

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

EVALUATION OF INFLOW LOADS IN THE YODO RIVER AND THE YAMATO RIVER UNDER FLOOD FLOW CONDITION

中谷祐介¹・西田修三²

Yusuke NAKATANI 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)

In heavy rainfall events, the inflow loads from rivers increase extremely because the fresh water, SS, and the nutrients are supplied in a short time, and thus make an impact on the coastal environment. In this study, we conducted the observations and analyses of the floodwater in the Yodo River and the Yamato River, and clarified the load characteristics under flood flow condition on Osaka Bay.

Based on the observation results, the relationships between loading amount and flow rate were formulated for each water quality. The estimated inflow loads of TN and TP were 10,700ton/year and 936ton/year from these two rivers in 2007, respectively. Moreover, the annual inflow loads of particulate matter varied enormously according to not only annual flow but also rainfall pattern.

Key Words : Osaka bay, Inflow load, L-Q relation, Flood event, Nutrient, Suspended sediment

1. はじめに

我が国の閉鎖性内湾では、長年にわたって総量規制等による負荷削減施策が推進されてきた結果、陸域からの汚濁負荷流入量は確実に減少してきた。しかしながら、大阪湾では湾奥部を中心に栄養塩レベルが依然として高く、赤潮や貧酸素化などの水質汚濁現象が今なお発生している。

閉鎖性内湾の物質循環を議論する際、陸域負荷は最も重要かつ基礎的な指標であり、その見積もりには従来原単位法が用いられてきた。しかし、この方法で得られる一次データは発生負荷量であり、海域への流達率を求める際に様々な不確定要素が含まれる。また、この方法では栄養塩類の形態別の算定も行われていない。その他の陸域負荷の算定方法としては、流入河川の平水時水質に流入流量を乗じることによって負荷量を求める方法がある(例えば、山本ら¹⁾)。しかし、この方法による算定結果には降雨出水の影響が反映されていない。出水時には多量の淡水、栄養塩類および土砂が沿岸域へ集中的に負荷され、長期的短期的に閉鎖性内湾の水・物質循環に大きなインパクトを及ぼしている。しかしながら、発生頻度の低い出水時には河川の代表水質を表していないと

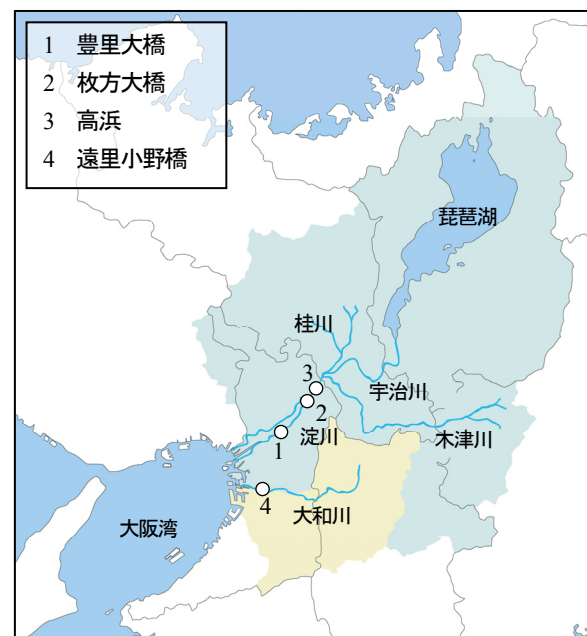


図-1 対象流域・河川と調査地点

の認識から、関係機関による水質調査は出水時を避けて行われることが多い。その結果、主要河川においても出水時水質データが不足しているのが現状である。近年は

出水時負荷の重要性についての認識が高まり、例えば坂井ら²⁾は東京湾流入河川において出水時調査を実施し、出水時の負荷量評価に平常時の水質をそのまま用いた場合、最大30%の差異が生じることを示している。また、大阪湾流入河川においても出水時の水質調査例はあるものの³⁾、データが少なく、流入負荷の実態は未だ明らかにされていない。

