

住宅地における発生源別懸濁態汚濁物質の 流出解析と発生源対策の評価

ANALYSIS OF PARTICLE POLLUTANT RUNOFF IN A RESIDENTIAL AREA AND ESTIMATION OF ON-SITE POLLUTANT REDUCTION MEASURES

城戸由能¹・岡 太郎²・深尾大介³
Yoshinobu KIDO, Taro OKA and Daisuke FUKAO

¹正会員 工博 京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

²フェロー会員 農博 京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³学生会員 京都大学大学院工学研究科 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

The water pollution in rivers and lakes is not adequately improved, though much pollutant load from point sources has been decreased. The pollutant runoff from non-point sources in wet weather condition brings relatively more impact to the water pollution than point sources in recent years. Investigation and analysis of pollutant runoff have been carried out during recent years, but amount of runoff pollutant is not adequately evaluated. Especially, the increase of pollutant load from non-point sources in an urban area strongly influences urban water environment.

In this study, a residential area is especially focused on among urban area, and investigation of storm and pollutant runoff was carried out in several rainfall events. And deposition and sedimentation on road surfaces, roof surfaces and drainage channel beds were examined at several sampling points during a few weeks. Investigation shows that the first flush of pollutant runoff consists of particle pollutant materials. Particle pollutant runoff was mainly derived from impervious area, for example roof and road surface, and dissolved pollutant runoff was derived from sedimentation in a drainage channel bed. On-site pollutant reduction measures were estimated by the storm and pollutant runoff model prepared by using of investigation data. Simulation showed that 2 mm rainfall storage from roof runoff brings 30% reduction of maximum pollutant runoff rate during one rainfall event.

Key Words: *Non-point source, Pollutant runoff analysis, On-site pollutant reduction, Particle Pollutant, Residential area*

1. はじめに

近年、河川や湖沼などは水資源としてだけでなく、生活空間・余暇空間などの多様な環境資源として認識され始めている。そのため水質管理は、水資源保全と環境保全の両面からますます重要となってきた。下水道整備や工場排水処理が行われ、家庭や工場などから排出される汚濁物質の削減が進んできたが、湖沼や河川の水質改善は近年あまり進んでいない。従来の河川水質管理では、工場・下水処理場・家庭・畜舎など、発生源を特定しやすい負荷源（点源）から、主に晴天時に流出する有機汚濁物質を対象に行われてきた。しかし、市街地の地表面・屋根面や山林・農地などから降雨時にも汚濁物質が流出する。とりわけ、都市域では不浸透化が進み、

雨水流出量が増大するとともに、大気からの降下物や自動車のタイヤくずなどの様々な汚濁物質が屋根面や地表面に堆積し、降雨流出に伴う汚濁物質流出量も増大している。これまでの雨天時の汚濁物質流出に関する調査・研究では、都市域を対象とした事例は少なく、自然系の汚濁物質流出解析で多く用いられている雨水流出量と汚濁物質流出量をモデル化したLQ式を都市域に適用した場合、不浸透面からの汚濁物質の流出特性を表現するのは困難である。このため不浸透面を類別してそれぞれごとに発生汚濁物質量を与えるなど、流出機構のモデル化に工夫を加えた研究が進められている。

一方、都市域での汚濁物質の削減対策として、浸水防止目的の小型の雨水貯留施設の一部の容量を用いた汚濁負荷削減を検討してきた¹⁾。しかし、流域条件や降雨特

性によっては流出水を貯留するなどの事後対応の効果は十分ではなく、できるだけ発生源に近い場所での流出削減対策を実施することが重要となっている。さらに、雨天時に流入した汚濁物質が、河川や湖沼などの水質に与える影響についても評価していく必要がある²⁾。

そこで、本研究では、都市域の一部である住宅地において流出観測を行い、汚濁物質の流出解析とその削減対策の評価を行うことを目的とする。まず、対象とする流域と汚濁物質を選定し、流域特性の調査に基づいて雨水流出解析を行う。次に、屋根面・道路面・排水路床を発生源とし、晴天時に堆積する汚濁物質量の調査を行う。さらに、これらの発生源から雨水に伴って流出する汚濁物質を算定するモデルを用いて、懸濁態汚濁物質流出量の推定を行う。これらのモデルを用いて、発生源別の流出削減対策の効果について検討する。

