

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

岩田 直泰* 山本 俊六* 是永 将宏* 野田 俊太*

Improvement of the Seismic Parameters Estimation and the Noise Discrimination
for the Earthquake Early Warning

Naoyasu IWATA Shunroku YAMAMOTO Masahiro KORENAGA Shunta NODA

We updated the algorithm of the earthquake early warning, and implemented the performance validation for the actual use. The new algorithm has high ability for the estimation accuracy and quickness of seismic parameters in comparison with the current one. The improvement of the train operation safety at the time of earthquakes can be produced by using these advanced techniques. And we developed the superior algorithm of the discrimination between the earthquake ground motions and the train-induced ground vibrations for seismographs installed along railway lines. The improvement of the reliability of earthquake early warning by those seismographs is expected.

キーワード：早期地震諸元推定，ノイズ識別，アルゴリズム，地震動，列車振動

1. はじめに

地震発生時に鉄道施設や走行列車の安全性が懸念される場合、鉄道事業者は可能な限り早く列車を停止させる^{1) 2) 3)}。いち早く列車を停止させるためには、伝播速度のより速いP波の情報を用いることが有効であり、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^{例えば4)}、必要に応じて警報を出力するシステムが稼働している^{5) 6)}。一方、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、これを受けて精度と即時性の改善に向けた早期地震諸元推定アルゴリズムの改良を行った^{7) 8)}。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⁹⁾とは別に、更なる識別性能の向上を目指し、周波数情報を用いたアルゴリズムを開発した。改良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を実装した地震計の導入により、地震時の列車運行の安全性および警報情報の信頼性の向上が期待される。本報告では上述の改良・開発について、地震動とノイズの実記録データを用いた検証結果についても触れる。

2. データセット

2.1 地震動のデータセット

本研究では鉄道に対する地震警報を扱うため、鉄道に

* 鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室

影響を与える可能性の高い地震を念頭に、震央が特定の地域に偏らないようその選択を行った。地震数は195となり、その震央位置の分布を図1に示す。対象地震のマグニチュードと震源深さの関係は図2の通りであり、マグニチュードは4.5から9.0、震源深さは112km以浅となった。地震動データは、対象地震に対し(独)防災科学技術研究所のK-NET¹⁰⁾(東北地方太平洋沖地震の

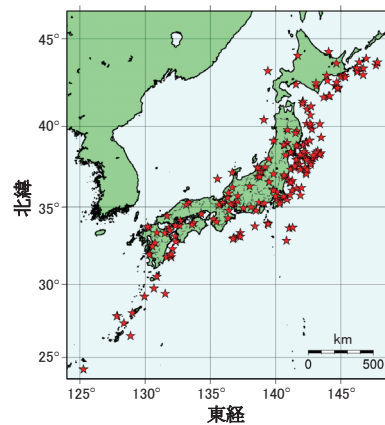


図1 震央の位置

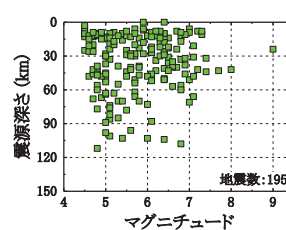


図2 マグニチュードと震源深さの関係

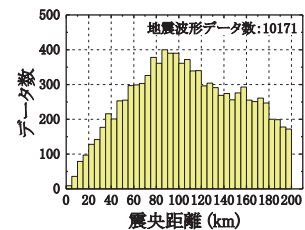


図3 地震波形データの震央距離ヒストグラム

特集：地震防災・耐震技術

み KiK-net¹⁰⁾ を含む) において震央距離が 200km 以内となるデータを抽出した。早期地震諸元推定では遠方の地震は対象としないことから、ここでは 200km 以内を選定基準としている。図 3 に検討対象の地震波形データ (10,171 波形) の震央距離ヒストグラムを示す。

2.2 ノイズのデータセット

鉄道沿線に設置された地震計において地震動と識別すべき振動は交通振動や工事振動等があるが、この中で列車走行に伴う振動の影響が最も大きいと考えられる。これより、本研究では識別すべきノイズを列車振動とする。

