淀川・大和川における水質モニタリング指標を用いた物質輸送量の推定

ESTIMATION OF MATERIAL LOADINGS UTILIZING AUTOMATIC MONITORING DATA IN THE YODO RIVER AND THE YAMATO RIVER

中谷祐介¹・今岡知武²・西田修三³

Yusuke NAKATANI, Tomotake IMAOKA and Shuzo NISHIDA

¹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)

²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)

³正会員 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

During flood periods, rivers transport large amounts of water and nutrient loads, and have significant impacts on water quality and ecosystems in enclosed waters. In this study, observations were carried out in the Yodo River, the three upstream rivers (the R. Katsura, the R. Uji, and the R. Kizu), and the Yamato River in ordinary and flood conditions. As a result, the relationships of SS with PN, PP, and POC were formulated, and we could estimate the loading amounts of PN, PP, and POC, using these correlations and the turbidity measured by automatic monitoring system. In a similar way, from the monitoring electric conductivity data, the loading amounts of DIN and PO₄-P were estimated with a high degree of accuracy in the Katsura River, where the water quality was influenced strongly by point source pollution.

Key Words : Yodo River, Yamato River, Flood, Automatic monitoring data, Nutrients

1. はじめに

閉鎖性水域の水環境に及ぼす出水のインパクトは大きく、その影響を精確に評価することは水質管理の観点から重要である¹⁾。近年は出水時負荷の重要性についての認識が高まり、各水域を対象に多くの研究が進められつつある^{2,3)}。これまで筆者らは、大阪湾主要流入河川である淀川や大和川において平水時および出水時に現地観測を実施し、流入負荷の実態把握に向けたデータの蓄積と解析を進めてきた^{4,5,6)}。その結果、物質負荷量と河川流量の関係(L-Q関係)は高流量域において大きく散乱することが明らかになった。その原因として、増水期と減水期に生じるヒステリシス効果をL-Q式では反映できないこと、また複数の上流支川を有する場合には各支川の流出特性が異なるために、流域内の降雨パターンにより合流部下流の水質が大きく左右されること等が挙げられる。これらのことから、L-Q式を用いて流量データのみから負荷量を精確に推定することには限界があると考えられる。

一方で、我が国の主要河川では自動観測機器を用いた流況・水質モニタリングが行われており、水位、水温、

pH、DO、COD、濁度、電気伝導度(以下、電導度)等について短時間隔の詳細な連続データを利用することが可能である。しかし、観測センサー機器や組み込み可能な分析システムによる計測はなされているものの、水環境の解析において重要となる栄養塩類のモニタリングは十分にはなされていない。現地設置型の自動分析装置を用いた栄養塩モニタリングは技術的には可能であるが、全国の水系に普及させることはメンテナンスも含めコスト面において現実的ではない。また、降雨出水時の現地調査は危険が伴ううえに、複数地点にわたる連続採水には極めて多くの時間と労力を要する。

このような課題を踏まえ、出水時を含めた物質輸送量を簡便かつ連続的に算定する一手法として、自動観測機器によるモニタリング指標から栄養塩類の負荷量を推定する試みがなされてきた^{7,8)}。しかしながら、出水時の水質データが不足しているため、大阪湾への流入河川においてその適用性について検討された例はない。

本研究では、淀川本川とその上流三支川(桂川、宇治川、木津川)、大和川を対象に、平水時および出水時に現地観測を実施し、各河川の水質特性とその変動要因を明らかにする。さらに、その解析結果を基に、水質モニタリング指標を利用した物質輸送量の推定を試み、その

