

高度化されたアルゴリズムを搭載した 早期警報用地震計の開発

岩田 直泰* 山本 俊六*

Development of Seismograph Equipped with Improved Algorithms for the Earthquake Early Warning

Naoyasu IWATA Shunroku YAMAMOTO

Recently the upgraded seismograph for earthquake disaster prevention, contributing to the safety improvement during earthquakes, has been expected. As actions for the functional advancement of the seismograph, the algorithms for the seismic parameters estimation and the noise discrimination by a single station were improved. In this report, we evaluated the estimating accuracy of the seismic parameters derived from the improved algorithms using waveforms recorded in the past earthquakes. Then, we developed a prototype seismograph equipped with the upgraded algorithms to verify the performance under the practical condition. As a result of field examinations, adequate processing was confirmed.

キーワード：早期警報用地震計，早期地震諸元推定，ノイズ識別，地震動，列車振動，稼働試験

1. はじめに

地震発生時において鉄道施設や列車の走行安全性が懸念される場合、安全を確保する目的から可能な限り早く列車を停止させる^{1) 2)}。より迅速な列車停止に向けた警報出力のために、鉄道では伝播速度の速いP波に着目し、単独観測点のP波初動部の情報から地震の位置（震央距離と震央方位）と規模（マグニチュード）を推定^{3) 4) 5)}する早期警報用地震計を用いたシステムを、主に新幹線に対して導入している^{1) 6)}。この早期地震防災システムは、2004年新潟県中越地震（ $M_j 6.8$ 、 M_j は気象庁マグニチュード）や2011年東北地方太平洋沖地震（ $M_w 9.0$ 、 M_w はモーメントマグニチュード）等の発生時において列車停止に向けた情報を早期に出力するなど有効に機能した実績^{7) 8)}を持つことから、鉄道における地震防災性能の向上に果たしている役割は大きい。

近年、地震時の鉄道の安全性を高めるため、地震諸元推定の精度や即時性のさらなる機能向上が望まれている。性能強化に向けた取り組みとして、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⁹⁾。

本報告では、既往地震を対象としてこの新たなアルゴリズムと現行のアルゴリズムを用いた地震諸元推定の結果を比較し評価した。その結果、提案手法は現行手法に対して同等以上の性能を有することを確認した。そして、実際の使用条件下における性能確認のため、高度化を図ったアルゴリズムを実装した試作版の早期警報用地

* 鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室

震計を開発し、稼働試験を行った。試験の結果、ノイズ識別や地震諸元推定に対する良好な動作が確認された。

2. 新たなアルゴリズムの開発

2.1 改良アルゴリズムの概要

機能を高めた早期警報用地震計の開発に向けて、主要処理となる早期地震諸元推定とノイズ識別の2つの機能のアルゴリズムを改良した⁹⁾。早期地震諸元推定アルゴリズムの改良においては、地震諸元の推定精度と即時性の向上を目的とした。これにより、地震時における安全性の改善が期待される。また、ノイズ識別アルゴリズムの改良においては、地震諸元に用いた振動が地震に基づくものか否かを判定して誤警報を防ぐことを目的とした。これにより、列車停止に向けた警報情報の信頼性の改善が期待される。

現行手法に対する提案手法の改良点の概要を表1に対

表1 改良アルゴリズムの概要

	現行手法	提案手法
地震検知	STA/LTA法	STA/LTA法 + レベルトリガ法
震央距離	B-Δ法 (2秒)	C-Δ法 (0.5秒) C-Δレベル 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, 平均0.58秒)
マグニチュード	変位M	変位M+ 加速度M (OR制御) 推定タイミングの追加 粘性減衰を考慮
ノイズ識別	振幅特性	振幅特性 + 周波数特性
警報時間	最短2.0秒 (標準設定)	最短1.0秒 (標準設定)

特集：地震防災・耐震技術

比して示す。赤字は主な変更点であり、地震検知、地震諸元推定（震央距離、震央方位、マグニチュードの各推定）、ノイズ識別の一連の処理について高度化を図った。提案手法の標準設定による警報出力までの最短時間は、現行手法から 1.0 秒短縮された。地震諸元推定の精度比較等は次章以降で考察する。

