

流域特性を考慮した汚濁物流出プロファイルの予測

FORECAST OF RUNOFF POLLUTANT LOAD CONSIDERING CHARACTERISTICS OF RIVER BASIN

市木敦之*, 山田 淳* 大西敏之**

Atsushi ICHIKI*, Kiyoshi YAMADA*, Toshiyuki OHNISHI**

(全文審査の上、受理。1994年7月25日)

ABSTRACT ; The objectives of this study are to establish a runoff model and show profiles of pollutant runoff by simulating the change of pollutant runoff with the variance of characteristics of river basins (i.e. population, urban area, rate of sewerage, etc.). The model, hereinafter referred to "MACRO MODEL", consists of three main sections. The first one shows pollutant runoff from point sources, taking the sedimentation of pollutants in sewers into consideration. The second one and the third one show pollutant runoff from nonpoint sources in urban area and rural area, taking land use into consideration. As it was proved that MACRO MODEL could simulate pollutant runoff correctly enough to forecast runoff profiles of pollutants, it came to be possible to estimate the effect of characteristics of river basin to pollutant runoff. As a result, some available knowledge, which were concerned with the environmental management of water, were obtained by using MACRO MODEL.

KEYWORDS ; characteristics of river basin, runoff profile, MACRO MODEL, nonpoint source, land use

1. はじめに

公共用水域へ流出する汚濁負荷量は、流域の構造や流況により異なる。また、同じひとつの流域をとってみても、都市化の進展や社会基盤の整備などによる流域特性の変容にともなって、汚濁物の流出特性も徐々に変化している。このような流域において、適切な水域管理計画を策定し、汚濁物の流出負荷量を制御する具体的な施設整備を行うためには、マクロにはあっても流域からの汚濁物流出負荷量を把握できなければならない。しかし、現行の水に関するモニタリングシステムでは、たとえば建設省や各自治体が主要河川にテレメータを設置して水量の常時連続観測を行ってはいるものの、水質について、定期的に公共用水域の水質調査が行われているのは主要水域だけであり、しかも1ヶ月のうち晴天時に1回程度の実施が普通である。加えて、公共用水域への年間汚濁物流出負荷量のかかなりの部分を降雨時流出成分が占めている¹⁾にも関わらず、こうした降雨時流出負荷量のモニタリングが継続的に行われている流域はほとんどない。そのため、現行の水域管理施策は、ほとんどの流域で、必要な汚濁物流出負荷量に関する情報が不十分な状態のまま行われている。こうした汚濁物流出負荷量に関する情報を精密なモニタリングなしに得るには、汚濁物の流出挙動を水域管理上必要な精度でモデル化して表すことが必要である。ここでモデルとして具備すべきことは、

* 立命館大学理工学部

** 立命館大学大学院理工学研究科

Department of Civil and Environmental Systems Engineering, Ritsumeikan Univ.

(1)汚濁物の時々刻々の流出を正確に再現できずとも流域からの大凡の流出負荷量がわかること、(2)可能な限り簡易なモデル構造として特性の異なる流域について汎用性のあるものであること、(3)流域特性について操作性があり、流域構造の変容にともなう汚濁物流出負荷量の変化を予測できること、などである。たとえば中村らは、特定の流域における晴天時負荷量についてではあるが、独自の評価指標を導入して、下水道の整備進捗にともなう汚濁負荷削減プロファイルモデルにより明らかにしている^{2)・3)}。本研究では、流域特性を表すフレーム値を用いて極めてマクロにでも汚濁物流出の全体像を把握することを目的としており、複数の中小河川における晴天時、降雨時の実測データを基に、汚濁物流出負荷量を流域の人口、土地利用、下水道整備率などの流域特性を用いたモデルとして一般化し、流域構造の変容に呼応して変化する汚濁物流出プロファイルの予測を試みた。

2. マクロにみた汚濁物の発生、堆積、流出挙動

流域における汚濁物の挙動は、その発生源と降雨などの水文条件によって規定される。図-1に汚濁物の発生、堆積、流出挙動の概要を示す。汚濁物は、その発生源によりポイントソースとノンポイントソースに分類され、さらに、ポイントソースはその起源により生活系、業務系に、ノンポイントソースはその発生ステージの土地利用により市街地、田、畑、山林に細分される。ポイントソースからの流出成分は、浄化槽や下水道等の排水処理施設に取り込まれて処理されると、放流水として以外は受水域への流出はなくなるが、下水道未整備地域などでは、汚濁物は排水系統内に排出されると、晴天時に一部は流出し、残りは流路内に堆積して二次的な汚濁源として地域的に偏在し^{4)・5)}、降雨を掃流力として受水域へと流出することになる。ノンポイントソースからの流出成分は、その発生ステージにおいて晴天時に堆積し降雨に応じて排水系統を通じて流出したものと、山林等自然域からの晴天時基底流出成分とから成るが、いずれも十分な流出抑制施設を経ることなく受水域へ至る場合がほとんどである。本研究では、排水処理施設によって一連の流出系の外へ排出されることなく受水域まで流出する各発生源からの汚濁物の挙動を、そのプロセスの中で定量的に明らかにする。

