

# 2011年東北地方太平洋沖地震において津波作用を受けた 道路交通インフラの構造被害把握

Structural Damage Clarification of Road Infrastructures  
subjected to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami

○高橋 和慎<sup>1</sup>, 庄司 学<sup>2</sup>  
Kazunori TAKAHASHI<sup>1</sup> and Gaku SHOJI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 筑波大学大学院システム情報工学研究科

Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

<sup>2</sup> 筑波大学システム情報系

Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba

We analyze satellite images of damaged road infrastructures, such as bridges, due to tsunami waves during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake tsunami. We detect wash-away distances of 28 decks and wash-away areas of 27 embankments. We calculate inundation depths at the damaged bridges by carrying out tsunami flow and inundation simulations. The dependence of wash-away distances of the decks and wash-away areas of the embankments at the damaged bridges upon inundation depths is revealed.

**Keywords :** the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake tsunami, road infrastructure, bridge, structural damage clarification, satellite image

## 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震( $M_w = 9.0$ )では、東日本沿岸の広域に及ぶ道路交通インフラが津波作用を受け、その多くが甚大な構造被害を受けた。それらの中でも、特に橋梁が被害を受けることでその機能が失われると、道路ネットワークが寸断され発災直後の救援・復旧活動に甚大な影響を及ぼす。そのため広域な津波災害に対し、道路交通インフラの重要な要素である橋梁の構造被害の状況を迅速に把握することは重要である。このような観点から、衛星画像に基づく橋梁の広域的な被害把握に関する研究が精力的に行われており、著者らも衛星画像を利用して橋梁の構造被害を把握するとともに、それらの浸水高に対する脆弱性を明らかにしている<sup>1), 2)</sup>。本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震津波により被害を受けた橋梁を対象に衛星画像に基づく分析を行い、浸水深を指標として構造被害との関係を明らかにする。さらには被災前後に取得された衛星画像から橋梁の構造被害を半自動的に取得し、道路ネットワークの寸断に関わる橋梁の構造被害を即時的に推定する手法に関して提案する。

## 2. 対象橋梁と津波数値シミュレーション

本研究で対象とする橋梁は、庄司ら<sup>3)</sup>によって分析された津波作用により被災した33橋梁の中で、桁橋構造であり、かつ、衛星画像から主桁の流出(以降、主桁流出)または橋台背面盛土の流出(以降、盛土流出)の被害を把握可能な27橋梁とする(図1)。なお、主桁流出の被害が生じた橋梁の中で、後述する数値計算結果で主桁の標高の位置まで浸水した橋梁のみを対象としている。

東北大により開発されたTUNAMI-CODE (Tohoku University's Numerical Analysis Model for Investigation of Tsunami)<sup>6)</sup>を用いて津波の伝播及び浸水に関する数値シ

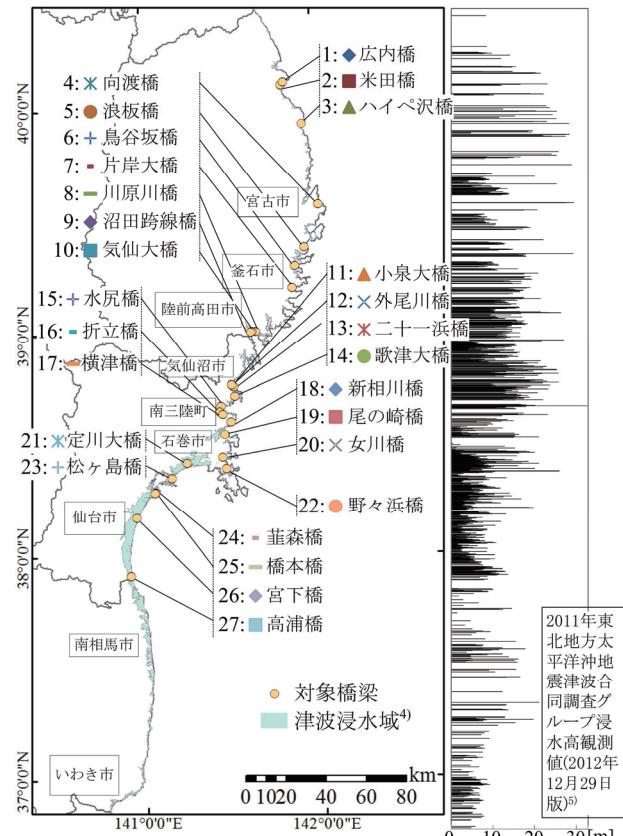


図1 対象橋梁の位置及び観測された浸水高  
(図中の番号及び記号は橋梁の通し番号  
及び各橋梁を示す記号を意味する)

