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

Video Image-Based Analysis of Concentrating Tsunami Dynamics on Shirahama Beach in Ryori Bay

山中悠資¹・田島芳満²・佐藤慎司³

Yusuke YAMANAKA, Yoshimitsu TAJIMA and Shinji SATO

The 2011 Tohoku earthquake tsunami hit wide stretch of the Pacific coast of Japan and measured tsunami inundation heights showed significant variations even along the coast line within the same bay. Lack of quantitative data of tsunami dynamics around the nearshore and inundating area makes it difficult to fully understand actual behaviors of tsunami. This study focused on the analysis of video imagery taken at Shirahama Beach in Ryori Bay, where locally concentrating tsunami inundation height was also observed. Developed analysis system enabled us to quantify the time-varying surface water fluctuations and surface water velocities. It was found through the analysis that shorter wave fluctuations excited around the nearshore breakwaters appear to have significant impacts on such locally concentrating tsunami dynamics.

1. はじめに

2011年3月11日14時46分に発生した東日本大震災は大規模な津波を引き起こし、東北地方太平洋沿岸を中心に甚大な被害を及ぼした。東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ(2011)による津波痕跡調査結果によると、この津波の痕跡は同じ湾内であっても痕跡高が大きく異なる分布を有していたことがわかった。このような沿岸部や浸水域における津波の局所集中特性は、インド洋津波やカトリナによる高潮による被災調査結果等においても指摘されているものの(例えば鯉渕ら, 2005; 田島ら, 2006), 実際の氾濫時における定量的データの不足によりその詳細なメカニズムを実証的に解明する研究成果は得られていないのが現状である。一方で、東日本大震災による津波の挙動はビデオカメラ等により多くのデータが残されており、沿岸部における津波挙動の実証的理解の飛躍的な進展が期待される。

岩手県大船渡市三陸町に位置する綾里湾では、他の地点と同様に来襲した津波が局所集中する傾向が見られた。特に湾奥の白浜海岸においては、漁港背後域である南側斜面周辺で集中的に高い津波痕跡高が計測された。また、漁港施設や消波構造物の倒壊・損壊も同地点において集中的に見られた。この白浜海岸においても津波来襲時の様子がビデオ画像で捉えられている。本研究ではこの白

写真-1 撮影されたビデオ画像の一部

図-1 綾里湾の平面図と津波痕跡高及びカメラ撮影点

浜海岸において撮影されたビデオ画像(写真-1)に焦点をあてて津波の挙動を可能な限り定量的に抽出し、その特徴を把握し記述することを研究の目的とする。

2. ビデオ画像の補正

デジタルビデオカメラによって記録された映像から津波の定量的な情報を抽出するため、まず映像から1/30秒間隔で連続する静止画像群を取り出した。定点観測カメラによる画角が固定された連続静止画像に基づく沿岸域

1 学生会員	東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻
2 正会員 Ph.D.	東京大学准教授大学院工学系研究科社会基盤学専攻
3 フェロー 工博	東京大学教授大学院工学系研究科社会基盤学専攻

写真-2 静止画像A

での定量的なデータの抽出は既にいくつかの研究事例があるが(例えば田島ら, 2008), 本研究で対象としたビデオ画像は津波来襲時に避難しながら撮影されたもので, 手ブレによる画角の変化が著しく, そのままでは定量データの抽出が困難であった。そこで, 本研究では以下の手順で連続静止画像の補正を行なった。まず取り出した連続静止画像をそれぞれ輝度値の平面分布に変換し, これらの画像群の中から補正のための基準静止画像1枚を選定した。次に連続静止画像間のマッチングに適する固定物体を含む領域(テンプレート)を決定し, 補正する画像を平行移動・回転させながら, テンプレート内の輝度値分布が基準画像のそれと最も良く適合する位置を正規化相互相関法により求めた。なお, テンプレートには写真-1に示した南側斜面の一部を指定した。これにより求めた移動量及び回転量に基づき, 各画像における画素座標を変換し, 連続した補正画像群を作成した。

