

# 公的地震情報を活用した 早期運転再開支援システムの試作

岩田 直泰\* 山本 俊六\* 是永 将宏\*  
野田 俊太\* 伊藤 賀章\*

A Support System for an Early Resumption of Regular Train Operation  
by Applying a Public Earthquake Information

Naoyasu IWATA Shunroku YAMAMOTO Masahiro KORENAGA  
Shunta NODA Yoshiaki ITO

At present, in case of an occurrence of earthquake, which tremor exceeds operation control threshold, there is a need to implement walking patrol along partial railway section, of which each seismographs is in charge, for the sake of ensuring safety. In order to resume regular train operation rapidly after restricted train operation due to earthquake, we constructed a working model system to estimate a seismic damage accurately just after an occurrence of earthquake. This system supports decision of early re-operation of train control due to earthquake. By obtaining the seismic information not only from railway operator's seismographs but also from public institution's ones in quasi-real-time, this system estimates the distribution of shake over meshed planes and extracts quake and structure damage at any given chainage of target railway route for their evaluation.

キーワード：地震時運転規制，早期運転再開，公的地震情報，地震動推定，構造物被害推定

## 1. はじめに

現在、地震発生時においてその揺れが大きく、鉄道構造物や走行中の車両に影響が及ぶと懸念される場合には、鉄道事業者は可能な限り早く列車を停止させ<sup>1)</sup>、その後、事前に定められたルールに従って徒歩巡回等に基づく安全確認を行い、運転の再開を行うこととなっている。

一般に鉄道では、線路沿線において地震時に列車を停止させるための地震計（沿線地震計）が設置されており、さらに新幹線では線路から離れた位置にも、主に沖合の海溝型地震を対象とした地震計（海岸地震計）が設置されている。このうち、沿線地震計の情報は線路直近における地震動の大きさを表すことから、鉄道構造物等への影響度合いを知る材料として運転再開の判断にも使われている。すなわち、予め定めた大きさ以上の揺れが観測された場合、その地震計に関して予め定めた受け持ち範囲に対し、徒歩等による安全確認が実施される。

ただし、徒歩等による安全確認は、目視で軌道や構造物などに変状がないことを確かめることから、多大な時間を要する場合がある。運転再開の早期化を図るために

は、この安全確認をよりの確かつ効率的に実施する必要があるが、そのためには地震計の設置されている場所以外の地震動を精度良く推定することが望まれる。

1995年の兵庫県南部地震以降、(独)防災科学技術研究所（以下、防災科研と呼ぶ）などの公的機関により全国に多数の地震計が整備され、その情報は広く一般に公開されている<sup>例えは2)</sup>。特に、近年の情報通信技術の発展により、これらの地震情報は準リアルタイムで入手できるようになっている。これまで地震時の運転停止や再開の判断には、鉄道事業者が独自に設置し管理する地震計の情報を用いていたが、公的地震情報を活用することにより、運転再開判断における地震動推定のための情報を増やすことができる。これにより、鉄道沿線の地震計が設置されていない箇所の地震動を、従来よりも高い精度で推定し、最適な巡回範囲を算出することにより、状況によっては安全確認の時間を短縮することができると期待される。

そこで、公的地震情報を活用した地震動推定や構造物被害推定を行う早期運転再開支援システム（以下、プロトタイプシステムと呼ぶ）を試作した。現在はそのシステムの稼働試験を行い、地震動推定の結果を蓄積している。ここでは、試作したシステムの概要等を報告する。

\* 防災技術研究部 地震防災研究室

## 2. システムの概要

製作したプロトタイプシステムは、図1に示す通り、「サーバシステム」と「クライアントシステム」に分かれている。サーバシステムでは、「地震情報収集プロセス」により、気象庁や防災科研<sup>3)</sup>のホームページ（以下、HPと表す）から地震情報（地震発生の有無、震源情報等）を準リアルタイムで取得する。「トリガープロセス」により地震発生が確認されれば、「波形収集プロセス」で防災科研のHPより地震波形データ<sup>2)</sup>を自動ダウンロードし、「波形処理プロセス」により地震動指標の計算などの基本的な波形解析を行う。これらで取得した情報は、クライアントシステムの「地震情報確認プロセス」から閲覧することができる。そして、発生した地震に応じて「データ処理プロセス」を起動させることにより、距離減衰法、IDW法（逆距離加重法）またはKRIGING法による地盤増幅特性を考慮した地震動の面的推定や構造物被害推定を行う。さらに、「図化处理プロセス」では推定した地震動の分布等を対象領域の地図上に示し、対象路線の構造物被害ランクをキロ程に対してプロットするなどの図化处理を行う。

