

地震検知から最短 1 秒で警報出力 地震時に迅速に列車を減速・停止させる

岩田直泰・是永将宏・山本俊六

日本は世界的に見ても地震が多く発生する国であり、鉄道は都市内や都市間において国内に広く展開されていることから常に地震の脅威に直面していると言える。地震時に乗客の安全を確保する措置として日本の鉄道では専用の地震計を用い、その地震計で観測した情報をリアルタイムに処理し必要に応じて警報を出力する早期地震警報システムが導入されている。

早く列車を停止させるには伝播速度の速い P 波の情報が有効である。鉄道では、単独観測点の P 波初動の情報から必要に応じて警報を出力する地震計が稼働している。地震はいつどこで発生するか分からないという状況の中、この地震計の性能を高め安全性を向上させることは常に万全を尽くすべき研究課題と言える。以上の背景から、これまで鉄道総合技術研究所（鉄道総研）は、迅速かつ確実に警報を出力するために地震計の処理の改良に取り組んできた。本稿では、鉄道における早期地震警報の概要を述べると共に、その高度化に向けた取り組みと性能向上に対する総合的評価について述べる。

キーワード：早期地震警報, 地震諸元推定, ノイズ識別, 地震計, 性能評価

1. 早期地震警報の概要

地震時において乗客の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ある。過去に発生した地震を振り返ると、構造物のみならず軌道や駅施設などの被害によって、列車の運行に支障を生じた事例が報告されている。このようなことから、地震時に鉄道施設の被災が懸念される場合には、乗客の安全確保のために素早く列車を停止させることが重要となる^{1) 2)}。

鉄道のための地震計は図-1のように計測部と処理部で構成されており、線路直近に概ね一定間隔で設置される地震計と、地震発生域に近くなるよう海岸近傍に設置される地震計の2種類がある。これらの地震計はサーバーを介してネットワークで接続されており、警報の情報などを地震計間で通信している。このサーバーと複数の地震計などをあわせて早期地震警報システムと呼んでおり、このシステムが用いている専用の地震計の処理を図-1によって説明する。

地震が発生すると、P波やS波と呼ばれる地震波が生じ地中を伝播していく。このうち、地震計には伝播速度の速いP波が最初に到達する。まず、地震計はこのP波の到達を自動で検知する(①P波検知)。次に、検知したP波の情報を用いて、地震計はその位置から震央までの距離(震央距離)と水平面で北から

時計回りの角度(震央方位)を求める。また、震央距離とP波の振幅最大値から地震の規模(マグニチュード)を逐次計算する。ここでは震央距離と震央方位、マグニチュードを合わせて地震諸元と呼ぶ(②地震諸元推定)。さらに、地震計は測定された振動が地震によるものか、列車走行などのノイズによるものかを識別する。P波の到達直後の揺れは一般的に微弱であるため、誤警報防止の観点からノイズ識別は重要な処理の1つである(③ノイズ識別)。そして、観測された振動が地震によるものと識別された場合、地震計は警

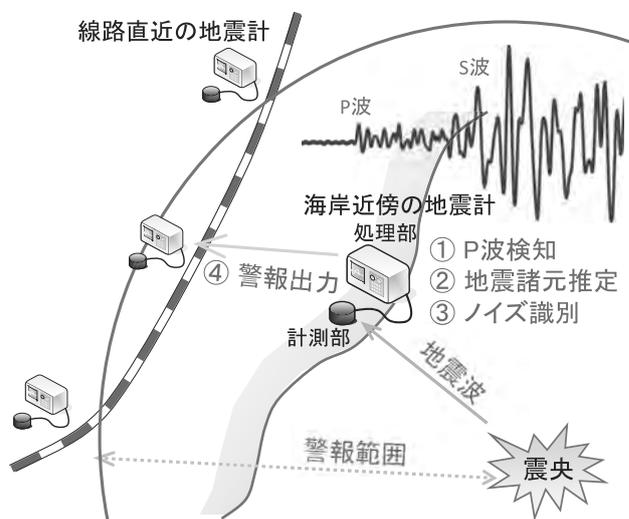


図-1 早期地震警報システムで用いる地震計の処理の流れ

報範囲内の列車に対し警報を出力し列車を停止させる。警報範囲の算定には、過去の鉄道被災事例に基づきマグニチュード (M) と被災地点の震央距離 (Δ) の関係を図-2の通り整理して、被害が生じる可能性のある範囲を求める方法 (M-Δ法) を採っている。停止のための警報信号は、推定した震央位置から警報範囲内の列車に対して出力される (④警報出力)。

