

1999年台湾集集地震における空間的地震動特性のクリッキング推定

能島暢呂¹・杉戸真太²・松下昌弘¹・柳生健治⁴

¹ 正会員 博士(工学) 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

² 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

³ 正会員 (株)大鉄工業 (〒532-8532 大阪市淀川区宮原 4-4-44)

⁴ 正会員 修士(工学) (株)イビソク (〒503-0854 岐阜県大垣市築捨町 3-102)

本研究は、断層近傍で多数の強震記録が得られた1999年台湾集集地震を対象として、各強震観測点での気象庁計測震度と継続時間を算出し、クリッキングを適用して未観測点での値を補間推定することにより、地震動の空間分布特性について検討を行ったものである。2種類のクリッキング手法(Ordinary KrigingとMedian-Polish Kriging)に基づいて、計測震度と継続時間それぞれの空間自己相関特性を表現するバリオグラムを算出し、観測値の補間推定値および推定誤差分散の空間分布を求めた。ディレクティブティー効果など断層近傍における地震動の特徴が明確に現れていることを明らかにしたほか、観測点の設置密度と補間推定値の精度の関連から、地震動強度分布に対するクリッキングの有効性について考察した。

Key Words: 1999 Chi-Chi earthquake, spatial interpolation, Ordinary Kriging, Median-Polish Kriging, JMA seismic intensity, duration

1. はじめに

わが国では、1995年兵庫県南部地震の教訓から、リアルタイム地震防災システムの重要性が広く認識されるようになり、地震動強度の面的分布の早期把握を目的として全国規模で強震観測網が展開されてきた。しかしながら地震計の設置密度には限界があり、未観測点での地震動強度を補間推定することが不可欠の課題であることに変わりはない。空間統計学の一手法であるクリッキング(Kriging)¹⁾は、観測値に基づいて未観測点での最良線形不偏推定量を算出し、空間補間を行う統計的手法であり、推定誤差分散の評価も可能である点に特徴がある。地震工学分野においては理論面に着目した基礎的研究は多いものの、実際の強震記録に適用した事例はまだ少ない。こうした中で1999年9月21日に台湾で発生した集集地震($M_w = 7.5$)では、台湾中央気象局(CWB)により多数の強震記録²⁾が収録された。特に断層近傍で高密度に得られた強震記録は貴重であり、震源付近の強震動特性の解明³⁾や震源過程の推定⁴⁾などに利用されている。

以上の背景のもとで、本研究では1999年台湾集集地震の強震記録をもとにして、各強震観測点での気象庁計測震度と継続時間を算出し、クリッキングを用いて地震動の空間分布特性について検討を行うとともに、その適用性について検証することを目的としたものである。

2. データとクリッキング手法の概要

(1) 計測震度と継続時間

本研究では、台湾中央気象局(CWB)により得られた422地点の加速度記録²⁾を対象として、記録の不備や重複を除去したうえで、ほぼ南北に80kmの長さで地表に出現した車籠埔断層を囲む東経 $120^{\circ}00' \sim 121^{\circ}10'$ (約120km)、北緯 $23^{\circ}20' \sim 24^{\circ}40'$ (約147km)の範囲内(後出の図を参照)にある106観測点での加速度記録を利用した。この範囲内で強震計が設置されている部分の面積は概算で約8,200km²となり、平均すると約8.8km四方に一箇所の割合で強震記録が得られている計算になる。まず加速度記録3成分を用いて、各観測地点での計測震度気象庁を算出した結果、平均値5.11、最小値3.97、最大値6.52で正規分布に近い分布形状となった。さらに東西成分を用いて加速度パワーの累積値が5%から95%に達するまでの時間 t_{90} を継続時間とした結果、平均値32.2秒、最小値8.7秒、最大値96.3秒となった。

図-1に計測震度および継続時間の空間補間のための解析手順を示す。

(2) バリオグラム (Variogram)

強震観測点の位置を s_i 、そこで観測された物理量を $Z(s_i)$ とする。観測点 s_i と s_j の2点間距離 h_{ij} と、観測値の差の2乗 $(Z(s_i) - Z(s_j))^2$ を、すべての2点の組み合わせについてプロットした散布図はバリオグラム・ク