このような背景を踏まえ、本研究では、大阪湾主要流入河川である淀川と大和川を対象に、出水時において現地水質調査を実施し、その流入負荷特性を明らかにする。さらに、その結果を基に流入負荷の定量化を行い、既往の結果との比較・検討を含め、出水時負荷の重要性について評価を行う。

2. 淀川および大和川の概要

本研究における対象領域の概要を図-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へと名称を変える）に加えて、桂川と木津川の三川が合流してなる河川であり、大阪平野を流下した後に神崎川と大川に分流して大阪湾へ流入する。淀川・琵琶湖流域は約8,240km²の面積を有し、滋賀・京都・大阪といった都市域を流域内に抱えている。そのため、その水・物質循環には地形・地質といった自然要因の他に、上下水道やダム、導水といった人為的な因子が大きく関わっている。

一方、大和川は初瀬川を源流に、奈良盆地と大阪平野を含む約1,070km²の流域を流れ、大阪湾へ注ぐ一級河川である。その水質は主に生活排水の影響を強く受け、近年の様々な環境施策により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. 淀川・大和川における流入負荷特性

(1) 調査の概要

出水時を含めた流入負荷特性を明らかにするため、月1回の定期平水時調査と、降雨増水の度に随時出水時調査を実施した。調査は淀川では2007年5月から、大和川では2009年3月から実施し現在まで継続しているが、ここでは2009年8月までの調査結果について解析を行う。淀川では豊里大橋（河口上流14.0km）、大和川では遠里小野橋（河口上流4.2km）において観測を行った（図-1）。2009年8月までに淀川と大和川でそれぞれ46サンプル、17サンプルの試料を採水した。採水時の河川流量は、淀川では109～2,730m³/sec、大和川では14～632m³/secの範囲にあった。

観測点の流心において採水を行った後、水温、pH、電導度を測定し、冷暗条件下で河川水試料を実験室へ持

ち帰り水質分析を行った。分析項目はSS、NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N、DIN、DON、TDN、PN、TN、PO₄-P、DOP、TDP、PP、TP、SiO₂-Siである。また、大和川ではTOC、DOC、POCの分析も行った。ただし、PN、PP、POCについては全濃度と全溶存態濃度の差より、DON、DOPについては全溶存態濃度と溶存無機態濃度の差より算定した。これらの分析にはAuto analyzer AACSV（BLTEC社製）およびTOC-V（島津製作所製）を使用した。

(2) L-Q関係の構築

調査結果を基に、低流量域から高流量域までに対応した式(1)のL-Q（負荷量－流量）関係式を構築し、淀川と大和川の出水時負荷特性をそれぞれ明らかにする。

$$L = a \times Q^b \quad (1)$$

ここで、 L ：物質負荷量[ton/day]、 Q ：流量[m³/sec]、 a 、 b ：係数である。L-Q式を構築するためには、採水時の流量値が必要となる。遠里小野橋については河川事務所により測定されている水位モニタリングデータ（暫定値を含む）より、H-Q（水位－流量）式を適用することで流量を求めた。一方、豊里大橋では水位データおよびH-Q式がないため、上流の枚方大橋（河口上流25.9km）における流量を上流端境界条件に、Dynamic wave modelを用いた簡易的な河道部流出解析により、豊里地点における流量を推定した。ただし、枚方は流砂による河床変動や背水の影響を受けやすいため⁴⁾、平水時には高浜地点（河口上流32.9km）の流量を枚方流量に換えて用い、高水時には実際の枚方流量をそのまま与えた。ここで、枚方および高浜における流量は、遠里小野橋と同様に、水

