

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

FIELD OBSERVATION ON WATER ENVIRONMENTS IN TEGANUMA UNDER A RAIN CONDITION

二瓶泰雄¹・大竹野歩²・河嶋祐太³・酒井耕介⁴・増永良⁵・戸簾幸嗣²・出口浩⁶
Yasuo Nihei, Nobu Ootake, Yuuta Kawashima, Kohsuke Sakai, Ryo Masunaga, Koji Tomisu and Hiroshi Deguchi

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

³非会員 学(工) 大和ハウス工業㈱

⁴非会員 学(工) ㈱エヌ・ケー・エクサ

⁵非会員 学(工) 東京久栄㈱

⁶正会員 工博 東京理科大学助教授 理工学部土木工学科

To clarify the overall characteristics of water environments in Teganuma and its watershed under a rain condition, an intensive field survey was carried out at 8 measuring stations in Teganuma and Oohori River, one of main rivers in the watershed. The results of the data analysis indicate that the turbidity fluctuation at the upper points in Oohori River during a rainy period is appreciably different with that at the middle and lower points. This difference is caused by those of the flowing down time and runoff loading in upper and middle catchments. The concentration of water quality during the flood condition was also found to be abrupt changes in time and have spatial differences along the river.

Key Words : Teganuma, water environments, rainfall, turbidity, water quality

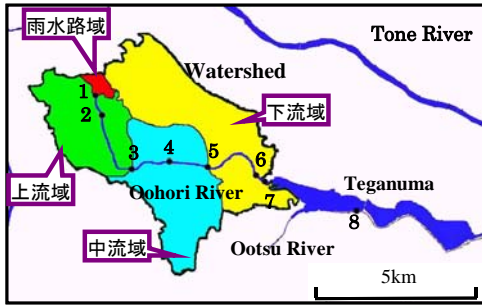
1. はじめに

千葉県北西部に位置する手賀沼は、以前は自然豊かな湖沼であったが、1960年代以降急速に水質汚染が進行し、最近では、全国有数の富栄養化湖沼として有名である。このような水質汚染が進んだのは、流域の大規模な宅地化に伴い急激に人口が増加し、排水負荷量が増大した上に、手賀沼の水容量が非常に小さいことから、小さい湖盆に大きい負荷量が流入したためであると考えられる¹⁾。このようなことから、手賀沼流域の水環境特性を適切に把握・管理していくためには、手賀沼へ流入する河川における濁質・栄養塩フラックスに関して降雨時を含めた形で実態把握するとともに、流域内における排出・流達汚濁負荷量の面的分布を解明することが必要不可欠となる。

手賀沼流域の水環境に関する既存の調査研究は様々な形で行われているものの^{2)~4)}、これらの流入河川における水文・水質量に関する現地調査では、わずか数箇所

の観測ポイントで、しかも降雨のない平常時に行われていることが多い。それに加えて、降雨時に発生する河川出水が手賀沼における水質変動特性に及ぼす影響に関する知見も少ないことから、降雨が手賀沼やその流入河川における水環境特性に及ぼす影響については十分把握されていない。

そこで本研究では、降雨時における手賀沼や流入河川における水環境特性を総合的に明らかにするために、流域全域をカバーし、なおかつ空間的に密に水文・水質観測を行うことを試みた。具体的には、手賀沼への流入河川の一つである大堀川の上流域から下流域及び手賀沼にわたって8つの定点観測ポイントを設けて、降雨時における水文・水質量に関する多点同時集中観測を実施することとした。以下では、これらの観測結果のうち、降雨時における大堀川での濁度・栄養塩濃度等の変動過程に関する結果について示すこととする。



