都市河川における雨天時汚濁負荷の実態と 水質・底質への影響

POLLUTANT LOAD IN RAINY WEATHER AND ITS INFLUENCE ON WATER AND BENTHIC ENVIRONMENT IN URBAN RIVERS

中谷祐介¹・今福大智²・根井大輝²・西田修三³
Yusuke NAKATANI, Daichi IMAFUKU, Daiki NEI and Shuzo NISHIDA

¹正会員 博(工) 大阪大学大学院助教 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)

To quantify pollutant inflow load in wet weather and elucidate its influence on water and benthic quality in urban rivers, field surveys and laboratory experiment were conducted. As a result, water qualities of drainage water from the CSO outlets and freeway outfalls showed significant fluctuations according to precipitation variation. The pollutant inflow load in wet weather had a minor impact on the mass balance in the waters. Moreover, the results of stable isotope ratio analysis indicated that the organic matter from CSO outlets and freeway outfalls did not constitute a large portion of sediments in the rivers.

Key Words : combined sewer overflow, freeway drainage, pollutant load, water quality, urban river

1. はじめに

古くより社会基盤整備が進められた都市域では、合流式下水道が採用されている場合が多い。合流式下水道は浸水対策と水洗化の普及を同時に行えることに加え、雨水と汚水を単一管渠で排除するために、分流式下水道に比べて整備コストを抑えることができるという利点がある。しかし、雨天時には大量の雨水とともに、処理場で処理しきれなくなった汚水が未処理のまま公共用水域へ排出される。これを合流式下水道越流水(Combined Sewer Overflow, 以下CSOと記す)と呼び、公衆衛生上、水質保全上、景観上の問題を引き起こすことが指摘されている。わが国では2000年頃からCSO問題への対策が始められ、合流式下水道緊急改善計画に従った様々な事業が各自治体において現在着実に進められている。

CSOによる汚濁負荷については、水域環境へ甚大な影響を及ぼしていることが懸念される。しかし、現地実測が難しいこともあり、環境基準項目に指定されているCOD, BOD, SS, 細菌類に着目した調査例¹⁾²⁾は存在するものの、水環境の解析に重要な形態別の栄養塩類に関するデータの蓄積は少ない³⁾⁴⁾。そのため、CSOが水域環境へ及ぼす影響やその流出制御による水質改善効果につ

いて、定量的な知見は未だ限られているのが現状である。

本研究では、大阪都市部を流れる東横堀川と道頓堀川を対象に、雨天時に流入する汚濁負荷の実態調査を実施するとともに、河川環境への影響について解析を行う。

2. 方法

(1) 研究対象領域

研究対象領域を図-1に示す。大阪都心部を流れる東横堀川と道頓堀川は、多量の汚濁負荷の流入により1970年頃にはBOD値が20~30mg/Lと極めて劣悪な水質環境にあった。その後、様々な施策により水質は大幅に改善されたものの、現在もほぼ全域にわたって貧酸素水塊が発生しており、さらなる水質改善が求められている。

東横堀川は淀川水系の下流部に位置し、南北に流れる全長約3km、川幅約20mの河川である。南端からは道頓堀川と名を変え、約2.5km西流した後、下流端で木津川に合流する。道頓堀川の河川幅はSta.3付近を境に変化し、西部区間が約50m、東部区間が約30mとなっている。

東横堀川と道頓堀川はともに人工的に開削されてできた運河であり、上下流端は水門によって普段は閉鎖されている。水門の役割としては、高潮の防御、水位の制御、

図-1 研究対象領域

船舶を航行させるための開門機能に加え、感潮域であることを利用した水質浄化運転機能が挙げられる。すなわち、上げ潮時には東横堀川水門を開けて比較的清浄な大川の河川水を取り入れる一方で、下げ潮時には東横堀川水門を閉じて汚濁した寝屋川の河川水が流入しないようにするとともに、道頓堀川水門を開けて下流に排水することで、河川の水質浄化を図っている。このため、当水域では水の流入出が東横堀川から道頓堀川への一方向かつ一時的にしか発生せず、ほとんどの期間は停滞水域となっている。また、東横堀川では河川を覆うように高速道路の高架橋が通っており、雨天時には高速道路排水が河道部へ直接流入している。

