

# 都市域ノンポイント汚染源負荷の堆積・流出挙動 モデルと流出制御に関する研究

和田安彦<sup>1</sup>・三浦浩之<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (〒564 大阪府吹田市山手町3-3-35)

<sup>2</sup>正会員 関西大学助手 工学部土木工学科 (〒564 大阪府吹田市山手町3-3-35)

都市河川に代表される都市域公共用水域の水質悪化の原因のひとつが、都市域のノンポイント汚染源からの汚濁負荷である。本論文では都市域の代表的なノンポイント汚染源である路面と雨水樹における汚濁物質の堆積・流出挙動について、実態調査を行い、汚濁物質の堆積挙動が降雨特性により変化することを明らかにした。また、各汚染源の堆積・流出メカニズムをシミュレートするモデルを構築した。そして、このモデルを用いて、ノンポイント汚染源の清掃による堆積汚濁物質の除去による雨天時ノンポイント汚染源負荷流出量の低減効果を予測した。その結果、雨水樹は都市域のノンポイント汚染源負荷が集約されるため、その清掃管理が雨天時流出負荷の低減に効果のあることを明らかにした。

*Key Words* : non point pollutants, simulation model, storm water runoff, runoff control

## 1. はじめに

近年、都市域における公共用水域水質保全には、下水道整備等の生活排水、工業廃水の浄化と共に、ノンポイント汚染源からの汚濁負荷の除去が重要であることが認識されてきた。これは、公共用水域に流入する汚濁物質の中で、生活排水等の特定汚染源からのものの比率が低下する一方で、相対的に特定できない広域的に散在する汚染源、すなわち、ノンポイント汚染源からの汚濁物質の比率が増加しているためである<sup>1)</sup>。ノンポイント汚染源負荷はその集積によってこれまでの特定汚染源からの集中的な負荷に代わって水質汚濁の主要な原因になっている<sup>2)</sup>。したがって、公共用水域の適正な水質保全には、既存の特定汚染源からの汚濁負荷削減対策では対処しきれない市街地等からのノンポイント汚染源からの汚濁負荷削減対策が必要である。

適切なノンポイント汚染源からの汚濁負荷削減対策を実施するためには、まず、ノンポイント汚染源負荷の堆積・集積メカニズムと流出メカニズムの解明が必要であり、これにより対策の基本方針と対策実施効果

の把握が行える。ノンポイント汚染源負荷の堆積・流出メカニズムをシミュレーションするモデルとしては、下水道流出系を中心とするSTORM<sup>3)</sup>、SWMM<sup>4)</sup>、土研モデル<sup>5)</sup>、堆積負荷運動評価モデル<sup>6)</sup>、2段流出モデル<sup>7)</sup>等があり、さらに河川流域を対象にノンポイント汚染源負荷の堆積・流出挙動に着目したものととして、連続調査をもとに構築された堆積掃流構造モデル<sup>8)</sup>、タンクモデルに汚濁物質流出機構を組み込んだ水質タンクモデル<sup>9)</sup>、簡易に流出負荷量を把握できる汚濁物質流出プロファイルモデル<sup>10)</sup>、負荷流出パターンを考慮した流出モデル<sup>11)</sup>等がある。堆積掃流構造モデルではモデル中の係数決定に単なるカーブフィッティングでなく修正Powell法や準ニュートン法による係数探索法を提案している。さらに、汚濁物質の流出挙動をより詳細に表現しようとするものにKISNPS<sup>12)</sup>等がある。

これらのモデルはノンポイント汚染源負荷を流域単位、排水区単位で把握・表現するには適しているが、都市域の排水系統の基本ユニットである数ha規模の排水ブロックにおけるノンポイント汚染源負荷の堆積・流出挙動を表現することは困難である。

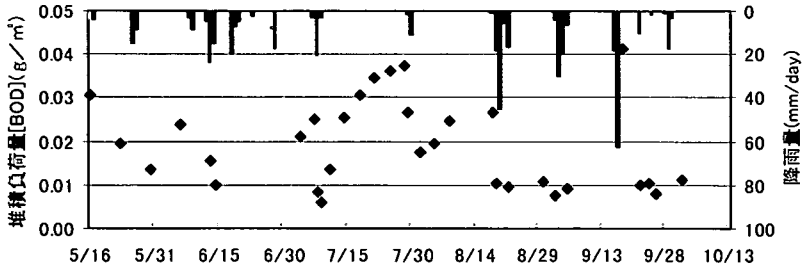


図-2 堆積汚濁物質量の経時変化

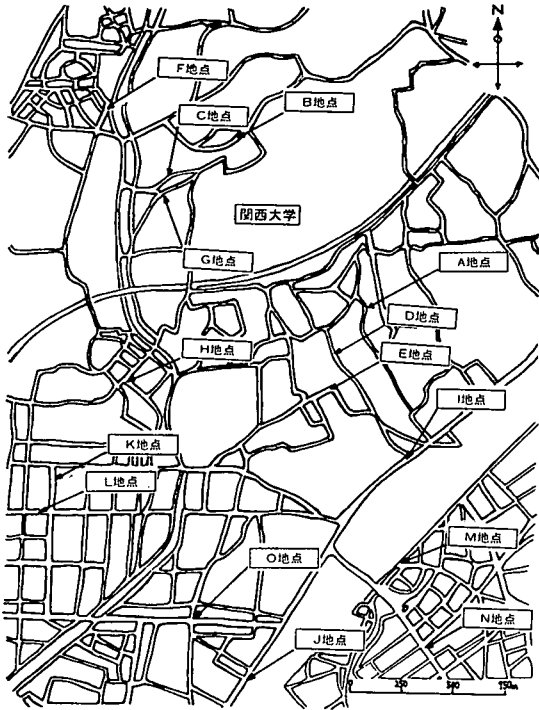


図-1 調査地点

一方、都市域におけるノンポイント汚染源負荷対策には、路面清掃等による堆積汚濁物質の除去や、汚濁した雨水流出水の処理があるが、これらの対策は比較的小さな規模で行うものであり、その効果の評価は排水ブロック単位で行うべきものである。このような排水ブロック単位でのノンポイント汚染源負荷の解析に適するモデルとして、筆者らはこれまで、排水ブロックの個別のノンポイント汚染源における汚濁物質の挙動に着目して、路面堆積負荷流出モデル<sup>13)</sup>、雨水樹流出負荷モデル<sup>14)</sup>等を構築してきた。

