

(3) 都市路面堆積負荷の雨水マスからの流出のモデル化とその解析

MODEL BUILDING AND ANALYSIS OF RUNOFF WATER QUALITY OF
THE FLUSHING FROM THE STREET INLETS

和田 安彦, 三浦 浩之*

Yasuhiko WADA, Hiroyuki MIURA

ABSTRACT; Various pollutants are produced too much in our environment, and they are accumulated on road surfaces, roofs, and open areas. Since most accumulated loads on road surfaces are gathered into street inlets, we never ignore the influences of pollution loads in street inlets on runoff water quality.

So, we derive the model for runoff loads from street inlets which are one of non-point pollution sources, in order to make clear the influence on runoff loads on rainy day and the runoff characteristics, and we simulate runoff loads by our model on the basis of the results of runoff experiments.

KEYWORDS; Simulation model, Water quality, Accumulated loads, Non-point sources, Runoff water quality model, Runoff experiments, Street inlets.

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おり、これらは降雨時に集中的に流出し、公共用水域の汚濁原因や下水道施設への高負荷要因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、雨天時流出負荷制御のために必要であり、路面堆積負荷の流出は発生汚濁負荷量の面からも重要である。路面堆積負荷流出機構の中でも、道路端の雨水樹は降雨表面流出水質に影響を与えられる汚水だめを形成しており、この汚濁物の降雨表面流出水質への寄与は、表面流出負荷の要因の一部となり、必ずしも小さいものではない。この汚濁物の流出過程を表現するモデルが、今後都市路面流出負荷をさらに詳しく表現するために必要である。

このため筆者らは雨水樹からの汚濁物の流出に着目し、この流出特性を把握して、モデル化を図り、雨水樹堆積負荷流出機構を明らかにすることを試みているが、ここではその一環として行なった雨水樹流出の模型実験の結果を考察する。この実験は、雨水樹堆積負荷の一定条件下における、流入雨水量の変化に伴う雨水樹流出水質変化を明らかにするものである。

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するため、汚濁物質流出モデルを構成し、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い、モデルの検討及びその流出特性について考察を行った。

2. 降雨による汚濁流出機構と雨水樹堆積物質

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

* 関西大学 Univ. of Kansai

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/day²⁾に対して770kgと少ないが、SSは、家庭下水の5.9ton/dayに対して14.5tonと約2.5倍もある。樹内の貯留水は、晴天時の蒸発散により濃縮されたり、樹蓋等の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塩等が増大している。この雨水樹による樹内堆積物が常時十分な頻度で清掃等により排除されていれば、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上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。

3. 雨水樹堆積負荷流出実験

1) 実物大雨水樹模型

実験に用いた雨水樹模型は雨水樹の現場調査に基づいて製作したもので、雨水樹と流入・流出水路から成っている（Fig. 1）。流入水路は幅15cm、深さ15～18cm、長さ2mの透明アクリル製で、流入水量測定のため直角三角ぜきを設け、この三角ぜきにおける流入水の乱れを防止するため、越流ぜき、緩衝材、整流板、もぐりぜきを上流側に設置した。流出水路も流入水路と同様な型式で長さが19cmで、雨水樹への取付位置は流入水路より5cm低くしてある。一方、雨水樹は実例等をもとに底面が一辺35cmの正方形で深さ30cmとし、土砂だめ部（流出水路取付位置よりも下の部分）は深さ10cm、容積12.25ℓにした。

2) 実験条件

流入水量の測定は三角ぜき越流水深と流量との関係から算定した。

雨水樹堆積泥は関西大学工学部周辺における雨水樹（17地点）から採取し、その内一定重量分（5.56kg；湿潤時）を雨水樹底部に均等に堆積させ、上澄み水を流出口まで満たした上で12時間放置後実験を行った。なおここでは流入水は上水を用いている。

3) 堆積泥の含有負荷

実験に用いた堆積泥の性状および含有負荷量はTable.1に示すものである。堆積泥の含水率は60～80%にあり、単位乾燥泥当たりの含有負荷量は平均でBOD 4.37（g/kg）、COD 16.88（g/kg）、SS154.0（g/kg）である。土研による東京都谷端川流域におけるもの³⁾と比較すると筆者らのものはおよそ1/2～1/3の値となっている。これは筆者らの調査が大学内でやや市街地とは異なる環境下にあるものを対象としたためと考えられる。

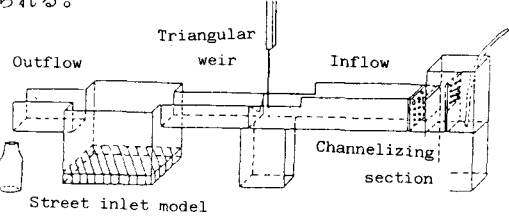


Fig. 1 Water course in experiment.

