

# 直下型地震に対してより早く 列車の運転を規制する

是永 将宏

防災技術研究部(地震防災 研究員)



これなが まさひろ

## はじめに

鉄道では大きな地震が発生した場合、列車を素早く停止、減速させることでお客さまの安全を確保しています。地震発生時には、線路の沿線などに設置されている地震計で地面の揺れをとらえて、そのデータをもとに列車を停止、減速させるか否かの判断(運転規制判断)を行っています。また、新幹線のように高速で走行する列車に対してはより早く運転規制の判断を行うことが求められており、新幹線には鉄道総研が開発した早期地震防災システムなどが導入されています。

本稿では、地震発生時の鉄道の安全性をさらに向上させることを目指し、特に鉄道沿線の直下で発生した地震に対してより早く運転規制の判断を行うための新しい判断手法の検討について紹介します。

## 現在用いられている運転規制判断手法

まず、現在用いられている運転規制判断の手法について紹介します。運転規制判断手法には、大きく分けて『推定地震諸元情報を用いた判断手法』と、『地震動指標値を用いた判断手法』の2種類があります。

推定地震諸元情報を用いた判断手法は、地震計で観測された地震波の初期微動(P波)の数秒間のデータから地震諸元(震央位置やマグニチュードなど)を推定して、その地震による影響範囲を素早く予測し、大きな揺れ(S波)が来る前に影響範囲内の列車に対して運転規制判断を行うというものです。地震諸元を推定する手法には、鉄道総研と気象庁が開発したB-Δ法などを用いた早期地震諸元推定アルゴリズム<sup>1)</sup>があります。B-Δ法とは、地震波初動部の振幅の増加率から地震計から震央までの距離(震央距離)を推定する手法です。早期地震諸元推定アルゴリズムではB-Δ法に加えて、主成分分析法により震央方位を、地震波初動部の振幅からマグニチュードを求めることで、地震諸元情報の推定を行っています。早期地震諸元推定アルゴリズムの概念を図1に示します。また、地震検知数秒後に気象庁から発表される緊急地震速報も、運転規制判断に用いられる推定地震諸元情報の一つです。

地震の影響範囲を予測する手法には、M-Δ法<sup>2)</sup>などがあります。M-Δ法は、過去の地震による鉄道の被害事例から、マグニチュードと被害が発生した場所から震央までの距離との関係を求めておき、経験的に地震による被害が

