

# 都市ノンポイント汚染源負荷流出調査に基づく 不浸透面堆積負荷流出モデルの検討

肱岡靖明<sup>1</sup>・古米弘明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 国立環境研究所 社会環境システム研究領域 環境計画研究室  
(〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

<sup>2</sup>正会員 工博 東京大学大学院教授 工学系研究科都市工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

分流式下水道排水区において連続降雨を対象としたノンポイント汚染源負荷の流出調査を行い、分布型モデルによる汚濁負荷流出解析における地表面堆積負荷流出モデルの検討を行った。まず、Sartor らの提案したモデルを適用して、屋根と道路を一括して不浸透面として捉えた解析を行ったところ、SS 負荷流出の急激な変化を再現できなかった。そこで、屋根と道路の堆積負荷は異なる流出パターンを示すと推定しそれぞれの雨水流出量を考慮して、さらに道路からの汚濁負荷流出の遅れを表すために、限界掃流量の概念を追加した改良モデルによる検討を行った。この結果、総降雨量が 1.4~11.3mm と異なる 3 つの降雨において、ファーストフラッシュ現象を含む SS 負荷流出量の時間的変化を適切に表すことができることを示し、ノンポイント汚染源負荷の流出解析における地表面堆積負荷流出特性の重要性を明らかにした。

**Key Words:** non-point source pollution, washoff model, roof and road runoff, suspended solids, distributed model

## 1. はじめに

都市域における主なノンポイント汚染源負荷の発生源として、自動車排ガスを含む道路粉塵、工場やゴミ焼却場からの煤煙等が挙げられる。これら排ガスおよび煤煙には、発ガン性物質である多環芳香族炭化水素等の微量有害有機物質や重金属等が含まれており、これら微量有害物質の雨天時における流出に伴う、公共用水域の水環境や水域生態系への影響が懸念されている<sup>1)~3)</sup>。

公共用水域の水環境を保全するためには、ノンポイント汚染源負荷の挙動を正確に把握し、効果的な対策を実施する必要がある。しかしながら、ノンポイント汚染源負荷は面的に分布するため、発生源や発生量の特長が非常に難しく、雨天時の流出は降雨や地表面の形状によりその挙動が大きく異なるため、定量化が困難である。

下水道システムにおける雨水流出および汚濁負荷の堆積、流出機構を解析するために、近年、欧米にて数種の分布型モデル<sup>4)</sup>が開発されてきており、日本への導入のためのモデル比較検討も実施されてきている<sup>5)~7)</sup>。分布型モデルは地理情報システムと組み合わせることにより、精度の高い解析を行うことが可能となっている<sup>8)9)</sup>。一方、分布型モデルに組み込まれている各プロセスモデルには経験モデルも多く含まれている。特に、地表面堆積負荷流出モデルに関しては、その重要性から既存の研

究においていくつかのモデル<sup>10)~12)</sup>が提案されているが、いずれも観測データから導かれた経験モデルであり、他流域へ適用する際には、対象流域特性やそこで観測されたデータに基づいて、モデルの適用範囲の検討およびモデルに必要なパラメータを検定する必要がある。

既存のノンポイント汚染源に関する調査では、各地の分流式下水道を対象とした、雨天時流出量調査<sup>13)~15)</sup>、路面堆積負荷量調査<sup>16)~19)</sup>、路面堆積負荷流出量調査<sup>20)21)</sup>があるが、必ずしも分布型モデルを前提にした検討はなされていない。また、下水道排水区を対象とした調査や路面堆積負荷流出量調査では、単独降雨を対象としたものが多く、路面堆積負荷量調査では、堆積量の経時変化を長期にわたり調査しているが、雨天時における負荷流出量の経時変化を同時に捉えられていない。

そこで本研究では、都市域の分流式下水道排水区において連続降雨を対象としたノンポイント汚染源負荷の雨天時流出量調査を行った。さらに観測データをもとに、分布型モデルの中でも、汚濁負荷解析において重要なプロセスである地表面堆積負荷流出に関して詳細なモデル検討を行った。本研究の具体的な目的を以下に記す。

- 1) 連続降雨を対象として、ファーストフラッシュに着目したノンポイント汚染源負荷の流出調査を実施すること
- 2) 複数の降雨時における観測データに基づき、既存の

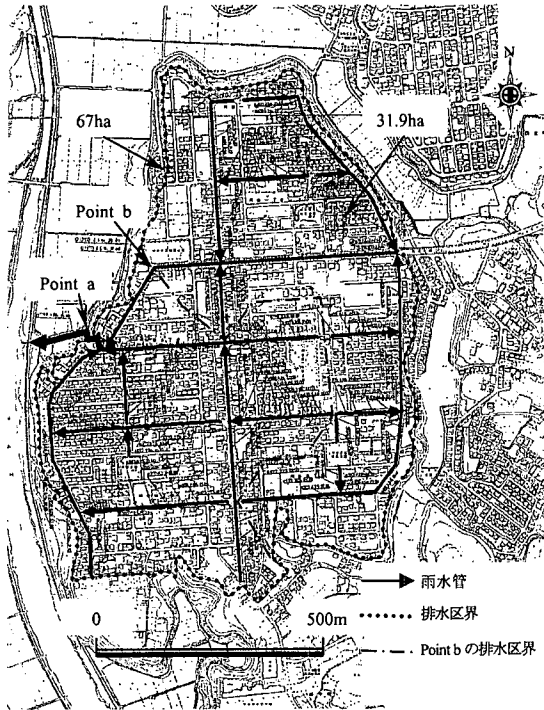


図-1 対象排水区図及び排水区界

地表面堆積負荷流出モデルの再現性およびモデルに必要なパラメータについて検討を行うこと

- 3) 既存の地表面堆積負荷流出モデルの限界を議論し、再現性を向上させるため、不浸透面を屋根、道路に区別し、それぞれの汚濁負荷流出特性を考慮した改良モデルの提案を行うこと

## 2. ノンポイント汚染源負荷流出調査

図-1 に対象排水区を、表-1 にその概要を示す。観測装置は、最下流点 (Point a) と排水区北部と南東部の排水が流下する点 (Point b) の二地点に設置されている。Point a において雨量を測定し、Point b において水位の測定および採水を行った。Point b の受け持つ排水区における工種別面積割合を表-2 に示す。屋根、道路に代表される不浸透面積率は約 40% であり、裸地や畑地も含む都市の住宅地となっている。この Point b は、公道における採水器設置可能場所の制約条件から、曲がり角や段差のある連結部付近となった。

雨天時におけるノンポイント汚濁負荷の流出調査には、装置の設置、人員の手配、サンプルの輸送、サンプル測定、それらにかかるコストなど、多大な労力と資金が必要とされる。そのため、対象降雨数や測定サンプル数を絞り込まざるを得ず、観測データの蓄積が非常に難しい。そこで本調査では、独自に開発した自動採水・測

