大船渡湾口における 2011年東北地震津波挙動の動画解析

本間 真平¹・鈴木 崇之²・佐々木 淳³

¹日本道路株式会社 (〒105-0004 東京都港区新橋1-6-5)
E-mail: homma-shimpei-sj@ynu.jp

²正会員 横浜国立大学准教授 都市イノベーション研究院
(〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)
E-mail: suzuki-t@ynu.ac.jp

³正会員 東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科
(〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5)
Email: jsasaki@k.u-tokyo.ac.jp

津波の解析には現地観測データが不可欠である。東北地方太平洋沖地震による津波は観測機器の多くを被災させた一方、津波を捉えた貴重な動画が残されている。動画を用いた津波挙動の把握はいくつかの例があるが、大部分は陸上遡上を対象としており、海面上や沿岸部の流速を求める研究は少ない。本研究では大船渡湾に來襲する津波を撮影した動画を用い、津波の流速を求めることを試みた。動画を等間隔の時間で切り出した画像群・グレースケール画像へ変換した後、幾何補正を行うことで距離・角度の歪みを除去し、津波流速の平面分布を時系列的に把握した。

Key Words : *Tsunami, estimation of velocity field, movie, image analysis, Ofunato Bay*

1. はじめに

2011年3月11日午後2時46分、マグニチュード9.0の大規模な地震が東北地方太平洋沖で発生した。震源域は岩手県沖から茨城県沖にかけて幅約200 km、長さ約500 kmであり、震源の深さは約24 kmであった。地震の最大震度は宮城県北部で記録された震度7、それ以外の地域でも岩手県から千葉県にかけて震度6弱以上を観測した。この地震によって生じた津波は、環太平洋地域を中心に各国の海岸に達し、甚大な被害をもたらした。震源域に近い東北地方の太平洋沿岸においては甚大な被害が発生し、最大で海岸から約6 km内陸まで浸水した。震災後、津波被害状況把握のための現地調査などが多岐にわたる専門家等により行われた。海岸工学の分野においても、東北地方^{1) 2) 3) 4)}、北海道⁵⁾、関東⁶⁾などの地域における報告がなされている。

そうした中、津波挙動の把握を目的とした研究も多くなされ、その一つの手法として動画解析が挙げられる。2011年東北津波の動画を用いた解析としては、林ら⁷⁾が仙台平野を遡上する津波の流速を、また、山中ら⁸⁾が綾里湾における津波による水位の変化を算出している。し

かし、沿岸海域部における津波の流速を対象としている研究は少ない。本間ら⁹⁾は大船渡湾口において津波流速の推定を行ったが1側線のための解析にとどまっている。海域での津波流況の把握は、津波挙動解析や数値シミュレーションの精度検討などにおいて大きな意義を持つと考えられる。そこで、本研究では岩手県大船渡市において湾口部付近を撮影した津波来襲時の動画を用い、大船渡湾口部付近における流速の時空間分布を把握することを目的とする。

2. 動画解析

(1) 動画の概要

本研究で使用するビデオカメラの動画は、株式会社東海新報社から提供いただいたものであり、大船渡湾口防波堤より約2 km陸側の標高110 mの高台から湾口方向が撮影されている (39° 2' 25.1" N, 141° 42' 41.07" E)。動画には津波来襲時の様子が15時04分より31分59秒間収録されていた。ビデオ撮影の位置および撮影範囲を図-1に示す。

(2) 動画の画像変換

撮影された動画の解析を行うため、a) 動画から静止画への変換、b) グレースケールへの変換、c) 輝度値への変換、の3つの手順で動画の変換を行った。この変換作業により、津波の挙動を輝度値の変化として捉えることが可能となる。次項よりこの作業手順を簡潔に示す。

a) 動画から静止画への変換

はじめに、撮影された動画をビットマップ形式で静止画の集合体として保存した。これにより動画を縦480×横720の 픽セル画像の集合体として扱うことが可能となる。図-2にその画像の一例を示す。画像上の 픽セルの横方向位置をx、縦方向位置をyと定義し、さらに画像左上端の座標を(1, 1)、右下端を(720, 480)とした。静止画へ変換する際、時間間隔は1秒とした。

b) グレースケールへの変換

ビットマップを構成する各 픽セルには色の情報が含まれる。通常、色の情報は赤 (R)、緑 (G)、青 (B) の3要素で表され、各要素が0~255までの値をとる。グ

