

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

八 木 宏*・大森義暢**・高橋亜依***

多摩川河口域を対象として大潮期における一潮汐間の流動特性と、それが懸濁物質輸送に与える影響を検討した。多摩川河口域の流動構造は、基本的となる潮流と重力循環流に加え、上げ潮時と下げ潮時に鉛直混合特性の非対称性が生じることで、下げ潮時には傾圧的、上げ潮時には順圧的な特徴を示すこと、潮汐振幅の変化や流量の大小により流速分布や底面せん断力の性質は大きく変化することを示した。また懸濁物質輸送量もこれに連動して変化し、標準的な大潮時には上流向き輸送、潮位差が大きい大潮時には正味の輸送量が小さくなり、また流量が大きい大潮時には下流向きの輸送となることを示した。

1. はじめに

河口域は、上流から運ばれてきた微細な土砂や有機物が堆積しやすく、また運ばれてくる土粒子には豊富な栄養塩が吸着しているため、河口域の土砂供給・土砂移動システムは豊かな河口域生態系を維持するために重要な役割を果たしている。河口域における土砂動態は、上流からの供給・沈降・堆積、そして波浪や潮汐による巻上げ・再移動が中心であると考えられるが、このうち潮流を中心とした底質及び懸濁物質の輸送については河口域環境にとって重要な要素であることからこれまでに数多くの検討が行われている。本研究で対象とした多摩川についても、横山ら (2002) によって、i) 大潮の上げ潮時に高濁度水塊が発生すること、ii) 高濁度水塊の形成にはブロック化によるものと底質の巻き上げによる二つの原因があることが指摘されているが、海水の進入挙動や混合特性など河口域全体に対する流動構造の把握やそれに基づいた底質輸送機構については十分な検討が行われていない。そこで本研究では、現地調査に基づいて多摩川河口域全体を対象とした流動場形成の仕組みと、それが懸濁物質輸送や底質環境に与える影響を把握することを試みたのでその結果を報告する。

2. 現地観測の概要

本研究では、多摩川河口域を対象として、大潮期における一潮汐間の流動特性と懸濁物質の挙動を把握するための調査(一潮汐間縦断観測)、及び水中懸濁物質と底質粒径の季節変化を把握するための調査(水・底質調査)を実施した。一潮汐間縦断観測は、2002 年 8～10 月の期間に計 4 回(8/9, 8/25, 9/22, 10/5)実施した。観測は、図-1 に示すように河口から 8 km の区間に計 11 カ所の観測点を河道の滞筋に沿って設定し(観測点 N1: -2.5 km 地点～N11: 5.5 km 地点、なお各観測点の縦断方向

距離については、国土交通省の表示に従い、観測点 N5 付近が 0 km 地点に対応し、下流方向に負、上流方向に正としている)、1 回に約 2 時間かかる 11 カ所の観測点に対する縦断観測を、図-2 に示すように一潮汐間に 6 回(Run 1: 満潮, Run 2: 下げ潮初期, Run 3: 下げ潮後期, Run 4: 干潮, Run 5: 上げ潮初期, Run 6: 上げ潮後期)繰り返すことで、一潮汐間の流れや水質量的変化を把握することを試みた(但し、10/5 は満潮時刻の関係で下げ潮初期から満潮までの計 6 回となっている)。観測項目は、多項目水質計(アレック電子: クロロテック ACL-DK)による水温、塩分、濁度、クロロフィル a 濃度の鉛直分布、溶存酸素(HORIBA: U-21), ADCP (RD-Instruments: 2400 KHz)による流速の鉛直分布、採水による懸濁態炭素(POC), 溶存態炭素(DOC) (TOC-5000, SSM-5000 A, 島津製作所)である。また、水・底質調査は 2002 年 8～11 月までの期間に計 6 回(8/5, 8/22, 8/30, 9/27, 10/4, 11/12)実施した。観測は、図-1 に示した観測点 N1 から N14 までの 16 箇所において、採水による POC, DOC 計測、採泥による底質粒度分布計測(レーザー回折式粒度分布測定装置、島津製作所: SALD-3000)を行った。

