

都市流域の流出汚濁解析と負荷特性に およぼす降雨形態の影響

RUNOFF ANALYSIS ON POLLUTANT LOAD IN URBAN CATCHMENT AND EFFECT OF RAINFALL PROPERTIES ON POLLUTANT RUNOFF

和田有朗¹・道奥康治²・辻義和³

Nariaki WADA, Kohji MICHIOKU and Yoshikazu TSUJI

¹学生員 工修 神戸大学大学院 自然科学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

²フェロー会員 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (同上)

³非会員 神戸大学 工学部建設学科 (同上)

In urban areas where there is a high density of property, infrastructure and population, it is an urgent task to develop an engineering tool for predicting the quantity and quality of stormwater from the viewpoints of disaster prevention and preservation of the water environment. In the present study, a field measurement and a runoff analysis of stormwater in a small urban area were performed, and the effects of rainfall hyetograph on the pollutant runoff process were examined. Excellent agreement between the SWMM simulation and the field data were found not only with the runoff discharge, but also with the concentration and transporting rate of nutrients. A response analysis of pollutant runoff was carried out for design storms of single-peaked triangular hyetographs with various durations and peak intensities. The results provide information useful in the management of sewage and river systems, such as the design and operation of sewage treatment plants, planning of river restoration for increasing river self-purification capability, scheduling of road cleaning operations, land use planning, and so on.

Key Words : *quantity and quality of stormwater, non-point source pollutant, runoff analysis, pollutograph, urban drainage, SWMM*

1. はじめに

都市域の水環境を良好に維持するためには公共用水域の保全・整備が重要である。特に、面源負荷を担う下水道の雨水排除系の適切な計画・管理が求められている。そのために汚濁負荷発生量の予測評価、流出過程、流出機構の解明、さらには公共用水域への水量・水質の影響評価が必要である。

本研究では、都市域における面源負荷の特性を明らかにするために、神戸市内小流域の雨水排除系における流出汚濁負荷の現地観測を実施した。さらに、Storm Water Management Model¹⁾(SWMM)を適用して汚濁流出特性の再現を試みた。モデル諸定数を同定した後、SWMMの解析結果が現地観測結果との比較によって検証された。さらに、降雨ハイエトグラフと物質流出特性との関係を明らかにするために、モデル降雨を用いた汚濁負荷流出シミュレーションを実施した²⁾。感度解析に基づいて降

雨強度、降雨継続時間など降雨特性と汚濁負荷特性との関係が明らかにされた。

2. 既往の研究

都市域の流出現象に関する研究として、神田ら³⁾や渡辺ら⁴⁾は都市小流域の流出や汚濁負荷の解析にSWMMを適用している。和田ら⁵⁾は都市域における流出負荷を面源負荷ととらえ、既往の流出モデルを整理した。また、汚濁負荷流出を対象に道路面と雨水桝における汚濁物質の堆積、流出メカニズムを実地調査より明らかにし、これを再現するための解析モデルを構築している。城戸ら⁶⁾は住宅地における懸濁態物質の流出に対してキネマティックモデルとSWMMを適用している。また、路面への堆積負荷に基づいて路面清掃率が流出負荷におよぼす影響を明らかにしている。古米ら⁷⁾は合流式下水道システムを対象に分布型モデルを用いて雨天時流出解析と

