

淀川水系の出水特性と物質輸送の解析

RIVER FLOW AND MASS TRANSPORT OF YODO RIVER SYSTEM IN FLOOD CONDITIONS

西田修三¹・前田瑛美²・今岡知武³
Shuzo NISHIDA, Emi MAEDA and Tomotake IMAOKA

¹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)

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

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

During flood periods, rivers transport large amounts of water and nutrient loads, and have significant impacts on water quality and ecosystems in coastal seas. In order to clarify the runoff characteristics of Yodo, Uji, Katsura and Kizu rivers, field measurements were carried out under the flood condition caused by typhoon no.0918 in addition to ordinary conditions.

The river flows were calculated using the SiO_2 -Si concentrations, stable isotope ratios and conductivity readings of water samples along with H-Q formula. Mass transports were also estimated, and the results showed that Uji river has a major influence on Yodo river in the ordinary conditions, while Kizu River become a dominant river among the three upper rivers in the flood condition.

Key Words : Yodo River, flood, river flow, mass transport, nutrient load, typhoon

1. はじめに

出水時には水とともに栄養塩等の物質が多量に輸送され、下流部や河口沿岸域へのインパクトは極めて大きい^{1)~3)}。しかし、これまで出水時の観測はほとんど実施されてこなかった。本研究対象の淀川水系においても、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)~8)}がなされてきたが、出水時の流量および水質の観測データは極めて少なく^{9)~10)}、その特性は未だ明らかになっていない。

中谷ら¹⁰⁾は、出水時に淀川下流域において水質調査を実施し、流量と負荷量の関係は高流量域で大きく散乱することを見出した。その要因として、上流三川(桂川、宇治川、木津川)の流域特性が大きく異なることを指摘している。

筆者らは、淀川本川と上流三川の流出特性と栄養塩等の物質輸送の実態を明らかにするために、平水時とともに出水時の観測を実施してきた。本研究では、年最大流量を示した2009年10月の台風18号による出水時の観測データを中心に、淀川本川および上流三川の流量の算定と物質輸送特性の解析を行った。

2. 淀川流域の概要

淀川は、琵琶湖を水源とする宇治川が、桂川、木津川などの支川と合流して大阪湾へと注ぐ一級河川である(図-1)。流域は三重、滋賀、京都、大阪、兵庫、奈良の2府4県にまたがり、総流域面積は約8,240km²、幹線流路延長は約75kmである。

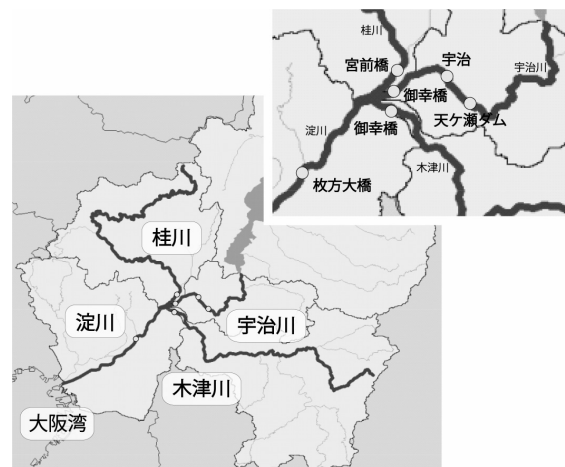


図-1 淀川水系と調査地点

桂川は、丹波高原を源として京都盆地を流れ、淀川に合流する。上流域には山地が多く、下流域では市街地が形成されている。そのため大量の下水処理水が流入し、平水時の水質は下水処理水の影響を顕著に受けている。宇治川は、琵琶湖からの唯一の流出河川である瀬田川が京都府宇治市において名を変えた河川で、中流部には天ヶ瀬ダムが存在し、流量・水質ともにその貯留の影響を受けている。木津川は、三重と奈良の県境に位置する布引山脈を源とし、宇治川に合流する。流域は三重県中北部、奈良県東部、京都府南東部の3県にまたがっており、山地・農地が多いのが特徴で、人為的な影響の少ない河川である。これら三河川が合流して淀川本川となる。淀川下流域には大阪市が位置し、人口が集中している。

三川の流域面積は、桂川1,100km²、宇治川506km²（琵琶湖とその集水域3,848km²を含まず）、木津川1,596km²、面積比はそれぞれ34%、16%、50%である。平水流量はそれぞれ約30m³/s、140m³/s、30m³/sを有し、淀川の年総流量8,452×10⁶m³（1955～2003年）に対してそれぞれ約17%、65%、18%を占め、宇治川の寄与率が最も高い。

