都市流域の不浸透流出面（屋根面，道路面） における雨水・汚濁負荷流出特性

RUNOFF CHARACTERISTICS OF STORMWATER AND WASHOFF WATER QUALITY FROM ROOF AND ROAD SURFACES

渡辺 政広¹・西村 文武²・重田 尚秀³・小林 康司⁴

Masahiro WATANABE, Fumitake NISHIMURA, Naohide SHIGETA and Yasushi KOBAYASHI

¹ 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町 3 番)

² 正会員 工博 愛媛大学講師 工学部環境建設工学科 (同上)

³ 学生会員 愛媛大学大学院理工学研究科 環境建設工学専攻 (同上)

⁴ 学生会員 愛媛大学大学院理工学研究科 土木海洋工学専攻 (同上)

Owing to overflows from combined sewer pipe systems, water quality of receiving waters, including urban rivers, has become worse year by year. Appropriate countermeasures that can mitigate the overflows, therefore, must be developed promptly. The authors have investigated a distributed simulation model of water quality and stormwater runoff in urban sewer pipe systems. First, a surface routing model of stormwater and pollutants, which is a sub-model of the distributed model, is proposed. Second, the routing model is applied to a roof and a road surface of Matsuyama city and the applicability of the model is investigated on the basis of the comparisons of observed and simulated hydrographs.

Key Words : Road and roof surfaces, washoff equation, water quality, distributed runoff model, urban sewer pipe systems

1. はじめに

近年，都市域の合流式下水道管渠システムからの雨天時越流水による公共用水域の水質の悪化が問題となってきた。

このような問題を解決するためには，先ず，都市域における各種流出面上と下水道管渠システム内における雨水と汚濁負荷の非定常で不均一な流出を解析しえる計算モデル，すなわち，図-1 に示すような，雨水と汚濁負荷の分布型非定常流出解析モデルが必要となる。

本論文では，上述の流出解析モデルの開発を目指した研究の一環として，市街地の屋根面・道路面における雨水・汚濁負荷流出の観測を行い，既に提案されている流出面における雨水・汚濁負荷流出の基礎式（流出面における雨水・汚濁負荷の流出モデル，図-1）の適用性について検討した。

2. 雨水・汚濁負荷流出の観測

(1) 屋根面¹⁾

図-1 雨水・汚濁負荷流出の分布型非定常解析モデル。

図-2 観測解析対象流出面の位置図。

表-1 交通量調査結果

Date Type	Nov. 17, 1999	Nov. 28, 1999
Motorcycle	539	184
Automobile	1058	609
Truck and Bus	34	2
Total	1631	795

愛媛大学（松山市文京町3番、図-2）構内の水理実験室の屋根面を調査・解析対象の流出面を選び、雨水と汚濁負荷の流出観測を行った。

屋根面の概要を、図-3 (a) に示す。雨水および汚濁負荷の流出の観測は、屋根と雨水マスを結ぶ7本の鉛直パイプの中の1本の経路を、図-3 (a) に示すように、塩化ビニール製のパイプに変え、実験室内に引き込んで行った。屋根面の観測対象部分の集水（排水）面積は73 m²、樋に向かう屋根面上の流れの勾配は19 %、樋のそれは6.0 %である。

解析の対象とした水質項目は、濁度、T-CODである。水質の計測は、濁度には水質チェッカーU-10（堀場製作所）を、CODにはCOD計（笠原理化学株式会社）および共立CODパックテスト（共立理化学研究所）を用いて行った。

降雨データには、愛媛大学より直線距離で約700 m離れた松山地方气象台（図-2）で観測された地上観測原簿（0.5 mm 転倒マス雨量計記録および1分間降雨強度計記録）を用いた。

降雨・流出・水質の観測は、平成8年（1996年）6月12日から同年11月9日までの約5ヶ月間の計22の降雨・流出に対して行われた。

(2) 道路面²⁾

愛媛大学と隣接する松山北高校との間を南北に走る道路面（図-2）を調査・解析対象の流出面を選び、雨

(a) 屋根面

(b) 道路面

図-3 観測・調査・解析対象流出面。

水と汚濁負荷の流出観測を行った。

道路面は、図-3 (b) に示すように、ほぼ平行四辺形状をしており、集水（排水）面積は123 m²、側溝に向かう道路面上の流れの勾配は29 %、側溝のそれは5.8 %である。

