

(14) 都市下水排除方式の提案とその適用性に関する研究

A PROPOSAL OF URBAN DRAINAGE SYSTEM AND STUDY ON ITS APPLICATION

酒井 彰*, 張 昇平*, 川口 智哉*, 赤坂 和俊*

Akira SAKAI *, Sheng Ping ZHANG *, Tomoya KAWAGUCHI *, Kazutoshi AKASAKA *

ABSTRACT : For water quality management, it is important to control not only point pollutants load, but also nonpoint pollutants load during wet weather.

In this study, we have first discussed the principles and measures to control nonpoint pollutants load during wet weather. Based on the results, a new drainage system, which takes advantage of both combined and separated drainage systems, has been proposed.

Some simulations on pollutants load behaviors has been performed and the results have shown that the proposed drainage system is possible to collect and treat nonpoint sources more efficiently in comparison with the traditional drainage systems, and very suitable to high-density urban area nonpoint pollutant control.

KEYWORDS : Pollutants load runoff, Urban runoff control, Urban drainage sysytem, Nonpoint sources

1. はじめに

従来、水域の水質管理は主に点源汚濁負荷源に起因する有機物負荷を制御対象として進められてきた。こうした水質管理の限界を示す水域の例として、富栄養化現象のため水質改善の停滞している閉鎖性水域やより安全で快適な水質及び環境が要請されている都市河川をあげることができる。

今後の水質管理においては、栄養塩類の制御を進めるとともに、多様な汚濁源から流出する汚濁負荷制御が重要となる。とくに、点源負荷に起因する汚濁負荷制御対策が進んだ都市域では、水質管理において雨天時汚濁負荷制御を組み込むことの必要性が高いと考えられる。しかし、既往の都市下水排除方式は、雨天時の汚濁負荷流出特性に関する十分な知見のもとで、その制御を意図した設計がなされてきたとは言えず、これまでの雨天時汚濁に対する取組みも、既往の排除方式の雨天時負荷流出に係わる欠陥の軽減、解消を主眼としたものであった。

今後は、より長期的視点から多様な雨天時汚濁負荷制御方を提示し、水質管理体系の一環として都市域における雨天時汚濁負荷制御を組み込んでいかなければならないと考える。

このような認識に基づき、酒井ら(1993a)は、雨天時汚濁負荷制御方を検討していくため、発生源、貯留・堆積過程の異なる汚濁負荷を分離して取り扱うことを主眼として、都市域における雨天時汚濁負荷流出モデルを再構成し、このモデルをベースに、ノンポイントソースを含めた汚濁負荷の挙動に着目して、既往の都市下水排除方式の特性について考察した。また、雨天時汚濁負荷制御の実効をあげていくためには、効果的なノンポイントソースの制御が可能となる排除方式の採択が必要であるという考えのもとに、路面流出水を汚水とともに収集する都市下水排除方式が提案された(酒井ら, 1993b)。

本論では、上記の研究を踏まえて、効果的なノンポイントソースの制御を意図して先に提案した都市下水排除方式における汚濁負荷の流出特性、処理特性について他の排除方式との比較、ノンポイントソースの供給条件の相違による影響の観点から分析し、提案した排除方式の適用条件について考察する。また、検討対象とする水質指標として新たに栄養塩類を取りあげ、雨天時流出汚濁負荷に関する有機物指標との相違について明らかにする。

* 株式会社 日水コン (NIHON SUIDO CONSULTANTS CO., LTD.)

