

## 東海道新幹線地震防災システムについて

他 谷 周一

東海旅客鉄道（株）

東海道新幹線の地震防災システムでは、遠方で発生する大地震の早期検知を目的とした「早期地震警報システム」と、沿線での実際の揺れを把握することを目的とした「沿線地震計」で構成される。本稿では、東海道新幹線地震防災システムの概要を紹介する。

### Earthquake disaster prevention system for the Tokaido Shinkansen

Shuichi Taya

Central Japan Railway Company

This paper outlines the earthquake disaster prevention system adopted for the Tokaido Shinkansen. The system consists of two components: "Earthquake rapid alarm system", designed to remotely and instantly detect a great earthquake occurring in the distance, and "Wayside seismographs", installed to sense actual quakes subsequently reaching along the Shinkansen line.

#### 1. はじめに

鉄道における地震対策は、構造物を地震に耐えられるように強化する事に始まる。橋りょうや高架橋といった構造物の上を列車が走るため、地震により構造物が破壊されてしまっては、列車の安全は確保できないからである。

構造物の耐震補強に加え、地震時の列車の安全性を更に向上させるためには、走行中の列車が地震により強烈に揺すられた際の、列車脱線の危険性を下げるための仕組みも必要とされる。その仕組みとして考えられるのが、地震の発生を少しでも早く知り、少しでも早く列車に警報を出し、大きく揺れる前に少しでも減速させること—すなわち早期地震警報—である。

東海道新幹線では、この早期地震警報を高いレベルで実現したシステムを平成4年に稼動しはじめ、現在に至っている。

本稿では、現在の東海道新幹線地震防災システムの概要を紹介する。

#### 2. 地震波の伝達特性と早期地震警報

地震は、震源を中心として、時間をかけて揺れが周囲に広がっていく現象であり、地震発生から沿線に大きな地震動が到達するまでに若干の時間がある。したがって、震源の近くで地震を検知し、地震動の伝わるスピードより早く、震源から離れた位置に地震警報を伝えることができれば、警報受信から実際に大きく揺れる

までの間に、余裕時間を作り出すことができる。

また、地震の揺れはP波とS波に大きく分けることができるが、P波（Primary Wave=最初の波）、S波（Secondary Wave=2番目の波）の語源のとおり、P波、S波の順で到達する。P波、S波の到達時間差は、震央から観測点までの距離で異なるが、概ね数秒から十数秒となる。揺れの大きさについては、P波は「初期微動」とも呼ばれるように、揺れは小さい。一方S波は「主要動」とも呼ばれるとおり、P波に比べ何倍も大きく揺れる。地震で鉄道構造物に被害を及ぼすのはS波である。

以上の特徴から、早期地震警報を実現するためには、2つの手段があることが分かる。1つは「震源に近いところで地震を検知・警報すること（前線警報）」、もう1つは「P波のうちに検知・警報すること（P波警報）」である。この2つの手段は、「震源に近いところにP波から警報の有無を判断できる地震計を設置し、その地震計の情報を警報が必要なところまで伝送するための通信手段を確保する」ことで実現可能となる。その具体形が「早期地震警報システム」であるといえる。

#### 3. 東海道新幹線地震防災システム概要

##### 3.1. システム構成と各装置の機能概要

東海道新幹線地震防災システムは、「早期地震警報システム（TERRA-S:テラス）」と「沿線地震計」で構成され、TERRA-Sはさらに「遠

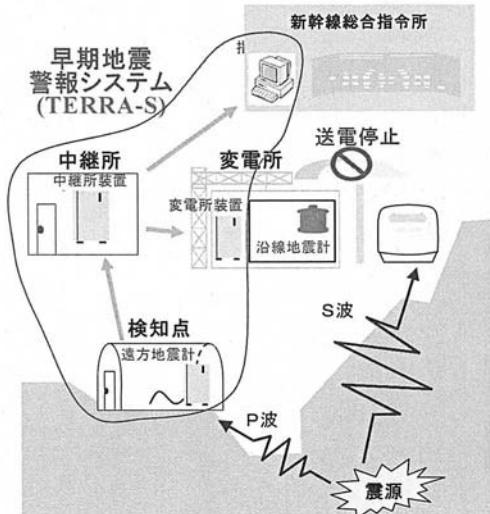
方地震計」「中継所装置」「変電所装置」「指令端末」に分けられる。各装置の配置は図1のとおりである。



(図1) 各装置の配置

### 3.2. 地震時のシステムの動作の流れ

地震が発生すると、まず、震源から最も近い遠方地震計で地震を検知する。その遠方地震計では、最初の2秒間の観測データをもとに、警報判断に必要となる地震諸元（マグニチュードと震央距離、震央方位）を推定する。推定した地震諸元は変電所装置に送信される。変電所装置では、受信した地震諸元をもとに自機の受け持ち範囲内に警報が必要か否かを判断し、必要な場合には変電所装置から変電設備に警報を発信する。警報を受けた変電設備は直ちに列車への送電を停止し、停電を検知した列車では直