Table 1 Characteristics and pollution loads of the bottom sediments.

試料番号	1	2	3	4	5	6	平均
試料湿潤重量(kg)	5.56	5.56	5.56	5.56	5.56	5.56	5.56
含水率(%)	69.1	60.3	61.2	61.0	88.6	76.9	69.5
試料乾燥重量(kg)	3.29	3.47	3.45	3.45	2.94	3.14	3.29
含有負荷量(g/kg乾泥)	800	4.25	3.89	5.15	3.46	5.45	4.02
COD	15.64	15.26	13.58	17.52	21.55	17.75	16.38
SS	140.01	157.09	159.93	144.12	154.53	168.23	153.99

4. 雨水樹堆積物質の流出モデル

(1) 雨水樹流出濃度の基礎式

雨水樹内で行われる堆積物質流出機構は、上澄みに溶存している物質の流出と沈殿・堆積したものが巻き上がり、流出するもので構成されていると考えられる。したがって、雨水樹堆積物質の流出モデルとして、前

者を表わす「溶存物質除去式」と後者を表わす「沈殿物質除去式」の2つを用いて、これらの流出挙動を表現することができる。

Ian J. Fletcher と Christopher J. Pratt は、⁴⁾ 雨水樹内で生じる汚濁物流出システムを

- ① 雨水樹への降雨水流入以前に、先行降雨時から晴天時に貯留された樹内上澄水中の溶存物質が、樹への降雨流入水により希釈され、流出水中に混入するもの
- ② 晴天時に樹内の土砂ために堆積した汚濁物などの底成沈殿物が、降雨流入水により樹内でかくはんされ、流出水中に混入して放出されるもの

により構成されると考えて、以下のようなモデルを表現している。

1) 雨水樹からの溶存物質除去式

溶存物質の除去は流出水量と樹内溶液の混合割合 P を用いて、次式で表わされる。

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

ここで、 C : 溶存物質濃度 (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 : 雨水樹上澄水初期濃度 (mg/ℓ)、 t : 経過時間 (sec)。

なお、 P は流入水量 Q が雨水樹内の水量 V とどの程度混合しているかを示す指標で、 $P = 664.0 \cdot Q + 19.7$ ($Q \leq 0.12 \ell/\text{S}$, $Q > 0.12 \ell/\text{S}$ では $P = 100\%$) で表わされる。

2) 雨水樹からの沈殿物質除去式

雨水樹の底成沈殿物質は、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。底成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、流出する。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り場合分けされる。Fletcher と Pratt は、一定流量 Q における1秒当りの沈殿物質の離脱量 K (mg/s) を測定し、沈殿物質除去式として以下のものを示した。ここで M (mg) は離脱物量で、ある流量において巻き上げ可能な底成沈殿物質中の汚濁物質量のことである。したがって、雨水流入開始からの経過時間 t が、 $0 \leq t \leq M/K$ である時は離脱継続時、 $t > M/K$ では離脱は終了している。

① 沈殿物質離脱時

$$C = \frac{K}{Q} Q (1 - e^{-t \cdot Q/V}) \quad (2)$$

② 離脱終了後

$$C = \frac{K}{Q} (1 - e^{M \cdot Q/(K \cdot V)}) \cdot e^{-(t - M/K) \cdot Q/V} \quad (3)$$

3) 流出濃度式

筆者らは一定流量時の雨水樹流出濃度は、溶存物質除去式と沈殿物質除去式を合成したものを流出濃度式として、次のように表わした。

離脱継続時 ($t \leq M/K$)

$$C = C_0 \cdot e^{-t \cdot Q \cdot P / (100 \cdot V)} + \frac{K}{Q} (1 - e^{-t \cdot Q/V}) \quad (4)$$

離脱終了後 ($t > M/K$)

$$C = C_0 \cdot e^{-t \cdot Q \cdot P / (100 \cdot V)} + \frac{K}{Q} (1 - e^{-t \cdot Q/V}) \cdot e^{-(t - M/K) \cdot Q/V} \quad (5)$$

