出水時を含めた那珂川からの土砂供給量の算定と 鹿島灘における広域土砂動態予測に関する研究

鵜崎 賢一¹・高橋 誠²・武田 勇星³

¹正会員 群馬大学准教授 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-uzaki@gunma-u.ac.jp

²非会員 東京都庁 (〒163-8001 東京都新宿区西新宿2丁目8-1)

³非会員 前橋市役所 (〒371-0026 群馬県前橋市大手町2丁目12-1)

那珂川からの土砂供給量を直接計測によって算定する手法を確立するとともに、得られた時系列データを境界条件として鹿島灘の広域土砂動態の数値予測を行った。土砂供給量の算定について、浮遊砂に関しては濁度計と ADCP を、掃流砂に関しては ADCP と芦田・道上式を用いて行った。その結果、2013 年の年間土砂供給量は $71,900 \text{ m}^3/\text{year}$ と見積もられた。数値予測は潮汐と風波を考慮した泥と砂による三次元広域地形変化モデル“WD-POM”を用いた。本論文では、那珂川からの浮遊砂のみを時系列として与えた。計算結果は、波崎漁港付近や大洗サンビーチ付近が堆積、那珂川河口南側の大洗公園付近が侵食となり、定性的には実海浜の特徴と一致する結果となった。

Key Words : *sediment discharge from the river, coastal erosion, numerical simulation*

1. はじめに

茨城県の鹿島灘は、南端の銚子から北部の大洗に至るまで広く海岸侵食が問題となっており、その対策のためヘッドランド群の建設や粗粒材養浜等が行われている。その一方で、鹿島港は慢性的な航路埋没が生じ、継続的な浚渫が行われている。このような局所的な海岸侵食対策や航路埋没対策は、勿論一定の効果が確認されているが、本来、こうした問題は河川や海食崖からの土砂供給と海浜からの沖合・沿岸流出との土砂収支の問題である。そうした土砂動態を明らかにするためには、とくに河川からの土砂供給量を精確に見積もり、その値を用いて広域的な土砂動態計算を行うことが重要である。栗山¹⁾は、那珂川からの砂の供給量を $22,000 \sim 36,000 \text{ m}^3/\text{year}$ 、利根川から $56,000 \sim 75,000 \text{ m}^3/\text{year}$ と見積もった上で、鹿島灘の広域土砂収支を見積もった。しかしながら、この値は芦田・奥村²⁾や藤田³⁾をもとに流域面積から砂の供給量を算定したものである。谷沢ら⁴⁾は、大洗港の北側海域での堆積量から、那珂川の砂の供給量を $60,000 \text{ m}^3/\text{year}$ と算定した。こうした見積もりから、平均的には那珂川からの土砂供給量はこれらのオーダーの値であると推察できる。しかしながら、河川の土砂供給量は当然出水量の大小に大きく依存することから、その値をより精確に見積もるなら、少なくとも流量に依存する形で評価されるべきである。しかしながら、潮汐の影響から河口では流量すら算定されておらず、そのため土砂供給量の精確な算定手法は確

立されていない。また、河川工学においても、とくに掃流砂量の精確な算定手法を確立することは急務であることから、本研究では、河口における土砂供給量を浮遊砂・掃流砂ともに直接計測によって算定する手法を確立し、得られた値を境界条件として沿岸域の広域的な土砂動態を明らかにすることを目的とする。

2. 現地観測の概要

現地観測は、2013 年～2015 年にわたり行われた。浮遊砂・ウォッシュロードについては、光学式濁度計 (JFE アレック社製 Compact-CLW) を用いた観測を行った。掃流砂については、Rennie et al.⁵⁾ を参考に、ADCP のボトム・トラック機能を応用して算定した結果が芦田・道上式に比較的一致することから、流量データによって掃流力を算定し、それを用いて芦田・道上⁵⁾ による掃流砂量式から算定した。浮遊砂観測は、2013 年においては那珂川左岸の那珂湊漁港の那珂川側水門の前で、2015 年においては那珂川右岸の那珂湊マリーナの岸壁で、係留策とブイとアンカーを用いて梅雨期から台風期まで長期係留して行った。設置水深はともに平均水深の半分の位置とした。データ・サンプリングは 1 秒間隔で、15 秒間の計測を 10 分バーストで行った。掃流砂観測は、非出水期において、涸沼川との合流点のやや上流の感潮域にある湊大橋において、リバーボートと ADCP (RD Instruments 社製 Workhorse1200kHz) を用い、橋上から固定係留して行われ

図-1 観測位置の概要

図-2 リバーボートによる観測の概要

た。掃流砂観測の詳細は、鵜崎ら⁶⁾を参考にされたい。また、2013 年においては、観測船に ADCP を設置し、河口の海門橋下において河道横断観測と採水を行った。図-1 に各観測位置の概要を、図-2 に、橋上から ADCP とリバーボートを固定係留して行った掃流砂観測の概要を示す。

