

東京大学 正員 市川 新
 ○ 東京大学 志村 近史
 建設省 高野 匡裕

1 非特定汚染源負荷と雨天時流出負荷

雨天時には高濃度の負荷流出 (Stormwater Runoff) が起こるが、その発生源としては、合・分流式下水道管渠内の堆積物、路面・屋根・空地での堆積物および降雨水中の負荷があげられる。この中の管渠内堆積物は、特定汚染源とよばれる家庭・工場等から発生する汚濁物によるものが多く、かつ降雨時の負荷流出において量的に大きな比率を占めると想像される。一方、路面・屋根・空地・降雨から発生する負荷は発生源を特定しにくい。ため、本論文では非特定汚染源 (Non-Point Sources) と定義するが、これは特定汚染源から発生するものと本質的に異なるものである。しかし、いずれも雨天時に流出する負荷であり発生源は面的に拡がり、管渠末端での処理にすぐれない等の点では両者は共通点を有している。

ここでは、山形市が昭和53年に行なった雨天時負荷流出調査のデータを用いシミュレーションを行なった。さらに解析にあたっては非特定汚染源負荷が河川の汚濁に及ぼす影響と、特定汚染源負荷との量的比較から考察を加えた。

2 シミュレーションモデル

降雨に伴う汚濁負荷の流出量 Q_s を次式によってモデル化する。

$$Q_s = -\frac{dP}{dt} = K P^m Q^n \quad (1)$$

ここで P は堆積負荷量、 Q は流量、 K 、 m 、 n は定数である。 K は負荷流出係数ともいうべきもので、堆積している汚濁負荷の流出のしやすさを表わす。流量に関しては線形であると考え $n=1$ とした。また種々の m の値について実測値との回帰の誤差、相関を調べたところ、 m が 0.5 以下の範囲では m が大きいほど良い相関を示したが m を大きくしてもそれ以上良い相関と得られることはなかった。ここでは $m=1$ と $n=1$ の二つのモデルを使い、適宜両者の比較も行なった。

なお、雨天時負荷流出のモデルとしては他に完全混合槽モデル、掃流負荷モデル等があるが、基本的な形式の形としては (1) 式と類似したものである。また合流式下水道からの雨天時流出についても (1) 式の適合性の良いことが、建設省土木研究所の中村氏によって多くの降雨に対して確認されている。¹⁾

3 負荷流出係数 K と初期堆積負荷量 P_0 の算定

(1) 式において比例定数 K と初期条件 P_0 を定めれば、降雨時の流量 $Q(t)$ は実測して与えることができるので、負荷の流出は完全に再現することができるとする。従って、シミュレーションに先だてて K と P_0 を定めることが必要である。様々な条件 (都市活動の状態、地形、気候等) での K 、 P_0 の値とあらかじめ知ることができれば、降雨による流出負荷量の予測も可能になる。従来 K 、 P_0 は経験的に与えられていたが、ここでは負荷流出データから推定することを目的とし、次の方法で算定した。すなわち、 $m=1$ の場合については (1) 式より、

$$\ln \frac{P}{P_0} = -K \int_0^t Q(t) dt = -K V \quad (2)$$

ただし V は時間 t までの累積流量である。また観測される流出負荷の累積量 X は、

$$X = P_0 - P \quad (3)$$

であるから (2) 式に (3) 式を代入し、両辺を t で微分すると

$$X = -\frac{1}{K} \frac{dX}{dt} + P_0$$

となる。また $m=2$ の場合については 同様にして

$$X = K^{-1/2} \left(\frac{dX}{dt} \right)^{1/2} + P_0$$

(4)

(5)