図-1 津波動画の観測地点と撮影方向、および動画のスナップショット

図-2 本研究におけるビットマップ画像の座標系

レースケールでは3要素がすべて同じ値をとるため、扱う要素が1つに集約され解析が容易となる。そこで、本研究では、RGBカラー画像をグレースケール画像へ変換することとした。

c) 輝度値への変換

静止画に変換後、グレースケールへ変換した画像を数値データである輝度値へと変換した。津波の挙動は数値データの変化として表されることから、この輝度値を解析することにより湾口部の流況が把握可能となる。

(3) 実距離の補正

a) 現地調査

本研究で使用した動画は、標高約110 mの高台から撮影されているため俯角により画像上の1 픽セルに含まれる範囲の実距離に差が生じている。そのため、画像上のどの 픽セルにおいても含まれる実距離が均一になるよう幾何補正を行った。この幾何補正を行うには、位置情報が既知の 픽セルが必要となる。しかし、撮影された画像内において位置情報が既知の 픽セルは数点のみであった。そこで、大船渡湾口部において現地調査を実施し、幾何補正に必要な位置情報を取得することとした。

現地調査は、2013年7月28日に実施した。綾里湾小石浜港より船を出し、湾口部43点の位置情報をD-GPS (HE-7501, 本多電子) 計測により測定した。さらに、この様子を津波来襲時の動画撮影に使用したビデオカメラ (HDR-XR100, ソニー) を用いて来襲時と同様に撮影を行った。前報となる本間ら⁹⁾において使用したGPSの誤差が±3 mであったのに対し、今回使用したD-GPSの誤差は±0.4 m程度であり、精度は向上している。

b) 画像の重ね合わせ

津波の時空間的な流速場を算出するため、全ての画像を同一の座標系の上で重ね合わせることにした。現地調査にて撮影した動画より、対象海域全体が含まれる画像を1枚を抽出し、これを基準画像とした。次に、大船渡湾口付近の津波と地震による変位が無視できると考えら

図-3 画像重ね合わせの基準点 (図中赤丸)

れる、図-3に示す4点を基準点とし、津波来襲時の動画から変換された静止画像群と基準画像の両者の大きさおよび角度が一致するよう重ね合わせた。

c) 幾何補正

画像の重ね合わせ完了後、幾何補正を実行した。幾何補正には位置情報が既知となる点が3点以上必要となる（Ground Control Point, 以下GCP）。ここでは現地調査にて取得した43点のGPS情報のうち、基準画像の範囲内に位置する42点をGCPとして幾何補正を行った。GCPとした42点の直角座標系を、現地調査によって得られた緯度経度を指標とした座標系に変換することで幾何補正を行った。

幾何補正の際には精度の検証としてGCPの評価を行うことができ、設定座標と計算座標との差（エラー）が示される。このエラーの合計が1未満であることが判断の目安となるが、本補正のエラーは±0.3ピクセル以内であった。幾何補正後の画像の一例を図-4に示す。

(4) 解析時間帯

使用した動画（31分59秒）は撮影者がビデオカメラを手にとって撮影したため、手振れ等によって動画内に局所的なブレが見られた。また、ズームの切り替わりにより動画撮影範囲が変化する時間帯も見られ、解析が困難と考えられる時間帯が存在した。そこで、撮影時間が15秒間以上で、手振れやズームの切り替わりが僅かであり、

図-4 幾何補正後の画像の一例

表-1 解析時間帯

解析時間帯	解析時間
A	12 : 00～12 : 19 (19 秒)
B	12 : 46～14 : 58 (132 秒)
C	15 : 06～17 : 04 (118 秒)
D	19 : 06～21 : 42 (152 秒)
E	26 : 30～30 : 09 (219 秒)
F	31 : 19～31 : 59 (40 秒)

