

地震防災のためのリアルタイム地震情報の活用

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 地震解析研究室長
山本 俊六



1. はじめに

地震は一般に予知することが困難な現象であり、一旦、発生すると広域が強い揺れに襲われ、線的に広がる鉄道施設も、構造物や付帯設備の被害、脱線など、さまざまな被害を受けることがある。また、揺れによる直接の被害を受けない場合であっても、運転再開に向けた点検のため、多大の時間を要することがある。

前触れもなく発生する地震に対して鉄道のレジリエンスを向上させるため、これまで、事前対策、緊急・即時対応、初動のための対応、復旧・復興対応などの観点から多角的に対応が進められてきた。このうち、事前対策では、耐震設計や耐震補強の実践、また未経験外力に対抗するための地震力フリーな構造の開発などが精力的に行われている。さらに、復旧・復興対応として、復旧の容易な構造物の提案が行われてきた。

一方、地震直後から数時間以内で実施される緊急・即時対応、初動のための対応では、早期地震警報による運転規制や計測された地震動指標値による点検判断などが行われている。そこでは、瞬時に変化する事象に対応するために、地震計で観測されたデータを利用したリアルタイム地震情報の活用が部分的に行われつつある。現在鉄道分野で活用されるリアルタイム地震情報は、限られた範囲で、限られた処理に基づくものであるが、今後この情報の質を高め、より適切なタイミングで活用することで、地震直後の鉄道の安全性をさらに向上させ、より適切な初動体制の構築が可能となることが期待される。特に、緊急・即時対応として利用される早期地震警報では、精度と即時性のさらなる向上が求められている。また、初動対応では、これまで“点”のデータとして扱われてきた揺れの強さを、“線”あるいは“面”のデータとして利用できることが期待されている。

以上を背景に、ここでは、リアルタイム地震情報の活用に向けた現在進行形の研究開発として、地震諸元

推定アルゴリズムを用いた早期地震警報、公的機関が設置した海底地震計データを用いた早期地震警報、地震後の早期運転再開のための鉄道用地震情報公開システムについて紹介する。さらに、個別に提供されるこれらのリアルタイム地震情報を時間的、処理的に統合して、信頼性と利便性を向上させたシームレスなリアルタイム地震情報に関する将来像を示す。

2. アルゴリズムの改良による早期地震警報の高度化

2.1 早期地震警報の概要

大きな揺れを受ける前に運転規制を行うことは、鉄道の安全にとって極めて重要である。これを目的に利用されている新幹線等の早期地震警報システムは、鉄道沿線や沿線から離れた箇所に設置された地震計の情報をを用いて警報を出力する。このシステムでは単独観測点の情報をを用いた警報出力ロジックとして、地震波振幅の規定値超過に基づく方法（以降、S波警報）、P波から一旦地震諸元を推定し、この情報から鉄道の地震被害が予測される領域を求める方法（以降、P波警報）が用いられている（図1）。

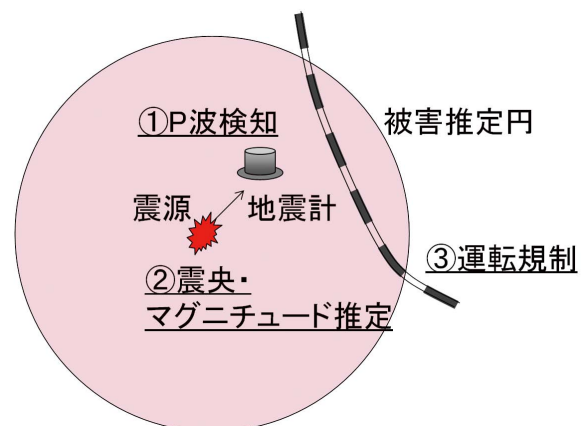


図1 P波警報のしくみ

P波警報は、このシステムの重要な機能である。地震計におけるP波警報の処理の流れを図1に示す。地震計はP波検知後、震央距離、震央方位、マグニチュードの推定を行う。また、これらの処理と並行して地震動と非地震性のノイズとの識別を行う。観測された波形が地震と判断された場合は、震央とマグニチュードによって、求められた被害予測範囲に対して警報を出力する。P波警報は最短1~2秒で出力される。

これまで、このシステムは2011年の東北地方太平洋沖地震などの大地震の際に有効に機能することが実証されたが、鉄道の安全をさらに向上させるために、より早く正確に警報を出力することが望まれている。