となるから 縦軸に X 、横軸に $\frac{dX}{dt}$ (すなわち汚濁負荷の増分と流量の増分の比)、または $\left(\frac{dX}{dt} \right)^{1/2}$ を取ってプロットすればその傾きと切片から K 、 P_0 を一意的に定めることができる。山形市でのデータによる実例を図-1に示す。この降雨は降雨強度のピークと3つ持つ雨であったが、それとともに K の値が変化していることがうかがわれる。また K が明らかに負に値する部分が見受けられるが、これは全ての降雨に対して(1)式と適用することの限界を示すものと考えられる。降雨によつて流出期間中常に K が負となりシミュレーションのできないケースもあった。ちなみに図-1のケース(BOD)からは $P_0 = 26 \sim 35 \text{ mg/l}$ と求められ、単位面積あたりにすると $0.19 \sim 0.25 \text{ BOD-8/m}^2$ 、1日あたりでは $27 \sim 28 \text{ BOD-mg/m}^2/\text{日}$ となった。同降雨において他の指標に関して同様に求められた K 、 P_0 を表-1に示す。

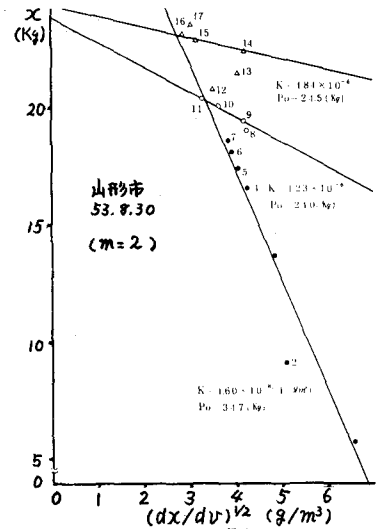


図-1 K 、 P_0 の算定

4 負荷流出シミュレーションの結果

山形市における昭和53年8月30日のデータを用いて雨天時負荷流出シミュレーションを行なった。当該地域の汚水排水は分流式によっており、データは降雨の開始とともに下流部の道路側溝で採取したものである。ただし非特定汚染源以外の汚濁負荷も相当量含まれていると思われる。また流域面積は 13.69 ha 、人口 1089

	$K \text{ (1/gm)}$	$P_0 \text{ (kg)}$	$\sqrt{Q_s/Q_c}$ と $P_0 + \Delta P$ の相関係数
BOD	0.429×10^{-7}	35.21	0.87
S-BOD	0.380×10^{-7}	16.91	0.77
COD	0.179×10^{-7}	45.16	0.88
S-COD	0.115×10^{-7}	28.91	0.70
SS	0.277×10^{-8}	58.22	0.84
T-N	0.532×10^{-7}	10.54	0.93
S-TN	-	-	-
NH ₄ -N	0.385×10^{-8}	9.54	0.05
NO ₃ -N	-	-	-
NO ₂ -N	0.220×10^{-7}	1.54	0.07
T-P	0.883×10^{-8}	1.12	0.79
S-TP	-	-	-
PO ₄ -P	0.112×10^{-5}	0.90	0.78

