

都市路面堆積負荷流出とモデル化

関西大学工学部土木工学科 正員 和田安彦

関西大学工学部土木工学科 正員〇三浦浩之

1. 緒言

都市域においては、人口の集積と諸活動の活発化、高密度化により、面的に発生する汚濁物は増加している。降雨時には、多くの汚濁物が集中的に流出し、公共用水域汚濁原因や下水道施設への高負荷の一つになっている。都市域では非特定汚染源からの汚濁物の流出機構を明らかにすることが必要で、路面からの汚濁物流出はその発生源の一つで発生汚濁量の面からも重要視されている。

本論文では、路面堆積負荷流出機構を明らかにするため、雨水樹からの汚濁物の流出についての検討を行った。

雨水樹が降雨時汚濁流出に及ぼす影響や雨水樹中の汚濁物質特性を明らかにし、汚濁物質流出モデルを構成した。それにもとづく降雨時の汚濁物質の流出状況についてシミュレーションを行った。

2. 降雨による汚濁流出機構と雨水樹堆積物質

2-1. 降雨時路面汚濁物質流出機構

路面へは大気中から自動車排気ガス含有物質、工場ばい煙、粉じん等が降下、蓄積し、人為的なごみ投棄等もあるため、路面上は常に汚染された状態となる。降雨時にはこれら晴天時負荷に降雨による負荷が加わり、いっそう路面は汚染されるが、雨水が汚濁物質を路上より洗浄、排除するため汚濁物質の大半は、雨水樹へ排出されている。

晴天時に発生し、路面、空地、屋根に堆積した汚濁負荷は降雨によりそのほとんどが雨水樹にいったん集められる。これら汚濁負荷は流入雨水量が樹内貯留容量（排水孔の高さによる）を超えると下流下水道施設に流下する。東京都のある排水区では雨水樹からのBOD負荷量は、家庭下水の8.0ton/dayに対して770kg²⁾と少ないが、SSは、家庭下水の5.9 ton/dayに対して14.5 tonと約2.5倍もある。J. Fletcher, J. Pratt³⁾らによれば、樹内の貯留水は、晴天時の蒸発散により濃縮されたり、開口部からの汚濁物質浸入等により汚濁が進行して嫌気性状態にあるため、溶解性有機物やアンモニウム等が増大している。この雨水樹による樹内堆積物が常時十分な頻度で排除されていれば、公共用水域への影響はさほど問題とはならないのであるが、実際にはほとんど行なわれておらず、そのため晴天時に堆積した汚濁物質は降雨時に容易に下水道に流入している。このように、雨水樹は晴天時に発生する路面からの汚濁物質を貯留し、雨天時に排出するといういわば雨天時の汚濁供給源となっている。

2-2. 都市流出への雨水樹の寄与

雨水樹から流出する汚濁負荷の、都市域汚濁物質流出へ及ぼす影響について、その割合からまとめたものが表-1に示すものである。

表-1 雨水樹内流出負荷量

雨水樹流出負荷量の全降雨流出汚濁物質負荷量に占める割合は決して低いものでなく、10~30%程度が雨水樹を発生源としている。中でもアンモニウム塩は、降雨によっては降雨時全流出負荷量の80%も占めることもあり、平均でも30%以上と高い値を示している。溶存物質やCODも雨水樹を発生源とするものの割合が高く、40%以上を占めることもある。反対に、SSは雨水

成 分	雨水マス内負荷の全降雨流出負荷への割合	
	平 均 値	範 囲 値
S S	10.6	1.9 ~ 22.4
溶 存 物 質	20.7	3.8 ~ 40.2
C O D	20.5	2.9 ~ 49.2
B O D	13.9	2.7 ~ 30.4
硝 酸 塩	15.7	2.6 ~ 24.6
アンモニウム塩	31.5	9.5 ~ 80.9

