

## 鉄道用地震情報公開システムの開発

山本 俊六\*      岩田 直泰\*  
坂井 公俊\*\*    岡本 京祐\*

### Development of an Earthquake Information Distribution System for Railways

Shunroku YAMAMOTO      Naoyasu IWATA  
Kimitoshi SAKAI      Kyosuke OKAMOTO

An earthquake information distribution system for railways is developed in order to rapidly inform railway companies of the shaking distribution along the rail after large earthquakes. This information can be used for effective initial responses such as narrowing down the inspection area or estimating structure damage just after shakings. The system outputs information on the shaking distribution of the earthquake by using the earthquake early warning information from Japan Meteorological Agency and seismic data recorded by K-NET operated by National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. The shaking distribution is scaled by filtered acceleration, spectrum intensity, and shaking intensity as is usually utilized in railway companies. Amplification factors and the effect of soil nonlinearity are considered in the system when the shaking distribution is analyzed. The evaluation of the system by using the on- and off-line data demonstrates that the estimation error in shaking intensity is 0.61 and the information is distributed 8-9 minutes after the earthquakes on average.

キーワード：鉄道用地震情報公開システム，運転再開，被害復旧，揺れ，空間分布，増幅率

### 1. はじめに

鉄道では、地震発生時に停止した運行を再開するために、鉄道事業者が設置した地震計による測定値や気象庁などの公的機関が発表した揺れの実測情報などを使用したり、参考にしたりすることが多い<sup>1)</sup>。地震観測は広がりを持った空間の中で離散的に行われているので、実測された揺れのデータは、通常周辺の代表値として扱われる。一方、地震の揺れは、震源の特性、伝播経路、地表の増幅特性等の影響を複雑に受け、短い距離間隔でも大きく変化するケースがあることが知られている。鉄道沿線の揺れの変化が詳細に分かれれば、地震による鉄道の被害の有無や程度をより精度良く推定することができる。これにより、地震後の点検や初動体制構築を効果的に実施できるようになり、早期の運転再開や復旧支援に寄与できる可能性がある<sup>2) 3)</sup>。

揺れの詳細な空間分布を推定するためには、地震計の設置密度を高くして、多くの実測データを利用することが望ましい。また、震源に関わる情報や場所によって変化する表層地盤の増幅特性を考慮することにより、適切に空間補間することが重要である。地震直後に活用できる公的な地震計の実測データとして防災科学技術研究

所（以下、防災科研）の K-NET<sup>4)</sup> のデータが存在する。K-NET は 1996 年以降、全国に整備された約 1000 点の強震計ネットワークで、約 20 ～ 30km 程度の空間間隔で地震計が展開されている。各地震計のデータは、地震発生後概ね 6 分程度で、防災科研のホームページからダウンロード可能である。また、地震直後に利用できる震源の情報として気象庁の公開する緊急地震速報<sup>5)</sup> が挙げられる。緊急地震速報は、気象庁や防災科研が全国に展開する約 1000 点の地震計のリアルタイムデータに基づき、地震発生直後に震源、マグニチュード、発生時刻などを推定し、即時的に配信される情報である。2007 年より本運用されており、この情報により、発生した地震の概要を早期に把握することができる。さらに、表層地盤の増幅特性に関する情報として、鉄道総合技術研究所（以下、鉄道総研）が整備したデータセットが存在する<sup>6)</sup>。このデータセットは、日本全国について 250m 間隔で地盤の固有周期を簡易評価したものである。後述するように、地盤の固有周期の情報と基盤面の地震動の振幅より増幅率の評価が可能となる。

以上のニーズと利用可能な各種データの存在を背景に、公的な地震情報を活用して、地震発生直後に地震の揺れの空間分布を精度良く推定し、速やかに公開する鉄道用地震情報公開システムを開発した。このシステムは、リアルタイム情報（K-NET データ、緊急地震速報）お

\* 鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室

\*\* 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室

特集：地震防災・耐震技術

よび事前に準備したデータセット（鉄道総研の地盤固有周期データセット）を活用して、人の手を介さず揺れの空間分布を緯度経度 0.015 度間隔で自動推定するものである。揺れの空間分布を表示する際に用いる地震動指標は、鉄道事業者が業務で利用する機会の多い警報用最大加速度、SI 値、計測震度の 3 種類である。また、空間分布の情報とともに、K-NET 観測点における実測データの分析も行う。これらの情報はホームページで公開され、鉄道用地震情報公開システムの登録ユーザは、ホームページ更新の案内をメールで受け取ることができる。

