河川が流入する漂砂系における土砂収支の評価

Evaluation of Sediment Budget Around a River Entrance

Eko Pradjoko¹・田中 仁²

Eko PRADJOKO and Hitoshi TANAKA

The natural sediment bypassing of river mouth is difficult to determine due to the hydrodynamic complexity in that area. The sediment bypassing of river mouth is one component which important to know and have influence to the behavior of surrounding shoreline. The sediment budget method is applied to determine the sediment bypassing in Nanakita River mouth Sendai Miyagi by using the best known estimated data in that area. The results reveal the existence of sediment bypassing and the role of river mouth to supply sediment to the system. The blocking effects of river mouth to the long-shore sediment transport also indicate in this result. This is important when applying the shoreline change model in the river mouth area.

1. はじめに

沿岸域における土砂収支評価に際して、河口は土砂の供給源として位置づけられる。しかし、その存在が、河口噴流・河口前面堆積地形を通じて沿岸漂砂の連続性を分断する効果を持つ場合もあると考えられる。特に、沖側に張り出した河口テラスが強固に存在する場合には、たとえ導流堤が無くても沿岸漂砂を阻止する効果を有する (Truong・田中, 2006; 中村, 2008; Eko・田中, 2010)。したがって、河口テラスが存在する河口部は、漂砂系において土砂供給の役割とともに、漂砂遮断の役割も有することに注意しなければならない。ただし、このような評価を行うためには、河口部・周辺海岸を含む広い領域の資料が必要となる。

河口と類似した感潮狭水路を対象とした土砂収支の評価がRosati・Kraus (1999) によりなされてる。また、狭水路の航路維持を目的として、同様な解析がなされている (例えば, Jarret, 1991)。その後, Kraus (2000) は Reservoir Modelを提案し, 感潮狭水路が注ぐ海浜における漂砂のバイパス現象について検討を行っている。ただし, モデルの適用には, 沿岸域・感潮狭水路を含め広域的な深浅測量データを必要としている。

本研究においては, 仙台海浜に注ぐ七北田川河口周辺を対象として, 20年にわたり2ヶ月間隔の高い頻度で撮影された空中写真を活用し, 河口の存在が周辺海浜漂砂系に及ぼす影響を土砂収支の観点から評価した。

2. 研究対象とデータ

(1) 研究対象

研究対象の仙台海浜および七北田川河口の概要を図-1に示す。七北田川は仙台市の北西部の泉ヶ岳にその源を発し, 仙台港から南に約2kmのところで仙台湾に注ぐ二級河川である。七北田川河口周辺海浜では北上する漂砂が卓越し, このため右岸砂州が成長することが多い (Srivihok・田中, 2004; Srivihok・Tanaka, 2004)。七北田川で見られる地形変動・水理特性については, 著者の一人の報告に詳述されている (田中, 2010)。

(2) 使用データ

河口を含む周辺海域における土砂収支の概念図を図-2に示す。漂砂系の末端に位置するCell 1, 河口前面のCell 2, および漂砂上手に位置するCell 3を設ける。それぞれについての底質保存則は以下の通りである。

$$\text{Cell 1: } Q_{\text{byleft}} - q_L L_S = \Delta V_{LS} + \Delta V_{LSS} \quad \cdots \cdots (1)$$

$$\text{Cell 2: } -Q_{\text{byleft}} + Q_{Rr} - q_L L_{rv} + Q_{\text{byright}} = 0 \quad \cdots \cdots (2)$$

$$\text{Cell 3: } Q_L - Q_{\text{byright}} - q_L L_r = \Delta V_{RS} + \Delta V_{RSS} \quad \cdots (3)$$

図-1 研究対象河口・海浜の概要

1 学生会員 M.Eng. 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻
2 フェロー 工博 東北大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻

図-2 土砂保存則の概念図

ここで、 Q_{RV} ：河口からの流砂量、 Q_L ：右端から流入する沿岸漂砂、 ΔV_{LS} 、 ΔV_{RS} ：それぞれ、Cell 1およびCell 3内の土砂量変化、 ΔV_{LSS} 、 ΔV_{RSS} ：それぞれ、左岸・右岸の砂州体積の変化、 $Q_{byright}$ 、 Q_{byleft} ：Cell 2に右岸・右岸から流入する漂砂量、 q_L ：岸沖方向に移動する漂砂量（単位幅）、 L_s 、 L_{rv} 、 L_r ：Cell 1、Cell 2、Cell 3の沿岸方向の長さである。Cell 1の左端は仙台港防波堤に接しており、ここを通過する漂砂は存在しない。式 (1) の諸量のうち、 Q_{RV} についてはMeyer・Peter-Müller (1948) の式を用いた。また、 Q_L はCERC式と同様な式を用い、係数は汀線変化モデルを通じてキャリブレーションされた値（田中，1991）を用いている。また、Cell 1、Cell 2内の土砂量変化 ΔV_{LS} 、 ΔV_{RS} は、二月に一度の高頻度空中写真に最小二乗法を当てはめ、その汀線変動速度に漂砂の移動高さ h_c を乗じて求めた。ここで、漂砂の移動高さについては近隣海浜における既往の研究（野村ら，1986）より8mとし、さらに、海浜砂丘部の平均的な高さである3m（平尾ら，2010）を加算した。この際、空中写真に撮影された水際線の検出にはBeach Tools (Hoeke et al., 2001) による画像解析を用いた。この手法によれば、水域と砂浜とを識別することが出来、さらに、碎波帯の白色と砂浜の白色とを正確に見分けることが出来る。 ΔV_{LSS} 、 ΔV_{RSS} については、空中写真から得られる面積の変化に、河口水深の平均値である $h = 1.5\text{m}$ を乗じて砂の体積とした。

