

地震時における鉄道運休期間の予測と震災間比較

岐阜大学 正会員 ○加藤宏紀・能島暢呂, 刈谷市役所 非会員 白川航平

1. 背景と目的

国内では鉄道の遅延や運休を伴う被害地震が多発しており、運休の有無や運休期間の予測モデル¹⁾²⁾が構築されてきた。一方、2018年大阪府北部の地震の被災事例では低震度領域においても広範囲で短期間の運休が発生した。このことから、各地震の特徴を踏まえた運休期間の予測が必要であると思われる。本研究では地震時における鉄道の運休状況に関する情報提供を目的として、主要地震の被災事例に基づいた運休期間の予測モデルを構築し震災間で比較する。

2. 分析対象地震と使用データ

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震、2016年熊本地震、2018年大阪府北部の地震、2018年北海道胆振東部地震の計4地震を対象として分析を行う(以降、2011年東北、2016年熊本、2018年大阪、2018年北海道)。各地震に伴う旅客駅の運休状況および路線情報については、文献²⁾で収集・整理したデータを用いる。図1に鉄道の運休の有無を赤丸と青丸でそれぞれ示す(以降では、基本的に2011年東北と2018年大阪の結果を図示する)。運休期間は本震に伴う運転規制開始から解除されるまでの期間とし、図2に示すように日単位で表す。地震動分布については、文献³⁾⁴⁾の本震の推定震度分布を用いた。ここで、鉄道の運転規制措置の最小単位は駅区間であるため、各地震に対して駅位置の推定震度分布の値を採用した。図3に推定震度分布と鉄道の駅位置(黒丸)を示す。区間別乗客数については、各区間の両端の駅における乗降客数データ⁵⁾を用いて、それらの平均値で代用することとした(図4)。

3. 地震時の鉄道ネットワーク機能の定量的な評価

予測モデルの構築に先立ち、地震時における鉄道のネットワーク機能を定量的に評価する。具体的には高速道路を対象とした分析手法⁶⁾を鉄道に応用し、以下に示す3種類のネットワーク指標(施設指標 N 、 L と機能指標 V)を算出し、地震前の水準で正規化して0.0(ネットワーク機能を完全に喪失した状態)~1.0(平常時)で表した(図5)。

- 1) 運行可能区間数 N (区間): 運行可能な区間数
- 2) 運行可能区間の延長距離 L (km): 運行可能な区間距離の総和
- 3) 区間別乗客数×運行可能区間の延長距離 V (人/日・km): 区間別乗客数とその区間距離の積の総和

施設水準と機能水準は、本震直後に0~20%程度まで低下し、その後1日~1ヶ月程度で地震前の水準まで回復している。 V と N 、 L を比較すると、2011年東北では V の回復が N 、 L よりも早い。これに対して2018年大阪では、 V の回復が N 、 L よりも遅い。この理由として、2011年東北では乗客数の多い首都圏で早期に運休が解消されたのに対して、2018

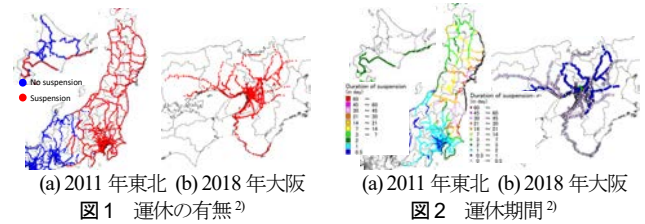
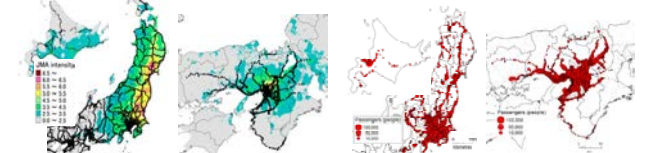
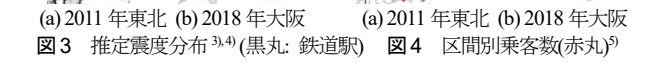
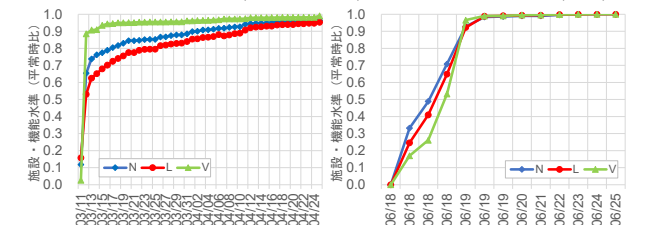
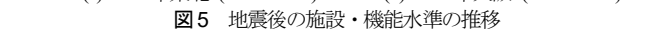
図1 運休の有無²⁾図2 運休期間²⁾図3 推定震度分布³⁾⁴⁾(黒丸: 鉄道駅)図4 区間別乗客数(赤丸)⁵⁾