表-1 Point b の受け持つ排水区概要

面積	31.93ha
排除方式	分流式下水道
マンホール数	81
下水管数	81
下水道普及率	100%
用途地域	第一種住居専用地域

表-2 工種別面積と割合

工種	面積(ha)	割合(%)
屋根	4.64	14.5
道路	8.52	26.7
その他不浸透面	0.00	0.0
間地	8.52	26.7
公園	0.65	2.0
畑地	3.89	12.2
裸地	5.71	17.9
合計	31.93	100.0

表-3 降雨特性

日付	総降雨量 (mm)	最大降雨強 度 (mm/hr)	降雨継続 時間 (分)	先行晴天 日数 (日)	サンブ リング
5月15日	1.4	3.2	240	10.1	○
5月17日	1.5	8.4	300	1.2	×
5月19日	9.3	6.0	690	2.0	×
5月24日	11.3	4.8	720	4.8	○
5月26日	6.2	9.6	380	2.9	○

定システム<sup>22)</sup>を利用して、1999年5月に連続降雨を対象としたノンポイント汚染源負荷の流出調査を行った。調査では、汚濁負荷の指標の一つとしてSSを測定した。また、ファーストフラッシュにおけるノンポイント汚染源負荷の急激な流出変化を捉えるために、採水間隔を降雨流出初期には短く、そして段階的に長く設定した。降雨開始より8時間に最大48サンプルの連続採水が可能である。下水管路内での水位観測においては、構造上の影響を受けない直線区間に水位計を設置することとした。しかしながら、保守管理の作業性や接続コード長の制限から連結部より下流側約3mに設置せざるを得なかった。

表-3に、1999年5月15日から5月26日までの観測降雨特性を示す。総降雨量1.4~11.3mm、先行晴天日数1.2~10.1日と条件の異なる全5降雨において観測データを得ることができた。しかしながら、自動採水器の故障や、水位センサーや雨量計の感知ミスにより、2降雨においては採水を行うことができなかった。

## 3. 解析手順

分布型モデルを用いた雨水流出解析や汚濁負荷流出解析を行うためには、マンホールや管渠の情報を含む下

表-4 有効降雨モデルと SLR モデルのパラメータ値

対象降雨	屋根		道路		浸透域	
	初期損失 (mm)	貯留係数 (sec <sup>-1</sup> )	初期損失 (mm)	貯留係数 (sec <sup>-1</sup> )	初期損失 (mm)	浸透能 (mm/hr)
RUN-R1 5月15日			2.0	0.01		
RUN-R2 5月15日	0	0.01	0	0.01	6	10
RUN-R3.1~3.5 5月15日, 17日, 19日, 24日, 26日			0.5	0.0005		

水道ネットワークデータファイルや、対象排水区の地表状態を表す土地利用情報が必要とされる。本研究では、Data-Conversion System<sup>8)</sup>を用いて、土地利用情報を含む下水道ネットワークデータファイルを作成した。本システムでは、自治体の有する下水道台帳データファイルからマンホールや下水管の諸元に関する情報を抽出し、下水道ネットワークデータファイルを作成することが可能である。さらに、10m×10m メッシュの土地利用情報をもとにマンホールの集水域を決定し<sup>23)</sup>、集水域内の土地利用情報を算出することが可能である。対象排水区には、現地調査に基づく工種分布図があり、その図面をもとに10m×10m メッシュデータを作成し、集水区域毎の工種別面積を算出した。

汚濁負荷解析の進め方を以下に記す。本研究で適用を試みた地表面堆積負荷流出モデルは、パラメータ数が少なく広く使用されている Sartor および Boyd が開発したモデル<sup>10)</sup> (以後 S/B モデル) である。

1) 分布型モデル (HydroWorks,1994) を用いた雨水流出解析

- 有効降雨モデルおよび地表面流出モデルに必要なパラメータの検討
- 複数降雨を用いた上記パラメータの検証

2) 地表面堆積負荷流出モデルの検討

- S/B モデルの適用 (屋根, 道路の区別なし)
- S/B モデルの拡張 (屋根, 道路の区別あり)
- 道路の堆積負荷流出に限界掃流量を適用

地表面堆積負荷の流出は、地表面における雨水流出の挙動に支配されるため、適切な雨水流出解析が汚濁負荷解析の精度向上に必要不可欠である。

次に、地表面堆積負荷流出モデルに S/B モデルを適用し、その再現性について検討した。解析では、ファーストフラッシュおよび流出過程における急激な負荷流出量の時間変化を捉えるため、屋根・道路の雨水流出および負荷流出の違いに着目した。道路側溝や雨水ますといった道路面と同等の高さに位置する排水系統は道路に含まれるとして一括して取り扱った。パラメータの影響評価は、Point b で得られた雨水管内水位および SS データを用いて行った。なお、下水管内の SS の挙動は分布型モデルである HydroWorks を用いて計算し、雨水管内の初期堆積量なしと仮定した。また、Point b の受け持つ排水

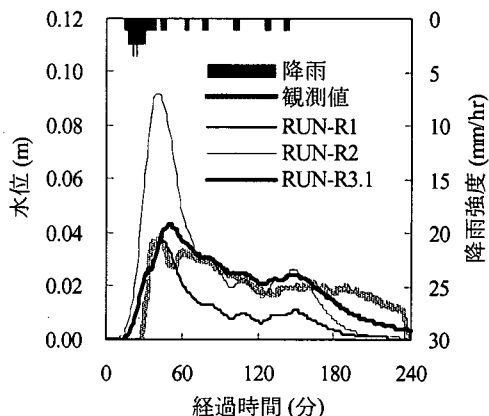


図-2 有効降雨モデルと SLR モデルのパラメータの検討 (5月15日)

区に含まれる 81 個の各マンホールの集水域を統合して、9つの簡素化された集水域を設定して解析を行った。

4. 雨水流出解析

汚濁負荷解析の前提となる雨水流出解析では、まず有効降雨モデルおよび地表面流出モデルに必要なパラメータを、Point b における雨水管内水位変化データを用いて検定した。地表面流出モデルには単線形貯留池モデル<sup>24)</sup>を使用した。使用した分布型モデルでは、工種毎に異なるパラメータを与えることが可能である。表-2に示すように対象排水区の地表面は7つの工種に分類されている。それぞれに有効降雨モデルおよび地表面流出モデルに必要なパラメータを決定する場合、非常に多くの観測データが必要となる。そこで、代表工種として屋根、道路、浸透域の3分類を与えた。浸透域における浸透能は文献値<sup>25)</sup>を用いて10mm/hrと設定し、表-3に示す5降雨では、不浸透域からの流出のみを扱うことにした。

まず、5月15日に観測された総降雨量1.4mmの降雨を対象とした雨水流出解析結果を図-2に示す。表-4には本節で議論する解析に用いたパラメータをまとめて示す。本調査では流速および流量のデータはなく、水位のみを測定している。非定常な条件での水位と流量の関係も不明なため、分布型モデルにおける非定常流計算による水