表-1 K 、 P_0 の算定結果

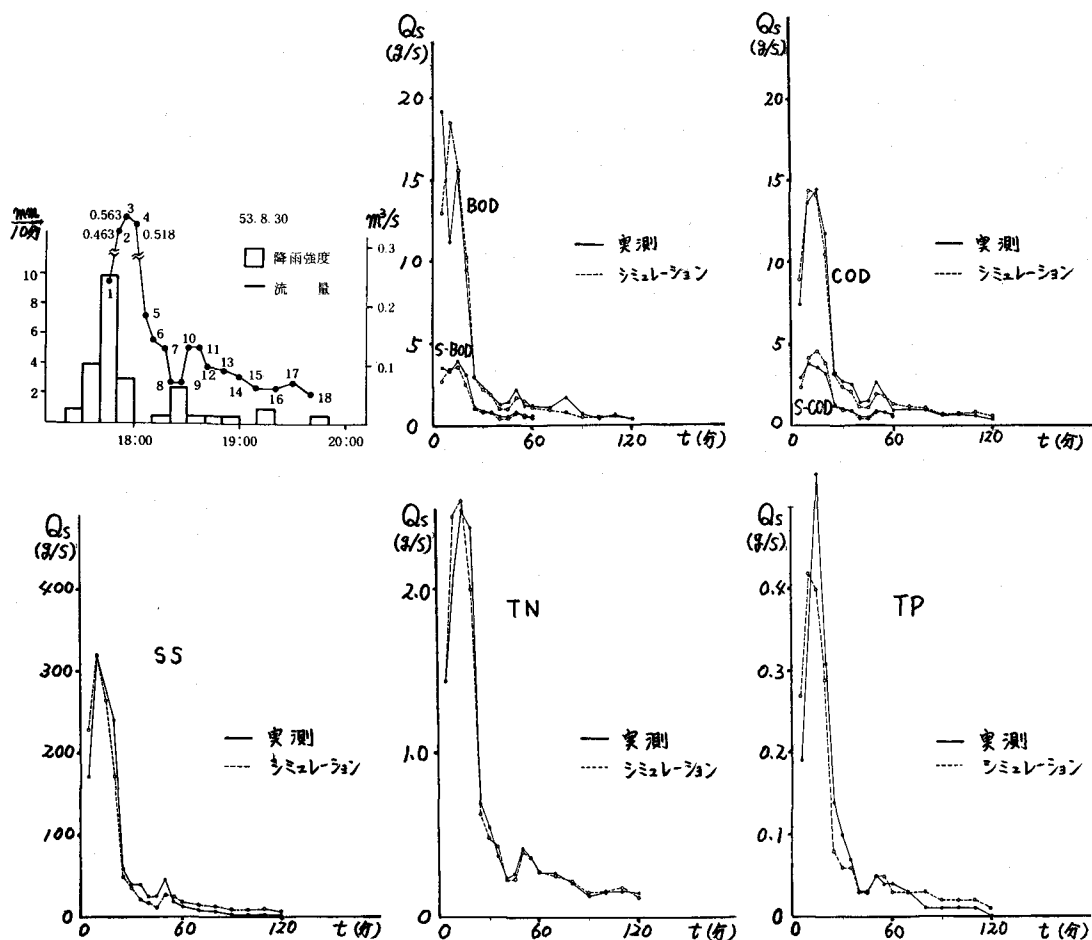
人、道路延長 3360 m で、土地利用は住宅(住居、2住専)が約4割、商業が6割を占める。排水は同日の他にも同年9月20日、11月13日、12月4~5日にも行なわれ、9月20日と11月13日には屋根からの流出と降雨水中の負荷も一緒に測定された。分析はBOD、S-BOD、COD、S-COD、SS、TN、S-TN、NH₄-N、NO₃-N、NO₂-N、TP、S-TP、PO₄-Pについて行なわれた。

また $m=2$ の場合について(1)式の適合性をみるために、式(1)から $\sqrt{Q_s/Q_c}$ と $P_0 + \Delta P$ の相関を調べた(表-1)。BOD、COD、TNの相関係数はそれぞれ 0.87 、 0.88 、 0.93 と高く、(1)式による再現性はよいと言えるが、SSで 0.84 とやや低く、溶解性のBOD、CODでは 0.77 、 0.70 と小さくする。リンもまた溶解性有機指標と同程度の相関を示すが、4つのうちNH₄-N、NO₂-Nは著しく低く、S-TN、NO₃-N、S-TPでは負の相関を示した。

次に同日のBOD、S-BOD、COD、S-COD、TN、TP、SSの(1)式によるシミュレーション結果を示す(図-2)。なお、ここで取りあげた降雨は初期に大きな流量ピークを持つ雨で、シミュレーションによって好都合の降雨であったことを付け加えておく。

5 非特定汚染源負荷量の発生源別推定——山形市データより

ここでは、流域の非特定汚染源負荷の発生量を 降雨水からの負荷、屋根からの負荷、路面からの負荷、雨水管からの負荷に分け、それぞれにおける降雨前の負荷堆積量を推定しそのシェアを評価する。使用した指標はBOD、COD、SS、TNで、先行晴天日数11日で最大限まで堆積していると考え、路面負荷堆積量はシミ



四-2 シミュレーション結果 (山形市昭和53年8月30日)

