東日本大震災津波後の河口砂州河道内侵入現象

Sand Spit Intrusion Into A River Mouth After The Great East Japan Tsunami

田中 仁¹・Mohammad Bagus Adityawan²・盧 敏³・Vo Cong Hoang⁴

Hitoshi TANAKA, Mohammad Bagus ADITYAWAN, Min ROH and Hoang Cong VO

The Great East Japan Tsunami of 2011 caused severe morphology changes along the affected shoreline, including sand formation in front of the river mouth. This study investigates the recovery process of this sand formation at several rivers. Sand spit intrusion into the rivers occurs during the recovery process. The river mouth width and the intrusion distance show similar relation and trends, which was also observed in sand intrusion into the river due to jetty construction. A more detail analysis show that the river mouth was severely eroded by the tsunami. The water depth in the river mouths was significantly deeper after the tsunami. Thus, the location of the depth of closure was moved into the rivers, which lead to the sand intrusion. This agrees well with laboratory experiments from previous study.

1. はじめに

2011年東日本大震災津波によりもたらされた海浜・河口の地形変化の特徴として、河口砂州のフラッシュが挙げられる(例えば、田中ら, 2011)。東日本大震災津波の約1年前に発生したチリ地震津波の際にはこのような河口地形変化は認められていない。したがって、このような大規模な河口地形の変化は、レベル2の津波がもたらす特徴的な事象の一つであると言える。

被災後、比較的早い期間で以前の砂州地形に回復した河川も見られるが、多くの一級河川・二級河川において以前の河口砂州地形に戻っていない箇所も多く見られる(平尾ら, 2012)。このような河口地形の未回復により、河道内への砂州侵入が多くの河川で観察されている。適度な河口砂州の発達には波浪・塩水の遡上を妨げるので、洪水時に河積阻害を生じさせないことが担保されれば、河口砂州の存在を前提とした河道計画が可能となる。しかし、今時津波後に見られた河口砂州の河道内への移動により、波浪・塩水の遡上が顕著化し、河川堤防・水門などの河川施設が波浪により損傷を受けた事例が多く見られ、これまでの砂州の存在を前提とする河道計画に大きな支障をもたらす兼ねない河川が見られる。

本研究では東北地方における一級河川・二級河川を対象として、空中写真・深浅測量データなどをもとに、このような河川における河口砂州の河道内侵入の実態を示すとともに、河道内への砂州の侵入のメカニズムに関する検討を行った。この際に、類似な現象を示す導流堤建

設後の河口地形に関する知見も収集し、統一的な機構の説明を試みた。

2. 研究対象および使用データ

本論文では、2011年3月11日の東日本大震災津波により大規模な河口砂州のフラッシュが生じた宮城県内の一級河川・二級河川を研究対象としている。これらの河川において津波前後に撮影された空中写真、および河口部の深浅測量資料を収集し、解析を行った。

また、同様な河口砂州の河道内侵入現象は導流堤建設後の河口部においても見られることがある。その代表的事例として山形県・最上川を取り上げ、その現地資料もあわせて分析を行った。これらの河川の位置図を図-1に示す。

3. 結果と考察

(1) 各河川での津波前後の河口地形変化

図-2 (a) から (e) には各河川における河口砂州の河

図-1 研究対象河口の位置

1 フェロー	工博	東北大学工学研究科教授	土木工学専攻
2 正会員	Ph.D	東北大学工学研究科PD	土木工学専攻
3 学生会員	M.Eng.	東北大学大学院	土木工学専攻
4 学生会員	M.Sci.	東北大学大学院	土木工学専攻

