

早期地震防災システムの信頼性向上に向けた取り組み

佐藤 新二

防災技術研究部（地震防災 主任研究員）



さとう しんじ

はじめに

鉄道開業以来、日本列島の立地条件もあり、日本の鉄道は絶えず地震の脅威にさらされてきました。地震という現象は、特定の地域で発生するものに関しては、ある程度周期性があると言われてはいますが、そのようなものについてもいつどこで発生するか正確に予測する技術はありません。また地震発生から地震波が各地に到達するまでの時間は短く、揺れを感じた時に対応することも限られています。さらに大きな地震の場合、広い範囲にわたって強い揺れに見舞われますが、地盤の状態によって、揺れやすい地域、あるいは揺れにくい地域があるなど、地震発生後の揺れの正確な予測は容易ではないと言われています。

このような状況でも、地震が発生したときにできるだけ早く、地震発生を知らせて必要な措置を行うことは重要です。これを目指したのがユレダスを始めとした、新幹線の早期地震防災システムです。このシステムは世界に先駆けて1992年に実用化されました。

このシステムの大きな特徴として、電源や通信が途絶えた状況でも、地震監視、地震検知後の警報判定ができるように、地震計単体で処理を行っていることが挙げられます。地震を検知し、どの程度の規模の地震が、どこで発生したかを推定する技術（ソフトウェア）だけでなく、信頼性の高い地震計（ハードウェア）が実現することにより、地震発生時の列車の安全が実現されるといえます。ここでは、これまでの20年近くの実績と経験をもとに、地震計ハードウェアの機能向上による早期地震防災システムの信頼性向上に向けた取り組みを紹介します。

早期地震防災システムについて

最初に早期地震防災システムについて説明します。地震波にはP波（初期微動）、S波（主要動）と呼ばれる2種類の波があります。東海道新幹線開業当初はS波による警報判定のみ行っていました。このとき採用された地震計は、制

御用地震計と呼ばれています（図1上）。その後在来線で多く使われている表示用地震計が導入されました。この段階で、新幹線では表示用地震計と制御用地震計の2台の観測体制となりました。制御用地震計は倒立振り子を用いた構造のため、信頼性が高く表示用地震計のバックアップという機能を担っています。

1992年P波検知により、S波が到着する前に警報判定を行うユレダスが実用化されました。さらに2004年に新潟県中越地震での上越新幹線脱線事故を受け、より早い警報



図1 地震計システム
（上：制御用地震計，下：表示用地震計）

判定が望まれました。そこで沿線の地震計間で通信を使い、P波が到着していない箇所でも警報判定ができる新たな地震計が実用化されました(図1下)。P波は断層との位置関係によっては、振幅が十分でないことがあるため、新幹線の地震計でも在来線同様S波検知が基本機能です。しかしより早い警報判定を目指す今日において、P波検知機能を有する地震計は、新幹線には欠くことのできない防災設備となっており、P波検知機能の精度向上は、重要な課題の一つとなっています。

信頼性向上に向けた課題

早期地震防災システムは主に地震計とサーバから構成されます。地震計が何らかの理由で停止した場合、地震発生時の鉄道の安全性に非常に大きな影響を与えるため、地震計を停止させず、ノイズ振動の影響を受けにくくすることが信頼性向上に繋がると考えます。またP波という微小な波を警報判定に利用するため、地震計は周辺で発生する交通振動などの影響を受けることになります。このような中で、地震計および全体システムが安定して稼働するために支障となる要因を抽出し、必要に応じて検討を行う必要があります。これが信頼性向上に向けた課題と言えます。