そこで、本研究では、都市域の排水ブロック単位で

のノンポイント汚染源負荷の堆積・流出挙動のよりの確な把握とモデル化を計った。研究対象はノンポイント汚染源負荷の中でも汚濁物質の集積が最も多く、雨天時排水水質の汚濁が問題視されている<sup>15)~18)</sup>道路とし、調査は道路側溝および雨水樹で実施した。これらの汚染源は都市域全体のノンポイント汚染源負荷が排出系に流入する直前に位置することから、これら汚染源の定期的な清掃による公共用水域への雨天時流出汚濁負荷の軽減化効果を検討した。

## 2. 道路側溝への汚濁物質堆積・流出挙動

### (1) 道路側溝への汚濁物質の堆積挙動調査

#### a) 調査概要

道路側溝への汚濁物質の堆積状況に関しては、筆者らによる用途地域別路面堆積負荷量に関する調査<sup>20)21)</sup>がある。また、EPAによる調査<sup>21)</sup>もある。

これら既往研究の成果を踏まえて、路面の堆積負荷の集中する側溝部分における汚濁物質の堆積挙動を連続調査により検討した。

調査は本大学周辺の生活道路、幹線道路の側溝計13地点で実施した。堆積土砂量調査を週1回程度、堆積土砂含有負荷量調査を2~3週に1回程度の頻度で行った。また、比較対照のため、さらに8地点において堆積土砂量、堆積土砂含有負荷量調査を行った。調査地点の位置を図-1に示す。

調査地点の選定に当たっては、道路側溝の整備状態、住民等による清掃等の外乱の有無等を考慮した。

#### b) 調査結果

連続調査結果の一例を図-2に示す。すべての調査時に堆積土砂含有負荷量を分析することが困難であったため、数回に一度の頻度で含有負荷量分析を行った。含有負荷量分析しなかった場合の堆積負荷量は、全調査の平均の含有負荷量値を用いて算出した。

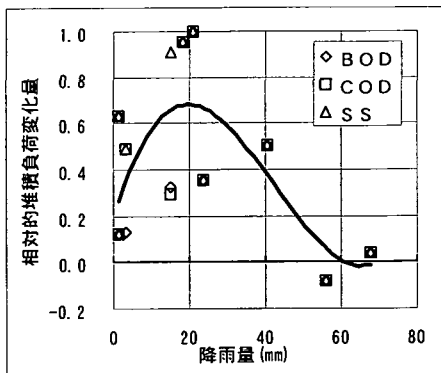


図-3 降雨量と相対的堆積汚濁物質減少量の関係

従来の研究において明らかにされているように、晴天期間中に堆積汚濁物質量は増加し、雨天時に流出して降雨後には減少している。この傾向は水質汚濁項目に関係なく表れている。しかし、必ずしも降雨後に堆積汚濁物質量が減少するとは限らず、降雨によっては降雨前よりかえって増えている場合も見られた。この降雨後の堆積汚濁物質量の増加は、街路樹のある道路や付近に公園、空き地等のある道路で目立つ傾向であった。

### c) 堆積汚濁物質の挙動

降雨によっては降雨前よりも降雨後に堆積汚濁物質量が増加する現象が見られた。降雨前後の堆積汚濁物質減少量が降雨量20mm程度の降雨の場合に最も大きかったことから、この場合の堆積汚濁物質減少量を1.0とした時の降雨前後の堆積汚濁物質の減少量の関係を求めた。これを図-3に示す。また図中の曲線は堆積汚濁物質減少量の近似曲線である。

降雨量が20mm程度以下では降雨量の増加に従って降雨前後の堆積汚濁物質減少量は多くなるが、降雨量が20mm程度を超えると降雨量が多い方が降雨前後の堆積汚濁物質減少量は少なくなっている。さらに、降雨量が50~60mm以上となると降雨前より降雨後の方が堆積汚濁物質量が増える場合もみられた。

この現象は、次のように考えると説明できる。すなわち、市街地への降水の大半は道路から道路側溝、雨水枡を経て下水道等へ流出している。これらの雨水流出に伴ってノンポイント汚染源負荷も下水道へと流出するが、その一部が流出経路上である道路側溝に堆積する。この新たな堆積汚濁物質量が降雨による道路堆積汚濁物質流出量よりも多い場合に、降雨後に堆積汚濁物質量が増加することになる。

