

多摩川感潮域の土砂動態に関する研究

MOVEMENT OF FINE SEDIMENT IN THE TAMA RIVER ESTUARY

横山勝英¹・藤田光一²

Katsuhide YOKOYAMA, Koh-ich FUJITA

¹正会員 工博 建設省土木研究所 河川研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭一番地)

²正会員 工博 建設省三重工事事務所所長 (〒514-8502 三重県津市広明町 297)

In the Tama River estuary, the behavior of river-bed fluctuation and the movement of bed sediment were investigated by old survey data and field measurement. The results are as follows.

1) The erosion and deposition on river bed were caused regardless of the flood volume, and dredging area was buried in several years. 2) The method for estimating the turbidity from the echo intensity of ADP was developed, and the flux of suspended sediment for a month was calculated. As compared this result with the discharged SS during flood, SS flux of flood was larger than that of tide period. However, the countercurrent during one spring tide eroded and transported 60(ton) of bed sediment, it is supposed that the transported sediment have large effects on water quality and bed environment.

Key Words : tidal current, erosion of river bed, fine sediment, deposition, turbidity and sound intensity

1. はじめに

沖積河川の河口域は河床勾配がほぼ水平であり、さらに海の潮汐作用によって流れが緩やかになるため、上流域では堆積し得ないシルト・粘土などの微細な土砂が堆積しやすい環境にある。あるいは、微細な土砂が堆積することで河口域や沖積平野が形成されてきたとも言える。

このような場所は、地形、底質、潮汐変動などの影響によって、汽水性の生物が豊かで漁業活動も盛んであるため重要な自然環境となっている。一方で、河口周辺の低平地には人口が集中するために、河道としての役割は取水、航路としての利用、洪水疎通などが重要である。しかし、土砂の堆積は河積を減少させるので、航路維持や洪水疎通能力の確保のためには浚渫が必要となる場合もあり、さらに浚渫箇所が再埋没する場合もある。

したがって、河口域の河道を適正に管理するためには、微細土砂の供給および堆積のメカニズムを明らかにし、環境管理技術を構築する必要があるといえる。

従来の河口域の研究では、河川分野では塩水楔運動の研究、海岸分野では河口砂州の研究などがそれぞれ詳細に行われてきているが、河道および沿岸の土砂動態と地形変化に関する研究は少ない。藤田ら¹⁾は、数万年オーダーでの地形変化に関する検討を行っているが、対象としている時間スケールや土砂移動量が地質学的である。ま

た、主に実験室レベルで土砂の堆積・再浮上に関するミクロな研究が進められているが²⁾、実際の河川では数年から数十年単位の堆積機構を精度よく予測することが必要であり、いずれの研究もこの点においてなお隔たりがあると思われる。

そのため本研究では、微細土砂の数年程度の時間スケールでの供給及び堆積の機構をモデル化することを最終的な目標としている。本論文ではその基礎的段階として、多摩川を対象にして過去の測量資料の整理から河床変動の特徴を調べ、さらに約1ヶ月間の土砂動態観測を実施して洪水時と平常時の土砂移動量を比較し、地形変化への影響を考察した。なお、現地観測においては、超音波流速計を用いた新たな土砂観測手法を提案している。

2. 調査対象地の特徴

(1) 地形

調査対象地は多摩川の河口域である。図-1に平面図および最深・平均河床縦断面図を示す。縦断面図には後に行う現地観測の地点も記している。本研究では微細土砂が堆積しやすい水域を対象とするため、河床勾配が概ね水平になっている河口から10km付近までを検討区間とした。図から、1~4km付近は浅く、5~7kmは窪地状の地形となっていることが分かる。

