

断層近傍における地震動の特徴を考慮した Kriging 法による地震強度分布推定手法の検討

古閑 智之¹・酒井 久和²

¹学生会員 法政大学大学院 デザイン工学研究科都市環境デザイン工学専攻

(〒162-0843 東京都新宿区市ヶ谷田町 2-33)

E-mail: tomoyuki.koga.9j@stu.hosei.ac.jp

²正会員 法政大学教授 デザイン工学研究科都市環境デザイン工学専攻

(〒162-0843 東京都新宿区市ヶ谷田町 2-33)

E-mail: hisakai@hosei.ac.jp

構造物の被害予測は経済的な地震対策の観点で重要であり被害予測式がしばしば使用されている。しかし、被害予測式を求めるために必要となる地震強度が被害構造物位置で観測されていることは稀で、近年は観測記録を空間的に補間する Kriging 法によって推定されることが多い。Kriging 法は簡便に任意の地点の地震強度を求めることができる手法であるが、断層近傍への適用に検討の余地があるとされている。

本研究では熊本地震を対象として、断層近傍における地震動の特徴であるアスペリティとディレクティビティ効果を Kriging 法に導入した最大加速度分布推定手法を提案した。結果、提案手法に基づく予測誤差は有意に小さく推定法の精度が良いことを確認した。さらに、強震動シミュレーション結果や実被害報告などと比較することにより妥当性を検証した。

Key Words: Kriging method, earthquake intensity, asperity, directivity, near fault effect

1. はじめに

近年、日本国内で強震動を伴う地震が頻発し、人的、社会的に甚大な被害が発生しているため、これらの被害を軽減するための地震対策が求められている。構造物の被害予測式を構築するためには被災・無被害構造物地点における地震強度が必要となるが、すべての構造物で地震強度が得られていることは稀である。特に、ライフラインなどの広域に分布する構造物に対しては、面的な地震強度分布が必要となる。

地震強度分布を推定する手法は大別すると理論的手法と経験的手法に分けられる。理論的手法では入倉・釜江¹⁾のハイブリッド法などによって震源破壊の複雑な過程や伝播経路の特性を評価することが可能なため精度良く推定できる。しかし、多くのパラメータが必要となるため地震基盤から表層までの詳細な地下構造モデルの構築がされていない地域での適用には不向きである。一方、経験的手法である地震動予測式はマグニチュードや震央距離などの比較的少ないパラメータから地震強度を安定して推定することができ、通常は比較的シンプルな関数

形となっているため理論的手法よりも簡単に計算することができる。司・翠川²⁾は地震規模と震央距離に断層タイプと震源深さをパラメータとして加えた地震動予測式を開発しており、海洋プレート内地震による地震動がプレート間地震や地殻内地震による地震動よりも強いこと、震源が深いほど地震動の最大振幅が大きいことを示した。片岡³⁾は短周期レベルをパラメータとして地震動予測式に組み込むことでばらつきが顕著に小さくなったことから、短周期レベルが地震強度の推定精度に大きな影響を与えるパラメータであると示した。また、アメリカでは Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) の NGA-West2 のデータベースに収集された日本を含む世界中の地殻内地震の強震観測記録を基に、Campbell and Bozorgnia⁴⁾や Chiou and Youngs⁵⁾ら 5 つの研究チームが地震動予測式を構築している。これらの例のように、地震観測網の発達と観測記録の蓄積に伴って多くの地震動予測式が開発されている。詳細な地盤モデルが得られていない地域でも地震強度を推定することができる点で地震動予測式を用いた手法は優れているが、理論的手法とは異なり複雑な震源過程や地盤構造の影響を考慮することが困

難であるという課題がある。

そこで、本研究では地球統計学の中心的手法である Kriging 法を用いて地震強度を面的に補間する手法を提案する。Kriging 法は確率場の構造を対象として、観測値の分布から予測誤差が最小となるような任意の地点の未観測値を予測することを目的とし、十分多くの未観測値の予測を繰り返せば確率場局面全体の予測を行うことが可能となる空間の線形回帰法である⁹⁾。石神ら⁷⁾は Kriging 法に基づく放射能分布推定プログラムを開発しており、正路・小池⁹⁾によると、地熱地帯に Kriging 法を適用させ、地下温度や透水係数の分布を推定した事例もある。このように、Kriging 法は空間的に相関のあるデータの定量評価が必要な科学・工学の様々な分野で適用されており、地盤工学では地盤調査結果や地盤沈下量などの推定にも利用されている。