淀川流域は広大なため、地域によって気候が異なり、気候特性から3つに分類することができる。琵琶湖流域の北部の山地は、梅雨期だけでなく冬季にも降水量が多く、年間を通して降水日数、降水量ともに多い日本海側気候である。木津川上流域は、梅雨期以外にも太平洋上で台風が発生する7月から10月にかけて降水量が多い太平洋側気候である。これ以外の琵琶湖南部から淀川中下流域にかけては、梅雨期以外は比較的降水量が少ない瀬戸内海式気候である。

3. 調査概要

(1) 調査概要および分析方法

淀川本川と上流三川の平水時と出水時の水質を把握するために、2009年4月から月1回の平水時調査および出水時の採水調査を実施している。ここでは、最も出水規模が大きく、かつ比較的密な時間間隔で採水を行った10月7日～11日の台風18号による出水イベントの調査およびその前後の平水時調査（9月16日、10月28日実施）の結果について述べる。

採水は10月7日から11日にかけて計7回行った。調査地点を図-1に示す。桂川では宮前橋（三川合流基点から上流約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）、合流後の淀川本川では枚方大橋（同下流約9km、淀川河口から約26km）で行った。橋上の流心において表層水を採水し、冷蔵して持ち帰った。

現地では温度、pH、電気伝導度、濁度を測定し、持ち帰った採水試料は、室内にて栄養塩（形態別N、P、Si）およびTOC、DOC、COD、SSの分析を行った。なお、

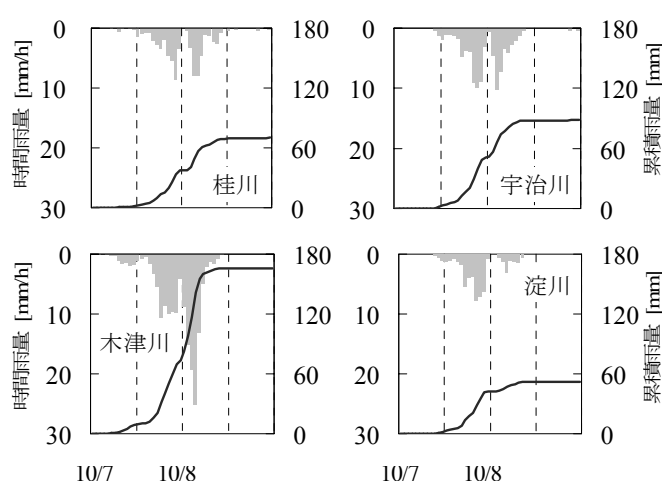


図-2 時間雨量と累積雨量の経時変化

N、P、Si、Cそれぞれの懸濁態成分PN、PP、PSi、POCは、全成分から溶存態成分を差し引くことで求めた。また、出水時（10月7日～11日）に採水した試料のみ、水素・酸素安定同位体比（ δD 、 $\delta^{18}O$ ）の分析と粒度分析もあわせて実施した。

(2) 2009年台風18号の概要

台風18号は、非常に強い勢力を保ったまま南西諸島から西日本に接近し上陸した後、本州を縦断する進路を取ったため、沖縄地方から北海道地方にかけての広い範囲で暴風雨となった。近畿地方では7日未明から雨が降り始め、8日の午前2時から4時頃に雨量のピークを迎え、午前11時頃に止んだ。近畿地方の一部では、6日から9日までの総雨量が300mmを超えた。特に集中した降雨があった7日から8日にかけての、各河川流域内の雨量観測点で計測された平均降雨量を図-2に示す。なお、淀川の雨量は合流後の中流・下流域の降雨量の平均を表している。台風が紀伊半島の南から北東に進路を取り、木津川上流域に多量の降雨をもたらしたため、他の河川流域に比して2～3倍の降雨量を示している。

4. 調査結果

(1) 流量算定

出水時の流出特性や物質輸送量を明らかにするためには、まず正確な流量の把握が必要となる。各河川的主要地点においては、年度毎に作成されたH-Q式を基に水位の連続観測データから流量の算定が行われている。本研究において観測を実施した4地点においても、納所（宮前橋：桂川）、淀（御幸橋上流1.7km：宇治川）、八幡（御幸橋上流1.0km：木津川）、枚方（枚方大橋：淀川）の各観測所で流量観測がなされている。しかし、高流量時の観測データが少なく観測精度も低いため、高流量域においてはH-Q関係に大きな誤差が生じる。比較的高流量域