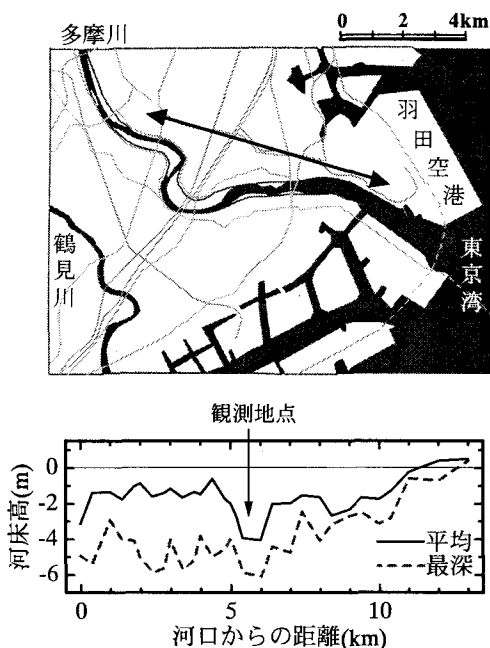


図-1 多摩川感潮域の平面図(上)と縦断面図(下)

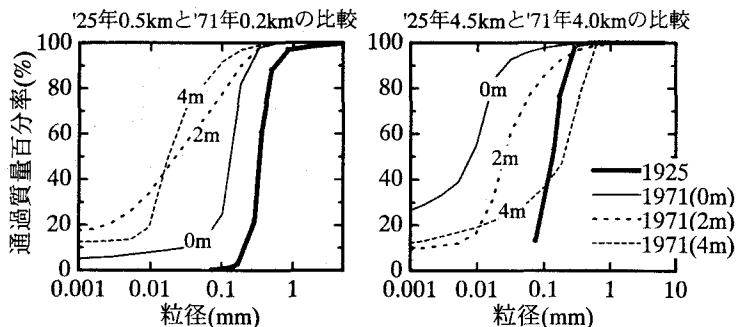


図-2 河床材料の粒度分布図(左:0km付近, 右:4km付近)

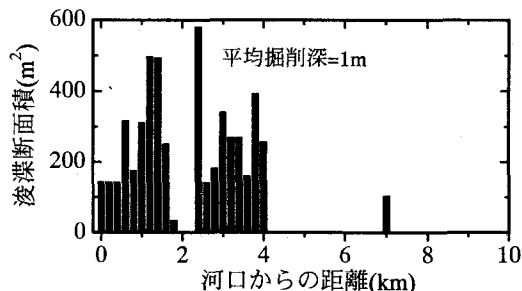


図-3 浚渫実績の縦断分布図

(2) 底質

図-2に1925年⁹⁾と71年⁹⁾の河床材料について、0km付近と4km付近の粒度分布比較図を示す。1971年(細線)は地層ボーリングとなっており、図中の数字は各地層深度の試験結果を表している。これより、1925年(大正時代)には細砂から粗砂であった河床が、約50年経過した後には粘土もしくはシルト質に変化していることが分かる。ただし、1925年については、数値以外の記録として「水深大となり沈積物中泥土の量多し」「有機物を増す」とあるため、場所によってはシルト粘土が堆積していたものと考えられる。1971年については他の調査地点でもシルト質が大半であった。したがって、やはり傾向としては河床材料が細粒化したものと考えられる。

この原因としては、戦後の経済成長に伴う流域排水の増大が挙げられる。多摩川の河口域では1960年代以降、有機汚泥が厚く(最大3m程度)堆積して水質汚濁や悪臭等が顕著になったため、環境整備事業として1971年(S46)から1994年(H6)にかけて浚渫を実施した。図-3に浚渫位置を示す。総浚渫量はおよそ100万 m^3 であり、また0~4kmで集中的に汚泥除去が行われた。

平成に入ってからの変化は、その後の調査資料が得られていないので明らかではないが、現地踏査で0km、2.5km、5.5kmの底質を採取したところシルト質であった。

以上より、河川感潮域には細粒土砂が堆積し易いために、底質材料は流域変化の影響を強く受けると言える。

(3) 河床変動の特徴

図-4に1kmの河床変動履歴と1968年を基準とした断面面積の変化時系列、および上流地点の年最大流量時系列を示す。また、図-5に5kmについて同様の図を示す。図

中の番号①~⑤は、1968年から91年までの測量年を指したものである。1kmは河床地形が浅く有機汚泥の浚渫が実施された場所の例として、5kmは窪地状の地形で浚渫が実施されていない場所の例として示している。