図-1 対象領域と観測地点

有用性について評価を行う。

2. 対象領域の概要

研究対象領域を図-1に示す。淀川は琵琶湖から流出する瀬田川（天ヶ瀬ダムより下流では宇治川に名称を変える）に加えて、桂川と木津川の三川が合流して形成される河川であり、大阪平野を流下しながら神崎川と大川を分流して大阪湾へ流入する。桂川の上流域には山地が多いが、下流域では市街地が形成されており、下流部での河川流量は平水時には半分近くを下水処理水が占めている¹⁾。宇治川は琵琶湖から流出した後、中流部において天ヶ瀬ダムを経由するため、流量・水質ともに琵琶湖湖水の影響を強く受ける²⁾とともに、ダム貯留の影響も受けている。木津川は流域内に山地・農地が多く、一部下水道が未整備の地域もあるが、比較的人為的影響の小さい河川である。大和川は初瀬川を源流に、奈良盆地と大阪平野を流れ、大阪湾へ注ぐ一級河川である。流域内の都市化に伴い水質汚濁が深刻化し、近年の様々な環境施策により水質は改善傾向にあるものの、一級河川の中では依然として最低水準にある。

3. 現地調査の概要

出水時を含めた河川の水質特性を明らかにするために、月1回の平水時調査と出水時の調査を継続して実施している。ここでは、淀川と上流三川については2009年4月から2010年8月までに得られたデータを、また大和川については2009年3月から2010年3月までのデータを基に解析を行う。採水地点は、桂川では宮前橋（三川合流地点から上流約2.4km）、宇治川では宇治川御幸橋（同上流約1.2km）、木津川では木津川御幸橋（同上流約1.2km）、

淀川本川では枚方大橋（同下流約9km、河口より上流約25.9km）、大和川では遠里小野橋（河口より上流約4.2km）である（図-1）。なお、各観測地点では関係機関により平水時に月1回の頻度で公共用水域水質調査が実施されている。本研究では、筆者らの観測結果に加えて、2006年1月から2009年12月までに行われた公共用水域水質調査の結果も解析に用いる。

橋上から流心において採水し、水温、pH、電導度、濁度を測定した後、冷暗条件下で採水試料を実験室に持ち帰り水質分析を行った。分析項目は形態別の栄養塩（N、P、Si）と有機炭素、およびSS、CODである。ただし、懸濁態成分（懸濁態窒素PN、懸濁態リンPP、有機懸濁態炭素POC）については全成分と全溶解態成分との差より算定した。現地測定にはpH-電導度計D54SE（HORIBA）、電導度計SC82（YOKOGAWA）および多成分水質計AAQ1183-H（JFEアドバンテック）を、水質分析にはAACS（BLTEC）およびTOC-V（島津製作所）を使用した。また、2009年10月台風18号に伴う出水時に採水した試料については、質量分析計Finnigan MAT252（Thermo Electron Corporation）を用いた水素・酸素安定同位体比（ δD 、 $\delta^{18}O$ ）の分析もあわせて行った。

河川流量はH-Q関係より算定した。ただし、2009年台風18号に伴い発生した出水の際は、淀川合流部における背水の影響により、増水期から減水初期にかけてH-Q関係が成り立たなかったため、以下の方法により各上流支川の流量を推定した。まず、高流量域まで適用可能なH-Q式が得られている枚方地点については、H-Q式をそのまま適用して流量を算定した。ただし、低流量時にはより精度の高い高浜地点におけるH-Q式を用いた。次に、保存性の高い水質指標（ $\delta^{18}O$ 、水温、電導度、 SiO_2-Si 濃度）の観測データを用いて、各収支式より淀川への流量比率を最小二乗法により推定し、枚方地点の流量を乗じることにより各支川の流量を推定した。

4. 河川の水質特性と変動要因の分析

(1) 水質の流量依存性

現地観測により得られた水質と流量の関係を図-2に示す。その関係は溶解態成分と懸濁態成分で大きく異なっている。DINと PO_4-P についてみると、桂川と大和川では濃度は低流量時には大きく変動するが、流量の増加に伴い収束する傾向がみられる。一方、宇治川や木津川では濃度は流量に依存せず、概ね一定値を示している。