図—1 手賀沼流域と観測点配置図

表—1 流域内の土地利用特性

	面積率 (%)			
	市街地	畑	田	林
雨水路域	26	62	1	11
上流域	41	35	3	21
中流域	76	17	1	6
下流域	77	15	1	7

2. 手賀沼流域及び現地観測の概要

(1) 手賀沼・大堀川の概要

現在の手賀沼は、湖沼面積 6.5km²、水量 560 万 m³、平均水深 0.86m という極めて浅い湖沼である。また、手賀沼流域の面積は 86 km²、人口は平成 7 年の時点では約 43 万人となっている。これより貯水量 100 万 m³あたりの人口は約 8 万人となり、霞ヶ浦や琵琶湖と比べて極めて大きく、手賀沼の水質悪化の原因が、貯水量の小さい湖盆に流域から多くの汚濁負荷を受けた結果であることが分かる¹⁾。この手賀沼には、主として、大堀川と大津川という二つの都市河川が流入しており、手賀沼東端で接続している手賀川を通して、利根川へ流出している。

上述した主要流入河川の一つである大堀川は、千葉県流山市、柏市を流下する小河川であり、本川の流路長は約 7km、河床勾配は 1/1400~1/600 である。この大堀川の本川部分には、市街地を流れる雨水路の放流口が大小あわせて 20 程度あり、降雨時にはそれらの雨水路から本川への流入が顕著となる。

(2) 観測地点

本研究で実施した現地観測では、大堀川の上流部から下流部にかけて 7 地点と、手賀沼に 1 地点、の計 8 つの観測点を設定して、各点において水文・水質観測を実施することとした。具体的な観測点の配置に関しては、図—1 に示すとおりである。大堀川本川では、上流域から河口部までに 1~2km の間隔で 5 地点を選定した (Sta.3~7)。また、本川よりも上流域に位置する幅 2m 程度の

表—2 各観測項目の測定時間間隔

観測点	観測項目 unit : minute					
	水位	流速	濁度	雨量	水温	水質
Sta.1	30	60	30	30	/	120
Sta.2	60	60	60	60	/	/
Sta.3	5	30	15	30	5	120
Sta.4	60	60	60	60	5	/
Sta.5	30	60	30	30	5	120
Sta.6	60	60	60	60	5	/
Sta.7	30	60	30	30	5	120
Sta.8	/	/	30	30	5	120

雨水路沿いにおいても、観測ポイントを 2 地点とした (Sta.1, 2)。さらに手賀沼内では、沼中央部に位置する手賀大橋近くに 1 地点 (Sta.8) を設けた。

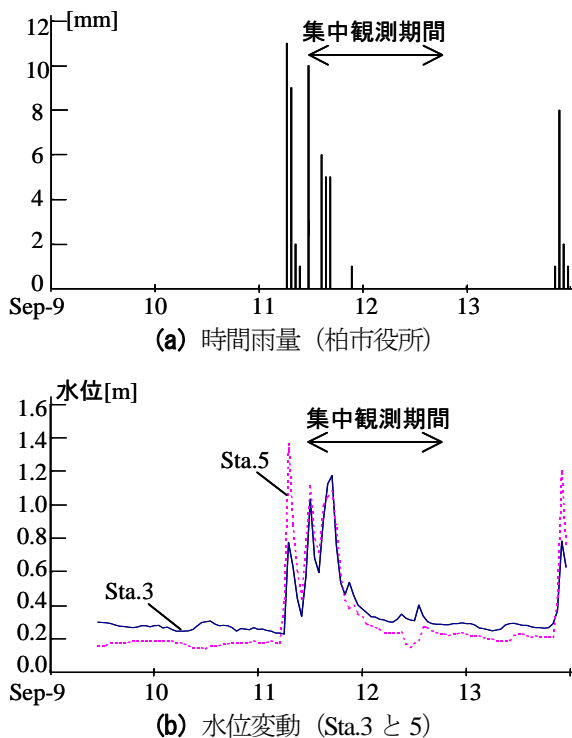
表—1 は大堀川流域内の土地利用特性を面積率の形で表している。ここでは、大堀川流域を図—1 に示すように 4 つの小流域に分割し、Sta.1 における集水域 (以下、雨水路域とする)、Sta.3 の集水域から Sta.1 の集水域を除いた領域 (上流域)、Sta.3~Sta.5 間の集水域 (中流域)、Sta.5~Sta.7 間の集水域 (下流域) としている。これを見ると、市街地の面積率に関しては、雨水路域や上流域では 50%以下となっているが、中・下流域では 75%を超えており、流域内の土地利用特性が上流域と中・下流域とで大きく異なっていることが分かる。

