雨天時における路面排水の水質特性および汚濁負荷の 流出挙動に関する研究

和田 桂子* 藤井 滋穂**

Characterization of Stormwater Runoff Processes from Urban Roadways

Keiko WADA* and Shigeo FUJII**

* Lake Biwa - Yodo River Water Quality Preservation Organization, 1-1-30 Kitahama, Chuo-ku, Osaka 541-0041, Japan

** Research Center for Environmental Quality Management, Kyoto University, 1-2 Yumihama, Otsu, Shiga 520-0811, Japan

Abstract

On the basis of field surveys of stormwater runoff conducted in urban roadways, stormwater runoff processes were characterized to determine their loading effects on the receiving water body. The main results are as follows: (1) In stormwater runoff, 82-96 % of the total rainfall amount was discharged owing to hydrologic abstraction. (2) The percentages of the particulate portion were 96, 60-70 and 26 % for phosphorus, organic matter (chemical oxygen demand and total organic carbon), and nitrogen, respectively. (3) The pollution load carried by automobiles and the remaining load from previous rainfall affect stormwater runoff. (4) A cumulative flow of 2-5mm, averagely 3.5mm, was considered to be the most effective loading cutoff in the first flush runoff. (5) Total stormwater runoff could be decreased by 50 % in a year using these first flush runoff cutoffs.

Key words: non-point source, first flush runoff, stormwater runoff, organic matter, nutrient salts

1. はじめに

琵琶湖は、近畿圏の重要な水資源であり、条例による厳しい排水規制の制定や下水道の整備等、様々な水質保全の取り組みがなされてきた。その結果、琵琶湖流域のポイント汚染に対する施策は着実に進み、滋賀県の下水道普及率は全国平均を上回り78.2%(平成16年度末)を達成し¹⁾、琵琶湖のBOD濃度は減少してきた^{1~3)}。しかし、1984年頃を境にBODとCODの乖離現象が生じ、COD濃度は増加傾向を示している。また、全国の閉鎖性水域で指摘されているノンポイント対策の遅れは、琵琶湖でも問題となっており^{4~7)}、全負荷量に対するノンポイント負荷(自然系+市街地系+農地系)の占める割合が増加している。一方、琵琶湖周辺の平地部は、農地等が宅地に開発され建物や道路など都市域が急速に発展してきた。建物や道路など不透透域の拡大は、降雨の流出を促進し、土壌浸透の機会を減少するため、水域への汚濁負荷の増加が懸念される^{8~12)}。今後、さらなる道路網の整備とモータリゼーションの発達が、琵琶湖に与える影響は少なくないと思われる。したがって、都市域からのノンポイント負荷削減のために、雨天時に流出する路面排水の特性を把握することは重要と考える。これまで路面排水の水質汚濁では重金属や微量有害物質の報告は

多いものの、有機物や栄養塩類を主眼とした研究は少ない。

そこで本研究は、雨天時に道路から発生する路面排水が、河川や湖沼等の公共用水域へ流入するというノンポイント汚染源の基礎データとして、1999年から2005年の6年間にわたり実施した路面排水中の実測調査から、路面排水の流出特性、路面排水中の有機物と栄養塩類の流出挙動について解析した。さらに、雨天時の路面排水の汚濁負荷量を推定し、初期フラッシュ排水の削減効果について評価した。

2. 調査概要

2.1 調査水質項目および分析方法

本研究では、湖沼水質保全対策の総量規制項目となっているCOD、窒素、リンを検討対象とし、有機汚濁物質指標ではTOCも検討に加えた。道路起源とされる金属類や微量有害物質等は、多くが道路塵埃などの粒子態成分に吸着して存在していることが報告^{13~21)}されていることから、各水質項目は粒子態成分と溶存態成分に分けて把握し、それらの挙動解析の基礎資料を提供できるようにした。さらに、一部の試料ではSS、濁度および形態別無機態窒素について測定・調査した。

水質測定で、CODは工場排水試験法JIS K0102 17 (過マンガン酸カリ法, 100℃30分)、T-NはJIS K0102-45.5 (熱分解法)、

* (財)琵琶湖・淀川水質保全機構 〒541-0041 大阪市中央区北浜 1-1-30

** 京都大学大学院工学研究科附属流域圏総合環境質研究センター 〒520-0811 大津市由美浜 1-2

Table 1 Summary of monitoring sites on road runoff.

