

手賀沼流域における汚濁負荷特性に関する現地観測

FIELD OBSERVATION ON POLLUTANT LOAD IN WATERSHED OF LAKE TEGANUMA

二瓶泰雄¹・大竹野歩²・菊間弘和²・藤本美樹

Yasuo NIHEI, Nobu OOTAKE, Hirokazu KIKUMA and Miki FUJIMOTO

¹正会員 博(工) 東京理科大学講師 理工学部土木工学科(〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

²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

To examine pollutant loads in the watershed of Lake Teganuma under rainy and normal atmospheric conditions, we have made field measurements on the discharge, T-BOD, T-COD, T-N, T-P and other water qualities in Oohori River, one of main urban rivers in the watershed. The fluxes of the water qualities at the sluices in Oohori River reveal the appreciable regional variations of the pollutant loads in the watershed. The budget analysis of the water qualities for the river water indicates that the self-pollution effect in the river with the pollutant loads at the main sluices has significant influences on the water qualities in the river. Although the pollutant loads in the river under the rainy condition increase remarkably compared to those under the normal atmospheric conditions, the ratios of T-COD and T-P fluxes in the rain condition to those in the normal conditions are larger than that of T-N fluxes. This difference may be closely related to that in T-COD, T-N and T-P contained in the river-bed deposit.

Key Words : Lake Teganuma, pollutant load, water quality, field measurement, Oohori River

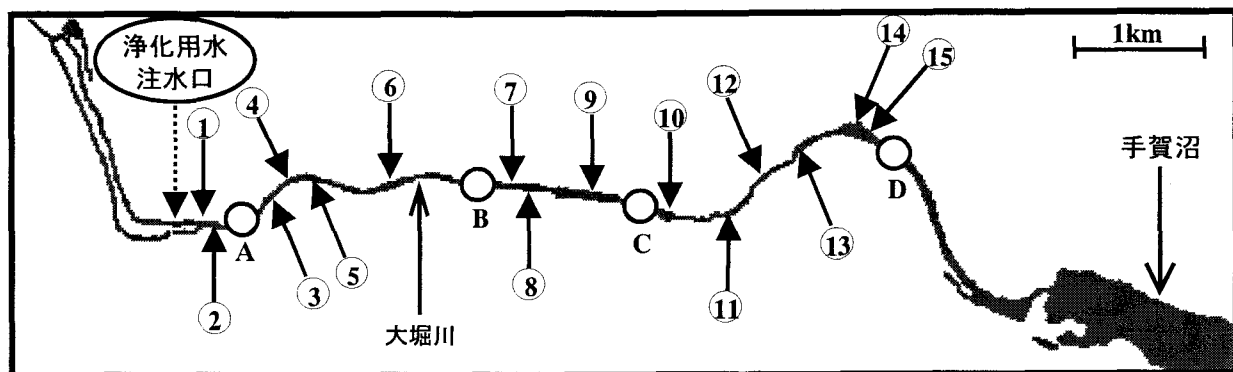
1. はじめに

平均水深0.86m, 湖沼面積650haであり東西方向に細長い形をしている手賀沼は1960年代以降水質汚濁化が著しく進行しており¹⁾, 1974年度以来水質汚濁度全国ワースト1という不名誉な記録を更新し続けている。この手賀沼における水質悪化の主要因としては, 流域から河川経由の汚濁物質の過剰流入や, 沼内における栄養塩・有機物の内部生産等が指摘されている^{1), 2)}。このような手賀沼の水質浄化対策の一つとして, 最近, 利根川から手賀沼やそこへ流入している大堀川へ導水を行う, という北千葉導水事業が操業を開始し, 沼内のCODが減少するなど一定の浄化効果が現れている。しかしながら, 浄化用水の注水が停止もしくは注水量が少ない場合には, 沼内の水質環境は依然として悪化していることが確認されている³⁾。このようなことから, 手賀沼における水質管理を適切に行っていくためには, 手賀沼自体のみならず流域全域における水環境特性を解明する, という流域水環境学的な視点に基づいた調査研究を行っていくことが強く求められている。

