

011

既往地震データに基づく高速道路の復旧予測手法の提案

Construction of the numerical model to predict the restoration time of expressways after an earthquake

14TM0311 上原 康平  
Kohei Uehara

指導教員 丸山 喜久

SYNOPSIS

This study developed a numerical model to estimate the restoration time of expressways after an earthquake. A series of logistic regression analyses was performed based on the dataset after the recent earthquakes: the 2004 Mid-Niigata earthquake, the 2007 Chuetsu offshore earthquake, the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, and the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake. The model constructed by this study had an excellent discriminating ability based on the assessment of receiver operating characteristics (ROC) curve. The model was applied to estimate the restoration time of expressways after a scenario earthquake which may occur in the Nankai Trough.

1. はじめに

中央防災会議では、南海トラフ巨大地震や首都直下地震が近い将来発生すると予想している<sup>1)</sup>。2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震、2011年東北地方太平洋沖地震などの地震が発生した際に、人的被害や建物被害に加え、道路ネットワークやライフライン等にも多大な影響が生じた。道路ネットワークは被災地への緊急対応を司る重要なライフラインであるため、地震後の復旧状況を予想することは、災害対策の立案に貢献することができる。

そこで本研究では、震度曝露人口<sup>2),3)</sup>の考え方を応用した震度曝露道路延長を説明変数として、高速道路の復旧期間を予測することを目的とする。既往地震の際の高速道路の復旧状況にもとづき、高速道路の復旧確率を予測する多重ロジスティック回帰モデルを構築する。さらに、ロジスティック回帰分析の結果を、ROC曲線（Receiver Operating Characteristics curve）によって検証し、復旧予測モデルに適した関数形を定める。また、今後発生が予想されている南海トラフ巨大地震時の高速道路ネットワークの復旧日数の推定を試みた。

2. 既往地震の際の高速道路復旧時間と震度曝露道路延長

地理情報システム（GIS）上に対象地域の道路データを反映させ、高速道路の道路延長を算出した。これに震度情報を付加させるために、対象とする地震の震度分布を重ね合わせた。本研究では、2004年新潟県中越地震<sup>4)</sup>、2007年新潟県中越沖地震<sup>4)</sup>、2008年岩手・宮城内陸地震<sup>5)</sup>、2011年東北地方太平洋沖地震<sup>5)</sup>の4地震を対象とした。4地震の高速道路の復旧期間の概要<sup>6)-9)</sup>を表-1に示す。ここで復旧期間は、車線規制の有無に関わらず、地震後に一般車両の通行が認められるまでに要した時間とした。新潟県中越地震、新潟県中越沖地震については最大速度（PGV）の空

表-1 高速道路の復旧期間の概要

|            | 対象路線   | 通行止め範囲      | 復旧期間(日) |      | M   |
|------------|--------|-------------|---------|------|-----|
|            |        |             | 最短      | 最長   |     |
| 新潟県中越地震    | 関越自動車道 | 長岡IC－水上IC   | 1.0     | 13.0 | 6.6 |
| 新潟県中越沖地震   | 北陸自動車道 | 能生IC－新潟中央IC | 0.1     | 2.4  | 6.6 |
| 岩手・宮城内陸地震  | 東北自動車道 | 花巻IC－福島飯坂IC | 0.1     | 0.2  | 6.9 |
| 東北地方太平洋沖地震 | 東北自動車道 | 青森IC－浦和IC   | 0.9     | 13.0 | 9.0 |

間分布<sup>4)</sup>を式(1)を用いて計測震度 $I$ に変換<sup>10)</sup>した。岩手・宮城内陸地震と東北地方太平洋沖地震の震度分布は、地震動マップ即時推定システム<sup>5)</sup>より入手した。

$$I = 2.42 + 1.82 \log_{10} PGV$$

(1)

震度曝露道路延長はインターチェンジ（IC）間ごとに、震度階別に集計した。高速道路では、計測震度が震度5弱以上であると通行止めの処置をとり、点検を行う<sup>11)</sup>ため、本研究では震度5弱以上の高速道路を対象に震度階ごとに曝露道路延長を集計した。

