山国川と中津干潟の広域土砂動態と 侵食・堆積機構の解明

鵜崎 賢一¹・大熊 汐里²・倉持 顕³・田井 明⁴・
池畑 義人⁵

¹正会員 群馬大学大学院理工学府環境創生部門
(〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)
E-mail: k-usaki@gunma-u.ac.jp

²学生会員 五洋建設(株)(〒112-0004 東京都文京区後楽 2-2-8)

³非会員 東京都庁(〒163-8001 東京都新宿区西新宿 2-8-1)

⁴正会員 九州大学工学研究院環境社会部門(〒819-0395 福岡県福岡市元岡 744)

⁵正会員 日本文理大学工学部(〒870-0397 大分県大分市一木 1727)

大分県中津干潟では、アサリを中心とした漁獲高が近年激減しており、地元の住民は干潟の侵食や泥質化の影響を懸念しているが、その実態解明はなされていない。そこで本研究では、高精度な測深技術を用い、三大学共同で大分県中津干潟の地形変化観測を行なって広域的な土砂動態を明らかにし、その侵食実態を解明するとともに、侵食・堆積機構を明らかにすることを目的とした。その結果、大出水による堆積とそれ以外の軽微な侵食という傾向と、山国川からの土砂供給と共に沿岸土砂輸送の影響が無視しえないことが示唆された。また、多変量解析から干潟の侵食堆積量を予測する回帰式を得た。その結果から、侵食堆積量の予測式は、堆積は降雨量に、侵食は有義波高に依存し、比較的大きな定数項も存在することがわかった。

Key Words : *inter tidal flat, ADCP, RTK-GPS, sediment budget, multivariable analysis*

1. 緒 論

大分県の中津干潟は、日本第二の広さを有する干潟であるが、10年前と比べてアサリを中心とした漁獲高が激減している。地元の漁師や住民は、干潟の侵食や泥質化が漁獲高に影響を与えているのではないかと懸念をもち、その原因として干潟中央に位置する中津港の拡張整備や主な土砂供給源と考えられる山国川の平成大堰の建設の影響を危惧している。中津港を管轄する国土交通省¹⁾も経年的な深浅測量を行なっているが、近年は堆積傾向と結論付けた。しかしながら、このデータは2011年の多雨、12年の北部九州水害の時点までのデータであり、それから堆積傾向と結論付けるのはやや尚早かと考えられる。また泥質化についての報告も12年の水害の影響は見て取れず、侵食や泥質化の実態が解明されたとは言えないのが現状である。そこで本研究では、より高精度な測深が可能なADCPとRTK-GPSによるM9(YSI Nanotek社製)を用いて広範囲な干潟の地盤高観測を経年的に行ない、まず侵食堆積実態を明らかにすることを目的とする。また、河川からの土砂供給量の算定手法を確

立して山国川に適用し、河川と干潟の土砂収支を調べ、それらのデータをもとにして、干潟の侵食堆積機構を明らかにすることを目的とする。

2. 現地観測手法

(1) 干潟の地盤高測量

砂泥干潟は、河口部を除いて細粒分が薄く広く侵食堆積する傾向にあることから、より高精度な測量技術を用いて地盤高測量をする必要がある。RTK-GPSは1~2cm精度で地盤高を測量することが可能であり、ADCPと組み合わせたM9(YSI Nanotek社製)を用いて高精度な測量が可能である。図-1にM9の概要を、図-2に観測領域と測線を示す。本研究では、山国川左岸の吉富漁港西岸から中津港までの沿岸約7.0 km岸沖約2.5 kmの観測領域において、岸から1 kmの沿岸部では沿岸方向に500 m間隔で14本の岸沖測線を、岸から1~2.5 kmの沖合い部では岸沖方向に500 m間隔で3本の沿岸測線を設定した。沿岸部では、M9を小型ボートで曳航し、沖合い部では、

ADCP と D-GPS を漁船に設置して測深を行なった。現地観測は2013年から毎年、梅雨と台風の出水期の前後、5月末と9月末の大潮時に行なった。得られた各測線の水深データについて、GMT を用いてメッシュ・データに補間し、各メッシュ毎に差分をとって侵食堆積量を算定した。

(2) 河川からの土砂供給量の算定

山国川からの土砂供給量の算定は、鶴崎ら²⁾を参考に、浮遊砂・ウォッシュロードと掃流砂にわけて行なった。浮遊砂量についてはバンドーンを用いた採水試料をGF/F ろ紙を用いてSS 分析し、さらに光学式濁度計による濁度データを用い、C-Q 曲線を作成して求めた。掃流砂量については、矩形断面を仮定して流量データと Manning 式から水深を算定し、断面平均流速から掃流力を求めて芦田・道上式³⁾から算定した。年間の土砂供給量は、耶馬溪のアメダス・データで45mm/day 以上の流量データを用いて算定した。

