

# 利根川感潮域における底質特性の 季節変動について

## SEASONAL VARIATION OF BOTTOM SEDIMENT CHARACTERISTICS IN THE TONE RIVER ESTUARY

小林 侑<sup>1</sup>・佐々木 努<sup>2</sup>・石川 忠晴<sup>3</sup>・箕浦 靖久<sup>4</sup>

Yu KOBAYASHI, Tsutomu SASAKI, Tadaharu ISHIKAWA and Yasuhisa MINOURA

<sup>1</sup>学生会員 学(工) 東京工業大学大学院 修士課程 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259番G5-3)

<sup>2</sup>非会員 学(工) 東京工業大学大学院 修士課程 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259番G5-3)

<sup>3</sup>フェロー 工博 東京工業大学大学院 教授 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259番G5-3)

<sup>4</sup>学生会員 修(工) 東京工業大学大学院 博士課程 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259番G5-3)

A series of field measurement was carried out once in a month from August, 2008 to September, 2009 in order to investigate seasonal variation of sediment characteristics in Tone River Estuary. Grain size distribution was analyzed for about 300 sediment samples collected in the estuary. A result of mode analysis showed that the bottom sediments in the estuary can be decomposed into three particle families; silt, fine sand and coarse sand, each of which is approximated by a log-normal function. Seasonal variation of bottom sediment characteristics was discussed being based on the composition of above mentioned three particle families. Coarse sand was dominant in the estuary after the flood of 8,000m<sup>3</sup>/s or frequent fully open of the dam gates while the river flow rate is not so large (500 m<sup>3</sup>/s ~1,000m<sup>3</sup>/s). After then, the area of silt spread from downstream and the layer of silt became thick. This motion is considered to be caused by the estuary circulation which developed under the small river flow rate.

**Key Words :** estuary, bottom sediment, grain size distribution, mode analysis, field measurement

### 1. はじめに

河川感潮域は河から海への遷移領域である。平常時は入江に近い水理状態であり塩水が遡上し細粒土砂の堆積が促進される。出水時には一方向流れが卓越し、底質の粗粒化が生じる。その結果、感潮域の底質特性は河川の流量に応じて時空間的に大きく変化する。

底質は感潮域の水環境と深く関わっている。とりわけ細粒分は栄養塩や有機物のキャリアとなり、また貧酸素水塊の形成<sup>1)</sup>など水質に与える影響も大きい。そのため、感潮域の環境を理解する上で底質特性の変化を把握することは重要である。

鈴木ら<sup>2)</sup>は利根川感潮域での観測から、出水後に底質が粗粒化した後に、細粒分が下流から堆積していくことを示唆している。川西ら<sup>3)</sup>は太田川放水路で出水後に細粒分が下流に輸送され、それが潮汐作用で回帰することを示している。また横山ら<sup>4)</sup>は筑後川感潮域で出水後に軟泥がフラッシュされ、その浸食量が出水規模に依存す

ることを示している。これらの現地調査はそれぞれ約半年に及んでいる。しかし、感潮域の底質環境は出水時の流況のみならず、通年の流量変動によって形成されると考えられるため、通年的な底質変化を調べる必要もあると考えられる。

ところで、以前の研究では、細粒分の動態は主に砂・シルトの便宜的区分(74 $\mu$ m)に基づき論じられた<sup>2) 3) 4)</sup>。ところが感潮域の底質の粒度分布は複数のピークを持つことがあり、各感潮域固有の“粒子群”の組み合わせである可能性がある。宇野ら<sup>5)</sup>は干潟の底質についてその粒度組成から2つの粒子群に分けて動態を解析している。

そこで本研究では、利根川感潮域において、1年間にわたって河道縦断的な底質調査を実施し、出水時・平水時を通して底質動態の把握を試みた。また粒度分布をモード解析することにより、底質を構成する複数の粒子群の割合の変化をもとに、底質特性の季節変化を考察した。また鈴木ら<sup>2)</sup>のデータを再解析し、底質変動に対する出水規模の影響を調べた。

