

(11) 雨天時負荷流出挙動とそのモデル化

～雨天時流出汚濁負荷の制御に関する研究(2)～

関西大学工学部 和田 安彦

1. 緒 言

現在の下水道システムは晴天時を中心とした家庭排水や工場排水等の点源汚濁物の処理に目が向けられ、雨天時に都市の中で多量に発生し流出してくる非点源汚濁物の制御と処理には十分でないところが多い。そのため、雨天時に都市から多量に流出する負荷により公共用水域の汚濁の原因の一つともなっている。わが国においては都市の単位面積についての一降雨流出負荷量は 1.0～2.7 t/Km² (BOD) といわれている。

この論文では公共用水域を守るために雨天時にどのような汚濁物がどのように流出し、その量は降雨によってどのように変化するのかを明らかにするための基礎的研究とそれらをもとにした雨天時下水道からの流出負荷のモデル化の検討を行なう。各種モデルの利用等の面からの評価を行なうとともに新しい雨天時負荷流出モデルの基礎的考察を行なうものである。

2. 雨天時都市汚濁物の流出

(1) 雨天時流出負荷量

平均的な降雨から各流域で流出する負荷量はわが国で行なわれた研究をまとめると表-1のように表わされる。単位面積当たりBODで1.0～2.7/Km²にある。これらの汚濁源は主として、①晴天時負荷、②管きょ内堆積負荷、③降雨負荷、④下水道周辺環境負荷に分けられ、谷端川排水区¹⁾(542ha)

表-1 汚濁流出負荷ポテンシャル

場所	東京都内 谷端川 排水区	札幌市内 排水区	大阪府 菊水 排水区
BOD (t/Km ²)	1～1.6	2.32	2～2.7

では1日を対象として発生負荷量を考えると表-2に示すように、BODでは晴天時に

流下している負荷量が多く

(66%)、管きょ内堆積物

(20.8%)、下水道周辺環

境負荷(13.2%)となっ

ている。SSのそれはそれぞれ、

9.9%、60.7%、29.4%で

BODとSSとは管きょ内堆

積負荷量に大きなウェイトの

違いが存在する。負荷量のウ

ェイトは対象とする時間によ

っても異なる。従って発生源

については平均降雨時間につ

いて検討する必要がある。表

表-2 谷端川における雨天時流出汚濁源

発生源	項目	BOD		SS		単位面積当りの負荷量	
		堆積負荷(t)	割合(%)	堆積負荷(t)	割合(%)	BOD(t/Km ²)	SS(t/Km ²)
1) 晴天時負荷		8.0t/日	66.6	5.9t/日	9.9	1.48	1.089
2) 管きょ内堆積負荷		2.5 (2～3)	20.8 (62.2)	36.0	60.7 (72.9)	0.461	6.642
3) 降雨負荷		—	—	—	—	—	—
4) 下水道周辺環境負荷	①路面	0.66	5.5 (16.4)	3.0	5.1 (6.1)	0.1218	0.5535
	②間地	0.05	0.4 (1.2)	—	—	0.0092	—
	③屋根	0.041	0.3 (1.0)	0.4	0.7 (0.8)	0.0076	0.0738
	④雨水マス	0.77	6.4 (19.1)	14.0	23.6 (28.3)	0.1421	4.354
	⑤汚水マス	—	—	—	—	—	—
* (): 晴天時負荷を除いたもの。	⑥側溝						
		12.021		59.3			

一3は菊水排水区における平均降雨時間(7.37時間)における汚濁源の割合を表わしたものである。夜間の降雨については晴天時負荷量は小さいが平均して表わしており、平均降雨によって管きょ内堆積負荷量や下水道周辺環境負荷量が流出してしまうとしている。昭和49年12月2日から51年12月25日までの2年間における全降雨の平均継続時間は7.37時間であり、この内、実降雨時間の平均時間は2.97

時間である。この表でみると管きよ内堆積負荷量のウェイトが非常に大きくなる。

表-3 菊水排水区における平均降雨時間の流出汚濁源(7.34時間)

