

マグニチュード推定式の改良による 早期地震警報の即時性向上



野田 俊太
Shunta Noda
鉄道地震工学研究センター
地震解析研究室
主任研究員



岩田 直泰
Naoyasu Iwata
事業推進部
(地震防災システム)
課長



中島 仁志
Hitoshi Nakajima
東日本旅客鉄道株式会社
新幹線設備部
副長



櫛 健典
Takenori Keyaki
東日本旅客鉄道株式会社
研究開発センター
副主幹研究員

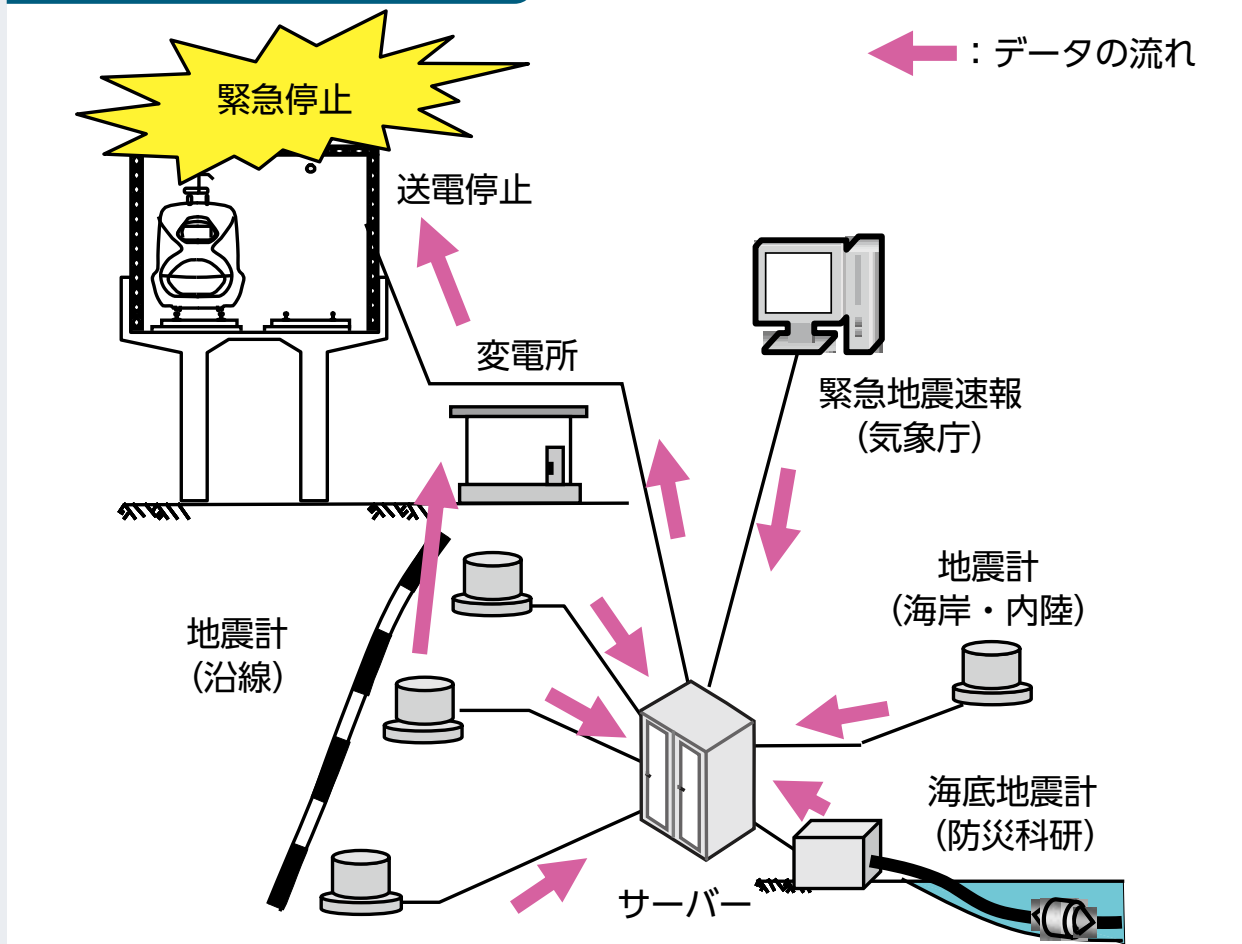
はじめに

2024年には、1月1日に能登半島地震(M7.6)が発生しました。8月8日に発生した日向灘の地震(M7.1)では、初めて南海トラフ地震臨時情報が発表されるなど、日本の鉄道は常に地震