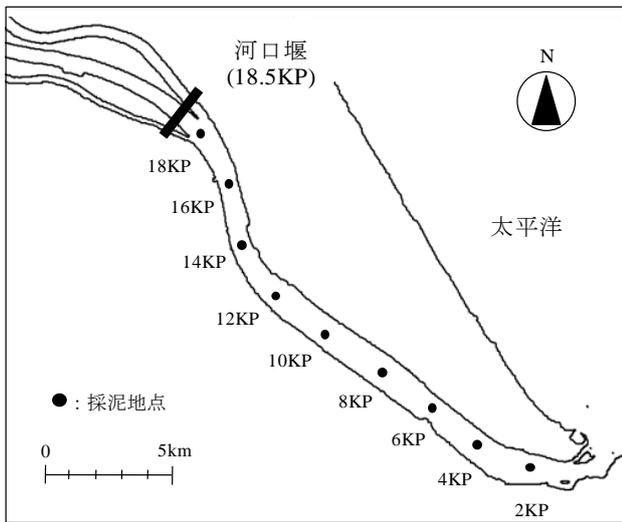


図-1 利根川感潮域の平面図

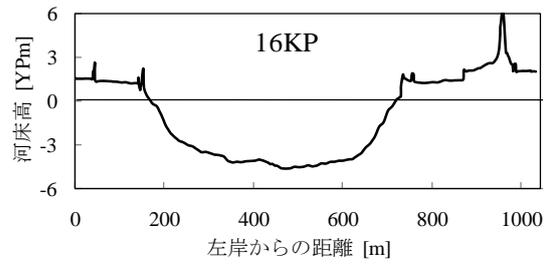


図-2 16KPにおける河道断面図 (平成11年測量)

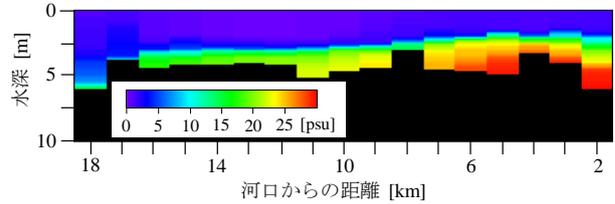


図-3 平水時の塩分縦断分布 (1996年9月13日:鈴木ら<sup>6)</sup>)

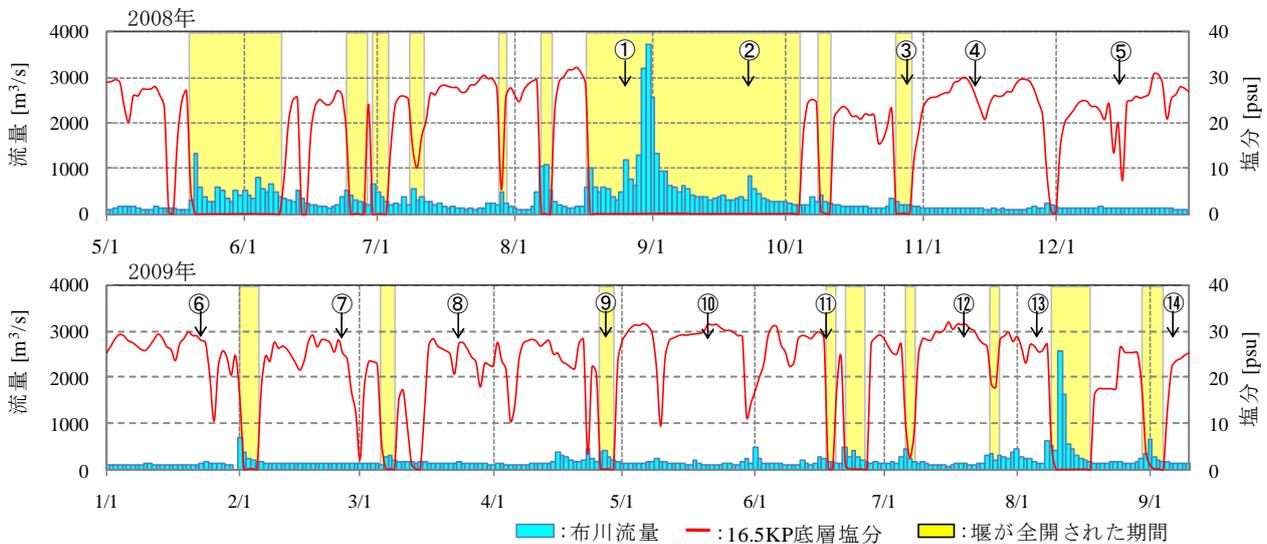


図-4 2008-2009年の観測期間における布川流量、16.5KP底層塩分濃度の時系列

## 2. 現地調査の概要

### (1) 対象水域

図-1に対象水域を示す。調査区間は2KP～18KPまでの16kmの区間である。“KP”は河口からの縦断距離を示す。河道は概ね直線的で、大きな蛇行部はない。図-2に代表的な断面を示す。地形データは国土交通省に提供して頂いた。堤防法線間距離は約1,000m、低水路は幅約600m、水深約5mの典型的複断面である。なお河床勾配は1万分の1以下でほぼ水平である。