項目	BOD		SS		NH ₄ -N		PO ₄ -P		
	発生負荷(t)	割合(%)	発生負荷(t)	割合(%)	発生負荷(t)	割合(%)	発生負荷(t)	割合(%)	
晴天時負荷	0.83	23.0	0.41	1.5	0.057	90.1	0.085	96.7	
管きよ内堆積負荷	2.23	61.8	17.58	62.6					
下水道周辺環境負荷	路面	0.21	5.8	0.824	2.9	0.00094	1.5	0.00117	1.3
	間地	0.0184	0.5						
	屋根	0.035	1.0	0.576	2.0	0.00529	8.4	0.00176	2.0
	雨水マス	0.284	7.9	8.708	31.0				
	汚水マス側溝								
合計	3.6074		28.098		0.06323		0.08793		

3. 管きよ内堆積汚泥の特性と負荷量

(1) 堆積汚泥量の算定

管きよ内に堆積している汚泥量と負荷量が多いがその定量化は一般に困難である。全国の資料があれば管きよの配、径別、土地利用別の堆積負荷量が求められるが、ここでは限られた地域での密な調査資料であり単位管きよ長当りの管きよ断面積(X cm²)と、堆積汚泥量(Y cm³)との関係を表わすと図-1のようになる。多小のばらつきは管きよ内堆積量調査にも存在するため最小2乗法で回帰すると

$$Y = 2.17 \times 10^{-8} X^{2.405} \quad (1)$$

となる。この関係式をもとにモデル地域における堆積汚泥量が推定できる。この流域における平均勾配は0.60‰である。

(2) 管きよ内堆積負荷量

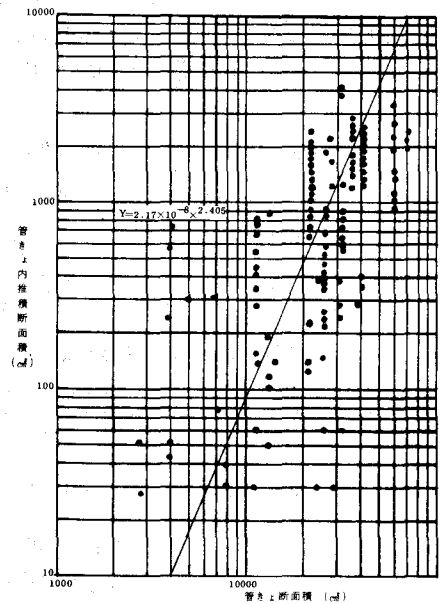
管きよ内堆積汚泥の算定は難しいが、雨水流出水中に堆積汚泥からの溶出によって負荷量が流出することから、管きよ内堆積汚泥(10g湿潤)を純水(500cm³)に溶解かく拌しその負荷量を定量した。乾泥1g当りの含有負荷量は、BOD 0.057~0.236×10⁻²g, SS 3.887~9.774×10⁻²g, TS 7.00~7.692×10⁻²g, Sol.S 2.865~3.113×10⁻²gである。対象地域(150ha)における堆積汚泥量は乾泥量にして634.4tであり、単位面積当りの管きよ内堆積量は423t/Km²である。これらをもとに、単位面積当りの堆積負荷量を求める(表-4)と平均値ではBOD 1.50t/Km², SS 11.8t/Km², Sol.S 18.1t/Km², TS 27.98t/Km², 熱灼減量 15.14t/Km²となる。

モデル排水区における堆積負荷量はBOD, 2.25t, SS, 17.7tとなり、表-1で流出負荷量の収支から求めた負荷量

とほぼ対応しており、堆積汚泥量からも求められる。SS堆積量が多いの下流にポンプ場があり管内貯留量が影響しているためと考えられる。1降雨によって管きよ内堆積負荷量の大半が流出している。

また、堆積汚泥の特徴には、

- ① 降雨前後の含有汚濁物量は大きな変化を示しているが、堆積汚泥量は砂等が多く、量そのものにさほど大きな変化はない。
- ② 管きよ内堆積負荷量の回復が早く回復期間は1~2日である。



管きよ断面積と管きよ内堆積汚泥断面積

表-4 単位面積管きよ内堆積負荷量

項目	範囲 (t/Km ²)	平均堆積負荷量 (t/Km ²)
BOD	0.70 ~ 3.71	1.50
SS	4.97 ~ 22.48	11.80
Sol.S	8.59 ~ 49.13	18.10
TS	13.22 ~ 67.11	27.98
熱灼減量	7.65 ~ 31.74	15.14

