

津波遡上シナリオを搭載した ドライビングシミュレータの構築

榊 想太郎¹・丸山 喜久²

¹学生会員 千葉大学博士前期課程 大学院工学研究科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)
E-mail:z9t0217@students.chiba-u.jp

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

本研究では、神奈川県鎌倉市を対象地域として、自動車運転中に津波の発生から運転車両が冠水するまでを体験することができるドライビングシミュレータを開発することを目的とする。津波数値解析の波源モデルとしては、神奈川県が津波浸水予測図の作成に使用しているものを仮定する。解析結果をVR空間へ入力し座標設定を行うことで、津波遡上シナリオが生成される。これをドライビングシミュレータのシナリオとして搭載し、津波来襲時の運転体験実験を行う。

Key Words : tsunami inundation scenario , driving simulator , evacuation from tsunami by automobile

1. はじめに

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震では、東北地方の太平洋側から関東地方に至る広い地域が津波による甚大な被害を受けた。その際、沿岸部を走行中の自動車が津波に巻き込まれ、多くの人々が犠牲になった。ドライブレコーダーで自動車が津波の飲み込まれる際の映像が記録され、マスコミによって広く報道された¹⁾。

我が国では、津波来襲時の自動車による避難は渋滞や事故の恐れがあるため望ましくないとされている。自動車によって避難を行った場合、道路構造や都市構造に起因するボトルネック区間で渋滞が発生し、避難が困難になる可能性がある。また、東日本大震災では、路面崩壊や電柱等の道路への倒れこみ、液状化によるマンホールの浮き上がり、停電による信号機滅灯など車両通行に支障をきたす状況が津波被災地以外でも各地で発生した。こうした避難時の危険性から、国としても「原則徒歩」による避難を提言している²⁾。

一方、中央防災会議の報告³⁾によると、東北地方太平洋沖地震のケースでは生存者の約57%が津波からの避難に自動車を利用している。自動車を使用した理由について「車で避難しないと間に合わないと思ったから」、

「家族で避難しようと思ったから」、「安全な場所まで遠くて、車でないと行けないと思ったから」などの理由があげられている。しかし、「避難を始めた場所に車で来ていたから」、「平時の移動には車を使っているから」といった日常生活に自動車が欠かせないがゆえの回答も多数みられた³⁾。高齢化が進んでいる状況や要援護者と一緒に避難する必要性があり得ることを考慮すると、今後自動車に依存した避難は助長される可能性が考えられる。また、避難できる高台が非常に離れているなどの地形的状況によっては、自動車による避難がやむを得ない実情もある。

また、沿岸部は観光地となっていることも考える必要がある。例えば、神奈川県鎌倉市は、1498年の明応地震と1923年の関東大震災で津波による甚大な被害を被った。推定高さ10mの明応地震の津波は山裾の大仏まで押し寄せたという説もある⁴⁾が、これは歴史文書が不十分で諸説ある⁵⁾。関東大震災では、最初に海水が引いた距離は約500m以上で、津波高さは7~8m、江の島の沖から由比ヶ浜方面へ向かって襲って来たと考えられている⁶⁾(図-1)。さらに、南海トラフで地震が発生した際は最大高さ14mの津波の来襲が予想されている⁷⁾。これらのことをふまえると、観光客などの土地勘のない不慣れた人々を誘導することにも配慮する必要性が考えられる。



図-1 関東地震の津波による鎌倉市の被災状況⁹⁾
(左…由比ヶ浜地区 右…坂ノ下地区)

