

(3) 負荷流出パターンを考慮した雨天時流出負荷の研究

関西大学工学部土木工学教室 和田 安彦

1. 緒言

市街地での諸活動により、私達の身の回りには多量の種々の汚濁物が発生し、地表面や、下水道管きょ内に堆積している。降雨の発生によってこれらの堆積汚濁物は公共用水域に直接流出する。これは、市街地から流出する雨水流出を含めた雨天時下水の流出によるもので非点源負荷流出の主要な要因となっている。

公共用水域の水質汚濁防止の上から、総量規制の実施とともに、これらの負荷の水質汚濁に与える寄与率は無視しうるものではない。汚濁負荷を効果的に減少させてゆくためには、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正当に、かつ容易に表わすモデルの開発検討が必要となってくる。それを通じて、降雨によりどのように負荷が流出するのかを考察することにより、地域ごとの排水区の特성에応じた雨天時下水道汚濁防止対策が行いうるようになる。

ここでは、雨天時の流出負荷を、初期の流出しやすい負荷、中間流出負荷、流出し難い負荷に分け、それらを降雨時の雨水流出、負荷流出の段階によって表わすモデルを検討する。それによって、各降雨における雨天時流出負荷シミュレーションを行い、総合的な流出負荷の検討を行う。

2. 雨天時下水道負荷流出モデル

(1) 負荷流出の運動式

雨天時合流式下水道負荷流出 Q_s の運動方程式は、研究の初期段階から表わすと次のようになる。初期の負荷流出の基礎式は、流量を Q として、次式が用いられた。

$$Q_s = K Q^n \quad (1)$$

流出負荷は、ある限界流量 Q_c を越えると急激に増大し流出することから次式が用いられた。

$$Q_s = K (Q - Q_c)^n \quad (2)$$

さらに、流出負荷は限界流量によるものと、一般流量によるものから構成されているとし次式が用いられる。

$$Q_s = K Q^{n-1} (Q - Q_c) \quad (3)$$

しかし、合流式下水道の流出負荷は管きょ内堆積負荷 S の占める割合が大きく、これらの負荷が流出に大きな影響をもつことから次式が用いられる。

$$Q_s = K S^m Q^n \quad (4)$$

限界流量を越えると急激に負荷の流出があることから、次式が用いられる。

$$Q_s = K S^m Q^{n-1} (Q - Q_c) \quad (5)$$

ここで、 K 、 m 、 n は、それぞれ負荷流出係数、堆積負荷流出運動係数、負荷流出運動係数である。

(2) 路面流出負荷の運動式

路面堆積流出負荷 L_s の運動方程式は、Storm³⁾

では降雨量によって、初期堆積負荷量 P_0 が流出するとして次式で表わしている。

$$L_s = P_0 (1 - e^{-kr_e \cdot \Delta t}) / \Delta t \quad (6)$$

最も簡単には、降雨量 r_e (単位時間降雨量) のみによって流出するとして次式で表わされる。

$$L_s = K \cdot P_0 \cdot r_e \quad (7)$$

路面に堆積する負荷量 L は、1日の路面堆積量を a とすると、 t 日後には、

$$L = P_0 e^{-kt} + \frac{a(1 - e^{-kt})}{1 - e^{-k}} \quad (8)$$

で表わされる。

さらに、中村ら⁴⁾は単位時間内の路面堆積負荷量 (dp/dt) は、路面にさらにいくら堆積しうるかという空席率で表わしている。

$$\frac{dp}{dt} = K \cdot a \left(\frac{P_m - P}{P_m} \right) \quad (9)$$

ここで、 P_m は最大路面堆積負荷量

3. 負荷流出パターン考慮の流出モデル

(1) モデルの基礎式

雨天時流出負荷を初期流出負荷、中間流出負荷、流出し難い負荷に分け、それぞれの運動方程式と負荷の連続式を表わすと次のようになる。

負荷の運動式

$$Q_s = Q_{s_1} + Q_{s_2} + Q_{s_3} \quad (10)$$

$$Q_{s_1} = K_1 S_1^{m_1} (Q - Q_c)^{n_1} \quad (11)$$

$$Q_{s_2} = K_2 S_2^{m_2} (Q - Q_c)^{n_2} \quad (12)$$

$$Q_{s_3} = K_3 S_3^{m_3} (Q - Q_c)^{n_3} \quad (13)$$

負荷の連続式

$$S = S_1 + S_2 + S_3 \quad (14)$$

$$S_1 = S_{0_1} + \int M_1 dt + \int R_1 dt + \int r_1 dt + \int Q_1 dt + \int Dwf_1 dt - \int Q_{s_1} \quad (15)$$

$$S_2 = S_{0_2} + \int Q_2 dt + \int Dwf_2 \cdot dt - \int Q_{s_2} \cdot dt \quad (16)$$

$$S_3 = S_{0_3} + \int O_3 dt + \int Dwf_3 \cdot dt - \int Q_{s_3} \cdot dt \quad (17)$$