本システムは、2015 年 6 月より運用されている。ここでは、このシステムの処理概要について述べた後、システムの運用状況と揺れの推定精度などに関して報告する。

## 2. システムの処理概要

### 2.1 システムの処理フロー

はじめにこのシステムの処理フローを図 1 に示す。システムの処理は、大きく①地震情報収集処理、②揺れの空間分布推定処理、③推定結果公開処理、④情報データベース作成処理に分類できる。これらの概要を以下に示す。

#### ①地震情報収集処理

本システムは気象庁から配信される緊急地震速報の最終報を受信し、「揺れの空間分布推定処理」開始条件を満たす場合に処理を開始する。処理開始条件は、緊急地震速報による予測震度が 3 以上（予測震度未定義の場合はマグニチュード 7.5 以上）の場合である。次に、K-NET の即時データが公開されるまでの所定の待ち時間ののち、データの自動取得を行う。自動取得した

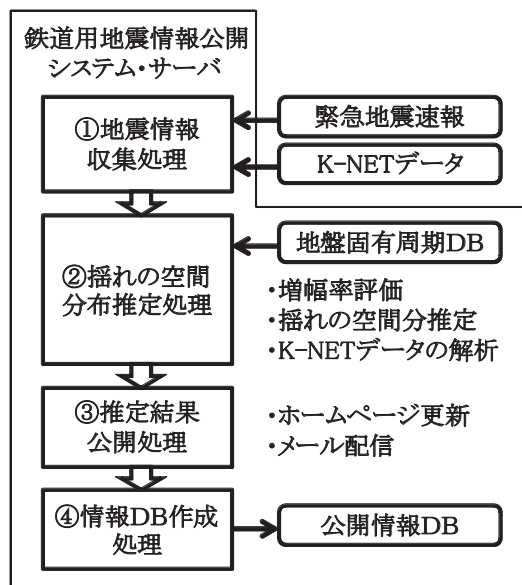


図 1 鉄道用地震情報公開システムの処理フロー

K-NET データの観測点数が 5 点以下の場合は、この地震の影響度は低いと見なし、ここで処理を中止する。

#### ②揺れの空間分布推定処理

自動収集した K-NET データと緊急地震速報の最終報、また事前に用意した地盤固有周期データセットに基づき、地盤の増幅率の評価と空間補間をし、揺れの空間分布を推定する。また、併せて K-NET データ（大きな揺れの観測された上位 50 点）の波形解析を行う。

#### ③推定結果公開処理

上記の解析に結果に基づき、図表を自動作成し、ホームページの更新を行う。次に、登録ユーザに対してメール配信をし、ホームページの更新を連絡する。

#### ④情報データベース作成処理

公開した情報について本システムのデータベースへの登録を行う。各地震情報は、地震の発生日時、マグニチュード、地震動指標などにより検索可能なように整理・保存される。

以上の処理は、鉄道総研のサーバ上で実施される。

### 2.2 揺れの空間分布推定処理

地震の揺れの空間分布を精度良く求めるためには、地震計の設置密度を高めるとともに、地盤増幅の特性を空間的に密に評価する必要がある。また、非常に大きな揺れを対象にして推定を行う際には、地盤の塑性化の影響も考慮できることが望ましい。

そこで本システムでは、鉄道総研の整備した高密度（250m 間隔）の地盤固有周期データセット（図 2）<sup>6)</sup> と地盤の非線形挙動を簡易に考慮可能な増幅率評価手法<sup>7)</sup> を組み合わせることにより、地盤の塑性化を考慮した上での地震動の空間分布を評価することとした。

本システムで用いている地盤増幅率は、次式で表現される。

$$Z_A, Z_V = \sqrt{\frac{1 + 4h^2 \left\{ \alpha \left( T_g / T_b \right)^\beta \right\}^2}{\left( 1 - \left\{ \alpha \left( T_g / T_b \right)^\beta \right\}^2 \right)^2 + 4h^2 \left\{ \alpha \left( T_g / T_b \right)^\beta \right\}^2}} \quad (1)$$