ここで、離脱継続時の流出濃度式を時間 t に関して微分し整理すると流出濃度は、

$$K - C_0 \cdot Q > 0$$

という条件下では増加して、離脱終了時において濃度が最大となり、反対に

$$K - C_0 \cdot Q < 0$$

では、流出濃度は流出の継続とともに単調減少する。

(2) 離脱率 (K)、離脱物質量 (M) の算定

上記のモデル式を実験結果に適用するためには、離脱率 K と離脱物質量 M を集実験結果より求めることが

必要となる。筆者らが離脱継続時の流出濃度式を離脱率 K (mg/s) について、 $Q > 0.12$ (ℓ/s) という条件下 ($P = 100$ (%)) で解くと次式が得られた。

$$K = \frac{C - C_0 \cdot e^{-t \cdot Q/V}}{1 - e^{-t \cdot Q/V}} \cdot Q \quad (6)$$

実験により得られた汚濁物流出濃度図より、離脱終了時間、その時の最大流出濃度 C (mg/ℓ)、初期濃度 C_0 (mg/ℓ) を読みとり、式(6)を用いて K を算定する。離脱終了時には離脱率 K と離脱終了時間 T (sec)、離脱物量 M (mg) の間には $T = M/K$ の関係が成立するので、これより M を求める。離脱率 K (mg/s) と離脱物量 M (mg) は、流量の関数として Fig. 2, 3 に示すように表わせる。各水質項目における K 、 M をそれぞれ柵内堆積物の底質当たりの量として示すと、以下のようなになる (K' は実値の 10 倍の値を用いている)。

$$K'_{\text{BOD}} = 1.569 \cdot Q + 0.417 \quad (7)$$

$$M'_{\text{BOD}} = 5.517 \cdot Q + 0.861 \quad (8)$$

$$K'_{\text{COD}} = 2.099 \cdot Q + 0.236 \quad (9)$$

$$M'_{\text{COD}} = 4.783 \cdot Q + 0.101 \quad (10)$$

$$K'_{\text{SS}} = 1.778 \cdot Q + 0.222 \quad (11)$$

$$M'_{\text{SS}} = 5.712 \cdot Q + 0.083 \quad (12)$$

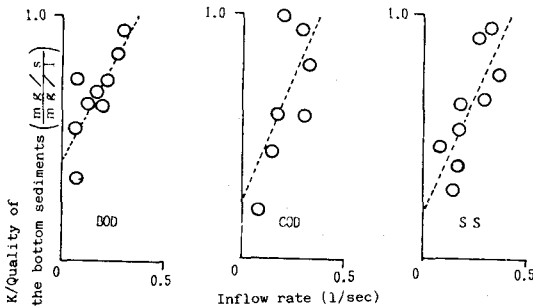


Fig. 2 Relation between the rate of release and the inlet flow rate.

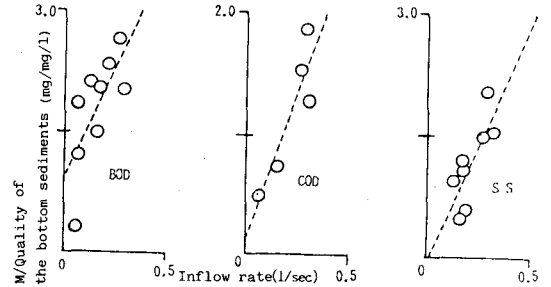


Fig. 3 Relation between the total mass of material released from the bottom sediments and the inlet flow rate.

(3) 離脱終了時と流量の関係

離脱終了時間 T は

$$T = M/K = \frac{M'}{10K'}$$

で求められるため、これに各水質項目の単位底質当たりの離脱率 K' と離脱物量 M' を代入すると、離脱時間 T は次のように流量の関数で表わされる。これを図化したものが Fig. 4 である。

$$T_{\text{BOD}} = -6.050 / (1.569 \cdot Q + 0.417) + 35.16 \quad (13)$$

$$T_{\text{COD}} = -4.368 / (2.099 \cdot Q + 0.236) + 22.78 \quad (14)$$

$$T_{\text{SS}} = -7.960 / (1.778 \cdot Q + 0.222) + 32.13 \quad (15)$$

これより離脱終了時間 T は、流量 Q が増加するにつれて増加するが、これは、離脱物量は流量が増加するにつれて増大するためである。しかし流量が増加するにつれて離脱率も増加するので離脱終了時間は一定値に収束する。この実験においてその値は $T_{\text{BOD}} = 35.16$ (sec)、 $T_{\text{COD}} = 22.78$ (sec)、 $T_{\text{SS}} = 32.13$ (sec) である。

5. 雨水柵堆積物質流出シミュレーション

(1) 現況シミュレーション

流量一定時の流出濃度の変化を表わす理論式と実験値とを、流量 $Q = 0.071$ (ℓ/s) と $Q = 0.321$ (ℓ/s) を例にとって比較した (Fig. 5 ~ 10)。

シミュレーション結果により離脱終了時間 T 、最大濃度 C_{max} は、実測値と計算値ではほぼ一致している

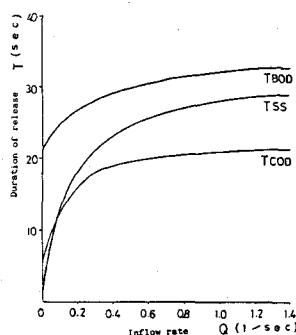


Fig. 4 Relation between the duration time of release and the inlet flow rate.