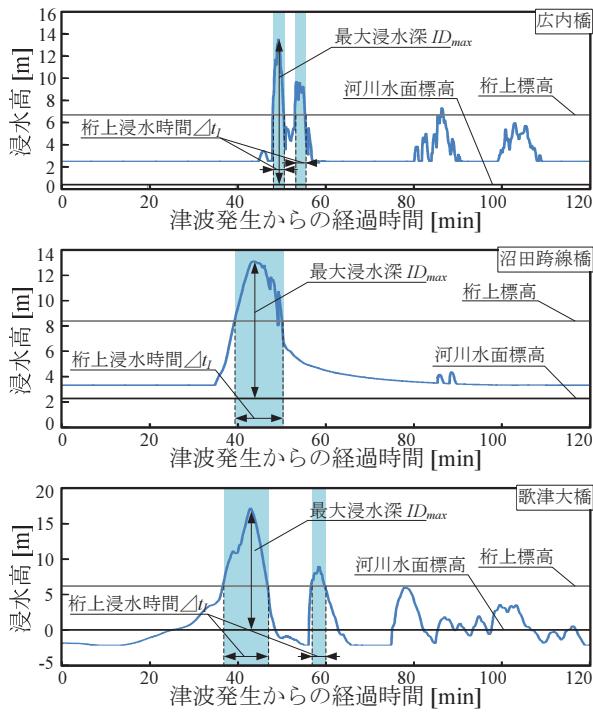


図 2 浸水高の時刻歴波形

ュレーションを行い、橋梁の位置における最大浸水高を求めた。支配方程式は浅水理論に基づく以下の式となっており、格子配列は Staggered 格子を採用し leap-frog 差分法により計算を実施した。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (1b)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (1c)$$

ここで  $\eta$  は津波波高、 $M$  と  $N$  はそれぞれ東西方向である  $x$  方向、南北方向である  $y$  方向の流量フラックス、 $D$  ( $=\eta+h$ ) は全水深、 $h$  は静水深である。なお、Manning の粗度係数は全計算で一様に 0.025 とした。数値計算は 27 の対象橋梁を 19 の計算 Group に分割し、それぞれにおいて計算領域を広域(Region1)から狭域(Region6)までの 6 段階に設定した。標高及び水深のデータについては、陸域の広域 4 領域では GEBCO30 のデータ、陸域の狭域 2 領域では国土地理院提供の数値標高モデル (10mDEM)を利用し、海域の広域 1 領域では GEBCO30 のデータ、海域の狭域 5 領域では日本水路協会の海底地形デジタルデータ M7000 シリーズを利用した。各領域でこれらのデータを Kriging 法で補間した。津波波源モデルは Fujii *et al.* のモデル(version4.2)<sup>7)</sup>を利用し、Okada の方法<sup>8)</sup>により初期水位を静的に与えた。計算時間は刻み幅 0.10 秒で総計算