まず、1km(図-4)について見ると、②(79年)に急激に断面面積が増加し、河床は最大2m程度低下しているが、その2年後には約75%程埋め戻り、さらに2年後の③(83年)では浚渫により再び河積が増大している。その後はこの断面では浚渫が実施されていないため、徐々に①の河床に還元してゆき、⑤(91年)ではほぼ元通りになっている。②の河積増大は、入手した浚渫記録には記載されていないが、流量記録では1975年以降かなり低い流量が続いていることから、洪水による洗掘とは考えにくく人為的な掘削によるものと推測される。

いずれにしても、②と③の河積増大の直後に50~70%程度埋め戻っていることが特徴的である。流量との関係を見ると、1974年に過去30年間で最大の洪水が生じているものの河積はほとんど変わっていないが、②と③の後に生じた平均よりも若干大きい洪水によって大部分が埋まっている。つまり、河床がある安定した形状から人為的に変化すると、元の形状に戻る方向に土砂の移動が生じ、戻る速度は数年程度と短い時間であると言える。

図-5に示す5kmでは、浚渫は実施されていないが、横断形状は①から⑤まで堆積と洗掘を繰り返している。河積の変化は、②と④が洗掘、③と⑤が堆積であり、洗掘から堆積に転じる期間には平均程度の洪水か、もしくは渇水に近い状態が起きている。とはいうものの、その逆(渇水だから堆積する)は成立しておらず、流量との明瞭な相関は見いだせない。

以上の整理を0kmから10kmまでの200mピッチの51

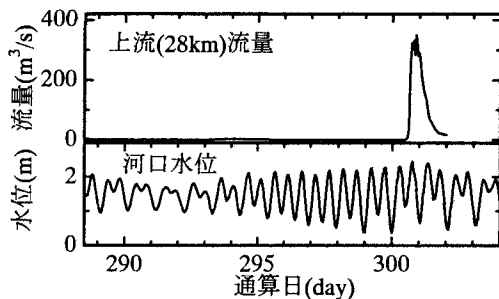


図-7 上流地点(28km)流量と河口潮位

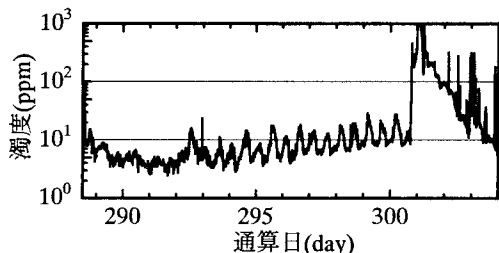


図-8 底層の濁度時系列 (河床より1m)

400(m³/s), 日平均値にすると 180(m³/s)の洪水が発生している。図-4より, 平均年最大日流量は700(m³/s)であるため, この出水は中小規模と言える。河口水位(潮位)は292日前後に小潮に, 300日前後に大潮になっている。

図-8に底層(河床より1m)の濁度時系列を示す。濁度は小潮時には5ppm程度で安定しているが, 潮位変動が大きくなるにつれ濁度の上下が活発になり, 300日には30ppmに達している。これは, 潮位変動に伴う順流逆流運動によって底質が巻き上げられていると推測される。

そこで, これらの様子を更に詳しく見るために, 変動の大きい大潮時2日間の濁度と流速の時系列を図-9に示す。各図の右軸は流速であり, 正の値が順流(上流→河口), 負の値が逆流を示している。大潮時の表層は順流と逆流が交互に生じて, 特に逆流は中層・下層に徐々に伝搬している。一方, 濁度は逆流時に強くなるが, 中層で最も早く上昇し始め, 流速との位相も一致している。表層や底層では流速との対応が悪く位相差も見られる。

以上より, 多摩川5.5km地点の濁度の上昇は, 潮位変動に伴う逆流が中下層に達する時に顕著に現れる。また, 濁度は中層の流速と良く対応しているため, 下流1~4km付近の浅い水路で底泥の巻き上げが生じ, それが5.5km地点に流れ込んでいると推測される。

4. 土砂動態の計測方法

感潮域は塩淡水混合現象によって流動が複雑なため, 土砂動態を時空間的に把握するためには鉛直濃度分布の計測が必要となる。しかし, 多数の濁度計による計測は労力と洪水時の危険性を考えると最良ではなく, 簡易に濃度分布を計測する方法が望ましい。