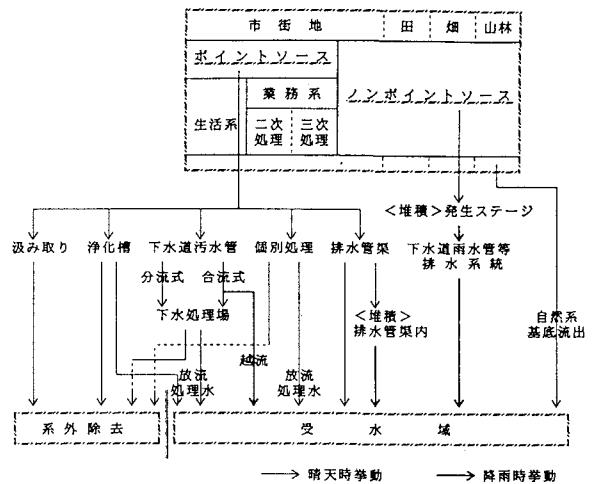


図-1 汚濁物の発生、堆積、流出挙動の概念

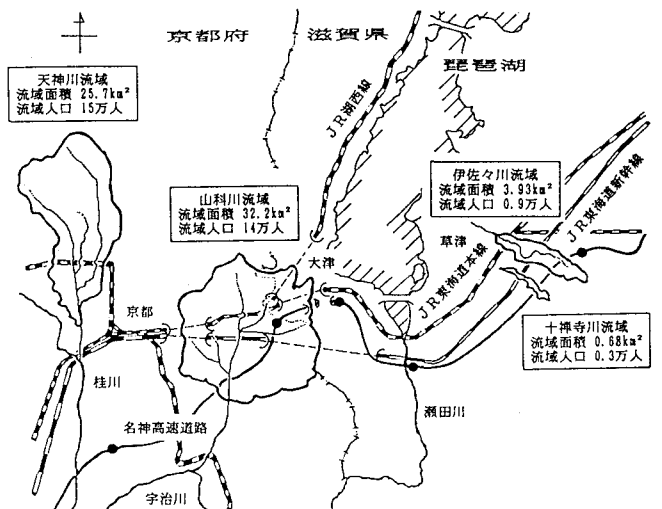


図-2 対象流域

3. 流域と解析データの概要

3.1 流域の概要

検討の対象としたのは、いずれも流域

の下流部で市街化区域を有する都市域中小河川、天神川、山科川、十禅寺川および伊佐々川である。対象とした集水域の概要と特性を図-2、表-1にそれぞれ示す。天神川は京都市西部に、山科川は京都市東部に位置しており、いずれも流域の都市化がほぼ完了している。一方、十禅寺川と伊佐々川はともに琵琶湖へ東岸から流入しており、近年流域の都市化が著しい。天神川では、上流部が山地と住居地、中流部が住居地、下流部が工業地と住居地と比較的明瞭に区分されており、山科川では、上流部が山地、その他の地域では住居地域を主体に工業地域や田畑が混在している。十禅寺川は、上流部が山地、中流部で大規模な住宅団地が3ヶ所あり、伊佐々川は、上流部が山地と田畑、中流部が住宅地となっており、下流で滋賀県草津市の中心部を流れている。下水道の排除方式は、天神川流域は分合流式併用になっており、山科川、伊佐々川両流域は分流式のみである。十禅寺川流域では、下水道が未整備で一部合併浄化槽が設置されている。

表-1 対象流域の概要

河川	集水域 km ²	土地利用 %				流域人口 ×千人		下水道整備率 %	
		市街地	田	畑	山林	1980年	1990年	1980年	1990年
天神川	25.75	52.47	0.59	0.12	46.82	157.8	151.4	38.8	92.3
山科川	32.21	38.21	12.86	0.09	48.84	141.3	141.7	0.0	90.3
十禅寺川	0.68	50.97	6.03	4.63	38.38	-	2.8	-	0.0
伊佐々川	3.93	49.82	27.80	8.42	13.95	-	9.0	-	65.4

下水道整備率：市街地における面積整備率

3.2 解析データの概要

本研究で堆積、流出挙動の解析に用いたデータは、(A)晴天時流出データ、(B)降雨時調査データ、(C)路面堆積物調査データの3種類であり、水質指標としては、SSと閉鎖性水域である湖沼、海域の水質環境基準となっているCODを対象とした。それぞれの概要を以下に示す。

(A) 晴天時流出データ

京都府が府内の公共用水域において測定している流出データ^{(6)・(7)}の中から、天神川と山科川の当該流域部分をもって解析データとした。測定頻度は、流量およびSS、CODについては概ね毎月1回であり、いずれも原則として晴天時に行われている。表-2に晴天時流出データの概要を各年の75%非超過確率値(大きいものから25%値)として示す。SSで人為的攪乱と見られるばらつきがあるものの、流量の減少や水質の改善傾向が認められる。これは、表-1に示したように両流域で1980年代に下水道整備が急ピッチに進んだためであり、流量減少と水質改善の相乗効果により流出負荷量はいずれの流域においてもドラスチックに削減されている。

(B) 降雨時調査データ

各河川で1980年から1993年に筆者らが実施した降雨時の連続採水試料の分析結果に降雨データを加えたものを解析データとした。調査は、図-2に示した採水地点に転倒マス型自記雨量計とストレーンゲージをセンサーとする自記水位計ならびに自動採水装置(ISC0-2700 使用)を設置し、連続的に記録、採水を行うとともに、降雨時には流速を浮子で観測した。そして、降雨開始後流量に降雨時流出の影響が現れ始めた時点から降雨終了後平時の流量に戻るまでの間の直接流出量を、降雨時流出量とした。降雨量は、10分間隔の降雨強度として整理し、流量は、別途行った採水地点の横断面測量と浮子流速による実測流量Qを、当該水位Hの2次式として近似したH-Q式を降雨毎に作成し、これに10分間隔で観測した水位を代入することにより算定した。採水間隔は、流出前半の流量、水質急変時では

表-2 晴天時流出データの概要

河川	年度	75% 流量 (m ³ /s)	75%水質 (mg/l)	
			SS	COD
天 神 川	1980	1.94	48	48
	1981	1.69	65	61
	1982	1.23	41	47
	1983	1.01	83	45
	1984	0.95	81	31
	1985	0.85	74	23
	1986	0.71	120	22
	1987	0.69	200	25
	1988	0.71	13	19
	1989	0.80	8	15
	1990	0.54	7	10
	1991	0.44	4	7
1992	0.54	5	7	
山 科 川	1980	1.56	80	16
	1981	1.33	16	16
	1982	1.37	15	15
	1983	1.07	13	13
	1984	0.88	16	23
	1985	0.89	12	14
	1986	1.13	14	17
	1987	0.94	13	13
	1988	1.19	7	11
	1989	1.19	6	11
	1990	1.10	4	7
	1991	0.99	5	5
1992	0.98	3	4	