③ 従って、平均的にみると管きょ内には常に一定した汚濁負荷量が存在している。

4. 路面負荷流出モデルと検討

(1) 路面負荷流出モデル

雨天時流出汚濁負荷量を推定するには管きょ内の堆積掃流負荷と路面負荷流出が大きいことから、ここでは路面負荷流出モデルについて検討する。路面負荷の支配因子は

- ① 先行晴天日数
- ② 物質の減衰
- ③ 清掃の間隔と効率

が主要なものであるが、路面に堆積した物質の減衰は測定が難しく、稲場²⁾は下水管きょ内の堆積物の自己減衰係数とほとんど類似と考え、BOD等については第1段階の反応と第2段階の反応とに分けて中西³⁾らの反応速度をもとに次のように表している。

先行晴天日数をNとし、第1段階の反応までの日数を N_0 とすると、路面堆積量Sは

$$1) N \leq N_0 ; S = \frac{a}{K_1} (1 - E^{-K_1 N})$$

$$2) N > N_0 ; S = \frac{a}{K_1} (1 - E^{-K_1 N_0}) + \frac{a E^{-K_1 N_0}}{K_2} \{1 - E^{-K_2 (N - N_0)}\} \quad (2)$$

K_1 は一般に0.065/日とされ、 $K_1 \neq K_2$ としてとり扱っている。

今、一日当りの単位面積についての堆積負荷量を a とすると、 n 日後の単位面積当りの堆積負荷量 $P(n)$

$$\text{は、} \quad P(n) = a \sum_{n=1}^n E^{-Kn} = \frac{a \{E^{-K} / (1 - E^{-K})\}}{1 - E^{-Kn}} \quad (3)$$

ここで、 K は総合的な反応速度係数である。道路清掃間隔 N_0 により次の2つの場合に分けられる。

$$1) \quad n \leq N_0 \quad P(n) = \frac{a \{E^{-K} / (1 - E^{-K})\}}{1 - E^{-Kn}} + P_0 \quad (4)$$

$$2) \quad n > N_0 \quad P(n) = P_0 (1 - E)^m + a \{E^{-K} / (1 - E^{-K})\} (1 - E^{-KN_0}) \times \{(1 - E)^m + (1 - E)^{m-1} + \dots + (1 - E)\} + a \{E^{-K} / (1 - E^{-K})\} \{1 - E^{-K(n - m N_0)}\} \quad (5)$$

ここで； P_0 ；先行降雨後の路面残存堆積負荷量

E ；清掃効率

m ；先行降雨後の清掃回数

総括反応速度 K についてはBODではSartor⁴⁾は0.01/日を、中西³⁾は0.065/日を示しているが、

$$E^{-K} / (1 - E^{-K}) \approx 1/K \quad (6)$$

と近似しても、 $K=0.01$ /日でその近似誤差は0.0005、 $K=0.065$ でのそれは0.002であり、総括反応係数が比較的大きいレベルでは近似値でさして問題はないといえる。

以上は路面堆積負荷量の減衰について検討したものであるが、この堆積負荷量が降雨によってどのように流出するかを検討する必要がある。地表面負荷流出 M_p はSTORM⁵⁾では

$$M_p = AP (1 - E^{-KR\Delta T}) / \Delta T \quad (7)$$

と表わしている。

ここで、 A ；ブロックごとの路面面積

K ；総括流出減衰係数（流出減衰係数×流出係数）

R ；降雨強度

式-4、5と式-7により路面に堆積した負荷量の降雨時流出を算定することができる。

(2) モデル計算

計算に当っては $K = 0.01$ とし、実測資料をもとにして、

$$K_{BOD} = 0.273$$

$$K_{SS} = 0.202$$

を得、これらの値をもとに BOD 負荷 (図-2, 3) では計算値と実測値とが良く合致しているが、初期流出時は計算値がやや高くなっている。これは実測資料が必ずしも降雨当初から採水して得られていないことによるものと考えられる。

5. 雨天時負荷流出

(1) 雨天時負荷流出モデル

雨天時に汚濁負荷がどのように流出し降雨が変ればそれがどのように変化してゆくかを推定することは下水道計画や公共用水域の保安全管理に重要な役割を果たす。晴天時下水道においても大きな変化をし処理に変動を与えているが、雨天時にはそれに加えて都市活動の中で発生した種々の物質が流出し簡単にそれらの挙動を表わすことが困難なのが実情である。