超音波ドップラー流速計は, 水中に音波を発射し, 浮遊粒子に当たって反射した際のドップラーシフトを解析

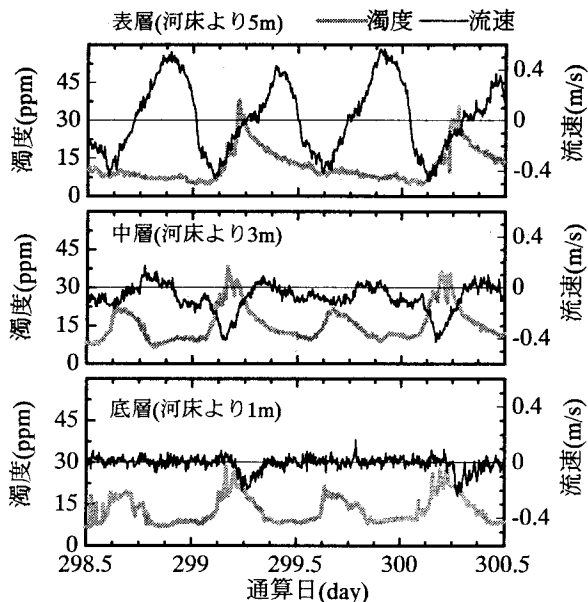


図-9 大潮時の流速と濁度の関係(表層・中層・底層)

することにより流速を算出している。そのため, 音波の反射強度自体は水中の粒子濃度と相関が高いと考えられており, 超音波流速計の副次的な使用方法として検討された例もある⁹⁾。ただし, 水中超音波の技術は海洋分野で発展してきたため, 対象とする土砂濃度は河川と比べて各段に低く, せいぜい十数ppmが上限であった。本研究では河川での土砂観測を目指して, 数十ppmを越える高濃度場での反射特性について検討を行う。

まず, 海洋における音波伝搬理論として, 海中を音波が伝搬する際には諸要因によってエネルギーが損失する伝搬損失のあることが知られている。伝搬損失は拡散損失と減衰損失の和として表され, 拡散損失は距離の対数に比例して変化する幾何学的効果, 減衰損失は吸収, 散乱, その他の影響によるもので距離に比例する効果として説明されている⁷⁾。これを式で表すと, 次のようになる。

$$T_l = k \log r + 2 \alpha r \quad (1)$$

ここで, T_l :伝搬損失(dB), r :センサーからの距離, α :吸収係数である。 α は周波数の関数として様々な式が提案されているが⁸⁾, $f=1.5\text{MHz}$ の場合, 概ね0.5から0.8の範囲にあるため, ここでは $\alpha=0.65\text{dB(m)}$ とした。

本研究では, 高濁度場での音波の伝搬を計測するため, さらに土粒子による散乱の効果(減衰損失)を加味する。

$$T_l = k \log r + 2 \alpha r + \beta T_b r \quad (2)$$

ここで, T_b :濁度, β :濁度係数, である。

さて, 現地観測の結果, 濁度と音響強度の対応関係は図-10のようになった。図は同一水深における濁度と音響強度の関係である。なお音響強度の単位は, この計測機は[count]という単位であり1countが0.43dBに相当する。音響強度と濁度の間には相関が見られるが, ばらつきも1オーダー程度認められる。この要因としては, 水の物性

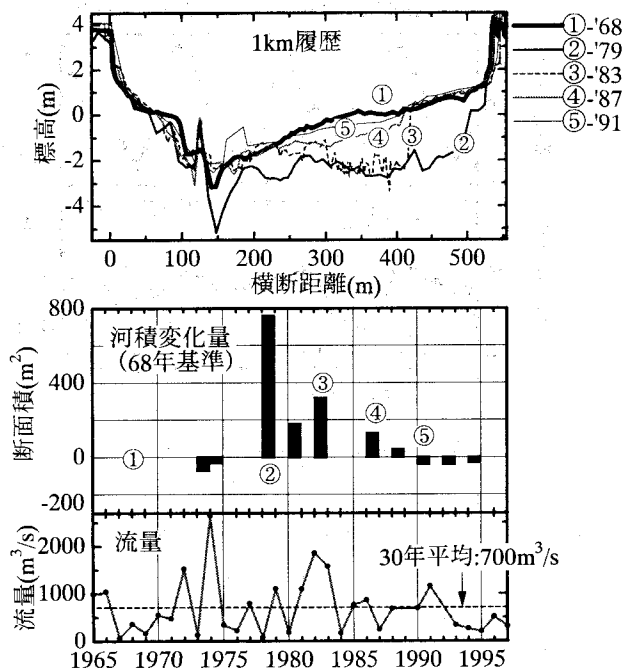


図-4 河床変動履歴、河積変化量と年最大流量 (1km)