エレーションに先だって求められた総堆積負荷量 P_0 と降雨負荷, 屋根負荷, 管内負荷との差として求めた。

① 屋根負荷

11月13日の屋根排水水質データから, (1)式を適用することにして屋根負荷量 P_r を算定した。ただしこの時の先行晴天日数は3日であるので, 先行条件を11日に与えるため $\frac{11}{10}$ と乗じた。また, 単位面積あたり負荷の計算では流域の総屋根面積 5.61 ha を使用した。結果を表-2に示す。

② 降雨水負荷

降雨水中の汚濁物濃度は 降雨開始後急激な減少があることが知られている。従って当日の降雨の最初のピーク(降水量 18 mm)ですべての負荷が洗い出されるとし, さらに濃度が直線的に減少すると考え, $C(t) = \frac{t}{R} C(0)$ (C : 濃度, R : 時間 t までの降水量)と仮定し, 負荷量と推定した。結果を表-3に示す。

③ 管内及び路面堆積負荷

総堆積負荷量と管内堆積負荷 P_{in} と管外堆積負荷 P_{out} に分けて考える。晴天時の管内堆積量 P_{in} は一定と考え,

	総堆積負荷	屋根負荷	シェア
	$P_0 \text{ (kg)}$	$P_r \text{ (kg)}$	$P_r/P_0 \times 100 \text{ (}\%)$
BOD	35.2	0.86	2.4
COD	45.2	3.09	6.8
SS	582.2	20.36	3.5
TN	10.5	0.59	5.6

表-2 屋根堆積負荷の推計値

また降雨直後には路面堆積負荷はすべて流出してしまったと仮定すれば、この時の P_{out} は 0 だと考えられるので先行晴天日数 0 日の時の総負荷量 P_0 は P_{in} に等しいとみなせる。一方、管外堆積負荷は 11 日で最大値 $P_{outmax} = P_{out} - P_{in}$ をとりと仮定した。ここでは、12 月 4~5 日の先行晴天日数が 0、8 月 30 日のそれが 11 であるのでその時の P_0 とそれぞれ P_{in} 、 P_{outmax} として計算しにのが表-4 である。

④ 発生源別負荷量のシエア

以上の推算により発生源別に求められた堆積負荷量を総括して表-5 に示す。ただし、これは管外の堆積量が最大になった場合の値である。また本地域は分流式であるにもかかわらず晴天時にも負荷の流出が見られることから、管内堆積には特定汚染源負荷（通常の家庭排水等）も含まれていると考えられる。しかし、管外堆積は非特定汚染源のみに帰因すると考えられ、計算の結果では SS で 8 割、COD、TN で 6 割程度の寄与があることになる。

	COD (kg)	SS (kg)	TN (kg)
P_{0max}	45	582	11
P_{in}	19	101	4
P_{outmax}	26	481	7

表-4 管内及び管外堆積の推計値

	初期濃度 C_0 (mg/l)	降雨水負荷 P_r (kg)
BOD	2.3	2.7
COD	3.3	3.8
SS	8.0	9.3
TN	1.5	1.7

表-3 降雨水負荷の推計値

	COD		SS		TN		備考
	kg	%	kg	%	kg	%	
A 管内	19	42	101	17	4.0	36	表-4 より
B 降雨水	4	9	9	2	1.7	15	表-3 より
C 屋根	3	7	20	3	0.6	5	表-2 より
D 路面	19	42	452	78	4.7	43	E-(B+C)
E 管外計	26	58	481	83	7.0	64	表-4 より
F 総負荷	45	100	582	100	11.0	100	表-4 より

表-5 山形市 8 月 30 日降雨時の発生源別負荷堆積量

6 年間の雨天時流出負荷量の推定

非特定汚染源に帰因する年間総負荷量を以下のモデルによって推定し、特定汚染源負荷との量的比較を行なった。

① 降雨量と降雨間隔の期待値

降雨を確率事象として扱い、降雨量 V (mm)、降雨間隔 n (日) の雨の確率密度関数が

$$f_v(v) = \lambda e^{-\lambda v} \quad (6)$$

$$f_n(n) = \psi e^{-\psi n} \quad (7)$$

で表わされることが関西大学の和田氏によって提唱されている。従って V と n の期待値 $\bar{V}$ 、 $\bar{n}$ は

$$\bar{V} = \int_0^{\infty} V \cdot f_v(V) dV \approx 1/\lambda \quad (\text{mm}) \quad (8)$$

$$\bar{n} = \int_0^{\infty} n \cdot f_n(n) dn \approx 1/\psi \quad (\text{日}) \quad (9)$$