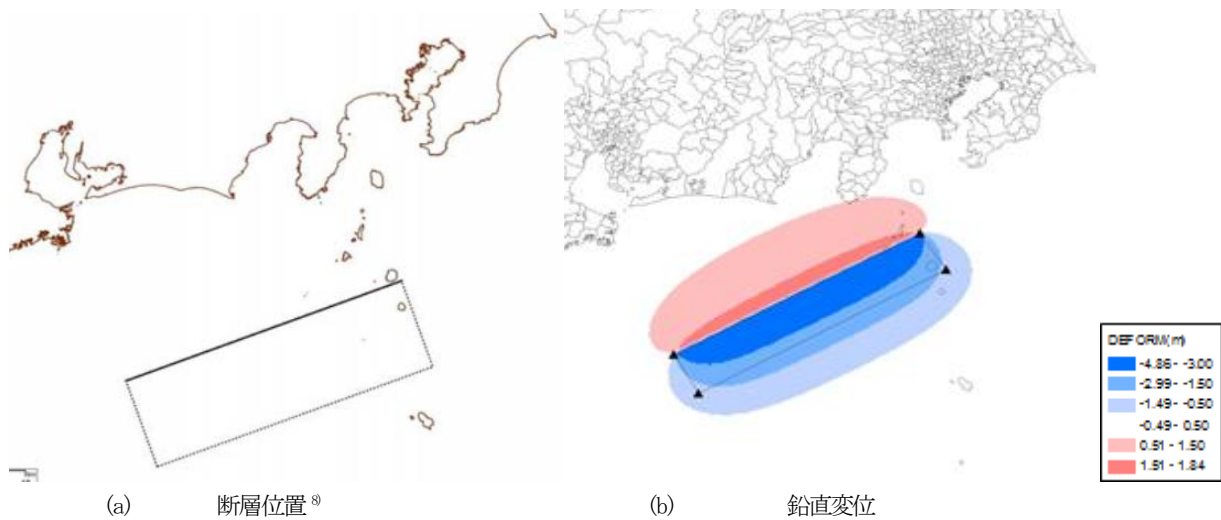


図-2 明応型地震の断層位置と海底地形の鉛直変位

表-1 明応地震の震源断層パラメータ

経度 (°)	緯度 (°)	上端深さ (km)	走向 (°)	傾斜角 (°)	すべり角 (°)	長さ (km)	幅 (km)	すべり量 (m)
137.39	33.35	1.0	62	60	270	220	80	8.0

現在、地域全体を見渡す鳥瞰図的な視点の津波シミュレーションや、歩行者に対する標識等の避難支援設備は事例がみられるものの、自動車の運転者の目線からの津波シミュレーションを行い、自動車に対する誘導標識の設置や運転者への情報配信について定量的に評価することは現状では行われていない。こうした現状から、自動車運転者への避難支援方法の検討は津波来襲時の自動車避難に対する啓発、沿岸部での津波減災のソフト面での対策立案は検討に値する。

そこで、本研究では、最大浸水域が明応型地震で最大

となり、その際最大津波高さが12.9m⁷⁾と予測されている神奈川県鎌倉市を対象地域として、バーチャルリアリティ（VR）空間上に道路、建物、信号、街灯、鉄道等を適宜配置し走行実験コースを作成した。これを用いて、実際に自動車を運転中に津波が発生し、浸水域を脱出し高台への避難が完了もしくは、途中で運転車両が冠水するまでの運転体験シナリオを作成する。このVR空間を、3面モニタ、ハンドル、アクセル、ブレーキペダルからなる簡易ドライビングシミュレータに取り込み、走行実験を行う。このシミュレータは、車速およびハンドル操

