

精度と即時性を高めたP波による震央推定手法

防災技術研究部 地震防災研究室
室長 山本 俊六

1. はじめに

現在新幹線等で利用されている早期地震防災システムは、振幅の規定値超過を利用した運転制御（S波警報）とともに、P波初動部のデータを利用した運転制御（P波警報）を行う。P波警報ではP波初動の短時間の地震波データより地震諸元（震央、マグニチュード）を推定し、これらと経験的に求められた地震の影響範囲との関係より制御範囲を求め、警報を出力する。原理的にP波警報はS波警報に比べ早く警報を出力する可能性を持つが、適切な警報出力を行うためには、地震諸元を精度良く推定することが重要である。ここでは、現行のP波警報で使用されている震央推定手法に比べ、精度と即時性を同時に高めた推定手法を開発したので報告する。

2. 現行システムの震央推定手法

現行の早期地震防災システムにおける震央推定の流れを図1に示す。P波検知後、地震計は、P波初動部の加速度振幅の成長から震央距離を求め、同時に、P波初動部の変位の振動方向から震央方位を求める。求められた震央距離と震央方位から震央を決定する。

震央距離の推定にはB- Δ 法¹⁾が使用される。これはP波初動部2秒のデータに以下の(1)式で示す関数をフィッティングさせ、主に振幅成長の傾きを表す係数Bと震央距離の経験的關係を用いて震央距離を推定する手法である。

$$y(t)=Bt\exp(-At) \tag{1}$$

ここで、tはP波到達からの経過時間(秒)、y(t)は加速度振幅絶対値、A、Bは係数である。また、震央方位はP波初動部1.1秒のデータに主成分分析法²⁾を適用することにより波形の振動方向を求めて推定する。

地震計はこの後、震央距離と観測された波形の振幅からマグニチュードを推定する。さらに震央とマグニチュードの關係から運転制御範囲を求める。したがって、震央距離と震央方位の推定精度は早期地震防災システムの性能に大きな影響を与える。

3. 提案する震央推定手法

3.1 震央距離推定手法

はじめにP波初動部における地震波の性状を把握するために、P波到達以降の加速度振幅の時間変化を様々なマグニチュードや震央距離で分類し比較を行った。その一例を図2に示す。図はP波初動部3秒の加速度振幅絶対値を示している。マグニチュ

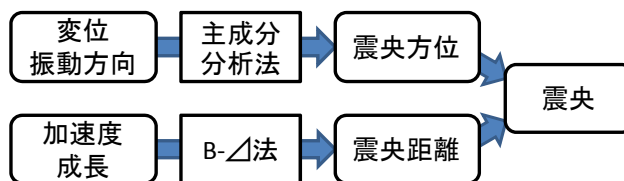


図1 P波による現行の震央推定手法

ードは4クラスから7クラス、震央距離は20~40km、60~80kmの波形を選択した。

図よりP波初動部0.5秒程度までは、マグニチュードの違いによらず、同一震央距離の加速度絶対値はほぼ同じように成長していることが分かる。一方、P波初動部0.5秒程度までの加速度成長は、震央距離が長くなるほど緩やかになることが確認できる。振幅成長の性状が変わる主な原因は地震波の散乱や幾何減衰と考える。これらの影響は距離に依存するため、加速度の振幅成長の度合いから震央距離を推定することが可能になる。

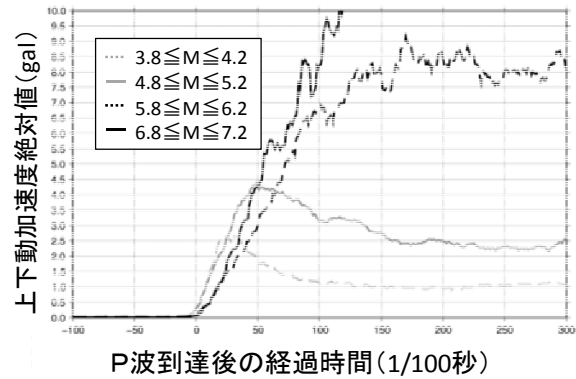
ここでは図2に示したP波初動部の形状を以下の1次関数で近似することとする³⁾。

$$y(t) = Ct \quad (2)$$

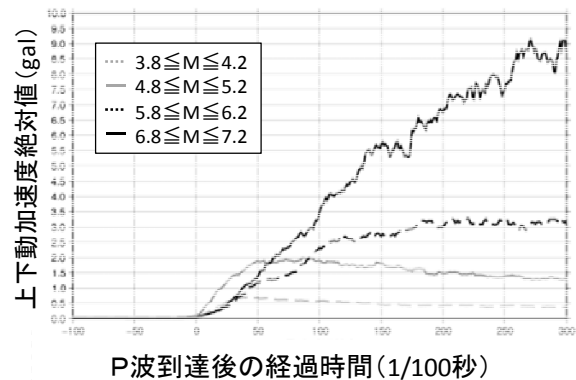
tはP波到達からの経過時間(秒)、y(t)は加速度絶対値、Cは成長の傾きを表す係数である。(2)式の形状を、現行のB-△法で使用する関数形状と比較したものを図3に示す。B-△法では2秒のデータを対象に2つの係数A, Bを持つ関数をフィッティングさせるのに対して、提案する手法では0.5秒のデータを対象に1つの係数Cを持つ関数をフィッティングさせる。