2. 都市下水排除方式の提案

ここでは、ノンポイントソースの制御を意図した都市下水排除方式の提案を行う。

既往の排除方式におけるノンポイントソースの挙動に関して、酒井ら(1993a)は、1) 分流式では基本的に無処理で放流されるものの、2) 合流式下水道は降雨時に流出するノンポイントソースの一部を下水道系内に取り込むことができ、流末での対策として貯留施設を設けることによりノンポイントソースを収集処理できる排除方式ということができるかと考察している。

しかし、既往の合流式下水道は、地表面工種による雨水流出水の水質レベルの相違等を考慮することなく、すべての雨水流出水を対象に収集されるため、雨天時汚濁負荷の収集機能面で効果的でない面がある。さらに、雨水による希釈により、収集した汚濁負荷量に対する処理機能面が低下する傾向がある。

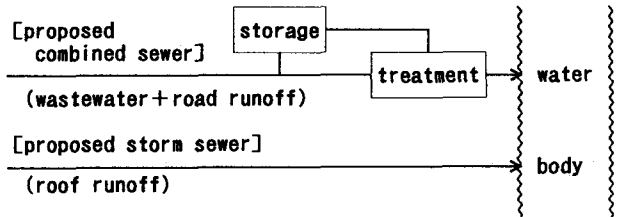


Fig. 1 Concept of the proposed drainage system

Fig. 1 に提示する排除方式は、屋根面に比べてノンポイントソースの堆積の著しい道路面からの流出水を汚水とともに収集することにより、ノンポイントソースを効果的に収集・処理し、かつ一時貯留水の効果的な処理を図ることを意図した方式である。この排除方式の特徴を以下に列記する。

- ①混合排除系（汚水＋路面流出水）において、遮集能力に対する雨天時流出負荷の収集効率は合流式と比べて向上することができ、一時貯留水を含め高い処理効率が期待できる。
- ②雨水排除系（屋根流出水）から流出する汚濁負荷量及び流出水の水質は、分流雨水管と比べて小さくなり、雨水利用を意図した場合有利になる。

3. 排除方式による雨天時汚濁負荷削減特性

3-1 モデル排水区及びシミュレーション条件の設定

①モデル排水区条件

Table 1 の諸元を有するモデル排水区を対象として年間シミュレーションを行った。対象とする水質指標は、COD 及び T-N、T-P とした。

②モデルパラメータ

ノンポイントソースの供給、堆積に係わる条件としては、1) 降雨水質、2) 地表面工種すなわち道路と屋根それぞれにおける晴天時のノンポイントソース供給速度、3) 清掃、飛散等による晴天時におけるノンポイントソースの減少速度を設定することとし、実測調査結果及び既往の調査資料をもとに設定した。

既往の調査資料を含め、降雨水質の調査結果を Table 2 に示す。Fig. 2, 3 には、東京都内の中心市街地

Table 1 Drainage basin conditions

items	conditions
drainage basin area[ha]	100
impermeable area ratio	0.65
road area ratio	0.25
population density[person/ha]	160
specific wastewater amount[l/person/day]	400
specific pollutant amount[kg/ha/day]	
	COD 4.48
	T-N 1.92
	T-P 0.224
inflow ratio of point source to storm sewer(%)	2.5
	(0.0)*

* case for draining management

Table 2 Concentration of rain water [mg/l]

R[mm]	COD	T-N	T-P	comments
20.0	3.4	0.75	0.016	Tokyo
7.0	2.7	2.00	0.027	"
12.0	3.0	0.90	0.017	"
5.0	5.0	1.90	0.031	"
11.6	4.0	0.44	<0.010	Kitakyushu *
5.5	0.6	0.38	0.022	Kobe *
24.0	3.3	1.50	0.320	Yamagata *
11.0	3.3	1.20	0.130	"
9.0	1.6	1.42	0.048	Chiba *

* reference 3)