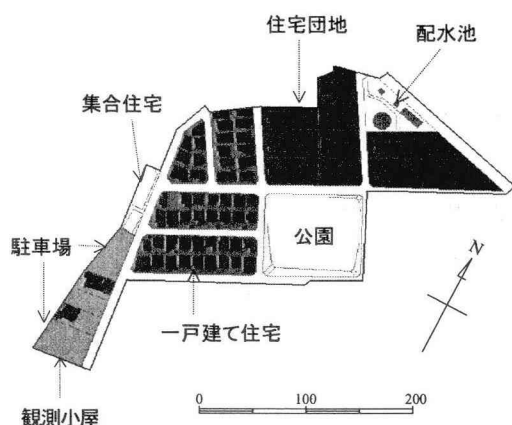


図-1 土地利用区分

汚濁負荷解析を実施し、雨水幹線へのゲートの設置や堰の調整による流出汚濁負荷の削減効果を立証している。

3. 汚濁流出負荷の現地観測

(1) 対象流域の概要⁹⁾

対象流域は都賀川水系に属する神戸市灘区の六甲山麓南側の市街地である。流域面積は 4.81ha、標高差は約 30m（最高標高 242.1m、最低標高 211.3m）、勾配は 2～11%と大きく、北から南にかけて急斜面を構成している。下水排除方式は分流式である。下水道網は開渠の道路側溝と、暗渠の雨水幹線から構成されている。雨水排水は道路側溝から最下流の明渠水路を通過して、都賀川水系六甲川へ流出する。図-1 に示すように、降水量・流量・水質は最下流部に設置された小屋で観測された。当該水路は3面張りで、雨天時には負荷流出が速く、晴天時にはほとんど水量がないため汚濁負荷流出はない。

流域の土地利用は、住宅団地、一戸建て住宅、駐車場、集合住宅、公園、舗装道路からなり、公園、団地敷地、一戸建て住宅の庭を除けば流域の約 72%が不透透域である。

(2) 観測と水質分析の方法

a) 観測方法

流量計測にはISCO社の4150ドップラー式流量計を用いた。平均流速、水位、流量をセンサーにより測定し、同社のMODEL674型雨量計で測定された雨量データとともに流量計本体内のデータメモリーに記録される。雨量計は観測小屋屋上に設置された。流出水はISCO社の6712型採水器によって時間プログラムに基づき自動的に1リットルずつ採水される（最大24サンプル）。

b) 水質分析の方法

試料水は一時的に冷蔵庫（5℃程度）に保存され、できるだけ早急に、浮遊物質濃度SS、生物化学的酸素要求量BOD、化学的酸素要求量COD、全窒素T-N、全リンT-

表-1 対象降雨の諸元

観測日	2003/9/12	2003/11/29	2004/7/10	2004/7/10
総降雨量 (mm)	10.8	29.2	14.6	12.6
降雨開始時刻	14:06	22:49	5:38	19:45
降雨終了時刻	0:41	17:54	12:00	20:35
降雨継続時間 (h)	10.6	19.1	6.4	0.8
平均降雨強度 (mm/hr)	1.0	1.5	2.3	15.1
先行晴天日数 2mm (日)	2.2	4.5	12.8	0.6
先行晴天日数 10mm (日)	2.2	4.5	12.8	0.6
先行晴天日数 30mm (日)	16.0	5.0	12.8	15.0

Pについて下水試験法に従い分析された。

(3) 対象とする降雨と流出

汚濁負荷流出解析に用いる4回の降雨事象の諸元を表-1に示す。2003年9月12日、2003年11月29日の二降雨はともに降雨継続時間が10時間を越える長雨である。11月29日の降雨は平均降雨強度、総降雨量ともに9月12日の降雨を大きく上回っている。

4. 雨水と汚濁物質の流出特性

(1) 懸濁態の動態

a) 流出物質濃度の経時変化

2003年9月12日の降雨で観測されたハイトグラフ、ハイドログラフ、ポリユートグラフを図-2に示す。降雨に対してやや遅れながら、SS、COD、T-Nの濃度が変動している。降雨ピークに対応した濃度ピークがT-Pにも見られるが、BODの降雨に対する応答は必ずしも明瞭ではない。SSとCODに関しては、降雨開始直後にファーストフラッシュによる高い濃度が検出されている。

b) 流出負荷量の経時変化

図-2 に対応する汚濁負荷量を図-3 に示す。

いずれの水質項目についても負荷量と流量が類似の動態を示している。前述のように、本流域の大半は不透透域でかつ急勾配であるため、降雨流出にともない汚濁物質は下水管渠や排水路など雨水排除施設にほとんど貯留されることなく流下されている。