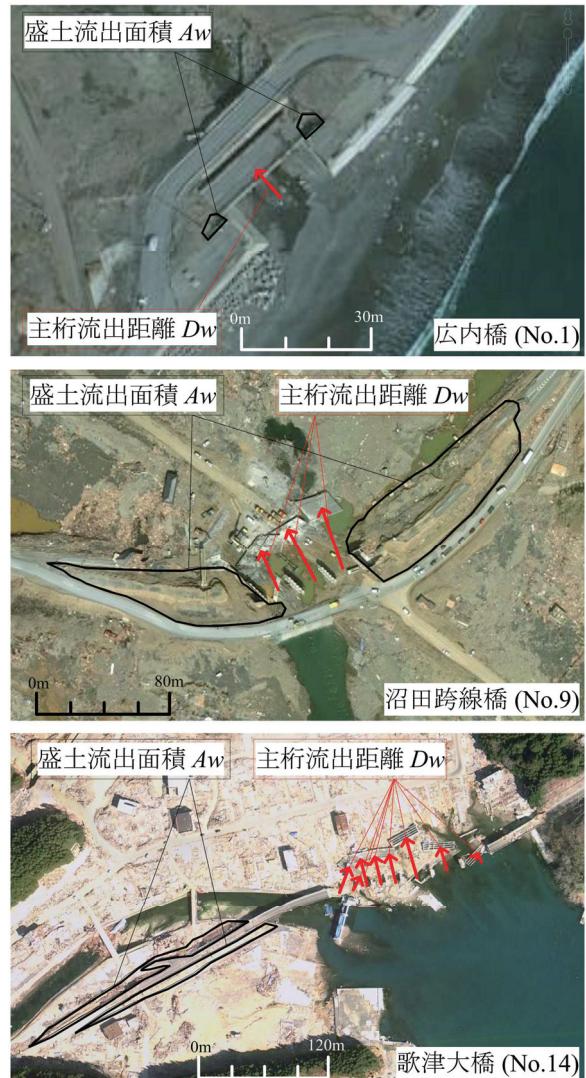


図 3 主桁流出距離  $D_w$  及び盛土流出面積  $A_w$  の算出結果

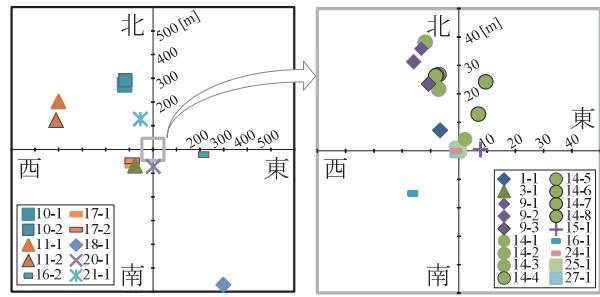


図 4 主桁の最終的な流出位置

時間は 120 分とした。

津波シミュレーションの妥当性の評価については観測点  $i$  に対して浸水高の観測値  $R_i$  の計算値  $H_i$  に対する比を  $K_i$  と定義した上で、対数平均  $K$  と対数標準偏差  $\kappa$  を指標として評価する<sup>9)</sup>。計 519 の各観測地点における観測値及び計算値を基に計算した結果、観測点における平均的な補正倍率を表す  $K$  は 0.927、 $K$  に対する変動の割合を表す  $\kappa$  は 1.190 となった。これらは共に 1 に近いほど精度が良いとされ、相田<sup>10)</sup>は  $K$  が 0.92、 $\kappa$  が 1.2 となる津波波源モデルを精度の良いモデルとしている。この検討結果に基づき、各橋梁の位置での数値計算の精度が十分で

