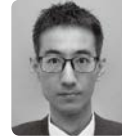


Special edition paper

社外の高密度地震動情報の活用



加藤 健二*¹



中山 亮二*²



細野 渉*³



櫻 健典*⁴

Utilization of external high-density seismic motion information

Kenji KATO*¹, Ryoji NAKAYAMA*², Wataru HOSONO*³, and Takenori KEYAKI*⁴

*¹ Chief Researcher, Disaster Prevention Research Laboratory of Research and Development Center of JR EAST Group

*² Sub-Chief Researcher, Disaster Prevention Research Laboratory of Research and Development Center of JR EAST Group

*³ Researcher, Disaster Prevention Research Laboratory of Research and Development Center of JR EAST Group

*⁴ Sub-Chief Researcher, Disaster Prevention Research Laboratory of Research and Development Center of JR EAST Group

Abstract

Operation control after earthquake are currently implemented according to the spectral intensity (SI) of the seismograph installed by JR. Seismic observation networks have been enhanced recently by various organizations other than JR, and the observed data are available soon after the earthquake. Therefore, we proposed a method for estimating the seismic motion along the railway track with the seismographs installed by non-JR organizations, and showed that the range of the operation control after earthquake might be optimized by the proposed method.

●**Keywords:** Driving regulation, Estimation of ground motion

*¹JR東日本研究開発センター 防災研究所 主幹研究員 (現 新潟土木設備技術センター)
*²JR東日本研究開発センター 防災研究所 副主幹研究員 (現 安全企画部門)
*³JR東日本研究開発センター 防災研究所 研究員 (現 新潟新幹線運輸区)
*⁴JR東日本研究開発センター 防災研究所 副主幹研究員

1. 緒言

現在当社では、自社で設置した地震計の観測値(SI値)の大きさに応じて、地震時の運転規制を実施している。近年社外のような機関で地震観測網が充実しリアルタイムで活用可能な状況となっている。そこで、これら社外の地震動情報を活用して線路の地震動を推定する手法を検討した。

2. 地震時運転規制等の現状

地震発生時の列車の安全の確保は、被害の恐れが想定される場合には、いち早く列車を止め、その後沿線で実際に観測された地震動の大きさに応じて、設備点検や列車の速度を落とすなどの運転規制を行っている。沿線の揺れは、自社にて整備した地震計(以下 JR地震計)で実施しており、運転規制を行う区間は、あらかじめ地震計毎に受持ち範囲を設定している(図1)。

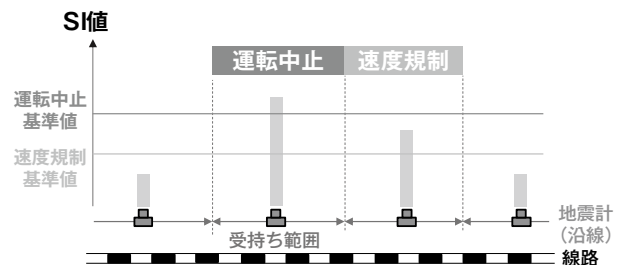


図1 地震時運転規制方法(現行)

3. 社外の地震動情報の活用

兵庫県南部地震(1995年1月)や東北地方太平洋沖地震(2011年3月)などを契機に、様々な機関で地震観測体制の充実が図られてきた。また近年では、これら地震観測情報に地盤情報などを加味することで、地震計のない地点においても地震動の推定が可能となっており、これら各種地震動情報が、地震発生後ほぼリアルタイムに入手可能な状況となっている。

これら社外の地震動情報を鉄道に活用する場合、大きく2つの用途が考えられる。1つは列車を早期に止めることへの活用であり、気象庁による緊急地震速報や国立研究開発法人防災科学技術研究所による海底地震計情報の活用がすでに行われている。もう1つは線路のきめ細かい地震動を把握することが可能なことから、運転規制などでの活用や、地震による被害等が発生した場合の被害地点の地震動分析などへの活用である。地震時の規制基準値は、過去の地震被害などの分析による被害地点の地震動を参考に算出しており、被害地点の地震動をより正確に把握することができれば、より適切な規制基準値の変更などに活用ができる。表1は、線路の地震動推定に活用可能な社外地震動情報の例である。