なお、プロトタイプシステムの開発にあたり、(公財)鉄道総合技術研究所が所有する宮崎リニア実験線をモデル線区に選び、地震動推定を行う領域は九州地域とした。この宮崎リニア実験線は、宮崎県の日向市から都農町にまたがる全長約7kmのリニアモーターカー用の旧試験路線であり、起点方と終点方の両端がラーメン高架橋、その間が桁式高架橋となっている。プロトタイプシステムは、最終的にはモデル線区である宮崎リニア実験線のキロ程に対して、地盤の揺れの大きさや構造物の被害を推定するシステムとして製作した。

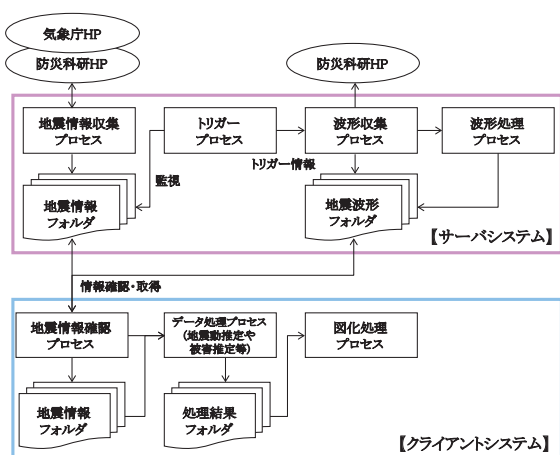


図1 プロトタイプシステムのブロック図

## 3. 地震動の推定手法

プロトタイプシステムでは、前述の通り距離減衰法、IDW法またはKRIGING法による空間補間の3つの手

法をそのタイミングで入手済の地震情報に応じて任意に選択することにより、面的な地震動を推定する。

距離減衰法は震源情報（震源位置、マグニチュード等）のみから地震動分布を推定することができるが、空間補間は防災科研のK-NET（強震観測網）およびKiK-net（基盤強震観測網、プロトタイプシステムでは地表面のデータのみ使用）<sup>2)</sup>に波形データがアップロードされた後に、データを自動で取得し、それを解析することにより実測情報をもとに揺れの大きさを計算する。なお、地震動の推定は各手法ともクライアントシステムの「データ処理プロセス」を手動で起動させることにより実行する。面的な地震動分布を求めた後には、対象路線（モデル線区）のキロ程に対する地震動指標等を抽出することより被害推定を行う。本章では、プロトタイプシステムに組み込んだ地震動推定手法について述べる。

### 3.1 鉄道固有の地震動指標のための距離減衰式の作成

一般に、地震動を推定する簡易的な方法として距離減衰式が用いられることが多い。この距離減衰式は震源から評価地点までの距離やマグニチュード、震源深さなどの少ないパラメータから簡易に地震動を推定することができる。ゆえに、最大加速度や最大速度などの一般的な地震動指標に関しては様々な検討がなされ、多くの距離減衰式が提案されている<sup>例えば4) 5) 6)</sup>。

一方、鉄道では運転規制判断を行うための地震動指標として、警報用最大加速度（5Hzハイカットフィルタ処理を施した加速度）<sup>7)</sup>が一般に用いられているが、近年では被害との相関がより高いとされる、SI値<sup>8)</sup>や計測震度といった地震動指標も用いられるようになってきている。これらの地震動指標の中で、特に警報用最大加速度は鉄道固有の指標であり、この指標を対象とした距離減衰式は検討された事例が少ない<sup>7)</sup>。早期運転再開判断を支援するプロトタイプシステムでは、鉄道の運転規制判断に用いられている指標の距離減衰式を使う必要があるため、システム製作に先立ち新たに式を作成した。