3. 観測結果と考察

(1) 多摩川河口域の一潮汐間の流動特性

本研究で実施した 4 回の一潮汐間縦断観測の潮位差(0 km 地点)と観測時間中の平均流量(田園調布堰下流部, 13 km 地点)を表-1 に示す。4 回ともに大潮期にあたるが、観測時の潮位と流量を比較すると、第 2 回観測(8/25)と第 3 回観測(9/22)は比較的条件が近く、平均潮位差が 150～160 cm で流量 50 m³/s 程度であり、これを基準に考えると第 1 回(8/9)は潮位差が大きく流量が小さいケース、第 4 回(10/5)は潮位差がやや大きく流量が大きいケースと位置づけられる。そこで本研究では、8/25, 9/22 を大潮時の標準ケースとして、8/9 を潮位振幅の大きいケース、10/5 を流量が大きいケースとして比較検討を行った。

* 正会員 博(工) 東京工業大学助教授大学院理工学研究科
** 修(工) (株)日揮
*** 学生会員 東京工業大学大学院理工学研究科

a) 標準的な大潮時の流動構造

本研究で大潮期の標準的なケースと位置づけている8/25について、一潮汐間の6回の縦断観測結果として塩分、濁度、クロロフィルa濃度の縦断分布を図-3に示す。これを見ると、塩分は潮汐に対応して、下げ潮時に河川内下層から東京湾へ高塩分水が後退、上げ潮時に進入している様子がわかる。河口に近い濁度は、観測点N3～N7の区間の底面付近で大きい値を示し、下げ潮時よりも上げ潮時に高くなる傾向がある。また、クロロフィルaは東京湾に近い河口部で濃度が高く、下げ潮時には東京湾へ流出、上げ潮時に高濃度のクロロフィルaが東京湾から流入しており、潮汐により河口域と東京湾との

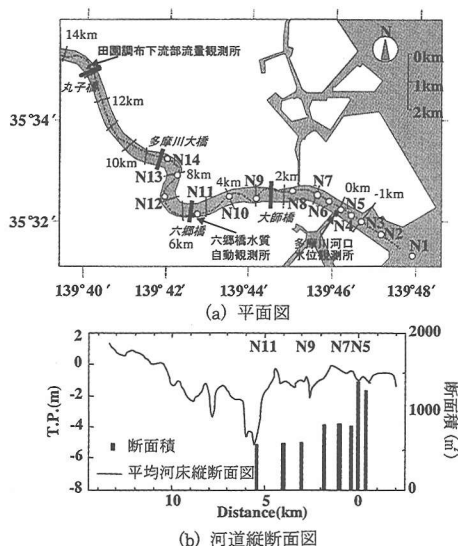


図-1 多摩川河口域の地形と観測点位置

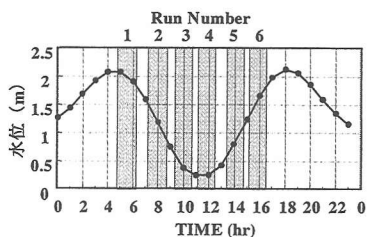


図-2 一潮汐観測時の潮位変化とRun 1～Run 6の時刻(8/9)

表-1 一潮汐観測時の潮位差と流量

	平均潮位差(cm)	流量(m^3/s)
8/9	199.0	28.6
8/25	158.5	57.4
9/22	152.5	44.7
10/5	171.5	87.6

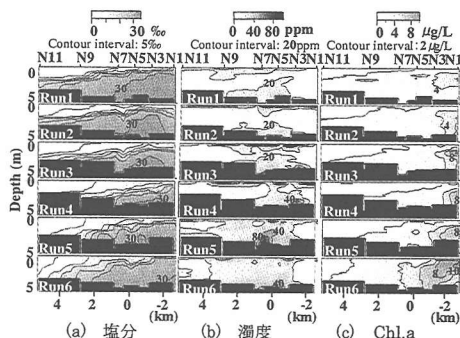


図-3 標準的な大潮期(8/25)の塩分・濁度・Chl. a 縦断分布

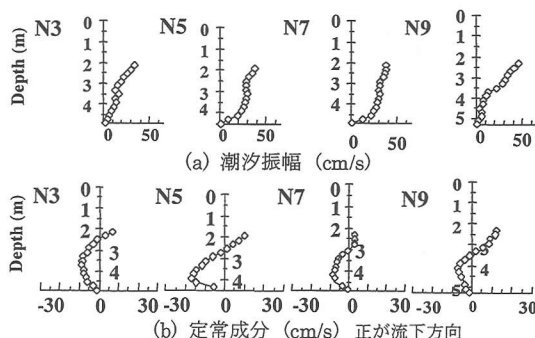


図-4 標準的な大潮時の流速の潮汐変動成分と定常成分の鉛直分布

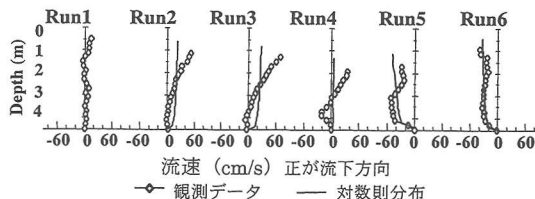


図-5 標準的な大潮時の流速鉛直分布の時間変動(観測点N5)

