

1. 緒言

都市活動の活発化、都市への人口、産業の集積化とともに都市域に面的に発生する負荷量は非常に多い。これらは降雨時に流出し、雨水管の流出負荷量にも影響して無視しえない量となっている。この問題に対処し、適切な管理計画を立てるためには、これらの量を定量化することはもちろん、降雨時の降雨流出における負荷を予測算定するモデルが必要となってくる。

当論文では、分流式雨水管の水質特性や流出負荷の定量化を行い、それをもとにして雨水管の流出負荷を2つのモデルにより表わした。すなわち、流量に寄与する流出分と堆積負荷に寄与する流出分の和に、流量と堆積負荷の積に寄与する流出分を加えた3段流出モデル、3つの影響要素の積で表わした堆積負荷運動評価モデルであり、これらモデルの妥当性、検討を行った。モデル設定の考え方や基礎式をもとに各降雨ごとにシミュレーションを行って考察を進め、モデルの総合的な評価と検討を行った。これらは、水環境アセスメント及びその管理を行う上で、今後重要となる。

2. 分流式雨水管の水質、負荷特性

2-1. 分流式雨水管の水質特性

分流式雨水管の雨天時水質は、都市活動や生産活動の進展、交通量や物質の輸送量の増大に従って次第に悪くなっている¹⁾。ここでは、その水質の特徴を平均的に分析し、その特性を明らかにする。

(1) 水質の変化

分流式雨水管の水質の変化は地域によって変化するものの流出水質、負荷のパターンは比較的類似している。神戸市花隈排水区での降雨時の流量、水質、負荷量の時間変化をみると図1のようになる。この総降雨量は31.5mmで、2つのピークのある降雨であるが、図から次のような点が指摘しうる。

- 1) 都市流出は早く流速時間も短いため、降雨ピークと流量ピークはほぼ一致している。
- 2) 負荷量ピークと水質ピークには時間的な差があり、前者は後者より平均して20~30分程度遅れている。
- 3) 水質曲線にはピークが1つしか見られないが、負荷量曲線には流量に対応して2つのピークが見られる。前半の負荷量ピークは高濃度によるもの、後半のピークは流量ピークによるものと考えられる。
- 4) 流量的には後半のピークの方が多くにも関わらず、負荷量、水質ともに前半のピークの方が高い値を示しており、ファースト・フラッシュ現象と考えられる。

(2) 平均水質

対象区域での分流式雨水管の各降雨日の平均水質をもとに降雨回数で算術平均した水質は表1のようになる。一般

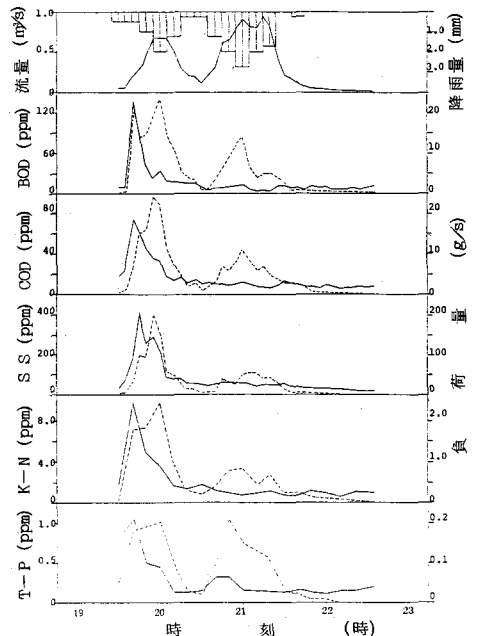


図 1 分流式雨水管の雨天時流出水質、負荷量変化

に商業地域が多く、住商混合地域の古くからある市街地の花隈では、雨水管の雨天時水質は比較的高く、平均値でBOD 35.9 ppm、 λ -BOD 17.5 ppm となっている。溶解性物質も多く、SS 152 ppm と高い値を示しており、その有機性のものは58 ppmと全体の半を占め、残りは無機性物質である。