(図2) システム構成と情報の流れ

ちに非常ブレーキが作動する。（図2）

地震が終了すると、各沿線地震計は指令端末に観測した震度を送信する。指令では各地での震度の値から地震後の運転規制を判断する。

### 4. 早期地震警報システム (TERRA-S)

#### 4.1. TERRA-S 開発のポイント

現在の早期地震警報システム TERRA-S は平成17年8月より稼動している<sup>1</sup>。平成4年以来、本システムで3代目のシステムとなるが、初代、2代目に比べ、次の2点で大幅に機能強化している。

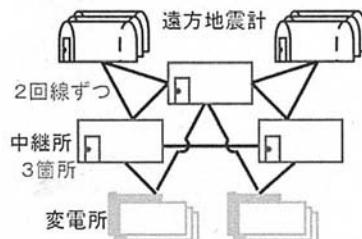
##### (1) 地震警報の更なる早期化

地震警報は、その目的から考えれば、早期性が高いほど良いものであることは明らかである。TERRA-Sでは、東田ほかが考案した「B-△法」を中心とする新しい地震諸元推定方式を取り入れ、地震波到達から地震諸元推定完了までの時間を初代システムと比較して1秒短縮（3秒間→2秒間に）した。

##### (2) 情報伝送の迅速性と信頼性の両立

TERRA-Sでは、地震発生直後および地震で揺れている最中に情報伝送を行わなければならぬ。また、1秒でも早く、かつ確実に情報を伝達する必要がある。TERRA-Sでは、ネットワークの構成を図3に示すような構成とし、回線1本の不通、中継所装置1箇所の機能停止があっても、情報伝送が途絶えないようにしている。

また、回線には専用線を使用し、接続確立までの時間をなくし、かつ地震情報以外の伝送によ



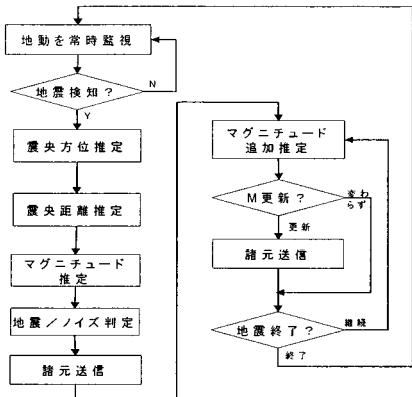
(図3) TERRA-S のネットワーク構成

る情報が輻輳しないようにしている。さらに平常時から電文のやり取りを行わせ、スタンバイ

の状態にしている。

#### 4.2. 遠方地震計での処理

遠方地震計での地震検知～諸元推定処理は、鉄道総研と気象庁が開発した「早期警報用地震計における地震諸元推定アルゴリズム」に則っており、図4のとおりの流れとなっている。



(図4) 処理フロー

#### (1) 地震検知方法

観測値の絶対値を取り平滑化処理した値がノイズレベルを超えた場合に地震波が到達したとみなす。

#### (2) 震央距離の推定

東田ほか<sup>2</sup>は、数多くの地震波の最初の部分を詳しく調べた結果、上下動の波形の振幅の絶対値をとり、対数グラフで表示すると、その形状に次のような特徴があることを見出した。

① 振幅増加傾向の継続時間はマグニチュードに比例する

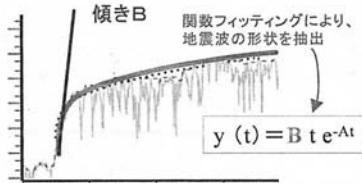
② 振幅増加の傾き（P波の立ち上がりの鋭さ）は震央距離に反比例する

さらに、地震波の最初の部分の包絡線を作成し、式1に示す関数でフィッティングすることにより、複雑な地震波を簡単な形へモデル化し、「振幅増加傾向の経過時間」と「振幅増加の傾き」という2つの指標を定量化する方法も提案した。モデル化の概念を図5に示す。

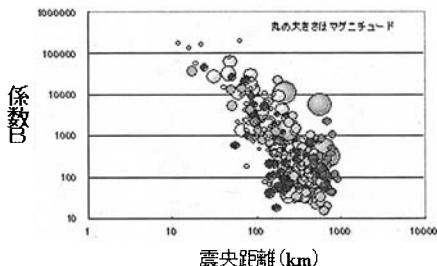
$$Y(t) = Bt \cdot \exp(-At) \quad (\text{式1})$$