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震などにおいて、早期地震警報システムで用いる地震計は列車停止に向けた警報を早期に出力するなど有効に機能した実績があり³⁾、この地震計が鉄道の地震防災に果たしている役割は大きいと考える。

2. 地震計の高度化

2011年東北地方太平洋沖地震の後も、2016年の熊本地震、2018年の大阪府北部の地震や北海道胆振東部地震などで強い揺れが生じて鉄道に影響を与えている。地震に対する鉄道の安全性向上への要望は常に高いことから、鉄道総研では従来より稼動している地震計の高度化を目指し、図-1のP波検知、地震諸元推定、ノイズ識別の各アルゴリズムの改良を行った。

(1) 地震諸元推定アルゴリズムの高度化

地震諸元推定の中から、本稿では単独観測点の震央距離の推定アルゴリズムならびに推定時間の短縮について紹介する。地震計が最初に観測するP波において、P波到達直後の数秒間における上下振幅の増加程度は、震央距離と関係があることが確認されている。例えば、振幅の増加が急である場合は地震計の設置地点から近い地震、緩やかな場合は遠い地震の傾向がある。この特性を利用して、従来は図-3の通り時間に伴うP波振幅の絶対値に対して簡単な関数をフィッ

ティングし、得られた上下動の増加程度の値 (係数B) から統計的に震央距離を推定していた (B-Δ法)⁴⁾。

従来のアルゴリズムを高度化する目的から、震央距離が同程度でマグニチュードが異なるP波の上下動振幅の増加程度を詳しく分析したところ、図-4の例のようにP波到着直後のごく初期の形状は直線的であり、その傾きはマグニチュードによらず震央距離に依存することが認められた。これは、地震計により観測される地震動の中でも、P波到達後のごく短い時間のみに着目すれば震央距離をより正確に把握できることを表している。図-4に示す単純な関数により

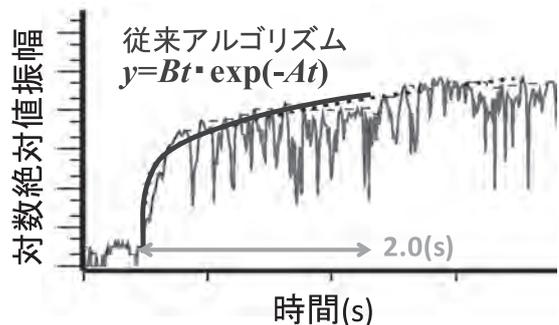


図-3 従来アルゴリズムのP波振幅増加程度の定量化手法 (B-Δ法)

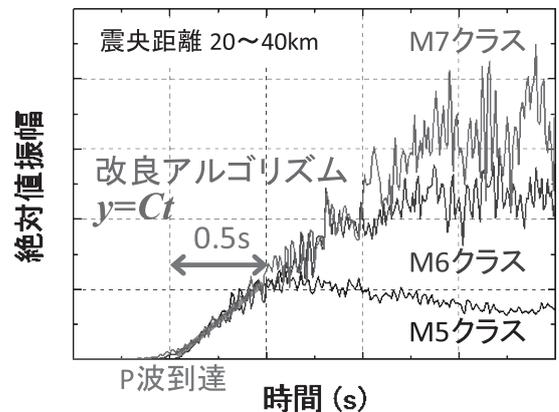


図-4 P波初動部の上下動振幅の例 (C-Δ法)

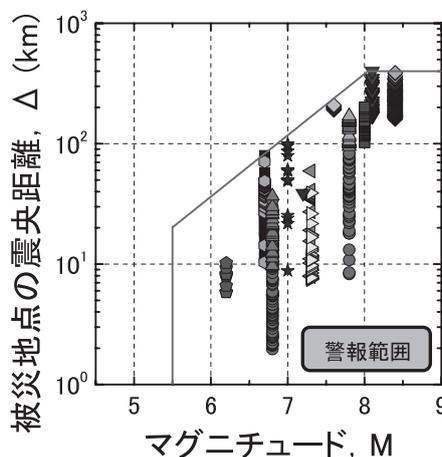


図-2 警報出力範囲の算定 (M-Δ法)