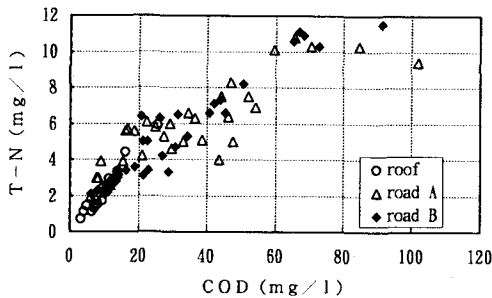


Fig. 2 Relationship between COD and T-N in nonpoint source runoff

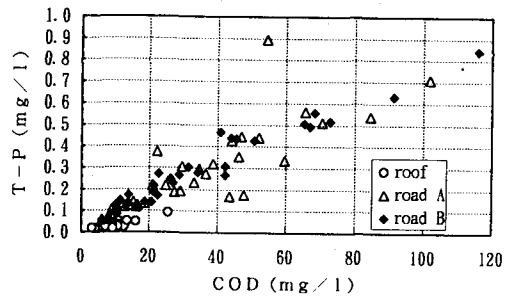


Fig. 3 Relationship between COD and T-P in nonpoint source runoff

における実測結果における路面及び屋根からの流出水のCOD濃度とT-N及びT-P濃度の関係を示す。ノンポイントソース供給速度は、酒井ら(1993a)が提示したモデルを適用し、Fig. 2, 3の水質値を概ね再現できる数値を設定した。Table 3にノンポイントソース供給条件等の設定値を示す。なお、CODについては、ノンポイントソースの条件による排除方式毎の雨天時汚濁負荷の削減特性に対する感度を分析するため、降雨水質、ノンポイントソース供給速度を3ケース設定した。

Table 3 Parameters of nonpoint source supply and decrease

items	case-a	case-b	case-c
supply rate nonpoint source[kg/ha/day]			
COD	1.000	0.500	0.200
T-N	—	0.050	—
T-P	—	0.005	—
rainfall concentration[mg/l]			
COD	3.00	2.00	1.50
T-N	—	0.60	—
T-P	—	0.02	—
ratio of supply rate (road:roof)			
COD	5:1		
T-N	5:1		
T-P	10:1		
decrease rate of nonpoint source[l/day]	0.1		

また、Fig. 2, 3から、ノンポイントソースの流出挙動において今回検討対象とした3水質指標間では大きな差異がないと判断されることから、ノンポイントソースの流出モデルは同一のものとし、負荷流出係数は同一の方針のもとで設定することとした。汚濁負荷流出に係わるモデルパラメータをTable 4に示す。

Table 4 Model parameters

items	value
initial rainfall loss[mm]	2.0
critical rainfall intensity of nonpoint source runoff[mm/hr]	0.5
nonpoint source runoff coefficient[l/mm]	0.2
pollutant discharge coefficient[l/mm]	
storm sewer	0.25
combined sewer	*
initial value of sediment	
storm sewer	**
combined sewer	1/2*DWL
dimension of sediment	1.0
dimension of specific discharge	1.3

* set to fit dry weather condition

** limiting value for long time simulation

DWL:dry weather load

③簡易処理及び高級処理水質

各水質指標毎の処理水質は、わが国の都市下水処理場における平均的な晴天時流入水質、簡易処理及び高級処理水質を参考としてTable 5のように設定した。

Table 5 Relationship between inflow and outflow concentration

	COD		T-N		T-P	
		[mg/l]				
secondary treatment	COD>50	C*0.2	T-N>25	C*0.7	T-P>3.5	C*0.6
	10<COD<50	10	17.5<T-N<25	17.5	2.1<T-P<3.5	2.1
	COD<10	C	T-N<17.5	C	T-P<2.1	C
primary treatment	COD>50	C*0.7	T-N>25	C*0.9	T-P>3.5	C*0.857
	35<COD<50	35	22.5<T-N<25	22.5	3<T-P<3.5	3
	COD<35	C	T-N<22.5	C	T-P<3	C

C:inflow concentration

④年間シミュレーション

年間汚濁負荷流出シミュレーションは、酒井ら(1993a)が提示したモデルを適用し、A気象台の1年間降雨データを用いた365日間連続シミュレーションにより行った。晴天時については、堆積負荷量の変化を解析的に解き、雨天時には1時間を計算ステップとして計算した。年間の有効降雨量は1,553mm、雨天時として計算した有効降雨の継続時間は584時間である。

3-2 提案した排除方式の汚濁負荷削減特性

ここでは、CODを対象に、ノンポイントソース供給条件は平均的条件として Table 3・ケースbのもとで、提案した排除方式を含めた排除方式毎に雨天時の流出負荷量、雨天時流出負荷量の配分、晴天時を含めた年間総排出負荷量について分析する。