(2) 先行晴天日数と初期堆積負荷量の関係

水質濃度時系列を時間積分して汚濁負荷累積量が算定された。物質が流域表面に一樣に堆積すると仮定して、物質負荷累積量から初期堆積物質質量 P_0 (kg)を推定した。三降雨のみではあるが、先行晴天日数 x_d (day)と P_0 との関係を図-4に示す。SS、CODについては先行晴天日数が長いほど初期堆積負荷量が増加していることが確認されるが、BOD、T-N、T-Pに関してはこのような傾向は明確には現れてはいない。和田ら⁹⁾や城戸ら¹⁰⁾によると、粒子態物質は先行晴天日数が長いほど初期堆積負荷量は増

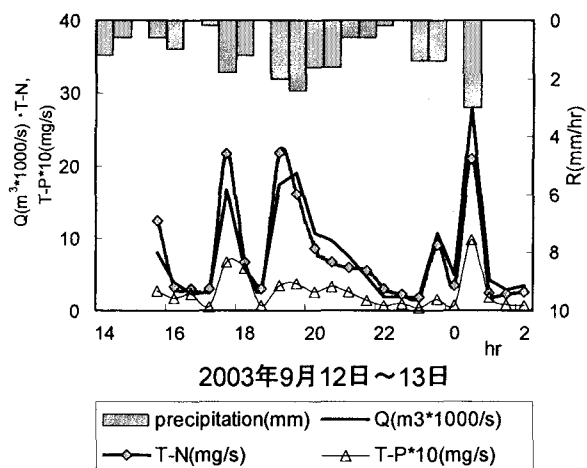
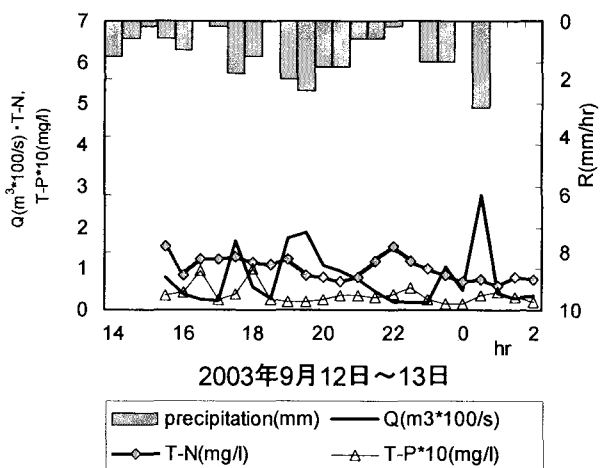
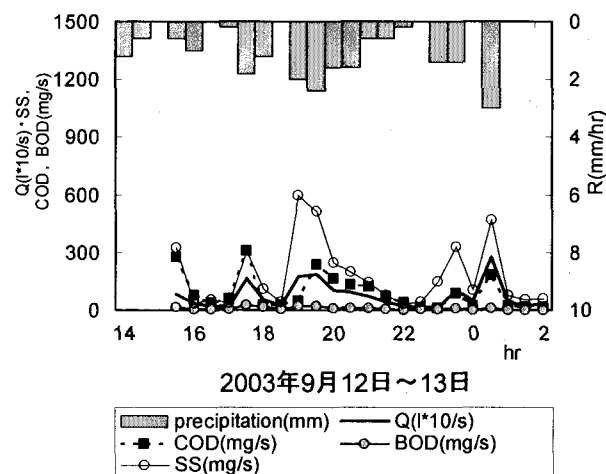
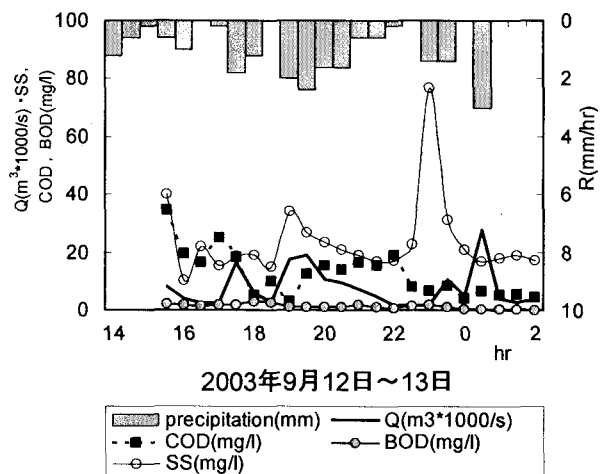