一方、新しく造成された北須磨団地は住居専用地域が大半で、雨水管流出水質の平均値も比較的低くとなっている。SSは67 ppmで有機性のものは16 ppmであり、残りは無機性のものとなっている。新造成住宅地での水質は比較的良好ではあるものの、やはり雨水管の汚濁が進行していると考えられる。

2.2 分流式雨水管の流出負荷

(1) 算定法

分流式雨水管からの流出負荷量を定量化しただけでは、雨水幹線流出負荷は都市の密度や排水区画の広さ等によって異なるため、一般化して検討するには限度がある。単位面積流出負荷量について比較すると、その流出負荷の特徴や一般的な流出負荷の定量化が容易となる。

降雨時流出負荷量 L_R は、排水面積 S や降雨量 R 、雨水流出率 C によって変化し、単位面積単位降雨流出の流出負荷量 l_u は式(1)で求められる。

$$l_u = \frac{\int L_R \cdot dt}{S \cdot C \cdot \int R \cdot dt}, \quad L_R = \int L_R \cdot dt \quad (1)$$

ここで、 L_R : 単位時間降雨流出負荷量、 R : 単位時間降雨量

(2) 単位流出負荷量

和田らによる構内雨水幹線での晴天時の日流出負荷量と降雨時に新たに流出した負荷量と、単位面積・単位降雨流出当たりについて求めると表2のようになる。晴天時流出負荷量はBOD 0.744 kg/ha・mm、COD 0.592 kg/ha・mm、SS 1.307 kg/ha・mmであり降雨時の単位流出量の含有負荷量はBOD 0.324 kg/ha・mm、COD 0.258 kg/ha・mm、SS 0.569 kg/ha・mmである。他の雨水幹線と比較してみると表3のようになる。

神戸市南園切²⁾(4回調査の平均)や山形市(2回調査)³⁾のそれとBODはほぼよく似ており、CODもよく似ている。SSが他の雨水管と比較して各水質項目間の比率から見て流出負荷量がケないが、オーダーは一致している。

3. 分流式雨水管の流出負荷のモデル化

分流式下水道の雨水管において、汚濁負荷が降雨によって流出すると考えた場合の流出状態を2つのモデル式により表わした。

すなわち、流量に寄与する流出分と堆積負荷に寄与する流出分の和に流量と堆積負荷の積に寄与する流出分を加えた3段流出モデルと、堆積負荷量と流量及びその増減の3つの要素の積で表わした堆積負荷運動評価モデルである。

これらモデルについて、その妥当性の検討のためモデル設定の考え方を基礎式をもとに、流出負荷シミュレーションの検討を行った。シミュレーションは、まず各降雨の実測データを入力しモデルの係数も降雨ごとに算定する。次に、この係数算定値と対象降雨特性との回帰分析を行い、係数推定式を得る。推定式より各降雨の係数を推定し、総流出負荷量を初期堆積負荷量として算定したものをを用いて、流出負荷シミュレーションを行う。こ

表 1 分流式雨水管の平均水質 (ppm)

場 所	花 隈		北 須 磨	
	範 囲	平 均	範 囲	平 均
BOD	17.0 ~ 67.7	35.9	5.26 ~ 49.4	13.8
S-BOD	7.86 ~ 30.7	17.5	—	—
COD	16.8 ~ 64.4	34.0	10.9 ~ 40.3	17.0
SS	73.1 ~ 221.0	152.0	48.2 ~ 88.8	67.0
V-SS	19.6 ~ 114.0	58.3	9.84 ~ 29.0	16.4
T-P	0.27 ~ 0.54	0.41	0.24 ~ 0.6	0.32
K-N	2.08 ~ 7.97	5.42	1.31 ~ 2.8	1.71

表 2 単位面積・単位降雨流出の流出負荷量

項 目	晴 天 時 (kg/ha・日)	降 雨 時 (新たに流出した負荷) (kg/ha・mm)
BOD	0.744	0.324
COD	0.592	0.258
SS	1.307	0.569
Cl ⁻	1.450	0.631
NH ₄ -N	0.0600	0.0262
PO ₄ -P	0.0017	0.00078