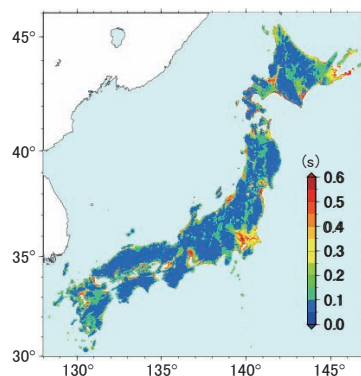


図 2 全国の地盤固有周期  $T_g$  の推定結果<sup>6)</sup>

ここで、 $Z_A$ ：加速度増幅率、 $Z_V$ ：速度増幅率、 $T_g$ ：地盤の固有周期、 $T_b$ ：地震動の卓越周期 ( $=2\pi PBA/PBV$ )、 $PBA$ ：基盤位置での最大加速度、 $PBV$ ：基盤位置での最大速度、 $h, \alpha, \beta$ ：入力レベルに応じて変化する係数、である。本式によって表現される増幅率の例を図3に示すが、入力レベルや地盤と地震動の周期比の変化によって、増幅率が変化しており、本手法を用いることで、地盤の塑性化、共振といった現象を考慮した上での地震動分布を瞬時に評価することが可能となる。

揺れの空間補間は以下のような流れ（図4）で実施する。①地表で観測された K-NET の波形データより観測点における最大加速度と最大速度を計算する。②前述の増幅率評価手法で求めた増幅率を用いて、観測点直下の基盤面における最大加速度と最大速度を計算する。さらに基盤面上、緯度経度 0.015 度グリッドで最大加速度と最大速度の空間補間を行う。③再び同様の増幅率評価手法を用いて、基盤面グリッド上の最大加速度と最大速度から、直上の地表グリッドの最大加速度と最大速度を

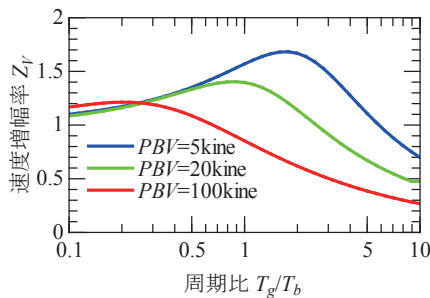


図3 本システムで使用する地盤増幅率<sup>7)</sup>の評価事例

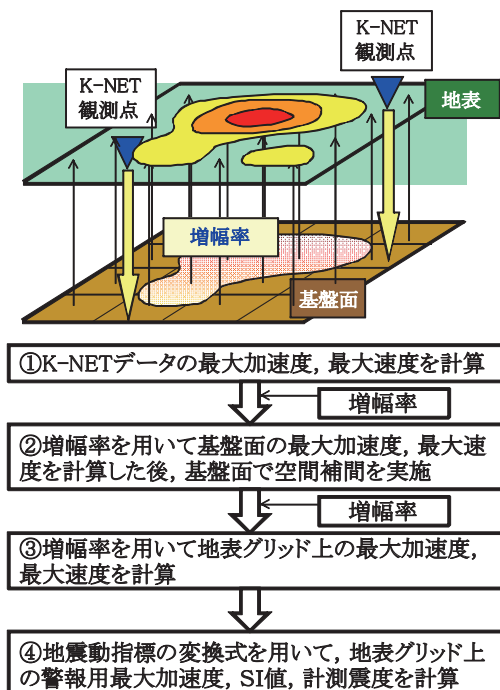


図4 揺れの空間分布推定のフロー

求める。④各グリッド上で、地震動指標の変換式を用いて最大加速度と最大速度から警報用最大加速度、SI 値、計測震度を計算する。

なお、②の空間補間の際は、最小曲率法<sup>8)</sup>を用いている。この補間法はデータ領域外側の値の推定もできる利点を持つ。また、④の地震動指標変換式として式(2)～式(4)を用いた。これらの式は、1996年～2011年までに発生した195地震（マグニチュード4.5～9.0）において K-NET（東北地方太平洋沖地震のみ KiK-net を含む）で観測された10171記録を用いて回帰したものである。

$$\log_{10}PGA_{JR}=0.496*\log_{10}(PGA*PGV)+0.470 \quad (2)$$

$$\log_{10}SI=0.974*\log_{10}PGA+0.0566 \quad (3)$$

$$Is=1.005*\log_{10}(PGA*PGV)+1.242 \quad (4)$$

ここで  $PGA_{JR}$  は警報用最大加速度、 $SI$  は SI 値、 $Is$  は計測震度を示す。また、 $PGA$ 、 $PGV$  はそれぞれ最大加速度、最大速度である。