3. 二段階座標変換による実座標系の推定

次に補正後の連続静止画像群に対して幾何的な座標変換を施すことにより, 画素座標に基づく実座標推定を試みた。津波来襲時のビデオ画像からは座標変換に必要な実座標情報が既知である点を見出すことが困難であったため, 本研究ではビデオ画像が撮影された地点とほぼ同じ地点から静止画像A(写真-2)を改めて撮影し, この座標を介した以下に整理する二段階の座標変換を行うことによって実座標の推定を試みた。

まず手ブレ補正時の基準画像内において, 静止画像Aと共通し, かつ特徴的な点を基準点として20点選定した。これらの基準点の選定時には, これらが画像内にバランス良く分布することや, 静止画像A取得時と津波来襲時で位置が変化していないと考えられることを選定条件とした。次に選定したそれぞれの基準点に対応する点を静止画像Aの中から抽出し, 両画像における基準点の画素情報に基づき, 田島ら(2008)と同様の手法を用いて両画像の位置関係を表すための座標変換パラメータを最小自乗法に基づき推定した。これにより, ビデオ画像内の

任意の画素座標と対応する静止画像Aの画素座標が得られる。次に, 静止画像Aの中から現地測量によって得られている, 実座標が既知である9点を選定した。これらの基準点情報に基づいて同様の座標変換パラメータを抽出した。ここで, 座標変換式は平面から平面への変換式であるため, 静止画像Aの任意の画素座標に加えて実座標系での任意の平面を指定すれば, その平面上での座標を求めることができる。例えば標高Zを指定すれば, その水平面である(X,Y)平面座標上の座標が推定可能となる。

4. 実座標系の推定誤差

ここでは, 開発したビデオ画像に基づく実座標推定システムの妥当性を検証する。本研究ではビデオ画像から直接実座標を推定することが困難であったため, ①ビデオ画像の手ブレを補正し, ②補正後画像と対応する静止画像Aの画素座標を求め, ③静止画像Aの座標から実座標を推定する三段階の計算を実施しており, それぞれの段階における誤差を把握する必要がある。

まず手ブレ補正の誤差については, 手ブレ補正後の静止画像群内で, 特徴的かつ位置が変わらないと思われる3点を選定し, それぞれの画素座標のrms誤差を求めた。その結果, 3点でのrms誤差の平均値は, 画像の画素座標U(横方向)およびV(縦方向)の方向でそれぞれ3.8ピクセル, 4.6ピクセルであった。

次に補正に用いた基準画像と静止画像Aにおいて, 前節で選定した20の基準点に対してその推定誤差を算定した。その結果, 20点におけるrms誤差の平均値は0.9ピクセルであった。

最後に静止画像Aに基づく実座標系の推定誤差を検証した。誤差の検証には, 座標変換パラメータを抽出する際に選定した静止画像A内における7点を対象とし, それぞれ画素座標から座標変換を用いて指定した実座標と現地調査時に測量した実座標との差を比較した。

まずビデオ画像から水位データを抽出することを念頭に置き, 座標変換式と画素座標に基づく標高Zの推定誤差を検証した。画素座標に加えて実座標(X,Y,Z)のいずれかの成分を指定すれば残りの2成分の推定が可能であるが, 逆に任意の2成分(X,Y)と画素座標は抽出した座標変換式を必ずしも満たさない。そのため, 本研究では指定した画素座標と任意のZに基づく推定座標(X',Y')と指定した(X,Y)との距離(誤差)を求め, この距離を最小とするZを推定値として定めた。この時, 推定したZと計測した標高との誤差は7点のrms誤差で約5.1cmであった。逆に, 標高Zに実測値を与えて推定したX及びYのrms誤差は, それぞれ36.5cm, 50.0cmであった。これらの結果から, 静止画像Aにおける画素座標や実座標上のいずれか1成分が正しく与えられれば, 残り