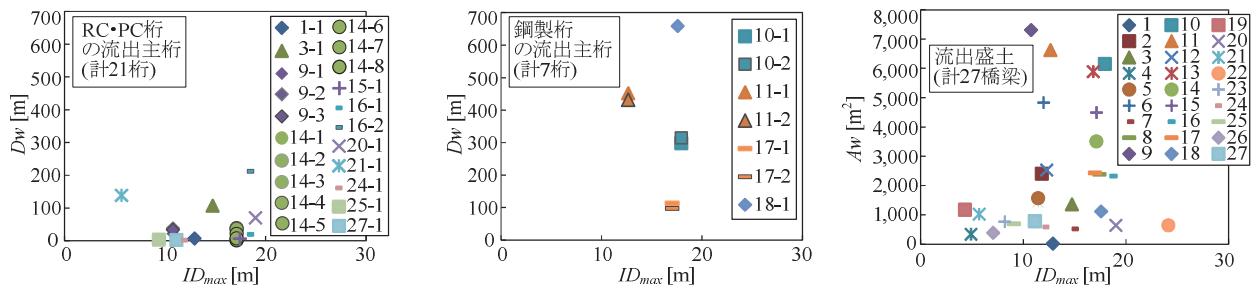


図 5 主桁流出距離  $D_w$  及び盛土流出面積  $A_w$  と最大浸水深  $ID_{max}$  との関係

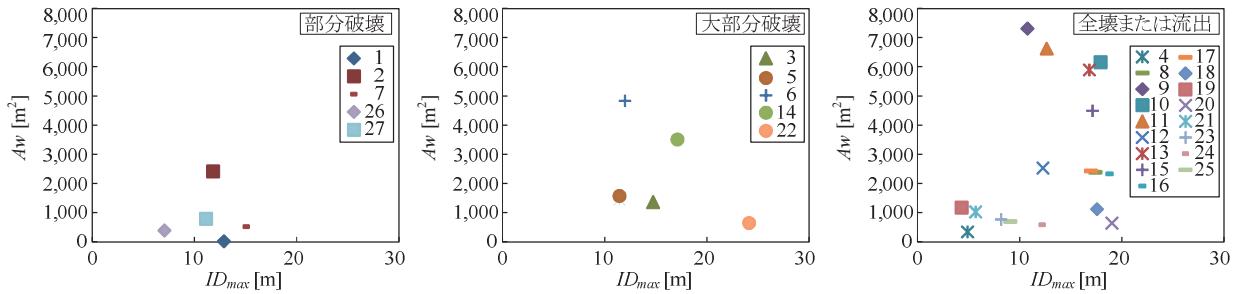


図 6 盛土の各破壊程度における盛土流出面積  $A_w$  と最大浸水深  $ID_{max}$  との関係

あると考え、以降の分析ではこれらの計算値を用いる。

数値計算から得られる浸水高の時刻歴波形から最大浸水深を算出する過程を図 2 に示す。最大浸水深  $ID_{max}$  は最大浸水高から橋梁の位置における河川水面の標高を差し引いて算出した。なお、図 2 に示す河川水面及び桁上の標高は測量を伴う現地調査結果及び国土地理院が提供する震災後の航空レーザ測量結果に基づく数値標高モデル(5mDEM)を基に特定している。なお、図 2 で示される 3 橋梁については、次章で示す盛土の各破壊程度で代表的な橋梁となっている。

### 3. 最大浸水深と構造被害の関係

衛星画像に基づく道路交通インフラの被害把握に関する研究事例(例えば、文献 11)を参考にし、本研究では Google Earth が公開する衛星画像を対象に、図 3 に示すように津波作用を受けた橋梁の主桁流出距離  $D_w$  及び橋台背面の盛土流出面積  $A_w$  を算定し、それらと最大浸水深  $ID_{max}$  との関係を分析した。

図 4 には算定した主桁の最終的な流出位置を示す。流出方向は N14W から N75W の間が最も多く計 15 枠、次に N111W から N143W の間が多く計 6 枠となっている。以上の合計 21 枠については橋脚の位置より内陸側に流出しており、主に遡上する津波の作用を強く受けて流出したと推察される。一方、残りの合計 7 枠は N21E から N179E の間の方向に流出しており、これらの主桁については主に遡上した津波が海に引き返す時の作用を強く受け流出したものと推察される。

次に、最大浸水深  $ID_{max}$  との関係を分析する。図 5 に示すように、RC・PC 枠に対する  $D_w$  は、 $ID_{max} = 5.7\text{m}$  で定川大橋の主桁(No.21-1)が 139.3m と比較的大きな値を示しているものの、 $ID_{max} = 6.0\text{m} \sim 13.0\text{m}$  では 40.0m 以下の小さな値を示す。これが  $ID_{max}$  が大きくなるに伴い上昇し、 $ID_{max} = 18.5\text{m}$  で折立橋の主桁(No.16-2)の  $D_w$  が 214.1m の最大値を示した。鋼製枠に対する  $D_w$  は、 $ID_{max} = 12.7\text{m}$  で  $D_w = 427.1\text{m} \sim 444.8\text{m}$  の値を示すが、 $ID_{max}$  が大きくなるに伴い上昇し、 $ID_{max} = 17.5\text{m}$  で新相川橋の主桁(No.18-1)の  $D_w$  が 657.0m の最大値を示した。 $A_w$  につ

