長期データを用いた那珂川からの土砂供給量の推定と河口域での土砂の挙動に関する研究

RESEARCH OF SEDIMENT TRANSPORT BEHAVIOUR OFF THE RIVERMOUTH AND THE ESTIMATION OF SEDIMENT TRANSPORT QUANTITY FROM THE NAKA RIVER BY USING LONG-PERIOD OBSERVATION DATA

高橋 誠¹・戸屋 裕亮²・山田 航³・荒木 陽介⁴・堀口 真弥⁵・田井 明⁶・
松本 健作⁷・鶴崎 賢一⁸・清水 義彦⁹

Makoto TAKAHASHI, Yusuke TOYA, Wataru YAMADA, Yosuke ARAKI, Shinya Horiguchi, Akira TAI, Kensaku MATSUMOTO, Ken-ichi UZAKI and Yoshihiko SHIMIZU

¹非会員 群馬大学理工学部環境創生理工学科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

²非会員 埼玉県庁 (〒330-9301 埼玉県さいたま市浦和区高砂3-15-1)

³非会員 茨城県庁 (〒310-8555 茨城県水戸市笠原町978-6)

⁴, ⁵非会員 群馬大学大学院理工学府環境創生理工学専攻 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

⁶正会員 博(工)九州大学助教 高等研究院 (〒819-0395福岡市西区元岡744)

⁷正会員 群馬大学理工学研究院環境創生部門 助教, ⁸正会員 群馬大学理工学研究院環境創生部門 准教授, ⁹正会員 群馬大学理工学研究院環境創生部門 教授

Quantity of Sediment transport from the rivermouth is not well known. However, it is very important in order to calculate sediment transport and beach profile change in coastal zone. Many research activities by using ADCP to estimate sediment transport quantity were made. However, it is difficult to conduct field observations by using ADCP at the flood. Then, in this study, sediment transport quantity from the Naka River in the Ibaraki prefecture was estimated by using ADCP, the turbidity meter, and STD. Furthermore, sediment transport off the rivermouth was observed. In conclusion, the sediment transport quantity due to suspended component was well estimated and it was carried to the direction of southwest, the port of Ooarai.

Key Words : sediment transport, rivermouth, ADCP, turbidity meter, STD

1. はじめに

茨城県の鹿島灘の海岸侵食は全域的に深刻な状況である一方で、鹿島港における航路埋没もまた深刻な課題である。宇多ら¹⁾は、那珂川河口の大洗磯浜海岸の侵食状況を調べ、那珂川の供給土砂の減少をその原因として挙げているが、供給量の減少について直接的な裏付けはない。また、こうした侵食対策や航路埋没の対策を広域的に検討するための境界条件としても、那珂川からの土砂供給量を把握することは非常に重要である。しかしながら、河川の流量データは存在していても土砂供給量のデータはあまりないのが現状である。とくに実測値は皆無であり、掃流砂、浮遊砂・ウォッシュロードを含めて土砂供給量を精確に計測し、併せてそれらの沿岸域での挙動を推定することが本研究の目的である。本論文では、

浮遊砂・ウォッシュロード成分についての検討を行う。

土砂供給量については、橘田ら²⁾のようにADCPを用いて河道横断面の流速と後方散乱強度計測を利用する方法が広まりつつあるが、その方法だと横断面全域の流速分布・土砂濃度分布がわかるものの、出水ピーク時の観測が困難である。的確にピーク時の土砂供給量を計測するためには、重田ら³⁾のように濁度計の長期係留による観測が有効であるが、濁度計単体の計測では横断面の分布に関する情報に乏しい。そこで本研究では、両者の観測を行ってその結果を複合的に用いて那珂川からの土砂供給量を算定するとともに、その河口沖での挙動に関しても明らかにする。