2.2 新しい警報アルゴリズムの開発と効果

このシステムのP波検知能力と地震諸元推定の精度、即時性の向上を目標として、警報アルゴリズムの改良

を行った。主な改良項目は、P波検知、震央距離推定、震央方位推定、マグニチュード推定、ノイズ識別である。

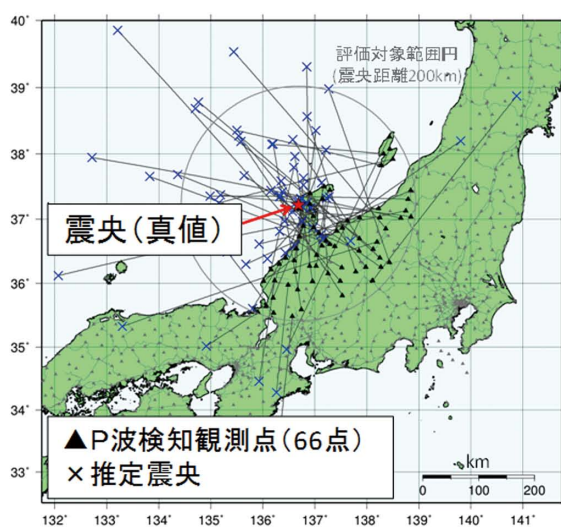
これらをまとめたものを表1に示す。P波検知については、これまで検知が難しかった緩やかな立ち上がりのP波についても対応できるようにした。震央距離については、P波到達後0.5秒間のデータを対象とすることにより、マグニチュードの違いの影響を受けずに精度良く震央距離を推定できるようにし、震央方位については、P波の最初の半波長のデータを用いることにより、推定精度を向上させた。また、従来の変位によるマグニチュード推定に加えて、加速度によるマグニチュード推定を行うことにより、マグニチュード推定の即時性を向上させた。さらに、上下動・水平動の成分比と周波数特性の差異から地震動と列車ノイズを識別する手法を導入し、ノイズ識別の性能を向上させた。

新しいシステムでは、以上の改良によりP波検知能力とP波警報の精度と即時性を総合的に向上させた。また、この改良により、P波警報出力までの最短時間を従来の2秒から1秒へと短縮した。図2に、2007年能登半島沖地震におけるK-NETデータを用いた震央推定のシミュレーションの結果を示す。図中の青いX印が推定された震央の位置である。図より、新しい手法による震央の推定精度が現行の手法に比べて向上していることが確認できる。

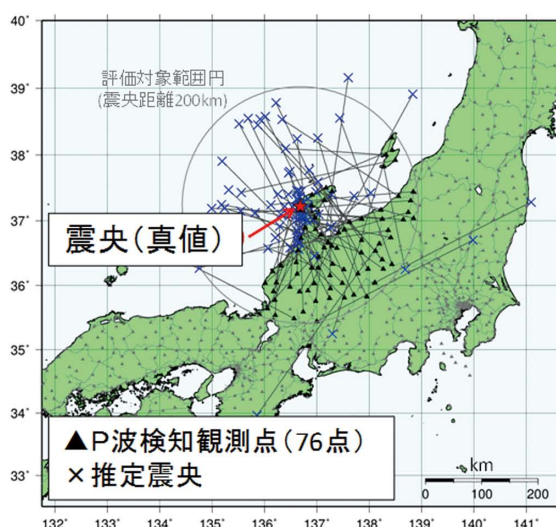
現在、これらのアルゴリズムを実装した地震計の商品化が進められており、鉄道での活用は間近と言える。

表1 新しいP波警報アルゴリズムの改良点

	改良項目	効果
より 確実に	P波検知	検知率の向上
	ノイズ識別	識別率の向上
より精度良く・ より早く	震央推定	精度・即時性向上
	マグニチュード	即時性向上



現行手法



新しい手法

図2 現行の手法と新しい手法の震央推定精度の比較 (2007年能登半島沖地震におけるK-NETデータを用いたシミュレーション)

