

新幹線地震防災システムの開発

The Development of the Early Earthquake Detection and Alarm System for Bullet-train (Shinkansen)

渡辺 篤* 本間 芳則* 大庭 健太郎* 奥富 剛史*

Atsushi Watanabe, Yoshinori Homma, Kentaro Oba, Takeshi Okutomi

新幹線地震防災システムとは、地震の際に即座に運転制御信号を発して運行中の列車を止め、あるいは減速させることで被害を最小限に抑えるための安全管理システムである。地震のP波とS波の伝播速度の違いを利用し、震源の近くで検知した情報をもとに震源位置や地震の規模を即時に推定、通信回線を使って大きな揺れが来る前にき電を停止し、列車制御を行う。

2003年から、従来システムの老朽化等による全面的なリプレースのため、鉄道総研殿等の指示の下、各JR殿の新幹線向けの地震防災システムの開発を行ってきた。

本稿では、新幹線地震防災システムの概要および主要機能を解説する。

Early Earthquake Detection and Alarm System (EEDAS) for bullet-train (Shinkansen), is a safety management system to warn, to stop trains, seconds after damaging earthquake occurs then mitigating a potential damage to minimum. Using propagation velocity difference between P-wave and S-wave, the system detects the triggering signal from the sensors nearby epicenter, calculating the epicenter location and magnitude, and issues warning information to trains by network before the main shocks come.

A new version of the EEDAS has been developed since 2003 to replace the current system, covering for the Shinkansen of Japan Railway companies.

In this report, EEDAS is summarized, the new system function is explained.

1. まえがき

日本は世界でも有数の地震国である。被害を及ぼすような大規模な地震は、最近のものだけでも、2007年新潟県中越沖地震、能登半島地震、2005年福岡県西方沖の地震、宮城県沖の地震、2004年新潟県中越地震等枚挙にいとまが無い。このような大地震に対して、鉄道や道路、電気、ガス、水道等各種施設の地震災害を軽減するためには、施設の耐震性を向上することはもちろん必要である。一方で、地震発生時には迅速かつ適切に施設を制御することにより事故を未然に防ぐことが重要となる。

新幹線の場合、運転区間の拡大と列車のスピードアップが図られていく中で、地震検知後より早い時点（初期微動、P波）で運転制御判断を行うこと、さらに運転制御信号を発する範囲を地震の規模に応じてより的確に設定すること等が求められた。このコンセプトに基づいて開発されたシステムがユレダス（Urgent Earthquake Detection and Alarm System）であり、1観測点単独のP波初動部数秒間のデータから、地震諸元（マグニチュード、震央位置）を推定し、その後の大きな揺れ（主

要動、S波）による影響範囲を判断するシステムである。

ユレダスが実用化されて十数年になるが、この間に鉄道総研殿と気象庁殿が共同研究した新たな地震諸元推定アルゴリズムを組込んだ地震計が実用化された。当社では、2003年からユレダスの老朽化等によるリプレースのため、鉄道総研殿等の指示の下、各新幹線の地震防災システムの開発に従事している。

本稿では、新幹線地震防災システムの概要及び主要機能を解説する⁽¹⁾⁽²⁾。

2. 新幹線地震防災システムの概要

新幹線地震防災システムとは、地震発生をいち早く検知し、地震の影響が想定されるエリア内の新幹線沿線上で、大きな揺れが到達する前に自動的に列車制御を行うためのシステムである。このシステムは、海岸検知点、沿線検知点、中継サーバおよび監視用PCから構成される。図1にシステムの概要を示す。

海岸検知点は、主に海溝型の大地震を対象とした早期地震検知を目的とし、新幹線沿線を囲むように海岸線上に配置される。海岸検知点は、運転制御判断を行わず、

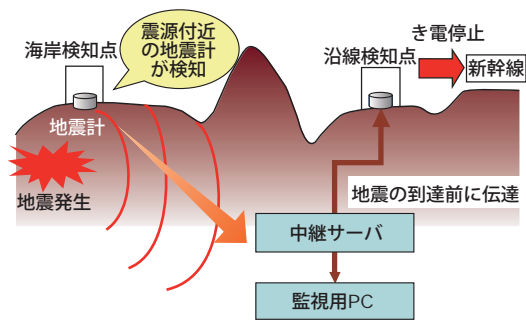


図1 システム概要

地震を検知し、その情報を伝える役割を担っている。

海岸検知点の地震検知機能にはS波検知機能とP波検知機能の2種類があり、S波検知機能は、地震動指標値がある規定値を超過した場合に、その値を運転制御情報として中継サーバに送信する機能である。一方、P波検知機能は、P波初動数秒のデータから地震諸元を推定し、その推定値を運転制御情報として中継サーバに送信する機能である（3.1節参照）。