樹以外からのものも多く、雨水樹からのものは全体の10%前後である。降雨によっては、雨水樹からの流出負荷の割合が極端に低くなり、10%から1%台になることもある。このように、雨水樹流出負荷の全降雨時流出負荷量への影響は、降雨や汚濁物質の種類により変動するが、一般にその割合は高く、降雨時流出負荷の1/10~1/3は雨水樹からのものであるといえる。

3. 雨水樹堆積物質の降雨時流出モデル

3-1. 雨水樹流出濃度の基礎式

(1) 溶存物質除去式

Ian J. Fletcher と Christopher J. Pratt によれば、流出水量と樹内溶液の混合割合 P との関係は $P=664 \cdot Q+19.7$ ($Q < 0.121/s$) であり $0.121/s$ 以上の流入水によって完全に混合されるとしている。

$$C = C_0 \cdot e^{-t \cdot Q \cdot P / 100V} \quad (1)$$

ここで、 C :溶存物質濃度(g/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 :雨水樹初期濃度(g/l)

(2) 雨水樹からの沈殿物質除去式

雨水樹の底生沈殿物質は樹内溶液中に離脱し混合され、流出水によって放出される。底生沈殿物質がすべて離脱した後は、樹内溶液に混合された溶解物質が流入水により希釈され、流出される。このように沈殿物質は2段階で除去され、離脱継続時と離脱終了後によって場合分けされる。FletcherとPrattは一定流量 Q における1秒当りの離脱量を測定し(離脱率 $K=278 \cdot Q+25.9$)、沈殿物質除去式として以下のものを示した(M (mg):沈殿物質量)。

$$\textcircled{1} \text{ 沈殿物質離脱時} \quad C = \frac{K}{Q} (1 - e^{-t \cdot Q/V}) \quad (2)$$

$$\textcircled{2} \text{ 離脱終了後} \quad C = \frac{K}{Q} (1 - e^{M \cdot Q/K \cdot V}) \cdot e^{(-t \cdot Q/V + M \cdot Q/K \cdot V)} \quad (3)$$

3-2. 流量変化時の雨水樹流出濃度式

I. J. Fletcher と C. J. Pratt は流量一定時の雨水樹流出濃度式を示したが、実際には降雨の時間変化に伴う流量変動が生じるので、筆者らは流量変動に対応できるモデルを構成した。

なおここで、 $\Delta t (=5\text{min})$ 間は流入水量は一定であるとした。

(1) 雨水樹からの溶存物質除去式

流量 $Q(n)$ 、流入してから S 秒後の流出濃度を $C(n, s)$ とすると、 $Q(n)$ は5分間一定であるからその間は流量一定モデルと同様となる。

$$C(1, s) = C_0 \cdot e^{-s \cdot Q(1) \cdot P(1) / 100V} \quad (4)$$

$Q(1)$ 終了時の流出濃度 $C(1, 300)$ は $Q(2)$ でのため樹内初期濃度と一致するはずであるから、流量 $Q(2)$ における流出濃度 $C(2, s)$ は

$$C(2, s) = C(1, 300) \cdot e^{-s \cdot Q(2) \cdot P(2) / 100V} \quad (5)$$

となる。以後同様にして、流量 $Q(n)$ における s 秒後の流出濃度 $C(n, s)$ は

$$C(n, s) = C(n-1, 300) \cdot e^{-s \cdot Q(n) \cdot P(n) / 100V} \quad (6)$$

(2) 雨水樹からの沈殿物質除去式

流量 $Q(n)$ のときの離脱量を $K(n)$ (mg/s)とすると、離脱量は $K(n) \times s$ であるから

$$\frac{M - 300 \sum_{n=1}^{z-1} K(n)}{K(z)} = s_1 < 300 \quad (7)$$

が成立すれば、 n 番目の流量が s_1 秒間流入した時に沈殿物質が離脱終了することになる。この時の時間 T (sec)は $T = (z-1) \times 300 + s_1$