このような研究背景に基づいて, 著者らは, 手賀沼流域の主要流入河川の一つである大堀川を対象とした水環

境調査を実施した(二瓶ら⁴⁾, 以下前報とする)。その結果, 降雨時における大堀川での濁度・栄養塩濃度の変動パターンなどに関していくつかの知見を得た。しかしながら, そこでは, 降雨中に現地調査を開始したため, 降雨初期において濁度や水質濃度が急激に上昇する, というファーストフラッシュ現象を捉えられなかった。また, 前報では, 降雨時においてのみ水環境観測が行われており, 非降雨時(以下, 平常時と呼ぶ)に関する十分な知見は得られておらず, 降雨時と平常時における汚濁負荷量の違い等については十分把握されていない。

そこで本論文では, 手賀沼に対する河川経由の汚濁負荷特性を把握するために, 大堀川を対象として, 降雨時と平常時における水理・水質観測を実施することを試みた。具体的には, 河川内及び樋管における複数地点を対象として, 短期集中的な水環境調査を降雨時1回, 平常時2回にわたり実施するとともに, メモリー式測器を用いて連続的に水位・流速・濁度・pH・電気伝導度等に関する観測を行った。それらの結果に基づいて, ①大堀川の水環境に関する基本的特性や, ②平常時における汚濁負荷特性の地域差や河川内における物質収支特性, さらに, ③降雨時における水質環境や汚濁負荷量の算定, などについて検討した。



図—1 大堀川と観測点配置図 (Stn.A～D：河川内, Stn.1～15：樋管)

2. 現地観測の概要

(1) 大堀川の概要

本研究で現地調査を行った大堀川は、千葉県流山市と柏市を流域とし、手賀沼西部に流入する小河川である。その流路長は12.9km、流域面積は3146haである²⁾。この流域全体における土地利用特性としては、市街地が流域の8割を占めており、また排水負荷に対しては、工場排水よりも生活排水の寄与が大きいことが指摘されている²⁾。この大堀川には、図—1に示すように、流域内を流れる雨水路とつながっている樋管が大小あわせて18箇所ある。なお、大堀川における18の樋管のうち、3箇所においては、後述する平常時観測では水の出入りが無いことが確認されたため、図—1においては省略している。また、上述したように、北千葉導水事業の一環として、利根川水が大堀川上流部(図—1)に最大0.5m³/sで導水されている。平常時における流量としては、大堀川では1～2m³/s、樋管では最大で0.3m³/s程度となっている。

(2) 短期集中観測

a) 測定項目・方法

短期集中的な水環境観測は、降雨時1回、平常時2回にわたり実施された。これらの観測では、河川及び樋管における水質濃度負荷量を計測するために、水位と流速、水質項目(濁度、T-BOD、T-COD、T-N、T-P、SS)について測定した。水位計測には、水位標もしくは自記式水位計(Diver, Eijkelkamp社製)を使用した。流速については、浮子等をトレーサーとした表面流速の計測、もしくは、自記式小型流速計(Compact-EM, アレック電子(株)製)を用いることとした。水質に関しては、バケツによる表層採水を行い、濁度については多項目水質計(W-22P, HORIBA(株)製)により現場計測した。その他の水質項目については、サンプル水を本学実験室に持ち帰り、T-BODに関しては一般希釈法⁵⁾を、その他の項目に関しては前

表—1 短期集中観測における測定点

	観測地点	降雨時	平常時	
			夏季	秋季
河川	A,C,D	○	○	○
	B	×	×	○
樋管	2,7,8,14,15	×	○	○
	1,3,4,5,6,9,10,11,12,13	×	○	×