沿線検知点とは、新幹線沿線にある間隔で設置され、自らが受持つ区間の地震の影響を監視し、地震の影響があると判断した場合に、指定された変電所に運転制御信号を発令する。変電所は、沿線検知点が発令した信号を受信すると、き電（送電）を停止する。送電が停止されると、走行中の列車では非常ブレーキが自動的に動作し、減速・停止することになる。

沿線検知点の運転制御判断機能には、自らの地震動（S波、P波）を検知し運転制御判断を行う機能の他に、中継サーバを介して受信した、外部（他の海岸検知点や沿線検知点）からの地震情報に基づいた運転制御判断機能がある（3.2節参照）。

中継サーバは、海岸検知点、沿線検知点及び監視用PCとリアルタイム通信を行う。地震発生時には、海岸検知点や沿線検知点から送信される地震情報及び運転制御情報を、確実に集約し、いち早く適切な箇所に転送を行う。中継サーバはシステム全体の中枢に位置し、高い信頼性が要求されるため、サーバの2重化構成や設置場所の分散等を行っている（3.3節参照）。

監視用PCは、システム全体を監視する目的で設置される。監視用PCは中継サーバから全ての情報を受信し、地震発生の有無や装置故障の有無をリアルタイムで表示し、システム状態の常時把握を可能にする。また、システム内の装置の遠隔メンテナンス操作を行うことができる（3.4節、3.5節参照）。図2にシステムの一般的な構成イメージを示す。

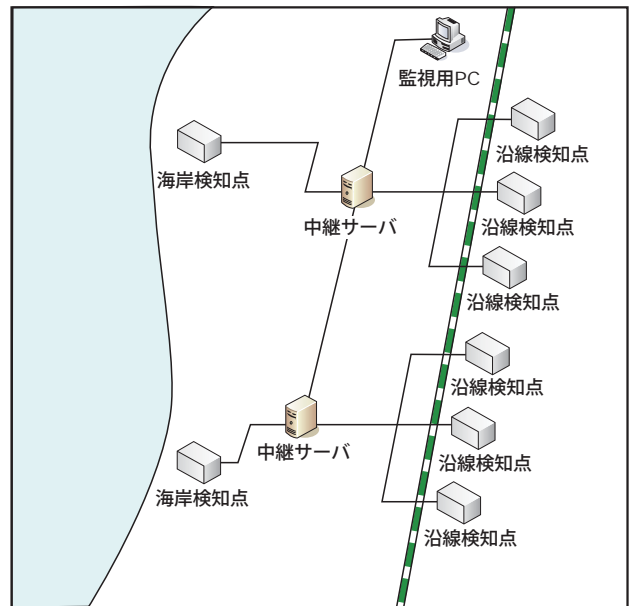


図2 システム構成イメージ（新幹線）

3. システムの機能

新幹線地震防災システムの主要機能の概要を以下に示す。

3.1 地震検知機能（検知点）

地震検知機能とは、地震波の到来を自動的に検知し、地震データから必要な情報を抽出する機能であり、鉄道総研殿と気象庁殿の共同研究により開発されたアルゴリズムにより実現している。⁽¹⁾

地震検知機能を大別すると、P波検知機能とS波検知機能がある。

①P波検知機能

P波検知機能は、地震諸元推定アルゴリズムを用いている。その概要は以下のとおりである。

- (1) 単独の地震計で検知したP波初動数秒の地震波形データのエンベロープ形状（振幅の包絡線）を求め、(1)式をフィッティングして、初動部の平均的な振幅増加率を示す係数 B を算出する。

$$y(t) = Bt \cdot \exp(-At) \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $y(t)$ は地震波の振幅エンベロープ、 t はP波到達時を原点とする時間、 A 、 B は関数フィッティングによって得られる係数である。