① 沈殿物質離脱濃度式 ($T < t$)

一定モデルの離脱濃度式(2)は流量変化においても適用できる。

$$C(n, s) = \frac{K(n)}{Q(n)} \cdot (1 - e^{-t \cdot Q(n) / V}) \quad (8)$$

② 離脱終了後の流出濃度式

$n=z$ 番目の流量が s_1 秒間流入した時にすべての沈殿物質が離脱終了したとすると、

$$C(z, s_1) = \frac{K(z)}{Q(z)} \cdot (1 - e^{-T \cdot Q(z)/V}) \quad (9)$$

となる。これは槽内濃度と一致するはずであるから、離脱終了後の初期濃度と考えれば、溶存物質濃度式 (6) より離脱終了時の流出濃度は

$$C(z, s) = C(z, s_1) \cdot e^{-(s-s_1) \cdot Q(z) \cdot P(z)/100V} \quad (10)$$

となる。さらに $z+1$ 番目の流量での流出濃度は、

$$C(z+1, s) = C(z, 300) \cdot e^{-s \cdot Q(z+1) \cdot P(z+1)/100V} \quad (11)$$

となり、以後同様にして

$$C(n, s) = C(n, s_1) \cdot e^{-(s-s_1) \cdot Q(n) \cdot P(n)/100V} \quad (12)$$

$$C(n, s) = C(n-1, 300) \cdot e^{-s \cdot Q(n) \cdot P(n)/100V} \quad n < z \quad (13)$$

4. 雨水樹堆積物質流出シミュレーション

4-1. 対象地域および対象降雨

(1) 対象地域および雨水樹汚濁特性

雨水樹に関する調査は土木研究所により東京都豊島区周辺で行われ、谷端川流域内の雨水樹を以下の項目について調査している (表-2)。

① 雨水樹及び樹蓋の形状 ② 土砂だめ内の堆積量 ③ 上ずみ水質、底質負荷

表-2 雨水樹内汚濁負荷 (実測値)

排水区 (Point)		1	2	3	4	5	6	7	8
地点 (No.)		5	1	2	6	2	3	4	1
雨水マスの深さ (m)		0.84	1.01	0.82	0.95	0.58	0.54	0.75	0.69
雨水マスの底面積 (㎡)		0.196	0.196	0.196	0.158	0.196	0.196	0.196	0.196
フロダムの深さ (m)		0.15	0.15	0.16	0.25	—	—	0.15	0.16
雨水マスの容量 (l)		29.4	29.4	31.4	39.5	—	—	29.4	31.4
沈殿物堆積面深さ (m)		0.10	0.02	0.09	0.03	0.03	0.04	0.08	0.17
沈殿物容量 (l)		19.6	3.92	17.64	4.74	5.88	7.84	15.68	33.32
沈殿物量 (kg)		23.52	4.70	21.17	5.69	7.06	9.41	18.82	39.98
BOD ₅	初期濃度 (mg/l)	649.0	362.0	1682.0	574.0	396.0	444.0	211.0	146.0
	底質 (g/kg)	13.54	9.56	8.54	13.03	11.47	6.85	8.42	1.76
	底質負荷量 (mg)	318461	44932	181427	49384	80978	64459	158464	70365
COD	初期濃度 (mg/l)	552.4	310.7	641.4	209.4	103.0	425.0	537.4	155.1
	底質 (g/kg)	50.7	42.8	63.6	46.7	47.2	36.4	53.4	17.4
	底質負荷量 (mg)	1192464	201160	1346412	176993	333232	342524	1004988	695652
SS	初期濃度 (mg/l)	5210	3320	7740	11678	11204	4604	5610	1648
	底質 (%)	38.0	53.8	54.5	44.1	42.6	38.3	45.3	24.8
	底質負荷量 (mg)	8937600	2528600	11537630	2509290	3007560	3604030	8525460	9915040

