

007

東北地方太平洋沖地震の被害データに基づく津波による道路被害予測

Damage estimation of road network caused by tsunami based on the dataset of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake

15TM0304 板垣 治
Osamu Itagaki

指導教員 丸山 喜久

SYNOPSIS

This study investigates the relationship between the damage ratios of ground-level roads and tsunami inundation depths after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. According to the results, four types of fragility functions for ground-level roads are proposed considering the differences of topographical features. The classifications are validated due to the results of numerical simulation of tsunami propagation. Employing the fragility functions, this study estimates the damage situations of road network in Kochi City assuming a gigantic scenario earthquake which may occur in the Nankai Trough.

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分に発生した東北地方太平洋沖地震では、観測史上最大規模のマグニチュード 9.0 の地震により、大きな被害があった。特に青森県から千葉県にかけての太平洋沿岸の広い範囲が津波によって浸水し、壊滅的な被害を受けた。この結果、浸水域では多くの道路が使用不可能になり交通が麻痺した。その主原因は、道路構造物が津波の影響で使用不可になってしまう物的被害や、津波漂流物による道路閉塞などを原因とする道路交通の機能的損失である。復興支援には自動車が一つの重要な手段であるため、道路交通は被災地の復旧活動を担う社会基盤であり¹⁾、津波後の早急な回復が望まれる。

東北地方太平洋沖地震の津波により被災した地域は広範囲にわたるため、沿岸部の地形的特徴が異なっている。千葉県から宮城県までの沿岸部のほとんどは低く平らな土地で構成される低平地であるが、青森県や岩手県、宮城県の一部の三陸海岸と呼ばれる地域には、海岸段丘を有する地域や、リアス式海岸を有する地域も存在する。これまで津波の持つ流れの特徴（浸水深と流速の関係など）と構造物の被害の関係性に関して研究がなされてきた²⁾。道路構造物の被害も同様に、津波の持つ流れの特徴の影響が反映されるものと考えられる³⁾。

政府は今後、南海トラフにおける巨大地震が高い確率で発生するとしている⁴⁾。この地震は、想定されている津波の浸水範囲も東北地方太平洋沖地震と同様に広範囲にわたり、沿岸部には複数の地形的特徴がある⁵⁾。そこで本研究では、東北地方太平洋沖地震の際の被災地の地形的特徴ごとに、平面道路の被害分析を行った。本研究の平面道路とは道路全体のうち、橋や高架、トンネルを除いた道路とする。本研究で提案した地形区分に関して、東北地方太平洋沖地震の津波数値シミュレーションを行うことで地形区分ごとの平面道路被害についての考察を行った。さらに、本研究で構築した平面道路被害推定式を用いて、中央防災会議が発表している南海トラフ地震津波のモデルの道路の物

的被害予測を行い、被害想定箇所や数を明らかにした。さらに、既往研究を参考に、高知県高知市における南海トラフ地震津波後の道路機能的損失による被害を検討した。

2. 東北地方太平洋沖地震津波による平面道路の被害分析

本研究の対象地は、東北地方太平洋沖地震津波により浸水した青森県六ヶ所村から千葉県一宮町までの太平洋沿岸の地域とする。本研究では、復興支援調査アーカイブ⁶⁾で利用可能な道路被害データ、津波の浸水深（100m メッシュ）を利用した。ただし、原発事故により立入が制限されている地域は除外した⁷⁾。復興支援調査アーカイブで取りまとめられている道路被害は、大、中、小の 3 ランクに大別されているが、本研究では、「道路が全面的に崩壊するか、損傷規模が道路車線の大半におよび走行が不可能な場合」とされる、大被害のみを扱った。道路大被害の被災形態は、道路の亀裂、路肩部の崩壊、盛土が高い場合の盛土の崩壊、落石・土砂崩れ等、接続部の段差発生、アスファルト舗装の剥離の 6 つに大別することができる。

大被害の件数を浸水深ごとの道路延長で除すことによって平面道路の被害率（件/km）を算出する。道路延長は平成 24 年 9 月に取得された三井造船システム技研（株）の道路地図（V2012-3）を利用し、算出した。既往研究^{8),9)}、浸水域の傾斜を参考に地形分割（図-1）を行ない、平面道路被害率を算出した（図-2）。地形区分は以下ようになる。

