

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

震央距離をより早く 正確に推定する

新幹線の早期地震防災システムは、S波（※参照）による規定値超過に基づく警報機能に加えて、地震動のP波（※参照）より地震諸元（震央位置やマグニチュード）を推定し、この情報に基づき速やかに警報を出力する機能を持っています。この機能の性能を高め、より早く正確に地震諸元を推定することができれば、状況によってより早期の警報出力が可能となります。ここでは、P波初動部の性質に着目し、従来より精度と即時性が高い震央距離推定手法に関して解説します。

P波による地震警報

現在新幹線で利用されている地震防災システム¹⁾では、沿線や海岸に設置された各地震計により観測された地震波形を即時的に用いて、S波による警報処理およびP波による警報処理を行います。S波による警報処理は、加速度の規定値超過に基づき警報出力を判断するもので、P波による警報処理は、P波より一旦地震諸元を推定し、この

情報から対象地点での警報出力の判断を行うものです。

P波による警報処理は、地震時により早く警報を出力するための重要な特徴的な機能ですが、適切な警報出力を行うためには、地震諸元を短時間で精度よく求める必要があります。現在行われている地震諸元推定の流れを図1に示します。はじめに震央距離、震央方位をそれぞれ独立して推定し、



山本 俊六
Shunroku Yamamoto
防災技術研究部
地震防災研究室
室長
【専門分野】地震工学、
地震学



野田 俊太
Shunta Noda
防災技術研究部
地震防災研究室
研究員
【専門分野】地震学

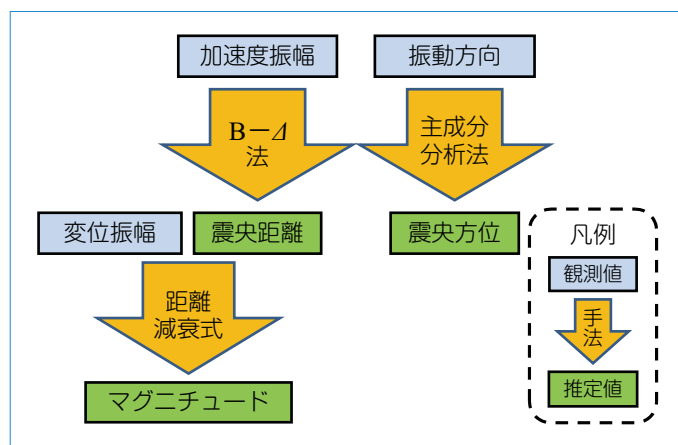


図1 P波による地震諸元推定の流れ

※ P波・S波

P波は地震発生時最初に観測される振幅の小さな地震波です。縦波とも呼ばれ、地盤を最も速い速度で伝播する波動です。S波は、P波に遅れて伝播する振幅の大きな地震波です。横波とも呼ばれ、地震被害の原因となる波動です。

