

複数の都市河川における降雨時水質環境の比較解析

COMPARATIVE ANALYSIS OF WATER QUALITY ENVIRONMENTS UNDER RAINY CONDITIONS IN SEVERAL URBAN RIVERS

今野篤¹・二瓶泰雄²・大竹野歩³・水口陽介⁴

Atsushi KONNO, Yasuo NIHEI, Nobu OOTAKE and Yosuke MIZUGUCHI

¹ 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

(〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

² 正会員 博 (工) 東京理科大学助教授 理工学部土木工学科 (同上)

³ 正会員 修 (工) 東京都北区都市整備部地域整備課 (〒114-8508 東京都北区王子本町1-15-22)

⁴ 非会員 東京理科大学 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

For understanding water environments in urban rivers under rainy conditions, the intensive field measurements of water quality and hydrodynamic environments were carried out at several urban rivers and the Edo River in which the scale and environments of the watershed are different. The observed results indicate that the differences of the water quality environments between urban rivers under rainy conditions are closely related with those of sedimentary environments. The contribution of the sedimentary environments to water quality environments in the Edo River is much smaller than that in the urban rivers due to the property of erosion rate of sediments. The origin of the particulate matters in urban rivers is quantitatively discussed with the observed data for the erosion rate of sediments.

Key Words: urban river, water quality, sedimentary environment, rainy condition, comparative analysis

1. 序論

都市河川の多くは、流域での人間活動に起因した水質汚濁や富栄養化の問題を抱えており、今後、水環境の現状把握や保全・再生対策を実施することは急務の課題である。この都市河川では、排水規制の強化や下水道整備の促進・高度化により家庭や工場起源の点源負荷は減少傾向にあるものの、合流式下水道雨天時越流水 (Combined Sewer Overflows; CSO) 問題に象徴されるように、降雨時における汚濁負荷の影響が相対的に増加している¹⁾。降雨時における都市河川の水質環境は、非降雨時とは大きく異なることが指摘されているものの^{2)~5)}、降雨時での観測作業上の問題に起因して、観測データが十分に存在せず、その実態については不明な点が多い。

また、降雨時における河川水中の汚濁物質の起源としては、降雨由来や市街地表面 (路面、屋根面)、山林・田畑からの流出、河床堆積物などの面源負荷が考えられ、これまでもいくつか検討が行われている⁶⁾。しかしながら、このような面源負荷特性は、同一河川でも降雨状況や先行晴天日数等により変化することや、同一気象条件でも流域環境や河道状況が異なる都市河川毎に大きく異なるにも関わらず、それらに関しては未解明な部分が多い。

本研究では、都市河川を対象として、降雨時における水質環境の実態や汚濁物質の起源を把握することを目的

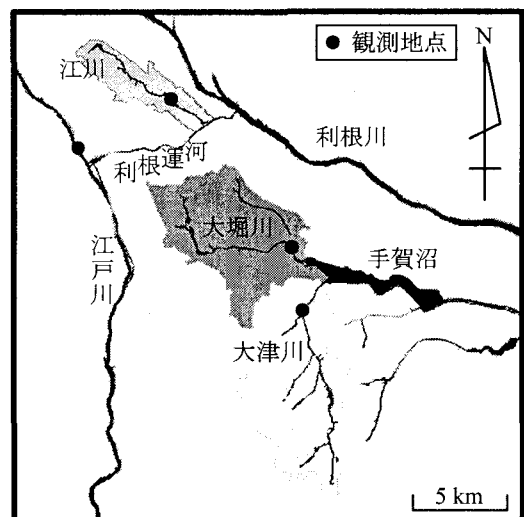


図-1 現地観測対象とする4つの河川

として、降雨イベント時における複数の都市河川での現地調査を実施した。ここでは、流域環境や河道状況が異なり、かつ、近接した3つの都市河川と、大河川である江戸川を観測サイトとして選定し、複数の降雨イベント時における水理・水質環境調査を行った。また、降雨時水質環境の決定要因を検討するために、上述した面源負荷の一つである底質環境に着目し、降雨時調査と同期する形で底質環境調査を実施した。本論文では、これらの調査結果に基づいて、降雨時水質環境の特徴やそれと底質環境との関連性について、複数の都市河川での結果を