雨水および汚濁負荷の流出の観測は、集水域の下流端にある雨水マスで行った。解析の対象とした水質項目は、SS、D-COD、T-CODで、それらの濃度は下水試験方法³⁾に従って測定した。降雨データには、道路面の傍に設置された受水マス（直径20 cm）で集水された降雨量を5分間隔で測定して得られた5分間強度記録を用いた。

降雨・流出・水質の観測は、平成11年（1999年）6月23日から同年11月12日までの約5ヶ月間の計9つの降雨・流出に対して行われた。

なお、本道路面に対し、平日（平成11年11月17日・水曜日・7 a.m.～7 p.m.）および日曜日（平成11年11月28日・7 a.m.～7 p.m.）に実施された2回の交通量調

表-2 都市下水道流域における代表流出面

Surface Flow Planes	Pervious / Impervious	Rainfall Loss
Steep Slope	Impervious	None
Flat Slope		Depression Storage
Road and Parking Lot		
Small Bare Land	Pervious	Depression Storage
Large Bare Land		Infiltration

査結果を、表-1 に示しておく。

3. 雨水・汚濁負荷流出モデルとその適用性

(1) 雨水流出モデルとその適用性²⁾

a) 雨水損失の算定

市街地の流出面を、表-2 に示すように分類する。屋根面と道路面における凹地損失は、Linsley らの指数関数型の近似式⁴⁾を適用すると、次のように表される。

$$D_s = S_d \left\{ 1 - \exp(-P_e/S_d) \right\} \quad (1)$$

ここに、 D_s : 累加凹地貯留量, S_d : 最大凹地貯留量, P_e : 累加余剰降雨量, である。

b) 雨水流出の追跡

屋根面、樋および道路面、側溝の流れは、いずれも、kinematic wave 流れとして取り扱う。流れの運動方程式および連続の式は、次式のように表される。

$$\text{屋根・道路面: } h = k' \cdot q^p, \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_e \quad (2)$$

$$\text{樋・側溝: } F = K \cdot Q^P, \quad \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (3)$$

ここに、 h : 水深, q : 単位幅流量, r_e : 有効降雨強度, k' , p : 斜面定数, F : 流水断面積, Q : 流量, K , P : 水路定数, x : 距離, t : 時間, である。

c) モデルの適用性

上述の雨水流出モデルを、調査・解析対象の屋根面および道路面に適用し、雨水流出シミュレーション結果を実測結果と対比して、本モデルの適用性（適合性）を検討した。検討の一例を、図-4 に示す。

これらより、本モデルの適合性がかなり高いものであることがわかる。

図-4 雨水流出シミュレーション結果（道路面）。

(2) 汚濁負荷流出モデルとその適用性

a) 汚濁負荷流出の基礎式^{5), 6)}

はじめに、屋根面・道路面に堆積した汚濁物質の降雨による流出は、次式のように表される。

$$L_s = \alpha_L k P_s r_e^b A \quad (4)$$

ここに、 L_s : 汚濁負荷流出量 (mg/sec), P_s : 流出面上の残存汚濁負荷量 (mg/m²), r_e : 有効降雨強度 (mm/hr), b : べき指数 ($b \geq 1$), k : 汚濁負荷流出係数 (1/mm), α_L : 汚濁負荷流出量についての単位換算係数 = $1/3600$ (mm/hr)^{1-b}, A : 排水（集水）面積 (m²), である。

次に、降雨流出期間中の汚濁の堆積を無視すると、 P_s に関する連続の式は、次のように表される。

$$dP_s/dt = -L_s/A \quad (5)$$

b) 汚濁負荷の流出特性⁶⁾

はじめに、式(4)を式(5)に代入し、これを、降雨開始時刻 $t=0$ から任意時刻 $t=t$ の間で積分すると、残存汚濁負荷量 P_s に関する式(6)および累加流出汚濁負荷量 ($P_{s0} - P_s$) に関する式(7)が得られる。

$$P_s = P_{s0} \exp \left(-\alpha_L k \int_0^t r_e^b dt \right) \quad (6)$$

$$\int_0^t L_s dt = P_{s0} - P_s$$

$$= P_{s0} \left\{ 1 - \exp \left(-\alpha_L k \int_0^t r_e^b dt \right) \right\} \quad (7)$$

