

津波来襲時の映像解析による 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の流速測定

林 里美*・越村 俊一*

1. 序論

2011 年 3 月 11 日 14:46:18 (JST), 牡鹿半島の東南東約 130 km の地点で東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) が発生した。この地震により生じた津波は、岩手県・宮城県・福島県を中心とした太平洋沿岸部を襲い、甚大な人的被害・建物被害をもたらした。

今回の事例も含め、巨大津波の発災後は多くの現地調査が行われ、浸水域や浸水深、遡上高等の津波流況が明らかになる。特に、流速は津波挙動を把握する上で重要な要素である。陸上における流速情報は、構造物に作用する流体力・漂流物の衝突力の定量的評価や、津波数値計算の再現性の検証に有用であり、建物被害予測手法の高度化にも応用が可能である。

しかし、陸域における津波の遡上速度・流速は直接的な測定が困難であるため、従来は浸水深の水位差から近似的に推定する手法が用いられてきた (松富・首藤, 1994)。多数の津波目撃映像が残されるようになった近年では、これらを解析することで実流速の算定が行われている。その解析手法は様々であり、例えば榊山ら (2005) と Borrero *et al.* (2006) は、ビデオ上で漂流物を追跡することで実際の流速を算定した。一方、Fritz *et al.* (2006) は津波目撃映像を DLT 法 (3次元射影変換) で幾何補正した後に、PIV 法 (粒子画像流速測定法) を適用することで実流速を計測した。各手法の妥当性に関しては、同じ映像を解析した Borrero *et al.* (2005) と Fritz *et al.* (2006) から、後者のように適切な幾何補正を施す方が、より正確な結果を得

ることが出来ると考えられる。よって、津波目撃映像から流速を求める際は、解析対象に適した画像処理を行うことが望ましいとされるが、このような測定例は未だ少なく、最適な解析手法も確立されていない。

本研究では、2011 年東北地方太平洋沖地震津波の実態解明を目的として、津波目撃映像に画像処理を施すことにより、浸水挙動の把握や遡上速度・流速の測定を行う。更に、映像解析から得た実測値と津波数値計算結果を比較することで、数値シミュレーションの再現性とその課題について論ずる。

2. 映像解析による津波の陸上遡上特性の把握

初めに、陸域における津波先端部の移動速度 (遡上速度)、及び津波の氾濫流速を求めため、津波来襲時の映像解析を行う。

2.1 解析対象ビデオと地域の決定

本研究では、高画質であることやカメラモーション (カメラの上下運動や回転) が最少であること、画面上に正確な撮影時刻が記録されていることから、NHK の空撮映像を解析対象とした (図 1)。このビデオは、発災後約 1 時間が経過した 15:52 から、名取川河口周辺を起点にして撮影が開始されており、特に 15:55 - 16:09 には仙台平野を遡上する津波先端部を克明に記録している。また、名取川河口から仙台東部道路にわたる範囲を撮影していることから、仙台市若林区藤塚・名取市閑上・名取市小塚原の 3 地域を解析対象とした (図 2)。

*東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター



(a) 藤塚 -1



(b) 藤塚 -5



(c) 閑上 -1



(d) 閑上 -3



(e) 小塚原 -2



(f) 小塚原 -3

図 1 NHK 空撮映像のキャプチャ画像

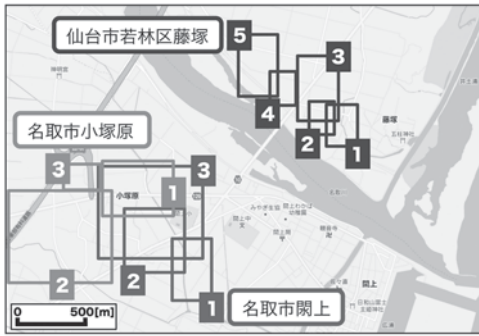


図2 解析対象地域

2.2 画像処理の準備

2.2.1 遡上速度測定準備 — 津波フロント線

NHK 空撮映像のうち、陸上を遡上する津波先端部を捉えているシーンを抽出（キャプチャ）し、更に以下の条件を満たすキャプチャ画像を選定する。

- 津波フロント線の判別・描画が可能か（津波フロント線が明確に視認できるか）
- 画像処理（幾何補正）に必要な地上基準点が4点以上残存しているか

キャプチャ画像の選定後は、オリジナル映像と照合しながら津波フロント線をキャプチャ画像上に描画する。ここで留意すべきは、津波フロント線を目視判読している点である。選定した画像の中には、地表と海水の色の識別が難しいものや、火事の煙によって津波先端部が不鮮明なシーンも含まれている。このようなシーンは解析対象から取り除いているものの、津波フロント線の視覚的解釈に起因する誤差は数 m 程度発生しうる。