列車振動のデータは、新幹線沿線に設置された複数の地震計 (65 地点) の記録波形データ (10,002 波形) とした。列車振動の性質は、線路からの離隔や地盤条件により異なることが予想されるが、本研究では地震動と列車振動を識別する指標の平均的な傾向を確認する目的から、全てのデータを同一に扱うこととした。

3. 早期地震諸元推定アルゴリズムの機能向上

地震発生時において早期に列車停止信号を出力するためには、初めに P 波を検知し、次に震央位置 (震央距離と震央方位) を求め、更に地震規模 (マグニチュード) を推定する必要がある。本章では、上述の流れに沿って改良された処理内容と効果について述べる。本報告に示す早期地震諸元推定アルゴリズムの改良により、最短の警報出力時間は現行の 2.0 秒から 1.0 秒に短縮される。

3.1 地震検知

P 波初動の情報に基づき地震諸元を推定する場合、P 波到達の時刻を地震計がリアルタイムで自動検知する必要がある。現行手法では、加速度波形の短時間移動平均と倍加した長時間移動平均が交差した点を P 波到達時刻とする手法 (STA/LTA 法) ^{例え 11)} を実装しているが、アルゴリズムの改良に伴い移動平均の計算パラメータを再調整した。これにより、P 波初動が緩やかに立ち上がる地震に対する検知性能を向上させた。さらに、STA/LTA 法で P 波到達を検知しなかった場合にも比較的強い揺れに対する地震動を取り逃すことがないように規定値超過による地震検知手法 (レベルトリガ) を追加した。この規定値は任意に設定可能である。以上の改良により、地震の見逃しの可能性を低減させた。

3.2 震央距離推定

震央距離の推定には、P 波初動の振幅増加率と震央距離の相関性を用いている。現行手法では P 波到達から 2 秒間のデータを関数 $y=Bt \cdot \exp(-At)$ にフィッティングすることにより、P 波初動の振幅増加率を表す係数 B を求

め震央距離を推定している (B- Δ 法) ^{例え 4)}。一方、フィッティングする関数を単純化して $y=Ct$ とし、推定に用いる P 波到達からのデータ長を少なくすることにより精度が向上することが明らかとなっている (C- Δ 法) ⁷⁾。図 4 には目視で P 波到達位置を読み取った場合 (手動検測) における現行と提案の各手法から求めた係数 B および C と気象庁情報から求めた震央距離の相関係数を示す。各係数と震央距離は負の相関を持つため -1 に近いほど推定精度が高いことを表す。図によると、提案手法は現行よりも推定データ長が短い段階で相関係数が最小となり、C- Δ 法により精度と即時性の両方の向上が認められる。

また、震央距離推定を開始するタイミングに関し、P 波到達時刻の直後からのデータを利用して計算する場合と、やや振幅が大きくなった時刻から計算した場合を比較した結果、後者の方が推定精度は高くなることが明らかとなった。早期地震諸元推定アルゴリズムにおいて、P 波の到達は加速度波形の短時間移動平均と倍加した長時間移動平均が交差する位置として算出している。改良アルゴリズムでは、距離推定開始位置を決める倍率 (ECL) を、P 波到達位置を決める倍率よりも大きく設定することで上記を実現させる。図 5 には推定精度 (対数誤差 RMS) と ECL の関係を示す。ここで推定に用いるデータ長は 0.5 秒である。対数誤差 RMS は、誤差を表す指標のため、より小さい値の方が精度は高いことを表す。図から ECL を 4.0 とした場合の精度が最も高いことが確認される。推定開始時刻は ECL を 4.0 にすることにより平均 0.18 秒程度遅れるが、推定に用いるデータ長が短くなることより推定結果が得られるまでの時間は実質的に短縮される。図 6 には、現行手法による係数 B と ECL が 4.0 の場合における係数 C を重ねてプロットしている。図によると係数 C の方がばらつきは小さく、より

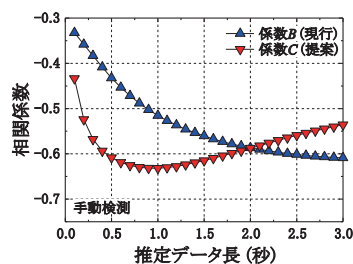


図 4 現行手法と提案手法の比較 (震央距離)

