

淀川流域圏の水質の変遷と下水道システムの影響解析

CHANGE OF WATER QUALITY IN THE YODO RIVER BASIN AND IMPACT OF SEWERAGE SYSTEM ON IT

西田修三¹・前田瑛美²・吉田淳貴³・長澤稔郎³

Shuzo NISHIDA, Emi MAEDA, Junki YOSHIDA and Toshiro NAGASAWA

¹正会員 工博 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

²学生会員 修(工) 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

³学生会員 学(工) 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

The water environment of river basins and coastal areas was improved for the past years by emission concentration regulation and total volume control, especially the development of sewerage systems. However, material cycles in the river basins have changed and this caused change of ecosystem in the coastal water.

To estimate the influence of the sewerage systems on the change in water quality of the Yodo River, data of sewerage systems in the basin was collected and analyzed. Moreover a simulation using a grid-base basin model and field measurements including flood stage were carried out to make quantitative evaluations of the change in river water quality.

Key Words : *Yodo River, Water Quality, Sewerage System, Grid-Base Basin model*

1. はじめに

高度成長期以降、水・物質の自然循環系を形成している流域圏において、上下水道の整備や環境維持水の導水など人工的(人為的)な循環系が急速に発達し、土地被覆状況や地形・地質によって決定される自然循環系だけではなく、自然系と人工系からなる複合循環系によって河川流域や沿岸海域の水・物質循環が決定されるようになってきた。河川および沿岸海域の水質改善に向けて実施された排水の濃度規制や総量規制等の環境施策、とりわけ下水道システムの普及と高度化による有機物や栄養塩の除去は、水域の水環境を大きく改善し、劣化した水域の再生に大きく貢献してきた。しかし、その一方で流域の水・物質循環系が大きく歪められ、沿岸海域への局所的な負荷増大や栄養塩枯渇など水質構造に変化が生じ、プランクトンの種組成の変化など沿岸生態系異変の一要因ともなっている^{1,2)}。

流域圏の水環境の変遷とその要因に関しては様々な研究が行われており、人為的要素、特に下水道システムに着目した研究としては、例えば多摩川の水質特性について下水道システムの普及との関連を解析した研究³⁾等があるが、河川水質変化の要因を定量的に捉えた研究は多

くはない。本研究で対象とする淀川流域圏においても、琵琶湖-淀川プロジェクト⁴⁾をはじめとする多くの調査研究^{5)~7)}がなされてきたが、データベースの整備が遅れている下水道関連のデータ解析は現状分析や単年度分析にとどまり、淀川流域圏全体におよぶ長期のデータ分析はほとんどなされていない。

そこで、本研究では、まず過去30年に及ぶ下水道資料の収集と解析を行い、下水道システムの整備が河川水質の変遷に及ぼした影響を明らかにするとともに、流域モデルを用いた複合循環系のシミュレーションにより、その影響の定量的評価を行った。また、流域の定期観測とともに出水時観測を実施し、河川水質に及ぼす下水処理場からの放流水の影響について、その実態の把握と影響解析を行った。

2. 淀川流域圏の概要

淀川水系は、流域面積8,240km²、幹川流路延長約75kmに及び、上流域に琵琶湖を、下流域には京都、大阪の二大都市を抱える。琵琶湖には118の一級河川が流入し、回転率は約0.19/年である。図-1に琵琶湖下流域の淀川水系の主要河川を示す。琵琶湖から流出した湖水は、瀬田



図-1 淀川水系(琵琶湖下流域)と主要な調査地点

川として滋賀県内を流れ、宇治川となって下流し、桂川、木津川と合流した後、淀川となる。淀川は、平均流量約250m³/sを有し、大阪平野を南西方向へ流下して、一部は神崎川と大川に分流し大阪湾に流れ込む。猪名川は、兵庫県東部に水源を有し、流域が兵庫、京都、大阪にわたる河川であり、下流域で淀川から分流した神崎川と合流して大阪湾にそそぐ。各支川流域が淀川水系全体の流域に占める面積割合は、琵琶湖流域が約47%、桂川約13%、宇治川約6%、木津川約19%、三川合流より下流の淀川約10%、猪名川約5%⁵⁾である。