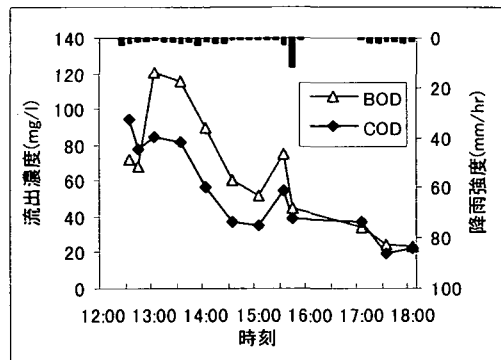


図-4 流出水濃度の経時変化

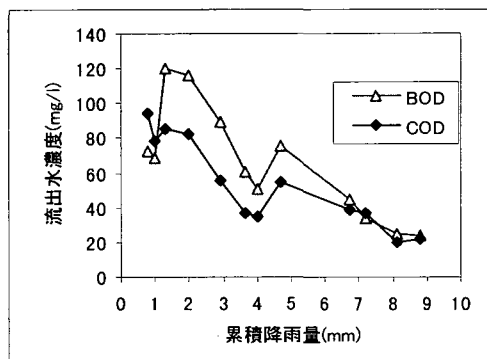


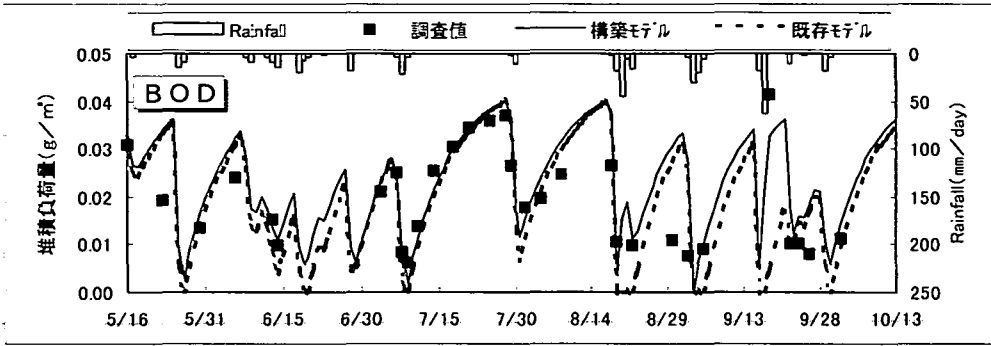
図-5 累積降雨量と流出水濃度

### (2) 道路側溝堆積汚濁物質の流出挙動

雨天時の道路側溝堆積汚濁物質の流出挙動を調査した。調査では、道路側溝を流出する雨水排水を雨水枡流入位置で採取し、流出水量、水質の測定を行った。道路側溝雨水排水の経時変化を図-4に示す。調査地点の雨水枡の設置間隔は約22m、集水面積は約44m<sup>2</sup>である(道路幅員4m)。流出濃度は降雨初期に高く、次第に低下していく傾向がある。

また、降雨中盤以降に降雨強度が強くなると流出濃度は高くなるが、初期流出ほど高濃度とはならないことが読みとれる。また、図-5には累積降雨量と流出濃度の関係を示す。基本的に累積降雨量の増加に比例して流出濃度は低下している。

このような道路側溝の雨水排水濃度の変動特性より、道路側溝堆積汚濁物質の流出はその堆積量に依存する比率が高いことがわかる。したがって、道路側溝からの汚濁物質の雨天時流出挙動の定量的な把握には、降雨開始時の初期堆積負荷量の推定が重要である。



$$\langle K_g = 0.12, a_g = 0.005, c_R = 0.25, m_R = 15, S_g = 0.0005 \rangle$$

図-6 堆積汚濁物質質量変動シミュレーション結果

### 3. 道路側溝汚濁物質堆積・流出モデル

#### (1) 従来の堆積モデルにおける問題点

既存の路面堆積負荷モデルとして次のものがある。

$$P_{g(n)} = P_{g_0} \cdot e^{-K_g n} + \frac{a_g(1 - e^{-K_g n})}{1 - e^{-K_g}} \quad (1)$$

ここで、 $P_g$  : 路面堆積負荷量( $g/m^2$ )、 $P_{g_0}$  : 初期堆積負荷量( $g/m^2$ )、 $K_g$  : 路面堆積負荷の減衰係数、 $n$  : 先行晴天日数(日)、 $a_g$  : 1日当たりの路面堆積負荷量( $g/m^2$ )である。

この式では、路面等には単位面積当たり毎日同じ負荷量だけ堆積し、堆積した負荷量は1日ごとにある減衰係数で減少すると考えている<sup>13), 20), 26)</sup>。このモデルと以下に示す路面堆積負荷流出モデルにより晴天時堆積負荷量の推定シミュレーションを行った。

$$Q_{g(n)} = c_R \cdot (P_{g(n)} \cdot A)^{m_R} \cdot r_{(n)} \quad (2)$$

$$P_{g(n+1)} = P_{g(n)} - Q_{g(n)} / A \quad (3)$$

シミュレーション結果の一例を図-6に示す。堆積負荷量の変動を表現できるようにカーブフィッティングにより各係数の設定を行ったが、総降雨量が20mm程度より大きな降雨の場合には、再現性は低くなっている。この原因は、用いたモデルでは降雨量が大い場合に生じる周辺地域からの汚濁負荷の流れ込みを考慮していないためである。そこで、このモデルをもとに、降雨時の周辺部からの汚濁物質の供給を補給汚濁物質質量として取り扱い、シミュレーションの再現性の改良を行った。

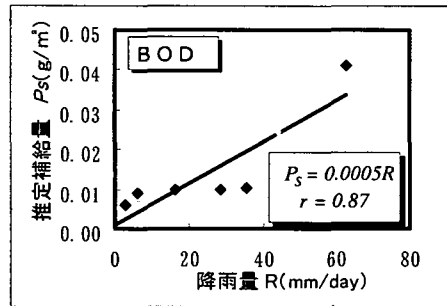


図-7 降雨量と推定補給量の関係

#### (2) 汚濁物質補給の考慮

降雨時の汚濁物質の道路側溝への補給量は、降雨量の影響を受けると考えられる。そこで、先のモデルによるシミュレーション結果において、降雨後のシミュレーション値と実測値との差を補給汚濁物質質量と考え、その値と降雨量との関係を解析した。解析結果の一例を図-7に示す。データ数は少ないが、両者の相関性の高いことがわかる。

#### (3) 堆積汚濁物質変動シミュレーション

以上の結果より補給項を既存モデルの連続式に次のように組み込んだ。

$$P_{g(n)} = P_{g(n-1)} - L_g + P_{sg} \quad (4)$$

$$P_{sg} = S_g \cdot R$$

ここで、 $P_{sg}$  : 周辺部からの補給汚濁物質質量( $g/m^2$ /日)、 $S_g$  : 補給汚濁物質係数( $g/m^2/mm$ )、 $L_g$  : 路面側溝流出汚濁物質質量( $g/m^2$ /日)、 $R$  : 降雨量( $mm$ /日)である。なお、補給汚濁物質係数は先の降雨量と推定補給汚濁物質質量の回帰式の傾きで表されると仮定した。

既存モデルに補給を考慮した構築モデルを用いたシミュレーションを行った。シミュレーション結果を既存モデルの結果と共に図-6に示す。補給負荷量を考慮することで、総降雨量20mm以上の連続降雨の後の堆積汚濁物質の減少及び増加状況が示されている。このように、従来の算出モデルでは、汚濁物質の補給を考慮していないため、全体的に堆積汚濁物質を少なく見積もっており、公共用水域水質保全の観点からは危険側の結果をもたらしているといえる。