I：海岸段丘を有する地域

青森県階上町から、岩手県岩泉町まで。

II：リアス式海岸

岩手県宮古市から、岩手県大船渡市まで。

III：低平地を有するリアス式海岸

岩手県陸前高田市から、宮城県石巻市の一部まで。

IV：低平地

青森県六ヶ所村から青森県八戸市までと、宮城県石巻市の一部から、千葉県一宮町まで。

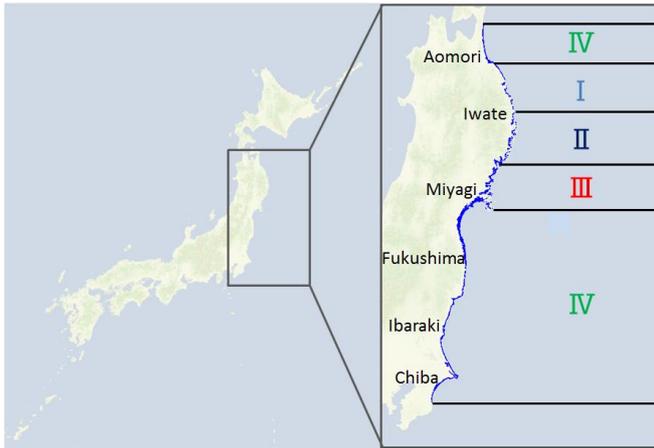


図-1 本研究の地形区分

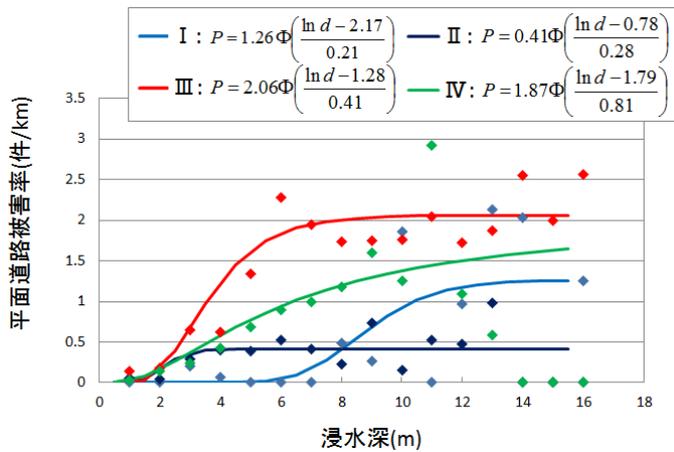


図-2 平面道路被害関数

浸水深と被害率の関係を回帰分析により評価する。回帰分析はI~IVの地形区分ごととし、関数形には式(1)を仮定した。標準正規分布の確率分布関数 $\Phi(x)$ を用いて、浸水深と被害率の関係は対数正規分布を仮定し、それに倍率 C を乗じることとした。なお、 d は浸水深、 P は被害率である。

$$P = C\Phi\left(\frac{\ln d - \lambda}{\zeta}\right) \quad (1)$$

式(1)の C 、 λ 、 ζ は回帰で得られる定数であり、次の目的関数 ε を最小化することで求めた。

$$\varepsilon = \sum (P_R - P)^2 w \quad (2)$$

ここで、 P_R は実被害から求めた被害率であり、 w は平面道路の延長である。つまり、道路延長による重み付最小二乗法によって回帰定数を決定した。

浸水深と平面道路被害率の関係(図-2)には、地形区分ごとに違いが見られた。浸水深が3m程度までは地形による差は大きくないが、浸水深が大きくなると被害率に違いがみられる。浸水深が5mを超えると最も被害率が高くなるのは、III：低平地を有するリアス式海岸である。この地域では浸水深が6m程度で被害率が頭打ちする。次いで被害率が大きいのは、IV：低平地である。I：海岸段丘を有する地域では、浸水深が6mまでの被害率は非常に小さいが、その後、被害率が急に大きくなる。II：リアス式海岸では、浸水深が約5mで被害率が頭打ちする。