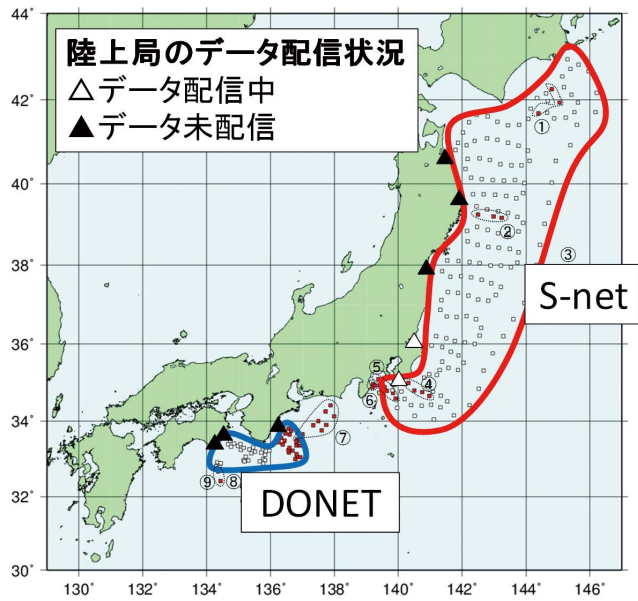


図3 DONETとS-netの観測点配置

3. 海底地震計データの活用

3.1 海底地震計整備の状況と活用効果

海洋研究開発機構および防災科学技術研究所など公的機関による海底地震計・水圧計観測網の整備が、南海・東南海エリア、日本海溝エリアで進められている。震源近くに設置された地震計のデータを利用できることは、早期地震警報にとって大きなアドバンテージである。したがって、これらの海底地震計のデータを鉄道が直接活用することにより、該当する海域で発生する大地震に対して、より早いタイミングで運転規制をかけることが可能となる。

図3に各観測網における海底地震計の設置を示す。青線で囲われた観測網が海洋研究開発機構のDONET、赤線で囲われたものが防災科学技術研究所のS-netである。

これらの地震計配置から、例えば、東北地方太平洋沖地震の際にS-netの海底地震計データを用いていれば、当時の早期警報システムに比べ概ね10秒程度早く警報を出力できることが予想され、海底地震計データの活用価値が高いことが示される。

3.2 海底地震計データ活用に向けた技術開発

通常、鉄道の早期警報は、陸域に設置された自社の地震計データを利用する。一方、海底地震計データは、陸域と異なる環境で観測されるものであり、鉄道にとっては部外のデータである。したがって、海底地震計データを鉄道で活用するためには、データ特性の把握と、これを考慮した警報手法の検討、鉄道へのデータ伝送や予期せぬノイズなどによる誤動作防止の検討が必須となる。以下、これらの検討結果を示す。

はじめに海底地震計データの特性の把握を行った。その結果、地震計の固定方法や海底面付近の堆積物の影響などにより、大振幅時に大きな基線ブレが生じたり、同一の震源距離であってもが陸域地震計に比べて振幅が顕著に大きくなるケースがあることが確認できた。また、陸域で用いているP波警報のアルゴリズムを海底地震計データに適用したところ、十分な精度が得られないことも確認できた。これらの状況より、まずは規定値超過に基づく警報手法を用いることとした。この際、規定値は、沿線からの距離と海底面の増幅特