#### (4) 雨天時流出シミュレーションモデル

路面堆積負荷は、粒径が大きい堆積性負荷と微粒子の付着性負荷に分けることができ、それぞれ流出特性が異なるので、別々に分けて取り扱うと流出過程がより精密に表現することができる<sup>27)</sup>。しかし、流出負荷のうち堆積性負荷、付着性負荷の割合を調査して確認することは困難である。

そこで、流出モデルによりそれぞれの流出特性を検討した。堆積性負荷は流出水により容易に洗い流されるためモデルは流出水量の関数形とする。一方、付着性負荷は降雨水によって洗い出されて初めて流出するため、その流出モデルは降雨強度の関数形とした。

【運動式】

$$Lg = Lg_a + Lg_s \quad (5)$$

$$Lg_a = Cg_a \cdot Pg_a^{m_a} \cdot Q^{n_a} \quad (6)$$

$$Lg_s = \frac{1}{3600} \cdot Cg_s \cdot Pg_s^{m_s} \cdot (R - R_0)^{n_s} \quad (7)$$

【連続式】

$$\frac{dPg}{dt} = \frac{dPg_a}{dt} + \frac{dPg_s}{dt} \quad (8)$$

$$\frac{dPg_a}{dt} = -Lg_a + Psg_a \quad (9)$$

$$\frac{dPg_s}{dt} = -Lg_s + Psg_s \quad (10)$$

$$Psg_a = \frac{1}{3600} \cdot S_a \cdot R \quad (11)$$

$$Psg_s = \frac{1}{3600} \cdot S_s \cdot R \quad (12)$$

ここに、 $Lg_a$ ：堆積性路面負荷流出量( $g/m^2/s$ )、 $Lg_s$ ：付着性路面負荷流出量( $g/m^2/s$ )、 $Pg_a$ ：堆積性路面負荷量( $g/m^2$ )、 $Pg_s$ ：付着性路面負荷量( $g/m^2$ )、 $Psg_a$ ：堆積性路面負荷補給量( $g/m^2/s$ )、 $Psg_s$ ：付着性路面負荷補給量( $g/m^2/s$ )、 $S_a$ ：堆積性路面負荷補給係数( $g/m^2/mm$ )、

表-1 堆積性負荷と付着性負荷の比率

調査地点	BOD		COD		T-N		T-P	
	堆	付	堆	付	堆	付	堆	付
S3	16	84	10	90	20	80	17	83
S7	13	87	6	94	10	90	18	82
I	18	82	17	83	12	88	28	72
J	8	92	7	93	10	90	15	85
K	9	91	4	96	7	93	13	87
L	6	94	4	96	7	93	11	89
P	10	90	10	90	13	87	9	91
平均	11	89	8	92	11	89	16	84

$S_s$ ：付着性路面負荷補給係数( $g/m^2/mm$ )、 $R$ ：降雨量( $mm/hr$ )、 $R_0$ ：限界有効降雨量( $mm/hr$ )、 $Cg_a$ ：堆積性路面負荷流出係数、 $Cg_s$ ：付着性路面負荷流出係数、 $m_a, m_s, n_a, n_s$ ：運動式の係数である。

初期堆積負荷量は、雨天時の周辺部からの補給を考慮した堆積モデルを用いて設定する。また、周辺部からの汚濁物質の補給量は、先に求めた負荷補給係数を用いて算出する。

堆積性負荷、付着性負荷の初期堆積量は、表-1に示す対象地域における堆積汚濁物質調査結果より求めた各汚濁負荷の存在比率を用いて算出した。

#### 4. 雨水樹での汚濁物質堆積・流出モデル

##### (1) 貯留水量、水質の挙動

雨水樹からの沈殿・堆積汚濁物質の流出プロセスを表すモデルについては、筆者らがJan J. Fletcherらのモデル<sup>19)</sup>をもとに雨水樹流入水量の時間的変動を考慮して構築したモデルがある<sup>19)22)</sup>。したがって、ここでは、まず、降雨開始時に雨水樹に残留している貯留水の水量、水質について検討した。

##### a) 雨水樹貯留水量

雨水樹の貯留水量、水質は、雨水樹から下水管渠への流出負荷量に影響する。特に降雨初期の流出負荷量には大きく影響する。雨水樹貯留水量は、降雨により雨水樹の貯留可能最大容量まで貯留され、晴天期間が続くと徐々に蒸発散し減少していく。晴天期間が長期にわたると雨水樹内の貯留水量はすべて蒸発する。このような貯留水量の変動状況を、先に示した道路側溝堆積汚濁物質調査地点にある雨水樹において調査した。調査結果の一部を図-7に示す。この図は晴天期間の前後の貯留水量の変化を示したものである。これより、雨水樹に残留した貯留水は晴天日にほぼ一定量が蒸発により失われていること、その量は樹により差があるもののある範囲内にあることがわかる。すなわ

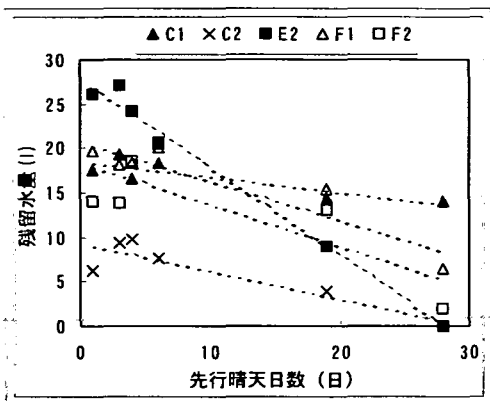


図-8 晴天日数と雨水樹残留貯留水量の関係

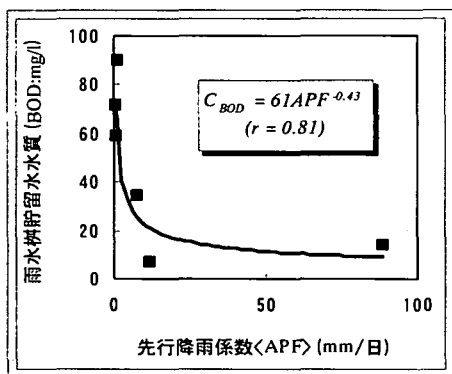


図-9 先行降雨係数APFと雨水樹貯留水質の関係

ち、雨水樹から晴天日に蒸発する貯留水量はほぼ0.3~0.4(ℓ/日)にあり、多い場合には約1.0(ℓ/日)程度になることもある。

#### b) 雨水樹貯留水質

雨水樹に降雨後に残留した貯留水中の汚濁物質濃度は、晴天時の蒸発により貯留水量が減少するため次第に濃縮されて高くなる。また、開口部からの汚染物質侵入等により濃度が高くなることもある。さらに、嫌気性状態になって汚濁が進行する場合もある。開口部から雨水樹内に侵入している汚染物質としては、タバコの吸い殻、落葉等が多い。

