

# 地震時の高速道路復旧時間予測手法の 高精度化に向けた検討

五十嵐 翼<sup>1</sup>・丸山 喜久<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 千葉大学博士前期課程 大学院融合理工学府 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)  
E-mail: tsubasa-igarashi@chiba-u.jp

<sup>2</sup>正会員 千葉大学准教授 大学院工学研究院 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)  
E-mail: ymaruyam@tu.chiba-u.ac.jp

本研究では地震時の高速道路の復旧日数の予測モデルを高精度化することを目的とし、多重ロジスティック回帰分析を用いて復旧予測のためのロジットモデルを再構築した。2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震、2008年岩手・宮城内陸地震、2011年東北地方太平洋沖地震、2016年熊本地震の際の高速道路の開通までに要した日数をもとに、復旧予測モデルの構築に関する検討を行った。また、復旧日数の予測値の高精度化を図るため、道路構造を考慮した復旧予測モデルの検討も行った。さらに、構築した復旧予測モデルを南海トラフ巨大地震の基本ケースに適用し、復旧日数の推定を行った。

**Key Words :** *expressway, Japan Meteorological Agency's seismic intensity, restoration time, logistic regression analysis, receiver operating characteristics (ROC) curve*

## 1. はじめに

我が国では2004年新潟県中越地震、2011年東北地方太平洋沖地震、2016年熊本地震など大規模な地震が多数発生しており、そのたびに多大な人的被害や建物被害等が生じた。同様に、このような大規模な地震では、道路ネットワークやライフライン等も多大な被害を受けた。また、内閣府の中央防災会議では、南海トラフ地震や首都直下地震の危険性が指摘されている。とくに南海トラフを震源とする巨大地震では、関東から西日本の広い範囲が大きな揺れに見舞われ、人的被害や建物被害に加えて、高速道路等へも多大な被害が見込まれる。道路は被災地の応急復旧活動に欠かせない社会基盤施設であり、道路ネットワークの地震発生後の復旧状況を予測することは、事業継続計画の策定<sup>1)</sup>など災害対策の立案に貢献することができる。

既往研究<sup>2)</sup>では、震度曝露道路延長を説明変数として、既往地震<sup>3)</sup>の際の高速道路の復旧状況にもとづき、多重ロジスティック回帰分析を用いて復旧日数の予測モデルが構築されている。この既往研究<sup>2)</sup>については2章で詳細を述べるが、予測モデルで説明変数に震度曝露道路延長を用いているため、それぞれのインターチェンジ (IC) 間の延長の大きさが復旧予測モデルに大きく影響を与えていた。さらに、IC間の延長は区間ごとに大きく違いがあ

るため、隣接する区間であっても予測された復旧日数に大きな差が生じるなど、現実に即さない部分が見られた。

そこで、本研究では既往研究で構築された復旧予測モデルの再検討を行い、モデルを改良することで精度の向上を図る。さらに、分析対象とする高速道路の区間および対象とする地震を増やした予測モデルの再構築、高速道路の道路構造を考慮した復旧予測モデルなどの検討を行い、高精度な予測モデルの構築を目指す。最後に、得られた予測モデルをもとに今後発生が予測されている南海トラフ地震の際の高速道路復旧日数の予測を試みる。

## 2. 既往研究による復旧モデルの検証

既往研究<sup>2)</sup>ではIC間の復旧確率 $p$ を予測する数理モデルを構築するため、ロジスティック回帰分析<sup>8)</sup>を行い、予測モデル式(1)を構築している(表-1)。

$$p = \frac{1}{1 + \exp\{-(b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_M x_M + b_t x_t)\}}, \quad (1)$$

表-1 式(1)のロジットモデルの回帰定数

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_M$	$b_t$
13.65	-0.02	-0.11	-1.82	0.35

説明変数である $X_1$ は震度5弱および震度5強の震度曝露道路延長(km),  $X_2$ は震度6弱以上の震度曝露道路延長(km),  $x_M$ はモーメントマグニチュード(Mw),  $x_t$ は高速道路の復旧日数である。 $X_1, X_2$ は, IC間ごとに計算する。 $b_0 \sim b_2, b_M, b_t$ は回帰定数である。 $p$ は復旧確率を表す。

まず, 既往研究の後に発生した 2016 年熊本地震の際の高速道路の実際の復旧日数<sup>9)</sup>と, 既往研究のモデルで推定された復旧日数について比較を行った。図-1に, 2016年4月16日に発生した熊本地震の震度分布<sup>3)</sup>と高速道路の位置関係を示す。また, 高速道路のIC間の道路延長が10km以上の区間を緑色, 10km未満であることを青色でそれぞれ表示している。図-2では, 高速道路の実際の復旧日数と, 既往研究の予測モデル式(1)を用いて推定された復旧予測日数を表している。ここで, 式(1)の $p$ が0.51以上のとき, そのIC間は復旧したものと仮定した<sup>2)</sup>。

IC間の道路延長が長い植木IC-熊本IC間や, 御船IC-松橋IC間などでは4~5日程度の復旧日数が予測されているが, IC間の道路延長が短い他の区間では震度が大きくても予測日数がほぼ0日となっている。このことから既往研究で構築された予測モデル式(1)では, IC間ごとの道路延長の大小が予測される復旧確率に大きく影響を与えていることが考えられる。このような問題を解決するため, 次章ではモデルの改良を検討する。