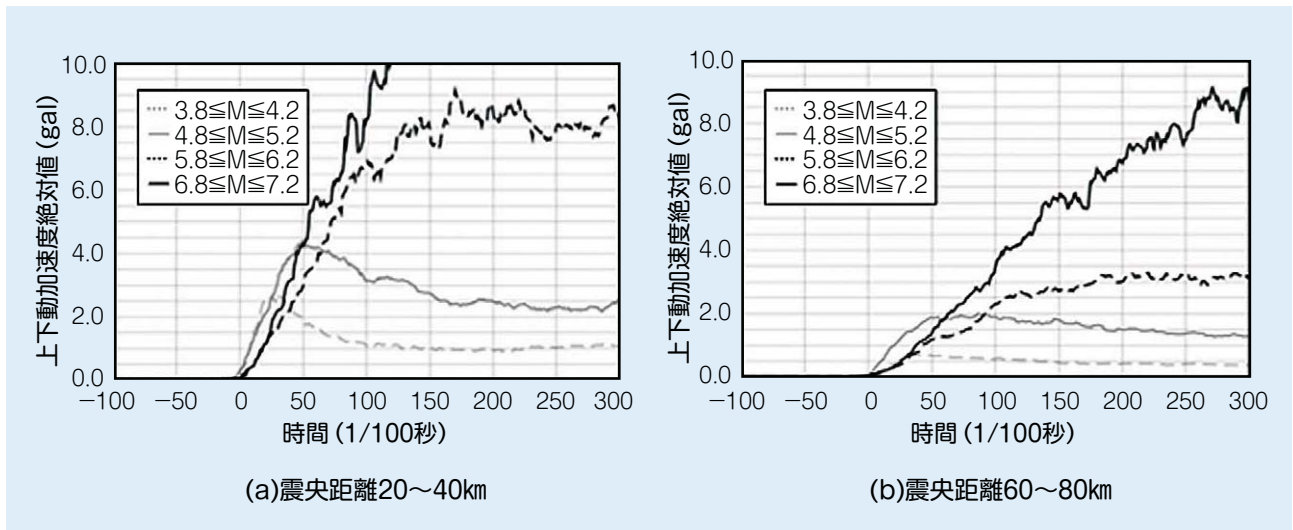


図2 地震波の立ち上がりの性質

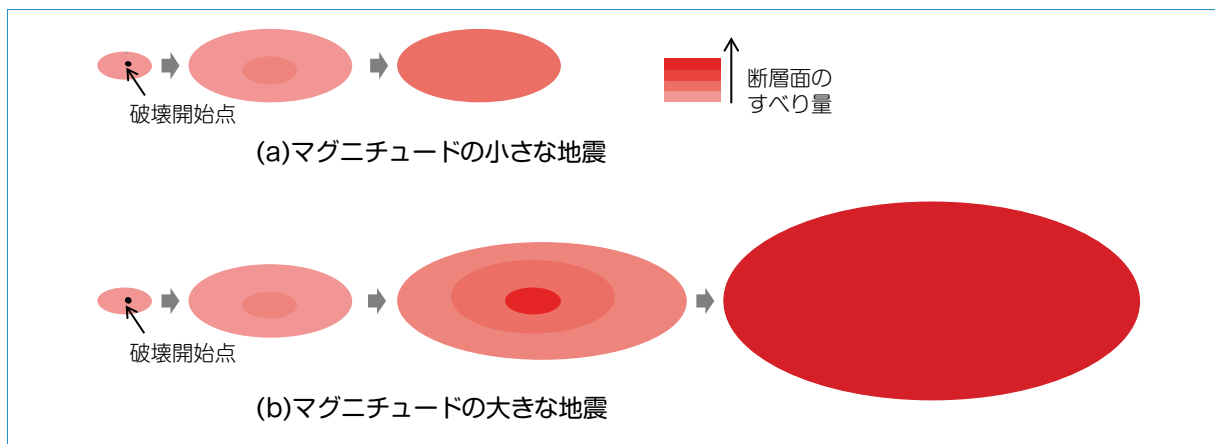


図3 断層破壊の進展イメージ

次に震央距離と観測された変位振幅からマグニチュード (M) を推定します。したがって、震央距離と震央方位を早く正確に求めることが、P波警報の第一歩となります。

ここでは単独の地震計のデータを用いた震央距離の推定手法に焦点を絞り、P波初動部の立ち上がりの性質が示す物理的な意味にも触れながら、手法の概要と効果を説明します。

P波の立ち上がりの性質

はじめに、観測された地震記録に基づき、P波初動部の立ち上がりの性質

を確認します。図2に防災科学技術研究所の強震観測網 (K-NET) で記録された地震動記録を震央距離とマグニチュードによりグループ分けし、P波初動部3秒間における加速度振幅絶対値の平均的な成長をそれぞれ計算したものを示します。(a)は震央距離20~40kmのグループ、(b)は震央距離60~80kmのグループです。

図2より、震央距離が等しい場合、マグニチュードが大きなものほど時間をかけて振幅が大きく成長することが分かります。また、P波の立ち上がりから0.5秒程度までの範囲では、立ち

上がりの性質はマグニチュードに寄らず、概ね等しいことが分かります。さらに、この範囲における振幅の成長の傾きは震央距離が遠いほど緩やかになる傾向が認められます。

P波初動部の性質と断層破壊との関係を考察する目的で、異なるマグニチュードの地震における断層破壊進展の違いを単純化して表現した概念図を図3に示します。(a)がマグニチュードの小さな地震、(b)がマグニチュードの大きな地震の断層破壊の進展を表現しています。大きなマグニチュードの地震では時間をかけて破壊が広が