Run	Catchment area (m ²)	ADT/12h* (% of HGV**)	Dry weather period (day)	Rainfall		Rainfall intensity		Discharge		Measurement item (): The number of samples
				Amount (mm)	Duration (h)	Average (mm·h ⁻¹)	Max (mm·10min ⁻¹)	Amount (mm)	Duration (h)	
St. 1	75	15,648 (26.8%)	1.4	29.0	8.8	3.3	3.5	23.7	9.6	COD/TOC/N/P(9) SS/Turbidity(28)
			1.5	5.5	4.7	1.2	1.5	4.0	4.8	COD/TOC/N/P(12) SS/Turbidity(18)
St. 2	750	12,350 (16.3%)	4.6	5.0	4.0	1.3	None	2.6	4.5	COD/TOC/N/P(6) SS(6)
			14.4	12.0	5.5	2.2	1.0	9.7	5.7	COD/TOC/N/P(6) SS(6)
			4.0	5.0	5.7	0.9	1.5	3.2	7.1	COD/TOC/N/P(8) SS(8)
			23.2	2.5	2.3	1.1	1.0	1.6	2.5	COD/TOC/N/P(9) NH ₄ /NO ₂ /NO ₃ (9)
			2.9	20.5	7.7	2.7	3.0	19.0	9.4	COD/TOC/N/P(8) NH ₄ /NO ₂ /NO ₃ (8)
			6.4	51.5	6.0	8.6	6.5	50.0	6.3	COD/TOC/N/P(7) NH ₄ /NO ₂ /NO ₃ (7)
St. 3	285	13,002 (8.0%)	2.1	11.0	10.8	1.0	1.0	9.5	12.7	COD/TOC/N/P(2) NH ₄ /NO ₂ /NO ₃ (2)
			3.2	5.0	5.2	1.0	1.0	3.8	6.6	COD/TOC/N/P(2) NH ₄ /NO ₂ /NO ₃ (2)
			5.6	13.0	10.3	1.3	1.0	9.8	11.6	COD/TOC/N/P(2) NH ₄ /NO ₂ /NO ₃ (2)
			17.5	8.5	10.7	0.8	1.5	5.7	14.0	COD/TOC/N/P(2) NH ₄ /NO ₂ /NO ₃ (2)

* Average Daily Traffic vehicles on Weekdays (a.m.7:00-p.m.7:00), 1999 Road Traffic Census, ** HGV; Heavy goods vehicle

St.1 ; roadway area 40m² sidewalk area 35 m², St.2 ; roadway area 600m² sidewalk area 150m², St.3 ; roadway area 243m² sidewalk area 42 m²

Dry weather period: not contained <1mm, Amount of precipitation: not measured <0.5mm, "None" shows data were not obtained

濁度はJIS K0101-9.4 (積分球式濁度計法), TOCはJIS K0102 22.1 (燃焼酸化-赤外線式TOC分析法), T-P, SSは環境庁告示第59号別表に従った。粒子態成分と溶存態成分とは0.45 μmミリポアろ紙で区分し, COD, T-N, T-Pではそのろ液と未ろ過液を, TOCではろ液 (DOC) とろ過残留物 (POC, CHNコーダー測定) を測定した。したがって, TOCはDOCとPOCの和で与えている。

2.2 調査場所および調査方法

路面排水調査は, 滋賀県内の国道 (国道8号: St. 1) および県道 (近江八幡大津線: St. 2, 大津能登川長浜線: St. 3) の3ヶ所 で実施した。Table 1に調査道路²²⁾・調査内容の概要をまとめる。調査場所は片側一車線の交通量の多い主要道路を選んだ。

St. 1では, 一降雨に発生する路面排水を集水槽の排水パイプ出口からポリタンクに10~130l ごとに全量計測取水した。そのうち濃度変化を代表する試料でSS濃度および濁度を測定し, さらに, その中から抽出した試料で他の水質項目も分析した。降水量は, 東北東約3.0km離れた場所の雨量計 (10分毎) から得た。本地点ではRun1-1, 1-2の2回調査した。

St. 2では, 6降雨 (Run2-1~Run2-6) を対象に, 路面排水を流出開始から一定時間ごと (直後, 15分後, 30分後...) に採水し, 各6~9検体を水質分析した。流量は, 採水地点横に設置したパーシャル流量計にて計測し, 降水量は200m北の雨量計 (10分毎) から得た。ただし, Run2-1は, 大津気象台の降水量データ (1時間毎) を用いた。

St. 3では, 4降雨 (Run3-1~Run3-4) を対象に, 路面排水を経時的に複数回採水後, 流量比でコンポジットすることによって, 初期流出 (初期フラッシュ) 部分および初期フラッシュ後の排水の2検体を水質分析した。流量は装置流入時にパーシャル流量計にて計測し, 降水量は約50m離れた場所の雨量計 (10分毎) から得た。

3. 結果および考察

3.1 路面排水の流出特性

Table 1に示すように, 一降雨の路面排水量はいずれの調査でも降水量より小さく, また路面排出は雨量計に降水が観測後10~25分程度遅れて流出し始めた。このような路面排水の損失・遅滞は, 地表に到達した降水の一部が蒸発散,

Fig. 1 Relationship between total rainfall amount and total runoff amount.