ここに、 P_{s0} :初期堆積汚濁負荷量 (mg/m^2), である。

式(6)は、残存汚濁負荷量は累加降雨量の増加と共に指数関数的に減少してゆくことを示している。また、式(7)は、累加流出汚濁負荷量 ($P_{s0} - P_s$) は累加降雨量の増加と共に指数関数的に増大し、やがて、 P_{s0} に漸近することを示している。

次に、汚濁負荷の流出濃度 C_s は汚濁負荷流出量 L_s と雨水流出流量 Q_s から、式(8)のように表される。

$$\begin{aligned} C_s &= \alpha_c \frac{L_s}{Q_s} = \alpha_c \frac{\alpha_L k P_s r_e^b A}{\alpha_Q r_e A} \\ &= \frac{\alpha_c \alpha_L}{\alpha_Q} k P_s r_e^{b-1} \end{aligned} \quad (8)$$

ここに、 Q_s :雨水流出流量 (m^3/sec), α_Q :雨水流出流量についての単位換算係数、 C_s :汚濁負荷流出濃度 (mg/l), α_c :汚濁負荷流出濃度についての単位換算係数、である。

ここで、 $b=1$ の場合、汚濁負荷流出濃度 C_s は、式(8)より、次式のように表される。

$$C_s = \frac{\alpha_c \alpha_L}{\alpha_Q} k P_s \quad (9)$$

式(8)および式(9)より、降雨期間中における P_s は常に減少しているの、 $b=1$ の場合、降雨期間中、 C_s は常に減少し続けること、一方、 $b > 1$ の場合 (たとえば、 $b=2$ の場合)、 C_s は降雨強度の強弱に応じて増減することが分かる。

c) モデルの適用性⁶⁾

はじめに、式(7)で表される累加降雨量と累加流出汚濁負荷量の関係について、屋根面では T-COD および濁度 (Turbidity) を対象に、道路面では T-COD および SS を対象に検討した。検討結果の一例を、図-5 および図-6 に示す。

これらより、屋根面および道路面のいずれにおいても、また、いずれの水質項目についても、観測された累加降雨量と累加流出汚濁負荷量のグラフには、累加降雨量の増大と共に指数関数的に増加し、累加降雨量が屋根面では 0.3 mm を、道路面では 3 mm を過ぎるあたりから P_{s0} に漸近してゆく傾向、すなわち、式(7)が述べている汚濁負荷の流出特性がよく反映されていることが分かる。

次に、式(8)および式(9)で表される汚濁負荷流出濃度と有効降雨強度との関係について、上と同様に検討した。検討結果の一例を、図-7 および図-8 に示す。

これらより、屋根面および道路面のいずれにおいて

図-5 累加降雨量と累加汚濁流出量の関係 (屋根面)。

図-6 累加降雨量と累加汚濁流出量の関係 (道路面)。

図-7 観測されたポリユート・グラフ（屋根面）.

図-8 観測されたポリユート・グラフ（道路面）.

も、観測されたポリユート・グラフには、溶解性の汚濁が主体を占める T-COD、D-COD では降雨期間中ほぼ減少し続けているので $b=1$ 、固形性（粒子性）の汚濁が主体を占める濁度、SS では降雨強度の強弱に応じて増減しているので $b > 1$ （たとえば、 $b=2$ ）であるべきこと、すなわち、式(8)および式(9)が述べている汚濁負荷の流出特性がよく反映されていることが分かる。

以上より、屋根面および道路面からの汚濁負荷の流出は、式(4)および式(5)を用いて精度よく解析できるであろうことが分かる。

d) 汚濁負荷流出係数の適値および前期無降雨日数と初期堆積汚濁負荷量の関係

上述した流出面における汚濁負荷流出モデル（式(4)および式(5)）を実流域に適用するに当たり、モデル・パラメータ k および初期堆積汚濁負荷量 P_{s0} がどの程度の値をとるかを示す必要がある。

ここでは、道路面で観測した7つの降雨・流出を選び、D-COD および SS を対象として、 k および P_{s0} の組合せを種々に変え、式(4)および式(5)による汚濁負荷流出シミュレーションを行い、シミュレーション結果

