

鉄道沿線地震動推定に向けた観測値と推定値の 組み合わせ手法の提案

岩田 直泰* 森脇 美沙* 野田 俊太* 松林 弘智** 山本 俊六**

Improving the accuracy of Seismic Ground Motion Estimation along Railways
by Integrating Observed and Estimated Data

Naoyasu IWATA Misa MORIWAKI Shunta NODA
Hirotoshi MATSUBAYASHI Shunroku YAMAMOTO

In the event of an occurrence of earthquake, railway companies suspend trains as soon as possible, considering the seismic intensity. Subsequently, if necessary, they inspect railway facilities based on seismic ground motion (SGM), which is spatially discrete, observed along the railways. In some cases, time required for safety inspections may be considerable depending on the circumstances. Estimating spatially continuous SGMs is one of the key technologies for reducing inspection time, since the early resumption of train operations after earthquakes has become a significant issue recently. In this study, we first describe differences in SGM between measured data and true data in conventional systems and then propose a method to estimate spatially continuous SGMs by integrating observed data and estimated data. Furthermore, a case study is presented in which the proposed method is employed to estimate SGMs along a virtual railway, assuming additional data observed by seismometers along a railway.

キーワード：地震時列車運転規制，早期運転再開，面的地震動，鉄道沿線地震動

1. はじめに

鉄道における地震防災対策は、構造物の耐震設計および耐震補強などのハード対策¹⁾が基本となる。また近年、軌道や車両に関わるハード対策も積極的に導入されている。これらの対策に加え、地震情報をリアルタイムに活用したソフト対策も防災や減災に役立てられている。例えば、鉄道事業者が設置した地震計や気象庁の緊急地震速報などの情報を用いた早期地震警報による自動列車停止システム^{例えは2)}、および地震計の記録した値を基準にした点検や運転再開の判断^{例えは3)}などは、地震時の列車運転規制という形でソフト対策として適用されている。

地震後における運転再開に関して、一般に沿線に設置された地震計が予め定めた基準値を超過する地震動を観測した場合、予め設定した区間を対象に安全確保に向けた鉄道施設の目視による点検（以下、点検）を実施する。2018年6月18日の大阪府北部の地震（Mj6.1、Mjは気象庁マグニチュード）では、点検が比較的広範囲に発令されたことから、運転停止から再開までに多大な時間を要した事例が報告されている⁴⁾。このように、地震が発生した位置や規模によっては運転再開までの列車の停止

時間が長くなることが課題となっており、地震時における鉄道運行の安定性向上という観点において、点検区間の適正化に向けた判断を支援する情報の提供が望まれている。加えて、駅間に停止した列車の次駅までの移動についても、乗客の列車内閉じ込めからの早期救済に向けて、その判断を支援する情報の提供も求められている。

上述の通り、鉄道の地震時における運転規制の実務では沿線に設置された地震計の観測値が使われるが、近年は面的な推定地震動情報が利用できるようになった。面的な推定地震動情報は、点検区間の適正化に資するのみならず、地震計間の大きな揺れの見逃し防止にも役立つものである。このようなリアルタイムに活用可能な面的地震動情報は、近年、鉄道の実務において導入が進みつつある^{5) 6)}ものの、鉄道の地震後の運転再開判断において、推定データの実務使用は十分には進んでいない。これは、地震動の推定誤差と現行の地震時列車運転規制における地震動の取り扱い上の誤差の関係が整理されておらず、推定誤差の扱いが定まっていないことが一因であると考えられる。本研究では、現行の地震時列車運転規制における地震動の取り扱い上の誤差と、面的地震動の演算による推定誤差の関係を整理した上で、推定データの運転規制への適用に向けて、実務的な観点から推定誤差の扱いの考え方を示す。さらに、地震動推定に対し観測データを効果的に適用できる範囲を統計的に明らかに

* 鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室

** 株式会社 ANET

することにより、観測値と推定値を組み合わせた、実務的な面的地震動の推定手法を提案する。その面的地震動から路線に沿って線状に地震動を抽出することにより沿線の地震動が把握できる。最後に、沿線に設置された鉄道事業者の地震計データの導入を想定した、提案手法による地震動推定の事例を仮定の鉄道路線に対して示す。