地震強度分布の推定に Kriging 法を用いた事例として菅井⁹⁾らの先行研究がある。菅井らは Kriging 法を用いて工学基盤までの地震波とボーリング地点で計算した地震動強さから任意の建設サイトごとに地震動強さを推定しており、推定した震度が公表されている震度と概ね一致したことから手法の適用性の高さを示している。しかし、菅井らは解析対象を東北地方太平洋沖地震発生時の愛知県尾張旭市内としており、内陸地震による震源断層近傍での地震動の特徴は考慮されていない。そこで、本論文では、この特徴を反映させた地震動予測式を確率変動しないトレンド成分として用い、地震計によって観測された地震記録との残差を Kriging 法によって補間する手法を示す。さらに、2016 年熊本地震を対象に手法の妥当性の検討を行う。

2. 推定方法

(1) 推定の流れ

本研究では、確率場をトレンド成分 $\alpha Z(x)$ とランダム成分 $\varepsilon(x)$ によって構成されるものと仮定する。工学基盤面での最大加速度と確率変動がないトレンド成分との差であるランダム成分のみを Kriging 法によって補間することで観測誤差による影響を小さくする。確率場は下式で表される。

$$Z(x) = \alpha Z(x) + \varepsilon(x) \quad (1)$$

ここで、 $\alpha Z(x)$ は地震動予測式を用いて期待値として評価するトレンド成分、 $\varepsilon(x)$ は Kriging 法によって補間するランダム成分とする。

本研究の地震強度分布推定法の流れを図-1に示す。まず、地盤・地形条件の影響を取り除くため、地表の観測

値を地盤増幅率を用いて工学基盤面に引き戻す。次に、断層近傍における地震動の特徴を組み込んだ地震動予測式を用いて工学基盤面における推定値と観測値のトレンド成分を算出する。その後、観測値とトレンド成分の差であるランダム成分のみを Kriging 法によって補間し、任意の地点におけるトレンド成分とランダム成分の和をその地点の工学基盤面での地震強度とする。最後に、地盤増幅率を用いて工学基盤面から地表面へと引き上げることで地表面における地震強度を求める。これを 250m メッシュごとに行い、地震強度を面的に推定する。

(2) Kriging 法の概要

Kriging 法にはいくつかの計算手法があるが、その中で最も利用度が高い手法のひとつであり、固有定常の仮定で用いることができる Ordinary Kriging 法を適用する。この手法では式(2)のようにデータ $Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_n)$ の線形結合で未観測位置 x_0 での値 $Z(x_0)$ を予測する⁹⁾。

$$\hat{Z}(x_0) = \omega_1 Z(x_1) + \omega_2 Z(x_2) + \dots + \omega_n Z(x_n) \quad (2)$$

ここで、 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ は重み係数であり、定常性を満たすために重み係数の総和は 1 となる。任意の地点 x_0 の推定値 $\hat{Z}(x_0)$ を最も小さい誤差で求めるためには推定分散が最小となるような重み係数を求めればよく、以下の Ordinary Kriging 方程式の解として与えられる。

$$Ax = y \quad (3)$$

ここで、

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \gamma(x_1 - x_2) & \dots & \gamma(x_1 - x_n) & -1 \\ \gamma(x_2 - x_1) & 0 & \dots & \gamma(x_2 - x_n) & -1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(x_n - x_1) & \gamma(x_n - x_2) & \dots & 0 & -1 \\ -1 & -1 & \dots & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$x = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n, \lambda)^T$$

$$y = \{\gamma(x_1 - x_0), \gamma(x_2 - x_0), \dots, \gamma(x_n - x_0), -1\}^T$$

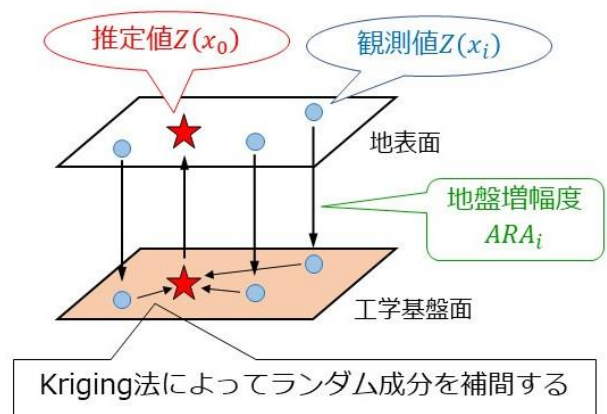


図-1 本研究における地震強度推定手法の流れ

λ はラグランジュの未定乗数を表し、 $\gamma(h)$ はバリオグラム関数である。共分散関数に地震動の空間分布に関する確率場モデルとして一般的に採用されている指数型モデルを採用すると、固有定常の仮定の下ではバリオグラム関数を以下の式で表すことができる。