### 3. 復旧予測モデルの再構築

#### (1) 復旧予測モデルの改良

まず, 既往研究<sup>2)</sup>と同じデータセットで復旧予測モデルを再検討する。つまり, 熊本地震は回帰分析の際のデータに用いない。本研究では, 式(2)の $x_1$ をインターチェンジ(IC)間の距離に対する震度5弱および震度5強の揺れに曝された距離の割合,  $x_2$ をIC間の距離に対する震度6弱以上の揺れに曝された距離の割合とした。また, 既往研究<sup>2)</sup>と同様に,  $x_M$ はモーメントマグニチュード(Mw),  $x_t$ は実際の高速道路の復旧日数とし,  $b_0 \sim b_2, b_M, b_t$ は回帰定数を表す(表-2)。

$$p = \frac{1}{1 + \exp\{-(b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_M x_M + b_t x_t)\}} \quad (2)$$

本研究により得られた式(2)のロジスティック回帰分析の結果を, ROC (Receiver Operating Characteristics) 曲線<sup>10)</sup>を用いて検証する。ここで復旧済みの区間を復旧済みと正しく判別する率を敏感度TPR (sensitivity) とし, 未復旧の区間を未復旧と正しく判別する率を特異度TNR (specificity) とする。復旧確率 $p$ が閾値以上となるとき,

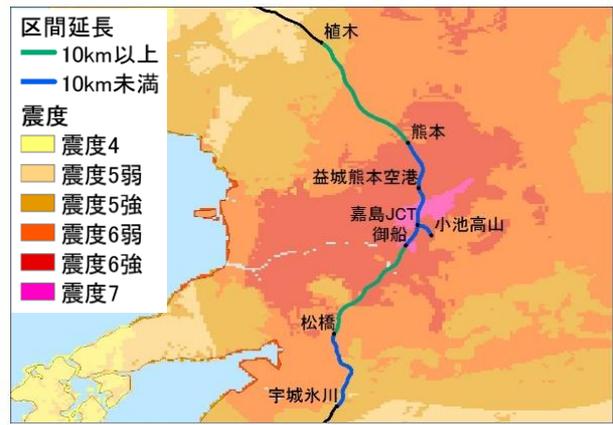


図-1 熊本地震における震度分布と九州自動車道のIC間距離

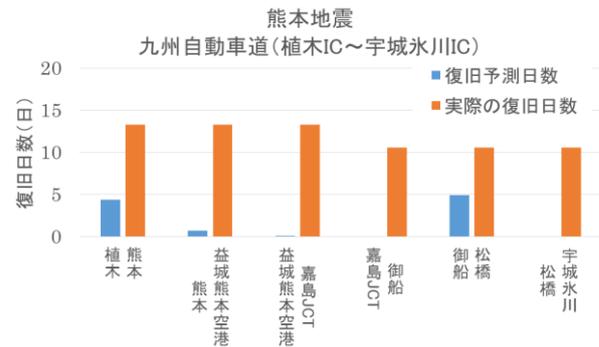


図-2 熊本地震の際の実際の復旧日数と既往研究のモデル(式(1))で得られた復旧予測日数

その区間は復旧したものとみなす。閾値を適宜変化させTPR, TNRをその都度算出し, 横軸に1-TNR, 縦軸にTPRをとったものをROC曲線という。判別モデルが有効である場合, ROC曲線は1-TNR, TPRの比が1:1の直線から左上に離れていく<sup>10)</sup>。ROC曲線下の面積はAUC (Area Under the Curve) と呼ばれ, 最大値は1, ランダムな判別では0.5となる。

既往研究の式(1)のAUCは0.93, 式(2)のAUCの値は0.95となり, 判別能力は非常に高い。図-3に, 式(2)で表されるロジットモデルのROC曲線を示す。式(2)のROC曲線にもとづき, 高速道路の復旧日数を評価するために最適な閾値を定める。TPR, TNRがともに最大となる最適な判別解を与える $p$ の閾値は, ROC曲線上の点でグラフの左上隅からの距離が最も近い点に対応する。図-3に示したROC曲線によると $p=0.52$ となった。なお, このときのTPRは0.87, TNRは0.88である。

表-2 式(2)のロジットモデルの回帰定数

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_M$	$b_t$
16.0	-2.25	-4.59	-2.00	0.41



データ数が増えたことで、新潟県中越地震の際の復旧予測日数は式(3)の方が実際の復旧日数と近くなった。また、東北地方太平洋沖地震でも式(3)で得られた復旧予測日数は実際の復旧日数に近づき、既往研究の式(1)で問題であった、隣接するIC区間ごとの復旧予測日数のばらつきも解消された。

ここで、式(3)の対象区間のほとんどが東北地方太平洋沖地震のデータとなっている。このため、新潟県中越沖地震や岩手・宮城内陸地震には、復旧日数を過大評価する区間もある。新潟県中越沖地震では、新潟県中越地地震とくらべて大きな余震が少なかったため、損傷が拡大せず早期復旧ができたことも考えられる<sup>12)</sup>。今後は、M7クラスの地震や、余震回数や復旧日数が少ない地震のデータを増やすことで、分析データがより幅広くなり、更なる予測精度の向上が見込まれる。