表-1 与条件誤差によるパラメータの誤差感度

与条件誤差	推定誤差 (X)	推定誤差 (Y)	推定誤差 (Z)
1pixel (U 方向)	0.070m	0.072m	0.016m
1pixel (V 方向)	1.337m	1.134m	0.102m
1m (X 方向)	—	—	0.041m
1m (Y 方向)	—	—	0.042m
1m (Z 方向)	13.11m	11.13m	—

の2つの実座標の推定誤差は十分に小さいものであると言える。

次に上述した三段階の実座標推定手法のうちの最初の二段階である、ビデオ画像から静止画像A上での画素座標を求める段階における推定誤差や、与条件として与える実座標上の1成分の誤差による、実座標推定精度に対する感度分析を行なった。与条件誤差の感度が最も高いのは実座標上で観測点から最も離れている点であると考えられるため、ここでは写真-2に示した南側斜面の湾口付近の点Aに対して誤差の感度分析を行なった。分析は与条件とする画素座標 (U,V) と実座標 (X,Y,Z) のいずれか1成分のうち、1つの値を1画素あるいは1mだけ変化させ、その時の残りの実座標の推定値の変化量を求めた (表-1)。

表-1より、与条件誤差に対するZの推定感度は縦方向の画素座標Vで最も大きい、それでも約10cm/pixelであり、標高の推定精度の信頼性は比較的高いと判断することができる。また最初の二段階における画素座標の推定誤差は最大で約4.7ピクセル (U)、約5.5ピクセル (V) であることから、本研究におけるZの推定誤差は最大で60cm程度となることが予想される。

一方、X及びYの推定誤差は、与条件Uの誤差による影響は小さいものの、V及びZの誤差による影響はそれぞれ1画素に対して1m以上、1mの誤差に対して10m以上と大きかった。以上より、推定された標高座標Zについては誤差10cm程度以下の精度が期待できるのに対して、水平座標 (X,Y) の絶対位置については10m程度の誤差がある可能性があるため注意が必要である。一方、例えば漂流物の追跡から流速を推定する際には移動距離が重要であり、絶対位置の推定よりも相対的位置関係の推定精度が重要となる。そこで静止画像A内の白浜海岸の水面上の4点を選定し、与条件としてZを変化させた時、推定された4点の水平距離がどの程度変化するか計算した。その結果、与条件Zの値が1m大きくなると、X方向及びY方向の各点間距離は2.0%程度減少した。これは与条件Zが+1mの誤差を持つ場合、例えば実点間距離100mが98mと推定されるということである。したがって、(X,Y) の推定値の絶対位置の推定誤差は大きいものの、

図-2 推定した南側斜面の水位

相対位置の推定誤差は比較的小さいものであると言える。

5. ビデオ情報に基づく定量情報の抽出

(1) 南側斜面における水位の推定

手ブレ補正後静止画像群から南側斜面の画像内の水面位置を抽出し、それを与条件として与えることで時々刻々の水位を推定した。推定手順を以下に示す。まず輝度値の勾配ベクトルとその閾値を用いることで水面位置の画素座標を抽出した。水位の推定には前節で示した方法を用いたが、それには対応する水平座標を与条件として与える必要がある。本研究では静止画像A内の南側斜面に沿ってGPSで測量した水平座標群を用い、これら各々の点から実座標のZ軸 (鉛直方向) に沿った線を伸ばし、この線と抽出した斜面と水面の境界線との交点におけるZ座標を水面高さとして求めた。ここで、水面境界は斜面上に位置しているため、実際にはGPSで計測した水平位置とはズレがある。画像とほぼ正対する斜面の勾配を30°とし、計測地点と水面との標高差を勘案すると水平座標のズレは15m程度であると考えられ、このときのZ座標の誤差は表-1と同様の操作を行うことにより1m程度過大となることがわかった。また湾口と湾奥では撮影地点からの距離が異なるため、斜面上の水平座標推定誤差による水位の誤差は、湾奥の方が湾口よりも数十cm程度高くなる可能性があることにも留意する必要がある。