表－1 都市河川流域の環境情報

		大堀川	大津川	江川
流域面積[km ²]		31.0	35.9	12.0
流路長[km]		12.9	7.9	7.5
流域人口[万人]		16.5	16.2	2.5
下水道普及率[%]		84	70	0
土地利用 [%]	市街地	75	58	44
	水田	1	6	5
	畑	11	22	17
	森林	13	14	34

比較する形で報告する。

2. 現地観測の概要

(1) 観測サイト

本研究で対象とした観測サイトとしては、富栄養化湖沼として有名な千葉県手賀沼に流入する主要都市河川である大堀川と大津川、さらに、利根運河へ繋がっている都市河川の1つである江川、また、これらの都市河川と流域規模が大きく異なる大河川である江戸川を選定した。これらの河川の位置は、図－1に示すとおりであり、大堀川と大津川、江川の流域は近接していることが分かる。

この都市河川流域における環境情報の概略を表－1に示す。これより、大堀川と大津川は、流域面積や人口は同程度であり、流域の市街化が進行している。また、下水道普及率が両者ともに70%を超えており、かつて卓越していた生活系負荷よりも産業系負荷や面源負荷が顕著であることが指摘されている^{7), 8)}。一方、江川は、他の2つの都市河川と比べて、人口や流域規模が小さく、市街地率も相対的に低く、また、下水道普及率が0%となっている。一方、江戸川は、千葉県野田市関宿にて利根川から分派し、茨城県、千葉県、埼玉県、東京都の境界を南下し、東京湾へ流入している。江戸川は、流域面積158.0km²、流路長54.7kmの大河川であり、上述した3つの都市河川と大きく異なっている。

(2) 降雨時における水理・水質観測

降雨時における短期集中的な水理・水質観測は、表－2に示すように、2001年度から計9回の降雨イベントを対象として行われている。これらの観測のうち、大堀川では計7回行われており、また観測No.7と9では、大堀川、大津川、江川の3つの都市河川において同時観測が実施された。各降雨イベントにおける総降雨量や先行晴天日数は、表－2に示すとおりである。各河川における観測点は、図－1中の丸印で示されている位置である。

観測での計測項目は、水位と流速、水質項目（濁度、SS、COD、窒素、リン）である。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、濁度について多項目水質計（W-22P、株式会社堀場製作所製）により現場計測した。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、下水試験方法97年度版⁹⁾に従い分析した。また、COD、窒素、リンに関しては、全成分（＝懸濁態成分＋溶存態成分、T-COD、T-N、T-P）と溶存態成分（D-COD、D-N、D-P）を分析し、両者の差として懸濁態成分（P-COD、P-N、P-P）を算出した。水質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時間から数時間とした。次に、水位に関しては自記式水位計（Diver, Eijikelkamp 社製）により計測した。また、流速計測には、河川用流速計（AEM1-D、アレック電子株式会社製）や高解像度超音波ドップラー流速分布計（RDI, WorkHorse ADCP Sentinel 1200kHz）を用いた。なお、観測No.7では、大堀川にて高解像度 ADCP を河床設置し、流速やSSの鉛直分布計測や、その結果に基づいて底質巻上げ量を求めた¹⁰⁾。

(3) 底質環境調査

都市河川の降雨時水質環境と底質環境の関連性を検討するために、底質環境調査として、①河床表層土壌中の栄養塩・有機物含有量と、②底質巻上げ量の流速依存性、について調べている。まず、①の調査では、観測サイトとして、降雨時観測と同じ4つの河川とし、観測No.1と3を除く7つの降雨イベント前後において河床表層土壌を採泥した。分析項目としては、底質中の窒素、リン、