距離減衰式作成のためのデータセットを整えるに当たり、解析の信頼性を確保するため、データにP波初動部やS波の最大部が含まれていることを確認した。データセットは、K-NETおよびKiK-netにおいて1996年から2010年に観測された245地震の29734波形のうち、福島の方法<sup>4)</sup>に従って11187波形を選定した。距離に関しては、断層パラメータが決定されている大きな地震に対しては断層最短距離の計算を行い、それ以外は震源距離を用いている。なお、断層パラメータは山中<sup>例えば9)</sup>によった。対象とした地震動指標は、水平合成最大加速度PGA (gal)、警報用最大加速度PGAJR (gal)、計測震度IsおよびSI値SI (kine)の4種類である。用いた距離減衰式の関数型を式(1)に示す<sup>6)</sup>。

$$Y = a_1M + a_2D - bX + c_0 - \log_{10}(X + d_1 \cdot 10^{d_2 \cdot M}) + c_j \quad (1)$$

ここで、 $Y$  は算出する地震動指標を表し、本報告では  $\log(PGA)$ ,  $\log(PGAJR)$ ,  $I_s$  および  $\log(SI)$  である。 $X$  は距離 (km),  $M$  は気象庁マグニチュード,  $D$  は震源深さ (km) であり,  $a_1, a_2, b, c_0, d_1, d_2$  および  $c_j$  は回帰で求める係数である。各係数の決定には、三段階の回帰分析<sup>(例えば4)</sup>を用いた。算出した係数を表1に示す。

表1 距離減衰式の回帰係数一覧

	$a_1$	$a_2$	$b$	$c_0$	$d_1$	$d_2$
PGA	0.51404	0.00607	0.00404	0.48503	0.00581	0.5
PGAJR	0.54634	0.0058	0.00332	0.01746	0.00492	0.5
$I_s$	1.09849	0.01065	0.00865	-1.38401	0.00279	0.5
SI	0.65626	0.00531	0.00295	-1.63288	0.01284	0.5

式(1)の  $c_j$  は、観測点ごとに求められる地点補正值であり、回帰分析に使用するデータが得られた地震観測点(ここではK-NETおよびKiK-net観測点)の地表面における平均が0となるように定めている。

なお、防災科研のJ-SHIS<sup>10)</sup>などで公開されている地盤増幅情報の全国的な平均値を計算し、その値を式(1)から引くことで、表層地盤による地震動増分を差し引いた基盤上の地震動を推定することができる。その基盤上の地震動に評価地点の地盤増幅度を足すことで地表面の地震動を簡易的に推定できる。地盤増幅算出の定義式の一例として、計測震度に対するものを式(2)に示す<sup>11)</sup>。

$$\Delta I_s = 4.943 - 1.779 \cdot \log_{10}(AVS30) \quad (2)$$

ここで、 $\Delta I_s$  は表層地盤による計測震度増分、 $AVS30$  は地表面から深さ30mまでのS波速度の平均値(m/s)である。

### 3.2 距離減衰式を用いた地震動の推定

距離減衰式を用いた地震動の推定では、観測される地震データの蓄積に伴い表1で示した回帰係数が変わる可能性があるため、距離減衰式の係数を再決定するソフトも別途開発した。なお、プロトタイプシステムでは、関数型は式(1)に示した型に固定されるが、各係数の値は任意に設定できる。

近年では、気象庁の緊急地震速報の情報を取り込み、運転停止判断を行う鉄道事業者も増えている<sup>12)</sup>が、気象庁が提案する計測震度の予測手法は、いくつかの統計的な関係式を組み合わせ合わせた変換処理が行われている<sup>13)</sup>。このため、それぞれの統計式による誤差の積み重なりが、予測値と観測値の差異を大きくする要因となることが指摘されている<sup>14)</sup>。これに対して、ここで作成した距離減衰式は、緊急地震速報で提供される情報のみから、より少ない関係式で揺れの大きさを推定することが可能である。推定計測震度における精度検証の結果、提案した距

距離減衰式を用いた場合には、気象庁の従来手法より予測精度(RMS)が約35%向上することを確認している<sup>15)</sup>。

### 3.3 空間補間(IDW法)を用いた地震動の推定

IDW法(逆距離加重法)は、計算点と観測点の距離の逆数を重みとして補間計算を行う手法<sup>(例えば16)</sup>であり、プロトタイプシステムへ組込んだ定義式を式(3)と(4)に示す。