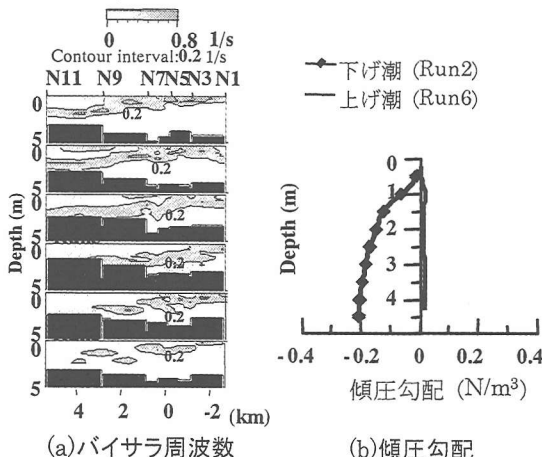


図-6 標準的な大潮時のバイサラ周波数の縦断分布と傾圧勾配の鉛直分布(観測点N5)

間でクロロフィル a の流入・流出が活発に行われていることを示している。図-4 は、観測点 N3, N5, N7, N9 における流速計測結果から杉山ら (1997) の方法に基づき、流速を潮汐成分と定常成分に分離し、その鉛直分布を示したものである (但し、潮汐成分については流速振幅を表示)。これを見ると、潮流速振幅は、河口から 2~3 km に位置する観測点 N5, N7 において底層まで大きな値を示しているが、これはこの付近で川幅が大きく減少し、水深が浅くなることで河道断面積が小さくなる地形的な特徴を反映したものと考えられる (図-1 参照)。一方、定常成分はいずれの観測点においても表層で下流向き、下層で上流向きの上下交叉的な分布となっており、河口密度流 (重力循環流) の特徴を良く表している。

図-5 に観測点 N5 の流速分布を Run 1~Run 6 について示す。図中には、計測された流速分布の単位幅流量から算出した対数流速分布 (Manning の粗度係数を 0.03 として算出) を参考のために併せて表示している、これを見ると下げ潮時には上層で流速が大きく下層で小さい傾圧的な特徴を示している。一方、上げ潮時は初期には対数流速分布と差異があるものの後期には両者が概ね一致している。以上の傾向は、多摩川河口域の流動場は、基本的には潮流成分と重力循環成分の重ね合わせと考えられるが、一潮汐間の変化を詳細に検討すると、下げ潮時に重力循環成分が発達、上げ潮時に減衰しており、上・下げ潮時に重力循環の強さ、密度流としての性質に変化が生じていることを示唆している。そこで、重力循環流の発達に影響を与える成層構造の空間分布と時間変化特性を示すために、成層の安定度を示すパイサラ周波数を算出しその空間分布の一潮汐間の変化を図-6(a) に示す。全体的な傾向として、下げ潮時にはパイサラ周波数が大きく、上げ潮時に減衰していることがわかる。これは、下げ潮時には比較的明瞭な成層構造が維持されるものの上げ潮時には混合が進み成層が弱くなることを示している。図-6(b) は、次式で示される運動方程式の密度の空間分布に起因した圧力勾配項 (以下、傾圧勾配と呼ぶ) の鉛直分布を観測点 N5 について表示したものである。

$$\frac{\partial P_{bc}}{\partial x} = g \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \quad \dots\dots\dots (1)$$

(η : 水位, ρ : 密度, x : 縦断方向, z : 鉛直方向)

ここでは、下げ潮時の代表として Run 2, 上げ潮時の代表として Run 6 の結果を表示している。これより、下げ潮時には傾圧勾配が相対的に大きく、下層を中心として上流向きに作用しているが、上げ潮時は傾圧勾配が全水深的に小さくなっている。これは、先に示した成層構造を反映しており、下げ潮時には鉛直混合が小さく明確な成層構造が維持することで、傾圧勾配が作用し重力循環が