地震計動作シミュレーション

地震計は常時毎秒100回、センサから加速度データを読み込んでリアルタイムで地震検知および警報判定などの処理を高速で実行します。この時、単独観測点処理でP波検知を行うため、震央位置やマグニチュードの推定誤差が生じる場合があります。そこで大きな地震が発生した際、地震計単体および地震計間の連携処理によって、新幹線が正しく停止したのか検証することは非常に重要です。また、ノイズによる誤動作の検証も不可欠です。これらを検証するためには、地震計の記録データが必要となります。そこでまず地震計に記録されたデータの整理法を考えました。地震計はある一定以上の揺れを検知した場合、波形データとして記録する仕組みとなっています。また観測点によっては、地震以外のデータ(ノイズ)も多く記録されます。このノイズは地震計周辺の交通振動などの人間活動の振動がほとんどであると考えています。地震と同じくノイズデータを整理保存することは、地震とノイズを区別するノイズ識別法改良のために重要となります。そこで、兵庫県南部地震をきっかけとして、地震とノイズの両データを体系的に整理保存する方法を考案しました。この手法で整

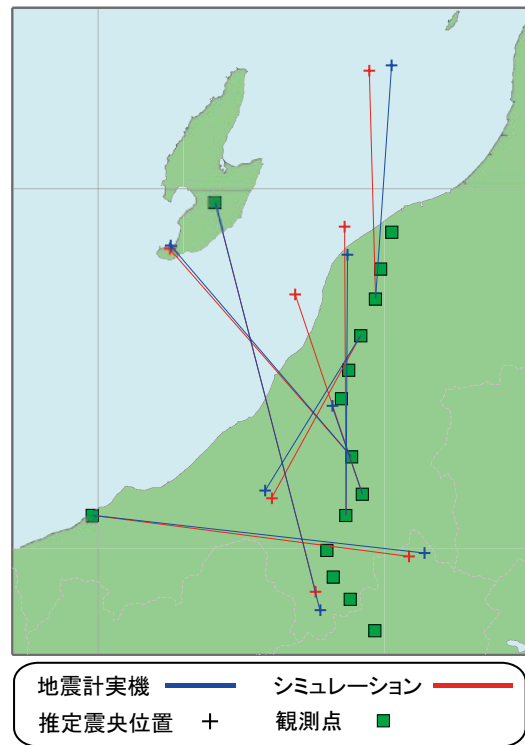


図2 P波推定シミュレーション結果

理されたデータを、JR地震フォーマットとしました。現在は単にJRフォーマットと呼んでいますが、地震とノイズデータを体系的に整理保存する方法は、JRフォーマットが初めてと考えています。

その後JRフォーマットを使って地震計動作を再現するシミュレーションシステムも併せて開発しました。このシステムは、P波およびS波を検知後何秒で警報判定したのかを100分の1秒刻みで判定することが可能です。図2は地震計の実機の推定結果とシミュレーション結果の比較を表しています。地震計実機の結果とシミュレーションの結果がややずれていますが、この理由は地震計実機では、連続観測された無限長のデータで演算しているのに対して、シミュレーションでは有限長のデータで演算しているためです。このシミュレーションシステムによって、個々の地震計の動作および早期地震防災システム全体の動作の検証を行っています。この検証により、通信の遅延も含めたシステム全体の信頼性の検証が可能となります。

通信仕様の標準化

ユレダスでは、1つのメーカーによって地震計を含めたシステム全体が製作されていました。現行の新システムはユレダスと比較して地震計の台数が2倍程度増加し、システム構成も複雑になりました。そこでシステム全体の製造時

の品質を向上し、信頼性を上げるために新たな取り組みを行う必要が生じました。地震発生時、地震計間で交換する情報を電文と言いますが、これまで電文は地震計メーカーが独自に定義し、システムを構築していました。このようなシステムでは、他社の地震計を組み込むことができないため、システム構築に制約が生じます。そこで、鉄道総研では、全ての新幹線のP波およびS波警報が扱える通信仕様を標準化し、2005年メーカーに公開しました。現行の新システムはこの通信仕様を踏まえて構築されていますが、地震計の増設および廃止に対して、ユレダスと比較して低コストで対応できるようになっています。また、同じシステムの中で複数のメーカーの地震計が混在した構成が可能となりました。現在整備中の北陸新幹線（長野～金沢間）、北海道新幹線（新青森～新函館間）においては、既存のシステムの大規模な改修を必要とせず、システム構築が可能となります。