3. 復旧予測モデルの構築

高速道路の復旧確率を予測する数理モデルを構築するために、統計解析システムのRを用いて、ロジスティック回帰分析を行う<sup>12)</sup>。関数形は、式(2)、(3)を仮定した。統計解析システムRに用いるデータフレームとして、IC間ごとの開通までに要した日数<sup>6)-9)</sup>に基づき、IC間の震度曝露道路延長と地震後0～13日の通行の可否をとりまとめた。

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

(2)

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

(3)

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)、 $x_t$ は開通までに要した日数（復旧期間）、 $x_M$ はモーメントマ

グニチュードである。また、 $b_0 \sim b_2$ ,  $b_M$ ,  $b_l$ は回帰定数である。震度曝露道路延長に関する変数を1つだけとする場合も検討したが、AIC（赤池情報量基準）<sup>12)</sup>の値に基づき、本研究では式(2)、(3)のように震度曝露道路延長を2変数とした。 $p$ は復旧確率を表し、確率変数を $Y$ （復旧済み：1，未復旧：0）とすると以下のように書ける。つまり、ある時点においてIC間の復旧が完了している事象の生起確率を $p$ としている。

$$p = \Pr(Y=1|x_1, x_2, x_t, x_M) \quad (4)$$

$$1-p = \Pr(Y=0|x_1, x_2, x_t, x_M) \quad (5)$$

式(2)、(3)で算出される $p$ はIC間ごとの復旧確率である。また、 $x_1$ および $x_2$ はIC間ごとの震度曝露道路延長を表しており、ある場所での地震動強さを反映している。一方、式(3)のようにモーメントマグニチュードを導入したのは、マグニチュードの大きな地震の下で広範囲にわたって大きな地震動に晒される影響を表すためである。道路被害が広範に生じた場合には復旧期間が長くなると想像されるので、モーメントマグニチュードを説明変数とすることによって、地震による強震域の広さの違いを表すことを意図した。

本研究のモデルで算出される復旧日数はIC間の震度曝露道路延長の大小に依存する。高速道路の最小構成要素をIC間として捉え、IC間ごとの震度曝露道路延長を用いて復旧日数を算出することとした。また、このモデルでは震度曝露道路延長 $x_1$ および $x_2$ をIC間ごとに算出し、IC間ごとの復旧確率 $p$ を評価しているため、IC間の空間的な連続性は考慮していない。

式(2)、(3)の関数形を仮定したロジスティック回帰分析の結果を、ROC（Receiver Operating Characteristics）曲線<sup>13)</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感度 $TPR$ （sensitivity）、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）と定義する。感度および特異度は、表-2の混同行列に基づき式(6)、(7)のように書ける。

$$TPR = TP / (TP + FN) \quad (6)$$

$$TNR = TN / (TN + FP) \quad (7)$$

式(2)および(3)の $p$ の値を適宜変化させ、 $TPR$ および $TNR$ をその都度算出する。そして、横軸を $1-TNR$ 、縦軸を $TPR$ として図化したものがROC曲線である。一般的に、判別モデルが有効である場合、ROC曲線は $1-TNR$ と $TPR$ の比が1:1である直線から左上に離れ、判別能力の高いモデルのROC曲線はグラフの左上隅に近づく<sup>13)</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<sup>13)</sup>。

式(2)および式(3)のロジットモデルに対してROC曲線を描くと図-1のようになる。式(2)のモデルのAUCは0.77、式(3)のモデルのAUCは0.93となり、式(3)の方がAUCが大きく判別能力が高い。また、式(3)のAUCの値に基づき、判別能力が優れたモデルと判断した（優：0.9～1.0，良：0.8～0.9，可：0.7～0.8）<sup>14), 15)</sup>。式(3)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復旧確率 $p$ の値を定める。復旧確率 $p$ がある値以上になったときに、その区間は復旧済みであるものと判別する。最適な判別結果を与える $p$ の値は、ROC曲線上の点でグラフの左上隅に最も近い点に対応する。図-1のグラフの左上隅からの距離が最も近くなる $1-TNR$ 、 $TPR$ を与える $p$ を評価したところ、本研究の式(3)のモデルでは $p = 0.51$ となった。なお、このときの $TPR$ は0.83、