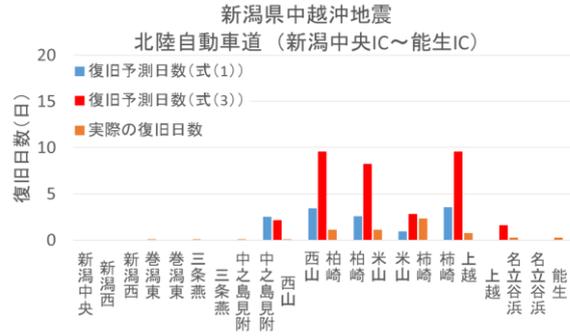


図-7 新潟県中越沖地震における復旧予測日数と実際の復旧日数の比較

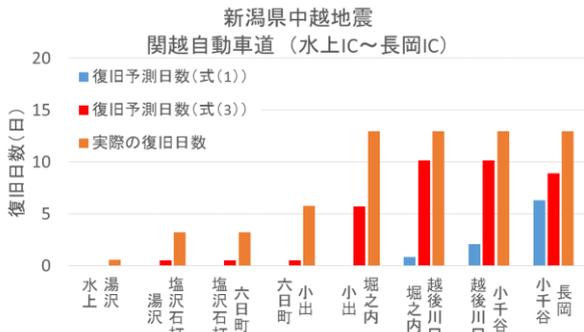


図-6 新潟県中越地震における復旧予測日数と実際の復旧日数の比較

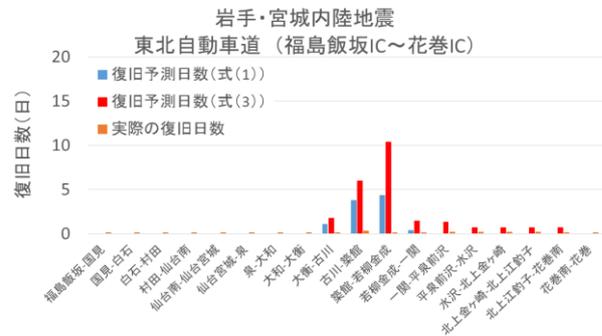
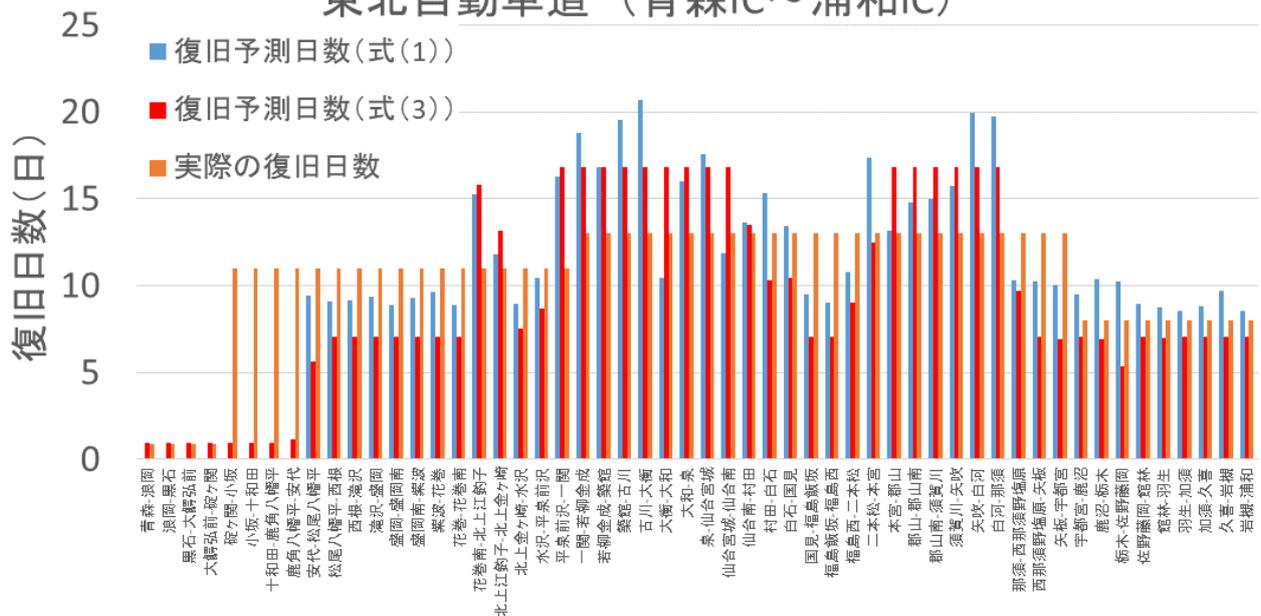