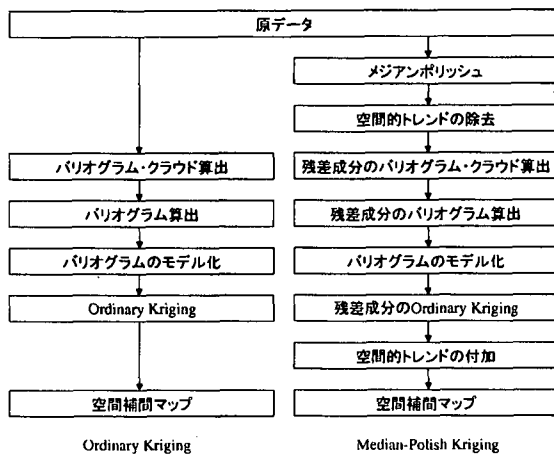


図-1 空間補間マップ作成の流れ

ラウドと呼ばれる。2点間距離を適当な幅 h で分割し、次式のように各区間内の観測値の個数 $N(h)$ でこれを平均化することによって、バリオグラムが求められる¹⁾。

$$2\hat{\gamma}(h) \equiv \frac{1}{N(h)} \sum_{i,j}^{N(h)} (Z(s_i) - Z(s_j))^2 \quad (1)$$

さらに、2点間距離 h の関数でバリオグラムをモデル化する。本研究では次式で表わされる Spherical model¹⁾を採用し、刻み幅 Δh を 5km とした。

$$2\gamma(h) = \begin{cases} 0, & h = 0 \\ c_0 + c_s \left\{ \frac{3}{2} \frac{h}{a_s} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a_s} \right)^3 \right\}, & 0 < h < a_s \\ c_0 + c_s, & h \geq a_s \end{cases} \quad (2)$$

図-2 に計測震度のバリオグラム・クラウド、図-3 に計測震度のバリオグラムとその Spherical model を示す。モデル・パラメータについては、計測震度で $c_0 = 0$, $c_s = 0.78$, $a_s = 60$, 継続時間で $c_0 = 0$, $c_s = 600$, $a_s = 70$ とした。

(3) Ordinary Kriging

クリッキングでは、未観測点 s_0 での物理量 $Z(s_0)$ を、次式のように n 個の観測値の加重平均で推定する。

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(s_i), \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (3)$$

ここで λ_i は $Z(s_i)$ に対する重み係数である。上記のバリオグラム・モデルを用いて空間的な共分散構造を表現し、推定量が不偏性を満足し推定誤差分散を最小化するという条件のもとで、 λ が決定され、補間推定値とその推定誤差分散が求められる¹⁾。

(4) Median-Polish Kriging

地震動の空間的分布では、断層からの距離減衰や局所的な地盤条件の影響でトレンド成分が顕著となる。Median-Polish とは二次元空間データからトレンド成分を抽出する手法である。対象地域を格子状に分割し、行方向および列方向に観測値の中央値を掃き出すことによって、共通中央値 a 、行効果 r 、列効果 c をトレンド成分として

