

分流式下水道雨天時汚濁負荷流出の 地域特性に関する研究

金 泰成¹・山田 淳²・野村 淳³

¹学生会員 立命館大学大学院 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

²正会員 工博 立命館大学教授 環境システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

³非会員 工修 新薬開発研究所 (〒061-1405 北海道恵庭市戸磯452-1)

近年、分流式下水道の進捗とともにノンポイント汚濁物による公共用水域の汚濁の重要性は増加している。都市域の地表面に堆積した汚濁物が雨天時に雨とともに公共用水域へ流入する。本研究は、分流式下水道においても雨天時汚濁対策が必要であるとの立場から、降雨特性や地域特性に応じた施設の計画、設計、管理方法等に関する基準化のための基礎的な検討をおこなった。その結果、分流式下水道における降雨特性、地域特性が降雨流出と汚濁負荷流出特性に及ぼす影響を明らかにした。

Key Words : *Separate Sewer System, Nonpoint Pollution, Runoff Characteristics, Storm Event, Catchment Area Characteristics, Rainfall Characteristics*

1. はじめに

日本の下水道では、当初から都市部に対して合流式が採用されてきた。しかし、その後整備地域が郊外や都市化進行地域に広がるにつれて分流式が採用されてきている。分流式では汚水と雨水が分離されているため、雨水による汚濁はないものと考えられてきた¹⁾。しかし、雨水は土地や建物の屋根などに堆積した汚濁物を含んで流出するため、受水域への影響を無視できないことが分かってきた²⁾。これらノンポイント汚濁源といわれるところからの汚濁負荷を削減するための方策も考えられ始めているが³⁾、対策を検討するための基礎データが収集できていない。また、ポリュートグラフの再現モデルについては、Hydro Works, MOUSE, SWMM などの市販化されたモデルや国内でも土研モデルが使われているが、現象を再現し他に適用するには十分でない。従来から、分流式雨水管渠は、最大雨水流出量のみを指標として設計されてきたため、降雨量や降雨強度の異なるような降雨特性に対して、また、人間活動に伴う汚濁ポテンシャルの違い、地形や管きよ整備方法の違いなどの地域特性に適用できるモデルに

はなっていない。

本研究は、水質汚濁問題はないという前提で建設された分流式下水道の雨水管きよから、実際には高濃度の流出があり、閉鎖性水域を受水域とする場合には対策が必要となっていることから、降雨特性や地域特性に応じた施設の計画、設計、管理方法等に関する基準化のための基礎的な検討をおこなうものである。そのため、多様な降雨特性、地域特性をもった基礎データを収集し、ハイドログラフやポリュートグラフを再現できるよう、モデルのパラメータ設定に必要な汚濁負荷流出特性を検討する。降雨が短時間集中的で季節的にも広く分布しており、土地利用の形態にも固有の特徴がある日本の場合には外国と異なった特性があるものと考えられる。

2. 対象排水区と調査概要

(1) 対象排水区

対象排水区として湖沼を最終放流先とする分流式下水道が設置されている7都市を選定した。これらの都市は、関東、中部、近畿など中央日本の地域にあり、いずれも有機物汚染や富栄養化問題を抱える

地域である。表-1に対象地域の概要を示し、表-2に土地利用の表面工種を示す。

排水区の利用地域はそれぞれ特徴があり住居地域から商業地域までを含んでいる。また、雨水管のマンホール数も排水区面積や地形等の状況により異なっている。排水区面積も5ha程度の小さいものから60haを越える大きなものである。一方、土地利用の表面工種も多様で、不透水面積比率も38%から81%と広く分布している。

これらのことから、地域特性を検討するために最低必要な排水区を選定されたと考えられる。

(2) 調査概要

各排水区における雨天時調査は一部排水区において著者らが実施したが、遠隔地の排水区については、前田らの研究⁴⁾およびその基礎となった調査報告書を利用した。調査は現場での雨天時を中心とする測定調査と採水サンプルの分析からなる。降雨量は現

場で詳細に測定され、水位は1分ごとに測定された後流量に換算された。採水は降雨に応じて2分から15分毎に実施されその後いくつかの項目について分析された。調査結果の概要を表-3に示す。報告書を含めた全データをその後収集した排水区の土地利用図や管渠流量計算表を用いて精査し、最終的に7排水区32降雨分のデータを解析対象とした。