表－2 観測期間と降雨状況

イベントNo.	期間	総降雨量[mm]	先行晴天日数[日]	大堀川	大津川	江川	江戸川	備考
1	2001/7/6-7	8	5.96	○				
2	2001/9/30-10/2	70	8.71	○				台風0119号
3	2002/7/10-11	59	0.63	○				台風0206号
4	2003/6/24-26	18	5.71			○		
5	2003/7/3-4	33	1.88	○				
6	2003/8/9-12	20	2.71				○	台風0310号
7	2003/9/20-21	52	16.13	○	○	○		
8	2004/5/20-21	66	0.50	○				台風0402号
9	2004/6/11-12	12	1.58	○	○	○		台風0404号

COD 含有量としており、これらの結果を単位土壌乾燥質量当たり換算して表示している。分析方法に関しては、採泥した土壌サンプルを実験室に持ち帰り、前節に示した水質項目と同じ方法に基づいている。次に、②の調査では、著者らが別途行っている河床堆積物の巻上げ調査方法¹¹⁾に基づいて、大堀川と江戸川における底質巻上げフラックスを計測した。この巻上げ観測を、大堀川では、観測 No.5, 7, 8, 9 の降雨イベント前後に行った。また、江戸川では、巻上げ試験装置の都合により、降雨時観測を行った観測 No.6 の前後に行うことができず、2004 年 8 月 18 日に巻上げ調査を実施した。

3. 降雨時水質環境の特徴

(1) 水質濃度の時間変動特性

都市河川における水質濃度の基本的な特徴を抽出するために、3 つの都市河川で同時観測が行われた観測 No.7 における水質濃度の時間変化を図-2 に示す。ここでは、水質濃度として、リンに着目し、全リン濃度 (T-P) と溶存態リン濃度 (D-P)、懸濁態リン濃度 (P-P) を示している。また、図中には、比較のため、SS と時間雨量 (千葉県我孫子市アメダスデータ) も表示している。この観測中には、同図 (a) に示されているように、降雨ピークが 2003 年 9 月 20 日 16 時頃と同 21 日 5 時頃の 2 回現れている。このような降雨状況下における SS の時間変化を見ると、1 回目の降雨ピークに対応するように、3 つの河川ともに SS が上昇し、そのピーク値は大堀川や江川では 200mg/L、大津川では 120mg/L である。これらのピーク値を降雨イベント前の値と比べると、大堀川では 8 倍程度、大津川と江川では 20 倍程度にまで達している。また、2 回目の降雨ピーク時においても、各河川ともに SS は上昇しているものの、そこでのピーク値は、1 回目のピーク値よりも小さく、3 河川とも 70~80mg/L で同程度になっている。

次に、同図 (c) に示されている T-P に着目すると、1 回目の降雨ピーク時には、明確な T-P のピークが 3 河川ともに現れ、そこでのピーク値は降雨イベント前の値を大きく上回っており、SS と類似している傾向が見られる。一方、2 回目の降雨ピーク時においては、SS では 3 河川間で差が見られなかったにも関わらず、T-P に関しては江川での値が大堀川や大津川よりも明確に大きいことが分かる。このような河川間の T-P の差が生じている要因としては、河川間では明確な差が見られず、濃度値も小さい D-P (同図 (d)) ではなく、T-P と類似して大きく時間変動している P-P (同図 (e)) にあるものと考えられる。水質濃度の時間変動特性に関する傾向は、窒素や COD とともに類似していることが確認されている。