3. 観測結果ならびに考察

(1) 中津干潟の侵食堆積実態

図-3 に、2015 年9月の地盤高測量結果の一例を、図-4 に、2016 秋-17 秋における侵食堆積量の空間分布を示す。図-3 の凡例は、地盤高を示す。から、中津港の沖防波堤西側と山国川河口の航路とその沖合で水深の大きい領域が認められる。また、中津港と山国川河口の間で沖向きに舌状に張り出す地形と河口デルタは、やや不明瞭ではあるが一応確認できる。図-4 においては、2017 年7月に発生した北部九州水害の影響から、干潟は全面的な堆積となっている。山国川河口航路においては浚渫の影響で侵食となっている。図-5 に、国土交通省九州地方整備局別府空港・港湾事務所が2000-2012 年まで計測した侵食堆積量を示す。図は、2000 年の地形に対する侵食堆積量を示している。2011 年の多雨、12 年の北部九州水害の影響から、その両年は顕著な堆積傾向となっている。図-6 に、国土交通省のデータと本研究のデータを、観測領域の面積が一致するように補正し、前年度比の侵食堆積量として連結した長期変動データを示す。図のデータも2017 年の北部九州水害で終わっているが、2014 年以降、堆積と侵食を含んでおり、平均値は約14 万 m^3/yr である。測量精度から、全領域で約10 万 m^3/yr 程度は誤差範囲内であるため、この図からは近年堆積傾向とは言えず、大出水時の大きな堆積とそれ以外の軽微な侵食であることが判断できる。

図-1 M9 (YSI Nanotek 社製)

図-2 観測領域と測線

図-3 地盤高測量結果の一例 (2015 年9月)

(2) 山国川からの土砂供給量の算定

図-7 に、武川ら⁴⁾による日本全国の河川の L-Q 式を示す。図は、比浮遊砂量 L' と比流量 Q' の関係になっているが、近似式として、

図-4 侵食堆積量の空間分布 (2016 秋-2017 年秋)

$$L' = 13.83Q^{1.62} \quad (1)$$

を得ている。図-8 に、北部九州水害時の山国川の Q_s - Q 曲線を示す。図中のデータは平成大堰において山国川河川事務所が計測した濁度データに対して、本研究で行った採水試料の SS 分析結果による濁度-浮遊砂濃度変換係数を掛けたものである。図から、武川ら⁴⁾の結果と異なり、 $Q \cong 300 \text{ m}^3/\text{s}$ 付近で依存性の変化点があることから、本研究では高流量域と中・低流量域とで近似式を以下のように二つ求めた。

$$\text{高流領域} : L = 7.93Q^{2.70} \quad (2)$$

$$\text{低流量域} : L = 3.39Q^{1.48} \quad (3)$$

図-9 に、山国川からの年間の土砂供給量の経年変化を示す。図において、青線は耶馬溪のアメダス・データによる降雨量であり、黄緑色が掃流砂量、槐色が浮遊砂量を示す。図から、山国川の土砂供給量は上流部の降雨量に強く依存していることがわかる。2017 年の北部九州水害においては、年降水量としてはあまり大きくなく、その結果、2012 年と異なり年間の土砂供給量としてはさほど大きな値とはなっていない。その内訳は、浮遊砂量よりも掃流砂量の方がかなり大きな値となっている。国土交通省は、芦田・奥村⁵⁾による手法を用いて山国川の年間土砂供給量を 22 万 m^3/year と見積もっている。それと比較すると、本手法による算定値は 2012 年の水害時でも約 25 万 m^3/year とやや過小評価であると考えられ、この点は今後の課題である。

図-5 経年的な侵食堆積量データ (国土交通省)

図-6 侵食堆積量の長期変動

図-7 日本全国の河川のL-Q式 (武川ら⁴⁾)