2.2.2 流速測定準備 — 漂流物

本研究では、漂流物を追跡することで流速の算定を行う。したがって、以下の条件を満たす適当な漂流物をピックアップし、マークを施す。

- 微小な時間間隔で追跡可能な物体
 - 定常状態かつ直線的に動いている物体
- 選定の結果、津波先端部が通過して 2 - 45 秒が経過した地点における漂流物を解析対象

とした。なお、車・船・家屋の一部などの大規模な漂流物に関しては、移動速度が周囲の瓦礫と同程度であると視覚的に判断された物体のみを対象とした。

2.2.3 幾何補正準備 — 被災前地図

解析対象地域である仙台市若林藤塚・名取市開上・名取市小塚原を、図2に示す通り、5つ・3つ・3つの小領域に分割した。今回は、この11領域の被災前地図として、Google Earth から取得した衛星画像を使用した（画像取得日：2008年9月1日）。

2.3 キャプチャ画像の幾何補正

遡上速度と流速を求めるためには、各時間における津波フロント線と漂流物の正確な位置を把握する必要がある。そこで、2.2にて津波フロント線と漂流物のマークを描画したキャプチャ画像に、2次元射影変換を適用して幾何補正し、GIS上で被災前地図と重ね合わせる作業を行った。

2.3.1 解析手法の概要

幾何補正とは、画像の座標系を画像座標 (i, j) から実空間座標 (x, y) へ変換する手法である。この処理を行うことで、画像上に生じた幾何学的歪みの除去が可能になる。幾何補正には複数の変換方法が存在するが、その中でも2次元射影変換は、画像平面と実空間平面が平行でなくても適用出来るという特徴を有する。つまり、直下視画像に限らず斜め空撮画像の幾何補正も可能であるため、本研究では2次元射影変換を適用することとした。なお、2次元射影変換は式(1)で表される。

$$(i, j) = \left(\frac{a_1x + a_2y + a_3}{a_7x + a_8y + 1}, \frac{a_4x + a_5y + a_6}{a_7x + a_8y + 1} \right) \quad (1)$$

ここで、入力画像座標 (i, j) 、出力画像座標 (x, y) 、未知パラメータ a_k ($k=1, \dots, 8$) である。

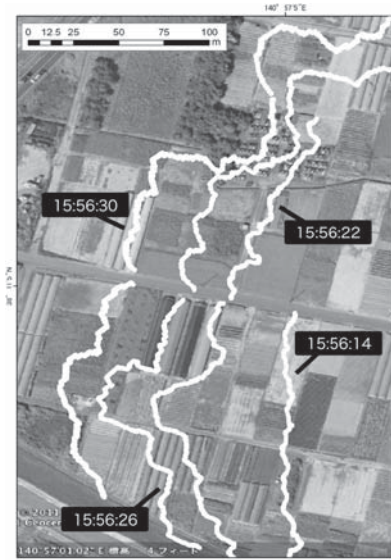
2.3.2 解析作業の詳細

GIS 上で 2 次元射影変換を行う際は、未知パラメータを 8 つ有する式 (1) を満たすよう、最低 4 点の地上基準点座標 (x,y) が必要になる。正確性を期するため、本解析における地上基準点の決定条件として、以下を定めた。

- 道路や水路など、被災前地図でも位置が不変であるもの

- 家屋や構造物など、浸水しても目印になりやすく、かつ明らかに流出していないもの
- ビニールハウスや田畑の区画で、被災前地図上でも位置が不変であると判断されるもの