ここで、 M_i ; 路面流出負荷
 R_i ; 降雨含有負荷
 r_i ; 屋根含有負荷
 O_i ; 他の水路等の非点源負荷
 Dwf_i ; 晴天時負荷量
 S_1 ; 初期流出負荷
 S_2 ; 中間流出負荷
 S_3 ; 流出し難い負荷

(2) モデルの特徴

流出負荷を3つに分けてそれぞれの流出に伴う負荷の全体を総流出量とする当モデルの特徴は次のようになる。

- 1) 初期流出、中間流出、流出し難い負荷の3つの流出負荷の流出状態を表現しうる。
- 2) ピーク負荷流出及び周辺流出負荷の状態を比較的的確に表現しうる。
- 3) 複数ピーク流出負荷がある場合に、それらの流出負荷の状態を的確に表現でき、数多い複雑な流出ピークをもつ雨天時流出負荷を適正に表現しうる。
- 4) 一括流出の場合より流出負荷を3つに分けた方が流出負荷挙動の精度は向上する。
- 5) 流出負荷の構成による流出状況が適宜表わされ、流出負荷の持続性及び希釈効果も表現しうる。

(3) 流出モデルのフローチャート

雨天時流出負荷シミュレーションのフローチャートは図-1のようになり、地域の排水諸元をいれ、地域の負荷流出係数と地表堆積負荷を含めた初期管きょ内の雨天時流出負荷量を設定すると、それによって、地域内の雨天時流出負荷量を運動、連続の式によって求める。この結果をアウトプットし、シミュレーションの適合性を評価基準によって判定する。シミュレーション結果と実測値との適合性が望ましくなければ、流出し難い負荷や中間流出負荷の堆積負荷量の初期設定を改め、さらにそれらの流出負荷係数もトライアルで適正化する。これによって適合性の評価を受けたものは、流出負荷量をシミュレートし、アウトプットする。

(4) シミュレーション諸係数の考え方と設定

雨天時流出負荷シミュレーションの諸係数算定の考え方は次の通りである。

1) 初期堆積負荷量 (S_{0i})

初期堆積負荷量 S_0 ($\sum S_{0i}$) は、合流式下水道越流負荷調査結果により、晴天時流出負荷量の1~2日分であることから、これらの値をもとにする。流量が全体的に大きい場合には、中間流出負荷 (Q_2)、流出し難い負荷 (Q_3) の初期堆積負荷量 S_{0_2} 、 S_{0_3} はほぼ等しいとする。一般には $S_{0_2} > S_{0_3}$ である。

2) 負荷流出係数 (K_i)

降雨時には一般に初期流出負荷、中間流出負荷、流出し難い負荷の順に流出することから、 $K_1 > K_2 > K_3$ を満足させる。 K_i は各排水区の実測値をもとに決定しうるが、実測値のない場合には、発生負荷量、流出負荷量から経験的に求める。

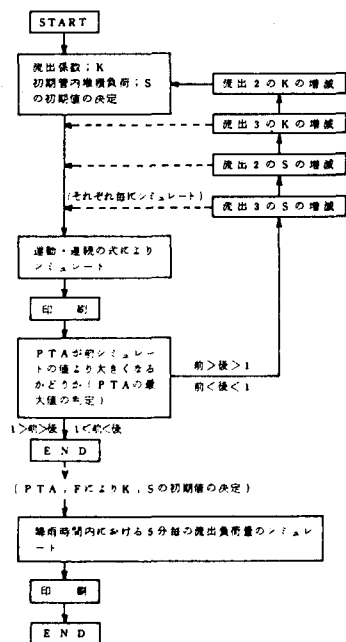


図-1 シミュレーション計算のフロー

3) 限界流量 (Q_{ci})