これらより、雨水樹内の汚濁物質に関して次の特性があげられる。

- ① 雨水樹内の底質 (堆積) 中に含まれる汚濁物が多いほど、上ずみ水中にも多くの汚濁物質が含有されている。
- ② 易溶性有機物質は、底質中では分解作用が進むため含有濃度は比較的低い。
- ③ 難分解性有機物質や浮遊性汚濁物質は、底質中にも比較的高濃度で含まれている。
- ④ 上ずみ水中の汚濁物質濃度は底質中の含有量と関係があり、有機物質では100~600 ppm 以下にある。

(2) 対象降雨および雨水樹流入水量

対象降雨は神戸市花隈排水区におけるデータを用いた。⁶⁾ 雨水樹への流入水量は、その雨水樹の集水面積により決定されるため、本研究では、雨水樹の取付け管径に基づく設計排水面積⁴⁾により、各雨水樹の排水面積を次のように定めた (表-3)。これより、雨水樹への流入水量 $Q_{in}(l/s)$ は、各雨水樹集水面積と

取付け管径	排水面積
250mm以上	1200㎡
200mm	600㎡
150mm	200㎡

花隈地区の排水面積との比例配分により求めた。

4-2. 雨水樹堆積物質流出解析

(1) 流入パターン別汚濁物質流出解析

花隈排水区での降雨データを基に雨水樹堆積汚濁物の流出シミュレーションを行った結果、雨水樹からの汚濁物流出濃度には雨水流入開始後20分前後までの流入水量が大きく影響することが明きらかとなった。しかも降雨開始後およそ60分で雨水樹内負荷はほとんど流出している（図-1）。

そこで流入開始から60分以内の雨水流入パターンとして、前ピーク型、中央ピーク型、後ピーク型、一定型の4種類を用いて、雨水樹流出負荷特性の検討を行った（この時、総流入水量はどの流入パターンも同一）。これらの結果の一例は図-2～5に示すもので、これより

- ① 一定型では、雨水樹沈殿物質がすべて巻き上がるまで流出濃度は対数曲線を描いて上昇し、ピーク後徐々に低下していくが、次第にその低下の度合は少なくなる。
- ② 前ピーク型では、ピーク流出濃度はさほど高くないが、流入継続による濃度低下も少なく、1時間経過後でもピーク時の1/4程度の濃度（およそ200ppm）にある。
- ③ 中央ピーク型では、流入水がピークとなると同時に流出濃度は極端に低くなり、流入開始後40分程で50ppm程度にまで低下している。
- ④ 後ピーク型では、流入水量がピークとなるまでは一定型とあまり濃度変化状態は変わらないが、その後は急激に濃度は低下し、60分後には50ppm程度となっている。
- ⑤ ピーク濃度が最も高いのは後ピーク型で1700ppmにもなり、次いで中央ピーク、一定型の順で、前ピーク型では後ピーク型の約半分程度の濃度（870ppm）となっている。
- ⑥ 流出濃度がピークとなるまでの所要時間を比較すると、前ピーク型が最も早く、流入開始後12分余りでピーク濃度となっている。残りの3パターンでは、ピーク時間はほぼ同一で、流入開始20分程度となっている。