- 千葉県東方沖(1987)
- 釧路沖(1993)
- ▲ 北海道南西沖(1993)
- ▼ 北海道東方沖(1994)
- ◆ 三陸はるか沖(1994)
- ▲ 兵庫県南部(1995)
- ▽ 鳥取県西部(2000)
- 芸予(2001)
- ★ 宮城県沖(2003)
- 宮城県北部(2003)
- 十勝沖(2003)
- 新潟県中越(2004)
- ▲ 新潟県中越沖(2007)
- ▼ 岩手・宮城内陸地震(2008)
- ◆ 東北地方太平洋沖地震(2011)

この特性の定量化を行い、得られた上下動の増加程度の値(係数C)と震央距離の関係を再整理したところ、震央距離の推定に要する時間は4分の1と大幅に短縮され、推定精度は従来と同等もしくはそれ以上となることが確かめられた(C- Δ 法)⁵⁾。

ここでは震央距離の推定アルゴリズムの改良について紹介したが、改良したアルゴリズムを実装した地震計ではP波検知や震央方位推定、マグニチュード推定ならびにノイズ識別についても精度向上や時間短縮を図っている。従来のアルゴリズムによる警報出力は最短でP波検知の2秒後となるが、改良したアルゴリズムは最短1秒後に警報を出力することができる。

(2) ノイズ識別アルゴリズムの高度化

早期地震警報において、伝播速度の速いP波情報の活用が有効なことは先に述べた通りである。しかし、P波初動は一般的に揺れの程度が小さいため、誤った警報の出力を防ぐ観点から対象とする振動が地震動であるか否かを正確に判別する必要がある。特に、線路の近くに設置される地震計は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の重要性は高い。従来の地震計でも、地震動と列車振動を識別する処理が組み込まれており、具体的には卓越する振動方向の違いに着目した指標に基づいて識別を行ってきた。

ノイズ識別の高度化に向けて地震動と列車振動の卓越周波数帯域を比較したところ、地震動は相対的に低周波、列車振動は相対的に高周波の揺れが強いことが

明らかとなった。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指標を定義した⁵⁾。図-5において、1段目は記録された波形、2段目と3段目はそれぞれ高周波と低周波の振動のみを取り出した波形、4段目は得られた両波形の比を示す。4段目の振幅比において、左の地震動ではP波の到達後にこの値が変化し基本的に小さくなる。一方、右の列車振動では列車通過中においてこの値は基本的に大きくなる。この振幅比を識別指標として定めた。

開発したノイズ識別アルゴリズムは従来の振幅に基づく指標と新たに定義した周波数に基づく指標の両方を用いることとしている。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は大きく改善されることを確認している。

3. 開発アルゴリズムの総合性能評価

従来アルゴリズムに対する改良アルゴリズムの警報出力性能を検証する目的から、列車停止に向けた警報出力の範囲とタイミングの評価を行った⁶⁾。

まず、警報出力範囲の検証では、対象とした地震ごとに地震諸元推定アルゴリズムによる推定と気象庁情報による正解の警報出力範囲を比較した。この範囲は先に述べた図-2のM- Δ 法を適用しており、性能検証の概念を図-6に示す。検討の結果、表-1の通り改良アルゴリズムでは従来アルゴリズムに対して適切な警報を発した面積(正解率)が約6%向上し、不