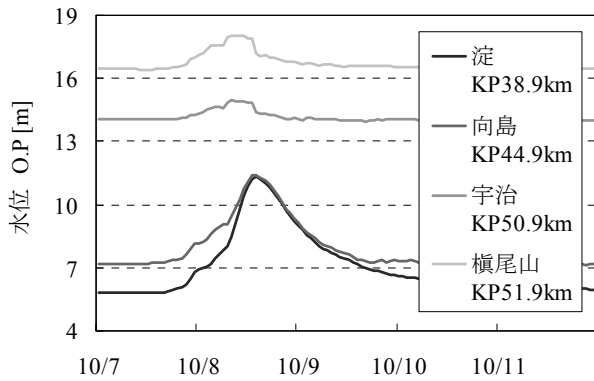


図-3 宇治川の水位変化

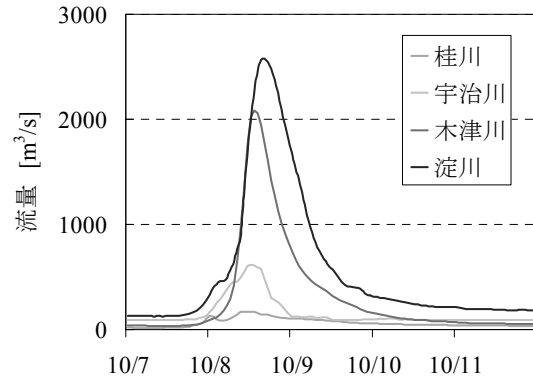


図-4 流量の経時変化

のデータが採取されている枚方観測所以外は、年度毎に作成されたH-Q式も大きく異なり、大規模出水時の適用には注意を要する。また、河床勾配の小さい宇治川や桂川の下流域においては、図-3に示すように出水時には三川合流部の水位上昇の影響が観測所の上流にまで及び、H-Q式を用いた流量算定は行えない。

そこで、台風18号による出水時の流量推算のために、以下の方法により各河川の流量の算定を行った。

①高流量域まで適用可能なH-Q式が求められている枚方観測所については、そのままH-Q式を用いて流量を算定する。ただし、低流量時はより精度の高い高浜観測所のH-Q式を用いる。

②保存性の高い、 δD 、 $\delta^{18}O$ 、電気伝導度、Si、TDN、水温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、H-Q式より算定された枚方地点の流量を乗じて各河川の流量を推定する。

③得られた流量を用いて、納所（桂川）と八幡（木津川）におけるH-Q式を補正し、水位データより毎時流量を求める。ただし、桂川については背水の影響が現れる時間帯は上流の桂観測所の流量データに集水面積比を乗じた流量で補正を行う。

④淀（宇治川）については背水の影響が及ばない宇治観測所の流量データと②で算定された流量の関係を用いて、淀の毎時流量を推定する。

以上の方法により算定された流量の経時変化を図-4に示す。最大流量は、桂川200m³/s、宇治川600m³/s、木津川2,100m³/s、淀川2,600m³/sであった。三川では木津川のピーク流量が最も多く、出水期間（10月7日～11日）における三川の総流出量の約60%を占めていた。

(2) 水質特性

図-5に出水時の水位と水質の経時変化を示す。出水に伴う濃度変化は、水位（流量）とともに増減を示す場合、水位（流量）の増加に伴い希釈効果により減少する場合、そして、水位（流量）変化に依存せず大きな変化を生じない場合の3ケースに分類できる。

SSは流量の増減にあわせて大きく増減している。TP、

PPもSSの変化と同様の傾向を有し、リンの吸着特性から特にPPはSSとの相関が顕著に見られる。PNもSSの変動とともに変化しているが、リンほど顕著ではない。POCもPNと同様の傾向を示していた。しかし、N、P、Cいずれも平水時と比べ出水時の方が懸濁態成分の寄与率が高くなっていた。

Siは木津川と他の河川では変動特性が異なっている。自然河川の特性を有する木津川では流量の増減に対応してSi濃度も増減し、希釈効果が顕著に現れているが、桂川では出水ピーク後に多少の濃度上昇は見られるものの、希釈効果は顕著には見られない。また、宇治川ではSi濃度が他河川に比して極めて低い。これは琵琶湖やダムにおいてSiがトラップされるためと考えられる。