3. 観測結果ならびに考察

(1) 浮遊砂量観測

図-3 に、2013 年 9 月の出水時のハイドログラフとハイトグラフを、図-4 にその時の濁度計の計測結果の一例を示す。那珂川河口では、上流の那須地域においてまとまった降雨があると、半日程度のタイムラグで濁水が流出すると言われている。図中の小口は上流域（河口から 82km）、野口は中流域（38.5km）の流量・水位観測所である。図から、那須での降雨の後、小口、野口の順に流量ピークが生じ、それから少し遅れて河口で濁度の上昇があることがわかる。また、濁度は急速に上昇し、緩やかに下降する傾向がわかる。図-5 に、ADCP による河道横断面の流速分布 (a) 下げ潮時、(b) 上げ潮時を示す。図から、

図-3 ハイドログラフとハイトグラフ (2013)

図-4 濁度の時系列データ (2013)

(a) 下げ潮時

(b) 上げ潮時

図-5 ADCP による河道横断面の流速分布

図-6 浮遊砂濃度と後方散乱強度の関係

下げ潮時には全断面流出、上げ潮時には半水深以下で塩水楔の侵入があることがわかる。浮遊砂量の算定には、中流の野口での流量を、タイムラグを考慮して用いている。

図-7 後方散乱強度と濁度との相関

図-8 浮遊砂量と流量の関係 (2013)

(a) ハイドログラフと浮遊砂濃度の時系列 (2015)

(b) 浮遊砂濃度と流量の関係 (2015)

図-9 2015 年出水時の各データ

那珂川は野口から下流ではさほど大きな合流河川がなく、流量については下流でも維持されていると考えられる。但し、海門橋下では直前で涸沼川が合流していることから、後述する海門橋下における河道横断面観測による流量値で補正を掛けている。図-6 に採水試料の SS 分析結果による浮遊砂濃度と採水位置における後方散乱強度との相関を示す。本研究においては強熱減量試験も行っているが、図-6 においては SS 濃度を単純に浮遊砂濃度としている。図-7 に、濁度計の設置水深における後方散乱強度と濁度の相関を示す。図-6, 7 から、浮遊砂濃度と濁度の関係式は、式 (1) で示されることがわかる。

$$C = 0.247TB^{1.267} \quad (1)$$

ここに、 C : 浮遊砂濃度 (mg/l), TB : 濁度 (ppm) である。図-8 に、図-3, 4 と式 (1) を用いて得られた浮遊砂量 $q_s = QC$ と流量 Q の関係を示す。最小二乗法で得られた近似式は式 (2) のようになる。

$$q_s = 6.00 \times 10^{-8} Q^{3.118} \quad (2)$$

ここに、 q_s : 浮遊砂フラックス (m^3/h), Q : 流量 (m^3/s) である。図-9 に、2015 年出水時の各データ (a) ハイドログラフと浮遊砂濃度の時系列データ, (b) 浮遊砂量と流量の関係を示す。図から、2015 年の出水では、ハイドログラフがふた山になったものの、濁度計による浮遊砂濃度はひと山のピークとなり、そのために浮遊砂量と流量の関係が一意に定まらず、ループを描く結果となった。これは、ハイドログラフのふた山目の出水では、さして土砂供給がなかったことを示唆するものである。2015 年の観測は、本来、2013 年の小出水時のデータの高流量域を補間することが目的であったが、2015 年のデータでは一意な q_s-Q 式を得ることはできていないため、本論文の解析では 2013 年のデータを使用した。

(2) 掃流砂量観測

図-10 に、掃流砂量の算定結果を示す。横軸は Ensemble Number となっているが、約 6 秒で 1 Ensemble の設定になっているため、時間軸とみなせる。図から、五料橋 (河口から 150 km) では平均で 32.5 cm/s、湊大橋 (1.8 km) では 3.68 cm/s のボトム・トラック速度となっている。五料橋は利根川中流域の狭窄部となっており、平水時でも流れが速いためにこのような値となっているが、これらの観測は出水時ではないことから、全般的にはやや小さめの値となっている。掃流砂量 q_b を、 v_s : 掃流砂層の移動速度、 C_s : 掃流砂濃度、 h_s : 掃流砂層厚を用いて式 (3) のように単純化して定義し、Rennie et al.⁷⁾ を参考に、(b), (d) に

