

千葉県旭市における 東北地方太平洋沖地震の津波浸水域の把握

北村 健¹・丸山 喜久²

¹千葉大学大学院生 工学研究科 建築・都市科学専攻 (〒263-8522 千葉県稲毛区弥生町1-33)

E-mail: k.kitamura@chiba-u.jp

²千葉大学大学院准教授 工学研究科 建築・都市科学専攻 (〒263-8522 千葉県稲毛区弥生町1-33)

E-mail: ymaruyam@tu.chiba-u.ac.jp

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震とそれに伴って発生した津波は、東日本に甚大な被害を与えた。著者らは、千葉県旭市を対象地域として、本地震津波による被害調査を実施した。地理情報システム(GIS)を用いて旭市における浸水域マップを構築し、既存の津波ハザードマップと比較した。さらに、標高データを利用して地形特性と浸水範囲の関係を考察した。また、国土地理院が構築した本地震の震源断層モデルを用いて、千葉県旭市を対象とした津波浸水シミュレーションを行った。本研究では、シミュレーション結果とGIS上で構築した浸水域マップを比較し、津波被害地域の地形的特徴を分析する。

Key Words : *The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, tsunami inundation area, GIS, Numerical simulation of tsunami propagation, Asahi, Chiba Prefecture*

1. はじめに

2011年3月11日14時46分、宮城県牡鹿半島の東南東約130km付近の地点を震源としたモーメントマグニチュード(M_w)9.0の巨大地震が発生した。これは、1900年以降最大だった1933年昭和三陸地震の M_w 8.4を上回るマグニチュードである¹⁾。この地震では、宮城県栗原市で震度7、宮城県や福島県など28市町村で震度6強を観測するなど、東日本を中心として大きな揺れを観測した。地震による被害に加え、広い範囲で大規模な津波が発生し、甚大な被害をもたらした。岩手県宮古市では40mを超える遡上高を記録し²⁾、青森県、岩手県、宮城県、福島県、茨城県、千葉県の6県62市町村で浸水面積が561km²に及んだ³⁾。

東北地方太平洋沖地震による死者は15,000人以上、行方不明者は4,000人を超えている⁴⁾。岩手県、宮城県、福島県の3県における犠牲者のうち、92.5%の死因が水死であることが発表されており⁴⁾、津波による犠牲者が大半を占めたことがわかっている。また建造物被害については10万戸以上が全壊し、とくに東北地方の太平洋沿岸地域における全壊戸数が、その大部分を占めている⁴⁾。日本政府は、地震と津波による被害総額は16.9兆円にのぼると試算しており、阪神淡路大震災の被害額を大きく上回る⁵⁾。さらに、東京電力福島第一原子力発電所にて事故が発生したことと、それに伴う各地域への風評被害による経済

損失を考慮すれば、長期的な被害額は試算値以上にのぼることが想像される。

著者らは、千葉県旭市を対象地域として、東北地方太平洋沖地震による津波被害調査を実施した。旭市では今回の地震で震度5強を記録し、沿岸全域で津波を観測した。人的被害については、死者が14名、行方不明者が1名と発表されている。建造物被害については、全壊が336戸、大規模半壊が429戸にのぼり、合計3,625戸の住家が被害を受けた⁶⁾。

本研究では、まず旭市の津波被害調査報告を行う。調査で得られた現地の津波浸水域地図と、Google Crisis Response⁷⁾が公開する被災地の衛星画像を用いて判読した浸水域、そして国土地理院が提供している浸水範囲概況図の3つの情報を地理情報システム(GIS)を用いて統合し、3者を比較することによって、本地震津波による千葉県旭市の津波浸水域マップを作成した⁸⁾。この浸水域マップと、旭市における既往の津波ハザードマップとの比較を行うとともに、国土地理院で頒布されている旭市周辺の10mメッシュデジタル標高データをGIS上で統合することで、津波浸水域と地形の関連性について考察する。さらに、国土地理院が構築した本地震の震源断層モデルを用いて、千葉県旭市における津波シミュレーションを実施し、数値解析によって推定される浸水域とGISで構築した浸水域マップを比較した。

著者らは、2011年3月18日、4月12日、6月28日に

計3回の現地調査を行った。1回目の調査では主に旭市の津波被害状況を把握し、2回目の調査で現地のボランティアによって作成された津波浸水域マップや津波の遡上痕から、浸水域の推定を行った。また3回目の調査では、津波被害を受けたと考えられる地域の住民にヒアリング調査を行い、より詳細に浸水域を特定することを目的とした。

