

# P波を用いた単独観測点処理による早期地震警報手法の高精度化

鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室

岡本京祐 (okamoto.kyosuke.51@rtri.or.jp), 津野靖士

## 1. はじめに

鉄道における早期地震警報では、揺れの検知後により早く列車を止めるために、単一観測点での震源緒言推定が有効である。この際に、震央距離を推定するために使われるのが  $B$ - $\Delta$ 法 (Odaka, 2003),  $C$ - $\Delta$ 法 (山本ほか, 2012) である。これらの手法では  $P$  波初動の立ち上がりの傾き ( $C$  値に相当) が地震に依らず震央距離と関係性を持つことを利用して、震央距離を求める。しかし現実的には、同じ震央距離の地震に対して  $C$  値がばらつくことが観測されており、震央距離推定の精度を低下させている。本研究では、同じ震央距離の地震に対して  $C$  値が異なる大きな要因が地域により不均質性が異なることであると考え、このことを検証する。また、表層の堆積層内での増幅効果、震源関数が与える影響についても簡単に考察する。

## 2. ボルン近似を用いた $P$ 波初動の合成

実際の地震波形から観測された  $C$  値を説明するために、ボルン近似に基づく数値計算 (Sato, 1984; Yoshimoto et al., 1997) により地震波形を合成し理論的な  $C$  値を求める。本計算の際には、一次の  $PP$ ,  $SP$ ,  $PS$ ,  $SS$  変換波が考慮されている。計算された波形に対して式 1 を最小二乗法でフィッティングすることで  $C$  値を求める。

$$y = Ct \quad (1)$$

ここで、 $t$  は時間を表す。  $C$  値を求める際には、 $P$  波到達後 0.5 秒間の波形を用いている。また、波形合成の際には、4Hz から 20Hz の波を考慮している。この波形計算の際にパラメータとなるのが、地殻の不均質性を表す相関距離  $a$  とばらつき強度  $\varepsilon$  であり、震源距離  $r$  における指数関数型自己相関関数  $R(r)$  (式2)

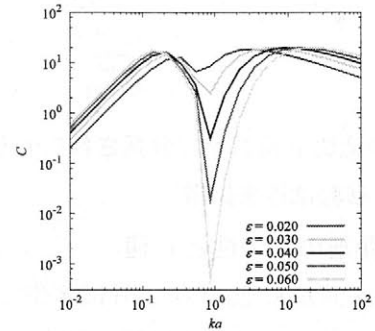


図 1  $C$  値 (縦軸) と各種不均質パラメータの関係性 ( $ka$  が横軸,  $\varepsilon$  ごとに描画)

に従う。

$$R(r) = \varepsilon^2 \exp\left(-\frac{r}{a}\right) \quad (2)$$

$C$  値と  $ka$ ,  $\varepsilon$  の関係にあるケースについて描画したものが図 1 である。ここで、 $k$  は波数である。これより、 $ka \approx 1$  となり散乱強度が大きくなる領域近傍 (例えば, Wu, 1982) で  $C$  値が  $a$ ,  $\varepsilon$  両者に対して大きく変動することが分かる。本研究では簡単のため地域ごとに  $a$  が揺らぐことを考えるが、 $\varepsilon$  の揺らぎも  $C$  値に対して大きな影響を持っていると考えられる。