(3) 測定項目・方法

本観測における測定項目としては、水位、流速、濁度、SS、雨量、水質濃度、水温としている。後述するように、ほとんどの項目の計測は自記式測定器を用いずに行ったため、各測定項目の計測時間間隔は 15~120 分と異なっており、その詳細は表—2 に示すとおりである。水質濃度としては、ここでは全窒素 (T-N)、全リン (T-P)、化学的酸素要求量 (COD) としている。また、濁質環境をより詳細に把握するために、浮遊砂や河床上の堆積砂に関する粒度分布も別途計測することとした。

各項目の測定方法としては、水温には自記式小型水温計 TidbiT (Onset 社製) を用いた。また、水位に関しては、Sta.3 のみ自記式水位計 Diver (Eijkelkamp 社製) を用い、それ以外の観測点では水位標等を用いることとした。雨量については、貯水型雨量計を自作し、それにより計測した。流速については、浮子を使い表面流速を計測することとした。なお、Sta.5 では、千葉県が河川水位を一時間毎に連続的に自動計測しているため、この観測データも解析に用いることとした。

水質項目の計測・分析方法としては、まず、表層水をバケツ採水し、そこで得られたサンプル水を、濁度用と T-N・T-P・COD 用としてそれぞれ 1000ml のポリ瓶に保存した。その後、濁度に関しては、携帯式濁度計 (東亜電波工業(株)製) を用いて、採水後数時間以内に現場計測



図—2 観測期間中の降雨・河川水位の概況

した。もう一つのサンプル瓶は冷凍保存し、下水試験方法 97 年度版⁵⁾ に準拠して分析することとした。ここでの分析方法としては、T-N に関しては紫外線吸光度法を、T-P についてはモリブデン青吸光度法を、COD には過マンガン酸カリウム法を、それぞれ用いた。

(4) 観測期間及び観測体制

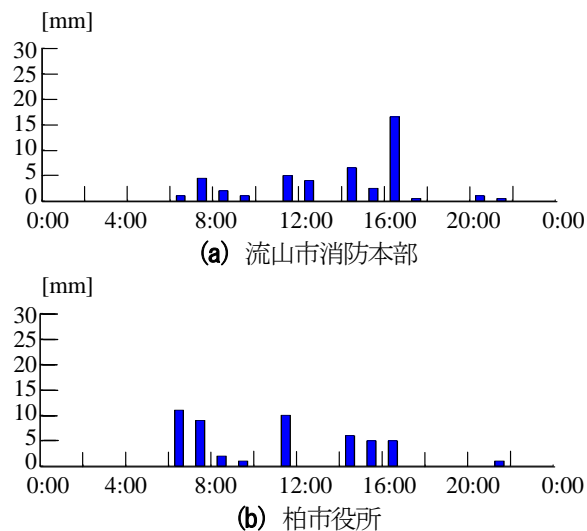
本観測では 2000 年 9 月 11 日 11 時から 12 日 19 時にわたって、短期集中的な多点同時観測を実施した。また、自記式観測器に関しては、9 月 9 日～18 日まで河川内に設置して連続計測した。

上述したような短期集中型の多点同時観測を実施するために、著者らの所属する東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室の教員・学生合わせて 26 名により、以下のような観測体制で現地調査を行った。まず、5 つの定点観測班を設けて、それぞれ、雨水路域 (Sta.1・2)、大堀川上流域 (Sta.3)、中流域 (Sta.4・5)、下流域 (Sta.6・7)、手賀沼 (Sta.8) を担当し、各計測を順次実施した。また、採水したサンプル水の回収および携帯式濁度計による濁度計測のために、一つの移動観測班を設定することとした。