表-1 L-Q式の係数と相関係数

		淀川	大和川			淀川	大和川
TN	a	0.208	0.456	NH ₄ -N	a	1.91×10^{-2}	3.88×10^{-2}
	b	0.884	0.890		b	0.800	0.728
	R ²	0.925	0.943		R ²	0.551	0.764
TP	a	4.38×10^{-3}	1.28×10^{-2}	NO ₂ -N	a	1.88×10^{-2}	1.35×10^{-2}
	b	1.09	1.30		b	0.528	0.719
	R ²	0.873	0.985		R ²	0.518	0.787
TOC	a	—	0.222	NO ₃ -N	a	0.202	0.482
	b	—	1.11		b	0.819	0.695
	R ²	—	0.969		R ²	0.925	0.938
TDN	a	0.292	0.668	DIN	a	0.190	0.550
	b	0.817	0.729		b	0.845	0.696
	R ²	0.933	0.941		R ²	0.896	0.961
TDP	a	1.66×10^{-2}	4.62×10^{-2}	PO ₄ -P	a	2.63×10^{-2}	4.46×10^{-2}
	b	0.805	0.846		b	0.693	0.825
	R ²	0.814	0.975		R ²	0.694	0.964
PN	a	3.29×10^{-4}	1.01×10^{-2}	DON	a	7.74×10^{-2}	9.16×10^{-2}
	b	1.47	1.40		b	0.774	0.849
	R ²	0.669	0.866		R ²	0.595	0.675
PP	a	2.25×10^{-5}	8.43×10^{-5}	DOP	a	2.24×10^{-4}	1.39×10^{-3}
	b	1.69	2.12		b	1.21	1.11
	R ²	0.735	0.962		R ²	0.739	0.764
POC	a	—	1.14×10^{-2}	DOC	a	—	0.257
	b	—	1.36		b	—	1.02
	R ²	—	0.668		R ²	—	0.985
SS	a	2.96×10^{-3}	6.34×10^{-2}	SiO ₂ -Si	a	0.595	1.24
	b	1.97	2.02		b	0.880	0.796
	R ²	0.874	0.970		R ²	0.904	0.941