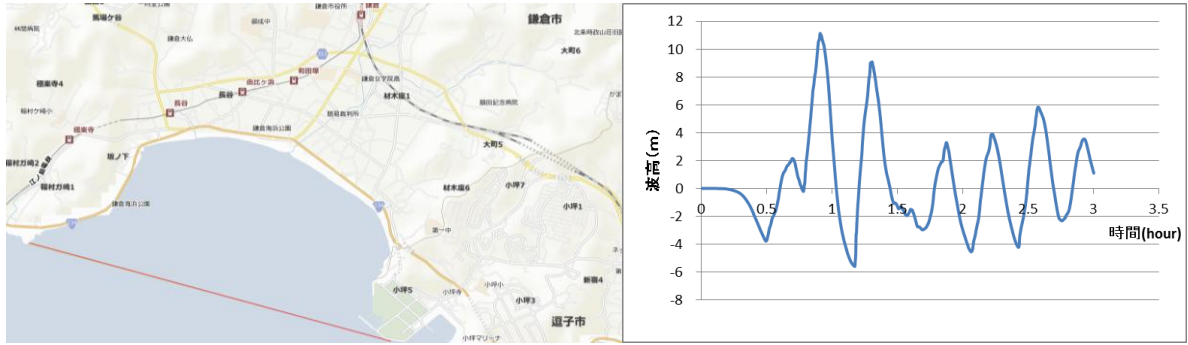


図-3 時刻歴潮位変動の取得位置（左）と津波による潮位変動の時刻歴（右）

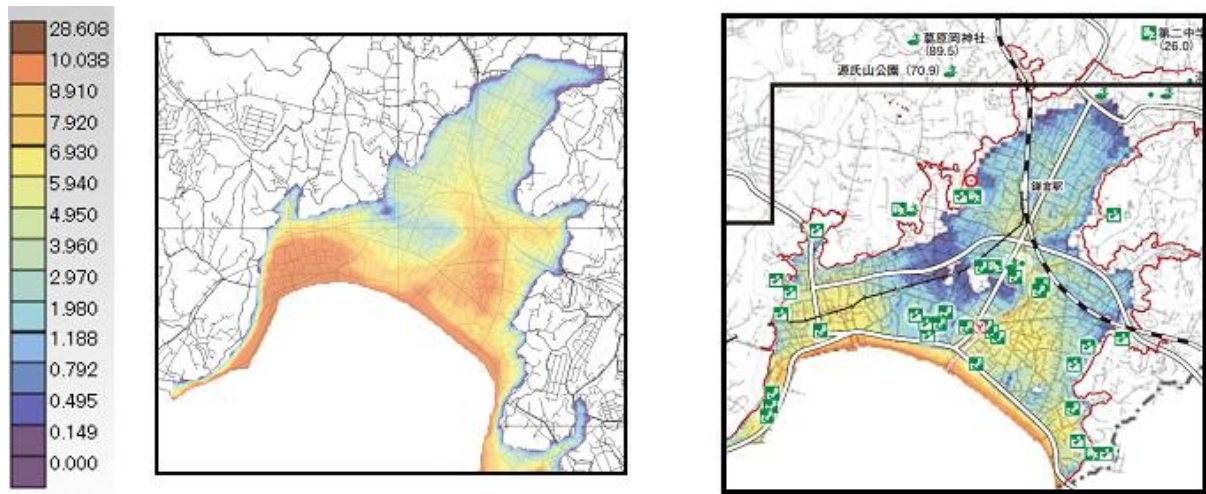


図-4 最大浸水深分布の比較（左：本研究，右：神奈川県津波浸水予測図⁷⁾）

作等の時刻歴結果を記録する機能を備えており、走行実験を行う際被験者の反応特性や運転操作に関する傾向の分析へ役立てることができる。本研究の最終的な成果としては、津波来襲時の自動車走行実験を通して、津波時の自動車の避難誘導に関わる効果的な情報提供の検討に応用することを目指す。

2. 明応型地震の津波数値解析

津波数値解析の震源モデルとしては、神奈川県が津波浸水予測図⁹⁾の作成に使用しているものを仮定する。表-1には震源断層パラメータを、図-2(a)には震源断層の位置⁸⁾、図-2(b)にはOkadaの式⁹⁾から求めた海底地形の鉛直変位を示す。数値計算は、非線形長波理論に基づくStaggered leap-frog法を用い、以下に示す連続の式(1)と運動量保存から導かれる運動方程式(2)、(3)を解く¹⁰⁾。

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

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

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

式中の η は水位、 D は海底から水面までの全水深、 g は重力加速度を表し、 n は表-2に示す土地利用条件に従ったManningの粗度係数¹¹⁾で運動方程式中の摩擦項に含まれ津波の遡上に対する抵抗値として扱う。数値解析では、格子間隔1350mの外洋部から陸域に向けてメッシュサイズを1/3ずつ細分化して進める。この解析によって得られた潮位変動の時刻歴を境界条件の入力値(図-3)として用い、後述するxpswmmを使用して湾口から陸域の解析を行う。