10分とし、流出後半の流量遅延期では水位の下降に合わせて適宜10分～1時間とした。採水した試料は、直ちに実験室へ持ち帰り、水質を分析した。降雨時流出調査結果の概要を表-3に示す。調査した降雨は、天神川で14降雨（降雨番号T-1～T-14）、山科川で22降雨（降雨番号Y-1～Y-7, Yc1-1～Yc1-4, Yc2-1～Yc2-5, Yc3-1～Yc3-6）、十禅寺川で8降雨（降雨番号Jc1-1～Jc1-4, Jc2-1～Jc2-4）、伊佐々川で12降雨（降雨番号Ic1-1～Ic1-8, Ic2-1～Ic2-4）であった。

(C) 路面堆積物調査データ

路面堆積物調査は、1991年から1993年の4期間にわたって、京都市内の第1種住居専用地域において行った。路面堆積物は、道路（幅員4.5～6m）の縁石間の全幅員から家庭用掃除機を用いて採取し、ここから、2mmフルイ通過分の堆積物量（単位面積あたりの乾燥重量）を求めるとともに、有機物（強熱減量）の含有量を求めた。路面堆積物調査結果の概要を表-4に示す。なお、既存の堆積物調査データ⁸⁾では、有機物堆積量とCOD(P)（懸濁態COD）堆積量の値がほぼ等しいことから、以降の解析では、（有機物堆積量）=（COD(P)堆積量）として計算する。

4. 汚濁物発生、堆積、流出挙動のマクロモデル

4.1 マクロモデルの構成

2. に示したように、汚濁物の挙動が流出源や晴雨により大きく異なることを考慮して、本研究では以下の構成で発生、堆積、流出挙動のモデル化を行った（以下本モデルをマクロモデルと称する）。マクロモデルの構成を図-3に示す。

(A) ポイント負荷の発生、堆積、流出挙動

(1) ポイント負荷の晴天時発生、堆積、流出挙動

ポイントソースにおける発生負荷量（ L_{p01} , L_{p02} ）は、生活系、業務系に分けて原単位と人口、産業出荷額を用いて算定し、ポイント負荷の排除

表-3 降雨時流出調査結果の概要

降雨番号	調査期日	先行晴天日数(day) #	降雨量(mm)	降雨継続時間(hrs)	降雨影響時間(hrs)	平均流量(m ³ /s)	平均水質(mg/l)	
							SS	COD
T-1	80/7/8	0	12.0	4.0	6.0	4.36	403.9	51.42
T-2	80/7/23	3	12.5	4.0	4.0	6.57	328.6	59.41
T-3	80/7/30	5	30.0	9.0	8.7	12.84	321.5	84.22
T-4	86/8/10	10	3.0	2.0	6.0	1.87	221.0	51.13
T-5	82/5/14	7	11.0	3.7	3.3	2.83	357.5	65.32
T-6	82/10/19	25	7.5	5.0	6.2	2.13	258.5	44.88
T-7	85/9/3	22	8.0	0.7	3.3	5.01	879.8	145.84
T-8	86/6/6	8	12.0	9.0	12.7	1.42	12.9	14.96
T-9	86/6/17	0	23.0	2.8	3.0	10.95	480.5	43.10
T-10	86/9/10	22	4.5	0.5	2.7	3.21	47.1	25.80
T-11	87/6/3	10	18.5	1.3	7.4	3.60	511.9	55.91
T-12	87/10/17	2	1.0	0.3	4.5	0.86	45.7	13.64
T-13	89/3/31	5	4.5	1.8	3.7	1.80	41.8	—
T-14	91/7/20	5	22.0	8.5	9.8	3.30	188.4	12.41
Y-1	89/8/30	2	31.5	11.0	22.8	8.24	115.0	20.91
Y-2	89/9/28	5	16.5	4.5	5.8	7.35	51.5	13.42
Y-3	89/11/9	23	9.0	1.5	23.8	1.69	203.1	37.76
Y-4	90/5/31	12	5.0	45.6	46.3	1.43	6.9	7.74
Y-5	90/7/7	3	7.0	2.0	5.0	4.90	89.5	13.67
Y-6	90/9/3	38	14.0	0.7	5.0	7.12	745.7	73.34
Yc1-1	91/6/19	2	12.0	22.3	31.0	2.55	16.8	6.46
Yc1-2	91/6/22	1	8.0	5.3	11.0	3.19	17.0	6.49
Yc1-3	91/6/23	2	2.0	1.2	5.0	2.36	4.6	4.59
Yc1-4	91/6/23	2	12.5	39.5	43.5	2.82	5.1	5.61
Y-7	91/9/8	41	11.0	2.2	6.7	4.78	522.7	52.84
Yc2-1	92/9/14	20	4.5	19.0	25.0	1.85	5.0	4.42
Yc2-2	92/9/25	31	22.0	5.8	10.2	4.04	162.5	20.08
Yc2-3	92/9/29	3	10.0	1.8	7.0	3.42	231.9	22.86
Yc2-4	92/9/29	3	33.5	9.5	18.0	5.24	178.1	16.13
Yc2-5	92/10/1	1	12.5	5.0	38.5	1.87	28.4	7.58
Yc3-1	93/9/18	3	3.0	5.3	30.0	2.10	17.7	5.64
Yc3-2	93/9/22	7	17.5	10.0	22.5	3.01	28.1	6.90
Yc3-3	93/9/23	0	4.0	3.8	24.5	2.07	6.6	4.85
Yc3-4	93/9/30	7	61.5	15.2	43.0	5.99	81.8	9.59
Yc3-5	93/10/3	2	7.0	8.3	17.0	2.22	3.4	3.62
Yc3-6	93/10/7	6	44.5	24.5	60.0	3.33	52.1	6.01
Jc1-1	91/11/8	11	7.5	4.8	11.5	0.85	12.2	9.02
Jc1-2	91/11/23	14	2.0	4.8	13.0	0.87	49.5	11.51
Jc1-3	91/11/27	30	1.0	1.5	5.0	0.89	25.5	8.91
Jc1-4	91/11/27	30	68.0	28.0	31.0	0.23	129.0	14.40
Jc2-1	92/6/7	8	50.0	13.3	21.0	0.26	66.8	10.73
Jc2-2	92/6/15	7	5.5	3.7	10.0	0.83	11.5	6.96
Jc2-3	92/6/18	10	6.0	1.0	15.5	0.86	12.9	9.55
Jc2-4	92/6/23	15	28.5	19.8	31.0	0.29	232.5	24.40
Ic1-1	92/10/24	9	7.5	6.0	10.0	0.51	11.4	4.56
Ic1-2	92/10/30	15	3.0	1.0	4.0	0.43	28.9	7.38
Ic1-3	92/11/1	16	2.0	6.0	4.5	0.44	14.8	5.58
Ic1-4	92/11/3	18	0.5	0.2	4.0	0.26	1.3	3.30
Ic1-5	92/11/6	22	7.0	11.1	16.5	0.37	18.3	5.72
Ic1-6	92/11/9	25	9.0	7.0	17.0	0.44	29.8	4.98
Ic1-7	92/11/10	26	0.5	1.0	4.0	0.41	7.9	3.69
Ic1-8	92/11/20	9	18.0	9.6	24.0	0.74	141.0	11.72
Ic2-1	93/6/13	4	22.5	15.0	38.0	0.91	150.2	12.73
Ic2-2	93/6/16	2	3.5	0.7	5.5	0.56	111.3	10.89
Ic2-3	93/6/18	4	63.0	33.7	62.5	1.75	294.9	15.90
Ic2-4	93/6/22	2	75.0	20.7	31.0	2.16	180.4	10.35