図-2 各物質濃度の時系列

図-3 各物質負荷量の時系列

加するのに対し、溶解性物質が多いBOD、T-N、T-Pに関しては必ずしもそのような傾向が明確には現れないことが報告されており、図-4にも同様の傾向が認められる。

5. SWMMによる流出汚濁負荷の解析

(1) 対象流域のモデル化¹⁾

対象流域を21個の集水域に分割し、集水域毎に1つの雨水流入点（ノード）とこれを結ぶ管渠（リンク）を設定する。管渠長や雨水流入点の地盤高などを与え、面積や勾配などの流域パラメータを設定する。

(2) 実測降雨におけるモデルパラメータの調整

既往の汚濁負荷解析^{2)~8)}を参照しながら、流出量・流出汚濁負荷に関し観測値と解析値との適合を得るためにパラメータを同定した。なお、汚濁負荷解析には以下のモデル式が用いられている。

1) 堆積モデル

$$P_0 = S_c \cdot A \cdot t_d^{S_p} \quad (1)$$

ここで、 P_0 ：初期堆積負荷量(kg)、 S_c ：堆積係数(kg/ha/day^{S_p})、 A ：サブキャッチメントの面積(ha)、 t_d ：先

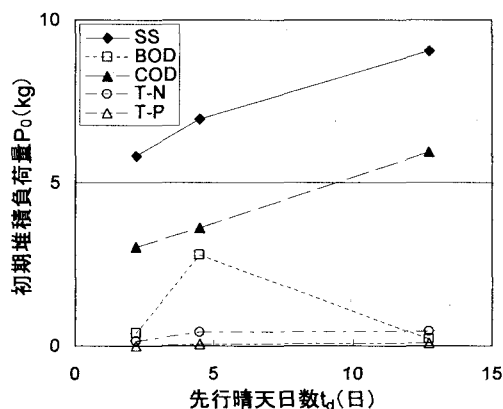


図-4 先行晴天日数と初期堆積負荷量の関係

行晴天日数(day)、 S_p ：堆積指数(無次元)である。

2) 汚濁負荷流出モデル

$$C_w = P_0 (1 - e^{-kt}) \quad (2)$$

$$k = C \cdot r^P \quad (3)$$

ここで、 C_w ：累積流出負荷量(kg)、 t ：経過時間(hr)、 C ：係数(mm/hr)^P、 r ：runoff rate(mm/hr)、 P ：指数(無次元)である。式(2)の P_0 の中に先行晴天日数の他、先行降雨の特性(降雨量、降雨強度)等が反映されている。よって、式(3)により流域に堆積した汚濁物質が降雨時にフラッシュアウトされる現象が概ね再現される。

表-2 雨水流出モデルのパラメータ

入力データ		同定値
N 等価粗度係数	浸透域($m^{-1/3}s$)	0.2
	不浸透域($m^{-1/3}s$)	0.015
d_p 凹地貯留	浸透域(mm)	3.2
	不浸透域(mm)	1.0
f_0 初期浸透能		20.0
f_∞ 終期浸透能		2.5

表-3 流出汚濁負荷モデルのパラメータ

使用モデル	入力データ	同定値						
		BOD			T-N			
		03/9/12	03/11/29	04/7/10①	03/9/12	03/11/29	04/7/10①	04/7/10②
堆積モデル	S_c 堆積係数(kg/ha/day ^{Sp})	0.052	0.10	0.0026	0.017	0.018	0.0049	0.45
	S_p 堆積指数(無次元)	1	1	1	1	1	1	1
流出モデル	C 係数(mm/hr) ^P	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
	P 指数(無次元)	0.95	0.95	0.95	1.12	1.12	1.12	1.12

