

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# 早期地震防災システムで迅速かつ確実に列車を止める

地震時に鉄道施設の被災などが懸念される場合、可能な限り早く列車を停止させる措置が取られます。早く列車を停止させるには伝播速度の速いP波の情報が有効です。鉄道では、単独観測点のP波初動数秒の情報から地震の位置と規模を推定し、必要に応じて警報を出力するシステムが稼働しています。近年、地震時の安全性向上に資するシステムの高性能化が望まれており、早期地震諸元推定アルゴリズムの改良を行いました。また、線路沿線に設置された地震計による警報情報の信頼性を向上させるため、列車走行に伴う振動と地震動を識別する新たなノイズ識別アルゴリズムを開発しました。

## 早期地震防災システムの概要

地震時において安全を確保するためには強い揺れに見舞われても鉄道施設が健全であることが大切です。しかし、過去に発生した地震を見ると鉄道施設が被害を受けた事例が報告されています。このようなことから、地震時に被災が懸念されるような場合、素早く列車を停止させ安全を確保することが大切です<sup>1)2)</sup>。

素早い警報出力には、地震波の中でも伝播速度が最も早く、最初に観測されるP波の情報を活用することが有効です(図1)。鉄道では、P波初動数秒の情報から地震の位置と規模を推定し、必要に応じ

て警報を出力する早期地震防災システム(以下、システム(☞参照))が稼働しています<sup>3)</sup>。

このシステムは、早期地震諸元とノイズ識別のアルゴリズムを実装した早期警報用地震計(以下、地震計(☞参照))を用います。地震時におけるこ

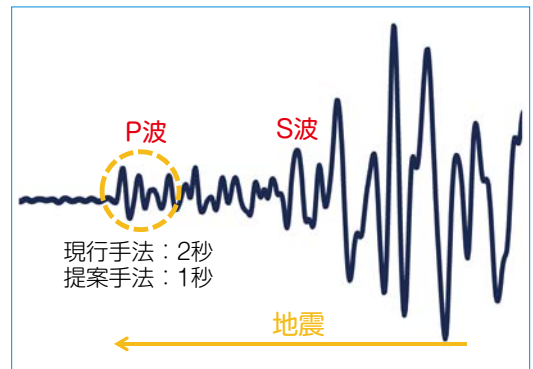


図1 地震波の波動成分の概要



**岩田 直泰**  
Naoyasu Iwata  
鉄道地震工学研究センター  
地震解析研究室  
主任研究員  
【専門分野】地震防災、  
地震工学



**山本 俊六**  
Shunroku Yamamoto  
鉄道地震工学研究センター  
地震解析研究室  
室長  
【専門分野】地震防災、  
地震工学



**是永 将宏**  
Masahiro Korenaga  
鉄道地震工学研究センター  
地震解析研究室  
副主任研究員  
【専門分野】地震防災、  
地震学



**野田 俊太**  
Shunta Noda  
前 鉄道地震工学研究センター  
地震解析研究室  
副主任研究員  
【専門分野】地震防災、  
地震学

### ☞ 早期地震防災システム

地震発生時に素早く列車を停止させ、沿線で観測された地震動を迅速に把握することを目的としたシステム。地震計の情報はネットワークによりサーバーに集約されます。サーバーを介することにより、ある地震の情報に基づきほかの地震計に警報出力させることもできます。

### ☞ 早期警報用地震計

定められた地震動指標の規定値超過により警報を出力する機能に加え、P波初動の情報から地震の位置と規模を推定し、必要に応じて警報を出力する機能も有している地震計。地震計で得られた情報は、ネットワークを介してサーバーへ送信されます。