以上の手続きにより、約 20～30km 間隔で設置された K-NET データから緯度経度 0.015 度グリッド（約 1～2km のグリッド）間隔で警報用最大加速度、SI 値、計測震度の分布を推定する。

### 2.3 K-NET データの解析

本システムでは、揺れの空間分布推定以外に、K-NET の波形データの分析も併せて行う。具体的には、加速度フーリエスペクトル、弾性加速度応答スペクトル、所要降伏震度スペクトルなどの計算を行う。このうち、所要降伏震度スペクトルは鉄道構造物等設計標準・解説耐震設計<sup>9)</sup>で規定されたスペクトルと比較できるように表示されており、対象とする地震動が構造物に与える影響を把握することができる。また、観測された最大加速度と既往の距離減衰式<sup>10)</sup>との比較も実施する。

以上の情報は、地震動の特性を把握する上で重要な情報と考える。

### 2.4 公開画面

2.2, 2.3 に記述した処理結果は図化され、これに基づきホームページが更新される。また更新のタイミングで鉄道用地震情報公開システムの登録ユーザにメールが送信される。ユーザはメールに記載された URL をクリックすることにより、更新されたホームページにアクセスできる。

ホームページの画面表示の例を図5に示す。画面の左側には推定された揺れの空間分布図が表示される。空間分布図は、地震動指標（警報用最大加速度、SI 値、計測震度）や縮尺（400×400km, 100×100km）によって切り替え可能である。図には鉄道の路線が示されてお

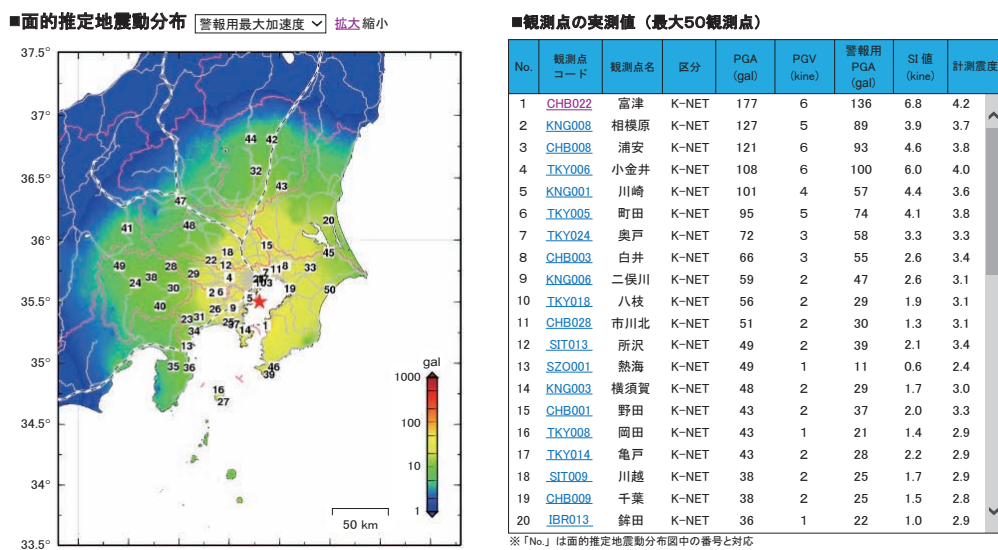


図5 鉄道用地震情報公開システムのホームページ画面例（2015年9月12日東京湾の地震の例）

り、鉄道事業者の観点から揺れの状況を確認することが可能である。一方、画面の右側にはK-NETで観測された地震動指標の観測値が示される。観測値は警報用最大加速度の大きな順にリストとして示される。また、表内の観測点コードをクリックすると各観測点の観測データに関する詳細な情報が確認できるページにリンクされる。このページには、加速度波形、加速度フーリエスペクトル、弾性加速度応答スペクトル、距離減衰式との関係、所要降伏震度スペクトルが表示される。