負荷流出における物理的なとり扱いは難しいが、晴天時流量をもとにし、 $Q_{c1} < Q_{c2} < Q_{c3}$ となる。

4) 負荷堆積運動係数 (m)

m は経験的に 1.0 ~ 2.0 にあり、 m の設定は負荷流出の状況を大きく変える。

5) 負荷流出運動係数 (n)

n は経験的に 1.0 ~ 2.0 にあり、 n は S 、 Q_s に直接的な影響を与える。特に降雨流出量の大きい場合に効果的に影響する。

(5) 対象域

シミュレーションを行う対象域は、北九州市を中心とし、堀の内、白川、豊橋も検討した。

(6) 諸係数

諸係数の考え方とその求め方は(4)で詳しく述べたが、ここでは、流出負荷の限界値を示す限界流量のとり扱い方法とその考え方、及び諸係数のもつ特徴について明らかにし、19個のシミュレーションを行ったものの各ケースごとの諸係数について述べる。

1) 限界流量

最も流出しやすい負荷は晴天時の最低流量においても流出しているためそれを限界流量とする。中間流出は晴天時の平均流量より大きなピーク流量に近い流量を限界流量とする。流出し難い負荷は中間流出負荷の限界流量にさらに平均流量だけ大きな流量を限界流量とする。すなわち、晴天時汚水量の時間変化の中で、最低流量となる2~7時の流量を Q_{c1} とし、 Q_{c2} は日平均流量に最低流量を加えたものとし、 Q_{c3} は日平均流量の2倍に最低流量を加えたもので表わす(図-2)。

それぞれ式で表わすと次のようになる。

$$Q_{c1} = LL \quad (18)$$

$$Q_{c2} = LL + CL \quad (19)$$

$$Q_{c3} = LL + 2CL \quad (20)$$

2) 諸係数の特徴

諸係数の特徴は次のものである。

① K

負荷流出係数は、全体のシミュレーション計算に対応しているが、流出への影響は流出を3形態に分離しているため、それぞれの S_i を与えるのにも関係をもつ。

② m

この値が大きくなると、流出負荷の状態に影響がでてくる。初期流出負荷が小さいため、初期流出に合わせて S を小さくすると、ピーク流出負荷時の流出が小さくなる。また、ピーク流出負荷に合わせてと S^m の項が大きくなるため、結果として Q_s が大きくなり、さらに初期流出負荷量が大きくなる。

③ n

流出負荷量を小さくするため、この値を大きくすると、限界流量を上回る流量($Q - Q_c$)による流出負荷量が大きくなり、 S が小さくなる。連続の式による S の減少量が大きくなるため、次の流出負荷量はさらに減少する。

④ Q_c

K 、 m 、 n がそれぞれ得られたなら、 Q_c により、3形態ごとの流出負荷の割合が定められる。

3) 諸係数の決定

諸係数は表-1に示すものである。No 1~7は各係数を経験的に決定し、 K_1 、 K_2 、 K_3 と S_1 、 S_2 、 S_3 、 m_1 、 m_2 、

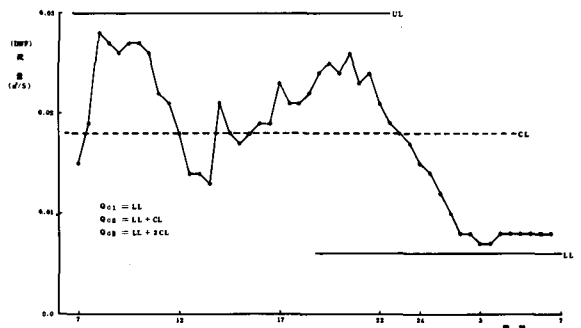


図-2 晴天時汚水量の時間変化

m_3, n_1, n_2, n_3 を種々組み合わせたとときの雨天時流出負荷シミュレーション値と実測値とを評価方法の最小誤差評価法と実測値対比法により検討したものである。

No.8~11は、限界流量を晴天時流量より決定し、それによって諸係数の決定を行ったものである。

(7) シミュレーションの評価法と評価基準

シミュレーション結果を実測値と比較し、その適合性を評価する評価基準となる評価方法には次の3つがある。

1) 最小誤差評価法

シミュレーション値と実測値の差の絶対値の総和をシミュレーション時間内の計算値の数で除した単位計算時による誤差を最小化する方法である。これは全体として、より実測値とシミュレーション値が近くなる評価方法であるが、各ピーク流出時やその他の各時間において必ずしも合致度の良くない場合もある。

評価式は次のものである。

$$Min. F = Min. \left| \frac{\text{シミュレーション値} - \text{実測値}}{N} \right| \quad (2)$$