$$Y = \sum_{i=1}^n w_i \cdot Y_i \quad (3)$$

$$w_i = \frac{1/r_i}{\sum_{i=1}^n 1/r_i} \quad (4)$$

ここで、 $Y$  は計算値、 $Y_i$  は観測値、 $w_i$  は重み、 $r_i$  は評価点と観測点  $i$  との距離を表す。

プロトタイプシステムのIDW法では、評価点から指定した検索半径内(探索距離)にある観測データのみを用いており、探索距離は任意に設定できるようになっている。

図2に示す通り、公的機関の地震計で観測された揺れの大きさは、同じく公的機関から公表されている地盤増幅情報をもとに工学的基盤面の揺れに換算され(図2の①)、補間計算は工学的基盤面で行う(図2の②)。工学的基盤面で面的に推定された地震動は、地盤増幅情報を考慮し地表面の地震動が推定される(図2の③)。

ここでは、公的機関の地盤増幅情報として、防災科研のJ-SHISで公開されている情報<sup>10)</sup>を用いた。なお、J-SHISでは、工学的基盤はS波速度が400m/sの地盤と定義されている。

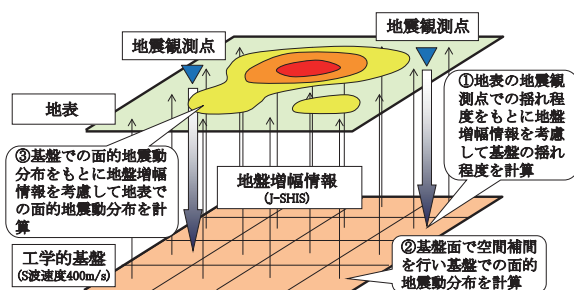


図2 空間補間の手順

### 3.4 空間補間(KRIGING法)を用いた地震動の推定

IDW法と同様に、波形データが取得された後にはKRIGING法による地震動推定<sup>(例えば17)</sup>も行うことができる。用いた手法は、平均値と共分散を既知とするSimple Kriging法であり、基盤面における距離減衰式をトレンド成分、距離減衰式の値と基盤面に換算した観測値(ここでは公的機関の地震情報から地盤増幅を除いた値)の残差をランダム成分として空間補間を行う。ここでの距離減衰式には、本報告で提案している3章1節の距離減衰式を採用している。なお、プロトタイプシステムによるKRIGING法での空間補間の共分散関数は、指数型

特集：防災技術

とガウス型を選択できるようになっており、パラメータとして相関距離を与える。プロトタイプシステムへ組込んだ定義式<sup>18)</sup>を式(5)から(7)に示す。

$$Y = \sum_{i=1}^n w_i \cdot Y_i \quad (5)$$

$$C(d) = a \cdot \exp\left[-\left(\frac{d}{D}\right)^n\right] \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n w_j \cdot C(x_i - x_j) = C(x_i - x_0) \quad (7)$$

ここで、 $Y$  は計算値と距離減衰値の差分、 $Y_i$  は観測点  $i$  における実測値と距離減衰値の差分、 $w_i$  は重みである。 $C(d)$  は共分散関数 ( $n=1$  のとき指数型、 $n=2$  のときガウス型) であり、 $d$  は対となる2点間距離、 $D$  は相関距離、そして  $a$  は共分散の最大値を表現する係数である。

3.5 推定地震動の信頼性を向上させるための機能

プロトタイプシステムには、地震動推定の信頼性を向上させるために取得した地震動データの選別機能を付加している。すなわち、ダウンロードした地震動データに対し、取得した地震波形データの記録時間が気象庁の発表した地震発生時間と乖離している場合や、地震の規模が小さいもしくは震源までの距離が遠いなどの理由により地震動を記録した観測点の数が少ない場合、補間計算の精度が確保できないと思われるため、そのデータを使用しないようにすることができる。また、取得された個別の波形データに対する信頼性を検証するために、距離減衰より求められた値から一定以上乖離したものは地震動推定には採用しない設定を行うこともできる。これらのデータ選別の閾値は任意に定めることが可能である。

さらに、その観測点で過去に記録された地震データを用いて H/V スペクトル<sup>1)</sup>を算出し、この情報をデータベースとして保持し、新たに得られた波形データの H/V スペクトルと比較することによりデータの採否を決めることもできる。以下、この手法について詳細に述べる。

地震動の H/V スペクトルの例として、モデル線区である宮崎リニア実験線に最も近い K-NET 観測点である MYZ006 (都農) の解析結果を図3に示す。この図は、131 地震の記録にて作成 (図中の細い灰色の線はそれぞれ