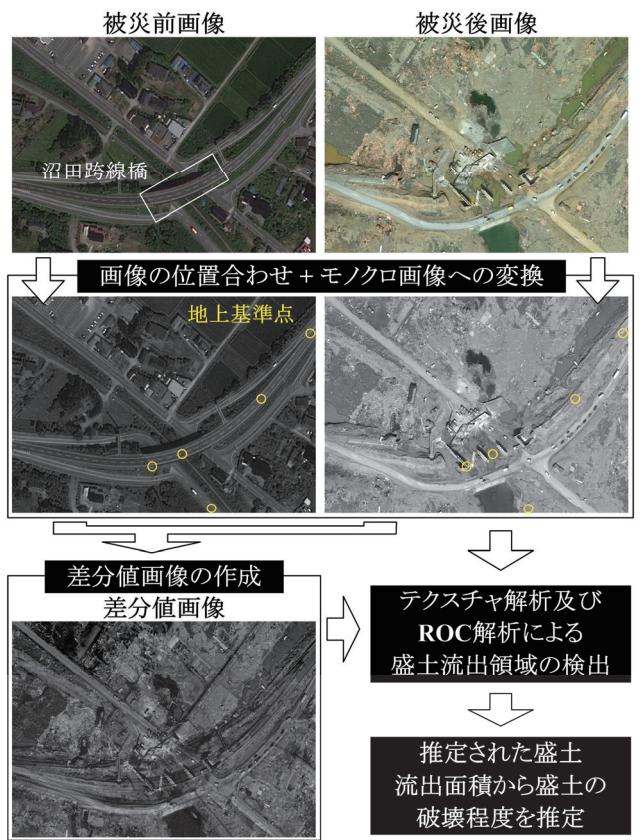


図 7 盛土流出領域の半自動的検出手法

いては、 $ID_{max} \leq 10.0\text{m}$  で  $1,200\text{m}^2$  以下の比較的小さな値を示すが、 $ID_{max}$  が大きくなるに伴い急激に上昇し、 $ID_{max} = 10.8\text{m}$  で沼田跨線橋(No.9)の  $A_w$  が  $7,293\text{m}^2$  の最大値を示した。

図 6 では文献 12)により類型化される盛土の破壊程度(部分破壊、大部分破壊、全壊または流出)ごとの  $A_w$  と  $ID_{max}$  の関係を示す。部分破壊の 5 橋梁では  $A_w = 36\text{m}^2 \sim 2,423\text{m}^2$  の比較的狭い面積を示し、 $ID_{max}$  も 15m 以下の比較的小さな値を示している。大部分破壊の 5 橋梁では  $A_w = 679\text{m}^2 \sim 4,828\text{m}^2$  を示し、 $ID_{max}$  は 10m 以上 25m 未満の

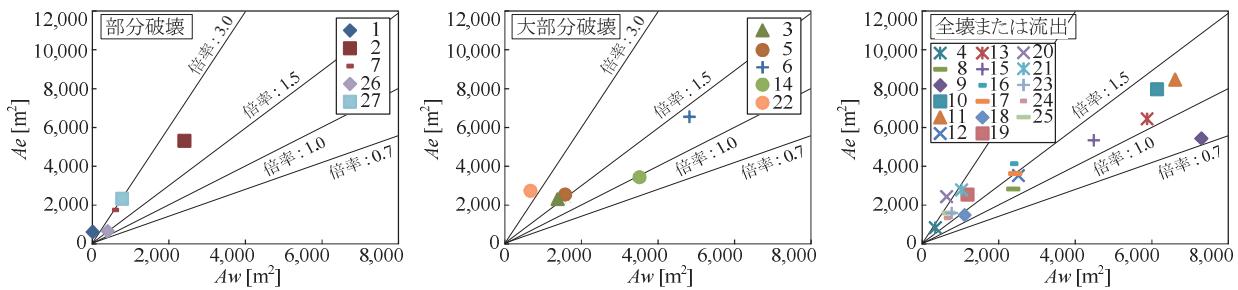


図 8 盛土の各破壊程度における盛土流出領域の推定面積  $A_e$  と盛土流出面積  $A_w$  との関係

値を示す。これが全壊または流出の 17 橋梁では  $A_w = 363\text{m}^2 \sim 6,614\text{m}^2$  の広い面積を示しており、 $ID_{max}$  も 4m 以上 20m 未満の値を示している。以上のように、各破壊程度における  $A_w$  の範囲には開きがあるものの、破壊程度が大きいほど  $A_w$  も大きな値となる傾向を示した。

#### 4. 構造被害の半自動的検出手法の提案

被災前後の衛星画像から橋台背面の盛土流出領域を半自動的に検出手法を図 7 に示す。具体的には、地上基準点を活用して被災前後の衛星画像に対し位置合わせを行い<sup>13)</sup>、カラー画像をモノクローム画像に変換し、その上で被災後画像及び被災前後の画像の画素値の差分を取った差分値画像を対象にテクスチャ解析<sup>14)</sup>を行うことで画像の特徴量として分散を算出する。その結果に対して、既往の研究事例<sup>例えば、文献 15)</sup>のように真陽性率と偽陽性率の考え方に基づく ROC 解析を行い、盛土流出領域を検出手法。