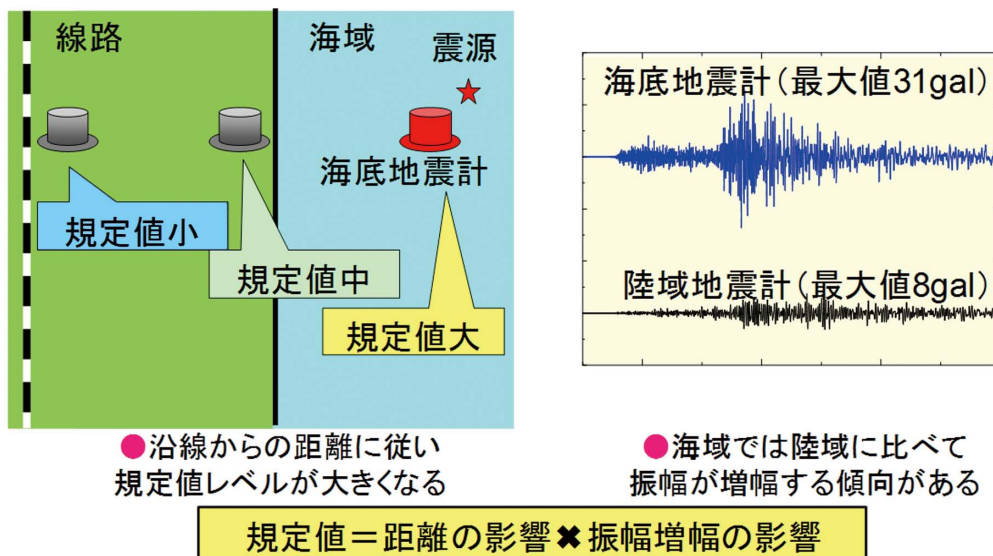


図4 規定値の決定方法

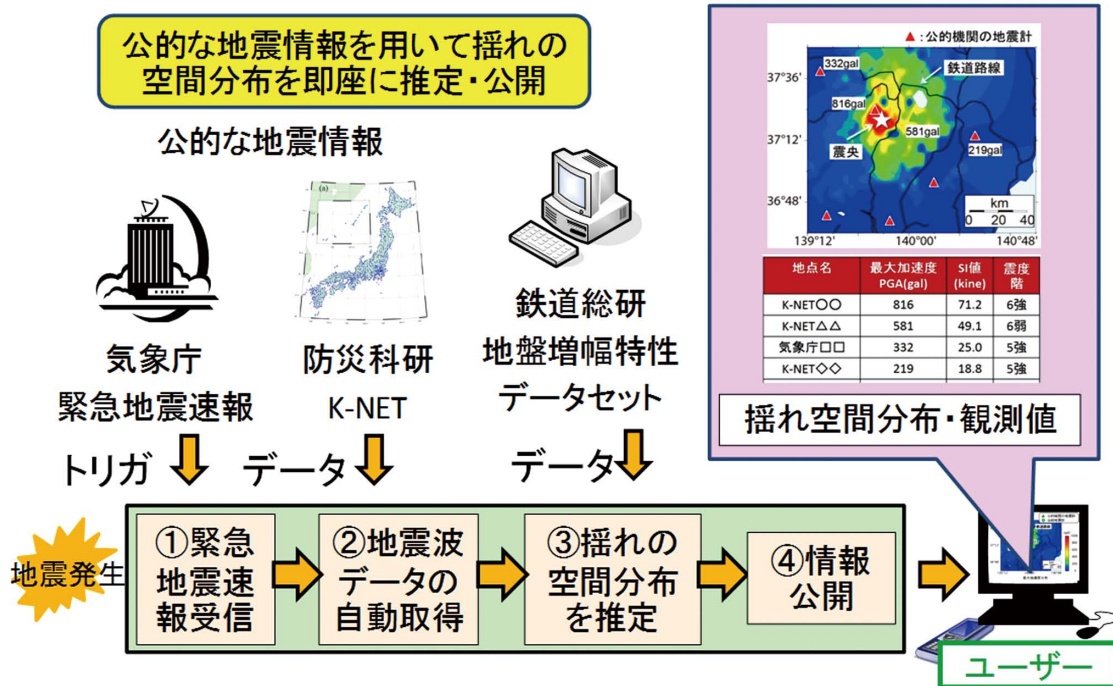


図5 鉄道用地震情報公開システムの概要

性を考慮して決定する(図4)。

次に、データ伝送や誤報防止策について検討した。膨大な海底地震計データを限られた帯域で伝送するために、通信経路途中に処理装置を設置し、サンプリングレートを下げ、規定値超過に必要な情報のみを効率良く伝送するようにした。また、データの信頼性を評価するための品質管理フラグを導入することとした。たとえばサンプル間で極端な値の変化が認められた場合は、この情報が波形データとともに伝送され、鉄道側は必要に応じてデータの利用を停止することができる。これらの品質管理フラグと、2点以上で大きな振幅が観測された場合のみ警報を出力するなどのロジックを利用することなどにより、誤動作の可能性を大きく低減することができる。

現時点で、海底地震計により記録された地震波データは限定的であるが、今後これらのデータが数多く蓄積されると考えられる。検証と研究を進めることにより、海底地震計データによる高度な警報の実現を目指している。

4. 鉄道用地震情報公開システムの展開

4.1 システムの概要

現在、地震直後の対応として、鉄道では沿線に設置

された地震計の観測データなどに基づき、線路巡回や点検を実施することが多い。この際、地震計の情報は点の情報であるため、地震計と地震計の間の揺れの変動は把握できない。仮に線路に沿った面的な(線的な)揺れの分布を把握することができれば、大きな揺れの箇所、被害の可能性の高い箇所を絞り込むことが可能となり、より効果的な点検判断や早期運転再開支援の情報になると考えられる。鉄道用地震情報公開システムは、線路に沿った揺れの情報を地震直後に提供することを目的に開発した。