報⁴⁾と同じ手法により分析を行った。なお、一部のサンプル水については、溶存態濃度と懸濁態濃度とに分けて測定を実施し、また、SSに関しては降雨時観測のみ計測を行った。

b) 降雨時観測

降雨時観測の期間としては、2001年7月6日14時から翌日18時までとした。この観測中7月6日19時頃より30分程度の間に総雨量8mmが観測された。観測地点としては、表—1に示しているように、河川内3地点(Stn.A, C, D)とした。測定間隔としては、降雨中及び直後においては15分もしくは30分とし、それ以外に関しては1時間～数時間とした。

c) 平常時観測

平常時観測としては、2001年6月27日9時より24時間(夏季)、2001年10月15日15時から24時間(秋季)、と2回行い汚濁負荷量の日平均値や日変動特性について検討した。夏季における観測地点としては、河川内では3地点(Stn.A, C, D)とし、樋管では全15地点とした(表—1)。ここでの測定間隔・回数は、河川内3地点では約4時間間隔で計7回とし、樋管のうちStn.2, 8では12時間間隔で計3回、その他の樋管は1回のみとした。

秋季における観測地点としては、夏季観測結果を踏まえて、河川内4地点(Stn.A～D)と樋管5地点(Stn.2, 7,

8, 14, 15) とした (表一1)。これらの観測地点の多くは, Stn.B から D の下流区間に集中しており, この河川区間における物質収支特性について検討を行った。測定時間間隔に関しては, 水位と流速については 30 分とした。水質濃度分析用の採水については, BOD に関しては 3~12 時間, その他の水質項目に関しては 1 時間毎とした。

(3) メモリー式測器を用いた連続観測

上述した短期集中観測時を含めた期間における水環境の基本特性を把握するために, メモリー式測器を河川内に設置して連続観測を行った。観測期間としては, 2001 年 6 月 22 日~7 月 11 日 (夏季) と 9 月 29 日~10 月 19 日 (秋季) とし, 観測地点としては河川内 4 地点 (Stn.A ~D) とした。測定項目としては, 水位, 流速, 濁度・Chla 濃度, 水温・DO・pH・電気伝導度等の多項目水質とした。これらの測定には, 前節で示した測器と濁度・Chla 濃度計 (ACLI04-8M, アレック電子(株)製) を用いた。

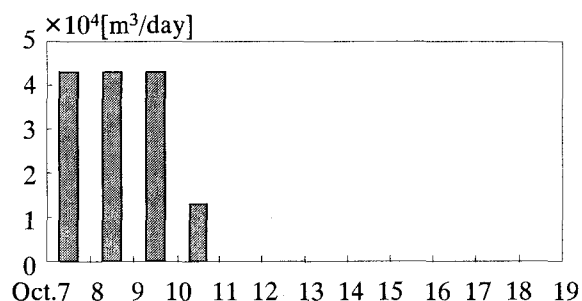
3. 河川上・下流部における水環境の基本特性

大堀川における水環境の基本特性を把握するために, 連続観測により得られた水位, 水温, 電気伝導度, pH の時系列変化を図一2 に示す。ここでは, 2001 年 10 月 7 日~19 日における河川内 (Stn.A と D) での観測結果と, 時間雨量 (AMeDAS, 千葉県我孫子市) 及び北千葉導水事業における浄化用水の日注水量を示している。時間雨量と水位変動に着目すると, 10 月 10 日にまとまった降雨が見られ, 河川水位が大きく上昇した。その後, 秋季平常時観測を行った 10 月 15 日頃までには水位値は大きく低下し, 降雨影響はほとんど見られず, また, その時には浄化用水は注水されていないことが分かる。

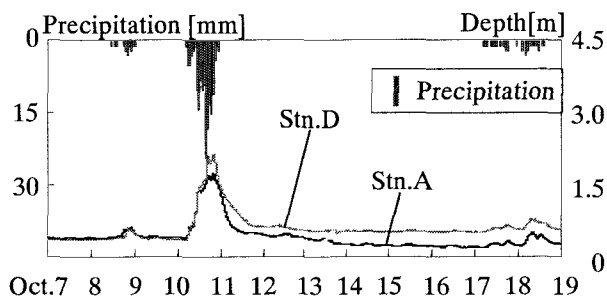
水温に関しては, 浄化用水を注入しているときには, Stn.A ではほぼ一定値となっているものの, 下流部の Stn.D では大きく日変化している。一方, 浄化用水が注入されていない時には, 両地点ともに大きな日変動が生じている。また, 降雨時には両地点ともに明確に水温が低下し, 河川流下方向に水温が一様化している。

