

都市河川河口域における土砂・栄養塩・有機物 輸送特性に関する現地観測

FIELD MEASUREMENTS ON SEDIMENT, NUTRIENT AND ORGANIC MATTER TRANSPORTS IN AN URBAN RIVER ESTUARY

山崎裕介¹・二瓶泰雄²・大関雅丈³・今野篤⁴・西村司⁵

Yusuke YAMASAKI, Yasuo NIHEI, Masatake OOZEKI, Atsushi KONNO and Tsukasa NISHIMURA

¹ 学生員 修(工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻博士課程(〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

² 正会員 博(工) 東京理科大学講師 理工学部土木工学科(同上)

³ 学生員 東京理科大学 理工学部土木工学科(同上)

⁴ 学生員 学(工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻修士課程(同上)

⁵ 正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科(同上)

For understanding pollutant transports in an urban river, the field measurements of the hydrodynamic environments and SS during one month were carried out in the estuarine section of Oohori River and Lake Teganuma. We also conducted the intensive field survey of the sediment, nutrient and organic matter transports in Oohori River under a rainy condition. The observed results show that the differences of SS fluxes between Stns.1 and 3, located at upstream and downstream points in the estuarine section, appear appreciably in hydrologic events and depends on the erosion process of river-bed deposits and flow rate in the river. The differences of nutrient and organic matter fluxes between Stns.1 and 3 in the hydrologic event are also characterized with the erosion process.

Key Words: urban river, estuary, sediment transport, nutrient, COD

1. 序論

水質汚濁化が著しい都市河川や湖沼, 内湾における水環境を適切に保全・管理していくためには, 流域からの汚濁負荷量に関するモニタリングやモデリングを実施していくことは重要となる。流域から発生した汚濁物質は, 河道部での流下過程において, 水路や河川での沈殿・堆積や土壌吸着, 植物体による吸収などにより減少する場合や, 底質の巻上げや水生植物の流失などに伴って増加する場合がある。また, このような汚濁物質濃度の増減の様子は, 降雨時と非降雨時とでは大きく異なっており, 汚濁物質の流下過程は単純ではないものと考えられる¹⁾。このように, 流域からの汚濁負荷量を正確に評価するためには, 河道部での流下過程における汚濁物質の動態を正確に理解することは必要不可欠であるものの, それらに関する知見は, その現象の複雑さゆえに不十分である。

そこで本研究では, 汚濁物質の堆積・巻上げ過程が水理条件により大きく変化すると考えられる河口域に着目し, 都市河川河口域における土砂・栄養塩・有機物の動態を検討することを目的とした現地観測を実施すること

を試みる。ここで対象とする観測サイトとしては, 富栄養化湖沼として有名な手賀沼²⁾に流入する都市河川である大堀川³⁾を対象とする。具体的な観測内容としては, ①自記式測器を用いた水理・濁質環境に関する連続調査と, ②降雨時を対象とした短期集中的な水理・水質調査, という2種類の現地調査を実施した。①の調査結果に基づいて, 降雨時・非降雨時条件下での河口域におけるSS収支を調べて, 河口域における土砂堆積・侵食状況を検討する。また, ②の観測結果を用いて, 降雨時における河口域の土砂・栄養塩・有機物輸送特性を把握する。

2. 現地観測の概要

(1) 大堀川の概要

現地観測対象は, 水質汚濁の問題を抱えている手賀沼の西部に流入する主要都市河川の一つである大堀川とした(図-1)。この大堀川流域の面積は31km²であり, 流路延長は12.9kmである⁴⁾。流域の土地利用特性としては, 市街地75%, 山林13%, 畑11%, 水田1%であり, 市街化が著しく進行している⁵⁾。この流域では, 下水道整備

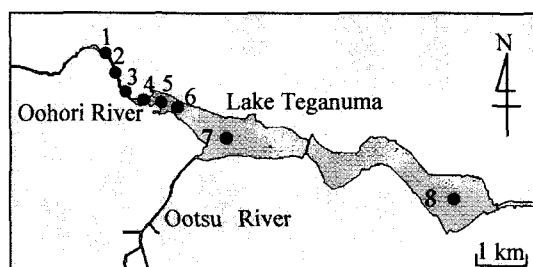


図-1 観測地点図

率が既に 8 割を越えており、流域からの汚濁負荷量に関しては、これまで卓越していた生活系負荷⁶⁾と共に、産業系負荷や面源負荷の寄与が増加している⁵⁾。その他の大堀川流域の詳細に関しては、二瓶ら⁵⁾を参照されたい。