窪地貯留, 植物等による遮断等の損失 (hydrologic abstraction) が原因であり, その量的関係を本調査結果について検討した。

Fig. 1に示すように, 総流出量 y は総降水量 x と線形関係があり, “ $y = mx - b$ ” 式で回帰でき, 流出率にあたる傾き m は, 0.822~0.956 (-), 絶対損失量にあたる切片 b は0.49~1.44(mm)となった。小流域の流出解析²³⁾における流出係数 K (=累積流量/総降雨量) のアスファルト道路値は0.70~0.95であり, 本結果は同様な範囲を示した。

3.2 路面排水の水質特性

3.2.1 浮遊成分の特性

路面排水は, 一般に流出初期に高濃度であり, 時間と共に低下する。その流出機構には, 降雨強度, 雨水流出強度などの路面上に堆積した汚濁物を掃流しようとする外力と, 先行晴天日数, 不浸透面積率, 降下ばいじん量などの掃流される汚濁物量を増加する因子と関連し, 路面排水の水質に大きく影響を及ぼしている^{24~26)}。そこで, St. 1の連続採水調査結果を基に路面排水の流出影響因子について検討した。

Fig. 2にSt. 1での路面排水の濁度, SSの経時変化を示す。濁度はRun1-1, Run1-2とも流出直後に高い値から, その後速やかに低下するパターンとなった。SSも多くの濁度と類似の傾向を示すが, Run1-1で30分後に初期濃度を超える急上昇区間があるなどの点でパターンが異なった。濁度における高濃度から単調的な減少パターンは, 比重の軽い粒子成分が降雨の継続とともに堆積量が減少し, 結果としてそ

Fig. 2 Hyetograph, hydrograph, SS concentration and Turbidity on St.1.

— : Flow rate -○- : SS -○- : Turbidity □ : Rainfall intensity

の流出濃度が減少することを反映している。一方SSでは、Run1-1のように降雨開始後しばらくして強い降雨 ($2 \sim 3.5 \text{ mm} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$) となる場合、初期の弱い降雨では流出せず路面上に残存する粗粒子や比重の大きな堆積物が、 $2 \text{ mm} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$ の強い降雨強度で掃流され、さらにそれらが流出した後でも、50～70分後に示す $3 \sim 3.5 \text{ mm} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$ の降雨強度により堆積物が一掃されることを意味し^{27,28)}、その結果流出過程の間でも高いSS濃度が生じうることを示す。

上記とは別に、降雨停止後の再降雨時7:00～7:30の観測では濁度、SSとも濃度上昇していた。これは上記の場合とは異なり、再降雨時の強度が大きくないため、初期流出時の残存した堆積物の流出とは考えられず、このピークは無降雨時に新たに供給された負荷によるものと推定される。路面排水は堆積物の他、降雨中に路面に降下するばいじんや路面上を走行する車両等によって持ち込まれる物質も同時に流出する²⁹⁾。そこで、同時間の降下ばいじん量を推定し、流出量と比較してみた。同地点付近の降下ばいじん量(平成16年度、甲賀市甲賀地域振興局)³⁰⁾の月平均 $1.3 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{month}^{-1}$ を用いて、無降雨となった5:00～7:00および弱い降雨強度のため路面に保持されると推定される3:30～5:00の合計3時間30分の降下ばいじん量を推定すると、 $6.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ となる。一方、ピーク直前までの3:30～6:40のSS濃度をベースラインと仮定すると、流出量との関係から負荷量は $1.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ で推移し、これを差し引いたピークに相当する負荷量(流出量180L)は、 $23.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ と算出される。したがって、このピークが示す汚濁負荷量は、降下ばいじん量より極めて大きいことから、降雨が小康状態の時に走行していた自動車などにより外部から持ち込まれたその他の汚濁負荷が影響している可能性が示唆された。

3.2.2 粒子態および溶存態成分の特性

路面排水中の粒子態成分について、St. 1～St. 3 ($n=11$; 極端に路面排水量が少なかったRun2-4を除く)での一降雨の総負荷量をベースを流量で戻した値から算出した。Fig. 3に示すように、各々の回帰式の傾きから粒子態成分の存在割合は、COD; 62%, TOC; 70%, T-N; 26%, T-P; 96%であった。リンは排水中のほとんどが粒子態であり、SSと同じ挙動を示すことを示唆している。CODおよびTOCは路面排水中の60～70%が、窒素は26%が粒子態として流出すると推定できた。

