利根川汽水域における 細粒底質の浮上現象について

STUDY ON THE SURFACING OF FINE SEDIMENT IN THE TONE RIVER ESTUARY

石川忠晴¹・松延和彦²・箕浦靖久³・佐々木努⁴

Tadaharu ISHIKAWA, Kazuhiko MATSUNOBU, Yasuhisa MINOURA and Tsutomu SASAKI

¹フェロー会員 工博 東京工業大学教授 大学院総合理工学研究科環境理工学創造専攻
(〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259 G5-3)

²学生会員 学(工) 東京工業大学 大学院総合理工学研究科環境理工学創造専攻
(〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259 G5-3)

³学生会員 修(工) 東京工業大学 大学院総合理工学研究科環境理工学創造専攻
(〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259 G5-3)

⁴非会員 学(工) 東京工業大学 大学院総合理工学研究科環境理工学創造専攻
(〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259 G5-3)

Fine bed sediment in a river estuary is sometimes flushed by a freshet, and it affects bio-chemical condition in the estuary. The process of the phenomenon has not been much clarified yet because of the difficulty of measurements. This paper discusses the phenomenon by paying attention to black patterns of the water surface appearing on aerial photos taken in the Tone River estuary during a freshet. Sediment data suggests that the patterns correspond to deoxidized fine sediment raised from the channel bed. From correlations of the patterns with bed topography and flow field obtained from stereo analysis of the aerial photos, the process is considered as follows: A turbulent spot caused by a local depression of channel bed triggers sediment pick up and intensifies vertical mixing, raising the sediment to the water surface. The transverse shear between the vertically mixed zone and the surrounding flow generates further turbulence, resulting in the expansion of the zone of vertical mixing and sediment rising.

Key Words : River estuary, surfacing of fine sediment, aerial photo analysis, vertical mixing

1. はじめに

河川感潮域では塩分の影響により微細粒子がフロックを形成し沈降しやすくなる¹⁾。また堆積した粒子はエスチュアリ循環によって上流に輸送される^{2),3),4),5)}。このため塩水層が停滞する区間の表層底質は細粒成分が支配的となる。細粒底質は有機物や被酸化物質および栄養塩類を多く含むため、水環境に大きな影響を及ぼしている⁶⁾。特に貧酸素水塊の形成は汽水生物に大きな打撃を与えることがある⁷⁾。

しかし汽水域の底質状態は出水によって大きく変化する^{8),9)}。比較的大きな出水では細粒底質の層が消失して短時間に粗粒化し、その後の塩水回帰によって細粒化が徐々に進行する。出水時における観測は容易でないため、細粒化の過程に比較して粗粒化の過程は十分捉えられて

いない。加えて粗粒成分に比べて細粒成分の運動則に関する理論は未発達であり、数値計算などによる研究も十分行われていない状況にある。

本研究では、2001年9月の利根川出水時に撮影された汽水域の航空写真から、細粒成分の巻き上げ状況を推定し考察を加える。この航空写真では、汽水域下流部の水面に細粒底質の局所的浮上と思われる黒色の模様が捉えられている。そこで航空写真解析により流速分布、流線などを求め、黒色模様との対応関係を調べ、細粒底質の浮上メカニズムを考察した。

2. 出水による底質の粗粒化

(1) 対象河道の特性

検討対象である利根川汽水域の平面形状を図-1-1に、

図-1-1 利根川汽水域の平面図

図-1-2 16KPにおける断面図

代表的な断面形状を図-1-2に示す。利根川汽水域は延長約18.5kmで、緩やかな湾曲部を有するが概ね直線的な河道で、河床はほぼ水平（1/10,000程度）である。堤防法線間隔は約900m、低水路幅は約600mで、平常時の低水路水深は5m程度である。

平常時には潮汐に伴う流動が支配的である。ただし18.5Kにある河口堰から潮位変動に同期した放流が行われるため、自然の潮汐流動とは異なり、塩水楔の移動量は少なく、エスチュアリ循環が発達している⁷⁾。流量が250m³/sを超えると河口堰は全開となる。

