

鉄道における地震時の運転規制と早期警報技術の変遷

Development of Earthquake Early Warning System and train operation controls after earthquake

四宮 卓夫^{*1}

Takuo SHINOMIYA

Director (Disaster Prevention Unit), Research and Development Center of JR EAST Group



Abstract

Various research studies have been conducted in Japan, a country prone to earthquakes. However, predicting the exact location and timing of earthquakes remains challenging. Therefore, to prevent disasters, we implement both tangible measures, such as seismic reinforcement of railway structures, and intangible measures, such as train operation controls. One essential intangible measure is the Earthquake Early Warning System, which detects earthquakes immediately and stops trains accordingly. Another function involves operation control, which ensures that trains do not run in damaged areas once operations resume. It is important to identify and to inspect areas where damage may occur. These two functions are constructing the intangible measures of trains. In this paper, we will provide a historical overview of how we have dealt with earthquakes in Japan. In addition, we will explain the Earthquake Early Warning System, the operation controls after earthquakes, and the technological prospects.

●**Keywords:** Earthquake Early Warning System, Train operation control, Seismic observation, Intangible measures

^{*1}JR東日本研究開発センター 防災研究所 所長

1. 緒言

地震の発生が多い日本では様々な地震研究が進められている。しかし、地震がいつ、どこで発生するかを正確に予測することは困難である。そのため、地震に対して列車運行の安全を守るために、線路の耐震性を向上させる耐震補強（ハード対策）と、地震の発生に対して列車の運行を制限する運転規制（ソフト対策）を実施している。ソフト対策では、地震の発生を可能な限り早く検知し、走行している列車を停止させることが重要である。その後、列車の運行を再開する際には、損傷した線路に列車を入れないことが重要であり、被害発生のおそれのある区間を把握して点検等を実施する必要がある。前者は地震の早期警報として、後者は地震時の運転規制として、取扱いを構築している。本稿では、鉄道における地震時の取扱いの変遷と今後の展望について述べる。

2. 地震による鉄道被害

日本の鉄道は、新橋・横浜間の開業以降、数多くの被害地震に見舞われてきた。鉄道開業の1872年から国鉄が民営化した1987年までに発生した主な被害地震を表1に示す¹⁾。およそ10年弱に1回程度、大きな被害地震が発生している。海域のプレート境界付近で発生する大きな地震に加え、内陸部の直下型地震でも甚大な被害が発生している。また、チリ地震津波など、地球の反対側で発生した地震の津波が日本沿岸の各地域に大きな被害をもたらした場合もあった。

関東大震災は、明治以降に発生した人的被害が最大の地震であり、2023年9月1日で発生から100年となる。震源は神奈川県

西部と想定されており、東海道線や御殿場線など南関東の広い範囲で鉄道設備に被害が発生した(表2)。大きな被害として、東海道線根府川・真鶴間白糸川橋りょうが山津波で押し流され、根府川駅でも地すべりに停車中の列車が巻き込まれて海まで押し流される甚大な被害が発生している²⁾。

表1 主な被害地震・津波¹⁾ (1872年～1987年)

| 発生年月日 | M(*1) | 地震名 | 死者・行方不明者(*2) | 津波 |
|---------------|-------|---------|--------------|----|
| 1872年 3月 14日 | 7.1 | 浜田地震 | 死者 555 | ○ |
| 1891年 10月 28日 | 8.0 | 濃尾地震 | 死者 7,273 | |
| 1894年 10月 22日 | 7.0 | 庄内地震 | 死者 726 | |
| 1896年 6月 15日 | 8.2 | 明治三陸地震 | 死者 21,959 | ○ |
| 1896年 8月 31日 | 7.2 | 陸羽地震 | 死者 209 | |
| 1923年 9月 1日 | 7.9 | 関東大震災 | 死・不明 10万5千余 | ○ |
| 1925年 5月 23日 | 6.8 | 北但馬地震 | 死者 428 | |
| 1927年 3月 7日 | 7.3 | 北丹後地震 | 死者 2,912 | ○ |
| 1930年 11月 26日 | 7.3 | 北伊豆地震 | 死者 272 | |
| 1933年 3月 3日 | 8.1 | 昭和三陸地震 | 死・不明 3,064 | ○ |
| 1943年 9月 10日 | 7.2 | 鳥取地震 | 死者 1,083 | |
| 1944年 12月 7日 | 7.9 | 東南海地震 | 死・不明 1,183 | ○ |
| 1945年 1月 13日 | 6.8 | 三河地震 | 死者 1,961 | ○ |
| 1946年 12月 21日 | 8.0 | 南海地震 | 死・不明 1,443 | ○ |
| 1948年 6月 28日 | 7.1 | 福井地震 | 死者 3,769 | |
| 1960年 5月 23日 | 9.5 | チリ地震津波 | 死・不明 142 | ○ |
| 1983年 5月 26日 | 7.7 | 日本海中部地震 | 死者 104 | ○ |