のリスクに直面していると言えます、地震に対する安全対策をさらに高めていくことが重要となっています。

新幹線の地震対策の一つとして、早期地震検知システムが用いられています(図1)。このシ

図1 新幹線早期地震検知システムの概要



システムは、鉄道事業者が管理運用する早期警報用地震計のデータに基づいて列車停止の判断を行います。具体的には、地震波のうち先に到達するP波の情報から判断を行うP波警報、P波の後に来るS波で判断を行うS波警報の二種類の方法が主に用いられます(図2)。また、必要な場合に警報が確実に出力されるようするため、気象庁の緊急地震速報や、近年公的機関によって整備された海底地震計の情報を活用した警報

判断も並行して行われます。

早期警報用地震計のP波警報においては、P波開始から最短1秒の地震動データにより地震諸元¹⁾を推定します。その後地震計が観測する地震動の強さに応じて、地震の規模を表すマグニチュード M の値を更新していきます。この情報を基に、地震被害の発生リスクがあると考えられる区間を走行する列車を停止させます(地震時の新幹線の停止方法²⁾)。 M が大きいほ

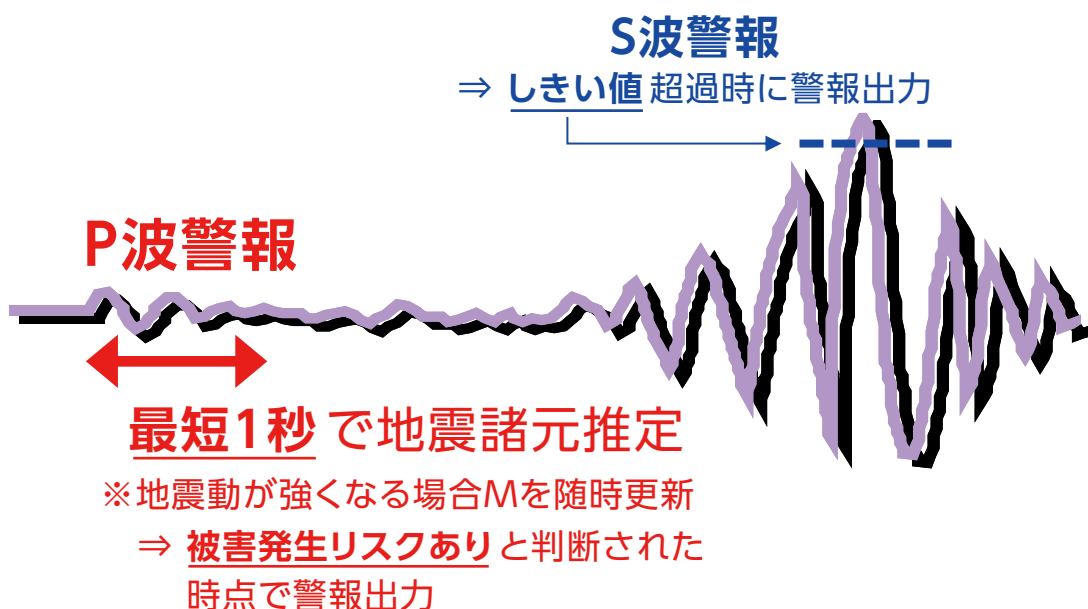
地震諸元

地震が発生した場所(震源または震央)およびその規模(マグニチュード M)を地震諸元と呼びます。新幹線の早期警報用地震計や気象庁の緊急地震速報では、地震発生中に地震諸元をリアルタイムに推定します。さらに、気象庁は地震終了後速やかにその時点までの情報を利用して地震諸元を決定、発表しますので、各メディアでその諸元を目にすることができます。

地震時の新幹線の停止方法

地震被害の発生リスクがあると考えられる区間内の地震計から変電所に対して列車停止信号(DC 24Vの接点出力)を出力し、これを受けた変電所が送電を停止することによって走行する新幹線列車を緊急停止させます。