(2) 自記式測器を用いた連続調査

この大堀川河口域を対象として、①自記式測器を用いた連続調査と、②降雨時における短期集中調査を実施した。まず、①の調査における観測点としては、図-1に示しているように、河川内 (Stn.1)、河川と手賀沼の接続点 (Stn.4)、手賀沼内 (Stn.6) に1地点ずつとした。観測項目としては、Stns.1と4では、水位、流速、水温、濁度、クロロフィルa濃度とし、Stn.6では水温と濁度、クロロフィルa濃度とする。また、Stn.1では、底面高さ変化も合わせて計測している。Stns.4と6における水温は、鉛直成層状況を捕らえるため多層にわたり計測している。また、全地点における濁度・クロロフィルa濃度の計測は、表層において行われている。

観測期間としては、Stn.6における濁度・クロロフィルa濃度は2003年6月28日～7月16日とし、それ以外に関しては同年6月18日から7月16日までの約1ヶ月間とする。これらの自記式測器の計測時間間隔は5分もしくは10分としている。この計測には、水位には自記式水位計 (Diver, Eijkelkamp 社製)、流速には自記式小型流速計 (Compact-EM, アレック電子(株)製)、水温には小型水温計 (TidbiT, Water Temp. Pro, Onset 社製)、濁度とクロロフィルa濃度にはワイパー付き濁度・クロロフィル濃度計 (Compact-CLW, アレック電子(株)製)、底面高さ変化には光学式砂面計 (SSM7, 三洋測器(株)製)を各々用いている。

また、河川・湖沼内における土砂沈降量を計測するために、Sediment trap (直径6.4cm, 高さ12cm)を設置した。測定点は、図-1に示すように、Stns.1～8とした。設置期間は2003年7月3日から10日とした。

(3) 降雨時における短期集中調査

降雨時における短期集中的な水理・水質観測は、2003年7月3日21時から4日18時に行われた。この時の降雨状況としては、アメダスデータ (千葉県我孫子市)に

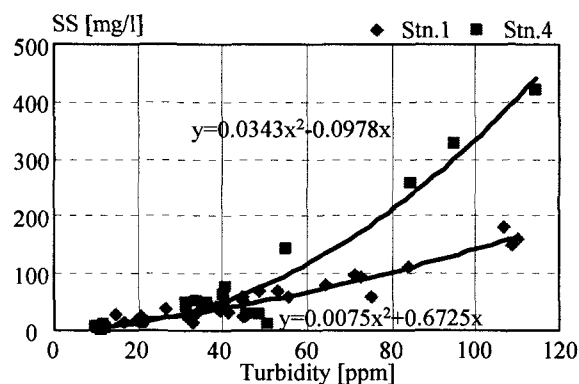


図-2 濁度とSSのキャリブレーション結果

よると、7月3日22時頃から断続的に雨が降り、7月4日3時には時間雨量17mmを記録し、総雨量は31mmであった。観測地点は、図-1に示すように、Stns.1, 3, 4の河道部3地点とする。