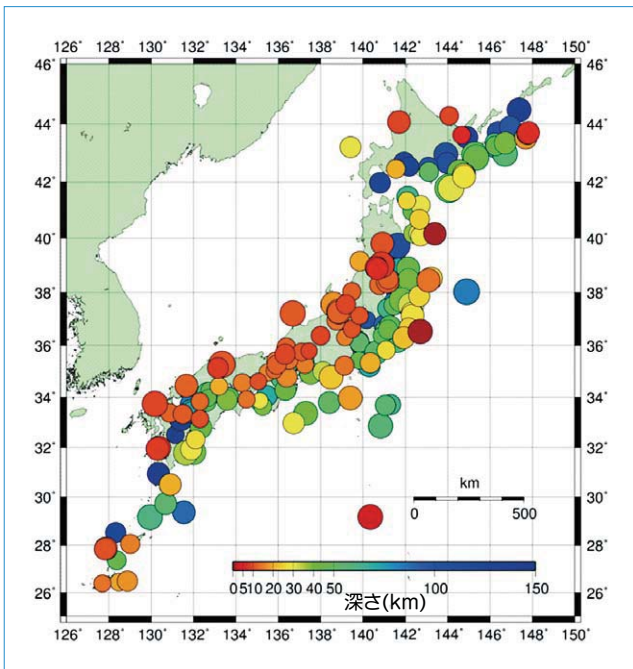


図4 解析に用いた地震の震央と深さ

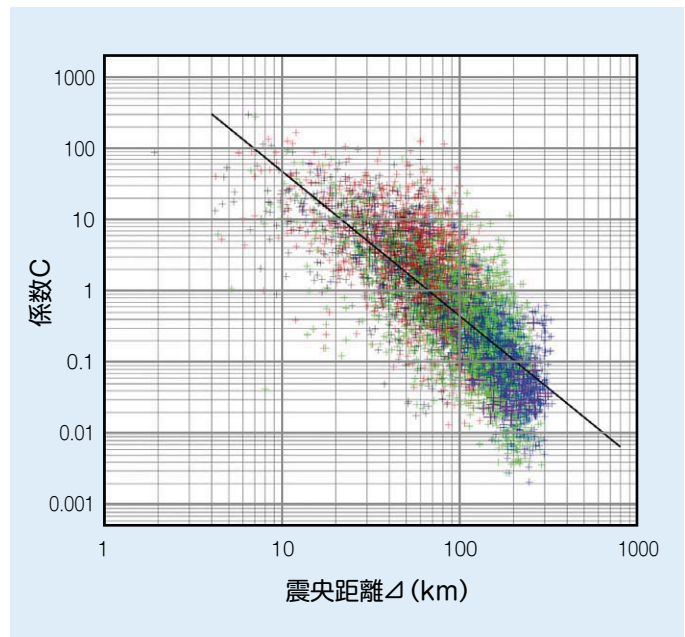


図5 係数Cと震央距離Δ

り、最終的に広い範囲が大きくなりすぎます。ただし、破壊進展の初期段階では、破壊範囲とすべり量に関し小さなマグニチュードの地震と大きな差はないと考えることができます。このため、P波初動部の振幅成長はマグニチュードに寄らずほぼ同様であることが推測されます。

ではP波初動部の振幅成長の度合いが、震央距離にしたがい変化するのは何故でしょうか。これは、主に散乱と幾何減衰が影響するためと考えられます。

地震動が伝搬する地盤は不均質性を有しており、伝搬経路で波動の散乱が発生します。震央距離が長くなるほど、散乱の影響は強く、遅延して観測点に到達する成分が増加します。結果的に波形の立ち上がりが緩やかになります。

また地震波は、震源から射出された後3次元的に広がることにより伝搬距離に伴い振幅が減少する性質を持ちます。これを幾何減衰と呼びます。

P波初動部は、主に上述した散乱と幾何減衰の影響を受け、伝搬距離に伴

い大きく変化します。したがって、P波初動部の性質を調べることで、逆に震央距離を推定することが可能になると考えられます。

P波初動部の傾きと震央距離

ここではP波立ち上がりの傾きと震央距離の関係調べるため、図4に示した139の地震に対して、K-NETで記録された10365波形を対象に解析を行いました。

図2より、P波立ち上がりから0.5秒程度の範囲では、立ち上がりの性質を1次関数で表現できることが分かります。したがって、成長の性質は“傾き”を用いて単純に評価することが可能です。この傾きを求めるため(1)式をフィッティングさせて係数Cを求めます。

$$y(t) = Ct \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 t はP波立ち上がり後の経過時間、 $y(t)$ は加速度振幅絶対値、 C は