(2) 底質粒度特性

小林ら¹⁰⁾は、利根川汽水域の多数の底質試料の粒度解析を行い、宇野ら¹¹⁾の方法を用いて利根川汽水域の底質データを整理した。その結果、①底質は式(1)で示す4つの対数正規分布の和で表わされること、②それらのうち細粒の2つの成分は常にほぼ同じ比率で一緒に現れるので一つのグループとみなせること、③したがって流況変化に伴う底質粒度変化は3成分の配分によって説明できることを示した。各成分の平均粒径および標準偏差を表-1に示す。

$$f(D)dD = \sum_{i=1}^N \alpha_i \frac{1}{s_i \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(X - X_i)^2}{2s_i^2} \right\} dX \quad (1)$$

ここに、 $X = \log D$, $X_i = \log D_i$, $s_i = \log \sigma_i$ である。

D_i, σ_i, α_i はそれぞれ第*i*成分のモード径、幾何標準偏差、

成分割合であり、最小二乗法を用いて決定される。

表-1 各成分の平均粒径と標準偏差

成分名		平均粒径 [μm]	標準偏差 [μm]
シルト	第一成分 (75%)	7.9	3.3
	第二成分 (25%)	36.2	1.8
細砂		100.0	1.7
粗砂		200.0	1.5

図-2 粒度分布と解析結果

図-3 細粒底質の写真

図-2に底質粒度分布と上記の式で成分分解した結果を示す。本論文で対象とする細粒底質は1～80μmの広い粒度を持つ成分で、主体はシルトである。図-3に河床から採取した細粒底質の写真を示す。ごく表層の数mmを除くと嫌気化して黒色を呈している。

(3) 出水時の粗粒化

鈴木ら⁹⁾は2001年8月から2002年2月にかけて、利根川汽水域において底質調査を実施し、2001年9月12日出水に伴う粗粒化と、その後の細粒化の経過を報告している。鈴木らのデータを小林ら¹⁰⁾が再整理して前述の3成分の配分比を求めた結果を図-4(a)に示す。また最近行われた底質調査のうち、2008年8月と2009年8月11日出水の前後の調査の結果を図-4(b)および図-4(c)に示す。なお、2008年には6,7月に500~1000m³/sの小出水が度々生じていたが、その間の調査データはない。2001年9月出水と2009年8月出水のピーク流量はいずれも当該年の最大流量であり、最近20年の年最大流量の中で2001年出水(7,813m³/s)は第2位、2009年出水(2,759m³/s)は第11位であった。

2001年出水後の調査(10月9日)は出水からやや時間が経っていたため部分的に細粒分が現れているが、出水直後には汽水域の大部分が粗粒化していたものと考えら

れる。これに対して2009年出水では粗粒化は上中流部に限られている。また2008年のたびたびの小出水後の粗粒化も上中流域に限られている。このことから、出水による底質の粗粒化は上流側から始まるのではないかと思われる。下流部の底質は塩水に接する機会が多いので、細粒分の堆積厚が大きいのか固結度に違いのある可能性がある。あるいは地形的な要因で局所的に上中流部の掃流力が大きいことなども考えられる。

3. 洪水航空写真解析

(1) 浮上した細粒底質が作る水面模様

2001年出水を含む期間の布川流量時系列を図-5に、利根川河口堰で推定された出水時の流量時系列を航空写真撮影時刻とともに図-6に示す。撮影は洪水ピークの10時間後に行われた。一般に掃流力のピークは洪水流量のピ

図-8-1 8-2Kの航空写真

図-8-2 航空写真に対応する地形

図-9-1 解析結果(流速ベクトル)

図-9-2 解析結果(流線)

ーク以前に生じるので、写真撮影の時刻は河床洗掘の最盛期を過ぎていたと考えられる。

洪水航空写真を合成して図-7に示す。黒色の濃淡が随所に見られるが、特に10Kの利根かもめ大橋の下流側と7K以降で濃くなっている。これらは細粒底質が水面に浮上した結果であると考えられる。前者は橋脚の位置に対応していることから、橋脚背後の馬蹄形渦により巻き上げられたものと考えられる。一方下流部の巻き上げ部分には人工構造物は存在せず、河床地形に関係している可能性がある。そこで図-8-1と図-8-2に下流部の航空写