† 10mm/day以上の降雨日からの日数

表-4 路面堆積物調査結果の概要

調査期間	調査期間総降水量(mm)	平均採泥間隔(日)	平均堆積物量(g/m ²)	平均有機物率(mg/kg)
91/7/29～91/9/2	39.0	18	2.68	74000
91/11/22～91/12/6	70.5	10	3.59	41000
92/11/16～92/12/19	94.5	14	2.83	40600
93/7/22～93/9/2	394.5	10	1.43	69900

率（発生したポイント負荷が下水道や浄化槽等によって処理される率：x）によって排水系統内に放出されるものと系外へ排出されるものに振り分けた。

$$L_{pv} = (L_{p01} + L_{p02}) \cdot x / 100 \quad \text{----- (1)}$$

また、排水系統内に放出されたポイント負荷は、晴天時に一部が負荷の堆積率(y)により堆積(dSp/dt)し、残り(Lps)は山林等からの基底流出分(Lns)とともに公共用水域へと流出するものとした。

$$\frac{dSp}{dt} = (L_{p01} + L_{p02}) \cdot (1 - x/100) \cdot y/100 - L_{pr} \quad \text{----- (2)}$$

$$L_{ps} = (L_{p01} + L_{p02}) \cdot (1 - x/100) \cdot (1 - y/100) \quad \text{----- (3)}$$

(2) ポイント由来堆積負荷の降雨時流出挙動

降雨時流出負荷量は、有効降雨量(Qr)のべき乗に比例するものとし、降雨時のポイント由来負荷流出量(Lpr)を(4)式で表した。

$$L_{pr} = k_p \cdot S_p^a \cdot Q_r^b \quad \text{----- (4)}$$

(B) 市街地ノンポイント負荷の堆積、流出挙動

ノンポイントソースは土地利用により市街地、田、畑、山林に区分し、市街地については、関連文献⁹⁾を参考にして、晴天時堆積、降雨時流出挙動をそれぞれ(5)、(6)式で表すものとした。ここで、パラメータSnu、kn3、およびkn3'は、場所によって値が異なる¹⁰⁾ため、ここでは路面堆積物の実態調査結果を基に、各パラメータを用途地域別に設定した。

$$\frac{dSn}{dt} = kn_3' \cdot S_{nu} \cdot \exp(-kn_3 \cdot T) \quad \text{----- (5)}$$

$$L_{nr3} = S_n \cdot \{1 - \exp(-kn_3 \cdot R)\} \quad \text{----- (6)}$$

(C) 非市街地ノンポイント負荷の降雨時流出挙動

非市街地からの降雨時流出負荷量は、有効降雨量(Qr)のべき乗のみに比例するものとし、土地利用によりそれぞれ(7)～(9)式で表した。

$$L_{nr4} = kn_4 \cdot Q_r^b \quad \text{----- (7)}$$

$$L_{nr5} = kn_5 \cdot Q_r^b \quad \text{----- (8)}$$

$$L_{nr6} = kn_6 \cdot Q_r^b \quad \text{----- (9)}$$

- ここに、L：負荷量 (kg/day)
- S：堆積量 (kg)
- Qr：有効日降雨量 (m³/km²·day)
- T：堆積ゼロからの経過日数 (日)
- R：日降雨量 (mm/day)
- x：ポイント負荷の排除率 (%)
- y：ポイント負荷の堆積率 (%)