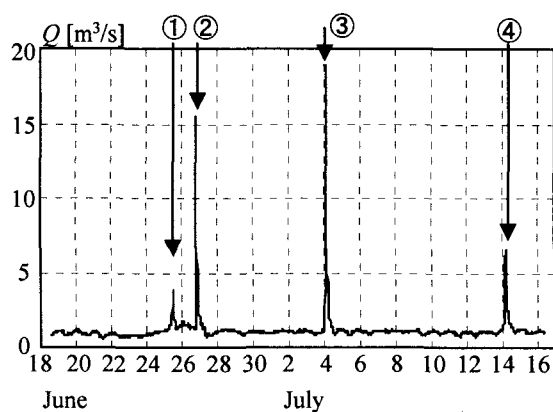
観測項目としては、Stn.1では水位と流速、水質項目 (濁度、SS、COD、窒素、リン) とし、Stn.3では濁度のみ、Stn.4では水質項目のみとしている。ここでは有機物濃度の指標としてCODを計測している。これらの計測方法としては、水質項目に関しては、まず、河川表層水をバケツ採水し、その後、濁度については多項目水質計 (W-22P, 株式会社製作所製)を用いて現場計測した。その他の水質項目については、サンプル水を実験室に持ち帰り各々の項目に関して分析を行った。COD、窒素、リンに関しては、全成分 (=懸濁態成分+溶解態成分、T-COD、T-N、T-P) と溶解態成分 (D-COD、D-N、D-P)をそれぞれ分析している。分析方法は、下水試験方法97年度版⁷⁾と同じとする。流速に関しては、河川用流速計 (AEMI-D, アレック電子(株)製)により表層流速の横断分布計測を実施した。これらの項目の測定時間間隔としては、降雨中及びその直後では15分～1時間として、それ以外は1時間から数時間とする。なお、Stns.1や4では、前節で示した連続調査を行っているため、そこで得られるデータも合わせて整理している。

また、底質環境を調べるために、7月3日に図-1中の8地点の表層土壌を採取し、底質の粒径分布や強熱減量等を計測した。ここで、粒径分析についてはふるい分け試験により行い、強熱減量の分析に関しては、下水試験方法97年度版⁷⁾に基づいて実施している。

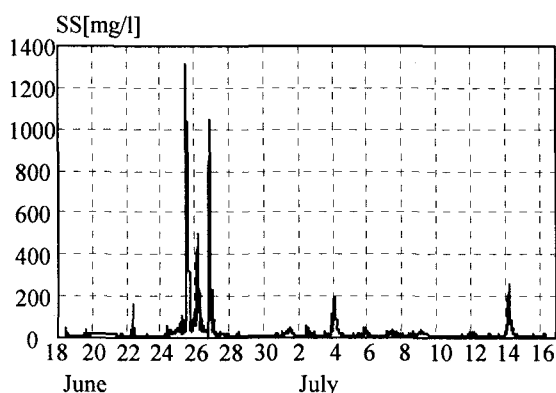
3. 観測結果と考察

(1) SSと濁度の関係

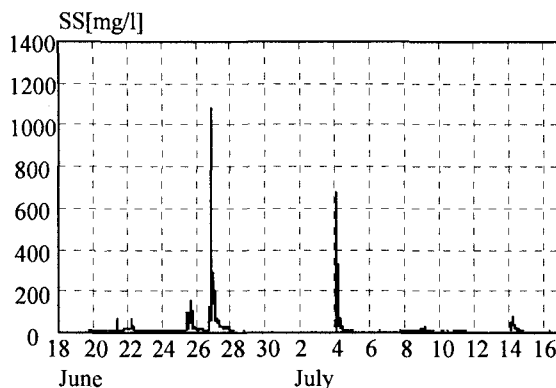
大堀川河口域における土砂・栄養塩・有機物輸送特性を示す前に、SSと濁度の相関図を図-2に示す。ここでは、短期集中観測時において得られたSSと同時に観測されていた濁度の結果に関して、Stns.1と4において別々に



(a) 流量 Q (Stn.1)



(b) SS (Stn.1)

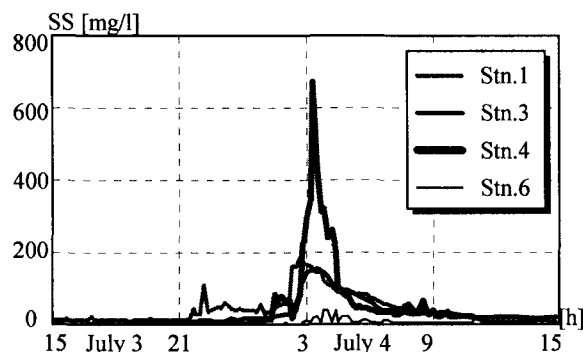
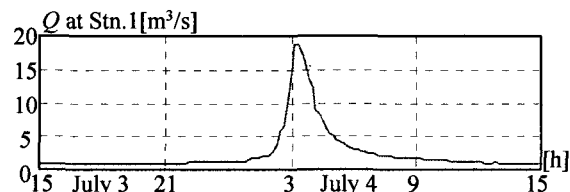


