

鉄道における 早期地震警報システムの変遷

山本 俊六
防災技術研究部
(地震防災 主任研究員)

佐藤 新二
同
(同 主任研究員)



やまもと しゅんろく さとう しんじ

はじめに

日本は世界でも有数な地震国です。気象庁の公表している地震カタログには、毎年10万個以上の地震が登録されています。これは、日本のどこかで1日平均約300個以上の地震が発生している事実を示しています。また概観的には日本の国土全域が地震の危険に晒されていることが分かります。従って、日本全国に展開された鉄道網も、常に地震の脅威に直面していることとなります。

鉄道の地震被害を低減するためには、構造物の耐震性向上や脱線対策などのハード対策に加えて、地震発生直後、大きな揺れが到達する前に列車を速やかに停止させるソフト対策が必要となります。鉄道総研では、地震動の初期微動を確実に捉え、この情報から地震被害発生範囲を瞬時に判断し、列車の運転停止を行う早期地震警報システムの開発を進めてきました。図1にこの早期地震警報の概念図を示します。このシステムの実用化により、地震発生時、大きな揺れが到達する前に、列車を減速、停止することが可能となりました。

ここでは、地震動の初期微動を利用した早期地震警報システムの変遷に関して、開発の舞台裏も含め記述したいと思います。

最初の早期地震警報システム(ユレダス)

第1世代の早期地震警報システムであるユレダスは1988年の青函トンネル開通時に初めて導入されました(図2左)。このユレダスは、地震がどこで発生したかという情報を、指令に表示する機能のみ有していました。その後ユレダスは改修され、1992年に東海道新幹線「のぞみ」導入に伴い警報判定機能を有するユレダスが世界で初めて実用化されました。さらに1998年北陸新幹線(東京～長野間)開業時に、初期微動検知手法を改良したコンパクトユレダス(図2右)が導入されました。

ユレダスでは、地震動検知後、初期微動数秒間の波形を解析し、地震の大きさと震源を計算します。次に上記の地震情報から、地震被害が予想される範囲を推定し、この情報に基づき列車の運転制御を行います。

ユレダスにおける地震情報推定の具体的な流れを図3に示します。はじめに地震波の卓越周期から地震の大きさを表すマグニチュードを計算します。次に初期微動の最大振幅とマグニチュードおよび震源距離の関係を示す経験式から震源距離を求めます。さらに振動方向から震源方向を求め最終的に震源位置を求めます。従来は大きな揺れ(主要動)の振幅によって運転制御を行っていましたが、初期微

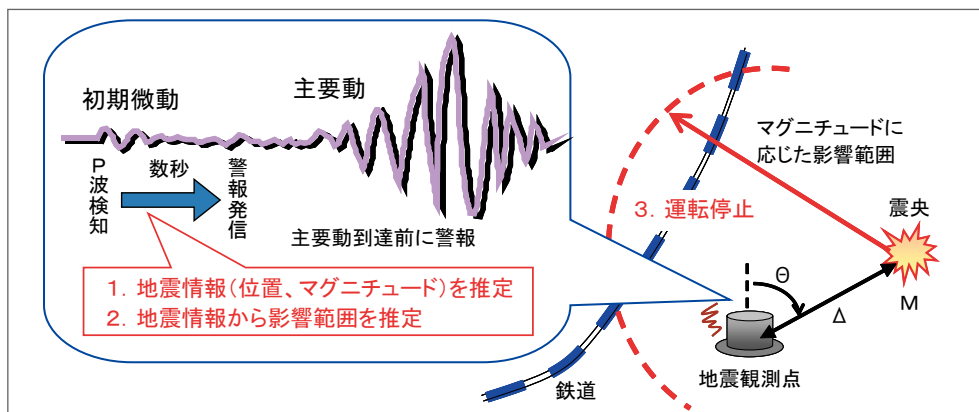


図1 早期地震警報システムの概念



ユレダス コンパクトユレダス

図2 早期地震警報システム

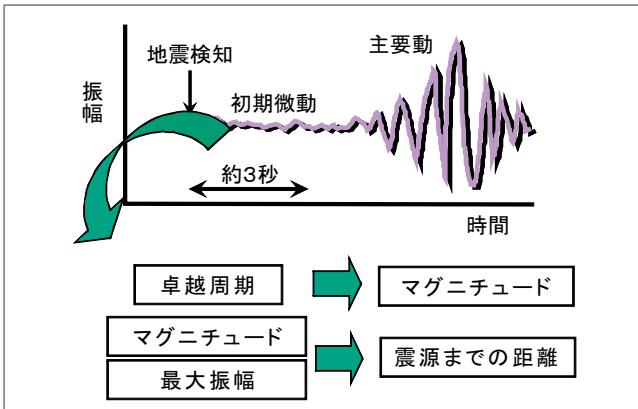


図3 ユレダスにおける地震情報の推定方法

動から運転制御を行う方法により、列車を安全に停止させるための時間を確保することが可能になりました。このようにユレダスは実用的な早期地震警報システムの先駆けとなりました。