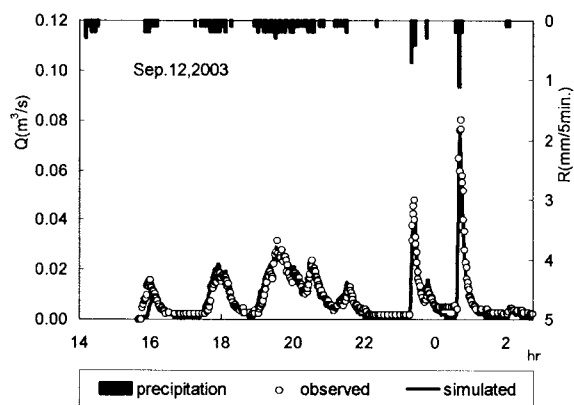


図-5 実測ハイドログラフと流出解析値との比較

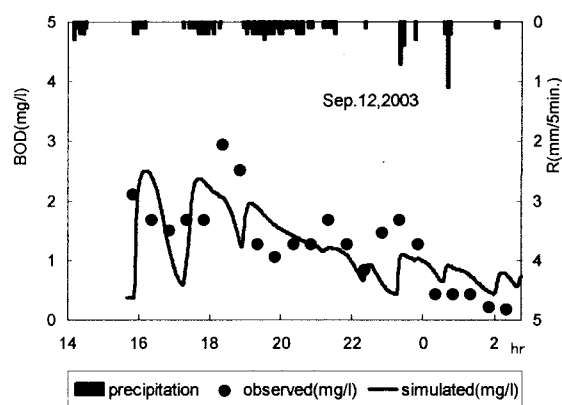


図-6 濃度の実測値と解析値の比較(BOD)

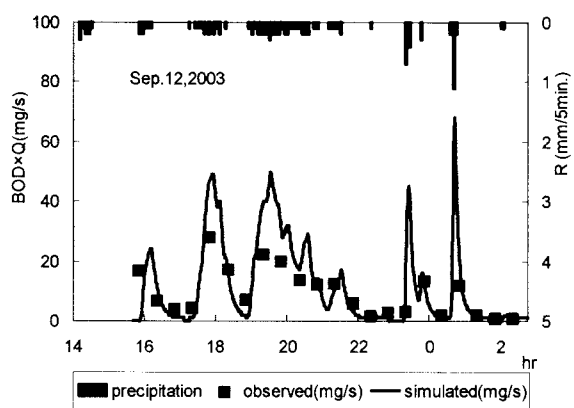


図-7 負荷量の実測値と解析値の比較(BOD)

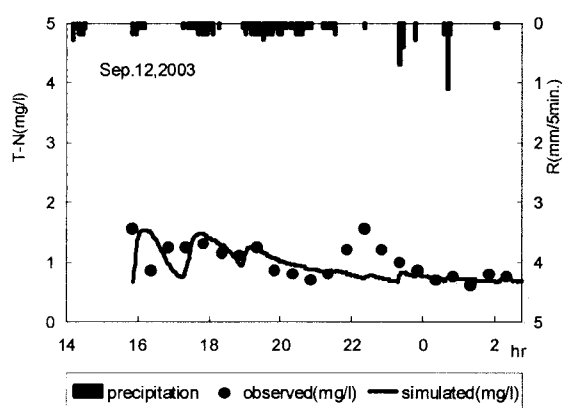


図-8 濃度の実測値と解析値の比較(T-N)

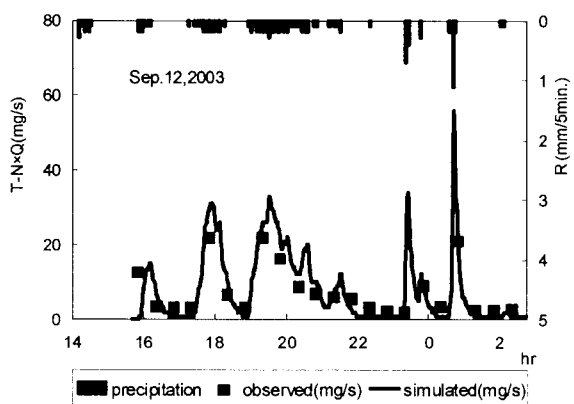


図-9 負荷量の実測値と解析値の比較(T-N)