(c) SS (Stn.4)

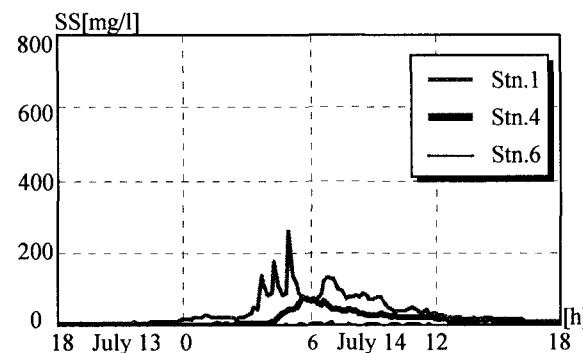
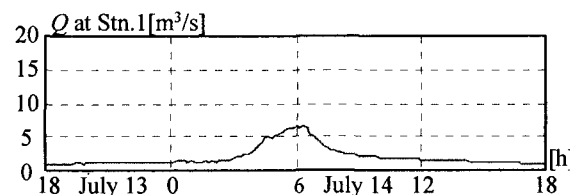
図-3 流量とSSの時系列変化

表示している。これを見ると、この計測では、両地点における濁度とSSの相関関係が明確に異なっており、同じ濁度値に対して、Stn.4のSSの方がStn.1よりも大きくなっていることが分かる。両地点ともに、赤外光を用いた後方散乱方式の濁度計を採用しているため、両地点におけるSSと濁度の相関関係が異なった理由は、浮遊土砂の粒径が異なったものと推察される⁸⁾。このような結果により、Stn.1とStn.4の間の河口域において、降雨時には、浮遊土砂の粒度分布が変化していることが推察される。

(2) 河口域におけるSS環境の時系列変化



(a) 降雨イベント③



(b) 降雨イベント④

図-4 降雨イベント時のSSの比較

河口域における土砂輸送の基本特性を調べるために、連続観測により得られたStn.1における流量及びStns.1, 4におけるSSの時系列変化を図-3に示す。まず、流量の時間変化を見ると、観測期間中には4つの降雨イベントに対応して流量の増加・減少が見られる。以下では、各イベントを、図中に示すように、降雨イベント①, ②, ③, ④と呼ぶこととし、降雨時の短期集中調査期間は降雨イベント③に相当している。次に、SSに着目すると、両地点ともに、降雨イベント時において顕著なSSの上昇が見られるものの、その大きさは降雨イベント毎、地点毎に異なっている。具体的には、全期間中のSSの最大値は、Stn.1では降雨イベント①で見られるのに対して、Stn.4では降雨イベント②で生じている。また、各降雨イベン

トにおいて Stns.1 と 4 の SS の大きさを比べると、降雨イベント①、④では Stn.1 の方が、降雨イベント③では Stn.4 の方が大きく、また、降雨イベント②では両者の SS は同程度である。このように、河口域の上流側 (Stn.1) と下流側 (Stn.4) とでは、降雨イベント毎に SS の大小関係が変化していることが示された。

降雨イベント時における SS の動態をより詳細に検討するために、降雨イベント③と④における流量 (Stn.1) と SS の時系列変化を図-4 に示す。SS については、降雨イベント③では、河道部 (Stns.1,3,4) と湖沼 (Stn.6) の計 4 地点、降雨イベント④では、これらのうち Stn.3 を除いた計 3 地点の結果が図示されている。まず、降雨イベント③の結果を見ると、Stns.1 と 3 の SS の時間変化は概ね類似しており、SS のピーク値は 150~180mg/l となっている。それに対して、Stn.4 の SS は、Stns.1 と 3 よりも大きく、ピーク時には 600mg/l を越えている。Stn.1 から Stn.4 の間における樋管から河川への流入量は小さいことが確認されているので、この降雨イベント時では、Stn.3 から Stn.4 における河床堆積物の巻上げプロセスが顕著であったために、Stn.4 の SS が Stns.1 や 3 よりも大きくなったものと考えられる。さらに、河口地点 (Stn.4) よりも 0.4km 離れた湖沼内 (Stn.6) では、他の地点と比べて SS の時間変化はほとんど見られない。これより、河口より流出した懸濁物質の大部分は、河口地点近傍に沈降していることが推察される。