18.5KPの位置に河口堰が建設されている。河口堰は塩害防止と新規利水開発を可能にするが、堰下流域の流動性を低下させるため、図-3に示すように塩淡二層状態が強められる。河口堰の開閉操作は堰上流の流量と潮位に依存している。平水時には、堰下流側の水位が高い時に全閉、低い時に半開になる。鈴木らの現地観測<sup>6)</sup>によれば、平水時には塩水楔は河口堰近傍まで遡上し停滞していることが多い。流量が約250m<sup>3</sup>/sを超えると堰は全開

となり塩水楔は下流に後退する。

### (2) 調査期間の流況

底質調査は2008年8月～2009年9月の約1年間にわたって14回実施された。図-4に調査期間中の日平均流量(布川地点:76.5KP)および堰から2km下流に当たる16.5KPの底層塩分の時系列を示す。図中の①～⑭は各調査日を示し、黄色で示す期間には堰が全開操作が行われていた。流量データは国土交通省、底層塩分および堰操作データは水資源機構に提供して頂いた。

2008年の夏から秋にかけて、ピーク流量が1,000 m<sup>3</sup>/s程度の出水が数回生じ、またピーク流量3,700 m<sup>3</sup>/sの出水が8月の終わりに発生した。この期間は約1ヶ月半にわたり堰が全開となり、塩水楔は下流に後退していた。なお、利根川下流河道の計画流量は9,500 m<sup>3</sup>/sであるので、この規模の出水は比較的頻繁に生じ得る。

2008年秋から2009年の夏までは大きな出水はなく、堰の全開操作もほとんどなかった。16.5KPの底層塩分は概ね20psu以上であり、塩水楔がほとんど河口堰付近

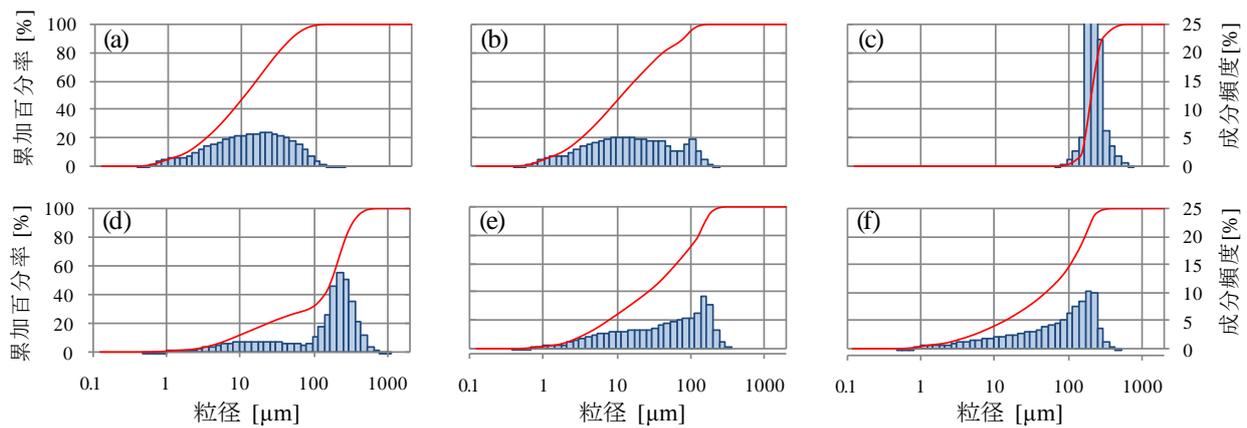


図-5 利根川感潮域における代表的な粒度分布

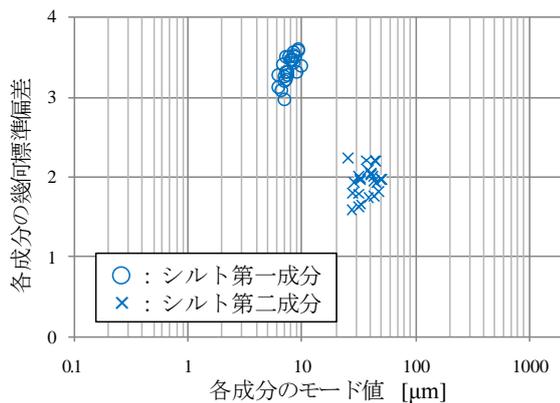


図-6 多成分モデルの適用結果（細粒分のみ）

まで達していたと考えられる。2009年夏にはピーク流量 2,600m<sup>3</sup>/s の出水が生じたが、これ以外に大きな出水はなく、2008年と比較して流量は全体的に少なかった。