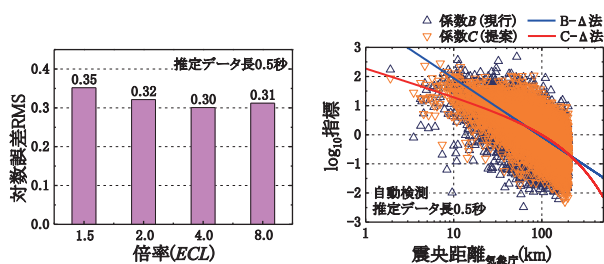


図 5 推定精度と倍率 (ECL) の関係

図 6 係数 B と係数 C の比較

正確に震央距離を推定可能であることが確認される。

また、現行手法では係数 B を用いた震央距離算出に 1 次式を用いていたが、粘性項を含む方が推定精度は向上することが確認されたことからアルゴリズムの改良に伴い震央距離推定の関数形に式 (1)¹²⁾ を採用した。

$$\log_{10} C = Pd1 \cdot \log_{10} \Delta + Pd2 + Pd3 \cdot \Delta \quad (1)$$

ここで C は係数 C 、 Δ は震央距離 (km)、 $Pd1$ から $Pd3$ は回帰係数を表す。式 (1) では Δ を直接求めることができないため収束計算により算出する。図 6 には B- Δ 法と C- Δ 法の震央距離推定のための回帰線を併せて示す。式 (1) の粘性項の導入により対数誤差 RMS は約 5.7% 低減する。

3.3 震央方位推定

現行手法では、震央方位推定において、主成分分析法により P 波初動から 1.1 秒のデータ長を用いている (固定ウィンドウ法)。図 7 に推定に用いるデータ長を変化させた時の推定と気象庁情報を用いて求めた震央方位の相関係数を示す。ここで、相関係数は 1 に近いほど推定精度が高いことを表す。図によると 0.5 秒前後で相関係数が最も大きくなっていることから、1.1 秒を用いる現行手法に対し、推定に用いるデータ長を短くすることで精度が向上することが分かる。更に、データ長を固定することなく、変位波形が半波長となるデータ長を用いた方が精度は向上することが明らかとなっている (可変ウィンドウ法)⁸⁾。半波長の検出には、P 波到達からある程度時間が経過した後において変位波形がゼロクロスするまでのデータ長としている。ゼロクロスの検出は P 波到達後 0.3 秒から 1.0 秒の間であり、その間にゼロクロスが検出できなかった場合には 0.5 秒の固定長で主成分分析法により震央方位を推定する。図 7 には可変ウィンドウ法の相関係数 (0.84) を併せて示しており、現行の 1.1 秒のデータ長を用いた固定ウィンドウ法の相関係数 (0.78) よりも高いことが認められる。

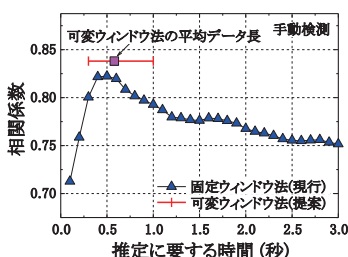


図 7 現行手法と提案手法の比較 (震央方位)

3.4 マグニチュード推定

地震の規模を表すマグニチュードの推定は、3.2 節で推定した震央距離と観測される振幅値から統計回帰式を用いて求める。現行手法では振幅値は加速度波形を 2 回

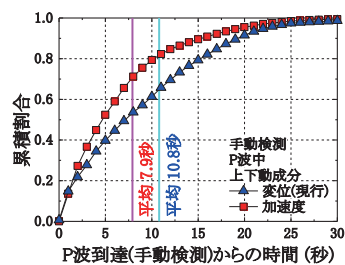


図 8 加速度と変位の最大値出現タイミング

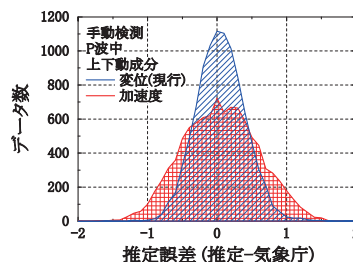


図 9 加速度と変位の推定誤差 (マグニチュード)