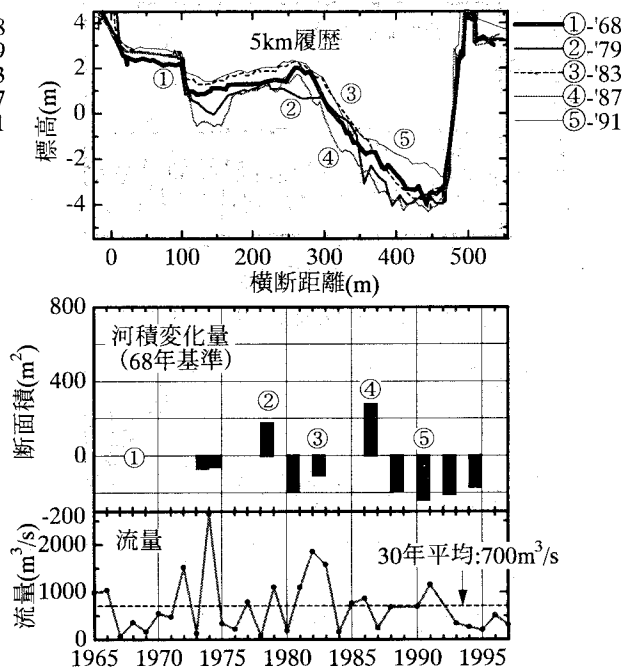


図-5 河床変動履歴、河積変化量と年最大流量 (5km)

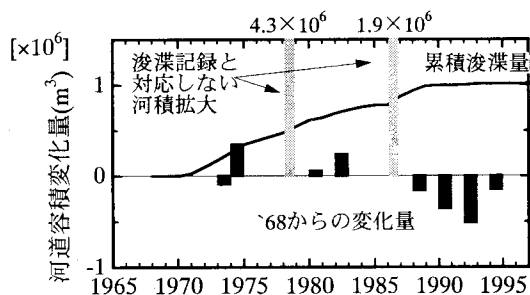


図-6 全区間(10km)の容積変化量と浚渫履歴

断面で11 測量年の全てに対して行い、河道容積の経年変化を求めた。その結果を図-6 に示す。また、浚渫量の累積時系列も示している。浚渫量は容積を増大させる行為なので、正の値としている。

1968 年からの河道容積の変化量は1995 年で15 万 m^3 であり、この量は10km 区間全体が5cm 下がったことに相当するが、30 年間の変化としてはほぼ元の状態に戻ったと言える。つまり、総浚渫量100 万 m^3 は全て埋まったことになる。図中のメッシュで印した河積の拡大は、入手した浚渫記録と対応していないが、1979 年に430 万 m^3 、1983 年に190 万 m^3 拡大し、その後全て埋め戻っている。

1989 年以降は浚渫がほとんど行われていないが、河道容積は徐々に減少し、10km 区間全体が20cm 上昇した程度の堆積が生じている。そして1995 年には河床低下に転じている。なお、図-4 の流量時系列によれば1991 年の洪水が平均より若干大きい、それ以外は大きな洪水は生じていない。

以上、資料整理より得た多摩川感潮域の河床変動の特徴をまとめると、①浚渫等の人為的な河積拡大は、洪水規模に係わらず数年程度で埋め戻ってしまう、②平均以

下の洪水しか生じていない期間でも土砂の堆積・流出が生じている。

そこで次に、この考察がどの程度確からしいのか、その可能性を調べるために、現地で実際に生じている土砂動態の現地観測を実施した。

3. 現地観測

(1) 観測方法

観測は5.5km 地点で実施した。観測地点の縦断位置は図-1 に示したとおりであり、横断形状は図-5 の5km 地点とほぼ同じである。この地点は、川幅が相対的に狭く窪地状に深い場所である。