(a) 五料橋における鉛直流速分布の時系列

(b) 五料橋におけるボトム・トラック速度

(c) 湊大橋における鉛直流速分布の時系列

(d) 湊大橋におけるボトム・トラック速度

図-10 ADCP による掃流砂量の算定

示す ADCP のボトム・トラック速度から v_s を求め、式 (4) に示す江頭の式⁸⁾ から $C_s \cdot h_s$ を算定した。

$$q_b = v_s \times C_s \times h_s \quad (3)$$

$$\frac{h_s}{d} = \frac{1}{C_s \cos \theta (\tan \phi_s - \tan \theta)} \tau_* \quad (4)$$

$$\tau_* = \frac{u_*}{(\sigma/\rho - 1)gd} \quad (5)$$

図-11 掃流砂量の比較

図-12 土砂供給量の算定結果

ここに、 ϕ_s : 砂の内部摩擦角、 θ : 河床勾配、 σ : 砂の密度、 ρ : 水の密度、 d : 砂の中央粒径である。

図-11 に、上述の方法で算定された掃流砂量と、芦田・道上式との比較を示す。ここに u_* は、ADCP によって得られた鉛直流速分布に対数則を適用して求めた。図において、五料橋は利根川中流域の観測地点である。図から、観測を行った小出水時あるいは平水時には、観測値と芦田・道上式による値がほぼ良好に一致することがわかる。但し、湊大橋においても五料橋においても、無次元掃流力 τ_* が大きくなると式からはずれる傾向がある。以上のことから、以降の掃流砂量の算定においては、流量データと等流仮定から摩擦速度 u_* を求め、それから τ_* を算定し、その値と芦田・道上式による流砂量式から掃流砂量を算定した。 u_* あるいは τ_* の算定については様々な手法があり、出水時の算定において等流仮定は不適当とも思われ、今後より最適な手法を示す必要がある。

図-12 に、得られた浮遊砂量と掃流砂量の値を示す。年間値は 2013 年の値である。図-8 に示すように、濁度デー

タは流量が $500 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上になると有意な値を示すことから、この流量以上を、土砂を伴う出水とみなして年間供給量を算定した。その結果、9月のひと出水で浮遊砂量が $27,400 \text{ m}^3$ 、掃流砂量が $19,100 \text{ m}^3$ となっている。通常、浮遊砂量よりも掃流砂量の方が多いものと考えられるが、本研究結果では逆になっている。那珂川はもとより細粒分が多いことと、川砂採取によって河口部の水深が比較的深いことによるものと考えられる。また、年間量では、前者が $33,600 \text{ m}^3$ 、後者が $38,300 \text{ m}^3$ と、ほぼ近い値となっている。栗山¹⁾によれば、芦田・奥村²⁾に従って算定された那珂川からの砂の供給量は $36,000 \text{ m}^3/\text{year}$ であるが、その際に土砂供給量の35～40%が砂であると仮定していることから、全土砂供給量は約 $90,000 \text{ m}^3/\text{year}$ となる。本手法による算定結果は $71,900 \text{ m}^3$ であり、比較的近い値となることがわかる。しかしながら、本手法による算定値は直接計測にもとづくものであり、より真値に近いものと考えられる。

4. 数値計算の概要

現地観測から得られた那珂川からの土砂供給量を境界条件として与え、鹿島灘の土砂動態について数値予測を行った。本論文では、計算の第一段階として、2013年9月の出水時を対象とし、河川からの土砂供給については浮遊砂のみを与えて計算を行った。数値計算には、Uzaki & Kuriyama⁹⁾によるWD-POMをさらに改良したものを用いた。本モデルは、潮汐と風波を考慮した泥と砂による三次元海浜変形モデルであり、Princeton Ocean Modelをベースに波浪場をエネルギー平衡方程式で、海浜流モデルをradiation stressモデル、泥の輸送を移流拡散方程式、砂の輸送をBailard式、海浜変形を土砂収支式で計算するモデルである。

表-1に計算パラメータを、図-13に潮流と海浜流場の流速ベクトルを示す。ここでx軸は沖向きに、y軸は沿岸方向にとっている。時間刻みdtにおいてexternalとinternalが存在することは、ベースとなるPOMが潮位と流速計算においてmode splittingを用いているためである。計算は、9月15日～18日について、潮流場と波浪場・海浜流場を対象として行われた。河川からの土砂供給量は、那珂川からの浮遊砂のみについて、図-8をもとにハイドログラフから時系列として与えた。同時に河川からの流量についてもハイドログラフで時系列として与えた。波浪データは、鹿島港のNOWPHASデータから、出水期間中の最大値を、沖側境界で一様に与えた。

5. 計算結果ならびに考察

図-13に、潮流と海浜流場のベクトル図を示す。図に

表-1 計算パラメータ

メッシュ数	nx	330	
	ny	598	
メッシュサイズ	dx	288	m
	dy	288	m
時間刻み	dt	external	0.1 s
		internal	1.0 s

図-13 潮流と海浜流場の流速ベクトル
(2013.09.17 満潮時)