3. 観測結果と考察

(1) 観測期間中における降雨・河川水位の概況

観測期間中における降雨と河川水位の概況を見るために、9/11～12 に行われた集中観測期間を含む 5 日間の時



図—3 手賀沼流域周辺における時間雨量 (9/11)

間雨量データ (千葉県柏市役所) と大堀川における Sta.3 と 5 での水位データを図—2 に示す、降雨に関しては、観測日初日 (9 月 11 日) には、計測開始前の午前 5 時頃より 10mm を越える降雨があり、その後、正午前と夕方にまとまった雨が降っていた。河川水位に関しては、降雨の時間変動特性と対応して、9 月 11 日には両地点ともに 3 つの明確な水位変動のピークが現れていることが分かる。また、両地点で観測された 3 つの水位ピークの値を比べると、中流域の Sta.5 では一回目のピークが最も大きくなっているのに対して、上流域の Sta.3 では三回目のピーク時の値が最大となっていることが分かる。

このような水位変動特性の違いを調べるために、手賀沼流域及びその周辺で観測されている時間雨量データの時系列変化を図—3 に示す。同図(a)の流山市消防本部は大堀川上流域近くに、同図 (b) の柏市役所は大堀川中流域内に、それぞれ位置している。これを見ると、9 月 11 日早朝における一回目の降雨に関しては、中流域の雨量が上流域よりも大きくなっているのに対して、同日夕方三回目の降雨時では上流域の雨量の方が中流域のデータよりも相対的に大きくなっていることが分かる。このことから、大堀川流域内における降雨の空間的な非一様性により、河川内の水位変動特性の違いが形成されていることが確認された。

なお、本研究における多点同時集中観測では、上述したように、9 月 11 日 11 時に計測を開始したので、初期降雨時において生じることが知られているファーストフラッシュ現象⁶⁾ を捉えることはできなかった。しかしながら、9/11 に生じた 3 つの降雨・水位ピークのうち、残りの二つに関しては本観測で捉えられたので、以下には、それに着目してデータ解析を行うこととした。

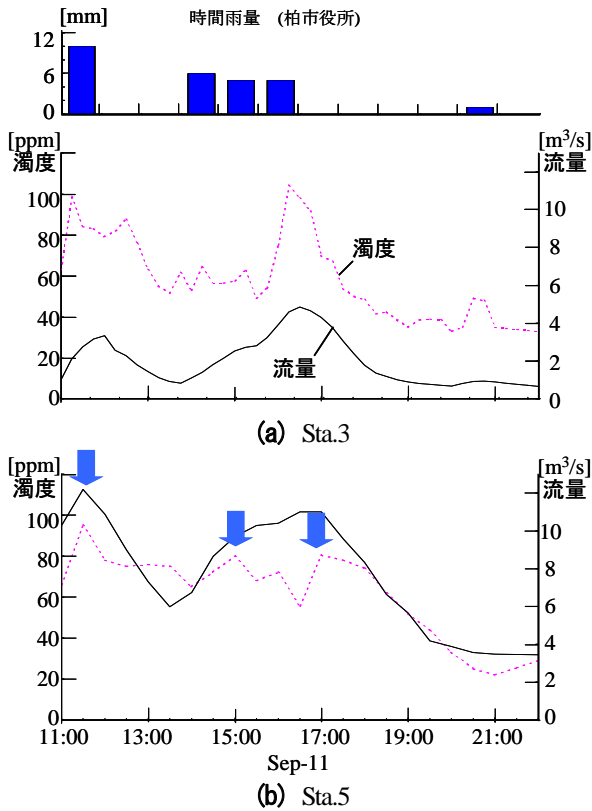


図-4 降雨時における流量・濁度の時系列変化

(2) 濁度変動特性

a) 流量と濁度の時系列変化及びヒステリシス

降雨時における河川内での濁度変動特性を明らかにするために、大堀川本川の上流域 (Sta.3) と中流域 (Sta.5) における流量と濁度の時系列変化を図-4に示す。これを見ると、上流域のSta.3では、観測期間中の2回の降雨ピークに対応して、流量と濁度ともに2度の明確なピークが現れているとともに、そのピークが生じているタイミングとしては、濁度の方がやや先行してことが分かる。一方、中流域に位置するSta.5では、流量に関してはSta.3と同様に明確な2度のピークが現れているのに対して、濁度変動に関しては、流量が減少しても高濁度値を保っており、やや不明確であるが3つの変動ピークを有していることが分かる (図中矢印)。