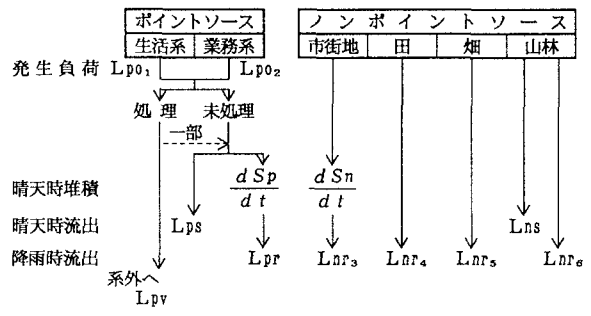
Snu：極限堆積量 (kg)

kn3'：堆積速度係数 (1/day)

kp, kn4~kn6：流出速度係数 (kp ; day/mm, kn4~kn6 ; 無名数)

α, β：係数

a, b：指数



- L：負荷量 (kg/day) S：堆積量 (kg)
- 添字 p：ポイントソース (1.生活系, 2.業務系)
- n：ノンポイントソース (3.市街地, 4.田, 5.畑, 6.山林)
- o：発生 v：系外除去 s：晴天時 r：降雨時

図-3 マクロモデルの構成

添字 p: ポイントソース (1. 生活系, 2. 業務系)

n: ノンポイントソース (3. 市街地, 4. 田, 5. 畑, 6. 山林)

o: 発生 v: 系外除去 s: 晴天時 r: 降雨時

ただし、指数bは、流域における汚濁物の降雨に対する流出の応答性を示すと考えられるため、流域内での排水系統の整備状況の指標でもあるポイント負荷の排除率(x)を用いて(10)式で表すものとした。

$$b = \alpha \cdot x + \beta \quad \text{----- (10)}$$

4.2 モデルパラメータの検討

(A) ポイント負荷の発生、堆積、流出挙動

(1) ポイント負荷の晴天時発生、堆積、流出挙動

ポイントソースからの排出負荷は、晴天時にはポイント負荷の堆積率(y)によって、流出する成分(Lps)と堆積する成分($\frac{dSp}{dt}$)に分けられる。ここでは、4.1で述べたようにポイントソースにおける発生負荷

量(Lp01, Lp02)の算定は、原単位を用いて行った。算定に用いた原単位を表-5に示す。本来、原単位は流域により値が異なるのが普通であるが、本研究では、流出挙動のマクロなプロファイルを示すという目的から、一般に用いられる原単位のオーダーから逸脱しない程度で適当な値を用い、各流域について厳密には定めていない。天神川, 山科川について、表-5の汚濁物発生原単位を用いて推定したポイントソースからの排出負荷量(Lp01+Lp02)・(1-x/100)と晴天時の河川負荷量(「京都府公共用水域水質測定結果」^{6),7)}, 1981~1993年)の関係を図-4に示す。両者の関係は、いずれの水質においても線型であり、比排出負荷量に換算すると(11)式により表される。

表-5 ポイントソース原単位

項目	原 単 位		
	生活系 (g/人・day)	二次産業 (g/百万円・day)	三次産業 (g/人・day)
SS	35	1.0	80
COD	38.0	1.1	90.0

人: 流域人口(生活系)
従業員数(三次産業)

$$L_{baso}/A = a_3 \cdot (L_{p01} + L_{p02}) \cdot (1 - x/100) \cdot (1 - y/100) / A_3 + a_6 \cdot L_{ns} / A_6 \quad \text{----- (11)}$$

ここに、Lbaso: 河川の晴天時流出負荷量の実測値(kg/day),

A, A3, A6: 流域面積, 市街地面積, 山林面積(km²),

a3, a6: 市街地, 山林の流域面積に対する面積比率

ただし、この期間(図-4)におけるx:

〔天神川 15.3~100.0%,
山科川 0.0~72.5%〕

ここで、yと山林からの基底流出比負荷量Lns/A6を流域に依らず一定と仮定すると、回帰分析により表-6を得る。下水道等に取り込まれず雑排水として排出された汚濁物が、懸濁成分を中心にならりの割合で排水系統内に堆積し、ポイントソース由来の2次的な汚濁源となって降雨時に流出していることがうかがえる。

(2) ポイント由来堆積負荷の降雨時流出挙動

海老瀬は、河川における詳細な流出調査から、晴天時分を差し引いた一降雨の直接流出分による

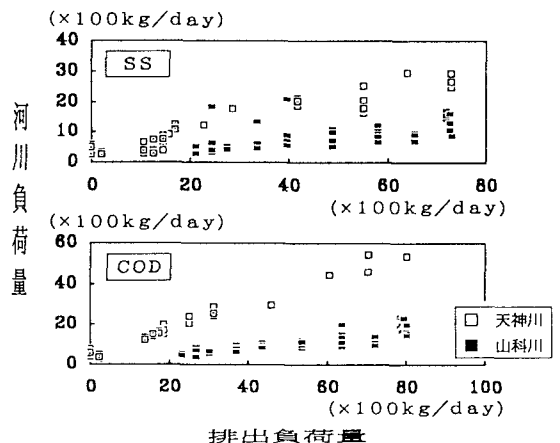


図-4 排出負荷量と晴天時河川負荷量の関係

積算流出負荷量と積算流出流量が両対数紙上で直線回帰できるとして、一降雨積算流出負荷量を(12)式により定式化した¹¹⁾。

$$\Sigma L_r/A = k \cdot (\Sigma Q_r)^b \quad \text{----- (12)}$$

ここに、 $\Sigma L_r/A$ ：晴天時分を差し引いた積算比負荷量 (kg/km²)