表1 社外地震動情報の例

配信機関	社外地震動情報				(参考) JR地震計(在来線)
	SUPREME 東京ガスネットワーク(株)	震度速報 気象庁	J-RISQ (国研)防災科学技術研究所	DISER (公財)鉄道総合技術研究所	
観測点数 推定密度	・約4,000箇所 東京ガス供給+周辺ガス供給エリア(東京ガスネットワークとの情報共有点のみ)	・気象庁 ・地方自治体 ・防災科研	・防災科研、地方公共団体、気象庁の観測値 ・表層地盤増幅率 ⇒250mメッシュの推定値	・K-NET震度計(防災科研)の観測値 ・鉄道総研地盤データベース ⇒500mメッシュの推定値	設置間隔 40km以内 ・山手線 約5km ・主要5方面 約10km ・首都圏 約20km
配信情報	SI値、最大加速度 震度階級相当値	震度階級	震度階級	SI値、最大加速度 計測震度	SI値、基準値超過情報
配信時間 (地震発生後)	約5分(95%の地点)	約3分	10分程度 (地震規模による)	10分程度 (地震規模による)	数秒(基準値超過情報) 約3分(SI値)

4. 社外の地震動情報による線路の地震動推定

現行の在来線では、40kmを越えない間隔で地震計を設置している。首都圏においては地震計の増設により、きめ細かい地震監視体制とし、規制区間、点検区間の細分化を行っている。社外の地震動情報により、線路の地震動をきめ細かく把握することが可能となれば、自社にて地震計の増設を行うことと同様の効果が期待できる(図2)。ここでは、社外地震動情報として、首都圏に高密度に配置されている東京ガスネットワーク(株)のSUPREME(以下、東京ガス地震計)を用いて線路の地震動を推定する方法を検討した。

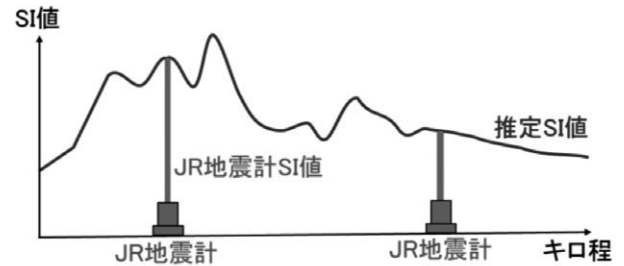


図2 社外地震動情報の活用イメージ

検討対象地震は、在来線にて地震動指標をSI値に変更後の2003年5月から2022年3月の間に、首都圏50km圏内でJR地震計が3kine以上を観測した39地震とした(表2)。線路の地震動の推定方法として、2つの方法を検討した。1つ目は、線路最近傍の地震計の観測値を用いる方法で、もう1つは、線路近傍の複数の地震計の観測値から推定する方法である。推定精度の評価は、JR地震計観測位置でのJR地震計SI値と、東京ガス地震計観測値から算出した推定SI値との、相関係数やRMSLEで行った。

RMSLEとは、対数平均平方2乗誤差と呼ばれ、2つの値の差異を評価する指標の1つである。定義式は式(1)である。類似した指標であるRMSE(平均平方2乗誤差)に比べ、推定SI値がJR地震計SI値よりも小さい場合、評価値が大きくなるため安全側の検討が可能と考え、今回はRMSLEを用いることとした。

$$RMSLE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\log(y_i + 1) - \log(\hat{y}_i + 1))^2}$$

y_i : JR地震計SI値
 \hat{y}_i : 東京ガス地震計による推定SI値
 N : データ数

(1)

4・1 一定の条件を満たす線路最近傍の観測値から推定する方法(方法1)

方法1では、線路に最も近い東京ガス地震計観測値を線路の地震動とする方法を検討した。東京ガス地震計は、地震時のガス供給遮断が主目的のため、線路の地震動を推定するには不適切な箇所もあると考えられた。そこで、東京ガス地震計の設置状況を確認したところ、建物内に設置されている箇所や、崖等の段差付近にある箇所など、必ずしも周辺の地震動を代表していない可能性のある箇所が確認された。

そこで、線路の地震動を推定するのに用いる東京ガス地震計として、以下箇所を予め選定した上で、線路最寄りの地震計のSI値を用いることを検討した。選定方法は2段階を考えた。1つは、線路と地震計設置箇所の地盤特性が類似した箇所とすること、もう1つは、東京ガス地震計同士で過去の地震観測値を比較し、周辺と地震動の傾向が大きく異なる箇所とした。