鉄道用地震情報公開システムの処理の流れを図5に示す。このシステムは気象庁から配信される緊急地震速報の最終報をトリガとして処理を開始する。はじめに、一定の待ち時間ののち、防災科学技術研究所のK-NETの即時公開データを自動取得する。次にシステムは自動取得したデータと事前に用意した地盤増幅特性に関するデータを用いて面的な地震動分布等を推定する。さらに、これらの推定結果に基づきホームページを更新し、同時にユーザーに対して更新のメールを送る。ユーザーはメールに記載されたURLをクリックすることにより、更新されたホームページにアクセスし、最新の情報を確認できる。スマートホンに表示されたホームページ画面の一例を図6に示す。

このシステムの震度推定精度に関して、過去データ



図6 画面表示例

を用いた検証を行った。その結果、震度の推定誤差は0.58であることが確認できた。即時的な震度の推定結果としては一定の精度を保っていると考えられる。また、揺れの推定情報は、地震発生後約8～9分後に公開される。以上より、この情報の精度と即時性は実用に耐えうるものと考えられる。

4.2 個別路線の被害推定に向けて

鉄道用地震情報公開システムは、現在揺れの空間分布を地図上に示す形で結果を公開している。現状の表示方法でも鉄道事業者は、地図上で自社路線上の揺れの分布を把握できるが、揺れをキロ程に沿って表示することなどにより、鉄道への揺れの影響をより直接的に把握できると考える。また、鉄道事業者が管理する沿線の地震計データ、地盤データなどピンポイントの情報を入力データとして扱うことにより、より精度の高い揺れの推定情報を提供できる可能性がある。さらに、鉄道事業者の所有する構造物のデータを利用することにより、構造物の被害推定情報も提供可能である。図7に個別路線における被害推定のイメージを示す。

今後はより実用的なシステムを目指して、推定処理の高精度化を進めるとともに、鉄道事業者の要望を反映する形でシステムのバージョンアップを図る予定である。

5. リアルタイム地震情報の将来像

ここでは、地震時における鉄道のレジリエンスの向上のために、リアルタイム地震情報の重要性を述べ、具体的な開発事例として、新しい地震諸元推定アルゴリズムを用いた早期地震警報、海底地震計データを用いた早期地震警報、鉄道用地震情報公開システムについて紹介した。

上述の各リアルタイム地震情報は、基本的に独立した異なるデータを扱い、異なるタイミングで情報を提供するものである。一方、図8に示すように地震発生後に利用できるデータの種類や量は、時間の経過に伴い増大し、同時に鉄道で必要とされる情報の種類や量も時間経過とともに多様化、増大する。このような状況の中、各リアルタイム手法の高度化のみならず、手法の融合や部内情報や部外情報などのさまざまな情報の融合、さらに出力された個別のリアルタイム情報の結合などが、より価値のある情報活用のために重要になる。