2. 沿線の地震計情報の取り扱い上の誤差

2.1 地震時における列車運転規制の概要

先に述べた地震時における列車運転規制に対して、鉄道事業者は沿線に概ね一定間隔で地震計（以下、沿線検知点）を設置しており、一般に列車停止後の点検の判断は沿線検知点の観測値に基づき行われる。図1の通り、ある沿線検知点に対して隣の沿線検知点とのおおよそ中間地点を境界とする受け持ち区間が定められている。ある沿線検知点の観測地震動が運転規制基準値を超過した場合、点検や徐行などの運転規制はその沿線検知点の受け持ち区間に対して発令される。沿線検知点の設置間隔は、在来線は一般的に40km^{（例えば7）}であり、新幹線でも10から20km^{（例えば8）}である。一旦、運転規制が発令されると、その受け持ち区間を目視により点検する必要が生じるため運転再開までに多大な時間を要する場合がある。

現行の地震時列車運転規制の特徴は、図1の水色実線の通り、沿線検知点の観測値をその沿線検知点の受け持ち区間において一律として取り扱うことにある。一方、実際の地震動は図1に赤色実線で示す通り、震源までの距離や表層地盤などの影響を受けて変動しており、現行の取り扱い上の地震動（水色実線）と実際の地震動（赤色実線）には差異がある。また、沿線地震動を推定した場合、図1の青色破線で示す推定地震動は、実際の地震動（赤色実線）とは差異が生じる場合がある。

本研究では、受け持ち区間において一律とする現行の地震時列車運転規制における地震動の取り扱い上の誤差を「取扱誤差」、面的地震動推定の誤差を「推定誤差」と定義して、それらの関係について分析する。

2.2 検討に用いた地震

取扱誤差と推定誤差の関係の整理やそれに続く推定誤差の扱いの考え方の提案に向けて、本研究では鉄道への影響が懸念される地震として、比較的規模が大きく、震源深さが60km程度以下の地震を検討に用いた。本研究で対象とする81地震の震央位置の分布を図2に、マグニチュード（2011年東北地方太平洋沖地震はモーメントマグニチュード、それ以外は気象庁マグニチュード）と震源深さの関係を図3に示す。図に示す凡例の通り、円の大きさはマグニチュードに対応し、色は震源深さに対応している。図3によると、検討に用いた地震におい

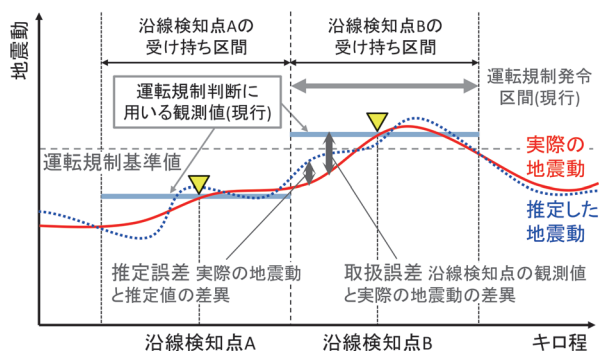


図1 地震時における列車運転規制の概要

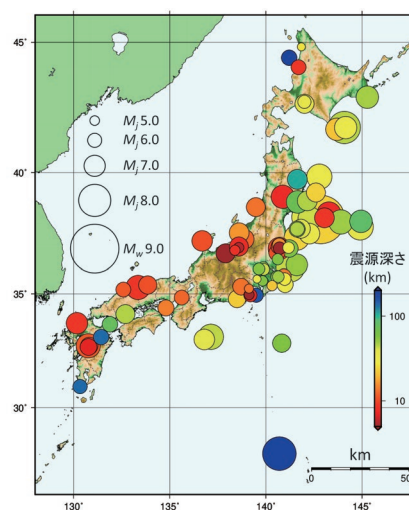


図2 対象地震の震央位置の分布

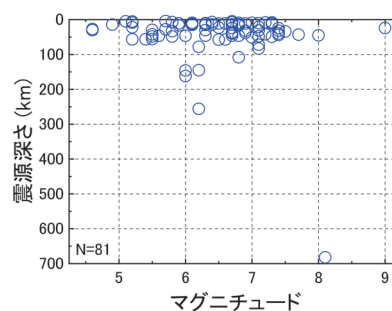


図3 対象地震のマグニチュードと震源深さの関係

て震源深さが際立って深い地震が1つあるものの、それ以外は60km程度以下の地震が多く、マグニチュードは6.5以上の地震が半数程度（全体の53%）である。なお、マグニチュードが8.0以上の地震として、十勝沖の地震（2003年）、三陸沖の地震（2011年）、小笠原諸島西方沖の地震（2015年）が本研究の検討に含まれている。