現地観測では、断面を通過する土砂量を測定する目的で流速と濁度の鉛直分布を、また感潮域の基本項目として塩分と水温の鉛直分布をそれぞれ計測した。流速は有線式超音波ドップラー流速計 (NORTEK 社,ADP) を河床に設置して計測した。センサー周波数は1.5MHz、層厚は0.4m の設定で5 分間の平均流速を計測した。

濁度、塩分、水温の計測にはそれぞれ小型メモリー式センサー (アレック電子製) を用いた。これらをロープに結びつけ、アンカーと水中ブイを用いて河床より1m、3m、5m の位置に固定した。塩分と水温の計測間隔は10 分、濁度の計測間隔は5 分である。

(2) 観測結果

観測期間は1999 年10 月15 日から11 月16 日までの約1 ヶ月間である。図-7 に上流地点(28km)における流量と河口潮位を示す。横軸は年間通算日であり288 日は10 月15 日を表している。流量図によれば301 日に最大流量

(水温、塩分、濁度など)が鉛直方向に不均一なこと、音波の波長(1mm)が浮遊粒子径よりも相当大きいため、散乱応答が悪いこと等が考えられる。特に、センサー近傍の音響データもばらついていて、後者の影響が大きいと考えられる。本研究では、これらの要因について詳細に取り扱うことは困難なため、均一な場を仮定した伝搬損失及び高濃度場での散乱について考える。

音響強度と濁度の関係について、前述の伝搬損失を考慮して式をたてると次のようになる。

$$40\log T_b = I - B + T_l \quad (3)$$

ここで、 I :音響強度、 B :基準音圧、である。

(2),(3)式の各係数を求めるには、最低濁度(1ppm)での音響強度 I を水深ごとに比較すればよい。ただし、濁度1ppmは通常の海水状態なので、土粒子による散乱の項は無視してよい。これより、 $B=80(\text{count})$ 、 $k=65$ 、 $\alpha=1.5(\text{count/m})$ となり、得られた相関式を図-10に点線で印す。

次に、高濁度時の土粒子による散乱の項について考える。図-10の高濁度状態(数百ppm以上)では音響強度の増加が抑えられているため、(2)式が実測値に近くなるように濁度係数 β を調整して図中の実線を得た。この時、 $\beta=0.004$ であった。以上を整理すると、多摩川のこの観測期間については次式が成立した。

$$40\log T_b = I - 80 + 65\log r + 3r + 0.004T_l r \quad (4)$$

図-11にこの式を用いて音響強度から推定した濁度時系列と実測濁度の比較を示す。推定値と実測値は大潮時の濁度変動時や、洪水減衰期の高濃度のいずれも比較的良好に合っていることが分かる。さらに大潮時についての濃度分布図を図-12に示す。潮位変動に伴って底層から中層にかけて高い濁度が発生している様子が詳細に表現されており、これらにより超音波流速計による濁度の推定が実用的であることが示された。

5. 平常時と洪水時の土砂移動量の比較

(1) 観測期間内の移動量

超音波流速計によって流速と濁度の鉛直分布が同時に推定できることが示されたので、この両者の値を用いて単位面積当たりの通過土砂量を計算する。さらに、河道横断方向の流速と濁度の分布は一樣として、水深ごとに通過量と断面積を掛け合わせて断面通過土砂量を計算する。ここで、土砂濃度は濁度に等しいと仮定している⁹⁾。

図-13に断面通過土砂量の順流と逆流成分および合計を示す。図-7の河口水位と比較すると、小潮の頃は順流が卓越し、潮位変動の増大に伴い逆流成分が大きくなり、大潮(298~300日)では逆流が卓越していることが分かる。同様の計算を洪水終了後の303日から320日にかけて行って平常時の移動量を集計し、さらに洪水時の通過