また、降雨後の貯留水質は降雨量の多い場合ほど良好であることが調査結果より明らかになった。

そこで、前回の降雨量と先行晴天日数が雨水樹の残留貯留水の水質に影響すると考え、これらと貯留水質との関係を検討した。ここでは前回の降雨量と先行晴天日数を表す指標として先行降雨係数APF (=前回の降雨量/先行晴天日数)を用いた。

調査結果をもとに、先行降雨係数APFと貯留残留水

水質の関係をBODを例として図-8に示す。先行降雨係数が小さい(すなわち、前回の降雨量が少なく、その後の晴天日数が長い)と貯留水の汚濁物質濃度は高濃度となり、先行降雨係数が大きい(前回の降雨量が多く、その後の晴天日数も少ない)と低濃度になること、先行降雨係数がある値以上になると汚濁物質濃度はさほど変化しなくなることが明らかになった。他の水質項目も両者間には同様な関係のあることが示された。したがって、先行降雨係数APFにより降雨直前の雨水樹残留貯留水の水質を予測できる。

#### (2) 雨水樹沈殿・堆積汚濁物質の流出モデル

筆者らは雨水樹内に沈殿・堆積した汚濁物の雨天時流出機構は次の2つのプロセスにより成り立っているものと考え、流出モデルを構築した<sup>14)</sup>。

- ① 貯留残留水溶存物質の流出
- ② 沈殿堆積汚濁物質の巻き上がり・流出

<溶存物質除去式>

$$C_D = C_0 \cdot e^{-tQ(P/100)^V} \quad (13)$$

<沈殿物質除去式>

$$C_S = K/Q(1 - e^{-tQ^N}) \quad (0 \leq t \leq M/K) \quad (14)$$

$$C_S = K/Q(1 - e^{-M/KQ^N})e^{-(t-QM/MQ(KV))} \quad (M/K < t) \quad (15)$$

ここで、 $C_D$ : 溶存汚濁物質濃度(mg/ℓ)、 $Q$ : 雨水樹流入水量(ℓ/s)、 $P$ : 樹内溶液混合割合(%),  $V$ : 雨水樹容量(ℓ)、 $C_0$ : 雨水樹貯留残留水初期濃度(mg/ℓ)、 $t$ : 経過時間(s)、 $C_S$ : 沈殿汚濁物質流出濃度(mg/ℓ)、 $K$ : 流入水量 $Q$ の時の単位時間当たりの沈殿汚濁物質巻き上がり量(mg/s)、 $M$ : 流入水量 $Q$ における巻き上がり可能沈殿汚濁物質質量(mg)

#### 5. 堆積汚濁物質除去による公共用水域流出汚濁物質量の削減効果予測

##### (1) 道路・雨水樹清掃による汚濁物質の除去

###### a) 路面清掃

1日の標準清掃距離は清掃機械、道路条件、塵量、回送距離、昼夜作業の別等により異なるが、20~40kmが一般的であり、大都市などの交通事情の厳しい地域では20km前後が標準である。作業の頻度は道路の種類、重要性、交通量、塵量、沿道の状況などにより異なるが、大都市では週2~3回、地方都市では週1~2回が多い。機械清掃の場合、清掃機械は清掃作業条件に合わせてその選定と組み合わせが検討されている<sup>23)24)</sup>。

一般的には、路面清掃車の前に粗大塵収集車と散水車、後方にダンプトラックが配置される。

ただし、路面清掃は路面環境・景観を改善するために行われているもので、粗大塵収集には優れているが、路面堆積土砂の粒子径が小さいものは収集できない。すなわち、堆積性汚濁物質の除去には効果を発揮するが、付着性汚濁物質の除去効果は少ないと考えられる。

#### b) 雨水樹清掃

雨水樹の清掃方式には、真空吸引式、ポンプ式、水ジェット式、バケツ式、オーガ式、そして人力式(じょれん、スコップ等)があるが、最も一般的なのは真空吸引式側溝清掃車によるものである<sup>24)</sup>。清掃頻度は道路管理者や道路の種別により異なるが、およそ年1回以上である。

雨水樹には道路や屋根からの汚濁物質が集積していることから、雨水樹沈殿堆積汚濁物質の清掃により、雨天時の汚濁物質流出を抑制できると考えられる。

#### (2) 路面清掃実態調査

路面清掃により道路側溝に堆積している汚濁物質がどれだけ除去されているのかについて、実態調査を行った。まず、路面清掃実施前日に汚濁物質の堆積しているある1区間のL側溝の一部(50cm長)の堆積汚濁物質質量を採取し、堆積性と付着性に分け定量分析する。次に路面清掃後に、前日堆積汚濁物質を採取していない部分の堆積汚濁物質を採取し、同様に堆積性と付着性に分け定量分析する。この分析結果と前日の分析結果より、清掃による汚濁物質除去について定量評価する。

清掃前後の粒径別堆積土粒子量調査結果より、堆積性汚濁物質の清掃除去効率は平均で約60%であることが明らかになった。また、路面清掃車による清掃では付着性汚濁物質の清掃除去効率はおよそ10%程度(COD)に過ぎないことが判明した。

路面清掃車による路面堆積汚濁物質の清掃除去効率は粒径の大きい物質ほど高いことから、清掃前後の堆積汚濁物質の粒度分布を調べた。清掃前後の堆積物質の粒径分布は図-10のようになった。図にはEPAによる粒径別清掃効率の値<sup>25)</sup>から予測した清掃後の堆積物質の粒度分布も示している。路面清掃後の粒度分布とEPAの清掃効率値を用いた予測結果はほぼ等しい結果となった。したがって、路面清掃車による清掃は粒径の大きい堆積汚濁物質ほど効果が高いことが調査結果からも証明できた。