2.3 地震時列車運転規制における地震動の取扱誤差

2.1節で述べた通り、現行の地震時列車運転規制は取扱誤差を有している。本節では、観測された地震動デー

タに基づき取扱誤差を定量的に評価する。取扱誤差の評価には、国立研究開発法人 防災科学技術研究所（以下、防災科研）の強震観測網（以下、K-NET）および基盤強震観測網（以下、KiK-net）⁹⁾を用い、図4に示す対としたK-NETとKiK-netの離隔距離と同一地震で観測された計測震度差を整理した。

対としたK-NETとKiK-netの組み合わせの内、2.2節で述べた対象地震に対して、離隔距離が40km以内の組み合わせを整理した結果、その数は123,475組となった。対とした組において震源から遠い観測点までの10km区切りの震源距離のヒストグラムを図5に灰色で示す。ここで、遠い地震は鉄道への影響は小さいと考えられることから、地震波形データについて本研究では震源距離が200km以内を評価対象とする。併せて、地震動が小さい場合は地震時列車運転規制では考慮されず点検の実施には影響しないため、本研究では計測震度1.5（震度2）以上を評価対象とする。対とした組において共に震源距離200km以内かつ計測震度1.5以上を選定した結果、

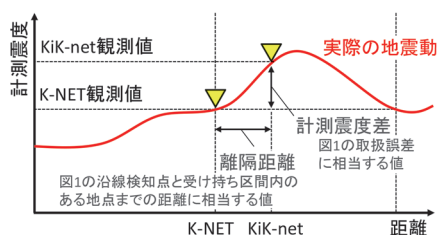


図4 取扱誤差の評価方法

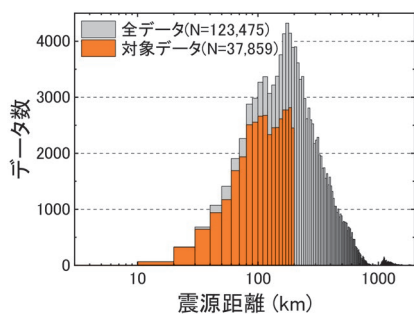


図5 取扱誤差評価データの震源距離ヒストグラム

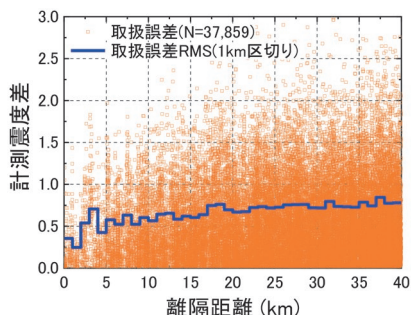


図6 離隔距離と計測震度差の関係

37,859組となり図5にそのヒストグラムを橙色で示す。

なお、鉄道の地震時列車運転規制に用いる地震動指標は、警報用最大加速度¹⁰⁾、SI値¹¹⁾、計測震度¹²⁾が挙げられるが、本研究では気象庁が算出方法を定義した計測震度を対象として検討する。

地震計からの離隔に伴う地震動の差異について、上述した評価対象の37,859組に対する離隔距離と計測震度差の統計的な関係を図6に示す。図6の青色実線は、離隔距離を1kmごとに区切り、各区間の計測震度差のRMS（Root Mean Square、二乗平均平方根）を算出したものである。従ってこの青色実線は、離隔距離に応じた取扱誤差を定量的に示したものと考えることができる。図より、離隔距離が大きくなるほど1km区切りの取扱誤差のRMSは大きく、すなわち2点間の離れが大きい程、地震動の差異は大きくなることが確認される。

3. 面的地震動の推定誤差

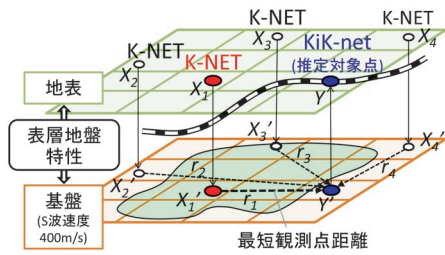
3.1 面的地震動の推定情報を配信するシステムの概要

地震後に地震動の分布を迅速かつ正確に把握することは防災対応において重要であり、現在、複数の公的機関から地震発生後にウェブサイト上に面的地震動の情報が提供される^{例えは¹³⁾}。また、鉄道事業者へリアルタイムに提供される推定沿線地震動情報には、公益財団法人鉄道総合技術研究所（以下、鉄道総研）が防災科研と連携して開発し運用している鉄道地震被害推定情報配信システム（Damage Information System for Earthquake on Railway 以下、DISER）^{14) 15)}によるものがある。