2. 対象流域における観測および水質分析

(1) 対象流域の選定

本研究では、宇治市北部に位置する戸建て住宅団地を対象流域（K団地）とした。市街地の中でも住宅地に注目したのは、工業・商業施設等がなく、比較的汚濁物質の発生源を特定しやすいためである。また当該流域は丘陵地に位置し、地形勾配が比較的急であるので、雨水の流出経路を特定しやすく、観測や解析に適している。

図－1に対象流域および観測地点を示す。K団地は宇治市北部に位置する低層住宅地である。流域は東西に細長く、西向きに傾斜している。観測地点より上流の集水

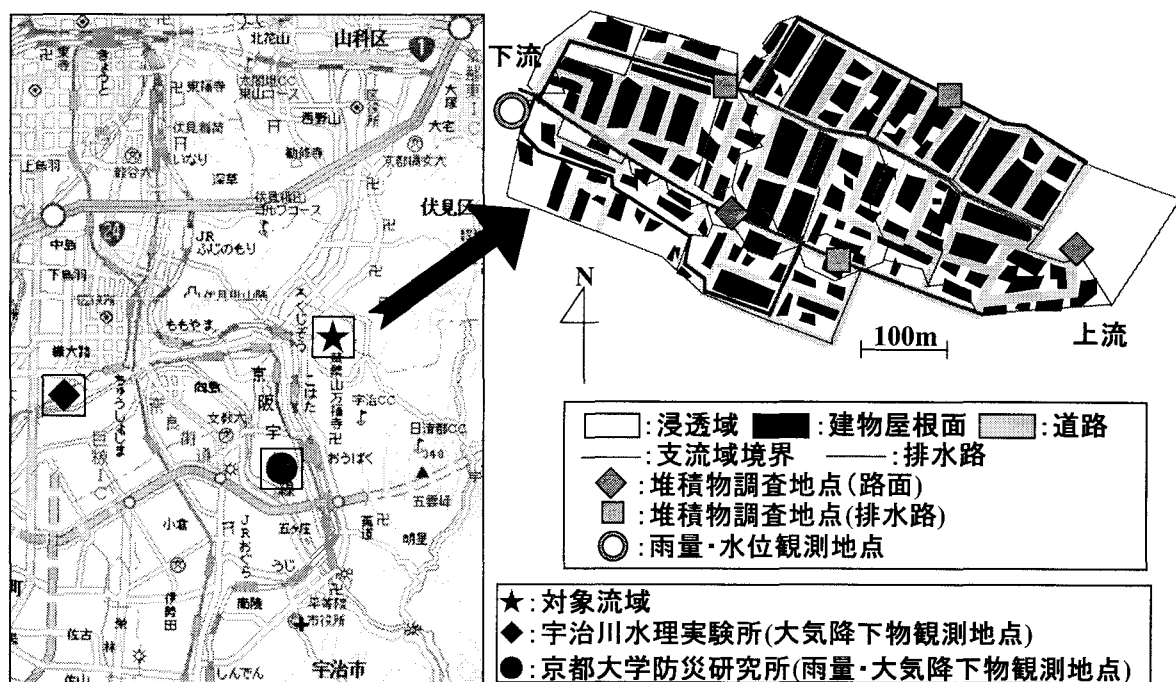
面積は約0.18km²で、道路は全て舗装されており、ほぼ全域で戸建て住宅が建設され、一部には浸透面である空地や茶畑・林地が残っている。流域内には自然河川は存在せず、雨水はコンクリート排水路によって集められ、下流の河川に放流される。流域には分流式公共下水道が整備されているが、一部に下水道未接続家屋が存在するため、晴天時にも家庭排水の流出が存在する。