表-2 モデル検証のための混同行列

|    |              | 予測                              |                                |
|----|--------------|---------------------------------|--------------------------------|
|    |              | Positive<br>復旧済み                | Negative<br>未復旧                |
| 観測 | True<br>復旧済み | True Positive(TP)<br>開通済みの的中数   | False Negative(FN)<br>未開通のはずれ数 |
|    | False<br>未復旧 | False Positive(FP)<br>開通済みのはずれ数 | True Negative(TN)<br>未開通の的中数   |

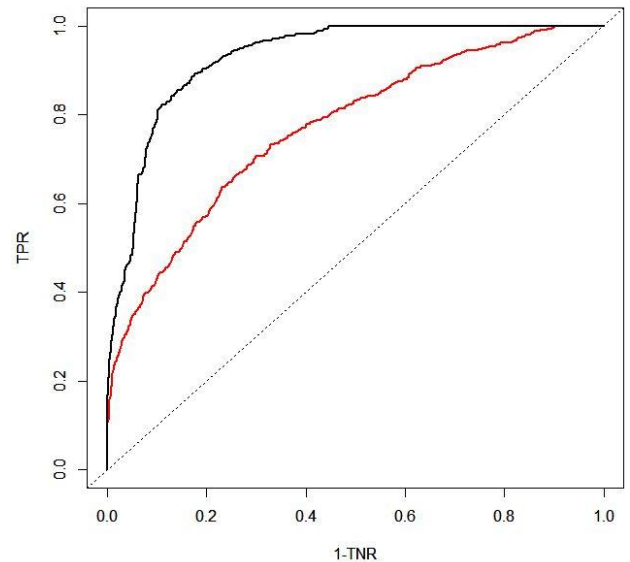


図-1 式(2)のロジットモデルのROC曲線（赤色）と式(3)のロジットモデルのROC曲線（黒色）

$TNR$ は0.88である。

#### 4. 高速道路の復旧日数と震度曝露道路延長の関係

##### (1) 既往地震への適用

前章で構築した復旧予測モデル（式(3)）を用いて、新潟県中越地震、および東北地方太平洋沖地震を対象に、地震後の高速道路の復旧に要した実際の日数と、モデルで推定した復旧日数を比較した（図-2, 3）。ここで、高速道路の復旧日数は、ROC曲線を用いた検証結果を踏まえて、 $p = 0.5$ となるとき<sup>16)</sup>の $x_t$ とした。また、 $x_1$ ,  $x_2$ がどちらも0 kmのときには、高速道路の通行規制が行われないものとした。さらに、モデルで算出した復旧日数が負になった場合は、復旧日数は0日とした。

新潟県中越地震の際の開越自動車道（図-2）では、実際の復旧期間が13日であった区間の予測結果が最大でも7日程度と過小になった。新潟県中越地震では、盛土部において車線全体が崩壊するような大規模崩壊が複数発生した<sup>16)</sup>。既往のいくつかの被害地震を考慮して統計的に構築した本研究のモデルでは、このような特定の地震で生じた局所的な大被害の影響を反映することが難しい。そのため、予測された復旧日数は現実の復旧日数と比べて過小となったものと考えられる。東北地方太平洋沖地震の際の東北自動車道（図-3）では、実際の開通までに要した日数は11日と13日の区間が隣接して存在する。本研究ではICの空間的な連続性を考慮していないため、隣り合うICでも推定された復旧日数に差が生じている。しかし実際の開通に13日要した区間については、予測された復旧日数が長くなる傾向がある。これらの結果から、本研究で構築した復旧日数予測モ