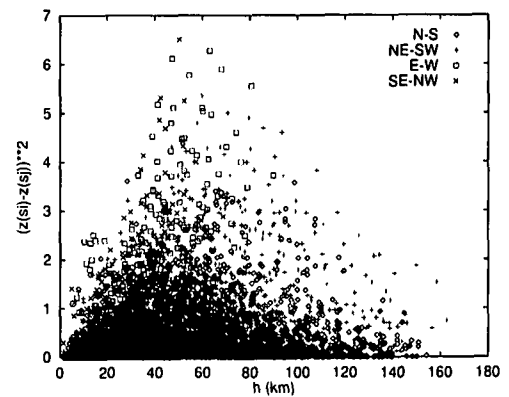


図-2 計測震度のバリオグラム・クラウド

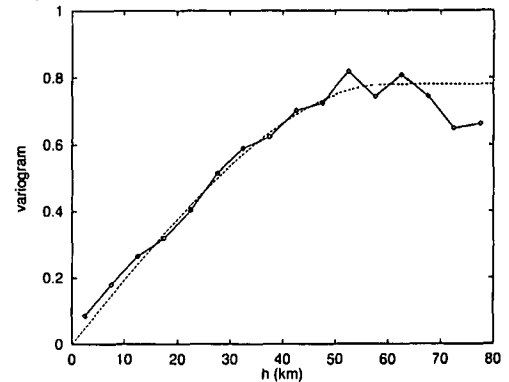


図-3 計測震度のバリオグラムとそのモデル

求め、残差成分 $R(s_i)$ を加えて観測値を表現する。座標 (x, y) の観測点 s_i では以下のようなになる¹⁾。

$$Z(s_i) = a + r(y) + c(x) + R(s_i) \quad (4)$$

前出の図-2 では、2点間距離 h の方向を 45° 刻みに 4 分割して方位ごとにマークを変えており、バリオグラムの方向依存性が確認できる。このように異方性の影響を無視できない場合、トレンド成分を除去した残差成分 $R(s_i)$ に対して Ordinary Kriging を適用する Median-Polish Kriging が有効となる。本研究では東経・北緯とも $5'$ 刻みに分割し、16 行 12 列の格子を形成して Median-Polish を適用した。その結果、計測震度の行効果のレンジは $+0.51 \sim -0.67$ 、列効果では $+0.80 \sim -1.32$ 、継続時間の行効果のレンジは $+12 \sim -5$ 秒、列効果は $+40 \sim -20$ 秒となり、東西方向の変動が大きいことがわかった。

図-4 は計測震度のトレンド成分、図-5 は計測震度の残差成分のバリオグラムとその Spherical model である。トレンド成分が除去されたことで、残差成分のバリオグラムは図-3 の $1/5$ 程度となっている。Spherical model のモデル・パラメータについては、計測震度で $c_0 = 0.05$, $c_s = 0.09$, $a_s = 20$, 継続時間で $c_0 = 0$, $c_s = 150$, $a_s = 45$ と求めた。計測震度については $c_0 \neq 0$ であるので、ごく近傍の二点で揺れが大きく異なる “microscale variation” を、いわゆる “nugget effect” として考慮することとなる。一方、継続時間については “nugget effect” を考慮せず $c_0 = 0$ とするのが適当と判断された。

3. Krigingによる空間補間の結果と考察

対象範囲を東西方向に 210 刻み (刻み幅 0.57km), 南北方向を 240 刻み (刻み幅 0.61km) とした 50400 点を観測点として補間推定値とその標準偏差を算出した。

(1) Ordinary Kriging

Ordinary Kriging で求めた計測震度の補間推定結果を図-6 に示す。相対的な大小関係を明確にするため、 $+$ 、 $-$ の記号を記入した。断層上盤側で震度 6 以上の値となり、南西部の沿海地域に向かって距離減衰が顕著であるのに対して、北方へは減衰が小さく、断層の破壊進行方向に地震動強度が増幅するディレクティビティ効果が表れているものと解釈できる。補間推定値の標準偏差を図-7 に示す。観測点から離れるにつれて標準偏差が大きくなる傾向や、観測点密度が高い断層下盤側で標準偏差が 0.25 以下と精度が良いことが確認できる。この程度の観測点密度で地震動強度の補間を行う場合、「震度階の強・弱の相違程度」が推定精度の目安であるといえる。

同様に継続時間に関する結果を図-8 と図-9 に示す。計測震度と継続時間には強い負相関が認められ、断層上盤側および北東側の地域では 15 秒~20 秒程度の短い継続時間となっている一方、断層の南西側の地域では 50 秒を越えており、ディレクティビティ効果が確認できる。標準偏差は図-7 の計測震度と同様の傾向を示しており、観測点密度の高い平野部では 7 秒以内となっている。

(2) Median-Polish Kriging

図-10 は Median-Polish Kriging で求めた計測震度の補間推定結果である。図-6 に比べると、トレンド成分 ($a+r+c$) に起因する東西方向および南北方向の局所的トレンドが不自然に目立つ。しかし観測点密度が高い平野部一帯では、クリッキング手法の相違による補間推定結果の相違はほとんど認められない。図-11 に示す Median-Polish Kriging による標準偏差は、図-7 の Ordinary Kriging による標準偏差と比べると、“nugget effect”を考慮したために観測点近傍で大きな値を示しているものの、観測点密度が高い平野部で約 0.20 以内で、Ordinary Kriging より小さく抑えられている。