3. 下水道システムの整備と河川水質の変遷

1970年は流域平均30%程度であった普及率が2005年には90%まで上昇するなど、過去30余年で淀川流域の下水道システム整備は大きく進展した。このような下水道事業の変遷やシステムの現状を捉える上で「下水道統計」は有用な資料であるが、物質循環に係る詳細な議論をする上では、例えば流入下水や放流水の水質項目が限定的であるなどデータ不足は否めない。一方、各下水処理場では水質試験が実施され詳細なデータがとりまとめられているが、行政区域を越えて一元化されたデータベース等の整備はなされておらず、流域規模での解析を行う上でそれらデータの利用は簡便ではない。

そこで本研究では、下水道統計⁸⁾に加え、各下水処理場の水質試験に関する報告書やデータ等^{9),10)}を関係自治体より収集し、1970年頃からの処理場の基礎データ・処理水量・流入下水水質・放流水質等についてデータベース化を行った。ここでは、そのデータベースを基にデータ欠損の少ない1975年から2005年までの30年間にわたるデータの解析を行った。

(1) 下水道システムの整備と変遷

本研究では、大阪府および京都府に存在する10箇所の流域下水処理場を解析対象とした。以下に各処理場(No.)と処理区の河川(括弧内)を記す。

No.1(神崎川), No.2(神崎川), No.3(淀川), No.4(淀川), No.5(寝屋川), No.6(寝屋川), No.7(桂川), No.8(木津川), No.9(桂川), No.10(木津川)。

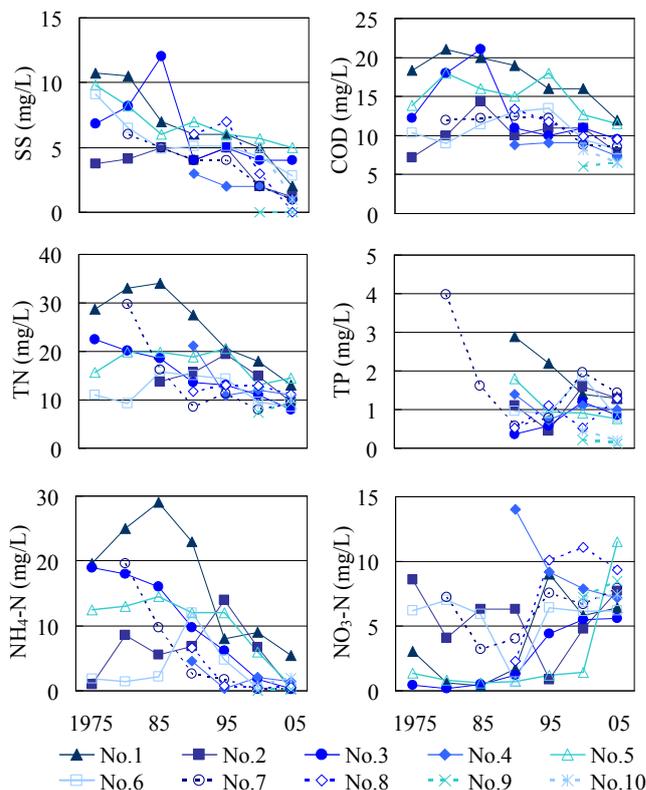


図-2 放流水質の経年変化

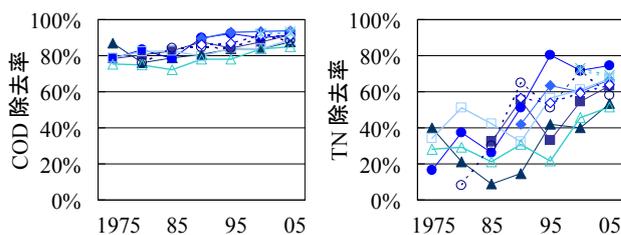


図-3 CODおよびTNの負荷除去率の経年変化

(凡例：図-2に同じ)

