津波来襲後の広域漂砂系の変容

Modification of Littoral System due to the 2011 Tsunami

Vo Cong Hoang¹・三戸部佑太²・田中 仁³・Nguyen Trung Viet⁴

Hoang Vo CONG, Yuta MITOBE, Hitoshi TANAKA and NGUYEN Trung Viet

Recovery of sandy beach from severe erosion by the 2011 tsunami can be observed on Sendai Coast even 3 years after the tsunami. The long-term effect of such a severe morphology change on sediment transport system is investigated through analysis of aerial photographs. Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis is applied to shoreline positions extracted from the aerial photographs. The first and third modes express the recovery process of shoreline from the severe erosion with respective time-scale, and the superposition of their contribution rate is more than 70%. Comparison of shoreline change rate before and after the tsunami clearly shows that the recovery process of severely eroded area caused completely different trend of sediment transport processes.

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震津波が来襲した海岸のうち、岩手県内は岩石海岸が多く、砂浜海岸の変化は限定的である。一方で海浜・河口砂嘴に対して大規模な地形変化をもたらしたのは、長大な砂浜が続く仙台湾に面した地域である (Tanakaら, 2012)。これら仙台湾の被災地のうち一部は急速な回復を示しているが、一部では津波来襲から約3年が経過した現在においても大規模な地形変化が残存している。震災以前の仙台湾における沿岸域土砂収支の構造については既往の研究で議論が行われているが (姜ら, 2004)、津波による大規模な地形変化が残存する現在ではその構造に変化が生じているものと考えられる。

同海岸には七北田川および名取川の河口があり、それぞれその左岸側に蒲生干潟および井土浦というラグーン状の地形が形成されていた。これらのラグーン地形は津波により完全に破壊され、その後数ヶ月をかけて連続した汀線が回復したものの、現在においても津波以前と比較して大幅に汀線が後退した状態である。このような大規模な地形変化が残存していること、さらにその同海岸における海浜変形過程への影響が不明であることは新たな海岸堤防の建設や防災計画を行う上で問題となっており、詳細な調査を行うことが必要とされている。しかしながら、今次津波による地形変化やその回復過程に関する既往の研究は比較的短期間または河口部などの局所的な海浜変形過程に注目しており (Daoら, 2013; 田中ら, 2013)、このような広域かつ長期間にわたる漂砂系への

図-1 研究対象海岸

影響については十分な検討がなされていない。

本研究では、津波前後の仙台湾海岸を対象にして行った空中写真解析をもとに津波がもたらした大規模な地形変化による広域的な漂砂系の変容の実態を検討した。

2. 研究対象および使用データ

本研究では東仙台湾周辺から名取川河口までの全長約11kmの砂浜海岸を対象とする (図-1)。本対象領域は仙台湾防波堤および閑上漁港防波堤が漂砂系の両端部となっており、領域外との沿岸漂砂の流入出が遮られている。なお沿岸漂砂の卓越方向は北向き (図-1の右から左) である。本領域は七北田川および名取川の河口を有し、その左岸側にはそれぞれ蒲生干潟および井土浦とよばれているラグーン地形が存在する。また本海岸のほぼ中央に位置する荒浜海岸には6基の離岸堤が設置されている。津波以前の河口部や離岸堤周辺部の海浜変形過程については空中写真解析や測量結果をもとに検討が行われてきた (Ekoら, 2010; 姜ら, 2004)。一方で七北田川河口から約800m南側に位置する南蒲生浄化センターの排水口や名取川河口から約2km北側に設置されていた消波ブロックのように、津波により周辺海浜に生じた大規模な汀線後退により新たに汀線から突出した構造物があり、これらの構造物の漂砂系全体への影響を調査する必要がある (三戸部ら, 2013)。

1 学生会員 M.Sc. 東北大学大学院博士課程 土木工学専攻
2 正会員 博(工) 東北大学工学研究科助教 土木工学専攻
3 フェロー 工博 東北大学工学研究科教授 土木工学専攻
4 Ph.D. ハノイ水資源大学准教授 土木工学科

図-2 津波来襲後の空中写真(上)および取得した汀線位置(下)。下図の破線は津波後の平均汀線位置 $\bar{y}(x)$ を示す

図-3 汀線位置の時間変化。時刻 t は津波来襲日(2011/3/11)からの日数を示す。図-2(A)~(D)参照。なお各グラフには2011年3月6日(津波来襲5日前)からのデータを示している