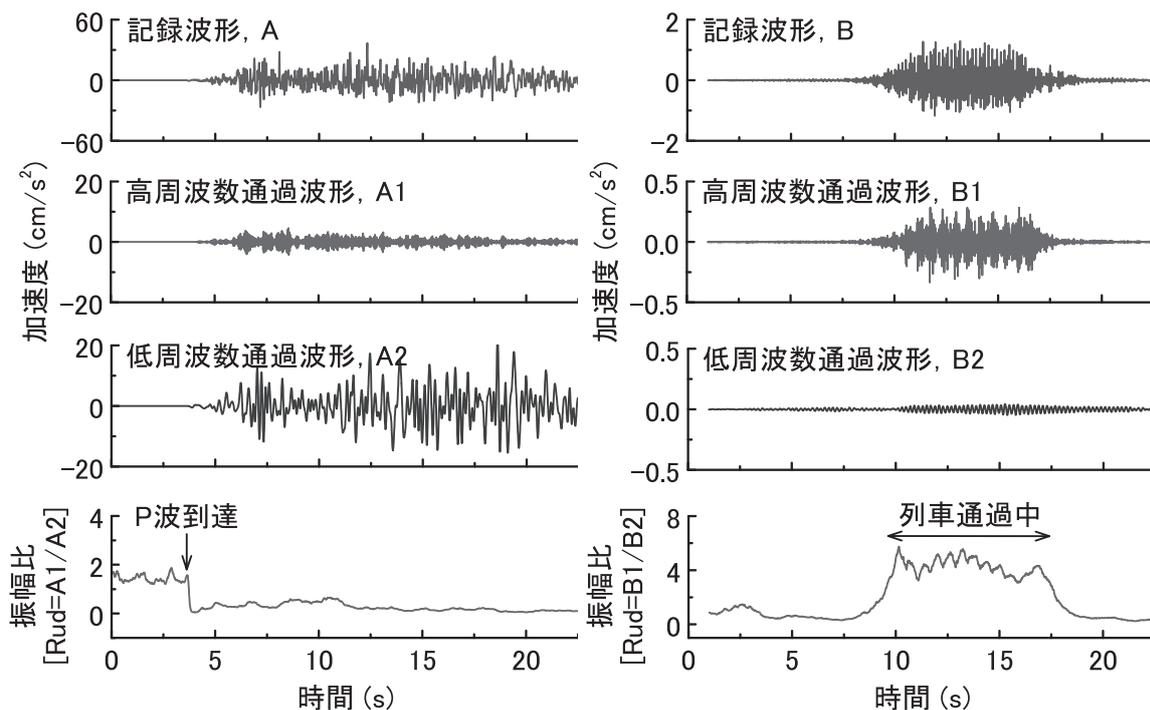
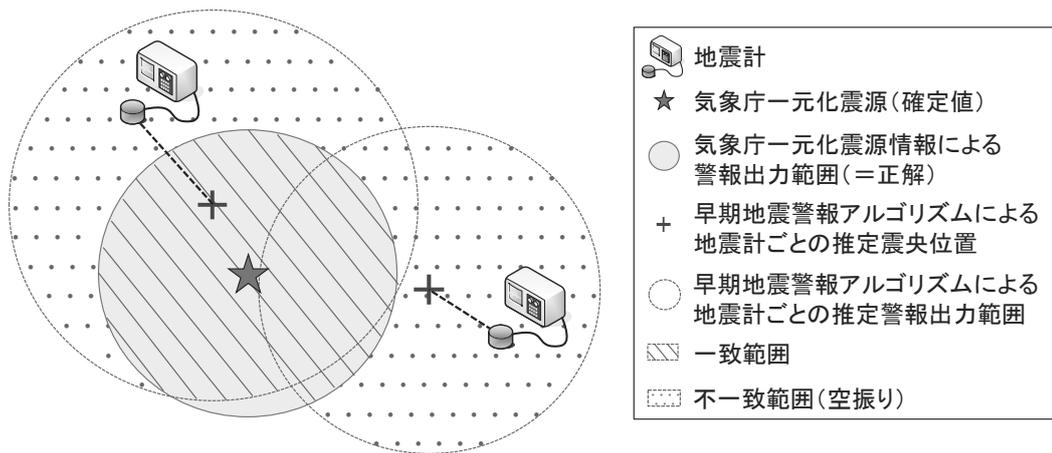


図-5 新たに定義したノイズ識別指標の例(左:地震動, 右:列車振動)



$$\text{正解率} = \frac{\text{一致範囲の面積}}{\text{正解の面積}} \quad \text{空振り率} = \frac{\text{不一致範囲(空振り)の面積}}{\text{正解の面積}}$$

図-6 警報出力範囲の正解率と空振り率の概念

表-1 警報出力範囲の正解率と空振り率

	従来アルゴリズム	改良アルゴリズム
正解率	0.87	0.93
空振り率	1.42	0.19

要な警報を発した面積（空振り率）は約 85%減少することが明らかとなった。

次に、警報出力タイミングの検証では、近年の主な被害地震について地震ごとに従来と改良のアルゴリズムによる警報出力タイミングを比較した。警報出力タイミングは、地震諸元推定アルゴリズムに基づく警報出力範囲に、推定を行った地震計が含まれた時点と定義した。図-7に、一例として2004年新潟県中越地震による複数の地震計を対象とした検証結果を示す。横軸は地震発生からの経過時間、縦軸は警報出力した地震計の割合を示しており、この地震の場合、地震検知や地震諸元推定の性能向上の結果として、改良アル