各処理場からの放流水質の経年変化を図-2に示す。なお、No.1からNo.6では、TPは1985年まで測定されていなかったためデータが欠損している。SS, COD, TN, TPについては10処理場全体の傾向としては減少しているものの、その特性は項目ごとに異なっている。SSはどの処理場においても比較的安定して減少している。CODとTN, TPは、概ね減少傾向を示すが、明確な減少傾向が見られる場合がある一方、変動が大きく一定の傾向を示さない場合もあり、処理場によって水質の変遷に差異が見られる。

CODとTNの負荷除去率の経年変化を図-3に示す。ここで負荷除去率とは、各処理場の流入負荷量と放流負荷量の差を下水処理過程において除去された負荷量(負荷除去量)とした場合の、流入負荷量に対する負荷除去量の割合を表す。CODとTNの除去率を比較すると、CODは10処理場すべてで1975年当時から70%以上の高い除去率を示し2005年には約90%に達しているのに対して、TNは処理場によって除去率に大きな差が見られ、2005

年においても50%から70%程度の除去率となっている。なお、SSはCODと、TPはTNと同様の傾向を示していた。これらの要因としては、現在までの下水処理方式では懸濁物および有機物の除去に対しては安定した効果が得られている一方、窒素やリンの除去に対しては十分ではないこと、また窒素・リンの除去に関わる高度処理の導入状況が処理場によって異なることなどが挙げられる。

図-4にCODの負荷除去量の経年変化を示す。新しい処理場の供用開始と各処理場の処理水量の増加、および負荷除去率の向上が相まって、総負荷除去量が大幅に増加している。2005年での10処理場の総除去量は1975年当時のおよそ3倍に至っている。その量は大阪湾に流入する全COD負荷量¹⁾144ton/日の約80%に相当する。なお、ここで対象とした10処理場以外にも含めた流域内主要処理場での総除去量は、300ton/日以上にも及んでいた。下水処理によって流域圏の物質循環系からこのように多量のCOD負荷が除去されていることから、下水道システムが流域圏の物質循環に及ぼす影響の大きさがうかがえる。

10処理場の放流水のNH₄-NとNO₃-N濃度の経年変化を図-2に示す。下水処理過程において、NH₄として流入した窒素は硝化され、NO₂を経てNO₃へと形態を変えた後、除去される。年によって変動はあるものの、すべての処理場でNH₄-Nは減少、NO₃-Nは増加の傾向を示し、硝化が進行していることが見てとれる。特に1985年以降はその傾向が顕著に見られ、窒素の形態別構成比が大きく変化したことがわかる。図-5に処理場からの放流水のDINに占めるNH₄-Nの割合を示す。処理場による差はあるものの、すべての処理場においてNH₄-N比が減少していることがわかる。

(2) 河川水質の変遷と水質バランス

国土交通省が実施している水質観測と公共用水域水質調査のデータを用い、淀川流域の主要河川における水質の経年変化の解析を行った。対象河川は、桂川、宇治川、木津川、淀川、猪名川、神崎川の6河川とした。

水質(COD, TN, NH₄-N)の年平均値の経年変化を図-6に示す。なお、凡例の括弧内は各河川の水質観測地点名であり、図-1に印した点に位置する。3項目とも、木津川、宇治川を除く4河川において改善傾向を示し、特に猪名川、桂川と神崎川での改善幅が大きい。これらの河川においては、流域人口が多く河川水質に及ぼす人為的な要因が大きいいため、下水道整備の効果が強く現れたものと考えられる。

また、図-5において、すべての河川でNH₄-Nの割合が減少していることが見てとれる。これは、下水道の整備が進みNH₄-Nが減少し、代わりにNO₃-N濃度が増加していることと対応している。このような河川の水質バランスの変化は、植物プランクトンを中心とする沿岸域生態系に影響を及ぼしてきた可能性が示唆される。