本領域では津波以前から継続的に約1~2ヶ月間隔で空中写真の撮影を行っており、津波来襲約3か月後の2011年6月からその撮影を再開している。本研究では津波来襲2年前の2009年3月から現在までの空中写真および国土地理院が撮影した津波来襲直後の2011年3月12日の空中写真をもとに津波前後の仙台海岸全域における汀線変化過程を抽出した(図-2)。なお取得した汀線位置については各空中写真の撮影時刻における潮位に基づいて潮位補正を行っている。潮位補正には津波前は鮎川観測点における観測潮位、津波後は来襲直後の観測潮位が存在しないため仙台港における天文潮位を用いた。

3. 結果と考察

(1) 汀線変化

図-2に示した測線について、空中写真から求めた汀線位置の時間変化を図-3に示す。漂砂のもっとも上手に位置する箇所(図-3(a))では津波後に約150mの汀線後退

があり、その後回復傾向を示すが、現在でも津波前に比べ50mから100mほど下がったままであり、その状態で安定している。図-3(b)は離岸堤群より漂砂上手に位置し、これまでほぼ安定した汀線を示し、大きな変化が見られない。一方、離岸堤群より漂砂下手の図-3(c)はわずかに汀線の後退傾向が見られる。また漂砂系末端の図-3(d)においては津波直後の100日程度で数十mの汀線後退が生じており、その後は同程度の値で変動している。

(2) 経験的固有関数解析

汀線位置について経験的固有関数(Empirical Orthogonal Function, EOF)解析を行うことで、津波来襲後の汀線変化過程の特徴を抽出した(Miller・Dean, 2007a; Miller・Dean, 2007b; Eko・田中, 2010)。経験的固有関数解析はある物理量の時空間的分布を空間に関する固有関数 $e_n(x)$ および時間に関する固有関数 $c_n(t)$ の積として表す主成分分析の一種である。本研究では次式のように津波来襲後の平均汀線位置 $\bar{y}(x)$ (図-2下参照)か

図-4 津波後の平均汀線位置からの変動量 $y(x, t)$ (上)および第一成分から第三成分までの空間関数 $e_n(x)$ (下)

らの変動量 $y(x, t) = y_s(x, t) - \bar{y}(x)$ (図-4上参照) について経験的固有関数解析を行った。

$$y(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} e_n(x) c_n(t) \dots \dots \dots (1)$$

ただし津波来襲直後で砂浜決壊箇所が多い2011年3月12日は除外し、概ね連続した汀線まで回復した2011年6月8日から現在までの汀線位置に対して解析を行った。また河口直近部では津波後に河口砂州の河道への侵入など特徴的かつ大きな地形変化が確認されているが(田中ら, 2013)、本研究では漂砂系全体としての汀線変化過程の特徴を捉えることを目的とするため解析範囲に加えなかった。ここで各成分の寄与率のうち第一成分は67%、第二成分は11%、第三成分は7%となりそれ以降の成分は4%以下となった。以下では主要な第一成分から第三成分までについてその特徴を議論する。

図-4下は第一成分から第三成分までの空間関数 $e_n(x)$ を、図-5は時間関数 $c_n(t)$ を示している。第一成分の時間関数の時間変化をみると津波来襲から約800日程度はほぼ単調に減少しており、その後は概ね一定の値で遷移している。一方で空間関数は津波後に大規模な汀線変化が確認されたラグーン地形の周辺部 ($x=1000\text{m}$ 付近および $x=10000\text{m}$ 付近) で大きい。汀線位置の第一成分による変動成分 $y_1(x, t) = e_1(x) c_1(t)$ (図-6 (a)) をみると、同範囲において大きく値が増加していることがわかる。以上から第一成分は、主に失われたラグーン地形の回復過程を表しているといえる。また中央部 ($x=6000\text{m}$ 付近) も値が増加しており、離岸堤付近においても侵食からの回復傾向にあることが分かる。

汀線位置の第三成分による変動成分 (図-6 (c)) は津波来襲直後に絶対値が最も大きく、その後200日程度で値が減少し、それ以降は比較的小さな値で遷移している。この第三成分の時間関数の変化をみると、初期のおよそ

図-5 第一成分から第三成分までの時間関数 $c_n(t)$

図-6 各成分による汀線位置の変動成分 $e_n(x)$ $c_n(t)$

200日間で減少した後、津波来襲から800日後程度までは単調に増加し、その後概ね安定している。津波来襲400日後以降は符号は反対であるものの第一成分と同様な変動傾向があり、津波後初期においてのみその時間変化の傾向に差異が生じている。一方で空間関数はラグーン周辺部において大きく値が変動し、その極小値および極大