次に係数Cと震央距離との相関性を確認するため、防災科学技術研究所のK-NETで記録された10365波形(139地震)に対して(2)式を最小自乗法でフィッティングさせ係数Cを求め、これと気象庁の地震カタログから計算した震央距離とを比較した。その結果を図4に示す。図より係数Cと震央距離との間には良好な負の相関があることが確認できた。

さらに、図4に示したデータより係数Cと震央距離の関係式を求め、これを用いた際の震央距離の推定精度を計算した。対数軸における推定震央距離の誤差(推定された震央距離の対数値-気象庁による震央距離の対数値)の自乗平均平方根は0.277である。同様の処理を現行の震央距離推定手法を用い推定誤差の自乗平均平方根を求めたところ0.313を得た。以上より、提案する手法により震央距離の推定精度が約13%向上したことが分かる。また推定に用いる解析データ長は従来の2秒から0.5秒に短縮された。



(a)震央距離 20~40km のケース



(b)震央距離 60~80km のケース

図2 P波初動部における加速度振幅絶対値の時間変化

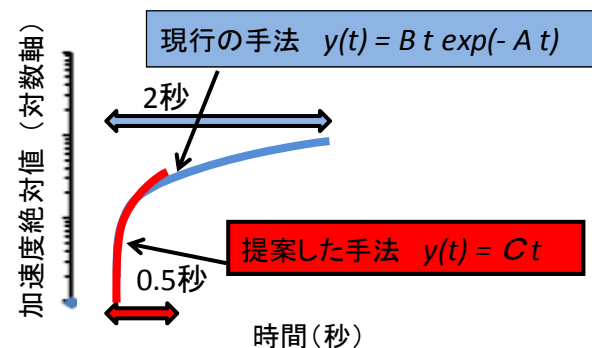


図3 現行の震央距離推定手法と提案した手法

3.2 震央方位推定手法

現在利用している震央方位推定手法はP波初動部 1.1 秒の変位波形に主成分分析を適用し 3 成分軌道の主軸を求めることにより、震央方位を推定している。ここでははじめに、解析データ長の変化に伴う震央方位推定誤差の変化を求める。K-NET で記録された 1991 波形を対象に、現行手法による震央方位の推定を行い、気象庁カタログに基づく震央方位との誤差を算出した。解析データ長を 0.1 秒から 2.0 秒まで 0.1 秒刻みで変化させ平均推定誤差をプロットしたものを図 5 に示す。

図より、解析データ長 0.6 秒で誤差が最小値を示すことが分かり、これより現行手法 (1.1 秒) より短い解析データ長を用いることの効果が認められる。長い解析データ長で誤差が大きいのは、データの後半部に直達P波以外の散乱波等が多く混入し、解析の精度を低下させているためと考える。一方、解析データ長を極端に短くすると推定誤差が増大することも分かる。これは解析用のサンプル数が非常に少なくなるため、主成分分析が不安定になるためと考える。したがって、解析精度を上げるためには解析が安定する程度のサンプル数を確保しつつ解析データ長をある程度短くすることが効果的と予測できる。

以上より、ここではP波初動の半波長を解析対象として主成分分析を行う方法を提案する。概念を図 6 に示す。現行の手法は地震波の性質によらず、固定長 (1.1 秒) を対象に解析を行った。提案する手法では、P波到達以降、最初に振幅の極性が入れ替わるまでの区間を解析対象とするため、地震波により解析データ長が変化する。ただし、極性が入れ替わるまでの時間が 0.2 秒より短い場合は、解析データ長を 0.2 秒とする。これにより、十分なサンプル数を確保しつつ、地震波の波長に応じて直達波以

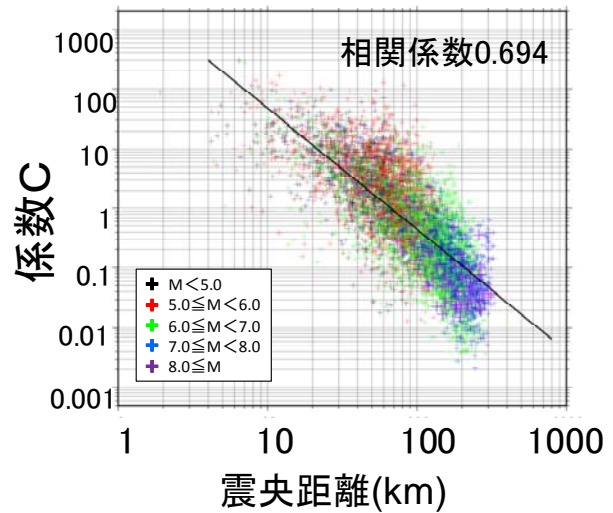


図 4 係数 C と震央距離の関係
(図中の実線は回帰式を示す)