次に、降雨イベント④に関しては、Stn.1 の SS は、一般的に Stn.4 の結果よりも大きくなっており、両地点間の SS の大小関係が、降雨イベント③の結果と逆になっていることが分かる。また、湖沼内である Stn.6 では、降雨イベント③と同様に、ほぼ一定の低い濃度レベルとなっている。

(3) 降雨時・非降雨時における土砂堆積・侵食特性

前述した観測結果に基づいて、降雨時・非降雨時における河口域の土砂堆積・侵食特性を把握する。図-5 は、河口域上流側 (Stn.1) と下流側 (Stn.4) における累積 SS flux の時間変化を示す。図中の ΣL_1 と ΣL_4 は、それぞれ Stns.1 と 4 における累積 SS フラックスを表す。これより、各降雨イベントでは、両地点ともに累積 SS flux が大きく増加しており、降雨時における SS flux が非降雨時よりも顕著になっていることが分かる。降雨イベントにおける累積 SS flux を比べると、降雨イベント毎や場所毎に、その増加量の様子が変化している。

これらの結果を定量的に検討するために、各降雨イベント毎の Stns.1 と 4 における累積 SS フラックス ΣL_1 、 ΣL_4 及び両地点間の差 ($=\Sigma L_1 - \Sigma L_4$) を表-1 に示す。ここで、降雨イベントとして、①では 6 月 25 日 0 時~26 日 0 時、②では 6 月 26 日 9 時~27 日 9 時、③では 7 月 3

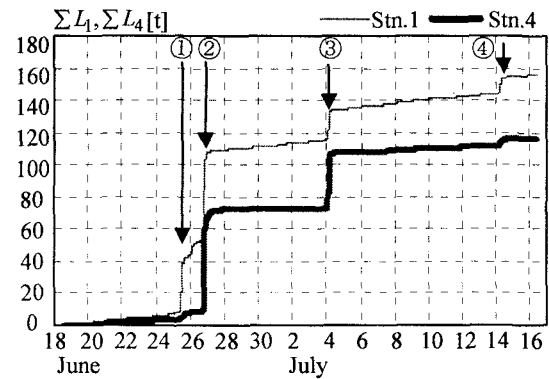


図-5 累積 SS flux の時間変化

表-1 降雨時・非降雨時の累積 SS フラックス
(単位は非降雨時のみ t/day, それ以外では t とする)

	ΣL_1	ΣL_4	$\Sigma L_1 - \Sigma L_4$
Hydrologic event①	36.9	4.1	32.8
Hydrologic event②	57.2	62.2	-5.0
Hydrologic event③	19.1	34.3	-15.2
Hydrologic event④	10.6	4.6	6.0
Non-rainy Condition	1.1	0.4	0.7

日 15 時~4 日 15 時、④では 7 月 13 日 18 時~14 日 18 時と定義して、累積 SS フラックスの計算を行っている。また、降雨時と非降雨時における結果を比べるために、降雨影響のない 7 月 4 日 15 時から 9 日間における結果を非降雨時として表示している。なお、表中の単位は、非降雨時の結果のみ t/day であり、それ以外では全て t とする。まず、累積 SS フラックスに着目すると、Stn.1 における降雨イベント時には非降雨時の 10~55 日分が流出している。一方、Stn.4 に関しては、降雨イベント時の累積 SS フラックスは非降雨時の 10~155 日分流出しており、Stn.1 よりも降雨イベント時の寄与が大きい。

累積 SS フラックスの差 ($=\Sigma L_1 - \Sigma L_4$) に着目すると、まず、非降雨時では正となり、このときには河口域で土砂堆積が卓越していることが分かる。降雨イベント時に関しては、降雨イベント①と④では正であり、それぞれ非降雨時の約 50 日、9 日分の土砂を河口域に堆積させていることが分かる。一方、降雨イベント②と③における累積 SS フラックス差は負となり、各々非降雨時に堆積する約 8 日分、23 日分の土砂を侵食している。このように、降雨イベント毎に、河口域における土砂堆積・侵食傾向のみならず、累積 SS フラックス差の大きさも変化していることが明らかとなった。