$$\gamma(h) = \sigma^2 \{1 - \exp(-h/l)\} \quad (4)$$

ここで、 σ^2 はデータの分散、 h は任意の2地点間の距離、 l は自己相関距離を表す。自己相関距離とは、観測点の影響範囲を決める指標のことであり、値が大きいかほど標本となる観測地点の値に影響される範囲が広がる。地震強度指標の場合、自己相関距離は観測地点の密度によって適切な値は変化するため、値を決定するときには注意が必要である。また、Kriging法では観測地点での推定結果は観測値と一致する。

Ordinary Kriging 法では、点 x_0 での推定分散の最小値 σ_{OK}^2 を、式(3)の解 ω_i と λ を用いて次式で与える。

$$\sigma_{OK}^2 = \lambda + \sum_{i=1}^n \omega_i \gamma(x_i - x_0) \quad (5)$$

この σ_{OK}^2 をクリギング誤差とよぶ。

このように、Kriging 法は単に $Z(x_0)$ の予測値を与えるだけでなく、その予測誤差まで与える。これが、スプライン補間等の他の空間補間法と大きく異なる点である。

(3) 地盤増幅度

地盤増幅度は山口・翠川¹⁰⁾によって提案された推定式を用いて算出する。山口・翠川は、強震観測網によって観測、蓄積されている多数の強震記録から地盤の増幅特性を抽出し、その周期特性の変化を地表から深さ30mまでの地盤の平均S波速度(AVS30)をパラメータとして定式化している。下式で地盤増幅度 ARA_i を表す。

$$ARA_i = 10^{(g(x_s) - g(x_r))} \quad (6)$$

$$g(x) = \sum_{k=0}^4 \frac{1}{k+1} a_k \cdot (\log x)^{k+1} \quad (7)$$

ここで、 x_s は当該地点におけるAVS30、 x_r は基準地盤でのS波速度、 a_k は回帰係数で表-1に示す値を採る。また、 x_s は防災科学技術研究所のJ-SHISでの公開値を用いる。

(4) 断層近傍における地震動の特徴

断層近傍ではアスペリティ¹¹⁾やディレクティビティ効果¹²⁾、逆断層の上盤効果¹³⁾、フリングステップなどの

様々な要因によって地震動が特徴的な挙動を示すことが明らかとなっている。

逆断層の上盤効果として、上盤側では下盤側に比べて最大で3倍程度地震動が大きくなったという結果が報告されている¹⁴⁾。また、地表地震断層のごく近傍では最もフリングステップが顕著に観測され、断層を横切るライフラインや土木施設に甚大な影響を与えるが、地表地震断層付近では地震動自体が構造物に与える影響は小さいと思われる事例も報告されている¹⁵⁾。

しかし、上盤効果とフリングステップはまだ十分な研究の成果がなく地震動にどの程度相関があるか定かでないため、本研究では、アスペリティとディレクティビティ効果の2つの影響を考慮した地震強度推定手法を提案する。

(5) 地震動予測式

司・翠川²⁾が提案した以下の地震動予測式を用いて工学基盤面における最大加速度のトレンド成分を算出する。

$$\log A = b - \log X_{eq} - k X_{eq} \quad (8)$$

ここで、 A は最大加速度、 X_{eq} は等価震源距離、 k は粘性減衰を表す係数であり、司・翠川²⁾より0.003とする。また、 b は以下の式で表される。

$$b = a M_w + h P + \sum d_i s_i + e + \varepsilon \quad (9)$$

式中の M_w はモーメントマグニチュード、 P は震源深さを表す。 e は定数項であり、0.60である。 ε は標準偏差で震源から100km以内の地点では0.24、 a 、 h 、 d は回帰係数で、それぞれ0.5、0.0036、0.00とする²⁾。

等価震源距離とは、任意の地点において断層面から受けるエネルギーと等価なエネルギーを発生する仮想点震源からの距離であり、以下の式で定義される。

$$X_{eq}^{-2} = \frac{\sum e_m X_m^{-2}}{\sum e_m} \quad (10)$$

ここで、 X_m は観測点から断層面の各小領域 m への距離

表-1 回帰係数 a_k

$k = 0$	-5.857×10^2
$k = 1$	9.302×10^2
$k = 2$	-5.490×10^2
$k = 3$	1.428×10^2
$k = 4$	-1.383×10

(図-2 参照), e_m は各小領域 m からの地震波エネルギーの相対放出量を示す. この等価震源距離に王寺ら¹⁰⁾の手法を用いてアスペリティとディレクティビティ効果の影響を組み込む.