積分した変位波形を用いている。ただし、図 8 に示す通り最大値の出現は、統計的には変位よりも加速度の方が早い傾向がある¹³⁾。図の通り P 波中では平均 2.9 秒早くなっているが、この傾向は S 波中にも共通することを確認している。加速度を用いることによりマグニチュード推定 (加速度マグニチュード) に関する即時性の向上が期待される。ただし、図 9 に示すように変位に基づくマグニチュード推定 (変位マグニチュード) の方が加速度マグニチュードに比べて推定誤差が小さくなる。この際、精度と即時性のいずれを優先するかの判断が必要となるが、高速で走行する新幹線を対象として地震時の安全性を確保するためには即時性を重視することの効果は高いと考える。以上より、改良アルゴリズムでは加速度および変位に基づくマグニチュードの論理和 (OR) 制御を用いることを提案する。

また、現行手法では P 波中においてマグニチュードの追加推定回数は最大 3 回を基本としていたが、より細かく推定する方が安全性を確保できることから最大 11 回まで追加推定が行えるように改良を行った。

加えて、現行手法におけるマグニチュード算出式は粘性項を含んでいないが、その項を含めることにより精度の向上が認められたことから関数形に式 (2) を採用した。

$$Mj = Pm1 \cdot \log_{10} A + Pm2 \cdot \log_{10} \Delta + Pm3 + Pm4 \cdot \Delta \quad (2)$$

ここで Mj はマグニチュード、 A は振幅値 (加速度 cm/s^2 もしくは変位 cm)、 Δ は震央距離 (km)、 $Pm1$ から $Pm4$ は回帰係数を表す。式 (2) の粘性項の導入により誤差 RMS は加速度マグニチュードで約 4.0%、変位マグニチュードで約 1.5% 低減する。

4. ノイズ識別アルゴリズムの機能向上¹⁴⁾

4.1 地震動と列車振動の特性の違い

4.1.1 成分間の振幅比

地震動の初動はP波であり一般に上下動が卓越することから、現行の地震計では地震動とそれ以外の雑振動の識別に平滑化を行った上下動と水平動の振幅比の最大値 ($VHmax$) を指標の1つとして用いている⁹⁾。

2章で示したデータセットに対して $VHmax$ を求め、地震動と列車振動を比較した結果、地震動は上下動が卓越し $VHmax$ が1以上となるケースが多いのに比べ、列車振動は1以下のデータ数が多いことが確認された。現行手法はこの $VHmax$ の閾値を適切に設定することにより地震動と列車振動の識別を行っている。

4.1.2 周波数特性

列車振動は、車両の走行に伴い車輪が軌道を変位させることにより生じる。振動特性は車両の車軸配置や走行速度に影響されるが、線路沿線で観測される列車振動は多くの場合、比較的高周波成分が卓越することが報告されている^{例えは¹⁵⁾}。一方、地震動は地盤振動特性の影響を受けるものの、一般的に列車振動より低周波成分が卓越することが予想される。地震動と列車振動の上下動に対するスペクトルの比較例を図10に示す。なお、この図では地震動と列車振動の卓越する周波数を比較する目的から、それぞれのフーリエ振幅の最大値で正規化して表示している。図より地震動は比較的低周波帯域が卓越するのに対し、列車振動は地震動と比べて高周波帯域が卓越していることが確認される。周波数特性の情報を用いることにより、地震動と列車振動を適切に識別できる可能性が示唆される。

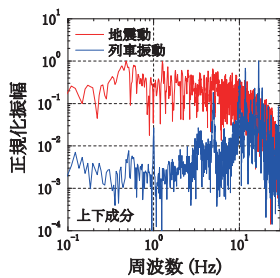


図10 正規化フーリエスペクトルの比較例

4.2 周波数特性の違いを考慮した識別指標の提案

4.2.1 ゼロクロス (Zc)

周波数特性の簡易評価法の1つとして、単位時間に振幅値がゼロを交差する回数をカウントして周波数特性を把握するゼロクロス法 (Zc) が知られている。

地震動と列車振動の上下動を対象として Zc を計算し統計的に整理した結果、地震動と比較し列車振動はゼロクロス回数が多いことから、高周波成分が相対的に目立

つことが確認された。この傾向は図10に示した両者の周波数特性と調和的な結果である。

4.2.2 近似卓越周期 (Tc)