表-3 調査結果の概要

排水区ID	実測降雨数	平均採水数	測定項目	分析項目
SO	5	31	・降雨量 ・水位	・SS ・COD ・BOD ・T-N ・T-P
OS	4	48		
AK	3	47		
TT	6	46		
UK	5	48		
TN	2	39		
OO	7	47		

表-1 対象排水区の概要

排水区ID	県名	用途地域	マンホール数	最終放流先
SO	滋賀県	第1種低層住居専用地域 第2種低層住居専用地域	84	琵琶湖
OS	滋賀県	第1種中高層住居専用地域 第1種住居地域	174	琵琶湖
AK	千葉県	第1種住居地域、住居地域 商業地域、近隣商業地域	29	手賀沼
TT	茨城県	第2種住居地域 商業地域	5	霞ヶ浦
UK	茨城県	第1種低層住居専用地域 第1種住居地域	50	霞ヶ浦
TN	長野県	指定なし	47	諏訪湖
OO	長野県	準工業地域 商業地域	47	諏訪湖

表-2 排水区表面工種別面積率

排水区 ID	面積 (ha)	工種別面積比率 (%)										
		不透水面				浸透面						
		屋根	道路	その他	合計	間地	裸地	畑地	芝・公園	山地	水田	合計
SO	46.71	17.3	22.0	0.6	39.9	32.8	10.0	0	5.1	12.2	0	60.1
OS	66.18	13.3	19.0	5.4	37.7	31.5	13.5	3.6	3.9	0	9.8	62.3
AK	15.88	17.1	19.9	2.1	39.1	38.2	10.2	4.8	7.7	0	0	60.9
TT	5.26	25.9	13.9	41.2	81.0	19.0	0	0	0	0	0	19.0
UK	67.00	16.6	21.9	0.2	38.7	33.3	15.6	9.1	3.3	0	0	61.3
TN	14.20	19.7	22.5	0	42.2	37.4	20.4	0	0	0	0	57.8
OO	5.50	33.1	16.9	12.2	62.2	29.7	8.1	0	0	0	0	37.8

(3) 調査結果

調査結果の一降雨単位のを表-4に示す。先行晴天期間は、10～726hrsと広く分布しており、総降雨量は2.5～48.5mm、降雨継続時間は0.3～14.7hrs、平均降雨強度は0.5～21.0mm/hrと同様に広く分布している。また、降雨量と流出高を用いた流出率では、不浸透面が多い地域でも0.5以下にとどまっており、0.1程度の低い流出率もみられる。このことは、中小降雨における流出状況は管渠設計の基準となっている流出係数とはかなり異なることを示している。

汚濁負荷に関しては、1降雨の比負荷流出がSSで0.16～46.25kg/haと変化し、CODで0.05～4.28

kg/haといずれも大きな幅がある。先行晴天期間、降雨特性の影響もあるが、排水区のもつ人間活動のポテンシャルの違いが反映していると考えられる。同様のことは水質についてもみられる。平均水質でも排水区によってはSSで汚水並み、CODで20mg/lを越える結果になっており、降雨初期のいわゆるファーストフラッシュ時には高濃度になっているものと考えられる。その例を図-1に示す。典型的なファーストフラッシュ現象がみられ、流量にかかわらず初期濃度が高い。このことは、分流式下水道雨水管渠からの汚濁物に対する対策の必要性と、効果的な汚濁制御の必要性を示唆している^{3), 5)}。