現在わが国で検討されたモデルを分類すると次のようになる。

- 1) 地表面流出と管きょ流出を区別せずひっくり返り取り扱うモデル
 - 2) 管きょ系流出を中心にした流出モデル
 - 3) 各流出系を1つ1つモデル化しそれらを総合化したモデル
- 1) については、①完全混合槽

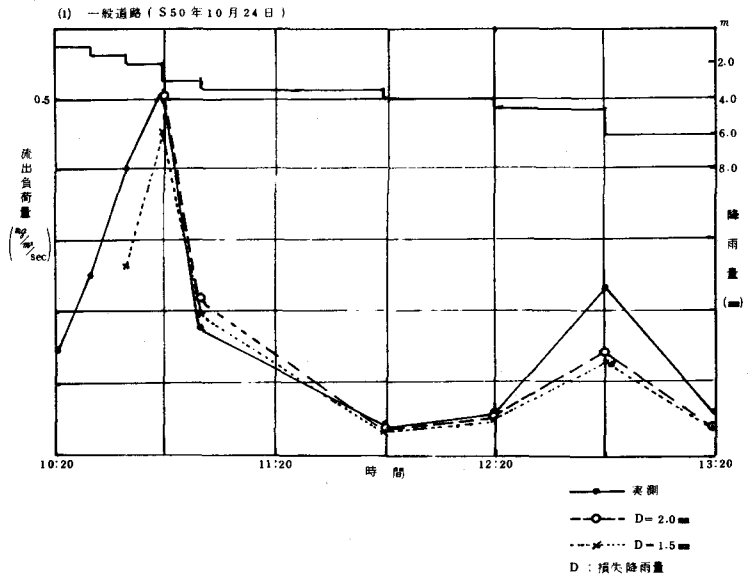
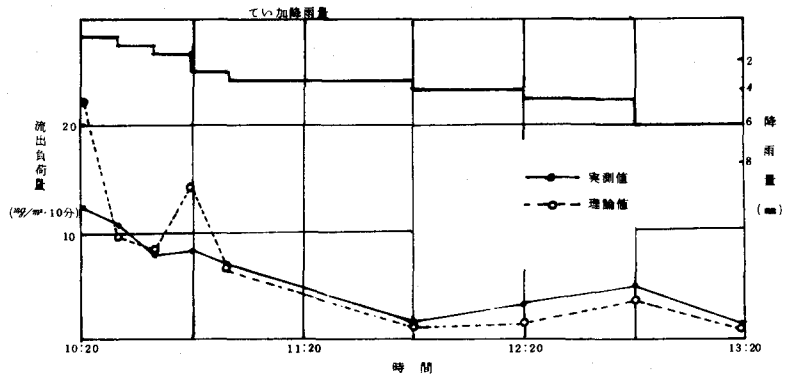


表-5 雨天時汚濁負荷流出モデル

	モデル分類		
	国内	国外	
地表面流出、管きょ流出を区別せず合わせたモデル	<ol style="list-style-type: none"> 1. 完全混合槽モデル 2. 特性方程式モデル 3. 貯留関数モデル 	<ol style="list-style-type: none"> 1. エスパイモデル 	
管きょ系を中心にした流出モデル	単純	<ol style="list-style-type: none"> 1. 汚濁負荷の運動モデル 	<ol style="list-style-type: none"> 1. SWMM 2. バッセル都市排水管理モデル 3. シカゴ流量シミュレーションモデル 4. STORM 5. MIT モデル 6. SOGREAH モデル 7. 水資源 SWMM
	合成	<ol style="list-style-type: none"> 1. 堆積負荷(評価)モデル 2. 掃流負荷モデル 	
各流出系を1つ1つモデル化し、それを総合したもの	<ol style="list-style-type: none"> 1. 修正RRL法(水量) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ISS モデル 2. ドルジコンサル モデル 	

モデル⁷⁾、②特性方程式モデル²⁾、③貯留関数モデルがあげられ、2)については回帰式をもとにした、④汚濁負荷の運動の式があり、3)には⑤堆積負荷(評価)モデル¹⁾⑥掃流負荷モデルがあげられる。これらを一覧表にすると表-5のようになる。