### (3) 調査方法

底質調査は 2KP～18KP 区間の滞筋において 2km ごとを実施された。この水域では観測用標識の常時設置は認められていないため、採泥地点の緯度経度を予め調べておき、現地では DGPS (Trimble 製:TSC1) を用いて各採泥地点に移動した。採泥にはエクマンバージ採泥器 (離合社製:5141-BW) を用い、また多項目水質計 (JFE アレック製:AAQ1182) を用いて塩分の鉛直分布を計測した。底質採取厚さは約 5cm で、その表層 1cm 程度の粒度分布を計測した。なお底質が層を成している場合は層ごとに分けて分析した。粒度分析にはレーザー回折式粒度分析装置 (島津製作所製:SALD-3000) を用いた。なお本論文では表層底質の分析結果についてのみ述べる。

## 3. 粒度分布解析

### (1) 利根川感潮域の底質

約300のサンプルを分析したところ、類似したパターンが見られた。図-5に代表的な粒度分布形を示す。(a)は粒度の幅が大きく細粒分が卓越している状態、(b)は中央

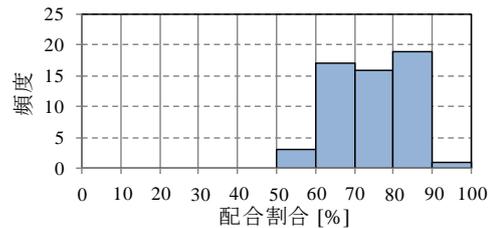


図-7 シルト第一成分の配合割合

粒径100μm程度の細砂と(a)の細粒分が重合した状態、(c)は中央粒径200μm程度の砂が単独で現れる状態、(d)は(a)と(c)の複合、(e)と(f)は3種類以上の成分が重なっている状態のようにみえる。以上の結果は利根川感潮域における底質が複数の“粒子群”の組み合わせである可能性を示している。そこで本研究では、次に述べるモード解析により、粒子群の特性と構成比の変化を調べることでより底質特性の動態を考察することとした。

### (2) モード解析

宇野ら<sup>5)</sup>は四国の干潟における底質の粒度分布が細粒と粗粒の2つのピークを持つことと、各粒子群の粒度分布が対数正規分布に従うことを示した。

前述したように、利根川感潮域の底質は3つ以上の粒子群で構成されている可能性があることから、本研究では、宇野らの手法を次式(1)のように  $N$  個の粒子群を含む多成分モデルへと拡張した。

$$f(D)dD = \sum_{i=1}^N \alpha_i \frac{1}{\log \sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(\log D - \log D_i)^2}{2 \log^2 \sigma_i} \right\} d(\log D) \quad (1)$$

ここに、 $D_i$ 、 $\sigma_i$ 、 $\alpha_i$  は第  $i$  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。 $N$  は近似に用いる粒子群数である。以下では、この手法を「多成分モデル」と呼ぶ。なお  $N$  を 2 とすると宇野らの手法となる。

ところで図-5(a)に示した細粒成分は利根川感潮域に頻りに現れ、その粒度分布曲線も概ね同形であることから、ひとつの粒子群であると考えられる。ただし粒度分布曲線はやや非対称であり、1つの対数正規分布で近似できない。そこでまず、細粒分のみの多数のサンプルに

対して上記のモデル式を適用したところ、概ね2つの対数正規分布で近似できることがわかった。各々の中央粒径と幾何標準偏差を求めたところ図-6 に示す結果を得た。図-7 は図-6 のシルト第一成分割合の頻度分布を示し、60%~90%の範囲に概ねかたまっている。すなわち、どの粒径分布も、ほとんど同一の2つの対数正規分布で表現される。そこで各々の分布のパラメータの平均値を採用し、 $D_1=7.90[\mu\text{m}]$ 、 $D_2=36.27[\mu\text{m}]$ 、 $\sigma_1=3.30[\mu\text{m}]$ 、 $\sigma_2=1.79[\mu\text{m}]$ とした。また成分割合は $\alpha_1=74.97[\%]$ 、 $\alpha_2=25.03[\%]$ として細粒分の粒度分布を表現することとした。以下、この粒子群を「シルト成分」と呼ぶ。