表-4 調査結果（一降雨単位）

降雨ID	調査日 Yr/M/D	先行晴天期間 (hr)	降雨			流量			汚濁負荷			
			総降雨量 (mm)	降雨継続時間 (hr)	平均降雨強度 (mm/hr)	流出量 (m ³)	流出高 (mm)	流出率	SS比負荷 流出量 (kg/ha)	SS 平均水質 (mg/l)	COD比負荷 流出量 (kg/ha)	COD 平均水質 (mg/l)
SO1	94/08/21	204	32.4	5.03	6.44	4726.8	10.12	0.31	7.04	70.1	2.95	29.3
SO2	94/09/06	10	3.4	3.97	0.86	416.5	0.89	0.26	0.43	47.9	0.20	22.5
SO3	94/09/08	23	13.4	2.15	6.23	1104.6	2.36	0.18	1.20	51.2	0.48	20.4
SO4	99/08/27	25	7.0	0.33	21.00	742.8	2.45	0.35	0.83	36.6	0.35	15.5
SO5	99/09/07	54	2.5	0.62	4.05	238.8	0.79	0.32	0.25	32.2	0.05	6.6
OS1	95/04/18	42	14.7	4.13	3.56	2263.4	3.42	0.23	4.89	164.4	0.59	19.7
OS2	95/04/28	62	5.1	1.92	2.66	434.4	0.66	0.13	0.28	68.5	0.06	15.7
OS3	95/11/14	158	22.3	10.92	2.04	3918.1	5.92	0.27	1.57	27.3	0.53	9.2
OS4	95/11/19	96	25.4	9.28	2.74	4283.0	6.47	0.25	2.53	40.7	0.48	7.7
AK1	93/12/20	86	7.8	6.28	1.24	253.7	1.60	0.20	0.85	55.2	0.23	14.9
AK2	93/12/26	142	3.1	5.62	0.55	97.6	0.61	0.20	0.23	51.3	0.12	27.4
AK3	94/03/08	52	14.4	7.50	1.92	533.1	3.36	0.23	2.35	75.3	0.47	15.0
TT1	95/05/12	30	16.3	4.82	3.38	236.6	4.50	0.28	3.91	88.3	0.81	18.3
TT2	95/05/15	45	25.5	6.83	3.73	392.6	7.46	0.29	5.51	76.9	0.86	11.9
TT3	95/05/29	69	2.6	2.78	0.93	14.0	0.27	0.10	0.23	104.0	0.09	38.2
TT4	95/06/03	113	27.6	4.02	6.87	417.5	7.94	0.29	14.19	181.6	1.99	25.5
TT5	95/06/08	47	13.8	5.47	2.52	138.3	2.63	0.19	2.44	105.0	0.58	25.0
TT6	95/06/13	87	5.7	5.68	1.00	63.8	1.21	0.21	0.53	55.5	0.17	17.8
UK1	95/03/03	58	9.4	7.03	1.34	1151.4	1.72	0.18	1.27	73.8	0.17	9.7
UK2	95/03/10	137	7.8	6.53	1.19	1098.2	1.64	0.21	0.98	59.7	0.23	14.3
UK3	96/03/07	151	8.9	7.45	1.19	1403.9	2.10	0.24	3.24	170.9	0.29	15.5
UK4	96/03/15	176	22.4	10.37	2.16	2010.6	3.00	0.13	2.00	116.3	0.26	15.4
UK5	96/03/17	28	6.3	7.05	0.89	817.6	1.22	0.19	1.26	114.7	0.14	13.0
TN1	94/06/16	57	6.4	8.03	0.80	220.9	1.56	0.24	0.80	54.5	0.37	25.3
TN2	94/07/01	36	4.7	5.75	0.82	107.9	0.76	0.16	0.16	21.7	0.10	13.6
OO1	95/04/12	55	15.5	9.22	1.68	326.8	5.94	0.38	8.35	148.1	1.00	17.7
OO2	95/06/14	16	17.1	6.53	2.62	404.0	7.35	0.43	4.57	79.1	0.67	11.7
OO3	95/06/15	10	47.5	3.93	12.08	976.4	17.75	0.37	46.25	261.7	4.28	24.2
OO4	95/07/08	36	48.5	14.72	3.30	1174.8	21.36	0.44	21.92	207.0	1.44	13.6
OO5	95/08/21	726	10.7	3.22	3.33	156.3	2.84	0.27	9.06	337.4	1.16	43.1
OO6	97/05/15	12	19.3	6.65	2.90	422.6	7.68	0.40	2.58	79.9	0.44	13.5
OO7	97/05/20	80	10.4	4.72	2.20	206.8	3.76	0.36	2.10	56.9	0.45	12.1