P波初動の卓越周期 (Tc) を推定する手法の1つとして式(3)が提案されている^{1) 16)}。この手法は、卓越周期を算出するデータ区間が正弦波に近似しているという仮定に基づいている。

$$Tc = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{Ntc} v_i^2}{\sum_{i=0}^{Ntc} a_i^2}} \quad (3)$$

ここで、 Tc は近似卓越周期 (s)、 a_i は上下動加速度データ (cm/s^2)、 v_i は a_i を1回積分した速度データ (cm/s)、 Ntc は Tc を算出する際のデータ長 (本研究では3.0秒とした)、 i はカウンタである。 v_i は、漸化式により毎サンプルごとに算出している。

地震動と列車振動の Tc を計算し統計的に整理した結果、地震動と比較し列車振動は Tc が小さく短周期 (高周波) が卓越していることが分かった。一方、地震動は Tc が相対的に大きく長周期 (低周波) の卓越が見られた。

4.2.3 周波数帯域比 (Rud)

図10の通り、一般的に地震動は高周波帯域に比べて低周波帯域が卓越するのに対し、列車振動はその逆の高周波帯域が卓越している。ここでは、漸化式フィルター¹⁷⁾を用いて高周波および低周波の帯域を通過させるデータを毎サンプル求め、それらの絶対値振幅の移動平均の比を識別指標 (Rud) として定義した。本研究では地震計の出力データにおいて有効な周波数範囲を考慮し、 Rud を算出する際には低周波帯域は5Hz以下、高周波帯域は20Hz以上を通過させるようフィルター特性を設定した。その周波数特性を図11に、 Rud の定義を式(4)に示す。

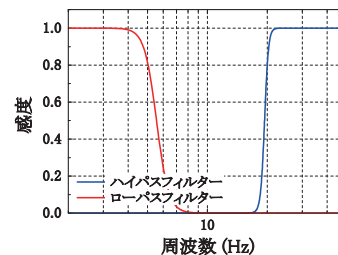


図11 Rud を計算する際のフィルター特性

$$Rud = \frac{\sum_{i=0}^{Nrud} abs(a_{high})_i}{\sum_{i=0}^{Nrud} abs(a_{low})_i} \quad (4)$$

ここで、 Rud は提案する識別指標、 $abs(a_{high})_i$ は高周波帯域通過後の絶対値加速度データ (cm/s^2)、 $abs(a_{low})_i$ は低周波帯域通過後の絶対値加速度データ (cm/s^2)、 $Nrud$ は Rud を算出する移動平均のデータ長 (本研究では1.0秒とした)、 i はカウンタである。

図 12 (a) および (b) に、地震動と列車振動の Rud の時系列の例をそれぞれ示す。図 12 (a) の地震動では、P 波到達の前後において Rud の値が変わり、P 波到達後は 1 以下となる。一方、図 12 (b) の列車振動では、列車通過時において Rud の値が変化し、通過時は 1 より大きくなる。地震動と列車振動の Rud を計算し統計的に整理した結果、 Rud が 1 以下において地震動のデータ数が多くなっていることが確認された。