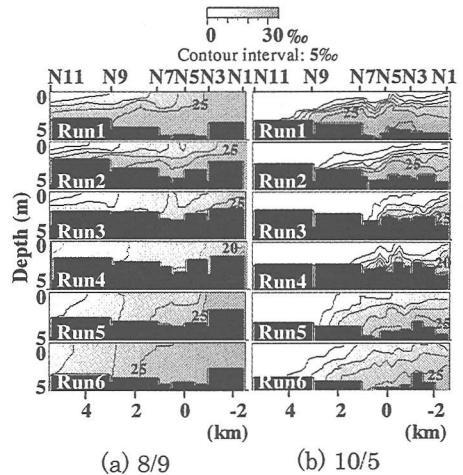


図-7 潮位差が大きい大潮時 (8/9) 及び流量が大きい大潮時 (10/5) の塩分縦断分布

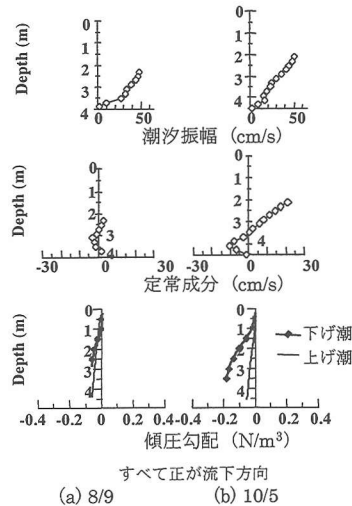


図-8 潮位差が大きい大潮時 (8/9), 流量が大きい大潮時 (10/5) の流速の潮汐変動成分, 定常成分, 傾圧勾配の鉛直分布 (観測点 N5)

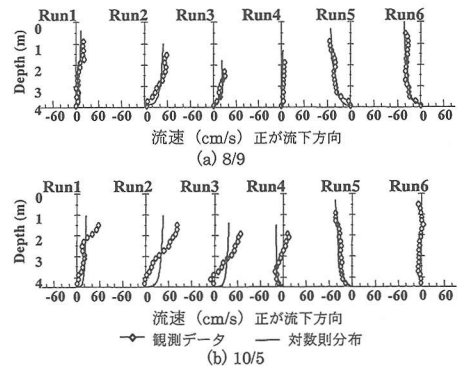


図-9 潮位差が大きい大潮時 (8/9), 流量が大きい大潮時 (10/5) の流速鉛直分布の時間変動 (観測点 N5)

発達する。これに対して、上げ潮時には鉛直混合が強く傾圧勾配が減少することで鉛直循環が減衰し図-5に示したような順圧的な対数型流速分布が発達すると考えられる。以上の事実は、多摩川河口域の流動場は基本的には順圧的な潮汐変動成分と傾圧的な重力循環成分から構成されているが、上げ潮時と下げ潮時に鉛直混合の非対称性が生じ、鉛直混合が相対的に小さい下げ潮時には傾圧性が強い流速分布が発達し、鉛直混合が大きい上げ潮時には順圧的な流速分布が形成されると考えられる。

b) 潮位差及び流量が大きい大潮時の流動構造

次に、潮位差や流量の異なる場合に上記で検討した流動構造がどのように変化するかについて検討した。

図-7に、潮位差が大きい大潮時(8/9)と流量が大きい大潮時(10/5)の塩分縦断分布を示す。潮位差が大きい場合には、本研究で大潮時の標準ケースと位置づけている8/25に比べ、鉛直方向の成層構造が弱く強混合的になっている。一方、流量が大きい大潮時では、上流からの低塩分水が河口付近にまで達しており、成層が明確に形成され、結果として東京湾側から河川下層への高塩分水の進入が下流側に止まっている。流速場は(図-8)、まず潮位差が大きい場合には、潮流速変動が大きく、鉛直循環流成分が小さい。これは、潮位差が大きいケースは鉛直混合が顕著であるため傾圧勾配が小さく、鉛直循環流の発達が弱いことを示しており、結果として流速分布は順圧的な対数型流速分布と良く一致する(図-9)。一方、流量が大きい場合には、河川流量が大きいために成層構造が顕著であり、鉛直シアの大きい平均流(鉛直循環流)が発達し、これに流量に対応した下流向きの平均流が加わることで流速分布は、標準的な大潮時より