2.2 仕様書の改訂

鉄道総研は、現行の早期警報用地震計の実用化にあたり、ソフト開発の迅速化や処理の統一化等を図る目的から「早期警報用地震計における地震諸元推定アルゴリズム仕様書」を定めている。現行の全ての早期警報用地震計はこの仕様書に基づき製作されている。2.1 節で述べたアルゴリズムの改良に併せ、この仕様書の全面的な改訂を行った。仕様書には、早期地震諸元推定およびノイズ識別の処理フローや演算式、暫定的に定めた標準設定用のパラメータが詳述されている。

なお、鉄道のための地震検知点は、線路直近に概ね一定間隔で設置される沿線検知点と、想定される震源域に近くなるよう線路から離れた位置として一般的に海岸線近傍に設置される海岸検知点の 2 種類が存在する^{1) 6)}。早期警報用地震計の対象とする地震や識別すべき雑振動は沿線と海岸の検知点で異なる。これより、標準設定用のパラメータはそれぞれの検知点に対して定め、仕様書に記載している。

3. 開発アルゴリズムに関する総合的な検証

3.1 統計的な検証

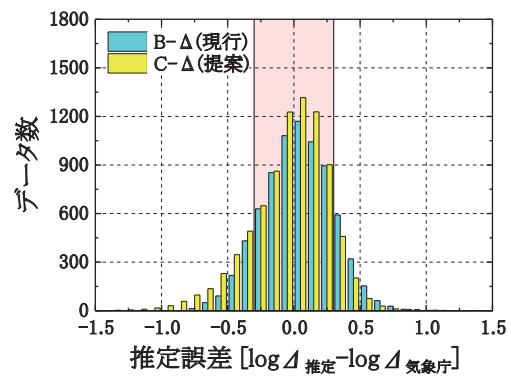
開発したアルゴリズムの性能を確認する目的から、地震動のデータセットに対して現行と提案の各手法により地震諸元を推定し、気象庁情報に基づき算出した値との差による推定誤差を整理した。この検証は地震諸元の推定結果を対象とするが、ノイズ識別アルゴリズムも適用した上での、早期警報用地震計への実装を想定したシミュレーションである。これより本検証は現行手法と提案手法の総合的な性能比較と位置付ける。

本報告で用いる地震動は、国立研究開発法人 防災科学技術研究所（防災科研）の K-NET¹⁰⁾ で記録されたデータを用いており、先に述べた海岸検知点に近い環境で観測されていることから、海岸検知点への導入を想定して暫定的に定めた標準パラメータを用いて検証を行った。

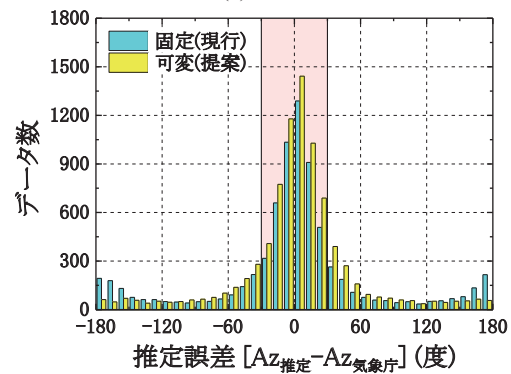
まず、地震検知の性能に関し地震動のデータセット⁹⁾に対して提案と現行の両手法で計算を行った。この地震検知は P 波到達の時刻を算出する処理であり、早期地震諸元推定に先立つ重要な処理と位置付けられる。検知データ数による評価の結果、提案手法による P 波到達の自動検知の性能は 10% 程度向上することが確認された。

