

水域環境における市街地ノンポイントソースの定量評価

—栄養塩に関するシミュレーション解析—

ESTIMATION OF RUNOFF POLLUTANT LOAD FROM NONPOINT SOURCE IN URBAN AREAS

市木敦之*

大西敏之**

山田 淳*

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

ABSTRACT ; The objectives of this study are to show profiles of pollutant runoff in urban rivers and into Lake Biwa and estimate runoff pollutant load from nonpoint sources in urban areas by simulations using Macro Model. As a result of the simulations, the characteristics of pollutant runoff from urban nonpoint sources and the unit basics of nonpoint pollutants were cleared. And it was shown that the control of pollutant runoff from nonpoint sources during storm events is significant to protect water quality of receiving water. From these results, some available knowledge concerned with the environmental management of water was obtained.

KEYWORDS ; pollutant runoff, urban nonpoint source, Macro Model, characteristics of river basin, rate of sewerage

1. はじめに

公共用水域における適切な水域管理計画を策定する際には、対象とする流域からの流出負荷量を予め把握しておく必要がある。発生源からの流出汚濁負荷量の把握には、多くの場合、原単位法による推定計算が用いられるが、こうした手法では、流域構造の変容や降雨をはじめとする水文因子によって変化する汚濁物の流出特性を的確に表現できていないといえない。そのため、現行の水域管理施策は、流出汚濁負荷量に関する必要な情報が不十分なまま行われていることが少なくない。特に都市域では、近年の社会活動の活発化に伴って発生する汚濁物に対して、下水道の敷設や雨水滞水池の設置などの施策が推進されている¹⁾ものの、一方では当該流域において、それらの施策がどの程度のオーダーの負荷量に対して行われているのか、あるいは、対象とする負荷量が流域からの総流出負荷量に対してどの程度の比率を占めているのか、などという基本的な事柄が必ずしも明確になっていないのが現状である。市街地ノンポイント負荷については、流出メカニズムがポイント負荷のそれと比較して複雑なことから、和田ら²⁾をはじめとして古くから定量化の試みが行われてきたが、いずれも流出実態の把握が中心であり、計画的なモデル解析には至っていない。筆者らは、水域環境管理のための計画的な議論には、巨視的にはあっても、流出源別の汚濁負荷量が推定できる必要があるとの認識から、流域特性を表すフレーム値を用いて流出負荷量を流出源別にシミュレートするモデル（以下「マクロモデル」とする）を構築し、SSやCODに関するシミュレーションを実施して、本モデルが流域構造の変容に呼応して変化する流出汚濁負荷量について十分な予測精度を有していることを確認してきた³⁾。本研究は、都市域中小河川や琵琶湖集水域にマクロモデルを適用した流出シミュレーションを行う

* 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.

ことにより、水域環境における市街地ノンポイントソースの位置づけを明らかにすることを目的としており、ここでは栄養塩について、流域の下水道整備状況や降雨量に応じて流出特性が異なる市街地ノンポイントソースの定量的な把握を試みた。

2. マクロモデルの概要

汚濁物の流出挙動は流出源や晴雨により大きく異なることを考慮して、ここでは、図-1のようにマクロモデルの構成を定め、既報^{3), 4)}に準じて以下の手順で定式化した。①ポイントソースにおける発生負荷量は原単位より算定し、ポイント負荷の除去率(X)によって排水系統内に放出されるものと系外除去されるものに振り分けた。②排水系統内に放出されたポイント負荷は、晴天時に一部が堆積(dSp/dt)し、残り(Lps)は山林からの基底流出分(Lns)とともに公共用水域へと流出するものとした。③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、路面堆積物の実態調査結果から市街地における挙動を(4)、(6)式で表した。④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、その指数(b)をポイント負荷の除去率(X)により定まるものとして(10)式で表した。⑤降雨時のポイント由来負荷流出量(Lpr)は、(5)式で表すものとし、ここでは $a=1$ として、T-N、T-Pの流出率を既存データ⁵⁾を参考にそれぞれ0.72、0.65と仮定し、何回かの試行計算により、 k_p の値を定めた。⑥ $kn_3 \sim kn_6$ については、降雨時の実測負荷量から Lpr と Lnr_3 を差し引いた値を田、畑、山林からの流出負荷量($Lnr_4 \sim Lnr_6$)と考え、 $Lnr_4 \sim Lnr_6$ の比率が土地利用別原単位の比率に一致するように定めた。以上の検討により、T-N、T-Pについて設定したマクロモデルのパラメーター一覧を表-1に示す。ただし、パラメータは、すべて単位面積あたりで一定と仮定している。1980年から1994年にかけて京都市および滋賀県草津市の都市域中小河川において行った汚濁物流出の実態調査結果³⁾における各河川比負荷量の実測値と、表-1のパラメータを用いて算定した推定値との関係を、晴雨別にそれぞれ図-2、図-3に示す。一部の降雨でT-Pの流出負荷量を過大に見積もる傾向があるものの、流出負荷量を巨視的に把握するという研究本来の目的から、全体としては、晴天時、降雨時とも十分な再現性が得られたと考えられる。