図-8 岩手・宮城内陸地震における復旧予測日数と実際の復旧日数の比較

## 東北地方太平洋沖地震 東北自動車道（青森IC～浦和IC）



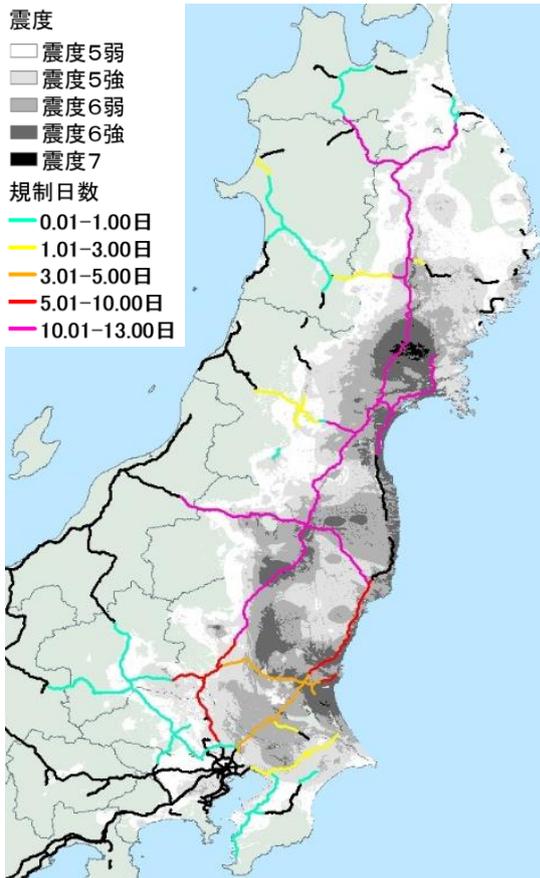


図-10 東北地方太平洋沖地震における震度分布と高速道路の実際の復旧日数

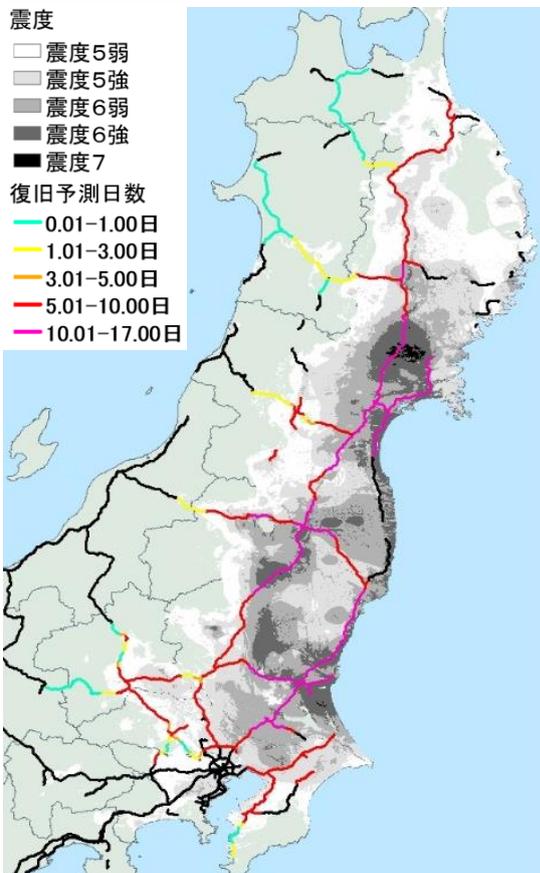


図-11 東北地方太平洋沖地震における震度分布と式(3)で得られた高速道路の復旧予測日数

#### 4. 道路構造を考慮した復旧予測モデル

復旧日数に与える道路構造の影響を推定するため、道路構造別の被害状況を分析した。文献<sup>13)</sup>は道路網のGISデータであり、橋・高架、トンネル、土工道路などに分類できる。道路構造ごとに耐震性は異なるものと考えられ、例えば丸山<sup>14)</sup>では、高速道路の盛土の区間について、走行に支障のあるとされる被災ランクBの被害は、震度6弱以上の震動を受けた区間で生じている。文献<sup>15)</sup>でも地震による高速道路の路面変状は震度5強から発生し、盛土箇所では被害が発生しやすいとされている。また、首都直下地震の被害想定では、震度6強以上の震動下で道路橋の被害があるものと仮定している<sup>16)</sup>。

そこで、既往地震の際の道路構造別の復旧状況を集計する。ここで本研究では、高速道路上の橋・高架、トンネルの区間を、構造区間、その他の区間を土工道路区間とした。図-12は東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0)、図-13は新潟県中越地震、新潟県中越沖地震、岩手・宮城内陸地震、熊本地震 (Mw6.2~7.0) の際の通行止め区間の延長の割合の系時的变化を示している。ここでは、地震発生後の通行止め発生時を基準とし、経過日数に応じて通行止めが継続している割合を表している。つまり、割合が0%となれば、すべての区間の通行止めが解除されたことを表す。とくに東北地方太平洋沖地震の際 (図-12) には、地震発生後10日目から13日目にかけて、震度6弱、震度6強の震動を受けた土工道路の区間よりも、震度6弱、震度6強の震動を受けた構造区間のほうが早く復旧していることがわかる。一方、M7クラスの地震 (図-13) に関しては、構造区間の復旧がやや早いものの明確な差は見られなかった。