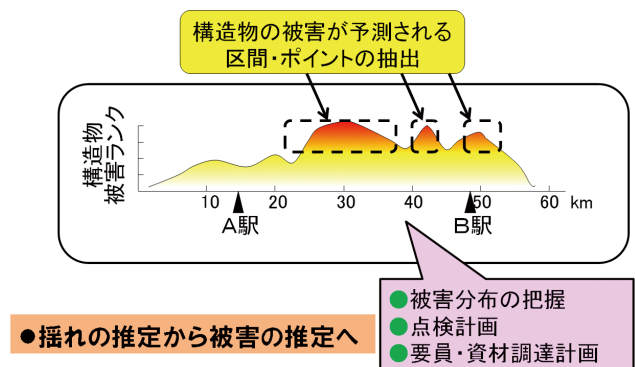


図7 個別路線の被害推定のイメージ

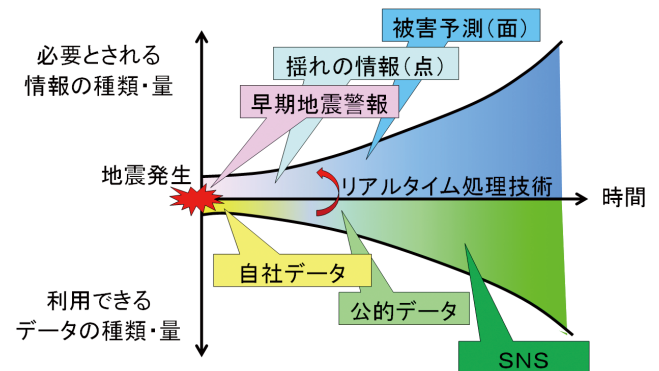


図8 時間経過に伴うリアルタイム情報の変化

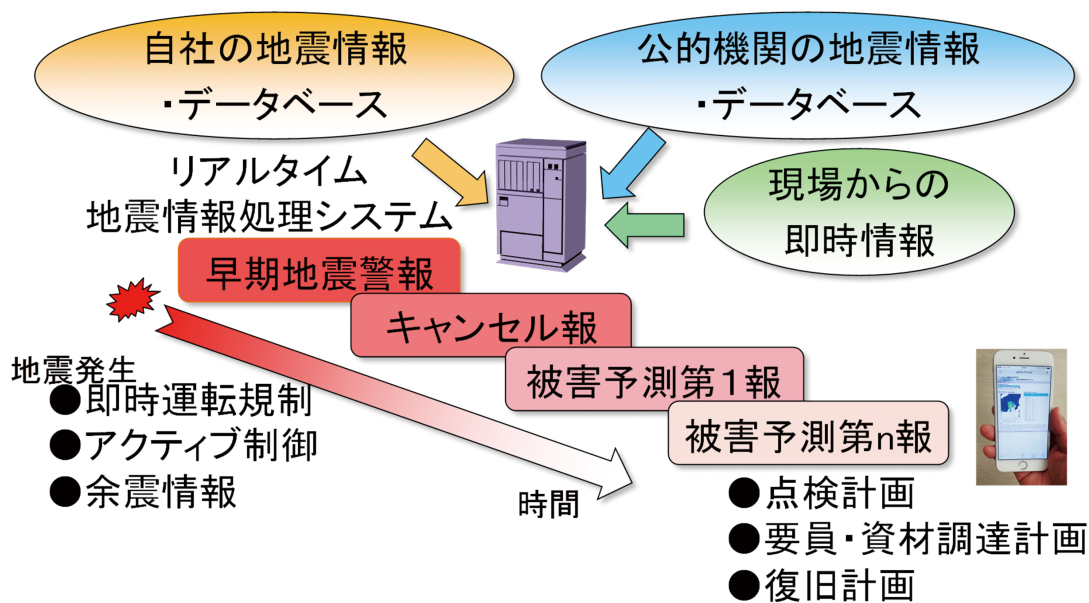


図9 シームレスなリアルタイム地震情報の活用イメージ

時間的および分野的にシームレスな情報処理や活用のイメージを図9に示す。地震発生後、自社の地震計や公的機関の地震計の情報を用いて早期警報を出力する。この情報を用いて即時の運転規制や、各種アクティブ制御が実施される。状況によってはキャンセル報が出力され、その場合は直ちに規制が解除される。揺れが収まった時点で被害予測情報が提供され、これに基づき初動体制の構築が行われる。さらに情報が追加されることにより予測精度は高まり、次第に現地からの確認情報が収集され、情報の確度が向上していく。これを受けてより具体的な運転再開計画や復旧計画が検討される。

このように高品質でシームレスなリアルタイム情報は、初動体制の確立や復旧支援に大いに活用できるため、事前のハードウェア対策と併せて鉄道のレジリエンス向上に大きく貢献すると考える。鉄道総研は、今後も関連する技術を着実に開発し、鉄道事業者と連携しながら、地震に対する鉄道の安全性をさらに高めることを目標に活動する所存である。

参考文献

1) 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, 2015

2) 岩田直泰, 山本俊六: 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, 鉄道総研報告, Vol.30, No.5, 2016
 3) 宮腰寛之, 山本俊六, 祇園昭宏, 神山新樹, 他谷周一, 渡辺 篤, 功刀 卓: 鉄道の早期地震警報への海底地震計情報活用に向けたデータ処理, 鉄道総研報告, Vol.29, No.1, 2015
 4) 山本俊六, 岩田直泰, 坂井公俊, 岡本京祐: 鉄道用地震情報公開システムの開発, 鉄道総研報告, Vol.30, No.5, 2016
 5) 山本俊六, 岩田直泰, 岡本京祐, 坂井公俊, 室野剛隆: 地震情報公開システムで地震後の早期復旧を支援する, RRR, Vol.73, No.3, 2016