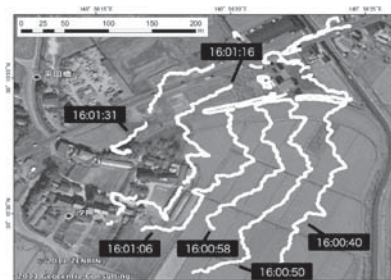
これらを踏まえて地上基準点を選択し、2 次元射影変換をした後、津波フロント線の



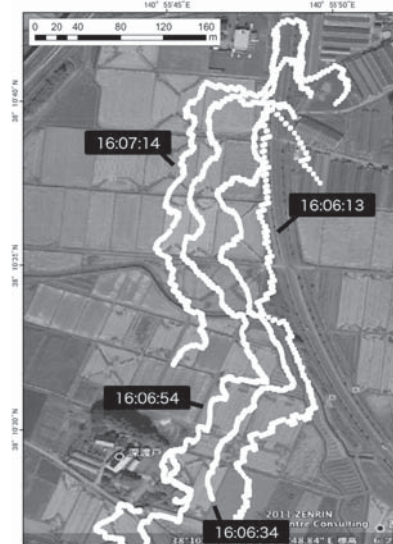
(a) 藤塚 -2



(b) 藤塚 -5



(c) 閑上 -2



(d) 小塚原 -2

図 3 津波先端部の時系列

時系列のみを被災前地図に表示した (図 3)。また、漂流物についても同様の処理を行ってマッピングし、変位の軌跡を描画した (図 4)。

2.4 遡上速度・流速の測定とフルード数算出

2.3 において、被災前地図上にマッピングされた津波先端部が、時間間隔 Δt [s] の間に移動した距離 Δx [m] を測定することで遡上速度 v_p [m/s] を算出する。なお、移動距離 Δx [m] に関しては、目撃映像に記録された漂流物の挙動から浸水方向を定めて測定した。

$$v_p = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2)$$

同様に、漂流物が時間間隔 Δt [s] の間に移動した距離 Δx [m] を測定することで流速 v_f [m/s] を算出する。測定点は各漂流物の中心部とし、変位の軌跡に沿って移動距離 Δx [m] を計測した。

$$v_f = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (3)$$

更に、式 (2)・式 (3) から明らかになった遡上速度・流速を用いて、フルード数 Fr の算定を行った。ただし、遡上速度及び流速の測定時刻における正確な浸水深を空撮映像から判断することが困難であったため、津波先端部付近で 1 m、浸水後 2 - 45 秒で 2 m の浸水深を仮定した。

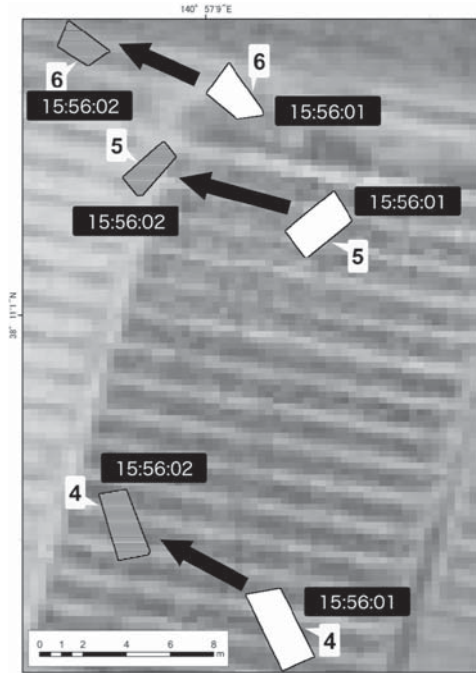
$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (4)$$

ここで、 v は遡上速度 v_p ・流速 v_f 、 g は重力加速度、 h は浸水深とする。

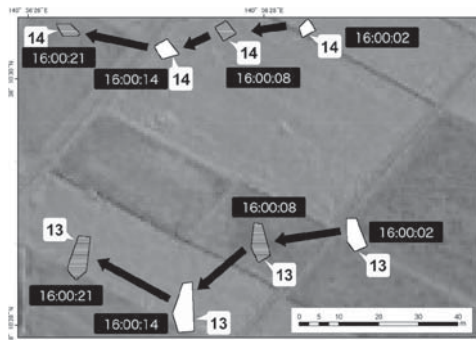
2.5 解析結果

2.5.1 遡上速度

各解析対象地域における遡上速度の実測値 (農地・家屋等有) を図 5 に示す。最も海岸線に近い領域 (藤塚-1) では、6 m/s 以上の遡上速度であったことが確認された。更に、



(a) 藤塚-1 (漂流物 NO.4, NO.5, NO.6)

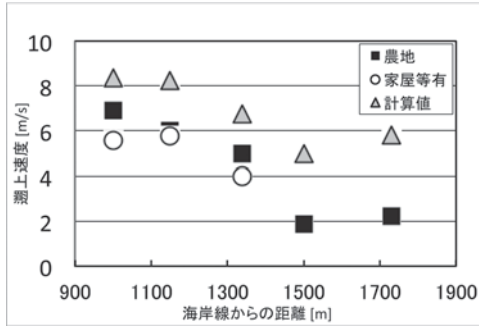


(b) 閑上-1 (漂流物 NO.13, NO.14)