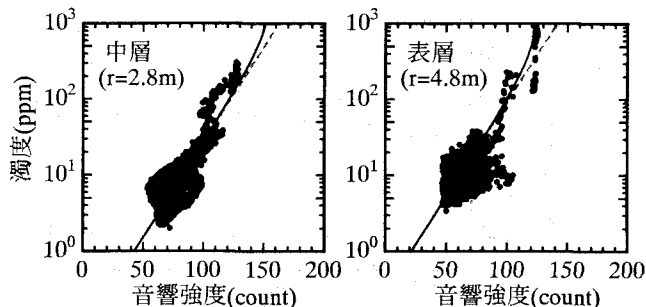


図-10 音響強度と濁度の対応

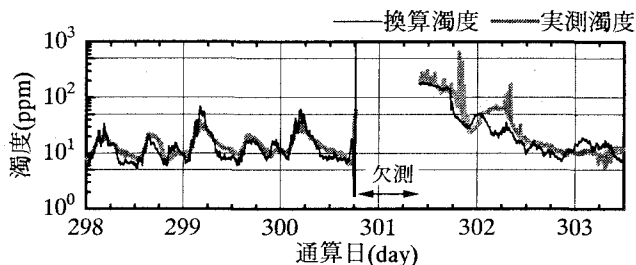


図-11 音響強度より換算した濁度と実測濁度の比較

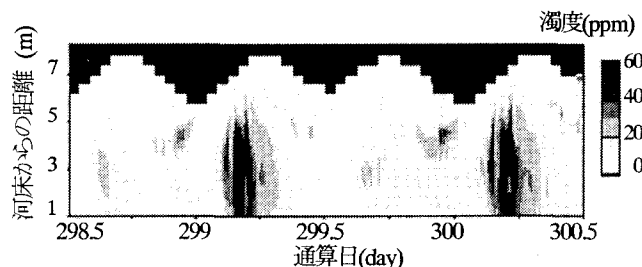


図-12 換算濁度の鉛直分布時系列

土砂量を濁度と上流の流量から計算すると、表-1が求まった。なお体積は、土砂が緩く溜まった状態を想定して密度を1.3として求めた。

これより、通過土砂量は平常時よりも洪水時の方がかなり多いことが分かる。あるいは見方を変えて、潮汐変動1年分と中小洪水1回分の移動量が同程度であると考えれば、平常時の土砂移動も無視し得ないとも言える。特に、図-13に○印で囲った部分では、一回の上げ潮(6時間程度)によって最大60(ton)の土砂が逆流しており、観測地点の前後で巻き上げや沈降が活発に生じていることを示している。こういった平常時の運動は、水質や生態などに影響を及ぼすと推測される。

(2) 流量規模ごとの想定移動量

洪水時の流量と土砂量の関係を図-14に示す。流量と濁度計測地点は20km程度離れているため、洪水伝搬の時間遅れを考慮して補正している。これにより、流量-土砂量の相関式を図中の実線のように求めた。この式を用いて、先ほどと同様に密度を1.3とし、実測洪水よりも大きな流量規模での供給土砂量を推定すると表-2のようになった。ここで、日平均流量630(m³/s)は平均年最大流量、1,400(m³/s)は5年確率程度の流量である。

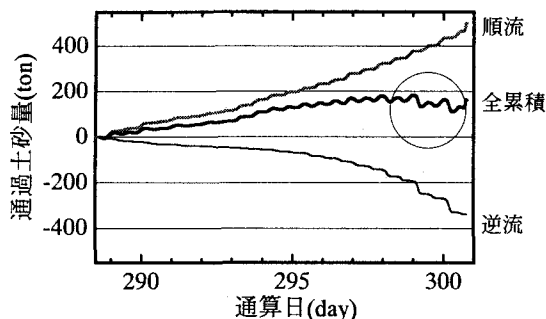


図-13 断面通過土砂量 (累積値)

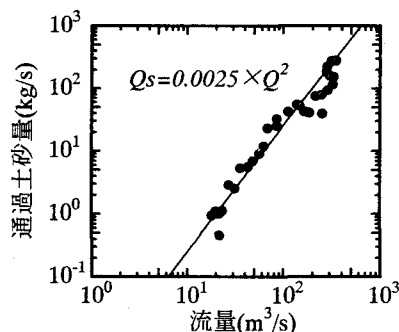


図-14 流量と土砂量の相関

表-1 平常時と洪水時の通過土砂量の比較

移動状態	期間	土砂量 (ton)	体積 (m³)	内訳(ton)
潮汐変動	30日	550	420	順流1,200,逆流650
洪水	2日	6,000	4,600	