デルは、新潟県中越地震の一部道路区間を除けば、推定精度は概ね良好と判断した。

図-3をもとに、東北地方太平洋沖地震の際の東北自動車道について、震度分布と実際の開通までに要した日数を図

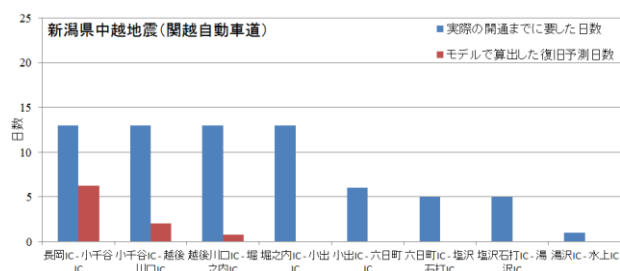


図-2 新潟県中越地震における実際の復旧日数とモデルで算出した復旧日数の関係

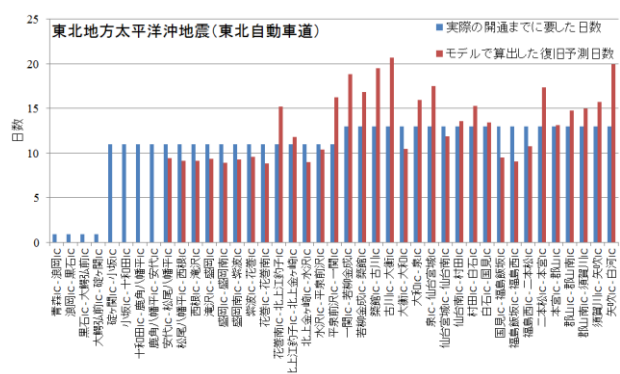


図-3 東北地方太平洋沖地震における実際の復旧日数とモデルで算出した復旧日数の関係

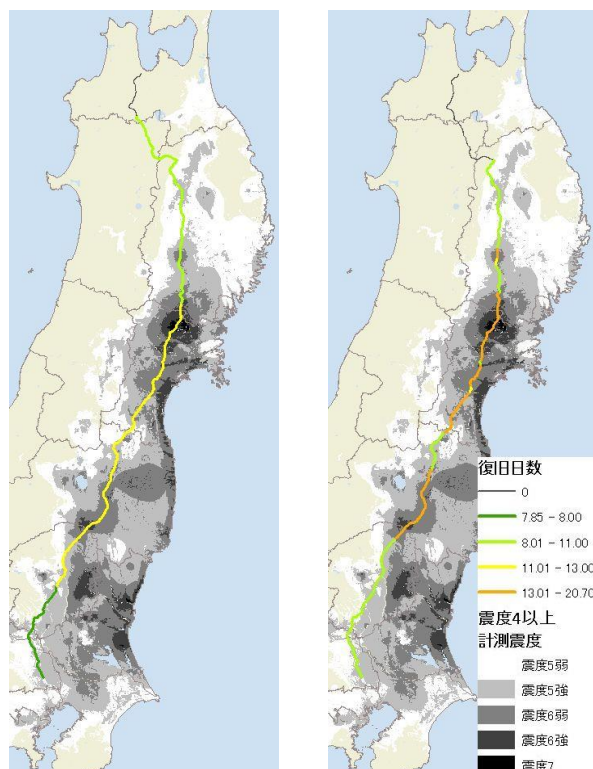


図-4 東北地方太平洋沖地震における震度分布と実際の開通までに要した日数（左）およびモデルで算出した復旧日数（右）

-4（左）のように地図上に示す。図-4（左）によると、岩手県北部、秋田県、青森県の一部区間で震度5弱未満の区間でも実際には通行止めが生じている。高速道路の通行規制は、インターチェンジ等に設置されている地震計の観測値をもとに実施されており、一般的には震度5弱以上で通行止めの措置がとられる<sup>11)</sup>。本研究で用いた地震動マップ即時推定システム<sup>5)</sup>の震度分布には高速道路に設置された地震計の観測値が考慮されていないため、現実の通行規制状況と地震動強さの間に一部整合性が取れなかったものと考えられる。また、モデルで算出した復旧日数を図-4（右）に示す。両者を比較すると、震度6弱以上の区間ではやや長めの復旧日数が予測されているが、その差は数日であり概ね現実に即している。

## (2) シナリオ地震への適用

本研究で構築した復旧予測モデルを南海トラフ巨大地震に適用し、高速道路の復旧日数を推定した。南海トラフ巨大地震の震度分布に関しては、中央防災会議で定義されている南海トラフ地震の5つのパターンのうち、基本ケースを用いて検討を行った<sup>17)</sup>。