表-6 雨天時汚濁流出シミュレーションモデルの概要

モデル	計算式	文字の意味
完全混合槽モデル	$\textcircled{1} \frac{dP}{dt} = -DP = -\frac{Q}{V}P \quad (12-1)$ $\textcircled{2} \textcircled{1} \text{を} \text{いて } P_{t+\Delta t} = P_t e^{-\frac{Q}{V}\Delta t} \quad (12-2)$ $\textcircled{3} \text{ある時間の流出量は } Q_s = P_t (1 - e^{-\frac{Q}{V}\Delta t}) / \Delta t \quad (12-3)$	P: 残存負荷量 D: 係数 $= \frac{Q}{V}$ Q: 流量 V: 槽容量 Δt : 時間ステップ
箱場モデル	$\textcircled{1} \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{E}{U_s} \right) = \delta_d - a(1-\lambda) \frac{\partial H}{\partial t} \quad (12-4)$ $\textcircled{2} E = k_1 h^{2.5}, U_s = k_2 h^{2.5} \quad (12-5)$ $\textcircled{3} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = i + q_d \quad (12-6)$ $\textcircled{4} q = k_3 h^{3/2} \quad (12-7)$	①~④より堆積汚濁物の変化は $a(1-\lambda) \frac{\partial H}{\partial t} = \delta_d - \frac{3}{2} k_1 k_2^{2/5} (i + q_d) - \frac{1}{3} k_1^{2/5} k_2 \frac{\partial h}{\partial t} \quad (12-16)$ ⑤ 流出汚濁負荷量は $E = a_1 x_1 + a_2 (x_2 - x_1) + a_3 (x_3 - x_2) + \dots \quad (12-17)$ ⑥ 雨天時汚濁負荷量は δ_d a: 密度
汚濁負荷運動(式)モデル	$\textcircled{a} Q_s = KQ^n \quad (12-8)$ $\textcircled{b} Q_s = KS^2(Q - Q_c) \quad (12-9)$	Q _s : 流出負荷量 Q: 流量 Q _c : 限界掃流量
堆積負荷評価モデル	$\textcircled{1} Q_s = KS^2(Q - Q_c) \quad (12-10)$ $\textcircled{2} \Delta S = S_2 - S_1 = (DWF_s - Q_s) \Delta t = \frac{DWF_t + \Delta t + DWF_t - Q_{s,t+\Delta t} + Q_{s,t}}{2} \Delta t \quad (12-11)$	Q _s : 流出負荷量 DWF _s : 晴天時負荷量 Q: 流量 ΔS : 堆積負荷量 Q _c : 限界掃流量 S: 残存負荷量
掃流負荷モデル	$\textcircled{1} M_p = AP(1 - e^{-KR\Delta t}) / \Delta t \quad (12-12)$ $\textcircled{2} Q = Bhv \quad (12-13)$ $v = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{2/3}$ $\textcircled{3} q_B = 6.6 U_s - 11, U_s = \sqrt{egh} \quad (12-14)$ $q_B = 2057(hI)^{1/2} - 11$ $\textcircled{4} Q_B = B \cdot q_B \cdot P_s \times 10^{-2} \quad (12-15)$	ここで、 (1) 先行晴天日数 < 道路清掃間隔 $P = a(e^{-K}/(1 - e^{-K})) + (1 + e^{-Kn}) + P_0 \quad (12-19)$ (2) 先行晴天日数 > 道路清掃間隔 $P = P_0(1 - E)^m + a(e^{-K}/(1 - e^{-K}))(1 - e^{-KL}) \times [(1 - E)^m + (1 - E)^{m-1} + \dots + (1 - E)] + a(e^{-K}/(1 - e^{-K}))(1 - e^{-K(n-mL)}) \quad (12-20)$ M _p : 路面流出負荷量 I: 雨水こう配 A: 流域フラク面積 Q _B : 掃流負荷量 R: 流出減衰係数×流出係数 k: 掃流強度 B: 管きょ巾 q _B : 底質汚洗淨上量 L: 管きょ長 h: 水深 P _s : 負荷換算率

(2) モデルの特徴と利点

それぞれのモデルの概要は表-6にまとめて示す。完全混合槽モデルは、下水道システムを大きな1つの槽とみだてて、その中の負荷量の単位時間当たりの変化は下水道管きょ中に存在する負荷量に比例するとし、一般に使われる一次反応型のものである。モデルは、下水道システムを等価な表面流と考え、単位巾あたりの負荷の流出を、水質の連続の式、運動の式と、流量の連続の式、運動の式を連立することによって、流出負荷量を表わしたものである。理論的に明解な取り扱いを行っている。汚濁負荷運動モデルは、汚濁負荷の挙動は流量の関数と表わせると考え、実測値をもとに回帰式を作りこれを用いるもので、SSについてはブラウンの式とも一致し、その他の有機系の汚濁負荷の場合には、べきnは1.3~1.5の値をとることが稲場⁴⁾の研究で明らかにされている。地域的な特性を強く受けるため、nは地域ごとに求めるのが望ましいモデルである。しかし、ファーストフラッシュピーク流出時、減衰時を1つの式で表わすことが困難である。単純で明解であり、これに管きょ内貯留や、限界掃流量をもとに修正したモデルも用いられている。ただ、堆積汚濁量Sの評価がむずかしい。