過去のデータを確認する場合は、ページ上部の「地震検索」タグをクリックすると検索ページに移動する。このページでは、地震の発生時刻、マグニチュード、地震動指標の大きさなどから、過去のデータを検索し、再表示することが可能である。

### 3. システムの運用状況と精度検証

#### 3.1 運用状況

本システムは2015年6月1日より実運用を開始し、2016年1月末までに128の地震に対して情報を公開した。図6に月別の情報公開頻度を示す。この期間における情報公開数は一カ月あたり11～24地震であり、月平均約16地震となる。

また、図7にこの期間に情報公開された地震のマグニチュードの頻度分布を示す。なお、ここで用いたマグニチュードは緊急地震速報最終報で示された値である。図より、マグニチュード4～5程度の地震の情報公開頻度が高いことが分かる。これは、マグニチュードの小さな地震はシステムの起動条件を満たさず、マグニチュードの大きな地震は発生頻度が低いことによる、必然的な結果と考える。

地震が発生してから情報を提供するまでの時間は、約8～9分である。K-NETデータのダウンロード時間も含め、鉄道総研サーバ内での揺れの空間分布推定処理や推定結果公開処理に要する時間は1分以内である。したがって約7～8分は公的な地震情報が発表されるのを待機する時間となる。今後これらの情報が早く発表されることになれば、より早期の情報提供が可能となる。

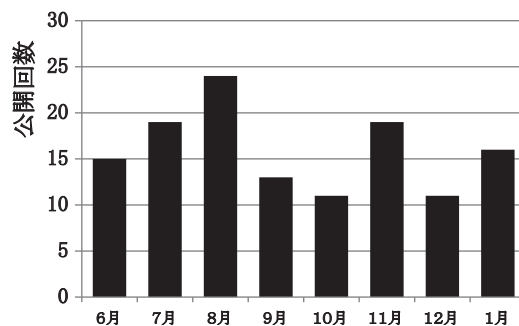


図6 月別の地震情報公開回数（2015年6月～2016年1月）

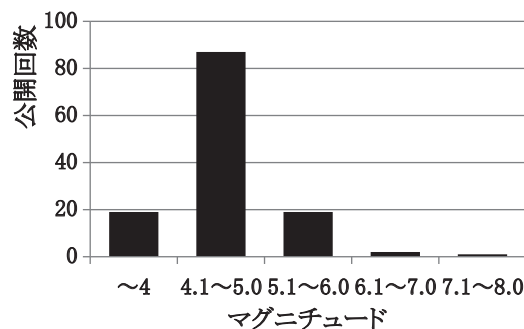


図7 マグニチュード別の地震情報公開回数（2015年6月～2016年1月）

### 3.2 検証用データ

本システムを活用する上で、揺れの推定精度の情報は重要と考える。一方、運用開始以降、現在までに蓄積されたデータのみではデータ数も限られ、大きな揺れを記録したケースが少ないため、適切な評価が難しい。したがって、ここでは、過去に発生した様々な地震を対象にオフラインでシステムを稼働させ、その推定値と地震計による実測値の比較を行うこととした。実測値として、K-NETとは独立して設置された防災科学技術研究所のKiK-net<sup>4)</sup>データを用いた。システムはK-NETのデータのみを使って推定をしているため、この検証は一種のブラインドテストと呼べる。検証用の推定値として、KiK-net地点に最も近いグリッド上の値を用いる。対象とした地震は2000年～2015年までに発生した32地震(マグニチュード4.8～9.0)である。この32地震には鉄道に被害を与えた地震も含まれている。表1に使用した地震のリストを示す。これらの地震の際にKiK-netで観測された3791波形を検証用データとした。

### 3.3 検証結果と考察

3791の波形データを対象として、本システムによる推定値(K-NETに基づく推定値)とKiK-netの実測値について計測震度を指標として比較したものを図8に示す。図より、低い震度域において推定値がばらつく傾向を示すものの、概ね推定値と実測値に高い相関があることが確認できる。全データにおける誤差の平均は二乗平均平方根(RMS)で0.61である。現在、緊急地震速報における震度予測的中率算出の目安が計測震度で±1以内であること<sup>11)</sup>、距離減衰式と微地形区分から経験的に求めた増幅率を用いた震度推定誤差が0.68であると言う報告<sup>12)</sup>などを考慮すると、このシステムによる推定値は、一定の精度を有していると考えられる。