また、すべての項目のx切片は正の値であり、路面排水には常に溶存態成分が存在することが明らかとなった。こ

れは元々雨水に含まれている溶存成分濃度と考えられる。琵琶湖・淀川流域の原単位における観測データ¹²⁾から求めた湖面降水の濃度は $\text{COD} 1.78 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、 $\text{T-N} 0.632 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、 $\text{T-P} 0.018 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ である。x切片の濃度はこれらの値と比較するとCOD、T-Pで類似した値となっており雨水中の溶存成分を示すと考えられる。T-Nは湖面降水が高く、大気中の窒素酸化物が降水濃度に影響することを示唆している。

ここで路面排水中の窒素は粒子態の占める割合が低く74%が溶存態として存在することから、St. 2およびSt. 3の調査で溶存態窒素(DIN)を形態別に分析した結果を基に詳細に検討する。St. 2の流出直後におけるDIN濃度は、アンモニア態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)が55～98%を占め一番高い値を示していた。D-TNに占める $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合は27～56%であり初期排水中には高濃度の $\text{NH}_4\text{-N}$ が含まれることを示唆している。St. 2は集水面積が広範囲で採水口までの管路が長く、管路等に残留した汚濁堆積物中の有機態窒素の分解によって $\text{NH}_4\text{-N}$ が生じた可能性が考えられた。一方、St. 3におけるD-TN中のDINの比率は79～93%であり、DIN中の60～64%が $\text{NH}_4\text{-N}$ という結果が得られた。St. 3は、道路からの路面排水を高架橋下にて直ちに直接取水しているため、雨水管の途中に堆積した残差等の有機物分解による窒素形態変化の影響がほとんどないと考えられる。また、 $\text{NH}_4\text{-N}$

Fig. 3 Proportion of particle substance in road runoff (St.1-St.3).

は、降水中でも多く含まれていることから降水由来による影響も考えられた。

このことから路面排水のアンモニア発生要因を考察した。大気降下物による窒素の供給は、場所による違いはあるものの都市部でT-Nは $1 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 程度である。NH₄-Nは、第3次酸性雨対策調査結果（1993～1997）では全降下物で平均 $0.29 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ （最大 $0.45 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、最小 $0.12 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ）や降雨水調査データでは平均 $0.45 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ （最大 $2.18 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、最小 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ）の値が報告されている³¹⁻³⁴。これらの値と比較するとSt.3の路面排水中のNH₄-N濃度は平均 $2.2 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ （最大 $3.3 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、最小 $1.6 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ）と大きい。東京都が調査した高速道路からの雨水排水中のNH₄-Nは平均値 $2.2 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ であり³⁵、同様の値である。また、高速道路の雨水排水が住宅地や工場屋根に比べ5倍から10倍高い値であったことから、降水からの供給以外に道路からの影響が路面排水に加算されることを示唆している。最近の研究で排気対策装置である三元触媒を装着した自動車からアンモニアの排出を懸念する報告³⁶⁻³⁸がされており、St.2およびSt.3での路面排水の窒素成分は自動車からの影響によると推測される。しかし、アンモニアの発生は運転モードで大きく異なる³⁹ことから発生源については今後も引き続き調査検討する必要があると思われる。

3.3 路面汚濁負荷の流出挙動

3.3.1 初期フラッシュ排水量の推定

都市域の路面排水は、路面堆積物の降雨による流出現象のため、基本的には水質濃度は累加流出高の増加とともに指数関数的に低下し、堆積物が流出し終わると降水レベルの一定の値に達する。これは、降雨初期排水（初期フラッシュ排水）を除去すれば、効率的・効果的な負荷削減量が可能であることを示す。そこで、St.1およびSt.2（降水量が少ないRun2-4を除く）の7降雨について初期フラッシュ排水量を推定した。路面排水は雨水管を通じて公共用水域へ流入することから、路面排水濃度がその濃度より高い場合汚濁負荷を与えることとなる。したがって、負荷を与える濃度を初期フラッシュ排水と定義し、水質濃度と累加流出高との関係から公共用水域濃度レベルまで低減する時の累加流出高を近似式にて算出した（Fig. 4）。指標とする濃度は琵琶湖南湖・瀬田川流入河川の平均水質濃度（2001）であるT-N $1.28 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、T-P $0.090 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ を用いた³⁰。ただし、CODは河川水濃度まで低減しないことから公共用水域への負荷を軽減するための実用的かつ有効なレベルとして、琵琶湖南湖へ放流する下水処理場の排水目標値 $10 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ を指標と仮定し累加流出高を求めた。その結果COD 4.8 mm 、TOC 3.1 mm 、T-N 3.6 mm 、T-P 2.3 mm となり、初期フラッシュ排水部分は2～5mmまでの範囲と推定できる。この結果から、降雨時の路面排水の概ね累加流出高 3.5 mm までを対

Fig. 4 Calculating concept the volume of first flush runoff.