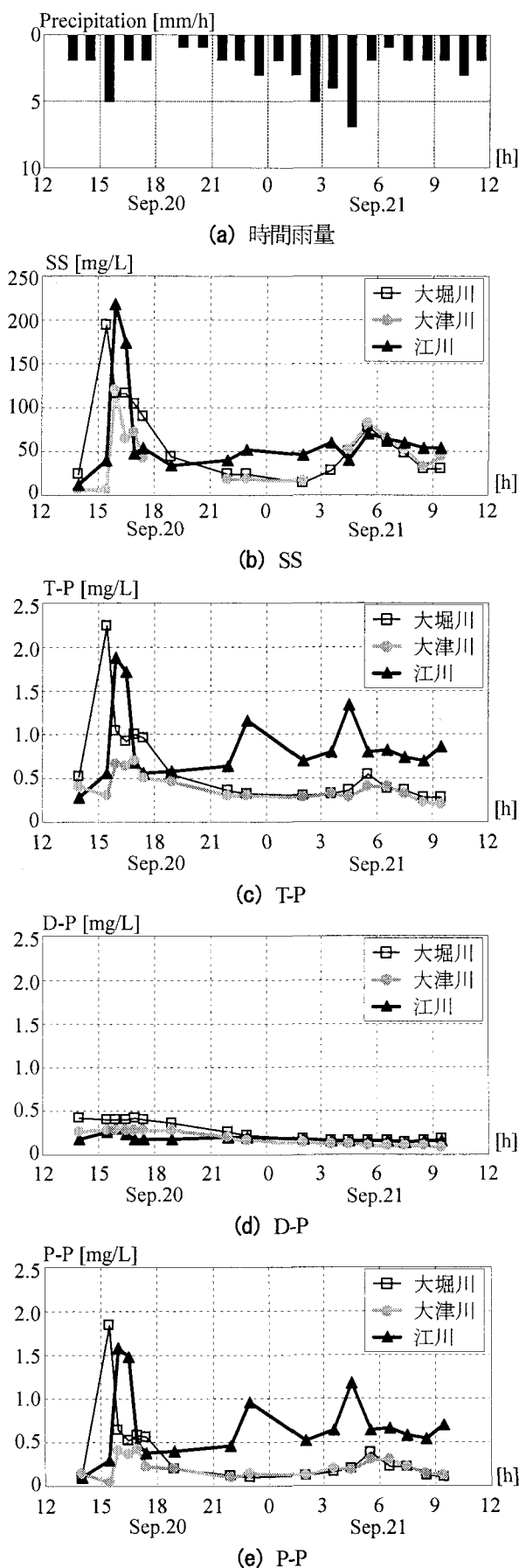
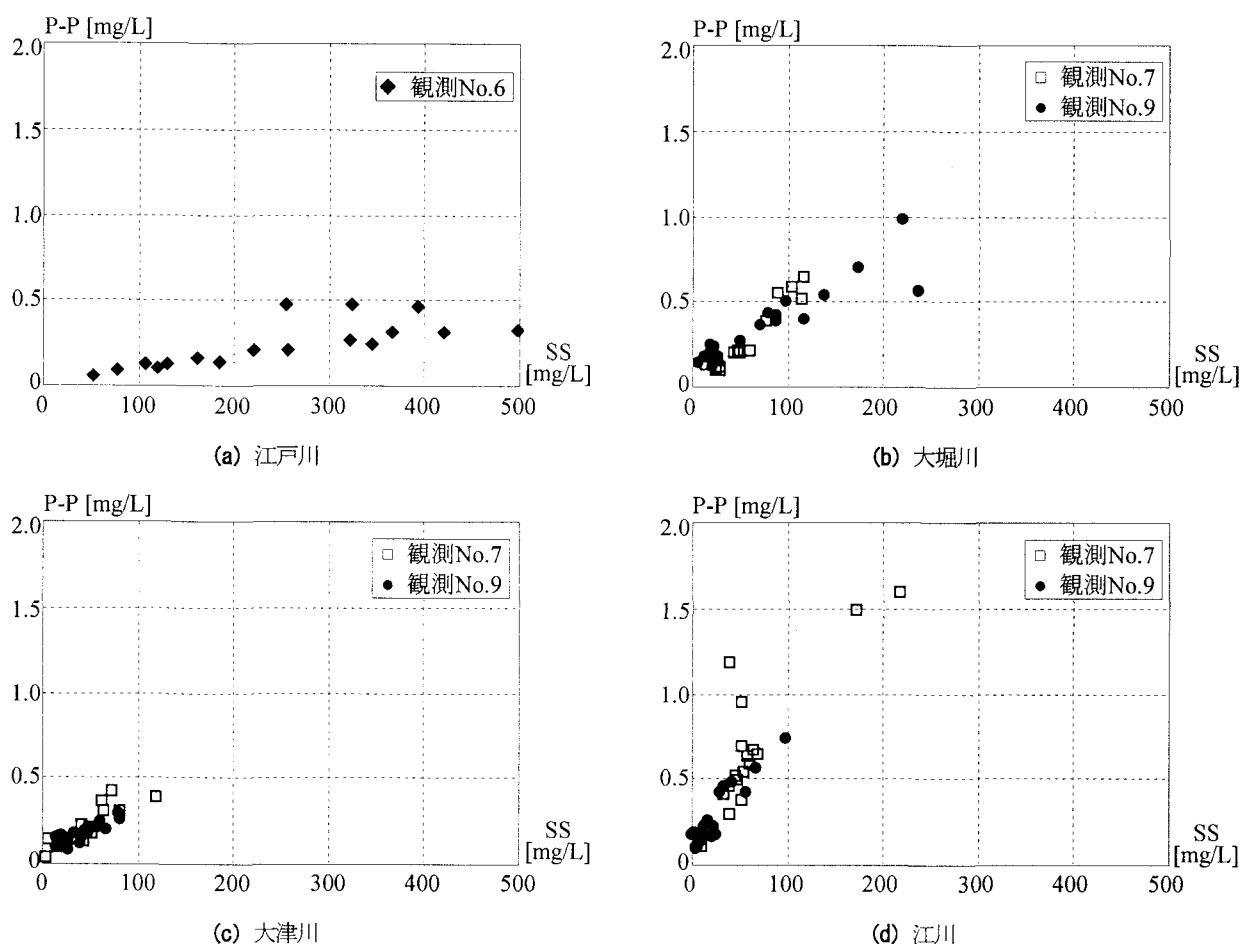