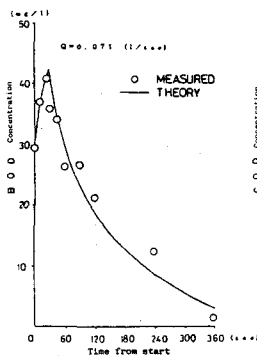


Fig. 5 The removal of BOD from a street inlet for a flow rate of 0.071 l/s.

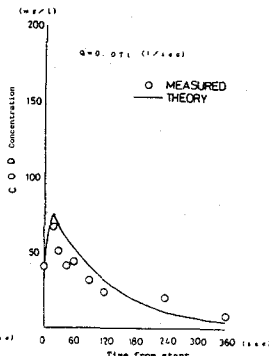


Fig. 6 The removal of COD from a street inlet for a flow rate of 0.071 l/s.

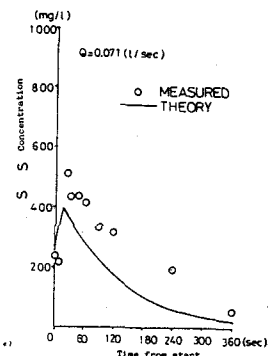


Fig. 7 The removal of SS from a street inlet for a flow rate of 0.071 l/s.

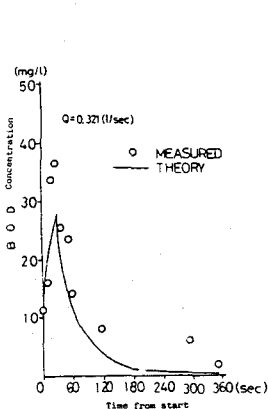


Fig. 8 The removal of BOD from a street inlet for a flow rate of 0.321 l/s.

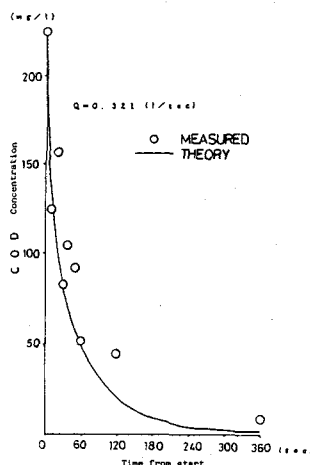


Fig. 9 The removal of BOD from a street inlet for a flow rate of 0.321 l/s.

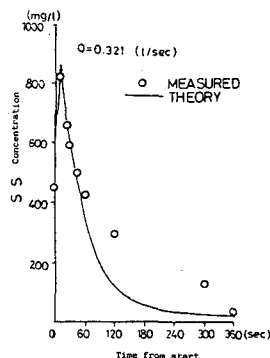


Fig. 10 The removal of SS from a street inlet for a flow rate of 0.321 l/s.

が、離脱後の濃度は、実測値の方が高めに出現する傾向にある。これは理論式における離脱終了後も現実には、少しずつ離脱が継続しているため高くなっていると思われる。

なお、 $Q = 0.321 (\text{l/s})$ の COD のグラフは単調減少となっている。これは雨水樹内の COD 負荷の初期状態が減少状態になる $K - C_0 \cdot Q < 0$ の条件に合うために、理論値も実験値も単調減少となっている。

(2) モデル式の確立とシミュレーション

1) モデル式の確立

ある流量において離脱可能な底質の量は BOD、COD、SS について、それぞれ式-(8)、(10)、(12)に全底質をかけたもので与えられる。したがって、時刻 t において流量 Q による離脱が終了した後、時刻 t' に時刻 t における流量 Q 以上の流量 Q' が生じた場合には、流量 Q と Q' による離脱可能物質量の差だけ新たに離脱する。

シミュレーションにおいて、一定時間 (30 秒) 同一の流量を流す場合を考える。N 回目の流量 $Q(N)$ を流してから S 秒経過したときの濃度を $C(N, S)$ とする。またモデルを考えるにあたって以下のような条件を設定した。

