

## 地震に対する早期検知手法や運転規制の改良



櫻 健典\*1



小野 桂寿\*2

### Improving the Earthquake Early Warning System and Operation Control after Earthquake

Takenori KEYAKI\*1, Keiji ONO\*2

\*1 Assistant Chief Researcher, Disaster Prevention Research Laboratory of Research and Development Center of JR East Group

\*2 Principal Researcher, Disaster Prevention Research Laboratory of Research and Development Center of JR East Group

#### Abstract

East Japan Railway Company has introduced the earthquake early warning (EEW) system that immediately stops trains based on the earthquake information from seismometers installed along railroads, coastlines and other locations, in order to ensure the safety of running trains during earthquakes. In this paper, we highlight efforts to improve the rapidity of the EEW system, and also discuss our improvements to operating control after earthquake considering the ground characteristics of the place where the seismometers are installed and along railroads.

●**Keywords:** Earthquake early warning, Magnitude estimation, Operation control after earthquake, Amplification factor, AVS30

\*1 JR東日本研究開発センター 防災研究所 副主幹研究員  
\*2 JR東日本研究開発センター 防災研究所 上席研究員 (現 JR東日本コンサルタンツ)

## 1. 研究の背景

鉄道においては、地震発生時にはいち早く地震を検知して列車の速度を落とし停止させることが重要であることから、東日本旅客鉄道株式会社 (JR東日本) では、新幹線、在来線ともそれぞれ早期地震検知システムを導入し、運用している。緊急停止が必要な区間の判定には、主要動であるS波の規定値超過による判定に加え、初期微動であるP波による地震動の推定において、規模と震源を推定して影響範囲を判定する方法 (図1) などを採り入れている。また、地震情報も当社で設置した沿線地震計や海岸および内陸地震計に加え社外の地震情報などを活用しており、重層的なシステム設計となっている (図2)。2017年11月からは、(国研) 防災科学技術研究所が整備した日本海溝海底地震津波観測網 (S-net) の情報をリアルタイムで受信し、新幹線の早期地震検知に活用している。これらの早期検知手法については、これまで (公財) 鉄道総合技術研究所と連携して、高度化を進めてきた。

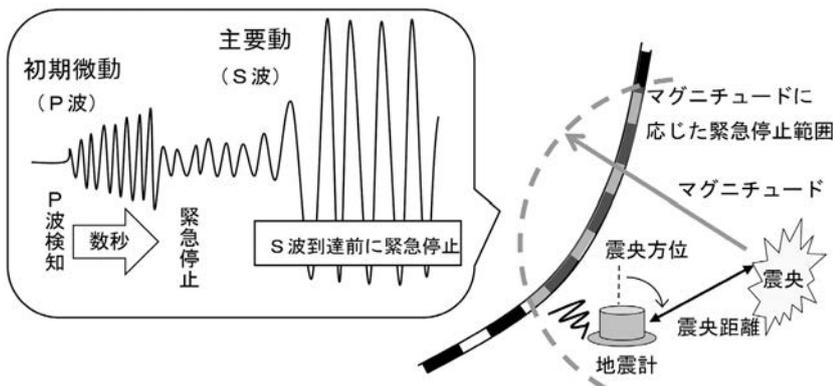


図1 P波警報の仕組み

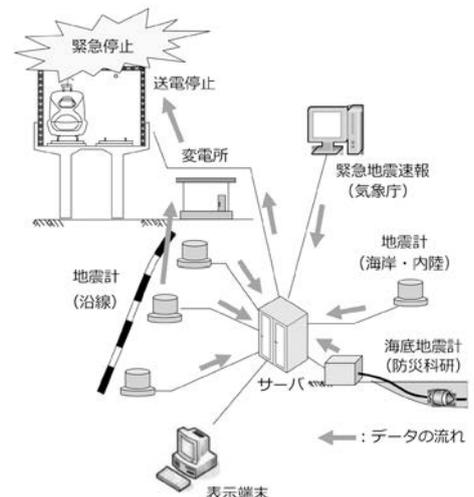


図2 新幹線早期地震検知システム

さらに、地震発生後には、観測された沿線の地震動の大きさに応じて運転規制を行っている。運転規制は、列車の運行を見合わせて設備点検を行う運転中止と、列車の速度を落として運行する速度規制の2段階を設定している。運転規制の基準値は、適用された設計基準や斜面・構造物の被害想定など、設備状態や沿線環境に応じて過去の鉄道被害のデータから設定している。地震が発生した際には、沿線の地震計の観測値が運転規制の基準値以上となった場合、地震計ごとに設定した受持ち範囲に対して運転規制を発令する。