この式のSを定量的に表わしたものが堆積負荷(評価)モデルである。Sの推定はむずかしいが、各降雨、先行晴天日数の類似した資料をもとにすれば妥当な値を求めることができ、流出負荷量を算定することができる。掃流負荷モデルは、路面や屋根等の表面負荷量をSTORMモデルの概念を応用し、管きょ内流出負荷量は流量の連続式、運動の式、負荷量の運動の式として掃流による負荷の算定式を用いたもので、負荷流出換算係数によって求めたい汚濁負荷量を算定するものである。

各モデルの特徴、その長短所をまとめたのが表-7である。

表-7 モデルの特徴と長短所

モデル	特 徴	長 所	短 所
完全混合槽モデル	1. 負荷変動を曝気槽の規模によって表わしている。 2. 槽内濃度が一定である。 3. ある期間内の量は一定であるとして扱う。	1. 取り扱いが簡単で地域の概要を知るのに良い。	1. 汚濁物の流出挙動が表面流として等価で表わされているため、現実の挙動と対応が良くない。 2. Vの算定が難しい。
堆積モデル	1. 汚濁物の流出挙動を表面流として等価で表わしている。 2. 地域の単位当たりの負荷流出量を水質改善の連続式、運動の式を連立して求める。	1. 理論的な負荷流出の根拠が明確。 2. 汚濁負荷の変動が表現しやすい。 3. ある因子の増加に対応する水質変化の応答が記述し易い。	1. 汚濁物の流出挙動を表面流として等価で表わされているため、現実の挙動と対応が良くない。 2. モデルに合う水質の測定が困難。 3. 汚濁負荷の変動がVのみで表現するには少し無理がある。
汚濁負荷運動(M)モデル	1. 汚濁物の流出挙動を濃度の関数として表わす。 2. 地域的な特徴を含んだ平均負荷流出を算定している。	1. 簡単に流出汚濁負荷量を求める。 2. 汚濁負荷の運動の式と連続の式を用いており、大規模性と信頼性が高い。	1. 汚濁負荷流出がループを踏くため1つの式では表わしにくい。 2. ファーストフラッシュ、希釈がうまく表わし得ない。 3. 地域が異なるような式の場合、Soの算定が難しい。 4. Soの算定に式の変動が変化し得る。
堆積負荷評価モデル	1. 汚濁負荷運動の式と連続の式により汚濁物量を算定する。 2. 曝気槽能力と相互に関連を対象としている。	1. 汚濁負荷の運動の式と連続の式を用いており、大規模性と信頼性が高い。	1. 比例定数 S_0 , K, m, nの決定はトライアルによりその地方の資料から求める必要がある。
掃流負荷モデル	1. 高雨や強風等の表流地山崩れ、管きより等掃流負荷量を同時に考慮して求める。 2. 表流地山崩れは一次反応式で、管きより掃流負荷量は、運動の式と連続の式ならびに掃流の式から求め、負荷流出係数係数を導入する。	1. 汚濁物の流出挙動を表面流等の表面流出によるものと、管きより掃流負荷の両方から表わしており、取り扱いが簡単である。	1. 掃流負荷量の算定の算定、表流時にも妥当に評価し得るとは限らない。

(3) シミュレーション結果とモデル

前報⁶⁾で述べた大阪南水排水区を対象にしてこれらのモデルの計算を行った結果の一部を図-4, 図-5に示す。これらの計算を1つのモデルについて10余の降雨について求めた結果から得られたシミュレーション結果をもとにしたモデルの特徴について表-8に示す。