次に、図 1 の (a) から (c) に、震央距離、震央方位、マグニチュードの現行手法と提案手法の推定誤差に対するヒストグラムをそれぞれ示す。

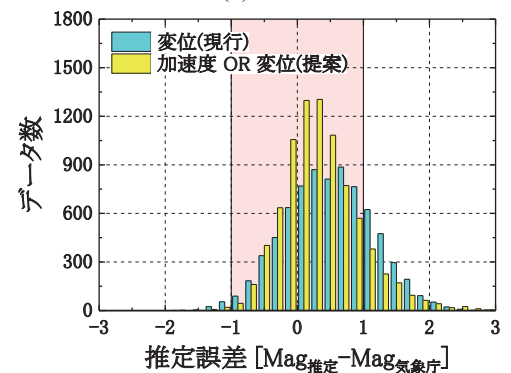
本報告では推定誤差の定量的比較に際し、その目標範囲を震央距離は 0.5 倍から 2.0 倍（対数の場合 ± 0.3 ）、震央方位は ± 30 度、マグニチュードは最終値で ± 1.0 に設定した¹¹⁾。図中の赤色の領域は各推定項目に対する目標範囲を表す。表 2 に各指標における現行手法と提案手法の目標範囲に含まれるデータ数の割合を示す。この表によると、震央距離のデータ数割合は両手法とも同



(a) 震央距離



(b) 震央方位



(c) マグニチュード

図 1 推定誤差の検証

表 2 推定値が目標範囲に入る割合の比較

	目標範囲	現行手法 (%)	提案手法 (%)
震央距離	± 0.3 (対数スケール)	74	74
震央方位	± 30 度	62	66
マグニチュード	± 1.0 (最終値)	76	87

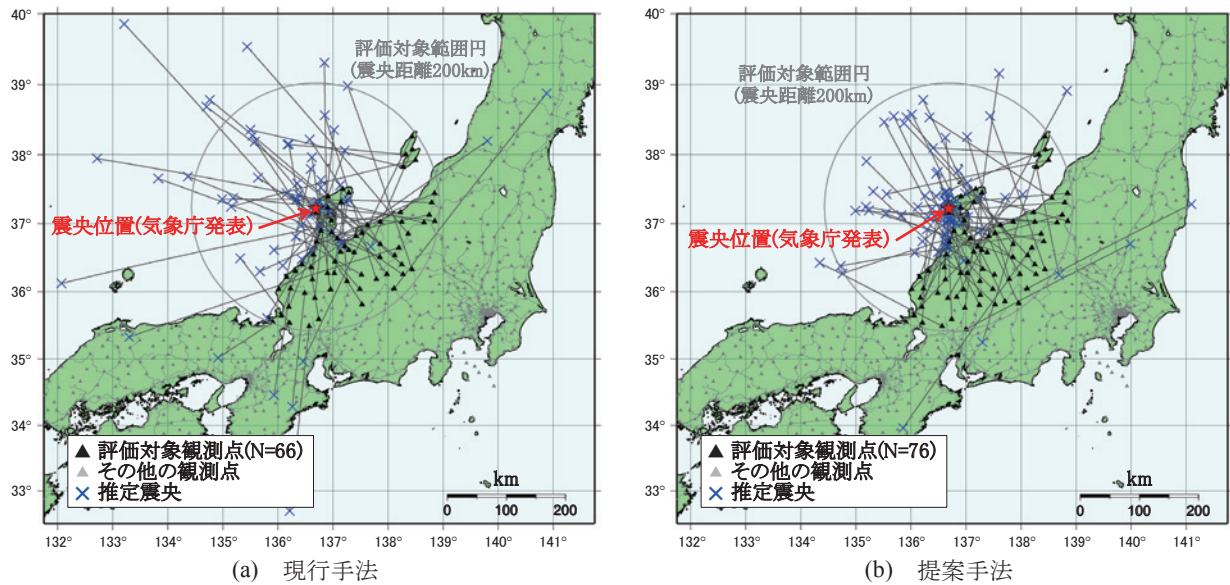


図2 推定震央位置の比較 (2007年能登半島沖地震)

じとなった。ただし、図1の(a)によると提案手法では検知データ数が増えていることから、結果的に目標範囲に含まれるデータ数は増加している。震央方位およびマグニチュードについては、現行手法に対し提案手法のデータ数の割合がそれぞれ4%および11%増加している。以上の統計的な検証の結果から、提案手法の地震諸元推定の精度は、現行手法と比べ同等以上となることが確かめられた。