上述した流量と濁度の変動特性の関係をより詳細に検討するために、Sta.1~7の雨水路・河川の全ての点における濁度と流量に関するヒステリシスを図-5に示す。ここでは、9月11日における二回目の降雨ピークに対応する濁度・流量データを太線で、三回目の降雨ピークに対応するデータを細線でそれぞれ示している。なお、Sta.6, 7では十分に信頼し得る流量観測値を得ることができなかったため、流量の代わりに水位と濁度間のヒステリシスとしている。また、Sta.1に関しては、2回目の降雨ピーク時における観測データの数が少なかったため、3回

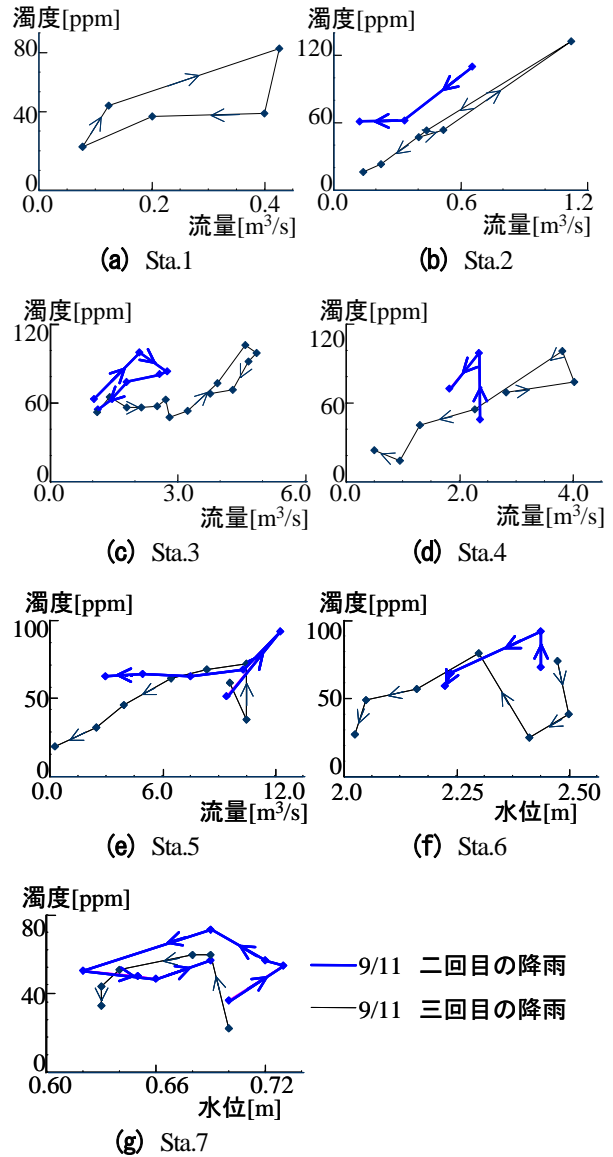
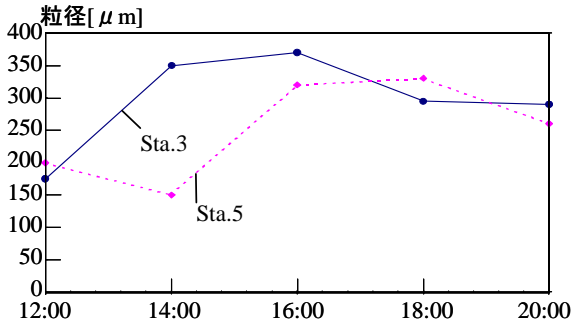