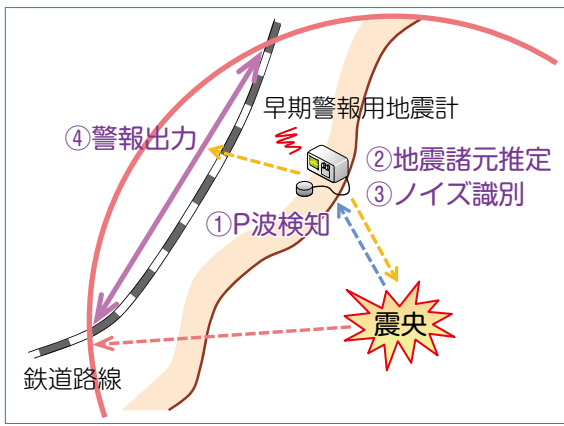


図2 早期地震防災システムの動作の流れ

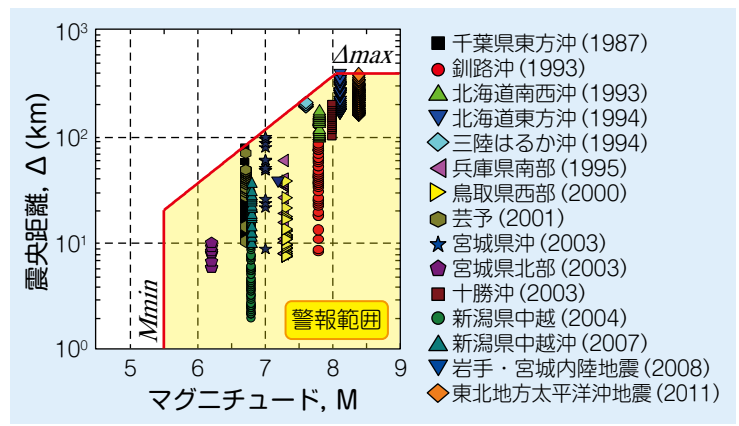


図3 M-Δ図

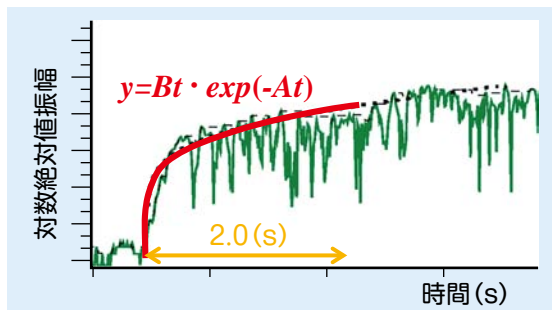


図4 現行の震央距離推定手法 (B-Δ法)

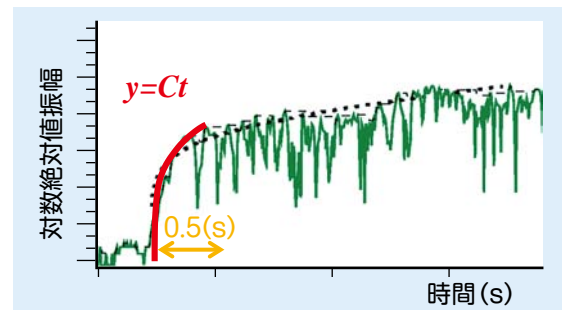


図5 提案の震央距離推定手法 (C-Δ法)

のシステムの処理の流れを図2によって説明します。

地震が発生すると、地震計にP波が到達します。まず、地震計はこのP波到達を正確に検知する必要があります(①P波検知)。次に、P波到達から数秒(現行手法では2秒、後ほど述べる提案手法では1秒)の情報を用いて地震計から震央までの距離と方位(北から時計回りの角度)を求めます。そして、推定距離と観測振幅からマグニチュードを推定します(②地震諸元推定)。なお、マグニチュードの推定は逐次観測される振幅の最大値を用いて更新していきます。ここで、警報出力を行う前に重要な処理があります。それは諸元推定の演算を行った振動のデータが地震動であるか否かの判定です。特に線路沿線に設置された地震計は列車走行に伴う振動の影響を常に受けることから、誤った警報の出力を防ぐためにもこの識別は重要な処理です

(③ノイズ識別)。最後に警報出力の判定が行われます。現在稼働しているシステムではM-Δ法と呼ばれる手法を採用しています。この手法は、過去の鉄道被災事例に基づき、マグニチュード(M)と被災地点までの震央距離(Δ)の関係を整理し(図3)、各マグニチュードにおいて被害が生じる最も遠い距離を把握することにより、警報を出力する範囲を決定する手法です。推定した震央位置から警報範囲内の列車に対し、停止のための警報信号が出力されます(④警報出力)。