まず、式 (1)、(2)、(3) を足し合わせれば、全域に

対する保存則である次式が得られる

$$Q_L + Q_{RV} - q_L(L_s + L_{rv} + L_r) = \Delta V_{LS} + \Delta V_{LSS} + \Delta V_{RS} + \Delta V_{RSS} \quad (4)$$

これより、 q_L を求めることが出来る。次に、この値を用いて、Cell 1, 2, 3に土砂保存則を当てはめ、河口前面のCell 2に右岸・左岸から流入する漂砂量 $Q_{byright}$ 、 Q_{byleft} が求められる。

七北田川においては1990年代に河口の完全閉塞が見られた（田中，2010）。近年は上述のように右岸砂州の発達は見られるものの、完全閉塞は報告されていない。このため、以下の土砂収支評価の中で、完全閉塞の発生は加味していない。

3. 解析結果

(1) 土砂収支解析結果

図-3は、上から順に ΔV_s 、 ΔV_{ss} 、 Q_L 、 Q_{RV} 、 $q_L L$ ($L = L_s + L_{rv} + L_r$)、および、 Q_{hyp} の経年変化を示している。

まず、海域における土砂量の変化 ΔV_s （図-3 (a)）を見ると、顕著な堆積あるいは侵食傾向を示してはならず、むしろ左右岸の双方において動的な変動を示している。

次に、図-3 (b) は砂州の発達の寄与分である。2000年より以前には、左右岸双方あるいは左岸側の砂州の成長が顕著であったが、その後、左岸よりも右岸砂州の成長が著しい。

この左岸砂州の成長は、図-3 (c) の沿岸漂砂の移動方向とも符合するものである。すなわち、2000年以前には南下する漂砂移動も見られていたが、近年はCell 3に流

図-3 土砂収支の解析結果と河口近くの汀線変動

入する北上する漂砂が卓越している。

図-3 (d) の河川流出土砂は洪水流量の年変動を反映して、他の土砂量に比べて大きな年変動を示している。

図-3 (e) によれば、岸沖方向の移動砂量は沿岸漂砂 Q_L の5倍程度である。また、 Q_L は図-3 (a) に示した ΔV_s と、左右岸において相関を示している。さらに、 q_L と Q_L とはほぼ逆相関を示していることが確認される。なお、姜ら

(2004) の報告によれば、沖向きに流出する漂砂は $1.86\text{m}^3/\text{y}/\text{m}$ と見積もられている。一方、図-3 (e) によれば、本研究の算定結果もやはり沖向きが卓越するものの、1991年から2010年までの平均値を取ると、 $23.3\text{m}^3/\text{y}/\text{m}$ となり、上記の姜ら (2004) の結果に比べて大きな値となっている。

図-3 (f) は河口前面のバイパス漂砂 Q_{byp} を示している。

Q_{byp} と Q_L はほぼ同方向に向かっていることが分かる。Cell 3に流入する漂砂は、この中で ΔV 生じさせ、さらに岸沖漂砂と相殺した残りが次のCell 2に流入することになる。1994年、2006年、2007年、2009年には、 Q_{byp} と Q_L の移動方向が逆向きである。これは、特に河川からの多大な流出土砂の影響であると考えられる。

(2) 河口前面をバイパスする漂砂

得られたバイパス漂砂量 Q_{byp} と、右端からの沿岸漂砂 Q_L との関係を図-4に示す。平均的に見て、正值（右岸から左岸へ）、負値（左岸から右岸へ）のいずれも沿岸漂砂の91%がバイパスし、残りの9%が河口噴流・テラス地形の影響により河口右岸側または左岸側に捕捉されることが判明した。特に、右岸から移動する漂砂（○印）は、横軸の周辺にプロットされるデータが多く、その多くが捕捉されていることを意味する。