以上の準備の後に、式(1)をすべての底質サンプルに適用したところ、各サンプルの中央粒径と幾何標準偏差として図-8 に示す結果を得た。シルト第一成分とシルト第二成分は先ほど求めた値である。したがって、利根川感潮域の底質はシルト成分のほかに、中央粒径100 $\mu\text{m}$ 程度の砂分(緑)と中央粒径200 $\mu\text{m}$ 程度の砂分(赤)から構成される。以下では便宜的に前者を「細砂成分」、後者を「粗砂成分」と呼ぶことにする。

図-9に式(1)による近似曲線と実際の粒度分布を比較する。なお図-8によれば、細砂成分と粗砂成分の境目(150 $\mu\text{m}$ 程度)は必ずしも明確ではない。しかし、(e)および(f)が以上の3成分により良好に近似される上、シル

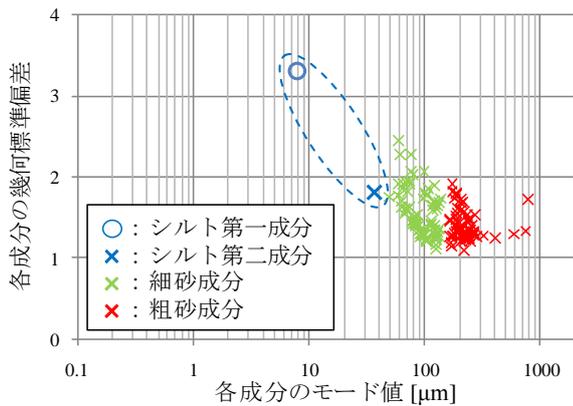


図-8 多成分モデルの適用結果 (全サンプル)

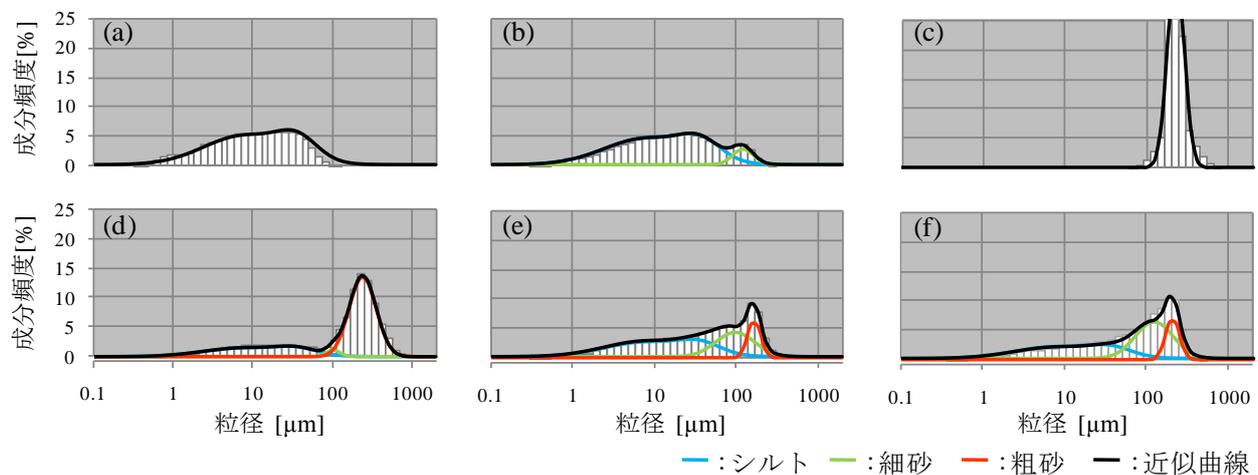


図-9 多成分モデルによる近似曲線と粒度分布の比較

ト成分と粗砂成分はそれぞれ単独で現れ得るのに対し、細砂成分は必ずシルト成分とともに現れることから、細砂成分と粗砂成分は起源が異なる可能性があると考え、本研究では別の成分として取り扱うこととした。

#### 4. 底質特性の季節変化とその考察

##### (1) 2008-2009年の結果

図-10 に多成分モデルにより求められた粒子群の構成割合の縦断分布を、観測日ごとに示す。

①と②は2008年8月から9月にかけて流量が大きかった期間の調査結果であり、感潮域の上流域で粗砂成分が卓越した。①と②の間に3,700 m<sup>3</sup>/sの出水が生じたが、粗砂成分の卓越範囲には大きな変化は見られない。