図-1は、1回目と2回目の被害調査ルートと、津波被害を受けた主な地点の現地写真である。調査ルートおよびそれぞれの現地写真は、GPSによる位置情報⁹⁾からGoogle Earth上に表示している。旭市沿岸東部の飯岡地区で多数の家屋が倒壊しており、堤防上の遊歩道が陥没している様子が多くの箇所で見られた(写真1,2)。住宅街の内部でも被害は大きく、海岸の砂が堆積し、生垣やブロック塀が薙ぎ倒され、家具などが散乱している状態だった(写真3)。また、旭市沿岸中部の野中川を渡る自転車専用道路の橋が落橋し、隣を走る自動車道路上に一時的に引き上げられている様子が見られた(写真4)。

2. 津波浸水域GISの構築

(1) 現地調査で得られた浸水域マップのGIS化

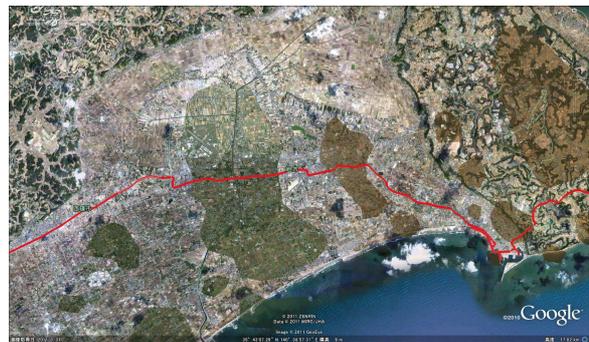
著者らは2回目の現地被害調査で、旭市の震災ボランティアが集めた情報によって作成された浸水域マップを入手することができた。ただし、この浸水域マップは、旭市の飯岡地区の浸水域に限られていて、旭市の沿岸全域を網羅しているものではなかった。

得られた地図は、住宅地図に浸水範囲がマーカーで示されていた。そこで、これを一旦写真に収めた上でJPEG形式ファイルとし、ArcGISのジオリファレンス機能を用いて位置合わせを行った。この際、ベースマップには国土地理院が公開している基盤地図情報を用いた。位置合わせを行った後、マーカー線をトレースして現地調査で得られた浸水域マップを参考にした浸水域ポリゴンをGIS上に作成した(図-2)。

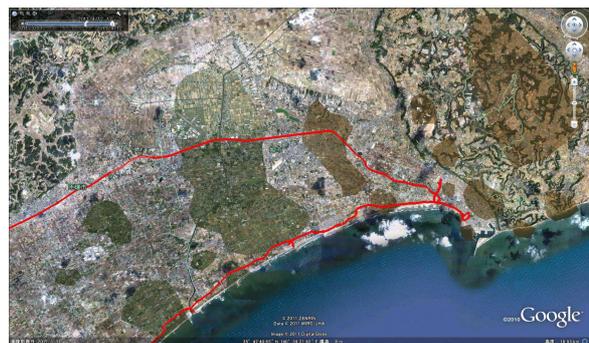
(2) 被災地衛星写真をもとにした浸水域の判読

地震直後の津波被災地における高解像度衛星画像が、Google社によるCrisis Responseで一般公開されている⁹⁾。この画像を用いて目視判読を行い、浸水範囲を把握する。浸水の有無を判読する要因として、主に地面や道路の極端な色の変化を基準にした。ただし、現地調査で得られた浸水域マップと同様に、Crisis Responseで公表されている衛星画像の範囲は旭市の飯岡地区に限られている。なお、衛星画像の撮影日は2011年3月12日である。

浸水範囲の目視判読から浸水域の境界線を入力した画像を作成し、ArcGISのジオリファレンス機能を用いてGIS上で位置合わせを行った。その後、浸水境界線をトレースして、Google Crisis Responseの被災地衛星画像を用いた津波浸水域ポリゴンを作成し



(a) 第1回調査ルート (2011年3月18日)



(b) 第2回調査ルート (2011年4月12日)



(c) 主な被害写真

図-1 被害調査ルートと主な被害写真

た(図-3)。

(3) 国土地理院による浸水範囲概況図のGIS化

国土地理院では、航空写真や衛星写真を判読して、東北地方太平洋沖地震津波の浸水域を推定している。これは東北地方の太平洋沿岸部、茨城県沿岸部、千葉県銚子市周辺を網羅したもので、その結果はインターネットで公開されている。

本研究では、公開されている浸水域地図画像のうち、千葉県旭市に該当する範囲を地理座標系へ投影し、GIS化を行った(図-4)。国土地理院が公開する浸水範囲概況図は、千葉県旭市の沿岸全域を含んでいる。