(3) 流出過程の再現

雨水流出過程の再現例を表-2に示す。なお、雨水流出

のパラメータ同定に際しては、前述の三降雨に加えて、水質観測を開始する以前の1997～2000年の期間における観測データ⁸⁾も加えて検討した。流出解析の結果を観測ハイドログラフとともに図-5に示す。SWMMによる再現精度は十分であると判断される。

(4) 汚濁負荷流出過程の再現

BOD、T-Nの汚濁負荷に関してパラメータ同定を行った。対象降雨は、前述の三降雨（T-Nは2004年7月10日の後半のデータも用いた）である。同定後のモデルパラメータを表-3に示す。これらを用いてSWMMにより再現されたBODとT-Nの濃度、負荷量の時系列を観測結果とともに各々図-6～9に示す。いずれも概ね再現していると考えられる。

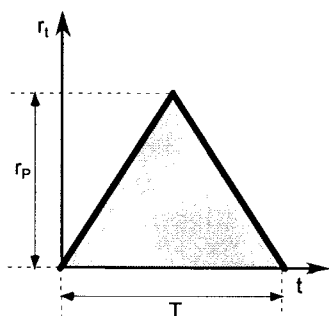


図-10 モデル降雨

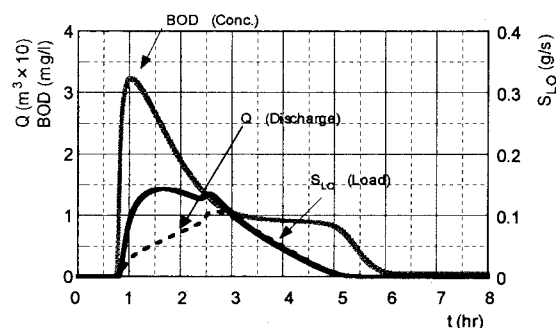


図-11 モデル降雨に対するBOD濃度と負荷量 S_{Lo} の応答例

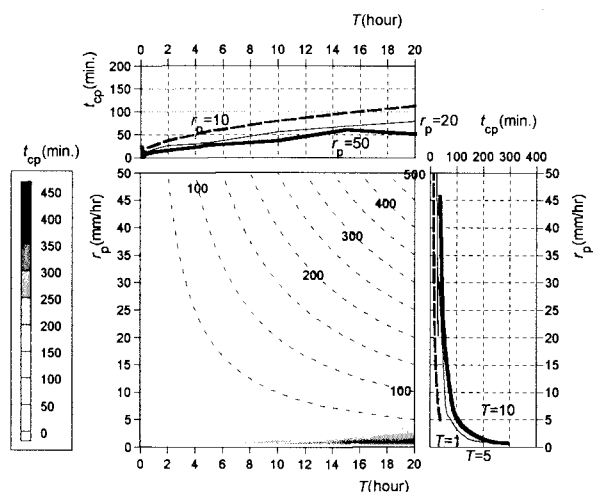


図-12 ピーク濃度の生起時間 t_{cp} と (r_p, T) の関係

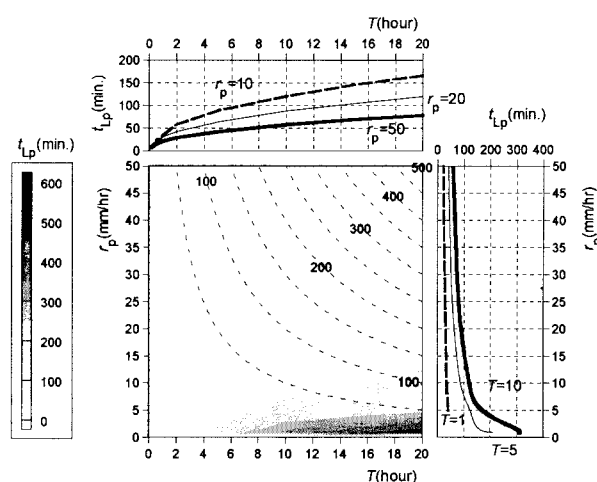


図-13 ピーク負荷量の生起時間 t_{Lp} と (r_p, T) の関係

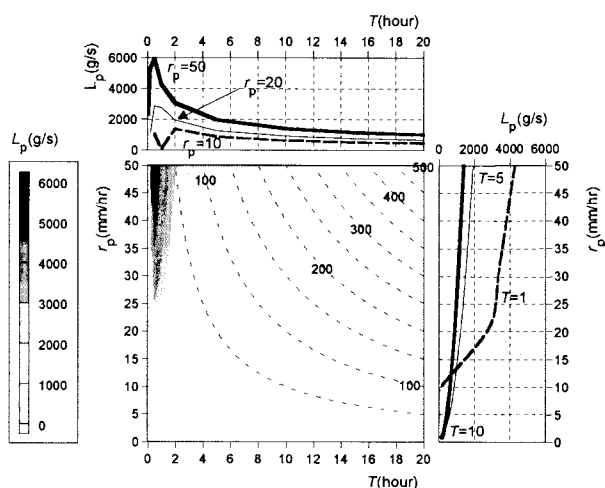


図-14 ピーク負荷量 L_p と (r_p, T) の関係

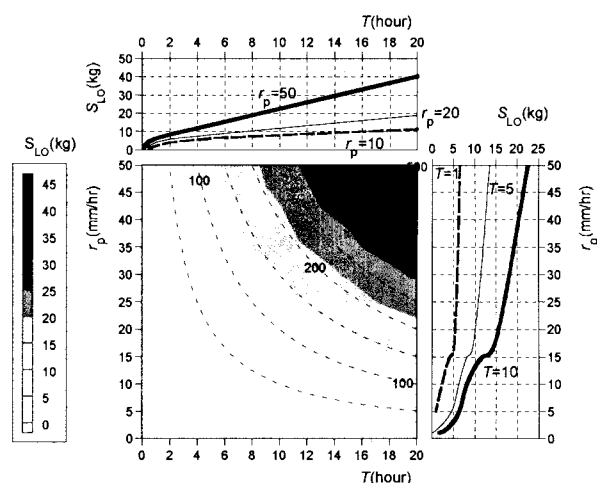


図-15 堆積物質の累積流出量 S_{Lo} と (r_p, T) の関係