表 3 単位面積・単位降雨流出含有負荷量

項 目	(単位: kg/ha・mm)		
	神 戸 (神戸市)	南園切 (神戸市)	A 市 (分流式)
BOD	0.324	0.230	0.220
COD	0.258	0.340	0.199
SS	0.569	1.190	3.630
NH ₄ -N	0.0262	—	—
T-N	—	—	0.0379
PO ₄ -P	0.00078	—	—
T-P	—	—	0.00584
Cl ⁻	0.631	—	—
溶 COD	—	—	0.0571

れを実測値と比較・検討することにより、シミュレーションの適合度等を評価する。

3. 1. 3段流出モデル

(1) モデルの考え方と基礎式

このモデルは、流量に関する流出分と堆積負荷量に関する流出分に加え、さらに流量・堆積負荷量両方に関する運動項目を考慮したものである。モデルの基礎式は次に示す線形式である。

$$Q_o = a \cdot Q^2 + b \cdot S^2 \cdot Q + c \cdot S \cdot Q \quad (2)$$

$$S = S_o - \int Q_o \cdot dt \quad (3)$$

ここで、 Q_o : 流出負荷量、 Q : 流量、 S : 堆積負荷量
 S_o : 初期堆積負荷量、 a, b, c : 係数

(2) モデルの係数算定法

モデル式の係数 a, b, c の算定は、最小自乗法を用いて求める。 Q を x 、 S が Q を y 、 $S \cdot Q$ を z とおき、モデルの基礎式を変形すると式(4)のようになる。この時、同時に式の差分化も行っている。

$$Q_{o,i} = a \cdot Q_i^2 + b \cdot S_{i-1}^2 \cdot Q_i + c \cdot S_{i-1} \cdot Q_i \\ = a x + b y + c z \quad (4)$$

各時間ステップの実測負荷量とシミュレーション値の差を最小にする a, b, c を求める。実測負荷量を L として、この残差を式で表わすと

$$S_e = \sum_{i=1}^n (L_i - Q_{o,i})^2 \quad (5)$$

となり、両辺を偏微分すると次式が得られる。

$$\frac{\partial S_e}{\partial a} = -2 \cdot \sum_{i=1}^n x (L_i - a x - b y - c z) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial S_e}{\partial b} = -2 \cdot \sum_{i=1}^n y (L_i - a x - b y - c z) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial S_e}{\partial c} = -2 \cdot \sum_{i=1}^n z (L_i - a x - b y - c z) = 0 \quad (8)$$

これらを整理すると

$$a \sum x^2 + b \sum x \cdot y + c \sum x \cdot z = \sum x \cdot L_i \quad (9)$$

$$a \sum x \cdot y + b \sum y^2 + c \sum y \cdot z = \sum y \cdot L_i \quad (10)$$

$$a \sum x \cdot z + b \sum y \cdot z + c \sum z^2 = \sum z \cdot L_i \quad (11)$$

が得られ、消去法により式(9)、(10)、(11)の連立一次方程式を解いて係数 a, b, c を求めた。

4. パラメータの同定及びシミュレーション結果

(1) 対象降雨および各諸元

降雨データは神戸市花隈排水区における神戸市の環境庁委託業務結果報告書(昭和54年度)³⁾および、建設省土木研究所「分流水下水道から雨天流出水に関するデ

3. 2. 堆積負荷運動評価モデル

(1) モデルの考え方と基礎式

このモデルは、流出負荷量を堆積負荷量と流量の運動項目で表わし、さらに流量の増減に影響を受けると考え、流量の増減分の関数で流出負荷量を表わしたものである。これは負荷流出の運動式と連続式から成り次式で表わされる。