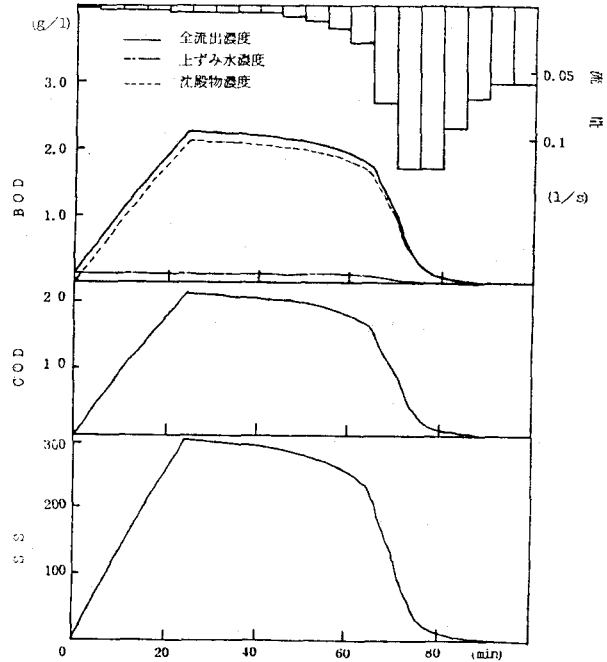


図-1 雨水樹からの汚濁物質流出濃度

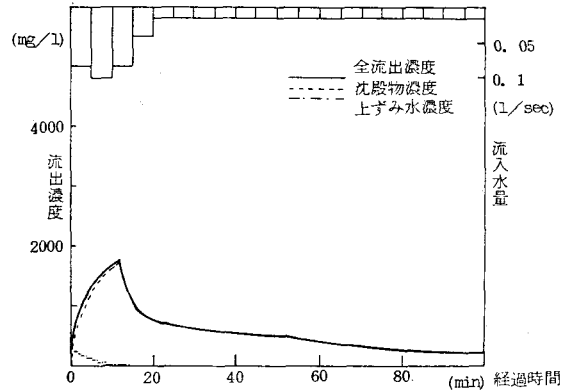


図-2 雨水樹からの汚濁物質流出濃度

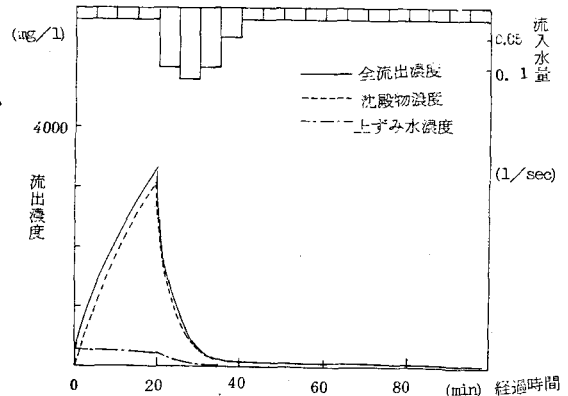


図-3 雨水樹からの汚濁物質流出濃度

これより ①雨水樹からの流出濃度は流入開始後すぐには高くなり、10～20分程度経過しないとピーク濃度とはならない ②流入開始10～30分経過後までの流出濃度が高く、流入開始直後の流量が多い降雨時には流出濃度はさほど高くない ③流入開始直後は流量が少なく30分程度経過しないとピークにならないような降雨時には、流出濃度は高い（BOD濃度が2000ppm余になることもある） ④流入水量の増加は前ピーク型の降雨では流出濃度を上昇させる役割を果たすが、中央、後ピーク型の降雨では、流出濃度を希釈低下させる役割を果たしている

このように、雨水樹からの流出負荷は、特に流入開始後1時間以内の流入水量の挙動に影響を受けている。

(2) 樹内汚濁物質の違いによる流出解析

堆積汚濁物質と上ずみ水質の流出濃度に及ぼす影響を把握するために、種々の雨水樹について同一の流入パターンを用いてシミュレーションを行った。図-6、7は、図-5のPoint8-No.1雨水樹と土砂だめ容量が等しいPoint2-No.1, Point7-No.4雨水樹について、同一流入パターンを用いて流出濃度変化を表わしたものである。これより

