

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

地震時に新幹線を早く止める —早期地震防災システムの開発—

地震の発生頻度の高い日本において、鉄道は耐震設計、耐震補強などさまざまな地震対策をとっています。特に新幹線は高速で走行するために、より高い安全性が求められてきました。ここでは、鉄道における地震時の減災を目的に、地震波を検知して速やかに列車を制御する新幹線の早期地震防災システムに焦点を絞り、その変遷と現行の地震防災システムの概要を説明するとともに、システムの開発に関わる技術的ポイントや課題克服の過程を紹介したいと思います。

早期地震防災システムの変遷

地震発生時に地震波を速やかに検知し、鉄道への影響が危惧される際に、早期に列車を制御することができれば、鉄道の地震被害低減に大きく寄与すると考えられます。特に高速で走行する新幹線では、その減災効果は高いと考えられます。このような背景のもと、新幹線では開業直後より、沿線で大きな揺れを検知して自動で運転制御を行う地震防災システムが導入され、その後、大きな揺れの到達前に新幹線を停止させる“早期”地震防災システムが導入・運用されてきました¹⁾(図1)。

新幹線の最初の地震防災システムは、1965年に東海道新幹線に導入されました。このシステムは、地震計を沿線

に約20km間隔で設置し、大きな揺れを検知した際に列車を自動停止するものです。地震時に人の手を介さず自動的に列車を制御するという観点から、画期的なシステムであったと考えることができます。その後1982年、東北新幹線が盛岡まで開通するタイミングで、海岸線検知システムが導入されました。このシステムは、海溝型の大地震から新幹線を守るために、関東から東北地方の海岸線に100km弱の間隔で地震計を設置し、これらが大きな揺れを検知した際に、列車を自動停止するものです。沿線に大きな揺れが到達する前に警報を出力するため、最初の早期地震警報システムと位置付けることができます。