表2 関東大震災での国有鉄道被害状況²⁾

| 構造物 | 被害概況 |
|------|--|
| 切土 | 被害面積 約20万㎡(約6万3千坪) 東海道線白糸川で泥流(山津波) (写真1) |
| 盛土 | 被害甚大箇所 東海道線国府津小田原間(写真2) 御殿場線国府津松田間 |
| 橋りょう | 損傷 橋台約340基、橋脚約280本、函渠約100箇所 主な被災箇所:東海道線馬入川B、酒匂川B等 |
| トンネル | 損傷 82トンネル のべ延長約2,400m(7,885尺) |
| 軌道 | 被害延長 約300km(約179里) |

2) 国有鉄道震災史、鉄道省(1927)より

1) 気象庁「過去の地震津波災害」(<https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/higai/higai-1995.html>)を加工して作成

※1 地震の規模(マグニチュード)、ただしチリ地震津波はモーメントマグニチュード

※2 被害数は、日本被害地震総覧による。関東大震災は理科年表による



写真1 東海道線根府川・真鶴間 山津波



写真2 東海道線小田原駅構内

3. 鉄道における地震時の取扱いの変遷

3・1 国鉄民営化まで(～1987年)

日本の地震観測は、1872年に政府が招へいたフルベッキらによって始められ、1873年には函館測候所にて気象官署として最初の地震観測を開始した。1884年には震度階級が制定され、当時は観測者の体感や被害の状況から震度が記録されていた。その後、震度階級は何度か変遷を経て、現在の計測震度を用いた10段階に至っている。

鉄道においては、古い時代の地震時の取扱いは不明確であるが、気象庁の震度階級が制定されて以降、震度に基づいた運転規制が始まったと考えられる。在来線では、駅長や保線区長が職員の体感や気象台の情報により震度を確認して運転規制を実施していた。1964年の新潟地震では、地震発生時に多くの列車が運転中であったが、保線従事員や乗務員が体感により運転中の列車を停止させたことで列車の脱線が発生しなかった。この経験を機に地震時の運転規制の重要性が認識され、その後の地震計の整備や運転規制の取扱いの制定が進められることとなった³⁾。特に、CTC化等によって無人駅が続く場合が生じるようになると、

駅長の代わりに地震動の大きさを確認する手段が必要となり、1970年代から、地震指示警報器が在来線の各線に設置されるようになった。これは、加速度を検知する簡易地震計を運転取扱い駅に設置し、20、40、80ガルの3段階の加速度レベルを色灯で区分し、かつ警報音を発する警報器を地震計設置駅の事務室に置いて、点灯した色に応じて運転規制を発令するものである⁷⁾。

高速走行する新幹線では地震の観測体制の整備は早く、1964年の東海道新幹線開業時点から簡易地震計や制御用感震器などを沿線に配置してきた。1965年には変電所の地震計で40ガル以上の地震を検知した場合に列車への電力送電を止め、列車を自動に停止させる仕組みを構築、列車を停止させた後に観測されたガル値と気象庁の震度階級を組み合わせることで運転再開の判定を行っていた。その後、80ガル用の制御用感震器を増備し、2段階の基準値による運転規制とした。40ガル以上の地震で自動的に停止し、80ガル未満であれば、設備係員による添乗巡回で運転再開し、80ガル以上の場合、地上巡回で安全確認した後、添乗巡回により運転再開、段階的に速度を向上させる仕組みとした⁴⁾。