表-1 マクロモデルのパラメータ

項 目			T-N	T-P	
晴 天 時	堆 積	y %	37.4	35.5	
		Snu/A3 ton/km ²	住専系	0.001	0.003
			住商系	0.003	0.001
			工業系	0.064	0.003
			幹線道路	0.019	0.016
			屋 根	0.007	0.001
	kn3' 1/day	0.095	0.121		
	流出	Lns/A6 kg/km ² /day	6.995	0.130	
降 雨 時	流 出	kp ×10 ⁻⁶	13.6	0.603	
		kn3 day/mm	0.048	0.067	
		k4/A4 ×10 ⁻³	18.0	0.467	
		k5/A5 ×10 ⁻³	13.0	0.025	
		k6/A6 ×10 ⁻³	2.168	0.068	
		α ×10 ⁻³	-1.644	2.341	
		β	0.937	0.971	

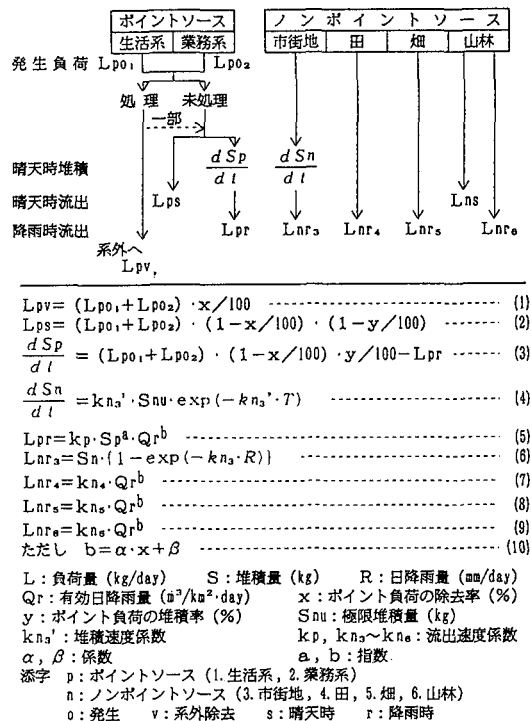


図-1 マクロモデルの構成

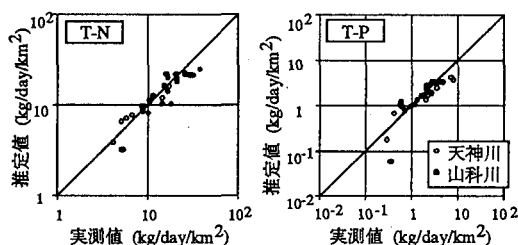


図-2 晴天時比負荷量の実測値と計算値の関係
(左: T-N, 右: T-P)

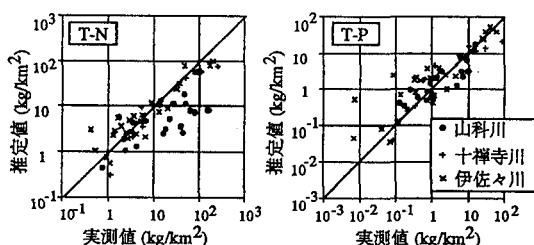


図-3 降雨時比負荷量の実測値と計算値の関係
(左: T-N, 右: T-P)