ゴリズムは従来アルゴリズムに対して4秒程度早く警報出力する結果が得られた。

ここで述べた総合性能評価から、地震諸元推定アルゴリズムの改良によって従来よりも適正な範囲に警報が出力されると共に早期性も高まることが確かめられた。これより、地震時における走行列車の安全性や安定性が向上すると見込まれる。

4. おわりに

鉄道では地震発生時に迅速かつ確実に列車を停止させることを目指し、専用の地震計を用いた早期地震警報システムを導入している。ここでは、地震計の処理概要を説明すると共に震央距離推定の新たなアルゴリズム、またこれらを導入した場合の総合的な性能評価に関する紹介を行った。本稿で述べた改良アルゴリズムを実装した地震計は2018年5月以降、新幹線の早

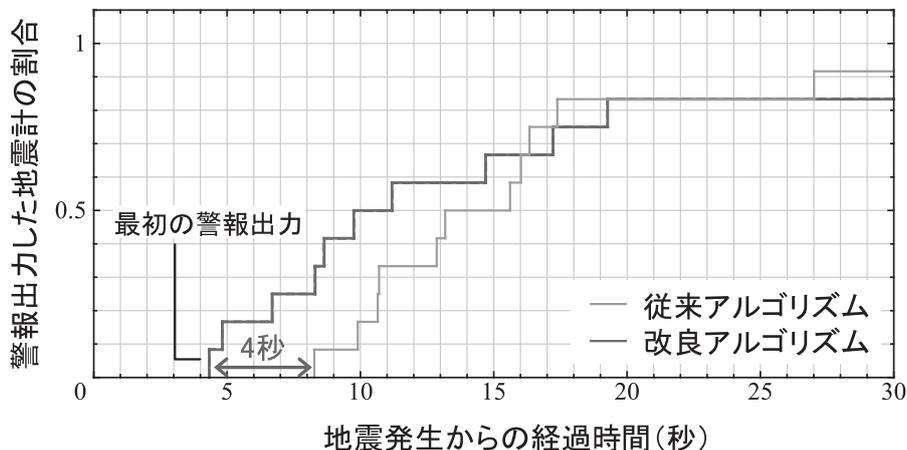


図-7 警報出力タイミングの比較例（新潟県中越地震，M6.8）

期地震警報システムへ順次導入されている。高度化された地震計の導入により、警報の信頼性や即時性が向上し地震時の安全性が高まると考える。

さらに鉄道総合技術研究所では、海溝で発生する巨大地震に対してより迅速に警報出力ができるよう、防災科学技術研究所や海洋研究開発機構が設置している海底地震計の情報を活用する研究を各機関と共同で進めている。加えて、地震時に停止させた列車の素早い運転再開を支援することなどを目指し、公的な地震情報を用いて鉄道路線上の地震動を推定すると共に構造物の被害ランクを推定するシステムを開発している。鉄道総研は、将来発生する地震に対して鉄道の更なる安全性向上を目指し今後とも研究開発を進めていく。

J C M A

《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) 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 Tomori, M., Earthquake early warning system for railways and its performance, Journal of JSCE, Vol.1, pp.322-328, 2013.
- 4) 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.

- 5) 岩田直泰, 山本俊六, 野田俊太, 是永将宏：早期地震警報に向けた地震諸元推定とノイズ識別のアルゴリズム開発, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.72, No.1, pp.133-147, 2016
- 6) 是永将宏, 山本俊六, 野田俊太：早期地震警報用アルゴリズムの総合評価, 鉄道総研報告, Vol. 32, No. 9, pp. 5-10, 2018 公益財団法人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 室長

【筆者紹介】



岩田 直泰 (いわた なおやす)
公益財団法人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
室長



是永 将宏 (これなが まさひろ)
公益財団法人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
主任研究員



山本 俊六 (やまもと しゅんろく)
公益財団法人鉄道総合技術研究所
鉄道地震工学研究センター
研究センター長