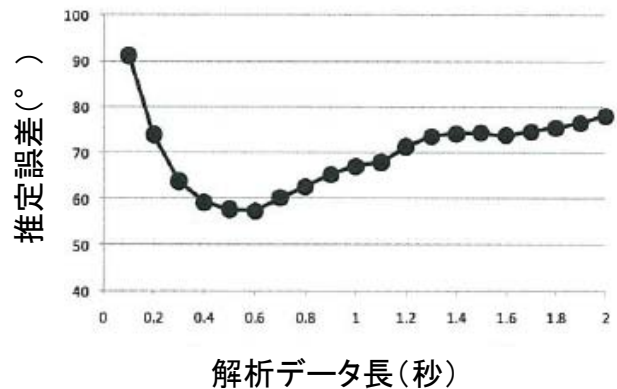


図 5 解析データ長に伴う震央方位推定精度の変化

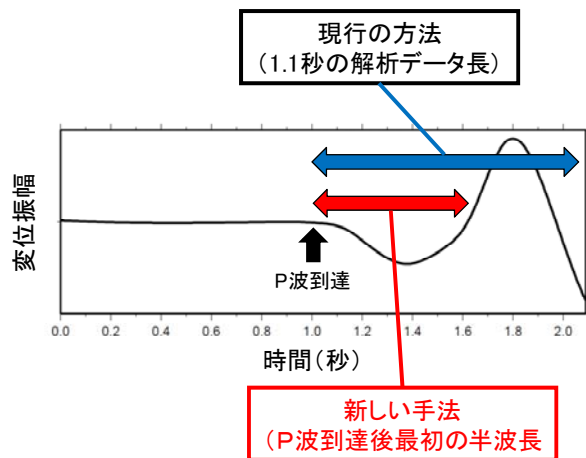


図 6 現行の震央方位推定手法と提案した手法

外の成分の混入の影響の少ない適切な解析データ長を扱うことが可能となる⁴⁾。

この手法を前述のデータセットに適用した際の、解析データ長の頻度分布を図7に示す。図より0.4～1.0秒程度の解析データ長が多いことが分かる。解析データ長全体の平均は0.85秒である。また推定誤差の自乗平均平方根は49.0度となり、1.1秒の解析データ長を用いた現行の手法(推定誤差67.9度)に比べて28%推定精度が向上する。したがって、提案した手法を用いることにより推定精度は向上し、平均的な解析データ長は短くなること分かる。

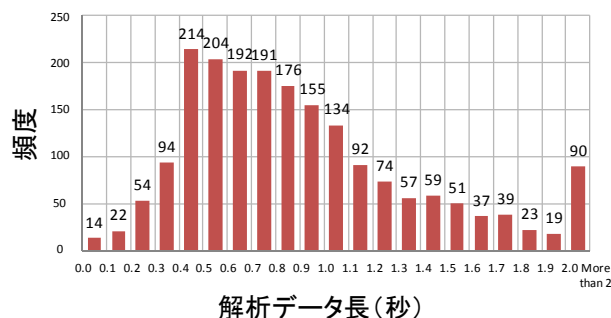


図7 提案した手法による解析データ長の頻度分布

4. まとめ

ここでは、早期地震防災システムで利用される震央(震央距離と震央方位)推定の精度向上を目指して提案した手法に関して報告した。

震央距離推定に関しては、P波初動部0.5秒のデータに1次関数をフィッティングさせ、その傾きと震央距離の経験的關係を利用して震央距離の推定を行う手法を提案した。この手法により、震央距離の推定精度は現行の手法に比べて約13%向上し、解析データ長は現行の2秒から0.5秒に短縮された。震央方位推定手法に関しては、P波初動部の半波長を対象に主成分分析を行う手法を提案した。この手法により、震央方位の推定精度が28%向上し、解析データ長が従来の1.1秒から平均0.85秒に短縮された。

早期地震防災システムにおいて、上記の手法を組み合わせることにより、現行より精度と即時性を高めた震央推定を行うことが期待される。

参考文献

- 1) Odaka, T., Ashiya, K., Tsukada, S., Sato, S., Ohtake, K., and Nozaka, D., : A new method of quickly estimating epicentral distance and magnitude from a single seismic records, " Bulletin of Seismological Society of America, Vol.93, No.1, pp.526-532, 2003.
- 2) 気象研究所地震火山研究部：自動検測手法の研究，気象研究所技術報告，No.16，pp.56-100，1985.
- 3) 山本俊六，野田俊太，是永将宏：P波初動部の立ち上がり特性に着目した震央距離推定手法，鉄道総研報告，Vol.26，No.9，pp.5-10，2012.
- 4) 野田俊太，山本俊六，佐藤新二：早期地震検知における地震諸元推定手法の精度および即時性向上，Vol.25，No.7，pp.7-12，2011.