(1) 雨天時流出負荷量の構成及び雨天時水質

Fig. 4 は、水質指標毎に雨天時流出負荷量の汚濁負荷源の内訳を排除方式、排除系統別に示したものである。

汚濁源の内訳のうち、降雨負荷とノンポイントソースについては、排除方式に係わらず同一となっており、雨天時流出負荷量の総量の相違は都市雨水排除系内堆積負荷量に起因する流出負荷量の差によっている（図中①～③）。雨天時流出負荷量の総量では分流式が小さいが、合流式と提案した排除方式では、ほぼ同程度の雨天時流出負荷量となっており、雨水排除系内堆積負荷量に起因する流出負荷量の差も小さい。排除系統別でみると、分流雨水管に比べて提案した排除方式の雨水排除系の負荷量が低減しており、この負荷量は分流雨水管における降雨負荷とノンポイントソースの合計値（広義のノンポイントソース）よりも小さい。

Fig. 5 は、排除系統別に年間の雨天時平均水質を示したものであるが、雨天時の都市下水を高濃度（混合排除）系と低濃度（雨水排除）系に分離しようとした目的は達成されていることがわかる。同図には、広義のノンポイントソースを降雨流出量で除した雨水流出水の平均水質（⑥）を併せて示したが、提案した排除方式の雨水排除系の水質は、雨水流出水の平均水質とほぼ同程度となっている。

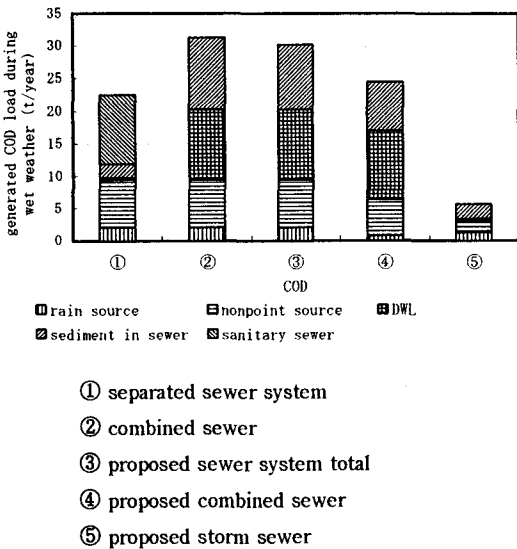


Fig. 4 Composition of generated load during wet weather

(2) 雨天時流出負荷量の配分

Fig. 6 は、雨天時流出負荷量の配分状況を排除方式別に示したものである。合流式及び提案した排除方式では、貯留施設を設ける場合には、雨天時流量が晴天時時間最大流量を越えた段階で貯留が開始され、貯留水は降雨終了後全量高級処理されるものとした。なお、いずれの排除方式においても貯留施設設置地点まで流出量は全量遮集されるものとした。