真と地形図を拡大して示す。黒色の水面模様は“いくつかのポイント”から発生し、下流に向かって拡大している。そのポイントの多くは、赤色の楕円でマークするように、地形図上の深掘れに対応しているように見える。すなわち細粒底質の巻き上げは、河道全体で同時に発生するのではない。このことから、河道平均的な掃流力よりも、局所的な地形により発生する乱れの増大が引き金となって生じるのではないかと考えられる。実際、深掘れ部分では強い乱れと上昇流が発生することが知られている¹²⁾。なお黄色の楕円については(2)で述べる。

図-10 断面形と流速横断分布

(2) 航空写真解析結果および考察

航空写真解析は箕浦ら¹³⁾の方法を用いた。飛行方向(x)とそれに直交する方向(y)に等間隔の矩形格子を設定し画像相関法を適用する。その際、画像ピクセルごとの相関係数をCIP内挿し三次精度で流速ベクトルを求める。ただし画像相関法は画像濃淡の薄い部分などで正しい結果を得られないこともあるので、さらにステレオ画像上で解析者が過誤を直接修正する。作成された矩形格子上の流速データをさらにCIP内挿し、ルンゲクッタ法により流線方程式を積分し流線図を作成した。図-9-1に流速ベクトル図を、図-9-2に流線図を航空写真に重ねて示す。なお流線は写真ごとに求めているので連続してはいない。水面の黒色の特に濃い2断面A,Bについて、流速横断分布を横断地形図とともに図-10に示す。図中の緑色の網掛けは、航空写真で黒く見える部分を示している。この部分の流速が周囲より減少していることから、底層水の“湧昇”または底層水と表層水の“鉛直混合”が生じ、それに伴い細粒底質が水面に浮上したものと考えられる。

底層水の湧昇は河道湾曲による二次流や並列螺旋流あるいは橋脚などの構造物に伴い生じることが多い。その場合は図-11の断面内流れの概念図に示すように、下層水が表層水を押し上げて表層に広がる。したがって、湧昇によって運ばれた細粒底質の外縁は表層流線と概略一致することになる。しかし図-9-2に示した表層流線は、黒色域が拡大する部分では一致していない。このことから湧昇流は明確には存在せず、鉛直混合によって底質が表層に運ばれているものと推察される。

一般に河床の凹部で乱れが増加し鉛直混合が発生しやすい¹²⁾。図-8-1と図-8-2の赤色の楕円の対応はこの現象を表していると考えられる。また浅い領域から深い領域に流線が斜めに侵入する場合にも同様の力学的効果が生じるものと推測される。図-8-1と図-8-2の黄色の楕円は、図-9-2の流線図をもとに該当する部分を示したものである。この部分でも水面が黒色になっていることがわかる。

(3) 細粒底質浮上のメカニズム

以上の知見をもとに、利根川汽水域下流部での細粒底質浮上の概念モデルを以下のように考えた。

シルトを主体とする細粒底質は有機物などを含み、ま

図-11 2次流による底質巻き上げ

(a) 河床凹部前後での鉛直流速分布の変化

(b) 領域の設定

(c) 領域 I, II での流速

図-12 鉛直混合の概念モデル

た電氣的性質も持つ。このため砂などの粗粒底質と異なり、河床に堆積後には粘着性ないし固結性が増加してくる。実際、採泥した底質は、図-3に示したように採取後も形が崩れない。その結果、出水時に発生する大きな掃流力でも容易には巻きあがらない可能性がある。

しかし河床面に凹凸がある場合、図-12(a)に示すように、下り斜面で流速鉛直分布に変曲点が生じ、乱れが増加しやすい。この局所的乱れの増加により河床から細粒底質が巻きあがる可能性がある。また局所的な鉛直混合の増大により流速が上下方向に一樣化するとともに、巻きあがった底質が上方に輸送される。河床の凹部で鉛直混合が進み流速が一樣化した部分を領域-I、その外側を領域-IIとする(図-12(b))。底層付近では領域-Iでの流れが速く、表層付近では領域-IIでの流れが速い(図-12(c))。したがって両領域の境界付近では横断方向のせん断が発生し、鉛直混合の強い領域が領域-IIに向かって広がっていくものと考えられる。