ΣQ_r ：晴天時分を差し引いた積算比流量 (m³/km²)

k ：係数 b ：指数

筆者らの調査降雨について流域別に(12)式により回帰係数 k および b を求めたところ、特に指数 b に流域の下水道等排水系統の整備状況の影響が強く現れていることが分かった¹²⁾。本論文では、指数 b が各流域における汚濁物の降雨に対する流出応答性を示すものとして、ここでは b を、降雨時の実測結果から流域毎に回帰分析を用いて求めた。そしてさらに、これらの指数 b を流域内での排水系統の整備状況の指標でもあるポイント負荷の排除率(x)を用いて(10)式で回帰して係数 α 、 β を定めた。表-7に(10)式による回帰分析結果を示す。以下本論文では、指数 b を市街地ノンポイントソース以外からの汚濁物の降雨時流出挙動を表すのに用いている。

ポイント由来堆積負荷の降雨時流出挙動をシミュレートするため、流域の社会指標を1990年の値に固定した各流域について、(2)式、(4)式および表-6、表-7の値を用い、ここでは $a=1$ として、京都地方気象台で観測された降水量の時系列データを用いて、流域毎に計算した過去10年間の L_{pr} の積分值が、その間の流域毎のポイント由来堆積負荷の積算量に一致するように何回かの試行を行い、 k_p の値を定めた。パラメータ k_p の値は、SSで 7.1×10^{-6} 、CODで 8.2×10^{-5} となり、両者の比較から、流域におけるCODのポイント由来負荷堆積ポテンシャルが、かなり大きいことがうかがえる。

表-6 (11)式による回帰分析結果

項目	ポイント負荷率 堆積率 y	基底比流量 出負荷量 L _{ns} /A ₀ kg/km ² .day	R ²
SS	71.27	1.425	0.551
COD	66.70	2.089	0.348

表-7 (10)式による回帰分析結果

項目	係数		R ²
	α	β	
SS	0.006	1.155	0.278
COD	0.003	0.922	0.198

(B) 市街地ノンポイント負荷の堆積，流出挙動¹³⁾

(5)式のパラメータ S_{nu} は、まず住居専用地域路面における堆積物量調査データの最大値に近い値を設定した。また、 kn_3' は初期堆積物量をゼロにして一定経過の後、採取したデータ(図-5)を用いて回帰分析により決定した。(6)式のパラメータ kn_3 は、5日間以上晴天日が続いた堆積物量の平均値から、降雨直後の堆積物量を差し引いた推定流出負荷量と日降水量の関係(図-6)を用いた回帰分析により決定した。用途地域の住商系(住宅、商業)と工業系のパラメータについては、住専系における結果を基に、全体の負荷量を実測値によって割増した。この方法で各指標のパラメータを決定した結果を表-8に示す。このパラメータを用いた(5)、(6)式に調査期間の日降雨量時系列を入力して、日単位のシミュレーションを行い実測値との比較を行った結果を図-7に示す。ここでは、損失降雨量を1.5(mm/日)とし、それ以下を晴天日とみなしている。季節を問わず同じパラメータを使用したにも関わらず、良好な再現性が見て取れる。

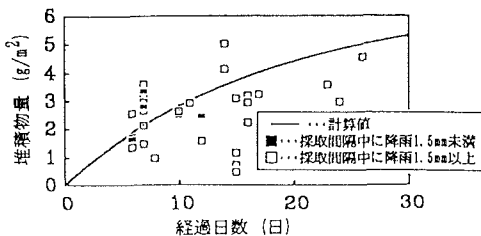


図-5 住居専用地域路面堆積物量

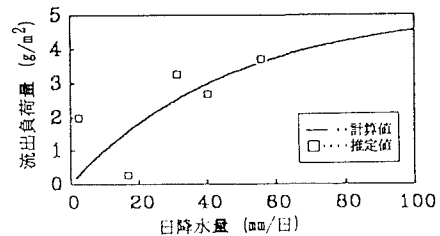


図-6 住居専用地域路面からの降雨時流出量

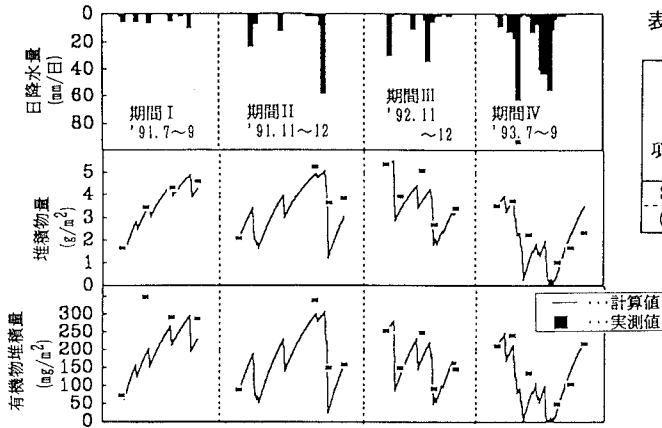


図-7 路面堆積物挙動のシミュレーション結果 (住専系)

(C) 非市街地ノンポイント負荷の降雨時流出挙動

田, 畑および山林の非市街地については、汚濁物堆積量やその流出挙動を個別に測定することが困難であるため、各土地利用からの流出負荷量を(7)~(9)式で定め、係数 $kn_4 \sim kn_6$ を、降雨時の実測負荷量(Lr)と L_{pr} , L_{n_3} , Qr^b および土地利用別面積 A_i を用いた重回帰式(13)により求めた。

$$Lr = L_{pr} + L_{nr_3} + \sum_{i=4}^6 (k_i / A_i) \cdot A_i \cdot Qr^b \quad (13)$$

以上の検討により設定したマクロモデルのパラメータ一覧を表-9に示す。ただし、パラメータは、すべて単位面積当たりで一定と仮定した。

4.3 マクロモデルの検証

表-9のパラメータを用いて算定した各河川比負荷量の推定値と実測値との関係を、晴雨別にそれぞれ図-8, 図-9に示す。晴天時負荷量は、両指標とも天神川で過小に、山科川で過大に見積もられており、流域により差が出たため再現性は高くない。特にSSでは、3.2で述べたように実測データにばらつきがあるため、推定値と実測値の差が非常に大きいものがある。また、ここでは全体をマクロに把握するという観点から、ポイント負荷の排除率(x)を下水道幹線の敷設状況から推定して用いたが、晴天時負荷