図2 P波警報とS波警報



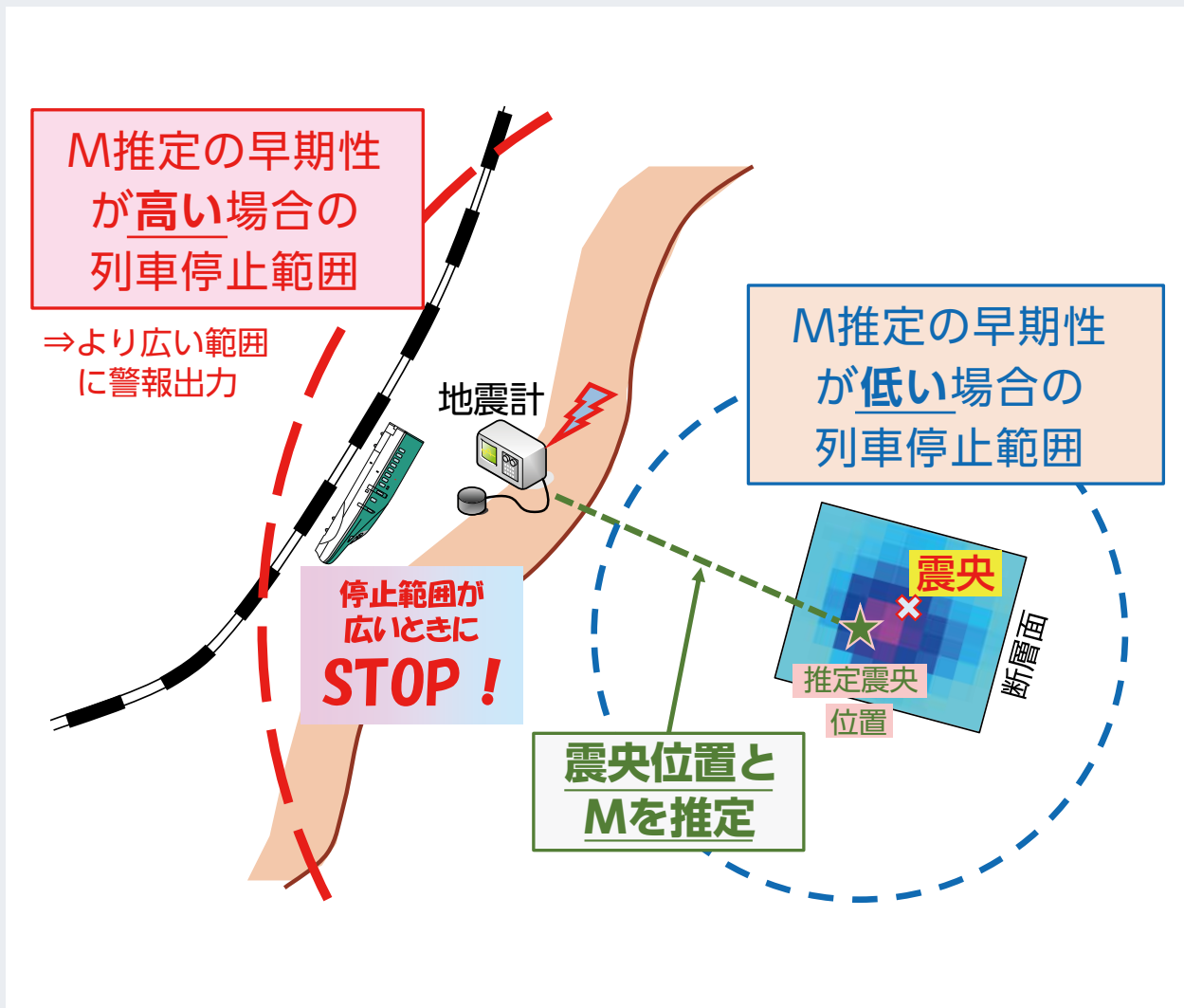


図3 M推定の早期性を高める効果

ど、より広い範囲で被害発生リスクが高まると考えられるため、可能な限り早くMを推定し、走行列車をより早く停止させることが重要です(図3)。

震央距離^⑤，logは常用対数，Pm1～Pm4は過去に観測された地震動データから決定される係数です。

従来使用していた推定式では、式(1)の全

マグニチュード推定式の改良

従来方法とその技術的限界

新幹線の早期警報用地震計では、次に示す式(1)によってMを推定しています。

$$M = Pm1 \times \log D_{max} + Pm2 \times \log \Delta + Pm3 + Pm4 \times \Delta \dots (1)$$