も全体的に下流側にシフトした分布形となっている。

(2) 底面せん断力

次に、底面付近における懸濁物質の輸送や巻き上りを考える上で重要な底面摩擦速度について検討した。図-10は、観測点N5における底面摩擦速度の一潮汐間の変化である。ここで、底面摩擦速度は、底面上40cmの流速観測結果から底面近傍では対数速度分布が成立すると仮定し算出した値である。これを見ると、標準的な大潮期(8/25)では、下げ潮時に摩擦速度は小さく上げ潮時に最大値を示すパターンであるのに対し、潮位差の大きい大潮時(8/9)では、上げ潮・下げ潮両者において摩擦速度が大きくなり、一方、流量の大きい大潮時(10/5)は、標準的な大潮時(8/25)と同様に上げ潮時に摩擦速度が最大となるがその値は標準ケースよりも小さい。これを先述の流動構造と対応させて考えると、潮位差が大きいケースでは順圧的な潮流速変動が主体であるために底面摩擦速度は上げ潮時、下げ潮時にそれぞれ大きくなる。これに対し、標準的な大潮時及び流量が大きい大潮時では、いずれも鉛直循環流が発達するために底面摩擦速度は上げ潮時にピークを示す。このうち流量が大きい場合には下流向きの平均流がこれに重なるために上げ潮時の摩擦速度が相対的に小さくなると考えられる。

(3) 濁質輸送量

図-11(a)は、流速及び濁度の計測結果から算出した単位幅当たりの濁質フラックスの鉛直分布である。これを見ると、標準的な大潮時(8/25)では上げ潮時における下層の上流向き濁質輸送が支配的となっている。これに対して、潮位差の大きい大潮時(8/9)では、上げ潮時と下げ潮時の輸送量が同レベルであり、一方、流量の大きい大潮時(10/5)は、上げ潮時の底層及び全水深的な上流向き輸送より下げ潮時の上層を中心とした下流側への輸送が上回っている。結果として、一潮汐間の濁質輸送量は、図-11(b)に示すように、標準的な大潮時には上流向き、振幅が大きい大潮時には正味の輸送量が減少し、流量が大きい時には下流向きとなる。これは、先述の流動構造及び底面摩擦速度の特徴をよく反映しており、標

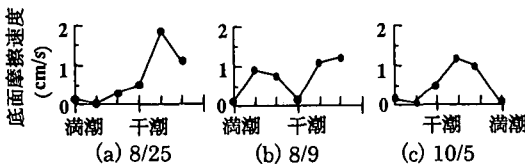


図-10 底面摩擦速度の経時変化(観測点 N5)

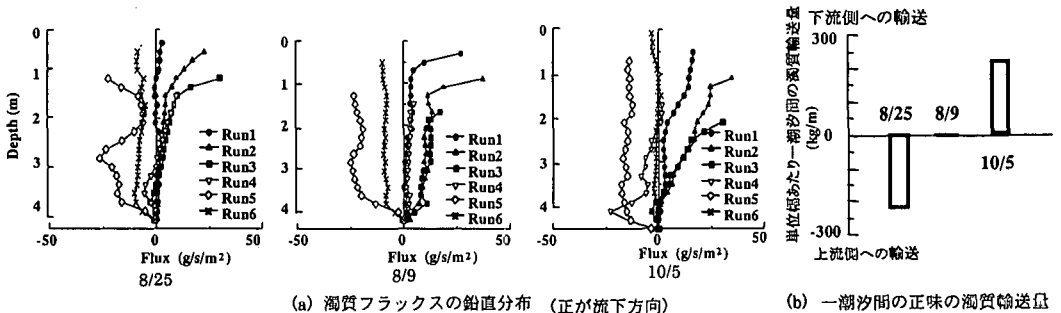


図-11 濁質フラックスと一潮汐間の正味の濁質輸送量(観測点 N5)

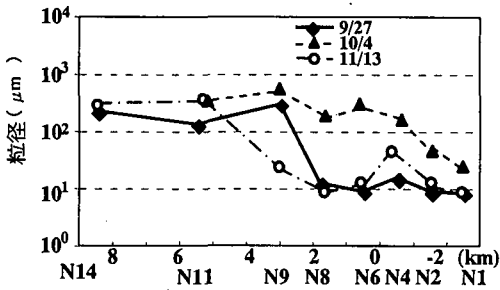


図-12 底質粒径（中央粒径）の縦断分布

準的な大潮時には、上げ潮時に底面付近で発生する上流向き流速と底面せん断力の影響によって、濁質は上流向きに輸送され、振幅が大きい大潮時には流動場が順圧的であるために、上・下げ潮時の輸送量が同程度になり結果として正味の輸送は減少する。一方、流量が大きい大潮時には、出水の影響によって底層だけでなく上層でも濁度レベルが上昇しているため、上げ潮時の上流向きの濁質輸送を上層の下流向きの輸送が上回るためと考えられる。