口内への侵入状況を示している。津波後にはいずれの箇所においても河口砂州が消滅し、その後、砂州の河道内侵入が見られる。なお、実線は津波来襲前の河口砂州の発達状況を示している。このうち、最大の侵入距離を示しているのは図-2 (a) に示した北上川であり、最狭部の位置は当初のそれから約1,000m上流側に位置している。このため、北上川においては、津波により砂州が消失した後に河口に侵入する波浪により河道内に向かう漂砂が発生し、左岸支川の排水水門・月浜第二水門（図-2 (a) の丸囲みの位置）の前面に堆砂が生じ、水門の開閉に支障を来す問題が生じた。図-2 (b) の鳴瀬川では海域からの侵入波により左岸高水敷が洗掘され、上流に輸送された砂が砂嘴を形成している。この影響で左岸堤防の基部が洗掘され、2011年8月30日に堤防の法面が50mにわたり崩落した（図-2 (b) の破線丸囲みの位置）。

これらの北上川、鳴瀬川の事例のように、従来、波動外力の影響を考慮せずに設計が行われている河川構造物・河川管理施設について、砂州の河道侵入に伴う波浪の遡上が各種の問題を引き起こしている。

北上川においては右岸に位置した延長約2kmの横須賀海岸が完全に失われ、漂砂の供給源が無いことから、河

口砂州の完全な回復が見られない。鳴瀬川においては、河口左岸側の汀線部に設置されたヘッドランドにより河口に向かう漂砂が制限されている（田中，2010）。これに対して、図-2 (c) の七北田川においては写真の右から左に向かう漂砂の供給が十分であるために、河道内に輸送された砂が河道を極端に狭窄させた。その後の河口地形の変化については、津波による砂州フラッシュの状況と併せて詳細を後述することとする。

図-2 (d) の名取川においては左右岸に導流堤が備わっており、以前はこの箇所に河口部が位置していたが、現在は極端な汀線の後退により左岸の中導流堤が機能していない。上記図-2 (b) の鳴瀬川でも同様な状況である。名取川でも七北田川と同様に河道の狭窄が顕著であり、写真に見える貞山運河と本川の左岸合流部を閉塞させるほどの砂嘴の発達が見られる。名取川河口左岸側には約2kmの砂浜があり、このような漂砂供給源の存在が図-2 (c) 七北田川と共通している。

図-2 (e) の阿武隈川周辺において漂砂の卓越方向は写真の右から左であり、河口内右岸側に砂の堆積が見られる。

図-2 (f) は導流堤建設後に同様な砂州侵入が見られた最上川の事例であり、現象としては前述の津波によるも

(a) 北上川（2012年2月22日, Google Earth）

(b) 鳴瀬川（2011年6月29日, 北上川下流河川事務所）

(c) 七北田川（2011年6月）

(d) 名取川（2013年3月4日）

(e) 阿武隈川（2012年3月4日, Google Earth）

(f) 最上川（2009年8月26日, 国土地理院）

図-2 津波後に見られた河口砂州の河道内侵入

(a) 河口砂州部

(b) 蒲生干潟砂丘部

図-3 津波後に見られる河口砂州の河道内侵入

(a) 2011年3月6日

(b) 2011年3月12日 (国土地理院)

(c) 2011年6月8日

(d) 2011年7月6日

(e) 2011年9月7日

図-4 七北田川における河口砂州侵入の過程

のと極めて類似している。前川 (2010) によれば, 1977 年の導流堤施工開始直後から河口砂州の上流への移動が始まり, 1977年から1989年の12年の間に砂州の先端が約500m上流に移動している。また, 上流への移動を高波浪時の越波によると述べている。なお, 前川ら (1999) は秋田県小吉川においても河口導流堤建設後に河口砂州が河道内を上流に移動した事例を報告している。

(2) 七北田川における津波前後の地形変化プロセス

図-2に示した地形はある時点のスナップショットであり, その地形に至る過程がすべての河川で明らかになっているわけではない。このうち, 七北田川においては津波来襲時の河口砂州フラッシュを含めて詳細は資料が残されているので, 以下ではそれらをもとに津波の前後の地形変化過程を詳述する。

図-3は仙台市消防局のヘリコプターから撮影されたビデオ画像から, 津波遡上が発生した直後の画像を切り出した静止画である。図-3 (a) によれば津波により砂州を完全に水没している。また, 右岸の海岸林に比べてはるかに早く津波が遡上している。図-3 (b) は河口左岸に位置する蒲生干潟 (ラグーン) の砂丘部を越流する津波を示す。津波のフロント部は直線状ではなく, 主に砂丘高さの凹凸により横断方向の波先端部のundulationが見られる。なお, 津波遡上に伴う七北田川河口周辺の詳細な侵食過程については, Rohら (2013) に報告が行われている。