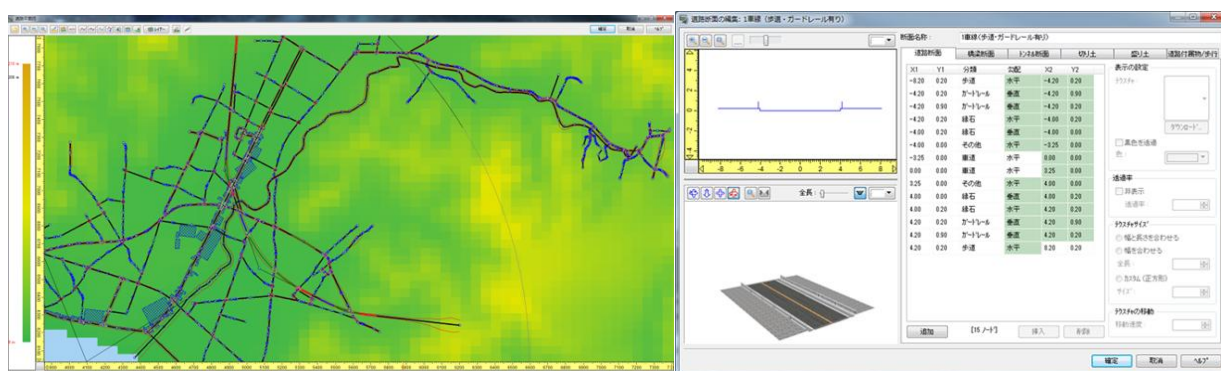


図-5 VR空間作成の様子(左：GISデータを用いた地形，道路，鉄道網の作成，右：道路テクスチャの編集)



図-6 本研究で構築したVR空間の概況

3. 神奈川県鎌倉市における津波浸水予測

湾口から陸域への津波遡上解析には，ドライビングシミュレータのCGソフトUC-win/Roadとの連携を考慮し，xpswmm¹²⁾を使用した．xpswmmは，河川や管路内の水理と地表面の氾濫現象を連動させた解析を行ことができ，浸水エリア，浸水深，浸水時間，氾濫流速などの解析結果を3Dやアニメーションで表示することができるソフトウェアである．また，氾濫解析結果をUC-win/Road¹³⁾で作成したVR空間へ読み込み表現することができる．

図-4に，本研究の最大浸水深分布と神奈川県策定の津波浸水予測図(2012年策定)を示す．解析メッシュのサイズやManning係数の設定値が本研究と神奈川県津波浸

水予測図では異なるため両者は厳密には一致しないが，大きな浸水深が予測されている地域が類似していることや，本研究は津波遡上を可視化することを目的としており，精度よく浸水域を推定することを目的とはしていないため，この津波遡上解析結果をVR空間へ読み込み，津波氾濫時の水面CGをVR空間上へ表現することとした．

表-2 Manning粗度係数¹¹⁾の設定値

土地利用(国土数値情報)	粗度係数(m ^{1/3} /s)
住宅地	0.040
森林	0.030
水域	0.025
その他(空地・緑地)	0.025



図-7 保有する簡易ドライビングシミュレータと作成した走行実験コース



図-8 津波冠水時の運転者目線の様子

4. VR空間の構築

本研究でシミュレーションコースを作成するために使用したソフトウェアUC-win/Road¹³⁾は、「合意形成を支援するための3次元VRシミュレーションソフトウェア」である。まず、本ソフトに搭載されている国土地理院の全国50mメッシュ標高地形データから、使用する地域の地形を指定する。

道路の設定をするには、まず選択した範囲の地形上にGISの道路データを読み込み、平面線形を定義することで、道路が敷設される。続いて縦断線形を編集することで道路の高さや縦断勾配を変更し、交差点の生成や高架道路、トンネル道路等の定義を行う。さらに断面を定義することで、形状や道路分類、勾配やテクスチャなどを個別に設定できる(図-5)。そこへ建造物や樹木等の3Dモデル、街灯や電柱、電線等を適宜配置することで景観を形成していく。3Dモデルにはアクション設定による動作モデルの作成および動作制御が可能のため、ある場所を通過することで車両の挙動を変える(速度の変化、車線変更等)設定ができる。また、信号機を配置し交差点で動作設定することで、信号制御や実際の交通規制に従った交通が再現できる。

