特集Ⅲ・非特定水質汚染源の現状と対策

非特定汚染源負荷の流出量とその特性

The characteristics of non-point sources and its Runoff Load

和田 安彦*

1. 緒 言

市街地での諸活動の増大により、私達の生活環境には種々の汚濁物が多量に発生し、それらは地表面や、下水道管きょ内に堆積している。降雨の発生によりこれらの堆積汚濁物は公共用水域に直接流出しており、非特定汚染源負荷流出の主要な要因となっている。

汚濁負荷を効果的に減少させていくためには、路面等への汚濁物の堆積負荷量や、管きょ内堆積負荷量等を含めた雨天時流出負荷を可能な限りの確に、かつ容易に表わすモデルの開発検討が必要になってくる。

ここでは、非特定汚染源流出負荷が重視されるように至った背景について考察し、4都市を例として、都市域における非特定汚染源負荷の状況について示す。

さらに、都市域の分流式下水道の雨水管から雨天時に流出する汚濁負荷の挙動を表わすモデルを適用した結果について述べる。

2. 非特定汚染源流出負荷クローズ・アップの背景

(1) 都市流出負荷重視の背景

アーバン・ランノフ、ストーム・ランノフが注目される背景には次のものがある¹⁾。

- ① 都市活動の増大化に伴って都市環境に蓄積される負荷量が増大してきた。
- ② 都市化によって雨水流出率が高くなり、都市の雨水流出量が増大して、都市環境に蓄積された負荷が掃流されやすくなった。
- ③ 都市において使用される水量が増大し、都市排水量が大きなウェイトをしめ、排水を含めた都市流出が都市域の水量、水質に大きな影響をもつようになってきた。

④ 総量規制等の実施に伴い、水域環境における流入負荷についてのクリティカルな状態が多く発生するようになり、都市流出、降雨流出における負荷を無視して論じられなくなった。

⑤ 閉鎖性水域においては特に流入負荷の挙動が水質に大きな影響を与えるようになり、可能な限り流入負荷量を減少させねば水質保全を行い得ない状態になってきた。

以上にあげたように、従来から都市に少しずつ蓄積されてきた負荷がかなりの量にのぼり、都市への汚濁物の「ストック」が増大している。さらに人口集積によって雨水流出率が高くなり、小さな降雨時においても雨水流出量がこれらの負荷流出に影響を持つようになっている。その上、都市内の水使用量の増大化の促進に伴い、都市では汚水等を含めた排除すべき水量が増加している。特に大都市域では閉鎖性水域が多く存在するため、都市内の水質保全の上では都市雨水流出を「引きがね」とした流出負荷量は非常に多くなっている。

(2) アーバン・ランノフの構成

アーバン・ランノフの構成は非常に複雑であるが、次のように(図-1)模式化されよう。

私たちの生活活動や生産活動によって発生した人為的な負荷は、都市や農村、山地等を含めた地域におい

図-1 点源、非点源負荷の地域流出の概念

* 関西大学工学部土木工学科助教授(京大工博)

Yasuhiko WADA

て、特定汚染源負荷と非特定汚染源負荷に分けられる。特に非特定汚染源負荷は降雨時に流出する割合が多く、これらの流出負荷は「ストーム・ランオフ」と呼ばれるものと、降下媒塵やごみ等の降雨時ではなく常時に発生する負荷量もある。

生活排水や事業所排水等の特定汚染源負荷にも、常時流出するものと降雨時に一度に集中的に流出する負荷（処理場放流負荷、降雨時の集中放流）もある。

3. 都市域における非特定汚染源負荷流出量

都市域からの非特定汚染源負荷の流出量を、分流水下水道の整備がなされている4市について検討した。

(1) 都市域の概要

対象とした都市域は、北九州市（朝日ヶ丘）、神戸市（花隈）、山形市（緑町）、千葉市（さつきが丘団地）である（表1）。

北九州市の朝日ヶ丘排水区域²⁾は、市北部沿岸地域の中央に位置した約48 %の勾配を有した丘陵地域で、対象面積は14.9ha（屋根面積率24.8%）である。北部から東都にかけての臨海地帯には重化学工業が発達し、南西部は宅地化が進行している。

神戸市の花隈排水区域³⁾は、市街地中央に位置した約66.5 %の勾配を有した地域（12.37ha）で、屋根面積率は43.0%である。東部は第2種住居専用地域、住居地域で、西部は商業地域である。