図5 地震後の施設・機能水準の推移

年大阪では乗客数の多い近畿圏の復旧にやや時間を要したことが挙げられる。また、図示は省略するが、2016年熊本は2018年大阪に、2018年北海道は2011年東北に、それぞれ近い傾向を示している。以上のように、 V の回復は乗客数の多い区間の被害・復旧状況に左右されることを示した。

4. 震度と運休の有無に関する分析(第1段階)

以降では、前述した指標のうち、施設指標 N に着目して分析・予測モデルの構築を行う。各地震における鉄道の運休状況と推定震度分布(図3の範囲外のデータも含む)を重ね合わせ、マッチング可能な駅区間を対象として運休の有無を震度別に集計した(図6)。1つの駅区間に対して当該区間の両端の震度を採用している。震度と運休の有無との関係を見ると、「運休あり」の区間のほうが「運休なし」よりも高震度側に分布する傾向にある。こうした傾向から、地震後の運休発生確率を機能的フラジリティ関数として予測するため、ロジットモデル⁷⁾でモデル化した。機能的フラジリティ関数を図7の実線で示す(図6から得られた震度別の運休発生割合を図7にシンボルで併記)。いずれの地震においても震度2.5付近から運休が出始め、同3.0~4.0程度で運休発生確率が50%、同5.0~5.5ではほぼ100%に達している。一部の事例を除いて、モデルの適合度を表す尤度比は0.7以上、的中率は0.8以上となっており、実測値とモデルはよく適合する傾向にある。震災間で比較すると震度3.5付近で運休発生確率が急増している点が共通している。一

キーワード 鉄道、運休期間の予測、2011年東北地方太平洋沖地震、2016年熊本地震、2018年大阪府北部の地震、2018年北海道胆振東部地震、機能的フラジリティ関数、レジリエンス関数、震災間比較

連絡先 〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1 岐阜大学工学部社会基盤工学科 TEL 058-293-2466

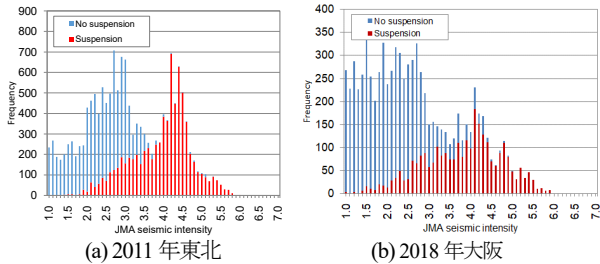


図6 各地震における震度と運休の有無との関係²⁾
(青：運休なし，赤：運休あり)

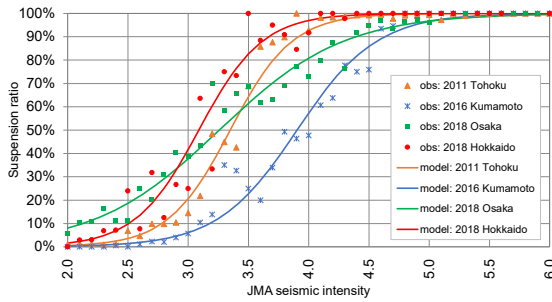


図7 機能的脆弱性関数の震災間比較(文献²⁾に基づき加筆修正)
方，2018年大阪や2018年北海道では，2011年東北や2016年熊本と比べると曲線がやや低震度から立ち上がる傾向にある。これは路線内の一部の運転規制基準超過が路線全体の運休に波及した影響やエネルギー不足などが要因である。

5. 震度と運休期間に関する分析 (第2段階)

各地震における震度と運休期間との関係を図8に黒丸印で示す。文献²⁾と同様の観点から，運休が発生したという条件下での運休期間を予測する条件付き復旧曲線を求める。本研究では，運休期間の平均値 $\mu(I)$ を震度 I に関するべき関数(式(1))でモデル化した。