桂川のTDNは出水初期段階に濃度低下を示すが、その後は、多量の河川水の流下により下水処理場等からの流入負荷が希釈されるため濃度はほぼ一定値を示し、流量の依存性はほとんど見られない。なお、テレメータの連続モニタリングデータを解析した結果、降雨初期にはファーストフラッシュによると思われるNH₄-Nの一時的な急増も見られた。

流量変化に対する溶存態の濃度変化はNH₄-Nのみが大きく、それ以外は緩やかな変化を示し、懸濁態成分ほどの大きな濃度変化は見られない。溶存態の濃度に関しては、桂川の濃度が高く、宇治川が低い傾向を示している。また、宇治川では上流の琵琶湖とダムの貯留効果により、懸濁態、溶存態ともに流量変化に伴う濃度変化は他の河川に比して小さかった。

流量と濃度の関係を図-6に示す。河川の水質に関して増水期と減水期で、流量と濃度の関係が一意で表現されないループ形状が現れることが知られている。今回の分析においては、PN、PPに関してその傾向が顕著に現れていた。

SSに関しては、木津川では流量の増加に伴いSS濃度が大きく上昇し、最大濃度は800mg/Lを示した。流量比率の大きい木津川の影響を受けて淀川においてもSS濃度が大きく上昇していた。桂川、宇治川においても流量増加に伴いSS濃度は上昇したが、木津川ほど高濃度は示さ