フィッティングにより定まる係数です。

上記データセットを対象に、P波立ち上がりから0.5秒のデータに(1)式をフィッティングさせ、求められた係数Cと震央距離との関係を表したものを図5に示します。図より、ばらつきは認められるものの、係数Cと震央距離の間に負の相関が示されることが分かります。また、回帰分析の結果、(2)式が求められます。

$$\log_{10}(\Delta) = -0.493 \log_{10}(C) + 1.826 \dots\dots\dots(2)$$

式中の Δ は震央距離を表します。

以上より、地震時にP波立ち上がりから0.5秒のデータを対象に(1)式をフィッティングし、求められた係数Cを(2)式に入力することにより、震央距離を求めることが可能となります。

従来の推定手法との比較

一方、現行の震央距離推定手法²⁾で

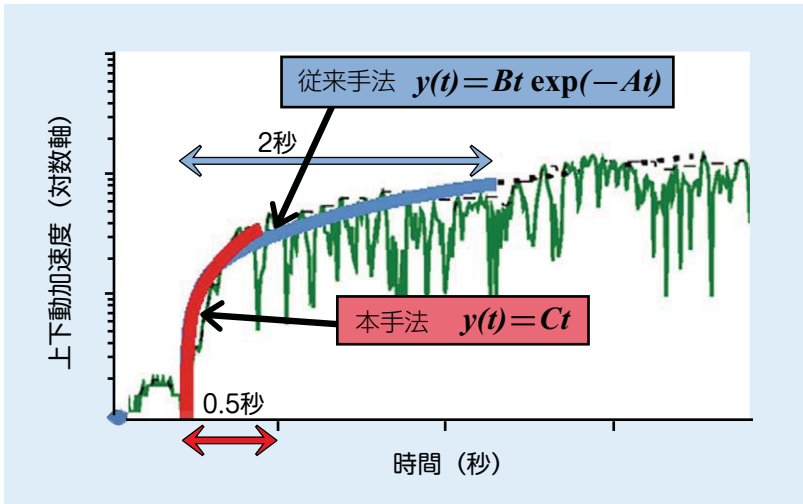


図6 本手法と現行手法の概念図

表1 本手法と現行手法の比較

	本手法	現行手法
解析に必要なデータ長	0.5 秒	2.0 秒
推定誤差 (自乗平均平方根)	0.277	0.313

は、P波立ち上がりから2秒の振幅データを用いて、(3)式に示す関数をフィッティングさせ、係数 B から震央距離を求めます。

$$y(t) = Bt \exp(-At) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 t はP波立ち上がり後の経過時間、 $y(t)$ は加速度振幅絶対値、 A 、 B はフィッティングにより定まる係数です。係数のうち、 A はデータ長後半の振幅の増減、 B はデータ長前半の傾きを表現します。前述の考察などから、係数 A はマグニチュードの大きさに関係し、係数 B は震央距離に関係すると考えることができます。

本手法と現行手法を比較した概念図を図6に示します。現行手法が2秒間のデータを対象に2種類の係数を用いて振幅成長の変化を表現するのに対し、本手法は0.5秒間のデータを対象に1種類の係数を用いて振幅成長の変化を表現します。

本手法と従来手法による震央距離推定誤差の平均値を比較したものを表1に示します。ここで推定誤差は、推定した震央距離の対数値と気象庁一元化震源情報³⁾から求めた震央距離の対数値の差の自乗平均平方根(RMS)で表しています。

表より、本手法による誤差は0.277、従来手法による誤差は0.313であり、本手法による推定値が現行手法に比べて平均12%精度が高いことが分かります。また、解析に用いるデータ長は、現行手法の2秒から、0.5秒に短縮されます。

おわりに

ここでは、地震動のP波初動部の振幅成長がマグニチュードに依存しない性質に着目し、現行手法より精度と即時性の高い震央距離推定手法を開発しました。この手法により、推定精度は12%向上し、推定時間は1/4に短縮されます。

本手法は単独のデータを用いた震央距離推定手法として有効と考えられるため、別途提案された震央方位推定手法⁴⁾と組み合わせて、即時的な地震諸元推定手法の総合的な性能向上を図りたいと考えています。**RRR**

文献

- 1) 岩橋寛臣, 岩田直泰, 佐藤新二, 芦谷公稔: 早期地震警報システムの実用化, 鉄道総研報告, Vol.18, No.9, pp.23-28, 2004
- 2) 東田進也, 小高俊一, 芦谷公稔: 早期地震検知における新しい地震諸元推定手法, 鉄道総研報告, Vol.16, No.8, pp.1-6, 2002
- 3) 気象庁: 地震年報, 気象業務支援センター, CD-ROM, 2003
- 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方法の精度および即時性向上, 鉄道総研報告, Vol.25, No.7, pp.7-12, 2011