2. 現地観測の概要

本研究の観測は、図-1に示す茨城県的那珂川河口周辺で行った。観測方法は河口近傍の海門橋においてADCP（超音波流速計、RD Instruments社製Workhorse）とGPS、観測船を用いて横断面の流速・後方散乱強度分布を計測するとともに、バンドーンを用いて採水を行った。また、海門橋からやや上流に位置する茨城海技学院の栈橋に濁度計（JFEアレック社製Compact-CLW）を長期係留させ濁度データを取得した。設置水深は水面下50cmとした。ADCPによる観測および採水は2012年10月9日・11月13日に、濁度計の係留期間は2012年10月11日～12月1日・2012年12月27日～2013年1月23日に行われた。観測期間ならびに得られた観測データの一覧を表-1に示す。なお、以降の本論文では、河川水にはプランクトン類が少ないと仮定して、SS濃度を浮遊砂・ウオッシュロード濃度とみなして検討を行っている。

3. 観測結果ならびに考察

(1) 濁度、流量、潮位、雨量の関係

観測結果の一例として、2012年11月12日から11月19日までの濁度計のデータを図-2に、潮位（大洗）と流量の関係を図-3に、雨量（水戸・那須）と流量の関係を図-4に示す。また、流量データに関しては、那珂川河口の湊大橋水位観測所では水位のみのデータしかなかったため、河口から約40km上流の野口水位観測所での流量データを用いる。観測所の位置関係を図-7に示す。

海門橋は河口域にあり、感潮域であるため、図-3に示す潮位変動の影響を受ける。それは水位上昇とともに塩水楔の侵入として現れる。図-2において、青線が濁度、赤線がchl.a濃度を示すが、河川水にはプランクトン類は少なく、海水に多いことを考えると、濁度とchl.a濃度が同時に上昇するイベントは塩水楔によるものである。これは、ADCPの計測データからも明らかであり、流量と潮時によっては水表面近傍まで楔が占める。従って、chl.a濃度が上昇せず、濁度が上昇するケース、図-2においては18日のケースに注目する。図-4においては、18日未明に出水があったこと、また、その直前に上流の那須、下流の水戸で降雨があったことがわかる。これらの結果

図-1 観測位置(出典: Google Earth)

からも、この濁度の上昇が出水によるものであることがわかる。19日にも同様のピークが認められるが、いずれも下げ潮時に観測されており、出水量と潮位の関係で濁度単体のピークが出現することがわかる。ここで図-2、図-4において、出水が大きく、より変化が鮮明でわかりやすい箇所を、図-5、図-6として記載する。また、図-2、図-5において極端に値が大きくなっている箇所が見受けられる。これはゴミなどがロープに絡まったことによる、正しい観測の値とは考えられないスパイクだと判断し、今回の考察では無視するものとする。

表-1 観測期間と得られたデータ

	観測期間	データ
ADCP	2012年10月9日 2012年11月13日	流速 後方散乱強度
採水		質量濃度 粒度分布
濁度計	2012年10月11日 ～2012年12月1日 2012年12月27日 ～2013年1月23日	濁度 Chl.a

表-2 ADCPの設定

測定モード	WMI
測定間隔	0.3m
ビームの発射数	3

図-2 濁度とchl. a濃度

図-3 潮位(大洗)と流量の関係

図-4 雨量(水戸・那須)と流量の関係

図-5 濁度とchl. a濃度

図-6 雨量(水戸・那須)と流量の関係

図-7 那珂川観測所の位置(出典: Google Earth)

(2) ADCPによる流速計測ならびに土砂濃度推定

図-8に、ADCPによる横断面の流速分布の一例を示す。図は、10月9日の上げ潮時のものであり、右側が左岸、左側が右岸である。暖色が下流方向の東向き、寒色が上流方向の西向き流速成分である。図から、表面ならびに

底面近傍は音波の反射のために流速計測ができないものの、水深1m以浅で下流方向、それ以深では上流向きの流れが生じており、後者は塩水楔であることがわかる。これはSTDを用いた観測結果の図-9からも、後者が塩水楔であることがわかる。図-9にSTDで得られた観測時の水温・塩分濃度・濁度の鉛直分布を示す。黄緑のプロットが水温、青が塩分濃度、赤が濁度を表す。水深2m以降で塩分濃度と水温が上昇しており、海水が存在していることが分かる。濁度は、表層の河川水部分が低く、深層の海水部分が高い結果となっている。これは、海水は河川水に比べ、クロロフィルを多く含んでいるためである。

図-8 横断面流速分布 (10月9日、上げ潮時、海門橋)