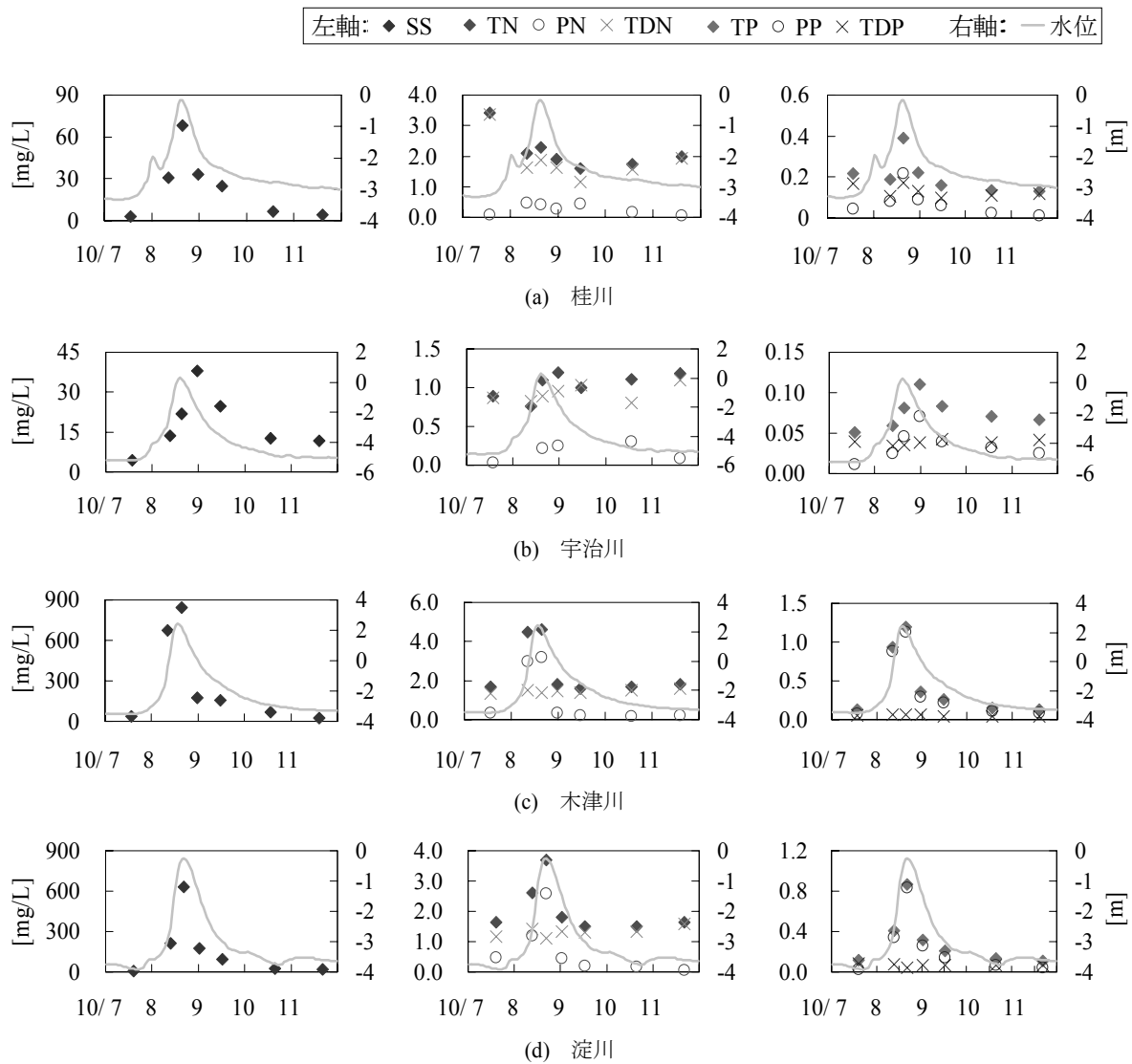


図-5 水位の経時変化と調査時の水質

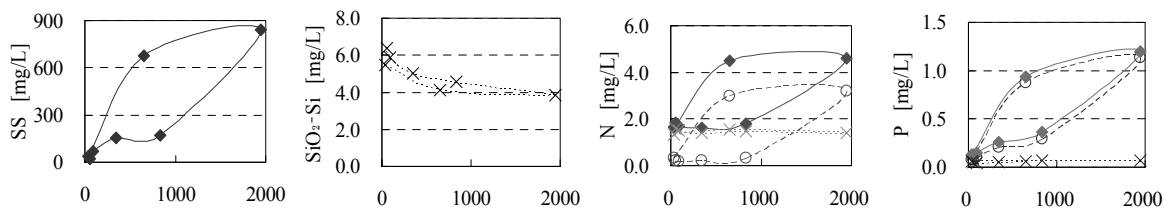


図-6 木津川の流量と濃度の関係(C-Q関係)

なかった。また、同程度の流量における三川のSS濃度を比較したところ、木津川の濃度が常に高く、桂川、宇治川と比べて木津川流域は土砂が流出しやすく、粒径も $100\mu\text{m}$ 以上にまで広く分布していることがわかった。

5. 物質輸送特性

(1) 負荷特性

淀川に対する上流三川の流量比率は、出水時の降雨パターンにより変化する。L-Q関係が三川ごとに異なることに加え、三川の流量比率も出水ごとに変化するため、三川が合流した淀川におけるL-Q関係は一意ではなくなる。その結果、淀川の負荷量を淀川本川での調査データのみによって作成されたL-Q関係式から算定すると大きな誤差が生じると考えられる¹⁰⁾。よって、出水時の淀川

の負荷量をより正確に求めるには、上流三川の流量状況と負荷特性の個別な把握が必要である。

各地点における物質輸送特性を把握するために、流量と負荷量の関係 (L-Q式) を求めた (図-7)。宇治川の流量に対する負荷量の増加は、桂川、木津川と比べて低く、出水時に宇治川の影響が小さくなることがわかる。溶存態では $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TDPのL-Q関係が各河川で大きく異なっている。TDPに関しては、桂川の最大流量は木津川に比して極めて少なかったが、高流量時にも濃度が高かったため、流量に対して大きな負荷量を示している。宇治川は桂川の3倍程度の最大流量を有していたが、濃度が低かったために、負荷量は桂川と同程度の値を示していた。

(2) 物質輸送量の算定

図-8に各観測時の流量と負荷量を、また、表-1に出水期間(10月7日～11日)の総負荷量を示す。出水時には木津川の流量、負荷量が支配的となることがわかる。

TDPに関しては濃度変化が小さいため、概ね流量に比例した負荷量を示し、河川による大きな差異は見られない。TDNについては、桂川と宇治川の負荷量は木津川の20～30%程度を示し、ほぼ流量割合に近い寄与率であった。TDPについてはL-Q関係に見られるように、桂川の負荷量が流量に対して大きな増加傾向を有するため、流量は木津川の20～30%程度であったが、負荷量は木津川の約40%を示した。

一方、SS、PN、PP、POC、および懸濁態の影響が大きいTPに関しては、桂川と宇治川の負荷量は、木津川の負荷量の数%にとどまり、台風18号による出水では、淀川本川の懸濁物質の負荷量の80%以上が木津川によって供給されたことがわかる。