南側斜面における推定した水位の時間変化図を図-2に示す。図-2の横軸は斜面に沿った水平方向距離、縦軸は時間経過 (下向きを正) を、色が推定水位を表している。図中のA, B, Cは写真-2に示した斜面に沿った位置で、B点は撮影点から南側斜面を見たときの画面手前の斜面と画面奥の斜面の境界位置である。A-B間は画面奥の斜面上の水位、B-C間は画面手前の斜面上の水位を表すため、A-B間とB-C間の境界は不連続である。ここで、時

間はビデオ撮影開始からの時間を表す。図-2では、水位がピークに達した30秒付近以後で周期8秒程度の水面変動が見られる。また、この変動はA-B間ではほぼ同位相で変化しており、斜面と直行する方向、すなわち沿岸方向に波が伝播していることがわかった。一方、B-C間では50秒から70秒にかけて右斜め下に向かって水位のピークが岸向きに移動している様子も見られた。これらのことから、湾口での水位変動は津波の侵入方向と南側斜面に正対する方向の最低二つのモードを有していたと推察される。また湾奥では津波による周期の長い水面変動が卓越し、重複波を形成していたようである。さらに、A-B間で見られたような短周期の水面変動が、B-C間でも同様に見られた。

(2) 漂流物の移動方向と移動速度

ビデオ画像内には漁船のブイなどの漂流物が多数確認できた。この各漂流物を0.5秒間隔で追跡することによって、白浜海岸内での波や流れ場の推定を試みた。漂流物平面座標を推定するには、与条件として漂流物の画素座標と水面標高を与える必要がある。標高は前節で求めたC地点における水位データ(図-3)を平滑化して与えた。

推定した漂流物の位置、移動方向、移動速度を図-4に示す。漂流物の初期位置は赤色で示し、同一漂流物の平面座標は直線で結んでいる。また、図-3の水位がピークとなる時間($t=35s$)を境界としてピーク来襲前後の二つの時間帯に分割し、それぞれの時間帯における漂流物の追跡結果を表示した。図-4より、ピーク前の漂流物はそ

のほとんどが津波の侵入方向と一致した方向に移動しているが、明らかに北から南に向いて移動している漂流物(No.5,7,8)も見られた。またそのような移動方向を示した漂流物は水位がピークに達する時間帯に集中していることから、水位のピーク近傍の時間帯で湾内の津波が既に重複波を形成していたことや、周期の短い水面変動が漂流物の移動特性に影響を及ぼしていたことが考えられる。さらに、ピーク前の漂流物の平均移動速度はほとんどが10m/s以上であり、最大では25m/sにも及んだ。ピーク後には漂流物の移動方向は場所によって異なっており、ピーク直後に卓越して見られた周期8秒の水面変動により、移動形態が大きく変化したと考えられ、これは海岸構造物の存在によって複雑な流れ場が形成されたことによるものと考えられる。

(3) 水面上における輝度値の標準偏差

ビデオ画像では津波来襲時に周期8秒程度の激しい水面変動が見られたが、その大きさは場所や時間により異なっており、これが来襲した津波が局所集中した原因の一つであると推察される。本研究では画像内の輝度値の変化に着目してその水面位置を抽出した竹原ら(2010)の研究を参考にし、手ブレ補正後の静止画像の同一画素座標の輝度値の標準偏差を求め、その平面分布を比較した。

まず全ての手ブレ補正後静止画像の同一画素座標の輝度値の自乗和を求め、その平均値を求めた。次に同様にそれらの輝度値の平均値を求め、その自乗値を求めた。それらの差を2倍して平方根で除したものを輝度値