$$Q_o = K \cdot S^2 \cdot Q^2 \cdot Q^{-P} \quad (12)$$

$$S = S_o - \int Q_o \cdot dt \quad (13)$$

ここで、 Q : ワンステップ前の流量、 K, P : 係数
 Q 項をわかりやすくするために上式を差分化すると次のようになる。

$$Q_{o,i} = K \cdot S_{i-1}^2 \cdot Q_i^2 \cdot Q_{i-1}^{-P} \quad (14)$$

$$S_i = S_{i-1} - Q_{o,i} \quad (15)$$

(2) モデルの係数算定法

モデル式の係数 K, P はシミュレーションを行なった結果をもとにして選定する。

係数 K の決定は基礎式を次式のように変形し行う。

$$K_i = \frac{L_i}{S_{i-1}^2 \cdot Q_i^2 \cdot Q_{i-1}^{-P}} \quad (16)$$

ここで、 L_i : 実測流出負荷量、 K_i : ステップ i における K

上式より求めた K の値を次に示す堆積負荷量と流量に関する加重平均を行って K を決定した。

$$K = \frac{\sum K_i \cdot S_{i-1}^2 \cdot Q_i^2}{\sum S_{i-1}^2 \cdot Q_i^2} \quad (17)$$

$P = 0.1, 0.2, 0.3$ の各場合について上記の計算を行い、実測との差が最小の時の K, P を採用した。

表 4 対象降雨、地域諸元

	面 積 (ha)	
花くま地区	神戸市データ	土研データ
対象面積	12.37	17.17
道路面積	4.88	9.31
屋根面積	5.28	6.39
その他	2.21	1.47

流出負荷量に占める割合 (%)			
降雨	屋根	路面	管き
0.9	4.3	28.1	66.7
33.3			

水 質 (ppm)			
項目	降雨	屋根	路面
BOD	1.1	3.5	13.9
COD	1.3	11.5	24.0
SS	7.5	52.6	26.6

ータベース⁴⁾を用いて、それぞれ環境庁データからは4降雨、土研データからは3降雨の合計7降雨をサンプル降雨とした。これら降雨の平均流出率は0.40であり、対象水質項目としてはBOD、COD、SSを採用した。

また対象とした花隈排水区は古くから雨けていた街で、北部は住居地区、南部は商業地区である。具体的な各諸元は表4に示すものである。

(2) モデルのパラメータ同定

① 初期堆積負荷量の算定

シミュレーションを行うにあたり、汚濁負荷を供給する能力をもつものとして初期堆積負荷の考えをモデルに導入する。これは降雨期間中に流出する負荷は降雨開始前までに排水区域内および雨水管中に堆積していた負荷により、その大部分が発生していると考えらるものである。その算定については、対象区域の面積、実測降雨水質、降雨流出量等をもとにして、以下の方法で進めた。

流出負荷量を降雨、屋根、路面、管きよからの4つに分け、それぞれについて流出負荷量を求めていく。まず計算ベースとなる降雨、屋根、路面の水質を当該地域のデータより算出する⁵⁾。また実測データより、総流出負荷に占める各発生源別負荷量の割合を求めておく。降雨、屋根からの流出負荷は、降雨量が10mmを越えたとそれまでに流出するとし各発生源別に表5に示す基礎式を用いて管きよ外からの流出負荷量を求め、これが求めれば、先に求めた管きよ外流出負荷の総流出負荷量に対する割合で除して、総流出負荷量を求め、これに補正係数を乗じたものを初期堆積負荷量とした。

以上述べた方法により、対象降雨の各諸元を用いて各降雨時の初期堆積負荷量を算定したが、ここで路面水質は実測値が得られなかったため、土木研究所道路排水実験⁶⁾の平均水質を用いた。

② 係数の一般化およびシミュレーション手法

各降雨ごとに算定した係数に一般性をもたせ、モデルによる流出予測シミュレーションを可能とするため、係数が流量特性だけで得られるよう両者の関係を明らかにする。

各モデルの係数と対象降雨総流出量との間には、図2、3に示すように、どの場合にもある一定の関係が得られ、それは線形回帰分析等の解析を行うことにより求められる回帰推定式で表わし得る。この推定式の一例を図2、3中に示す。