次に, 図-4には津波前後の地形の変化を示している。図-4 (a) は津波来襲前の河口地形である。仙台海岸では北上する漂砂が卓越し, このために七北田川河口では右岸砂州の発達が顕著である (田中, 1995)。左岸には汀線部まで導流堤が建設されており, このため, 河口開口部の左端はこの導流堤の位置を越えることはない。図-4 (b) は3月12日の河口地形であり, ラグーン地形が消失している。河口左岸海側には前述の導流堤が見られ, 特に左岸海浜での汀線の後退が顕著である。その後, 図-4 (c),

図-5 河口砂州侵入距離と低水路河口幅との関係

図-6 河口砂州侵入距離と平水流量との関係

図-4 (d) の様に河口砂州が発達した。特に、図-4 (d) の地形は複合砂嘴（宇多・山本，1991）の形態を示している。図-4 (a) の初期の河口砂州の形成箇所と比べ、河川上流の位置に砂州が発達している点が大きな特徴である。七北田川においては河口部での深浅測量がなされていないが、後述のように鳴瀬川では河口部が最大で8mほどの深さまで侵食されたことが確認されている。七北田川においても同程度まで河口部が深掘れしていると予想され、このため、河口内部まで進入した波浪により、図-4 (c)、図-4 (d) の様な砂州の形成が生じたものと考えられる。その後、図-4 (e) の様に河口は完全に閉塞した。

(3) 砂州侵入距離の特性

図-5は砂州の侵入距離 L_s （津波来襲前後での砂州先端位置の距離）と、津波来襲前の河口部低水路幅 B との関係を示す。データは最上川のものも含めてほぼ比例関係を示しており、 L_s と B の関係は図中実線の次式で与えられる。

$$L_s = 2.5B \quad \dots\dots\dots (1)$$

また、図-6は砂州の侵入距離 L_s と河川流量として平水流量 Q を用いて、その関係を検討したものである。河口部低水路幅は当然流量と相関を有するため、図-5と同様な相関関係を示している。

河口砂州の上流への移動は、従来の海域と河川の境界

(a) 鳴瀬川河口測線

(b) 横断面 (0.0k)

(c) 横断面 (0.1k)

(d) 横断面 (0.3k)

図-7 鳴瀬川における河口水深

が河川上流側に移動したことを意味し、河川構造物の設計に波浪外力を考慮しなければならない区間と言え、実務的にも重要な知見である。

(4) 河口水深と砂州侵入との関連

以上の砂州侵入は、津波により河口部が深く洗掘され、以前は海域で碎波していた波が河口内まで伝搬し易くなったことによるものと考えられる。上記の最上川の事例は河口導流堤建設後に見られており、この推測の妥当性を示している。図-7は津波前後の鳴瀬川における河口水深の変化であり、極端な河口地形の洗掘が認められる。

以上に述べた砂州フラッシュ後の河口地形に類似した砂嘴発達について、宇多・山本（1991）は興味深い実験を行っている。図-8の様な平面水槽を用い（後の説明のために左岸を描いているが、宇多・山本（1991）の実験においてこれは存在しない）、河道に相当する部分を30cm（Case ①）、および5cm（Case ②）とする二つの実験を行っている。その結果、図-8に示す異なる砂嘴の発達が見られた。この二つの地形は、七北田川において見