以上の結果から、道路構造の影響を土工道路の区間の割合で表し、復旧予測モデルの検討を行った。

$$p = \frac{1}{1 + \exp\left\{-\left(b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_r r + b_M x_M + b_i x_i\right)\right\}} \quad (4)$$

$$p = \frac{1}{1 + \exp\left\{-\left(b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_M x_M + b_i x_i\right)\right\}} \quad (5)$$

$$p = \frac{1}{1 + \exp\left\{-\left(b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_4x_4 + b_M x_M + b_i x_i\right)\right\}} \quad (6)$$

式(3)と比較して、式(4)は説明変数 $r$  (IC間ごとの土工道路の延長の割合)、式(5)は説明変数 $x_3$  (IC間ごとの震度5弱および震度5強の揺れに曝された距離に占める土工道路の割合)と説明変数 $x_4$  (IC間ごとの震度6弱以上の揺れに曝された距離に占める土工道路の割合)を新たに加えた。また、式(6)では説明変数 $x_4$ のみを加えた。分析の結果、判別能力の指標であるAUCの値は式(4)では0.88、式(5)、式(6)では0.89となった。構造別の復旧予測

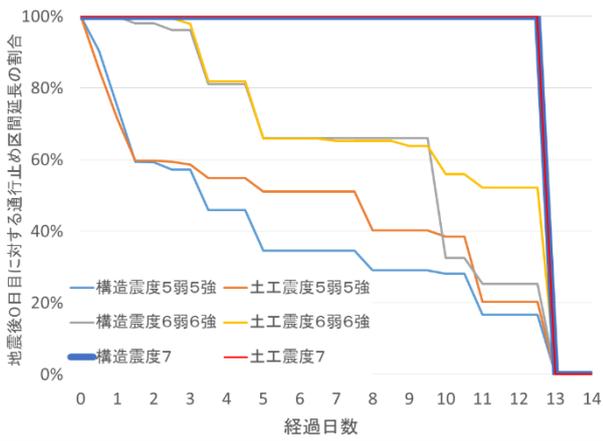


図-12 東北地方太平洋沖地震の際の経過日数に対する高速道路の通行止め区間の延長の割合

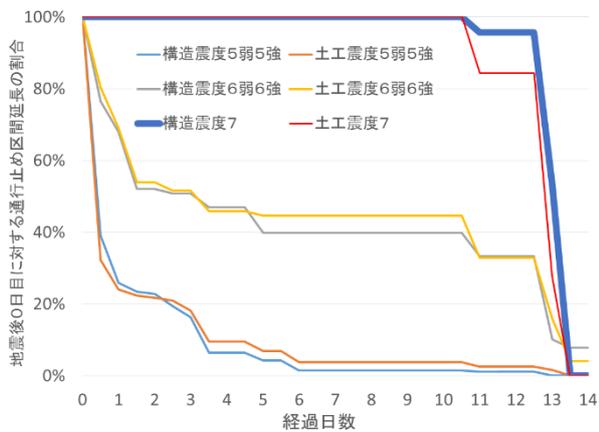


図-13 新潟県中越地震, 新潟県中越沖地震, 岩手・宮城内陸地震, 熊本地震の際の経過日数に対する高速道路の通行止め区間の延長の割合

モデルを検討する際に用いた区間にて式(3)のAUCは0.89であり, これらの式は同程度の判別能力と考えられる。

このことから, 道路構造の影響を考慮した復旧モデルとして説明変数が少ない式(6)を採用する(表-4)。なお,  $x_4$ の震度を震度6強以上にするなど, 類似した説明変数に関する検討も行ったが, AUCが大きく変わることはなかった。

図-14では熊本地震の際の式(3), 式(6)で得られた復旧予測日数と実際の復旧日数について示す。ここで, 式(6)の最適な閾値は $p=0.71$ である。式(3)の結果と比べると, 式(6)は松橋～宇城氷川間で実際の復旧状況に近い日数を予測するようになった。

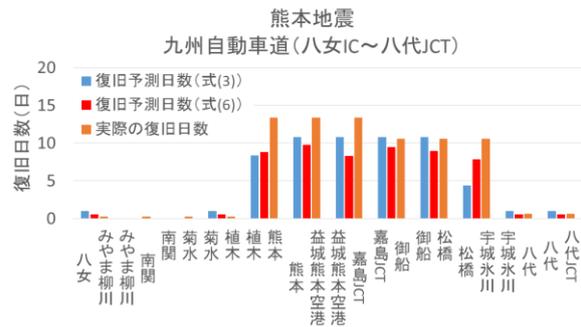


図-14 熊本地震における高速道路の実際の復旧日数と式(3), 式(6)で得られた復旧予測日数

表-4 式(6)のロジットモデルの回帰定数

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_4$	$b_M$	$b_t$
8.40	-1.51	-2.27	-1.75	-0.88	0.27



図-15 南海トラフ地震における震度分布と式(6)による地震発生1日(24時間)後の高速道路の復旧確率

## 5. シナリオ地震への適用

本研究で得られた地震発生時の高速道路復旧予測モデルを用いて今後発生が予測されている南海トラフ地震の際の高速道路の復旧予測日数の推定を行った。ここで、**図-14**では式(3)と式(6)の復旧予測日数に大きな差はなかったが、南海トラフ巨大地震と同じM9クラスの東北地方太平洋沖地震(**図-12**)では土工道路区間と構造区間の復旧日数に差が見られる。このことから、本研究では式(6)を用いることとした。また、復旧予測日数の推定を行う箇所は震度5弱以上の揺れを観測している高速道路とし<sup>17)</sup>、内閣府の中央防災会議における南海トラフ地