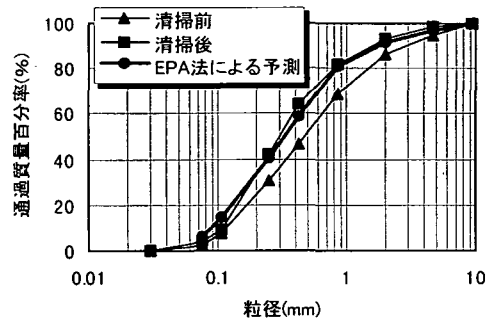


図-10 路面清掃前後の堆積物の粒径分布変化

#### (3) 路面清掃等による汚濁物質除去効果の予測方法

##### a) 路面清掃による汚濁物質除去

路面清掃による汚濁物質除去効果は、筆者らによる路面清掃を考慮した路面堆積・流出モデル<sup>26)</sup>を用いて予測した。

$$P_{g(n)} = \left\{ P_{g_0} + \frac{a_g(1 - e^{-k_g n c})}{1 - e^{-k_g}} \right\} \cdot (1 - E)e^{-k_g(n - n_c)} + \frac{a_g(1 - e^{-k_g(n - n_c)})}{1 - e^{-k_g}} \quad (16)$$

ここで、 $E$  : 清掃効率,  $n_c$  : 清掃間隔(日)である。

また、路面清掃車により除去できるのは堆積性の汚濁物質であり、付着性の汚濁物質は除去できないことから、路面清掃による汚濁物質除去は堆積性路面負荷のみについて行われるとした。なお、連続式において、雨天時の周辺部からの汚濁物質の補給を考慮した。

##### b) 雨水樹清掃による汚濁物質除去

雨水樹清掃により、樹内沈殿・堆積汚濁物質は大部分除去される。このため、雨水樹清掃によるノンポイント汚染源負荷の制御効果予測は、沈殿・堆積汚濁物質の90%が除去され、貯留残留水はそのまま除去されないとして、シミュレーションを行った。

#### (4) ノンポイント汚染源負荷の堆積・流出挙動の現況シミュレーション

##### a) 概要

上述したモデルを用いて、モデル地域からの路面(側溝)および雨水樹における汚濁物質堆積挙動と流出挙動のシミュレーションを行った。

モデル地域は実地調査地域に隣接する都市再開発地域である。モデル地域の諸元を表-2に示す。

シミュレーションする際の各解析モデルの諸係数値等は調査結果を基に同定したものをを用い、調査結果から同定できないものについては、ポリユートグラフ

表-2 モデル地域の諸元

総面積	45ha	計画人口	5,000人
幹線道路	4.2ha	建ぺい率	60%
区画街路	6.1ha	雨水樹設置数	862個
公園等	1.6ha		
宅地	33.1ha		

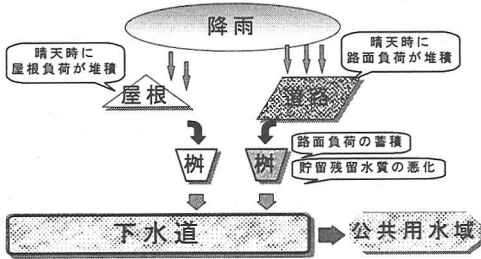


図-11 ノンポイント汚染源負荷の堆積・流出挙動

のカーブフィッティングにより同定したものを用いた。

また、モデル地域全体からのノンポイント汚染源負荷を把握するため、屋根における汚濁物質の堆積・流出挙動についてもシミュレーション解析した。モデルは堆積性路面汚濁物質の堆積・流出モデルを用い、減衰係数、流出係数等は研究室にて実施した実地調査結果に基づいて同定した値を用いた。

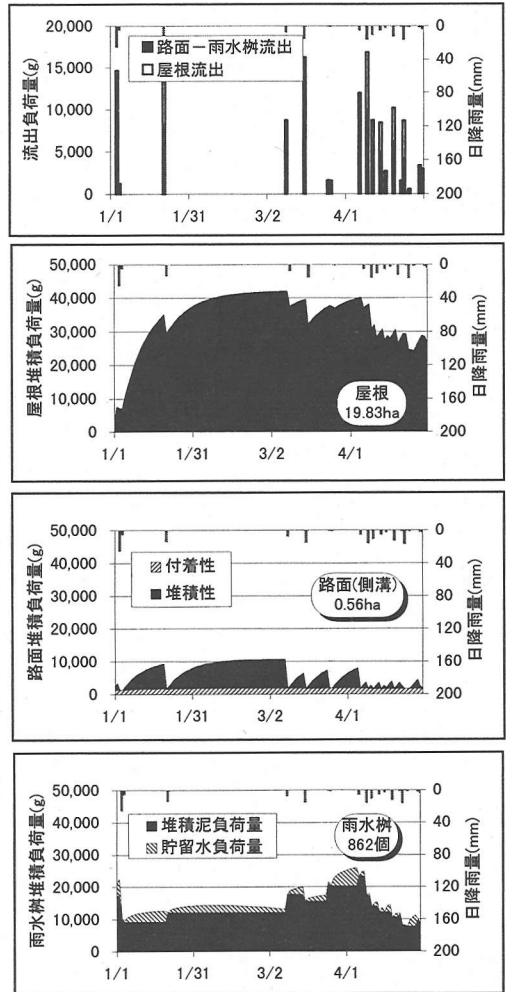
解析を行うノンポイント汚染源とその堆積・流出挙動のイメージを示すと図-11のようになる。屋根堆積汚濁物質は宅地内の枿を経て直接下水道に流出し、路面（側溝）堆積汚濁物質は一旦雨水枿に流入した後、雨水枿内の沈殿堆積汚濁物質と混合し、その一部が下水道へ流出する。

また、シミュレーション解析では、汚濁物質堆積挙動のシミュレーションは日単位で行い、雨天時の汚濁物質流出挙動のシミュレーションについては時間単位でシミュレートした。

b) 現況シミュレーション結果

現況シミュレーション結果を図-12に示す。計算期間は1995年1~4月であり、雨天時流出量は下水道へ流入するノンポイント汚染源負荷量を表している。個々の汚濁発生源では雨水枿に堆積している汚濁物質質量が多く、屋根堆積汚濁物質質量は少ないが、面積として屋根の占める割合が大きいため、地域全体では屋根堆積汚濁物質の比率が高くなる。