を実測結果と対比して、各出水で共通な k の適値と、各出水における P_{s0} の適値およびこれと前期無降雨日数との関係を調べた。

汚濁負荷流出シミュレーション結果と実測結果を対比して検討した一例を図-9 に示す。また、前期無降雨日数と初期堆積汚濁負荷量との関係について検討した結果を図-10 に示す。

これらより、はじめに、道路面における k の適値は、D-COD では 3 mm^{-1} 程度に、SS では 0.3 mm^{-1} 程度になることが確かめられた（図-9 および図-10）。次に、道路面における P_{s0} の適値は、D-COD および SS のいずれの場合においても、前期無降雨日数と密接な関係があり、図-10 から明らかなように、初期堆積汚濁負荷量は前期無降雨日数が増加するにつれて指数関数的に増大し、やがて一定値に漸近する特性が確かめられた。なお、前期無降雨日数が2週間(14日)程度に対応する初期堆積汚濁負荷量は、D-COD では $8.5 \text{ mg/m}^2 = 0.085 \text{ kg/ha}$ 前後、SS では $420 \text{ mg/m}^2 = 4.2 \text{ kg/ha}$ 前後となっている（図-10）。

図-9 汚濁負荷流出シミュレーション結果（道路面）.

4. 結論

本研究では、市街地の屋根面・道路面における雨水・汚濁負荷流出の観測を行い、既に提案されている流出面における雨水・汚濁負荷流出の基礎式（流出面における雨水・汚濁負荷の流出モデル）の適用性ならびにモデル・パラメータの適値について検討を進めた。

以下に、本研究で得られた主要な知見を要約する。

- 1) 市街地の屋根面および道路面における雨水流出は、kinematic wave モデルを用いて精度良く追跡計算できる。
- 2) 屋根面および道路面における汚濁負荷流出は、既に提案されている基礎式(4)および(5)を用いて精度高くシミュレートし得る。
- 3) 汚濁負荷流出量の基礎式(4)における有効降雨のベキ指数 b は、溶解性の汚濁が主体を占める D-COD および T-COD では $b=1$ 、固形性（粒子性）の汚濁が主体を占める SS および濁度では $b>1$ （たとえば、 $b=2$ ）であることが明らかにされた。
- 4) 汚濁負荷流出量の基礎式(4)における汚濁負荷流出係数 k の適値は、道路面の場合、SS では 0.3 mm^{-1} 程度、D-COD では 3 mm^{-1} 程度となることが分かった。
- 5) 汚濁負荷流出量の基礎式(4)における初期堆積汚濁負荷量 P_{S0} の適値は、道路面の場合、前期無降雨日数と密接な関係があり、前期無降雨日数が増加するにつれて指数関数的に増大し、やがて一定値に漸近する特性が確かめられた。また、前期無降雨日数が2週間(14日)程度における初期堆積汚濁負荷量は、D-COD では $8.5 \text{ mg/m}^2 = 0.085 \text{ kg/ha}$ 前後、SS では $420 \text{ mg/m}^2 = 4.2 \text{ kg/ha}$ 前後となるであろうことも分かった。

(a) D-COD

(b) SS

図-10 前期無降雨日数～初期堆積汚濁負荷量（道路面）.

なお、本研究の一部は、平成12年度文部省科学研究費補助金（基盤研究（C）(2)，研究代表者・渡辺政広）により行われたことを付記する。

参考文献

- 1) 渡辺政広・右近雄大・永吉光一：都市域の屋根面からの汚濁負荷流出特性，愛媛大学工学部紀要，第17巻，pp. 219～227，1998。
- 2) 渡辺政広・重田尚秀・小林康司：市街地の道路面における雨天時の汚濁負荷流出特性，土木学会四国支部第6回技術研究発表会講演概要集，pp. 492～493，2000。
- 3) (社)日本下水道協会：下水試験方法・上巻－1997年版－，(社)日本下水道協会，1997。
- 4) Linsley, R. K., Kohler, M. A. and Paulhus, J. L. H.: *Applied Hydrology*, pp. 268～271, McGraw-Hill, 1949.
- 5) Huber, W. C. and Dickinson, R. E.: *Storm Water Management Model; Ver. 4 - Part A; User's Manual*, U. S. EPA/600/3-88/001a, 1988.
- 6) 渡辺政広：都市河川の水質環境，土木学会1997年度（第33回）水工学に関する夏期研修会講義集 A コース，pp. A-7-1～A-7-19，1997。

(2000.10.2受付)