以下では、低い震度域における推定値のばらつきに対して考察し、改善方法を検討する。一般的に、地震の揺れは距離減衰に従い震源から離れるにつれて小さくなる傾向がある。したがって、低震度域は空間的に地震計データの存在する領域の境界付近に位置すると考えられる。本システムで用いている空間補間法である最小曲率法は、データを滑らかに繋ぐ曲面を求める方法であり、データ領域外側の推定(外挿)が可能である半面、データ領域境界付近から外側では実測データによる拘束が不十分になり、その結果、データ領域境界部(低震度域)の推定がやや不安定になるものと推測した。そこで現在使用している最小曲率法に比べ、データ領域境界付近の拘束を明確に設けることのできる逆距離加重法を補間法として導入した。同一のデータセットを対象として、逆距離加重法による推定値と実測値を比較した結果を図9に示す。この際、逆距離加重法で用いる探索距離は40kmと

している。図より低震度領域ではやや過大評価の傾向を示すもののばらつきが低減されることが分かり、低震度領域の推定値ばらつきの一因が、空間補間法にあると言う推測を裏付ける結果を得た。なお、逆距離加重法を導入することにより、誤差の平均は0.58(RMS)となり5%の精度向上が示された。

推定精度低下の原因としては、補間法以外に地盤の増幅率や地震動指標変換の不正確さやそれらが原理的に持

表1 精度検証に用いた32地震

発生日時	地震名	気象庁 マグニチュード
2000/6/7	石川県西方沖	6.2
2000/10/6	鳥取県西部	7.3
2001/3/24	安芸灘	6.7
2001/8/25	京都府南部	5.4
2003/5/26	宮城県沖	7.1
2003/7/26	宮城県中部	6.4
2003/9/26	十勝沖	8.0
2003/10/15	東京湾	5.1
2004/9/5	三重県南東沖	7.4
2004/10/23	新潟県中越地方	6.8
2004/11/29	釧路沖	7.1
2004/12/14	留萌地方南部	6.1
2005/3/20	福岡県北西沖	7.0
2005/7/23	千葉県北西部	6.0
2005/8/16	宮城県沖	7.2
2005/12/24	愛知県西部	4.8
2006/6/12	大分県西部	6.2
2007/3/25	能登半島沖	6.9
2007/7/16	新潟県上中越沖	6.8
2008/6/14	岩手県内陸南部	7.2
2009/8/11	駿河湾	6.5
2011/3/9	三陸沖	7.3
2011/3/11	三陸沖	9.0
2011/3/12	長野県北部	6.7
2011/3/15	静岡県東部	6.4
2011/4/7	宮城県沖	7.2
2012/3/14	千葉県東方沖	6.1
2012/12/7	三陸沖	7.3
2013/4/13	淡路島付近	6.3
2014/3/14	伊予灘	6.2
2014/11/22	長野県北部	6.7
2015/5/30	小笠原諸島西方沖	8.1

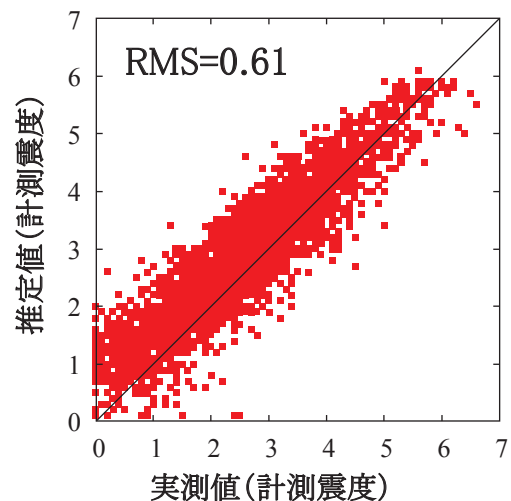


図8 本システムによる推定値と実測値の比較(最小曲率法による補間)