次に電気伝導度に着目すると, 両地点ともに平常時には 0.03 S/m を越える値となっている。これは, 一般の河川での値⁶⁾ よりも大きな値であり, 大堀川では人為的汚染の影響が顕著であることが分かる。また, 平常時には, 浄化用水量に関わらず, Stn.D における電気伝導度は Stn.A における値よりも大きくなっており, 生活排水などの影響が下流部ほど顕著に現れていることが示唆される。また, 降雨時には, 降雨による希釈効果のために Stn.A, D ともに電気伝導度は大幅に減少している。

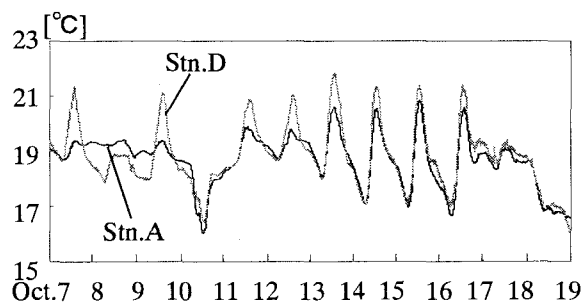
pH については, 浄化用水注水時には Stn.A の方が Stn.D



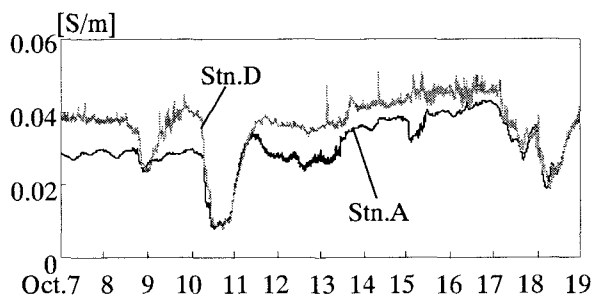
(a) 浄化用水注水量 (日平均値)



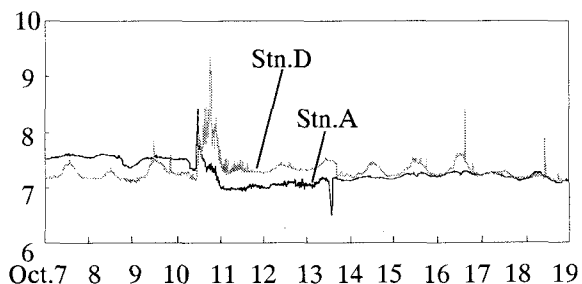
(b) 時間雨量と水位変動



(c) 水温



(d) 電気伝導度



(e) pH

図一2 秋季における連続観測結果 (Stn.A, D)