震央距離推定はP波初動部の振幅の立ち上がり形状に基づいているが⁹⁾、この形状は震源から地震検知点までの伝播経路の散乱減衰特性に主に支配されると考えられる¹²⁾。よって、地域ごとの散乱減衰特性の違い^(例えば13)を考慮して震央距離を求める推定式を最適化することにより推定の精度を更に高めることができると考えられ、今後の課題である。

3.2 既往地震データを用いたシミュレーション

次に、実使用時の地震諸元推定等の状況を確認するため、開発したアルゴリズムとパラメータを、既往地震で記録された波形(防災科研のK-NET¹⁰⁾)に適用してオフラインのシミュレーションを行った。ここで用いたパラメータも、3.1節の統計的な検証と同様に海岸検知点用の標準パラメータとした。なお本論文では、2007年3月25日に発生した能登半島沖地震(M_{6.9})を対象とする。

気象庁が発表した震央位置(★印)と現行および提案の各手法で推定した震央位置(×印)を図2の(a)と(b)にそれぞれ示す。なお、評価対象は震央距離が200km以内の観測点としたが、図中にはこの範囲内において諸元推定を行った観測点を▲印で示している。その観測点数は現行手法が66、提案手法が76となり提案手法の方が諸元推定を行った観測点数は多く、地震検知性能の改

善が確認される結果を得た。また、震央位置の推定結果を見ると、提案手法では現行手法に比べ気象庁発表の震央周辺に×印が分布しており、より正確な震央位置(震央距離および震央方位)の推定が確認される。加えて、マグニチュードの推定誤差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、提案手法の方が推定誤差は小さい結果を得た。警報出力のタイミングについては、提案手法の最速警報出力時刻は現行手法よりも1.0秒短縮されており、即時性の向上も確認できた。

4. 早期警報用地震計の開発

3章に示したオフラインでの精度検証の結果、早期地震諸元推定の性能向上が確認された。これを受け、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、試作版の早期警報用地震計を新たに開発した。

試作版の地震計では、プログラム更新やパラメータ変更、データ回収の簡易性を考慮し、処理部は組み込み型ではなくパソコンをベースとした。開発した地震計の処理部と計測部の外観を図3の(a)と(b)にそれぞれ示す。処理部では早期地震諸元推定やノイズ識別の演算を行うと共に、波形の記録等を行う。計測部はサーボ式加速度計(3成分)を用いており、許容最大加速度は±2G(G:重力加速度)である。なお、A/D変換器は処理部と計測部の間において電磁ノイズが混入するのを防ぐ目的から計測部に内蔵させている。また、早期地震防災システムでは、情報同期などの点において各地震計が時刻を正確に記録することが重要となる。開発した地震計の時刻校正はGPS信号を用いている。

なお、地震計のソフト開発は2.2節で述べた改訂版の仕様書に基づいて行った。仕様書の活用により、迅速か



(a) 処理部



(b) 計測部(左：GPSアンテナ，右：サーボ式加速度計)

図3 開発した早期警報用地震計の外観

つ正確にソフト開発を行うことができたと考える。

5. 開発地震計を用いた稼働試験

新たなアルゴリズムを実装した試作版の早期警報用地震計を用いて、実使用時に近い環境で稼働試験を行った。まずは地震動と列車振動の識別性能、次に地震諸元推定の精度の評価結果について述べる。

5.1 地震動と列車振動の識別の性能確認

地震動と列車振動の識別性能の確認を目的として、鉄道総研の日野土木実験所（以下、日野）内において稼働試験を行った。計測部設置地点の直近には複線の鉄道路線が存在し貨物列車や特急を含めた列車が頻繁に通過する。日野での稼働試験に際して設定したパラメータは、沿線検知点を対象として暫定的に定めた値とした。

試験期間は2015年2月20日から3月2日の10日間である。この間、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。識別状況を図4に示す。この識別方法は振幅情報（ VH_{max} : 上下動と水平動の最大振幅比）と周波数情報（ Rud : 高周波数帯域通過波形と低周波数帯域通過波形の移動平均）に基づいており、図中の赤い線が識別境界であり、赤い領域が列車振動、それ以外が地震動と識別されることを表す⁹⁾。