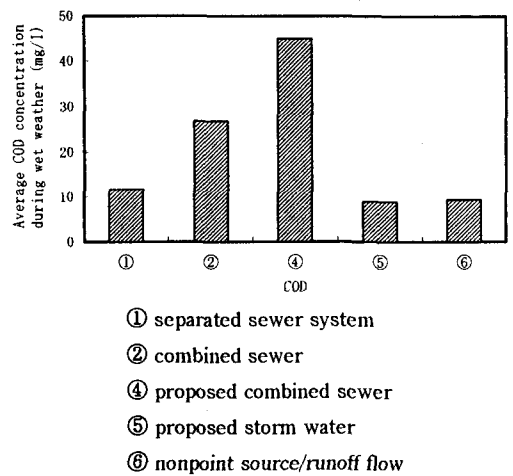


Fig. 5 Average inflow concentration during wet weather

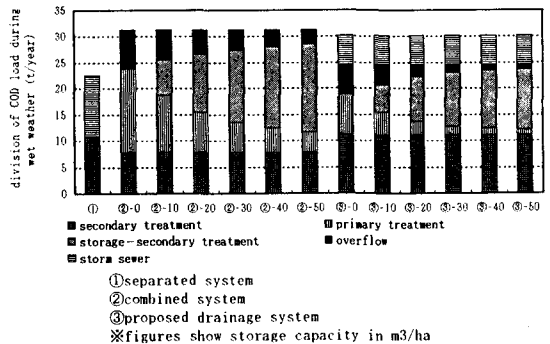


Fig. 6 Division of generated load to drainage routes during wet weather

提案した排除方式では、貯留施設の無い場合において高級処理される負荷量は合流式よりも大きく、分流式と同程度となっているが、簡易処理、無処理放流負荷量が発生しているため、合流式と同様貯留施設の導入は不可欠であるといえる。貯留施設設置の場合においては、提案した排除方式の混合排除系では貯留容量を $20\text{m}^3/\text{ha}$ 以上にとっても貯留負荷量は増加しておらず、この排除方式は、合流式と比べて小さな貯留容量で、貯留対象となる汚濁負荷量のほとんどを貯留できるという特性を有していることが示されている。また、簡易処理あるいは無処理放流される負荷量については、提案した排除方式における混合排除系からの負荷量は合流式に比べて小さい。

(3) 水域へ排出される年間負荷量

Fig. 7 は、年間の水域への総排出負荷量と貯留容量の関係を各排除方式について示したものである（図中の(1),(3),(4)）。合流式と提案した排除方式は、貯留容量の増加に対して排出負荷量は減少傾向を示すが、貯留容量が $20\text{m}^3/\text{ha}$ まででは、提案した排除方式の削減負荷量が大きい。なお、貯留水の処理水質は降雨毎の貯留水平平均水質に対し Table 5 の処理水質を適用した。

貯留容量が大きくなった場合、提案した排除方式に比べ合流式の削減負荷量が大きくなっているが、これは、合流式においても貯留施設設置地点まで流出負荷量は全量遮集されるものとしていること、ならびに提案した排除方式に係わる以下の条件設定のためと考えられる。

①点源負荷の一部が、誤接等により雨水排除系に流入するという条件を設定した。

②不浸透面積の約40%を占める道路面積全体からの雨水流出水を混合排除系に取込んでおり、Fig. 6 に示すようにこの排除系から簡易処理、無処理放流される負荷量が生起している。

Fig. 7 には、上記①に対応し、分流式及び提案した排除方式において雨水排除系には、点源負荷が混入しないという条件のもとでの年間排出負荷量を併せて表示した（図中の(2),(5)）。排水区域内で点源負荷源に対する排水管理が徹底された条件下では、提案した排除方式は、既往の排除方式である分流式、合流式よりも汚濁負荷制御の面で優れていることが示されている。

Fig. 8 は、Table 3 に示したように、CODに関するノンポイントソース供給条件及び降雨水質が、それぞれ $1.0, 0.5, 0.2 \text{ kg/ha/day}$ 、 $3.0, 2.0, 1.5 \text{ mg/l}$ と変化したとき、年間の水域への総排出負荷量と貯留容量の

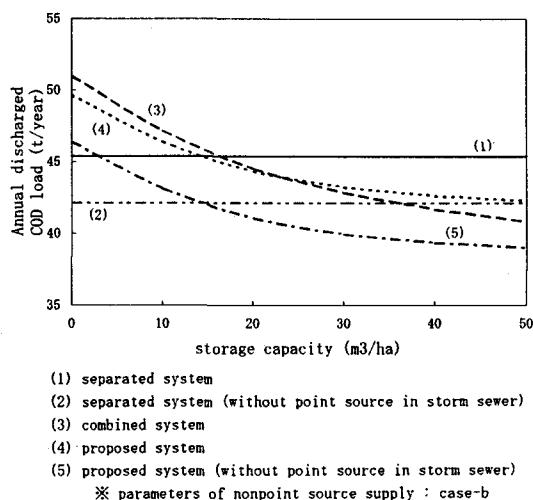


Fig. 7 Relationship between storage capacity and annual discharged COD load (case without point source inflow to storm sewer)