図-9 水温・塩分濃度・濁度の鉛直分布
(10月9日、上げ潮時、海門橋)

図-10 採水位置における距離補正した後方散乱強度

図中の各セルで音波の後方散乱強度も得られており、採水位置の該当するデータについて1分平均をとり、泉宮ら⁴⁾を参考に式(1)に示す距離減衰の補正式を用いた。

$$\sigma = I + 20 \log(r) + 2ar \quad (1)$$

ここに σ ：補正後の後方散乱強度， I ：観測値， r ：トランスデューサーからの距離， a ：補正係数である。ここに補正係数は観測地の特性が反映されるが、ここでは泉宮ら⁴⁾用いた値を参考に補正を行い、その結果が図-10である。図-11に、採水試料を粒径・粒度分布計 LISST-100 (Laser In-Situ Scatter and Transmissometry) を用いて分析した一例を示す。図から、出水量がさほど大きくないことと浮遊成分であることから、卓越粒径が30 μm 付近で非常に細かい粒子であることから、ウォッシュロードが卓越している状況であると推測される。これらのデータを積分してSS濃度を算定した。

ADCPの流速データにおいて、東向き流出成分となる位置のデータについて後方散乱強度とSS濃度の相関を調べた結果が図-12である。図から、後方散乱強度が増加すると土砂濃度が増加することを示す、右肩上がりの傾向を相関となることがわかる。プロットはやや頭打ちの傾向を示すが、この原因を明らかにすることは今後の課題である。図-13に、同時刻・同水深の濁度計による濁度のデータとADCPの後方散乱強度のデータの相関を示す。図から、後方散乱強度の増加に伴って濁度も増加する右肩上がりの関係があることがわかる。図-12、13の結果から得られたSS濃度と濁度の関係式を、式(2)に示す。

$$\ln(\text{SS}) = 0.5252 \ln(\text{Tb}) + 0.4307 \quad (2)$$

ここで、SS:SS濃度、土砂濃度、Tb:濁度である。

図-11 採水資料の粒径別濃度分布

図-12 後方散乱強度と土砂濃度の関係

図-13 後方散乱強度と濁度の関係

(3) 土砂量と流量の関係

前述したように、上げ潮時の濁度の増加のようにchl.a濃度の上昇と一致する濁度の上昇は塩水の遡上によるものと判断し、干潮時あるいは小出水時のみの濁度ピークについて式(2)を用いて土砂濃度に換算し、それぞれの値に対応する流速をかけて単位時間・単位面積当たりのフラックスを求めた。そのフラックスと流量との関係を図-14に示す。図から、流量が低い時と高い時で勾配の異なる直線で近似される。流速は流量に依存しているため、土砂濃度の変化によってこのような差が生じたと考えられる。これらは土砂の生産過程に違いがあるものと考えられるが、本論文ではそれを明らかにするまでには至っていない。その説明は今後の課題である。

図-14 土砂フラックスと流量の関係

(4) 土砂供給量の計算

(2)の関係式より換算した土砂濃度に流量をかけて、観測期間中の土砂供給量を計算した。

$$\text{土砂量} = \text{SS} \times \text{Q} \quad (3)$$

ここで、SS:土砂濃度、Q:流量 である。

ADCPの観測のみから算定した結果も併せ、それらの比較を表-3に示す。表において、「那珂川」がADCPの観測のみから算定した結果、「本研究による算定結果」が濁度計の長期係留データから求めた算定結果である。表から、同程度の流量においては、土砂供給量はオーダー的にはほぼ一致していることがわかり、いずれも妥当な算定であることが推察される。

表-3 土砂供給量の算定

	那珂川		本研究による 算定結果
	10月9日	11月13日	
流量 (m ³ /s)	63.9	71.0	61.4
浮遊砂量 (g/s)	334.8	774.6	327.5