(2) 観測の概要

採水可能で流水断面を特定できる下流地点を観測地点とし、2002年7月～12月にかけて水文観測および採水分析を行った。観測地点には自記水位計と雨量計を設置して5分間隔でそれぞれの観測を行った。また、プロペラ式流速計を用いて随時流速を測定し、断面流量を求めて水位－流量曲線を作成した。さらに、自動採水器を設置して、降雨開始直後には15分間隔、流量ピーク以降は30分間隔、流量低減時には1時間間隔で採水を行った。

(3) 対象水質項目

一般に溶存態汚濁物質の流出量は流量に大きく依存し、懸濁態汚濁物質は流量のみならず、汚濁負荷の現存堆積量に依存し、降雨初期には堆積量が多いため汚濁物質の流出速度も速くなる。したがって、汚濁物質の流出ピークは流量ピークよりも時間的に早く現れるファーストフラッシュ現象が発生しやすい。特に、住宅地における主要な発生源である道路面・屋根面・排水路底に堆積している汚濁物質は降雨初期に主として懸濁態として流出しやすい。これは、水溶性の汚濁物質とは異なり、石油系の炭化水素類や多環芳香族は疎水性が強く、土壌粒子等



図－1 観測対象流域

の懸濁態物質の表面に吸着して流出するためである。住宅地には庭等の浸透面もあり、ここからも雨水に伴う懸濁態汚濁物質の流出が考えられるが、流域末端の観測点では、不浸透面・浸透面由来の汚濁物質を分離して観測することはできない。そのため、汚濁物質の流出解析については、浸透域からの流出の影響が小さいと考えられる比較的小規模の降雨現象を対象として解析を行う。

水質分析項目は、有機汚濁物質指標であるTOC(Total Organic Carbon：全有機態炭素)を用いた。TOCは有機物を構成する炭素元素量であり、一般的な有機汚濁物質指標と比較して、微量有害化学物質など特定の汚濁物質との相関性を検討することもできる³⁾。採水した試料1 Lのうち、250mLをガラス繊維ろ紙（保留粒子径1 μm相当）を用いてろ過し、原水とろ過後試水について、懸濁態対応の全有機態炭素計（島津製作所製：TOC-V/SCN）を用いて有機態炭素量を測定し、その差を懸濁態有機態炭素(POC)とした。

3. 雨水流出解析と汚濁物質流出解析

本研究では、雨水流出解析にKinematic Runoff Model、汚濁物質流出解析に Storm Water Management Model (SWMM, US-EPA)の汚濁負荷表面流出モデルを用いた。なお、雨水流出については、観測値から基底流量を差し引いた直接流出量のみを対象とし、基底流量については晴天時の連続観測をもとに作成した24時間の時間－流量曲線を与えた。汚濁物質についても、晴天時の採水試料分析に基づいて作成した晴天時流出負荷量を差し引いた雨天時流出分を解析の対象としている。さらに、対象流域内および周辺地区で屋根面・道路面・排水路床に堆積する汚濁物質量を調査した。

(1) 雨水流出解析の結果

Kinematic Runoff Model の基礎式を式(1)～(3)に示す。河道流（今回の対象地区では排水路流）についても同様の基礎式を用い、両者共に特性曲線法を用いて解析を行った。

$$q = \frac{1}{N} I^{\frac{1}{2}} h^{\frac{5}{3}} \quad (1)$$

$$h = \left[\frac{N}{I^{\frac{1}{2}}} \right]^p q^p = Kq^p \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \quad (3)$$

ここで、 q ：単位幅あたり流量、 N ：等価粗度、 I ：斜面勾配、 R ：径深、 h ：斜面上水深、 r ：有効降雨強度、 K 、 p ：係数、 x ：流下方向距離、 t ：時間である。

都市計画基本図・下水道排水区図および現地調査に基づいて対象流域の地形・地被状況を調べ、対象流域の排水路を断面積・断面形状・勾配等に基づいて16に分割し、流域をそれぞれの分割排水路に流入する排水区に分割した。また、2002年7月～12月までの7回の雨量・流量観測の結果から、保留量曲線を求めて有効雨量を算定した。既存研究⁴⁾では総雨量20mmあるいは降雨強度20mm/hr以下の場合には浸透域からの直接流出が無いとされており、今回の観測からも同様の現象が確認されたので、まず小降雨の観測データをもとに不浸透面および河道の粗度係数を決定し、次に浸透域からの直接流出の発生が予想される比較的大きな降雨事象の観測データから浸透面の粗度係数を決定した。計算結果を図－2に、決定した粗度係数を表－1に示す。