6. 降雨継続時間が流出汚濁負荷におよぼす影響

(1) モデル降雨とパラメータの設定

雨天時の汚濁負荷は主に流域の面源に起因していることから、汚濁物質の流出特性は降雨の形態に大きく依存すると考えられる。自浄作用を促進する河川整備など受水域の水環境管理や下水道システムの計画・設計に際しては、降雨の違いによる濃度や負荷量の大きさ・ピーク発生時間など汚濁流出の応答特性の情報が必要である。

本研究ではモデル降雨波形を用いて、降雨継続時間やピーク降雨強度、総降雨量などの降雨特性が流出汚濁負荷におよぼす影響を感度解析によって検証した。簡単のため、図-10に示す三角波形のモデル降雨を想定する。ピーク降雨強度を $r_p=1\sim50(\text{mm/hr})$ 、降雨継続時間を $T=0.1\sim20(\text{hour})$ の範囲でそれぞれ変化させ、流出汚濁負荷解析を行った。雨水流出パラメータ、流出汚濁負荷パラメータは前述の同定値を基準として設定されている。感度解析にはBODを対象とし、降雨水質のBODを 1.5mg/l と設定した。

(2) 汚濁物質濃度のピーク生起時間

モデル降雨に対する BOD 濃度と BOD 負荷量の応答解析例を図-11 に示す。濃度ピークの方が負荷量ピークよりも先行するファーストフラッシュの特徴が確認できる。図-12 に BOD 濃度のピーク生起時間 t_{CP} と (r_p, T) の関係を示す。濃淡はピーク生起時間 $t_{CP}(\text{min.})$ の等値線、縦軸は降雨強度 r_p 、横軸は降雨継続時間 T を表す。また、破線曲線群は (r_p, T) の組み合わせから決まる総降雨量である。降雨強度 r_p が大きいほどピーク生起時間 t_{CP} が短くなり、堆積負荷は降雨初期に一気に流下する。すなわち、 r_p が大きいほどファーストフラッシュが早期に生起する傾向が確認される。