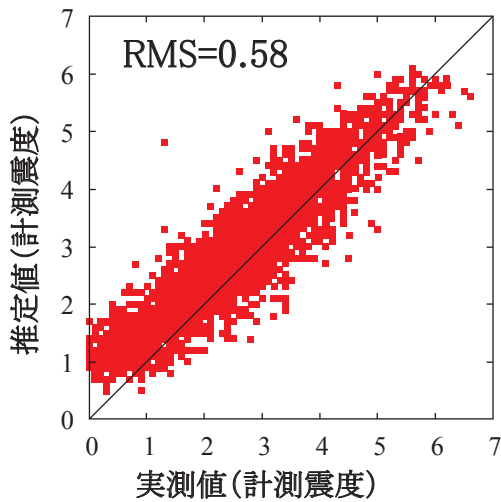


図9 逆距離加重法を使用した場合の推定値と実測値の比較

つばらつきなどの影響も考えられる。今後はこれらの検討を踏まえて、推定精度のさらなる向上を図る予定である。

#### 4. おわりに

ここでは、2015年6月より運用の始まった鉄道用地震情報公開システムに関して、処理の概要、運用状況、揺れの推定精度の検証結果などを報告した。

現在本システムは、緊急地震速報やK-NETの波形データなど公的な地震情報と、全国を対象として整備された地盤の固有周期データに基づき揺れの推定を行っている。今後はこの基本システムの増強や精度向上とともに、個別鉄道事業者に特化した情報提供の仕組みも構築したい。後者に関しては、キロ程に沿った揺れの分布情報の提供のみならず、鉄道事業者が管理する沿線の地震計データ、地盤データなどピンポイントの情報を併せて扱うことにより、より信頼性の高い推定情報を提供することを考えたい。また、鉄道事業者の所有する構造物のデータを利用することにより、構造物の被害予測を行い、即時的にその情報を提供することも視野に入れる。

本システムのユーザ登録は、[eqinfo-request@rtri.or.jp](mailto:eqinfo-request@rtri.or.jp)に申請することにより可能である。今後も鉄道事業者の効果的な運転再開や早期の復旧支援に役立つ情報の提供を目指して、ニーズに応えるシステム開発を進め、安定した保守・運用を実施する計画である。

#### 謝 辞

本システムの精度検証データ、入力情報として防災科

学技術研究所のK-NET, KiK-netのデータ、気象庁の緊急地震速報を使用しました。また、一部の図の作成にはThe Generic Mapping Toolsを使用しています。記して感謝いたします。

#### 文 献

- 1) 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
- 2) 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, pp.1-33, 1996
- 3) 岩田直泰, 山本俊六, 是永将宏, 野田俊太, 伊藤賀章: 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, Vol.26, No.9, pp.17-22, 2012
- 4) Okada Y., Kasahara K., Hori S., Obara K., Sekiguchi S., Fujiwara H. and Yamamoto A.: Recent progress of seismic observation networks in Japan -Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net-, Earth Planets Space, Vol.56, pp.15-28, 2004.
- 5) Hoshiya, M., Kamigaichi O., Saito M., Tsukada S., and Hamada N.: Earthquake early warning starts nationwide in Japan, Eos Trans. AGU, Vol.89, p.73, 2008.
- 6) 坂井公俊, 田中浩平, 室野剛隆, 加藤尚: 微地形区分を用いた全国の表層地盤固有周期の簡易評価, 土木学会第70回年次学術講演会, 2015
- 7) 野上雄太, 坂井公俊, 室野剛隆, 盛川仁: 表層地盤と入力波の周期特性を考慮した表層地盤での地震増幅率の評価, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.68, No.1, pp.191-201, 2012
- 8) Smith W.H.F. and Wessel P.: Gridding with continuous curvature splines in tension, Geophysics, Vol.55, No.3, pp.293-305, 1990.
- 9) 国土交通省鉄道局: 鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計, 丸善出版, 2012
- 10) 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, I-481, pp.961-962, 2011
- 11) 気象庁: 緊急地震速報の精度検証について, 緊急地震速報評価・改善検討会 (第6回) 資料, 2015 (<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/study-panel/eeew-hyoka/06/shiryoku8.pdf>)
- 12) 岩切一宏: 距離減衰式に基づく経験的なサイト増幅特性を用いた緊急地震速報の震度予測の精度向上, 地震研究所研究集会「揺れる直前の地震動予測: さらなる迅速化と精度の向上」, 2010 (<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/viewdoc/yure2010/10/iwakiri.pdf>)