ここで、淀川・大和川流域における河川水中の塩化物イオンはその大半が生活排水や工業廃水に由来し^{10,11)}、かつ高い保存性を有することから、河川水質に及ぼす点源負荷の影響の大きさを表す指標として用いることができる。図-3に塩化物イオン濃度の流量依存性を、図-4に塩化物イオン濃度と電導度の関係を示す（いずれも公共

図-2 水質の流量依存性

用水域水質調査結果より作成）。桂川と大和川では塩化物イオン濃度は低流量時に高い値を示し、平水時における点源負荷の影響が宇治川や木津川に比べて大きいと言える。塩化物イオン濃度の流量依存性は図-2に示したDINやPO₄-Pと類似していることから、平水時の桂川と大和川におけるDINとPO₄-Pは主に点源負荷に由来していると推察できる。また、図-4に示すように、塩化物イオン濃度と電導度はほぼ一意の関係にあることから、電導度も間接的に人為的負荷の影響を表す指標となっているものと考えられる。図-2に示した電導度の流量依存性に注目すると、いずれの河川においても流量の増加に伴い低下、収束しているが、その傾きや収束値は河川により異なり、流域の土地利用特性等に応じた流出特性の差異が現れている。なお、宇治川で高流量時においても電導度が高い値を示しているのは、供給される琵琶湖湖水の電導度が高いことに起因している。また、SiO₂-Siについても流量増加に伴い濃度が低下する傾向を示しているが、桂川では低流量域で低い値がみられる。その原因としては、河川自流量の低下に伴う低SiO₂-Si濃度の下水処

図-3 塩化物イオン濃度の流量依存性

図-4 塩化物イオン濃度と電導度の関係

理水の影響等が考えられるが、現時点ではその原因の特定には至っていない。

一方、図-2において懸濁態成分は平水時に低い濃度を示し、流量の増加に伴い急激に上昇する傾向がみられる。ただし、宇治川の水質は高流量時にも濃度変化が小さく、無機溶存態濃度が他河川に比べて低いこともあわせて考えると、上流に位置する琵琶湖やダムにおける貯留や流量制御の効果によって懸濁物質がトラップされていることが推察される¹²⁾。

(2) 懸濁態成分とSSの関係

懸濁態成分はSSに含有または吸着して存在しているため、両指標には各河川の水環境に応じた関係が存在すると思われる。観測結果から得られたSSと懸濁態成分の負荷量の関係を図-5に示す。若干のバラツキはみられるものの、いずれの河川においてもその関係は次の関数形で概ね近似することが可能であった。

$$L_{PM} = a \times L_{SS}^b \quad (1)$$

ここで、 L_{PM} ：懸濁態負荷量(g/sec)、 L_{SS} ：SS負荷量(g/sec)、 a 、 b ：係数である。表-1に式中の係数および相関係数の一覧を示す。一般に河川水中のPPは土砂粒子に吸着した形態で多く存在しており^{3),13)}、本結果においてもSSと極めて高い相関が得られた。一方で、PNやPOCは生物体を主な起源としており、その動態には物理過程に加え生物化学的過程が大きく関わるために相関が低下したと考えられる。また、宇治川ではいずれの項目においても他河川に比べて低い相関を示したが、琵琶湖やダムの貯留によってSSに質的な変化が生じているものと考えられる。

(3) 無機溶存態成分と電導度の関係

図-6に無機溶存態濃度と電導度の関係を示す。DINとPO₄-Pについては観測結果に加え、同観測地点における公共用水域水質調査結果もあわせて示している。DINとPO₄-Pに注目すると、桂川においてのみ電導度と高い相関がみられる。上記の通り、平水時の桂川におけるDINやPO₄-Pは点源負荷を主な起源としている。また、流域内に市街地を広く抱える桂川では、雨天時に沈着した雨水は排水溝等を通じて速やかに河道へ排出されるため、降雨に伴う面源流出水中の溶存イオン濃度は他河川に比べて相対的に低いと考えられる。これは、図-2に示した