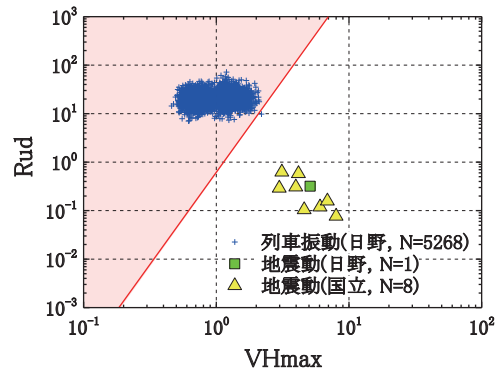


図4 地震動と列車振動の識別状況

地震動と誤って識別された列車振動波形によるマグニチュードの推定値は5.1であり、M5.5以上の警報出力の対象^{例えは¹⁾}には該当しないデータであった。この稼働試験で用いた識別基準は、新幹線の沿線で記録されたデータに基づいて暫定的に設定した沿線検知点用のパラメータであったため誤判定するケースがあったが、識別基準値を検知点ごとに最適化することにより、より正確な識別結果が得られると考える。

日野における10日間の試験期間中に千葉県中部でM4.5の地震が発生した。図4の通り正しく地震動として識別され、地震諸元推定の結果を得た。なお、地震諸元推定等の性能確認は、次節にて行う。

5.2 地震検知および諸元推定の性能確認

次に、地震の検知および諸元推定の性能を確認する目的から、鉄道総研の国立研究所（以下、国立）内に開発地震計を設置して稼働試験を行った。線路直近における試験ではないことから、設定パラメータは海岸検知点を対象として暫定的に定めた値とした。本報告では、2015年1月27日から2015年12月16日の323日間の記録について評価を行う。なお、評価期間内において開発地震計は連続して稼働していた。

5.2.1 地震検知の性能確認

まずは、地震の自動検知に関する評価を行う。気象庁が発表した一元化震源カタログに基づき評価期間内のすべての地震を抽出し、横軸にマグニチュード、縦軸に算出した震央距離をプロットした結果を図5に示す。震央距離は国立の地震計設置地点からの距離である。図において、気象庁情報に基づく地震（N=105417）は+印、開発地震計が検知を行い地震諸元推定の処理を行った地震（N=24）は■印として重ねて示している。図から確認される通り、震央距離200km以内、マグニチュード5.0以上の地震（N=3）に対しては地震検知処理を行い、地震諸元推定を行う結果が得られた。データ数は少ないものの、早期地震諸元推定アルゴリズムが対象とする範囲および規模（図中の赤い領域）の地震検知状況として、

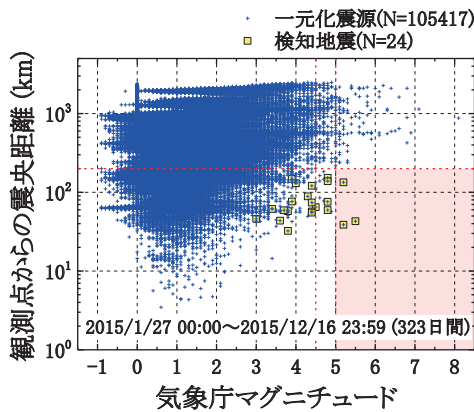


図5 地震検知状況

良好な性能が確認されたと考える。

5.2.2 地震諸元推定の性能確認

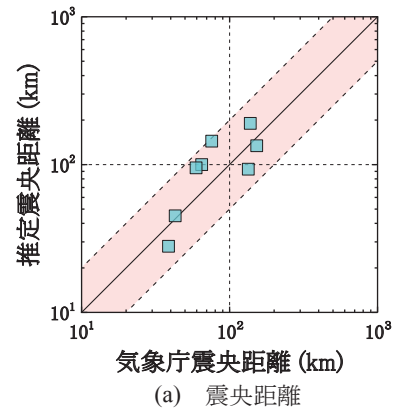
次に、地震諸元推定の精度に関する評価を行う。評価対象とする地震は、地震計が検知した地震 (N=24) のなかで震央距離 200km 以内、マグニチュード 4.5 以上の地震 (N=8) とした。対象地震の選定基準は、本報告では早期地震諸元推定アルゴリズムが対象とする震央距離と地震規模範囲を包含するものとして定めた。5.1 節に記した手法による評価対象地震の識別状況を図 4 に併せて示す。図の通り、地震動に対する正確な識別が確認される。

