

## 新しいアルゴリズムを実装した早期警報用地震計の試作ならびに稼働試験

(公財)鉄道総合技術研究所 ○正会員 岩田直泰 山本俊六 岡本京祐

### 1. はじめに

鉄道では、地震発生時に施設や列車の走行安全性が懸念される場合、可能な限り早く列車を停止させる。いち早く列車を停止させるためには伝播速度の速い P 波の情報が必要であり、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を用いている(例えば<sup>1)</sup>)。近年、地震時の安全性向上に資するシステムの更なる高性能化が望まれており、精度と即時性の改善に向けた単独観測点における早期地震諸元推定アルゴリズムの改良を行った。また、諸元推定には微弱な P 波初動を用いるため、特に線路沿線に設置された地震計では列車走行に伴う地面の揺れと地震動を識別する必要が生じる。そこで、現行の成分間の振幅比を用いた手法とは別に周波数情報を用いた識別アルゴリズムを開発し、警報情報の信頼性を高める取り組みを行った。本稿では、既往地震を対象とした早期地震諸元推定の総合的な評価、改良アルゴリズムを実装した試作版の早期警報用地震計の開発および試作版地震計の稼働試験の結果を報告する。

### 2. 早期地震諸元推定およびノイズ識別に関するアルゴリズムの改良

単独観測点における早期地震諸元推定の精度と即時性の向上を目指し、地震検知および震央距離、方位、マグニチュードの推定手法の改良を行った。加えて、地震動と列車振動の識別性能の強化に向けて、周波数情報を用いた指標を提案し、従来手法と組み合わせる上で識別の閾値を定めた。アルゴリズムの主な改良点<sup>2)</sup>を表1にまとめる。このアルゴリズムの動作に関する総合的な検証として、(独)防災科学技術研究所(以下、防災科研)の K-NET で観測された波形に対するシミュレーションを行った。ここでは2007年3月25日の能登半島沖地震(M6.9)を対象とした。

表1 アルゴリズムの主な改良点<sup>2)</sup>

	現行手法	提案手法
地震検知	LTA/STA法	LTA/STA法+レベルトリガ法
震央距離	B-Δ法(2秒)	C-Δレベル C-Δ法(0.5秒) 粘性減衰を考慮
震央方位	固定ウィンドウ法(1.1秒)	可変ウィンドウ法(1.0秒以内)
マグニチュード	変位M	推定タイミングの追加 変位M+加速度M(OR制御) 粘性減衰を考慮
警報時間	最短2.0秒(標準設定)	最短1.0秒(標準設定)
ノイズ識別	成分比	成分比+周波数特性

気象庁が発表した震央位置(☆印)と現行および提案手法による推定震央位置(×印)を図1の(a)(b)に示す。評価対象は震央距離が200km以内の観測点としており、諸元推定を行った観測点を▲印で示している。地震を検知した観測点数は現行手法が66、提案手法が76となり提案の方が地震検知性能は高い結果を得た。震央位置の推定結果を見ると、提案手法では現行に比べ気象庁発表の震央周辺に×印が集まっており、より正

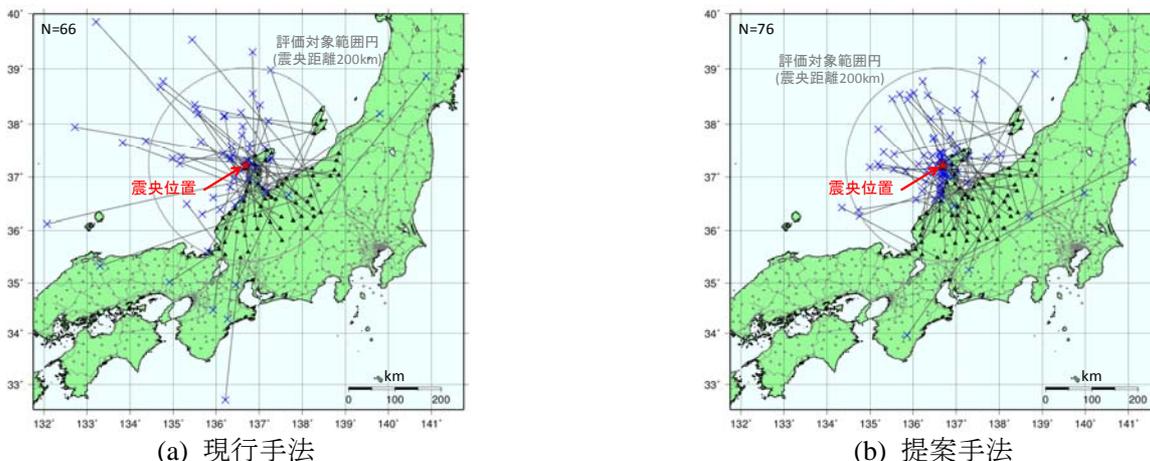


図1 震央位置推定の比較(2007年3月25日 9時42分 能登半島沖地震 M6.9)