計算結果は概ね観測流量を再現している。浸透域からの流出が想定される8月24日の場合、流出後半の逡減期の再現性が悪くなっているが、これは水位観測誤差と流量分離に用いた晴天時観測流量の変動に起因する。対象とする懸濁態汚濁物質の流出が降雨初期に発生することを考慮すれば、降雨開始後の比較的短時間の流量再現性が重要であり、今回の解析では十分な再現性が得られたと評価した。

(2) 汚濁物質の流出モデル

本研究の対象である住宅地には不浸透面として屋根面・道路面が存在する。また、一部の家屋から家庭排水や洗車等の汚水が排水路に流れ込んでおり、晴天時にも一部の雨水排水路では流出水が観測される。そのため、排水路底にはミズアカ状の付着生物群が生息するなど、路床に堆積している汚濁物質も雨水の流下過程で巻き上げられ、雨天時の流出汚濁物質の発生源となっている。そこで、雨水流出解析で用いた分割流域のひとつの斜面を浸透面と不浸透面に分離し、さらに不浸透面を屋根面と道路面に分割し、双方の斜面流に伴い流出する汚濁物質が排水路に流れ込むモデルを用いて、汚濁物質の流出解析を行った。汚濁物質の流出を表現するモデル式を以下に示す。

表－1 Kinematic runoff モデルの粗度係数

モデル要素	粗度係数
不浸透面	0.025
浸透面	0.500
河道	0.010

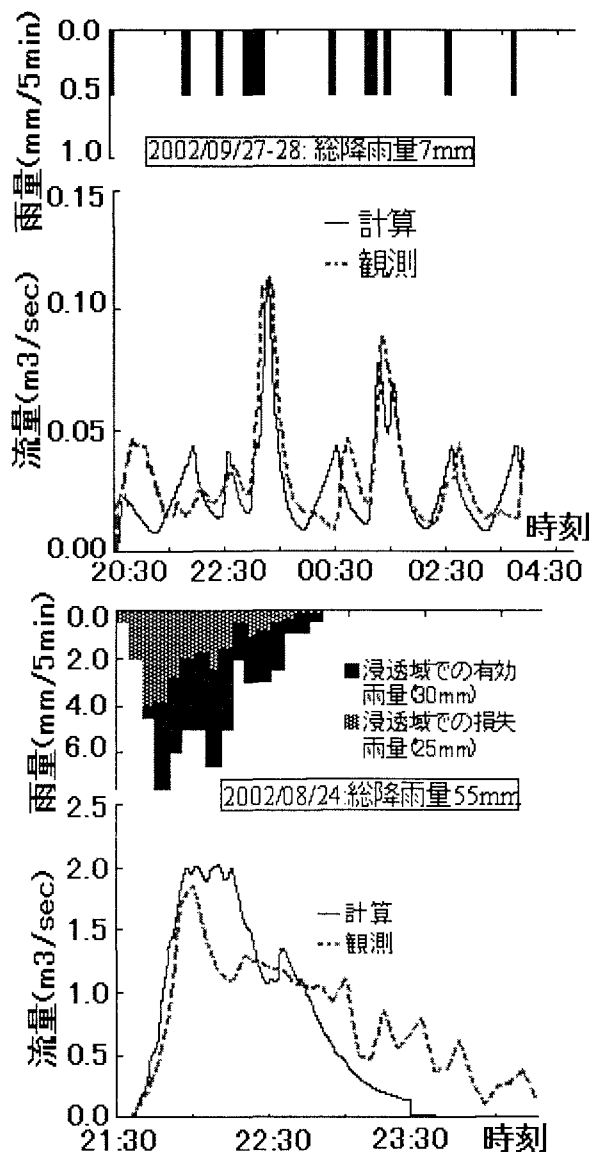


図-2 雨水流出解析の計算結果

$$\frac{dP_s}{dt} = -K_s P_s \quad (4)$$

$$\begin{aligned} M_s(t) &= \frac{P_s(t) - P_s(t + \Delta t)}{\Delta t} \\ &= P_s(t) \frac{1 - \exp(-K_s u_s \Delta t)}{\Delta t} \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 P_s ：汚濁物質現存量、 M_s ：汚濁物質流出量、 K_s 、 K_{st} ：比例定数、 u_s ：雨水流速である。雨水流速には雨水流出解析で求めたKinematic Runoff Modelの斜面流速を与え、汚濁物質の初期堆積量 P_{s0} を与えることで流出汚濁物質量を算定できる。今回の解析では P_{s0} として観測で得られた総流出汚濁物質量を与えた。さらに、排水路床の堆積汚濁物質の巻き上げについても、上記と同様の基礎式に基づき、雨水流速の代わりに河道流速を与