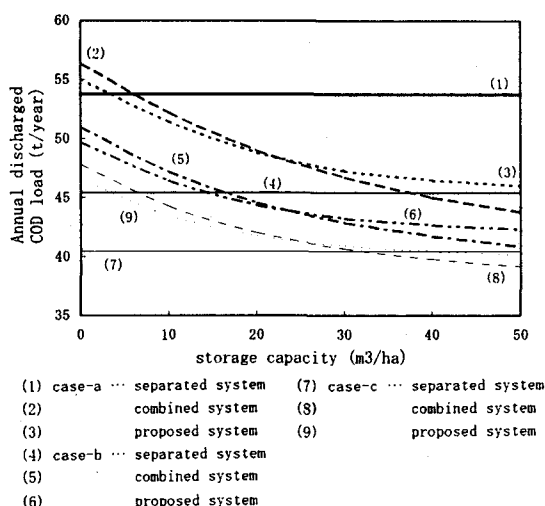


Fig. 8 Relationship between storage capacity and annual discharged COD load (case with different nonpoint source supply conditions)

関係を各排除方式について示したものである。Fig. 8より、点源負荷量に対してノンポイントソースに起因する汚濁負荷発生量が大きくなるほど、より小さな貯留容量で合流式あるいは提案した排除方式の年間排出負荷量は分流式と同程度となる。すなわち、ノンポイントソースの発生量が大きい場合においては、分流式下水道は、ノンポイントソースを制御対象とし得ないという点から、より高い汚濁負荷削減率を求めていることが困難になることが指摘できる。

以上の結果は、貯留施設の設置地点まで全ての雨水流出水は遮集されるという前提のもとで得られたものであるが、多くの合流式下水道では遮集管の容量に限界があり、雨水吐き室が存在している。これに対し、提案した排除方式は、遮集能力に制約のある条件下で雨天時流出負荷を効果的に収集できる排除方式として有効と考えられる。したがって、提案した排除方式においては、雨天時流出負荷を効率的収集を図れるよう、ノンポイントソースに起因する汚濁負荷流出量の面的な分布特性を考慮し、混合排除系に取り込む雨水排水面を選択的に決定していく必要がある。

3-3 窒素、リンの年間汚濁負荷削減率

ここでは、検討対象とする水質指標として新たに取り上げたT-N、T-Pについて、雨天時流出汚濁負荷に関する有機物指標との相違について整理する。

Table 6に窒素、リンの年間削減率を排除方式毎に示す。点源負荷量に対する雨水流出に伴う汚濁負荷流出量が有機物を指標とした場合に比べて相対的に小さいため、汚水と雨水をともに収集する排除方式では雨天時には流出水による希釈の影響が大きく、雨天時流出負荷の処理は効果的ではない。また、排除方式に係わらず、高級処理レベルのもとでは、T-N、T-Pの晴天時汚濁負荷に対する削減率が小さいため、年間の総排出負荷量に占める雨天時汚濁負荷の割合は小さくなっている。

Table 6 Comparison of annual T-N, T-P load between three drainage systems

		(t/year)					
		wet weather		dry weather		annual total	
		total ①	nonpoint source ②	①	②	②	③
T	storm sewer	2.62	2.62	1.36	1.36	0.49	0.49
	sanitary sewer	4.56	3.19	63.78	44.64	47.84	0.94
	separated system total	7.18	5.81	1.36	1.36	64.27	45.13
	removal rate		19.1%		0.0%	29.8%	28.7%
	combined sewer	10.97	9.25	1.36	1.22	60.47	42.33
N	removal rate		15.7%		10.3%	30.0%	27.8%
	storm sewer	1.78	1.78	0.56	0.56	0.53	0.53
	combined sewer	8.99	7.17	0.80	0.63	60.13	42.09
	proposed sewer total	10.77	8.95	1.36	1.19	60.66	42.62
	removal rate		16.9%		12.5%	29.7%	27.8%
P	storm sewer	0.25	0.25	0.11	0.11	0.06	0.06
	sanitary sewer	0.53	0.32	7.44	4.46	4.78	0.94
	separated system total	0.78	0.57	0.11	0.11	7.50	4.52
	removal rate		27.2%		0.0%	39.7%	38.5%
	combined sewer	1.23	0.98	0.11	0.09	7.05	4.94
P	removal rate		20.3%		18.2%	30.0%	28.6%
	storm sewer	0.18	0.18	0.04	0.04	0.06	0.06
	combined sewer	1.03	0.77	0.07	0.05	7.01	4.91
	proposed system total	1.21	0.95	0.11	0.09	7.07	4.97
	removal rate		21.5%		18.2%	29.7%	28.5%