図-5 濁度—流量間のヒステリシス

目の降雨時におけるヒステリシスのみを示している。これらを見ると、まず、雨水路域(Sta.1)や河川上流域 (Sta.3) では、ヒステリシスは時計回りになっており、濁度ピークが流量ピークよりも先に現れる、という先行型⁷⁾ (Williams⁸⁾ の分類ではクラスII) となっている。一方、中・下流域であるSta.4~7では、Sta.1や3とは逆に反時計回りになっており、遅れ型⁷⁾ (Williams⁸⁾ の分類ではクラスIII) に相当している。これらの観測結果から、大堀川のような流域規模の小さい中小都市河川においても、降雨時における濁度変動特性が、上流域と中・下流域において大きく異なることが明らかとなった。

b) 浮遊土砂の粒径組成

上述したような濁度変動特性の違いが生じる要因について検討することを試みる。そこで、中流域のSta.5において観測された浮遊土砂の供給源を検討するために、浮



図—6 Sta.3 と 5 における浮遊土砂の中央粒径

遊土砂の粒径組成を調べることにした。そこで得られた浮遊土砂の中央粒径の時間変化を図—6に示す。図中には、比較のために、Sta.3における結果も合わせて示している。これを見ると、両地点における中央粒径は150～350 μmの間を変動しているとともに、その時間変化パターンは概ね類似し、両者の位相差は2時間程度であることが分かる。また、Sta.3～5間の河床に堆積する土砂の粒径組成を別途調べたところ、そこでの中央粒径はほとんどの地点で200～260 μmとなっていたことから、浮遊土砂の粒径が時間帯によっては底質の中央粒径を上回っていることが分かる。これらのことを考慮すると、Sta.5での浮遊土砂の起源としては、河床上における堆積砂からの巻上げよりも、上流側から移流されてきた分が顕著であることが推察される。

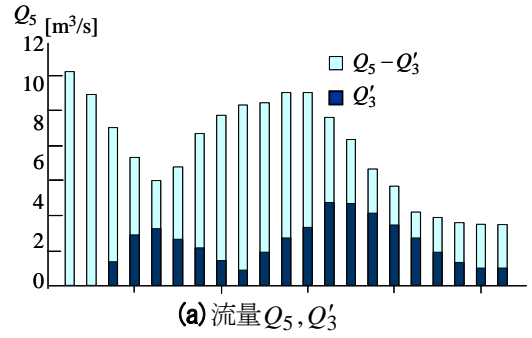
c) 濁度変動の要因

次に、Sta.5における浮遊土砂が、流域内のどの部分から移流されてきたかを検討する。ここでは、Sta.5における集水域を2分割して、Sta.3における集水域（雨水路域＋上流域）とSta.3～5間の集水域（中流域）を対象となる供給源として考えることとする。Sta.5における濁度変動特性に対する2つの小流域の寄与分を明らかにするために、Sta.5における流量と濁度フラックスと、それらに及ぼすSta.3を通過する流量と濁度フラックスの寄与分を図—7に示す。この寄与分を算出する際には、流量を例にとると、Sta.5における流量 Q_5 に対するSta.3を通過する流量 Q_3 の寄与分 Q'_3 は、以下のように与えることとした。

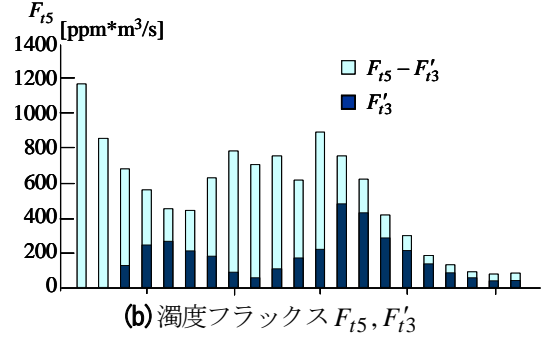
$$Q'_3(t) = Q_3(t - \Delta t) \quad (1a)$$