③~⑤に示す調査結果から、細粒化が下流側から徐々に進行してきた様子が伺える。⑤の調査の時点で、シルト成分は感潮域の全域にわたって堆積した。10月上旬には16.5KPの底層塩分は概ね20psu以上であり、塩水楔が河口堰近傍まで遡上し停滞していたことから、シルト成分の堆積は塩水楔の停滞によると考えられる。

⑥~⑬では感潮域全体でシルト成分が卓越していた。2008年冬から2009年夏にかけては500m<sup>3</sup>/s以上の流量は一度だけであった。このことから、非出水期にはシルト成分の堆積が進行しているものと考えられる。

⑭は2009年8月に生じた2,600 m<sup>3</sup>/sの出水から1ヶ月後の調査結果である。2008年と同様に感潮域の上流域で粗砂成分が現れる傾向が見られるが、その割合は2008年に比べて小さい。2009年夏は利根川流域の降雨が少なかったため、2008年と比べて流量が全体的に小さく、また河口堰が全開となった期間も短かったためであると考えられる。

ところで、2008年は1,000m<sup>3</sup>/s程度の洪水で粗粒化している(①)。その前は計測していないので定かではないが、2008年は5月に1,300m<sup>3</sup>/sの洪水が生じ20日間ほど堰が全開となり、その後も500~1,000m<sup>3</sup>/sの洪水が度々生