異なる場所に設置されている機器どうしを、電文を使って通信するためには、処理の内容によって電文を複数定義し仕様書として整備することが一般的です。現行のシステムは、P波警報処理6種類、S波警報7種類、計13種類の警報処理をサポートしています。本通信仕様書では、たった1種類の電文で13種類の動作を行うことができます。これは、図3のように電文内のデータの並びによって、地震計がどのような処理を実行するかを定義しているためです。

通信仕様を標準化した最大の効果として、地震計メーカー間の競争の発生が挙げられます。複数のメーカーで競わせることは、将来的に優秀な技術をもつ新規地震計メーカーが参入しやすくなります。また複数のメーカーを競わせることは、結果的には高い信頼性を備えた低コストの地震計が供給さ

れる事が期待できます。現在2社がこの仕様を踏まえた地震計を実用化しています。

地震計EMC試験

地震検知後少しでも早く新幹線を停止させるために、地震計は主に沿線の変電所に配置されています。

変電所内は地震計動作に影響を与える強さの電磁波が存在する可能性が高いため、これらの影響による誤動作の発生を排除することを考えなければなりません。そこで電磁波に対して、誤動作を起こさない性能（耐性）が地震計のハードウェアの信頼性向上には不可欠となります。そこで地震計観測分野では我が国で初めて、EMC規格を適用することにしました。EMC規格は、電子機器が電磁波の影響を受けても動作が乱れない、あるいは他の電子機器に与える影響が最小限であることを客観的に証明するための試験方法と評価基準を決めている規格です。

まず地震計周辺における電磁波の強さについて、地震計が設置されている変電所内で電磁波測定を行いました（図4）。その結果、IEC 62236と呼ばれる鉄道用のEMC規格が前提としている環境とほぼ同じであることが確認されました。次に、この環境で正常に動作し続ける地震計のEMC試験メニューを検討しました。試験メニューは地震計のどこの部分に、どの程度の電磁波を与えるか、そして個々の試験結果についてどのように評価するかを検討しました。そして図5のように、専門の設備においてIEC 61000-4をベースとした地震計EMC試験を実施しました。IEC 61000-4は、様々なEMCの試験方法を決めている規格で、先のIEC 62236でもIEC 61000-4の試験方法を採用しています。