表2 検討対象地震

No	発生日時			地震諸元			最大震度 (気象庁)	JR最大SI値(東京50km圏)	
	年	月	日	震央位置	M _j	深さ(km)		箇所	カイン値
1	2003	5	12	千葉県北西部	5.3	47	4	浜松町	6.9
2	2004	10	6	茨城県南部	5.7	66	5弱	蕨	10.9
3	2004	10	23	新潟県中越地方	6.8	13	7	大宮	6.4
4	2005	2	16	茨城県南部	5.3	46	5弱	蕨	7.3
5	2005	7	23	千葉県北西部	6.0	73	5強	浜松町	16.9
6	2005	10	16	茨城県南部	5.1	47	4	蕨	6.5
7	2006	5	2	伊豆半島東方沖	5.1	15	4	町田	3.9
8	2008	8	8	神奈川県東部	4.6	30	4	西国分寺	10.2
9	2009	8	11	駿河湾	6.5	23	6弱	品川	5.1
10	2011	3	11	三陸沖	9.0	24	7	新浦安	44.0
11	2011	3	15	静岡県東部	6.4	14	6強	大船	4.0
12	2011	3	19	茨城県北部	6.1	5	5強	大宮	3.2
13	2011	4	11	福島県浜通り	7.0	6	6弱	新浦安	6.2
14	2011	4	12	千葉県東方沖	6.4	26	5弱	蕨	4.2
15	2011	4	16	茨城県南部	5.9	79	5強	浜松町	4.6
16	2011	7	15	茨城県南部	5.4	66	5弱	武蔵浦和	5.6
17	2012	1	1	鳥島近海	7.0	397	4	蕨	3.5
18	2012	3	14	千葉県東方沖	6.1	15	5強	新浦安	3.2
19	2012	5	18	茨城県南部	4.8	51	4	白岡	4.4
20	2012	5	29	千葉県北西部	5.2	64	4	平井	4.3
21	2012	6	1	千葉県北西部	5.1	44	4	大宮	4.5
22	2012	7	3	千葉県南部	5.2	88	4	品川	5.3
23	2012	11	24	東京湾	4.8	72	4	品川	6.2
24	2012	12	7	三陸沖	7.3	46	5弱	新浦安	6.0
25	2013	11	10	茨城県南部	5.5	64	5弱	蕨、新浦安	6.9
26	2013	11	16	千葉県北西部	5.3	72	4	幕張本郷	5.2
27	2014	5	5	伊豆大島近海	6.0	162	5弱	新浦安	7.8
28	2014	9	16	茨城県南部	5.6	47	5弱	蕨	5.3
29	2015	5	25	埼玉県北部	5.5	56	5弱	飯田橋	5.9
30	2015	5	30	小笠原諸島西方沖	8.1	682	5強	浜松町	13.2
31	2015	9	12	東京湾	5.2	57	5弱	蒲田	9.9
32	2016	5	16	茨城県南部	5.5	42	5弱	武蔵浦和	3.9
33	2016	12	28	茨城県北部	6.3	11	6弱	白岡	3.9
34	2018	1	6	東京湾	4.7	71	4	品川	5.7
35	2019	5	25	千葉県北東部	5.1	38	5弱	新浦安	4.6
36	2021	2	13	福島県沖	7.3	55	6強	浜松町	8.3
37	2021	3	20	宮城県沖	6.9	59	5強	浜松町	4.5
38	2021	10	7	千葉県北西部	5.9	75	5強	東神奈川	20.4
39	2022	3	16	福島県沖	7.4	57	6強	浜松町	8.2

4・1・1 地盤特性が類似した箇所の選定 (選定1)

東京ガス地震計の設置位置と線路の位置では、地盤特性が大きく異なる場合もあることが想定される。そのような東京ガス地震計を除外することで、東京ガス地震計の観測値と線路沿線の地震動が近い値となると考えた。

そこで、JR地震計と東京ガス地震計の設置位置におけるAVS30(国立研究開発法人防災科学技術研究所が地震ハザードステーションJ-SHISで公表している深さ30mまでの平均S波速度)からSI値増幅率をそれぞれ算出し、SI値増幅率の比が1.4倍以内の地震計を類似した箇所として選定することを考えた。選定方法のイメージを図3に示す。なお、SI値増幅率は過去の検討から下式を用いた。

$$\log_{10}(\text{SI 値増幅率}) = -0.80 \times \log_{10}(\text{AVS30}) + 2.32 \quad (2)$$

1.4倍以内としたのは、首都圏での地震規制時の受持ち範囲を調整、設定するにあたって、同一地震計の警備区間内のSI値増幅率を1.4倍以内となるようにしていることを参考にした。地震計設置地点と、線路のSI値増幅率がこの値以内であれば、両者の地震動の差異は一定の範囲内に収まると考えたためである。