$$\mu(I) = b(I-a)^c, \text{ ただし } I \geq a$$

$$2.5 \leq a \leq 3.5, b > 0, c > 0 \quad (1)$$

$$\sigma(I) = CoV \times \mu(I) \quad (2)$$

ここで，パラメータ a, b, c は形状パラメータであり，条件付き非線形最適化手法である L-BFGS-法による最小二乗法を適用して求めた(表1)。式(2)の $\sigma(I)$ は運休期間の標準偏差， CoV は変動係数である。これらに基づき，震度が与えられた場合の運休期間を文献²⁾と同様にガンマ分布でモデル化した。図8に $CoV=50\%$ としたときの運休期間の確率分布を実線で重ねて示す。2011年東北では予測値と実測値は整合しており，運休期間のばらつきをほぼ捉えている。一方，2018年大阪では，震度によらず数時間程度運休している。これは，安全確認のため点検が実施されたことによるものであり，結果的に多くの区間で物理的な被害が発生しなかったことが影響していると考えられる。このように，震度と運休期間との間に相関が見られず，予測値は震度レベルが高くなっても運休期間がわずかに長くなる程度である($c=0.148$)。また，図示は省略するが，2018年北海道では，運休の主要因が停電に伴う信号停止や設備点検，事業者による復旧戦略の影響であるため，予測値は震度によらず一定($c=0.000$)である。これに対して2016年熊本では，物理的な被害が見られたことから，2011年東北と同様の傾向を示している。

表1 式(1)のモデルパラメータと正規化 RMSE

	2011年 東北	2016年 熊本	2018年 大阪	2018年 北海道
a	3.500	2.500	2.500	2.500
b	0.958	0.589	0.307	2.918
c	3.662	1.474	0.148	0.000
正規化 RMSE	0.066	0.148	0.246	0.194

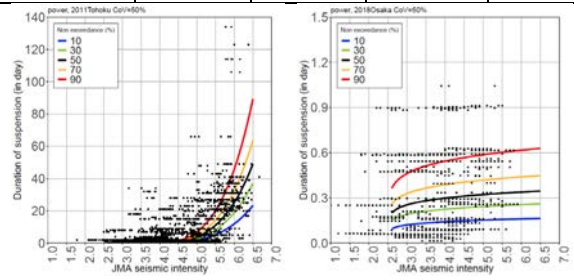


図8 震度と運休期間との関係 (黒丸:実測値，実線:予測値)

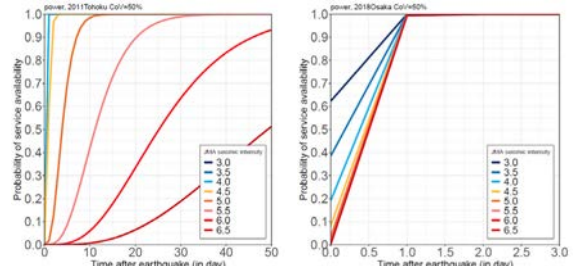


図9 鉄道のレジリエンス曲線

6. 鉄道のレジリエンス曲線の作成

図7と図8を組み合わせることで，次式で表されるレジリエンス曲線が得られる。

$$P(I, t) = \{1 - p(I)\} + p(I) \cdot F(t|I) \quad (3)$$

ここで $p(I)$ は震度 I における運休発生確率を表し， $F(t|I)$ は運休が発生したという条件下での運休期間 t の非超過確率を表す。 $P(I, t)$ は任意の時間断面における運行可能率を表している。図9に2011年東北と2018年大阪の結果を示す。2011年東北に関しては，震度レベルが高くなるにつれて運休期間が長くなることを表している。これに対して，2018年大阪では前述した理由のため，震度レベルによらず運休期間がほぼ一定になることを示した。図示は省略するが，2016年熊本は2011年東北に，2018年北海道は2018年大阪に，それぞれ近い傾向を示している。本研究では，海溝型の巨大地震，内陸型の活断層による地震，大都市圏で広域な運休が発生した地震，停電の影響が支配的な地震について，運休状況に特徴的な傾向が見られることを明らかにした。

謝辞：本研究の実施にあたり，(国研防災科学技術研究所「首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上プロジェクト」の補助を得た。参考文献 1) 高浜勉・翠川三郎：地震時の鉄道運休時間の推定方法，日本地震工学会論文集，第11巻，第2号，pp.40-54，2011.2) 加藤宏紀：地震災害におけるライフラインの機能的被害・復旧予測手法の開発，岐阜大学大学院工学研究科2019年度学位論文，176p.，2020.3.3) (独)産業技術総合研究所：地震動マップ即時推定システム HP，<http://qq.ghz.geogrid.org/QuickMap/about.html> 4) 中村洋光ら：リアルタイム被害推定・状況把握システムの開発状況，日本地震工学会 年次大会・国際シンポジウム2015，pp.4-32，2015.5) 国土交通省：国土数値情報ダウンロードサービス，駅別乗降客数データ(データ時点：平成30年度)，<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-S12-v2.6.html> 6) 能島暢呂：高速道路網の地震被害による交通機能への影響評価，第2回都市直下型地震災害総合シンポジウム論文集，pp.431-434，1997.