3. 都市域中小河川を事例とした市街地ノンポイントソースの定量評価

3.1 評価の方法

ここでは、市街地ノンポイントソースが汚濁物流出に及ぼす影響が顕著であると考えられる都市域中小河川を検討の対象とした。対象としたのは、京都市西部に位置する天神川、および京都市東部に位置する山科川であり、いずれも流域の都市化がほぼ完了している。集水域の概要を表-2にそれぞれ示す。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、一方山科川では、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。

両流域における流出源別の汚濁物流出特性を定量的に把握するため、マクロモデルを用いて流域特性や水文因子に関するシミュレーションを行った。入力条件としては、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、市街地ノンポイントソースからの流出負荷量に及ぼす影響が大きいと考えられる、下水道整備率と降水量を対象とした。シミュレーションで設定したシナリオの一覧を表-3に示す。シナリオでは、流域フレームを1990年の値で固定し、下水道整備率を0%から100%へと変化させた。その上で、1980年以降の降水量データから豊水年(1980年: 年降水量 2042.0mm)および渇水年(1994年: 880.5mm)の時系列データを用いた日単位のシミュレーションを行った。本シナリオでは、下水道整備率は市街地ノンポイント負荷の総流出負荷量に占める比率を、また降水量は市街地ノンポイントソースからの流出負荷量を規定していることになる。

表-2 対象流域の概要 (1990年現在)

河 川	集水面積 (km ²)	土地利用 (%)				流域人口 (×千人)
		市街地	田	畑	山林	
天神川	27.75	52.47	0.59	0.12	46.82	151.4
山科川	32.21	38.21	12.86	0.09	48.84	141.7

表-3 シナリオ一覧

シナリオ	下 水 道 整備率(%)	年降水量 (mm)
Case-1	0	2042.0 (1980年)
Case-2	100	2042.0 (1980年)
Case-3	0	880.5 (1994年)
Case-4	100	880.5 (1994年)

3.2 シミュレーションによる年間流出負荷量の算定

各シナリオにおけるシミュレーション結果を、比流出負荷量にして図-4(1)～(4)に示す。両流域の流域特性が似ているため、項目毎にかなり共通する流出特性がみられる。他の流出源に比べて市街地ノンポイントソースからの流出負荷量は、先行晴天日数や日降雨量による差が小さく、比較的小降雨でも一定の流出負荷量があることから、これらはかなり流出しやすい性状であることが推察される。そのため、市街地ノンポイントソースからの年間流出負荷量は、降雨量の大小より、むしろ年間の降雨頻度に依存していることが考えられる。図-4(1)～(4)には、流域からの総流出負荷および市街地からのノンポイント負荷について、任意の月日までの各累積流出負荷量をそれぞれの年間流出負荷量で除した比を併せて示している。ポイントソースや非市街地からの基底流出成分が一定の比率を占めているため、総流出負荷量が一年を通じて変動の少ない流出をしているのに比べて、市街地ノンポイント負荷は降雨時の出水に応じて断続的な流出

を繰り返している。この傾向は、豊水年（Case-1, Case-2）よりも渇水年（Case-3, Case-4）の方が顕著であり、年間流出負荷量のうちかなりの部分がこうした降雨により短時間に集中して流出していることが分かる。

シミュレーション結果から算定した年間比流出負荷量をその流出源比率とともに図-5に示す。いずれの負荷量についても、下水道整備率による差（Case1, Case-3とCase-2, Case-4）に比べて、豊水年（Case-1, Case-2）と渇水年（Case-3, Case-4）の差は小さく、同様の傾向が流出源の構成比率についても認められる。市街地ノンポイント負荷について、流域単位面積あたりおよび市街地単位面積あたりの年間流出負荷量（市街地ノンポイント負荷原単位）をまとめて表-4に示す。流域毎に市街地面積や用途地域面積が異なるために幅があるものの、既に述べたように年降水量による差は小さく、原単位として施策に反映できうる数字と考えられる。表-4では、流域からの総流出負荷量に占める市街地ノンポイント負荷量の比率が、下水道整備の進捗に伴いT-Nで10％程度、T-Pで20～50％にまで増加していることから、今後はこれらの汚濁物についての効率的な流出管理が重要な課題となることが分かる。