図-2 震災ボランティアがまとめた千葉県旭市における津波浸水域

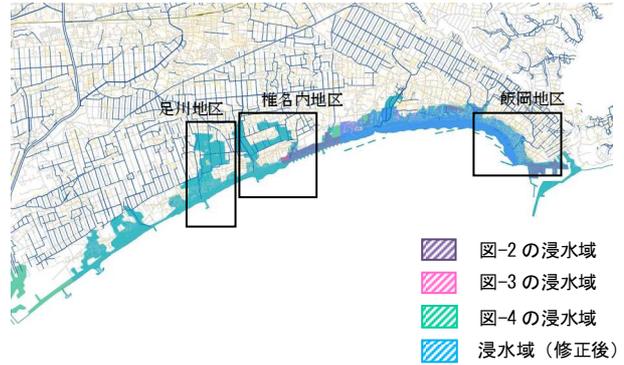


図-5 千葉県旭市における東北地方太平洋沖地震の津波浸水域



図-3 Google Crisis Responseの衛星画像から判読した千葉県旭市の津波浸水域

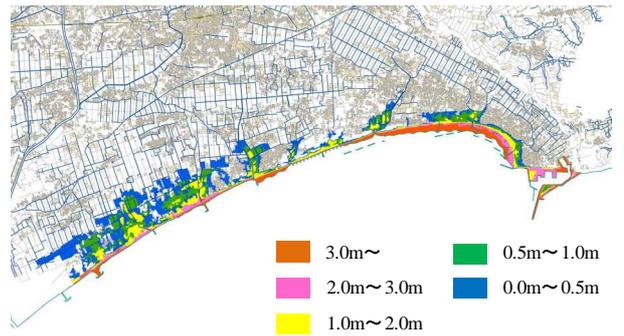


図-6 千葉県旭市の津波ハザードマップ



図-4 国土地理院の浸水被害概況図のGIS化（千葉県旭市）

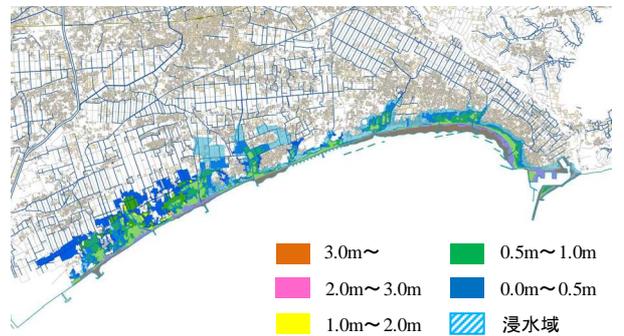


図-7 東北地方太平洋沖地震の津波浸水域と津波ハザードマップの比較

(4) ヒアリング調査による津波浸水域の修正

著者らは、調査によって得られた現地の津波浸水域地図、Google Crisis Responseの被災地衛星写真、国土地理院が公表する浸水範囲概況図の3通りの浸水域をArcGIS上でポリゴンとして作成した。しかしながら、現地地で得られた浸水域地図と、Google Crisis Responseの衛星写真が存在する範囲は旭市飯岡地区に限られているため、旭市全域を網羅できる浸水域は、国土地理院の浸水範囲概況図のみである。そのため、浸水域がすべて重複している旭市飯岡地区において、3通りの浸水域を比較し整合性を評価

した。概して、広い範囲で浸水域が一致しているものと考えられる。ただし、とくに河川沿岸の一部で浸水域の違いが見られたため、その地域については3回目の現地調査時に現地の住民にヒアリング調査を行い、より詳細な津波浸水域の把握を試みた。以上の検討をふまえて、本研究で構築した千葉県旭市における東北地方太平洋沖地震津波の浸水域GISマップを図-5に示す。なお、飯岡地区以外は、国土地理院の公開している浸水範囲概況図の結果が概ね正しいものと仮定している。