当水域では、図-1に示す28ヶ所の自然吐き口においてCSOが頻繁に発生している。現在、平成の太閤下水（北浜逢阪貯留管）と称されるCSOの一時貯留管の建設が進められており、これによって10年確率降雨に対してもCSOが発生しなくなるとされている。しかし、吉田⁵⁾により数回にわたるCSOの観測および負荷量の算定は行われているものの、排出先である東横堀川・道頓堀川の河川環境への影響に着目した調査解析はなされていない。

(2) 現地調査

河川に流入する雨天時負荷の実態と河川環境への影響を明らかにするために、CSO調査、高速道路排水調査、河川水質・底質調査を実施した。調査は2013年10月下旬より開始し現在も継続しているが、ここでは2014年8月中旬までに得られたデータを使用する。

上述の通り、東横堀川と道頓堀川には合計28ヶ所の自然吐き口が存在するが、今回はそのうち集水面積が約51haと最も大きい自然吐き口A（図-1参照）においてCSO調査を実施した。調査は吐き口より約30m下水管路上流に位置する雨水吐き室において行った。調査を実施した雨水吐き室の構造を図-2に示す。雨水が流入し、雨水吐き室内の水位が越流堰高さを超えるとCSOが発生する。採水には自動採水器（ポータブル型900MAX、

図-2 雨水吐き室の構造

HACH製）を使用し、雨水吐き室上部のマンホール蓋に機器を吊り下げて設置した。また、圧力式水位計（Compact-TD、JFEアドバンテック製）を用いて管内水位をモニタリングし、水位が越流堰の高さに到達する少し前から採水が開始されるように機器を設定した。

河川水質調査はCSOが発生した降雨を対象に、図-1に示すSta.1からSta.7を巡回して実施した。多項目水質計（AAQ-1183、JFEアドバンテック製）とDO計（Quanta G、Hydrolab製）を用いて橋上から流心で水温、電導度、濁度、Chl-a、DOの鉛直分布を測定するとともに、表層水を採取し水質分析に供した。Sta.4では河川調査と並行して、高速道路高架橋の橋脚排水口から流出する高速道路排水をバケツで採取した。

水質分析項目はSS、COD、および形態別の窒素、リン、ケイ素、炭素とした。懸濁態成分については全成分と全溶存態成分との差より、溶存有機態成分については全溶存態成分と溶存無機態成分との差より求めた。栄養塩類、有機炭素、CODの分析にはそれぞれAACS-V（BLTEC製）、TOC-V（島津製作所製）、吸光光度計DR2400（HACH製）を使用した。分析方法はそれぞれ連続流れ分析法、酸性化・通気処理法、吸光光度・過マンガン酸法である。SSの測定には保留粒子径0.6μmのガラス繊維濾紙（GS-25、ADVANTEC製）を使用した。また、2014年3月13日に採取したCSO試料と高速道路排水試料については、試料水中に含まれる懸濁物質の炭素・窒素安定同位体比の分析を行った。分析には質量分析計（DELTA V、Thermo Fisher Scientific製）を使用した。

河川底質調査は2013年10月17日と2014年6月25日に実施した。Sta.1からSta.7の間に架かる橋上から、河道中央においてエクマンバージ型採泥器（HOGA製）で表層泥を採取し、冷暗条件下で実験室に持ち帰った。試料は2mmふるいにかけた後、強熱減量（600℃で2時間強熱）を測定するとともに、乾燥粉碎・脱炭酸処理後に炭素・窒素安定同位体比の分析に供した。