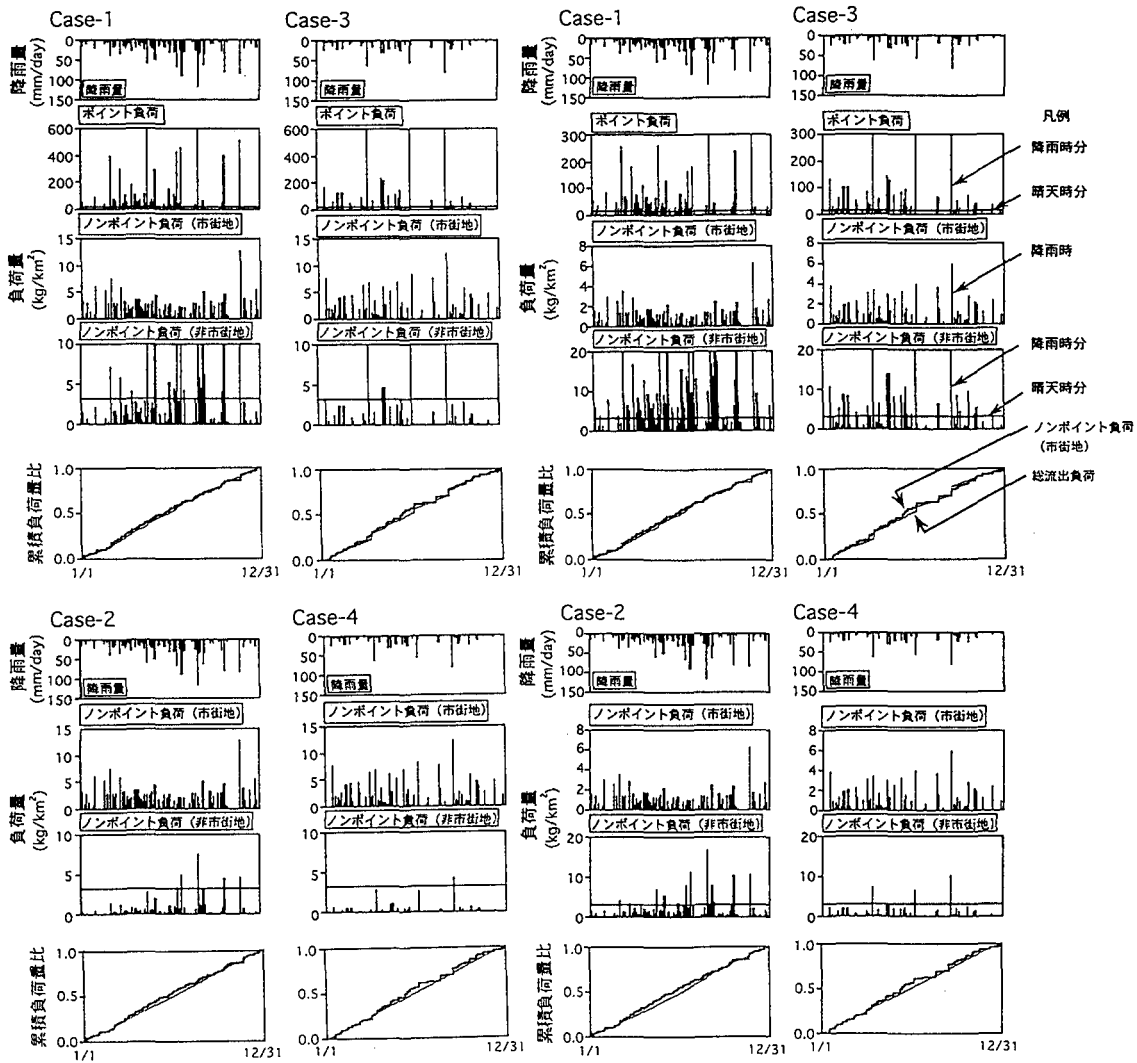


図-4 (1) シミュレーション結果（天神川・T-N）

図-4 (2) シミュレーション結果（山科川・T-N）