え、排水路床からの汚濁物質の供給を表現した。屋根面・道路面からの流出汚濁物質と排水路床からの巻き上げ汚濁物質が排水路を流下する過程について移流現象のみを考慮した。

(3) 堆積汚濁物質量の調査結果

都市域の不浸透面には晴天時に多くの汚濁物質が堆積し、降雨によって流出する。本研究の対象である住宅地周辺には大規模な工場等がなく、屋根面・道路面には大気汚染物質の降下物、道路面には自動車の排ガスやタイヤあるいは路面舗装材からの剥離物が堆積することが予測された。また、排水路底には家庭雑排水や洗車水などの下水道で集水されるべき汚水が流れており、沈殿物と付着生物が観察された。このような先行晴天期間に堆積する汚濁物質量を算定するための調査を実施した。大気降下物については、図-1に示す2地点で50cm四方の採取用アクリル板を設置し、一定期間において回収した採取版を精製水で洗浄し、汚濁物質を捕集した。道路面と排水路床の堆積物については、図-1に示す地点でスコップや金属製ブラシなどを用いて掻きだした物質を捕集した。物質量の測定に際しては、雨水による流出を考慮して200～500mLの精製水を加えた試料を10分間攪拌して静置後の濁水を原水とし、水質分析と同等の方法で堆積物質中のPOCを定量した。攪拌後すぐに沈殿する大型の粒子状物質は分析対象としていない。先行晴天日数と堆積汚濁物質量の関係を図-3に示す。

大気降下物は懸濁態・溶存態ともに先行晴天日数にほぼ比例して堆積しており、路面堆積物のうち懸濁態は増加するが、溶存態はほぼ一定量で推移する。路面堆積物は道路および自動車由来のものがそのほとんどを占め、疎水性の汚濁物質が多いことが確認できた。排水路床に堆積している汚濁物質も、先行晴天日数の進行に伴い直線的に増加するが、経過日数が5日を越えると溶存態汚濁物質の割合が相対的に高くなる。これは降雨直後から排水路内に堆積し始める汚濁物質の一部が排水路内の付着藻類等によって生物分解され、堆積した懸濁態汚濁物質が分解されて溶存態に変化したことが予測される。水温条件等によって分解速度は異なるので、必ずしも溶存態汚濁物質量の割合が高くなるとは限らないが、対象期間においては上記の傾向が確認できた。また、後述する排水路床からの巻き上げモデルのモデル定数が小さくなったのは、排水路床からの懸濁態汚濁物質の供給が少なかったためである。都市表面での汚濁物質堆積過程については、単純な供給プロセスだけでなく、風等の物理的な影響による離脱や生物等による分解過程もあり、今後とも詳細な実験・観測が必要である。