かつ、幾何補正に用いたGCPの42点が写り込んでいる、表-1に示す計6つの時間帯を解析対象とした。表中における解析時間帯AからDは押し波時、EおよびFは引き波時である。

(5) 動画解析結果と考察

ここでは代表例として解析時間帯A、D、Fにおいて算出された流速の平面分布をそれぞれ図-5～図-7に示す。流速は特徴的な輝度値を示す点（図-5中、円弧上に広がる線等）が時間経過とともに移動したピクセル数と時間を用いて算出した。ただし、解析では各時間帯においてはほぼ同程度の流速が続いていたと仮定し、解析開始時刻とその5秒後の画像を用いて流速を算出した。各図において赤枠で囲まれたベクトルが解析を行った中で最大の流速を示している。それぞれの値は、2.6 m/s、8.6 m/s、10.6 m/sであった。

押し波時（図-5、6）の図右側に見られる白い縦状の帯は、沖波防波堤を越波する際に発生した白波によるものである。図より、防波堤を越流した流れが徐々に湾内へと広がっていき、大船渡の湾形に沿って北東方向へカーブしながら進んでいく様子が見て取れる。津波来襲直後には防波堤の開口部の流速が大きく、その後徐々に湾

図-5 解析時間帯A（押し波時）における平面流速分布

図-6 解析時間帯D（押し波時）における平面流速分布

図-7 解析時間帯F（引き波時）における平面流速分布

内部へと最大流速を記録する部分が進んでいった。また、大船渡の湾形にそって進む流れにより形成されたカーブは、津波流速が増すほど曲線半径を広げていた。さらに、図-6の青囲部分には渦のような流れを確認することができた。本研究で使用した動画の押し波時には、複雑な流れが形成されていたことが明らかとなった。

引き波時（図-7）についても、湾の形状に伴い湾口方向にカーブする流れが確認できた。こちらも流速が増すにつれ曲線半径も大きくなっていった。また、防波堤付近では流れが堰き止められ、流速が遅くなっている様子も見取れる。

3. 数値シミュレーション

(1) 数値モデル概要

画像解析結果との比較を行うため、数値シミュレーションを行った。数値モデル¹⁰⁾は、計算領域の関係から大領域と小領域の2つに区分されている。大領域計算では東北地方全体を、小領域計算では大船渡湾を対象としている。小領域での計算領域を図-8に示す。大領域の計算では線形長波理論を用いており、津波発生時の初期水位には藤井・佐竹モデル Ver. 4.2¹¹⁾による解析結果を用いた。メッシュサイズは200 m、メッシュ数は縦1400メッシュ、横597メッシュである。時間刻みは0.3秒と設定し、30秒ごとのデータを抽出した。津波の遡上は考慮していない。小領域の計算は、この大領域の計算によって得られた、小領域の境界部分の水位分布を初期および境界条件として使用する。

一方、小領域計算では非線形長波理論を用いており、境界条件には大領域で算出された境界部分の水位データを用いた。メッシュサイズは20 mとし、メッシュ数は縦440メッシュ、横280メッシュとした。時間刻みは0.1秒とし、10秒ごとにデータを抽出した。津波の陸地への遡上は考慮せず、湾口防波堤のみ実スケールの高さ

図-8 小領域計算での地形データ

表-2 数値モデル概要

大領域	
メッシュサイズ	$\Delta x = \Delta y = 200 \text{ m}$
メッシュ数	$y = 1400, x = 597$
時間刻み	$\Delta t = 0.3 \text{ s}$
境界条件	藤井・佐竹モデル(Ver4.2)の波源モデルを基に作成
津波の遡上	考慮せず
マニングの粗度係数	0.01
小領域	
メッシュサイズ	$\Delta x = \Delta y = 20 \text{ m}$
メッシュ数	$y = 440, x = 280$
時間刻み	$\Delta t = 0.1 \text{ s}$
境界条件	大領域における水位分布結果を使用（時系列・平面分布ともに線形補間）
津波の遡上	湾口防波堤のみ越流を考慮
マニングの粗度係数	0.01