堆積性の路面汚濁負荷は比較的小降雨においても流出して堆積量が減少しているが、附着性の路面汚濁負荷は10mm程度の降雨が短い期間に集中して降らな



$$S_g = 0.0005(g/m^2/mm)$$

$$S_a = S_g, S_s = 0$$

$$Cg_a = 39.5, m_a = 2, n_a = 1$$

$$Cg_s = 0.0035, m_s = 1, n_s = 1$$

図-12 現況のノンポイント汚染源負荷の堆積・流出挙動

い限りあまり変動しない。

雨水枿へは堆積性の路面汚濁負荷が流入するため、雨水枿沈殿堆積物質の巻き上がりが生じないか、非常に少ないような小降雨時にはかえって降雨後に沈殿堆積汚濁物質質量が増加している。

(5) 路面清掃等による汚濁物質除去効果

a) 路面清掃の効果

路面清掃を2週間に一度実施した場合の下水道への雨天時流出負荷量の変化を図-13に、堆積負荷量の



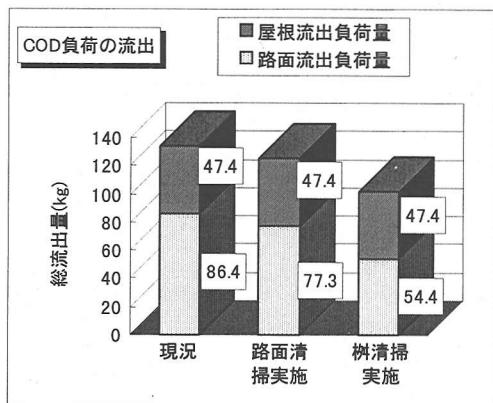


図-13 路面清掃と雨水樹清掃による雨天時ノンポイント汚染源負荷流出量の減少

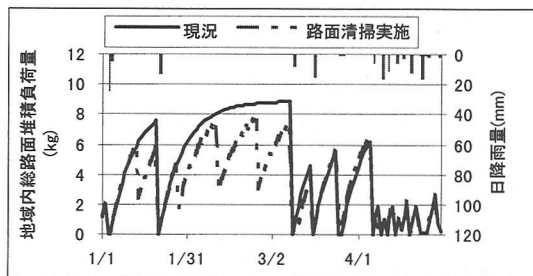


図-14 路面清掃によるノンポイント汚染源負荷堆積量変動

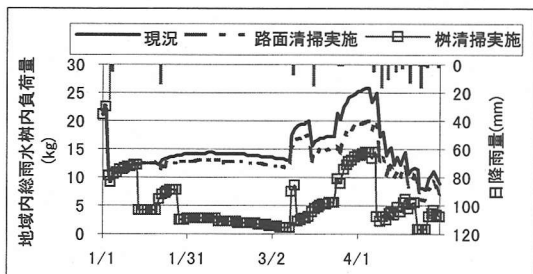


図-15 雨水樹清掃によるノンポイント汚染源負荷堆積量変動

減少状況を図-14に示す。路面清掃により雨水樹へ流出する汚濁物質が減少するため、雨水樹堆積汚濁物質質量も減少している。しかし、雨天時流出負荷量は現況より10%減少したに過ぎず、2週間に一度といった高い頻度で路面清掃を実施しても、地域全体からの雨天時のノンポイント汚染源負荷流出量の削減効果は低い。

#### b) 雨水樹清掃による効果

雨水樹清掃を路面清掃と同じく2週間に一度実施した場合の雨天時流出負荷量の変化を図-13に、堆積負荷量の減少状況を図-15に示す。雨水樹の清掃によ

り雨天時流出量を確実に低減化できており、現況に比較してシミュレーション期間の下水道への流出負荷量は40%弱も減少している。雨水樹の清掃はそこに流入する路面からの汚濁負荷も併せて除去することになり、清掃の効果が高い。

しかし、雨水樹の清掃は路面清掃に比較して効率が悪く、作業量が多くなるため、今回検討した頻度で地域全体の堆積汚濁物質を除去することは容易ではない。

このため、発生源対策としての雨水樹清掃と流出対策としての下水道等における雨天時流出対策を適切に組み合わせて公共用水域の水質保全を達成することが大切である。

また、雨水樹清掃の効果が高いことから、雨水樹堆積泥の清掃は比較的大きな降雨の発生する季節の前に、1年に数回程度の割合で実施しても効果は高いと考えられる。

## 6. 結論

都市域の公共用水域の水質保全を図るには、市街地等からのノンポイント汚染源からの汚濁負荷の削減対策が必要である。これは、既存の特定汚染源に対する汚濁負荷削減方策では対処しきれない。このため、代表的な都市域のノンポイント汚染源負荷である道路路面と雨水樹における汚濁物質の堆積・流出メカニズムを実地調査より明らかにし、これをシミュレートする解析モデルを構築した。さらに、モデル地域において解析モデルの同定を行った上で、ノンポイント汚染源負荷削減対策として各汚濁発生源における堆積汚濁物質の定期的な除去の効果を予測評価した。

得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 道路側溝の堆積汚濁物質は雨天時に降雨量に比例して流出するが、日降雨量が20mm程度を越える降雨時には道路の周辺部からの汚濁物質の供給があり、50~60mm程度の比較的大きな降雨後にはかえって堆積汚濁物質質量が増加する。
- 2) 道路側溝堆積汚濁物質の流出挙動は、流出汚濁物質を堆積特性から堆積性のものと付着性のものとに分けてモデル化することにより、従来のモデルよりもより高い再現性でシミュレートできる。
- 3) 雨水樹の貯留水質は晴天期間中に悪化していき、降雨開始時の水質は先行晴天日数と前回降雨量により影響を受ける。
- 4) 道路清掃車による路面清掃では、堆積汚濁物質の

うち、主として堆積性の汚濁物質が除去されるが、付着性の汚濁物質は大部分が除去されずにとどまる。

- 5) 市街地からのノンポイント汚染源負荷の雨天時流出を抑制するために、路面清掃を頻度高く実施しても効果が低い。それよりも清掃効率は低いが、市街地のノンポイント汚染源負荷が集積する雨水桝の清掃の方が効果は高い。