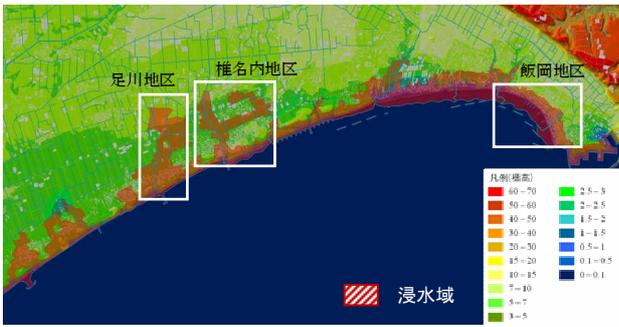


図-8 千葉県旭市における標高データと津波浸水域

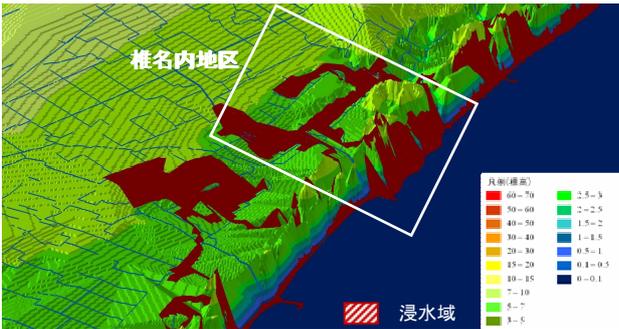


図-9 椎名内地区の3次元標高データと津波浸水域

3. 津波ハザードマップとの比較

千葉県旭市では、津波による被害に備えて、津波浸水域ハザードマップを作成しホームページで公表していた。このハザードマップは、1677年延宝地震、1703年元禄関東地震津波の津波浸水予測図を参考に作成されたもので、浸水深が5段階に色分けされて地図上に描かれている¹⁰⁾。元禄関東地震のマグニチュードは8.1、震源地は房総半島の南端沖である¹¹⁾。本研究では、この津波ハザードマップをGIS化し、東北地方太平洋沖地震における津波浸水域と比較を行った。津波ハザードマップをGIS化したものを図-6に示す。

図-7に、津波ハザードマップと東北地方太平洋沖地震における津波浸水域を比較する。これによると、旭市の主に東部地域については、今回の浸水域の面積の方が大きくなっているが、西部の一部地域ではハザードマップの浸水域の方が広がっている。このような差が出た要因として、震源域の違いが考えられる。東北地方太平洋沖地震の震源断層は宮城県三陸沖から千葉県の東方沖までの広範囲にわたっている⁹⁾。これに対して、ハザードマップのシナリオ地震として用いられた元禄関東地震の震源は、房総半島南端沖である¹¹⁾ため、旭市の西側から津波が押し寄せたことになる。したがって、今回の地震津波による浸水域面積が旭市東部で相対的に大きかったのに対し、元禄関東地震をもとにしたハザードマップの浸水域は旭市西部で広がったといえる。

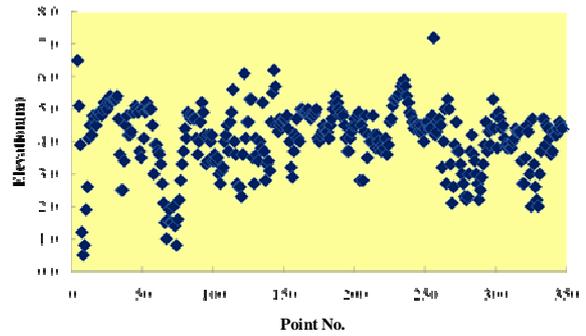


図-10 津波浸水域境界部における標高値 (Point No.は東から西に整列)

4. 地形・土地条件と津波浸水域の関係性の評価

津波の浸水域には、沿岸に到達した時点での津波の波高と波速に加えて、陸域の標高変化や障害物の有無といった地形特性が関係するものと考えられる。本研究では、3次元地形データを利用して、旭市の標高変化と浸水域の関連性を調べるとともに、航空写真から判読した防潮林や堤防が存在する区域あるいは河川沿岸における浸水域について分析を行う。

(1) 標高と浸水域の関係

旭市の3次元標高データをArcGIS上にTIN（不規則三角形網）データとしてデジタル表現する。標高データは、国土地理院が公開している10mメッシュデータを用いる。著者らが作成した津波浸水域を、この標高TINデータに重ね合わせて、標高と浸水域の関係を評価する。図-8より、浸水域の境界線が概ね標高3~5mの範囲にあることから、遡上高が5m程度であると推定される。また、旭市の沿岸部中央付近に位置する椎名内地区では、5mを超える遡上高になっていることが予想される。とくに目那川沿岸では、浸水域が回り込むようにして広がっている。椎名内地区について、標高データを3次元表示したものを図-9に示す。海岸付近で一部標高が高くなっている地形によって、回り込むように浸水したことがわかる。

次に、浸水域の境界線上に100m間隔でポイントを配置した。ポイント数は348個で、標高TINデータと空間結合させることで各々のポイントに標高データを与えた。個々のポイントが持つ標高は津波の遡上高を表しており、これらの標高データを図-10に示す。標高の上限はおおよその値で5m前後を示していることから、遡上高が5m程度であることが確認できる。ただし、数地点で遡上高が5m以上を示している。これは、椎名内地区をはじめとする海岸付近で標高が急激に高くなっている地域のデータであると推察される。また、図-11のように浸水域に対して測線を10本設定して地形断面を取得した場合も、各地点での遡上高は5m前後になっていることがわかる。