(4) 汚濁物質流出解析の結果

まず、堆積汚濁物質量の調査に基づき、対象流域の屋根面・道路面・排水路床に堆積している総汚濁物質量の

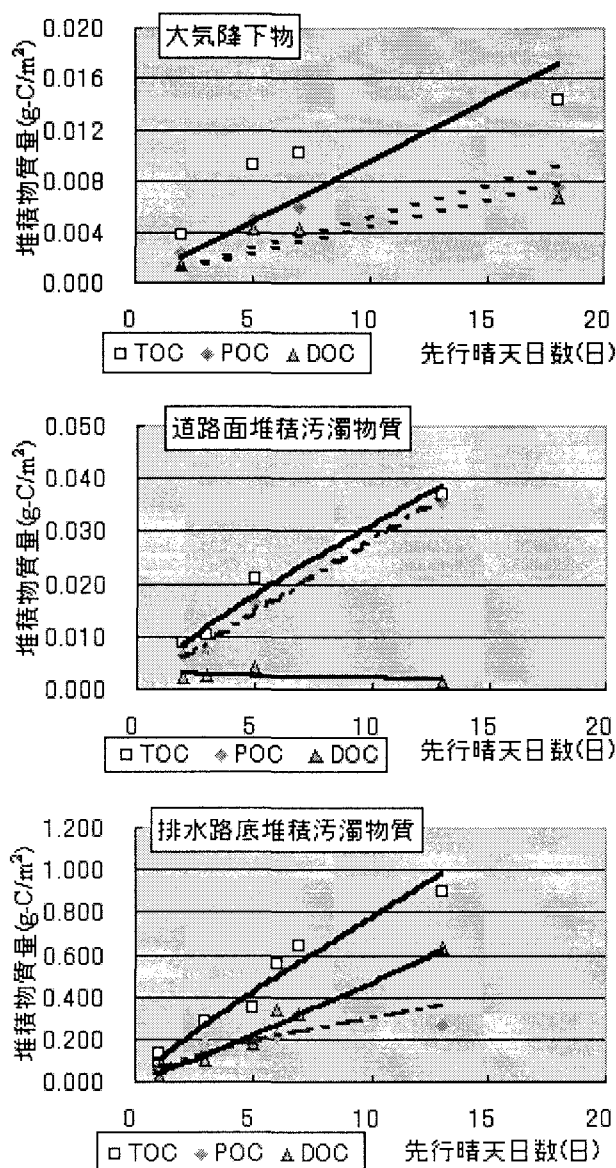


図-3 先行晴天日数と堆積汚濁物質

比を求め、2002年10月1日に観測された総汚濁物質流出量をそれぞれの発生源に初期堆積量として配分した。次に、雨水流出解析の結果求められた斜面流速および排水路内流速をもとに汚濁物質流出量を算定し、再現性が高まるように発生源ごとの比例定数を修正した。算定の結果を図-4に示す。なお、図中の観測値は採水時間間隔で得られた水質分析結果と観測水位から求めた流量に基づいて内挿補間して表示している。解析の結果、屋根面と道路面の比例定数はほぼ同程度の値となり、排水路床からの巻き上げモデルのモデル定数値は小さくなった

(表-2)。全般的な再現性は良好であり、とりわけ降雨開始直後のPOCの流出量ピークの再現性が高い。発生源を分離したことの効果については再現対象とした降雨事象も少なく、今後解析対象を増やすことが必要であるが、都市域不浸透面からの懸濁態汚濁物質の基本的な流出特性を十分再現していると評価した。