図 6 の (a) から (c) に震央距離、震央方位およびマグニチュードについて気象庁情報に基づく値と推定値 (震央方位のみ推定誤差) の関係をそれぞれ示す。ここでも、推定誤差の定量的評価にあたり 3.1 節と同様の目標範囲を設定した¹¹⁾。図中の赤い領域が目標範囲を表している。図 6 および表 4 の通り、目標達成率は震央距離が 100%、震央方位が 25%、マグニチュードが 75% であった。

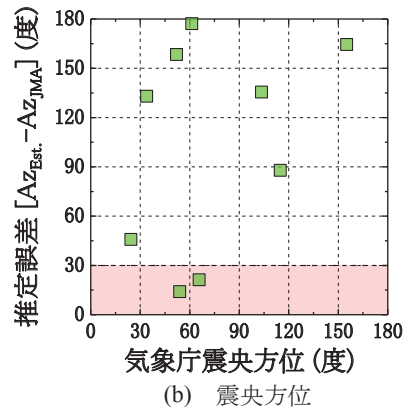
震央方位の推定は、目標とする精度から外れる地震が多い結果となった。震央方位は 1Hz から 2Hz のバンドパスフィルター処理をした変位波形を用いており、小さな振幅の場合、加速度データから変位に積分する際に地動ノイズや地震計の内部ノイズの影響を受けやすい。検討対象とした地震はマグニチュードが 4.5 から 5.5 と比較的規模が小さく、また距離もやや離れた地震が多かつ

表3 評価対象地震の一覧

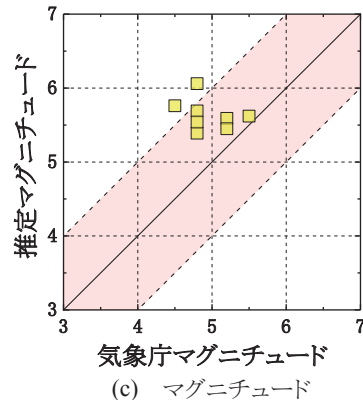
発生日時	震央距離 (km)	震央方位 (度)	M	震源深さ (km)	震央地域
2015/01/30 20:31	76	66	4.8	40	茨城県南部
2015/02/23 17:00	65	104	4.5	68	千葉県中央部
2015/05/25 14:28	43	24	5.5	56	埼玉県東部
2015/05/30 01:06	59	34	4.8	53	茨城県南西部
2015/08/06 18:22	134	52	5.2	55	茨城県北部
2015/08/28 23:46	153	61	4.8	46	茨城県東方沖
2015/09/12 05:49	39	115	5.2	57	東京湾
2015/11/22 08:20	138	54	4.8	52	茨城県北部



(a) 震央距離



(b) 震央方位



(c) マグニチュード

図6 地震諸元推定精度の検証

表4 地震諸元推定の性能確認の結果

	目標範囲	目標達成率 (%)
震央距離	0.5 倍から 2.0 倍	100
震央方位	± 30 度	25
マグニチュード	± 1.0 (最終値)	75

たことから P 波初動部の S/N 比が悪く、ノイズの影響が大きく出た可能性が挙げられる。また、マグニチュードを過大推定する傾向がみられた。これは震央距離をやや遠く推定したことが一因と考えられる。今回の検証は、規模の小さな地震が対象となっておりデータ数も少ないことから、鉄道施設等に影響を及ぼす強い地震動に対する精度を統計的に検証するには至っていない。このような地震に対して震央方位の推定精度を向上させるためには、地震計の内部ノイズの低減などのハード的な対応も必要となることが示唆される。稼働試験の結果から、震