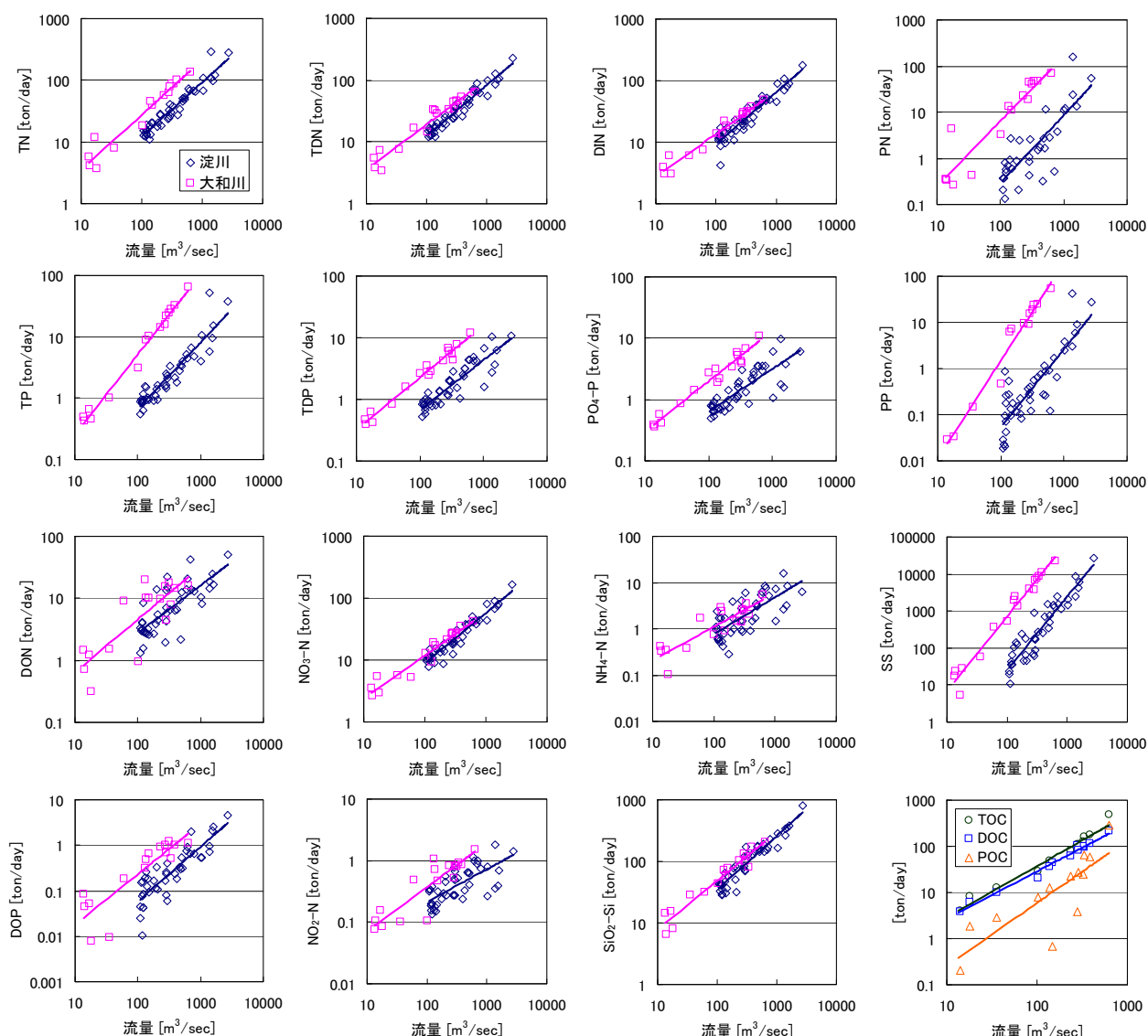


図-2 高流量域を含めたL-Q曲線 (TOC, DOC, POCについては大和川のデータのみを示している)

位のモニタリングデータとH-Q式から推定した。

(3) 高流量域を含めたL-Q関係

構築したL-Q式の係数一覧を表-1に、L-Q曲線を図-2に示す。ここで、係数 b は流量変化に対する水質濃度の増減特性を表している。淀川と大和川に共通して、SS, PN, PP, POCといった懸濁成分およびDOP, TP, TOCは流量の増加に伴い濃度が上昇し ($b > 1$)、一方、溶存成分のうち $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, DIN, DON, TDN, $\text{PO}_4\text{-P}$, TDP, $\text{SiO}_2\text{-Si}$ およびTNについては逆に流量増加に伴い希釈効果 ($b < 1$) が生じる傾向がみられた。また、大和川のDOCについては流量に対する濃度変化が小さく、流量とほぼ比例関係にあった ($b \approx 1$)。

水質項目によってはL-Q式の相関が低く、淀川では $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, DON, PN, $\text{PO}_4\text{-P}$ 、大和川ではDON, POCにおいて $R^2 < 0.7$ となっている。これらの原因には平水時水質の季節変動や、増水期と減水期に濃度が異なるヒステリシス効果²⁾が考えられる。ヒステリシス特性は河川や水質項目によって異なり、さらに降雨の履歴や

規模・分布の影響を受けるため、出水イベントごとにも違った特性を示すと考えられる。その特性を解析するためには、今後さらにデータを蓄積し、詳細に検討する必要がある。

また、大和川に比べ淀川では高流量域でのばらつきが比較的大きい。淀川は流域面積が広く、琵琶湖を水源とする宇治川の他に、桂川、木津川をはじめとした上流支川を複数有している。そのため、流域内の降雨分布に応じて、小流域の流出特性が下流域の水質に大きな影響を及ぼしていることが推察される。さらに、淀川のように上流に複数の下水処理場やダムを抱える大河川では、自然循環系に加え、処理水の放流やダムにおける水位操作などの人為的要因の影響が自然系要因に比べて無視できない⁵⁾。下流域における水質変動についてより高精度な予測を可能とするためには、流域全体に注目し、自然系要因および人工系要因を統合した物質循環の解明が不可欠と考えられる。