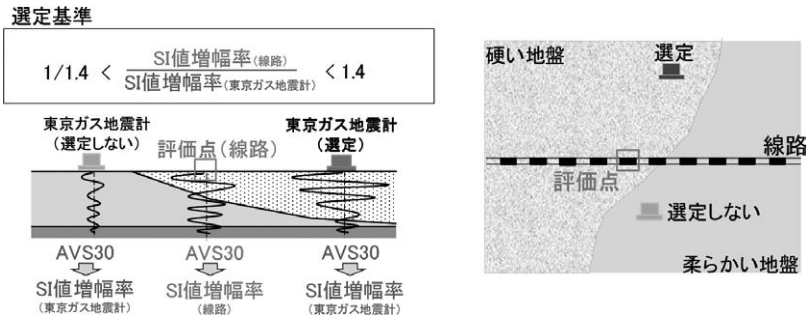


図3 地盤特性が類似した箇所の選定方法(イメージ)

4・1・2 周辺地震計と地震動の傾向が大きく異なる箇所の選定(選定2)

先述の通り、東京ガス地震計の設置箇所の中には、周辺の地震動を必ずしも代表していない箇所もあると想定される。そこで、そのような箇所以外を選定するため図4に示す方法により、東京ガス地震計の箇所毎に周囲との地震動の挙動の差異を、周囲の東京ガス地震計の地震動との残差で評価した。図5は、評価対象地震計毎に対象39地震に対して算出した残差の対数平均のヒストグラムである。平均残差0付近の箇所が多い正規分布に類似した分布となった。ここでは、平均残差が2σ相当の範囲を、周辺地震計と傾向が大きく異なる箇所と考え、この範囲内の東京ガス地震計を線路の地震動推定に用いることとした。

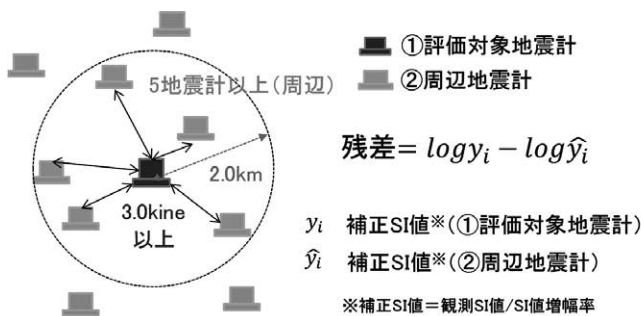


図4 残差の算出方法

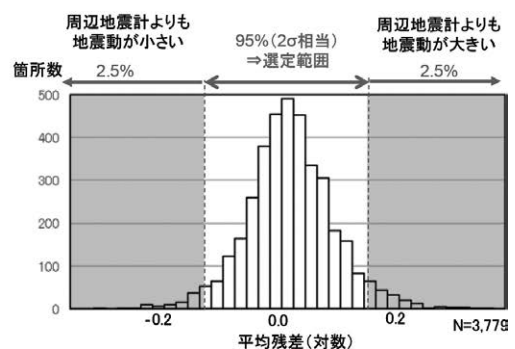


図5 平均残差のヒストグラム

4・1・3 推定精度

選定1および2の両方を行った場合の推定精度を、線路と推定に用いた東京ガス地震計との距離毎のRMSLEで比較した(図6)。比較は、先述の39地震でのJR地震計SI値または推定SI値のいずれかが3kine以上のデータで行った。

推定に使った東京ガス地震計が線路から近いほどRMSLEが小さくなり、線路から1.5km離れた地点では、RMSLE 0.119程度で推定可能となった。

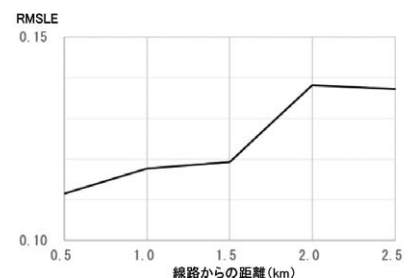


図6 RMSLE(線路からの距離毎)

4・2 線路近傍の複数の観測値から推定する方法(方法2)

方法2では、東京ガス地震計が非常に高密度に配置されている点に着目し、最近傍の1点で評価せず、近傍の複数の観測値を統計処理することで、先述の個々の地盤特性の差異や設置環境の違いを考慮せず算出する方法を検討した。