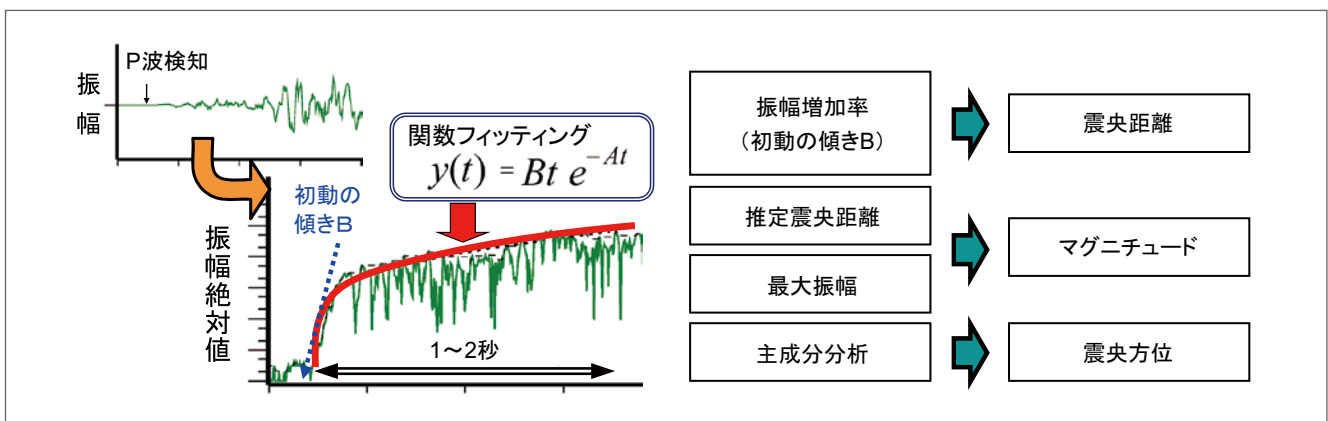


図1 早期地震諸元推定アルゴリズム

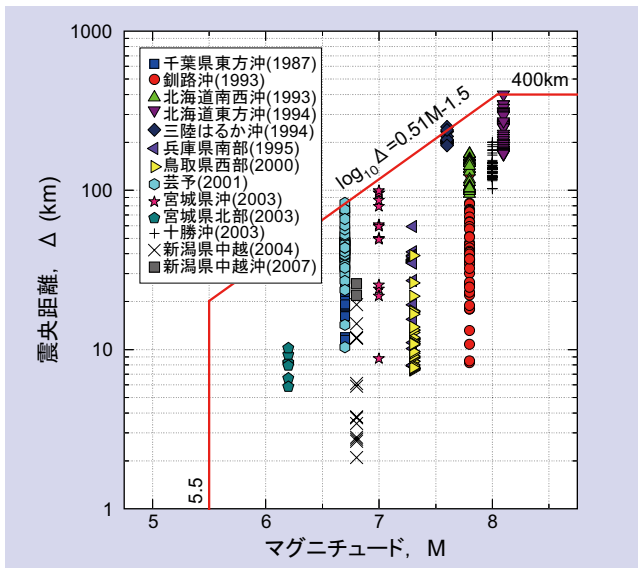


図2 鉄道被災箇所の震央距離とマグニチュードの関係

発生する可能性がある範囲を決定する手法です。図2にマグニチュードと被害発生箇所の震央距離との関係を示します。マグニチュードが大きくなるほど、地震による影響範囲が広がることが分かります。地震の影響範囲を予測には、このほかに距離減衰式を用いた手法などがあります。

新幹線の早期地震防災システムには、B-Δ法とM-Δ法を用いた運転規制の判断手法が導入されています。

一方、地震動指標値を用いた判断手法では、地震による地面の揺れ(地震動)が、あらかじめ定めたしきい値を超えた場合に、一定区間内の列車に対して運転規制を行います。鉄道の運転規制判断に広く用いられている地震動指標値として、JR用水平動2成分合成加速度があります。JR用水平動2成分合成加速度値とは、地震計で観測された地動加速度に、地震動の鉄道構造物への影響を考慮したフィルタ処理(JR用フィルタ、図3)を行い、その水平動2成分をベクトル合成することで得られる値です。このJR用フィルタに対応した漸化式が提案されているため、JR用水平動2成分合成加速度はリアルタイムに計算することが可能です。JR用水平動2成分合成加速度を用いた運転規制判断手法は、B-Δ法・M-Δ法による運転規制判断手法とともに、新幹線の早期地震防災システムに導入されています。

リアルタイムに計算することが可能な地震動指標としては、他にSI値(スペクトル強度)などがあります。SI値は地震動によって一般的な構造物がどの程度揺れるかを数値化したもので、被害との相関が比較的高いと考えられています。また、広く一般に知られた地震動指標として震度があります。震度については、気象庁で算出方法が定められ

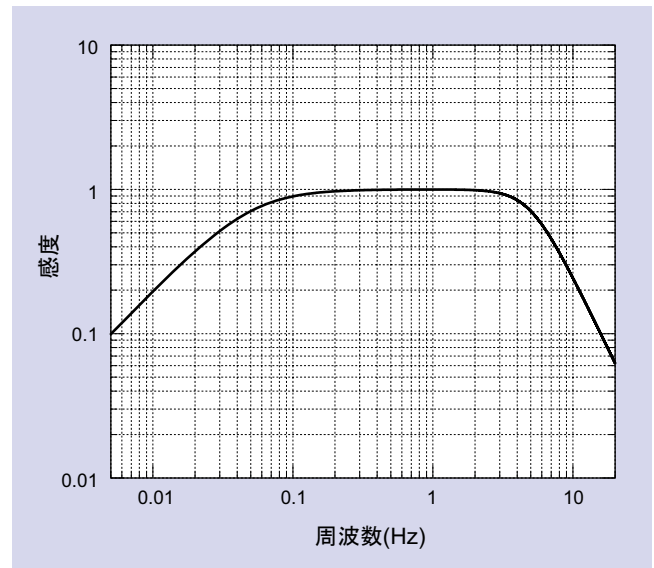


図3 JR用フィルタ

ています(この算出方法に基づき求められた値は計測震度と呼びます)。計測震度はリアルタイムに計算することができませんが、計測震度に相当する値をリアルタイムで算出する手法<sup>3)</sup>なども提案されています。