(5) 河口沖での土砂の挙動

河川から供給された土砂の河口沖での挙動を検討するために、ADCPによる河口沖の流速データを整理した。観測結果の一例として、10月9日の上げ潮時の経路を図-13に示す。アメダスの風向データからこの時間には南および西向きの風が吹いており、波向きも西向きであった。流速データの一例として10月9日における水深0.69m地点の東西方向の流速データを図-14に示す。観測当日は降雨後でありやや波が高い状況であったため、船舶の動揺の影響を抑えるために生データに移動平均をかけた。その結果を図-15に示す。図においては、河口沖の河口横断方向の南向きの測線におけるデータのみを示す。図から、平均的には表層において西向きの流れがあることがわかる。図-16、17に、各水深における東西方向成分、南北方向成分の移動平均結果を示す。図から、観測時は全水深にわたって西向きとともに南向きの平均的な流れが存在していることがわかる。従って、総合的には南西の大洗方向に河川水が流出していることがわかる。STDの観測結果から、観測時には表層の数cmの厚さで河川水が流出していることがわかっている。従って、その挙動は表層流に依存すると考えられる。ADCPではその表層流の見積りにはやや難点があるが、全水深で同方向の平均流の傾向があること、ならびに那珂川河口では、北東寄りの風によって大洗方向に濁水フロントが伸びている様子がしばしば確認されていることから、本観測にお

図-15 上げ潮時の観測経路 (10月9日)

図-16 東西方向流速(水深0.69m地点)

図-17 平均化した東西方向流速(水深0.69m地点)

図-18 水深ごとの東西方向流速

図-19 水深ごとの南北方向流速

いても同様に大洗方向に河川水が流出している様子がうかがえる移動平均後に残る周期的なトレンド、とくに南北成分に顕著に認められる周期的な増減に関しては、今

後さらに詳細な検討を行必要性がある。

4. 結 論

ADCPを用いた横断面観測と濁度計による長期係留観測から、那珂川からの土砂供給量の算定を試みた。本研究で得られた主な結論を以下に示す。

- ① 那珂川河口では、塩水楔の侵入によって潮位に応じた濁度の上昇があるが、それは同時にchl.a濃度の上昇も引き起こす。
- ② 那須や水戸で降雨があると流量が増加し、濁度も増加するが、河川水由来の濁度上昇については、chl.a濃度の上昇は起きない。
- ③ LISSTによる採水試料の分析結果から、本研究におけるADCP観測時はウォッシュロード成分が卓越していることがわかった。
- ④ ADCPの後方散乱強度と採水結果から、SS濃度と後方散乱強度は正の相関がある。
- ⑤ 濁度計による濁度とADCPの後方散乱強度も正の相関があり、③の結果を併用してSS濃度の算定が可能となった。
- ⑥ 河川水はプランクトン類が少ないと仮定し、SS濃度を土砂濃度と考えて土砂供給量を算定すると、同規模の流量時では、濁度計の長期係留データとADCPデータとの算定はほぼ同オーダーとなり、いずれも妥当な評価であることが推察された。

今後は、この結果と年間の流量データから、年間の土

砂供給量を算定するとともに、梅雨ならびに台風による出水時のデータを用いて算定式の再評価を行い、沿岸域の土砂動態の計算に応用していく予定である。

謝辞：本研究を遂行するにあたって、国土交通省関東地方整備局常陸河川事務所ならびに茨城県農林水産部水産振興課には多大なご協力を頂いた。また、那珂川漁業協同組合、那珂川第一漁業協同組合にも多大なご協力を頂いた。ここに記して謝意を示す。観測自体については茨城海技学院ならびに茨城海上保安部に多大なご協力を頂いた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 宇多高明・住谷迪夫・長山英樹・大木康弘・熊田貴之 (2007)：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，土木学会海岸工学論文集，第23巻，pp.1201-1206.
- 2) 橋田隆史・下田力・疋田真・Hening Huang (2010)：ADCPによる河川洪水観測の先端技術と観測に際しての基礎的な技法，河川流量観測の新時代.
- 3) 重田京助・二瓶泰雄・坂井文子・大塚慧，東京湾主要流入河川における浮遊土砂輸送特性に関する基礎的検討，土木学会論文集B1（水工学），第52巻，pp.913-918，2008.
- 4) 泉宮尊司・國田知基・泉正寿・永松宏・石橋邦彦，船体取付型ADCPによるシルトおよび微細砂の濃度の時空間変動の地観測，土木学会論文集B2（海岸工学），第46巻，pp.576-580，1999.

(2013. 9. 30受付)