と近似される。なお、最上川流域の降雨データから $\lambda = 0.08 \times 10^3$ (1/mm)、 $\psi = 0.7$ (1/日) と求められた。

② 堆積負荷量の推定

総堆積負荷量 $P_0(n)$ の晴天時の堆積状況を次式によりモデル化した。 n は降雨と降雨の間の晴天日数である。

$$P_0(n) = P_{in} + P_{outmax} \{1 - \exp(-\frac{dd_i}{P_{outmax}} \cdot n)\} \quad (10)$$

また dd_i は負荷堆積量である。右辺第 2 項は管外堆積の増加に上限値を規定したモデルで、中村氏によって提唱されているものだが、その当否についての確証は未だ得られていない。しかし、Santoro 等の実測値は (10) 式でよく説明できるとし、11 日で最大値と取るという仮定も妥当なものだと思う。 dd_i/P_{outmax} の値として COD、SS、TN でそれぞれ 0.4、0.3、0.4 と仮定すると堆積負荷の日変動は図-3 のようになり、以下の推算にはこの値を用いた。SS の図には Santoro による実測値を付記したが、本地域の堆積動向は商業地域のそれによく似ていることがわかり、以上の仮定が妥当なものであると断言することができよう。

③ 一降雨あたりの流出負荷の期待値

(1) 式 $(\frac{dQ_s}{dt} = -K P_m Q)$ と連続の式

$$Q_s = P_0 - P \quad (Q_s \text{ は流出負荷量})$$

から $m=1$ と 2 でそれぞれ Q_s について解くことができ、

$$Q_s = P_0 \{ 1 - \exp(-K \int_0^t Q_s dt) \} \quad (m=1) \quad (12)$$

$$Q_s = P_0 \{ 1 + 1/K P_0 \int_0^t Q_s dt \}^{-1} \quad (m=2) \quad (13)$$

と表わせる。ここで (10) 式より P_0 , $\int_0^t Q_s dt$ に一降雨あたりの期待値

$$\bar{P}_0 = P_{in} + P_{outmax} \{ 1 - \exp(-\frac{dd_0}{P_{outmax}} \cdot \pi) \} \quad (14)$$

$$\bar{Q} = A \bar{V} \quad (A \text{ は流域面積}) \quad (15)$$

をそれぞれ代入し、流出負荷の期待値 $\bar{Q}_s$ を求めた。さらに年間平均降雨日数と θ とすれば、年間総流出負荷量 Q_{SY} は

$$\begin{aligned} Q_{SY} &= \theta \cdot \bar{Q}_s \\ &= \theta \cdot \bar{P}_0 (1 - e^{-K \bar{Q}}) = \theta \cdot \bar{P}_0 (1 - e^{-K A \bar{V}}) \quad (m=1) \quad (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{SY} &= \theta \cdot \bar{Q}_s \\ &= \theta \cdot \bar{P}_0 (1 + 1/K P_0 \bar{Q}) = \theta \cdot \bar{P}_0 (1 + 1/K A \bar{V}) \quad (m=2) \quad (17) \end{aligned}$$

と表わすことができる。

④ 山形市の場合の試算 — COD について

COD についてシミュレーション結果より、 $P_{in} = 19 \text{ kg}$, $P_{outmax} = 26 \text{ kg}$ (表-4), $K = 0.5 \times 10^{-7} (1/\text{g} \cdot \text{m}^3)$ と求められており、 $\theta = 185 \text{ 日}$, $dd_0/P_{outmax} = 0.4 (1/\text{日})$ を与えると (14)~(17) 式より堆積負荷量と流出負荷量の期待値は、 $\bar{P}_0 = 30 \text{ kg}$, $\bar{Q}_s = 19 \sim 22 \text{ kg}$, $Q_{SY} = 3.5 \sim 4.0 \text{ t/yr}$ と求められた。