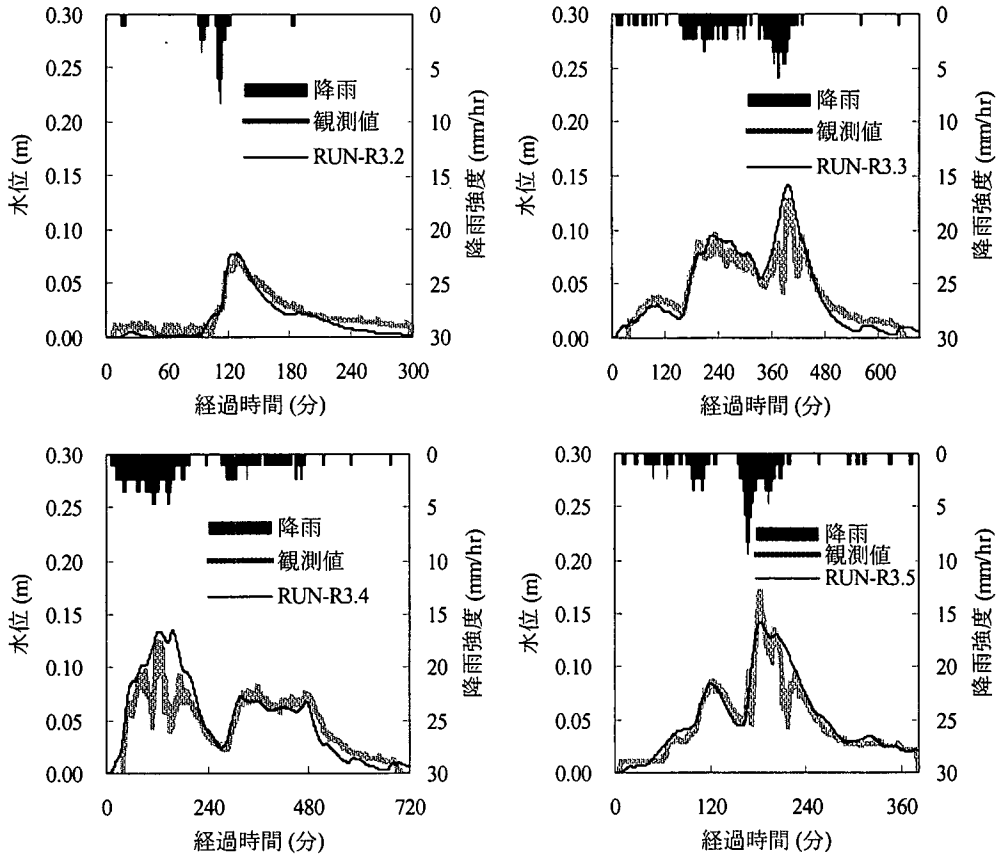


図-3 最適パラメータ値を用いた雨水流出解析 (左上: 5月17日, 右上: 5月19日, 左下: 5月24日, 右下: 5月26日)

位と観測値との比較により、雨水流出解析結果の再現性を検討した。

RUN-R1 では、道路を初期損失有りの不透透面と捉えて、修正 RRL 法などで一般的に採用されている初期損失 (2.0mm) を与えた<sup>20)</sup>。その結果、本計算では屋根からのみ雨水が流出することとなり、結果より、ピーク水位は的確に再現できているものの、ピーク後におけるシミュレーション水位は観測水位を常に下回っている。この過小評価は、屋根以外からの流出も発生していることを示しており、道路からの雨水流出も考慮する必要がある。そこで RUN-R2 では、屋根・道路ともに初期損失を 0mm とし、単線形貯留池モデルに用いるパラメータ (以後、貯留係数) は同じ値を用いた計算を行った。この条件は、屋根、道路において雨水流出が同じ挙動を示すと仮定していることになる。シミュレーション結果は、観測ピーク水位を約 2.5 倍上回っているものの、ピーク発生後の水位の変化は RUN-R1 と比べ再現性が高い。RUN-R1,R2 より、以下のような考察をまとめることができる。

- 1) 屋根は道路と比べ凹凸の少ない滑らかな表面を持つため、初期損失のない直接流出域と定められる。一方、道路はその表面の凹凸が大きいことから、初期

損失が存在する。初期損失の大きさは、5月15日の降雨の総降雨量より小さく、0~1.4mmの間にあると推察される。

- 2) 屋根表面は道路より滑らかで勾配も急であることから、屋根からの雨水流出は道路より早い。したがって、貯留係数を別々に与えることが妥当である。

上記の考察に基づき、いくつかの試行錯誤的な計算を行い、道路の初期損失、屋根および道路の貯留係数の最適値を決定した。その結果 (RUN-R3.1) を図-2 に示す。RUN-R1, RUN-R2 と比べ、再現性が飛躍的に上昇していることがわかる。

5月15日の降雨で得られたパラメータ値を検証するために、総降雨量が 1.5~11.3mm の 4 降雨 (表-3 参照) を対象とし、RUN-R3.1 で用いたパラメータを用いた雨水流出解析を行った。解析結果を図-3 に示す。観測結果に着目すると、5月19日では降雨開始後約 380 分、420 分において、2~3 分間で 3cm 程度の急激な水位低下と上昇が見られる。同様な現象は 5月24日、26日でも見られる。このような急激な水位変動は、降雨パターンが全体的に一律な 5月15日、17日、24日の降雨開始後 300 以降には発生しておらず、ピーク降雨強度観測時および観

測後に検出された。この乱れは、前述のように水位計を設置した場所が、曲がり角や段差のある連結部の下流側3m程度であったため、それらの構造に起因する水位変動の影響を受けている可能性が想定された。5月15日の降雨と比べ、総降雨量が同等から約8倍までの4降雨においても、上記の急激な水位変動を除き、シミュレーション結果は観測結果のピーク水位および全体の流出パターンを非常によく再現している。これらの整合性の高さから、対象降雨時には、主に屋根および道路の不浸透面から雨水が流出していると仮定したことの妥当性が示されている。

また、雨水流出解析において、不浸透面の工種として屋根と道路を区別して、雨水流出特性を解析することが重要であることが明らかとなり、それぞれに異なる初期損失および貯留係数を与えることで再現性が向上することが示された。さらに、屋根・道路の表面特性に基づく雨水流出解析のパラメータ値を第一種住居専用地域に対して提案できたものと考えられる。

## 5. ノンポイント汚染源負荷の流出解析

### (1) Sartor and Boyd モデルの適用

地表面堆積負荷流出モデルは、降雨による堆積負荷の浸食と輸送の現象を表すものである。Sartor and Boyd<sup>10)</sup>は調査データに基づき、堆積負荷量と雨水流出量を説明変数とした、負荷流出量を推定するモデルを作成した。そのモデル式を以下に示す。

$$\frac{dP}{dt} = -kR(t)P(t) \quad (1a)$$

$$P(t) = P^0 \exp(-k \int_0^t R(\tau) d\tau) \quad (1b)$$

$$P^0 - P(t) = P^0 [1 - \exp(-kQ(t))] \quad (1c)$$

ここで、 $P(t)$  : 地表面堆積負荷量[kg/ha],  $t$  : 時間[hr],  $R(t)$  : 雨水流出量[mm/hr],  $k$  : 負荷流出係数 [mm<sup>-1</sup>],  $P^0$  : 降雨開始時における地表面堆積負荷量 [kg/ha],  $Q(t)$  : 累積雨水流出量[mm]である。