$$\Delta t = \frac{L}{U} \quad (1b)$$

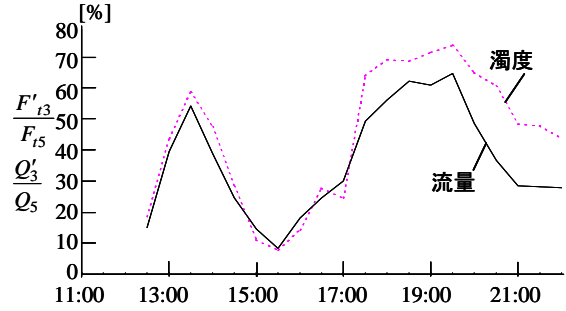
ここで、 L はSta.3からSta.5までの流下距離を、 \bar{U} は河川内で観測された平均移流速度をそれぞれ表している。ここでは、 Q'_3 は雨水路域＋上流域からの寄与分（図中黒色部分）に、 Q_5 と Q'_3 の差は中流域からの寄与分（図中白色部分）に、それぞれ相当している。濁度フラック



(a) 流量 Q_5, Q'_3



(b) 濁度フラックス F_{15}, F'_{13}



Sep-11
(c) $Q'_3/Q_5, F'_{13}/F_{15}$

図—7 Sta.5における浮遊土砂供給源の推定

ス F_t に関しても、同様に算出している。また、同図(c)には、Sta.5での各データの値に対する雨水路域＋上流域からの供給分の寄与率($Q'_3/Q_5, F'_{13}/F_{15}$)も合わせて示されている。

これを見ると、Sta.5での流量ピーク後の流量逡減期において、Sta.3からの寄与分 Q'_3, F'_{13} のピーク値が現れている。また、その寄与分の比率としては、流量よりも濁度フラックスの方が大きくなっている。以上のことから、図—4, 5に示しているSta.5における遅れ型の濁度変動パターンが生じる要因としては、上流域を起源としてSta.3を通過する高濁度水が、流量逡減期にSta.5に到達するためであることが分かる。このことより、Sta.5への流達時間や流達濁質負荷量が上流域と中流域の集水域とで大きく異なっているため、図—4, 5に示しているSta.3と5における濁度変動特性や河川流下方向における濁度—流量間のヒステリシスの違いが生じたものと考えられる。