4. 実測結果に基づく流入負荷の算定

(1) 算定方法

降雨出水の影響を含めた流入負荷の実態を明らかにするために、構築したL-Q関係（表-1）を基に、淀川および大和川からの負荷量を算定する。一例として2007年を対象に算定するが、淀川については年変動を捉えるため、2003年から2008年の6年間について算定する。豊里大橋および遠里小野橋における断面通過量を大阪湾への流入負荷として扱い、算定に用いる流量値は3. (2) と同様の方法によって推定する。

(2) 結果・考察

a) 2007年における流入負荷量

2007年における年間負荷量の算定結果を表-2に示す。流量比では大和川は淀川の1割程度にすぎないが、SSについては淀川からの負荷量を上回る量が大阪湾へ供給されており、それに応じてPNでは約1.3倍、PPでは約2.2倍の負荷が生じている。また、淀川および大和川から大阪湾に負荷されるDIN : PO₄-P : SiO₂-Si (mol比) は、36 : 1 : 69、および、18 : 1 : 28であり、Redfield比に比べていずれも相対的にリンの負荷割合が小さい。これらより、河口域では植物プランクトンの増殖に対しリンが制限栄養塩であると考えられる。

原単位法を用いて算定された大阪湾への陸域流入負荷量はTN、TPでそれぞれ107ton/day、7.0ton/dayとされている⁹⁾。これらの値に対し、2007年における淀川と大和

川からの合計流入負荷量はTN、TPについてそれぞれ27%、37%に相当する。今後、淀川と大和川の他に、神崎川や大阪市内河川などからの河川流入負荷に加え、沿岸に立地する事業所からの直接負荷や、河口沿岸に位置する下水処理場からの放流負荷を考慮し、大阪湾への陸域負荷量の算定を行う予定である。

b) 既往の算定式との比較

三島ら³⁾は1995年から1996年の淀川大堰上流側（河口上流10km）における観測データを基に、出水時観測結果も含めて構築したL-Q式を提示している。2007年の流量を対象に、三島らのL-Q式を用いて算定した結果との比較を表-3に示す。三島らのL-Q式を用いた場合に比べて、本研究で構築したL-Q式ではTN、TPについてそれぞれ約4割、約3割小さく見積もられ、大きな差異が生じた。その原因については観測年や観測地点の違いに加え、前述したように流域内における降雨の分布やヒステリシス効果、人為的要因の影響などが考えられるが、今回の結果から各要因の影響を定量的に評価することは難しく、今後の検討課題と考える。

c) 平水時水質のみを用いた場合との比較

出水に伴う水質変化の影響を捉えるため、出水時にL-Q式を適用せず、平水時の水質データを用いて年間負荷量を算定し、比較を行った。平水時水質には月1回の頻度で測定されている公共用水域水質調査データを用い、水質濃度を調査日間において線形補間して与えた。

2007年を対象にTN、TP、DIN、PO₄-Pについて、L-Q式を用いた算定結果に対する、平水時水質のみを用いた場合の算定値の相対差を図-3に示す。淀川ではいずれの水質項目においても、平水時水質のみを用いて算定した場合の方が大きく見積もられた。ただし、その差異は最

表-2 年間負荷量の算定結果（2007年）

	淀川 [ton/year]	大和川 [ton/year]	合計 [ton/year]
Fresh water	6.35×10^9	7.76×10^8	7.13×10^9
SS	93,900	96,100	190,000
NH ₄ -N	459	131	590
NO ₂ -N	105	44	149
NO ₃ -N	5,390	1,460	6,850
DIN	5,850	1,660	7,510
DON	1,610	471	2,080
TDN	7,740	2,260	10,000
PN	403	504	907
TN	7,930	2,720	10,700
PO ₄ -P	355	210	565
DOP	54	19	73
TDP	411	235	646
PP	109	236	345
TP	534	402	936
SiO ₂ -Si	22,300	5,270	27,600
TOC	—	3,120	—
DOC	—	2,530	—
POC	—	463	—