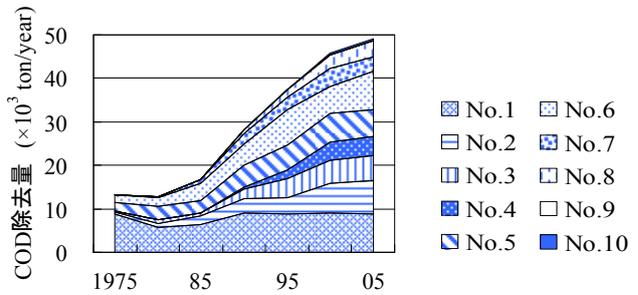


図-4 COD負荷除去量の経年変化

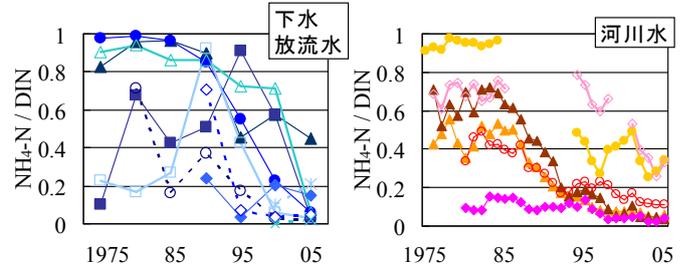


図-5 下水放流水および河川水のNH₄-N / DIN比の経年変化 (凡例：左図は図-2、右図は図-6に同じ)

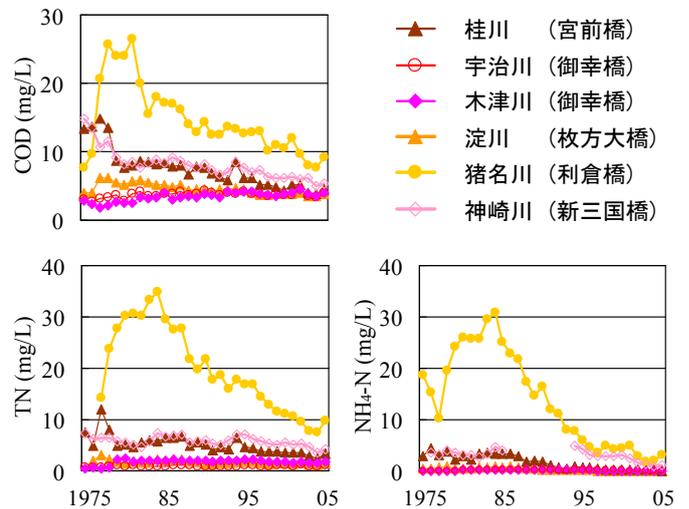


図-6 河川水質の経年変化

4. 流域モデルによる下水道の影響評価

前章より、下水道システムの整備は河川水質の変遷に大きな影響を及ぼしてきたことがわかった。ここではその影響をより詳細に明らかにするため、下水道システムの整備を普及率の向上と放流水質の向上の2要素に分別し、定量的評価が可能な流域モデルを用いてそれぞれが河川水質改善に果たした役割について解析を行った。

(1) 計算方法

計算対象領域は、琵琶湖に流入する河川の流域を含む淀川全流域である。水平方向には1km×1kmのメッシュに分割したグリッドベースモデルを採用し、鉛直方向にはA～D層の4層に分割した線形貯留モデルを採用した。メッシュ間、層間の物質移動を考慮してメッシュごとの

蒸発散量，流量，栄養塩濃度を算定している．モデルの構成と検証については加賀¹²⁾，西田¹³⁾に詳述されている．

表-1に計算条件を示す．社会状況(土地利用および人口分布)と下水道システムの2要素(普及率と放流水質)を変化させて計算を行った．ケース1はすべて1970年に設定，ケース2は2000年条件のもと下水道普及率のみ1970年レベルに設定，ケース3は2000年条件のもと下水放流水質のみ1970年レベルに設定，そしてケース4はすべて2000年に設定して計算を行った．

気象状況の差異による影響を除去するために，降雨等の気象条件はすべてのケースにおいて1998年1月1日から2000年12月31日の3年間のデータを使用した．計算開始後の2年間を助走期間とし，2000年1月1日から12月31日までの1年間の計算結果を解析に利用した．

(2) 計算結果

計算結果から，1970年に比して2000年では明らかに流域の各河川における河川負荷量が減少したが，桂川や神崎川，猪名川では，河川負荷量に対する処理場からの放流負荷量の割合が増加していた．特に神崎川や猪名川では，河川規模に比して多量の処理水が放流されており，CODでは河川負荷量の50%以上を放流負荷量が占めていることがわかった．