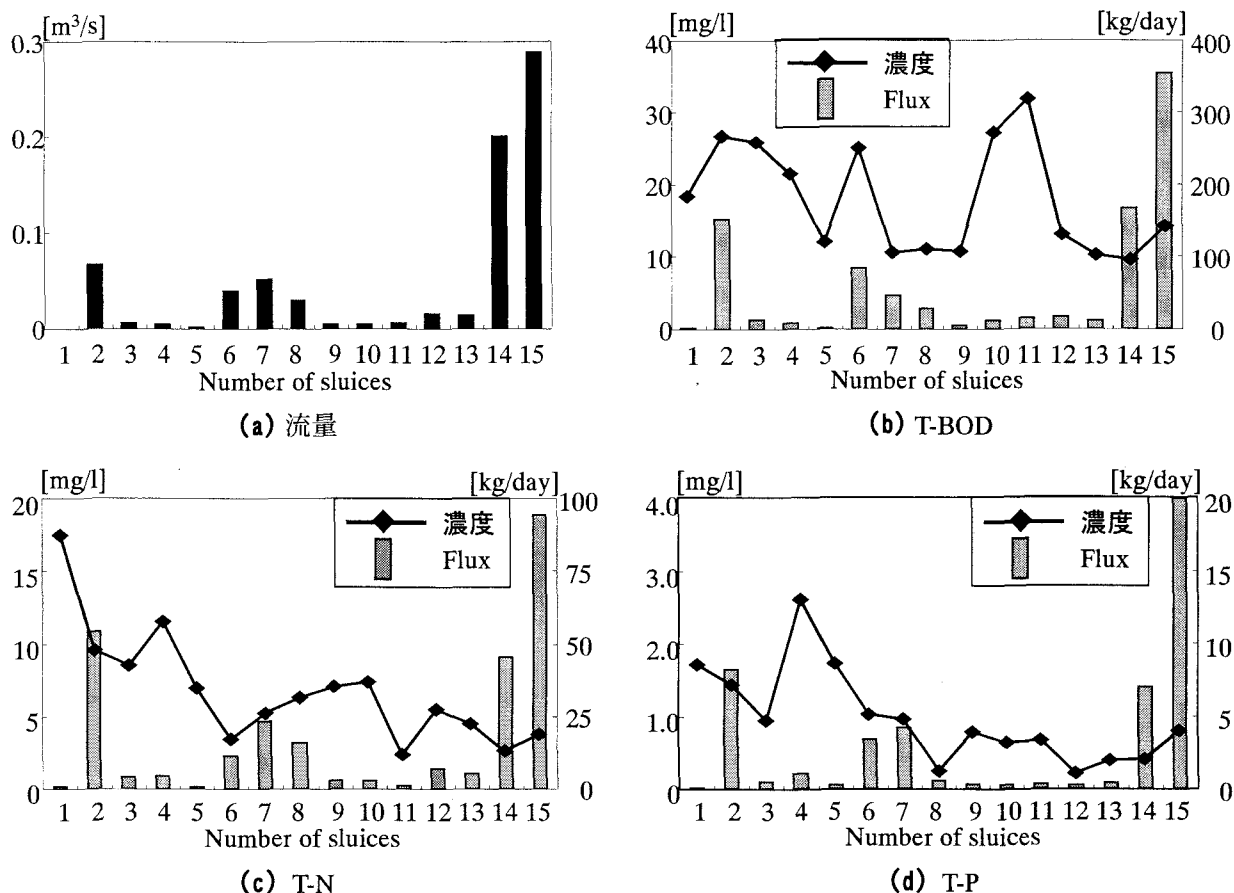


図-3 平常時夏季観測における全樋管の水質濃度及び負荷量

よりも大きくなるものの、浄化用水を注水していない時にはそこでの大小関係が逆となる。また、Stn.Dでは、Stn.Aと異なり明確な日変動が見られる。このような河川下流部（Stn.D）におけるpHの日変動は同時計測したDO変動特性と明確に正の相関があることが確認されたことから、付着性藻類等の河床堆積物による光合成活動などに起因してDOや炭酸ガスが日周変動し、その結果としてpHが日周変動するものと考えられる⁷⁾。

このように、平常時では、電気伝導度やpHが河川上・下流部とで大きく変化しているため、流域からの生活排水等の人為的影響や河床堆積物環境が、河川流下方向に変化しているものと推察される。