地震動指標値を用いた判断手法では、地震計(鉄道沿線)にある程度大きな揺れが来てからでなければ運転規制の判断を行うことができません。そのため、一般に推定地震諸元情報による判断手法を用いた方が、より早く運転規制判断を行うことができる場合が多いと考えられます。しかし、鉄道沿線に近い場所で大きな地震が発生した時には、P波が到達した直後に大きな地震動が到達することがあるため、地震動指標値による手法を用いた方が早く運転制御判断を行える場合もあります。

### 新たな運転規制判断手法の検討

次に、新たに検討を行った運転規制判断手法について紹介します。鉄道沿線の直下で発生した地震に対してより早く運転規制の判断を行うことを目指して、地震動指標値を用いた判断手法について検討しています。

一般的に、地震波初動部分では上下動成分が卓越し、特に震央に近い場所では、大きな上下動が観測されます。そこで、地震動の上下動成分に注目した指標値について検討を行っています。地震動の上下動成分に注目した運転規制判断の手法には、単独観測点での早期震度予測手法<sup>4)</sup>などがありますが、ここでは、前節で紹介したJR用フィルタを地動加速度の上下動成分に適用し、その値がしきい値を超えた場合に運転規制判断を行うこととしました。以下で

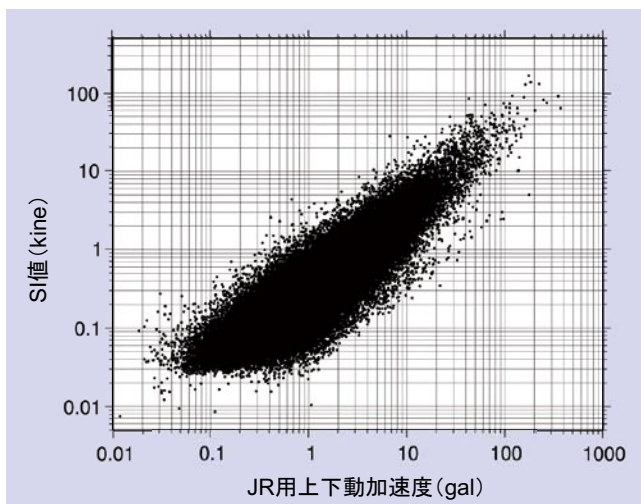


図4 JR用上下動加速度とSI値の関係

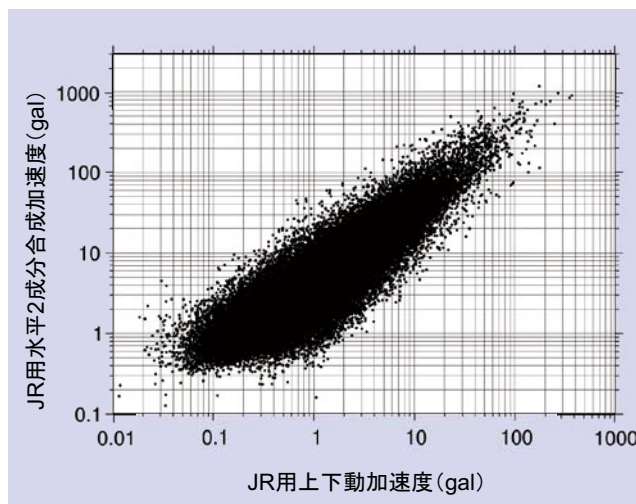


図6 JR用上下動加速度とJR用水平2成分合成加速度の関係

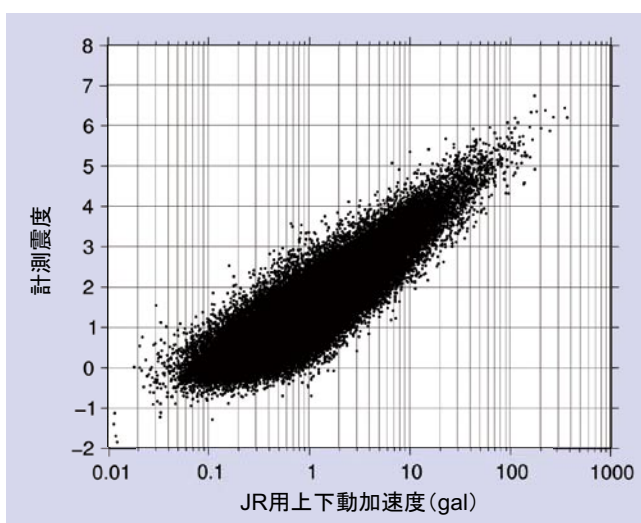


図5 JR用上下動加速度と計測震度の関係

は、この値をJR用上下動加速度と呼びます。

図4～6に、JR用上下動加速度値とSI値、計測震度、JR用水平動2成分合成加速度値との関係を示します。なお、計算には(独)防災科学技術研究所の強震ネット(K-NET)観測点で得られた地震波形(約13万データ)を用いています。図4～6より、ばらつきはあるものの、それぞれの間には正の相関があることが分かります。

次に、運転規制判断に用いるしきい値の設定を行うために、従来の手法に対する運転規制判断の誤差について検討を行います。しきい値を小さく設定すれば、運転規制の判断を早く行うことができます。しかし、しきい値を小さく設定し過ぎてしまうと、本来運転規制を行う必要のない、鉄道に被害が出ないような小さな揺れに対して不要な規制を行ってしまう可能性が大きくなります(以下、これを『空振り』と呼びます)。逆に、しきい値を適切な値よりも大きく設定してしまうと、運転規制を行うべき大きな揺れに