図-3 各降雨イベントにおけるCSO総排水量

(3) 水理模型実験

雨水吐き室では水位が堰高を超えるとCSOが発生するが、その越流量を現地で計測することは難しい。堰越流量の算定には種々の公式が提案されているが、雨水吐き室の形状が複雑な場合や、堰下流側の水深が一定以上の場合には公式を適用することができない。そこで、CSO越流量を求めるために、図-2に示した雨水吐き室の縮尺模型（縮尺比6/100）を作成し、水理実験を行った。模型材料には透明アクリル板および塩ビ管を使用した。上流からの流入水量を段階的に変化させて越流水深 H と越流量 Q を計測し、フルード相似則に従って実スケールの H - Q 関係式を構築した。

3. 結果と考察

(1) 雨天時排水の水質特性

図-3に調査期間中に発生したイベント毎のCSO総排水量を示す。期間中にCSOは26回発生したが、ここでは一例として、CSO発生前後を含めて詳細なデータが得られた2014年3月13日の調査結果を図-4に示す。3月13日のCSOは総排水量の規模で見ると上位6番目に当たり、総降水量は36.5mm、先行晴天日数は3日であった。1:30頃から概ね0.5mm/10minの弱雨が継続した後、14:40～15:30に2mm/10min以上の比較的強い降雨が生じ、ほぼ同時時間帯にCSOの発生が確認された。

多くの溶存態成分については、降雨強度が増加するにつれて濃度が低下する傾向がみられたが、これは管内に路面排水が流入したことにより、下水濃度が希釈されたためと推察できる。ただし、 $[\text{NO}_2+\text{NO}_3]\text{-N}$ については他の溶存態成分とは異なり、降雨が強まった時間帯に若干の濃度上昇がみられたが、これは下水に比べて路面排水の濃度が高かったためと考えられる。また、16:10前後にはDON濃度の上昇がみられたが、この原因については今回得られたデータからは特定に至らなかった。

一方、懸濁態成分（PN、PP、POC）について着目すると、14:30から15:00には管内水位が上昇するにつれて濃度が上昇しており、下水管内または路面上の堆積物が流量の増加に伴って徐々に掃流されたものと推察される。

図-4 降水量とCSO排水量・水質の変動

その後水位は一旦低下するが、15:20から15:40には再び上昇し、当降雨イベント内での最大値を示した。しかし、この際には懸濁態成分の濃度上昇は伴わなかったことから、堆積物の多くは15:00前後の一度目の流量ピーク時までにはほぼ掃流されたと考えられる。なお、水位が低下した15:50前後にも懸濁態成分の濃度上昇がみられたが、この原因については今回得たデータからは推測できなかった。その後、懸濁態物質の濃度は徐々に低下し、降雨終了時には極めて低濃度を示した。

高速道路排水調査の結果を図-5に示す。排水は9:00頃より開始し、その後は降雨終了時まで継続的に発生した。

図-5 降水量と高速道路排水水質の変動

弱雨が続いた14:00頃までの濃度変動に着目すると、窒素と炭素については10:00頃に一度上昇した後に徐々に低下したが、リンについては大きな変化は生じなかった。15:00前後に降雨強度が高くなると、リンと炭素については懸濁態成分の濃度上昇が生じているが、これは路面堆積物が掃流された影響が現れたものと考えられる。リンと炭素については全成分の40～90%を懸濁態成分が占めていた一方で、窒素については常に75%以上を溶存態成分が占めていた。なお、同じく高速道路排水を対象とした新矢ら⁶⁾の調査では、流出開始から30分以内に極めて高濃度の懸濁態物質（TOCでは最大約600mg/L）の流出が報告されているが、今回の調査では確認されなかった。今回の調査では採水を約1時間間隔で行ったため、ファーストフラッシュによる濃度変動を捉えられていない可能性も否定できない。

図-6 越流水深と越流量の関係

表-1 河川水中の存在量と流入負荷量の比較
(鍵括弧内はaに対するb, cの割合)