央方位推定の精度向上に向けた課題が明らかになった。

6. まとめ

鉄道に対する地震時の防災・減災性能向上への社会的要望の高まりから、新たな早期警報用地震計の開発を行った。この地震計は高度化を図った早期地震諸元推定およびノイズ識別のアルゴリズムを実装している。以下に、本報告の内容をまとめる。

- (1) 単独観測点による早期地震諸元推定とノイズ識別のアルゴリズムを改良した。また、地震計開発においてソフト制作の迅速化や処理の統一化を図るため、処理手法に関する仕様書の改訂を行った。
- (2) 開発したアルゴリズムに対する総合的な検証を行った。統計的な検証において、提案する新たなアルゴリズムは現行手法と同等以上の性能を有することを確認した。また、既往地震データを用いたシミュレーションにおいて、地震諸元推定の精度向上、ならびに警報出力の即時性向上を確認した。
- (3) 高度化を図った早期地震諸元推定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を試作した。試作版の地震計では、プログラム更新やパラメータ変更、データ回収の簡易性を考慮し、処理部はパソコンをベースとした。
- (4) 試作版の早期警報用地震計を用いて、実使用に近い環境で稼働試験を行った。地震動と列車振動の分離に関する試験では、良好な識別性能が確認された。地震諸元推定に関する試験では、震央距離とマグニチュードは目標とする精度を概ね満足する結果が得られた。震央方位は目標とする精度から外れる地震が多く、内部ノイズ低減のためのハード対策の検討の必要性が示唆された。

以上より、更なる改善の必要性が挙げられたものの、開発したアルゴリズムを実装した地震計を早期地震防災システムに導入することにより、早期地震警報の精度、即時性および信頼性が向上し、地震時の安全性の改善が期待される。

謝辞

本研究では、防災科研の強震観測網 (K-NET) および基盤強震観測網 (KiK-net) の地震記録波形¹⁰⁾ を使用しました。また、一部の図には The Generic Mapping Tools¹⁴⁾ を使用しました。記して感謝の意を表します。

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，第 60 巻，第 5 号，pp.387-397，2007
- 3) Nakamura, Y., "On the urgent earthquake detection and alarm system (UrEDAS)," *Proc. of 9th World Conf. on Earthquake Engineering*, pp.VII673-VII678, 1988.
- 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) 東田進也，小高俊一，芦谷公稔，大竹和生，野坂大輔：P波エンベロープ形状を用いた早期地震諸元推定法，地震第 2 輯，第 56 巻，pp.351-361，2004
- 6) 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
- 7) 仁杉巖監修：巨大地震と高速鉄道 新潟県中越地震をふりかえって，山海堂，2006
- 8) Yamamoto, S., and Tomori, M., "Earthquake early warning system for railways and its performance," *Journal of JSCE*, Vol. 1, pp.322-328, 2013.
- 9) 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
- 10) Okada, Y., Kasahara K., Hori S., Obara K., Sekiguchi S., Fujiwara H., and Yamamoto A., "Recent progress of seismic observation networks in Japan - Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net -," *Earth Planets Space*, 56, pp.15-28, 2004.
- 11) 中村洋光，大竹和生，芦谷公稔，東田進也：早期地震諸元推定手法における推定精度について，日本地震学会講演予稿集，2003 年度秋季大会，P115，p.53，2003
- 12) Okamoto, K., and Tsuno, S., "Investigation on relationship between epicentral distance and growth curve of initial P-wave propagating in local heterogeneous media for earthquake early warning system," *Earth, Planets and Space*, 67:167, 2015.
- 13) Carcole, E., and Sato, H. "Spatial distribution of scattering loss and intrinsic absorption of short-period S waves in the lithosphere of Japan on the basis of the Multiple Lapse Time Window Analysis of Hi-net data," *Geophys. J. Int.*, Vol. 180, pp. 268-290, 2010.
- 14) Wessel, P., and Smith, W. H. F., "Free software helps map and display data," *Eos Trans., AGU*, Vol. 72 (41), p. 441, 1991.