SO1

TT4

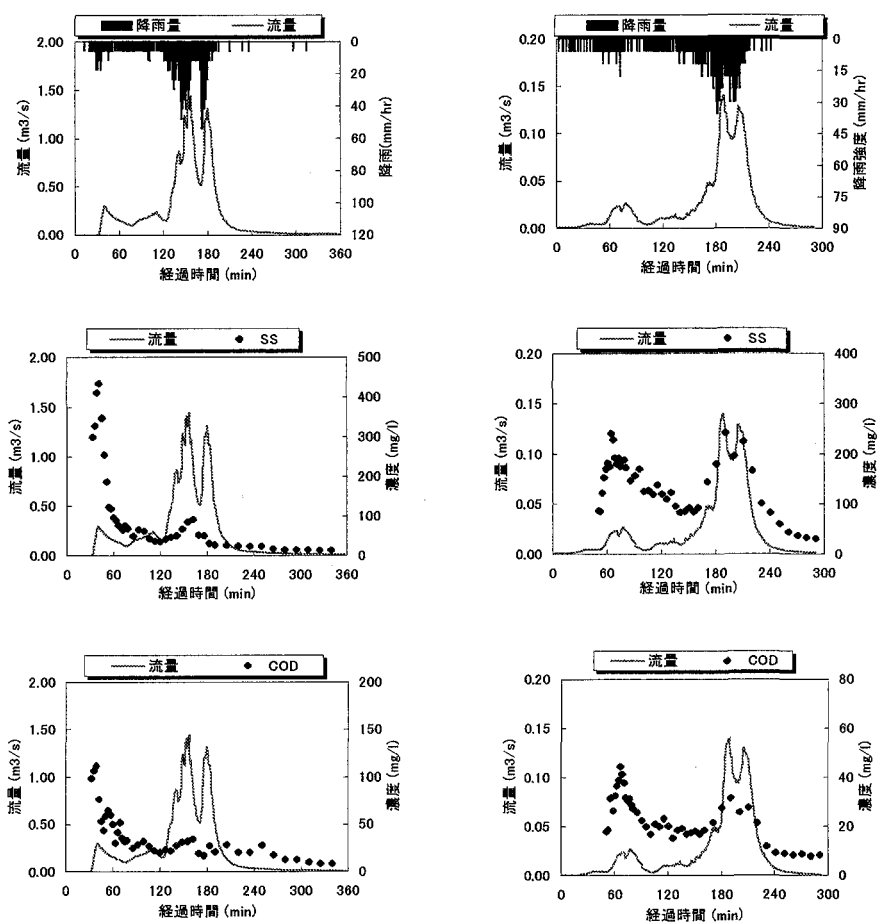


図-1 ハイドログラフとポリュートグラフの例（実測データ）

3. 降雨流出と地域特性

(1) 総降雨量と流出率

総降雨量が増加すると流出率が増加していくといわれており、浸透面での傾向は顕著であるといわれているが、実排水区であり実証されていない。図-2に総降雨量と流出高の関係を示し、不浸透面積率50%以上（平均72%）と50%未満（平均40%）の2グループに分けた回帰曲線を示す。降雨量の増加とともに流出率が増加する傾向がある。しかし、初期損失を除くと不浸透面積率の高いグループでの増加はわずかであり、不浸透面積率の低いグループではかなり増加している。

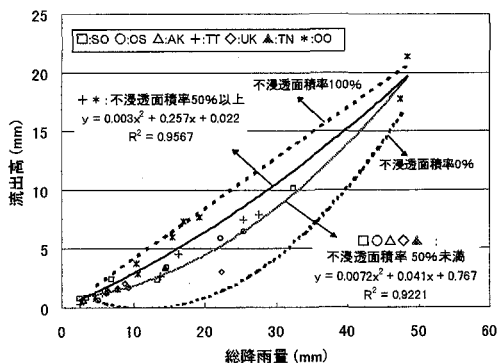


図-2 総降雨量と流出高（観測と予測）

そこで、2本の回帰曲線とそれぞれの平均不透透面積率を用いて、降雨量に対する不透透面積率100%, 0%の流出高を求め図-2に回帰曲線を加えた。不透透面積率100%の場合には初期損失を除きほぼ直線で増加しており、大きな降雨でさらに流出率が増加するの予想できない。不透透面として認定されている場合でもかなりの浸透性を持っていることが推定される。不透透面積率0%の場合には、表面流出が増加し急激に不透透面の流出率に近づき、55mm以上では急激に不透透面並の流出率に近づくものと推測される。