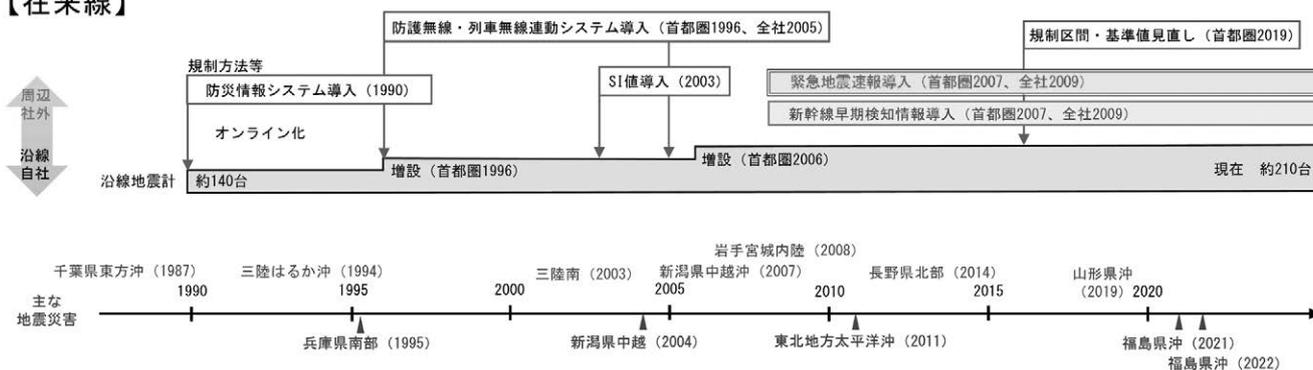
東北新幹線の開業にあたっては、沿線が世界有数の地震発生エリアである日本海溝に近いこと、また1978年に発生した宮城県沖地震 (M7.4) で建設途中の設備等に被害が生じたことなどから、従来の線路沿線での地震検知に加え、線路から離れた太平洋側の海岸付近にも地震計を配置することとした。これは、大きな地震の発生が想定される震源域に近い海岸地震計において、沿線に地震動が到達する前に地震を検知し、少しでも早く列車を止めるための仕組みである⁷⁾。また、1983年には、気象庁発表の震度情報を迅速かつ正確に入手可能な気象情報通報システム (MICOS) を活用するようになった。

3・2 JR発足以降 (1987年～)

JR東日本における地震の観測体制および規制方法の変遷を図1に示す。上段に在来線、下段に新幹線を示す。図中の二重線の項目は社外の地震情報の活用状況である。

在来線では、1990年に防災情報システムを導入、沿線の地震計の観測値をはじめ雨量や風速など各種の観測値をオンラインで入手可能なシステムを構築した。その後、1995年の兵庫県南部地震を契機に、乗務員にいち早く地震発生を知らせるため、250ガルを超える地震を観測した場合に防護無線や列車無線を自動で動作させるシステムを導入した。また、地震動を示す指標として加速度 (単位:ガル) を用いていたが、2003年から地震被害とより相関が高いSI値 (Spectrum Intensity、単位:カイン) を指標に導入、地震に対する安全性を確保しつつ運転規制の発令回数の低減を図った⁶⁾。その後、首都圏を対象に地震計の増設をおこない、直下型地震に対するきめ細かな補足、地震計の受け持ち区間の細分化による点検区間の絞り込みで運転再開までの時間の短縮を図るなどしている。

【在来線】



【新幹線】

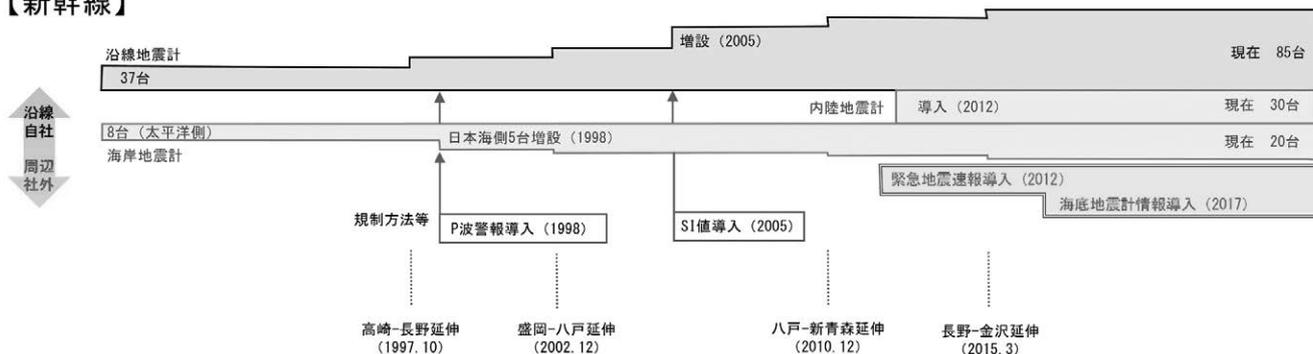


図1 地震の観測体制等の変遷 (JR発足以降)