式(10)中の e_m を求めるためにアスペリティ位置とそれ以外の背面領域でのすべり量を算出する. すべり量は「震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)」¹¹⁾より以下のように算出する.

はじめに, 震源断層全体の平均すべり量 D を求める.

$$D = M_0 / (\mu \cdot S) \quad (11)$$

ここで, M_0 は地震モーメント, μ は剛性率, S は震源断層モデルの面積を表す. アスペリティ全体の平均すべり量 D_a は以下の式によって表される.

$$D_a = \xi \cdot D \quad (12)$$

ここで, 「レシピ」¹¹⁾より, $\xi = 2$ とする.

背面領域の平均すべり量 D_b は, 震源断層全体の地震モーメント M_0 からアスペリティの地震モーメント M_{0a} を除いた背景領域の地震モーメント M_{0b} と背景領域の面積 S_b から以下の式で算出する.

$$M_{0a} = \mu \cdot D_a \cdot S_a \quad (13)$$

$$M_{0b} = M_0 - M_{0a} \quad (14)$$

$$D_b = M_{0b} / (\mu \cdot S_b) \quad (15)$$

ここで, S_a はアスペリティ領域の面積を表す. 王寺ら¹⁰⁾の手法を参考にし, e_m をすべり量の2乗と定義するため, アスペリティ領域では $e_m = D_a^2$, その他の背面領域では $e_m = D_b^2$ とする.

ディレクティビティ効果は, 王寺ら¹⁰⁾が用いた Boore and Joyner¹²⁾が提案した以下のディレクティビティ係数 DIR の式で表す.

$$DIR = \frac{1}{1 - (v/c) i_{rup} \cdot i_{ray}} \quad (16)$$

ここで, v は破壊伝搬速度, c は地震基盤の S 波速度を示し, Geller の経験式¹⁰⁾から $v/c = 0.72$ とする. i_{rup} , i_{ray} はそれぞれ, 破壊方向の単位ベクトル, 観測点と震源を結ぶ方向の単位ベクトルである. 上式は両者の内積であるため, 各ベクトルがなす角を θ として下式に変換する.

$$DIR = \frac{1}{1 - (v/c) \cos \theta} \quad (17)$$

王寺ら¹⁰⁾の研究から, ディレクティビティ係数は以下

の式で等価震源距離に影響を与えるものとする.

$$X_{eq}^{-2} = \frac{\sum e_m DIR_m X_m^{-2}}{\sum e_m} \quad (18)$$

なお, ディレクティビティ係数はディレクティビティ効果がないときには1となる.

これらの指標を用いて断層近傍における地震動の影響を等価震源距離に組み込み, 地震動予測式によってトレンド成分を算出する.

3. 2016 年熊本地震への適用

(1) 解析対象地域と使用データ

本研究では, 2016 年 4 月 16 日午前 1 時 25 分に発生した熊本地震の本震を対象地震として, 断層近傍における地震強度分布を推定する. 推定する地震強度は地表面における最大加速度 (PGA) とする. 対象領域としては, 熊本地震の地震断層である布田川・日奈久断層帯の活動範囲を考慮して, 北緯 32.6° から 33.0°, 東経 130.5° から 131.2° によって囲まれる, 一辺約 45km 及び約 65km の長方形領域とする (海域は除く). データは, 防災科学技術研究所の強震観測網 (KiK-net, K-NET), 気象庁の強震観測記録及び地方公共団体の震度計の記録の中から北緯 32.5° から 33.1°, 東経 130.4° から 131.3° で囲まれた領域内にある 77 地点の観測データを用いる (図-3 参照).

地盤増幅度は式(6)中の x_r を 600m/s として算出する. 求めた解析対象領域内での地盤増幅度を図-4 に示す.