震の5つのパターン<sup>18)</sup>のうち、基本ケースを用いて検討を行った。

また、**図-15**から**図-17**では式(6)を用いて、地震発生後の経過日数に対する復旧確率を地図表示している。**図-18**では、式(6)による高速道路の復旧予測日数(閾値： $p = 0.71$ )を地図表示している。震源域に近い太平洋沿岸の東名高速道路などで復旧には最大16日程度の時間を要することがわかる。一方内陸側の中央自動車道などでは、東名高速道路よりも6日程度早く復旧できる見込みがあることが確認できるので、中央自動車道を利用した迂回が可能である。

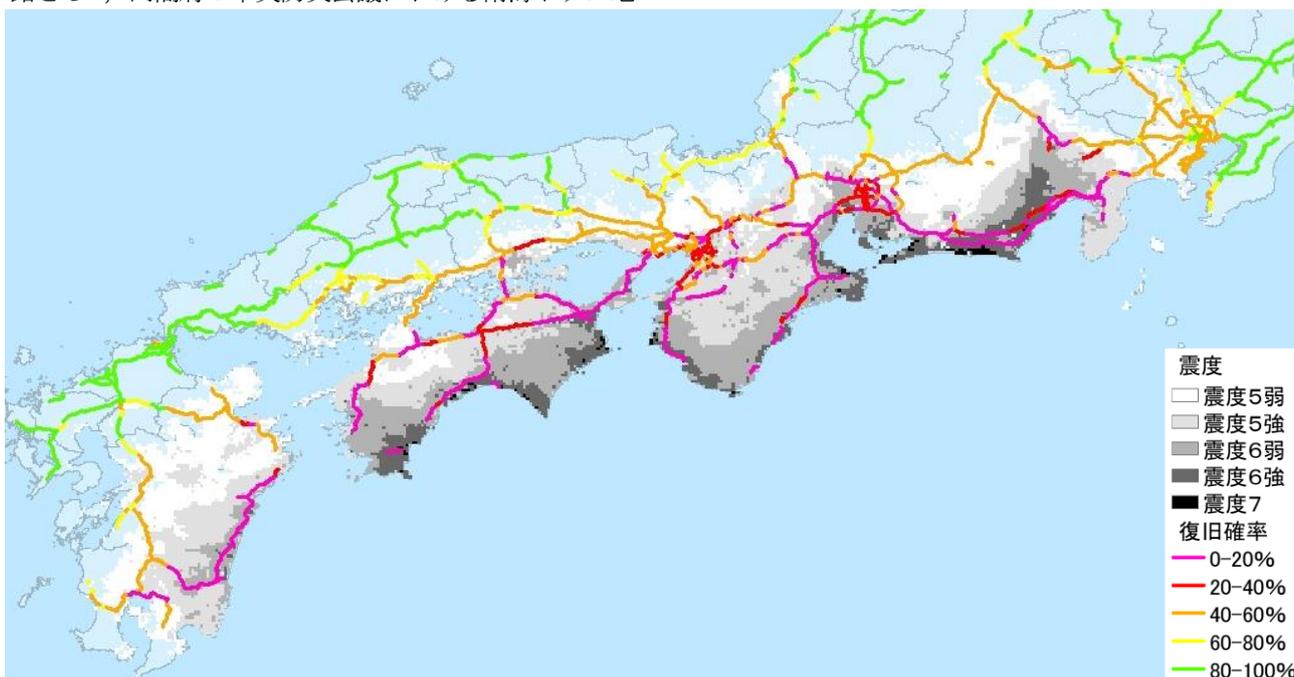


図-16 南海トラフ地震における震度分布と式(6)による地震発生3日(72時間)後の高速道路の復旧確率