象に流入対策を講じれば、高濃度の汚濁負荷を効果的かつ効率的に削減できると考えられる。

3.3.2 路面上の堆積汚濁負荷量の推定

路面排水は、降下物や路面上の堆積物が降雨によって流出し、路面上から減少する変化である。路面排水の負荷源には、降水成分や降雨時の走行車両等もあるが、ここでは主要な現象として堆積物による流出負荷を解析した。

Fig. 5 は、負荷量と累加流出高の関係を示した一例である。このように路面堆積物の流出速度が一次反応、 $dL/dq = -kL$ に従うとして、St.1およびSt.2の Lu ：推定堆積負荷量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$) および k ：負荷流出係数 ($1 \cdot \text{mm}^{-1}$) を推定した。 Lu は $q=0$ の時の L の値である。累加流出高 $q \text{ mm}$ の時の L 値 $L(q)$ は式(1)で表されトーマスの傾斜法⁴⁰を用いて求めた。算出した Lu および k の値を Table 2 に示す。

$$L(q) = Lu \times [1 - \exp(-kq)] \quad (1)$$

推定堆積負荷量 (Lu 値) は、降水量と先行晴天日数のほぼ等しいRun2-1とRun2-3で同様な値を示した。降水量がほぼ同じであるが先行晴天日数が長いRun2-4はRun2-1、Run2-3と比較するとCOD、TOCの溶存態成分およびリンの粒子態成分で5倍以上の高い値を示した。これは先行晴天期間が長ければ長いほど、路面堆積物の堆積量は増加し排ガス等に暴露される機会も多くなることによる。しかし、先行晴天日数が等しいRun1-1とRun1-2の場合、有機物の Lu 値に1.5～4.7倍の差がみられた。この原因の一つには前回の降雨で流出せずに残存した堆積物に、先行晴天期間の路面堆積物の汚濁負荷が加わり、次の降雨時に流出するためと考える。一降雨によって流出しきれなかった残存負荷量は、次の降雨時流出まで堆積し、次の降雨時流出の堆積初期条件となることから^{41,42} Lu 値に影響を及ぼしたと推察される。

負荷流出係数 (k 値) は、COD、TOCは同程度もしくは溶存態成分が流出しやすい傾向がみられた。リンは粒子態が溶存態より大きく、大部分が粒子態で存在するため降雨とともに流出しやすいと思われる。窒素も粒子態の方が大きく初期路面堆積物からの溶存態の流出が遅いことを示す。窒素は3/4が溶存態で流出するため、溶出が緩やかであるか、路面流出時の外部負荷の供給によって見かけ上、流出係数が小さくなっている可能性が示唆された。また、同じ水質項目間では降水量が多いと k 値が小さくなる傾向がみられた。このことは、 k 値には降水量や降雨強度等も影響しているものと推察される。

3.4 初期フラッシュ排水の負荷削減効果

累加汚濁負荷量は、Fig. 5 で示されるように堆積量の一次反応として経時的な変化はほぼ再現できるが、その初期値である Lu 値には、先行晴天期間他各種の影響があり、現時点で定式化困難である。そこでSt.1～St.3の各Runにおけ

Fig. 5 Relationship between loading and cumulative runoff volume.

Table 2 Efflux analysis of sediment on road.

Run	P-COD	D-COD	POC	DOC	P-TN	D-TN	P-TP	D-TP
1-1	91	79	75	71	1.6	5.9	0.68	0.09
1-2	63	38	16	26	2.4	4.9	0.46	0.03
2-1	32	21	40	16	1.2	5.5	0.28	0.00
2-2	45	79	42	78	1.2	15.2	0.56	0.22
2-3	33	16	31	22	1.2	2.3	0.49	0.05
2-4	32	118	32	123	3.2	14.2	2.41	0.25
2-5	72	118	70	106	13.1	13.8	1.81	0.38
2-6	137	267	172	224	13.7	31.4	2.38	0.69
1-1	0.150	0.182	0.011	0.225	0.304	0.309	0.159	0.079
1-2	0.646	0.732	0.839	0.772	0.631	0.596	0.990	0.515
2-1	1.155	1.402	1.018	1.595	2.401	1.137	0.882	-
2-2	0.385	0.580	0.424	0.588	0.877	0.518	0.409	0.390
2-3	0.731	2.071	0.575	1.539	0.640	1.424	0.303	0.594
2-4	0.903	1.223	1.597	1.186	1.382	0.707	1.287	0.919
2-5	0.249	0.226	0.213	0.241	0.185	0.176	0.245	0.167
2-6	0.096	0.142	0.103	0.155	0.160	0.091	0.137	0.087
1-1	0.965	0.877	0.106	0.888	0.933	0.896	0.952	0.917
1-2	0.981	0.958	0.967	0.971	0.985	0.961	0.933	0.952
2-1	0.967	0.926	0.983	0.928	0.985	0.931	0.962	-
2-2	0.815	0.885	0.842	0.867	0.891	0.913	0.837	0.785
2-3	0.893	0.961	0.958	0.948	0.901	0.961	0.920	0.904
2-4	0.898	0.980	0.979	0.985	0.996	0.970	0.999	0.994
2-5	0.929	0.890	0.951	0.900	0.768	0.891	0.963	0.900
2-6	0.843	0.808	0.766	0.834	0.848	0.796	0.816	0.863