(2) 一降雨内での流出率変化

上記は、一降雨内での流出率の変化の結果であるから、いくつかの降雨を対象に降雨開始から降雨終了までの累積降雨量を区分してその変化を図-3に示す。降雨強度の影響もあるが、流出率が増加していく状況がよく分かる。

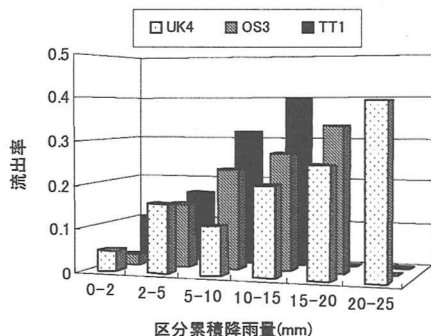


図-3 降雨量増加に伴う流出率変化

4. 汚濁負荷流出と地域特性

(1) 一降雨内での水質変化

区分累積流出高と水質の関係を示す。いくつかの降雨を選んでSSについて図-4に、CODについて図-5に示す。ここでは、降雨強度を示していないので、水質が時間とともに変動している例はあるが、全体としては降雨初期に水質値が高く次第に低くなっていくが、降雨別、排水区別にみるとかなりの違いがある。これらの傾向は降雨初期により顕著に現れている。SSでは600mg/lにも達し、CODでも100mg/lに達する降雨、排水区がある反面、ほとんど変化しないケースもある。しかし、いずれのケースも環境基準と比較して無視できない値であり、対策なしに無処理で放流することには問題がある。し

たがって、雨水流出水の管理、制御が課題であり、降雨初期から終期に至る水質の予測が必要となる。

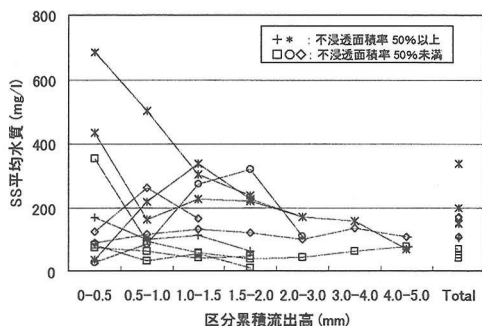


図-4 区分累積流出高とSS平均水質

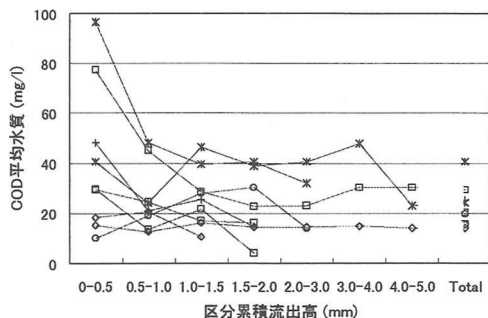


図-5 区分累積流出高とCOD平均水質

(2) ファーストフラッシュ

負荷量からみたファーストフラッシュ現象を検討するために、全流出高の当初1/4にあたる25%流出高に含まれる流出負荷量の全流出負荷量に対する比率を求めた。図-6にSS、図-7にCODの場合を

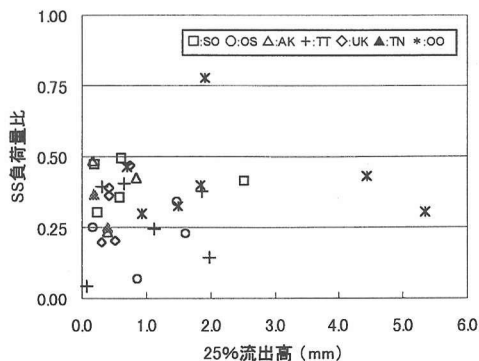


図-6 25%流出高のSS負荷量比

示す。ほとんどの降雨で当初に 1/4 を上まわる流出
 負荷がありファーストフラッシュ現象が確認された。
 平均的には SS, COD とともに 0.4 程度の負荷量が初
 期に流出している。なかには、0.8 に達する場合も
 あった。0.25 を下回っているのは後期集中型降雨の
 一部の場合である。