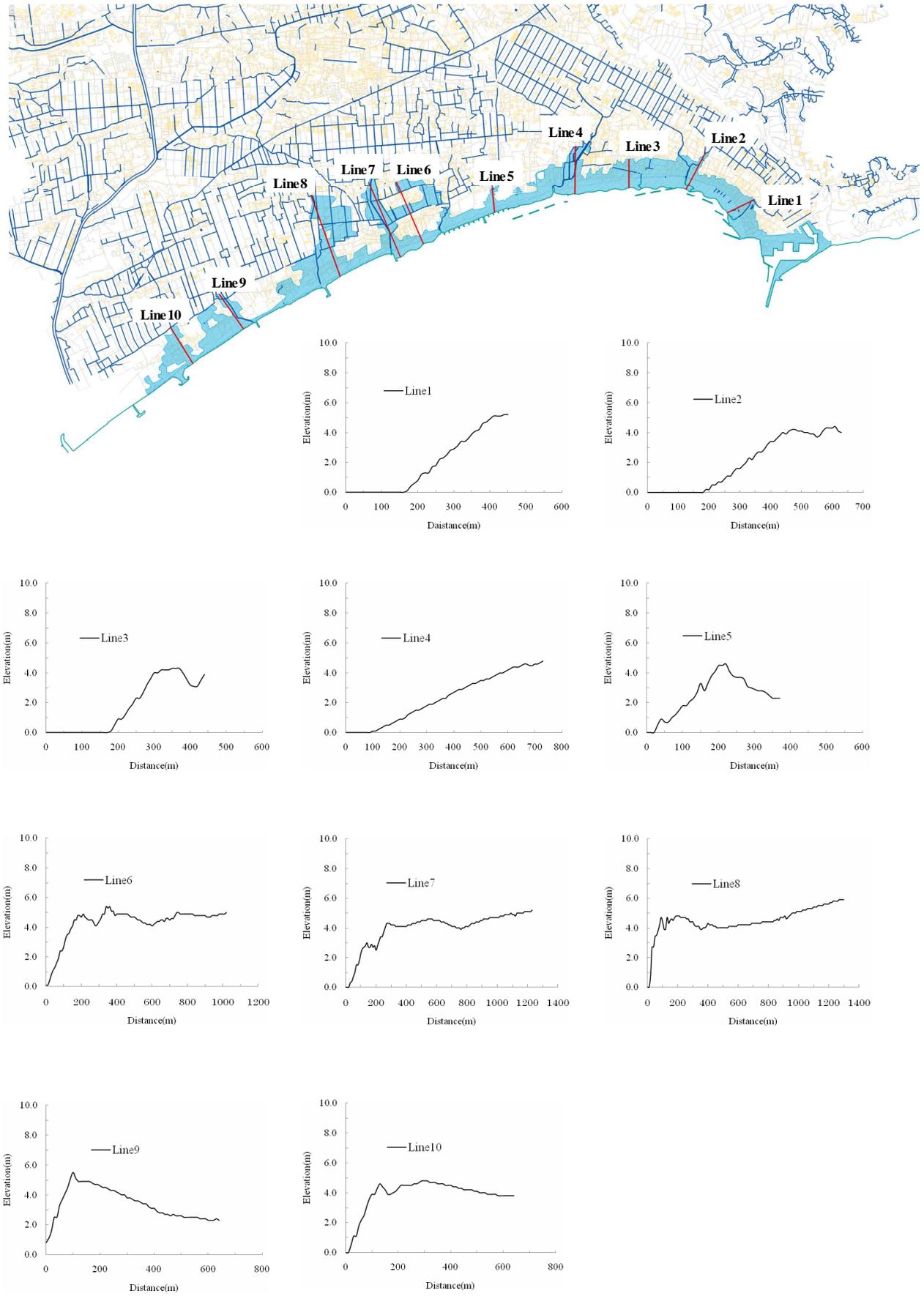


図-11 測線位置と地形断面

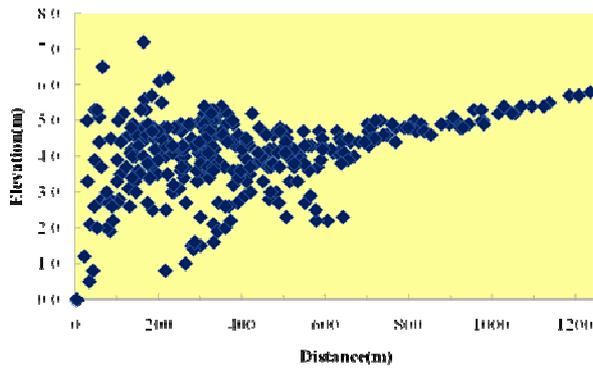


図-12 津波浸水域から推定した千葉県旭市における遡上高と遡上距離の関係

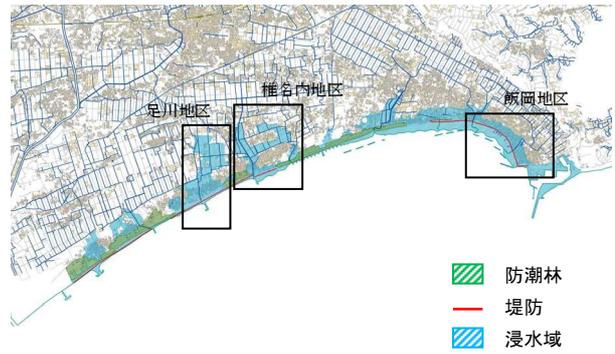


図-14 千葉県旭市の防潮林・堤防・河川・水路位置と浸水域



(a) 空撮画像の位置合わせ



(b) 防潮林位置の目視判読



(c) 防潮林位置を示すポリゴン

図-13 Google Earthの空撮画像を用いた防潮林位置の判読手順の例

(2) 土地条件と浸水域の関係

津波の遡上距離には、陸域に存在する防砂林や堤防などの障害物、あるいは河川や水路の有無といった土地条件が大きく影響すると考えられる。そこで、Google Earthの空撮画像で被災前の千葉県旭市の土地条件を把握し、浸水域にどのような影響を及ぼしたのか分析する。

はじめに、遡上高の推定に使用した浸水域の境界線上に100m間隔で配置した各ポイントに対して、海岸線からの距離を算出する。これにより、浸水域境界における遡上高と遡上距離の関係がわかる(図-12)。これによると、遡上距離が約600m以内の地域で遡上高のばらつきが大きい。よって、比較的海岸に近い範囲での土地条件が、津波の遡上距離に影響していると推察できる。

次に、Google Earthの地震前の空撮画像から、旭市沿岸部の土地条件および河川や水路の位置を判読する。ArcGISのジオリファレンス機能を用いて、GIS上で空撮画像の位置合わせを行った(図-13)。ArcGISの旭市の数値地図上に、堤防、防砂林、河川、水路の位置を示したものを図-14に示す。ここに浸水域を重ね合わせることで、土地条件と浸水域の関係を分析する。