降雨イベント毎に土砂堆積・侵食特性が異なる要因を調べるために、各降雨イベント時における最大流量 Q_{max} と Stns.1 と 4 における累積 SS フラックス差 ($=\Sigma L_1 - \Sigma L_4$) を図-6 に示す。これを見ると、最大流量 Q_{max} が大きくなるとともに、累積 SS フラックス差 ($=\Sigma L_1 - \Sigma L_4$) は減少し、 Q_{max} が小さいほど

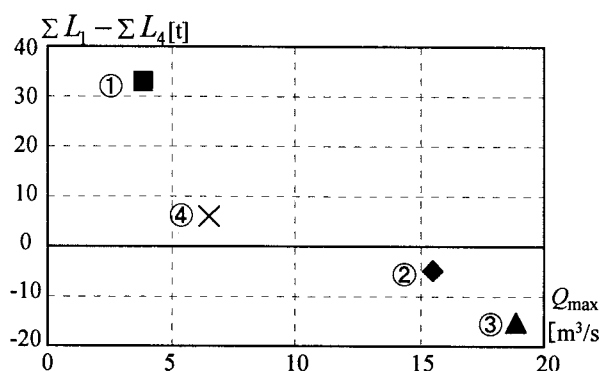


図-6 各降雨イベントにおける最大流量 $Q_{\max}$ と累積SSフラックス差($=\Sigma L_1 - \Sigma L_4$)の関係

$\Sigma L_1 - \Sigma L_4$ は増加していることが分かる。これは、最大流量が大きくなると、河口域における堆積物の移動限界速度を上回り、底質巻上げ量が増大するためであると考えられる。このように、大堀川河口域における土砂堆積・侵食特性は河道部の最大流量条件により大きな影響を受けていることが分かる。なお、上述した最大流量と土砂堆積・侵食量の定量的な関係は、河口域における堆積土砂の巻上げ特性により大きく変化するものと予想されるため、今後、著者らが別途行っている底質巻上げ量モニタリング⁹⁾をこの領域においても実施していく予定である。

(4) 降雨時における栄養塩・CODの動態

河口域における降雨時での栄養塩・有機物輸送特性を調べるために、降雨イベント③に実施された短期集中観測により得られたCOD、窒素、リンの懸濁態成分(P-COD, P-N, P-P)と流量の時間変化を図-7に示す。ここでは、3つの水質項目に関しては、Stns.1と4における結果が図示されている。これを見ると、両地点ともに、河川流量の増加とともに、懸濁態成分は上昇するものの、その増加量はStn.4の方がStn.1よりも大きいことが分かる。また、この二つの地点における水質濃度の大小関係を比べると、流量ピーク付近(7月4日3時頃)にはStn.4の方が、それ以外の流量が小さい時間帯にはStn.1の方がそれぞれ大きい、ということが全ての水質濃度で共通して見られる。このような懸濁態成分の時間変化は、図-4(a)に示しているSSの場合と類似した結果となっている。また、T-NやT-P、T-CODの溶存態成分に関しては、降雨イベント中、上述した懸濁態成分と比べて、両地点間の明確な差は見られないことが確認された。以上のことをまとめると、この降雨イベント③では、流量増加に伴って河口域における底質の巻上げ過程が顕著となり、CODや栄養塩の懸濁態成分に関しては、Stn.1よりもStn.4の方が大きくなることが明らかとなった。さらに、溶存態成分が両地点で同程度であるために、T-NやT-P、T-COD負荷