既存の研究において、屋根・道路における負荷流出量の再現性がS/Bモデルを用いて検討されており、負荷流出係数  $k$  の値としても、屋根が0.5~0.65mm<sup>-1</sup>、道路が0.06~0.20mm<sup>-1</sup>と推定されている<sup>29)</sup>。また、分布型モデルの一つであり、S/Bモデルを組み込んでいるSWMMでは一般的な値として0.18mm<sup>-1</sup>が示されている<sup>27)</sup>。

式(1c)に示すように、降雨開始よりある一定時間内に除去される累積負荷量 ( $P^0 - P(t)$ ) は、累積雨水流出量 ( $Q(t)$ ) を説明変数とする指数関数で表される。図-4に、3降雨についてPoint bにおける累積雨水流出量と累積SS負荷流出量の関係を示す。ここに示す累積雨水流出量は

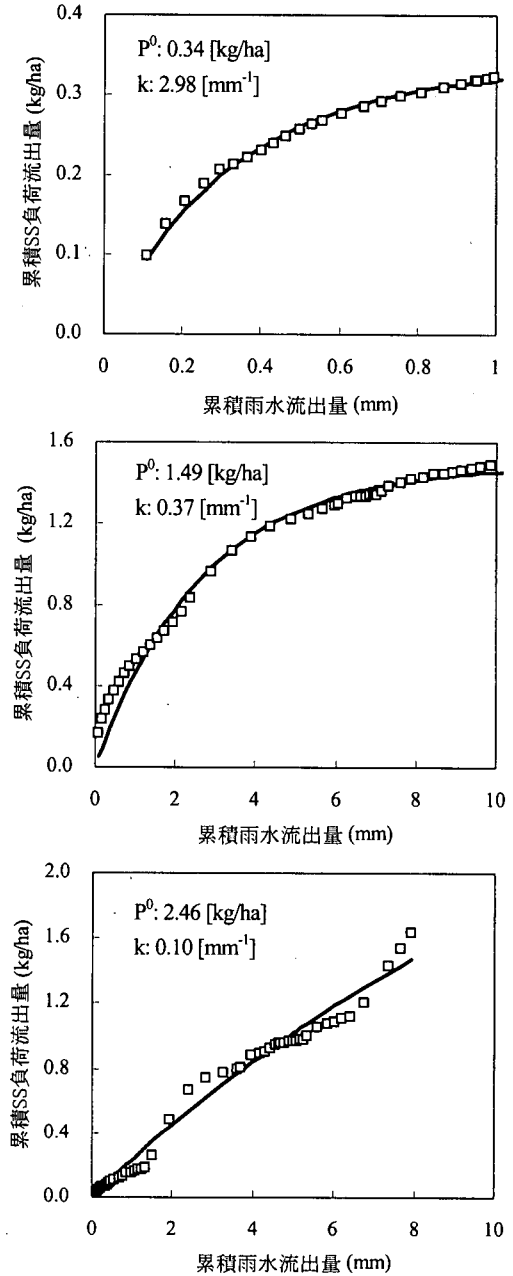


図-4 Point bにおける累積雨水流出量と累積SS負荷流出量の非線形回帰

(上: 5月15日, 中央: 5月24日, 下: 5月26日)

Point bにおける流量を基準に算定した。本研究では水位のみを観測しているため、累積雨水流出量を観測流量を用いて与えることができない。そこで雨水流出解析は、急激な水位変動を除き、計算水位は観測水位で表現される流出パターンおよびピーク水位を適切に表していると判断し、計算流量を用いて累積雨水流出量や観測負荷流出量を算出した。

回帰曲線は非線形回帰の最小二乗法により求めた。5月15日および24日の降雨では、非常に高い相関が見られるものの、5月26日の降雨では、S/Bモデルにより累積SS負荷流出量の増加傾向を十分には説明できない。図-4において推定されたk値に着目すると、5月15日では上記の文献値より一桁大きく、5月24日では文献値の範囲内にあり、SWMMでの標準値の2倍程度である。両者の相違は、2降雨の総降雨量が大きく異なるため、堆積負荷の発生源に違いがあると想像される。例えば小降雨である5月15日では屋根からの負荷流出が主たる発生源となり、24日では屋根および道路の両者からの負荷流出が寄与しているものと推測される。

図-4において推定された初期堆積量 $P^0$ およびkの値を用いて汚濁負荷解析を行った結果を図-5に示す。ここで得られたkの値は、Point bの受け持つ排水区全体を対象として雨水流出量をもとに算出された値であるが、その値を簡素化した集水域ごとに適用した。なお、表-5に本節で行う計算でのパラメータ値をまとめて示している。5月15日の降雨を対象としたRUN-P1.1では、ファーストフラッシュを表せず、なだらかに負荷流出量が低下する傾向を示している。同様に、5月24日の降雨を対象としたRUN-P1.2においても、ファーストフラッシュと降雨開始後120分に発生している二つ目のピークSS負荷流出量を表すことができない。5月26日の降雨を対象としたRUN-P1.3では、降雨開始より160分間のSS負荷流出量を高めに評価している一方で、その後に見えるピークSS負荷流出量を過少評価している。

これらの結果より、屋根・道路を一括して不浸透域とし、S/Bモデルを適用した場合には、総流出負荷量は推定することはできるものの、ファーストフラッシュおよび流出過程における急激な負荷流出量の時間変化を再現することができないことが明らかとなった。

## (2) 屋根・道路別SS負荷流出特性の検討

### a) 初期堆積量による影響の検討(限界掃流量なし)

前述のように、屋根と道路を一括して不浸透面とした汚濁負荷流出解析には限界があることがわかった。そこで、式(2a)~(2d)に示すように、屋根・道路からの負荷流出を区別して、負荷流出の時間変化が激しい5月24日の降雨を対象にさらに再現性の向上を検討した。

$$\frac{dP_1}{dt} = -k_1 R_1(t) P_1(t), \quad (\text{屋根}) \quad (2a)$$

$$P_1(t) = P_1^0 \exp(-k_1 \int_0^t R(\tau) d\tau) \quad (2b)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = -k_2 (R_2(t) - R_c) P_2(t), \quad (\text{道路}) \quad (2c)$$