図-7に，下水道普及率向上と処理場放流水質向上による河川水質の改善率を示す．それぞれ，ケース2と4，ケース3と4の計算結果を比較して算出した．なお，各河川における解析地点は，図-6と同じである．

水質項目ごとに改善率は異なるものの，1970年から

表-1 計算条件 (設定年)

条件	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
土地利用分布 人口分布	1970	2000	2000	2000
下水道普及率	1970	1970	2000	2000
下水放流水質	1970	2000	1970	2000

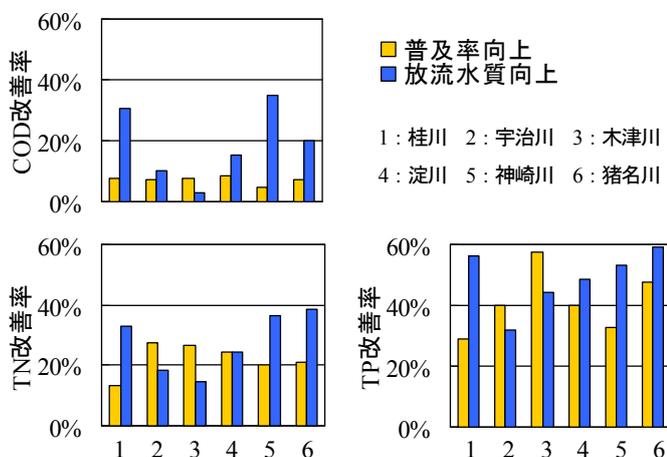


図-7 下水道普及率向上および放流水質向上による河川水質の改善率

2000年にかけての河川水質の改善には，下水道普及率の向上とともに処理場放流水質の向上が大きく作用していたことがわかる．各水質項目の改善率を比較すると，特にTPの改善率が大きい．すなわち，河川におけるTPの水質改善には，下水道システム整備の進展が大きく寄与していたことがわかる．また，桂川や神崎川，猪名川においては放流水質向上による改善効果が顕著に見られるが，都市部を抱えるこれらの河川流域では1970年時点ですでに普及率が高かったことがその理由と考えられる．

5. 流域調査

(1) 現地調査概要

淀川本川河口上流14.5km地点において，2007年より定点水質調査を実施し，平水時データとともに出水時のデータの収集と蓄積を行っている¹⁴⁾．2009年4月からは，三川の合流域まで観測域を拡大し，図-1に示す各河川の代表調査地点を含む計22地点において，月1回の平水時観測と降雨出水時の観測を実施している．

現地にて，水温，電気伝導度，pH，濁度を計測し，採水試料を持ち帰り栄養塩（形態別N，P，Si）およびTOC，COD，SSの分析を行っている．また，流量観測がなされていない地点では，負荷量算定のため必要に応じて流速測定も実施している．

(2) 調査結果

平水時の調査結果の一例として，図-8に2009年6月の観測結果を示す．観測地点は，安威川は宮鳥橋，他の河川は図-6と同じである．

上流三川については，都市部を流下する桂川の水質が最も悪く，琵琶湖下流に位置する天ヶ瀬ダムにおいて流量制御を受けたダム放流水が大半を占める宇治川では栄養塩濃度が低く，木津川は森林面積が最も多く人為的影響の少ない河川であることなど，それぞれ特徴を有した水質構造が見てとれる．合流後の本川水質は，流量比に応じた混合比の水質を示し，流量比率の大きい宇治川の水質に強く支配されていることがわかる．

淀川水系の下流域に位置し自流量の少ない安威川および神崎川では，下水処理場放流水の流入が多く，水質改善が進んでいない．淀川本川からの導水により水質改善を図っている箇所もあるが，一部では河川流量の数倍の