図-8 汀線の平均的变化速度の沿岸分布

図-7 名取川河口周辺部におけるメガカスプの形成

値の位置は2011年6月8日における平均汀線位置からの変動量 $y(x,t)$ のピーク位置と一致している。以上から第三成分は津波による砂浜決壊により生じた凹凸の大きい汀線形状が平滑な汀線形状に遷移する比較的短い時間スケールでの変動分を表すものであるといえる。したがって第一成分および第三成分はそれぞれ大規模な汀線後退からの汀線回復過程および凹凸の大きい汀線形状の平滑化過程を代表するものであり、時間スケールの異なる二つの汀線回復過程を表している。

一方で第二成分の空間関数を見ると河口周辺部や離岸堤背後を除いてほぼ一定の値を持っており、全体的な汀線の前進や後退過程を示している。またその時間関数は第一成分や第三成分とは異なり、津波来襲から現在に至るまでおよそ1年程度の周期で値の上下を繰り返している。第二成分は高波浪時の汀線後退や低波浪時の前進といった波浪条件等の変化に応じた汀線の変動分であると考えられる。ここで名取川河口部周辺について第二成分の空間関数を見ると、値が上下しており、他の領域と明瞭に異なる特徴が確認される。津波来襲後の名取川河口部周辺においては時折メガカスプと呼ばれるような波長が数百mにおよぶビーチカスプの形成が確認されており(図-7)、第二成分の空間関数にみられる名取川周辺における負のピーク位置はメガカスプ形成時の汀線の突出箇所に一致している。

津波来襲から現在に至るまでの汀線変動のうち第一成

分および第三成分で表される70%以上が津波による大規模な地形変化からの回復過程によるものであり、津波来襲以前において最も高い寄与率(40%程度: 姜ら, 2004)であった波浪条件等の変化による海浜全体の岸沖方向の汀線変動成分の寄与率は10%程度に低下している。今次津波による大規模な地形変化により平衡状態とは大きく異なる汀線形状が形成され、その後約3年間という長期間にわたってその影響が依然として支配的であることを示している。

(3) 津波来襲前後の汀線変化速度の比較

津波前後のそれぞれについて各測線での汀線位置を $y_s = at + b$ (t : 時刻, a , b : 係数) と最小二乗近似し、平均的な汀線変化速度 a (m/year) を求めた(図-8)。津波来襲前は河口部周辺を除いて全体として汀線が前進傾向にあることがわかる。その前進速度は離岸堤の漂砂上手の $x=6000\text{m} \sim 8000\text{m}$ 付近で特に大きい一方で、離岸堤の漂砂下手の $x=5000\text{m}$ 付近では小さい。これは北上する沿岸漂砂が離岸堤により捕捉されるためである。また沖方向に張り出した河口テラスも沿岸漂砂の捕捉効果を持っており、 $x=2500 \sim 3500\text{m}$ 付近においても汀線の前進速度が比較的大きい。

一方で津波後の大きな特徴は、津波により消失したラグーン地形や河口砂州の回復過程に伴い、二つの河口周辺部において著しく汀線が前進している点である。このことは図-6において示した経験的固有関数解析結果においても明瞭に表れている。ただし、名取川河口直近部については津波来襲後に河口砂州の河道侵入が生じており、これに伴って汀線が後退傾向にある。このような大きな汀線変動が河口付近で生じている一方で、名取川河口から約2kmに位置する消波ブロックの北側においては汀線の後退がみられない。津波による大規模な汀線後退により海側に突出した消波ブロックが沿岸漂砂を遮断しており、ラグーン地形の回復過程における北から南への土砂の供給が妨げられている。これによりその北側で大

表-1 排水口から消波ブロックまでの汀線変化速度の沿岸方向平均値と同区間の年間での平均的土砂増減量

期間	平均汀線変化速度 $\bar{a}$ (m/day)	年間での平均的土砂増減量 dV/dt (m ³ /year)
津波前	1.7×10^{-2}	4.5×10^5
津波後	2.0×10^{-3}	5.5×10^4