旭市には7本の河川が流れているが、目那川と矢指川流域では、浸水域が大きく広がっていることがわかる。また、足川地区では堤防が設置されているにもかかわらず、大きな浸水域が確認できる。これは隣接する地区に比べて、防潮林が存在しなかったために浸水を抑制することができなかったことが理由と考えられる。全体的には、防潮林が存在する沿岸地域では浸水域が小さくなっていることがわかり、津波の浸水に対して効果を示したといえる。津波による建物被害の多かった旭市東部の飯岡地区には、海岸に沿って高さ4m程度の堤防が配置されている。しかしながら、来襲した津波の高さが想定以上であったために、堤防を越えて津波が浸水した。しかし、住宅が密集している地域であるため、広範囲に津波が遡上することはなかったものと考えられる。

5. 津波数値シミュレーション

著者らは、千葉県旭市の東北地方太平洋沖地震津波による浸水域GISの構築と並行して、国土地理院が構築した本地震の震源モデル¹²⁾を用いて、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を発生させた震源モデルとして、西側に傾く2枚の逆断層1, 2を仮定している(図-15)。断層1については、岩手県南および宮城県沖に位置し、走向203°、傾斜角16°の断層面で、断層の長さ186km、幅129km、すべり量は24.7mである。断層2については、福島県および茨城県沖に位置し、走向203°、傾斜角15°の逆断層、断層の長さは194km、幅は88km、すべり量は6.1mである。

震源モデルによる海底の地殻変動量¹³⁾を津波発生初期条件とした。津波の数値シミュレーションには、Staggered leap-frog法¹⁴⁾を用いた。これは、空間領域に変数を位置づけた格子間の中央差分をとる手法である。津波伝播には非線形長波理論(浅水理論)を適用し、連続の式(1)と、海底摩擦項と移流項を含む運動方程式(2), (3)を解く。