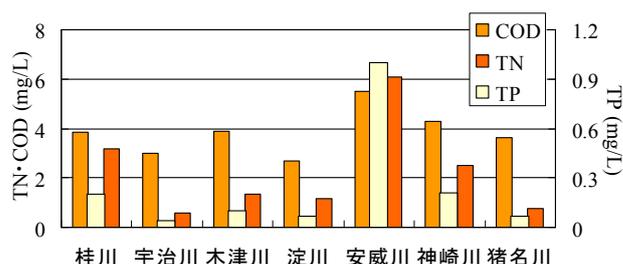


図-8 6月の平水時観測結果

放流水が流入する地点もある。その結果、水質は放流水の影響を顕著に受け、処理場の放流水質に依存した濃度と栄養塩構成比を示していた。

一方、出水時には河川流量の増加と処理場からの多量の雨水の流入が生じ、水質は強い非定常性を有すると予想されるが、その変動特性や河川への負荷の実態は把握されていない。そこで、神崎川流域の代表的な下水処理場を対象に、処理水放流口と雨水放流口（雨水吐）、およびその上下流の河道部において降雨出水時に水質観測を実施し、出水時の放流水の河川への影響を捉えた。なお、観測点における平水時の自流量は0.5～1 m³/s程度で、処理場から約2～3m³/sの処理水が恒常的に流入している。

採水地点は、処理水放流口とその上流1km、100m、下流1.2kmの河道3地点、および処理水放流口の下流400mに位置する雨水吐の計5地点である。河川水については、上流1kmおよび下流1.2km地点では橋上から、上流100m地点では河岸からバケツにて表層水を採水した。処理場から放流される処理水および雨水・越流水については、放流口から流出する放流水を直接バケツで採水した。

観測は、上流地点から下流地点まで5地点を1巡し、水位変化を見ながら時間をおいて複数回実施した。

ここでは2009年7月1日の降雨出水時の結果を示す。7月1日は、前日に日降雨量23.5mmの降雨があり、その後20時間無降雨状態が続いたのち、再び降雨があった。この降雨は断続的におよそ11時間継続し、対象地点周辺で最大8.5mm/h、総雨量16mm程度が観測された。

図-9は、各観測地点の水質の経時変化を示している。1回目(図中①)の観測時間は20:00～21:45、2回目(②)は23:40～1:40、3回目(③)は7:00～8:40である。なお、図には6月26日に実施した平水時観測の結果(6月)もあわせて図示している。

第1回観測時には雨水吐から約7.4m³/sもの多量の雨水放流があり、19:00から23:00まで5時間にわたり合計104,220m³の雨水放流があった。この処理場は一部合流式処理施設を含んでおり、放流雨水に合流式下水道越流水(CSO)も混入するためNH₄-N濃度が約6mg/Lと高く、NH₄-NがTNの約55%を占めていた。一方、処理水は2.5 m³/s程度の安定した放流量を有し、放流水質はTNで約6～9mg/Lを示し、大半はNO₃-Nであった。

処理場下流の河川水は、平水時には放流処理水の影響を顕著に受け、濃度、組成ともに処理水と同様の水質を示している。一方、降雨時にはCSOを含む放流雨水の影響を受けて特にNH₄-Nが上昇するが、放流が止まると上流から多量に流下する河川水の水質と速やかに同化し、処理場からの放流水の影響はほとんど見られなくなる。また、平水時には処理場から8mg/L程度の比較的高濃度のシリカが河川に供給されるが、出水時には上流域より30 mg/Lを超える高濃度の懸濁態シリカが供給されることも明らかとなった。