4. 平常時河川・樋管の水環境と物質収支特性

(1) 水質汚濁負荷量の地域差

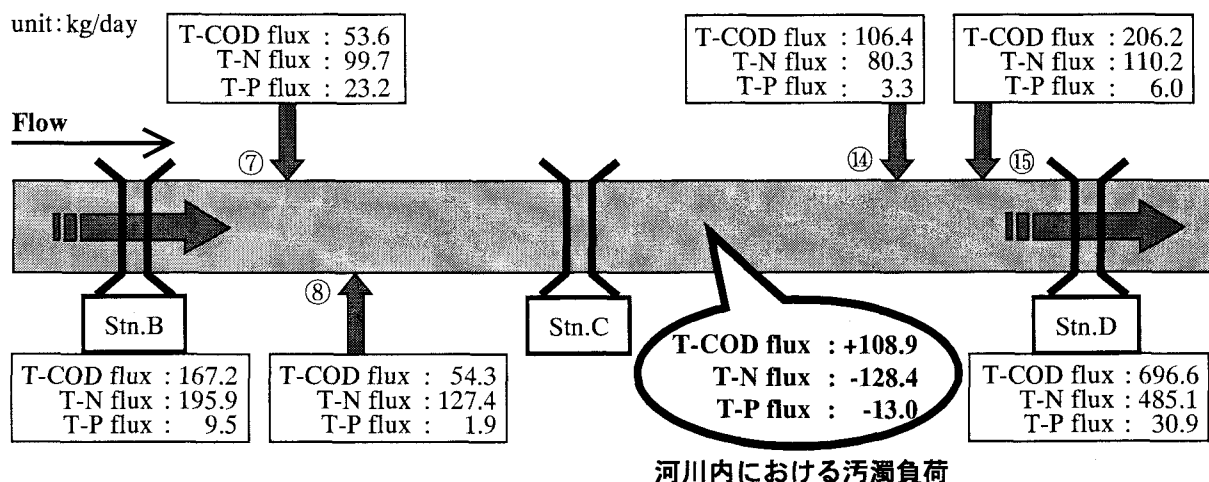
大堀川流域内における水質汚濁負荷量の地域差を調べるために、全樋管における流量とT-BOD、T-N、T-Pの濃度値及びその負荷量を図-3に示す。ここでは、平常時夏季観測結果のうち、2001年6月27日午前中に計測された結果を示している。なお、この時間帯には浄化用水は注水されていなかった。これらを見ると、T-BODは10～30mg/l、T-Nは3～18mg/l、T-Pは0.2～3.0mg/lとなっ

ており、全樋管での水質濃度は概ね高く、また樋管毎に大きく異なった値となっている。これにより、大堀川における多くの樋管では水質汚濁化が著しく進行していると同時に、その汚濁化の程度に明確な地域差が現れていることが分かる。

水質汚濁負荷量に着目すると、ここで対象としている15の樋管のうち、流量が相対的に大きい6つの樋管（Stn.2, 6, 7, 8, 14, 15、以下主要樋管と呼ぶ）において顕著な水質汚濁負荷量が生じているものと考えられる。また、同時に計測された浄化用水の影響のない河川下流部（Stn.D）での水質汚濁負荷量に関しては、T-BODは1224kg/day、T-Nは318kg/day、T-Pは38kg/dayとなっている。これらの値と上述した主要樋管における水質汚濁負荷量の和を比べると、河川下流部における負荷量の80%以上が主要樋管から流入しており、主要樋管が河川水質環境に多大な影響を与えていることが分かる。以上の結果から、大堀川の水質環境を改善する上では、これらの主要樋管及びその流域における汚濁負荷削減対策を何らかの形で重点的に行うことの重要性が示された。

(2) 河川内における物質収支特性

前節では河川下流部での水質汚濁負荷量に対する各樋管からの寄与について検討を行ったものの、河川での汚

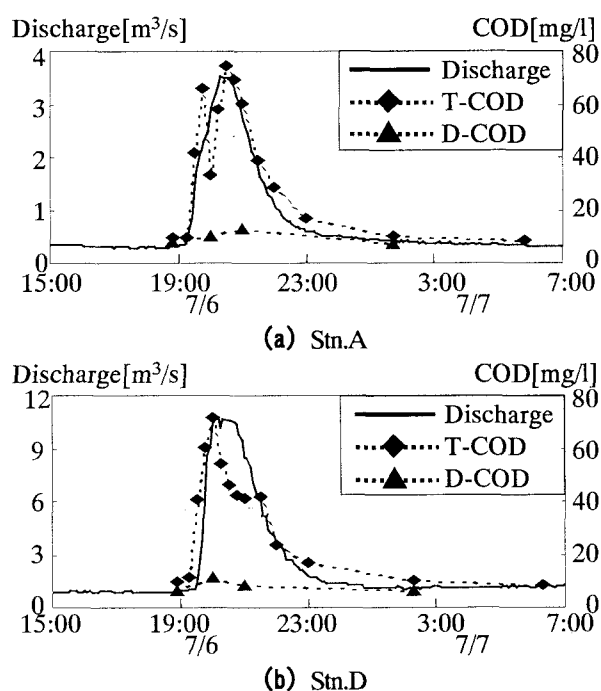


図—4 河川内における物質収支特性 (T-COD, TN, TP, 平常時秋季観測)