新幹線では、国鉄時代から沿線地震計と太平洋側に配置した海岸地震計による地震観測体制を整備していたが、さらに日本海で発生する地震に対応するため日本海側の沿岸にも海岸地震計を増設し、また、公益財団法人鉄道総合技術研究所（以下、鉄道総研）にて国鉄時代から引き続き研究開発が行われてきたP波警報を導入した。これは、地震動の伝搬速度が早いP波成分から後続のS波の地震動を推定することで、より早く列車を止める警報を出力する方法である⁹⁾。その後、内陸部で発生が想定される直下型地震に対して、より早く警報を出力するため陸域に内陸地震計を増設するとともに、気象庁の緊急地震速報など社外情報も活用して地震情報の多重化を進めている。

2007年からは、在来線においても、早期警報として新幹線の早期地震検知や気象庁による緊急地震速報が活用されている。

4. 現在の早期地震検知および運転規制の概要

4・1 新幹線早期地震検知システム

高速で走行する新幹線では、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。そこで、新幹線早期地震検知システムでは、沿線に一定の地震動の可能性がある場合に変電所からの送電を自動で止めることで、走行中の列車が停電を検知し緊急ブレーキが動作し停止させる仕組みとなっている（図2）。地震動の可能性のある区間の判定には、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など高度化をすすめるとともに、活用する地震情報も鉄道の沿線地震計や海岸および内陸地震計、社外の地震情報など多くを活用する重層的なシステム設計となっている。2017年11月より国立研究開発法人防災科学技術研究所（以下、NIED）が整備した日本海溝海底地震津波観測網（以下、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（図3）。これは、海底地震計で観測した値が制御基準値を超過すると、海底地震計ごとにあらかじめ設定した沿線で一定の地震動が想定される範囲に対して警報を出力するものであり、海域で発生する地震に対して従前より警報出力の早期化が期待できる⁹⁾。なお、海底地震計情報の活用に関する近年のJR東日本の取り組みについては、本号の「海底地震計の制御基準値に用いる地盤増幅率の精緻化」をご覧ください。

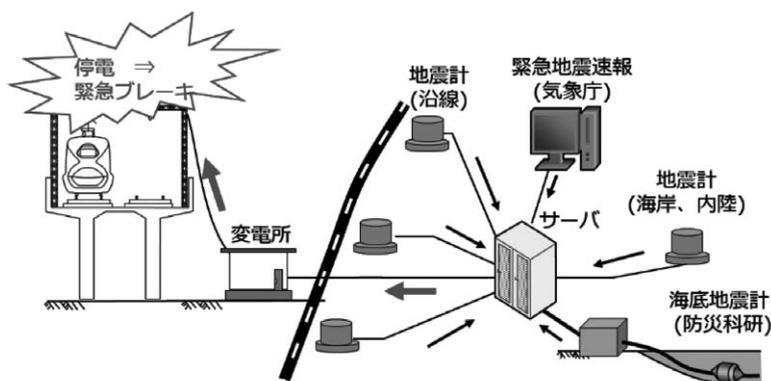


図2 新幹線早期地震検知システムの概要

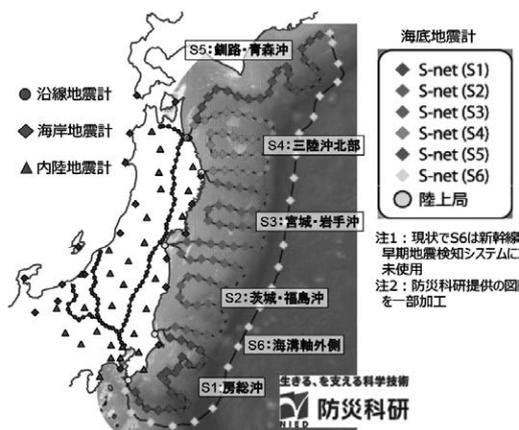


図3 JR地震計とS-net (NIED提供の図を一部加工)

4・2 地震時の運転規制の方法

地震が発生した際、線路に被害のおそれがある区間に対して列車を入れないことが重要である。そこで、地震発生後、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。地震が発生した時に、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(図4)。運転規制の基準値は、適用された設計基準、斜面の被害想定など、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。

また、在来線における運転規制の基準値は、地震計の設置間隔が40kmの場合を想定して設定されていた。これまでJR東日本では、首都圏を中心に地震計を順次増設してきたが、地震計が密に設置された区間であっても規制基準値は40km間隔の場合と同じであった。そこで、特に地震計の設置間隔が10km以内など密に設置されている区間については、従来の地震計間隔の場合の運転規制基準値と地震動の捕捉が同等になるように運転規制基準値を設定し、さらに沿線の地盤特性を考慮した上で受持ち範囲を見直すことで、より合理的な運転規制を実施している(図5)。