規模な汀線後退は生じていない。その一方で津波以前の土砂供給源であった北向きの沿岸漂砂が存在しないため、消波ブロック北側で津波以前にみられた汀線の前進傾向は失われている。また七北田川河口の約800m南に位置する南蒲生浄化センターの排水口についてもその南北で不連続な汀線変化過程が生じており、消波ブロックと同様に津波により海側へ突出したこの排水口も沿岸漂砂の遮断効果を有している。ここで、この排水口から消波ブロックまでの汀線変化速度 a の沿岸方向平均値 $\bar{a}$ (m/day)を表-1に示す。なお表-1には次式により概算した年間での平均的な土砂増減量 dV/dt (m³/year)も示している。

$$\frac{dV}{dt} = 365\bar{a}L(D_B + D_C) \dots\dots\dots (2)$$

なお L は排水口から消波ブロックまでの距離 (=6640m), D_B はバーム高さ, D_C は漂砂移動限界水深 (=8m) である。ただしバーム高さは津波前に蒲生干潟周辺で行われた測量結果 (平尾ら, 2010) をもとに3mとして計算を行った。津波来襲以前においては漂砂上手側からの土砂供給量が十分あり区間内の土砂量は増加していたが、津波後は漂砂上手からの供給がなく、一部の土砂が排水口を迂回して漂砂下手へ流出するため土砂量の増加率が著しく低下している。

津波以前は汀線前進傾向がみられた漂砂系末端部において津波後は前進傾向がみられない。この分の土砂は七北田川河口周辺部分の汀線回復の土砂供給源として作用したものと考えられる。

全体の漂砂系として見ると、局所的に大規模な侵食が生じたラグーン地形の回復のために広域的な漂砂環境が大きく変容しており、津波前と全く異なる様相を示している。これは、以前に得られている土砂収支に基づく海岸管理計画に大きな変更が必要であることを示唆しており、実務上も重要な知見である。

4. おわりに

2011年東北地方太平洋沖地震津波来襲後約3年経過した現在でも仙台湾の汀線は津波以前とは大きく異なる状態で遷移しており、新たな安定海浜への移行途上にあ

るといえる。

EOF解析の結果、第一成分と第三成分はそれぞれ背後にラグーンを有する領域における汀線後退からの回復過程と砂浜決壊箇所周辺での汀線形状の平滑化過程を表し、その寄与率の和が70%以上に及んだ。津波後3年間という長期間における汀線変動過程においても津波による大規模な地形変化からの回復過程が支配的である。

汀線の変化速度は津波の前後で全く異なる分布へと遷移しており、津波によるラグーン地形の消失からの回復過程が漂砂系全体での土砂収支の変容を生じていることが明らかになった。

謝辞：本研究を行うにあたり、(財)河川環境管理財団河川整備基金、および東北建設協会建設事業に関する技術開発支援の助成を受けた。ここに記して関係各位に深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- Eko Pradjoko・田中 仁 (2010)：沿岸漂砂系に流入する河口左右岸の汀線変動特性に関する研究, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 66, No. 1, pp. 541-545.
- 姜 炫宇・田中 仁・坂上 毅 (2004)：長期現地観測資料に基づく仙台湾岸汀線変動特性・土砂収支の検討, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 536-540.
- Nguyen Xuan Dao・田中 仁・Mohammad Bagus Adityawan・真野 明・有働恵子 (2013)：東日本大震災津波による石巻海岸での海浜地形変化, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 69, No.2, pp. I_281-I_285.
- 田中 仁・Mohammad Bagus Adityawan・盧 敏・Vo Cong Hoang (2013)：東日本大震災津波後の河口砂州河道内侵入現象, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I_616-I_620.
- 平尾隆太郎・Nguyen Xuan Tinh・田中 仁 (2010)：バリアー上の越波による海浜変形と対策工の効果の検証, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 66, No. 1, pp. 526-530.
- 三戸部佑太・Vo Cong Hoang・Mohammad Bagus Adityawan・田中 仁 (2013)：東日本大震災津波後の仙台湾岸の海浜変形, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I_611-I_615.
- Miller, J. K. and R. G. Dean (2007a)：Shoreline variability via empirical orthogonal function analysis: Part I temporal and spatial characteristics, Coastal Engineering, Vol.54, No.2, pp. 111-131.
- Miller, J. K. and R. G. Dean (2007b)：Shoreline variability via empirical orthogonal function analysis: Part II relationship to nearshore conditions, Coastal Engineering, Vol.54, No.2, pp. 133-150.
- Tanaka, H., X. T. Nguyen, M. Umeda, R. Hirao, E. Pradjoko, A. Mano and K. Udo (2012)：Coastal and estuarine morphology changes induced the 2011 Great East Japan Earthquake Tsunami, Coastal Engineering Journal, Vol.54, No.1, 1250010.