対して、規制を行わない可能性があります(以下、これを『見逃し』と呼びます)。運転規制の見逃しは安全性の面から、空振りによる不要な運転規制はお客さまの利便性の面から、その割合を少なくすることが求められます。今回は、JR用上下動加速度がしきい値を超過した一方で、JR用水平動2成分合成加速度値が40gal(1gal = 1cm/sec<sup>2</sup>)を超過しなかった場合を運転規制の空振りとし、JR用水平動2成分合成加速度値が120galを超過したにもかかわらずJR用上下動加速度がしきい値を超過しなかった場合を運転規制の見逃しとします。ここで、JR用水平動2成分合成加速度値120galとは、一般的に鉄道構造物に被害が出る下限値とされている計測震度4.5に相当するものとして、鉄道総研が提案している換算式を用いて求められた値です。

運転規制の空振りと見逃しの検討を行うためのしきい値を、10gal、15gal、20gal、25gal、30galとして、図6からそれぞれの場合の空振りと見逃しの割合を求めました。結果を表1に示します。表1には、比較のために、SI値とJR用3成分合成加速度値(JR用フィルタによる処理を施した地動加速度の上下動成分および水平動2成分をベクトル合成した値)についての空振りと見逃しの割合も示します。SI値のしきい値は3.0kine(1kine = 1cm/sec)、3.5kine、JR用3成分合成加速度のしきい値は40galとしています。

表1に示すように、しきい値を小さくすると運転規制の空振りの割合が増え、しきい値を大きくすると見逃しの割合が増えます。しきい値を設定する際には、空振りと見逃しの割合が双方なるべく小さくなるように適正な値を考える必要があります。

次に、JR用上下動加速度について、運転規制の判断を行うまでの早さについての検討を行いました。観測点の直近で発生した比較的大きな地震を対象とするために、震央

表1 運転規制の空振りで見逃しの割合

	JR用上下動加速度					SI値		JR用3成分 加速度
	10gal	15gal	20gal	25gal	30gal	3kine	3.5kine	40gal
空振りの割合 (40gal) N=3419	37.8%	7.0%	1.6%	0.7%	0.4%	32.5%	19.9%	1.1%
見逃しの割合 (120gal超過) N=616	1.0%	3.7%	14.0%	21.9%	32.3%	0.0%	0.0%	0.0%