### 早期地震諸元推定手法の高度化

近年の鉄道に対する地震防災性能向上への要望の高まりから、新たな早期地震諸元推定アルゴリズムの開発を行いました。アルゴリズムの高度化にあたり、P波到達の検知ならびに震央距離・震央方位・マグニチュードの各推定手法を改良しました<sup>4)</sup>。

ここでは、この中で震央距離の推定精度ならびに即時性の向上について述べます。まず、P波初動の振幅の成長の程度は震央距離と関係があることが分かっています。例えば、振幅の成長が急である場合は地震計の設置地点から近い地震であり、緩やかな場合は遠い地震となります。現行の震央距離推定では、P波初動に簡単な関数をフィッティングし、得られた係数から振幅成長の程度を定量化します(B-Δ法、図4)。この係数と震央距離の統計的な関係を用いることにより、P波初動数秒の情報から震央距離が求められます。このB-Δ法は基本としてP波到達から2秒のデータを用います<sup>5)</sup>。

震央距離推定手法として現行のB-Δ法よりも推定の精度が高く、時間が短い手法の検討を行いました。地震動データのP波初動の振幅成長の程度をマグニチュードと震央距離に分けて整理したところ、P波のごく初動部の振

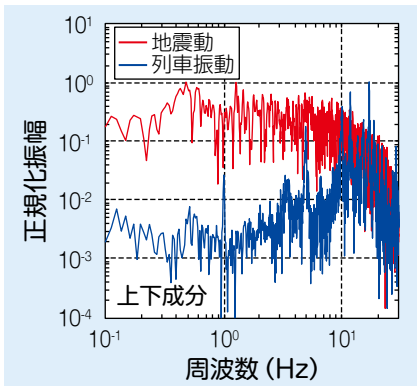


図6 地震動と列車振動の正規化スペクトルの比較例

幅成長はマグニチュードには依らず震央距離のみに依存し、その形状は直線的であることが分かりました。そこで、振幅成長の程度を定量化する関数の変更を試みた結果、推定精度は現行以上となることが確かめられました。また、推定に要するデータ長は0.5秒であり、現行と比較して4分の1となります。

ここでは震央距離推定手法について紹介しました。その他、P波到達の検知については現行以上の性能に改善し、震央方位推定ならびにマグニチュード推定についても推定の精度向上や時間短縮を図ったアルゴリズムを開発しています<sup>4)</sup>。

### ノイズ識別手法の高度化

早期地震警報の出力において、伝播速度の速いP波を用いることが有効であることは先に述べた通りです。しかし、P波初動は一般的に微弱であるため、誤報防止の観点から対象とする振動が地震動であるか否かを判別する必要があります。特に、線路の直近に設置される地震計は常に列車走行に伴う振動の影響を受けることから、ノイズ識別は早期警報用地震計の重要な処理の1つです。

現行の地震計においても、地震動と列車振動を識別する処理が組み込まれています。具体的には、地震動と列車

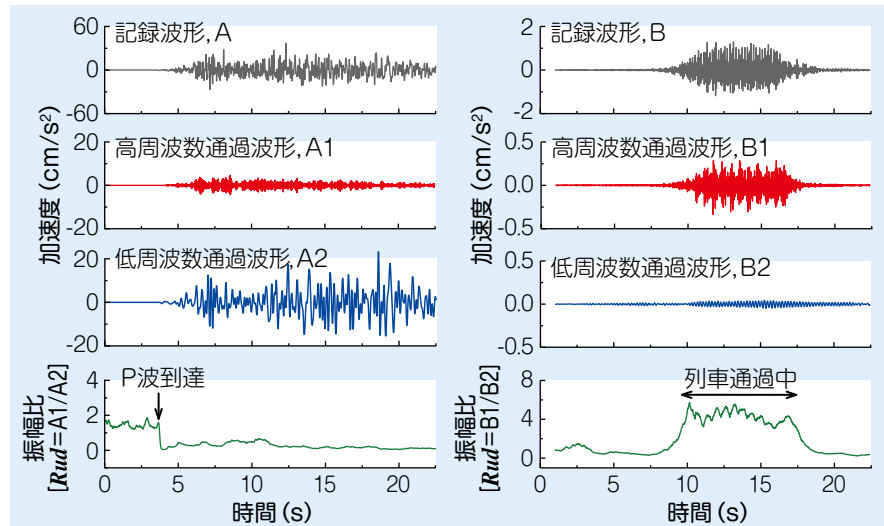


図7  $Rud$ の時系列の例(左：地震動, 右：列車振動)