られた図-4 (c) および図-4 (a) の地形に対応している。

平均的な波浪に伴う漂砂移動深さ h_C と河口水深 h_R の関係が $h_R > h_C$ の関係にある時に、宇多・山本 (1991) の Case ①,あるいは七北田川で見られた図-4 (c) の河口砂州の侵入がもたらされると解釈される。このことを h_R と h_C の関係として描いたものが図-9である。ここには、併せて宇多・山本 (1991) の実験ケースも示した。津波来襲前の七北田川における平均水深はほぼ一定で、1.5m程度である (田中, 1995)。一方、津波による河口の洗掘深を上述の様に8mと仮定する。一方、仙台海岸の h_C は8mと評価されている (宇多, 1997) が、これは年に数回の頻度の高波浪に対応するものである。図-4に見られる地形変化はより頻度の高い波浪によるものであることから、姜・田中 (2006) による仙台海岸での年平均波浪 ($H=0.91\text{m}$, $T=8.5\text{s}$) を用い、佐藤・田中による完全移動限界式 (土木学会, 1999) から $h_C=2.0\text{m}$ を得る。図-9にはこの結果も示した。津波の発生により河口の深掘れが生じ、 $h_R=h_C$ の線を越えた領域に入り、宇多・山本 (1991) の Case ①と同様な地形が発生したと理解することが出来る。

図-8 河口砂州成長の概念図

図-9 h_R と h_C との関係

4. おわりに

本論文においては、東日本大震災津波後でフラッシュされた河口砂州についてその後の河口内への侵入現象について検討を行った。主要な結論を以下に示す。

- (1) 2011年東日本大震災津波の際に洗掘が生じた河川における砂州の河口内侵入現象の事例を示した。
- (2) 導流堤建設後にも同様な事例が見られ、河口水深の増加がもたらした現象と推測される。
- (3) 河口水深 h_R および漂砂移動深さ h_C は、それぞれ河川の流砂系および海域の漂砂系の代表深さを表す重要な物理量である。これまで個別に扱われたこの二つの代表深さを結びつけることにより、河口部での砂移動現象を流砂系・漂砂系の双方の視点から包括的に説明できる。

謝辞: 本研究を行うにあたり、国土交通省東北地方整備局仙台河川国道事務所、同北上川下流河川事務所、宮城県土木部河川課、仙台市消防局より貴重な資料の提供を受けた。また、本研究に対して日本学術振興会科学研究費 (No.2301367), (財) 河川環境管理財団河川整備基金, 東北大学災害科学国際研究所特定研究助成, 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

- 宇多高明・山本幸次 (1991): 複合砂嘴の形成過程に関する実験的研究, 地形, Vol. 12, pp. 357-365.
- 宇多高明・山本幸次 (1992): 砂嘴形成海域の海底地形と砂嘴形態の関係について, 地形, Vol. 13, pp. 141-157.
- 宇多高明 (1997): 日本の海岸侵食, 山海堂, 442p.
- 姜 炫宇・田中 仁 (2006): 汀線変化モデルの漂砂量係数同定に及ぼす検証データの影響, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.556-560.
- 田中 仁 (1995): 七北田川において観測された中小河川特有の河口現象, 土木学会論文集, 第509号/II-30, pp.169-181.
- 田中 仁 (2010): 第10章 鳴瀬川, 日本の河口 (澤本正樹・真野 明・田中 仁編著), pp.94-103, 古今書院.
- 田中 仁・真野 明・有働恵子 (2011): 2011年東北地方太平洋沖地震津波による海浜地形変化, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 67, No.2, pp.1571-1575.
- 土木学会 (1999): 水理公式集, 713p.
- 平尾隆太郎・田中 仁・梅田 信・Nguyen Xuan Tinh・Eko Pradjoko・真野 明・有働恵子 (2012): 東日本大震災津波後の河口地形変化の特徴と問題点, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.68, No.4, pp.1735-1740.
- 前川勝朗・大久保博・掃部閑徹 (1999): 導流堤施工に伴う子吉川河口付近の地形変化, 農業土木学会誌, pp.1299-1305.
- 前川勝朗 (2010): 第9章 最上川, 日本の河口 (澤本正樹・真野 明・田中 仁編著), pp.83-93, 古今書院.
- Roh, M., M. B. Adityawan and H. Tanaka (2013): Study on river mouth erosion process due to tsunami, Proceedings of the 12th International Symposium on River Sedimentation. (in press)