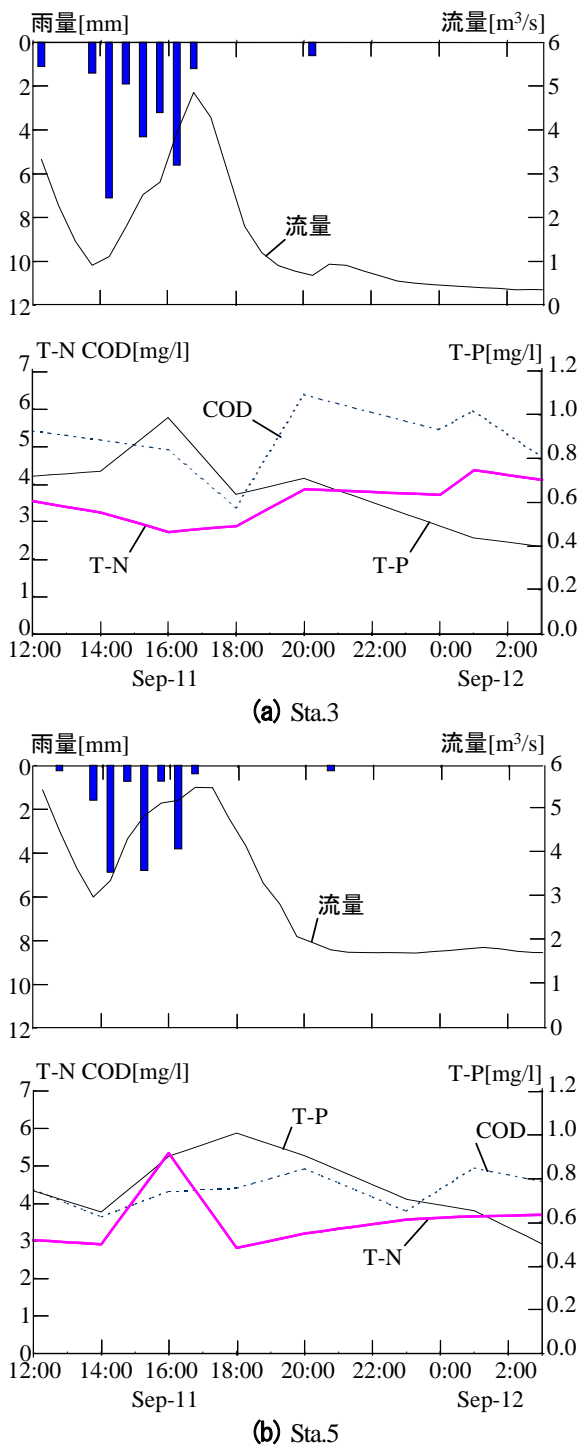


図-8 河川内における水質濃度変化

(3) 河川内における水質濃度変化

降雨時における河川内での水質濃度変動特性を見るために、河川上・中流域における T-N, T-P, COD の時系列変化を図-8 に示す。これを見ると、まず、河川中流域 (Sta.5) においては、流量の増加と共に、T-P や T-N は増加している、という従来知られている傾向と類似した結果^{6), 9)} となっていることが分かる。同観測点における COD は明確な変動パターンは見られない。また、これと類似した水質濃度の変動特性は、下流域 (Sta.7)

でも確認されている。一方、上流域 (Sta.3) では、流量の増加に対応して T-P のみが増加しており、T-N や COD は逆に減少していることが分かる。このような水質変動特性は、Sta.3 に加えて、Sta.1 でも観測されており、上流域・雨水路域と中・下流域とでは、濁度変動特性のみならず、水質濃度変動パターンも大きく異なることが明らかとなった。このような増水時における T-N や COD の減少傾向は、他の都市河川での観測例⁹⁾ とは大きく異なる変動パターンを示している。この要因としては、相対的に占有率が比較的高い林地からの直接流出成分の寄与が大きかったことや、上流域内におけるノンポイントソース起源の水質濃度負荷量が中・下流域内のものと比べて小さかったことなどが考えられるが、その詳細は今後検討する予定である。

4. 結論

手賀沼及び流入河川の1つである大堀川を対象として、水環境特性が大きく変化する降雨時における多点同時集中観測を実施した。その結果、河川上流域と中・下流域において、濁度変動特性や水質濃度の変化パターンが大きく異なることが明らかとなった。このうち、濁度変動特性の違いの要因としては、各小流域からの流達時間や流達汚濁負荷量の違いと密接に関連していることが示唆された。

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の学生諸氏には多大なる御助力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) (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。
- 2) 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。
- 3) 小林節子・平間幸雄：手賀沼の最近の水質の変化について，千葉県水保研年報，pp.63-71，1997。
- 4) 平間幸雄・小林節子：地理情報システムによる手賀沼流域の情報管理，千葉県水保研年報，pp.93-95，1997。
- 5) 下水試験方法 上巻 — 1997 年版一，日本下水道協会，pp.147-193，1997。
- 6) 国松孝男・村岡浩爾：河川汚濁のモデル解析，技報堂出版，pp.117-124，1989。
- 7) 恩田裕一・奥西一夫・飯田智之・辻村真貴 (編)：水文地形学 — 山地の水循環と地形変化の相互作用一，古今書院，pp.132-142，1996。
- 8) Williams, G P: Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers, *J. of Hydrology*, Vol.111, pp.89-106, 1989。
- 9) 海老瀬潜一：汚濁物質の降雨時流出と流出負荷量，水質汚濁研究，Vol.8, No.8, pp.499-504，1985。

(2001. 4. 16 受付)