7 雨天時流出負荷の寄与と評価

特定汚染源負荷について下水処理場からの排水量と $Q_{PY} (\text{m}^3/\text{日})$, 水質を $X (\text{ppm})$, 雨天時流出負荷量と $Q_{SY} (\text{kg}/\text{日})$ とすると、河川流入負荷中に占める雨天時流出負荷の割合 r_N は

$$r_N = Q_{SY} / (Q_{PY} X + Q_{SY}) \quad (18)$$

と表わせる。家庭排水の流量原単位、負荷原単位とそれぞれ 180 l/日 と 32 COD-g/1日 , $X = 10 \text{ ppm}$ と仮定すると 6 節の結果から発生レベルでの雨天時流出の寄与は約 2 割、放流レベルでの寄与 r_N は約 8 割となった。また、(16), (17) 式より r_N は

$$r_N = \{ Q_{PY} X / (1 - e^{-K A V}) \theta \bar{P}_0 + 1 \}^{-1} \quad (m=1) \quad (19)$$

$$r_N = \{ Q_{PY} X (1 + 1/K A \bar{V}) / \theta \bar{P}_0 + 1 \}^{-1} \quad (m=2) \quad (20)$$

$$(\bar{P}_0 = P_{in} + P_{outmax} (1 - \exp(-\frac{dd_0}{P_{outmax}} \cdot \frac{1}{\theta})))$$

となる。従って r_N は 年間降雨日数 θ , 負荷流出係数 K , 負荷堆積量 $\bar{P}_0$, 負荷堆積速度 dd_0 が大きい程、さらに集中的に雨が降る時期がある (θ が小さい) 程大きいことがわかる。なお図-4 は処理水質 X と r_N の関係を示すものであるが、処理水質が 50 ppm 以下になると雨天時流出負荷の占める率の方が上回ることがわかる。また、図-5 は

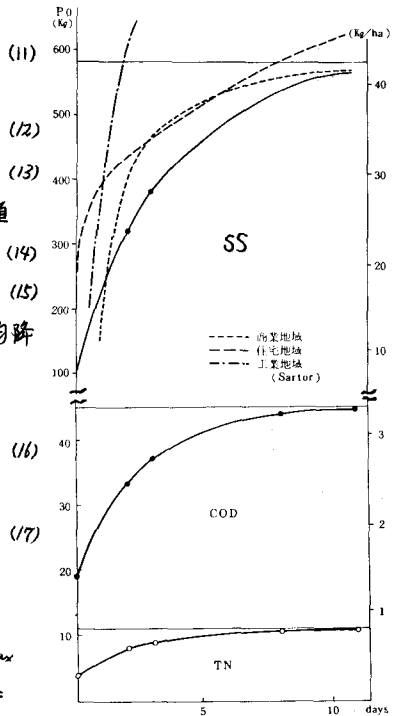


図-3 負荷の堆積動向

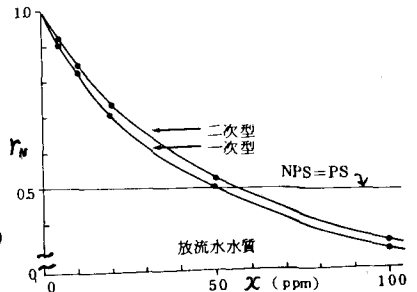


図-4 下水処理水質と r_N

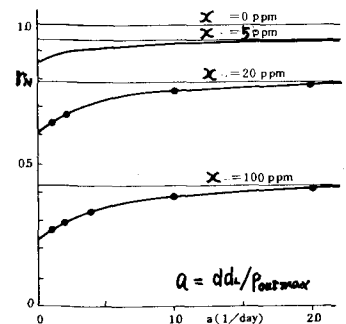


図-5 負荷堆積速度と r_N

dd_c/P_{outmax} と r_c の関係である。負荷堆積速度 dd_c の大きさは都市活動の規模を反映していると考えられる。従って、図から都市活動の規模が小さい場合は λ の変化に伴う r_c の変動が大きくなり、また処理レベルが高度なほど活動規模の変化の影響が小さいことがわかる。