2) 実測値対比法

シミュレーション値と実測値を対比し、その比を用いてシミュレーション値と実測値を評価する方法である。

評価式は次のものである。

$$Min. PTA = Min. \left\{ \frac{Q_{S1} + Q_{S2} + Q_{S3}}{\text{実測値}(Q_S)} \right\} \quad (2)$$

$$PT1 = Q_{S1} / Q_S$$

$$PT2 = Q_{S2} / Q_S$$

$$PT3 = Q_{S3} / Q_S$$

PTAが1.0に最も近いものが良く、PT1, PT2, PT3がそれぞれの流出段階において用いられ、最小誤差評価、実測値対比で不適となる場合に、流出状態の妥当性の評価ができる。

3) 堆積負荷評価法

初期堆積負荷量(S)の設定が妥当かどうかをある堆積基準をもとに判断してゆく評価方法である。

4. シミュレーション結果と考察

(1) シミュレーション結果

1) 対象シミュレーション

シミュレーションは次の3方法によって行い、合計19回行った。

- 1) 各係数を経験的に決定する場合
- 2) 限界流量を晴天時流量より決定する場合
- 3) 流出ハイドログラフ、ロードグラフの実測値をもとに自動化して諸係数を決定する場合

表-1 シミュレーション時の諸係数及び諸元

No	No.1	流出係数			貯留管内地積係数			限界流量			m			n			評価基準			単位時間	備考
		K1	K2	K3	S1	S2	S3	Qs1	Qs2	Qs3	m1	m2	m3	n1	n2	n3	PT1	PT2	PT3		
本係数に 実測値を 用いた 場合	1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	22.11.0
	2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	22.11.0
	3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	22.11.0
	4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	22.11.0
	5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	22.11.0
	6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	22.11.0
	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	22.11.0
No.8~11は 晴天時流量 より決定 した場合	8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	22.11.0
	9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	22.11.0
	10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	22.11.0
	11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	22.11.0
	12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	22.11.0
	13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	22.11.0
	14	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	22.11.0
No.15~19は 堆積負荷 より決定 した場合	15	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	22.11.0
	16	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	22.11.0
	17	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	22.11.0
	18	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	22.11.0
	19	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	22.11.0
	20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	22.11.0
	21	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	22.11.0

2) シミュレーション結果

シミュレーション結果を図-3, 4, 5に示す。No.1は52年11月8日の降雨(10.0 mm)時の流出負荷をシミュレートしたもので、実測値とほぼ良く合致したものである。この時のK値は $K_1 = 0.1414 \times 10^{-7}$, $K_2 = 0.1273 \times 10^{-7}$, $K_3 = 0.05928 \times 10^{-7}$ で、 $m=2$, $n=1$ である。評価基準PTAはほぼ1で、実測値とシミュレート値は一致している。ピーク流出負荷により、管内堆積負荷量が急激に減少しファーストフラッシュ時の流出が顕しいことを表している。

No.2はピーク流出負荷がやや小さいが、初期流出負荷が多く、ピーク後の負荷の減衰が大きい。これは、 S_{O_2} の値を大きくとる必要性を示している。No.3は初期流出負荷を適正に表しているが、ピーク流出負荷が小さい。そのため負荷流出係数を大きく、堆積負荷を小さくする必要がある。

No.4は初期流出負荷は大きい、ピーク流出負荷はほぼ実測値に近い。

No.1 1は52年8月23日の降雨(22.94 mm)