4・2・1 統計処理する箇所数および統計量の検討

沿線における東京ガス地震計の配置状況を確認した。図7は、東京ガス地震計配置エリアを対象に、横軸に線路からの離れ、縦軸にその離れ以内に各数量の東京ガス地震計が配置されているという条件を満たす線路上の地点数(全11026地点)の割合を示す。線路から1.5km以内に、3箇所では98%、5箇所では96%、7箇所では92%以上と、概ね東京ガス地震計が設置されていることを確認した。

東京ガス地震計観測値を統計処理する場合、何箇所の地震計の観測値で統計処理を行うのが適切か検討した。箇所数として、3箇所、5箇所、7箇所の3種類とし、また統計処理として平均値と中央値の2種類を検討した。それぞれ、JR地震計SI値と東京ガス地震計による推定SI値との相関係数およびRMSLEを算出し比較した(表3)。その結果、線路近傍5箇所の平均値が、最も相関係数が大きくRMSLEが小さい結果となった。以上から、線路の地震動の推定値として線路近傍の東京ガス地震計の統計量を用いる場合には、5地点の平均値が最も精度が高いことがわかった。

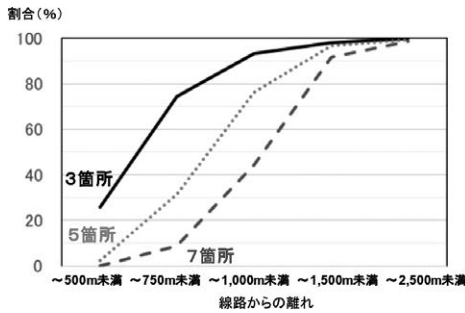


図7 複数の東京ガス地震計がある区間の割合

表3 RMSLEと相関係数

		3箇所	5箇所	7箇所
平均値	相関係数	0.855	0.879	0.869
	RMSLE	0.119	0.106	0.106
中央値	相関係数	0.846	0.855	0.846
	RMSLE	0.121	0.115	0.116

4・2・2 系統的誤差の補正の検討

JR地震計設置位置の地震動を本手法によって推定した場合、5箇所の平均値の1次近似直線の傾きは0.9457で1.0未満であることから、全体的には、JR地震計観測値よりも推定結果が若干小さい傾向にあることがわかった。

そこで、1次近似直線の傾きが1.0以上となるように補正することを考えた。補正方法としては、単純に定数を加算するなどの方法も考えられるが、平均を算出するのに用いた5地点のばらつきである標準偏差を用いて補正することを考えた。これは、5地点のばらつきが大きい場合、5地点の中には大きな観測値があると考え、より大きな補正を行うことで安全側の算出量となると考えたためである。

補正量を5点の標準偏差のN倍とし、1次近似直線の傾きが1.0以上となるNが0.27であることから、箇所毎の5点の標準偏差の0.27倍を足し合わせた。補正後のJR地震計SI値と推定SI値を比較したものが図8であり、系統的誤差が補正され、より高精度の推定が可能となった。

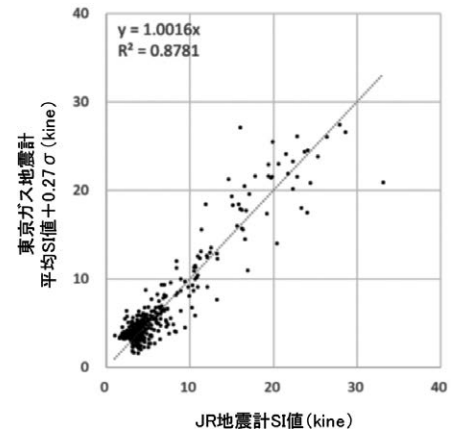


図8 JR地震計SI値と推定SI値

5. 検討手法による算出例と適用方法

2021年10月7日に発生した千葉北西部を震源とする地震における、方法2による推定SI値の算出例を図9に示す。当日は、X地震計で20kineを超える地震動を観測し、A駅～C駅間で運転中止となった。上記区間のうちA駅～B駅間では、推定SI値が比較的小さい結果となった。この値を線路の地震動とみなした場合、線路の地震動がきめ細かく把握できることから、運転規制範囲を適正化できる可能性があることがわかった。

一方、X地震計設置箇所では、JR地震計SI値が推定SI値に比べ大きく、推定SI値では局所的な地震動を十分捕捉できないことも想定された。今回の東京ガス地震計のように高密度で配置されていても、実際の地震計は、先述のように1~2km程度は離れていることから、必ずしも線路間際の地震動を観測しているわけでない。図9の事例では顕著ではないが、JR地震計SI値が推定SI値に比べて小さい可能性もあることから、JR地震計SI値と推定SI値の使い分け、あるいは併用の考え方については今後の検討課題である。