山形市の緑町排水区域⁴⁾は、市街地中央に位置した

総面積13.69ha（屋根面積率 41.0%）の区域である。北部は住宅地域、南部は商業地域で、市街地周辺は住居および水田からなっている。

千葉市のさつきが丘団地排水区域⁵⁾は、市域北部の丘陵地に位置し、総面積 93.2ha（屋根面積率 12.0%）で北北西方向に約13 %の勾配を有している。宅地開発が活発で調査地域内の約90%が住宅団地であり、公園、学校用地も広い。

表2には4排水区域の降雨水質、屋根排水水質、雨水管きょ排水水質の各降雨時における平均値を示している。以下、これをもとに検討を加える。

(2) 降雨水質

4排水区域の降雨水質には次のような特徴がみられる。

- ① 降雨初期の雨水濃度が比較的高い。
- ② 初期降雨濃度は先行晴天日数、先行降雨状況の影響を受け、先行晴天日数が長いと初期降雨濃度は高くなる。
- ③ 降雨水の濃度は、大気中の浮遊粉塵量の影響を受けている。

水質項目別では、以下の様な特徴が見られる。

- ① BOD、CODは、排水区による差が比較的大きく、北九州市A排水区での平均値（7.7 μ m, 7.2 μ m）は、神戸市H排水区のもの（1.1 μ m, 1.3 μ m）の6～7倍となっている。
- ② SSでは、山形市で特別な値を除いては、4排水区とも平均値で7 μ m前後の値となっている。
- ③ T-Nでは、神戸市H排水区の値がやや低い（0.37 μ m）他は、およそ1～2 μ m程度となっている。
- ④ T-Pでは、山形市M排水区が他都市の排水区域よりも1オーダー高い濃度を示し（0.168 μ m）であり、他は、0.05～0.02 μ m以下となっている。

これらは各都市の状況によって降雨水の含有負荷量、および成分が異なることを示している。

(3) 屋根排水

屋根排水水質の総合的な特徴は次のとおりである。

- ① 降雨初期の屋根排水は高濃度であり、1時間後には初期濃度の1～3割程度に排水濃度は低下する。
 - ② 屋根排水の初期濃度は、先行晴天状況の影響を受ける。
 - ③ 屋根排水濃度は降雨強度の影響も受け、降雨強度の大きい程、流出排水濃度は高い。
- 水質項目別の実測結果からは、次の事が明らかとなった。

表1 対象地域の都市排水特性

都市名	排水区	道舗装路率(%)	自保有自動車数(台)	夜間人口(人)	人口密度(人/ha)
北九州市	朝日ヶ丘(A)	100	282,905 (53年)	2,054	138
神戸市	花隈(H)	100	236,014 (54年)	1,997	162
山形市	緑町(M)	100	79,714 (53年)	1,089	79.6
千葉市	さつきが丘団地(S)	100	184,786 (56年)	12,125	130