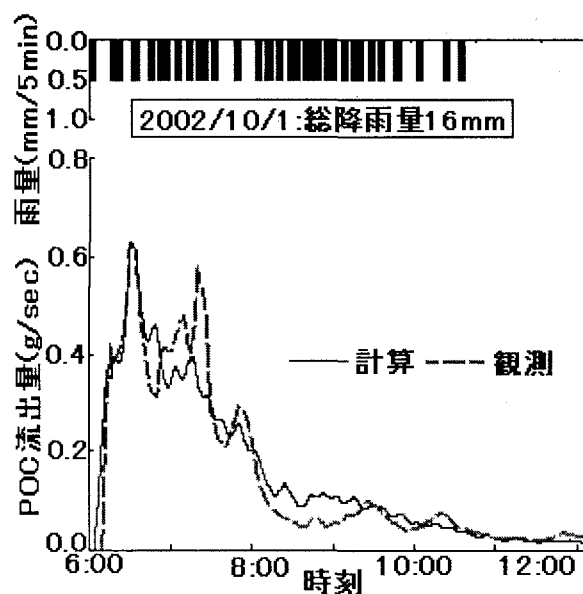


図-4 汚濁物質流出解析の計算結果

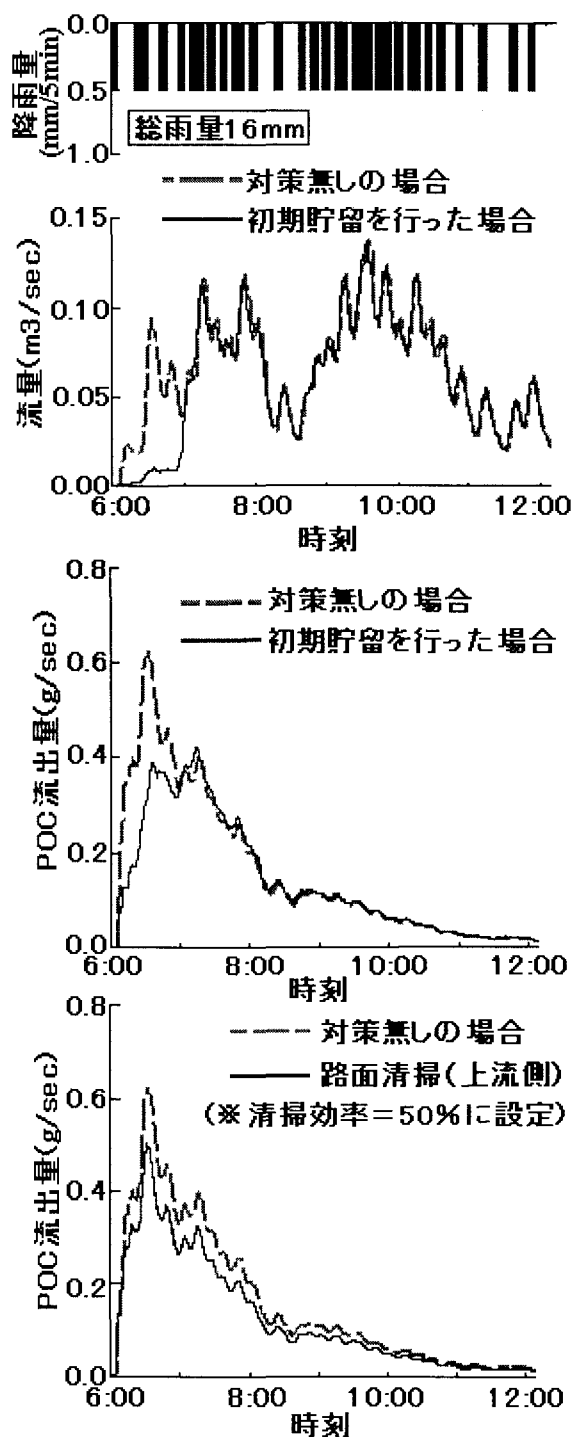
表-2 汚濁物質流出モデルの比例定数

発生源	比例定数 K_d の値
屋根面	0.400×10^{-2}
道路面	0.450×10^{-2}
排水路 (巻き上げ)	0.015×10^{-2}

4. 汚濁物質削減対策の評価

都市表面に堆積した汚濁物質の流出を制御するためには、排水区下流端で流出雨水を貯留し、沈殿等の水処理技術を適用することも可能である⁵⁾。しかし、比較的降雨初期に流出しやすい高濃度の汚濁物質を効率的に収集するためには時間-汚濁物質量の流出予測が必要であるが、先行晴天日数や降雨パターンに大きく依存するので、高精度の予測は困難である。一方、汚濁負荷削減の発生源対策としては汚濁物質そのものを系外に除去するものと流出抑制によるものがあり、ともに汚濁物質削減としては根本的対策と位置づけられる。前者に属するものとして路面清掃や排水路清掃が挙げられるが、これらの活動は生活環境保全のために自治会や行政等によりこれまでも取り組まれてきた削減策である。一方、屋根面雨水を積極的に貯留して雨水利用を図る事業が各地で進められている。雨水貯留は浸水対策のための流出抑制のひとつの方策であるが、雨水に含まれる汚濁物質の流出制御の点でも効果的な対策といえる。住宅地における雨水利用施設では汚濁雨水は立て樋に貯留され、降雨後に庭等に散水される簡易な装置が用いられており⁶⁾、初期雨水に含まれる汚濁物質の流出抑制が可能である。このような対策の効果をシミュレーションにより評価した。