Median-Polish Kriging による継続時間の結果を図-12 と図-13 に示す。計測震度と同様に、補間推定値に東西方向および南北方向のトレンド成分が目立つが、観測点密度が高い平野部では、図-8 の Ordinary Kriging による補間推定値とほぼ同様の分布となっている。また図-13 の標準偏差では、観測点密度の高い平野部で 5 秒以内となっており、Ordinary Kriging より小さくなっている。

4. 結語

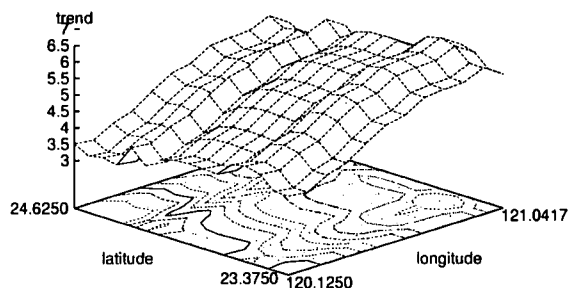


図-4 計測震度のトレンド成分

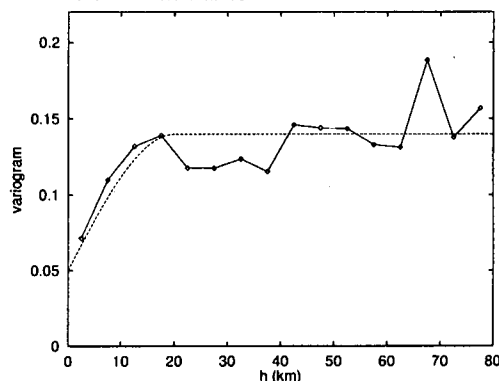


図-5 残差成分のバリオグラムとそのモデル

本研究では 1999 年台湾集集地震において得られた強震記録より、Ordinary Kriging と Median-Polish Kriging を用いて、断層近傍における計測震度と継続時間の空間的分布を算出した。Ordinary Kriging の方が簡便であるが、データの異方性を考慮した Median-Polish Kriging の方が、対象範囲全体にわたって推定誤差は小さく抑えられ、観測点密度が高い平野部での標準偏差は、計測震度で約 0.20 以内、継続時間 5 秒以内という結果となった。また強震記録が高密度に得られる地域においては、クリッキング手法によらずほぼ同じ補間推定結果が得られることが明らかとなった。今後、結果を大きく左右するバリオグラムのモデル化について詳細に考察するとともに、Universal Kriging 等の適用についても検討を進めたい。

謝辞：貴重な強震記録をご提供いただいた台湾の関係各位に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) Cressie, N.A.C.: *Statistics for Spatial Data, Revised Edition*, John Wiley & Sons, New York, 1993.
- 2) CWB: CWB Free-Field Strong-Motion Data from the 921 Chi-Chi Earthquake: Volume 1. Digital Acceleration Files on CD-ROM, 1999.
- 3) 能島暢呂, 杉戸真太, 古本吉倫: 1999 年台湾集集地震の強震記録の主軸解析, 第 35 回地盤工学研究発表会平成 12 年度発表講演集, pp.2337-2338, 2000.
- 4) 久世益充, 杉戸真太, 能島暢呂, 柳生健治: 強震動加速度記録を用いた 1999 年台湾集集地震における震源過程のインバージョン, 第 26 回地震工学研究発表会講演論文集, 2001.

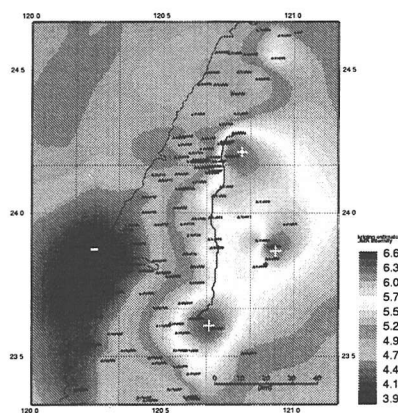


図-6 計測震度の補間推定値 (Ordinary Kriging)