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

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

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

上式において、 g は重力加速度、 M 、 N はそれぞれ x 、 y 方向の流量、 D は全水深(= $h+\eta$)である。 n はマニング粗度係数で、本解析では $0.025\text{m}^{-1/3}\text{s}$ と一様に仮定した。Staggered法のメッシュサイズは、外洋はもっとも粗く1350m、陸域に近づくほど450m、150m、50mと段階的に細かく設定し、サイズの異なる複数の領域を入れ子状に組み合わせて計算した。計算時間間隔は0.15秒で、地震発生から3時間の計算を行った。数値シミュレーションによって得られた千葉県旭市における浸水域を図-16に示す。浸水域は、ArcGIS上に表示しており、先に作成した浸水域マップとの比較が可能である。両者を重ね合わせたものが図-17である。概ね数値シミュレーション結果の方が、広い浸水域を示している。これは、本計算ではマニング粗度係数を $0.025\text{m}^{-1/3}\text{s}$ と一様に設定し、土地条件を考慮していないことが一因と考えられる。ただし、一部地域では作成した浸水域マップの方が数値シミュレーションよりも広い浸水域を示している。中でも顕著なのは足川地区である。

1. Horizontal Displacement

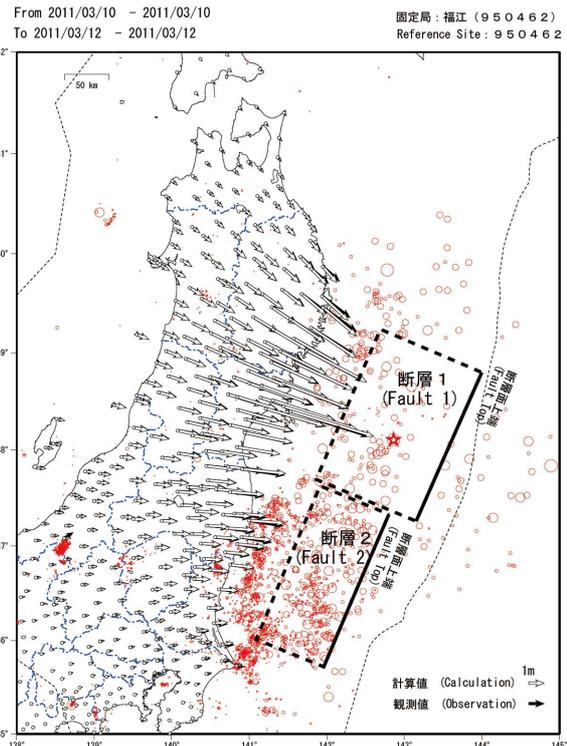


図-15 東北地方太平洋沖地震の震源断層モデル(国土地理院資料)

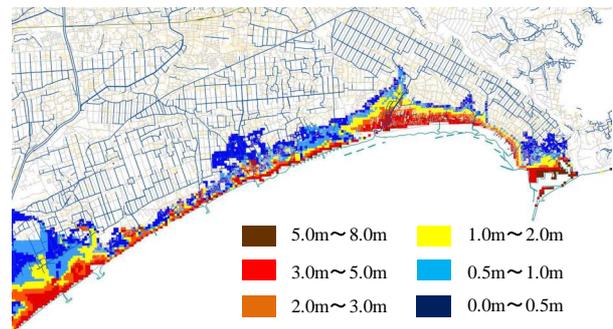


図-16 津波浸水シミュレーション結果

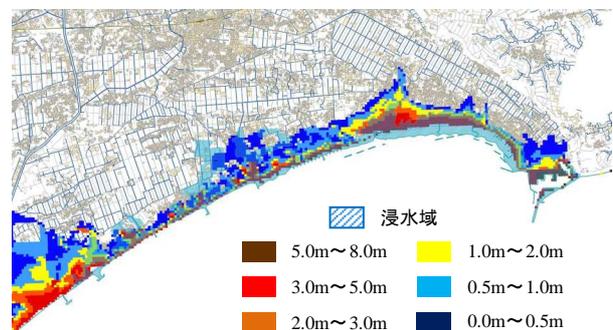


図-17 数値シミュレーション結果と浸水域マップ

足川地区の海岸部には堤防が設置されているものの、防潮林などの津波に対して抵抗する障害物が他の地域に比べて少なかった(図-14)。このことが影響

して、周辺よりも実際の浸水域が広がったものと考えられる。また、建物被害の多かった飯岡地区では数値シミュレーション結果と本研究で作成した浸水域が概ね一致しているものの、飯岡漁港周辺については数値解析結果の方が広い浸水域を予測している。今後は、堤防、防潮林などの土地条件の反映や陸域のメッシュサイズをより細かくするなどして数値シミュレーションの精度の向上を図る。