振動の卓越する振動方向から識別するもので、平滑化を行った鉛直動と水平動の絶対値振幅比の最大値  $VHmax$  から判断しています。図6に地震動と列車振動のスペクトルの比較例を示します。この図は卓越する周波数帯域を比較する目的から、それぞれの振幅の最大値で正規化しています。図によると地震動は相対的に低周波数、列車振動は相対的に高周波数が卓越しています。このような周波数成分の違いに着目した新たなノイズ識別アルゴリズムを開発しました<sup>4)</sup>。

周波数情報の活用では、リアルタイムに高周波数および低周波数の帯域を通過させるフィルター処理を行い、得られた波形の絶対値振幅の移動平均の比を指標  $Rud$  として新たに定義しました。図7において、1段目は記録波形、2段目と3段目はそれぞれ高周波数と低周波数のフィルター通過波形、4段目は  $Rud$  の時系列変化を示しています。左の地震動ではP波の到達後に  $Rud$  の値が変化し、基本的にP波到達前よりも小さくなります。一方、右の列車振動では列車通過中において  $Rud$  の値が変化し、基本的に列車接近前よりも大きくなります。

提案する地震動と列車振動の識別手法は現行の  $VHmax$  と新たに定義した  $Rud$  の両対数プロット図においてしきい値を設定し、両者を分離します。振幅と周波数の情報を共に活用することからノイズ識別性能が大きく改善されることを確認しています。

### 既往地震データによる検証

開発したアルゴリズムを用い、過去に発生した地震の波形データを用いてシミュレーションを行いました。ここでは2007年3月25日に発生した能登半島沖地震 ( $M6.9$ ) を例として示します。なお、シミュレーションには防災科学技術研究所のK-NETで観測された波形データを用いており、震央距離が200km以内の観測点を評価対象としています。図8と図9に気象庁が発表した震央位置 (★印) と現行手法と提案手法のそれぞれで推定した震央位置 (×印) を示します。まずP波の検知ができた観測点は、現行の66観測点から提案の76観測点に増加し、P波検知に関する性能向上が確認できます。また、震央位置の推定では、提案の方が現行と比べ気象庁発表の震央周辺に分布が集まっています。マグニチュー

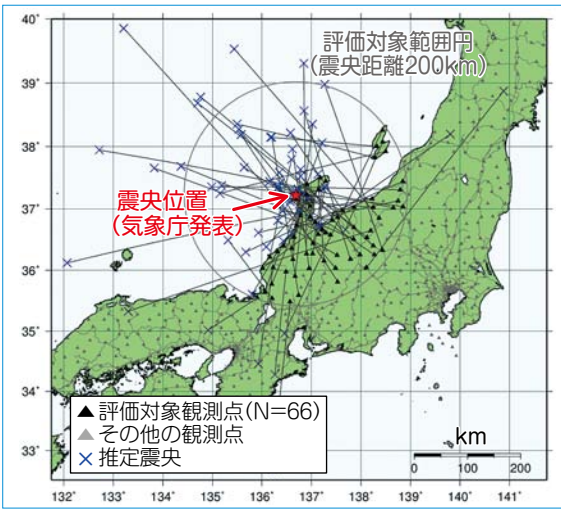


図8 震央推定位置の比較 (現行手法)

