

地震動分布推定のための逐次更新法の提案

エイトコンサルタント（株） 正 ○渡邊 敏明
香川大学工学部 フェロー 野田 茂
京都大学大学院 正 清野 純史

1. はじめに

地震発生直後に対象地域の地震被害を評価するためには、地震動強さの面的な分布を正確かつ早期に把握することが重要である。そこで、本研究では、時々刻々得られる地震動観測値を制約条件に含めて最大地動の空間分布を推定するため、有効な更新アルゴリズムを提案する。この方法を実観測値に適用して数値シミュレーションを行い、提案手法の妥当性を検討する。

2. 地震動分布の逐次推定

(1) 基本的考え方

地震動の時空間特性を早期に把握し、地震動分布を推定するためには、まず、観測値の特性を知らなければならぬ。最大地動は対数正規分布に従うので、ここでは事前確率場として対数正規分布を仮定する。その上で、地震動観測値に基づき、未観測点における最大地動を推定する確率論的補間理論を展開する。

本研究では、不偏性・最小誤差分散を活かした Kriging 補間理論を採用する。その際、確率場における空間構造の違いを考慮し、事前情報として平均値・共分散を与える Simple Kriging と平均値が未知で共分散が既知な Universal Kriging を用いる。この理論を用いると、未観測点における最適推定値と推定誤差分散（あるいは変動係数的指標）を容易に求めることができる。

Noda et al. (1998)¹⁾は、全観測データを一括処理し、未観測点における物理量を推定する手法を提案している。ここではその考え方を拡張して地震動の空間分布を求める。このため、時々刻々入手される観測値に基づき、事前確率場を基に事後確率場を漸化的に更新するアルゴリズムを提案する。その上で、最適推定値と推定誤差分散の意味について検討する。

(2) 逐次推定法

観測に伴う 2 時間ステップにおける推定量（前ステップの観測点数 N_1 、次ステップの観測点数 N_2 ）間の漸化関係を式(1)～式(4)に示す。なお、Universal Kriging では事前情報として平均面が与えられない。このため、推定精度は推定誤差分散ではなく、変動係数的指標で評価している。変動係数的指標の定式化に当たっては、Simple Kriging と同様漸化型にするため近似式を用いている。

Simple Kriging

最適推定値

$$\hat{w}_{SK}(z_r|N_1 + N_2) = \hat{w}_{SK}(z_r|N_1)e^{r_{SM} - \frac{1}{2}\sigma_{SM}^2} \quad (1)$$

推定誤差分散

$$\sigma_{SK}^2(z_r|N_1 + N_2) = \sigma_{SK}^2(z_r|N_1)e^{\sigma_{SM}^2} - m^2(z_r)e^{\sigma_e^2(z_r)}(e^{\sigma_{SM}^2} - 1) \quad (2)$$

Universal Kriging

最適推定値

$$\hat{w}_{UK}(z_r|N_1 + N_2) = \hat{w}_{UK}(z_r|N_1)e^{r_{UM} - \frac{1}{2}\sigma_{UM}^2} \quad (3)$$

変動係数的指標

$$\delta_{UK}^2(z_r|N_1 + N_2) \approx \delta_{UK}^2(z_r|N_1)e^{\sigma_{UM}^2} - e^{\sigma_e^2(z_r)}(e^{\sigma_{UM}^2} - 1) \quad (4)$$

ここに、 z_r は推定点、 $m(z_r), \sigma_e^2(z_r)$ は地震発生前に規定される事前平均値、事前分散である。 r_{SM}, r_{UM} は正規確率場における前ステップの平均値に関連した、 $\sigma_{SM}^2, \sigma_{UM}^2$ は同ステップの分散に関連した補正項を意味する。これらの詳細については説明を割愛する。

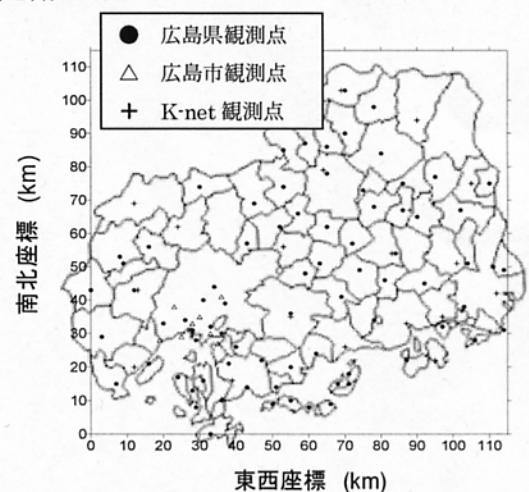


図-1 広島県における観測点位置

キーワード：対数正規確率場, Simple Kriging, Universal Kriging, 逐次観測更新処理
連絡先：〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20 Tel 087-864-2153, Fax 087-864-2153

3. 数値計算結果および考察

数値計算に用いた観測値は平成 13 年芸予地震による、広島県 78 地点、広島市 8 地点、K-net20 地点の合計 106 地点（図-1 参照）における水平 2 成分最大加速度である。事前確率場としての平均値、共分散はこれらのデータを用いて対数尤度推定法、重み付き最小 2 乗法によって定めた。ここでは、図-1 に示す広島市周辺地域 ($X=10\sim60\text{km}$, $Y=0\sim60\text{km}$) における地震動の空間分布を推定する。

