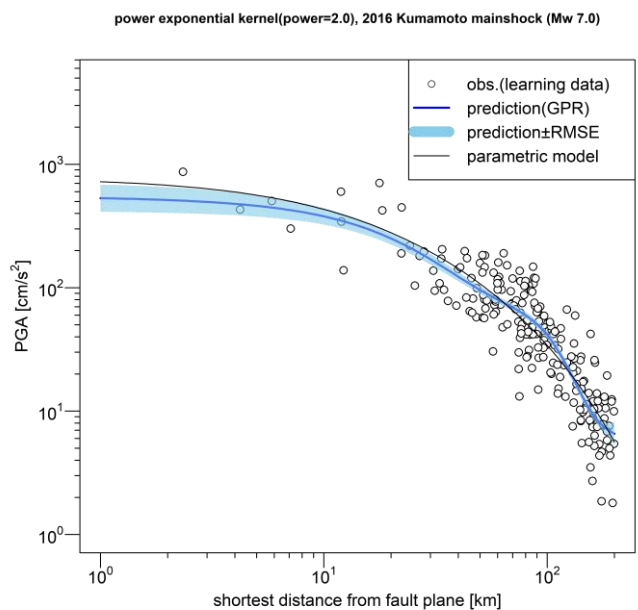
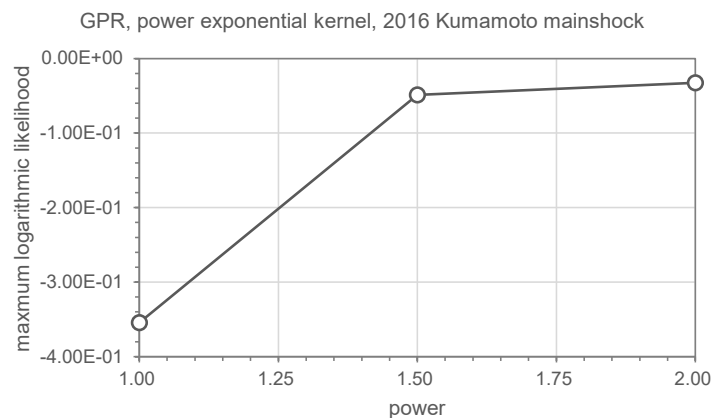
図-2 本震 PGA のガウス過程回帰結果
(カーネル関数の冪乗項: 1.0)図-3 本震 PGA のガウス過程回帰結果
(カーネル関数の冪乗項: 1.5)図-4 本震 PGA のガウス過程回帰結果
(カーネル関数の冪乗項: 2.0)

図-5 カーネル関数の冪乗項と最大対数尤度との関係