表-3 既往の算定式との比較

	TN	TDN	TP	TDP
(A) 本研究で構築したL-Q式 [ton/year]	7,930	7,740	534	411
(B) 三島らによるL-Q式 [ton/year]	13,700	12,800	736	483
(A)/(B) [%]	58	60	73	85

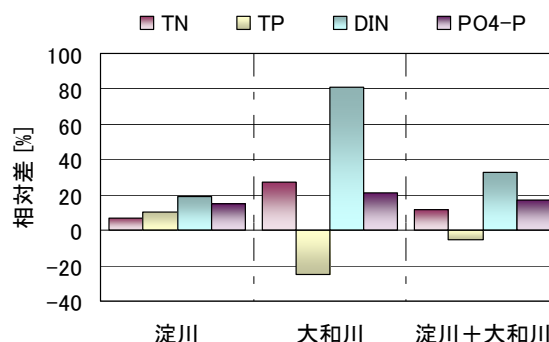


図-3 平水時水質を用いた場合の年間負荷量の相対差

大でも20%以下と比較的小さい。一方、大和川に注目すると、平水時水質のみを用いた場合では、L-Q式を適用した場合に比べてTN、DIN、PO₄-Pでは過大評価となった。特に、DINでは約1.8倍もの算定差が生じ、その差異は極めて大きい。これは、生活排水の影響を強く受ける大和川の水質は溶存態濃度が高く、出水時には雨水の流入により濃度が大幅に希釈されるためと考えられる。一方、TPでは過小評価となり、出水時の土砂流出に伴うPPの濃度上昇を反映した結果が得られた。このように、出水時負荷の算定にあたり平水時水質を適用した場合には、流量増加に伴う濃度変化を無視してしまうために、算定結果に多大な差異が生じることが示された。

d) 淀川における流入負荷量の年変動

流量の変動パターンによる差異を比較するため、2003年から2008年の淀川を対象に年間負荷量の算定を行った。また、年間負荷量に占める出水時負荷の寄与を調べるために、平水流量（185日流量）を閾値として、平水時負荷と出水時負荷を区別して算定した。各年の流量状況と平水流量を図-4に、流入負荷量の年変動を図-5に示す。

いずれの水質項目においても年間負荷量に占める出水時負荷の寄与は6割以上と大きい。また、平水時負荷は年変動が小さいのに対し、出水時負荷は年ごとの流量状況によって大きな変動を示した。原単位法による見積もりにはその年の降雨状況が反映されないため、このような年変動を捉えることができないが、得られたL-Q式を用いて算定された流入負荷量は流量に依存した年変動を有しており、6年間の平均値に対してTN、TPのそれぞれについて-14%から+21%、-20%から+27%とその変動幅は大きいことがわかる。生活系および産業系の発生負荷が気象によらず一定であると考え、この年変動は降雨に伴う面源流出および合流式下水道からの越流に起因するものと推察される。総負荷量に対するその変動規模は大きく、このことより原単位から見積もられた面源負荷量には大きな誤差が伴うことが示唆された。

一方、2005年、2007年、2008年に注目すると、年間総流入流量はほぼ等しいにも拘わらず、SSやPPの負荷量には大きな差異が生じている。これは、2007年は2005年や2008年に比べて短期間に集中的な大規模出水が生じ、流量の増加に伴い濃度が急増する懸濁物質の出水時負荷特性（ $b>1$ ）が顕著に現れたためである。例えば、河川から負荷された懸濁態リンは河口沿岸域においてPO₄-Pとして脱着・溶存することにより、周囲水のリン濃度の変動に無視できない影響を及ぼしている^{7)~9)}。そのため、河川からのPP供給は沿岸域の栄養塩動態や生物生産に多大な影響を及ぼしており、その供給量を精確に把握してはじめて、内湾沿岸域における栄養塩循環の実態解明が可能となる。この観点からも、出水時負荷量の精確な見積もりが重要であるといえる。