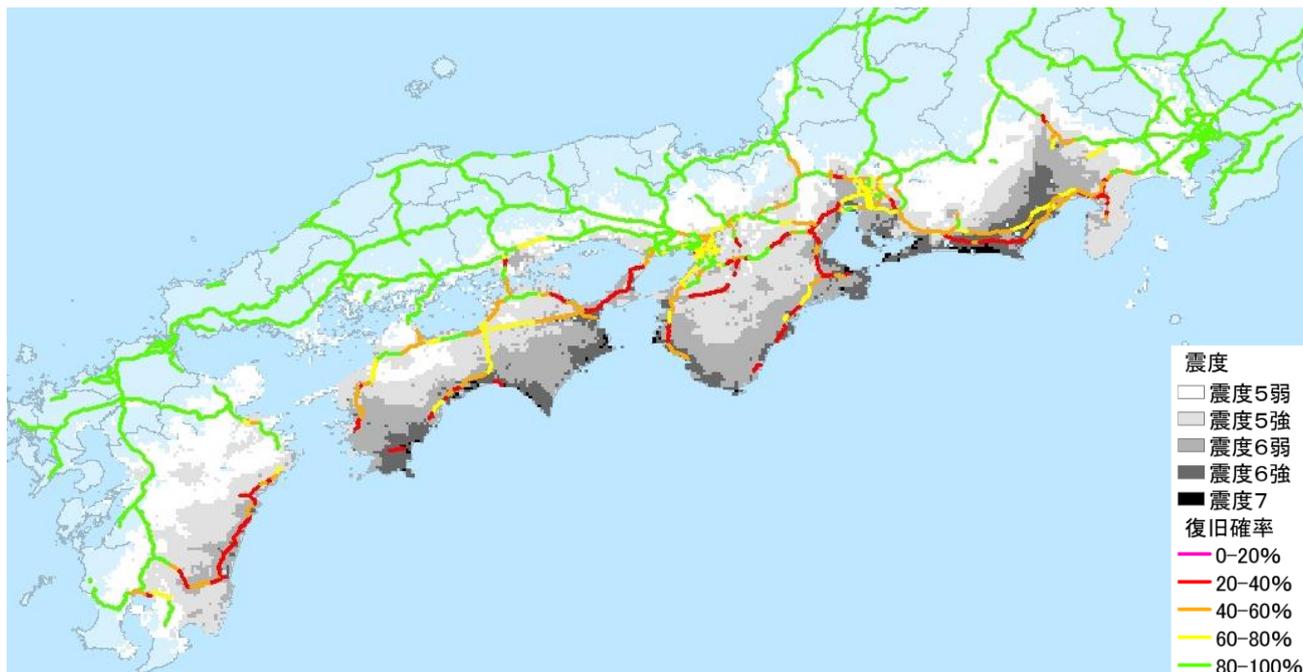


図-17 南海トラフ地震における震度分布と式(6)による地震発生10日(240時間)後の高速道路の復旧確率

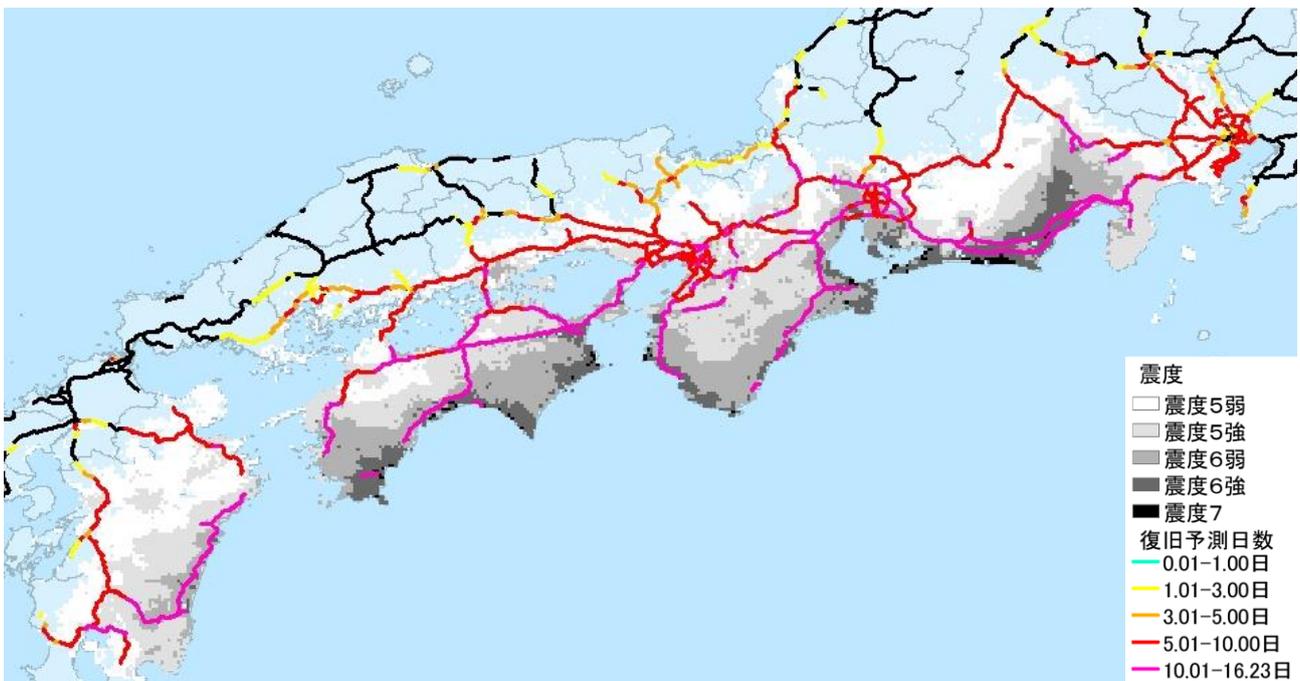


図-18 南海トラフ地震における震度分布と式(6)による高速道路の復旧予測日数

## 6. まとめ

本研究では、地震時の高速道路復旧時間予測手法の高精度化を目的とし、新たな復旧予測モデルの構築を行った。震度暴露道路延長を説明変数としていた既往研究のモデルと比べて、ある震度に曝される延長の割合を説明変数とすることによって、復旧日数の予測精度が改善された。また、連続するIC間の復旧日数の予測結果が、大きく変動することもなくなった。