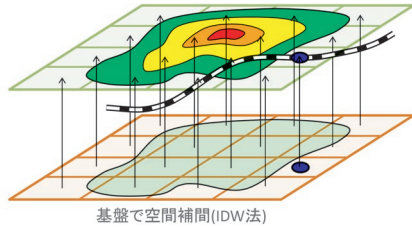
本研究における面的地震動推定は、DISERで用いているK-NETの観測データに基づく空間補間による演算手法¹⁴⁾を適用する。この演算には、観測点から推定対象点までの距離の逆数を重みとする逆距離加重法（以下、IDW法¹⁶⁾）を採用している。なお、図7(a)(b)の通り、IDW法による空間補間はS波速度400m/sの基盤上で行っており、地表の観測値から基盤の地震動を求める際には、鉄道総研が整備した全国の面的な地盤データベース¹⁷⁾を用いる。地盤情報の指標は鉄道の耐震設計に用いられる地盤の固有周期の T_g ¹⁾を用いている。また、各地震動指標に対する表層地盤の地震動増幅特性は、基盤入力地震動および入力地震動と表層地盤の卓越周期比を用いた強震時の非線形性を考慮する手法¹⁸⁾を適用している。

3.2 任意地点における面的地震動の推定誤差

本節では現在の面的地震動の推定精度を統計的に評価するために、同一地点の観測値と推定値の比較により、任意地点の面的地震動推定に対する誤差（以下、推定誤差）を統計的に評価する。面的地震動の演算結果の例（島



(a) 基盤における空間補間の概要



(b) 各メッシュの地表地震動算出の概要

図7 面的地震動推定の概要

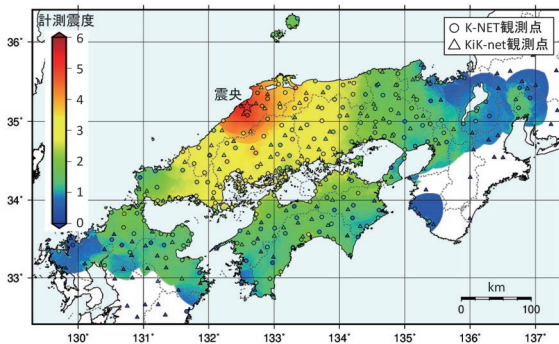


図8 面的地震動の演算結果例

根県西部の地震)として計測震度のカラーマップを図8に示す。地震動は震央から概ね同心円状に減衰しているが、例えば濃尾平野周辺の色合いから確認される通り、表層地盤の影響により平野部の地震動は周囲よりも大きくなっている状況が確認できる。

図7(a)に示した通り、複数のK-NET観測データ(図8中の○印)から評価点とするKiK-net位置の地震動(図8中の△印)を推定し、KiK-net観測データと比較することにより推定精度の評価を行った。KiK-netは地中と地表に地震計が設置されているが、本研究における面的地震動推定は地表を対象としているため、地表の観測データを適用して推定誤差を評価した。

2.2節で述べた対象地震に対して観測値と推定値を抽出した結果、データ数は14,110となった。評価点としたKiK-net観測点までの震源距離10km区切りのヒストグラムを図9に灰色で示す。地震波形データの選定に関して、ここでも2.3節と同様の考えにより、評価点としたKiK-net観測点までの震源距離200km以内、KiK-net

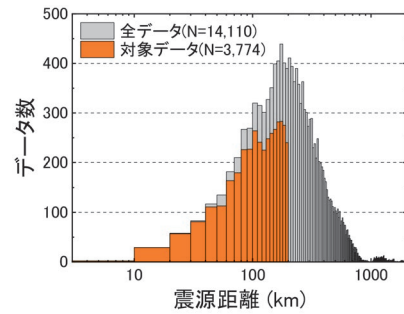


図9 推定誤差評価データの震源距離ヒストグラム

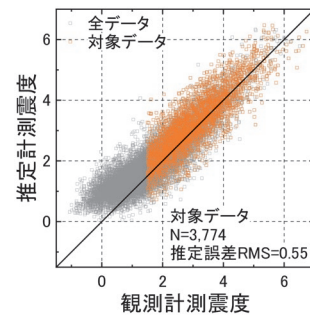


図10 観測値と推定値の比較(計測震度)