- ① 流入後すぐに流入水量と同量の水が流出する。
- ② 離脱率 K' は何回目の離脱においても、式-(7)、(9)、(11)で与えられる。
- ③ どのようなパターンで流量が変化しても、N 回目における初期からの総離脱量 M' は、式-(8)、(10)、(12)で表わされる。

④ 樹の土砂だめは、最初から水で満たされている。

これより、離脱継続時には、(N-1)回目の流量における30秒経過後の樹内容存物量の濃度を $C(N-1, 30)$ とすると、N回目の流量時の流出濃度 $C(N, S)$ はこれを初期の容存濃度と考えて、次式のように表わせる。

$$C(N, S) = C(N-1, 30) \cdot e^{-S \cdot Q(N) \cdot P(N)/(100) \cdot V} + K(N)/Q(N) \cdot (1 - e^{-S \cdot Q(N)/V}) \quad (13)$$

また離脱終了後の濃度は次のようになる。

$$C(N, S) = C(N-1, 30) \cdot e^{-S \cdot Q(N) \cdot P(N)/(100) \cdot V} + K(N)/Q(N) \cdot (1 - e^{-S \cdot Q(N)/V}) \cdot e^{-(S \cdot M(N)/K(N)) \cdot Q(N)/V} \quad (14)$$

2) 流量変化時のシミュレーション

流量変化時の雨水樹内堆積負荷流出実験を、0秒から6分15秒までは $Q = 0.27(\ell/s)$ 、それ以後は $Q = 0.356(\ell/s)$ として行った。実験の結果より BOD、COD、SS の初期濃度 (C_0) はそれぞれ 15.12、3.92、35.5 (mg/ℓ) であり、全底質量はそれぞれ 10,267、72,650、691,912 (mg) であった。これらの値を用いて理論式による濃度を時間的に追跡し、実験値と比較検討した結果を Fig.11 に示す。

これより $Q = 0.27(\ell/s)$ 時のモデル式による濃度変化は、実験値を良くシミュレートしているが、流量が増加した後の濃度変化は、実測値の方が理論値よりもピーク濃度が高く、また高濃度が継続している。これは、流量が増加した時の堆積物質の離脱量は、現実には、理論式で表わされるものよりも多くなることに起因すると考えられる。

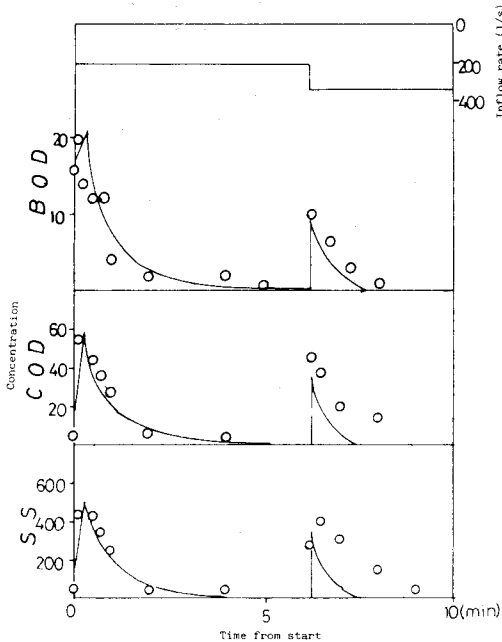


Fig. 11 The removal of BOD, COD and SS from a street inlet.

参考文献

- 1) 和田安彦、三浦浩之：都市路面堆積負荷流出とモデル化、環境問題シンポジウム講演論文集、№11、土木学会、1983
- 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) 下水管路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
- 4) Ian J. Fletcher・Christopher J. Pratt: Mathematical simulation of pollutant contributions to urban runoff from roadside gully ponds, Second international conference on urban storm drainage urbana, Illinois, USA, June 14-19, 1981

6. 結 言

雨水樹からの流出負荷は降雨時都市汚濁物質の流出の中でも無視できないもので、その流出特性を把握することは、水環境管理の上から重要である。雨水樹内負荷の降雨時流出特性を明らかにするため、モデル式を構成し、模型実験を行ないモデルの適合性の検討を行なった。実験には、実物大の雨水樹模型を用い、流入流量一定時および変化時の流出水質の測定を行ないこの結果を基に、雨水樹堆積物質流出モデルのパラメータの設定を行なった。これらが流量の関数として表わされることを明らかにした。得られたモデル式を用いて、雨水樹からの流出負荷のシミュレーションを行ったところ、一度離脱の終了した樹内堆積物質が流量の増加により再び離脱した後の再現性にやや改善の余地が見られるものの、ほぼ妥当な結果が得られた。今後は、当モデルを用いてより現実的な降雨時流入流量によるシミュレーションを行いたい。