ここで、 D_{max} は地震動の変位の最大値、 Δ は

⑤ 震央距離

評価点(ここでは地震計の位置)から震央までの距離を震央距離と呼びます。2006年ごろから運用開始された新幹線早期警報用地震計では、B-Δ法と呼ばれる方法で震央距離を推定していました。2018年に、これに置き換わる新たな手法としてC-Δ法を実装した地震計が実用化され、B-Δ法と比較して、推定精度を向上させた上で推定に必要な地震動データ長を最短1秒とすることに成功しました。

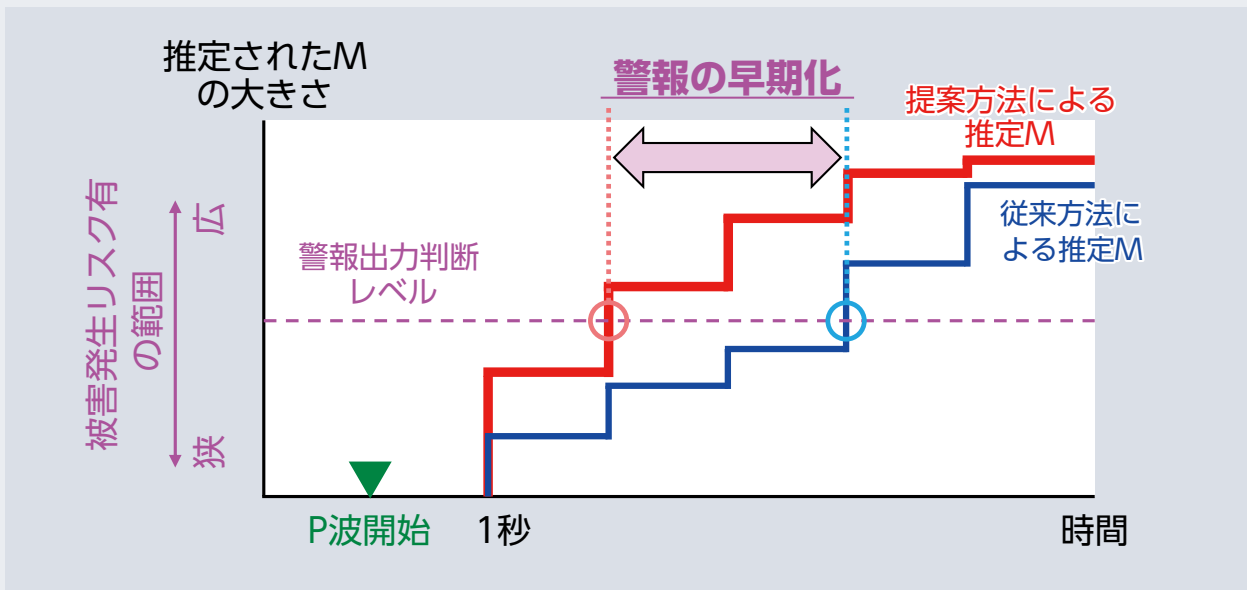


図4 提案方法によるM推定のイメージ

表1 従来方法と提案方法でのM推定式(式(1))の係数比較

P波開始からの時間 (秒)	従来方法の係数		提案方法の係数	
	Pm1	Pm3	Pm1	Pm3
1.0	0.9684	6.0015	0.9837	6.6789
2.0				6.4752
3.0				6.3769
4.0				6.3041
4秒以降				6.1202

での係数は常にある一定の値を用いていました。ここで、地震計はまず震央距離 Δ を推定し、その後観測された D_{max} の値を用いて M を推定する処理を行います。そのため、 Δ が決定されている場合には式(1)の右辺第二項、第三項(Pm3)、第四項は全て定数となり(つまり、 $M = Pm1 \times \log D_{max} + [\text{定数}]$)、 M と地震動の大きさ $\log D_{max}$ は単純な比例関係となります。したがって、 M が最大値(最終値)となるのは、地震動の大きさが最大になった時点ということになります。これが従来の地震学の知見における M を地震発生直後に推定することの技術的