佐藤 新二
Shinji Sato
事業推進部
地震防災システム課長
【専門分野】地震工学



山本 俊六
Shunroku Yamamoto
鉄道地震工学研究センター
地震解析研究室室長
【専門分野】地震工学



芦谷 公稔
Kimitoshi Ashiya
総務部
部長
【専門分野】地震工学

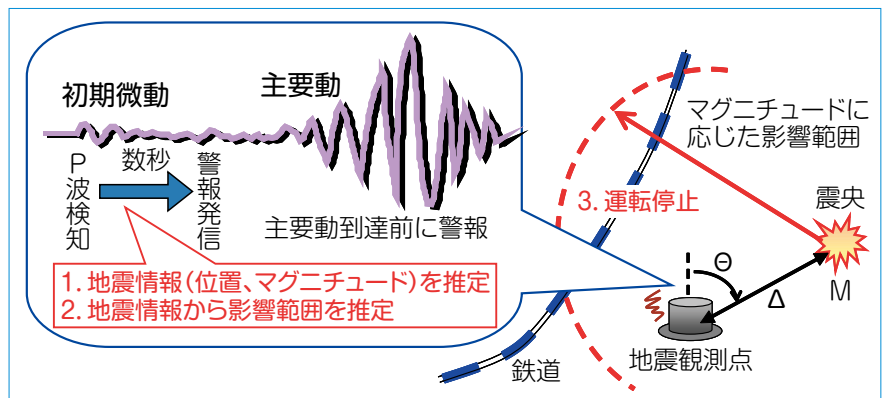


図1 早期地震防災システムの概念⁶⁾

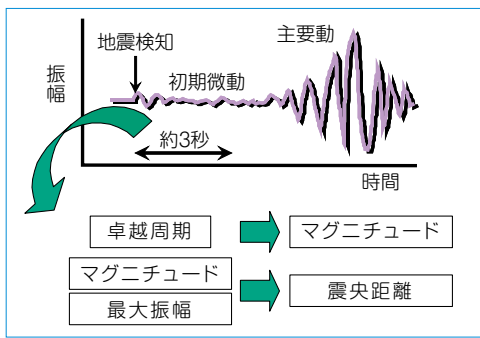


図2 ユレダスにおける地震情報の推定方法⁶⁾

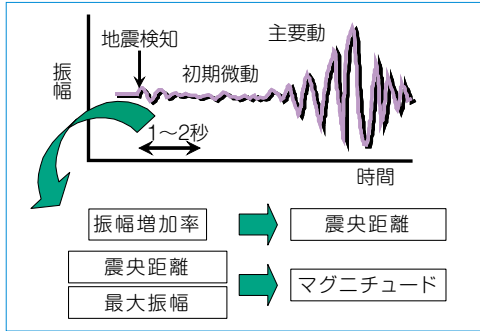


図4 新しい地震計における地震情報の推定方法⁶⁾

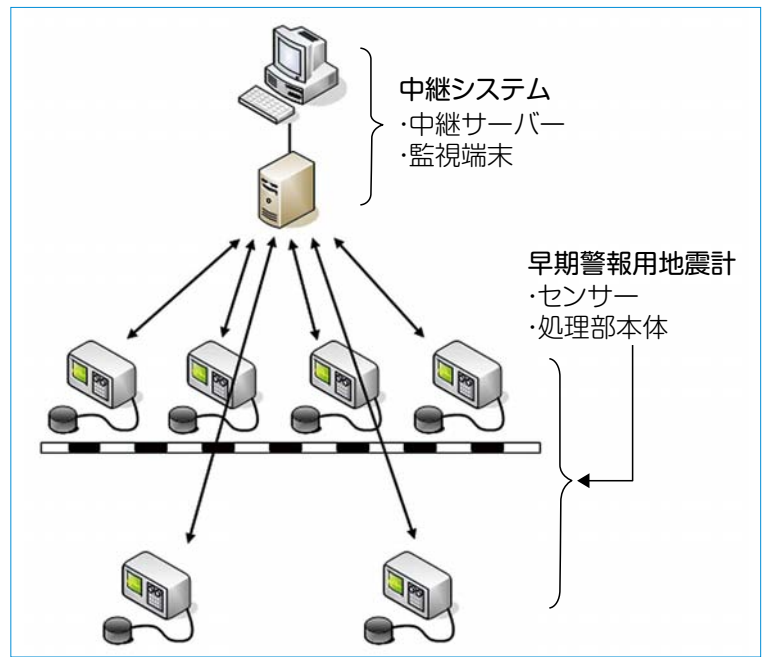


図3 現行の早期地震防災システムの構成

さらに1980年代から、より早いタイミングで警報を出力するための研究が進み、1992年、微弱な初期微動であるP波を利用した警報システム、ユレダスが東海道新幹線に導入されました。ユレダスは、1観測点のP波データを分析して早期地震警報を出力する世界初の実用システムです。具体的には、P波部分3秒のデータを用いてマグニチュードと震央を求め、M-Δ図と呼ばれる鉄道の地震被害を推定する経験式を用いて警報出力の判断をします。P波を用いることで、従来のシステムに比べて警報の余裕時間を増大させることが可能となりました(図2)。また1998年には、沿線近傍で発生した地震に対応するためのコンパクトユレダスが開発され、以降、東北新幹線、上越新幹線、長野新幹線に導入され、2004年に発生した新潟県中越地震の際には速やかに動作したことが報告されています²⁾。

一方、1990年代半ばより、リアルタイム地震学が発展し、同時に日本では高密度な地震観測網が整備され、地震に対してさまざまな知見やデータが

得られるようになってきました。これらを反映させ、ユレダスをさらに高度化したものが現行の早期地震防災システム(以下、現行システム)です^{3),4)}。

現行システムは、単独で警報判定を行う早期警報用地震計と、各地震計の情報を中継、監視する中継システムから構成されています(図3)。一般的に地震計は、センサーと処理部本体から構成されます。早期警報用地震計は現行システムの前身であるユレダスと同様に、処理部がS波警報とP波警報の機能を持っています。S波警報は、新幹線開業当初の地震防災システムや海岸線検知システムの流れを汲むもので、地震計が大きな揺れを検知して、あらかじめ定められた区間の新幹線を止めます。P波警報は、P波を利用して早期に新幹線を止めます。地震諸元(マグニチュード、震央位置)を推定するアルゴリズムはユレダスとは異なるものが開発され、最短1~2秒で警報を出力できるようになりました(図4)。さらに、ネットワークを介してほかの地震計の推定データを受けて、制御を行う機能も追加されました。2004年よ

り九州新幹線に導入され、現在、すべての新幹線に現行システムが導入されています。2011年の東北地方太平洋沖地震の際も、現行システムが有効に機能したことが報告されています⁵⁾。以下、現行システムの開発の過程を紹介します。

早期警報用地震計の開発

2000年頃より、早期警報用地震計で用いるアルゴリズムの開発が始まりました。ユレダスからの最大の改良ポイントは、震央距離とマグニチュードを推定する順序とその手法が変わったことです。ユレダスでは、まず地震波の卓越周期よりマグニチュードを推定し、次に推定されたマグニチュードと地震波の振幅を用いて震央距離を求めます。これに対して、早期警報用地震計のアルゴリズムでは、初めに震央距離を推定し、次に推定された震央距離と振幅を用いてマグニチュードを求めます。この推定順序の変更は以下の理由によります。

大きな地震では、断層の破壊が時間とともに拡大します。マグニチュード



図5 早期警報用地震計(左：実証機，右：実用機)