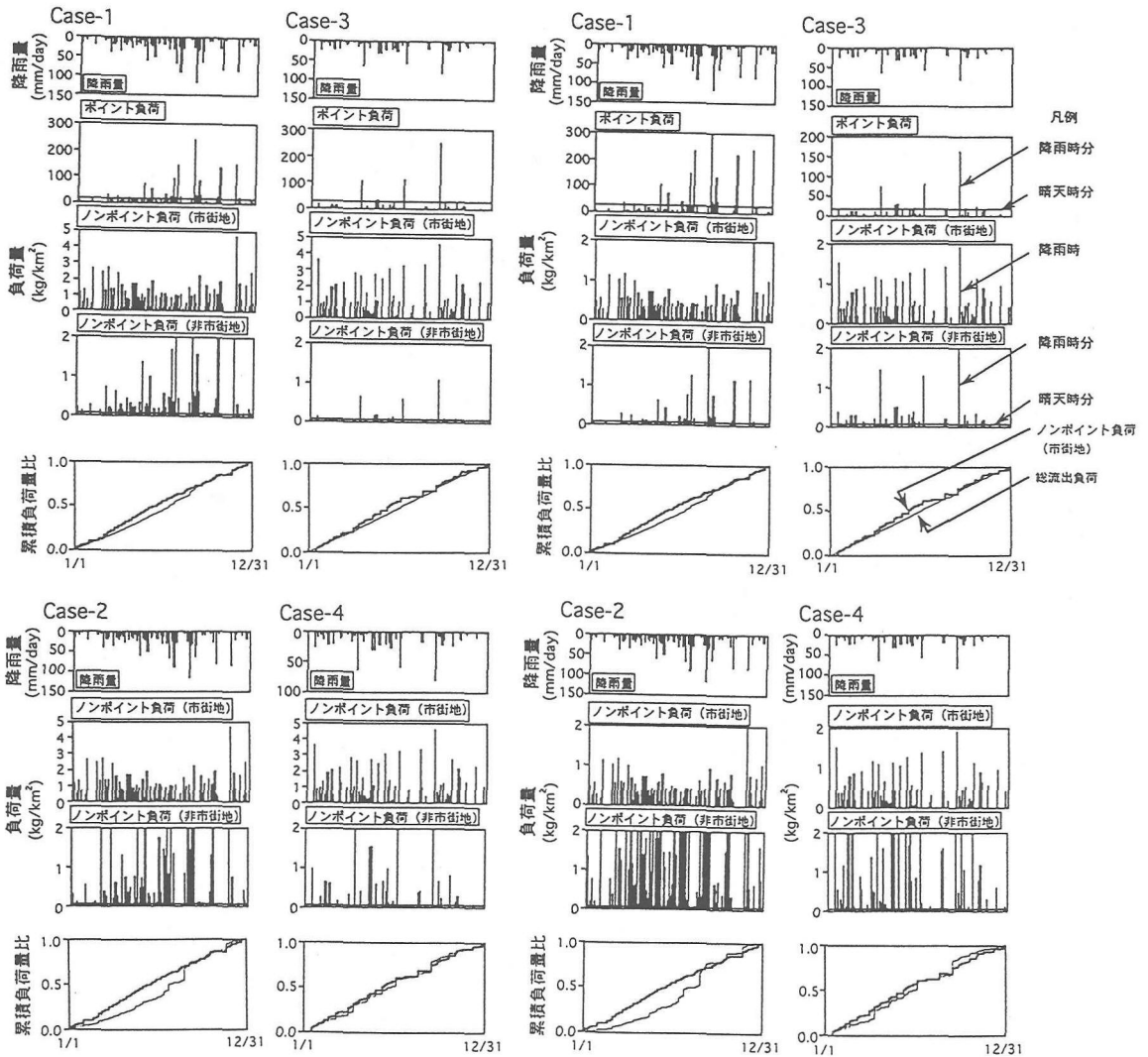


図-4 (3) シミュレーション結果 (天神川・T-P)

図-4 (4) シミュレーション結果 (山科川・T-P)