これらの結果から、市街地からのノンポイント汚染源負荷の影響を受ける公共用水域の水質保全には、市街地のノンポイント汚染源が集積する雨水桝における堆積汚濁物質の除去が効果的であることが明らかになった。しかし、雨水桝の清掃を定期的に行うことは、その効率性やコストを考えると難しい点がある。また、自治体による路面や雨水桝等の清掃は、都市計画道路が中心であり、幹線道路以外にも多数の雨水桝がある。したがって市民自らが都市環境の質を高める目的で雨水桝の清掃を実施することが効果的であると考える。すなわち、環境の質的な向上には自治体と共にそこに住む市民の取り組みが、水環境面においても不可欠である。

謝辞：最後に、本研究の遂行に当たり、種々の面からお世話になった方々に心からの謝辞を申し上げます。また、調査・プログラムの作成・解析に当たっては関西大学大学院学生、研究室学生諸君の協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 和田安彦：ノンポイント汚染源のモデル解析，技報堂出版，1990。
- 2) 和田安彦：ノンポイント負荷の制御，技報堂出版，1994。
- 3) U. S. Army Corps of Engineers：Urban Stormwater Runoff-STORM, Computer Program723-58-L2520, Oct., 1974。
- 4) Huber, W. C. and R. E. Dickinson：Storm Water Management Model (SWMM), User's Manual, Version 4. EPA/600/3-88/001a, Environmental Protection Agency, 1988。
- 5) 建設省都市局下水道部監修，合流式下水道越流水対策と暫定指針—1982年版一，日本下水道協会，
- 6) 和田安彦，三浦浩之：水環境アセスメントのための分流式雨水管のモデル化，第10回環境問題シンポジウム講演論文集，土木学会，pp.45-50，1982。
- 7) 和田安彦，三浦浩之：分流式下水道の雨天時流出に伴う汚濁負荷流出モデルとその適用，土木学会論文集，第369号/II-5，pp.287-293，1986。
- 8) 関根雅彦：汚濁負荷流出・流下モデルに基づく河川水質予測手法に関する研究（学位論文），1991。
- 9) 市木敦之，山田淳；都市域中小河川における水質タンクモデル運用のための基礎的検討，土木学会第49回年次学術講演会，pp.1224-1225，1994-9。
- 10) 市木敦之，山田淳，大西敏之：流域特性を考慮した汚濁物流出プロファイルの予測，環境システム研究，Vol.22，pp.68～77，1994。
- 11) 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17回土木学会衛生工学研究討論会論文集，pp.17-24，1981。
- 12) Sung Ryong Ha：Storm runoff modeling of pollutants distribution characteristics, 5<sup>th</sup> International Conference on Urban Storm Drainage, pp.311-316, 1990。
- 13) 和田安彦，吉本幸宏：非点源における路面堆積負荷の定量と流出シミュレーション，第17回土木学会衛生工学研究討論会，pp.25-31，1981。
- 14) 和田安彦，三浦浩之：都市域の雨水流出に伴う雨水桝流出負荷の研究，土木学会論文集，第381号/II-7，pp.199-206，1987。
- 15) Start M. Fineley and G. Kenneth Young：Grassy swales to control highway water quality runoff, Transportation Research Record, 1420, pp.71-77, 1990。
- 16) Douglas L. Smith and Byron N. Load：Highway water quality control. Summary of 15years of research, Transportation Research Record, 1279, pp.69-74, 1990。
- 17) Bruno Maestri, Michael E. Dorman and Jack Hartigan：Managing pollution from highway storm water runoff, Transportation Research Record, 1166, pp.15-21, 1988。
- 18) Werner Mischack：Pollution of street run-off by traffic local conditions, The Science of the Total Environment, 93, pp.419-431, 1990。
- 19) Ian J. Fletcher and Christopher J. Pratt：Mathematical simulation of pollutant contributions to urban runoff from roadside gully ponds, 2<sup>nd</sup> International Conference on Urban Storm Drainage, pp.14-19, 1981。
- 20) 和田安彦，田内和三：非点源負荷の定量と水域環境への影響度の評価，第16回衛生工学研究論文集，土木学会，pp.-，1980。
- 21) C. D. Newton, W. W. Shephard and M. S. Coleman：Street runoff as a source of lead pollution, WPCF, 46, 1974。
- 22) 和田安彦，三浦浩之，長谷川健司：都市域の堆積汚泥の含有負荷特性とその定量化(1) (2)，下水道協会誌，Vol.27, No.309, No.310, pp.38-46, pp.74-81, 1990。
- 23) 建設省：最新道路ハンドブック，pp.1161-1162, 1991。

- 24) (社)日本道路協会：道路維持修繕要項, pp.265-277, pp.31-43, 1981.
- 25) ジョン・A・ラーガー, ウィリアム・G・スミス著, 都市雨水による汚濁の管理と技術の評価, 建設省合流式下水道問題研究会誌
- 26) 和田安彦：非点源負荷における路面堆積負荷の定量と流出シミュレーションに関する研究, 水質汚濁研究, Vol.4, No.3, (1996. 4. 3受付)
- 27) 和田安彦, 田内和三：用途地域別路面堆積負荷の定量と特性, 用水と廃水, Vol.26, No.7, 1984.

## ACCUMULATION AND RUNOFF SIMULATION MODEL FOR NON-POINT POLLUTION CONTROL IN URBAN AREA

Yasuhiko WADA and Hiroyuki MIURA

Pollutants in the non-point pollution sources originate from diffuse sources, including atmospheric deposition and urban runoff. We focused on the accumulation and runoff of pollutants in the road gutters and street inlets which are typical non-point pollution source in urban area. The accumulation behavior of pollutants on the road surface and street inlet is influenced by rainfall and number of dry days. And we built up many simulation models for accumulation and runoff of the pollutants and by using these simulation models, we estimated effect of road sweeping and cleaning the street inlets for reduction runoff pollutants from non-point pollution sources in urban area. Most non-point pollutants were carried to the street inlets by urban storm runoff. The street inlets cleaning is the best way of management practice for urban runoff pollution control.