3. 津波数値シミュレーションによる考察

本研究で仮定した地形区分に関して、津波の流れの特徴を評価することを目的として、東北地方太平洋沖地震の津波数値シミュレーションを行った。東北地方太平洋沖地震の断層モデルには、今村らによる東北地方太平洋沖地震の津波の再現モデルである東北大学モデル(version1.2)¹⁰を用いた。数値計算は、非線形長波理論に基づく Staggered leapfrog 法を用い、以下に示す連続の式(3)と運動量保存から導かれる運動方程式(式(4)式(5))を解く¹¹⁾。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^3} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^3} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (5)$$

ここで、 M 、 N は x 、 y 方向の線流量、 η は水位、 h は水深、 D は全水深($=\eta + h$)、 n はマンニングの粗度係数である。津波の遡上計算に用いるマンニングの粗度係数は一律に 0.025 とした。津波数値シミュレーションは地形区分ごとに津波の特徴を評価するために、各地形区分の代表的な都市を1都市ずつ選んだ。Iは岩手県田野畑村、IIは岩手県大槌町、IIIは岩手県陸前高田市、IVは宮城県仙台市とした。

平面道路の大被害が発生した場所の浸水深 d と最大流速 u の関係性を都市ごとに式(6)で近似した(図-3)。なお、 a 、 b は回帰定数であり、図中には残差の標準誤差を併せて示している。

$$u = ad^b \quad (6)$$

地形的特徴ごとに浸水深に対する流速の分布が異なることが分かる。I：田野畑村では、浸水深が大きくなるに従い流速が大きくなる。浸水深が5m程度の時は流速が7m/s程度であるが、浸水深が15m程度になると、流速は13m/s程度になる。II：大槌町は、浸水深が大きくなっても流速があまり大きくならない傾向にある。浸水深が1m程度で流速が5m/s程度あるが、浸水深が15m/s程度のところでも流速は5m/s程度しかない。平面道路の被害率(図-2)も浸水深が4m程度で頭打ちする傾向があり、流速が浸水深に依らずあまり大きくならないことが反映されたものと考えられる。III：陸前高田市では、浸水深が5m以下でも流速がI, IIの地域と比べ大きく、浸水深が10m以上では流速15m/s

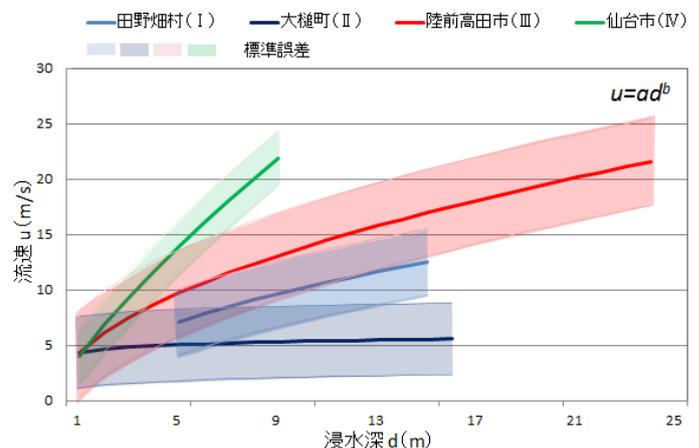


図-3 道路大被害周辺の流速と浸水深の関係の近似式

と非常に大きい。この地形区分の平面道路被害率（図-2）は、ほかの地域と比較して全体的に被害率が高く、流速が全般的に大きいことが一因と考えられる。IV：仙台市では、浸水深に対する流速の増加量が大きく、浸水深が5m～10mではほかの地形区分に比べ流速が大きかった。IVの平面道路の被害率（図-2）は、浸水深5～10mの範囲ではI、IIの被害率よりも高くなっている。このようにどの地域に関しても津波の流れの持つ特徴である流速が、ある程度平面道路被害率に反映されている。

4. 南海トラフ地震津波による道路物的被害予測

高知県高知市における津波による道路被害（物的被害）を予測する。道路データの区間ごとに浸水深を集計し、本研究で構築した地形ごとの平面道路被害推定式(式(1))に浸水深を代入して平面道路被害率（件/km）を得る。このとき、高知市は低平地であるためIVの式を用いる。さらに算出した平面道路被害率に各区間の浸水した延長を乗じることによって、区間ごとの平面道路被害件数を予測する。橋梁に関しては水越 庄司¹²⁾の式(式(7))を用いる。