観測点データが計測震度1.5以上を選定した結果、3,774データとなった。選定したデータのヒストグラムを図9に、対象データの観測値と推定値の統計的な比較を図10にそれぞれ橙色で示す。図10より計測震度に対する観測値と推定値の関係には正の相関が確認されるが、完全には一致せず、推定誤差を有している。推定誤差の統計値として算出した観測値と推定値の差分のRMS(以下、推定誤差RMS)は0.55となった。すなわち、上述の条件による面的地震動推定において、任意地点における計測震度の推定は、観測値と比較し統計的に ± 0.55 の差異を有すると言える。

なお、気象庁によると緊急地震速報による震度予測の目標値は計測震度の違いで ± 1.0 とされている¹⁹⁾。震源情報から距離減衰式により算出する緊急地震速報の震度予測と、多数のK-NET観測データに基づく空間補間による本手法の比較は、情報量の違いがある点に留意する必要があるものの、本研究で適用する面的地震動推定手法の推定誤差RMSは、気象庁の緊急地震速報における震度予測の精度目標値に収まっている。

3.3 最寄りの観測点からの離隔に伴う推定誤差

観測データに基づき地震動を推定する場合、一般に適用する観測データの位置が推定対象点に近いことが推定精度の確保につながると考えられる。特に本研究で扱う面的地震動推定は、3.1節に記した通り観測点からの距離の逆数により複数の観測点データのそれぞれの重みを決定するIDW法を適用している。よって、推定対象点

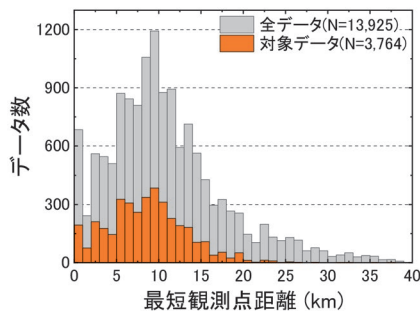


図 11 推定誤差評価データの最短観測点距離ヒストグラム

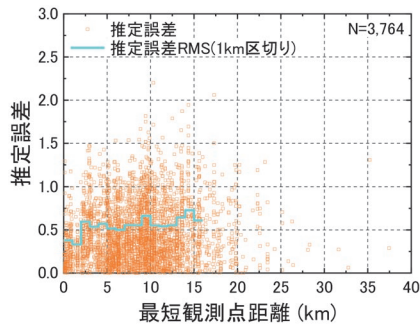


図 12 最短観測点距離と推定誤差の関係

と観測点の近接の程度は推定精度に対して重要な要素となる。そこで、本節では推定に用いる複数の観測点の内、図 7 (a) に示す推定対象点から最寄りの観測点までの距離（以下、最短観測点距離）と推定誤差の関係を整理した。

図 11 に本研究で分析した 13,925 データに対する最短観測点距離 1km 区切りのヒストグラムを灰色で示す。また、2.3 節と同様の考えにより、評価点とした KiK-net 観測点までの震源距離 200km 以内、KiK-net 観測データ計測震度 1.5 以上を選定したところ 3,764 データとなった。対象データのヒストグラムを図 11 に橙色で示す。

対象データに対する最短観測点距離と計測震度の推定誤差の統計的な関係を図 12 に示す。この図には、最短観測点距離 1km 区切りの RMS（水色実線）を併せて示している。なお、K-NET 観測点は設置間隔が約 20km であることから、最短観測点距離が 10km を超える場合、対象データ数が減少する。ここでは、1km 区切り区間におけるデータ数が 100 以上となる最短観測点距離 16km までの推定誤差 RMS を評価対象とする。図に示す 1km 区切りの推定誤差 RMS（水色実線）を見ると推定誤差は最短観測点距離により変化し、最短観測点距離が小さい方が推定誤差は小さくなることが確認される。この結果は、ある地点の地震動推定にあたり、より近接の観測データを用いることが推定誤差の低減につながる