ユレダスの課題

ユレダス開発と前後して、地震学の分野でも様々な知見が蓄積されてきました。特に1995年の兵庫県南部地震を契機に、公的機関による地震観測網の整備が積極的に推進された結果、地震の発生や破壊に係わるメカニズムを研究するための重要なデータが数多く収集され、この分野の研究が加速しました。これらのデータの中には、2003年十勝沖地震（マグニチュード8）を代表とする大地震のデータも含まれています。

大地震の場合、断層の破壊開始から破壊が終了するまでに10数秒～数十秒の時間を必要とします。例えばマグニチュード8クラスの2003年十勝沖地震では、破壊が終了するまでに約60秒かかること、断層の破壊は一様ではなく破壊開始から約20秒後に破壊域からのエネルギー放出量がピークに達することなどが確認されました。このため、

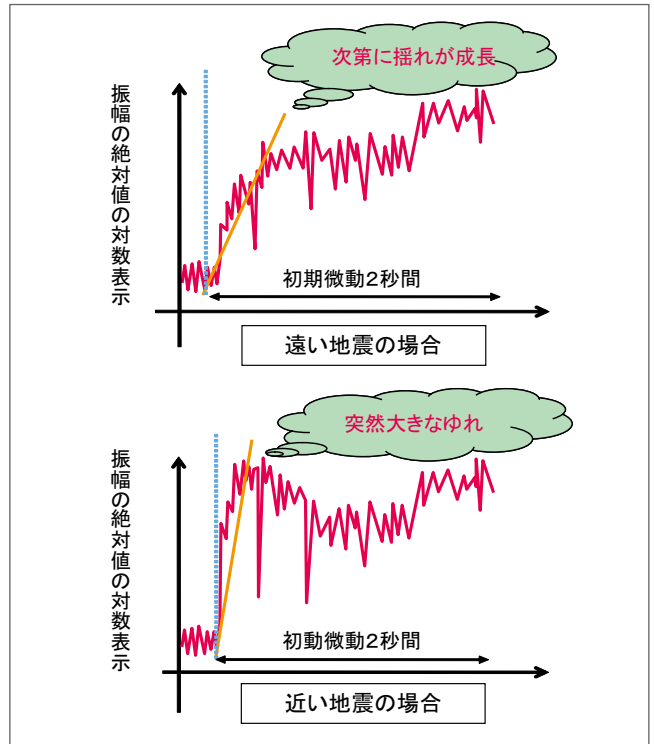


図4 初期微動の振幅増加の特徴

このような地震では、数秒間の初期微動波形のみから、マグニチュード8クラスの地震に成長することを判断するのは困難であり、地震の大きさの全貌を把握するために、より長い時間の波形を必要とすることが分かります。

ユレダスの手法は、数秒間の初期微動波形からマグニチュードを推定するため、断層破壊が数10秒以上継続する大地震の際にはマグニチュードの推定が適切に行えない可能性があることが示されました。

新しい震源情報推定手法の開発

ユレダスの持つ課題を克服するために、新しい地震情報の推定手法の開発に向けた取り組みとして、まずは原点に戻り、いろいろな地震の波形（数1000波以上）の特徴を丹念に確認する作業から始めました。

地震波形にもいろいろな種類があります。マグニチュードの大きな地震、小さな地震、震源距離の長い地震、短い地震など様々です。飽きることなくこれらの波形を眺めているうちに、地震の大きさによらず、初期微動の振幅の増加が震源距離に応じてある傾向を示すことに気づきました。すなわち、震源距離の長い地震では、波形の振幅が緩やかに増加するのに対して、震源距離の短い地震では、振幅が急激に増加するのです。我々が普段、地震を経験する際に、カタカタと揺れが大きくなるのは遠い地震であり、ドンと突然揺れが来るのは近い地震であると経験的に判断していることに対応する内容です（図4）。

この傾向は、波形に特定のフィルターを掛け絶対振幅を対数軸で表示することによりさらに明瞭になりました。この性質を使えば、初期微動の初めの数秒間の波形から、大雑把に震源距離の長短を見分けることが可能なように思われました。