図-5 懸濁態負荷量とSS負荷量の関係

図-6 無機溶存態濃度と電導度の関係

電導度と流量の関係において、桂川における高流量時の電導度が他の河川に比して低い値を示していることも一致する。すなわち、桂川における降雨時のDINと $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度変動には、電導度の高い生活排水や工業廃水と電導度の低い雨水との混合過程が支配的であり、その結果、濃度と電導度の間に高い相関が得られたものと考えられる。また、これらの関係はそれぞれ以下に示すような線形関係で近似が可能であった。

$$C_{\text{DIN}} = 0.134 \times EC - 0.293 \quad (R^2 = 0.84) \quad (2a)$$

$$C_{\text{PO}_4\text{-P}} = 0.00778 \times EC - 0.00829 \quad (R^2 = 0.71) \quad (2b)$$

ここで、 C_{DIN} ：DIN濃度(mg/L)、 $C_{\text{PO}_4\text{-P}}$ ： $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度(mg/L)、 EC ：電導度(mS/m)である。また、大和川においても、桂川と同様に河川水質に及ぼす点源負荷の影響が大きく、電導度の低下に伴いDIN、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度も低下する傾向がみられる。しかし、既往の調査研究¹⁴⁾により、大和川流

域では下水道普及率が低く、排水の多くが家庭の小型浄化槽で処理されているために、冬季には処理能力が低下し河川水質が悪化するというメカニズムが明らかにされている。今回の結果においても平水時濃度には強い水温依存性がみられ、大和川におけるDINや $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度変動は電導度のみから説明することはできなかった。一方で、木津川と宇治川ではDINおよび $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度と電導度に有意な相関はみられない。これは、両河川では平水時水質に対する点源負荷の影響が桂川や大和川に比べて小さいことに加え、宇治川の流出水は気象状況に依らず琵琶湖湖水が大半を占めるために濃度の流量依存性が低いこと、また農地や山地を多く抱える木津川では点源負荷だけでなく雨天時の面源負荷も河川のDIN、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度に対する大きな変動要因であること等が原因として考えられる。また、 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ については、いずれの河川においても電導度との間に明確な相関はみられず、自然循環系、人口循環系に依らず保存性を示すことが示唆された。

表-1 SS-懸濁態負荷量関係式の係数一覧と相関係数

水質項目	河川名	a	b	R^2
PN	桂川	2.99×10^{-2}	0.796	0.79
	宇治川	2.66×10^{-2}	0.823	0.59
	木津川	1.07×10^{-2}	0.867	0.89
	淀川	3.30×10^{-2}	0.813	0.78
	大和川	3.61×10^{-2}	0.822	0.99
PP	桂川	3.63×10^{-3}	0.958	0.94
	宇治川	9.73×10^{-4}	1.09	0.84
	木津川	1.05×10^{-3}	1.05	0.97
	淀川	4.02×10^{-3}	0.940	0.96
	大和川	6.70×10^{-3}	0.895	0.96
POC	桂川	2.06×10^{-2}	1.01	0.94
	宇治川	6.20×10^{-2}	0.913	0.78
	木津川	1.25×10^{-2}	1.04	0.95
	淀川	3.83×10^{-2}	0.941	0.86
	大和川	1.50×10^{-1}	0.707	0.83

5. テレメータ指標を用いた物質輸送量の推定

(1) 解析概要

淀川と上流三川では現地観測地点の付近に自動水質観測所が設置されており、濁度と電導度について毎時のテレメータ観測がなされている。ここでは、2010年5月22日から31日にかけて発生した出水イベントを対象に、前章において得られた式(1)とテレメータによる濁度観測データを利用して、出水時を含めた懸濁態負荷量の推定を試みる。同様に、溶存態成分についても、電導度との間に良好な相関が得られた桂川のDINと $\text{PO}_4\text{-P}$ に関して、テレメータ電導度と式(2)から負荷量の推定を行う。また、