- (2) 初動数秒間の関数フィッティングにより得られた係数 B から(2)式により震央距離 Δ を算出する。

$$\log \Delta = a \log B + b \dots\dots\dots(2)$$

ここで、係数 a 、 b は統計的に求める係数である。

- (3) 震央方位の算出については初動のパーティクルモー

ション（初動の三次元的な軌跡）の主成分を求める方法を用いている。

(4) その後、地震学で用いられている方法を参考にした(3)式によりマグニチュード M を算出する。

$$M = \bar{\alpha} \log A_{\max} + \beta \log B + \gamma \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 A_{\max} は初動部の最大振幅、 $\bar{\alpha}$ 、 β 、 γ は統計的に求める係数である。

②S波検知機能

S波検知機能は、各種の地震動指標を算出し、ある規定値を超えるかどうかを監視する機能である。新幹線地震防災システムで使用している地震計は、最大加速度、SI値及び計測震度という3種類の地震動指標を算出可能である。

3.2 運転制御判断機能（沿線検知点）

運転制御判断機能とは、自ら検知した地震情報（自局情報）もしくは他の検知点から受信した地震情報（他局情報）により、設置箇所が地震の影響を受けるかどうかを判断し、運転制御出力する機能である。地震発生時、地震の影響範囲は、地震のマグニチュードだけではなく、震源深さや地震断層の破壊状況、さらには、地盤特性や

対象とする施設の耐震性能により異なるため、一概にはいえない。しかし、地震時の列車制御の要、不要の判断は即座に行う必要がある。そこで、運転制御判断方法として、P波検知機能による推定地震諸元を利用した可変範囲制御とS波検知機能による最大加速度やSI値等の地震動指標を利用した固定範囲制御の2種類が使用されている。

①可変範囲制御

鉄道総研殿が開発したM-Δ法を用いた制御機能であり、過去の被害地震データを基に、地震マグニチュードMに応じて、これ以上は被害がないだろうという限界の震央距離Δに対する経験式を作成し、この式を運転制御判断に利用する。M-Δ法で得られた関係式を図3に示す⁽³⁾。この式を基に、検知点では、自局情報や中継サーバを介して受信した他局情報のマグニチュードMから震央距離Δを計算し、被害推定範囲内の場合、き電停止を行う（図4参照）。