本稿では、早期地震検知システムの改良としてP波による地震の規模を推定する手法の高度化と、運転規制の改良として在来線の運転規制基準値に地盤特性を考慮する手法について取り組んだ内容を述べる。

## 2. 早期地震検知システムの改良

### 2・1 P波により地震の規模を推定する手法の概要 (中島他、2024)

新幹線用に設置された地震計のP波警報では、P波の初動から1秒間の波形を用いて、地震諸元(震央距離・震央方位・マグニチュード)を推定する。推定した地震諸元から、被害想定範囲を推定しその範囲に警報を出力する。マグニチュードの推定は、検知した地震動が大きくなる毎に被害想定範囲を逐次更新し、追加のP波警報を出力する。このマグニチュードの推定には、過去の地震で得られたP波の振幅、震央距離などその際のマグニチュードから、統計的に求めた式(1)を使用している。

$$M = Pm1 \times \log Dmax + Pm2 \times \log \Delta + Pm3 + Pm4 \times \Delta \quad (1)$$

ここで、 $M$ はマグニチュード、 $Dmax$ は変位振幅、 $\Delta$ は震央距離、 $\log$ は常用対数、 $Pm1 \sim Pm4$ は係数である。右辺第二項( $Pm2 \times \log \Delta$ )は地震動の幾何減衰の影響を表す項、第四項( $Pm4 \times \Delta$ )は粘性減衰を表す項である。なお、ここではP波警報を取り扱っているため、 $Dmax$ はP波が卓越する上下動方向の変位振幅の値を用いる。

従来のマグニチュード推定式では、時間経過によらずパラメータ $Pm1 \sim Pm4$ には一定の値を使用していた。一方、 $Pm3$ に鉄道総研が提案した1秒ごとの時間とともに変化させた値を適用する(表1、図3)ことで、マグニチュードの推定精度が従来よりも改善することが分かった。

表1 変更パラメータ

	改良前の Pm1	改良後の Pm1
一定	0.9684	0.9837

P波到着からの 時間T (s)	改良前の Pm3	改良後の Pm3
1.00s	6.0015	6.6789
2.00s		6.4752
3.00s		6.3769
4.00s		6.3041
4s以降		6.1202

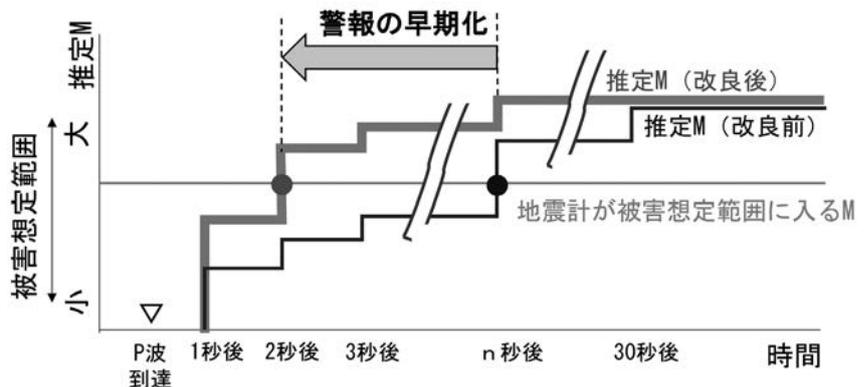


図3 改良パラメータによるマグニチュード推定イメージ

### 2・2 シミュレーションの手順

表1のパラメータをJR東日本の新幹線早期地震検知システムに蓄積された過去の地震記録に適用し、シミュレーションを実施した。対象としたのは2020年1月1日から2022年12月31日までの地震イベントのうち、P波推定が行われた全地震記録(N=4,429地震/3年)である。まず、システムの動作ログから、いずれかの地震計において警報出力がなされた地震イベントを検索した。次にそれぞれの地震イベントについて、P波警報・S波警報(緊急地震速報および海底地震計情報を含む)などすべての警報出力を確認し、最速の警報出力時刻を整理した。そして、P波による地震諸元推定が行われたログを抽出し、それぞれのログのマグニチュードからパラメータ改良を行った場合のマグニチュードを試算し、パラメータ改良後に警報出力対象となるか確認した。

### 2・3 シミュレーション結果

いずれかの地震計において警報出力がなされた地震イベントは、計60地震/3年であった。一方、マグニチュード推定パラメータ改良後に警報出力対象となる地震が新たに計12地震/3年あり、警報出力頻度は従来の約1.2倍となることが確認できた。