図-3 湾奥(C点付近)地点の水位

図-4 漂流物の位置・移動方向・移動速度

図-5 水面において時間変化する輝度値の標準偏差の平面分布（座標変換により描画）

の標準偏差と定義した。図-5 (b) より、相対的に水深が浅かったと考えられる南側斜面周辺においては標準偏差が大きくなる傾向が見られる。これは碎波を伴う波の浅水変形によるものであると考えられる。また津波が防波堤を越流するとき、防波堤の裏側は剥離渦によって激しい水面変動が生じると思われるが、図-5 (b) の防波堤付近では輝度値の標準偏差が相対的に小さくなった。一方、図-5 (c) では同地点周辺での標準偏差が大きくなる傾向が見られ、ピークの前後でその平面分布が大きく異なった。これには、ピーク来週時に発達した短周期波と周期の長い津波による流れとの干渉や、白浜海岸における重複波の重畳など様々な要因が考えられるが、その詳細な分析については今後の課題である。さらに、防波堤付近では水深が急激に小さくなるため、その周辺の水面変動は激しくなると予想されたが、水位のピーク前では水面は比較的静穏で、ピーク後に水面変動が激しくなるという結果となった。このような結果が得られた理由として、湾内では津波による長周期の波に加えて比較的短周期の波が卓越して生じていた。この長周期波と短周期波が関係する非常に複雑な波・流れ場が形成されたために、従来の長波理論では説明できない挙動が湾内で生じたものと思われる。この短周期波が卓越することによって生じていた津波の挙動は、防波堤を破壊・損壊させた力を増幅させた可能性があり、さらに詳細に分析する必要がある。

6. まとめ

綾里湾白浜海岸において撮影された津波来襲時のビデオ画像から定量的な情報を抽出した。その結果、津波による長周期の水位変動は湾奥ほど高くなっていたこと、周期8秒程度の激しい水面変動が南側斜面に沿ってほぼ同位相で見られ、この周期の波は斜面に直交する方向に伝播していたこと、水位のピーク前では津波の侵入方向と一致して10m/s以上の漂流物の移動速度が推定されたのに対し、ピーク後では場所によってその移動方向が異

なっていたことなどがわかった。さらに水面変動の激しさを表す指標として、同一地点における画像の輝度値の時間変化から、その標準偏差を算定して比較した結果、ピーク前には南側斜面や海岸堤防周辺で輝度値の標準偏差が大きかったのに対して、このような領域は、ピーク後には漁港防波堤周辺のみに限定される傾向が見られた。このような現象が生じた原因は短周期波の存在にあると考えられ、これが長周期波として作用する津波波力に加えて構造物の倒壊・損壊に関与した可能性が指摘でき、今後さらに詳細な分析を行う予定である。

謝辞：平成23年3月末に行われた津波痕跡調査で現地の住民の方に貴重なビデオ画像を提供していただいた。ここに記して謝意を表する。また、本研究の成果はJST平成23年度J-RAPIDプログラムによる研究成果の一部であることを付記する。

参考文献

- 鯉淵幸生・本田隆英・Thisara WELHENA・RANASINGHE・佐藤慎司 (2005)：インド洋地震津波によるスリランカ南部西部海岸の被害集中機構，海岸工学論文集，第52巻，pp1411-1415
- 酒井哲郎 (1975)：傾斜した海底を有する湾における長波の湾水振動，第22回海岸工学講演会論文集，pp.279-284
- 竹原幸生，江藤剛治 (2010)：風波碎波下における渦運動のPTV計測，ながれ，日本流体力学会誌，29 (6)，pp.437-439
- 田島芳満・佐藤慎司・藤原弘和 (2006)：Hurricane KatrinaによるBiloxi周辺の高潮被害分布とその外力特性の検証，海岸工学論文集，第53巻，pp.406-410
- 田島芳満・高川智博・浅野泰史・佐藤慎司・武若聡 (2008)：特性の異なる二つの台風による天竜川河口砂州の大規模変形，海岸工学論文集，第55巻，pp646-650
- 田島芳満・丹治雄一・三宅健一・加藤広之・中山哲蔵 (2011)：連続静止画像に基づく島田川河口部における地形変動特性の分析，土木学会論文集B3 (海洋開発)，Vol.67，pp11045-11060
- 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによる速報値 (<http://www.coastal.jp/tjtu/>，2011年4月18日参照)