以上の手順に従って走行実験に使用するVR空間を作

成した。本研究の走行実験で使用するVR空間の概観を図-6に示す。

5. 津波解析結果とVR空間の連携

xpswmmによる遡上解析結果をUC-win/Roadへ入力し座標設定を行うことで、作成したVR空間へ解析結果にもとづく津波遡上CGが生成される。これをもとに運転体験シナリオを構築し、3面モニタとハンドル、アクセル、ブレーキからなる簡易ドライビングシミュレータを使用して津波来襲時の運転体験実験を行う(図-7)。運転体験中に実際に自車が津波に冠水した地域へ差し掛かるか、津波に飲み込まれると、図-8のように、実際に津波が迫る様子や車両が冠水する様子を運転者の視点で再現できる。

また、シミュレーションを行う場合に走行ルートの指示や、予め定めた区間での交通状況の変化など、走行実験中に発生する事象や条件を個別に設定するため、シナリオを作成する。シナリオは複数のイベントが連続して進行していき、1つのシナリオとして完結することになる。遷移条件には、イベント開始からの時間経過や、速度変化、道路上に定義したチェックポイントの通過とい

った項目がある。本研究の走行実験では、運転開始とともに津波が来襲し、指定された高台の避難完了地点へ避難すると実験が終了するシナリオを構築した。走行実験コースの略図が図-7である。

6. まとめ

本研究では、現実の道路線形、地形データにもとづいた都市モデルに、数値シミュレーションで得られた津波遡上結果をCGとして反映させ、津波体験ドライビングシミュレータを構築した。今後は、本研究のシミュレータを活用し被験者を募って走行実験を行い、津波発生時の自動車運転者の行動指針に関する検討を進める。

具体的には、避難支援設備の検討として、道路標識やレーンマークによる施設対策、カーナビ等の地図情報端末の活用を考えている。標識、レーンマークの配置方法や表示内容の合理性を高め、カーナビへの標高データ等の地形情報を付加することなどが避難行動にもたらす効果を定量的に評価する。また、走行実験の際の運転者のハンドル操舵量や車速を記録することができるため、自動車運転中に津波が来襲した際や、避難行動中の運転者の反応特性を分析することも可能であると考えられる。最終的には、津波発生時の自動車運転者の行動指針を規定し、さらにカーナビや道路標識による運転者への情報伝播構造に関する分析を行い、最適な避難誘導方法の提案を目指す。

謝辞：本研究で使用した津波数値解析プログラムTUNAMI-CODEは、東北大学災害科学国際研究所の越村俊一教授に提供して頂いた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) フジニュースネットワーク：「千葉県旭市 走行中の車を襲った津波【視聴者提供映像】」，<http://www.fnn-news.com/311/articles/201103110060.html>，2013.
- 2) 中央防災会議：東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告，2011.
- 3) 中央防災会議津波避難対策検討ワーキンググループ：自動車で安全かつ確実に避難できる方策，2012.
- 4) 相田勇：東海道沖におこった歴史津波の数値実験，東京大学地震研究所彙報，第56冊第2号，pp.367-390，1981.
- 5) 石橋克彦：東海地震の長期的予測に関するコメント，地震予知研究シンポジウム，pp.123-125，1980.
- 6) 鎌倉震災誌：鎌倉町役場，1930.
- 7) 神奈川県：「津波浸水予測図」明応型地震，<http://www.pref.kanagawa.jp/cnt/f360944/p393023.html>，2012.
- 8) 神奈川県：新たな津波浸水予測図解説書，神奈川県県土整備局，2012.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 小谷美佐，今村文彦，首藤伸夫：GISを利用した津波遡上計算と被害推定法，海岸工学論文集，第45巻，pp.356-360，1998.
- 12) xpssoftware: xpswmm, <http://www.xpssoftware.com/products/xpswmm/>, 2013.
- 13) FORUM8: UC-win/Road, <http://vr.forum8.co.jp/>

DEVELOPMENT OF DRIVING SIMULATOR WITH TSUNAMI INUNDATION SCENARIO

Sotaro SAKAKI and Yoshihisa MARUYAMA

This study aims to reveal the permissible limits of tsunami evacuation using automobile based on a series of driving simulator experiments. The authors perform numerical simulation of tsunami propagation and the results are visualized from the viewpoint of a driver using 3D computer graphics (CG). The CG is installed to a driving simulator, which consists of three LCDs, steering wheel, and brake and accelerator pedals.