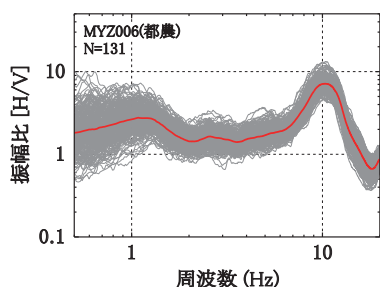


図3 MYZ006 (都農) の地震動 H/V スペクトル

の地震、太い赤色の線はそれらの対数平均) しているが、H/V スペクトルは震源や伝播経路の影響をほとんど受けず、表層地盤の特性のみに依存し、安定して求められている。

データベースに保持した過去地震の H/V スペクトルと、取得データの H/V スペクトルの差異が大きい場合、そのデータは適切でない可能性が高いと考えられる。ここでは、差異を定量化するために式(8)の評価式を定義した。

$$Misfit = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\log_{10}(O_{Di}) - \log_{10}(O_{oi})]^2} \quad (8)$$

ここで、 $Misfit$  はデータの信頼性を評価するための指標、 $N$  はデータ数、 $O_{Di}$  は既往地震によるデータベース H/V スペクトル、 $O_{oi}$  は地震動推定に使用する取得データの H/V スペクトルである。 $Misfit$  の計算帯域は 0.5Hz ~ 20Hz としており、閾値は任意に設定することができる。判定は X/Z と Y/Z で別々に行い、どちらか一方でも閾値以上となれば適切なデータではないと判定する。

4. 建造物の被害推定

プロトタイプシステムでは、3章で推定した地震動と事前に構築する建造物のデータベースを基に、モデル線区である宮崎リニア実験線に対し建造物の被害推定を行う。被害推定には、室野らが提案する手法<sup>19)20)</sup>を用いた。この手法は、正規化卓越周期 (地震動の卓越周期を建造物の降伏周期で除した値) に対して正規化加速度 (地震動最大加速度を建造物の降伏震度と重力加速度の積で除した値) を図化し、解析的に作成された応答塑性率の境界線を表す関数と比較して当該建造物の応答塑性率を算出し、建造物の損傷レベルを推定するというものである。

建造物被害推定のためのデータベースは、地盤データ (J-SHIS などの地盤増幅情報)、建造物データ (降伏周期と降伏震度などの建造物情報)、路線データ (キロ程と緯度・経度を対応させた情報) を保持している。宮崎リニア実験線の路線データとしては、電子地図情報から対象路線上の緯度・経度を約 50m 間隔で読み取り、その距離を足し合わせることでキロ程を求め、緯度・経度と対応させている。プロトタイプシステムでは、緯度・経度の情報から地震動の面的な推定情報を読み取り、被害推定を行った後にキロ程に対して被害ランクをプロットする。

地震後の安全確認である徒歩等による巡回は、各鉄道事業者によりキロ程を基準として定められている。よって、地震動の推定や建造物の被害推定はキロ程に対して算出する必要がある。指令員はこの情報を画面で確認して最適な巡回範囲を保守担当係員に指示することができ、状況によっては従来の手法に比べ安全確認のための時間を短縮することができると考えられる。

## 5. 稼働試験ならびに推定精度の検証

### 5.1 宮崎リニア実験線における地震観測の概要

試作したプロトタイプシステムは、先に述べた通り宮崎リニア実験線をモデル線区としているが、このシステムによる推定地震動を検証する目的から、宮崎リニア実験線に地震計を設置し、自然地震観測を行った<sup>21)</sup>。なお、地表面だけでなく構造物を含めた評価を行うことを目的として、構造形式が桁式高架橋とラーメン高架橋の2地点の地盤上（橋脚の支間中央）と高架橋上（橋脚の直上）に計4台の地震計を設置し、100Hz サンプリングで連続した加速度波形を記録している。ただし、本報告では地表面での地震動推定を対象とし、高架橋上の観測データの検証はここでは割愛する。図4に桁式高架橋地点における地盤上のセンサー設置状況を示す。なお、データを記録するロガーやバッテリーは高架橋上に設置している。