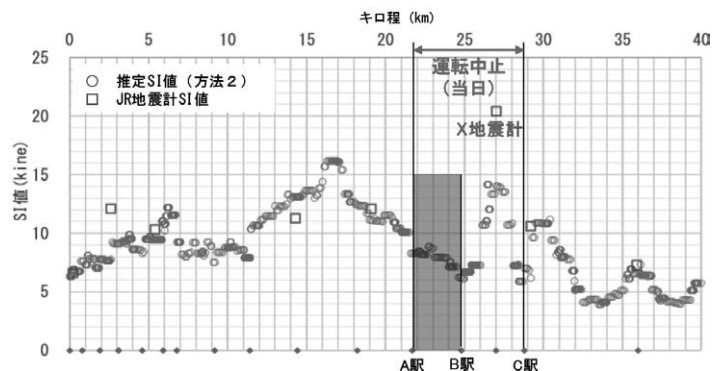


図9 千葉県北西部の地震(2021年10月7日)での算出例

6. 推定精度向上に向けた今後の課題

以上より、高密度な社外地震動情報を活用することで、一定の精度できめ細かく線路の地震動推定が可能となった。一方、社外地震計は必ずしも線路間際にないことから、箇所により推定誤差が生じることもわかった。

図10は、JR地震計が設置されている2地点について、地震毎にJR地震計SI値と推定SI値（ここでは方法2による）をプロットしたものである。近似直線の傾きに着目した場合、左のA地震計設置箇所の近似直線の傾きは1程度であり、周辺の東京ガス地震計の観測値から精度よく線路の地震動が推定されていると判断できる。一方、右のB地震計設置箇所の近似直線の傾きは0.64となり、推定SI値はJR地震計SI値よりも小さい。相関係数は0.9以上であることから、B地震計設置箇所は、周辺の東京ガス地震計の設置箇所よりも揺れやすい傾向にあると考えられる。これら、線路とその周辺の地震動の挙動の傾向が予めわかれば、今回検討した手法で算出したSI値に更に線路地点毎の補正等することで、推定精度の向上が期待できる。

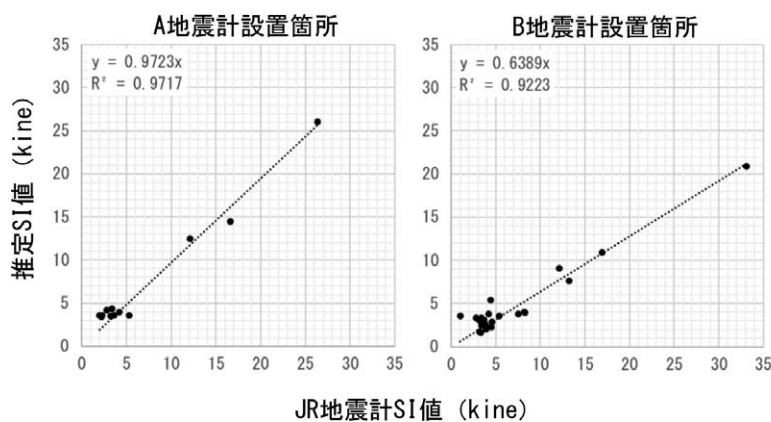


図10 地震毎のJR地震計SI値と推定SI値（方法2）

7. まとめ

今回、首都圏に高密度に配置された東京ガス地震計観測値を用いて線路の地震動を推定する方法について検討した。引き続き検討事例等を増やし、本手法の有効性などの検証を進めるとともに、推定精度の向上に取り組んでいきたいと考えている。

また、今回検討した東京ガス地震計を活用した線路の地震動推定は、適用範囲が首都圏の限定的なエリアであることから、東京ガス地震計以外の社外地震計観測値や、面的な推定地震動情報の適用方法などについても引き続き検討していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 清水・他：都市ガス供給網のリアルタイム地震防災システム構築及び広域地盤情報の整備と分析・活用、土木学会論文集、第738号、2003、pp.283-296
- 2) Nakamura *et al.* : Prototype of a Real-Time System for Earthquake Damage Estimation in Japan, Journal of Disaster Research, Vol.8, p.981, 2013
- 3) 岩田・他：早期運転再開に向けた鉄道地震被害推定情報配信システム（DISER）の開発、日本鉄道施設協会誌、第58巻第3号、2020、pp.223-226