震源断層モデルは久保ら¹⁹⁾が震源インバージョン解析に利用したモデル (図-5) を参考に設定した. 断層パラメータを表-2 に示す. 断層面を 2km の正方形領域に走向方向に 28 個, 傾斜方向に 12 個の小領域に分割し, 久保らが推定したすべり分布図 (図-6) を参考

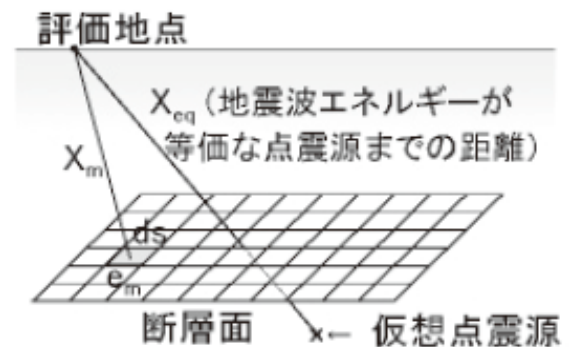


図-2 等価震源距離 X_{eq} のイメージ図¹³⁾

にしてアスペリティの位置を図-7 のように 37 の小領域に設定した。

(2) 推定結果

自己相関距離を 20km とし、解析対象領域内部の 250m メッシュごとに最大加速度を推定した。推定最大加速度分布図と予測誤差 σ_{OK} （クリギング誤差の平方根）の分布図を図-8、図-9 に示す。

図-8 より、震央より北東側で最大加速度が一番大きく推定されており、図-6 のアスペリティの影響が反映されていることが確認できる。さらに、図-4 で示す地盤増幅度の影響も強く表れていることがわかる。

また、予測誤差の平均値は 7.52Gal、最大で 49.1Gal となり、標本データが少ない地域では精度をさらに向上させる必要があると考えられる。

(3) 妥当性の検討

a) 地震動シミュレーション結果との比較

図-10 に青井²⁰⁾が地震動シミュレーションで求めた最大加速度の分布図を示す。図-10 より、震央から北東方向に向かって強震動域が広がっており、図-8 の推定結果からも同様の広がりを確認できる。

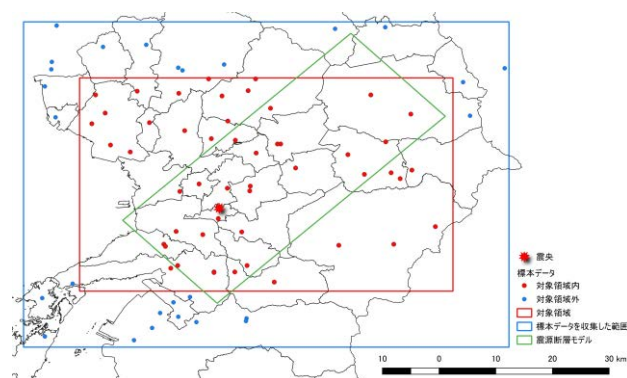


図-3 最大加速度を推定する領域と標本データの位置と震源断層モデルの位置

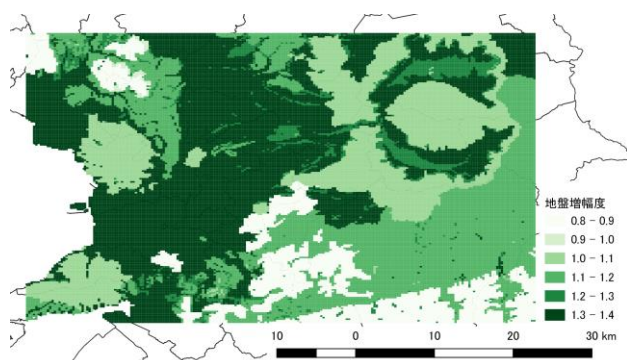


図-4 地盤増幅度 ($x_r = 600 \text{ m/s}$)