項目	水量 (m³)	物質量 (kg)		
		T-N	T-P	TOC
a) 負荷流入前における河川水中の存在量	4.46×10^5	1.41×10^3	72.6	1.16×10^3
b) CSO	5.67×10^3 [1.3%]	19.0 [1.4%]	3.92 [5.4%]	59.9 [5.1%]
c) 高速道路排水	1.71×10^3 [0.4%]	3.16 [0.2%]	0.45 [0.6%]	35.0 [3.0%]

(2) 雨天時負荷の定量的評価

水理実験より得られたH-Q曲線を図-6に示す。図中にはJIS B 8302に採用されている全幅せきの流量公式も併載している。H=0.25mを境にH-Q関係は変化し、H≤0.25mでは指数関数、H>0.25mでは二次関数でそれぞれ表現可能であった。H>0.25mでは実験より得られた関係と流量公式に大きな差異が生じたが、これはH>0.25mでは越流堰下流側の水位が上昇し、越流部の流れに影響を及ぼしたためと考えられる。

調査・実験結果を基に、降雨前の河川水中に存在する物質量と雨天時負荷量との比較を行った。河川水中の存在量は、河川水の水量と水質濃度の積より求めた。具体的には、河道部を流下方向に50m間隔に分割し、各区分について流表面積と水深の積として河川水量を算定するとともに、2014年3月12日晴天時調査で得られたSta.1～Sta.7の各地点の水質濃度を線形補間することで各区分の水質濃度を推定した。また、全CSO吐き口からの総負荷量は、自然吐き口Aにおける排水量に全吐き口との集水面積比を乗じて求めた総排水量に、自然吐き口Aで採取した試料水の時々刻々の水質濃度を乗じることによって算定した。高速道路からの総負荷量は、東横堀川上部の路面面積と降水量、路面流出係数(=0.83)⁷⁾の積より求めた総排水量に、調査で得られた排水水質を時間方向に線形補間して求めた水質濃度を乗じて算定した。

算定結果を表-1に示す。負荷流入前の河川水中存在量に比べると、雨天時負荷量はいずれの水質項目についても10%以下にしか相当せず、特に高速道路排水によるT-PとT-Nの負荷量はともに1%以下と極めて小さい。このことから、2014年3月13日に発生した中規模の降雨イベントによる雨天時負荷が、河道部の物質収支に及ぼす影

図-7 河川水質と雨天時負荷の変動

響は軽微であったといえる。ただし、調査期間内にはCSO排水量が1桁大きい降雨イベントも複数回発生しており（図-3参照）、その場合には雨天時負荷は物質収支に無視できない影響を及ぼしているものと考えられる。

(3) 河川水質に及ぼす雨天時負荷の短期的影響

河川水とCSOの栄養塩濃度および雨天時負荷量の時系列を図-7に示す。まず、CSOと河川水の溶存無機態窒素DIN（ $=\text{NH}_4\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$ ）の濃度を比較すると、CSOの濃度は河川水と同程度あるいはそれ以下であったことから、CSO水塊の流入は河川水濃度を上昇させないと考えられる。一方、 $\text{PO}_4\text{-P}$ についてはCSOの濃度は河川水よりも常に高く、最大で3倍近くの値を示しており、CSO水塊の流入は河川水濃度を上昇させると考えられる。実際、CSO負荷量と河川水質の変動についてみると、CSOの流入が局所的であるために全ての地点ではないが、採水地点の近くにCSO吐き口が存在するSta.4とSta.6では、CSO発生時に河川水の水質濃度が急変したことが確認できる。特にSta.6では、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度がCSO発生前の約2倍に上昇しており、CSOが河川水質を短時間に大きく変化させていることがわかる。また、CSO発生から約24時間後においても河川水質濃度はCSO発生前よりも高い値を示しており、閉鎖性の強い当水域ではCSOが河川水質に及ぼす影響は比較的長時間にわたることがわかった。