表2 雨天時流出源別水質

排水区	降雨量 (mm)	流出率	降				雨				水				屋				根				排				水				雨				水				排				水				(単位 ppm)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
			pH	BOD	COD	SS	T-N	T-P	pH	BOD	COD	SS	T-N	T-P	pH	BOD	COD	SS	T-N	T-P	pH	BOD	COD	SS	T-N	T-P	pH	BOD	COD	SS	T-N	T-P	pH	BOD	COD	SS	T-N	T-P																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
北九州市 (朝日ヶ丘)	39.8	0.45	4.3	11.6	14.4	16	2.604	0.176	6.9	9.6	40.7	70	2.852	0.142	7.3	79.4	48.6	321	3.319	0.713																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
	10.0		4.1	12.1	7.1	2	0.311	<0.010	6.3	1.9	7.0	34	0.660	<0.010	7.0	9.7	10.8	51	1.222	0.949																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
	11.6	0.78	5.4	4.5	4.0	6	0.444	<0.010							7.1	84.1	52.0	296	7.818	0.742																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
			4.7	2.5	3.3	7	0.910	<0.010																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	平均		4.6	7.7	7.2	7.8	1.067	<0.052	6.6	5.8	23.9	52.0	1.756	<0.076	7.1	57.7	37.1	222.6	4.120	0.801																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
神戸市 (花隈)	27.0	0.28							6.8	4.1	6.1	32	1.328	<0.04	7.2	42.2	50.4	394	7.187	1.373																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
	6.5	0.66							6.5	2.9	17.0	73	1.940	0.078	7.1	11.2	15.7	37	3.447	0.497																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
	3.5	0.34	6.3	1.2	2.0	10	0.355	<0.014							7.4	30.7	36.6	39	8.045	0.961																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
	5.5	0.34	5.6	1.0	0.6	5	0.383	0.022							6.9	27.1	42.1	79	10.014	1.236																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
	平均		6.0	1.1	1.3	7.5	0.369	<0.018	6.7	3.5	11.6	52.5	1.634	<0.059	7.2	27.8	36.2	137.3	7.173	1.017																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
山形市 (緑町)	24.0	0.30	4.1	2.3	3.3	8	1.5	0.32							6.4	18.9	19.8	273	3.393	0.448																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
	0.5	0.22	3.6	7.0	9.9	42	2.6	0.10	4.9	4.5	24.9	65	7.05	0.38	6.7	18.6	15.7	31	3.894	0.517																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
	11.0	0.37	4.6	1.6	3.3	2	1.2	0.13	5.9	3.2	9.9	60	2.05	0.135	6.5	27.4	24.0	108	5.369	1.114																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
	3.0	0.70	4.8	3.4	N.D	1	0.3	0.12							6.6	51.0	18.8	107	4.941	1.030																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
	平均		4.3	3.6	5.5	13.3	1.40	0.168	5.4	3.9	17.4	62.5	3.72	0.217	6.6	29.0	19.6	129.8	4.399	0.777																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
千葉市 (さつきが 丘団地)	2.0	0.19													7.7	4.7	7.4	63	3.422	0.096																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													</

- ① BODは、北九州市A排水区がやや高くなっている(5.8 mg/l)が、排水区間の差は少なく、平均として3～4 mg/l 前後にあるといえる。
 - ② CODでは、北九州市A排水区のもの、工場地域に隣接していること等から、比較的高くなっており(23.9 mg/l)、山形市M排水区、神戸市H排水区の2倍、千葉市S排水区の3倍程度である。
 - ③ SSでは、千葉市S排水区以外の3排水区は50～60 mg/l 程度であり、S排水区だけ、他の約1/2の値となっている。
 - ④ T-Nは、山形市M排水区、千葉市S排水区が3.6 mg/l 前後、北九州市A排水区、神戸市H排水区1.7 mg/l 前後となっている。
 - ⑤ T-Pは、降雨水質の傾向と同様で、山形市M排水区が他排水区の3～5倍高い値となっている。
- (4) 雨水管きょ排水
- 4都市の雨水管きょ排水には次のような特徴がみられる。
- ① 降雨後5分～1時間内に排水水質はピーク濃度を示す。
 - ② 雨水管きょ排水負荷に占める降雨水含有負荷の割合は小さく、屋根堆積負荷、路面堆積負荷の占める割合は比較的大きい。特に有機性物質の占める割合が大きいが、SSの占める割合は低く、未舗装の空地等からの流出が多い。
- 各都市の降雨時平均雨水排水水質から、次のような特徴が指摘しうる。
- ① BODでは、降雨、屋根排水水質における傾向と同様に、北九州市A排水区のもの、山形市M排水区はこれの1/2、千葉市S排水区は1/3程度となっている。
 - ② CODは、北九州市A排水区、神戸市H排水区が37 mg/l 前後、山形市M排水区、千葉市S排水区では、この1/2の18 mg/l 前後である。
 - ③ SSでも、北九州市A排水区で高い濃度を示し、(223 mg/l)、神戸市H排水区、山形市M排水区は、およそその1/2(130 mg/l 前後)、千葉市はさらにその1/2(52.0 mg/l)となっている。
 - ④ T-N、T-Pは神戸市H排水区、千葉市S排水区での濃度が比較的高く、北九州市A排水区、山形市M排水区においてはやや低くなっている。
 - ⑤ 各都市とも調査日の降雨状況等により水質濃度が大きく異なり、特にSSの変動幅が大きい。