図-2 降雨イベント時における水質濃度の時間変化の一例 (観測 No.7, SS とリン)



図－3 河川水のSSと懸濁態リン濃度（P-P）の比較

（２）河川水中の懸濁態濃度とSSの関係

前節で述べたように、都市河川間において懸濁態リン濃度の違いが顕著に見られたので、より詳細に検討するために、河川水中の懸濁態リン濃度とSSの相関図を河川毎に作成したものを図－3に示す。ここでは、江戸川に関しては観測No.6の結果を、また、3つの都市河川では、観測No.7と9に関する結果が示されている。この図を見ると、どの河川においても、SSの上昇に伴ってP-Pが大きくなっており、両者は概ね良好な相関性を有している。このようなSSに対するP-Pの上昇率は、河川水のSS中におけるリン含有量に相当しているものと考えられる。この河川水のSS中におけるリン含有量を河川同士で比較すると、その大きさは顕著に異なっていることが分かる。具体的には、まず、江戸川では、SSが500mg/Lに達してもP-Pは0.5mg/L以下となっており、3つの都市河川と比べて、河川水のSS中におけるリン含有量が低い。一方、都市河川間で比べて見ると、河川水SS中のリン含有量は江川が最も大きく、大堀川と大津川が同程度であることが分かる。このような江川と大堀川、大津川における河川水SS中のリン含有量の違いのために、図－2に示した都市河川間におけるP-Pの差が生じたものと考えられる。

表－3 リン濃度に関する水質環境と底質環境の比較

	河川水SS中 リン含有量 [g/kg]	底質中 リン含有量 [g/kg]
大堀川	5.18	3.44±1.06
大津川	5.40	3.55±2.06
江川	14.93	13.33±5.98
江戸川	1.02	9.81±0.63