おいて、流速ベクトルは間引いて描いている。与えられた潮位は、小名浜の潮位が銚子のそれよりもやや高く、波の入射角もやや南寄りであるため、潮流と海浜流の合成された流れ場は南から北へと流れている。汀線近傍ではやや強い北流が全域的に生じており、海浜流も北向きであることがわかる。那珂川河口においては、出水による沖向き流速ベクトルが認められる。

図-14に、流速ベクトルと地形変化を示す。図において、波崎漁港付近や大洗サンビーチ付近で堆積が認められる。波崎漁港付近では、犬吠埼による小規模な反時計回りの渦が形成され、南向きに土砂が輸送されて堆積する結果となっている。また、サンビーチ手前では局所的に侵食箇所も認められるが、基本的には北流が大洗港の防波堤で止められて、土砂の堆積が生じている。那珂川

図-14 流速ベクトルと地形変化 (2013.09.17 満潮)

河口南側の大洗公園付近では侵食傾向が認められるが、これは那珂川河口からの沖向き流速にのって、大洗港で上手からの土砂供給が遮蔽された上で、さらに北流した土砂が沖向きに流出することによるものと考えられる。これらの定性的特性は、宇多ら¹⁰⁾、勝山ら¹¹⁾も報告するような実海浜の傾向と一致する結果となった。

6. 結論

河川からの土砂供給量を直接計測によってより精度良く算定する手法を浮遊砂量・掃流砂量ともに確立し、現地適用した。得られた算定値は、他の研究者らの算定結果と比較的近い値となったが、本研究は直接計測に基づいており、より真値に近いものと考えられる。また、流量に依

存した形で評価されており、流量の時系列データがあれば、時系列データとして土砂量の算定が可能である。さらに、得られた土砂供給量を境界条件とし、広域土砂動態の数値予測を行った。その結果、定性的には実海浜における特徴を再現できる結果となった。

参考文献

- 1) 栗山善昭: 広域土砂収支図作成の試み, 水工学に関する夏期研修会講義集, Vol. 37, pp. B-5-1 -B-5-13, 2001.
- 2) 芦田和男, 奥村武信: ダム堆砂に関する研究, 京大防災研究所年報, Vol.15B, pp. 555-570, 1974.
- 3) 藤田光一: 流砂系における土砂動態のとりえ方と広域土砂動態制御への展望, 水工学に関する夏期研修会講義集, Vol. 36, pp. B-4-1 -B-4-15, 2000.
- 4) 谷沢肇, 宇多高明, 松浦健郎, 菊池泉弥, 福本崇継, 熊田貴之: 大洗港による那珂川流出土砂のトラップと遮蔽域内堆砂の実態, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 65 巻, pp.566-570, 2009.
- 5) Rennie, C. D., R. G. Millar and M. A. Church : Measurement of Bed Load Velocity using an Acoustic Doppler Current Profiler, *Jour. of Hydraul. Eng.*, Vol.128, pp.473-483, 2002.
- 6) 芦田和男, 江頭進治, 中川一: 21 世紀の河川学, 京都大学学術出版会, pp.129-131, 2008.
- 7) 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的研究, 土木学会論文集, 第 206 号, pp.59-69, 1972.
- 8) 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 B1 (水工学), 第 70 巻, pp. 651-655, 2014.
- 9) K. Uzaki & Y. Kuriyama : Numerical and field study of sediment budgets on an intertidal flat at the mouth of the Shirakawa River., *Proc. of River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, pp. 427-434, 2008.
- 10) 宇多高明, 住谷迪夫, 長山英樹, 大木康弘, 熊田貴之: 漂砂源の枯渇と護岸の前出しによって脆弱化した海浜の異常波浪による急激な侵食, 海洋開発論文集, 第 23 巻, pp.1201-1206, 2007.
- 11) 勝山均, 松浦健郎, 宇多高明, 熊田貴之, 長山英樹, 住谷迪夫: 鹿島灘海岸の侵食の実態と変形予測, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.576-580, 2007.

(2016. 3. 16 受付)

A STUDY ON THE ESTIMATION OF SEDIMENT DISCHARGE FROM THE NAKA RIVER INCLUDING THE FLOOD AND THE FORECASTING OF A REGIONAL SEDIMENT MOVEMENT OF THE KASHIMA-NADA SEA

Ken-ichi UZAKI, Makoto TAKAHASHI and Yusei TAKEDA

In this study, a method to estimate the sediment discharge from the river was established and the numerical forecasting of sediment movement of the Kashima-Nada Sea by applying the estimated value of discharge to the boundary condition. By using this method, yearly discharge was estimated at 71,900 m³/year in 2013. Numerical forecasting was conducted by using “WD-POM” which was the three dimensional numerical model of a regional sediment movement and beach erosion/deposition due to sand and mud by considering tides and wind waves. Numerical results showed the agreement qualitatively with the real coast.