そして、様々な地震波に対し、係数Bを求め、係数Bと震央距離の相関関係を調べたところ、

両者の間に負の相関関係があることを明らかにした（図6）。



(図5) 地震波初動のモデル化



(図6) 係数Bと震央距離の関係

TERRA-Sでは、この関係を利用して、地震波到達から2秒間のデータから係数Bを求め、式2から推定震央距離Δを算出する。

$$\log \Delta = \alpha \log B + \beta \quad (\text{式2})$$

#### (3) マグニチュードの推定

地震の規模を表す指標であるマグニチュード(M)は式3から求められる。

$$M = \alpha \log \Delta + \beta \log A_{\max} + \gamma \quad (\text{式3})$$

$\Delta$ :震央距離  $A_{\max}$ :最大振幅

$\alpha, \beta, \gamma$ :係数

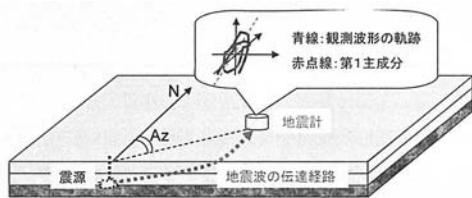
すなわち、Mを求めるためには、震央距離と最大振幅が分かれば良い。 $\Delta$ には(2)で算出した推定震央距離を用い、 $A_{\max}$ に地震波到達からその時点までの振幅最大値を用いれば、その時点での推定Mを算出できる。

#### (4) 震央方位の推定

横田<sup>3</sup>は、地震の初動の南北、東西、上下の3成分が三次元空間内で描く軌跡 $x(t)$ (パーセイクルモーション)を主成分分析することにより得られた第一主成分ベクトルから、軌跡の主たる振動方向を求める方法を見出し、また、主

たる振動方向から震央方位を推定する方法を提案した。その概要を図7に示す。

TERRA-Sでもこの方法で遠方地震計から見た場合の震央方位(Az)を推定している。



(図7) 震央方位の推定概要

#### (5) 地震／ノイズ判定

地面の揺れには、地震によるもののか、自動車等の機械振動や発破による振動などもある。また、地震計に電気的なノイズが入ると、地面は揺れていないにもかかわらず、大きな揺れを観測した状態になる場合がある。これらののような地震動以外を原因とする誤警報を防ぐため、最初の2秒分のデータから、その振動が地震動かノイズかを判定する処理<sup>4</sup>をする。

#### (6) マグニチュード追加推定

大地震の場合は、断層の破壊に数秒～数十秒かかるため、2秒の段階では原理的に最終的なMを推計する事はできない。このため、2秒以後も逐次、推定Mを算出しながら仕組みを取っている。Mが更新された場合、改めて地震諸元を送信する。

#### (7) 地震終了判定

観測値の絶対値を取り平滑化処理した値が終了レベルを継続して下回った場合に地震動が終了したとみなす。

#### 4.3. 推定地震諸元による警報判断処理

一般に、Mが大きいほど、地震による被害は広範囲に及ぶ。TERRA-Sの変電所装置では、各遠方地震計の推定震央位置を中心として、推定Mに応じた被害想定半径の円を描き、その

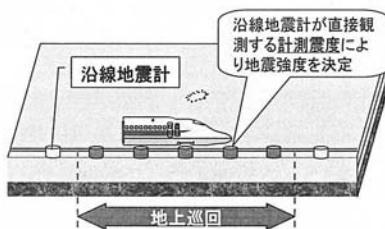


(図8) 推定地震諸元による警報判断処理

円内に自機の受け持ち範囲の線路がかかった場合、警報を発信する。(図8)

#### 5. 地震終了後の運転規制判断

早期地震警報システムまたは沿線地震計により列車が停止した後、沿線の揺れ状況から地震終了後の運転規制を判断する<sup>5</sup>。その判断の際には沿線地震計で観測した震度を参照する。地震強度毎の運転規制は図9のとおりである。



地震強度	計測震度	震度階	運転規制 緊急巡回
I	5.5～	6弱～	全線地上巡回 構造物点検
II	5.0～5.4	5強	全線地上巡回 部分構造物点検
III	4.5～4.9	5弱	部分地上巡回
IV	4.0～4.4	4強*	速度向上
V	0.0～3.9	～4弱*	規制なし

\* 4強、4弱は当社独自の表現

(図9) 地震終了後の運転規制判断

#### 6. おわりに

東海道新幹線地震防災システムは、本稿で紹介したとおり、最先端の地震防災技術の結晶であると自負している。しかし、これに満足することなく、更なるレベルアップを図っていき、東海道新幹線の安全・安定輸送に貢献していきたい。

1 「東海道新幹線の早期地震警報システムの構築」(他谷ほか, 第60回土木学会年次学術講演会)

2 「早期地震検知における新しい地震諸元推定方法」(東田ほか, 鉄道総研報告, 2002.8)

3 「自動検測手法の研究」(横田, 気象研究所技術報告 16 56-100, 1985)

4 「早期地震検知手法の汎用的な評価システムの開発」(佐藤ほか, 鉄道総研報告, 2005.10)

5 「地震発生後の運転規制判断の適正化」(伊藤ほか, 日本鉄道施設協会誌, 2006.10)