濁負荷量に対する要因分析を行うには、河川内での自浄・自濁作用等に起因する汚濁負荷まで含めた形で河川内での物質収支特性を検討する必要がある。そこで、Stn.B～Dの河川中・下流区間を対象として、平常時秋季観測における河川内 (Stn.BとD) と流入主要樋管 (Stn.7, 8, 14, 15) での T-COD, T-N, T-P の日平均負荷量を図—4に示す。図中には、河川下流部 (Stn.D) における負荷量から河川中流部 (Stn.B) と流入樋管の負荷量の総和を差し引いたものを、河川内における汚濁負荷量として図中に示している。

各樋管からの汚濁負荷量の大きさを比べると、まず T-COD に関しては、Stn.14 や 15 での値が、Stn.7 や 8 と比べて大きい。一方、T-N に関しては 4 つの樋管とも同程度であり、また T-P に関しては、Stn.7 の負荷量は他の樋管よりも明らかに大きくなっている。このように、水質項目により各樋管における負荷量の大小関係が大きく変化していることが分かる。ここで N/P 比に着目したところ、河川では 15～21 となっているのに対して、樋管に関しては Stn.7, 8, 15 においてそれぞれおよそ 8, 72, 20 となっており、栄養塩環境が樋管毎に大きく異なっている。このような違いは、上述した各樋管での汚濁負荷量の寄与が水質項目毎に異なっていることと密接に関連しているものと推察される。

河川内における水質汚濁負荷量を見てみると、この区間では流下方向に T-COD は増加、T-N や T-P は減少しており、各々の値は樋管での汚濁負荷量と比べて同程度の大きさとなっていることが分かる。このように河川において栄養塩・有機物濃度を変化させる要因としては、堆積層からの溶出や沈降・吸着、藻類の増殖による取り込み、付着性藻類の剥離・流下に伴う有機物の増加 (二次的負荷) 等が影響し合っているものと考えられる^{8), 9)}。これらの諸要因の中では、河川下流部では DO や pH が日変動し、流下とともに有機物濃度増加・栄養塩濃度減少



図—5 降雨時における流量と COD の時間変動特性

となることを考慮すると、藻類などの河床付着性微生物の影響が重要であると推察されるものの、本論文では、それらの現存量等に関しては未計測である。そのため、今後、同様な現地調査とともに、河床付着物や水生植物等といった生物相に関しても調査する必要がある。

5. 降雨時における水質環境と汚濁負荷特性

(1) 河川内における水質環境特性

降雨時における水質環境特性を検討するために、河川内 (Stn.A と D) における流量と T-COD 及びその溶存態濃度 (D-COD) の時系列データを図—5に示す。なお、7月6日 19時頃から 30分程度の間に集中豪雨が確認された。これを見ると、両地点ともに、流量とともに T-COD が大きく増加す

表-2 降雨時と平常時の汚濁負荷量の比較 (Stn.D)

	T-COD	T-N	T-P
平常時(夏季)[kg/day]	543	318	38
平常時(秋季)[kg/day]	697	485	31
降雨時[kg]	3781	776	185

る、というファーストフラッシュ現象が形成され、そのときの T-COD の最大値は、降雨前の 10 倍程度まで達している。このとき D-COD の値はあまり変化していないため、降雨時における T-COD の増加に対して懸濁態濃度(P-COD)の寄与が極めて大きいことが分かる。このような傾向は、2つの地点 (Stn.A, D)とも共通しており、また、他の水質項目(T-BOD, T-N, T-P)に関しても確認されている。両地点におけるファーストフラッシュ現象の様子を比較すると、Stn.D では1回の濃度ピークが流量に先行して現れるのに対して、Stn.A では明確な濃度ピークが2回出現している。これらの流量と水質濃度変動の関係は、前報⁴⁾とは大きく異なっている。本観測時と前報における観測時とは、時期や先行降雨期間等が異なっており、降雨前に河川内等における易掃流性堆積物の量や空間分布が変化していたものと推察される。