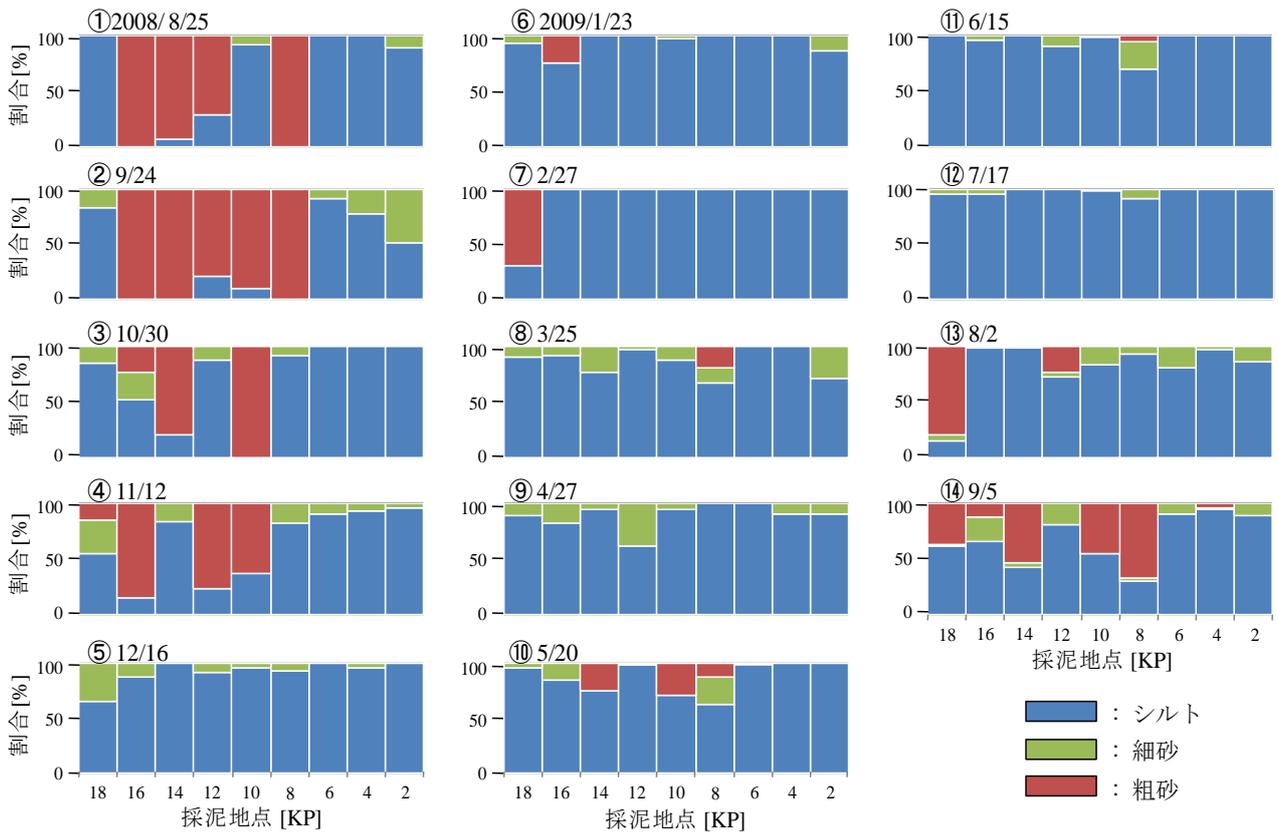


図-10 2008-2009年の各粒子群の構成割合の変化

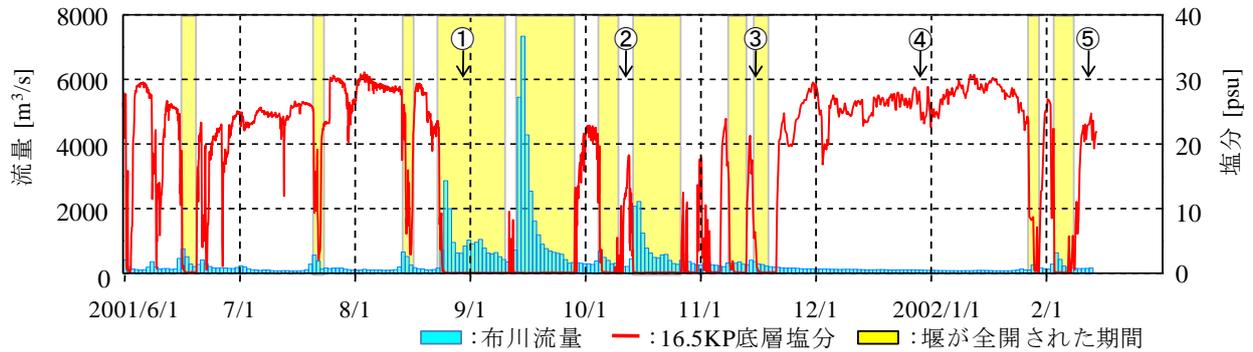


図-11 2001-2002年の観測期間における布川流量, 16.5KP底層塩分濃度の時系列

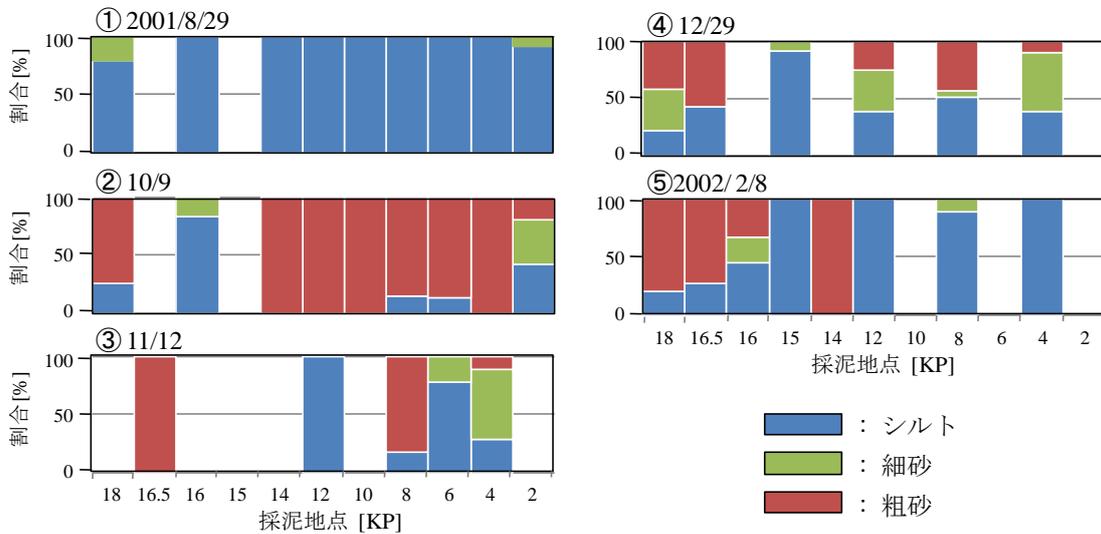


図-12 2001-2002年の各粒子群の構成割合の変化

じていることから、シルト成分の層が徐々に削られ粗粒化していたのではないかと考えられる。一方で2009年8月の洪水以前は小流量期間が長く、塩水楔が停滞してシルト成分が厚く堆積していたために④であまり粗粒化しなかったと推測される。これは単発的な洪水(3,000m<sup>3</sup>/s程度)では底質はあまり変化しないが、堰が断続的に全開になると粗粒化しやすいと考えられる。