4. おわりに

本研究では、利根川汽水域下流部における出水時の細粒底質巻き上げの機構について、2001年9月出水時の航空写真をもとに考察した。その結果を以下に要約する。

- ・ 細粒底質の巻き上げは、河床が窪んでいる箇所から発生し、両側に拡大していく。したがって、着目した現象の発生は局所的条件に規定されている。
- ・ 巻き上げ領域拡大部の外縁線は流線と一致しないことから、底質の巻き上げは螺旋流的運動によるのではなく、窪地での乱れ増大に起因する鉛直混合に依存していると考えられる。
- ・ 巻き上げ領域外縁では横断方向のせん断により乱れが発生し、その結果として、乱れ領域の両側への拡大が生じ、巻き上げが側方に伝播していく。

以上は、現段階ではあくまで推測であり、今後確認していかなければならない要素を多々含んでいる。しかしながら、航空写真に現れた現象は、“掃流力分布に従ってPick upされる”という従来の粗粒成分に対する流砂現象の考え方では理解しにくい面が多く、議論を喚起するという点を重視して報告させていただいた。

謝辞：本研究の実施にあたり、国土交通省関東地方整備局利根川下流河川事務所から種々の助力をいただいた。また本研究は科学研究費（基盤研究(B)：20360217）および河川整備基金（20-1151-001）の補助を受けている。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 山下俊彦・森田真郷・杉原幸樹・斎藤大作・山崎真一：石狩川河川水中の懸濁粒子の海水混合による凝集過程に関する研究，海岸工学論文集第 49 巻，pp.1016-1020, 2002.
- 2) Postma,H. : Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment, In *estuaries*, AAAS Publication, No.83, pp.158-179, 1967.
- 3) Festa J.F. and Hansen D.V. : Turbidity maxima in partially mixed estuaries : a two-dimensional numerical model, *Estuarine and Coastal Marine Science*, 7, pp.347-359, 1978.
- 4) 鈴木伴征・Arthur SIMANJUNTAK・石川忠晴・Jorg IMBERGER・横山勝英：利根川河口堰下流部における潮汐流動に伴う微細粒子の運動，水工学論文集第 48 巻，pp.775-780, 2004.
- 5) 八木宏・大森義暢・高橋亜依：多摩川河口域における流れと懸濁物質輸送特性について，海岸工学論文集第 50 巻，pp.461-465, 2003.
- 6) 例えば，山内克典：長良川河口堰が底質と二枚貝に与えた影響，応用生態工学 5(1)，pp.53-71, 2002.
- 7) T.Ishikawa, T.Suzuki, X.Qian : Hydraulic Study of the Onset of Hypoxia in the Tone River Estuary, *Journal of Environmental Engineering* Volume 130, Issue 5, pp. 551-561, 2004.
- 8) 鈴木伴征・大作和弘・石川忠晴：洪水に伴う利根川感潮域の底質変化，河川技術論文集第 9 巻，pp.265-268, 2003.
- 9) 川西澄・筒井孝典・中村智史・西牧均：太田川放水路における土砂動態と底質変動，海岸工学論文集第 52 巻，pp.906-910, 2005.
- 10) 小林侑・佐々木努・石川忠晴・箕浦靖久：利根川感潮域における底質特性の季節変動について，水工学論文集第 54 巻，pp.679-684, 2010.
- 11) 宇野宏司・中野晋・亘隆史：四国周辺の干潟における稀少種「シオマネキ」の生息地適性評価，海洋開発論文集第 18 巻，pp.185-190, 2002.
- 12) 瀬津家久・門田章宏・新橋秀樹・倉田昌明：河床波上非定常開水路流れの時空間相関構造に関する研究，土木学会論文集 No.579/II-41，pp.125-136, 1997.
- 13) 箕浦靖久・石川忠晴・吉田圭介：実体視と相互相関解析を併用した洪水航空写真解析手法の構築と検証，水工学論文集第53巻，pp.997-100, 2009.

(2010. 9. 30受付)