表-8 都市域ノンポイント負荷の堆積、流出挙動に関するパラメータ一覧

項目	晴天時堆積			降雨時流出	
	Snu / A_s kg/km ²			kn_3' l/day	kn_3 day/mm
	住専系	住商系	工業系		
SS	8500	25000	45000	0.056	0.022
COD	450	1500	2500	0.051	0.039

表-9 マクロモデルのパラメータ

項目	SS		COD	
	y	%	71.27	66.70
晴天時堆積	Snu / A_s	住専系	6.5	0.45
		住商系	25	1.50
		工業系	45	2.50
晴天時流出	kn_3'	l/day	0.056	0.051
	L_{ns} / A_s	kg/km ² ·day	1.42	2.09
降雨時流出	$kp \times 10^{-6}$		7.1	82
	kn_3	day/mm	0.022	0.039
	$k_4 / A_4 \times 10^{-4}$		2.058	235.8
	$k_5 / A_5 \times 10^{-4}$		8.298	174.5
	$k_6 / A_6 \times 10^{-4}$		9.273	56.9
	α		0.006	0.003
	β		1.155	0.922

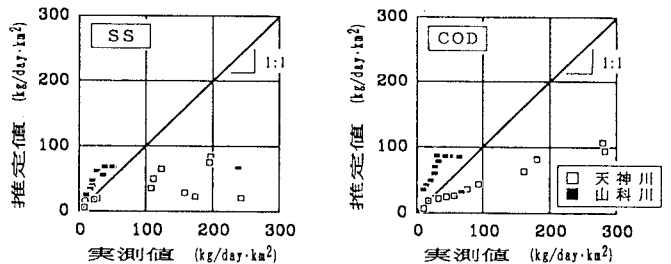


図-8 晴天時比負荷量の実測値と計算値の関係 (左: SS, 右: COD)

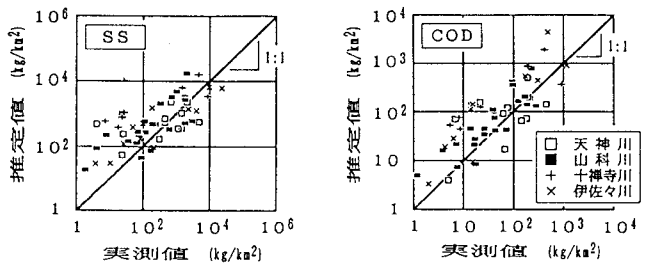


図-9 降雨時比負荷量の実測値と計算値の関係 (左: SS, 右: COD)

量の推定精度向上のためには、各戸への接続状況も正確に把握しておく必要があるだろう。しかし、降雨時負荷量については一定の精度を有しており、年間流出負荷量のかなりの部分をこうした降雨時流出成分が占めることと流出負荷量をマクロに把握するという研究本来の目的から、本モデルは十分な再現精度を有していると考えてよい。1990年の各流域においてマクロモデルを用いた過去10年間の降水量の時系列データによるシミュレーション結果を汚濁物の年間比流出負荷量にしてその流出源比率とともに図-10に示した。流出負荷量、流出源比率とも、流域特性による差が顕著である。

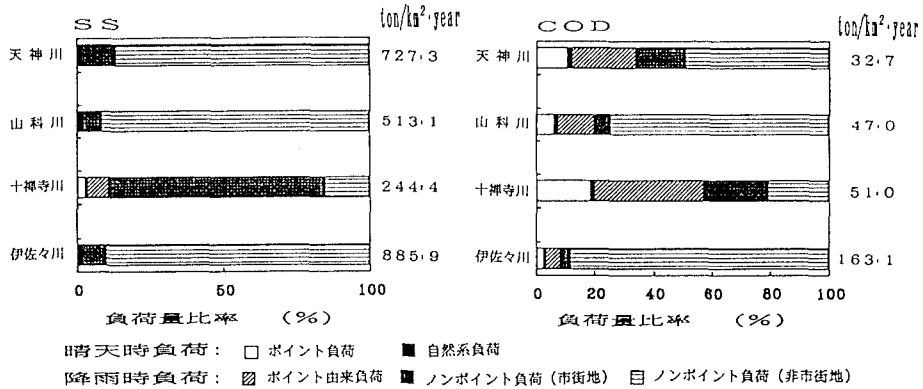


図-10 年間比流出負荷量とその流出源比率 (年平均降水量 1562.3 mm)
(左: SS, 右: COD)

5. 下水道の整備進捗にともなう汚濁物流出特性の変化

マクロモデルを用いて流域の社会指標をシナリオドライバーとしたシミュレーションを行うことにより、流域の社会変化にともなう年間流出負荷量の変化を検討することが可能となる。流域の社会指標としては、流域人口や産業構造、土地利用状況、ポイント負荷の処理方法などの入力が可能であるが、ここでは、下水道整備率をシナリオドライバーとしたシミュレーションを行い、年間流出負荷量に及ぼす下水道整備効果を検討した。シナリオでは、流域フレームを1990年の値で固定し、下水道整備率のみを0%から100%へと変化させ、その他の排水処理は行われぬものとした。天神川、山科川において、さきと同様に過去10年間の降水量の時系列データを用いたシミュレーション結果を年間流出比負荷量にして図-11に示す。一般的な傾向として下水道整備にともなう流出負荷量の削減とノンポイントソースの構成比率の増大が認められる。しかし、下水道整備途上の流域で都市下水路や雨水管渠を含めた排水系統等を介したバイパス効果によるノンポイント負荷の顕在化が生じているため、必ずしも下水道整備率に応じて一様に流出負荷量が減少していくというわけではない。これは、(10)式で表されるように、排水系統の整備前、公共用水域にまで流出しなかった堆積負荷が、その整備後、降雨時に流出しやすくなってきたためであり、特にSSでその傾向が顕著である。したがって、このような流域では、ポイントソース由来負荷の構成比率も大きく、排水系統内の堆積負荷に対する対策が水域管理のうえで重要となる。