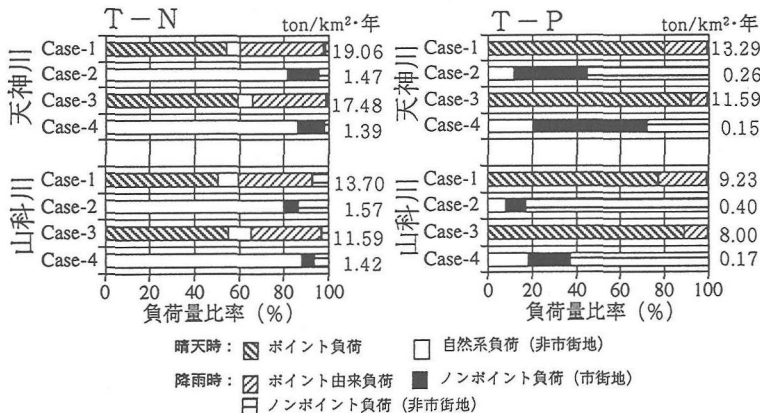


図-5 年間比流出負荷量とその流出源比率

表-4 市街地ノンポイント
年間比流出負荷量

項目	河川	年間比流出負荷量 ($\text{ton}/\text{km}^2 \cdot \text{年}$)	
		流域面積比	市街地面積比
T-N	天神川	0.17~0.21 (1.0~13.9)	0.33~0.39
	山科川	0.08~0.10 (0.7~6.4)	0.22~0.26
T-P	天神川	0.08~0.09 (0.7~52.1)	0.15~0.17
	山科川	0.03~0.04 (0.4~19.0)	0.09~0.10

() 内: 流域からの総流出負荷量に占める比率 (%)

4. 琵琶湖集水域を事例とした市街地ノンポイントソースの定量評価

4.1 評価の方法

次に、琵琶湖を対象として、マクロモデルを用いたシミュレーションを実施することにより、最終受水域における市街地ノンポイントソースの定量化を行った。琵琶湖集水域の概要を表-5に示す。ここでは、北湖、南湖にそれぞれ流入する河川を東西方向に区分することにより、琵琶湖流入河川を4カテゴリー（北湖東岸、北湖西岸、南湖東岸、南湖西岸）にグルーピングしている。シミュレーションでは、琵琶湖流入各河川について、それぞれ固有の流域フレーム値（1990年現在）を用い、「3.」におけるシミュレーションと同様に降水量の時系列データを入力して、日単位の流出負荷量を算定した。ただし、汚濁物の流達率は、琵琶湖流入・流出水に関する実態調査結果⁶⁾を参考にして、各河川における流路延長を基に仮定した。過去10年間の降水量の時系列データを用いて推定した年間琵琶湖流入負荷量と在来の推定値^{7)~10)}を比較した結果が表-6である。ただし、ここでは大気降下物、畜産排水、地下水流出成分および下水処理水による流入負荷量は、検討の対象としていない。本モデルの推定値はいずれも、他の推定値に比べて大きい。これは南湖への流入負荷量を他の推定計算よりも過大に評価しているためと推察される。しかし、他の推定計算では1985年前後の流域フレームを想定しているのに対して、本モデルによる推定計算は1990年の流域フレームを基にしていることや、いずれの推定計算においても、その基盤となる調査データが質量ともに琵琶湖流入負荷量を断定的に示すレベルにないこと、および既に述べた巨視的な流出負荷量の把握という本研究の主旨から、本モデルによる琵琶湖流入負荷量算定精度は妥当であると考えてよい。

表-5 琵琶湖集水域の概要（1990年現在）

	集水面積 (km ²)	土地利用 (%)				流域人口 (×千人)	下水道人口 普及率 (%)
		市街地	田	畑	山林		
北湖東岸	2111	5.47	18.21	2.35	73.97	679.4	7.6
北湖西岸	732	2.87	12.41	1.49	83.23	76.7	11.0
南湖東岸	221	21.00	39.11	4.56	35.34	304.2	47.0
南湖西岸	68	11.93	15.38	0.34	72.35	64.1	66.5
全 域	3132	6.10	18.26	2.26	73.38	1124.4	21.8