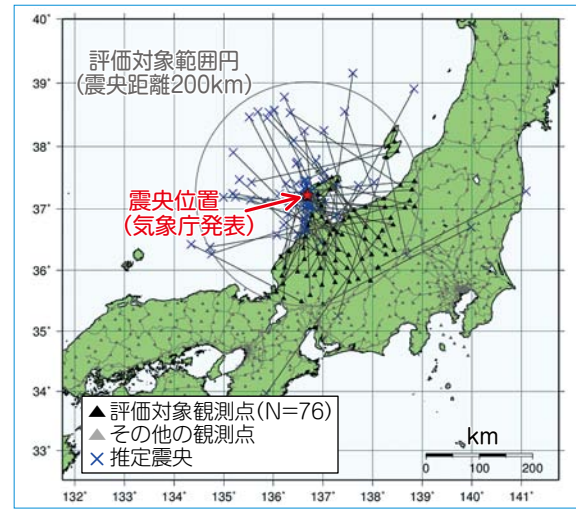


図9 震央推定位置の比較 (提案手法)

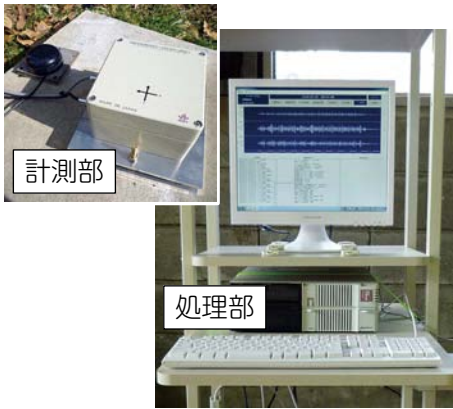


図10 開発した地震計の外観

ド推定に関しても、推定誤差は提案の方が小さくなることを確認しています。加えて、警報出力の時間を比べた結果、提案手法の最速警報出力時刻は現行よりも1秒短縮されており、シミュレーション結果から即時性の向上も認められました。

### 新しい早期警報用地震計の開発

開発した早期地震諸元推定およびノイズ識別のアルゴリズムの実システムへの適用を目指し、その動作を確認する目的から、早期警報用地震計を試作しました。試作版は、プログラムやパラメーターの変更、データ回収などの簡易性を考慮しパソコンをベースとしています(図10)。

さらに、ノイズ識別性能の確認に着目した線路直近における稼働試験を実施しました。この試験にあたり、新幹線沿線で記録されたデータに基づき列車振動と地震動の識別しきい値を暫定的に定めました。試験の結果、観測されたデータの内、対象の99.9%以上が正しく列車振動と識別され、良好な動作が確認されました。

100%の結果は得られませんでした。これは暫定的に定めた識別しきい値を用いたためと考えられます。今後、しきい値に関し地震計を設置する地点ごとに最適化することでより高い識別性能を得ることができると考えます。

### おわりに

早期地震防災システムでより迅速かつ確実に列車を止めることを目指し、早期警報用地震計に適用するべく早期地震諸元推定とノイズ識別の新たなアルゴリズムを開発し、これらを導入した地震計の総合的な性能評価を行いました。早期地震防災システムは、過去に発生した規模の大きな地震において良好に動作した実績を持っています

が例えば<sup>3)</sup>、開発したアルゴリズムを実装した地震計を導入することにより、早期地震警報の精度と信頼性が向上し地震時の安全性の改善が期待されます。

なお、本研究では防災科学技術研究所の地震波形記録を使用致しました。記して感謝致します。[RRR]

### 文献

- 1) 中村豊：研究展望 総合地震防災システムの研究，土木学会論文集，No.531, I-34, pp.1-33, 1996
- 2) 芦谷公稔，佐藤新二，岩田直泰，是永将宏，中村洋光：鉄道の地震警報システムにおける緊急地震速報の活用，物理探査，Vol.60, No.5, pp.387-397, 2007
- 3) Yamamoto,S., and M.Tomori：Earthquake early warning system for railways and its performance, Journal of JSCE, Vol.1, pp.322-328, 2013
- 4) 岩田直泰，山本俊六，是永将宏，野田俊太：早期地震警報のための地震諸元推定とノイズ識別の機能向上，鉄道総研報告，Vol.29, No.3, pp.5-10, 2015
- 5) Odaka,T., Ashiya,K., Tsukada,S., Sato,S., Ohtake,K. and Nozaka,D., A new method of quickly estimation epicentral distance and magnitude from a single seismic record, Bull.Seism.Soc.Am., Vol.93, No.1, pp.526-532, 2003