さらに、対象とする既往地震や高速道路の区間を既往研究よりも増やした結果、新潟県中越地震や東北地方太平洋沖地震の際の予測結果が改善された。隣接するIC間でも区間延長の差に影響されない復旧予測日数が得られた。一方、新潟県中越沖地震や岩手・宮城内陸地震に関しては、復旧日数を過大評価する区間もあった。今後はM7程度の地震や、高速道路の復旧日数が5日未満となるようなデータをより多く集めることでより、バランスのとれた復旧予測モデルの構築ができると見込まれる。また、道路構造の違いが復旧日数に与える影響を検討したところ、東北地方太平洋沖地震では構造区間と土工道路区間で復旧日数に差が見られた。

最後に、本研究で構築した復旧予測モデルを用いて今後発生が予測されている南海トラフ地震の際の高速道路の復旧予測日数の算出を行った。その結果、震源域に近い東名高速道路などで復旧に最大16日程度時間がかかることがわかった。

## 参考文献

- 1) 永田政司, 大窪克己, 渋谷正則: 高速道路における事業継続計画策定について, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.65, VI-439, 2010.
- 2) 上原康平, 丸山喜久: 既往地震データに基づく高速道路の復旧予測に関する統計分析, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol. 72, No. 4, pp. I\_110-116, 2016.
- 3) 産業技術総合研究所: 地震動マップ即時推定システム, <https://gbank.gsj.jp/Quake/QuakeMap/index.html>
- 4) 国立国会図書館インターネット資料収集保存事業 (WARP): 日本道路公社: 新潟県中越地震に伴う高速道路の状況について, [http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/236639/www.jhnet.go.jp/format/index12\\_12\\_24.html](http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/236639/www.jhnet.go.jp/format/index12_12_24.html)
- 5) 東日本高速道路株式会社新潟支社: 平成19年新潟県中越沖地震～高速道路の被災及び復旧状況～, [http://www.e-nexco.co.jp/pressroom/press\\_release/niigata/h19/0726/pdfs/information.pdf](http://www.e-nexco.co.jp/pressroom/press_release/niigata/h19/0726/pdfs/information.pdf)
- 6) 東日本高速道路株式会社東北支社: 平成20年 岩手・宮城内陸地震で発生した高速道路の被害状況等について (第8報 最終), [http://www.e-nexco.co.jp/pressroom/press\\_release/tohoku/h20/0614/](http://www.e-nexco.co.jp/pressroom/press_release/tohoku/h20/0614/)
- 7) 東日本高速道路株式会社: 東日本大震災関連記者発表資料等, [http://www.e-nexco.co.jp/pressroom/tohoku\\_eq/](http://www.e-nexco.co.jp/pressroom/tohoku_eq/)
- 8) 青木繁伸: Rによる統計解析, オーム社, 2009.
- 9) 内閣府: 防災情報のページ: 熊本県熊本地方を震源とする地震に係る被害状況等について, <http://www.bousai.go.jp/updates/h280414jishin/>
- 10) Hanley, J.A. and McNeil, B.C.: The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve, Radiology, Vol. 143,

- No. 1, pp. 29-36, 1982.
- 11) 国土交通省国土政策局国土情報課：国土数値情報 ダウンロードサービス, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>
  - 12) 坂本香, 藤本泰弘, 山田信行：新潟県中越沖地震により被災した高速道路トンネルの復旧について, 土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, Vol35, VI-015, 2008.
  - 13) 三井造船システム技研株式会社：MSR Product for MapInfo, 道路地図 V2012-3 全国版, 388549, 2012.
  - 14) 丸山喜久, 山崎文雄, 用害比呂之, 土屋良之：新潟県中越地震の被害データに基づく高速道路盛土の被害率と地震動強さの関係, 土木学会論文集 A, Vol. 64, No. 2, pp. 208-216, 2008.
  - 15) 澤野幸輝, 菊池慎司, 永井宏, 鶴原敬久：地震による高速道路被災箇所の要因分析, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol 68, VI-485, 2013.
  - 16) 中央防災会議 首都直下地震対策検討ワーキンググループ：首都直下地震の被害想定項目及び手法の概要, 2013.
  - 17) 垂水祐二, 佐藤亜樹男：地震時通行止め基準値の見直し—NEXCO 東日本—, EXTEC, No. 79, pp. 8-11, 2006.
  - 18) 内閣府：防災情報のページ：南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ, [http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough\\_info.html](http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_info.html)

## IMPROVEMENT OF NUMERICAL MODEL TO PREDICT RESTORATION TIME OF EXPRESSWAYS AFTER AN EARTHQUAKE

Tsubasa IGARASHI and Yoshihisa MARUYAMA

This study tries to develop a more accurate numerical model to estimate the restoration time of the expressways after an earthquake. The previous model developed by Uehara and Maruyama (2016) underestimated the restoration time after the 2016 Kumamoto earthquake. Hence, the authors performed a series of logistic regression analyses to develop the numerical model for the estimation of the restoration time of the expressways after an earthquake. The authors modified the numerical model to include the effects of road-structural types on the restoration time after the actual earthquakes. The numerical model was applied to a scenario earthquake in the Nankai Trough, and the restoration time was estimated.