②固定範囲制御

検知点では、あらかじめ設定した検知点においてS波検知機能により求められた最大加速度やSI値等の指標が規定値以上になった場合に、き電停止を行う（図5参照）。

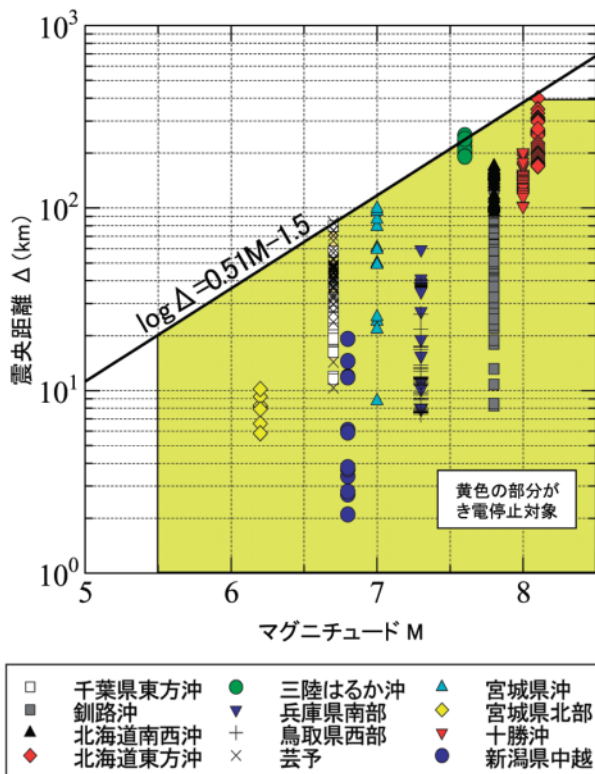


図3 M-Δ法

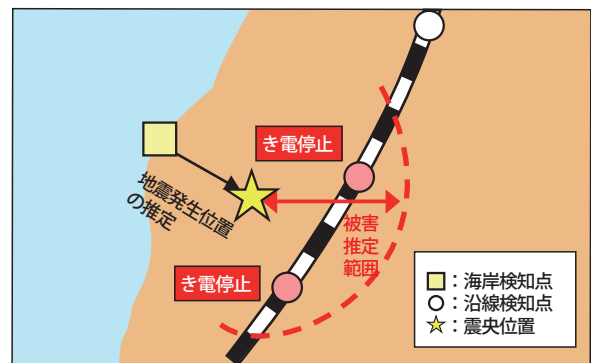


図4 可変範囲制御

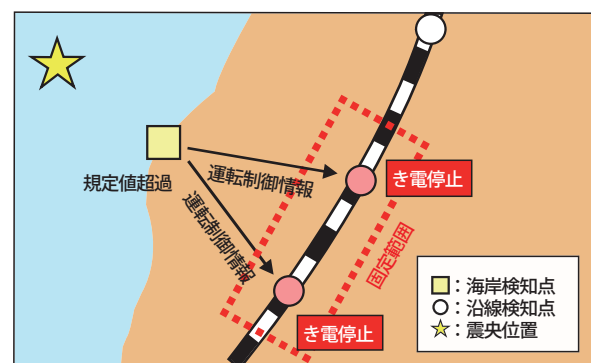


図5 固定範囲制御

3.3 情報中継機能（中継サーバ）

海岸検知点、沿線検知点及び監視用PCは中継サーバに接続されるように構成され、それぞれは中継サーバと直接通信を行う。情報中継機能とは、海岸検知点や沿線検知点が発信する地震情報や環境情報を中継サーバが指定箇所に転送する機能である。

図6は、海岸検知点が発知した地震を検知した時の情報の流れを示す。地震動（P波またはS波）を検知した海岸検知点からは、接続する中継サーバに地震情報（推定地震諸元情報、または規定値超過情報）が送信される。地震情報を受信した中継サーバは、接続する沿線検知点にその地震情報を転送すると同時に、他中継サーバと情報共有を行う。地震情報を受信した沿線検知点は、運転制御判断機能により自らが受持つ区間の地震の影響を算出し、運転制御出力の必要性を判断する。運転制御出力を行った場合は、中継サーバに運転制御情報（き電停止情報）を送信し、運転制御出力を行ったことを通知する。監視用PCには、海岸検知点、沿線検知点、中継サーバ間で送受信された全ての情報が転送され、発生した地震の状況とき電停止区間を画面通知する。

3.4 状態監視及び遠隔制御機能（全装置）

状態監視機能とは、地震計、中継サーバ等の機器が設置されている場所の環境情報や、通信状態を監視し、監視用PCへ通知する機能である。環境情報とは、温度セ

ンサ、湿度センサ、ドアセンサ等で監視している情報を指す。

遠隔制御機能とは検知点及び中継所内の機器を、監視用PCから遠隔で操作する機能である。異常時等の場合に、監視用PCから遠隔操作によって地震計、中継サーバ及び通信機器の状態取得、再起動等を行うことが可能である。