①:generated, ②:discharged, ③ constitutive rate(%)

inflow rate of point source to storm sewer = 2.5% of DWL

combined sewer and proposed system has 20m³/ha storage capacity

一方、窒素においては、提案した排除方式は他の排除方式に比べて、ノンポイントソースの除去率が高くなっており、この排除方式の採択により雨天時流出負荷量の収集効率を向上するとともに、高度処理の導入

による栄養塩類の処理レベルを高度化することにより、雨天時汚濁負荷削減率の向上の可能性が示唆される。

4. おわりに

提案した排除方式は、都市域における雨天時汚濁負荷を制御していくための対策の一環として汚濁負荷制御機能の向上を目的としたものであり、シミュレーション結果から、分流雨水管に比べ雨水排除系は低濃度に、合流管に比べ混合排除系は高濃度に分離することは可能と判断された。また、既往の排除方式のもとでの改善対策に比べ、より高い汚濁負荷削減レベルを達成する可能性を明示することができた。

さらに、この方式を適用していくうえで、以下の2点が重要であることが判明した。

- (1) 誤接防止等排水管理の徹底：提案した排除方式は、汚濁負荷制御の観点から高濃度（混合排除）系と低濃度（雨水排除）系に分離することを意図するものであり、点源負荷の混入等この分離機能を妨げようとする要因を排除する必要性は高い。
- (2) 混合排除系に取込む雨水流出面の工種の選択：混合排除系の汚濁負荷収集効率及び高級処理対象率を高いレベルに維持し、汚濁負荷削減効率を最大化する取込み条件を明らかにする必要がある。

窒素、リンについては、雨水流出水が低濃度であるため、雨水による希釈の影響が大きく現れ、雨天時流出水の効果的な処理は難しい面があり、雨天時汚濁負荷の削減レベル向上のためには、提案した排除方式を採用による汚濁負荷収集効率の向上に併せて、窒素・リンの除去を目的とした高度処理が必要と考えられる。

最後に、都市域における雨天時汚濁負荷制御のための対策手法を確立していくうえでの今後の課題を以下に提示する。

- (1) 窒素、リンの除去を目的とした高度処理レベルのもとでの雨天時汚濁負荷制御の必要性及び汚濁負荷削減効果を明らかにしていく必要がある。
- (2) 提案した排除方式においては、混合排除系で収集する雨水流出水を選択していく必要がある。このためには、ノンポイントソース、降雨水質の地域条件を反映した定量化が必要であり、データを収集・解析するとともに、大気中に存在している汚濁負荷等に対しては本来の発生源に立ち返った汚濁負荷流出機構の解析が求められる。
- (3) 雨天時の負荷に対して、今回は発生濃度を説明変数として単純に処理水質を設定したが、処理水質の設定に結果が影響を受ける面が大きい。汚水に起因する負荷と面的あるいは雨水排除系内に堆積している汚濁負荷の処理特性の相違を含め、雨天時処理の実態を把握するとともに、反映させていく必要がある。

【参考文献】

- 酒井彰、張昇平、平井真砂郎（1993a）都市雨水排除系からの汚濁負荷流出特性，環境工学研究論文集，Vol. 30, pp. 101-110
- 酒井彰、張昇平、平井真砂郎、川口智哉（1993b）雨天時汚濁負荷制御を考慮した都市下水排除システムの提案，第30回環境工学研究フォーラム講演集，pp. 133-135
- 和田安彦（1985）非特定汚染源負荷の流出量とその特性，環境技術，Vol. 14, No. 1