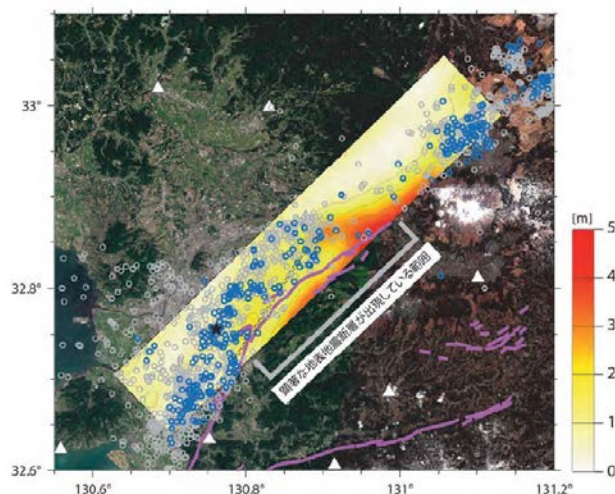


図-5 震源断層モデルの位置¹⁹⁾

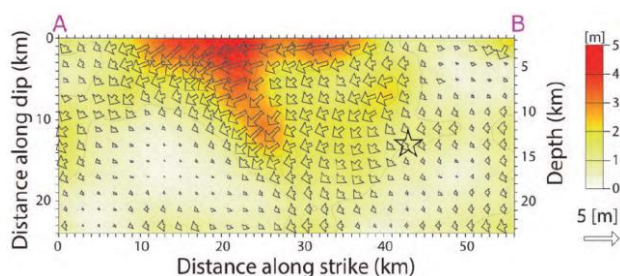


図-6 断層面すべり量分布¹⁹⁾

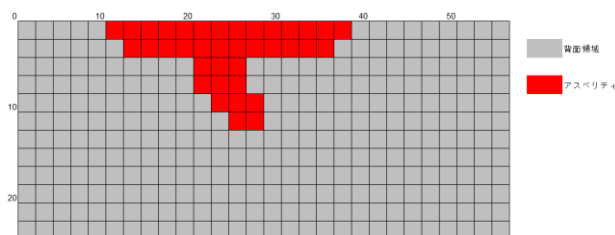


図-7 小領域のアスペリティ位置

表-2 断層パラメータ

標本数	77
断層破壊開始点緯度	32.7557
断層破壊開始点経度	130.7612
断層破壊開始点深さ(km)	13.58
断層面傾斜角度(°)	65
断層長さ(km)	56
断層幅(km)	24
断層面長さ方向分割数	28
断層面幅方向分割数	12
モーメントマグニチュード	7
断層上端深さ(km)	0.6
v/c	0.72
走向(°)	226
アスペリティ領域面積(km ²)	148
背面領域面積(km ²)	1,196
地震モーメント(N・m)	5.3×10^{19}

b) 建物の被害報告との比較

益城町での推定最大加速度分布図の拡大図を図-11に示す。香川ら²¹⁾の研究によると、甚大な被害を受けた益城町において、地表地震断層直近である下陳地区や上陳地区より、その周辺の田原地区の方が強震動に起因する大きな被害が報告されている。図-11より、下陳地区、上陳地区に比べて田原地区の方に大きな地震動が推定されていることが分かる。

c) ランダム成分の分布

図-12にKriging法によって補間したランダム成分の分布図を示す。ランダム成分が負の値になるということは地震動予測式で求めたトレンド成分が地震動を過大評価しているということである。図-12より、震央付近でランダム成分が-500Gal前後となっており、地震動予測式が地震動を強く過大評価していることが分かる。本手法では上盤効果やフリングステップなどの影響を考慮できなかったことも過大評価の一因であると考えられる。熊本地震では震央付近で多くの地震記録が得られたため、図-11のように震央付近での予測誤差は小さくなっているが、震央付近に地震計が設置されていない場合は精度の悪化が懸念される。