(4) 出水前後の底質粒径縦断分布の変化

ここでは出水前後の底質粒径縦断分布の変化と前述の一潮汐間の懸濁物質輸送特性の関係について検討した。図-12は、本観測期間中最大流量の出水（10/1）に対して、(a)出水直前（9/27）、(b)出水直後（10/4）、(c)出水の43日後（11/13）における河床表層（3 cm）の底質粒径（中央粒径）縦断分布を示したものである。出水前は、観測点 N1（-2.5 km 地点）～N8（1.8 km 地点）までの広い河口部領域に中央粒径 $10 \mu\text{m}$ 前後のシルトが、その上流側に $100 \mu\text{m}$ 以上の砂が分布していた。出水直後は、粒径 $200 \mu\text{m}$ 以上の砂が河口に近い観測点 N4（0.5 km 地点）まで分布するようになるが（粗粒化）、出水から1ヶ月以上たった11/13には、観測点 N11（5.5 km 地点）よりも下流側の広い範囲に再び $10 \mu\text{m}$ 前後のシルトが分布していた。以上の底質粒径縦断分布の変化を前節で議論した懸濁輸送特性と併せて考えると、出水時及びその直後は下流向きの底質・濁質輸送が卓越し、粒径の小さい細粒分は河口部に近い下流側に堆積するが、出水後の潮汐変動によって細粒分は上流向きに輸送され1ヶ月程度で河口から4～5 kmの広い範囲に再び $10 \mu\text{m}$ 前後のシルトが分布したと推定される。

4. まとめ

本研究では、多摩川河口域における大潮時の流動特性と懸濁物質輸送特性を現地観測結果に基づいて検討した。得られた結論は以下のとおりである。

1) 多摩川河口域の流動場は、基本的には潮流成分と重力循環成分が重合したものであるが、一潮汐間で上げ潮時と下げ潮時の鉛直混合特性の非対称性が生じ、下げ潮時には傾圧的な流速鉛直構造を示すが、上げ潮時には鉛直混合が進み順圧的な流速分布に近づく傾向が見られる。

2) 河口域の流速場は、潮汐振幅の変化や流量の大小により大きく変化し、濁質輸送量や輸送方向もこれに連動して変化する。懸濁物質は、標準的な大潮時には上流向き輸送、潮位差が大きい大潮時には正味の輸送量が小さくなり、流量が大きい大潮時には下流向きの輸送を示す。

3) 河口域の底質粒径縦断分布は、出水によって粒径 $100 \mu\text{m}$ 以上の砂が河口付近まで分布（粗粒化）するようになるが、1ヶ月程度で再び粒径 $10 \mu\text{m}$ 程度のシルトが河口域を広く分布するように変化する。これは潮汐による上流向き底質輸送によって河口部に堆積した粒径の小さい底質が上流向きに輸送された可能性が大きい。

謝辞：本研究を進めるにあたり、国土交通省京浜工事事務所から多摩川に関する貴重なデータを頂いた。また、東京都立大学土木工学科講師の横山勝英氏には多摩川調査に関する貴重なアドバイスを頂いた。さらに、鹿島技術研究所グループ長 田中昌宏氏には観測で使用したDOメーターを貸して頂いた。ここに記して謝意を表する。なお、本研究は文部省科学研究費基盤研究(c)『多重スケール沿岸海洋モデル構築に基づく外海栄養塩流入フラックス算定の試み』（代表者：八木 宏、課題番号：13650563）及びとうきゅう環境浄化財団、河川環境管理財団の補助を受けて行われたものであることをここに付記する。

参考文献

- 杉山陽一・藤原建紀・中辻啓二・福井真吾（1995）： ADCP による伊勢湾の流動構造調査，海岸工学論文集，第42巻，pp. 1096-1100.
- 横山勝英・藤田光一（2001）： 多摩川感潮域の土砂動態に関する研究，水工学論文集，第45巻，pp. 937-942.