(2) 降雨時と平常時における汚濁負荷量の比較

表-2 は、降雨時観測及び平常時夏季・秋季観測により得られた河川下流部 (Stn.D) における汚濁負荷量を示す。ここでは平常時では汚濁負荷量の日平均値を、降雨時に関しては降雨中及びその影響が明確に見られる 7 月 6 日 19 時～7 日 2 時までの値の総和を各々表している。これを見ると、全水質項目とも降雨時の結果は平常時における負荷量よりも大きい。しかしながら、その増加している割合は水質項目により異なり、T-N は約 2 倍であるのに対して、T-P や T-COD は 5～7 倍となっていることが分かる。

このような降雨時と平常時における水質環境の変化を検討する。上述したように、降雨時では、水質濃度に対して溶存態濃度よりも懸濁態濃度の寄与が大きいことから、河床表層土壌に含まれる T-COD, T-N, T-P の量について調べることにした。これらの結果を単位土壌乾燥質量あたりで換算したものとしては、平均的な値として、COD は 20.5～50.5g/kg, T-N は 3.6～7.6g/kg, T-P は 1.3～2.2g/kg となった。これらの結果より、河床土壌中では、平常時河川水中における水質濃度と比べて、T-N に対する T-COD や T-P の比が大きくなっている。以上の結果より、河川内の底質環境の違いが平常時と降雨時における水質環境の違いを引き起こしているものと考えられる。

6. 結論

手賀沼流域における汚濁負荷特性を把握するために、大堀川を対象とした水環境観測を降雨時及び平常時において実施した。主要な結果は以下のとおりである。

(1) 平常時観測結果により、この流域では、水質環境や汚濁負荷特性の地域差が顕著であることが示された。さらに、河川内における物質収支解析を行った結果、主要樋管からの汚濁負荷とともに、河川内での汚濁負荷が物質収支特性に大きな影響を与えていることが示唆された。

(2) 降雨条件下では、明確なファーストフラッシュ現象が形成され、そこでの水質濃度は最大で平常時の 10 倍程度まで上昇した。また、降雨時と平常時における汚濁負荷量を比較したところ、全ての水質項目に関して降雨時の負荷量が平常時での値よりも大きくなるものの、その増加する割合は T-N よりも T-COD や T-P の方が大きくなる。その要因としては、河川底質中の栄養塩・有機物環境と密接に関連していることが明らかとなった。

謝辞：本観測を実施するにあたり、東京理科大学理工学部土木工学科西村司教授と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、文部科学省科学研究費奨励研究 (A) (課題番号：13750498, 研究代表者：二瓶泰雄) と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) 山田安彦・白鳥孝治・立本英機：印旛沼・手賀沼 ― 水環境への提言一、古今書院、pp.1-167, 1993.
2) (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.
3) 二瓶泰雄・山崎裕介・谷脇大介・大竹野歩：手賀沼における流動特性及び水温・水質環境の水平・鉛直構造特性、水工学論文集、Vol.47, 2003 (投稿予定).
4) 二瓶泰雄・大竹野歩・河嶋祐太・酒井耕介・増永良・戸簾幸嗣・出口浩：降雨時における手賀沼流域の水環境特性に関する現地観測、河川技術論文集、Vol.7, pp.187-192, 2001.
5) (社) 日本下水道協会：下水試験方法上巻 -1997 年版-, pp.136-201, 1997.
6) 長谷部正彦・平田健正・井伊博行・坂本康・江種伸之・桑川高德・西山幸治・斎藤信彦・生天目実一：石川流域における水循環調査について、水工学論文集、Vol.42, pp.307-312, 1998.
7) 宗宮功・津野洋：環境水質学、コロナ社、pp.45-64, 1999.
8) 川島博之・鈴木基之：河川における自浄作用と自濁作用、生産研究、Vol.34, No.7, pp.287-295, 1982.
9) 川島博之・鈴木基之：浅い富栄養化河川水質シミュレーションモデル、化学工学論文集、Vol.10, No.4, pp.475-481, 1984.

(2002. 4. 15 受付)