8 非特定汚染源負荷の寄与と評価

雨天時に流出する負荷のうち非特定汚染源によるものを分離して推定するために、今までは別の観点から図-6のようなモデルを考える。 a 、 b 、 r が一定だとすると、降雨直前の管内堆積量は晴-雨-晴というサイクルの無限回の繰り返し後に $\frac{r}{1-r}(a+b)+a$ に収束するから、堆積負荷と流出負荷の比、管内堆積と管外堆積の比はそれぞれ

$$Q_s/P_o = 1-r \quad (21)$$

$$P_{outmax}/P_{in} = b/\{\frac{r}{1-r}(a+b)+a\} \quad (22)$$

となる。本例の場合表-4等より $Q_s = 20 \text{ kg}$ 、 $P_o = 30 \text{ kg}$ 、 $P_{in} = 19 \text{ kg}$ 、 $P_{outmax} = 26 \text{ kg}$ であるとするれば、 $r \approx 1/3$ 、 $b/a = 37/6$ となり、管内堆積物における特定汚染源負荷と非特定汚染源負荷の比は

$$(\frac{r}{1-r}b)/(\frac{r}{1-r}a) = 37/17$$

と算定される。以上のことと7節の結果から特定、非特定汚染源別の汚濁物収支が図-7のように求められた。図中○印が非特定汚染源によるもので、放流レベルでも約7割のシェアを占める。これは特定汚染源負荷の処理水質 λ が 10 ppm (COD) の場合であるが、 $\lambda = 30 \text{ ppm}$ の場合でも5~6割のシェアを占めることになる。

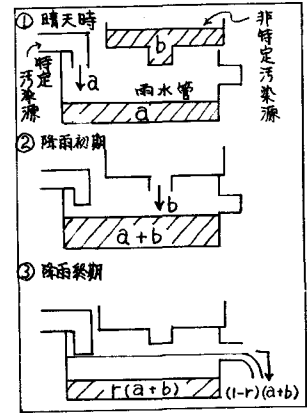


図-6

9 結論

雨天時の負荷流出は (1)式で示したモデルでよくシミュレートされる。また、堆積負荷量も (1)式で算定でき、表-5に示したように非特定汚染源である管外堆積量は総堆積量の6~8割を占めると考えられる。さらに降雨と確率事象として扱うことで年間の総雨天時流出負荷を算定すると、特定汚染源負荷が十分に処理された時、非特定汚染源負荷の放流レベルにおけるシェアは6~7割 (COD) に達すると予想される (図-7)。ただし、これらは山形市における試算値であり、かつ計算過程にいくつかの仮定を行っていることや、必ずしも全ての降雨に対してモデルの再現性がよくないことから推定の域を越えるものではない。

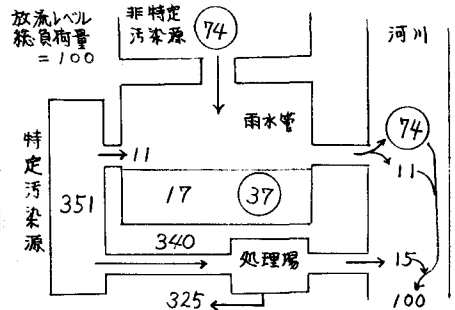


図-7 COD 年間汚濁負荷収支

10 謝辞

本論文で使用したデータは、山形市による昭和53年度環境庁委託業務「非特定汚染源による汚染防止対策調査」に基くものである。また研究にあたって実態調査検討会委員の諸先生方から多くの助言と御協力をいただき感謝いたします。

- 〔参考文献〕 1) 中村栄一；下水管路施設の合理化に関する調査報告書 (Ⅲ) 土木研究所資料 1487
2) 和田幸彦；確率論的立場からの汚水池容量の検討
3) Santon 他；Water pollution aspects of street surface contaminants JWPCF Vol.46 No.3