ことを表している。逆に最短観測点距離の大きな遠方の観測点データを新たに加えても精度向上に対する有効性は低いことが示唆される。

4. 推定誤差の扱いの考え方および観測値と推定値の組み合わせ手法の提案

4.1 推定誤差の扱いの考え方の提案

一般に推定情報には推定誤差が含まれることから、実務において推定情報を扱う場合には不安全な対応となることを避けるために、安全確保に向けて推定誤差の扱いの考え方を定めておくことが望ましい。例えば、推定誤差の RMS を算出して推定値にその値を加えて、過小推定となった場合の安全性を確保する考え方や、点検などを発令する基準値から推定誤差の RMS の値を減じて、過小推定となった場合の安全性を確保する考え方などが挙げられる。この際、例えば基準値に対してどの程度を減じることが適切かと言った課題や、基準値から誤差 RMS を減じることにより点検などの発令が頻発しないかと言った懸案が生じる。

推定情報には推定誤差が含まれることに加え、現行の地震時列車運転規制においても 2.1 節や 2.3 節で述べた通り実務上の対応において取扱誤差が生じている。ここで、推定誤差が取扱誤差よりも小さくなる場合には、推定情報は現行の取り扱い上の地震動情報よりも信頼性は高いと考えることができる。つまり、推定誤差の統計値が取扱誤差の統計値を下回る場合、推定による誤差を含む情報であっても、その推定誤差に対して特別の処理を行わずとも、統計的に現行以上の信頼性をもって推定に基づく地震動を適用できると考えられる。

4.2 観測値と推定値の組み合わせ手法の提案

図 10 で確認した任意地点における面的地震動の推定誤差 RMS の 0.55 を、図 6 の分離距離 1km 区切りの取扱誤差 RMS に重ねてプロットした結果を図 13 に示す。なお、推定誤差 RMS は任意地点に対するものであるため、距離によらず一定の値としてプロットしている。この図によると、取扱誤差 RMS（青色実線）と推定誤差 RMS（緑色実線）はある距離で交差することが確認できる。この取扱誤差 RMS と推定誤差 RMS の交差する距離（以下、観測値適用距離）は、統計的結果において、観測値適用距離以下は観測値をそのまま用いた方が誤差は少なく、観測値適用距離よりも大きい範囲は推定値を用いた方が誤差は少なくなることを表している。

図 13 より計測震度を適用した本研究の整理では、取扱誤差 RMS と推定誤差 RMS がほぼ等しくなる距離として、観測値適用距離は 2km となる結果が得られた。これを受け、観測値と推定値の組み合わせ手法として図

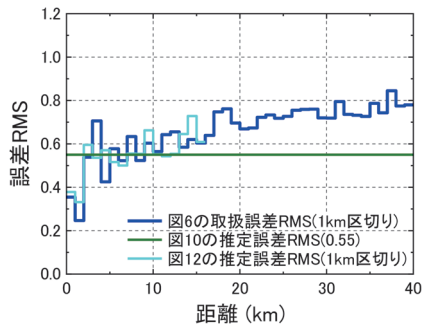


図 13 距離に対する各誤差 RMS の関係

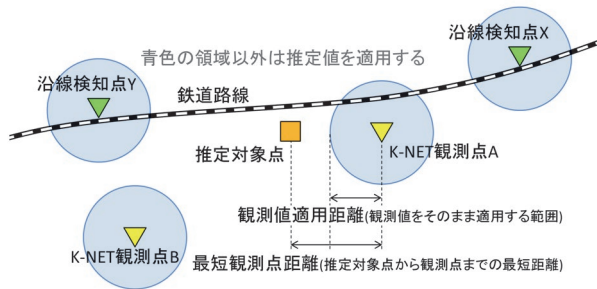


図 14 観測値と推定値の組み合わせ手法の概要

14の通り、観測点より2km以下の範囲には観測値の値をそのまま使い、2kmより大きな範囲には面的地震動の推定値を用いる地震動推定手法を提案する。この際、4.1節に述べた通り推定誤差について特別な処理をすることなく、推定データをそのまま適用する。なお図13には、図12に示した最短観測点距離1km区切りの推定誤差RMS（水色実線）も重ねてプロットしている。この図でも、最短観測点距離が2km以下の範囲において、取扱誤差RMS（青色実線）の方が推定誤差RMS（水色実線）よりも誤差RMSの値は小さくなっていることが確認できる。