一般に近畿地方を通過する台風は、淀川水系においては木津川の上流域に大きな降水をもたらす場合が多く、今回のように木津川の負荷量が桂川、宇治川と比べて非常に大きくなり、淀川の流量・負荷量に対して木津川が支配的になる傾向があると考えられる。

表-2に平水時の負荷量を示す。平水時の負荷量は、9月16日と10月28日の平水調査の結果を基に算出し、それらの平均値を10月の平水時の負荷量とした。

平水時は宇治川の流量、負荷量ともに最も多く、桂川と木津川の流量は同程度であるが、負荷量は桂川の方が多く、木津川の負荷量が最も少ない。

木津川は台風18号による出水では最大の負荷量を供給していたが、平水時には最も負荷量が少なく、平水時に最も負荷量が多かった宇治川では、出水時の負荷量供給は少なかった。このように、出水時と平水時では下流の淀川に対する負荷特性が大きく異なることがわかる。

木津川は平水時に流量、負荷量ともに少ないため、この出水によって大きな負荷量の増加を示したSSに関しては、わずか5日間の出水で平水時の約2500日分の負荷量を供給したことになる。同様に桂川では約100日分の負

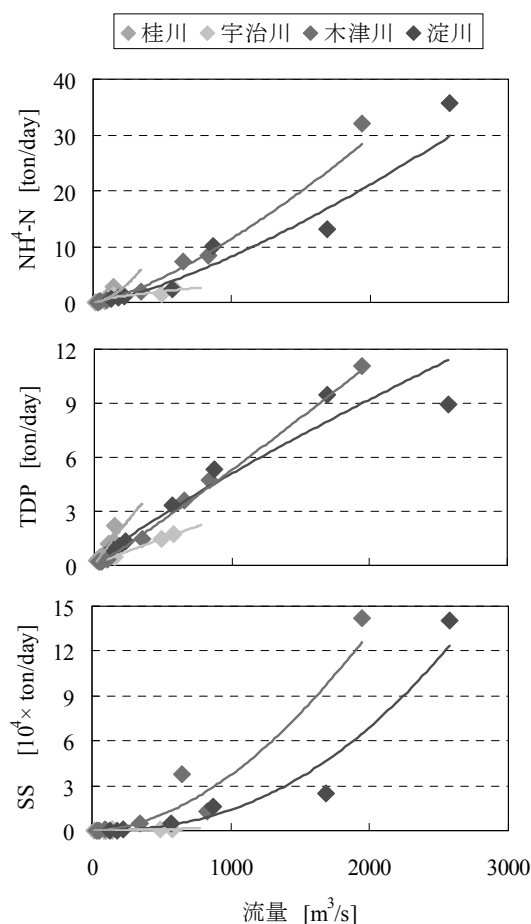


図-7 流量と負荷量の関係 (L-Q関係)