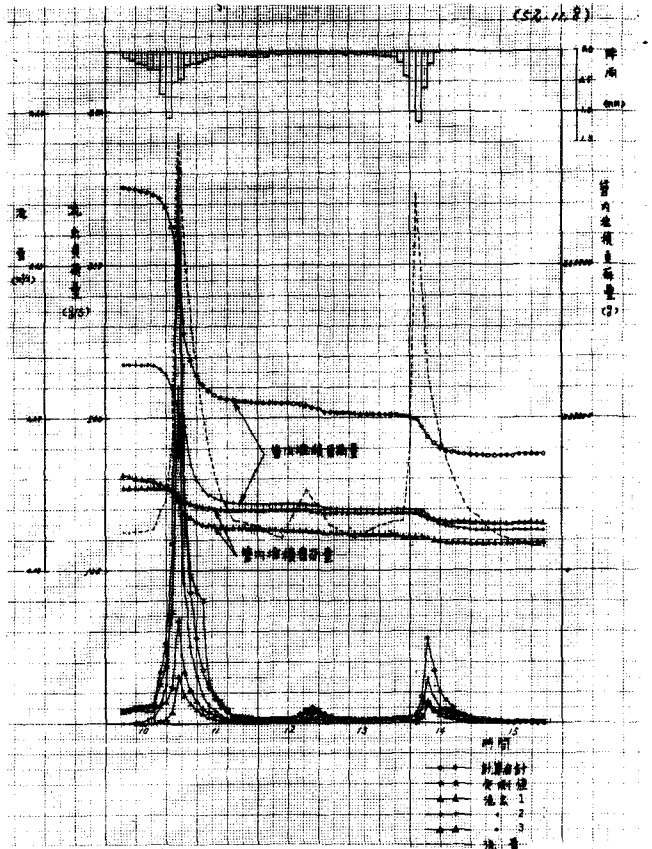


図-3 各係数決定時のシミュレーション (降雨同一)

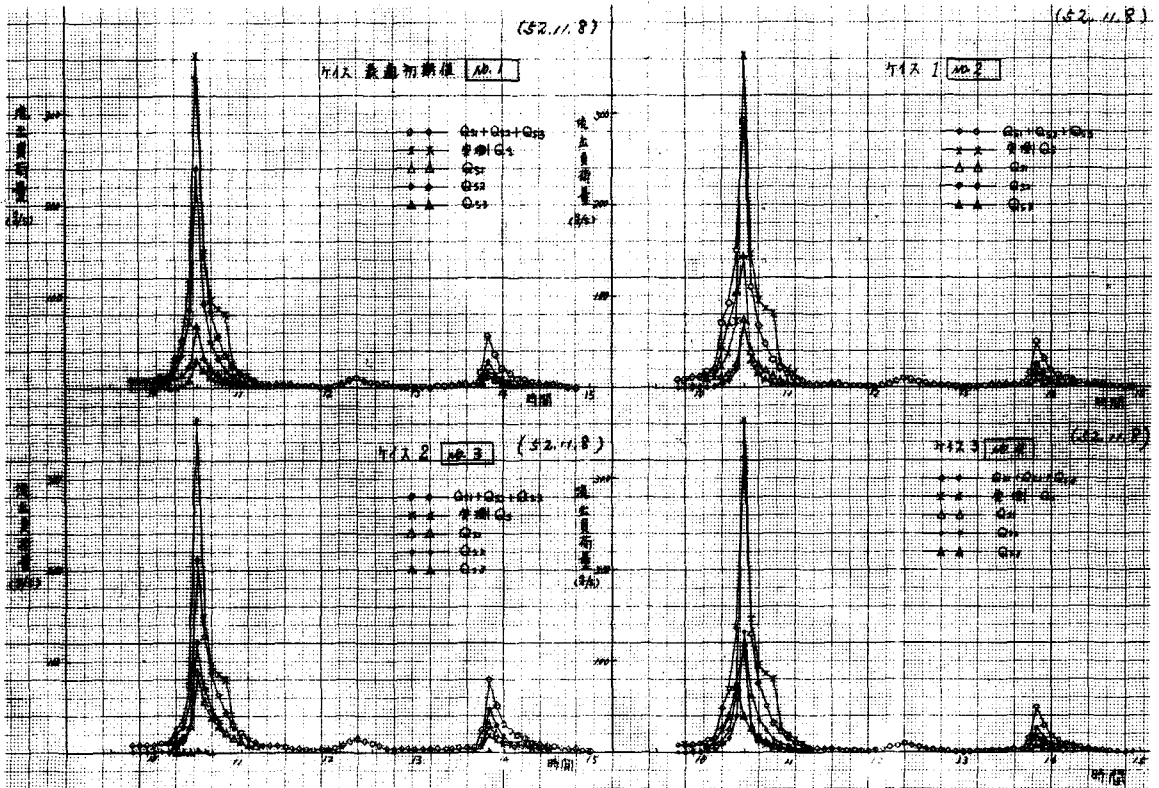


図-4 シミュレーション結果

を対象に雨天時流出負荷のシミュレーションを行ったものである。比較的降雨量の大きい激しい降雨である。ピーク流出負荷量は比較的良く合致しているが、第2ピーク以降の流出が合致していない。堆積負荷量がピーク流出負荷によって急激に減少していることを端的に表わしている。