4.3 提案手法を適用した沿線の地震動推定の事例

地震動の推定精度を高めるには、3.3節で分析した通り、観測点と推定対象点までの最短観測点距離が短い方が良く、より近傍の観測データを取り込むことが有効である。鉄道事業者が管理・運営している沿線検知点は線路直近に設置されており、沿線地震動の推定精度を高めるには、上述の観点から鉄道事業者の沿線検知点の観測データを導入することが望ましい。この鉄道事業者の沿線検知点の観測データは、地震後の点検区間の判断に用いられるだけでなく、列車の停止判断にも用いられるため、その情報はオンラインでリアルタイムに指令所などで集約される。このためデータ取得の即時性の観点においても沿線検知点の観測データは導入が容易である。本節では、4.2節で提案した観測値と推定値を組み合わせる手法において、鉄道事業者の沿線検知点の観測データ

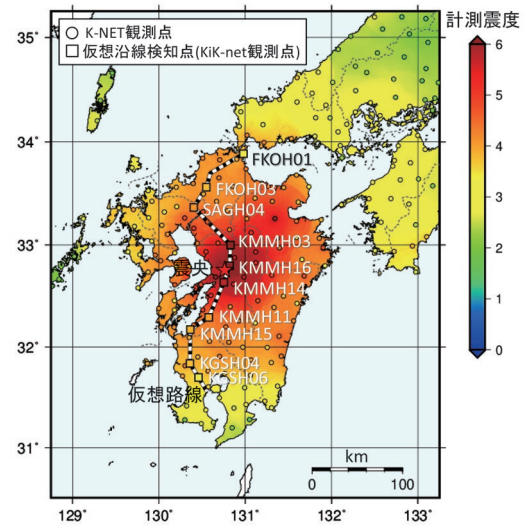


図 15 対象の仮想路線と推定面的地震動の例

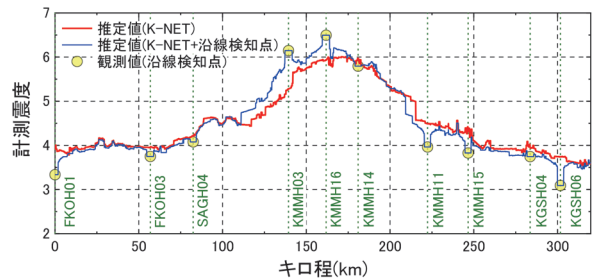


図 16 観測データを導入した推定沿線地震動の例

を導入した事例について述べる。

本研究用に独自に定めた仮定の路線と沿線検知点を図15に示す。ここで、仮定の沿線検知点は、KiK-net観測点を概ね一定の間隔となるように選定しており、そのKiK-net観測点を接続して仮定の路線を設定した。評価対象は2016年熊本地震である。図15には震央位置と推定面的地震動のカラーマップを示している。図の通り、震央の周辺では強い地震動の分布となっている。図16に、図15の面的地震動から仮想路線に沿って抽出した沿線の計測震度をキロ程に対して示す。この図においてK-NETのみから推定された沿線地震動（赤色実線）と仮定の沿線検知点（緑色破線）の観測値（黄色○印）を見ると、推定値と観測値がほぼ一致している地点（例えばSAGHO4やKMMH14など）も見られるが、3.2節で統計的に分析した通り、計測震度による観測値と推定値は差異がある場合も確認される。次に、4.2節で提案した観測値と推定値を組み合わせる手法を用いて、仮定の沿線検知点としたKiK-net観測データを加えて求めた沿線地震動（青色実線）を図16に併せて示す。ここで扱った面的地震動の推定において、地震計位置はその観測値が当該のメッシュに適用されることから、推定値は観測値と一致する。また、4.2節で提案した通り観測点から

観測値適用距離以下の範囲では観測値を適用した方が信頼性は高まると考えられるため、観測点から2 km以下の範囲は観測値をそのまま用いて沿線地震動を評価している。

ここで対象とした2016年熊本地震の場合、震央のやや北側の仮想路線におけるKMMH03やKMMH16では、推定値は観測値よりも小さく過小推定となっていたが、沿線検知点を模擬したKiK-netの観測データを導入することにより、推定地震動は引き上げられ修正されている。一方、震央より南側の仮想の路線におけるKMMH11では、推定値は観測値よりも大きく過大推定となっていたが、仮想沿線検知点であるKiK-netの観測データの導入により、KMMH11の前後の区間も含め、推定地震動は引き下げられ修正されている。