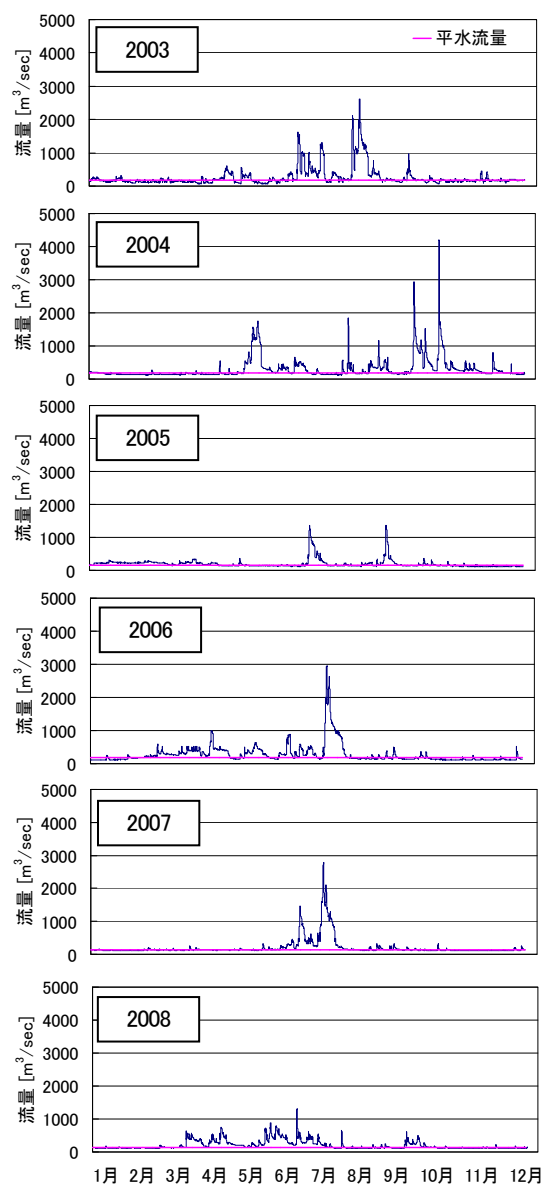


図-4 2003年～2008年における淀川流量

5. おわりに

本研究では、淀川と大和川において出水時水質調査を行い、高流量域にまで対応したL-Q関係を構築した。さらに、実測結果を基に、出水時を含めた年間流入負荷量を算定するとともに、出水時負荷の重要性について定量的な評価を行った。内湾沿岸域を対象とした従来の物質循環解析^{10),11)}では、出水時負荷の実態が明らかにされていなかったため、原単位法や平水時水質調査に基づいた流入負荷が陸域境界条件として与えられてきた。本研究はその問題点を解決するための基礎的な知見を提示しており、今後、陸域負荷削減施策の実効性について評価・検証も可能になると考えている。本研究の主たる結論は以下の通りである。