る累加汚濁負荷量と累加流出高の関係を概観してみた。

Fig. 6の例に示すように、両者は両対数紙上で直線近似可能で、回帰式 $\Sigma L/A = a \times (\Sigma Q/A)^n$ の係数値を算出することができた (Table 3)。この式を用いて年間負荷量および初期フラッシュ水の影響を検討してみる。

このため、滋賀県の過去10年間の気象データ⁴³⁾の平均年間降水量、平均降水日数に最も近似していた2000年の日降水量をデータとして用いた。降雨イベントは一日に複数回、あるいは逆に複数日連続することがあるが、ここでは日単位で独立したものと考えた。その結果、Table 4に示すように、1年間に降水量が観測された日数は148日であった。そのうち1.5mm未満は26日、1.5mm以上5mm以下の日数は46日、5mmを超える降水量の日数は76日となる。

つぎに3.1で得られた総降水量と総流出量の関係から、降水量1mm以下では路面流出はなく、それを超える分についてはその90%が路面排水となるとした。そして、その累加流出高から回帰式により累加汚濁負荷量を計算した。一方、初期フラッシュ分については計算された累加流出高が、

Fig. 6 Relationship between loading and cumulative runoff volume.

◇ Run1-1 ◆ Run1-2 △ Run2-1 ▲ Run2-2 ○ Run2-3 ● Run2-4
□ Run2-5 ■ Run2-6 ◆ Run3-1 ▲ Run3-2 ● Run3-3 ■ Run3-4

3.5mm未満の時はその全量が、それを超える場合は3.5mm相当分が、初期フラッシュ分に相当するとした。

これらの手法で求めたCOD、T-N、T-P負荷量をTable 4に示す。路面排水の推定負荷量は、COD $17,000\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$ ($46.6\text{kg}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)、T-N $1,920\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$ ($5.26\text{kg}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)、T-P $120\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$ ($0.33\text{kg}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)と試算された。湖沼水質保全計画では道路は市街地で示され、市街地は道路の他に屋根面や宅地等を含む。その汚濁負荷原単位(COD $14.4\text{kg}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 、T-N $3.86\text{kg}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 、T-P $0.20\text{kg}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)¹²⁾と比較すると、T-N、T-Pは同様な値であるが、CODは3倍高い値となり、道路はCOD負荷の寄与が大きいことを示す。本調査地点の交通量は、滋賀県の市街地内を通る県道や一般国道と同等であり、道路網が発達した市街地では道路が主要なCOD汚濁負荷源となりうるということが明らかとなった。また、初期フラッシュ排水負荷量は総汚濁負荷量の50%に相当していた。滋賀県の道路面積(道路統計年報)⁴⁴⁾の 98.8km^2 を用いて年間に発生する初期フラッシュ排水負荷量を推定するとCOD $870,000\text{kg}\cdot\text{y}^{-1}$ 、T-N $91,000\text{kg}\cdot\text{y}^{-1}$ 、T-P $6,000\text{kg}\cdot\text{y}^{-1}$

Table 3 Coefficient of regression model equation. (The number of samples=73)

	T-COD	P-COD	D-COD	TOC	POC	DOC	T-N	P-TN	D-TN	T-P	P-TP	D-TP
a	40.3	17.1	21.1	32.9	10.7	19.6	3.98	0.966	2.46	0.266	0.237	0.028
n	0.604	0.653	0.576	0.571	0.598	0.558	0.658	0.616	0.533	0.642	0.636	0.665
R^2	0.816	0.885	0.674	0.674	0.491	0.642	0.745	0.551	0.655	0.558	0.544	0.535

Table 4 Total stormwater runoff and first flash runoff cut-off in a year.