図-7 流量の経時変化

解析対象期間に実施した一連の現地観測結果との比較から、テレメータ指標を利用した物質輸送量の推定精度について検証を行う。

テレメータでは濁度のモニタリングは行われているが、SS濃度は測定されていない。しかし、両指標はいずれも水中の濁りを表す指標であるため、河川ごとに固有の関係を有している。観測結果を基に両指標の関係を調べたところ、いずれの河川においても良好な相関 ($R^2 \geq 0.93$) が得られたため、今回はこの関係を用いて濁度からSS濃度の換算を行った。また、電導度や濁度は、検定方法の違いや測定機種特性により計測差が生じる可能性が考えられるため、各観測地点について、採水試料の現地測定値と採水時刻におけるテレメータ値との関係（後掲の図-10）を求め、測定値の補正を行った。

(2) 結果と考察

解析対象期間における流量の経時変化を図-7に示す。図中の丸印は採水時刻を示しており、各観測地点につき計13回の採水を行った。今回の出水では宇治川流域で降水量が多く、淀川本川の流量は最大約1,800m³/secに達した。なお、宇治川では瀬田川洗堰や天ヶ瀬ダムにおける放流水量の調節操作により、減水期に急激な流量変化が生じ、下流の淀川本川にもその影響が及んでいた。このように、淀川の流出特性は降雨パターンだけでなく、人為的な要因にも大きく影響されている。

懸濁態負荷量について、採水分析による実測値と推定値との比較を図-8に示す。宇治川と木津川においては、いずれの水質項目についても比較的良好な精度で負荷量を推定することが可能であった。一方、桂川ではPPについては同様に推定が可能であったものの、PNやPOCについては低流量域におけるSSとの相関の低下のため、実測値から大きく乖離する結果となった。また、淀川本川では上流三川に比べると概して推定精度は低い。これは、上流域の降雨パターンに応じて上流三川からの負荷量寄与が異なるためと考えられる。一方、図-9に示すように、桂川においてテレメータの電導度からDIN、PO₄-Pの負荷量を推定したところ、その誤差はそれぞれ約10%、約30%の範囲にとどまり、極めて高い精度で推定することが可能であった。

懸濁態成分とSSの負荷量について高い相関関係が得ら

図-8 実測値と推定値の比較（懸濁態成分）

図-9 実測値と推定値の比較（無機溶存態成分）

図-10 採水測定値とテレメータ観測値の比較

れたにも拘わらず、テレメータ濁度を用いた負荷量推定では精度が低下する場合がみられた。濁度と電導度について、採水試料の現地測定値と採水時刻におけるテレメータ観測値の比較を図-10に示す。いずれの関係についても相関係数は $R^2 \geq 0.84$ と高い値が得られたものの、濁度に注目すると木津川や淀川において大きなばらつきが生じていることがわかる。これは、採水調査は河川の流心で行っている一方で、テレメータ観測は河岸で取水しているため、採水地点の上流側における支川の合流や下水処理水の放流、または河道形状によって横断方向に水質変化している場合には、採水調査とテレメータ観測で不一致が生じるためと考えられる。今回の推定結果にはこうしたテレメータ機器の設置場所に起因する誤差も含まれており、テレメータ指標を用いた物質輸送量の推定精度は、自動水質観測データの河川横断面の水質代表性によっても大きく左右されることが示された。

6. おわりに

本研究では、淀川本川とその上流三川（桂川、宇治川、木津川）および大和川を対象に現地観測を実施し、各河川の水質特性とその変動要因について解析を行った。また、既設の水質テレメータ指標を利用した物質輸送量の推定を試み、その有用性について検証を行った。