表-2 洪水規模ごとの推定供給土砂量

生起年月	ピーク流量	日平均流量	土量体積
1999.9	400(m³/s)	180(m³/s)	4,600(m³)
2000.7	1,200(m³/s)	630(m³/s)	90,000(m³)
1999.8	2,300(m³/s)	1,400(m³/s)	560,000(m³)

ただし、この方法で推定する土砂量には数倍から10倍程度の開きがあるから⁹⁾、大きな流量では表の推定値よりも更に大量の土砂が流れている可能性がある。

図-6によれば、浚渫が行われていない時期(1990年代)の変化量は1年間に数万から10万m³程度、浚渫記録に載っている変化量は年平均5万m³(20年間で100万m³)であり、一方表-2で平均年最大流量時には9万m³が供給されていると推測されたので、その大半が堆積すると仮定すれば浚渫箇所が短期間に埋没することも説明が付く。ただし、図-6にメッシュで記した430万m³と190万m³の変動量は、河積拡大後の流量規模が500~1,500(m³/s)であることを考えると、洪水のみでは説明が付きにくい。

6. まとめ

本研究では、河川感潮域における微細土砂の供給・堆積機構を解明するための基礎的段階として、多摩川の河口域において資料整理と現地観測により地形変化及び土砂移動の特徴について検討した結果、以下の知見を得た。

- 1)多摩川における過去の環境浄化浚渫は、洪水規模に係わらず数年程度で埋め戻っていた。
- 2)平均年最大流量以下の洪水しか生じていない期間でも土砂の堆積・流出が生じている。
- 3)5.5km地点では大潮の逆流時に中層から底層にかけて高い濁度が観測されたため、下流の浅い水路で底質が巻き上っている可能性がある。
- 4)超音波流速計の音響強度から濁度を推定する式を提案した。これにより、濁度と流速が同時に計測できる。
- 5)上記の方法により、約1ヶ月間の土砂移動状況を測定したところ、平常時よりも洪水時の土砂移動量が多いことが確認された。ただし、大潮の逆流時には一潮汐で約60tonの土砂が動いており、水質や底質に与える影響が大きいと推測された。
- 6)実測した流量と土砂量の関係から、平均年最大流量以上

の洪水での土砂輸送量を推定した。これらの土砂量は、その大半が堆積すると仮定すれば、多摩川での過去の河積変動履歴を説明しうることが示された。ただし、過去に2回ある大規模な土砂移動については、十分な説明が為しえず、更に詳細な検討が必要である。

謝辞：本研究を行うに際して、建設省京浜工事事務所には資料収集及び現地観測の便宜を図って頂いた。また、現地観測にあたり土木研究所河川研究室の平館・東氏、ナショナルボートの友光氏、日水コン株式会社の諸氏には多大なるご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1)藤田光一、山本晃一、赤堀安宏：勾配・河床材料の急変点を持つ沖積河道縦断面形の形成機構と縦断面形変化予測、土木学会論文集 No.660/Ⅱ-44,pp37-50,1998.
- 2)近藤雅秋、平松和昭、戸原義男、四ヶ所四男美、森健：底泥表層部の物性と流れによる巻き上げ特性に関する研究、農業土木論文集 163,pp79-86,1993.
- 3)大坪国順、村岡浩爾：底泥の物性および限界掃流力に関する実験的研究、土木学会論文集, No363/Ⅱ-4,pp225-234,1985.
- 4)高田昭：多摩川産砂利及び砂に関する調査、土木試験所報告、第9号、pp71-92,1927.
- 5)建設省京浜工事事務所：多摩川下流河床土質試験調査書、1972
- 6)川西澄、山本洋久、余越正一郎：超音波流速計と散乱光式濁度計を用いた懸濁粒子の濃度、粒径、フラックスの測定、水工学論文集,第42巻,pp559-564,1998.
- 7)Robert J.Urick：水中音響の原理、共立出版株式会社、pp.99-110,1978.
- 8)実吉淳一、菊池喜充、能本乙彦：超音波技術便覧、日刊工業新聞社、pp168,1960.
- 9)横山勝英・梅田信・石川忠晴：七ヶ宿貯水池への濁質輸送、第53回年次学術講演会概要集,pp750-751,1998.

(2000.10.2 受付)