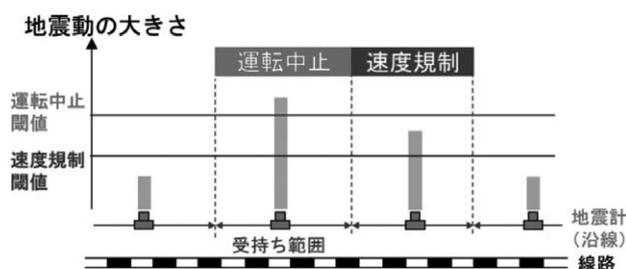


図4 沿線地震計による運転規制(イメージ)

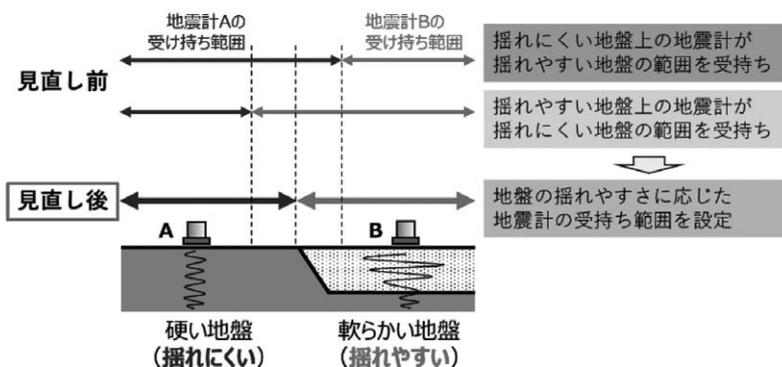


図5 地盤特性を考慮した地震計の受持ち範囲の見直し

5. 今後の技術展望について

地震に対する早期警報や運転規制については、地震の観測事例の蓄積にもとづいて、震源からの距離に応じた地震動の減衰、地盤による影響など、知見を蓄積していくとともに、鉄道総研をはじめ社外の最新の技術動向を把握することが重要である。特に、早期地震検知の技術は、鉄道総研を中心に早期化や推定精度の向上に関して、新たな知見が提案されている。最近の事例では、鉄道総研よりP波推定における地震の規模推定のパラメータを最適化することで精度を向上させる方法が提案されており、JR東日本の地震計で観測された地震記録を用いて早期化と輸送影響を検証し、実装に向けた評価をおこなっている。

一方で、地震時の運転規制基準値は過去の地震での鉄道被害などから設定しており、これまで規制方法や規制基準値の評価や改良などを行ってきた。これら評価には鉄道の地震計で蓄積したデータに加え、様々な社外機関の地震情報も活用している。近年では、さまざまな地震情報がリアルタイムに活用が可能な状況となっている。現在、社外情報を活用した線路沿線の地震動のきめ細かい把握とその活用について研究開発を進めている。また、SIP4Dなど産官学の様々な機関による組織を超えた防災情報の共有なども進められており、鉄道が社外地震情報を利用することに加え、鉄道事業者が観測した地震情報も相互に活用することで社会で広く利用されるなど、相互連携に関する研究開発の重要性がますます高まってくると考えている。

6. 結言

鉄道はこれまで様々な地震被害を受けており、早期警報技術や地震時の運転規制方法の整備、あるいは地震の監視体制の強化などに取り組んできた。地震の多い日本では、今後も一定の頻度で大規模な地震に見舞われることが確実といわれており、地震時の安全性を高める各種技術の研究開発や、その実装を進めることが求められる。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努めていきたい。

参考文献

- 1) 気象庁「過去の地震津波災害」(<https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/higai/higai-1995.html>、参照日 2023.5.31)
- 2) 国有鉄道震災誌、鉄道省(1927)、pp.292-296.
- 3) 矢崎庄作、地震と運転規制、鉄道線路、Vol.12,No.12(1964)
- 4) 若木宣成、大南正克、倉部憲雄、東海道新幹線の地震動早期検知システムの導入とその概要、日本鉄道施設協会誌、1990,No.6(1990)
- 5) 柴又治吉、土屋尚登、新幹線早期地震検知システムの導入、JREA、Vol.42,No.2(1999)
- 6) 鈴木博人、島村誠、地震時運転規制方法の研究、JR-EAST Technical Review、No3(2003)
- 7) 島村誠、自然災害に対する列車運行安全基準の成立と改良、土木学会、安全問題研究論文集、Vol.4(2009)
- 8) 鈴木博人、宮腰寛之、山本俊六、是永将宏、鈴木亘、青井真、新幹線における海底地震計を利用した早期地震検知とその効果、自然災害科学、Vo.40.No.8特別号(2021)