- ① ピーク流出濃度に達するまでの時間は沈殿物質量によって左右され、沈殿物質量が多いものほど流出濃度がピークを迎えるのが遅くなる。
- ② ピーク流出濃度は主に沈殿負荷量により左右され、沈殿負荷量の多いPoint7でのピーク値が最も高くなっている。しかし、沈殿負荷量からするとPoint2よりPoint8の方が倍近くもあるが、ピーク濃度は、Point2の方が高くなっている。これはPoint8の底質濃度が極端に低いことが影響していると思われる。
- ③ 上ずみ水質は、さほど汚濁物質の流出状態には影響しない。

以上より、雨水樹からの流出負荷の挙動は、沈殿物質量および底質に影響されることが明らかになった。これを容易に理解するため、Point7の雨水樹において沈殿物質量を1/2とした場合、および底質を1/2にした場合についてBODを代表値として同様な計算を行い、比較検討を行った。

①底質を1/2にすると、ピーク流出濃度も1/2と

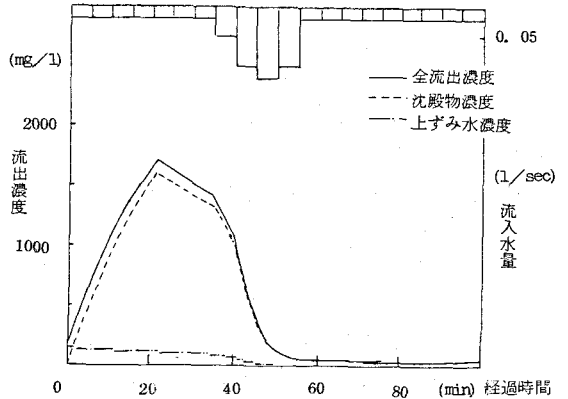


図-4 雨水樹からの汚濁物質流出濃度

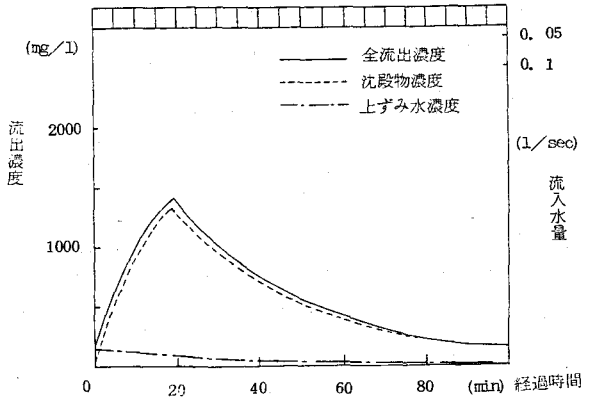


図-5 雨水樹からの汚濁物質流出濃度

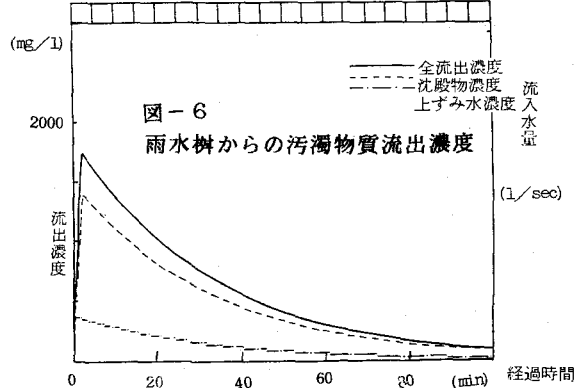


図-6 雨水樹からの汚濁物質流出濃度

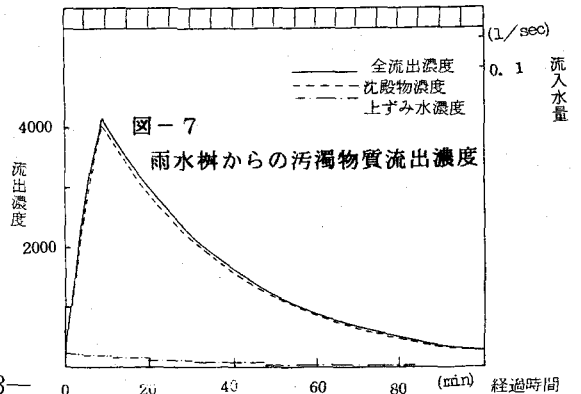


図-7 雨水樹からの汚濁物質流出濃度

なるが、ピーク時刻は同一である。②沈殿物質量を1/2とした場合は、流出濃度がピークとなるまでの時間は1/2となり、ピーク値も約1/2になる(>底質1/2時ピーク値)。③両者のピーク値がほぼ等しいのは底質負荷量が同一であるためと考えられる。④ピーク後の流出濃度の減衰パターンも酷似している。

5. 結言

都市路面汚濁物質流出機構のひとつである雨水樹流出負荷について、その流出挙動や都市流出への寄与について検討を行った。雨水樹からの流出負荷は降雨時都市汚濁物質流出のかんりの部分を占め、その流出特性を把握することは水環境管理の観点からも重要であろう。したがって、本論文では雨水樹内負荷の諸特性を明らかにした上で、その流出挙動をモデル式を用いて検討した。これにより得られた雨水樹内負荷に関する考察は次のものである。

- ① 路面の汚濁は、大気中からのばい煙、粉じんの降下、自動車の排気ガス、ごみ、等に起因する。
- ② 雨水樹には降雨時に路面堆積負荷の大半が流入するため、雨水樹は汚濁負荷の貯留槽を形成し、雨天時の汚濁供給源となっている。