（朔望平均干潮面より5 m）で計算を行い、越流可能とした。また、大領域計算より算出された水位分布を初期および境界条件として小領域計算に入力する際は、メッシュサイズの違いおよび時間刻みの違いによって補間作業が必要となる。この補間作業には線形補間を行った。それぞれの計算の概要を表-2に示す。

(2) 数値シミュレーション結果と考察

数値シミュレーション精度の検証として、岩手県南部

図-9 岩手南部沖 GPS 波浪計観測データと計算結果との比較

図-10 15時11分における小領域水位分布

沖 GPS 波浪計の観測データと数値計算結果との比較を図-9に示す。図より計算結果が実データに比べピーク時にやや過大評価しているけれども位相はよく一致している。

図-9に示した大領域における実データとシミュレーション結果の比較後、小領域における計算を行った。小領域モデルにおける計算結果（水位分布）の一例を図-10に示す。水位分布の算出と同様に流速値の算出も行った。流速値の算出は x 方向流速 u 、 y 方向流速 v として算出された計算結果を用いて行った。押し波時の解析時間帯Aでの流速値（解析開始時刻から5秒間の平均値）を図-11に示す。

押し波時における各解析時間帯での画像領域内における最大流速を表-3に示す。ただし、本シミュレーションでは、防波堤の越流は考慮されているものの、破壊については考慮されていない。ゆえに、破壊が発生したであろう押し波時の後半あたり以降については、流速値や流れの向きに差が生じている可

図-11 解析時間帯A（押し波時）における流速の平面分布（最大流速 2.3 m/s）

表-3 各解析時間における最大流速

解析時間帯	解析時間	最大流速 (m/s)	
		画像解析	数値計算
A	12:00~12:19 (19秒)	2.6	2.3
B	12:46~14:58 (132秒)	4.1	3.8
C	15:06~17:04 (118秒)	5.0	5.2
D	19:06~21:42 (152秒)	8.6	9.6

能性がある。また、引き波時には、沖に向けた流れが沖防波堤により堰き止められ、水位が局所的に高くなる結果となってしまう。本モデルでは流速を非線形長波理論から算出しているため、引き波時には、画像解析結果とは異なり湾奥に向う流れが算出された。この算出法については、今後改良を加える必要がある。

解析を行った時間帯における押し波の最大流速は 9.6 m/s、最小は 2.3 m/s であり、画像解析結果とほぼ同程度の値が算出されていた。ただし、画像解析においてみられた渦を伴う複雑な流れは見られず、また、画像解析において津波侵入直後には湾奥部に比べ湾口部の流速が速かったものの、津波シミュレーションでは湾奥部の流速が大きくなる傾向が見られるなど、差異が見られた。

4. 結論

本研究では大船渡湾口部に来襲する津波を撮影した動画を用い、その動画に変換作業・補正を行うことで津波の移動を画素輝度値の変化として捉え、津

波流速の時系列的・平面的な分布を算出した。以下に、主要な結論を示す。

1. 動画として保存されているデータを変換・補正し、標点の位置情報を入れ込むことにより津波流速の時系列的・平面的な分布を算出することが可能となった。
2. 大船渡湾では、押し波時において 8.6 m/s、また、引き波時において 10.6 m/s の流速が発生していることが画像解析より推定された。
3. 数値計算において押し波時の流速値を算出したところ、画像解析と同程度の値を得ることができた。

謝辞：本研究で使用した動画は株式会社東海新報社より提供頂いた。本研究で用いた GPS 波浪計データは国土交通省港湾局により観測され、(独法)港湾空港技術研究所において処理されたデータを提供頂いた。また、東京大学田島芳満教授、同大学院博士課程の山中悠資氏より本研究における手法のご教示を頂いた。ここに記して謝意を表します。本研究の一部は平成 25 年度笹川科学研究助成(代表：本間真平)および 2011-2012 年度 JST J-RAPID プログラム(代表：佐々木淳)の支援を受けた。