ただし、実際のシステムでは人が波形の性状を目で確認しながら震源距離を推定することはできません。開発グループは、初期微動の振幅の増加を関数で近似し、振幅の増加率を係数で表現すればよいと考えましたが、この近似に適した関数がなかなか見つかりませんでした。進展がないまま時間だけが流れました。

そのような中、開発者の一人がある一つの関数を使うこ

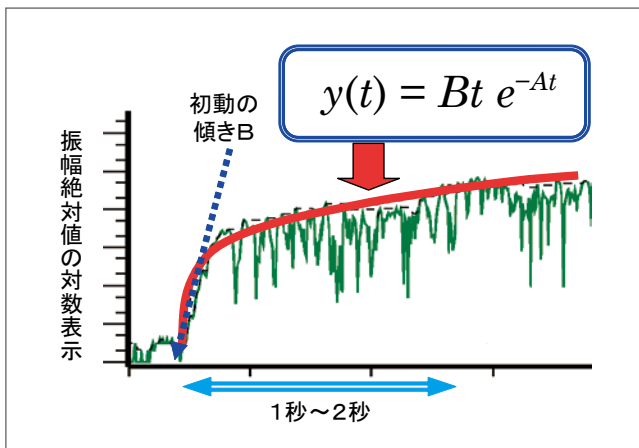


図5 初期微動の振幅増加を近似する関数

とを思いつきました。その関数は必ずしも地震学で常用するものではありませんでしたが、初期微動の振幅増加の傾向を表すのに適していると直感しました。その開発者は、実際の地震波形データを用いて徹夜で検証作業を行い、次の日の朝にはこの関数の有効性を確認することに成功しました。図5にこの関数の形状を赤い実線で示します。

この関数には2つの係数が使用されており、便宜的にそれぞれアルファベットでA、Bと呼んでいました。これらの係数のうち、“B”が初期微動の振幅増加の傾向を示すものであり、図6に示すようにこれが震央距離（地震学ではΔの記号を用います）と良い相関関係を示すことが検証されました。この手法は初期微動の振幅増加の傾向（係数B）から震央距離（Δ）を求めるため、B-Δ（ビー・デルタ）法と呼ばれるようになりました。B-Δ法により、初期微動の1～2秒間のデータから震央距離を自動的に求めることが可能となりました。

いったん、震央距離が推定できれば、事前に用意されたマグニチュード、振幅、震央距離の関係を表す経験式から、マグニチュードを計算することは容易です。大地震の際も、最大振幅を逐次解析し続けることにより、次第に増加していくマグニチュードを正確に計算し、被害をもたらす地震であると判断された時点で列車の運転制御を行うことができます。このようにして、大地震の際も、正確な地震情報を推定できる新しい早期地震警報のアルゴリズムが完成しました。このアルゴリズムを整理したものを図7に示します。