(3) 流出負荷量のピーク生起時間と負荷量ピークの関係

図-13 には BOD 負荷量のピーク生起時間 t_{LP} と (r_p, T) の関係を示す。 t_{LP} に対する r_p の影響は小さいが、 T の影響は大きい。後者については、総降雨量が T の三角形のモデル降雨を対象としたことによる。

図-14 にはピーク負荷量 L_p と (r_p, T) との関係を示す。短い降雨に対しては T の L_p におよぼす影響は大きい、継続時間が長くなるとその影響は小さい。これは降雨初期にほとんどの堆積物質が流出し、それ以降は降水に含まれる一定量の物質しか流出しないことを反映している。

(4) 堆積物質の累積流出量

図-15 には流域内堆積物質の累積流出量 S_{L0} と (r_p, T) との関係を示す。降雨継続時間 T が長いほど、また降雨強度 r_p が大きいほどより多くの堆積物質がフラッシュされ、受水域への負荷を増大させることが確認できる。

以上の感度解析から判明した流出汚濁負荷(BOD)と降雨事象との関係を要約すれば表-4 のようである。

7. むすび

雨水流出による汚濁負荷特性を SWMM によって解析した。初期堆積を考慮したモデルにおいてパラメータを同定し、流出量、栄養塩や有機物の汚濁濃度・負荷量が概ね再現された。

三角形モデル降雨を用いて降雨のピーク強度や継続時間が流出汚濁負荷におよぼす影響を解析した。降雨特性にともなう汚濁物質の流出特性が明らかとなった。今後、さらに降雨特性量の確率分布などを考慮して、受水域の水環境保全や雨水処理施設の計画・設計などに結びつけていく予定である。

表-4 降雨特性と流出汚濁負荷の関係 (BOD)

	降雨強度			降雨継続時間		
	大	↔	小	長	↔	短
ピーク濃度発生時間	早	↔	遅	遅	↔	早
ピーク負荷量発生時間	影響小			遅	↔	早
ピーク負荷量	影響小			影響小		
堆積負荷の流出量	大	↔	小	大	↔	小

謝辞：本研究に御協力いただいた神戸市建設局下水道河川部の関係各位に厚くお礼申し上げます。神戸大学神田徹名誉教授には多くの有益なご助言を頂きました。また、本研究は平成14,15年度科学研究費補助金、萌芽研究（課題番号：14655177、研究代表者：道奥康治）の助成のもとに実施された。

参考文献

- Wayne C. Huber et al : Storm Water Management Model, Version4, ; User's Manual,U.S.EPA/ 600/3-88/001a,1988.
- 和田有朗, 辻義和, 道奥康治他：都市雨水排除系における汚濁負荷流出のモデル化, 土木学会全国大会第59回年次学術講演会講演概要集, pp.487-488, 2004.
- 神田徹, 神吉和夫, ゴッパギョウ・マノヒ・ブーン：SWMM法の汚濁負荷流出への適用性について, 水工学論文集, 第40巻, pp.13-18, 1996.
- 渡辺政広, 永吉光一, 右近雄大：土研モデルと SWMM を組み合わせた下水道流域の汚濁負荷流出モデル, 水工学論文集, 第42巻, pp.199-204, 1998.
- 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, No.559, VII-2, pp.61-71, 1997.
- 城戸由能, 岡太郎, 深尾大介：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, 水工学論文集, 第48巻, pp.1453-1458, 2004.
- 古米弘明, 脇岡靖明, 市川新：分布型モデルを用いた浸水対策用雨水幹線を有する合流式下水道における雨天時流出汚濁負荷解析, 下水道協会誌, Vol.38, No.467, pp.99-112, 2001.
- 神田徹, 神吉和夫, 渡辺政広, 前田康宏：都市小流域への SWMM の適用におけるモデル・パラメータの値について, 水工学論文集, 第45巻, pp.79-84, 2001.

(2004.9.30 受付)