一方、周辺に吐き口が少ないSta.1～Sta.3の濃度変化については、2014年3月13日の調査データが欠損のため検討できなかった。しかしながら、2013年11月25日に実施した雨天時調査の結果では、CSO発生前後にSta.1～Sta.3における河川水質にほとんど変化が認められなかったことから、河川水質に及ぼすCSOの短期的な影響は、吐き口が集中する水域に限定的であると考えられた。

図-8 河床堆積物の強熱減量分布

(4) 河道部におけるCSO水塊の滞留日数

調査期間中に発生した全CSOイベントを対象に、CSO水塊の河道内滞留日数を算定した。2.(1)で述べたように、上下流端を水門で閉じられた当水域では水位制御および潮時に応じた水質浄化運転が行われており、河道部に流入したCSO水塊は下流端の水門から徐々に排出される。東横堀川上流部にもCSO吐き口が存在することを踏まえて、ここでは下流水門からの排水量の積算値が、CSO発生前に上下流水門間に存在した河川水体積と等しくなるまでの日数を滞留日数と定義した。排水量は、実際の水門操作記録を基に、河道部の流表面積と水門操作前後における河川内の水位変化より算定した。なお、水門操作の頻度は降雨履歴や月齢などによって変更されるため、滞留日数はCSOの発生時期によって異なることが予想される。

算定の結果、CSO水塊の滞留日数は6～26日とイベントによって大きく異なり、平均すると14日であった。滞留日数が比較的長期間であること、また上述のようにCSO水塊の流入が河川水の栄養塩濃度を上昇させることを考慮すると、CSOの発生は河道部における内部生産の促進に寄与しているものと推察される。以上のことから、当水域のような閉鎖性の強い都市河川では、CSO流出抑制の方策は水質汚濁改善に一定の効果を有すると考えられ、その定量的な評価が今後重要な課題である。

(5) 堆積有機物の起源解析

図-8に河床堆積物の強熱減量の分布を示す。Sta.4とSta.5ではデータが欠損しているが、これは堆積物中の泥質が極めて少なく、強熱減量を測定するのに十分な試料量を採取できなかったためである。東横堀川では強熱減量は5%以下と小さく、有機物の堆積量は比較的少なかった。一方、道頓堀川では下流に向かうにつれて強熱減量は増加し、Sta.1とSta.2では20%以上の高い値を示した。津久井ら⁸⁾は強熱減量とDO消費量には正の相関があることを報告しており、今回下流域で確認された強熱減量の高い底泥による酸素消費は、当水域における貧酸素化要因の一つであると推察される。また、入江ら⁹⁾は道頓堀川では下流水門からの塩水流入が底質内の還元的反応を生起し、酸素消費がもたらされることを指摘している。今後、当水域における貧酸素化機構を解明するためには、塩水流入の影響も含め、水-底泥間の相互作用を

図-9 各試料の炭素・窒素安定同位体比

明らかにすることが必要と考える。

CSOおよび高速道路排水中の懸濁物質と河床堆積物について、安定同位体比の分析結果を図-9に示す。このCSO試料は2014年3月13日の排水開始から終了までに複数回採取したものであるが、同一のCSOイベント内においても、 $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の値にはそれぞれ $-25.4 \sim -26.2\text{‰}$ 、 $5.0 \sim 12.0\text{‰}$ と大きな変動がみられた。安定同位体比とCSO越流量やCSO中の懸濁態物質濃度の関係を調べたところ、これらの指標間に明瞭な関係は認められなかった。