半自動的検出手法の推定精度を検証するため、図 8 には盛土の破壊程度ごとの盛土流出領域の推定面積  $A_e$  と盛土流出面積  $A_w$  の関係を示す。 $A_w$  に対する  $A_e$  の倍率を考えると、推定精度が高いと考えられる倍率が 0.7 倍以上 1.5 倍未満の 10 橋梁においては全壊または流出が 8 橋梁と全体の 80% を占めている。次に推定精度が高いと考えられる倍率が 1.5 倍以上 3.0 倍未満の 13 橋梁においても全壊または流出が 8 橋梁と多いものの、推定精度が低いと考えられる倍率が 3.0 倍以上の 4 橡梁においては、全壊または流出は 1 橋梁のみであり、大部分破壊と部分破壊とで合計 3 橋梁と全体の 75% を占める。このことから盛土の破壊程度が大きいほど推定精度が高いと言えるが、一方で、破壊程度が小さいと推定精度が低く 3.0 倍以上の面積を推定してしまうことがわかる。

以上のように推定精度の点で多くの課題は残されているが、本提案手法により半自動的に盛土流出領域を検出して、そこから盛土の破壊程度を推定することで、地域的な道路交通機能の損失状況を迅速に把握することが可能である。

#### 5.まとめ

2011 年東北地方太平洋沖地震津波により被害を受けた橋梁の構造被害を対象に衛星画像に基づく分析を行い、主軸流出距離及び盛土流出面積と最大浸水深との関係を明らかにするとともに、被災前後の衛星画像から半自動的に盛土流出領域を検出して、即時的に構造被害を推定する手法を提案した。

#### 謝辞

本研究では東北大大学の今村文彦先生及び越村俊一先生に数値計算に関して貴重なご助言を多々賜りました。数値計算に当た

っては筑波大学の中村友治氏及び石川尚樹氏、元筑波大学の江面嘉之氏及び高橋宏允氏から多大なるご協力を賜りました。

#### 参考文献

- [1] 庄司学, 高橋和慎, 中村友治 : 2011 年東北地方太平洋沖地震において津波作用を受けた橋梁構造物の被害把握, 日本地震工学会論文集, 第 12 卷, 第 6 号 (特集号), 2012 年.
- [2] Takahashi, K., Shoji, G. and Nakamura, T.: Tsunami Damage Detection on Road Infrastructures Subjected to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami, The 1st Asian Conference on Urban Disaster Reduction, No.3-4, 2012.
- [3] 庄司学, 中村友治, 高橋和慎, 櫻井俊彰 : 2011 年東北地方太平洋沖地震において津波作用を受けた道路構造物の被害, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No. 4, pp.I\_1186-I\_1193, 2012 年.
- [4] 国土地理院 : 10 万万分 1 浸水範囲概況図, <http://www.gsi.go.jp/kikaku/kikaku60003.html>.
- [5] 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ : 痕跡調査結果, 2012 年 12 月, <http://www.coastal.jp/tjt/>.
- [6] Disaster Control Research Center (DCRC), Tohoku University: TUNAMI-CODE Tohoku University's Numerical Analysis Model for Investigation of tsunami, 2009.
- [7] Fujii, Y., Satake, K., Sakai, S., Shinohara, M. and Kanazawa, T.: Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Earth Planets Space, Vol. 63, pp.815-820, 2011.
- [8] Okada, Y.: Surface Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-space, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 75, No. 4, pp.1135-1154, 1985.
- [9] 土木学会原子力土木委員会津波評価部会 : 津波評価手法の高精度化研究, 土木学会論文集 B, Vol. 63, No. 2, pp.168-177, 2007 年.
- [10] 相田勇 : 東海道沖におこった歴史津波の数値実験, 地震研究所彙報, Vol. 56, pp.367-390.
- [11] 例えば、丸山喜久, 山崎文雄, 用害比呂之, 檜作正登, 岡本拓 : 新潟県中越地震における高速道路被害状況と航空写真を用いた被害早期把握に向けた基礎的検討, 土木学会地震工学論文集, 第 28 卷, 第 127 号, 2005 年.
- [12] 首藤伸夫 : 津波による海岸堤防・護岸の被災 -昭和 8 年三陸 大津波から昭和 35 年チリ津波まで-, 津波工学研究報告(東北大大学災害制御研究センター), 第 16 号, pp.1-38, 1999 年.
- [13] 日本リモートセンシング学会 : 基礎からわかるリモートセンシング 第 10 章幾何補正, 理工図書.
- [14] (財)画像情報教育振興会 : 画像処理標準テキストブック 3-2-1 テクスチャ特徴の抽出, 1997 年.
- [15] 例えば、翠川三郎, 三浦弘之 : 高分解能 SAR 画像による 2008 年岩手・宮城内陸地震での斜面災害地域の抽出, 日本地震工学会論文集, 第 10 卷, 第 3 号, pp.3\_25-3\_32, 2010 年.