$$P(d) = \Phi\left(\frac{\ln d - 3.31}{0.82}\right) \quad (7)$$

高知市の津波による平面道路の区間ごとの予想被害件数を表-1に、橋梁も含めた道路への物的被害予想件数、確率を地図上に表示したものを図-4に示す。平面道路の予想被害件数が0-0.1件の区間は9076区間、0.1～0.2件の区間は106区間、0.2～0.5件までの区間は49区間、0.5を超える区間も13区間存在する。内陸の平地では予想被害件数が0.1件までの区間が大半であるが、沿岸の区間では浸水深が大きいため予想被害件数が0.2件を超える路線も多く存在する。このエリアに位置する県道14号線では、24.07kmが浸水し、11.63件の被害が予想される。高知市は平地であるため、浸水面積が大きく、全体的に浸水する道路区間が多い。

表-1 高知市の区間ごとの平面道路物的被害件数予測

予想被害件数	0-0.1	0.11-0.20	0.21-0.50	0.51-	合計
区間数	9076	106	49	13	9244

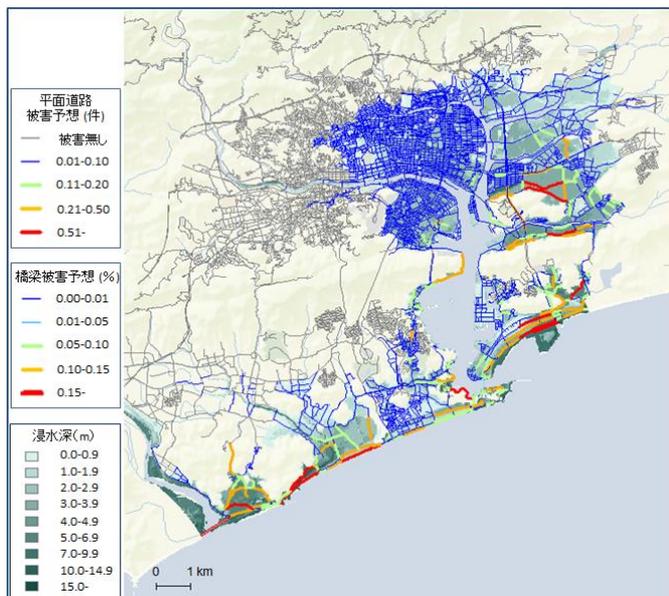


図-4 高知市の津波による道路被害予測結果

5. 南海トラフ地震津波による機能的損失評価

高知県高知市を対象に南海トラフ地震津波直後の道路の機能的損失を評価する。鳥澤¹³⁾の構築した津波による通行止め確率の式(式(8))を用いて高知県高知市の予想浸水域内の平面道路の通行止め確率を算出する。

$$P_{TS}(d) = C_{TS} \quad (C_{TS} > \Phi\left(\frac{\ln d - \lambda_d}{\xi_d}\right) \text{ の場合}) \quad (8)$$

$$P_{TS}(d) = \Phi\left(\frac{\ln d - \lambda_d}{\xi_d}\right) \quad (C_{TS} \leq \Phi\left(\frac{\ln d - \lambda_d}{\xi_d}\right) \text{ の場合})$$

ここで、 λ_d および ξ_d はそれぞれ全面通行止めが発生する浸水深 $\ln d$ の平均値及び標準偏差であり、最小二乗法により求められた。 C_{TS} は定数である。それぞれのパラメータは表-2の通りである。本研究では直轄国道に関しては直轄国道、その他の道路に関しては岩手県管理道路のパラメータを利用し、通行止め確率を区間ごとに与えた。

道路の通行止め被害はポアソン分布に従って発生すると仮定する。この時、区間ごとの通行止め発生数は式(9)のように書ける。

$$p(X = x_k) = (P_{TS})^{x_k} \cdot \exp(-P_{TS}) / x_k! \quad (x_k = 0, 1, 2, \dots) \quad (9)$$

ここで、 k は区間ID、 $p(X = x_k)$ は区間内の被害数が x_k である確率を表す。 P_{TS} は区間ごとの通行止め発生確率である。式(9)のポアソン乱数に従う被害個所分布を10通り発生させた。10通りのうちの一例を図-5に示す。浸水深が10m未満でも、直轄国道には0.4、そのほかの道路には0.55の通行止め発生確率が与えられているため(表-2)、どのパターンでも約3900箇所の通行止めが発生し、浸水域内の約4割の区間が津波後に通行不可になるという結果になった。本研究では津波による道路の機能的損失に伴う被害の評価を、津波前の消防署、出張所内の管轄人口と、津波後の管轄内の到達可能人口を比較することによって行う。高知市内には9か所の消防署、出張所が存在する¹⁴⁾