河床堆積物の安定同位体比についてみると、堆積物が砂質であったSta.4およびSta.5付近の地点とそれ以外の地点において明確な差異がみられた。しかし、 $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の分析精度がそれぞれ $\pm 0.1\text{‰}$ 、 $\pm 0.15\text{‰}$ であることを考えると、いずれの地点についても河床堆積物の安定同位体比組成はCSO試料や高速道路排水試料とは明らかに異なっており、河床堆積物の大部分は雨天時負荷以外に由来していることが示唆された。河床堆積物の起源としては、雨天時負荷の他に、河道部で発生した内部生産起源有機物や上下流水門外から流入する異地性有機物などが考えられる。今後、これらの有機物についても同位体組成を調べるとともに、試料の粒度分布に関する情報もあわせて解析することで、より詳細な起源解析を行う予定である。

4. おわりに

本研究では、道頓堀川および東横堀川を対象に、雨天時汚濁負荷の実態調査を行うとともに、河川の水質と底質に及ぼす影響について解析を行った。本研究で得られた主たる結論は以下の通りである。

- 1) CSOと高速道路排水の水質濃度は、今回の調査データからは特定できない要因による影響はあるものの、

概ね降雨状況に応じて変動することがわかった。

- 2) 2014年3月13日に発生した中規模の降雨イベントでは、CSOと高速道路排水による流入負荷量は降雨前の河川水中存在量の10%以下にとどまり、河道部の物質収支に及ぼす影響は軽微であると考えられた。
- 3) 雨天時負荷が河川水質に及ぼす短期的な影響は、CSO吐き口周辺に限定的であるが、地点によっては河川水の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度を負荷流入前の約2倍に上昇させるなど、無視できないものであった。また河道部に排出されたCSO水塊は比較的長期にわたって滞留し、内部生産の促進に寄与していることが推察された。
- 4) 道頓堀川下流における河床堆積物の強熱減量は20%以上と高い値を示し、底泥による酸素消費が貧酸素化要因の一つであると推察された。
- 5) 河床堆積物の安定同位体比組成は、CSOおよび高速道路排水中に含まれる懸濁物質とは明らかに異なることがわかった。

謝辞：現地調査を実施するにあたり、大阪市および(一財)都市技術センターの方々には多大なご協力を賜りました。また、本研究の一部は(公社)日本下水道協会、(公財)大林財団、(公財)鴻池奨学財団から助成を受けて実施しました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 草場大作，竹谷究，藤田昌一，姫野修司，小松俊哉：合流式下水道越流水の長期観測と流出解析による汚濁負荷の定量的評価，水環境学会誌，Vol.33，No.5，pp.41-47，2010。
- 2) 金子真，二瓶泰雄：雨天時越流水負荷による都市河川感潮域の大規模貧酸素水塊形成過程，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.68，No.4，pp.I_1591-I_1596，2012。
- 3) 鯉淵幸生，小野澤恵一，中村格之，原本英二，片山浩之，古米弘明，佐藤慎司，岡安章夫，磯部雅彦：東京湾お台場海浜公園における雨天時合流式下水道越流水の影響調査，海岸工学論文集，Vol.52，pp.886-890，2005。
- 4) 西田修三，中谷祐介，根井大輝：都市感潮河川に流入する合流式下水道越流水の挙動特性，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.70，No.4，pp.I_1237-I_1242，2014。
- 5) 吉田達朗：下水道雨水吐き口からの東横堀川・道頓堀川への雨天時排出汚濁負荷量測定結果，下水道業務論文集，No.26，pp.112-119，2007。
- 6) 新矢将尚，小西孝明，宮西弘樹，石川宗孝：高速道路排水における汚濁負荷の流出特性，用水と廃水，Vol.44，No.3，pp.207-213，2002。
- 7) 日本道路協会：道路土工要綱平成 21 年度版，2009。
- 8) 津久井公昭，山崎正夫：河川底質の評価について(その 3)，東京都環境科学研究所年報，pp.137-142，1995。
- 9) 入江政安，西田修三：道頓堀川の水質変動特性と水質管理についての調査解析，水工学論文集，Vol.51，pp.1129-1134，2007。

(2014. 9. 30受付)