他の平水時観測と7月19日出水時観測のデータも含め

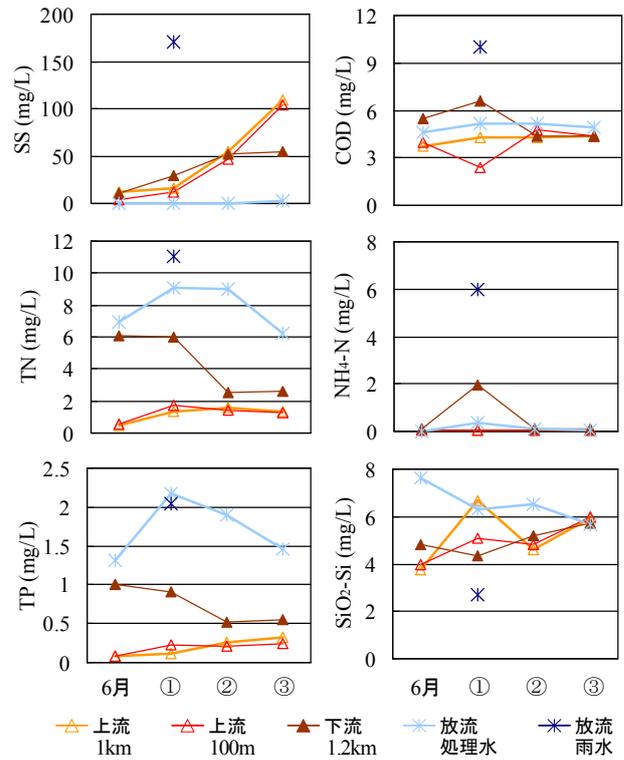


図-9 7月1日降雨出水時の水質の経時変化

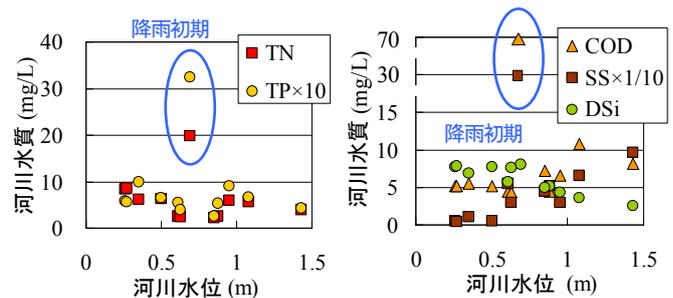


図-10 河川水位と水質の関係

て解析を行った結果、処理場に集水された雨水の放流と表層流出による河川の増水にはタイムラグが存在し、降雨直後には雨水放流により処理場下流部ではNH₄-N濃度が急激に上昇するなど、CSOを含む放流水の影響を顕著に受けるが、その後、増水により上流から供給される多量の河川水により希釈され、雨水および処理水の影響は消失し、処理場下流部の河川水質は処理場上流部の河川水質に支配されることがわかった。

(3) 負荷量の算定

平水時および出水時における処理場下流1.2km地点の河川水位と水質の関係をまとめて図-10に示す。降雨初期段階では放流雨水の影響を受けて河川水質は極めて高い濃度を示しているが、それ以外は濃度と水位に相関が認められる。汚水の処理過程で懸濁物が除去されるために河川への負荷がほとんどないSSに関しては、処理場の影響は現れず、自然河川と同様に水位上昇、つまり流量増加にともない単調に濃度が上昇している。また、希釈効果が卓越する溶存態シリカについては、水位の上昇と

表-2 7月1日降雨出水時の負荷量

	上流部河川水 平水時 (6/26)	上流部河川水			放流処理水			放流雨水		下流部河川水			
		①	②	③	①	②	③	①	流出総量 (ton)	①	②	③	
流量	m ³ /s	0.56	9.9	16.1	4.8	2.3	2.4	2.6	7.4	104,200	19.6	18.5	7.3
COD	g/s	2.1	42.7	69.2	20.9	11.9	12.6	12.5	73.5	1.04	129.3	81.5	32.2
TN	g/s	0.25	13.23	25.19	6.48	20.86	21.73	15.90	81.56	1.156	118.26	47.48	18.87
TP	g/s	0.046	1.15	4.22	1.55	4.99	4.59	3.72	15.08	0.213	17.82	9.72	4.02
DSi	g/s	2.10	66.45	74.53	28.19	14.49	15.47	14.56	19.94	0.283	84.62	95.81	42.00
NH ₄ -N	g/s	0.021	0.63	1.05	0.20	0.82	0.24	0.15	43.98	0.623	38.09	2.00	0.90

ともに明瞭な減少傾向が認められる。ただし、懸濁態シリカについては上述のとおりSSと同様に出水時に大きな値を示していた。他の水質項目については、低水位(低流量)時には河川水質は処理水の水質に近い値を示す一方、水位(流量)の増加にともなう希釈効果により濃度は減少傾向を示し、その後は自然河川と同様に単調な上昇もしくは減少傾向を示していることがわかる。つまり、降雨初期段階には放流雨水による突発的な負荷流入があり、放流処理水の影響が大きく現れる低流量時には希釈効果によりL-Q式のべき係数が1以下を示すなど、水位(流量)と水質との特徴的な関係が見出された。