式(3)のモデルを適用し、復旧日数を算出した。復旧日数 $x_t$ の算出には、前章までの検討結果を踏まえて $p = 0.5$ を式(2)に代入した。 $p = 0.5$ とすることの汎用性に関しては、今後の検討を要する。結果を図-5に示す。富士ICから清水IC間での震度6弱以上の曝露道路延長は約35.5 kmとなり、復旧日数が18.9日と予測されるなど、沿岸部で復旧日数が長くなるのが分かる。東名高速道路および新東名高速道路は、他の高速道路と比べて復旧日数が長い区間が多く、復旧期間として2～3週間が見込まれる。一方、並行する中央自動車道は1週間程度での復旧が見込めるため、新東名高速道路および東名高速道路の代用として果たす役割は大きいものと思われる。

式(3)を用いて、地震1日後、3日後、5日後、7日後～10日後の復旧確率 $p$ を算出した。さらに、全区間数（震度5以上の区間数）に対する $p$ が0.5以上となる区間数の割合を算出し、表-3のようにまとめた。1日後から7日後までは、復旧確率 $p$ が0.5以上となる区間は増加しないが、8日後以降は増加し、10日後には70%以上の区間の復旧確率が50%以上となった。図-6に、震度分布と復旧確率の経時変化を示す。10日後には72%の区間で復旧確率 $p$ が50%以上となるが、震度6弱以上の区間では復旧確率 $p$ が0.5未満であり、復旧作業が長期化することが懸念される。

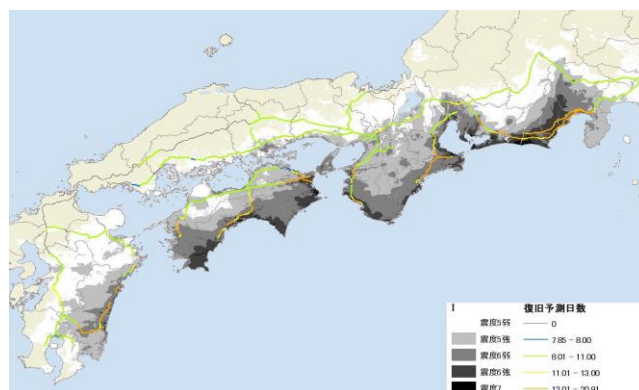


図-5 南海トラフ巨大地震における震度分布<sup>16)</sup>と高速道路の復旧予測日数の関係

表-3 全区間数に対する復旧確率 0.5 以上の区間数の割合

| 復旧日数                      | 1   | 3   | 5   | 7   | 8   | 9   | 10  |
|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $p \geq 0.5$ の区間数<br>全区間数 | 21% | 21% | 21% | 21% | 22% | 54% | 72% |

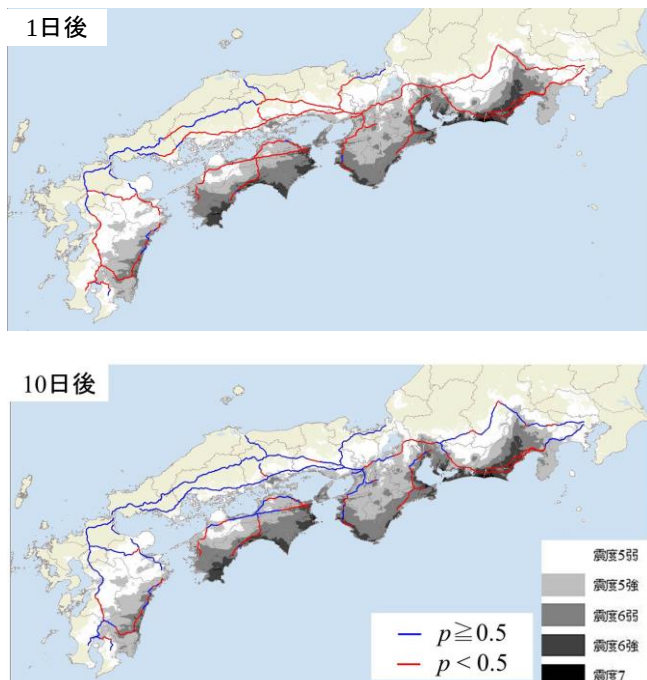


図-6 震度分布<sup>18)</sup>と地震後の復旧確率  $p$  の推移

## 5. まとめ

本研究は、既往地震における高速道路の開通までに要した日数をもとに、多重ロジスティック回帰分析を用いた復旧予測モデルを構築した。構築した復旧予測モデルを、既往地震に適用し検証を行った後、シナリオ地震への適用として南海トラフ巨大地震発生時の高速道路の復旧日数を推定した。