本研究で得られた主たる結論は以下の通りである。

- (1) 出水時を含めた観測結果から、無機溶存態濃度は流量の増加に伴い低下するが、一方で懸濁態濃度は急激に上昇する傾向がみられた。また、電導度とSSはそれぞれ無機溶存態成分および懸濁態成分と同様の流量依存性を示した。
- (2) 桂川と大和川において、塩化物イオン濃度とDIN、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度はいずれも低流量時に高く、河川水中のDINと $\text{PO}_4\text{-P}$ は主に点源負荷に由来していると考えられた。
- (3) 桂川において、DIN、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度と電導度にはそれぞれ有意な線形関係が見出された。また、出水時を含めた桂川のDIN、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は、点源負荷と雨水の混合過程によって概ね決定されることが示唆された。
- (4) さらに、桂川について得られた関係を基に、テレメータ電導度からDINと $\text{PO}_4\text{-P}$ の負荷量を算定したところ、その推定誤差はそれぞれ約10%、約30%にとどまり、極めて良好な精度で推定が可能であった。
- (5) 懸濁態成分とSSの負荷量は概ね良好な相関を有し、得られた関係式を基にテレメータ濁度から懸濁態負荷量を算定したところ、いずれの河川においても比較的良好な精度で推定することが可能であった。ただし、桂川と淀川では相関の低下により、PN、POC負荷量の推定は困難であった。

(6) テレメータ指標を用いた物質負荷量の推定精度は、テレメータの設置場所の水質代表性にも大きく影響されることがわかった。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金（基盤研究(B) No.21360236）および財団法人大林都市研究振興財団により補助を受けて行われた。また、分析に際しては京都大学生態学研究センターの共同利用施設（安定同位体比質量分析計）を使用させていただいたとともに、淀川河川事務所並びに大和川河川事務所には水位データの提供等のご高配をいただいた。ここに、あわせて感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 大垣眞一郎 監修：河川と栄養塩類，技報堂出版，2005。
- 2) 坂井文子，二瓶泰雄 他：江戸川・荒川・玉川・中川における出水時栄養塩・COD負荷特性，水工学論文集，第52巻，pp.1117-1122，2008。
- 3) 田中勝久，豊川雅哉 他：土壌流出によるリン負荷の沿岸環境への影響，沿岸海洋研究，第40巻，pp.131-139，2003。
- 4) 西田修三，中谷祐介 他：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，第52巻，pp.1345-1350，2008。
- 5) 中谷祐介，西田修三：淀川・大和川における出水時負荷特性と陸域流入負荷の評価，水工学論文集，第54巻，pp.1615-1620，2010。
- 6) 西田修三，前田瑛美，今岡知武：淀川水系の出水特性と物質輸送の解析，河川技術論文集，第16巻，pp.317-322，2010。
- 7) 山本浩一，二村貴幸 他：濁度計による懸濁態栄養塩負荷推定に関する研究，河川技術論文集，第9巻，pp.515-520，2003。
- 8) 城戸由能，福田勝之，中北英一：自動水質計を用いた雨天時を含む河川水質濃度の推定と負荷量算定評価，水工学論文集，第54巻，pp.1387-1392，2010。
- 9) 和田英太郎 監修：流域環境学，京都大学学術出版会，2009。
- 10) 海老瀬潜一：桂・宇治・木津川と淀川本川の塩化物イオン収支の一考察，水環境学会誌，Vol.32，pp.441-449，2009。
- 11) 窪原拓馬，井伊博行 他：大和川流域における河川水の水質特性について，水工学論文集，第45巻，pp.985-990，2001。
- 12) Harashima, A. et al. : Verification of the Silica Deficiency Hypothesis Based on Biogeochemical Trends in the Aquatic Continuum of Lake Biwa – Yodo River – Seto Inland Sea, Japan, Ambio, Vol.35, pp.36-42, 2006。
- 13) 西田修三，中谷祐介：淀川河口域における河川懸濁物質のリン吸着特性，海岸工学論文集，第54巻，pp.1101-1105，2007。
- 14) 井伊博行，谷口正伸 他：大和川のBOD，アンモニア態窒素，陰イオン界面活性剤濃度の季節変動とその原因について，水工学論文集，第46巻，pp.235-240，2002。

(2010. 9. 30受付)