4. 都市域の分流水管からの流出負荷量

非特定汚染源の一つである分流水管の水質、流出負荷量について、その流出特性を的確に表現する分流水管流出負荷モデルを構成した⁶⁾。

4.1 モデルの考え方と基礎式

モデルは流出負荷量が流量および先行降雨等の初期条件を表わす堆積負荷量により変化すると考えたものである。

(1) 2段流出モデル

運動方式は流量に関与する流出分と堆積負荷量の積に関与する流出分を加えたもので、式—(1)、(2)に示す。

$$Q_s = a \cdot Q^2 + b \cdot S \cdot Q \quad (1)$$

$$S = S_0 - \sum Q_s \quad (2)$$

ここで、 Q_s ：流出負荷量、 Q ：流量、 S_0 ：初期堆積負荷量、 S ：堆積負荷量、 a 、 b ：係数

(2) 堆積負荷運動評価モデル

流出負荷量を、堆積負荷量と流量の積で表わし、さらに流量の変化状態も加味したもので、式—(3)、(4)で表わす。

$$Q_s = K \cdot S^2 \cdot Q^2 \cdot Q'^{1-P} \quad (3)$$

$$S = S_0 - \sum Q_s \quad (4)$$

ここで、 Q' ：ワンステップ前の流量、 K 、 P ：係数

4.2 対象地域とモデル計算

(1) 対象地域および対象降雨

対象とした排水区は、先の4排水区である。対象降雨は、神戸市4降雨、山形市3降雨、千葉市4降雨、北九州市2降雨の合計13降雨である。

(2) 初期堆積負荷量の算定

初期堆積負荷量の算定は対象地域面積、実測水質、降雨流出量、工種別面積等をもとにして、流出負荷量を降雨、屋根、路面、管きょからによるものに分け、その総和に割増係数を乗じたものを初期堆積負荷量とした。なお、各発生源別堆積負荷量の算定における基本的な考え方および基礎式は表3に示すものである。

4.3 モデルの評価

(1) 降雨、地域特性による係数の推定

分流水管流出負荷の挙動を把握する事が目的である当モデルは、各係数が降雨特性、地域特性により容易に得られることが重要である。多変量解析の応用によりモデルの係数を降雨、地域特性により推定する式を構成した。係数の算定値と推定値との相関係数は大半が0.80～0.95の範囲にあり、この推定係数により雨水管流出負荷の算定がほぼ妥当に行いうる。

図-2 シミュレーション結果

(2) 推定係数によるシミュレーション結果
降雨、地域特性により推定された係数によるシミュレーション結果の一例を図-2に示す。シミュレーションと実測値の相関係数は0.70～0.95、合致率95～80%で雨天時雨水管流出負荷の再現が可能であると評価しうる。

なお、ここで合致率は次式によるものを用いた。

$$E=100-\sqrt{\sum(L-Q_s)^2} / TL \times 100 (\%) \quad (5)$$

表 3 初期堆積負荷量算定の基礎式

	考 え 方	基 礎 式
降 雨	降雨の汚濁負荷は屋根、路面の面積より算定	$S_1=P_1 \times R \times C \times (A-A_2-A_3)$
屋 根	降雨による屋根負荷流出量とその平均水質より求める	$S_2=P_2 \times R \times C \times A_2$
路 面	降雨による路面負荷流出量とその平均水質より求める	$S_3=P_3 \times R \times C \times A_3$
管きよ	全負荷量から降雨、屋根、路面負荷量を引いた値とする	$S_4=\sum S-(S_1+S_2+S_3)$
	S : 負荷量 P : 平均水質 R : 降水量 C : 流出係数 A : 面積	1 : 降 雨 2 : 屋 根 3 : 路 面 4 : 管 き よ

(E : 合致率, L : 実測流出負荷量, TL : 総流出負荷量)

両モデルは、都市域での分流式雨水管からの非特定汚染負荷流出の予測に有効となる。

参 考 文 献

- 1) 和田安彦; 非点源負荷の地域内定量例と考察, 水処理技術, Vol. 22, No.11, 1981
- 2) 昭和55年度, 非特定汚染源による汚染防止対策調査, 北九州市
- 3) 昭和54年度, 非特定汚染源による汚染防止対策調査, 神戸市
- 4) 昭和53年度, 非特定汚染源による汚染防止対策調査, 山形市
- 5) 昭和56年度, 非特定汚染源による汚染防止対策調査, 千葉市
- 6) 和田安彦, 三浦浩之; 都市域の分流式雨水管流出負荷のモデル化, 環境技術, Vol. 13, No. 2, 1984