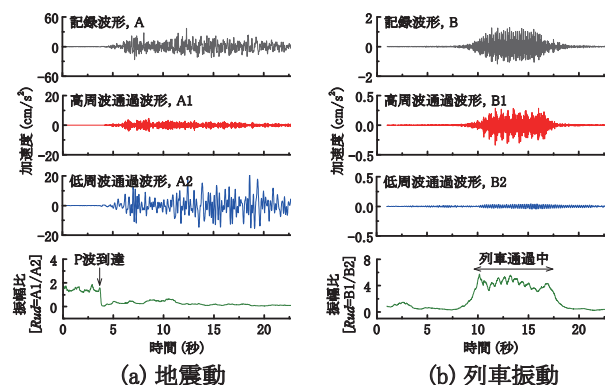


図 12 Rud 時系列の例

4.3 各識別手法の検証と考察

4.2 節では指標を定義し地震動と列車振動の識別の可能性について述べた。本節では、それらを区分する閾値を定め、識別の結果について考察する。

指標に対して閾値を定め地震動と列車振動を識別する場合、完全な分離は不可能であり、地震動をノイズとして識別するケースが発生する。本研究では、各指標において列車振動を除去する割合が、全列車振動データ数の 90% になるよう閾値を定めた。これにより、列車振動を除去できる割合が同一の条件のもとで、地震動を列車振動と誤って除去する割合を比較することができる。本研究で設定した各指標を単独で用いる際の閾値を表 1 (①から④) に示す。加えて、表 1 にはその際の地震動と列車振動の除去率 (ノイズと判定した割合) を併せて示す。列車振動の除去率が 90% に完全に一致しない指標もあるが、これは実システムへの実装を想定し閾値の桁数を整えていることによる。単独指標における地震動と列車振動の識別結果は図 13 (①から④) に示しており、地震動の除去率は $VHmax$ が最も低く、 Rud , Zc , Tc の順となった。

次に、指標を組み合わせることにより識別性能の向上を試みた。表 1 と図 13 (⑤から⑪) において、例えば $OR(VH, Zc)$ は $VHmax$ と Zc を論理和 (OR) で組み合わせている。本研究では、現行手法の $VHmax$ とその他の指標を組み合わせることを基本とした。組み合わせた際の閾値も単独指標と同様に、列車振動の除去率が 90% となるように設定し、地震動の除去率が最も低くなる値

を採用した。組み合わせの結果をみると、単独の指標よりも列車振動の除去率は高くなることが確認される。ただし、全ての指標を組み合わせた $OR(VH, Zc, Tc, Rud)$ の除去率が特別に高いわけではなく、 $VHmax$ と Rud を含む組み合わせの除去率が高い値となった。

そこで $VHmax$ と Rud の 2 つの指標に着目した際の、組み合わせ手法による識別状況について検討する。図 14 (a) と (b) は、地震動と列車振動の $VHmax$ と Rud に関する散布図である。図 14 (a) は $OR(VH, Rud)$ の結果であり、地震動が除去される割合は 12.6% (図 13 の⑦) となる。なお、図 14 において黄色い部分は除去領域を表す。図 14 (b) は、 $VHmax$ と Rud の散布図において対数の 1 次式 $\log_{10} Rud \geq a * \log_{10} VH + b$ により識別を行った結果である。ここでは列車振動の除去率が 90% かつ地震動の除去率が最も低くなるようにグリッドサーチ法を用いて 1 次式の係数を決定した ($a=3.8, b=-0.21$)。この手法の地震動除去率は 10.2% (図 13 の⑪) であり、今回検討した手法の中で最も低い。以上のように $VHmax$ と Rud を使い、提案した 1 次式を用いることにより、地震動と列車振動を良好に識別できることが確認された。

なお、線路沿線に設置されている地震計は、地点により線路からの距離や構造物の条件が異なる。路線により走行する車両も異なることから、列車振動の特性は地点ごとに異なることが予想される。よって、列車振動を除去するための閾値は沿線地震計の設置地点ごとに調整することが効果的と考えられるが、本研究では地震動と列車振動の識別について平均的な傾向を確認する目的か

表 1 識別の閾値および除去率

番号	識別指標	閾値				除去率 (%)	
		$VHmax$	Zc	Tc	Rud	地震動	列車振動
①	$VHmax$	1.29	-	-	-	17.6	90.0
②	Zc	-	16	-	-	63.4	91.6
③	Tc	-	-	0.271	-	51.7	90.0
④	Rud	-	-	-	0.4	47.4	90.0
⑤	$OR(VH, Zc)$	1.20	47	-	-	15.1	90.0
⑥	$OR(VH, Tc)$	1.22	-	0.071	-	17.1	90.0
⑦	$OR(VH, Rud)$	1.07	-	-	6.0	12.6	90.0
⑧	$OR(VH, Zc, Tc)$	1.16	43	0.053	-	14.3	90.0
⑨	$OR(VH, Zc, Rud)$	1.07	53	-	6.0	12.6	90.0
⑩	$OR(VH, Tc, Rud)$	1.07	-	0.016	6.0	12.6	90.0
⑪	$OR(VH, Zc, Tc, Rud)$	1.07	53	0.016	6.0	12.6	90.0