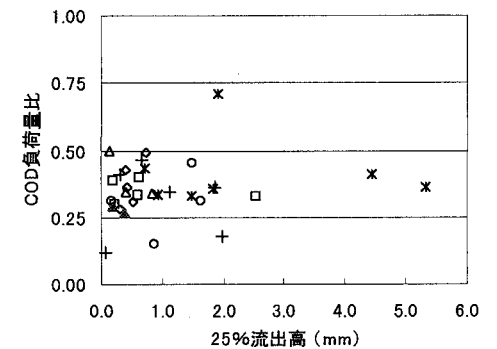


図-7 25%流出高の COD 負荷量比

(3) 総降雨量と比流出負荷量

汚濁負荷流出量は流出量と水質によって定まるも
 のであり、降雨特性と地域特性の影響を受ける。表
 -4 からも分かるように、同じ 20mm 程度の降雨量
 であっても排水区によって比負荷量は大きく異なっ
 ている。排水区による差は先行晴天期間の影響を受
 けてはいるが、人間活動による地域の汚濁ポテンシ
 ャルの差もかなりあると判断できる。総降雨量との
 関係を、SS については図-8 に、COD については
 図-9 に示す。SS 負荷量の場合は、不透透面の多い
 場合に降雨量に対して大きく増加しており、従来か
 らの掃流の考え方に近い結果となっている。COD
 負荷量については、浸透面の多い場合に降雨量に対

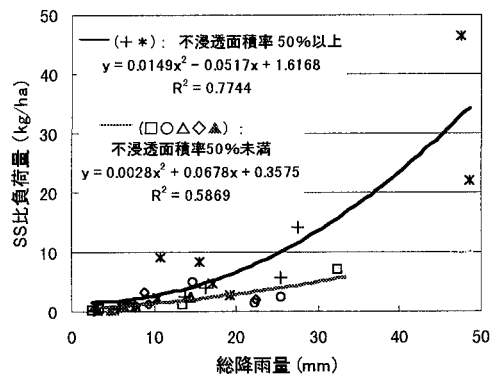


図-8 総降雨量と SS 比負荷量

して大きく増加しており、浸透面からの土砂の流出
 や溶解分の流出があることを示している。

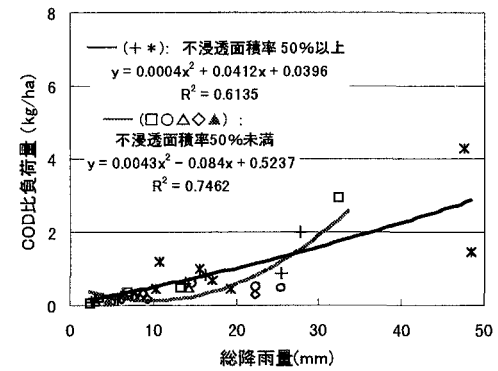


図-9 総降雨量と COD 比負荷量

(4) 汚濁ポテンシャル

汚濁ポテンシャルは、自動車交通や生産活動を含
 む人間活動によって都市表面に供給され、降雨とと
 もにノンポイント汚濁物として流出する汚濁物のフ
 ラックスと定義される。道路面、屋根、間地などに
 堆積する汚濁物の挙動は複雑であるが、ここでは流
 出負荷量を先行晴天期間で除した簡単な指標で表す
 こととし、表-4 の降雨から降雨量 15mm 以上、時
 間強度が一時的に 10mm 以上の場合に堆積負荷の
 全量が流出するものと仮定して、汚濁ポテンシャル
 を求めた。表-5 にその結果を示す。SS の場合、用
 途地域によって大きな違いがあり、住居地域、商業
 地域、準工業地域と次第に大きくなっている。この
 ことは、都市地域表面堆積物の現存量を調査した結
 果⁶⁾ と酷似している。COD の場合は、SS の場合と
 若干順序が異なるもののほぼ同じ傾向がみられる。

表-5 汚濁ポテンシャル (単位: kg/ha/day)