は破壊領域の大きさに対応付けられる値であるため、このようなケースでは時間の経過とともにマグニチュードが徐々に増加することになります。大きな地震の際は、時間の経過に従い、マグニチュードを繰り返し推定することが適切と考えられます。そこで、安定した繰り返し計算ができるように、初めに震央距離を求め、この値に基づきマグニチュードを逐次推定できるようにしました。この方法により、マグニチュードの適切な評価が可能となりました。アルゴリズム開発に関わる裏話は文献6)に記述されています⁶⁾。

早期警報用地震計もユレダス同様に、1点の情報で警報判断をするため、誤報対策が重要になります。特に、地震でない振動に対して誤って警報を出力し、列車を停止させないように、地震と地震以外のさまざまな振動(以下、ノイズ)を見分ける機能が大きな役割をはたしています。新しいアルゴリズムではこの機能の強化を行いました。このアルゴリズムを開発・検証するためには、地震波データのみならずノイズデータが必要になります。ただし、ノイズのデータは通常、不要なデータとして扱われ、一旦地震計に記録されても、その後多くは削除されてしまうため、まとまったデータセットがありませんでした。そこで、新幹線や在来線の地震計で記録されたデータを集め、整理し、データセットを作成

しました。整理されたノイズデータは2000波にも及びました。これらのデータは以降も繰り返し活用できるようにフォーマットや管理方法を決めました。早期警報用地震計は、これらの貴重なデータを活用することにより、ノイズ識別性能の向上を図っています。

開発された各種アルゴリズムは、実際の地震計の中で時間遅れなくリアルタイムで稼働しなければなりません。このため、開発したアルゴリズムを組み込んだ、地震計の実証機を製作し、動作の確認を行いました。ただし、実証機とはいえ、最終的には新幹線を対象としたシステムに使用されることが前提ですので、慎重に検討を行う必要があります。アルゴリズムの仕様上、地震検知およびP波推定をリアルタイムで演算する必要があります。ユレダスでは処理部に商用コンピューターを使用していましたが、早期警報用地震計ではさらに高速で演算処理が可能な専用処理装置を用いる必要がありました。しかし専用処理装置を使用した経験が無かったため、どのような仕様の処理部が必要なのか、当時不明であったため、早期警報用地震計と同じCPUで稼働するリアルタイムOS上で動作するプログラムを用いて実証試験を行いました。その結果、アルゴリズム仕様書で定められた時間以内で処理が可能であることを確認しました。この段階で処理部本体に必要な性能が明

らかにになり、これを受け、受注生産メーカーに早期警報用地震計の製作を依頼しました。

また、ユレダスでは、大地震のP波推定の精度向上のために速度計が必要とされ、加速度計、速度計のセットで地震観測が行われていました。実証機では、ユレダスと同様に加速度計と速度計を用いていました(図5左)が、各種検討の結果、新しいアルゴリズムでは加速度計のみで精度が保証されることが確認できました。

実証機製作の経験を踏まえて、早期警報用地震計の最終的な構成が決定され、ようやく早期警報用地震計の実用機の開発が始まりました。早期警報用地震計は実証機と異なり、可用性、保守性を考慮して、他機関で使用実績のある地震計をベースに開発を行いました。ただし、地震計の改修を行うため、地震計動作が不安定にならないよう、細心の注意を払いメーカーと開発を行いました。

地震計改修の主な内容は、各種アルゴリズムを地震計処理部本体に実装するソフトウェア改修と、ハードウェア改修です。ハードウェア改修の具体的な内容は、加速度計と地震計処理部のデータ伝送方式を、アナログ方式からノイズ環境下でも安定的に伝送できるデジタル方式に変更した点があげられます。以上の経緯で、新幹線専用の地震計実用機が開発されました(図5右)。

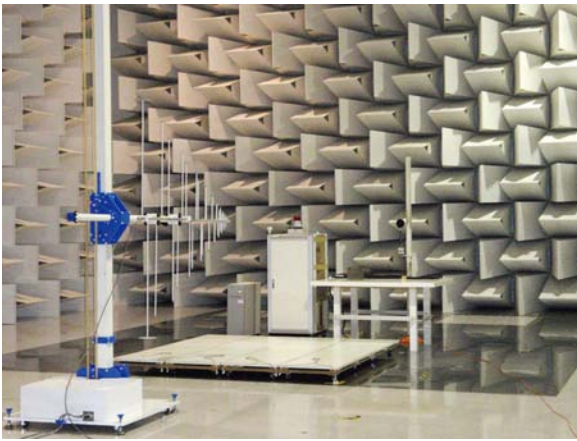


図6 地震計EMC試験

中継システムの進化

中継システムは地震計の情報の集約およびほかの地震計への中継配信を制御する中継サーバーと、地震および機器動作の監視を行う監視端末の2種類に大別されます。中継サーバーの機能は大きく分けて、地震計からの情報を集約し、ほかの地震計へ配信する情報配信機能と、地震計の動作記録を保存する情報記録機能、さらに地震計保守のための遠隔操作や、地震計記録データを回収するサービス機能に分類されます。当初中継システム全体を開発コストの低いWindowsベースで構築することを検討しました。しかし、鉄道事業者と検討した結果、セキュリティー・信頼性の観点から中継サーバーのみデータセンターなどで使用されている汎用OSで構築することにしました。