掃流負荷モデルは現在検討中である。

モデルの適合についての評価には次の4つが考えられる。

- ① ファーストフラッシュ時の適合
- ② ピーク流量時の適合
- ③ 減衰時の適合
- ④ 流出総負荷量の適合

雨天時負荷流出においてはファーストフラッシュ時とピーク流量時に多量の負荷量が流出し、減衰時には希釈効果も生じ、かつ晴天時負荷の影響もではじめ、雨水管理を行なってゆく場合には流量の制御が中心となるため、①、②に重点を置いた評価と、④とのバランスの上でモデルの適合度を評価してゆくべきであろう。

6. ま と め

雨天時の負荷流出の特徴を検討し、非点源汚濁負荷の制御の重要性を明らかにするとともに、管きよりに堆積している負荷量の算定ならびにその特性について考察した。雨天時負荷流出の中心である管きより堆積負荷の他に、路面負荷の流出の状況を表わすモデルとその適用についても論じ、それらを総合した雨天時負荷流出についてモデルの検討を行ないそれらの問題点と特徴について明らかにした。紙面の関係上詳細に述べられなかったが、モデルの特徴をその活用用途によって考慮してゆく必要があり、今後こ

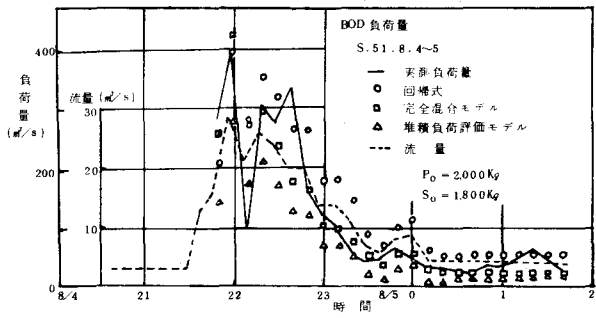


図-4 シミュレーション結果

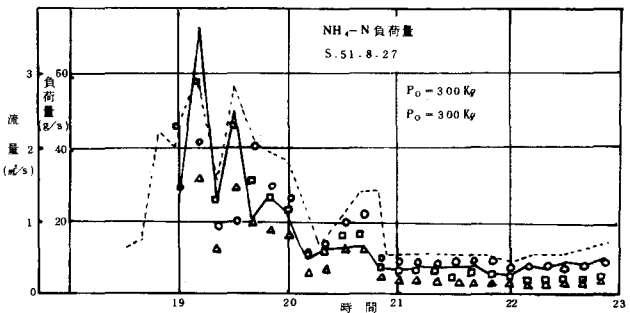


図-5 シミュレーション結果

表-8 シミュレーション結果の特徴

項目	モデル	汚濁負荷運動モデル	完全混合槽モデル	堆積負荷評価モデル
BOD		1. 流量支配が大きく、特定地域で極端な降雨でなければ実測値との合致度は高い。	1. 負荷流出のピークまでは実測値との合致度は良いが、希釈作用の効いてくるところでは合致度は悪くなる。	1. Soを正しく評価すれば実測値との合致度は良くなるが、Soの推定がむづかしい。 2. 汚濁負荷運動モデルを用いているので計算値はそれと似てくる。
Cl ⁻		1. 実測負荷量の変動が激しく合致しにくい。	1. 実測負荷量の変動が激しく合致しにくい。	
NH ₄ -H PO ₄ -P		1. 実測負荷量が小さく、水質変動もさほど極端な変化がないため、実測値との合致度は高い。	1. 負荷流出のピークまでは実測値とやや合致度は良くないが、ピーク後は比較的合致度は良い。	

の面の評価の研究が必要となつてこよう。地域の実情によつて地域での発生負荷が変わり、雨天時負荷流出も大きく変化する。従つて、都市の実情と用途に応じたモデルの検討が必要である。

参 考 文 献

- 1) 日本下水道協会；昭和50年度合流式下水道東京都報告書，1975年
- 2) 稲場紀久雄；雨天時下水道水量水質の制御に関する研究，学位論文，1975年2月
- 3) 中西弘；上下水の酸化処理に関する2，3の研究，学位論文，昭和41年12月
- 4) James D. Sartor and Gail B. Boyd；Water Pollution Aspects of Street Surface Contaminants, EPA-R2-72-081, NOV., 1972
- 5) Storage, Treatment, Overflow, Runoff Model "STORM", U.S. Army Corps of Engineer, July, 1976, 723-S8-L7520
- 6) 神山桂一他；合流式下水道における雨天時流出汚濁負荷量について、土木学会年講，S50.10.