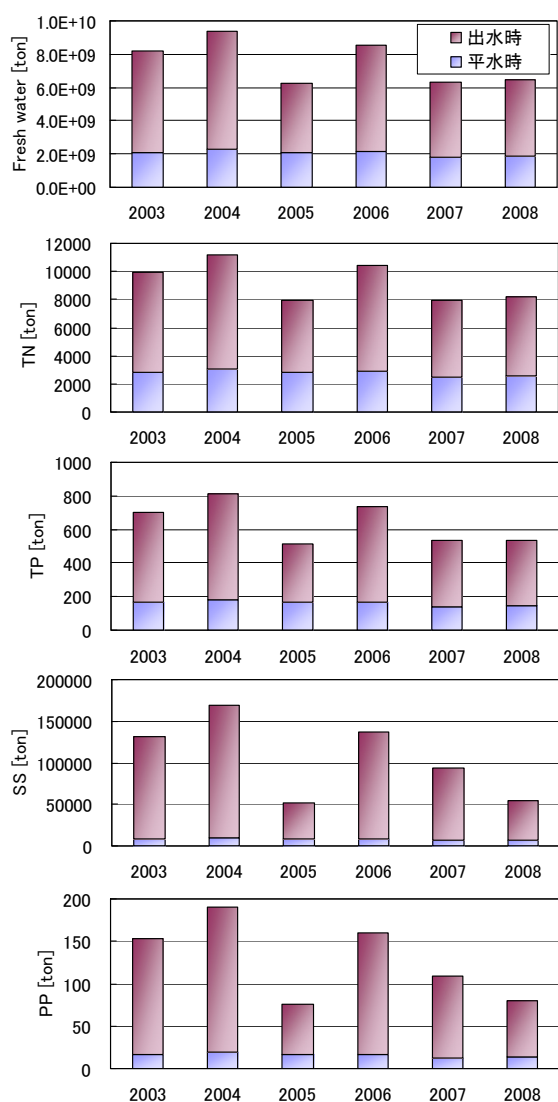


図-5 淀川における年間負荷量の比較

- (1) 淀川および大和川の下流部において出水時水質調査を実施し、高流量域にまで対応したL-Q式を構築するとともに、各水質項目について出水時負荷特性を明らかにした。
- (2) 2007年における淀川と大和川からの合計流入負荷量は、TNおよびTPについては、それぞれ10,700ton/year, 936ton/yearであった。これらは、原単位法により見積もられた大阪湾への流入負荷量のそれぞれ27%と37%に相当した。
- (3) 既往の算定式との比較を行ったところ、本研究で得られたL-Q式を用いた場合と異なる結果が得られた。
- (4) 平水時水質を高流量域にも適用して年間流入負荷量を求めた場合、今回得られたL-Q式を適用した場合に比して、最大で約1.8倍の算定差が生じ、出水時負荷の取り扱いの重要性が示された。
- (5) 淀川における年間流入負荷量は年間流量の変動に伴い、TN、TPのそれぞれについて-14%から+21%、-20%から+27%の大きな変動幅を有していた。また、

懸濁成分の年間負荷量は年間流量に加え、出水時の流出パターンにも大きく左右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）および平成21年度「瀬戸内海の環境保全・創造に係る研究助成」（瀬戸内海研究会）により補助を受けた。また、本研究を進めるにあたり、本研究室学生の寺中恭介君、長谷川剛基君、山中敦史君、田尾雄喜君の助力を頂いたとともに、国土交通省近畿地方整備局淀川河川事務所および大和川河川事務所には資料データのご提供を頂いた。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) 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) 坂井文子，二瓶泰雄，江原圭介，臼田美穂，重田京助，大塚慧：江戸川・荒川・多摩川・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) 三島康史，星加章，谷本照巳，Shettapong MEKSUMPUN：淀川河川水の化学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。
- 4) 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。
- 5) 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解析，水工学論文集，第51巻，pp.1153-1158，2007。
- 6) 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～東京湾，伊勢湾及び瀬戸内海の発生負荷量及び流入負荷量の把握 総論～，2006。
- 7) 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。
- 8) 田中勝久：沿岸・河口域のリン循環過程におよぼす土壌物質の影響，南西水研研報，No.28，pp.73-119，1995。
- 9) M. Suzumura, H. Kukubun, and N. Arata: Distribution and characteristics of suspended particulate matter in a heavily eutrophic estuary, Tokyo Bay, Japan, *Marine Pollution Bulletin*, 49, pp.496-503, 2004。
- 10) 中辻啓二，韓銅珍，山根伸之：大阪湾における汚濁負荷量の総量規制施策が水質保全に与えた効果の科学的評価，土木学会論文集，No.741，VII-28，pp.69-87，2003。
- 11) 谷本照巳，星加章，三島康史，柳哲雄：大阪湾における懸濁物質・窒素・リンの収支と循環，海の研究，10(5)，pp.397-412，2001。

(2009. 9. 30受付)