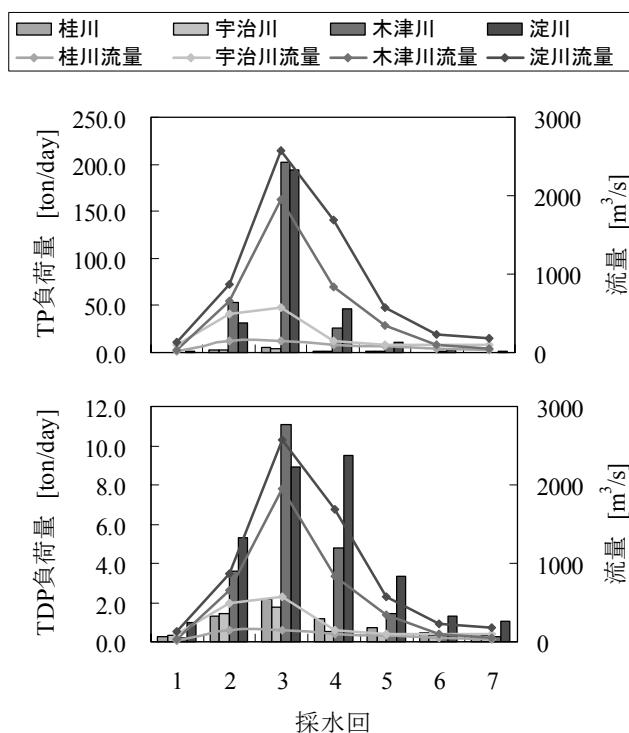


図-8 調査時の流量と負荷量

表-1 出水時 (10/7~10/11) の総負荷量

	流量	SS	NH ₄ -N	TN	TDN	PN	TP	TDP	PP	TOC	DOC	POC	SiO ₂ -Si
	[ton]	[ton]	[ton]	[ton]	[ton]	[ton]	[ton]	[ton]	[ton]	[ton]	[ton]	[ton]	[ton]
桂川	2.78×10^7	691	1.99	56.9	48.2	7.93	5.60	3.51	1.92	72.0	56.4	25.3	124
宇治川	6.68×10^7	1,090	4.19	68.2	60.7	10.5	4.87	2.54	2.20	181	155	36.8	155
木津川	1.37×10^8	59,600	17.0	420	199	173	87.9	8.18	91.4	1,880	393	1,500	610
淀川	2.43×10^8	63,300	23.8	544	315	176	96.0	14.7	117	2,510	806	1,440	914

表-2 平水時の負荷量

	流量	SS	NH ₄ -N	TN	TDN	PN	TP	TDP	PP	TOC	DOC	POC	SiO ₂ -Si
	[ton/day]	[ton/day]	[ton/day]	[ton/day]	[ton/day]	[ton/day]	[ton/day]	[ton/day]	[ton/day]	[ton/day]	[ton/day]	[ton/day]	[ton/day]
桂川	1.14×10^6	6.81	0.0545	3.54	3.43	0.264	0.189	0.170	0.0193	2.65	2.64	0.346	4.37
宇治川	7.62×10^6	48.9	0.313	7.62	6.20	1.40	0.392	0.149	0.243	18.6	16.6	2.05	12.2
木津川	1.15×10^6	23.2	0.0130	2.08	1.91	0.217	0.0828	0.0596	0.0232	3.06	2.59	0.623	7.50
淀川	9.57×10^6	42.5	0.480	16.9	16.9	0.808	1.01	0.902	0.109	22.1	21.4	1.58	25.7

荷量が供給された計算になる。一方、宇治川は平水時の流量と負荷量が多く、また、出水時の流量増加が小さいため、平水時に対して出水時の負荷量が、桂川や木津川のように高い比率とはならなかった。

三川の負荷量と合流後の淀川の負荷量を比較すると、TDNやTDP等の溶存態成分についてはほぼ収支が取れているが、SSやPN、PP等の懸濁態成分については収支が取れず、保存性を有していないことがわかる。この原因として、沈降・巻き上げ等の物理過程や吸脱着等の化学過程が関わっていることが推察される。

6. おわりに

本研究で得られた主要な結果は以下のとおりである。

- (1) 既往のH-Q式を用いた流量の算定において、河床勾配の小さい宇治川や桂川の下流域においては合流部水位の影響を受けて大きな誤差が生じた。
- (2) 良好な保存性を示した溶存態シリカ、安定同位体比、電気伝導度等を用いて出水時の流量比率の推定が可能であり、負荷量算定に有用であった。
- (3) 上流三川の水質と合流後の水質の収支を解析した結果、溶存態物質については比較的保存性を有していたが、懸濁態物質については沈降・巻き上げ等の物理過程や、吸脱着等の化学過程等により収支が取れないものが多かった。
- (4) 平水時は宇治川の水質が淀川本川の水質に支配的であったが、台風18号による出水時には木津川の水質が支配的であった。
- (5) 台風18号の出水期間における、淀川本川への木津川の流量寄与率は約60%であったが、懸濁態物質(TN、TP、SS等)の輸送量は全量の80%以上を占めていた。出水時の淀川の負荷量の把握には、木津川の流出特性の把握が極めて重要であることがわかった。

謝辞：本研究を進めるにあたり、淀川河川事務所には水位データのご提供等のご高配を頂いた。また、安定同位体分析には京都大学生態学研究センターの共同利用施設を使用させていただいた。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，北村智顕，松田治：瀬戸内海に対する河川流入による淡水，全窒素および全リンの負荷，生物生産学研究，35(2)，pp.81-104，1996.
- 2) 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.
- 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) 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.
- 9) 三島康史，星加章，谷本照巳，Shettapong MEKSUMPUN：淀川河川水の水質組成とその大阪湾への流入負荷量，中国工業技術研究所報告，No.52，pp.1-9，1999.
- 10) 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，Vol.53，pp.1615-1620，2010.

(2010. 4. 8受付)