7月1日の降雨を対象に負荷量の算定を行った。その結果を表-2に示す。放流処理水のTN負荷量は、平水時の河川負荷量の80倍に相当し、その影響の大きさがうかがえる。また、放流雨水のNH₄-N負荷量は、平水時の河川負荷量の約4日分に相当し、大きな負荷供給源となっていることもわかる。NH₄形態の窒素の供給は、河道部ばかりではなく河口沿岸域における生態系に大きな影響を及ぼすとともに、生物生産において重要な役割を果たしているものと考えられる。また、シリカについても処理水場からの負荷が大きく、シリカ循環において都市域の下水道システム等の人工循環系が重要な役割を果たしていることが示唆される。

6. おわりに

下水道システムの整備が淀川流域圏の水環境に及ぼした影響について、過去30年の資料分析、流域圏の水・物質循環シミュレーション、および現地調査により解析を行った。得られた主たる結果は以下のとおりである。

- (1) 大阪府、京都府に存在する10箇所の流域下水処理場における2005年の負荷除去率は、COD、SSは約90%に達しているが、TNは70%程度に止まっていた。また、10処理場における総COD除去量は、大阪湾に流入するCOD負荷量の約80%に相当する量であった。
- (2) 下水処理場放流水のNH₄-N濃度が減少し、NO₃-N濃度が増加した結果、河川水のNH₄-N濃度も減少し、過去30年間に大きな水質バランスの変化が生じていた。
- (3) 1970年から2000年にかけての河川水質の改善には、下水道普及率の向上とともに処理場放流水質の向上が大きく寄与していた。

- (4) 下水処理場の放流処理水はNO₃-N濃度が高くNH₄-N濃度は低い。降雨時の放流雨水のNH₄-N濃度は高く、河川への大きなNH₄-N供給源となっていた。

謝辞: 本研究を進めるにあたり、今岡知武君をはじめとする研究室学生の助力を得た。ここに感謝の意を表するとともに、本研究の一部が科学研究費補助金(基盤研究(B) No.21360236)により行われたことを付記する。

参考文献

- 1) 山本民次 他: 瀬戸内海における植物プランクトン態N:P比とその変動要因, 水産海洋研究, Vol.63, No.3, pp.6-13, 1999.
- 2) 日本海洋学会: ノリ色落ちと内湾域の栄養塩動態, 2008年度秋季大会シンポジウム講演要旨集, 2008.
- 3) 大垣眞一郎 監修: 河川と栄養塩類 管理に向けての提言, 技報堂出版株式会社, 2005.
- 4) 総合地球環境学研究所: 琵琶湖-淀川プロジェクト 最終成果報告書, 2007.
- 5) (財)琵琶湖・淀川水質保全機構: BYQ水環境レポート, 2008.
- 6) 金 再奎, 原田茂樹, 内藤正明: 琵琶湖の水質保全対策の評価に関する研究, 水環境学会誌, Vol.24, No.12, pp.837-843, 2001.
- 7) 中口 譲 他: 淀川水系における富栄養化関連物質の挙動とその季節変化, 地球化学, Vol.39, No.4, pp.173-182, 2005.
- 8) (財)下水道協会: 下水道統計, 昭和50~平成17年度版.
- 9) 大阪府: 流域下水道維持管理報告書, 昭和50~平成17年度.
- 10) 京都府: 水質試験年報・維持管理年報資料集, 昭和50~平成17年度.
- 11) 環境省 水・大気環境局: 平成17年度発生負荷量等算定調査報告書, 2006.
- 12) 加賀昭和: 環境技術開発等推進事業, 研究開発成果報告書「流域自然環境の多次的機能の劣化診断手法と健全性回復のための統合モデルの開発」, 2004.
- 13) 西田修三, 北畠大督, 入江政安: 淀川流域圏の水環境と大阪湾への影響評価, 水工学論文集, Vol.51, pp.1153-1158, 2007.
- 14) 西田修三, 中谷祐介: 大阪湾の水質と一次生産に及ぼす降雨の影響, 水工学論文集, Vol.52, pp.1345-1350, 2008.

(2009. 9. 30受付)