4. 結論

本研究では、Kriging法を用いて最大加速度分布推定手法を提案し、その妥当性について検討した。断層近傍の

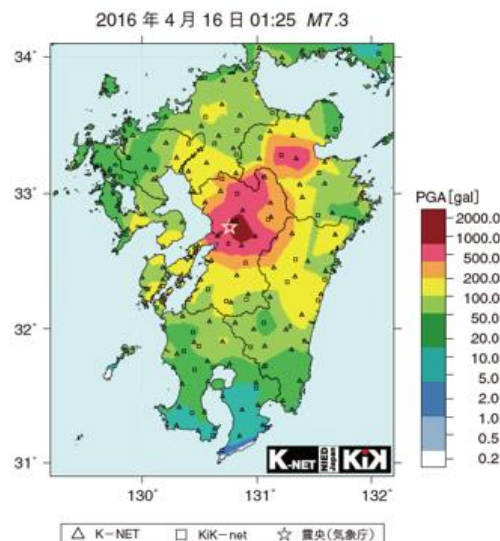


図-10 青井の地震動シミュレーションによる最大加速度の分布図²⁰⁾

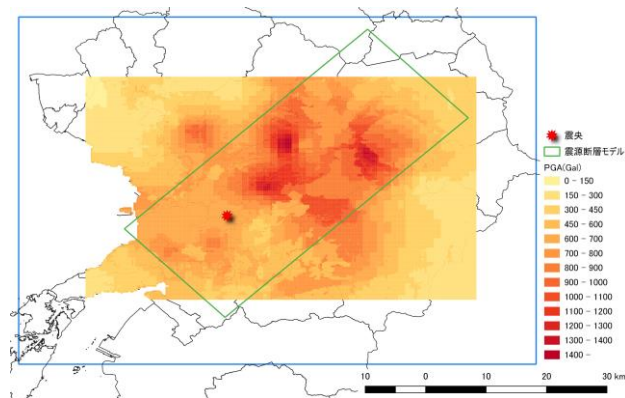


図-8 推定最大加速度分布図

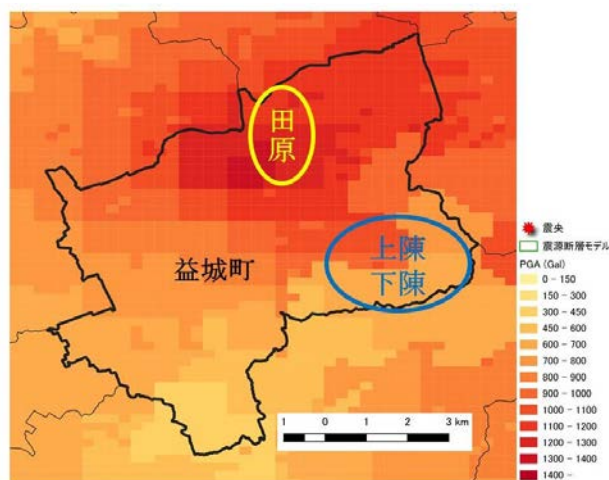


図-11 益城町での推定最大加速度分布図の拡大図

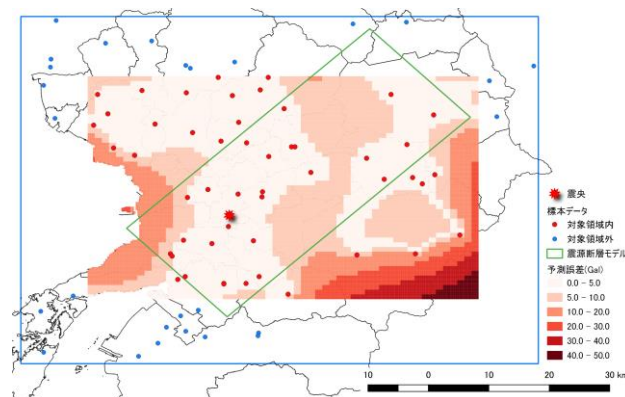


図-9 予測誤差分布図

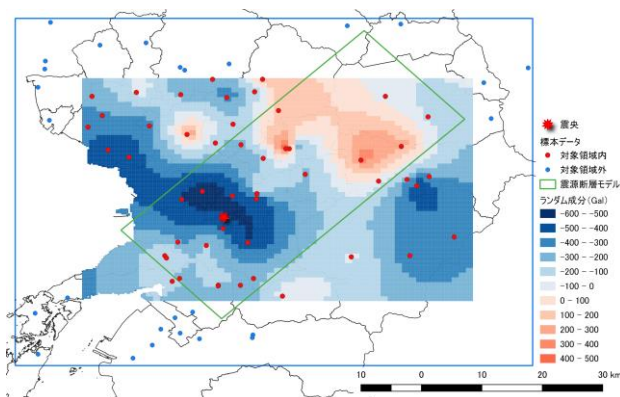


図-12 ランダム成分の分布図

地震動の特徴としてアスペリティとディレクティビティ効果を考慮したことで予測誤差は小さくなり、評価精度が向上したと考えられる。また、建物被害報告や強震動シミュレーション結果と整合した推定結果が得られ、本手法の妥当性が確かめられた。しかし、標本数が少ない地域ではさらに精度を向上させるために、地震動予測式に上盤効果などの影響を組み込むことが今後の課題である。また、他の内陸地震のデータを用いて回帰分析を行うことで汎用性の高い手法への改良を進める予定である。

謝辞：この研究を進めるにあたり、防災科学技術研究所が運用する強震観測網（K-NET, KiK-NET）、気象庁、熊本県、宮崎県、大分県、福岡県の公開データを活用した。JSPS 科研費 17K01343 の助成を受けた。ここに記して、謝意を表する。