合流式下水道流出負荷には種々の物質が流出し、混入しており、人間生活に伴う負荷発生の影響を受けるため実測値は必ずしも理論的な流出とならない場合がある。このような実測値の場合には、ある程度の流出負荷の合致があれば、モデルや諸係数を妥当と判断する必要がある。

以上にあげた方法をとると、合流式下水道のものが求めうる。

(2) 流出負荷モデルの評価基準とその検討

雨天時合流式下水道流出負荷シミュレーション値が妥当かどうかを実測値との比較の上で評価する必要がある、その適合性と妥当性を評価するための評価基準として、①最小誤差評価法、②実測値対

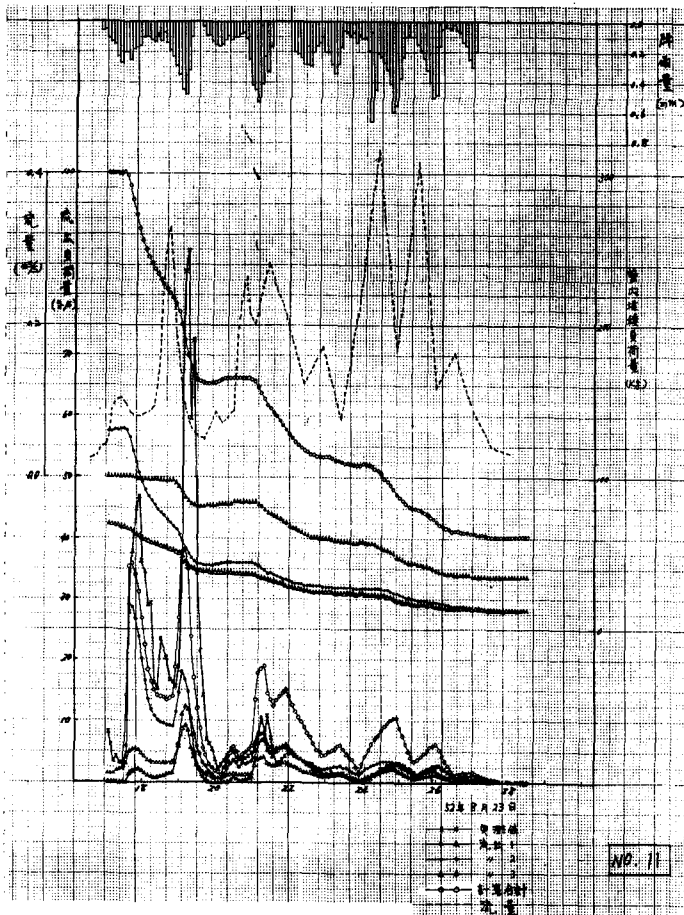


図-5 シミュレーション結果

比法、③堆積負荷評価法の3方法を取りあげた。まず、①により、シミュレーション値との差の平方和から望ましいシミュレーション値を選択し、次いで②により、PTAが1.0に近い値を選択する。この方法によると、困難な諸係数の決定においても、比較的容易に行うことができる。さらに、実測値や調査解析研究値を活用する③を用いると、総合的な判断のもとで、望ましい雨天時流出負荷シミュレーションを行うための諸係数の決定が行いうる。その結果、地域に適した各降雨における流出負荷の検討が可能となる。

5. 結 言

当論文では、降雨時流出負荷シミュレーションモデルにおいて、流出負荷を降雨後すぐ流出するものと、徐々に流出する中間流出負荷、流出しにくい負荷に分け、それらの流出挙動を検討した。その結果、かなり良い精度で、降雨時の流出負荷を算出しうるということがわかった。パラメータ設定も、実測値を投入すれば、自動的に決定することもでき、シミュレーションがかなり迅速に行ないうることも可能となった。ここでは、モデルの基礎式と諸係数の決定方法、及びシミュレーション値と実測値との適合性の評価基準等も明らかにした。本研究に関西大学土木工学科崔政治君の協力を付記します。

参 考 文 献

- 1) 和田安彦；負荷流出パターンを考慮した雨天時流出負荷の研究、第18回下水道研究発表会講演論文集、日本下水道協会、1980年5月
- 2) 山口高志、雨天時合流式下水道からの汚濁流出シミュレーション、土木技術資料18-2、1978年
- 3) Storage, Treatment, Overflow, Runoff Model, "STORM", U.S. Army Corps of Engineer, July, 1976, 723-S8-17520
- 4) 中村繁一；合流式下水道対策の検討(Ⅱ) (汚濁負荷流出シミュレーション) 第16回衛生工学研究論文集、土木学会、1980年1月