$$P_2(t) = P_2^0 \exp(-k_2 \int_0^t (R_2(\tau) - R_c) d\tau) \quad (2d)$$

ここで、 $R_c$ : 限界掃流量[mm/hr]である。

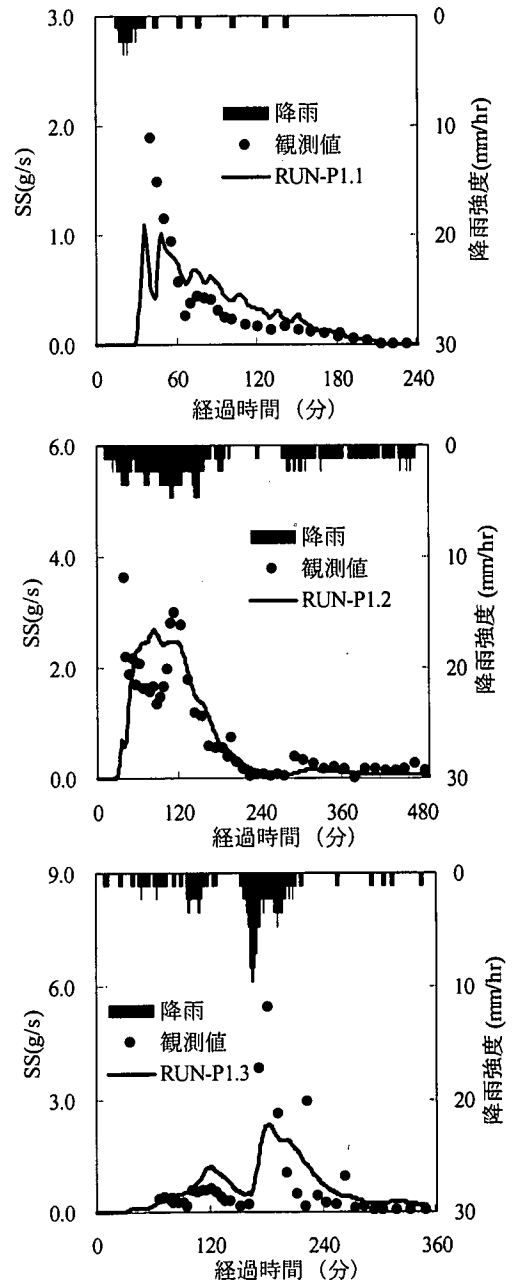


図-5 屋根と道路を一つの浸透域と捉えたシミュレーション結果と観測結果のSS負荷流出量による比較  
(上:5月15日, 中央:5月24日, 下:5月26日)

屋根はS/Bモデルを適用し(式(2a), (2b)), 道路に対してはS/Bモデルに負荷流出を引き起こす限界の掃流量の概念を導入することを試みた(式(2c), (2d))。これは、表面に凹凸が存在する道路では、堆積負荷はある一定の雨水流出速度に達したときのみ輸送可能な状態になり、流出が開始すると想定したものであり、その類似の概念はすでに流域全体を対象としたマクロ的汚濁負荷

表-5 初期堆積量および負荷流出係数

	対象降雨	屋根及び道路	
		P <sup>0</sup> (kg/ha)	k(mm <sup>-1</sup> )
RUN-P1.1	5月15日	0.34	2.98
RUN-P1.2	5月24日	1.49	0.37
RUN-P1.3	5月26日	2.46	0.10

\* RUN-P1.1-1.3 では、屋根と道路を一括してとらえP<sup>0</sup>とkは等しいと仮定して、シミュレーション結果と観測結果の総SS負荷流出量が一致するように設定されている

表-6 初期堆積量、負荷流出係数および限界掃流量

	対象降雨	屋根		道路		
		P <sup>0</sup> (kg/ha)	k(mm <sup>-1</sup> )	P <sup>0</sup> (kg/ha)	k(mm <sup>-1</sup> )	R <sub>c</sub> (mm/hr)
RUN-P2.a	5月24日	1.6		1.6		
RUN-P2.b		0.8	0.70	2.0	0.35	0.0
RUN-P2.c		3.2		0.7		
RUN-P3.a	5月24日	2.0		2.0		1.0
RUN-P3.b		2.3	0.70	2.3	0.35	1.5
RUN-P3.c		2.9		2.9		2.0

\* RUN-P2.a,P3.a-3.c では、屋根と道路のP<sup>0</sup>は等しいと仮定して、シミュレーション結果と観測結果の総SS負荷流出量一致するように設定されている

\* RUN-P2.b,2.c では、屋根のP<sup>0</sup>をRUN-P2.aを基準として与えた後、シミュレーション結果と観測結果の総SS負荷流出量一致するように道路のP<sup>0</sup>が設定されている

解析モデルに分類される土研モデル<sup>25)</sup>に導入されている。

式(2)に示すように、ノンポイント汚染源負荷流出を表すためには、k、初期堆積量、限界掃流量を決定する必要がある。それぞれの値の影響を検討する必要がある。そこで、まず限界掃流量を考慮しない条件(R<sub>c</sub>=0mm/hr)でのkと初期堆積量P<sup>0</sup>の値を検討したケースを示す。

5月24日の降雨に関して図-4で導かれたkの値0.37mm<sup>-1</sup>は、主に道路からの負荷流出を反映しているものと推察して、道路のkを0.35mm<sup>-1</sup>、屋根のkをその2倍の0.70mm<sup>-1</sup>として解析を行った(RUN-P2)。

k値とともに、初期堆積量についてもそれぞれ妥当な値を与える必要がある。そこで、屋根と道路の初期堆積量の配分に着目した解析を行った(表-6参照)。RUN-P2.aでは、屋根と道路の初期堆積量は一樣であると仮定して、総負荷流出量が観測値と一致するように初期堆積量を求めたケースである。RUN-P2.bでは、屋根の初期堆積量がRUN-P2.aの半分と設定して、同様に総負荷流出量が一致するように道路の初期堆積量を求めた。したがって、この計算では、結果的に道路からの負荷流出の寄与を大きく見積もったケースである。一方、RUN-P2.cでは逆に、屋根の初期堆積量をRUN-P2.aの2倍と設定した。この計算でも、道路の初期堆積量を観測値と計算値の総SS負荷流出量が一致するように設定している。なお、計算に必要な屋根・道路の雨水流出量として、雨水流出解析RUN-R3.2で求めた水理量を与えた。

上記3つのシミュレーション結果を図-6に示す。屋根と道路を区別しなかったRUN-P1.2と比べ、異なるk値をもつと仮定したRUN-P2.aでは、初期のピークがより

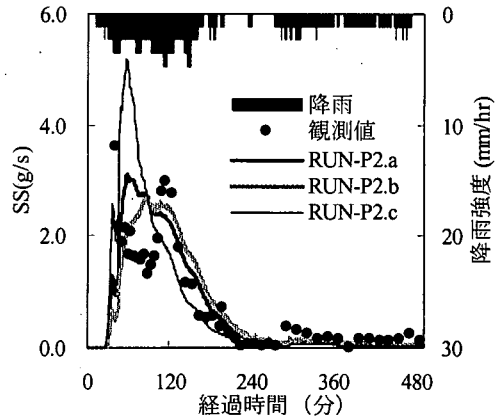


図-6 異なる初期堆積量によるSS負荷流出量の変化(5月24日)

明確に現れている。また、屋根の初期堆積量を変化させたRUN-P2.b, P2.cの結果から、初期堆積量の設定が、初期のピークと二つ目のピークなど負荷流出パターン再現性に影響を与えることがわかる。すなわち、最初のピークは屋根からの負荷流出、二つ目のピークは道路からの影響を主に反映していることが推察され、それぞれの初期堆積量を適切に設定することで再現性が向上する可能性が示唆された。しかしながら、上記以外にも試行錯誤的に堆積量の組み合わせを与えても、特に降雨開始後120分に発生したピークに見られる負荷流出の急激な変化を適切に再現できなかった。