結果を図-5に示す。流域内の全家屋に雨水利用のための各戸貯留タンクを設け、降雨量2mmまでの屋根排水を立て樋に一次貯留し、降雨後に庭等に散水して流出抑



図－5 汚濁物質削減対策の評価

制した場合には、流出初期の高濃度の汚濁雨水を削減できるので、汚濁物質の流出ピークを約30%逓減できる。貯留槽が満水状態でも立て樋による2mmの流出抑制は常に実行されるので、年間を通して得られる削減効果は大きい。一方、路面清掃および排水路床の清掃については、清掃によって流域内の堆積汚濁物質量が減少するので、清掃効率に従って減少した堆積汚濁物質量が総流出汚濁物質量から削減される。清掃効率50%で上流側の路面清掃を実施した場合、総流出量の約18%の削減効果となった(図－5)。流域の上流側で路面あるいは排水路床の

清掃を行った場合に、下流端への流達時間の遅れによって下流端での流出汚濁物質ピークに差異が現れ、受水域の水質影響を低減できることも期待したが、上流側あるいは下流側で路面清掃を行った場合に、下流端での汚濁物質流出量の時間変化に大きな違いは見られなかった。このことは排水路床の清掃でも同様であった。

5. まとめ

本研究では、住宅団地を対象とした雨水・汚濁物質流出現象と晴天時の汚濁部室堆積に関する観測調査を実施し、雨水および汚濁物質の流出モデルを作成し、流域内の屋根面・道路面・排水路床に堆積する汚濁物質の定量とその流出過程を表現した。特に、発生源別の汚濁物質流出モデルを用いて、各発生源対策を評価することができた。不浸透面の性質が比較的均質で、かつ流域のほとんどを占めている住宅地では、汚濁物質が雨水流出速度によって流送される特性が顕著に現れる。解析対象とした降雨は雨量強度が比較的小さく、ほぼ均等に降り続いており、雨水流出は降雨継続時間の全般にわたって流出するが、汚濁物質は降雨初期に集中して流出し、いわゆるファーストフラッシュ現象を顕著に示している。このため、初期貯留による汚濁物質流出量の削減が効果的であった。また、この降雨特性は、路面および排水路床の堆積汚濁物質の清掃を上流側と下流側で実施した場合の効果が同等であったことにも影響しており、多様な降雨事象を対象として、長期間の対策効果を評価することが次の課題である。

参考文献

- 1) Kido, Y., Hosoi, Y., Saito, K. and Fukui, N: Reduction of Runoff Pollutant Load by Real Time Control of Storage Systems in Urban Area, Proc. of Intl. Conf. on Urban Pollution Control Technology, pp.421-426, 1999.
- 2) 史 承煥・増田貴則・細井由彦: 河川に流出する粒子態物質の流度と富栄養化に及ぼす影響, 水工学論文集, Vol. 47, pp. 1039-1044, 2003
- 3) 鈴木祐麻他: 野洲川流域におけるダイオキシン類の挙動と土壌特性が与える影響, 環境衛生工学研究, Vol. 16, No. 3, pp. 80-885, 2002.
- 4) 岡 太郎・角屋 睦・野口美具: 宅地域の雨水浸透と流出特性, 京都大学防災研究所年報, Vol.23, pp.227-238, 1980.
- 5) Kido, Y., Hosoi, Y., Oniki, S. and Saito, K.: Cost/Effectiveness Analysis of Control Alternatives for Stormwater Runoff Pollutant Reduction on Equivalent Condition of Flood Prevention, Proc. of Asian WaterQual'99, Vol.2, pp.1399-1344, 1999.
- 6) 木津町経済建設部下水道課: 木津町雨水利用検討調査報告書, 2003

(2003. 9. 30受付)