参考文献

- 1) Ogasawara, T., Y. Matsubayashi, S. Sasaki and T. Yasuda: Characteristics of the 2011 Tohoku earthquake and tsunami and its impact on the northern Iwate coast, Coastal Engineering Journal, Vol. 54, No.1, 1250003, DOI: 10.1142/S0578563412500039, 2012.
- 2) Shimozono, T., S. Sato, A. Okayasu, Y. Tajima, H.M. Fritz, L. H. Liu and T. Takagawa: Propagation and inundation characteristics of the 2011 Tohoku tsunami on the central Sanriku coast, Coastal Engineering Journal, Vol. 54, No.1, 1250004, DOI:10.1142/S0578563412500040, 2012.
- 3) Gokon, H. and S. Koshimura: Mapping of building damage of the 2011 Tohoku earthquake tsunami in Miyagi Prefecture, Coastal Engineering Journal, Vol. 54, No.1, 1250006, DOI:10.1142/S0578563412500064, 2012.
- 4) Mikami, T., T. Shibayama, M. Esteban and R. Matsumaru: Field survey of the 2011 Tohoku earthquake and tsunami in Miyagi and Fukushima Prefectures, Coastal Engineering Journal, Vol. 54, No.1, 1250011, DOI:10.1142/S0578563412500118, 2012.
- 5) Watanabe, Y., Y. Mitobe, A. Saruwatari, T. Yamada and Y. Niida: Evolution of the 2011 Tohoku earthquake tsunami on the Pacific coast of Hokkaido, Coastal Engineering Journal, Vol. 54, No.1, 1250002, DOI:10.1142/S0578563412500027, 2012.
- 6) Sasaki, J., K. Ito, T. Suzuki, R.U.A. Wiyono, Y. Oda, Y. Takayama, K. Yokota, A. Furuta and H. Takagi: Behavior of the 2011 Tohoku earthquake tsunami and resultant damage in Tokyo Bay, Coastal Engineering Journal, Vol. 54, No.1, 1250012, DOI:10.1142/S057856341250012X, 2012.
- 7) 林里美, 越村俊一: 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, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, pp. I_366-I_370, 2012.
- 8) 山中悠資, 田島芳満, 佐藤慎司: ビデオ画像解析に基づく綾里湾白浜海岸に集中した津波外力場特性の分析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, pp. I_341-I_345, 2012.
- 9) 本間真平, 佐々木淳, 鈴木崇之: 大船渡湾における 2011 年東北地震津波の動画解析, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 69, No. 2, pp. I_443-I_448, 2013.
- 10) 田島芳満, 舟竹祥太郎, 佐藤慎司: 越流を伴う巨大津波に対する海岸堤防の減災機能の検証, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 69, No. 1, pp. 23-33, 2013.
- 11) 藤井雄士郎, 佐竹健治: 2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震の津波波源(暫定結果, Ver. 4.2 と Ver. 4.6), http://iisee.kenken.go.jp/staff/fujii/OffTohokuPacific2011/tsunami_ja_ver4.2and4.6.html, 2011.

STUDY ON THE 2011 TOHOKU TSUNAMI BEHAVIOR IN OFUNATO BAY USING MOVING IMAGE ANALYSIS

Shimpei HONMA, Takayuki SUZUKI and Jun SASAKI

The 2011 Tohoku earthquake and tsunami caused widespread and serious damage especially to coastal areas in the Tohoku region. While a number of hydrographic observation facilities were damaged, there exist movies capturing tsunami propagation and inundation, which are considered to be useful for obtaining hydrographic properties of tsunami behaviors. In this study, we tried to estimate time series of velocities of the tsunami in Ofunato Bay, using a movie that captured the first tsunami wave attack. Time series of the original images were converted to separate images of brightness values and then their distortion corrections were made using our field survey data. Finally, we obtained temporal and spatial distributions of the tsunami induced currents in Ofunato Bay.