図-8 北部九州水害時の山国川の Qs-Q 曲線

図-11 沿岸土砂輸送量の見積り

図-9 山国川からの土砂供給量

図-12 侵食堆積量の降水量への依存性

図-10 干潟の土砂収支と沿岸土砂輸送量の見積り

図-13 侵食堆積量の有義波高への依存性

図-14 回帰式のコンター図と侵食堆積量の比較

(3) 山国川と中津干潟の土砂収支と沿岸土砂輸送量の見積り

図-10 に、山国川と中津干潟の土砂収支と沿岸土砂輸送量の見積りの概念図を示す。干潟の縁辺部は水深が急に深くなって 10m 前後あり、砂はほぼ動かないと考える。東側境界から流出する砂は中津港航路に堆積するとしてその浚渫量で表す。両方の境界からの泥の流出は無視できないと考えられるが、中津港航路の浚渫土砂の含泥率が約 30%と示されていることから、泥も海底に堆積しているとして、沖側境界からの流出量を 0、東側境界からの流出量は航路浚渫量に含まれると仮定した。それらの仮定と山国川からの土砂供給量から求めた沿岸土砂輸送量を図-11 に示す。図中の数値計算結果は、鶴崎ら⁶⁾による「潮汐と風波を考慮した泥と砂による広域土砂動態・地形変化モデル：WDM-POM」によって計算された結果である。本モデルは、Princeton Ocean Model をベースに、波浪場をエネルギー平衡方程式、海浜流をラディエーション・ストレス・モデル、漂砂量を Bailard モデルや渡辺モデル、泥の輸送を移流拡散方程式、地形変化をそれらの土砂収支式で解き、干潟の干出・冠水スキームを組み込んだ準三次元モデルである。計算値は、周防灘スケールの大領域における潮汐残差流と、それからネスティングして求めた中津干潟の小領域における潮汐残差流と海浜流によって求められた。計算結果の詳細は、Uzaki et al.⁷⁾を参照されたい。河川のハイドログラフと小領域の波浪データは 2 月の値を与えた。図-11 から、沿岸土砂輸送量の平均値は約 90 万 m³/year であり、数値計算による値は約 43 万 m³/year となっている。図-9 において、山国川からの土砂供給量は、国交省見積りが約 22 万 m³/yr に対して、本研究による流量依存型でも最大約 25 万 m³/yr となり、やや過小評価であるとする、図-11 における沿岸土砂輸送量はやや過大評価と考えられ、河川の土砂供給量をより精度良く見積もることができれば、

観測値から算定した値と数値計算結果とはほぼ一致するものと考えられる。いずれにしても、河川の土砂供給量が現在の評価量と桁違いになることは考えにくく、この結果から、沿岸土砂輸送量の影響は無視できないことが示唆される。八木ら⁸⁾は、中津干潟周辺部において東向きの潮汐残差流が存在することを指摘しており、中嶋ら⁹⁾、周防灘には反時計回りの環流が存在することを示唆している。この恒流と冬の北西風による海浜流と吹送流によって、主に泥が西から中津干潟に流入してくるものと考えられる。清野ら¹⁰⁾は、砂州の変形から汀線近傍の沿岸漂砂量を見積もっており、彼らは約 2400m³/year と推定しているが、本研究によるこの値は干潟全体における流入量で泥も含んでおり、砂州の地形変化として堆積する量とは異なるものと考えられる。

(4) 侵食堆積メカニズム

図-6 で示した侵食堆積量 ΔV の経年データについて、山国川上流の耶馬溪におけるアメダス・データによる降雨量 r と荻田港の NOWPHAS データによる有義波高 $H_{1/3}$ をパラメータとして多変量解析を行なった。 r は山国川からの土砂供給量を介して堆積として影響し、 $H_{1/3}$ は高波浪による侵食として影響するものと考えられる。ここで $H_{1/3}$ は、毎月の $H_{1/3}$ データを降順に並べて改めて上から 1/3 平均をとったものとした。図-12 に、 ΔV の r への依存性を調べたものを、図-13 に、 ΔV の $H_{1/3}$ への依存性を調べたものを示す。いずれも、もう一方のパラメータ値がほぼ同じ値となるようなデータを用いて依存性を調べた。図から、いずれも線型依存とみなすことができ、それを仮定して多変量解析を行なった。得られた回帰式を (4) に示す。

$$\Delta V = 5.51 \times 10^3 r - 1.11 \times 10^7 H_{1/3} + 2.46 \times 10^6 \quad (4)$$

図-14 に、回帰式から得られるコンター図と用いた侵食堆積量データの比較を示す。図から、侵食堆積傾向とコンター図は比較的良好に一致し、図-12、13 で仮定した線型依存性がほぼ妥当であることがわかる。プロットされたデータのうち 2 点において計算値と観測値の比較を示した。これらから、両者は定量的にも良好に一致していることがわかる。この結果から、中津干潟の侵食堆積量は、降雨量が堆積に影響し、有義波高が侵食に影響することがわかる。このことは、降雨によって山国川から土砂供給が生じて干潟に土砂が堆積する一方で、高波浪によって干潟が侵食されることを示すものと考えられる。また、回帰式にはやや大きな定数項が存在する。この正の定数項は堆積に影響することから、安定的な沿岸土砂輸送による影響を示すと考えられる。しかしながら、その値は回帰式から 246 万 m³/year となり、図-11 で見積