表-2 既往研究の式のパラメータ¹²⁾

	C_{TS}	λ_d	ξ_d
直轄国道	0.40	2.27	0.36
岩手県管理道路	0.55	2.00	0.55

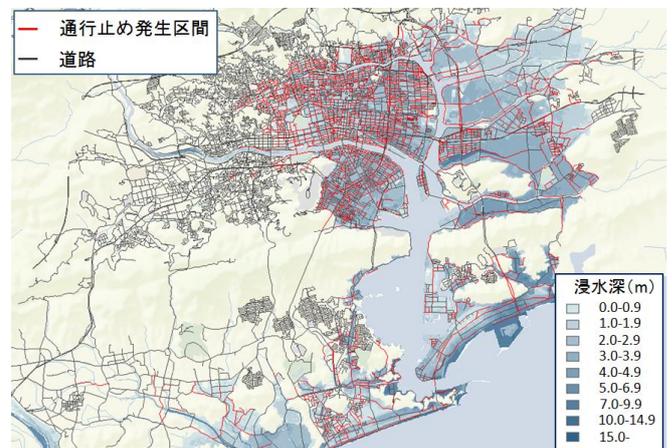


図-5 高知市通行止め発生個所の予測結果

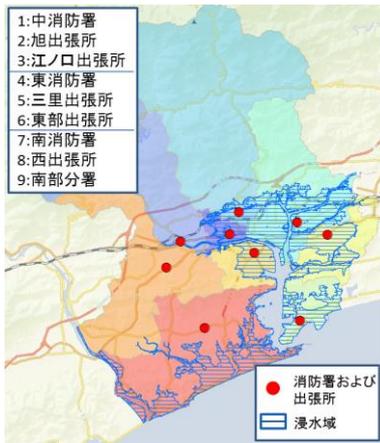


図-6 高知市の消防署と推定した管轄

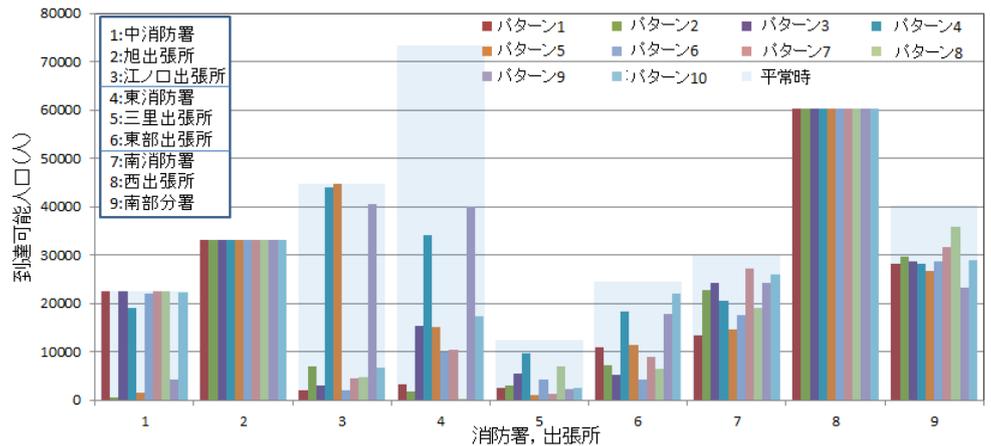


図-7 津波前と津波後の到達可能人口の比較

津波直後の消防署からの到達圏解析を GIS のネットワーク解析ツールを用いて行う。それぞれの通行止めパターンに関して消防署、出張所からの最大到達圏を調べ、各管轄内の 250m メッシュ夜間人口(国勢調査)¹⁵⁾を空間結合することによって到達可能人口を明らかにした。

図-7 に平常時と津波直後の到達可能人口の比較を示す。旭出張所と西出張所に関しては管轄エリアが津波によって浸水していないため、平常時と到達可能人口は変わらない。南消防署と南部分署に関しては機能低下があるがほとんどが 50%以上の人口をカバーしている。江ノ口出張所、東消防署、三里出張所は全体的に到達可能人口の減少が激しい。また、中消防署と江ノ口出張所はパターンごとの到達可能人口の減少の幅が大きい。管轄内に浸水域が存在する消防署、出張所は道路の機能的損失による被害が発生することが分かった。