図4 地震計の設置状況

### 5.2 システムの推定精度検証

プロトタイプシステムを製作して以降、推定精度検証の対象となり、かつ宮崎リニア実験線に設置した地震計で波形が記録されているのは、現時点で、2012年1月30日3時18分の地震（M4.9）、2月9日12時55分の地震（M4.6）、5月14日12時36分の地震（M4.7）の3地震であり、本報告ではこれらの地震に対して検証を行う。なお、震源位置はすべて日向灘である。

評価対象の3地震に対し、IDW法とKRIGING法（共分散関数は指数関数型）の最適なパラメータの検証を行った。ここでは、設置地震計で観測された波形データを正解値として、観測値と推定値の誤差の二乗平均平方根（以下、誤差RMSと呼ぶ）が最小となるようパラメータを決定している。誤差RMSの一例として各手法の計測震度の結果を示すと、距離減衰法は0.87、IDW法は0.77、KRIGING法は0.88となり、IDW法の誤差RMSが最も低くなった。IDW法とKRIGING法の精度を比較した既往の研究では、観測点の配置状況が密な場合にはIDW法、粗な場合にはKRIGING法の方が適していることが報告されている<sup>22)</sup>が、本検討の結果ではIDW法が最も高精度となった。なお、評価対象が違う場合や、使用する公的地震観測点などが変わった場合には、ここで求めた最

適パラメータや推定結果の精度も変わることが考えられるため、運用システムとして用いる場合には慎重な検討が必要であると言える。

最適なパラメータを入力した際のIDW法による地震動の面的な推定結果(2012年1月30日の地震)を図5に示す。

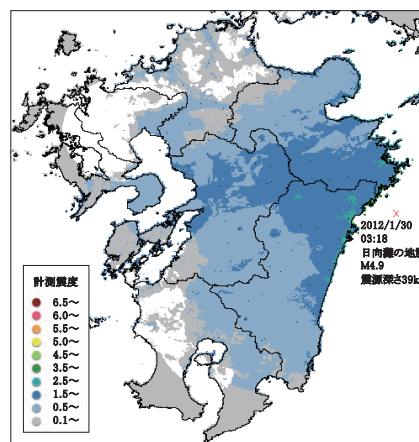


図5 計測震度の面的推定結果の例

評価対象の3地震に対し、地震計による実測地震動とプロトタイプシステムによる推定地震動の計測震度の比較結果を図6に示す。この図によると、実測値に比べ推定値の方が過大となっている場合が多いが、実測の計測震度が大きくなるに従い、推定値は実測値に近づいていくことが認められる。ここで使用する距離減衰式では、中規模程度以上の地震データを用いて係数を決定しており、小規模地震はやや大きめの地震動を推定する傾向になると考えられる。KRIGING法でも、観測箇所以外の推定値は距離減衰値に基づくため、系統的な過大評価は距離減衰式の影響を受けている。また、IDW法に関する誤差は、公的な地盤増幅情報と実際の特性が異なっていることが主な原因と考えられる。

図7には、2012年1月30日の地震において、キロ程に対する推定と実測の計測震度の比較を示す。この図より、各推定手法ともラーメン高架橋地点では推定値が実測値よりも大きくなっていることが分かる。これに関しても先に述べた通り、ラーメン高架橋地点の地震計設置位置における公的な地盤増幅情報が、実際の特性とは異なっていることが原因に挙げられる。ここでは、実際の地盤増幅に対

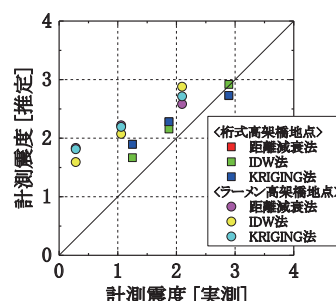


図6 実測と推定の計測震度比較による精度検証

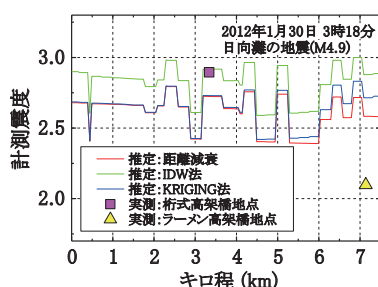


図7 キロ程に対する推定と実測の計測震度比較

して公的機関の地盤増幅度が大きい可能性が指摘される。  
 このように、公的機関の地盤増幅情報は地震動を評価したい地点の値を正確に示していない場合があり、必要に応じて常時微動などの実測データに基づいた評価法なども用いる事により、推定精度の向上を図る必要がある。この件に関しては、現在検討を進めているところであり、機を別にして報告することとしたい。