もられた平均約 90 万 m^3/year よりやや大きな値となっている。これは回帰式の相関に依存するものであり、今後、より精度を上げていく必要がある。

4. 結 論

高精度な測深技術を用いて広範囲な干潟の地盤高調査を経年的に行ない、その侵食堆積実態を明らかにした。その結果、大出水による大堆積とそれ以外の比較的軽微な侵食・堆積の繰り返しとなっていることがわかった。

また、河川からの土砂供給量の算定手法を確立して山国川に適用し、河川からの土砂収支を調べた。その結果、山国川以外にも沿岸土砂輸送の影響が無視できないことが示唆されたが、山国川からの土砂供給量の算定については、やや過小評価であることが示唆され、今後の改善が求められる。これらの結果を踏まえ、多変量解析を用いて干潟の侵食堆積量の予測式を求めた。その結果、中津干潟の侵食堆積量は、降雨量と有義波高、ならびに定数項に依存することがわかり、降雨量と定数項は堆積に、有義波高は侵食に作用することがわかった。この定数項は、沿岸土砂輸送量の影響を示すものと考えられる。

謝辞: 本研究の遂行にあたり、NPO 法人「水辺に遊ぶ会」の方々には、様々な面でご協力いただいた。大分県漁業協同組合の方々にも様々な面でご協力いただいた。また、国土交通省九州地方整備局山国川河川事務所ならびに別府港湾・空港整備事務所の方々、大分県中津市中津土木事務所の方々にも、データの提供等様々な面でご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省九州地方整備局別府空港・港湾整備事務所：中津港海域環境管理検討調査報告書，pp.1-151，2013.
- 2) 鶴崎賢一，荒木陽介，綿貫祐介，高橋誠：那珂川からの全土砂供給量の直接計測による算定手法の確立に関する研究，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.61，No.2，pp.1_651-1_655，2014.
- 3) 芦田和男，道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎研究，土木学会論文報告集，第 206 号，pp.59-69，1972.
- 4) 武川一樹，二瓶泰雄：日本の河川における浮遊土砂輸送量と流量の相関関係，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.69，No.2，pp.1_1221-1_1225，土木学会，2013.
- 5) 芦田和男，奥村武信：ダム堆砂に関する研究，京大防災研年報，17 号 B，pp.555-570，1974.
- 6) 鶴崎賢一，栗山善昭，坂本光：潮流と海浜流による干潟の地形変化に関する数値計算，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.65，pp.466-470，土木学会，2009.
- 7) Ken-ichi UZAKI, Masashi YONEYAMA, Shiori OKUMA, Akira TAI, Yoshito IKEHATA and Hiroki IYOOKA : Sediment Budget from the Yamakuni River to the Nakatsu Intertidal Flat and the Mechanism of the Morphodynamic Change of the Flat., Proc. of International Conference on Hydrosience & Engineering 2016, CD-ROM, 2016.
- 8) 八木宏，中山哲蔵，浜口昌巳，佐野朝昭，藤井義昭，杉松宏一：瀬戸内海周防灘中津干潟周辺におけるメソスケールの流れの構造とアサリ浮遊幼生の分散特性，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 67，No.2，pp.1_966-1_977，2011.
- 9) 中嶋さやか，金山進，関本恒浩，井関和夫：夏季周防灘の底層における孤立低温水塊の形成メカニズムと物理環境に関する一考察，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.66，No.1，pp.951-955，土木学会，2010.
- 10) 清野聡子，宇多高明，足利由紀子，神田康嗣，城野博之：中津干潟三百間地区における砂州の大変形の機構，土木学会海岸工学論文集，第 54 巻，pp.566-570，2007.

(2018.2.8 受付)

REGIONAL SEDIMENT TRANSPORT FROM YAMAKUNI RIVER TO NAKATSU INTERTIDAL FLAT AND THE INVESTIGATION OF MECHANISM OF EROSION/DEPOSITION OF THE FLAT

Ken-ichi UZAKI, Shiori OKUMA, Akira KURAMOUCHI, Akira TAI and Yoshito
IKEHATA

High-accuracy bottom surveys by using the RTK-GPS and the ADCP were applied to Nakatsu Intertidal Flat regionally and the sediment discharge from Yamakuni River were estimated by using the data of turbidity meter and the Ashida-Michiue equation. Sediment budget from Yamakuni River to Nakatsu Intertidal Flat was calculated in order to investigate the mechanism of erosion/deposition of the flat. From the long-term data of erosion/deposition of the flat, deposition due to the flood and ordinal erosion could be seen. From the estimation of sediment budget, it was suggested that effects of longshore sediment transport due to mud and sand could not be ignored. From the multivariable analysis of long-term erosion/deposition data, the prediction equation of erosion/deposition of the flat was acquired. It was effected by the precipitation for deposition, the wave height for erosion and the constant value for deposition.