Rainfall amount	(mm)	0	0.5, 1.0	1.5-5.0	5.5-10.0	10.5-20.0	20.5-40.0	123.0	Total
Days	(days)	217	26	46	28	24	23	1	365
Total rainfall amount	(mm)	0.0	17.0	118.0	215.5	365.0	636.0	123.0	1474.5
Total runoff amount	(mm)	0.0	0.0	64.8	168.8	306.9	551.7	109.8	1202.0
Σ_{total} COD	($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$)	0	0	2170	3320	4490	6290	688	17000
Σ_{total} T-N	($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$)	0	0	219	362	509	738	88	1920
Σ_{total} T-P	($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$)	0	0	14.6	23.5	32.7	46.9	5.4	120
$\Sigma_{first\ flush}$ COD	($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$)	0	0	2170	2450	2100	2010	87	8810
$\Sigma_{first\ flush}$ T-N	($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$)	0	0	219	259	222	213	9	921
$\Sigma_{first\ flush}$ T-P	($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$)	0	0	14.6	17.0	14.5	13.9	0.6	61

となる。本調査地点は県全体の平均交通量の約2倍と推計値は過大ではあるものの、これを初期フラッシュ排水として削減した場合、総汚濁負荷量の50%の削減が可能である。

4. ま と め

本研究では、道路からのノンポイント汚染の対策を考える上で知見を得るため、雨天時に流出する路面排水調査を実施し、その流出挙動や水質特性について検討した。以下に、主な成果を示す。

1) 路面排水量と総降雨量の関係は、密粒舗装などアスファルト表面で生じる蒸発散等により流出損失が生じ総降水量の82~96%が路面排水として流出する。

2) 各水質項目の形態特性の解析より、リンは96%が、COD、TOCは60~70%が粒子態として、また、窒素は74%が溶存態で流出する。

3) 路面排水負荷は、降雨前の路面堆積物以外に降雨中の自動車などによって持ち込まれる外部からの汚濁負荷や先行降雨時の残存汚濁負荷も影響する。

4) 効果的に汚濁負荷を削減できる初期フラッシュ排水量は累加流出高2~5mmの範囲で、概ね3.5mmと推定できた。

5) 累加負荷量と累加流出高の回帰式 $\Sigma L/A = a \times (\Sigma Q/A)^n$ から一年間の雨天時路面排水負荷量と初期フラッシュ排水負荷量を試算し、初期フラッシュ排水は全負荷量の約50%に相当することが明らかとなった。

謝 辞

本研究における調査の一部は滋賀県の受託事業を基に行われたこと、また、調査に際し元(財)琵琶湖・淀川水質保全機構の武井直子氏(東レテクノ(株))の御助力を得たことを記し、関係各位に謝意を表する。

(原稿受付 2006年5月31日)

(原稿受理 2006年9月26日)