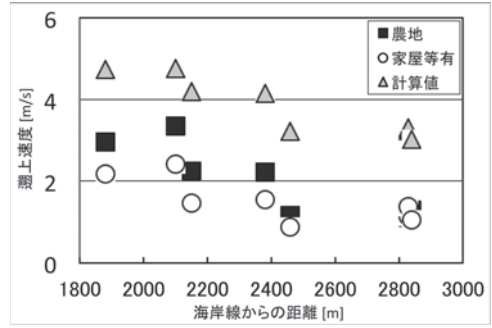
図 4 漂流物の移動軌跡

2 階建て木造家屋が浸水後約 10 秒間で崩壊・流失したことが目撃映像から明らかになった。

また、藤塚地区や閑上地区では、道路・水路・微地形の影響による局地的な減衰や加速が生じていたことが確認されたほか、家屋が密集する場所では障害物が無い農地に比べ、遡上速度が 1 - 3 割程度減勢することが分かった。



(a) 仙台市若林区藤塚



(b) 名取市関上・名取市小塚原

図 5 遡上速度の実測値と計算値

2.5.2 流速

藤塚-1・藤塚-2・関上-1・小塚原-3における流速の実測値を図6に示す。各領域の遡上速度と流速を比較すると、同程度あるいは後者の方が上回るという結果が得られた。特に、藤塚-1では浸水から10秒以内で8m/sに達しており、津波先端部通過後の僅かな時間で加速したことが確認された。これは、浸水深が急激に増加したことを示している。

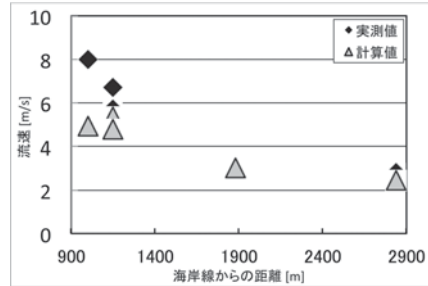
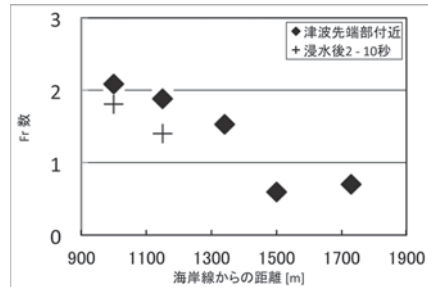


図 6 流速の実測値と計算値

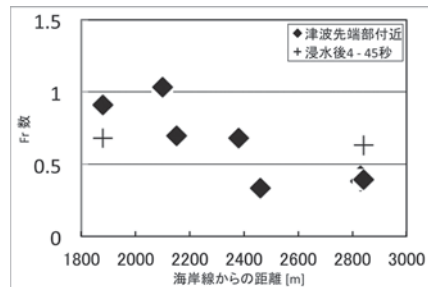
2.5.3 フルード数

以上の実測値を用いて、津波先端部付近と浸水後2-45秒間におけるフルード数を算出した。その結果を図7に示す。津波先端部付近に関しては、海岸線により近く遡上速度が4-7m/sの地点でFr > 1.5の射流となったが、内陸部へ浸入するにつれて常流に遷移していったことが明らかになった。また、浸水後の流れ場についても、津波前面よりもフルード数が減少する傾向にあり、射流から常流へ徐々に変遷していることを確認した。

なお、2004年インド洋津波において目撃された Banda Aceh 市街における津波の流れ場でも、津波先端部付近において限界流及び射流であったが (Fritz et al., 2006), 本地震の方がより大きいフルード数であったことが分かった。その理由として、住宅街に浸入する津波を解析対象にしている前者に対し、本研究では農地の多い平野における遡上速度を測定したことが挙げられる。



(a) 仙台市若林区藤塚



(b) 名取市関上・名取市小塚原

図 7 津波先端部分と浸水後の流れ場におけるフルード数の推定値

3. 数値解析による本津波の再現

次に、現行の津波数値計算モデルと既往の津波波源モデルによる実現現象の再現性を検証するため、2011 年東北地方太平洋沖地震津波の数値シミュレーションを行った。

本解析では、津波数値計算の初期条件として、今村ら (2011) による東北大学モデル (version1.1) の陸側断層に対し修正 (断層深さ 25 km, 傾斜角 20.5° , 滑り量一部増減) を加えた津波波源モデルを使用した。この修正は、本地震の余震分布を明らかにした Nettles *et al.* (2011) と Asano *et al.* (2011) に基づいて行った。また、陸上域における計算格子間隔を 10 m, Manning の粗度係数を一律 0.025 としたほか、断層破壊に関しては、観測波形データ (NOWPHAS) と東北大学モデル (version1.1) 波形の比較から、岩手県沖における断層破壊開始の時間差を 9-14 分と設定した。