排水区 ID	汚濁 ポテンシャル		用途地域
	SS	COD	
UK	0.36	0.05	第1種低層住居専用地域 第1種住居地域
SO	1.04	0.43	第1種低層住居専用地域 第2種低層住居専用地域
AK	1.18	0.23	第1種住居地域、住居地域 商業地域、近隣商業地域
OS	1.35	0.20	第1種中高層住居専用地域 第1種住居地域
TT	3.31	0.55	第2種住居地域 商業地域
OO	16.39	1.61	準工業地域 商業地域

TN は対象降雨がないので除く

流出水質の値を支配するのは汚濁ポテンシャルであり、その汚濁ポテンシャルは土地利用の用途地域によって大きく変わることが明らかになった。

5. 結論

いままでほとんど検討されていなかった水質汚濁に強く関係する中規模以下降雨の雨天時汚濁負荷流出機構を解明するため、7排水区32降雨の詳細な実測値を用いて降雨特性と地域特性による影響を検討した。その結果次のような成果を得た。

(1) 不浸透面の流出率は降雨量増加によってもあまり変わらないが、浸透面積比率の高い排水区では増加していく。

(2) 不浸透面と浸透面の流出量の差は明らかであるが、現在の定義があいまいなため、個々の排水区での予測を大きく狂わせる可能性がある。

(3) 降雨初期のSS, CODの値が非常に高い排水区があり、全体的にみても水質平均値は高い。環境基準、下水の放流基準からみて何らかの対策が必要と判断される。

(4) ほとんどの降雨でファーストフラッシュ現象がみられ、当初の1/4流出高で全体の半分近くの負荷流出がある。

(5) 一降雨比負荷量は、降雨量の影響と不浸透面積比率の影響を受けているが、SSとCODではその傾向が異なる。

(6) 排水区の汚濁ポテンシャルは用途地域の影響が強い。

以上の結果から、中規模降雨による流出汚濁対策に必要な基本情報が得られた。具体的な対策と効果

を検討するためには、降雨特性とポテンシャルを含む地域特性を考慮する必要がある。そのツールとしてハイドログラフとポリュートグラフを記述するモデルの開発が課題となる。

謝辞：本研究を行うにあたり、調査と実験に協力いただいた環境計画研究室の大学院生に感謝する。また、下水道新技術推進機構から観測データの提供を受けたことを付記し謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本下水道協会：下水道施設計画・設計指針と解説，日本下水道協会，pp.18-19，1995.
- 2) 山田淳，市木敦之，舟木琢也：都市不浸透域堆積物の発生源分離に関する研究，第32回日本水環境学会年会講演集，pp.182，1998.
- 3) 金 泰成，山田 淳，文 亨夫：雨水貯留施設による雨天時ノンポイント流出汚濁物のリアルタイム制御，環境システム研究論文集，Vol.28，pp.105-113，2000.
- 4) 前田正博，伊藤紀夫，本靖夫：ノンポイント汚濁負荷調査と削減対策，下水道協会誌，Vol.33，No.404 pp.15-20，1996.
- 5) 船山吉久：雨天時下水に関わるリアルタイムコントロールシステムの開発について，下水道研究発表会講演集，36，pp.186-188，1999.
- 6) Yamada, K., Funaki, T., Honda, S. and Sugihara, M.: Study on diffuse source pollution management for land use and drainage system planning. *Proceedings of 4th International Conference on Diffuse Pollution*, pp. 436, 2000.

STUDY ON CATCHMENT AREA CHARACTERISTICS OF POLLUTANT LOAD RUNOFF FROM SEPARATE SEWER SYSTEM DURING STORM EVENT

Tae-Sung KIM, Kiyoshi YAMADA and Jun NOMURA

According to the progress of sewer system consolidation, the importance of the pollution in the public water bodies by the non-point pollutant load is increasing. The pollutant deposited on the surface of the catchment area and discharged during the storm event flow into the public water bodies. To preserve water quality in the public water bodies and to propose some effective strategies, it is necessary to clear the runoff characteristics of pollutant load associated with the catchment area characteristics. In this study, we compared the runoff characteristics of the pollutant load using series of observed data during storm event that were collected from storm sewer pipe over 7 cities for the 32 storm events. As a result of analysis, we quantified the contribution of land use, amount of rainfall and antecedent dry period. It is of great use for modeling the relationship between urban development and water quality conservation.