参 考 文 献

- 1) 滋賀県環境白書(2004) 滋賀県。
- 2) 国土庁、環境庁、厚生省、農林水産省、林野庁、建設省(1999) 琵琶湖の総合的な保全のための計画調査報告書、348p。
- 3) 榎井正将(2005) 汚濁負荷の削減に向けて—下水道の役割、資源環境対策、41(2)、42-48。
- 4) 國松孝男(1988) 河川からの汚濁負荷流出機構と琵琶湖への汚濁負荷量の推定、滋賀県琵琶湖研究所5周年記念誌、49-63。
- 5) 和田安彦、三浦浩之(1999) 市街地のノンポイント汚染源負荷対策—表面流出過程と流下過程における汚濁制御方策—、月刊下水道、22(8)、22-26。
- 6) 山田淳(2002) Wet weather controlの必要性、水環境学会誌、25(9)、514-517。
- 7) 総務省(2004) 湖沼の水環境の保全に関する政策評価書、139。
- 8) U.S. Environmental Protection Agency(1983) Results of the Nationwide Urban Runoff Program, Vol.1, Final Report, Water Planning Division, U.S. EPA, Washington, DC。
- 9) 永淵修(2004) 都市域からの汚染物質の流出—化学物質による閉鎖性水域の汚染—、環境技術、33(5)、371-376。
- 10) 市木敦之(2004) 道路・大気降下物の影響、環境技術、33(5)、377-380。
- 11) 環境省(2000) 湖沼等の水質汚濁に関する非特定汚染源負荷対策ガイドライン。
- 12) (財)琵琶湖・淀川水質保全機構(2000) 琵琶湖・淀川水環境改善対策総合調査—面源負荷削減対策調査—、304p。
- 13) 小川進、松岡寿(1985) 道路浸透ますの水質調査、昭和60年度東京都土木技術研究所年報、95-104。
- 14) 浅田素之、大垣眞一郎(1996) 都市域における降雨初期雨水排水中のベンゾ(a)ピレンの挙動、水環境学会誌、19(11)、904-909。
- 15) 山田淳也、奥田知明、高田秀重、熊田英峰(1999) 道路路面排水におけるニトロ多環芳香族炭化水素の分析、第33回日本水環境学会年会講演集、357。
- 16) 市木敦之、山田淳、佐藤昌弘、大久保卓也(1999) 高速道路からの降雨時流出水が受水域に及ぼすインパクトに関する基礎研究、第33回日本水環境学会年会講演集、517。
- 17) 松山敦子、小西孝明、新矢将尚、石川宗孝(2000) 高速道路排水の水質挙動と汚濁負荷に対する影響要因の検討、土木学会第55回年次学術講演会、VII-126。
- 18) 新矢将尚、小西孝明、宮西弘樹、石川宗孝(2002) 高速道路排水における汚濁負荷の流出特性、用水と廃水、44(3)、11-17。
- 19) 三浦浩之、和田安彦、尾崎平、中嶋宣信(2003) 雨天時道路廃水の流出先水系での汚濁物質の挙動、用水と廃水、45(8)、779-785。
- 20) 小野芳朗、永留浩、河原長美、谷口守、並木健二、貫上佳則(2000) 道路堆積塵埃上の物質量と環境因子との相関性、水環境学会誌、23(12)、778-785。
- 21) 村上道夫、中島典之、古米弘明(2003) 多環芳香族炭化水素類(PAHs)含有率とそのプロファイルに基づく粒径画分ごとの道路・屋根堆積塵埃の識別、水環境学会誌、26(12)、837-842。
- 22) 平成11年度道路交通センサス(2001) 国土交通省道路局。
- 23) 水村和正著(2002) 水圏水文学、山海堂、東京。
- 24) Jewell, T. K. and Adrian, D. D. (1981) Improved Techniques for Modeling Stormwater Quality, Proc. 2nd Int'l Conference on Urban Storm Drainage。
- 25) 中村栄一(1984) 雨水による路面堆積物の除去速度、土木技術資料、26-8、447-452。
- 26) Vladimir Novotny (2002) Water Quality : Diffuse Pollution and Watershed Management, 2nd Edition, 896p pp.129, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA。
- 27) 脇岡靖明、古米弘明(2001) 都市ノンポイント汚染源負荷流出調査に基づく不透水面堆積負荷流出モデルの検討、土木学会論文集、No.685/VII、123-134。
- 28) 脇岡靖明、古米弘明(2003) 自動採水・測定装置を用いた分流式下水道排水区における長期連続雨天時都市ノンポイント負荷流出調査、水環境学会誌、26(4)、237-242。
- 29) 和田安彦著(1994) ノンポイント負荷の制御、技法堂、150p、東京。
- 30) 滋賀県ホームページ <http://www.pref.shiga.jp/biwako/koai/hakusyo/>
- 31) 田淵俊雄(1985) 降水中の窒素とリン、水質汚濁研究、8(8)、18-22。
- 32) 梅本論、駒井幸雄、井上隆信(2001) 山林域における湿性降下物及び全大気降下物による窒素・リンの負荷量、水環境学会誌、24(5)、300-307。
- 33) 國松孝男、須戸幹(1994) 大気降下物によるチッソ、リンの供給とその変動、環境技術、23(12)、710-713。
- 34) (財)河川環境管理財団(2003) 栄養塩濃度が河川水質環境に及ぼす影響に関する研究、195p。平成15年11月。
- 35) 東京都環境科学研究所ニュース(2001) 雨水の地下浸透と水質問題、No.32、16-19。
- 36) 成澤和幸(2003) 自動車からのアンモニア排出と発生係数測定の必要性、資源環境対策、39(13)、68-72。
- 37) 青井透、池田正芳(2003) 群馬県西部の降雨中窒素濃度の年間変動と低公害車が排出するアンモニア態窒素の関与、水環境学会第37回年会講演集、p.5。
- 38) 松本利恵、唐牛聖文、米持真一(2003) 大気降下物中の窒素化合物濃度の地域特性に関する研究、埼玉県環境科学国際センター報第3号(平成14年度)。
- 39) 青井透、森邦広、池田正芳(2003) 低公害車からのアンモニアガスの発生と関越自動車トンネル排気中窒素成分が谷川岳山頂近辺の降雨に及ぼす影響、土木学会第40回環境工学研究論文集、713-720。
- 40) 萩原耕一著(1964) B.O.D.試験法解説、積文堂、東京。
- 41) 和田安彦、三浦浩之(1997) 都市域ノンポイント汚染源負荷の堆積・流出挙動モデルと流出制御に関する研究、土木学会論文集、No.559/VII-2、61-71。
- 42) 宗宮功編著(2000) 琵琶湖 その環境と水質形成、第2章琵琶湖のまわり、技報堂出版、258p、東京。
- 43) 気象庁ホームページ <http://www.data.kishou.go.jp/etm/index.html>。
- 44) 滋賀県ホームページ http://www.pref.shiga.jp/h/doro/d_ex.html。