6. まとめ

本研究では、著者らが東北地方太平洋沖地震後に千葉県旭市で行った被害調査の概要を報告した。さらに、現地調査で得られた現地の津波浸水域地図、Google Crisis Responseで公開されている被災地衛星画像、国土地理院が公表する浸水範囲概況図の3通りの浸水域データをGIS上で統合し、旭市における津波浸水域マップを作成した。これを用いて、旭市が従来公開していた津波ハザードマップと浸水域の比較、あるいは標高や土地条件と浸水域の相関性の検討を行った。さらに、東北地方太平洋沖地震の震源断層モデルを用いて、千葉県旭市における津波浸水シミュレーションを行い、その結果と作成した浸水域マップの比較、考察を行った。

千葉県旭市が公開していた津波ハザードマップと浸水域マップの比較を行ったところ、旭市の東西で浸水域面積の違いがみられた。これは、東北地方太平洋沖地震の震源域と、ハザードマップに使用された元禄関東地震の震源域の違いが主な原因と考えられ、ハザードマップに比べ作成した浸水域マップは旭市東部の浸水域面積が大きくなった。

GISを用いて標高データと浸水域マップを重ね合わせることで、両者の相関性を評価した結果、旭市の本地震による津波の遡上高は、概ね5m程度であることがわかった。遡上高が5mを超える地域については、3次元標高データを利用し地形の特徴を調べた結果、海岸線付近で急激に標高が高くなっていることが原因であった。

土地条件と浸水域の相関性を調べるために、衛星写真から堤防や防潮林などの障害物の有無を判読し、その結果をGIS上で浸水域マップに重ね合わせることで検討を行った。旭市の海岸線の大部分に堤防が設置されていたが、今回の津波の高さは堤防の高さをを超えるものであったため、効果は期待されるほど大きくなかったと考えられる。一方で、沿岸部に防潮林が植生している地域の浸水域は、相対的に見て小さくなっていたことから、防潮林の津波の浸水に対する抑止効果は大きいものと推察できた。

千葉県旭市における津波浸水シミュレーションは、マニング粗度係数を一様として実施したため、浸水域マップよりも過大な浸水域が結果として得られることが予想されたが、一部地域で浸水域マップの方が大きい浸水域を示した地域が生じた。今後は、陸域の計算メッシュサイズをより細かくするなどして、シミュレーションの精度向上を図る。

謝辞 本研究で使用した津波数値シミュレーションプログラムであるTUNAMI-CODEは、東北大学災害制御研究センターの越村俊一准教授に提供していただいた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 気象庁：「平成 23 年東北地方太平洋沖地震」について，2011.
- 2) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ：<http://www.coastal.jp/ttjt/>
- 3) 国土地理院：津波による浸水範囲の面積（概略値）について（第5報），2011.
- 4) 警察庁緊急災害警備本部：平成 23 年東北地方太平洋沖地震の被害状況と警察措置，2011.
- 5) 日本政府緊急災害対策本部：平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）について，2011.
- 6) 千葉県旭市：東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）旭市災害状況，2011.
- 7) Google Crisis Response: <http://www.google.org/crisis-response/>
- 8) 丸山喜久，松崎志津子，山崎文雄，三浦弘之，Miguel ESTRADA：2010 年チリ地震に関する広域被害分析に向けた GIS の構築，土木学会論文集[特]地震工学論文集，Vol.66，No.1，pp. 377-385，2010.
- 9) GARMIN： <http://www8.garmin.com/buzz/oregon/>
- 10) 千葉県旭市ホームページ：<http://www.city.asahi.lg.jp/section/soumu/news/2008-0319-1407-2.html>
- 11) 地震調査研究推進本部：元禄型関東地震の想定震源域，http://www.jishin.go.jp/main/yosokuchizu/kaiko/k22_genroku-kanto.htm#kakojishin
- 12) 国土地理院：平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動と震源断層モデル，<http://www.gsi.go.jp/cais/topic110422-index.html>
- 13) 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.
- 14) 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.

ESTIMATION OF TSUNAMI-INUNDATED AREAS IN ASAHI, CHIBA AFTER THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE

Ken KITAMURA and Yoshihisa MARUYAMA

The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake generated extremely large tsunami. The authors conducted the field survey in Asahi, Chiba Prefecture after the occurrence of the earthquake. Tsunami inundation areas were built using the GIS datasets and compared with the existing tsunami hazard map in Asahi. The relationship between the topographical characteristics and the inundated areas was also considered using the digital elevation model. In addition, the numerical simulation of tsunami propagation is performed for analyzing the correlation between the land conditions and the tsunami inundated areas in Asahi, Chiba.