参考文献

- 入倉孝次郎・釜江克宏：1948 年福井地震の地震動—ハイブリッド法による広周期帯域強震動の再現—, 地震第 2 輯, Vol.52, pp.129-150, 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, 1999.9.
- 片岡正次郎・佐藤智美・松本俊輔・日下部毅明：短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.4, pp.740-757, 2006.10.
- Kenneth W. Campbell, Yousef Bozorgnia : NGA-West2 Ground Motion Model for the Average Horizontal Components of PGA, PGV, and 5% Damped Linear Acceleration Response Spectra, Earthquake Spectra, Vol.30, No.3, pp.1087-1115, 2014.8.
- Brian S.-J. Chiou and Robert R. Youngs : Update of the Chiou and Youngs NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra, Earthquake Spectra, Vol.30, No.3, 1117-1153, 2014.
- 間瀬茂：地球統計学とクリギング法 R と geoR によるデータ解析, オーム社, 2010.
- 石神努・向井雅之・助川武則・松原武史：クリギングに基づく放射能分布推定プログラム ESRAD の開発—使用手引—, 日本原子力研究開発機構, 2012.11.
- 正路徹也・小池克明：クリギング：誤差を考慮した空間データの補間, 日本地熱学会誌, Vol.29, No.4, pp.183-194, 2007.
- 菅井径世・森保宏・小川克郎：クリギング法による地震動分布推定の実用化に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.80, No.707, pp.39-46, 2015.1.
- 山口亮・翠川三郎：地盤の平均 S 波速度を用いた地盤増幅率の推定手法の改良, 日本地震工学会論文集, 第 11 巻, 第 3 号, 2011.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会：「全国を概観した地震動予測地図」報告書（平成 17 年 3 月 23 日公表, 平成 18 年 4 月 12 日更新）, 2005.
- Boore. D. M. and Joyner. W. B. : The effect of directivity on the stress parameter determined from ground motion observations, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.79, No.6, pp.1984-1988, 1989.12.
- 森川淳・加藤研一・池浦友則・武村雅之・岡崎敦：逆断層の震源近傍における強震動の上盤効果と距離指標—最大加速度を対象とした等価震源距離と断層最短距離の適用性について—, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78, No.694, pp.2073-2082, 2013.12.
- 翠川三郎：地震動強さの距離減衰式, 地震第 2 輯, 第 61 巻, pp.471-477, 2009.
- 断層帯近傍における地震動メカニズム検討小委員会：2020 年度 第 1 回研究会 小委員会活動報告, 土木学会 地震工学委員会, 2020.
- 王寺秀介・神原隆則・澤田純男・岩田知孝：等価震源距離に基づくディレクティビティ効果を考慮した距離減衰式, 土木学会論文集 A1, Vol.65, No.1, 104-110, 2009.
- 政府地震調査研究推進本部 地震調査委員会：震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）, 平成 29 年（2017 年）4 月.
- Geller. R. J. : Scaling relations for earthquake source parameter and magnitudes, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.66, No.5, pp.1501-1523, 1976.10.
- 久保久彦・鈴木亘・青井真・関口春子：近地強震記録によって推定された平成 28 年（2016 年）熊本地震（4 月 16 日 1 時 25 分, M7.3）の震源過程, 防災科学技術研究所.
- 青井真：2016 年熊本地震の強震動と震源過程, 防災科学技術研究所, 2016.9.
- 香川敬生・吉田昌平・上野太士：2016 年熊本地震で生じた地表地震断層ごく近傍の強震動について, 土木学会論文集 A1, Vol.73, No.4, 2017.

EARTHQUAKE INTENSITY ESTIMATION BASED ON THE KRIGING METHOD CONSIDERING NEAR-FAULT FIELD EFFECTS

Tomoyuki KOGA and Hisakazu SAKAI

Even in a few decades, some severe earthquakes brought catastrophic damage to human beings and infrastructure. The prediction of infrastructure damage is crucial for mitigating those damages. To improve previous empirical seismic damage evaluation methods for infrastructure, the accurate seismic intensities at damaged and undamaged structures sites is essential for relating the structural damage to the seismic intensities. However, seismic values are usually not measured at the demanded sites. Although the Kriging method is widely used to evaluate intensity distributions in these days, the evaluated values are not suitable for regions with sparse observation sites nor near fault.

In this study, we improved the ordinary Kriging method by considering the characteristics near the fault region. The Kriging method is for the Peak Ground Acceleration (PGA) distribution and based on moment magnitude scale, hypocentral distance, ground amplification and the influence of asperity and directivity effect. We applied the method to the 2016 Kumamoto earthquake. Since our results confirmed that the prediction error of the estimated results was acceptably small, and it could be judged that the estimation was performed with high accuracy. Furthermore, the simulated PGA distribution agreed well with those of a strong ground motion simulation and some damage reports.