(3) Cell 2を通過する上手側・下手側漂砂の関係

図-5は、河口前面に位置するCell 2について、右岸側検査面通過漂砂量 $Q_{bypright}$ と左岸側検査面通過漂砂量 $Q_{bypleft}$ の関係を示す。ここで、プロットされたデータに示された数字は Q_{RV} を示している。第一象限にあるデータの多くは $Q_{bypleft} > Q_{bypright}$ の関係を示し、その差が河川流出土砂量を表し、いずれのバイパス漂砂も南から北に向かう。また、河川からの流出土砂の多いデータは第四象限に多く位置し、河口から流出した土砂が左右岸に分かれて輸送されることを示している。

(4) 沿岸漂砂系に対する河口の効果

流入河川は、図-5で確認された流砂供給ソースとしてばかりでなく、図-4で見られるような漂砂移動阻止の効果を有している。対象河川には河口導流堤が無いにもかかわらず、このような沿岸漂砂遮断効果を示しており、漂砂系における河川の役割を評価する上できわめて重要な知見である。河川が流入する漂砂系にOne-lineモデルを適用する場合、このような漂砂移動阻止の効果を加味しなければならない。

4. おわりに

本研究では、仙台湾に流入する二級河川七北田川の河口周辺における土砂収支を検討し、特に河口全面でのバイパス漂砂量について検討を行った。主な結論を以下に示す。

- (1) 河川が流入する沿岸漂砂系を対象に、20年にわたり2ヶ月の間隔で撮影された空中写真の解析をもとに、土砂収支を評価した。その結果、七北田川河口部には導流堤が無いにもかかわらず、沿岸漂砂の遮断効果が認められた。
- (2) 土砂収支の検討においては、河川が土砂供給のソースとしての役割のみならず、沿岸漂砂阻止の効果を持

図-4 Q_{byp} と Q_L との関係

図-5 右側検査面通過漂砂量 $Q_{bypright}$ と左側通過漂砂量 $Q_{bypleft}$ との関係

つことを考慮する必要がある。

なお、2011年3月に発生した東日本大震災に伴う津波により、蒲生干潟と海域を隔てる砂嘴が大きく侵食された、干潟内に土砂の大規模な堆積が発生した。このため、この周辺の土砂環境も本論文で検討を行ったものと大きく変化してしまった。今後、新たな状況での土砂収支に関する検討が必要である。

謝辞：本研究を行うに当たり、宮城県土木部河川課より七北田川河川流量データの提供を受けた。また、JST－JICA地球規模課題対応国際科学技術協力事業、および日本学術振興会科学研究費（基盤研究（B）、No.21360230、同No. 22360193）の補助を受けた。ここに記して、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, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. B2-66, 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海岸汀線変動特性・土砂収支の検討, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.536-540.
- 田中 仁 (1991): 七北田川の河口閉塞と河口砂州フラッシュ, 水工学論文集, 第35巻, pp.275-280.
- 田中 仁 (2010): 第11章 七北田川, 日本の河口, 澤本正樹・真野 明・田中 仁編, 古今書院, pp.103-114.
- Truong ThienKhang・田中 仁 (2006): 河口テラスの縮退が漂砂系の連続性に及ぼす影響について, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.616-620.
- 中村聡志 (2008): 河口テラス状地形による沿岸掃流漂砂阻止機能の量的評価, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.501-505.
- 野村和正・宇多高明・因幡昭義・宮内利夫 (1986): 阿武隈川河口砂州の変形について, 第33回海岸工学講演会論文集, pp.267-271.
- Patchanok Srivihok・田中 仁 (2004): 高頻度空中写真による七北田川河口砂州動態の検討, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.531-535.
- 平尾隆太郎・Nguyen XuanTinh・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. B2-66, No.1, pp.526-530.
- Hoeke, R.K., G. A. Zarillo and M. Synder (2001): A GIS based tool for extracting shoreline position from aerial imagery (BeachTools), Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note, CHETN-IV-37, U.S. Army Corps Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.
- Jarrett, J. T. (1991): Coastal sediment budget analysis techniques, Proc. CoastalSediments' 91, pp.2223-2233.
- Kraus, N.C. (2000): Reservoir model of ebb-tidal shoal evolution and sandbypassing, J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng., Vol.126, No.3, pp.305-313.
- Meyer-Peter, E. and R. Müller (1948): Formulas forbed-load transport, Proc. 2nd Congress IAHR, pp.39-64.
- Rosati, J.D., and N. C. Kraus (1999): Formulation of sediment budgets at inlets, Coastal Engineering Technical Note, CETN-IV-15 (Revised September 1999), U.S. Army Research and DevelopmentCenter, Vicksburg, MS.
- Srivihok, P. and H. Tanaka (2004): Analysis of river mouth behavior change by using aerial photographs, Annual J. Hydraulic Engineering, Vol.48, pp.733-738.
-