- ③ 雨水樹内負荷の大部分は、沈殿物質中に含有されており、降雨時には沈殿物質の巻き上げおよび底質負荷の離脱が起った後に負荷が流出する。このため、雨水樹からの流出負荷はファーストフラッシュに影響すると同時に、その後の汚濁物質流出にも強く寄与している。
- ④ 雨水樹からの負荷流出は降雨開始後30分以内にほぼ終了するため、これまでの雨水流入状態に負荷流出は強く影響を受ける。また、雨水樹内負荷の流出は、沈殿物質の巻き上げを伴うため流入開始直後に流量が多い場合よりも、10~20分経過後に流量の多い場合の方が流出濃度は高くなる。
- ⑤ 雨水樹からの汚濁物質流出濃度は主に沈殿負荷量に左右されるが、沈殿物質量と底質との関係により微妙に変化する。また、雨水樹からの汚濁物質流出濃度がピークとなるまでの時間は、沈殿物質量に比例し、上ずみ水濃度はあまり影響しない。

このように雨水樹からの流出負荷は、降雨時総流出負荷の1/5~1/3と大きな部分を占め、これを制御すれば、都市域からの汚濁物質流出をかなり削減することも可能である。このためには、晴天時に樹内堆積物質を除去することも効果的ではあるが、かなりの労力を必要とするため現実に実施するには問題がある。したがって、より少ない費用と労力でより高い効果のある雨水樹流出負荷の減少が図れる手法を見出すことが、公共用水域水質向上のためにも望まれ、雨水樹に関する研究が行われることが必要となろう。

参考文献

- 1) 和田安彦：非特定汚染源負荷と雨天時流出モデル、公害と対策，Vol.18 No.5, 1982-5
- 2) 雨天時における合流式及び分流式下水道の改善に関する調査，日本下水道協会，1979-3
- 3) Ian J.Fletcher・Christopher J.Pratt:Mathematical simulation of pollutant contributions to urban runoff from roadside gully ponds, Second international conference on urban storm drainge urbana,Illinois,USA,June 14-19,1981
- 4) 下水道施設設計指針と解説、日本下水道協会，1972
- 5) 下水管理施設の合理化に関する調査報告書(V)，一都市域の汚濁ポテンシャル，土木研究所資料，第1705号，建設省土木研究所下水道研究室，1981-8
- 6) 分流式下水道から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，建設省土木研究所下水道研究室，1980-1