以上のようにして、モデルごとに各降雨の係数の推定式を算定する。

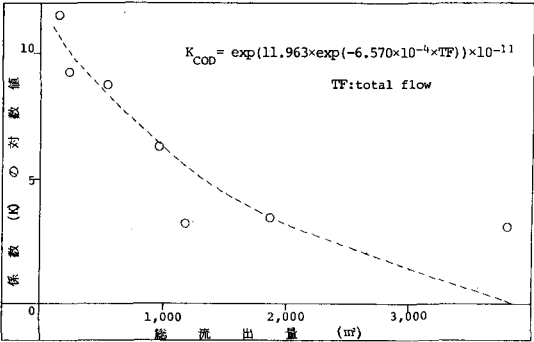


図 3 堆積負荷運動評価モデルの係数推定グラフ (COD)

	考 え 方	基 礎 式
降雨	降雨の汚濁負荷は屋根、路面の面積より算定	$S_1 = P_1 \times R \times C \times (A - A_2 - A_3)$
屋根	降雨による屋根負荷流出量とその平均水質より求める	$S_2 = P_2 \times R \times C \times A_2$
路面	降雨による路面負荷流出量とその平均水質より求める	$S_3 = P_3 \times R \times C \times A_3$
管きよ	全負荷量から降雨、屋根、路面負荷量を引いた値とする	$S_4 = \Sigma S - (S_1 + S_2 + S_3)$

S: 負荷量
P: 平均水質
R: 降雨量
C: 流出係数

1: 降雨
2: 屋根
3: 路面
4: 管きよ

表 5 初期堆積負荷量算定の基礎式

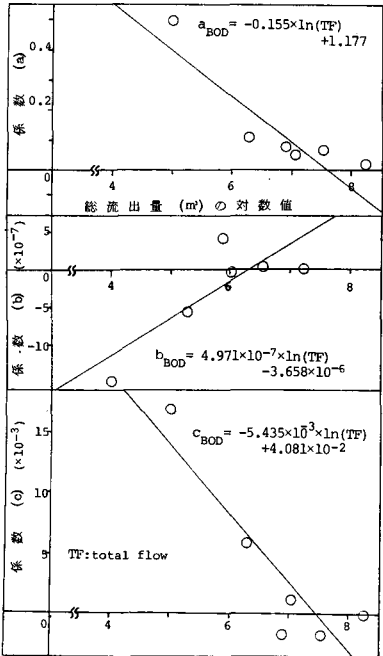


図 2 3 段流出モデルの係数推定グラフ (BOD)

これら推定式から得られた各降雨ごとの係数の推定値と先に算定した初期堆積負荷量を用いて、各モデルごとにシミュレーションを行った。

(3) シミュレーション結果の考察

図4に各モデルの表現特性比較のために各シミュレーション結果を同一図上にプロットしたものを示す。これらは推定式による係数の推定値と初期堆積負荷量、算定値を用いてシミュレーションしたものであり、その結果にはパラメータ同定方法などによる影響が存在するかも知れないが、モデルの諸特性は見出せ得ると考えられる。これより次の事が特性として挙げられる。

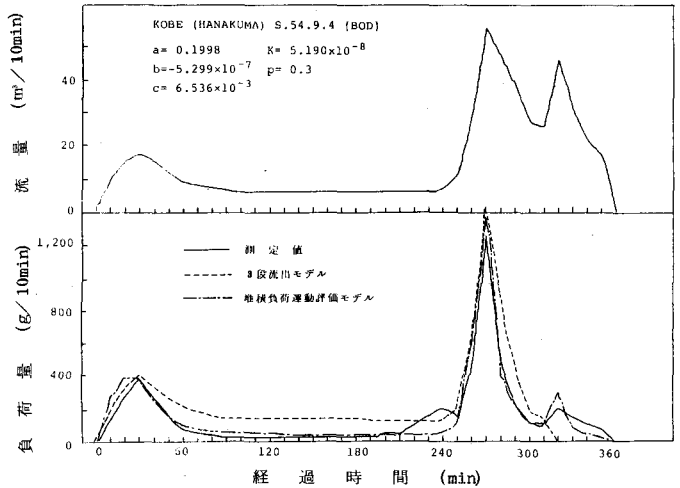


図 4 各モデルによるシミュレーションの比較 (BOD)