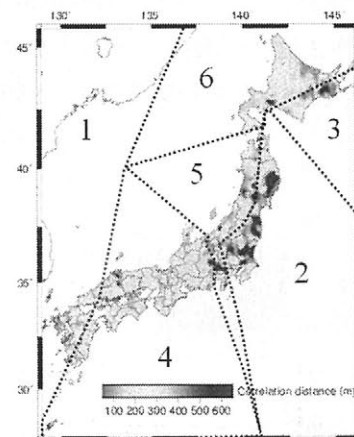


図 2 推定された相関距離  $a$  の値。地域区分は川瀬・松尾, 2004 より。

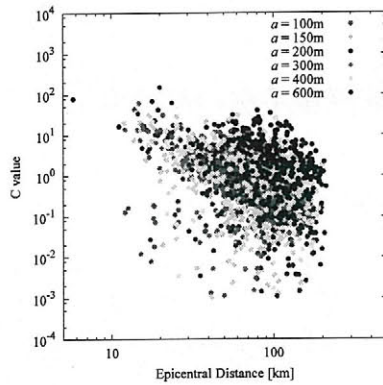


図3 観測点の  $a$  値ごとに分類された  $C$  値（縦軸）の分布（横軸は震央距離）。

### 3. 相関距離の地域性と $C$ 値

1996年3月から2011年4月に発生した55イベント、2373波形に対する観測  $C$  値と、その観測  $C$  値を最も説明できる相関距離  $a$  を理論計算により観測ごとに求めた ( $e$  は 6% に固定)。その結果が図2である。図2に示される観測点の相関距離ごとに色分けした  $C$  値が図3である。図2より相関距離  $a$  が地域ごとに長短の傾向を持っており、それによって  $C$  値が地域ごとにクラスターを作ることが分かる(図3)。同じ震央距離に対しても  $C$  値がばらつく要因として、地域ごとに異なる  $C$  値のクラスターを考慮していなかったことが挙げられる。

### 4. 表層地盤での増幅効果と震源関数

$C$  値がばらつく要因として、表層堆積層内での増幅効果、地震ごとに異なる震源関数の影響も挙げられる。増幅効果を簡易に評価するために、2000年4月から2015年7月に発生した地震に対して

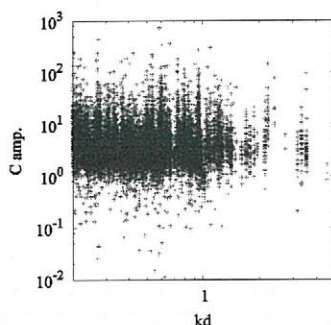


図4 KiK-net 地中、地表での  $C$  値増幅（縦軸）と基準化した KiK-net 深さ（横軸）。

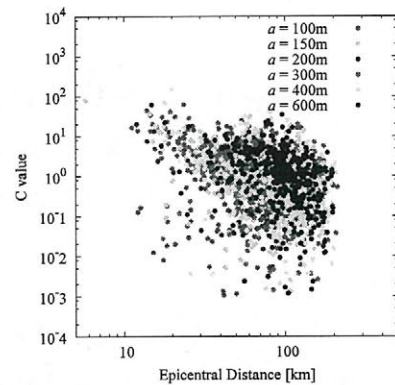


図5 観測点の  $a$  値（全波形より計算）ごとに分類された  $C$  値（縦軸）の分布（横軸は震央距離）。

KiK-net の地中と地表での  $C$  値の増幅を計算した(図4)。これより、KiK-net の置かれた環境に拠らず、 $10^0$  から  $10^1$  程度の  $C$  値増幅が生じていることが分かる。図3に見られる  $C$  値ばらつき（最大  $10^5$  オーダー程度）に比べて小さいが、震央距離推定の際に地震計の設置環境（岩盤サイトまたは堆積サイト）の考慮は必要になると考えられる。

図5はP波到着からS波到着までの観測波形と理論波形の振幅残差を最小にすることにより相関距離  $a$  を求め、その  $a$  値ごとに  $C$  値をプロットしたものである。P波全体を使うことで  $C$  値を用いた相関距離  $a$  の推定に比べて、震源関数そのものが推定に与える影響は小さいと考えられる。しかしながら、 $C$  値の地域性が両者(図3と図5)で似た傾向を持つことから、 $C$  値のばらつきは震源関数以外の要因に大きく影響を受けていることが示唆される。

### 4. まとめ

本研究では、 $C$  値のばらつきが地殻不均質の地域性によると考え数值計算、実データ解析により検討を進めた。その結果、不均質具合の違いにより、観測される  $C$  値のばらつきを説明できることが分かった。また、堆積層内での地震動の増幅と震源関数が  $C$  値ばらつきに与える影響も簡単に評価した。その結果、増幅効果は  $C$  値に影響を与える可能性があること、震源関数の影響は比較的小さいことが分かった。