次に、マグニチュード推定パラメータ改良による警報出力の早期性向上効果について、検討対象期間とした3年間に従来パラメータで警報が出力される60地震のうち、34地震においてマグニチュード推定パラメータ改良による警報の早期性向上効果が確認された。このうち、新幹線地震計のP波警報により送電停止した13地震では、P波の検知から送電停止までに要する時間が改良前パラメータの平均3.9秒から改良後パラメータでは平均1.3秒と、平均2.6秒短縮できることがわかった。2022年3月16日23時34分発生の福島県沖の地震では、従来と改良パラメータそれぞれの最速の警報出力時刻を比較すると、約3.1秒の早期性向上効果が確認された。

本検討結果をふまえ、2024年2月8日より新たなパラメータによるシステムの運用を行っている。なお、本改良は新幹線用に設置された地震計に対するものであるが、これらにより推定された地震諸元の情報は在来線でも活用しているため、在来線に対しても早期化効果がある。

## 3. 運転規制の改良

### 3・1 背景

地震発生時の地上設備の被害に対する列車の走行安全性を確保するため、沿線に配置した地震計の観測値があらかじめ設定された基準値を超えた場合に、列車を抑止もしくは徐行させる運転規制が多くの鉄道において実施されている。旧国鉄では、運転中止の基準値は気象庁旧震度階の震度5の下限値に基づいて、80gal以上が観測された場合とされた。その後、JR東日本では、耐震設計区間や落石の可能性のある山間区間を除く区間について、概ね計測震度4.5に相当する12kineを運転中止の基準値とした。

国鉄時代の地震計配置間隔は約40kmであったが、国鉄民営化後の地震計増設により、首都圏などの在来線では地震計配置間隔が5~20kmとなっている。さらに近年、首都圏については(国研)防災科学技術研究所から浅部・深部統合地盤モデルに基づく250mメッシュのAVS30(地盤増幅率)のデータが公表されるようになり、沿線の地盤特性を詳細に把握することも可能となってきた。これを基に、地震計の受持ち範囲内の地盤増幅率が一定範囲内に収まるよう、地震計の受持ち区間の最適化も一部線区において実施済である(図4)。そこで、沿線の地盤特性を考慮した地震時運転規制基準値の改良について検討した。

### 3・2 運転中止基準値の見直しに向けた検討手順(櫻他、2024)

主要な構造物の地震動による被害下限値である21.8kine(鈴木・島村、2003)を、ある運転中止基準値、ある配置間隔で離散的に配置された地震計により捕捉する性能を「捕捉率」と定義する。本検討では、捕捉率が運転規制用地震計配置間隔40km、基準値12kineの場合と同等以上となるよう、地震計配置間隔および地盤増幅率を考慮した地震計受持ち範囲の最適化効果を反映した基準値を検討した。

検討に際しては、首都圏に密に配置されている東京ガスネットワーク(株)が運用する超高密度リアルタイム地震防災システム「SUPREME」の観測SI値を使用することとした。検討対象とした地震イベントは、2000年から2022年までに東京50km圏内のJR東日本の在来線の運転規制用地震計で3kine以上を観測し、かつ $M \geq 5.5$ の24地震である。図5に示すように、2つの東京ガスネットワーク地震計の組合せを作成し、1つを沿線の任意地点(地点A)、もう1つを運転規制用地震計(地点B)とみなして考える

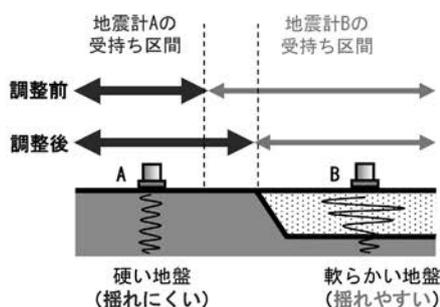


図4 地震計の受持ち区間の最適化

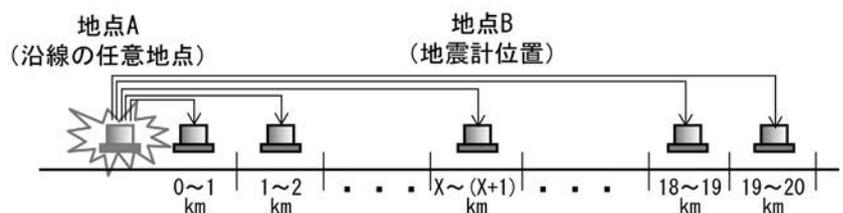


図5 地震計の組合せの作成イメージ

こととした。このような地震計の組合せを多数作成し、これら地震計の組合せのうち、運転規制用地震計（地点B）の基準値により沿線の任意地点（地点A）における被害下限値以上の地震動を捕捉できる割合Pを算出した。