4. 降雨時水質環境と底質環境の関連性

（１）河川水SS中及び底質中のリン含有量の比較

河川水SS中におけるリン含有量が都市河川毎に異なる要因を検討するために、面源負荷の1つであり、降雨時水質環境に直接的な影響を及ぼす底質環境に着目し、両者の関連性を検討する。河川水SS中及び底質中のリン含有量を比較した結果を表－3に示す。表中には、河川水SS中のリン含有量としてP-P/SSの平均値を示している。また底質中のリン含有量として、データのばらつきを考慮して、単位土壌乾燥質量当たり換算された結果の平均値と標準偏差を表中に示

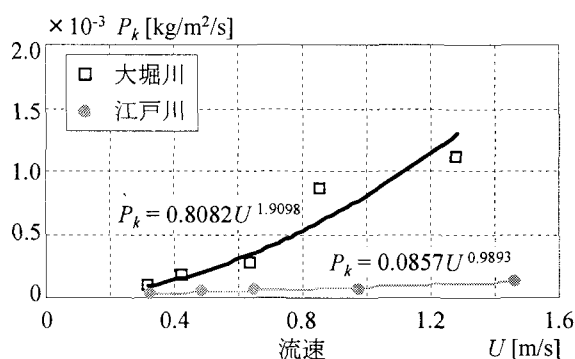


図-4 底質の巻上げフラックスの比較（大堀川と江戸川）

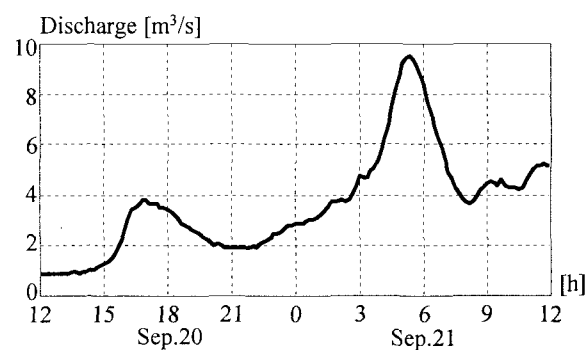
している。なお、ここでの底質データは、水質データとの比較のため、観測 No.7 と No.9 の時期の結果を用いており、表中のばらつきは、地点間およびサンプリング時間の差に起因している。

3 つの都市河川における底質中のリン含有量の平均値を比較すると、江戸川が最も大きく、大堀川と大津川は同程度である。このような底質環境の観測結果と河川水 SS 中のリン含有量を比較すると、江戸川では両者が同程度となっていることが分かる。それに対して、大堀川と大津川では、平均値としては、河川水 SS 中のリン含有量が底質中の結果よりも大きくなっている。しかしながら、底質データの標準偏差を考慮すると、河川水 SS 中のリン含有量の結果は、底質中のリン含有量と同程度であるものと思われる。また、江戸川のリン含有量に関しては、底質の結果が河川水の値よりも著しく大きくなっている。

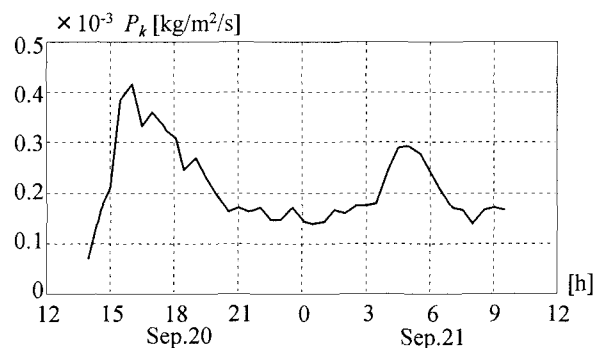
以上の結果をまとめると、3 つの都市河川における降雨時の懸濁態濃度の違いは、河川間での底質環境の差と密接に関連していること、また、江戸川では、降雨時水質環境に対して底質からの影響が小さいことが明らかとなった。なお、降雨時水質環境と底質環境の関連性は、COD や窒素においてもリンと類似した傾向となっているが、ここでは、紙面の都合上、省略している。