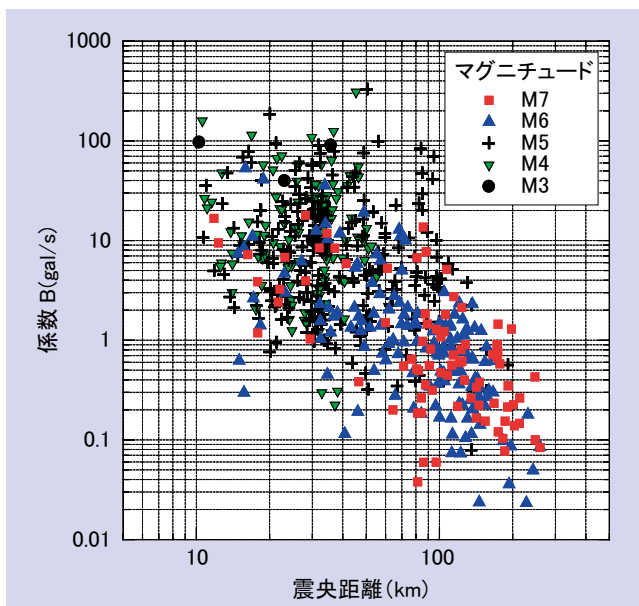


図6 係数Bと震央距離Δの関係

新しい早期地震警報システムの実用化

新しい早期地震警報システムの実用化を目指し、上記のアルゴリズムを採用した新地震計を開発しました（図8）。

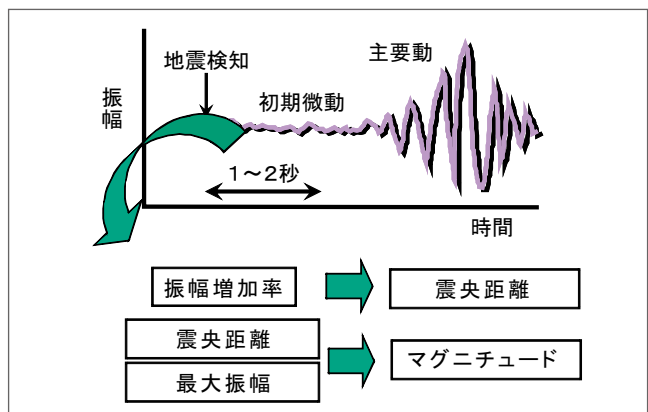


図7 新しい地震計における地震情報の推定方法

この地震計の設計には、B-Δ法以外に鉄道総研で蓄積されたこれまでの経験が反映されています。

まず、鉄道における地震計の高い信頼性を保つため、地震計単体で地震監視、地震計自身の状態チェック（ヘルスマニタリング）、そして外部からの地震情報等の情報チェックなど、これら複数の処理をリアルタイムで行う機能を追加しました。そこで、これまでのパソコンベースの処理部の構造を、より高速で安定的に動作する構造へ変更しました。

また異なるメーカーの地震計間で地震情報の交信を可能にするため、鉄道総研で地震計間の通信方法を標準化しました。これを地震計の通信仕様書といいます。この通信仕様書を満たしている地震計であれば、特別な地震計の改造なく、簡単にネットワークに接続することが可能となりました。これはどのメーカーのパソコンを使用しても、インターネットが使用できることと同じと言えば理解しやすいと思います。

さらに線路に近接した場所で発生した地震（直下型地震）に対して、これまでより早く警報判定をするために、図9に示すように初期微動から推定した情報を沿線地震計間で交換する方式を新しく採用しました。これは、2004年新潟県中越地震の発生以降の対策として採用したものです。この方式より、初期微動が到達していない箇所の地震計でも警報判定が可能となり、地震発生時より迅速な対応が可能となりました。

現在、初期微動を検知し運転規制を行う方法は、事業者のニーズに合わせて6種類存在します。前述した通信仕様書を満たした地震計であれば、簡単な地震計の設定により全ての運転規制方法に対応できるようになっています。この機能により、北陸新幹線（長野～金沢間）や北海道新幹線のように、異なる鉄道事業者の地震計間の情報のやりとりが必要になった場合にも、柔軟な対応が可能となります。

この新地震計は2004年九州新幹線（新八代～鹿児島中央間）開業に合わせて新規に導入され、さらに2005年度から東北・上越・長野新幹線および東海道・山陽新幹線におけるユレダスなどの後継機として順次採用されました。

緊急地震速報

国の施策として2006年より気象庁から緊急地震速報が配信されるようになりました。緊急地震速報は、気象庁および防災科学技術研究所の設置した全国約1000点の地震計のデータをリアルタイムに使用して求められた地震情報



図8 早期警報用地震計の実用機

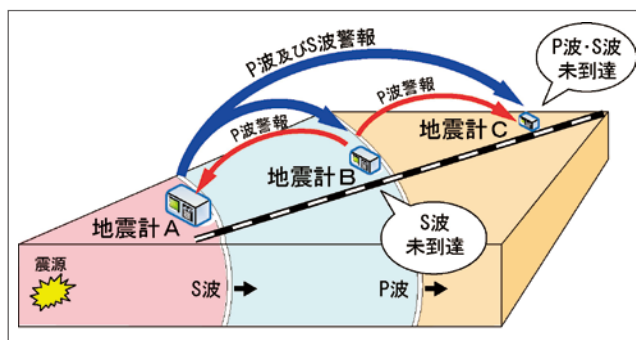


図9 早期警報用地震計の双方向通信

です。このシステムの単独観測点処理手法として、前述したB-Δ法のアルゴリズムが採用されています。鉄道分野で培われた技術が、国民向けのシステムの中にも利用されていることとなります。今後、緊急地震速報と事業者の持つ早期地震警報システムと組み合わせることにより、より効果的な地震防災システムの構築が期待されています。

まとめ

日本の鉄道における早期地震警報システムの変遷を簡単に振り返りました。現在、これらのシステムの運用には、実に多くの方々がかかわっています。地震情報推定の精度向上と同時に、維持管理の容易さもシステムに求められる重要な要素です。鉄道総研では、このような事柄を念頭に、より高精度で高い信頼性を持つシステムの構築を目指して、研究開発を進めています。[RRR]