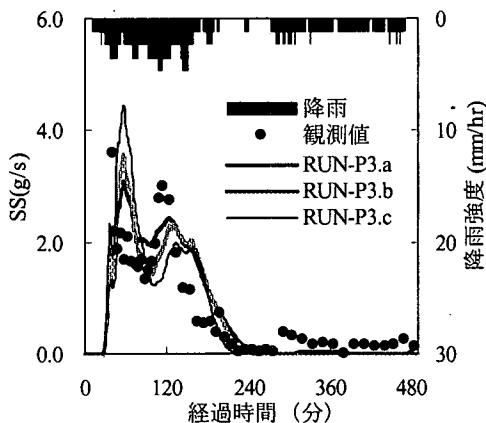


図-7 異なる限界掃流量による  
SS 負荷流出量の変化 (5月24日)

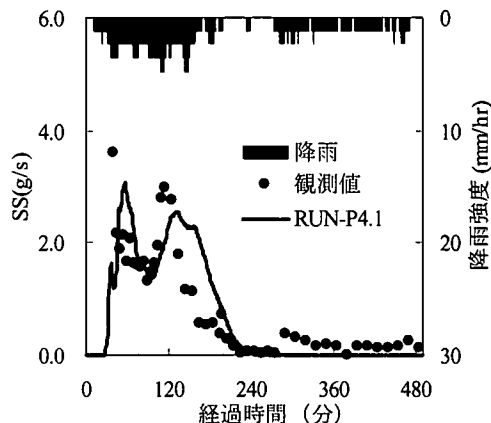


図-8 異なる屋根・道路の初期堆積量と限界掃流量 1.5mm/hr  
を用いたシミュレーション結果 (5月24日)

表-7 初期堆積量、負荷流出係数および限界掃流量

	対象降雨	屋根		道路		
		$P^0$ (kg/ha)	$k$ (mm <sup>1</sup> )	$P^0$ (kg/ha)	$k$ (mm <sup>1</sup> )	$R_c$ (mm/hr)
RUN-P4.1	5月24日	2.0		2.7		
RUN-P4.2	5月15日	1.5	0.70	-	0.35	1.5
RUN-P4.3	5月26日	0.7		3.9		

\* RUN-P4.1 と 4.3 では、屋根の  $P^0$  を与えた後、シミュレーション結果と観測結果の総 SS 負荷流出量が一致するように道路の  $P^0$  が設定されている

### b) 限界掃流量の導入

RUN-P2.a~ P2.c の結果より、屋根と道路に異なる  $P^0$  や  $k$  の値を与えても、二つ目の SS 負荷流出量のピークを適切に再現することができなかつた。この遅れたピーク発生は、道路における負荷流出の過程が根本的に再現できていないためと予想した。そこで、限界掃流量の導入による影響を検討するために、表-6 に示すようなパラメータ値を与えた一連の計算 (RUN-P3) を行った。その結果を図-7 に示す。限界掃流量を導入していない RUN-P1, P2 と比べ、SS 負荷流出の急激な変化を表現可能であった。しかしながら、いずれも、降雨開始後 120 分で発生するピーク SS 負荷流出量を下回っている。これは、屋根と道路の初期堆積量を一律に設定したことが原因と考えられた。

そこで、次に初期堆積量の設定について検討した。図-7 より、 $R_c$  が 1.5mm/hr のとき (RUN-P3.b)、降雨開始後 120 分で発生するピーク SS 負荷流出量の開始を最も適切に表している。そこで、限界掃流量 1.5mm/hr を最適値として、屋根の初期堆積量を推定した。この推定では、初期のピークは主に屋根の堆積負荷によるものと仮定し、降雨開始より 90 分までの総負荷流出量が屋根からの負荷流出量と一致するように屋根の初期堆積量を設定した。この時、屋根の初期堆積量は 2.0kg/ha となり、この条件で総負荷流出量が一致するように、道路の初期堆積量を

2.7kg/ha と求めた。この初期堆積量の設定における結果 (RUN-P4.1) を図-8 に示す。用いたパラメータを表-7 に示す。RUN-P1.2~3.3 と比べ、初期のピークとともに降雨開始後 120 分で発生するピーク SS 負荷流出量をより適切に表していることがわかる。

本研究では、屋根・道路に対して一律に  $k$  および限界掃流量を与えた解析を行った。そのため、例えば 5月24日では降雨開始 240 分以降の負荷流出を表すことができていない。この理由としては、SS の道路における限界掃流量の値を、その代表値として一律に 1.5mm/hr と設定したため、道路からの比較的容易に流出する汚濁量を表現できていないものと考えられる。

以上の 5月24日の降雨を対象とした汚濁負荷流出解析により、道路への限界掃流量の適用が再現性の向上に非常に効果的であることが明らかとなった。そこで、RUN-P4.1 で用いた  $k$  および限界掃流量 1.5mm/hr を 5月15日、26日の2降雨に適用し、その再現性を検証した。用いたパラメータを表-7 に示す。限界掃流量が 1.5mm/hr の時、5月15日の降雨では、屋根からのみ負荷が流出することとなるため、屋根の初期堆積量は総負荷流出量が一致するように設定した。また 5月26日の降雨では、道路の限界掃流量 1.5mm/hr により、降雨開始より 160 分間は屋根からのみ負荷が流出することとなるため、その時間内の総負荷流出量が一致するように屋根の初期堆積量



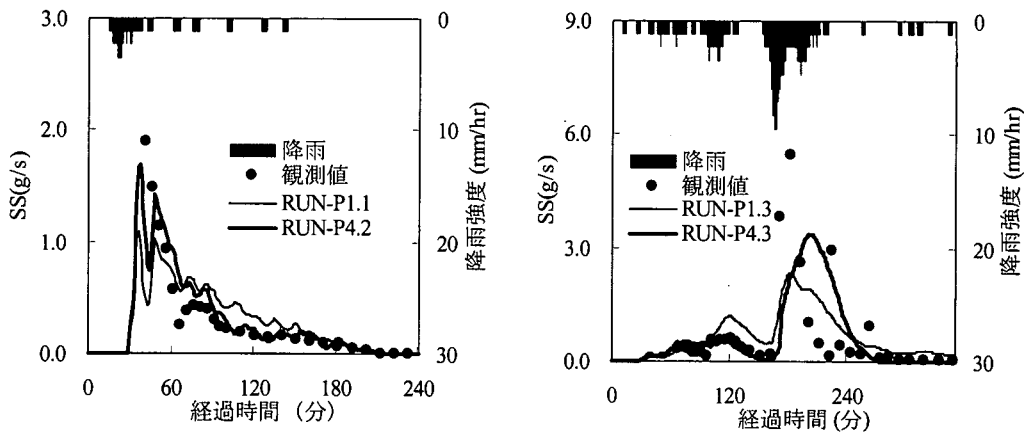


図-9 限界掃流量を導入した汚濁負荷解析 (左: 5月15日, 右: 5月26日)

を設定した。この時、道路の初期堆積量は観測値と計算値の総SS負荷流出量が一致するように設定している。

この解析結果を図-9に示す。5月15日の降雨では、屋根・道路を一つの浸透域と捉えたRUN-P1.1と比べ、ファーストフラッシュを適切に表している。また、5月26日では全体的に再現性は低いものの、屋根・道路を一つの浸透域と捉えたRUN-P1.3と比較すると、降雨開始より160分間の負荷流出パターンとピークSS負荷流出量をより適切に表している。