な限界と言われてきました。

時間変化する係数の導入

上で述べた技術的な限界を解決するため、鉄道総研では過去に観測された地震動データの詳細な分析を行い、最大(最終)の M と $\log D_{max}$ の比例関係は、 D_{max} が最大になる前、P波開始から早い段階ですでに成立していることを明らかにしました¹⁾。これを踏まえ、式(1)の係数のうち、特にPm3をP波開始からの時間によって変化させることで、 M をより早期に推定できる方法を提案しました²⁾(図4)。具体的な係数の値を表1に示します。従来の係数Pm3は

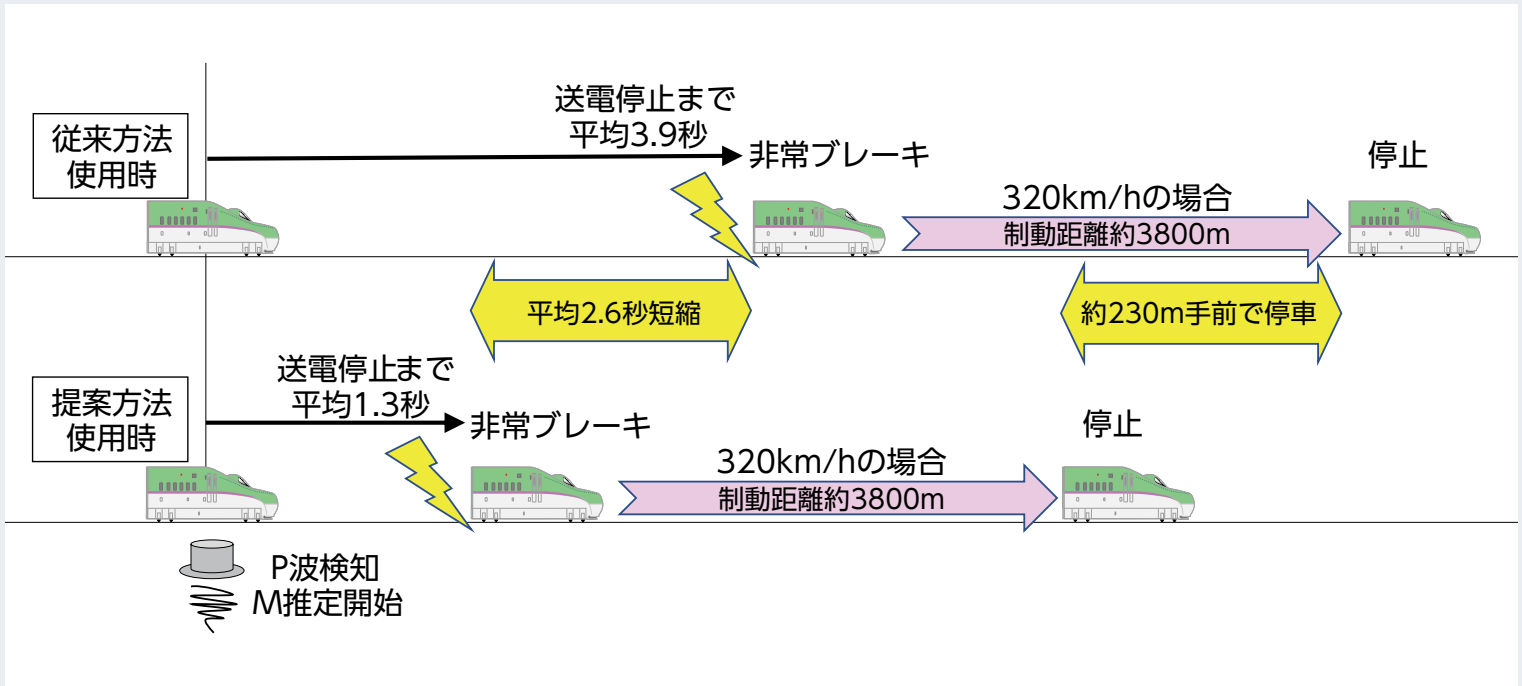


図5 警報出力までの時間が短縮されることによる停止距離の変化

時間によらず一定でしたが、新たなPm3はP波開始からの時間に応じて変化していきます。これにより、地震動の大きさが強くなる前から大きなMの値を推定することが可能になります。例えばP波開始から1秒の時点におけるMの推定誤差は、従来方法では約0.94でしたが、提案方法では約0.71となります。これは、最大(最終)のMを推定するまでの早期性が高まり、誤差が減少したということを意味します。これにより、警報出力までの時間を短縮し、地震時走行列車をより早く停止させることが期待されます。