また、一部線区における地盤特性を考慮した地震計受持ち範囲の最適化については、沿線の地盤増幅率（SI値増幅率）が運転規制用地震計設置位置のSI値増幅率の概ね1/1.4倍から1.4倍までの範囲に収まるよう実施されている。そこで本検討では、上述の地震計の組合せのうち、2地点のSI値増幅率が1/1.4倍から1.4倍までの範囲にあるものを使用することで、基準値の計算に地震計受持ち範囲の最適化効果を反映させた。SI値増幅率については過去の地震記録を統計的に分析して導いた、式（2）から算出した。

$$\log(\text{SI 値増幅率}) = -0.8 \times \log(\text{AVS30}) + 2.32 \quad (2)$$

ここで、AVS30の値は、(国研)防災科学技術研究所が公開している250mメッシュデータ（V4、2020年度版）を使用した。

### 3・3 地震計配置や地盤特性を考慮した捕捉率の算出結果

捕捉率の算出結果を図6に示す。運転規制用地震計の配置間隔40kmで地震計受持ち範囲の最適化無し、運転中止基準値12kineの場合の24地震平均の捕捉率は0.893であった。捕捉率がこれを上回るように地震計間隔短縮・地震計受持ち範囲の最適化有りの場合の基準値を定めることで、運転中止基準値を向上させつつ、被害下限値以上の地震動の捕捉性能としては地震計間隔40km、運転中止基準値12kineで受持ち範囲の最適化無しの場合と同等以上を確保することができる。また、②受持ち範囲最適化有りの場合は、①受持ち範囲の最適化無しの場合よりも捕捉率が向上し、全体的にグラフが上振れしていることから、その分運転中止基準値を向上可能である。

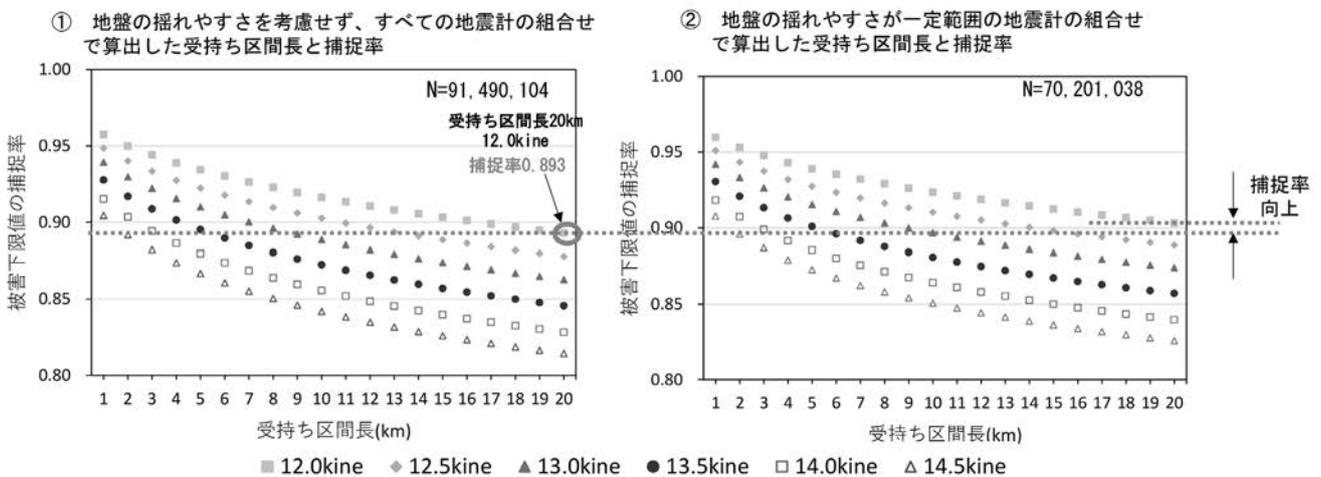


図6 捕捉率の算出結果

## 4. おわりに

当社で取り組んできた地震に対する早期検知手法や運転規制方法の改良について、最新の成果を紹介した。引き続き社内および社外の関係機関や研究機関と連携し、地震に対する列車運行の安全確保につながる研究開発を進めていきたい。

### 参考文献

- 1) 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(2024)、pp.47945-47948。
- 2) 樺健典・宮腰寛之・小野桂寿、地震計配置や地盤特性を考慮した鉄道における地震時運転規制基準の検討、土木学会全国大会第79回年次学術講演会(2024)、CS10-90。
- 3) 鈴木博人・島村誠、地震時運転規制方法の研究、JR East Technical review、No.3(2003)、pp53-60。