限界掃流量を導入することによりパラメータが一つ増加し、パラメータ同定の煩雑性は増すものの、再現性は飛躍的に向上した。したがって、道路の表面特性を考慮した限界掃流量の導入は、汚濁負荷の時間変動の解析には非常に効果的であることが明らかとなった。また、今回対象とした総降雨量が1.4~11.3mm程度の降雨では、不浸透面を屋根・道路と区別することが、降雨初期時の負荷流出パターンを適切に表すために重要であることが示された。今後、モデルの再現性をさらに検討するためには、さらにさまざまな降雨量および降雨パターンをもつ降雨を対象とした解析が必要である。

本研究では、SSはすべて一様な流出特性を持ち、屋根と道路はそれぞれに一様な表面状態であると仮定して一律に $k$ および $R_c$ を与えた。既存の研究ではSSはさまざまな流出特性を持つ堆積物の集合体であると仮定したモデルも提案されている<sup>28)</sup>。また、道路の素材によってSSの流出パターンも異なることが報告されている<sup>10)</sup>。このような現象を表すためにはより複雑なモデルが必要とされ、それに伴いパラメータ数が増加すると推測される。しかしながら、パラメータ検定に利用される観測データの精度、パラメータ決定の煩雑性、複雑なモデルによる再現性向上の度合いを総合的に考慮して、モデルの有効性や妥当性を検討することが必要になると考えられる。

### (3) 残存堆積量の検討

ノンポイント汚染源負荷の堆積および流出過程が有する特性としてその連続性が挙げられる。すなわち、降雨開始時の初期堆積量は、先行降雨終了時の地表面残存堆積量と晴天時の供給負荷量の総和であるため、その量的な把握には、先行降雨時の負荷流出の状況も考慮することが望ましい。そこで、RUN-P4.1~P4.3の計算結果における、初期堆積量と降雨終了時の残存堆積量の量的な関係を図-10に示した。各状態におけるSS負荷量は、Point bの受け持つ排水区内の不浸透面積あたりの量に換算されている。

屋根の初期堆積量を仮定して演繹的に道路の初期堆積量を求めているが、結果として、5月24日や26日において、その量が屋根を上回っていることは、それぞれの空間的な位置や表面特性から、矛盾していない推定結果であると考えられる。

残存堆積量に着目すると、降雨量が極端に少ない5月15日では、降雨終了時に初期堆積量の1/3程度が屋根に残存しているものの、5月24日および26日ではその残存率が2降雨ともに2%以下であった。一方、道路については、24日が52%、26日は70%の残存率となった。管路内の残存堆積量は無視できる計算結果であり、本解析において、管路内の初期堆積量をなしと仮定したことの妥当性が裏付けられている。また、毎回の降雨後ではないが、採水口などの保守管理において管路内の残存堆積物がほとんどなかった観察結果とも一致している。

汚濁負荷解析における初期堆積量の与える方法として、路面堆積負荷量調査に基づいて行う考え方もありえる。しかしながら、対象排水区全体を代表する堆積量を調査で得ることは非常に困難であり、掃除機やブラシ等によって堆積物を回収する方法では降雨によって流出しない分まで回収している可能性があることも考えられる。したがって、本研究において演繹的に初期堆積量を求め、

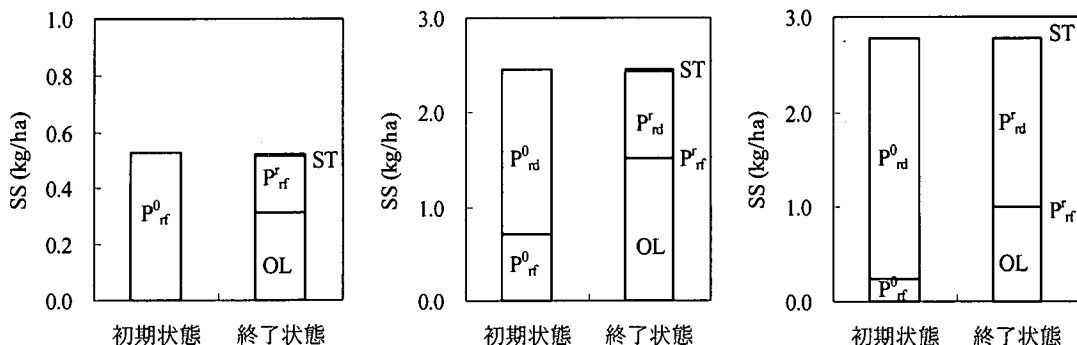


図-10 3降雨におけるSSマスバランス解析(左:5月15日,中央:5月24日,右:5月26日)

$P_{rf}^0$ : 屋根の初期堆積量,  $P_{rd}^0$ : 道路の初期堆積量, OL: 負荷流出量,

$P_{rf}^r$ : 屋根の残存堆積量,  $P_{rd}^r$ : 道路の残存堆積量, ST: 管路の残存堆積量

\* 屋根・道路の初期堆積量は屋根・道路面積当たりで示した表-7の値を全不透水面積当たりに換算して示している。

先行晴天日数と先行降雨終了時の残存負荷量との関係を連続する降雨観測データに関して再現可能であれば、この手法の妥当性を検討できると考えられる。

## 6. 結論

分流水下水道排水区を対象とし、連続降雨時において得られた観測データをもとに、分布型モデルを用いたノンポイント汚染源負荷の流出解析を行った結果、次のような結論を得た。

- 1) 都市雨水流出量の時間的な変動も考慮した解析を行う場合、不透水面として、その流出特性が異なる屋根と道路を区別して取り扱う必要がある。すなわち、有効降雨モデルにおいては、屋根を直接流出域、道路は0.5mm程度の初期損失があるとし、地表面流出モデルにおける貯留係数を与える場合に、屋根のほうが道路より雨水の流出が早いと仮定することにより再現性が向上した。
- 2) 地表面堆積負荷流出モデルとしてS/Bモデルを適用して、初期堆積量と負荷流出係数のパラメータ値を降雨毎に検討した。しかしながら、屋根と道路を一括して不透水域と捉えた汚濁負荷解析では、回帰して得られたモデルパラメータ値を用いても、ファーストフラッシュやSS負荷流出の時間的な変化を再現することができなかった。そこで、道路からの堆積負荷流出を発生させる限界の掃流量という概念を導入することにより、ファーストフラッシュを含む、SS負荷流出の時間変化を再現することが可能となった。
- 3) 汚濁負荷解析前後の物質収支より、道路の負荷堆積量を見積もる際には、先行降雨終了時の残存堆積量を考慮することが重要であることが確認された。ま

た、演繹的に推定された初期堆積量の信頼性を検討するためには、連続降雨を対象として、先行降雨終了時の負荷堆積状態および晴天時の負荷供給量を同時に評価することが重要であることが示唆された。