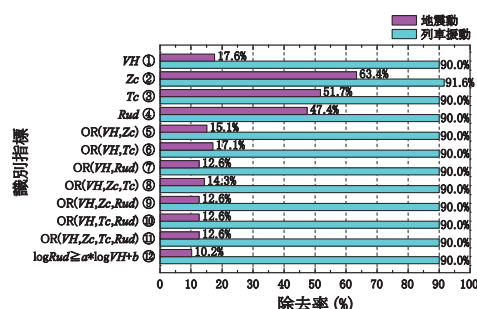


図 13 地震動と列車振動の除去率例

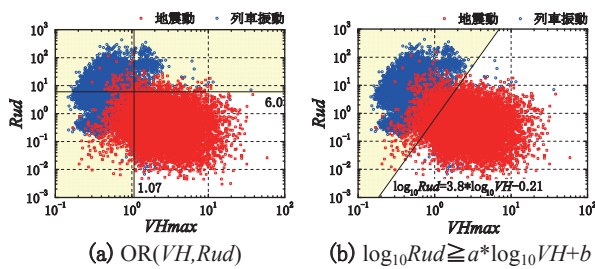


図 14 手法別の識別状況

ら、全ての沿線地震計のデータを同一に扱った。地点別閾値の効率的な決定方法は今後の課題である。

5. まとめ

本研究は、地震時の列車運行の安全性向上および警報情報の信頼性向上に向けた早期地震諸元推定とノイズ識別のアルゴリズムの機能向上について述べた。地震諸元推定では、地震検知（レベルトリガの追加など）、震央距離推定（C-Δ法など）、震央方位推定（可変ウィンドウ法）、マグニチュード推定（加速度マグニチュードの追加など）のアルゴリズムを改良することにより推定精度や即時性の向上が期待される。ノイズ識別では、現行の指標に加え新しい指標を定義し、それらを組み合わせることで地震動と列車振動の識別性能の向上が期待される。今後、本研究で述べたアルゴリズムを実装した試作版の地震計を開発し、稼働試験を行う予定である。

謝辞

本研究では（独）防災科学技術研究所の K-NET および KiK-net¹⁰⁾ のデータを使用致しました。また、一部の図の作成には The Generic Mapping Tools¹⁸⁾ を使用しました。記して感謝致します。

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) 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
- 6) 中村洋光，岩田直泰，芦谷公稔：地震時運転規制に用いる指標と鉄道被害の統計的な関係，鉄道総研報告，Vol.19, No.10, pp.11-16，2005
- 7) 山本俊六，野田俊太，是永将宏：P 波初動部の立ち上がり特性に着目した震央距離推定手法，鉄道総研報告，Vol. 26, No. 9, pp.5-10，2012
- 8) Noda, S., Yamamoto, S., Sato, S., Iwata, N., Korenaga, M., and Ashiya K., “Improvement of back-azimuth estimation in real-time by using a single station record,” *Earth Planets Space*, 64, 305-308, 2012.
- 9) 佐藤新二，中村洋光：早期地震検知手法の汎用的な評価システムの開発，鉄道総研報告，Vol.19, No.10, pp.17-20，2005
- 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) Allen, R.V., “Automatic earthquake recognition and timing from single traces,” *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 68, No. 5, pp.1521-1532, 1978.
- 12) 野田俊太，山本俊六，岩田直泰，是永将宏，佐藤新二：粘性減衰を考慮した単独観測点処理における震央距離推定方法，日本地球惑星科学連合 2011 年大会，HDS030-05
- 13) 干場充之，岩切一宏，大竹和生：最大動の出現時間について -緊急地震速報におけるより迅速な M 推定を目指して-，日本地球惑星科学連合 2009 年大会，Y230-004
- 14) 岩田直泰，山本俊六，是永将宏：早期地震警報に向けた地震動とノイズの識別手法の開発，第 14 回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.137-145，2014
- 15) 吉岡修，芦谷公稔：新幹線鉄道振動の発生・伝播モデル，物理探査，第 48 巻，第 5 号，pp. 299-315，1995
- 16) Allen, R. M., and Kanamori H., “The potential for earthquake early warning in Southern California,” *Science*, Vol. 300, 2003, pp.786-789.
- 17) 斎藤正徳：漸化式デジタル・フィルターの自動設計，物理探査，第 31 巻，第 4 号，pp.112-135，1978
- 18) Wessel, P., and Smith, W. H. F., Free software helps map and display data, *Eos Trans., AGU*, Vol. 72 (41), p. 441, 1991.