JR東日本新幹線早期地震検知システムへの導入効果の検証

JR東日本新幹線早期地震検知システムで記録された地震計の動作ログを分析し、提案されたM推定式の係数を導入した場合の効果を検証しました。検証対象としたのは、2020年1月から2022年12月までの3年分の動作ログで

す。検証では、P波警報やS波警報などの全ての警報出力を確認したうえで、従来方法と提案方法を使用した場合で、警報が出力される最速のタイミングがどのように変化するかを分析しました。

対象期間において、警報が出力された地震は計60地震でした。このうち34地震において、M推定式に提案方法を導入することで、警報出力が早くなる効果が見られることを確認しました。さらに、最速で警報が出力されたのがP波警報であった13地震に着目すると、従来方法では警報出力までの平均時間が約3.9秒であったのに対し、提案方法では平均約1.3秒となり、平均約2.6秒短縮されることを確認しました。2.6秒を新幹線の走行距離に換算すると、走行速度が320km/hの場合、停止までの距離が約230m短くなることとなります(図5)。

このように、提案方法を導入することで警報出力の早期性が向上します。これにより地震時の走行列車の安全性がさらに向上することが期

表2 JR東日本新幹線早期地震検知システムへの提案方法導入後の警報出力早期性向上

発生日時	震源	M	気象庁観測点の最大震度	新幹線システムでの警報短縮時間
2024/03/15 00:14	福島県沖	5.8	5弱	2.9秒
2024/03/21 09:08	茨城県南部	5.3	5弱	6.2秒
2024/04/02 04:24	岩手県沿岸北部	6.0	5弱	0.4秒

待されますが、一方で、警報出力における早期性と精度は、常にトレードオフの関係にあります。つまり、早期性が向上することで警報出力の頻度が高まることが考えられます。この頻度がどの程度高まるのかを確認するため、上記の動作ログを分析しました。その結果、従来方法使用時では3年間で計60地震について警報出力がありました。提案方法を使用した場合はこれが72地震に増加することがわかりました。したがって、警報出力頻度は1.2倍程度になることが想定されます。

おわりに

導入効果の検証結果を踏まえ、提案方法はJR東日本新幹線早期地震検知システムの早期警報用地震計に2024年2月上旬に導入されました³⁾⁴⁾⁵⁾。導入から2024年6月までに、JR東日本エリアにおいて気象庁の地震観測点で震度5弱を記録した3地震について、導入効果を確認しました。その結果、いずれの地震において

も警報出力までの時間が短縮されることが確認されました(表2)。

今後も、地震発生時により早く確実に新幹線を停止させることができるよう、早期地震検知システムの改良に取り組んでいきます。RRR

文献

- 1) 野田俊太, W. L. Ellsworth: P波振幅の成長特性を反映したマグニチュード決定方法の適用性, 鉄道総研報告, Vol.33, No.12, pp.5-10, 2019
- 2) 野田俊太: より早くマグニチュードを推定する, RRR, Vol.77, No.2, pp.8-11, 2020
- 3) 東日本旅客鉄道, 鉄道総合技術研究所: 地震発生時に新幹線をさらに早く緊急停止させます ~新幹線早期地震検知システムの改良~, 共同プレスリリース, https://www.jreast.co.jp/press/2023/20231205_ho03.pdf (入手日:2023年12月5日)
- 4) 中島仁志, 樺健典, 野田俊太, 岩田直泰: 新幹線早期地震検知システムにおけるマグニチュード推定パラメータの変更, JREA, Vol.67, No.6, pp.47945-47948, 2024
- 5) 中島仁志, 樺健典, 野田俊太, 岩田直泰: マグニチュード推定パラメータの変更による新幹線早期地震検知システムの性能向上, 日本鉄道施設協会誌, Vol.62, No.10, pp.743-746, 2024