地震計・中継サーバー間の通信方式については、2004年の九州新幹線開業までの短い開発期間を考慮し、地震計メーカーで実績のある通信仕様を採用しました。P波推定情報を伝送するためには80バイトのデータサイズが必要ですが、この仕様は40バイトであったため、2回に分けて通信をする必要がありました。当時の九州新幹線は地震計の台数が少ない小規模なシステムのため、実用上問題はありませんでした。しかし、その後、大規模なシステムへの対応に備えて、2005年に鉄道総研、

地震計メーカー、中継システムメーカーによる検討の結果、鉄道専用の通信方法が必要との結論に至り、1回の通信で必要な情報を伝送することを基本とした通信仕様を鉄道総研が策定しました⁷⁾。また、震源に近い沿線地震計のP波推定情報をほ

かの沿線地震計が警報判断に活用できるように、新たな仕様の追加を行いました。この仕様をもとに地震計を製作することによって、複数の地震計メーカーが混在する地震防災システムの構築が可能となりました。

信頼性と性能向上に向けたその後の展開

地震計動作の障害となる電波雑音に対する耐性を向上することは、早期地震防災システム全体の信頼性を向上させるために重要な課題です。そこで2008年、当時の地震計の電波雑音に対する耐性を評価し、改良のポイントを明らかにするために国際規格に準拠したEMC試験を実施しました⁸⁾(図6)。そこで、関係メーカーと協力し、EMC試験をクリアした地震計を開発しました。この地震計は、これまで北陸新幹線(長野～金沢間)、北海道新幹線そして首都圏新都市鉄道に導入されており、今後、他路線においても導入が見込まれます。

また、上記と並行して、地震計元推定の精度と即時性の向上を目指したアルゴリズムの改良、開発も行われ⁹⁾、ハードウェア、ソフトウェア両面の性能向上を目指しています。

おわりに

現行システムの研究開発および実機製作にあたり、メーカー構成および多

くの仕様の変更を行いました。限られた時間の中で実行できたのは、ユレダスの経験が大きく貢献したと考えています。また、現行システムが新幹線に導入されて間もなく10年となります。その間に沿線地震計増設、新幹線延伸に伴う沿線・海岸地震計の増設、緊急地震速報の導入が実施されるなど、システムは着実に成長しています。

このシステムが長期にわたり維持され、安定稼働する背後には、日々システムの監視をし、メンテナンスをする関係者の努力が存在します。また、実運用を通じてのさまざまなフィードバックが機能向上の原動力となっています。これからも、皆様の期待に応えられるよう、早期地震防災システムの研究開発に取り組んでいきたいと考えます。RRR

文献

- 1) 中村豊：研究展望：総合地震防災システムの研究，土木学会論文集，No.531/I-34，pp.1-33，1996
- 2) 航空・鉄道事故調査委員会，鉄道事故調査報告書，2007/11，2007
- 3) 佐藤新二，他谷周一，芦谷公俊：新しい地震計元推定アルゴリズムを用いた警報用地震計の開発，鉄道総研報告，Vol.16，No.8，pp.13-16，2002
- 4) 岩橋寛臣，岩田直泰，佐藤新二，芦谷公稔：早期地震警報システムの実用化，鉄道総研報告，Vol.18，No.9，pp.23-28，2004
- 5) Yamamoto,S. and Tomori M. : Earthquake early warning system for railways and its performance, Journal of JSCE, Vol.1, pp.322-328, 2013
- 6) 山本俊六，佐藤新二：鉄道における早期地震警報システムの変遷，RRR，Vol.67，pp.16-19，2010
- 7) 佐藤新二：地震防災システムにおける新たな情報通信方法の提案，鉄道総研報告，Vol.21，No.1，pp.43-48，2007
- 8) 佐藤新二，川崎邦弘，竹内恵一，中村一城，野田俊太：国際規格適合のための新幹線用地震計製作仕様の策定，日本気球惑星科学連合2010年大会，2010
- 9) 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計元推定とノイズ識別の機能向上，鉄道総研報告，Vol.29，No.3，pp.5-10，2015