6. おわりに

本研究では、汚濁物流出負荷量をマクロに捉えるモデルを構築し、シミュレーションにより下水道整備効果を明らかにした。栄養塩類についても、3.2で示したのと同じレベルのデータを得ているので、同様にモデルパラメータを決定して、検討を進めたいと考えている。本モデルを用いることにより、様々な社会指標が汚濁物流出に及ぼす影響を流出源別に検討することが可能となった。また、流出期を晴天時や降雨時などに分画した詳細な解析も行われるべきであろう。流出モデルのフレームとしては確立できたが、なお改善すべ

き点もあるため、十分な改良を加えて再現精度の向上を行いたいと考えている。

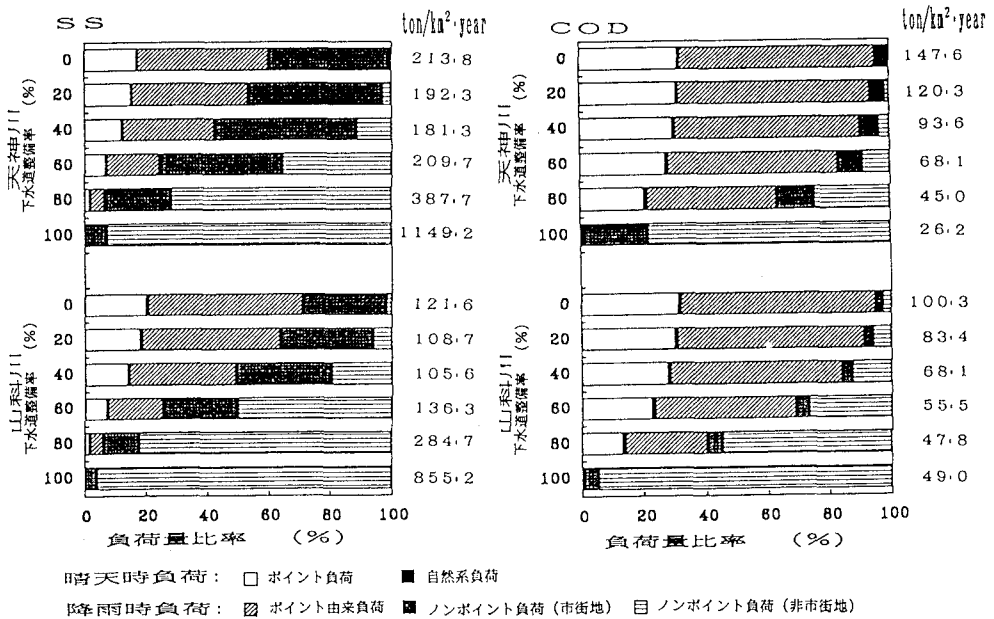


図-1 1 下水道整備の進捗と流出源別流出量の変化 (年平均降水量 1562.3 mm)
(左: SS, 右: COD)

なお、本研究の一部は、平成3～5年度滋賀県琵琶湖研究所委託研究「都市域の非特定汚濁負荷削減に関する研究」として実施されたものである。また、調査を行うにあたり環境計画研究室の大学院生、卒業研究生の協力を得たことを記し謝意を表する。

<参考文献>

- 1) たとえば建設省霞ヶ浦工事事務所 (1977) 霞ヶ浦負荷量解析
- 2) 中村正久, 佐野弘幸 (1990) 効率性と公平性を指標とする下水道建設のシナリオ分析, 環境システム研究, Vol. 18, pp. 136-142
- 3) 中村正久, 浅岡英二, 黒田幸智, 山田淳 (1991) 複合的な汚濁負荷削減分析のための下水道整備の進捗評価, 環境システム研究, Vol. 19, pp. 52-58
- 4) Yamada, K., Nishimoto, Y., Ichiki, A., Yoshitomi, M. and Nishioka, H. (1991) Pollutant Runoff and Environmental Management in Urban Areas, Proc. of 3rd IAWPRC Regional Conference Asian Water-quality '91, Shanghai, Vol. 2, pp. IV-23 - IV-28
- 5) Yamada, K., Umehara, T. and Ichiki, A. (1993) Study on Statistical Characteristics of Nonpoint Pollutants Deposited in an Urban Area, Water Science and Technology, Vol. 28, No. 3-5, pp. 283-290
- 6) 公共用水域水質測定結果 (1981-1989), 京都府
- 7) 公共用水域及び地下水の水質測定結果 (1990-1993), 京都府
- 8) 建設省土木研究所 (1981) 下水管路施設の合理化に関する調査報告書 (V), 土木研究所資料第1705号
- 9) たとえば中村栄一 (1984) 雨水による路面堆積物の除去速度, 土木技術資料, Vol. 26, No. 8, pp. 45-50
- 10) 建設省土木研究所 (1981) 下水管路施設の合理化に関する調査報告書 (IV), 土木研究所資料第1704号
- 11) 海老瀬潜一 (1984) 降雨時流出負荷量の算定モデル, 国立公害研究所研究報告, Vol. 50, pp. 59-88
- 12) Ichiki, A., Yamada, K. and Nakade, Y. (1993) Study on Quantification and Management of Runoff Pollutants from Nonpoint Sources in Urban Area, Proc. of 6th International Conference of Urban Storm Drainage, Vol. I, pp. 537-542
- 13) 山田淳, 梅原龍哉, 中部淳 (1994) 晴天時継続調査による大気由来汚染物と路面堆積物の挙動特性, 第28回日本水環境学会年会講演集, pp. 628-629