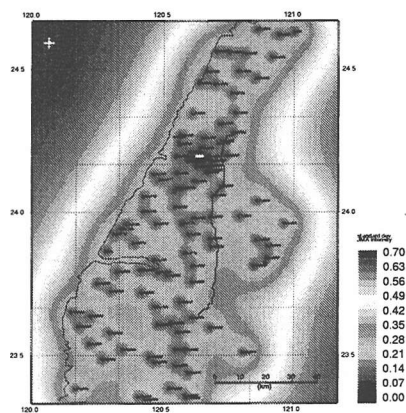


図-7 計測震度の標準偏差 (Ordinary Kriging)

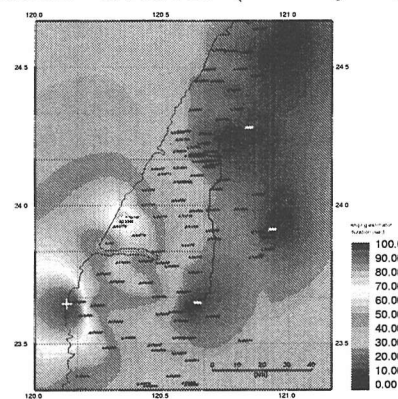


図-8 継続時間の補間推定値 (Ordinary Kriging)

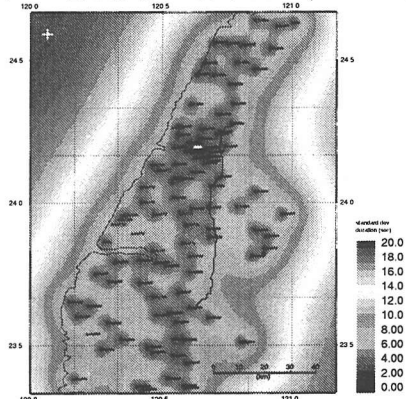


図-9 継続時間の標準偏差 (Ordinary Kriging)

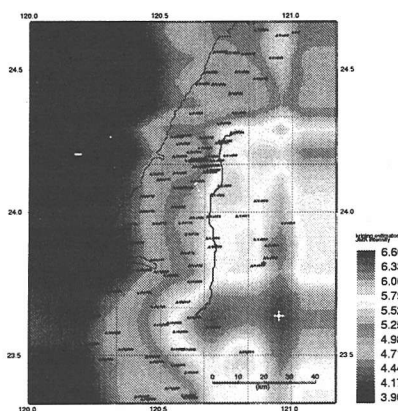


図-10 計測震度の補間推定値 (Median-Polish Kriging)

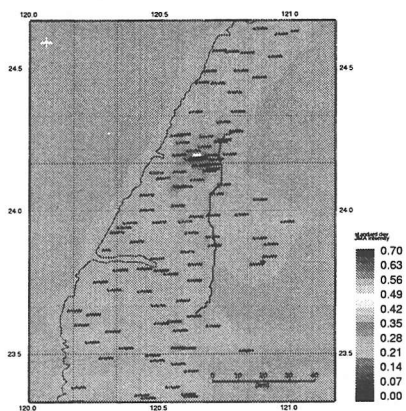


図-11 計測震度の標準偏差 (Median-Polish Kriging)

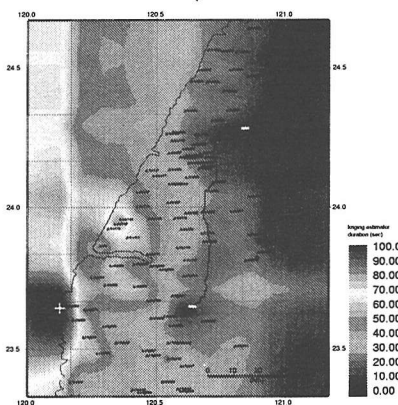


図-12 継続時間の補間推定値 (Median-Polish Kriging)

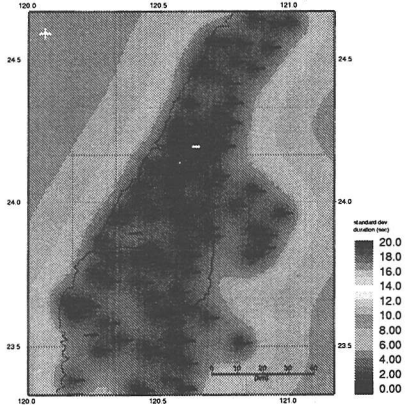


図-13 継続時間の標準偏差 (Median-Polish Kriging)