(2) 底質巻上げ特性

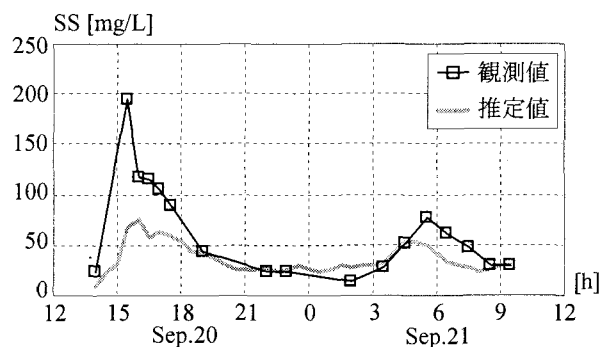
降雨時水質環境と底質環境の関連性が河川毎に異なる要因を、土砂水理学の観点より定量的に検討するために、ここでは、底質の巻上げ特性に着目する。図-4 は大堀川と江戸川における底質の巻上げフラックス P_k の流速依存性を示している。これらのデータは、2. 3 で述べた、巻上げ調査方法に基づいて現地河川にて直接計測された観測結果であり、大堀川の観測データは、観測 No.7 の直前（2003 年 9 月 19 日）の結果、江戸川では、2004 年 8 月 18 日の結果である。これを見ると、同じ流速条件下では、大堀川における巻上げフラックスの方が江戸川よりも 1 オーダー程度大きくなっていることが分かる。これより、江戸川において降雨時水質環境に対する底質影響が小さいのは、江戸川における底質巻上げ量が都市



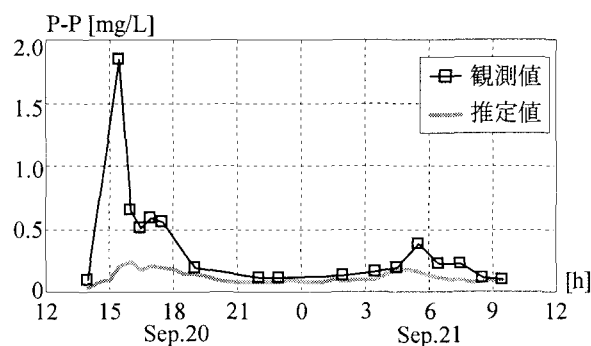
(a) 流量



(b) 巻上げフラックス P_k



(c) SS



(d) P-P

図-5 観測 No.7 における流量・巻上げフラックスおよび SS・P-P の観測値と推定値の時系列変化（大堀川）

河川と比べて著しく小さいことに起因しているものと考えられる。

(3) 降雨時懸濁態物質の起源

次に、降雨時における懸濁態成分の起源として、底質

がどの程度寄与しているかを検討する。ここでは、高解像度 ADCP により計測された巻上げフラックスデータに基づいて、底質起源と推定される SS 及び P-P の結果と観測値を比較したものを図-5 に示す。図中には、観測 No.7 における結果が表示されており、流量と底質巻上げフラックスの観測値も図示されている。ここで、底質起源の SS の推定値を算出するために、底質巻上げフラックスと土砂沈降フラックスが底面上で等しい、という局所平衡性の仮定と、SS の鉛直分布に対する指数関数の仮定、という2つの仮定に基づいて、底質巻上げフラックスの観測値より直接算出している。また、P-P の推定値は、上記の方法で推定された SS 値と底質中のリン含有量の平均値(表-3)の積として与えられている。

まず、2回の降雨ピーク中における巻上げフラックスの時間変動の特徴としては、流量は2回目の降雨ピークにおいて最大値を取るのに対して、巻上げフラックスに関しては1回目の降雨ピークのときに最大値が現れている。これは、底質巻上げフラックスと流速の関係性が降雨イベント中に変化することを示している¹⁰⁾。