観測データ群は時々刻々 7 ステップで入手されるものとした。図-2 は、Simple Kriging により最終ステップにおいて推定された最大加速度の空間分布である。この推定結果は一括処理方式で求めた結果と完全に一致する。3 つの時間ステップにおける推定値の経時変化を東西座標 $X=28\text{km}$ の南北方向断面において図示すると、図-3 のようになる。観測値を入手する度に推定結果が更新されていること、観測点では推定値と観測値の一致性を見ていることなどが理解できる。

図-4 は Universal Kriging による同様な結果である。この場合、事前平均値は未知であるが、この方法によれば、この平均値は観測値から間接的に求められるようになる。観測点数が少ない段階では Simple Kriging に比べて推定精度が悪い。しかし、観測データの蓄積に伴い、推定精度は向上していき、最終ステップでは Simple Kriging と同様な結果が得られる。

4. おわりに

数値シミュレーションの結果、観測点数が増えるごとに推定値はより確からしい値に漸近していき、最終的には逐次推定方式と一括処理方式による推定結果は一致した。Universal Kriging では平均面が未知であるが、観測値を入手するごとに地震動の距離減衰を表す平均面が推定できるので合理的であるとともに、最終的には Simple Kriging の結果とほぼ一致する利点を有する。このことは現実問題における Universal Kriging の適用可能性を意味する。これらより提案手法の有効性が明らかになった。

謝辞

計算に当たっては独立行政法人防災科学技術研究所の K-net、広島県、広島市の水平 2 成分最大加速度記録を使用した。その際、中電技術コンサルタントの片山氏の協力を得た。ここに、関係各位に深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) Noda, S. and Hoshiya, M.: Kriging of lognormal stochastic field, Journal of Engineering Mechanics, Vol.124, No.11, pp.1175-1184, November 1998.

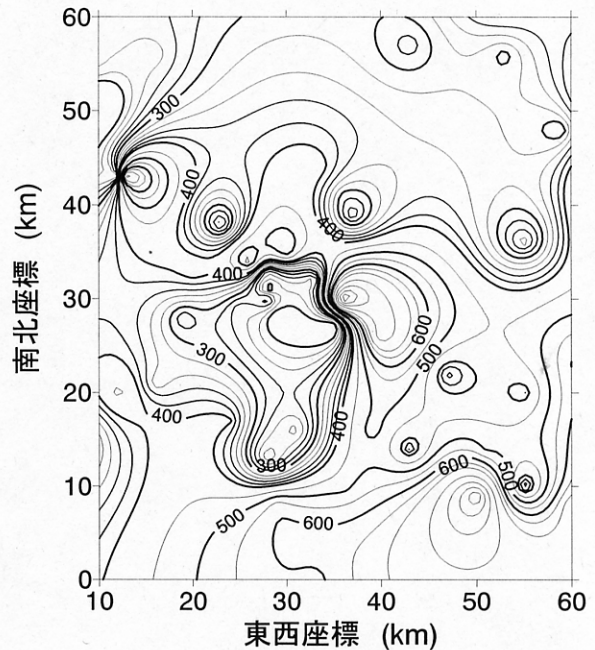


図-2 広島市周辺における最大加速度のコンターマップ

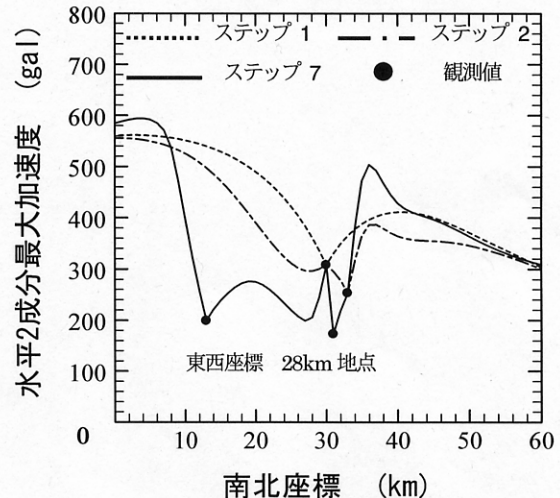


図-3 $X=28\text{km}$ 断面における Simple Kriging による逐次推定結果の一例

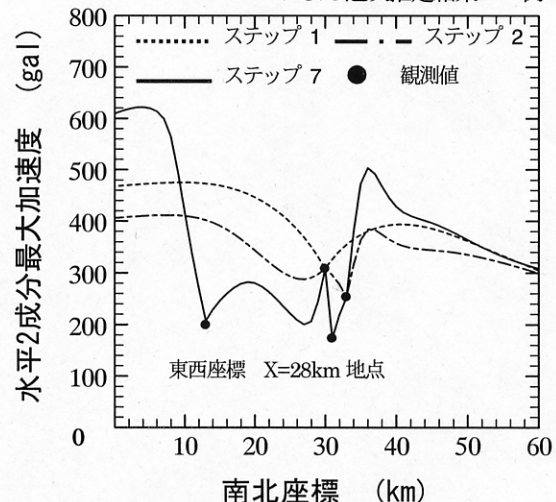


図-4 $X=28\text{km}$ 断面における Universal Kriging による逐次推定結果の一例