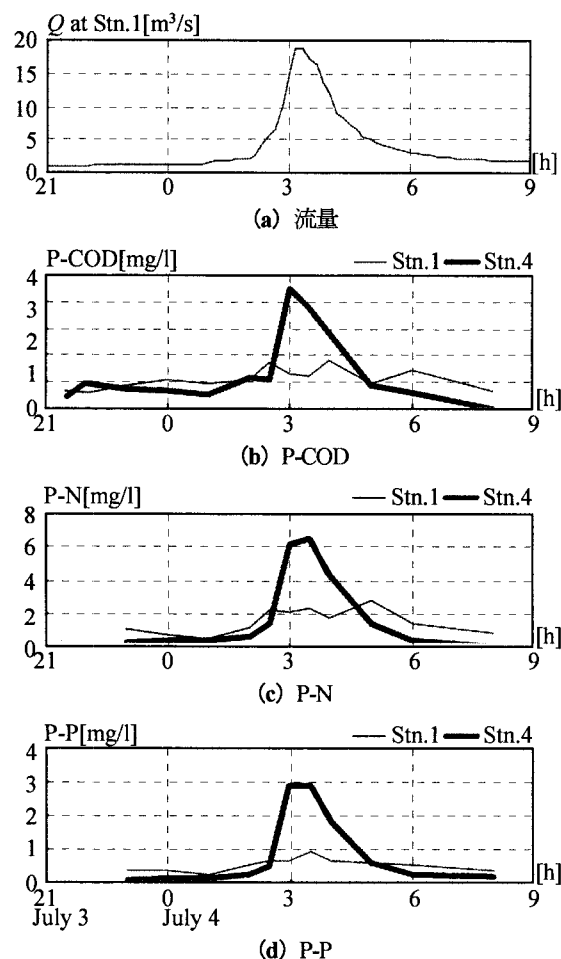


図-7 降雨イベント③におけるCOD・栄養塩濃度の懸濁態成分に関する時間変化

量が、懸濁態濃度の違いを反映して、両地点で明確に異なっていることが示された。

(5) 土砂沈降特性と底質環境

前述したように、短期集中観測を行った降雨イベント③では、Stns.1～Stn.4の間における底質の巻上げが顕著になるために、Stns.1と4における土砂・栄養塩・COD輸送特性が大きく異なることが示された。そこで、それらの結果と密接に関係している河口域や湖沼内における土砂沈降特性と有機物含有量の指標である強熱減量の分布を検討した結果を示す。まず、図-8は、Sediment trapにより計測された土砂沈降量を $\text{kg/m}^2/\text{day}$ の単位で表示している。ここでは、Sediment trapの容量に対して土砂沈降量が大きく、測定値の信頼性に欠ける河口域のStns.1, 2, 3の結果は除外している。この結果より、土砂沈降量は、河口地点(Stn.4)で最も大きく、大堀川河口からの距離とともに減少しており、沼中央部(Stn.7)や東側(Stn.8)では河口地点より1オーダー以上小さくなっている。このように、降雨時における大堀川河口から供給された土砂の大部分は河口地点近傍に堆積していることが、土砂沈降量データからも確認された。

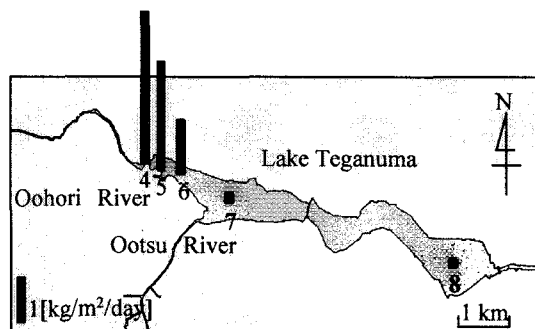


図-8 河口域及び沼内の土砂沈降量フラックス

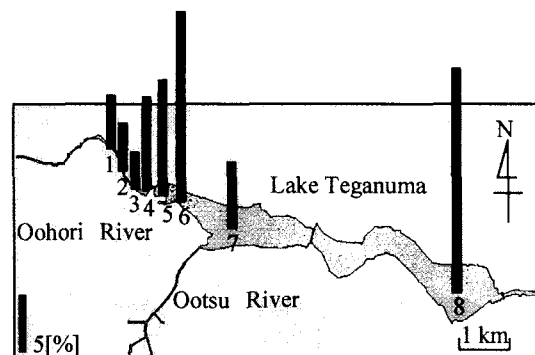


図-9 大堀川河口域と沼内における強熱減量

図-9は、河口域及び沼内における底質の強熱減量に関する空間分布を示す。これを見ると、河口地点 (Stn.4) の強熱減量は約 8%であり、Stn.4 より上流側 3 地点の結果の約 2 倍に達している。このような結果より、降雨イベント③では、河口域において有機物含有量が相対的に大きい Stn.4 周辺の底質が巻き上げることによって、流量ピーク付近の Stn.1 と Stn.4 での P-COD の差が形成されたものと考えられる。このように、巻き上げプロセスが顕著になる降雨時の水質環境は、底質環境の影響を大きく受けていることが分かる。また、沼内における強熱減量は、沼東側に行くとともに大きくなっており、最大で約 19%に達している。このように、手賀沼における底質中の有機物含有量は、極めて大きいことが分かる。