6. まとめ

本研究では東北地方太平洋沖地震津波によって被災した平面道路の物的被害と津波の浸水深の関係性を、広域的な被害予測を目的として分析した。どの地域も浸水深が大きくなるに従い、平面道路被害率は大きくなることが分かった。しかし、地域ごとに平面道路被害率の分布に違いがあったため、既往研究と、浸水域の傾斜を参考に被災地を地形的特徴ごとに、I: 海岸段丘を有する地域、II: リアス式海岸、III: 低平地を有するリアス式海岸、IV 低平地の4つの平面道路被害推定式を構築した。さらに詳細に考察するために本研究で設定した地形区分の中からそれぞれ代表的な都市を一つずつ選出し、津波数値シミュレーションによって陸域での津波の流れ方を調べた。本研究で流速がある程度平面道路被害に反映されていることが分かった。

さらに本研究では、物的被害想定を行う都市の道路の間ごとに本研究で構築した対応する地形区分の平面道路被害推定式を用いて被害を想定した。道路の機能的損失に関しては、鳥澤ら¹³⁾の構築した通行止め発生確率を与える式を道路区間に与え、ポアソン乱数を発生させることにより、10通りの通行止め発生個所分布を再現した。本研究では道路の機能的損失を評価するために、高知市の消防署、出張所を対象にして津波後と平常時の到達可能人口を比較した。その結果、津波の浸水域に管轄がある消防署、出張所は道路の機能的損失による被害が発生することが分かった。

参考文献

- 1) 廣瀬義伸, 近藤光男, 綾貴徳, 山根丈: 地震防災のための道路網および緊急施設整備計画に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No. 15, pp. 329-336, 1998.
- 2) 松富英夫, 首藤伸夫: 津波の浸水深, 流速と家屋被害, 海岸工学論文集, Vol. 41, pp. 246-250, 1994.
- 3) 中村友治, 庄司学: 橋梁構造物に入射する津波の時系列波形とその類型化, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 70, No. 4, pp. I_210-I_218, 2014.
- 4) 南海トラフ巨大地震モデル検討会: 中間とりまとめ, http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/pdf/chukan_matome.pdf, 2011.
- 5) 渡辺光: 日本の主要海岸区, 地学雑誌, Vol. 66, No. 1, pp. 1-16, 1957.
- 6) 東京大学空間情報科学研究センター: 復興支援調査アーカイブ, <http://fukkou.csis.u-tokyo.ac.jp/>
- 7) 首相官邸: 福島原発事故-福島原発・放射能に関する最新情報, <http://www.kantei.go.jp/saigai/anzen.html>.
- 8) 青井哲人: 三陸海岸の集落 災害と再生: 1896, 1933, 1960, <http://d.hatena.ne.jp/meiji-kenchikushi/2001110/p1>
- 9) 山口弥一郎: 津波と村, 三弥井書店, 2011.
- 10) 東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター: 東北地方太平洋沖地震を対象とした津波シミュレーションの実施 東北大学モデル(version1.2), http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/events/tohoku_2011/model/dcrc_ver1.2.pdf, 2012.
- 11) Koshimura, S., Imamura, F., and Shuto, N.: Characteristics of on-slope tsunami propagation and the accuracy of the numerical model, Tsunami Research at the End of a Critical Decade, pp.163-177, 2001.
- 12) 水越湧太, 庄司学: 南海トラフ地震に暴露される道路ネットワークの津波被害推計, 土木学会第 71 回年次学術講演会, I-329, pp. 657-658, 2016.
- 13) 鳥澤一晃, 吉田聡, 佐土原聡: サプライチェーンの BCP のための道路網被害予測と事業継続への影響評価, 日本地震工学会論文集, Vol. 14, No. 2, pp. 84-103, 2014.
- 14) 高知市消防局: 消防年報, https://www.city.kochi.kochi.jp/uploaded/life/70220_125916_misc.pdf, 2015.
- 15) 総務省統計局: 地図で見る統計 (統計G I S), <https://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/toukeiChiri.do?method=init>