## (2) 2001年の結果

今回の観測期間中の最大流量は3,700 m<sup>3</sup>/sであったが、2001年にはピーク流量8,300 m<sup>3</sup>/sの洪水が生じている<sup>2)</sup>。そこで、2001年に得られた粒度分布データに多成分モデルを適用し、洪水規模の違いによる影響を調べた。

この底質調査は2001年8月～2002年2月の約半年にわたり5回実施された。図-11に調査期間中の日平均流量および16.5KPの底層塩分を示す。図中の①～⑤は各調査日を表している。調査期間中に3回の洪水が生じた。1回目は8月下旬に生じピーク流量は3,400 m<sup>3</sup>/s、2回目は9月上旬でピーク流量8,300 m<sup>3</sup>/s、3回目は10月上旬でピーク流量2,600 m<sup>3</sup>/sである。

図-12に2001-2002年における粒子群の構成割合の縦断分布を観測日ごとに示す。①は3,000 m<sup>3</sup>/s規模の洪水後だが全域でシルト成分が卓越し、粗粒化は生じていない。この理由として、出水前に小流量が継続し塩水楔が停滞していたことが挙げられる。

しかし、8,300m<sup>3</sup>/sの洪水後の②では、感潮域の全域に渡って粗砂成分が卓越した。すなわち、この規模の洪水は十分大きな掃流力を発生し、底質の状態を大きく変化させることを示唆している。

③～⑤は流量の小さい期間であり、徐々にシルト成分が増加しているが、⑤(出水の5ヶ月後)の時点でも上流域で粗砂が見られる。2001年は11月下旬まで断続的に堰が全開操作され、塩水楔が遡上・停滞したのはそれ以降であり、シルト成分の回帰が遅かったためと考えられる。また、2008-2009年と同様に下流側からシルト成分が増加していく傾向が見られる。利根川感潮域においては比較的強いエスチュアリー循環の生じることが示されており<sup>7)</sup>、これによりシルト成分が上流側に輸送され、下流側から徐々に堆積していくものと考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、利根川感潮域を対象として1年にわたる連続的な底質調査を行い、モード解析を用いて底質特性の季節変動について考察した。その結果、以下のような知見を得た。

(1) 利根川感潮域の底質は、その粒度分布がシルト成分、細砂成分、粗砂成分の3つの粒子群の組み合わせに

よって構成され、それらは対数正規分布曲線によって近似される。

(2) 降水量の多い夏から秋にかけては粗砂成分の割合が増加し、冬から翌年の夏にかけて降水量が少ない期間にはシルト成分が回帰し、その厚さは徐々に増加する。シルト成分はエスチュアリー循環によって下流側から輸送されると考えられる。

(3) 塩水楔の停滞によりシルト被覆が厚くなった状況では、単発的な2,000～4,000 m<sup>3</sup>/s規模の出水では底質は変化しない。一方、堰が頻繁に全開操作されると河床表層のシルト成分は徐々に剥がされ、底質は粗粒化する。しかし8,000 m<sup>3</sup>/s規模の出水になると短時間のうちに感潮域全域にわたって底質の粗粒化が生じる。

今回の現地観測では河川最深部における採泥を中心として行ったため、河川横断的な底質特性の変化については検討できていない。今後は河川横断的な採泥も定期的に行ってデータ数を増やし、空間的な底質特性の変化を詳細に調べていきたいと考えている。

**謝辞:** 本研究を行うにあたり、国土交通省関東地方整備局利根川下流河川事務所、独立行政法人水資源機構利根川河口堰管理事務所ならびに中利根漁業協同組合に多大の便宜をはかっていただいた。また本研究は日本学術振興会科学研究費補助金及び河川整備基金の補助を受けている。記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 鈴木伴征, 石川忠晴, 銭新, 工藤健太郎, 大作和弘: 利根川河口堰下流部における貧酸素水塊の発生と流動, 水環境学会誌, 第23巻, 第10号, pp.624-637, 2000.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 横山勝英, 山本浩一, 一寸木朋也: 筑後川感潮河道における地形・底質の季節変動に関する研究, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.471-475, 2006.
- 5) 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.
- 6) 鈴木伴征, 若岡圭子, 石川忠晴: 利根川河口堰下流部における嫌気水塊の運動について, 水工学論文集, 第42巻, pp.769-774, 1998.
- 7) 鈴木伴征, 石川忠晴, 横山勝英: 河川感潮域におけるエスチュアリー循環の現地計測と数値計算, 河川技術論文集, 第9巻, pp.259-264, 2003.

(2009. 9. 30 受付)