3.5 地震情報表示機能（監視用PC）

地震情報表示機能とは、中継サーバ経由で受信した地震情報及び運転制御情報をリアルタイムで表示する機能である。図7は、海岸検知点の推定地震諸元により沿線

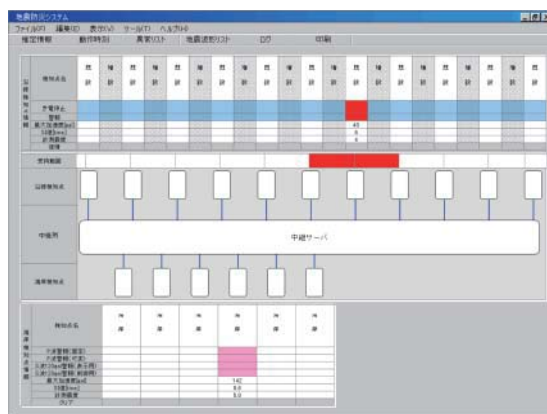


図7 監視用PC画面例（地震発生時）

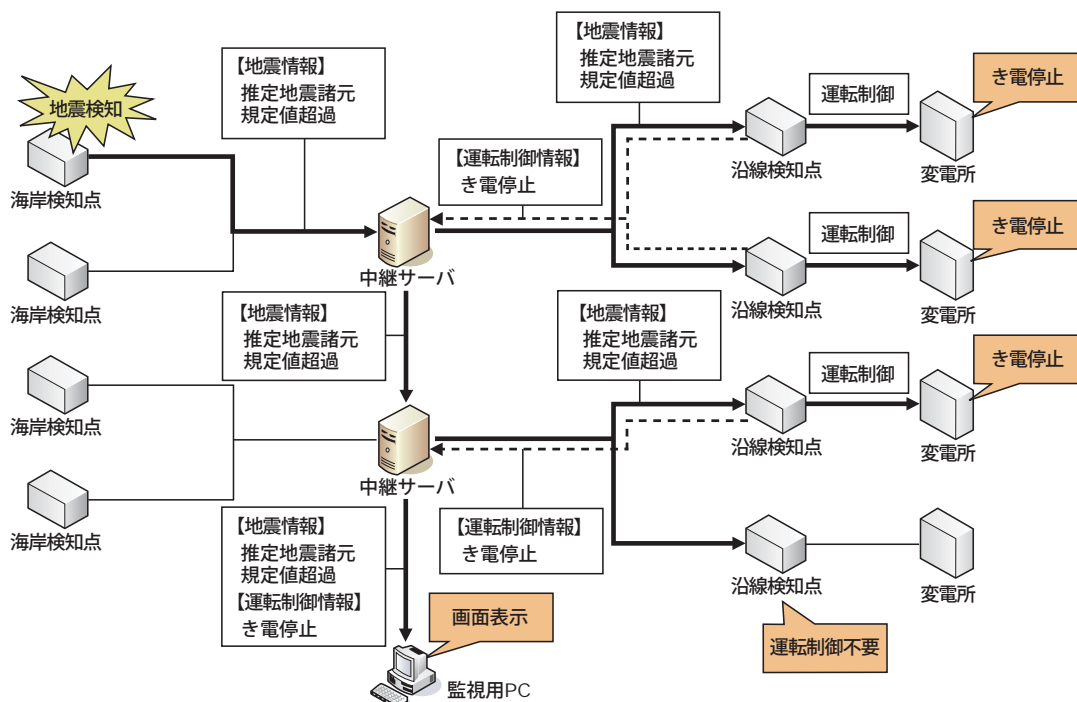


図6 情報中継例（地震情報）

検知点で電停止を行った場合の画面例である。各検知点の地震情報（マグニチュード、最大加速度、SI値等）をリスト表示し、電停止区間を赤色表示することで、地震の規模とその影響を一覧することが可能である。

4. むすび

本稿では、2003年から行ってきた開発のまとめとして、新幹線地震防災システムを紹介した。実際には、各JR殿で細かな振る舞いは異なるが、本稿では言及しなかった。

2007年10月から気象庁殿の緊急地震速報の配信が開始された。緊急地震速報で配信される情報を地震計の情報に変換することで、通常地震計と全く同様な取扱いが可能となり、既に2007年12月1日から一部JR殿の在来線地震防災システムで使用を開始している。

本稿の作成にあたり有益な情報をご提供してくださりました鉄道総研の防災技術研究部地震防災の皆様には感謝致します。

参考文献

- (1) 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，18巻9号，pp. 23～28，2004
- (2) 中村洋光、佐藤新二、芦谷公稔：鉄道における新しい早期地震警報システム，コンクリート工学，44巻5号，pp. 110～113，2006
- (3) 中村洋光、岩田直泰、芦谷公稔：地震時運転規制に用いる指標と鉄道被害の統計的な関係，鉄道総研報告，19巻10号，pp. 11～16，2005

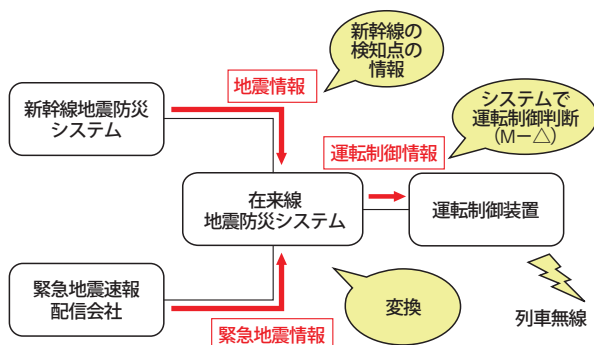


図8 システム構成イメージ（在来線）