- 4) 雨水流出解析と併せて、ノンポイント汚染源負荷が堆積する場として不透水域を屋根・道路と区別し、それぞれの負荷流出特性を考慮した汚濁負荷解析の有効性が示された。このように、工種情報に基づく解析を行うことにより、屋根雨水の浸透や再利用、道路における清掃頻度などによる効果をそれぞれに検討することが可能となる。さらに、下水道ネットワークを組み込んだ分布型モデルを適用していることにより、地表面におけるノンポイント汚濁負荷削減対策と下水道ネットワーク末端における処理とを連動して検討することも可能となる。このとき、土地利用の変化に伴う工種面積の変化量の情報により、汚濁負荷量の変化も推定可能であると推測される。

## 参考文献

- 1) 小野芳郎, 貫上佳則, 小田美光, 宗宮功: 道路路面排水中の多環芳香族化合物ニトロ誘導体由来の遺伝毒性評価, 水環境学会誌 第20巻, 第11号, pp.738-745, 1997.
- 2) 浅田素之, 大垣真一郎: 都市域における降雨初期雨水排水中のベンゾ(a)ピレンの挙動, 水環境学会誌, 第19巻, 第11号, pp.66-71, 1996.
- 3) 石丸尚志, 小笠原光憲, 森喜一, 盛岡通: 道路流出中多環芳香族炭化水素の導体に関する予測手法, 第31回日本水環境学会, pp.373, 1997.
- 4) 土木学会: 水理公式集 pp.364, 1999.
- 5) 田中修司, 榊原隆, 藤田昌一, 田中一郎, 古北克: 雨天時汚濁負荷量流出モデル比較検討調査, 1994年度下水道新技術研究所年報[2/2巻], pp.77-84, 1994.
- 6) 田中修司, 榊原隆, 藤田昌一, 百崎和博, 千葉恭人, 古北

- 克, 宮田篤: 雨天時汚濁負荷量流出モデル比較検討調査, 1995年度下水道新技術研究所年報[2/2巻], pp.83-88, 1995.
- 7) 田中修司, 榊原隆, 前田正博, 千葉恭人, 百崎和博, 木内悟: 雨天時汚濁負荷量流出モデル比較検討調査, 1996年度下水道新技術研究所年報[1/2巻], pp.73-77, 1996.
- 8) Hijioka, Y., Furumai, H., Ichikawa, A., and Aoki, J.: Application of distributed model to the sewer networks in highly urbanized area in Japan, *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Urban Storm Drainage*, Vol.3, pp.1407-1414, 1999.
- 9) 増田貴則: GISを活用した流域環境情報の統合化とその現象解析・計画論への適用に関する研究—琵琶湖流域を対象として—, 京都大学学位論文, 2000.
- 10) Sartor, J. D. and Boyd, G. B. : Water pollution aspects of street surface contaminants, *EPA-R2-72-081*, 1972.
- 11) Tomonvic, A. and Makishimovic, C. : Improved Modeling of Suspended Solids Discharge from Asphalt Surface During Storm Event, *Water science and Technology*, Vol. 33, No.4-5, pp.363-369, 1996.
- 12) Bujon, G., Herremans, L. and Phan, L.: FLUPOL: A Forecasting Model for Flow and Pollutant Discharge from Sewerage Systems during Rainfall Events, *Water Science and Technology*, Vol.25, No.8, 207-215, 1992.
- 13) 建設省土木研究所: 分流式下水道からの雨水流出に関するデータベース, 土木研究所資料第1549号, 1980.
- 14) 建設省都市局下水道部監修: 市街地ノンポイント負荷に関する手引き (実体把握と予測手法及び対策), 下水道新技術推進機構, 1998.
- 15) 市木敦之, 山田淳, 安随幸一郎, 嶋田智行, 小松貴之: 都市系面源負荷の雨天時流出特性の比較—高速道路排水溝, 分流式雨水管および都市河川における実態調査—, 第3回日本水環境学会シンポジウム講演集, pp.93-94, 2000.
- 16) 和田安彦, 田中和三: 用途地域別路面堆積負荷量の定量と特性, 用水と排水, Vol.26, No.7, pp.35-43, 1984.
- 17) 和田安彦, 三浦浩之: 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, 土木学会論文集, 第559号/VII-2, pp.61-71, 1997.
- 18) Zhang Haiping, Kiyoshi Yamada : Estimation for urban runoff quality modeling, *Water Science and Technology*, Vlo.34, No.3-4, pp.49-54, 1996.
- 19) 建設省土木研究所: 下水管路施設設計の合理化に関する調査報告書 (V) —都市域の汚濁ポテンシャル—, 土木研究所資料第1705号, 1981.
- 20) 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, pp.31-43, 1981.
- 21) 酒井彰, 住山真, 田中和博: ノンポイントソース流出水の水質特性及び汚濁負荷流出モデル解析, 下水道協会誌論文集, No.12, Vol.34, No.413, pp.12-26, 1997.
- 22) 脇岡靖明, 古米弘明, 中島典之: 自動採水・連続測定装置を用いた分流式下水道における雨天時 SS 汚濁負荷流出調査, 第二回水環境学会シンポジウム講演集, pp.82-83, 1999.
- 23) 市川新, 榊原隆, 大口豊: メッシュ法の都市河川流域への適用—その手法と実際—, 水利科学, No.161, pp.74-97, 1985.
- 24) Wallingford Software Limited : HydroWorks DM version 5.0 Documentation, 1999.
- 25) 建設省土木研究所: 下水管路施設設計の合理化に関する調査報告書 (IV) —合流式下水道の改良に関する調査—, 土木研究所資料第1704号, 1981.
- 26) 山口高志, 松原重昭, 山守隆: 都市域における降雨流出調査第2報—修正 R.R.L.報による流出推定—, 土木技術資料, 14-11, pp.34-39, 1972.
- 27) Huber, W. and Dickinson, R. E. : Storm Water Management Model (SWMM), User's Manual, Version4. EPA/600/3-88/001a, 1988.
- 28) 中村栄一: 都市雨水における汚濁負荷の流出特性と水質汚濁対策に関する研究—分流式下水道における雨水排除システムの改善についての考察—, 東京大学学位論文, 1999.

(2000. 11. 22 受付)

## MODIFIED WASHOFF MODELS OF ROOF AND ROAD FOR URBAN NON-POINT POLLUTION ANALYSIS

Yasuaki HIJOKA and Hiroaki FURUMAI

Continuous monitoring for runoff pollution was conducted at an urban drainage. The Sartor and Boyd model was applied to investigate SS wash-off process from impervious surface in three rainfall events. There was a good correlation between accumulated runoff and removed SS loads except one event. Then pollutant runoff analysis was carried out using a distributed model. Although the simulations with the calibrated model parameter values captured general trends of pollutographs, they did not work well to express the dynamic pattern. The disagreement seemed to be caused by different behavior of pollutant wash-off from roofs and roads. It was necessary to allocate different wash-off coefficient for each surface. In addition, the concept of critical runoff rate was also introduced to initiate delayed wash-off from road surface. The modified model for wash-off process explained well dynamic SS runoff pattern in several events with different rainfall characteristics. It was found that distinction of roof and road surfaces for runoff pollution was essential to explain first flush phenomena in cases of weak rainfall.