4. 結論

都市河川河口域における土砂・栄養塩・有機物輸送特性を把握するために、手賀沼流入河川の一つである大堀川の河口域を対象とした現地観測を実施した。そこで得られた主な結果は、以下のとおりである。

(1) 大堀川河口域における SS 環境を調べたところ、各降雨イベントによって、河口域上流側 (Stn.1) と下流側 (Stn.4) とでは、SS の大小関係が大きく変化していることが分かった。さらに、沼内 (Stn.6) における SS は、降雨イベント時でも大きく増加しておらず、大堀川河口から流出した懸濁物質の大部分は河口地点近傍に堆積して

いることが示された。

(2) 河口域における土砂堆積・侵食特性について検討した結果、非降雨時や河道内の最大流量が小さい降雨時には土砂堆積傾向、最大流量の大きい降雨イベント時には土砂侵食傾向になっていることが明らかとなった。

(3) 短期集中観測を行った降雨イベント③における栄養塩・COD 輸送特性を調べたところ、SS と同様に、河口域の下流側 (Stn.4) での栄養塩・COD は、上流側 (Stn.1) よりも大きくなっていることが示された。そのような栄養塩・COD の動態は、底質の巻き上げ過程の影響を大きく受けていることが明らかとなった。

なお本研究では、約 1 ヶ月間の連続観測結果により都市河川河口域における土砂・栄養塩・有機物特性の動態を検討しているものの、より長期間にわたる連続観測の実施 (例えば、横山ら¹⁰⁾) や短期集中観測の事例を積み重ねることは必要不可欠であり、今後行っていく予定である。

謝辞：本論文における現地調査を行う際には、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生諸氏には多大なる御助力を頂いた。また、水質分析に際しては、同学科出口浩助教授に様々な便宜を図って頂いた。本研究の一部は、下水道振興基金研究助成金 (研究代表者：二瓶泰雄) によるものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 国松孝男, 村岡浩爾: 河川汚濁のモデル解析, 技報堂出版, pp.1-266, 1989.
- 2) 山田安彦, 白鳥孝治, 立本英機 (編): 印旛沼・手賀沼 一水環境への提言一, 古今書院, pp.1-167, 1993.
- 3) 二瓶泰雄, 大竹野歩, 菊間弘和, 藤本美樹: 手賀沼流域における汚濁負荷特性に関する現地観測, 河川技術論文集, Vol.8, pp.517-522, 2002.
- 4) (社) 日本水環境学会編: 日本の水環境 3 関東・甲信越編, 技報堂出版, pp.153-166, 2000.
- 5) 二瓶泰雄, 服部裕司, 小久保武, 大竹野歩: GIS を用いた手賀沼流入河川の汚濁負荷解析, 水工学論文集, Vol.48, 2004 (印刷中).
- 6) 小林節子, 平間幸雄: 湖沼の水環境保全のための流域総合管理手法, 水環境学会誌, Vol.19, No.2, pp.121-131, 1996.
- 7) (社) 日本下水道協会: 下水試験方法上巻 -1997 年版-, 297p, 1997.
- 8) 横山勝英: 濁度計の粒径依存特性と現地使用方法に関する考察, 土木学会論文集, No.698/II-58, pp.93-98, 2002.
- 9) 二瓶泰雄, 山崎裕介, 西村司, 丸山透: 都市河川における易浮遊性堆積物環境の検討, 水工学論文集, Vol.48, 2004 (印刷中).
- 10) 横山勝英, 諏訪義雄, 二村貴幸, 谷口丞, 末次忠司: 湖沼川下流域における土砂・栄養塩動態の特性, 水工学論文集, Vol.46, pp.659-664, 2002.

(2003. 9. 30 受付)