- ① 3段流出モデルは一般に実測値よりもシミュレーション値の方が負荷量流出が早い時期に発生し、そのため初期堆積として与えた負荷量を降雨流出途中ですべて流出してしまうこともある。
 - ② 堆積負荷運動評価モデルは一般に降雨流出の変化による負荷量流出の増減を比較的表わし得ているが、3段流出モデルとは逆に、多少、負荷流出が遅れる傾向が見られる。
 - ③ 3段流出モデルは、前半のピークは比較的多く、後半のピークは比較的小なく負荷が流出する傾向がある。
 - ④ 堆積負荷運動評価モデルは、3段流出モデルとは逆に前半のピークは比較的小なく、後半のピークは比較的多く負荷が流出する傾向がある。
 - ⑤ 3段流出モデルは、最初のピーク流出後の低減部分における急激な負荷量の落ち込み、および相対的に流出量の少ない部分の表現に困難性が見られる。
 - ⑥ 堆積負荷運動評価モデルは、ピーク流出後の低減部分を適確に表現している。
- 次に各水質項目についてモデルによるシミュレーションの結果から評価を行う。

① BOD

3段流出モデルでは、係数の算定値と推定値との相関性が多少他の水質項目に比べて劣っているものの、シミュレーションの相関性は高く、再現精度も良好である。

堆積負荷運動評価モデルのシミュレーションは、相関性、再現精度とくに良好で、3段流出モデルと比較して優れている。

② COD

3段流出モデルによるシミュレーションは全体的に高い相関性を示し、ピーク時の流出状態も多少実測値よりも表現されることがあるが比較的再現できている。また各降雨における結果と比較すると相対的に流出量の多いケースでの再現性に優れている。

堆積負荷運動評価モデルによるシミュレーションの相関性は、全体的に当論文で行った各シミュレーションの中で最も相関性が高く、その再現精度も優れている。

③ SS

3段流出モデルによるシミュレーションの再現性は他ケースと比較してやや低い。また、このモデルの特性である負荷流出が実測よりも早く発生し、降雨流出継続中に負荷流出が終了してしまう傾向が顕著になって

いる。したがって相関性は比較的良好であるにも関わらず、再現精度はやや低くなっている。

堆積負荷運動評価モデルでは、他項目の場合と比較すると再現性はやや低いもののピーク時流出の表現は十分行なわれており、全体的な相関性も良い。また、段流出モデルの場合と同様にモデルの特性が顕著に表現されており、実測よりも負荷流出が少なく表現されることもある。

5. 結言

雨水管の流出負荷を適切に表わすために、流量に寄与する流出分と堆積負荷に寄与する流出分の和に流量と堆積負荷の積に寄与する流出分を加えた、段流出モデルと堆積負荷量と流量およびその増減の3つの要素の積で表わした堆積負荷運動評価モデルについてモデル構成を行い、その妥当性について検討した。

その結果、当モデルは雨天時の雨水管からの流出負荷を適切に表現でき、水域環境管理を行う上で大きな効果をもたらすことが明らかとなった。今後、さらに各降雨等についての検討を行っている。

参考文献

- 1) 和田安彦, 吉本幸典; 水域アセスメントのための雨水幹線流出負荷の考察, 環境問題シンポジウム論文集, No. 9, 土木学会, 1981年8月
- 2) 和田安彦; 非点源負荷における分流式雨水管の流出負荷の考察, 水利科学, No. 138, No. 139, 1981年4月, 6月
- 3) 神戸市; 非特定汚染源による汚染防止対策調査, 昭和54年度 環境庁委託業務結果報告書
- 4) 建設省土木研究所; 分流式下水道の雨水流出水に関するデータベース, 土木研究所資料, 第1549号, 1979年1月
- 5) 建設省土木研究所; 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, 第1487号, 1979年
- 6) 建設省土木研究所; 都市域からの雨天時汚濁流出調査報告書, 土木研究所資料, 第1069号, 1975年, 3月
- 7) 山形県; 非特定汚染源による汚染防止対策調査, 昭和53年度 環境庁委託業務結果報告書