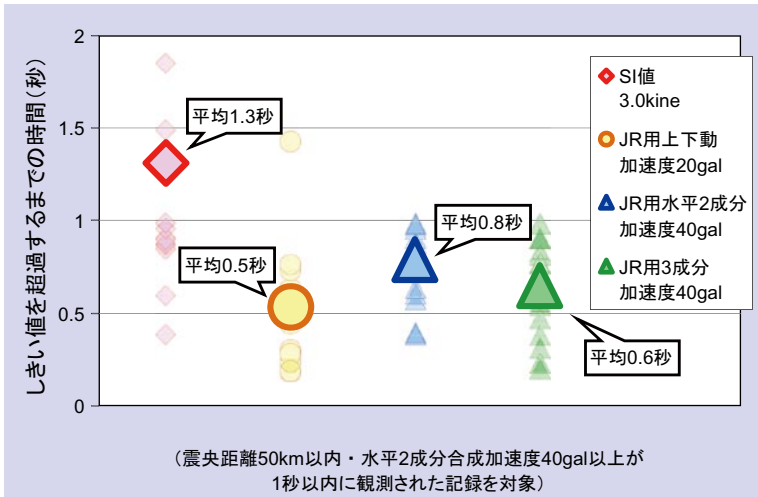


図7 各地震動指標値がしきい値を超過するまでの時間

距離が50km以内で、かつ、地震波が到達してから1秒以内にJR用水平動2成分合成加速度が40galを超過するデータについて、JR用上下動加速度がしきい値を超過するまでの時間を求めました。しきい値は20galとしています。図7に、各データでのしきい値を超過するまでの時間と、その平均値(図中の大きいシンボル)を示します。比較のため、SI値(しきい値3.0kine)、JR用水平2成分合成加速度(しきい値40gal)、JR用3成分合成加速度(しきい値40gal)のしきい値超過までの時間とその平均値も併せて図7に示しています。図7より、しきい値を超過するまでの平均の時間は、JR用上下動加速度が最も早く、現在運転規制判断に用いられているJR用水平2成分合成加速度に比べても、平均値で0.3秒程度早くしきい値を超過することが分かります。ただし、個々のデータを見ると、JR用上下動加速度よりも他の地震動指標値の方が早くしきい値を超過する場合があります。また、表1より、JR用上下動加速度のしきい値を20galとした場合の運転規制の見逃しの割合は14.0%と比較的高いことが分かります。しきい値を小さくすれば、より早くJR用上下動加速度の値がしきい値を超過するようになり、さらに運転規制の見逃しの割合も減りますが、同時に空振りの割合も増加するという問題があります。より早く、かつ確実に運転規制を行うためには、JR用水平動2成分合成加速度による従来の運

転規制判断手法と、JR用上下動加速度による新しい判断手法とを組み合わせる用いることが有効です。どちらか一方の値がしきい値を超えた場合に運転規制を行うことにすれば、一つの手法を用いた時よりも早く運転規制の判断を行えるようになることが期待され、同時に、運転規制の見逃しもなくなります。

### まとめ

鉄道の直近で発生した地震に対して安全性を向上させることを目指して、より迅速に列車の運転規制を行うための判断手法についての検討を行いました。その結果、地震動の上下動成分に注目した指標値を用いることで、より迅速な

運転規制の判断を行えることが分かりました。さらに、従来から用いられているJR用水平動2成分合成加速度のしきい値超過による判断手法と、新しい上下動成分指標値による判断手法とを組み合わせることで、より早くかつ確実に運転制御の判断を行えるようになることが期待されます。ただし、新しい指標値を実際の運転規制判断に用いる場合には、運転規制の空振りや見逃しなどを考慮に入れたしきい値の設定を行うことに加えて、列車振動など地震以外のノイズによる影響についても考慮する必要があります。

### 謝辞

本検討を行うにあたり、防災科学技術研究所のK-NETの強震動記録を使用しました。ここに記して感謝します。

### RRR

### 文献

- 1) 東田進也, 小高俊一, 芦谷公稔: 早期検知における新しい地震諸元推定方法, 鉄道総研報告, Vol.16, No.8, pp.1-6, 2002
- 2) 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, 日本地震学会秋季大会講演予稿集, Vol.19, No.10, pp.11-16, 2005
- 3) 功刀卓, 青井真, 中村洋光, 藤原広行, 森川信之: 震度のリアルタイム演算法, 地震2, 60, pp.243-252, 2008
- 4) 他谷周一, 中嶋繁, 下野五月: 単独観測点での早期震度予測手法, 日本地震学会秋季大会講演予稿集, pp.310, 2008