モデルの検証として、ロジスティック回帰分析において、地震の強震域を示すモーメントマグニチュードを説明変数として考慮するか否か、および復旧日数に与える説明変数の影響の評価を行った。モーメントマグニチュードを考慮すると、考慮しない場合よりもモデルの診断能力が高く、AUCの値から判別能力の高い優れたモデルを構築することができた。

本研究の結果では、新潟県中越地震、新潟県中越沖地震、岩手・宮城内陸地震、東北地方太平洋沖地震の4地震を対象とし、ICごとの震度曝露道路延長の変数に加え、モーメントマグニチュードを変数として構築した復旧予測モデルが最適であると考えられた。しかし復旧日数が短い区間や、震度曝露道路延長が短い区間については、教師データが充分ではなく、実際の開通までに要した日数とモデルで算出した復旧日数に差が生じた区間がある。また本研究では、IC間の空間的な連続性を考慮していないため、高速道路の復旧作業の実情に合わない予測結果を示すこともある。今後は、IC間の連続性を考慮しつつ、IC間の道路構造に関する検討を行い、より精度の高く現実に即した復旧予測モデルの構築を期待する。

## 参考文献

- 1) 内閣府：防災情報のページ,  
<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/index.html>
- 2) 能島暢呂, 杉戸真太, 久世益充, 石川裕, 奥村俊彦, 宮腰淳一：地震動予測マップの活用—その2：震度曝露人口の試算—, 土木学会地震工学論文集, 4p, 2003.
- 3) 能島暢呂, 杉戸真太, 久世益充, 濱本剛紀：震度情報ネットワークによる震度曝露人口のリアルタイム推計, 地域安全学会論文集, No.6, pp. 181-190, 2004.
- 4) Maruyama, Y., Yamazaki, F., Mizuno, K., Tsuchiya, Y., and Yogai, H.: Fragility curves for expressway embankments based on damage datasets after recent earthquakes in Japan, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 30, No. 11, pp. 1158-1167, 2010.
- 5) 地震動マップ即時推定システム,  
<https://gbank.gsj.jp/QuakeMap/index.html>
- 6) 社団法人地盤工学会：土構造物の地震時における性能設計と変形量予測に関するシンポジウム発表論文集, 2007.
- 7) NEXCO東日本：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/](http://www.e-nexco.co.jp/pressroom/press_release/niigata/h19/0726/), 2007.
- 8) NEXCO 東日本：プレスリリース, 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,  
[http://www.e-nexco.co.jp/pressroom/press\\_release/tohoku/h20/0614/](http://www.e-nexco.co.jp/pressroom/press_release/tohoku/h20/0614/), 2008.
- 9) NEXCO 東日本：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/)
- 10) Karim, K. R. and Yamazaki, F.: Correlation of the JMA Instrumental Seismic Intensity with Strong Motion Parameters, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 31, No. 5, pp. 1191-1212, 2002.
- 11) 後藤順治：地震時における道路通行規制基準の変更—安全性・信頼性の高い道路を目指して—, EXTEC, No. 59, pp. 21-23, 2001.
- 12) 青木繁信：Rによる統計解析, オーム社, 2009.
- 13) 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.
- 14) 丸山喜久, 永田茂, 若松加寿江：東北地方太平洋沖地震における上水道管路被害分析に基づく広域被害予測に関する検討, 日本地震工学会論文集, Vol. 15, No. 7, pp. 7\_416-7\_427, 2015.
- 15) ハスパートル, 丸山清輝, 野呂智之, 中村明：ロジスティック回帰分析を用いた既存地すべり地形の地震時の危険度評価, 日本地すべり学会誌, Vol.49, No.1, pp.12-21, 2012.
- 16) 丸山大三, 青柳貴司：新潟県中越地震における高速道路の早期回復, 平成 18 年度国土交通省国土技術研究会,  
<http://www.mlit.go.jp/chosahokoku/h18giken/program/kadai/pdf/ippan/ippan1-08.pdf>
- 17) 南海トラフの巨大地震モデル検討会：南海トラフの巨大地震による震度分布・津波高について（第一次報告）,  
[http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/pdf/1st\\_report.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/pdf/1st_report.pdf), 2012.