## 6. おわりに

地震発生後に列車の運転が停止された際の再開判断を支援し、安全確認をよりの確かかつ効率的に実施することを目的として、従来の鉄道事業者のみの地震計情報だけでなく、公的な地震情報を活用した早期運転再開支援システムを試作した。本システムを活用することにより、精度の高い地震動推定や構造物被害推定を行うことが可能となり、安全確認の範囲や優先順位を効果的に決めることができると考えられる。

なお、本研究は国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

## 謝辞

試作システムは、気象庁や防災科研の震源情報、防災科研の地震波形データを利用するものです。また、距離減衰式検討の断層パラメータには名古屋大学の山中佳子准教授の公開情報を使用しました。記して感謝致します。

## 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) (独) 防災科学技術研究所，強震観測網 (K-NET, KiK-net) : <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 3) (独) 防災科学技術研究所，高感度地震観測網 (Hi-net) : <http://www.hinet.bosai.go.jp/>
- 4) 福島美光：断層近傍まで適用可能な最大加速度の距離減衰式の導出と改訂，清水建設研究報告，第63号，pp.75-88，1996
- 5) 司宏俊，翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論

文集，第523号，pp.63-70，1999

- 6) 片岡正次郎，佐藤智美，松本俊輔，日下部毅明：短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式，土木学会論文集 A，Vol.62，No.4，pp.740-757，2006
- 7) 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，Vol.19，No.10，pp.11-16，2005
- 8) 鈴木博人，島村誠：地震時運転規制方法の研究，JR EAST Technical Review，No.3，pp.53-60，2003
- 9) 山中佳子：NGY 地震学ノート，[http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/sanchu/Seismo\\_Note/](http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/)
- 10) (独) 防災科学技術研究所，地震ハザードステーション (J-SHIS) : <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 11) Midorikawa, S., Matsuoka, M. and Sakugawa, K. : Site Effects on Strong-Motion Records Observed During the 1987 Chiba-ken-toho-oki, Japan Earthquake, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.E085-E090，1994
- 12) 芦谷公稔，佐藤新二，岩田直泰，是永将宏，中村洋光：鉄道の地震警報システムにおける緊急地震速報の活用，物理探査，第60巻，第5号，pp.387-397，2007
- 13) 気象庁地震火山部：緊急地震速報の概要や処理手法に関する技術的参考資料，2008
- 14) 山本俊六，堀内茂木，中村洋光，呉長江：緊急地震速報における震度マグニチュードの有効性，物理探査，第60巻，第5号，pp.407-417，2007
- 15) 是永将宏，岩田直泰，山本俊六，野田俊太，下野五月，小野友也：早期地震情報の利用を念頭に置いた距離減衰式の提案，土木学会第66回年次学術講演会 (CD-ROM)，I-481，pp.961-962，2011
- 16) 村石尚，岡田勝也：アメダス補完法による斜面災害地雨量の推定方法，鉄道総研報告，Vol.2，No.8，pp.31-38，1988
- 17) 山崎文雄，大西淳一，田山聡，高野辰雄：高速道路構造物に対する地震被害推定式の提案，第10回日本地震工学シンポジウム，論文番号658，pp.3491-3496，1998
- 18) Hans Wackernagel 原著 (地球統計学研究委員会 訳編 / 青木謙治 監訳) : 地球統計学，森北出版，2003
- 19) 室野剛隆，芦谷公稔：早期被害予測のための鉄道構造物の地震被害ランク推定手法の開発，鉄道総研報告，Vol.16，No.8，pp.7-12，2002
- 20) 室野剛隆，野上雄太，宮本岳史：簡易な指標を用いた構造物および走行車両の地震被害予測法の提案，土木学会論文集 A，Vol.66，No.3，pp.535-546，2010
- 21) 伊藤賀章，岩田直泰，山本俊六，是永将宏，野田俊太：常時微動による地盤・構造物連成系の地震時挙動の把握，日本地震工学会・大会 - 2011 梗概集，128-129
- 22) 末富岩雄，後藤洋三，坪田正紀，栗山利男：地震動強度指標の空間補間手法の実用性から見た一検討，土木学会第59回年次学術講演会 (CD-ROM)，I-788，pp.1573-1574，2004