4. 数値シミュレーションの再現性検証

4.1 遡上速度

図 5 の実測値と計算値の比較から、津波数値計算では海岸線付近で 3 割・内陸部で 2-3 倍程度の過大評価をしていることが確認された。よって、遡上速度の再現性を向上させるためには、陸上域の遡上計算条件を改善する必要があると言える。本研究では Manning の粗度係数として一定値を与えたが、実際の土地利用に応じた詳細な粗度係数を設定しない限り、再現性の向上は望めない。また、空撮映像からは、津波先端部に大量の瓦礫が集まっていることが確認されている。したがって、漂流物の有無が遡上速度・流速に影響を与えることを踏まえ、これらの抵抗も含めた津波先端部の境界条件を適切にモデル化すべきである。

4.2 流速

図 6 の実測値と計算値を比較すると、津波数値計算は実現現象の 6 割程度から同程度に収

まっており、概ね整合していることが明らかになった。したがって、瓦礫漂流物の影響が少ない津波先端部通過後の流れ場に関しては、現行の津波数値計算モデルでも良好に再現出来ることが確認された。

5. 結論

本研究では、津波遡上の様子を記録した空撮映像に 2 次元射影変換を適用し、被災前地図と重ね合わせるにより、陸上における詳細な浸水挙動を把握する手法を確立した。その結果、ビデオから津波先端部の正確な位置情報が抽出され、構造物に対する回り込みや局地的な浸水特性が明らかになった。遡上速度・流速に関しては、対象地域において実測値を得ることが出来たほか、障害物の有無による減衰効果や、浸水後数秒間で流れが加速するという性質も確認された。

更に、実測値と津波数値計算結果を比較することで、陸域における津波遡上計算条件の検証が初めて可能になった。その結果、流速に関しては数値シミュレーションの再現性が高いものの、遡上速度に関しては実現現象から大幅に乖離していることが明らかになった。今後は、土地利用に基づいた詳細な粗度係数の設定や、瓦礫漂流物を含んだ津波先端部の適切なモデル化を行う必要がある。

謝辞

本研究は、NEDO 産業技術研究助成事業 (プロジェクト ID : 08E52010a), 科学研究費補助金, および東北大学運営交付金 (東北太平洋沿岸における緊急津波実態調査) の補助を受けて実施した。また、津波来襲時の映像は NHK より提供いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 松富英夫, 首藤伸夫 (1994) : 津波の浸水深, 流速と家屋被害, 海岸工学論文集, 第

- 41 卷, pp.246-250
- 2) 榊山勉, 松富英夫, 都司嘉宣, 村上嘉謙 (2005) : ビデオ画像による津波氾濫流速と現地調査による推定値との比較, 津波工学研究報告, 第 22 号, pp.111-117
 - 3) Borrero, J.C., C.E.Synolakis, and H.M.Fritz (2006) : Northern Sumatra Field Survey after the December 2004 Great Sumatra Earthquake and Indian Ocean Tsunami, *Earthquake Spectra*, vol.22, S93-S104
 - 4) Fritz, H.M., J.C.Borrero, C.E.Synolakis, and J.Yoo (2006) : 2004 Indian Ocean tsunami flow velocity measurements from survivor videos, *Geophys Res. Lett.*, vol.33, L24605
 - 5) 今村文彦, 越村俊一, 村嶋陽一, 秋田善弘, 新谷勇樹 (2011) : 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 (version1.1), オンライン <www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/events/tohoku_2011/model/dcrc_ver1.1_111107.pdf>
 - 6) Nettles, M., G.Ekström, and H.C.Koss (2011) : Centroid-moment-tensor analysis of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and its larger foreshocks and aftershocks, *Earth Planets Space*, vol.63, pp.519-523
 - 7) Asano, Y., T.Saito, Y.Ito, K.Shiomi, H.Hirose, T.Matsumoto, S.Aoi, S.Hori, and S.Sekiguchi (2011) : Spatial distribution and focal mechanisms of aftershocks of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, vol.63, pp.669-673