沿線検知点の観測データの追加による沿線地震動推定の精度向上効果は、その路線近傍の観測データを用いて検証することが理想的であるが、実際には沿線近傍で取得できる観測データは限られているため、観測値と推定値を直接比較することは難しい。しかし、図12で示した最短観測点距離と推定誤差の統計的な分析の結果から、より近接の観測データを取り込むことによって推定精度が高まることは統計的に確認されている。これより、沿線検知点の観測データの導入は沿線地震動の推定精度の改善に資すると考える。

5. おわりに

地震時に停止させた列車の迅速な運転再開には、沿線の地震動を精度良く推定し、その情報に基づき点検区間の適正化を図ることが望ましい。本研究では、鉄道の地震時列車運転規制の実務における推定地震動の利用に向けて、推定誤差の扱いの考え方を示すと共に、観測値と推定値を組み合わせた沿線地震動の推定手法を提案した。

線路近傍に一定間隔に設置されている沿線検知点の観測データのみを用いる現行手法と比べ、観測値と推定値を用いる本研究の提案手法は、推定精度を向上させる実務的なデータ組み合わせ手法であると考えられる。提案手法による推定沿線地震動情報は、現行手法よりも高い信頼性を持って点検区間の適正化や駅間停止列車の次駅までの迅速な移動などの判断を支援でき、地震時に停止した列車の早期運転再開に資すると考える。加えて、信頼性の高い沿線地震動情報は地震計間の大きな揺れの見逃しを防ぐことも実現できるため、地震時の安全性を高めることにもつながると考える。

謝辞

本研究において、防災科研のK-NETおよびKiK-net

の地震波形データ⁹⁾を使用しました。関係各位に謝意を表します。

文献

- 1) 国土交通省監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善出版, 2012
- 2) 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, Vol.60, No.5, pp.387-397, 2007
- 3) 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
- 4) 国土交通省: 大阪府北部地震における運転再開等に係る対応に関する連絡会議資料, 資料5-4-7, 2018, <http://www.mlit.go.jp/common/001247910.pdf> (参照日: 2023年12月7日)
- 5) JR西日本ニュースリリース: 地震発生時に乗車されているお客様への迅速なご案内に向けた取り組みを行っています, 2021, https://www.westjr.co.jp/press/article/2021/10/page_18683.html (参照日: 2023年12月7日)
- 6) 山本俊六, 佐藤亮: 早期運転再開のための情報活用, 日本鉄道施設協会誌, Vol.59, No.3, pp.220-221, 2021
- 7) 堀込順一: JR東日本における地震対策と運転規制概要, 新線路, Vol.60, No.1, pp.59-61, 2006
- 8) JR東日本ニュースリリース: 新幹線早期地震検知システムの改良等について, 2005, https://www.jreast.co.jp/press/2005_2/20051020/no_3.html (参照日: 2023年12月7日)
- 9) 防災科学技術研究所: 防災科研 K-NET, KiK-net, 2019, DOI: <https://doi.org/10.17598/NIED.0004>
- 10) 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
- 11) JR東日本ニュースリリース: 構造物への被害と相関性の高い地震動指標の採用について, 2003, https://www.jreast.co.jp/press/2002_2/20030302.pdf (参照日: 2023年12月7日)
- 12) JR西日本ニュースリリース: 在来線における地震発生時の取り扱い変更について, 2013, https://www.westjr.co.jp/press/article/2013/08/page_4266.html (参照日: 2023年12月7日)
- 13) 防災科学技術研究所: J-RISQ 地震速報, 2020, DOI: <https://doi.org/10.17598/nied.0017>
- 14) 岩田直泰, 坂井公俊, 山本俊六, 室野剛隆, 青井真: 鉄道地震被害推定情報配信システム (DISER) を利用して素早く運転を再開する, RRR, Vol.77, No.2, pp.12-15, 2020
- 15) 鉄道総合技術研究所ニュースリリース: 鉄道地震被害推定情報配信システム (DISER) の運用開始について, 2019, https://www.rtri.or.jp/press/is5f1i000000bt7d-att/20190729_002.pdf (参照日: 2023年12月7日)

- 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) 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, I-069, pp.137-138, 2015
- 18) 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.191-202, 2012
- 19) 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/eev-hyoka/06/shiryous.pdf> (参照日: 2023年12月7日)