キーワード 早期地震情報、早期地震諸元推定アルゴリズム、ノイズ識別アルゴリズム、地震計  
 連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所・地震解析 TEL:042-573-7273

確な推定が行われていることが分かる。マグニチュード(以下、 $M$ )に関して推定誤差 RMS を算出したところ現行手法は 0.97、提案手法は 0.72 であり、提案の方が推定精度は高い結果を得た。加えて、警報出力時間を比べたところ、提案手法の最速警報時刻は現行よりも 1 秒短縮されており、即時性の向上も確認できた。

### 3. 試作版早期警報用地震計の開発および稼働試験

2章で述べたアルゴリズムを実装した試作版の早期警報用地震計の開発を行った。試作版では、プログラムやパラメータの変更、データ回収等の簡易性を考慮し処理部は組み込み型ではなくパソコンをベースとした(図 2 (a))。本稿では、(公財)鉄道総合技術研究所(以下、鉄道総研)の日野土木実験所(以下、日野)内における稼働試験の結果を主に報告する。計測部設置地点の直近には中央線が存在し頻りに列車が通過するため、試験の主目的は地震動と列車振動の識別性能の確認とした。計測部の設置状況を図 2 (b)に示す。試験期間は 2015 年 2 月 20 日から 3 月 2 日の約 1 週間としたが、5268 の列車振動の波形が記録され、1 データを除きすべてをノイズと識別した(図 3)。ただし、地震動と誤って識別された列車振動波形による  $M$  の推定値は 5.1 であり、 $M5.5$  以上の警報出力の対象には当たらないデータであった。用いた識別基準値は新幹線の沿線で記録されたデータから列車振動の識別率が 90%となるように暫定的に設定したため、このようなケースも想定されるが、基準値を検知点ごとに最適化することでより高い識別率になると考えられる。



(a) 処理部



(b) 計測部

図 2 地震計の設置状況

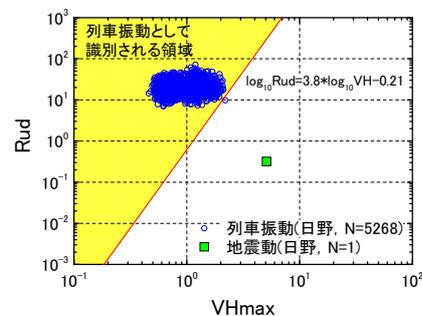


図 3 識別結果

なお、約 1 週間の試験期間中に千葉県中部で  $M4.5$  の地震が発生しており、図 3 の通り正しく地震動として識別され、諸元推定の結果が得られた。その推定結果を、気象庁が発表した諸元に基き求めた値と比較した結果を表 2 に示す。目標とする推定精度は方位が  $\pm 30$  度、距離が倍半分、マグニチュードが  $\pm 1$  以内としているが、表によるとマグニチュードのみ目標値を超過した。概ね良好な推定結果が得られたと考えるが、 $M$  を過大推定した一因として、対象地震の規模が小さく経験式の適用範囲からやや外れたことが挙げられる。なお、稼働試験は鉄道総研の国立研究所内で引き続き実施している。

表 2 推定結果の検証

	震央方位 (deg.)	震央距離 (km)	$M$	発生位置
気象庁発表	100	69	4.5	千葉県中部
試作版地震計	128	70	5.6	-

### 4. おわりに

警報アルゴリズムの高度化による早期地震防災システムの性能向上に関する取り組みとして、単独観測点による早期地震諸元推定ならびにノイズ識別のアルゴリズムの改良を行った。既往地震を対象とした早期地震諸元推定の総合的な評価の結果、提案手法は現行と比較し性能の向上が確認された。また、改良アルゴリズムを実装した試作版地震計の稼働試験の結果、地震動と列車振動の識別は良好であり、信頼性の高い動作が確認された。なお、本研究では防災科研の K-NET および KiK-net の地震波形データを使用した。

### 参考文献

- 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) 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