図-5 (c) に示されている底質起源の SS 推定値と観測値を比較する。1回目の降雨ピークでは、ファーストフラッシュ現象と見なされる時刻(9月20日15:30)において、観測値は約 200mg/L となっているのに対して、推定値が 70mg/L であり、推定値は観測値の 36%とあまり大きな値ではない。その後、SS 推定値は観測値により近づく傾向となっており、割合としては、50~60%となっている。さらに、2回目の降雨ピークでは、観測値に対する推定値の割合は 56~100%となっており、1回目の降雨ピークよりも大きくなっている。また、同図 (d) に示される P-P においても、SS と類似した傾向が見られた。具体的には、1回目の降雨ピークでは、ファーストフラッシュを除くと、P-P の推定値は観測値の 33~37%、2回目の降雨ピークでは 41~87%、となっている。

これより、降雨時河川水中の懸濁態物質の起源としては、底質が有意な大きさ(SSでは50-60%、P-Pでは30-40%)を占めることが推定された。また、底質以外のノンポイントソース(路面・屋根面堆積物)も大きな影響を及ぼしており、今後、ノンポイントソースデータを収集し、多角的に降雨時における河川水中の懸濁態物質の起源を検討する(その基礎的な検討を始めている)。

5. 結論

都市河川における降雨時水質環境の実態やそれと底質環境の関連性を調べるために、複数の都市河川と江戸川における現地観測を行い、以下の結論が得られた。

- 1) 同一の降雨イベントにおいて都市河川間で見られた降雨時水質環境の違いは、溶存態濃度ではなく懸濁

態濃度の違いに起因している。

- 2) 大河川である江戸川は、他の都市河川よりも、SS中の栄養塩・有機物含有量が小さい。また、3つの都市河川間においては、江川が最も大きく、大堀川、大津川では同程度である。
- 3) 都市河川における降雨時水質環境に対して底質環境が大きく関与しており、また江戸川では底質環境の影響が小さいことが示された。水質環境に対する底質影響の違いが江戸川と都市河川とで異なるのは、底質巻上げ特性と関連している。
- 4) 底質巻上げフラックスデータを用いて、河川水中の懸濁態物質の起源として底質の寄与を大堀川において調べた結果、SSでは50-60%、懸濁態リン濃度(P-P)では30-40%の寄与があることが示された。

謝辞：本研究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、水質分析の際に、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)と科学研究費補助金基盤研究(C)(2)(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) 古米弘明：都市域の雨天時汚濁負荷流出解析の現状と課題、水環境学会誌、Vol.25, No.9, pp.524-528, 2002。
- 2) 海老瀬潜一：汚濁物質の降雨時流出特性と流出負荷量、水質汚濁研究、Vol.8, No.8, pp.31-36, 1985。
- 3) 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。
- 4) 和田安彦：ノンポイント汚染源のモデル解析、技報堂出版、pp.1-214, 1990。
- 5) 森田弘昭：霞ヶ浦における河川流入負荷特性に関する研究、下水道協会誌、Vol.40, No.484, pp.119-137, 2003。
- 6) 和波一夫、嶋津暉之：都市河川の雨天時汚濁の実態、水環境学会誌、Vol.25, No.9, pp.529-532, 2002。
- 7) 二瓶泰雄、服部祐司、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, pp.1459-1464, 2004。
- 8) 砂田岳彦、二瓶泰雄、今野篤、尾関利文：GISを用いた手賀沼流域の汚濁負荷解析、土木学会年次学術講演会講演概要集第2部、Vol.59, pp.583-584, 2004。
- 9) (社)日本下水道協会：下水試験方法上巻 -1997年版-、297p, 1997。
- 10) 飯田裕介、二瓶泰雄、佐藤慶太：高解像度 ADCP を用いた洪水時都市河川の流速・SS の鉛直構造に関する現地観測、土木学会年次学術講演会講演概要集第2部、Vol.59, pp.291-292, 2004。
- 11) 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, pp.1447-1452, 2004。

(2004.9.30 受付)