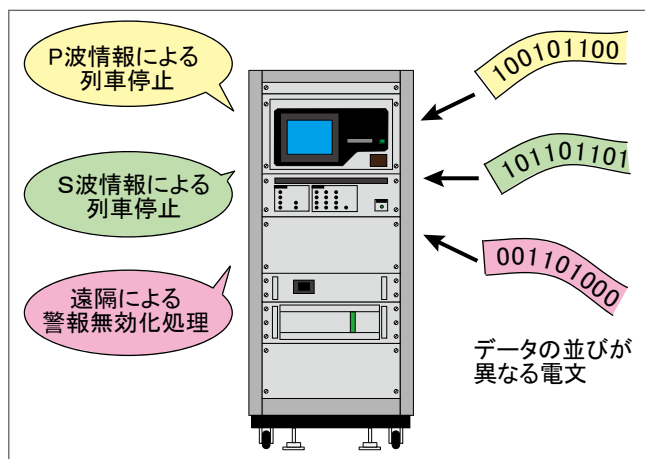


図3 地震計通信仕様の効果



図4 電波雑音現地測定

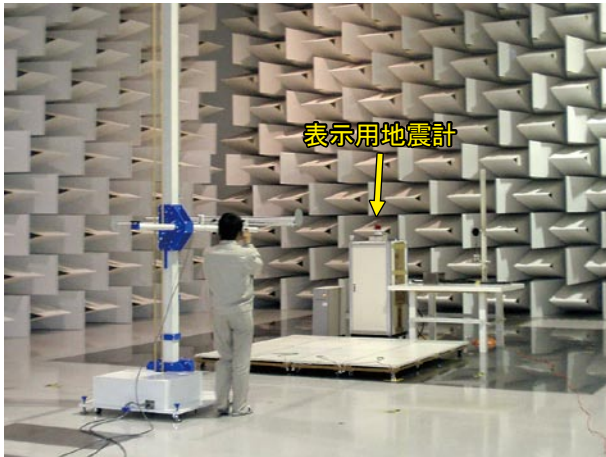


図5 地震計EMC試験

試験結果を受けて、8種類のEMC試験を実施して可能な限りノイズの影響を受けにくい地震計とすることを目的とした地震計製作仕様案を策定しました(図6および表1)。EMC試験の対象は、地震計に接続されているほとんどのケーブル(電源線、接地線、センサケーブルなど)となります。これらのケーブルおよびコネクタ接続部をポートとしますが、これらのポートに電磁波を与えても誤動作を起こさない地震計の試作機を現在製作中です。試作機の効果を見ながら、地震計EMC仕様として採用の可否を検討したいと考えています。

まとめ

ここでは、早期地震防災システムの信頼性に関する取り組みの一部を紹介しました。P波検知には誤検知などリスクが存在します。このリスクを最小限にするためには、推定情報の高精度化だけでなく、周辺環境の変化の監視、そして電磁波の影響を受けにくい地震計の開発、さらに地震発生後のシステム全体の動作検証など多岐にわたる対応が必要です。

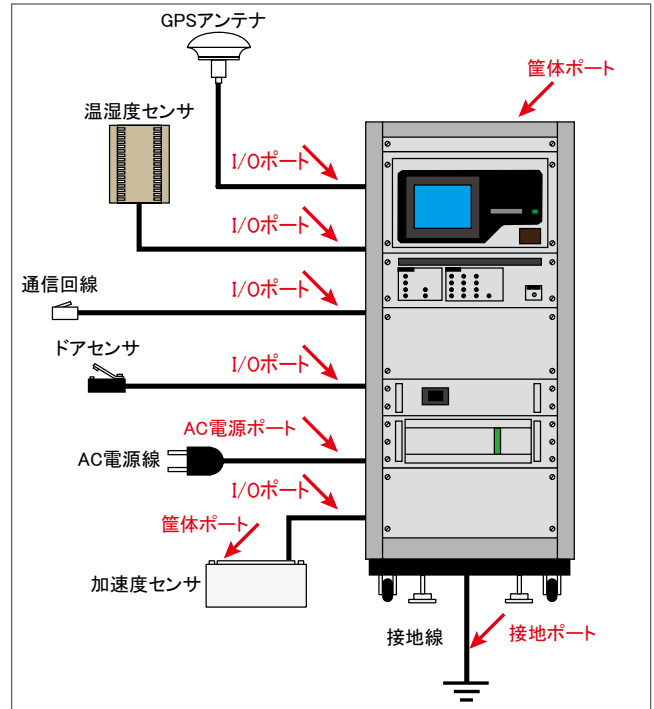


図6 EMC試験対象ポート(矢印部)

これまで、早期地震防災システムの研究開発は地震データによる、P波推定アルゴリズムの研究が主体でした。更なる信頼性向上のためには、地震計の特性を考慮して、鉄道の信号通信技術を取り入れたソフト・ハード両面の研究開発が必要です。いっどこで地震が発生しても安全を確保できるように、鉄道総研の総合力を駆使して取り組みたいと考えています。[RRR]

文献

- 1) 佐藤, 山口: 鉄道総研報告, 2001
- 2) 佐藤: 鉄道総研報告, 2007
- 3) 芦谷他: 地震学会秋季大会, 2008

表1 地震計製作仕様案(EMC試験案)

試験項目	試験方法	試験対象ポート			
		筐体	I/O	AC電源	接地
無線周波数の放射電磁界	IEC61000-4-3	○			
デジタル携帯電話からの無線周波数の放射電磁界	IEC61000-4-3	○			
電源周波数の磁界	IEC61000-4-8	○			
静電気放電	IEC61000-4-2	○			
パルス磁界	IEC61000-4-9	○			
無線周波数のコモンモード	IEC61000-4-6		○	○	○
ファーストトランジェント	IEC61000-4-4		○	○	○
サージ	IEC61000-4-5		○	○	○