表-6 琵琶湖への推定年間流入負荷量の比較

単位: ton/年

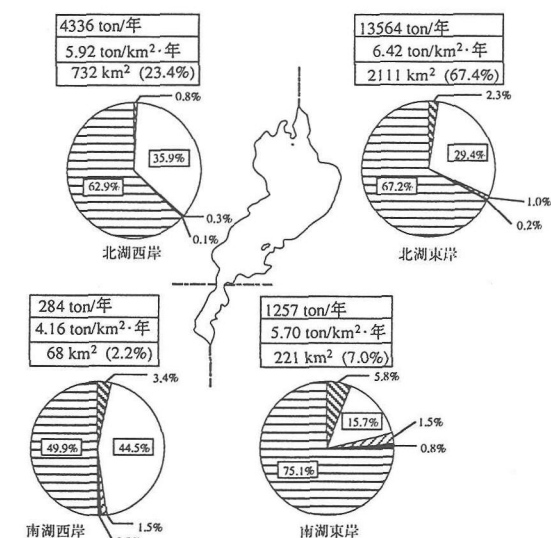
項 目	本モデル	土木学会 衛生工学委員会 ⁷⁾	岩井ら ⁸⁾	國松 ⁹⁾	小林 ¹⁰⁾
T-N	19440 (1541, 17899)	2666 (1613, 1053)	8190	5365	8883
T-P	1471 (366, 1105)	243 (141, 102)	1072	708	1008

()内: (左: 北湖, 右: 南湖)

4.2 シミュレーションによる年間流出負荷量の算定

各カテゴリーにおける総流入負荷量とその中に占める市街地ノンポイント負荷量の比率を図-6(1)、(2)に示す。T-Nでは、集水面積の大きい北湖で流入負荷量が大きく、そのほとんどが非市街地を流出源としていることから、比流入負荷量も非市街地面積の大きい北湖で大きい値となっている。一方T-Pでは、流入負荷量が必ずしも集水面積に比例して大きくならないため、比流入負荷量でみると南湖における値が北湖の2~4倍の大きさになる。流入負荷量を琵琶湖集水域全域についてまとめたのが図-7である。年間流入負荷量に占める降雨時流出成分の比率は、T-Nで67.7%、T-Pで85.1%であり、琵琶湖への汚濁物の流入が、こうした降雨時に著しく偏っていることが分かる。従って、今後琵琶湖の富栄養化防止のためには、T-N流入負荷量の大きい北湖東岸や、集水面積に比べてT-P流入負荷量が大きい南湖東岸からの、いずれも降雨時流出成分を、如何に効率よく制御するかが、重要な課題であると考えられる。

図-6, 7の結果を、市街地ノンポイント負荷について、流域単位面積あたりの年間流入負荷量にまとめたものが表-7である。特に北湖において集水域に占める市街地面積の比率が小さいため、流域面積比流入負荷量は、表-4の値に比べて10分の1程度になっており、他の流出源からの流入負荷量に比べても大きくないことが分かる。しかし、これらの汚濁負荷については、前述のように降雨時に集中して琵琶湖へ流入していることから、さらに時間スケールを短くした詳細な検討が必要であると考えられる。

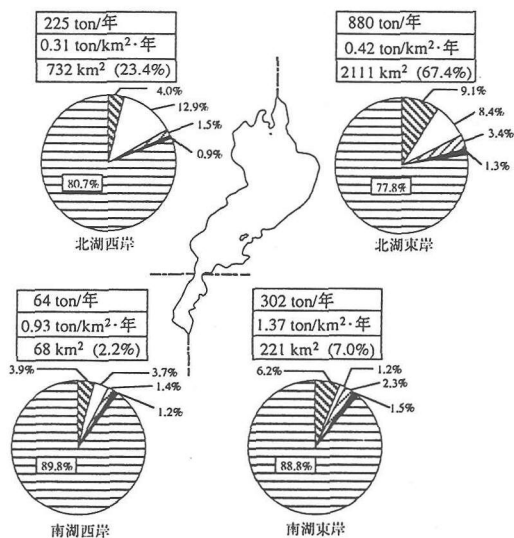


凡例

上段：年間流入負荷量
中段：年間比流入負荷量
下段：面積，()内は琵琶湖集水域に占める面積比率

晴天時：☐ ポイント負荷 ☐ 自然系負荷 (非市街地)
降雨時：▨ ポイント由来負荷 ▨ ノンポイント負荷 (市街地)
☐ ノンポイント負荷 (非市街地)

図-6 (1) 琵琶湖集水域における
流出源別負荷の分布
(T-N・1990年現在)



凡例

上段：年間流入負荷量
中段：年間比流入負荷量
下段：面積，()内は琵琶湖集水域に占める面積比率

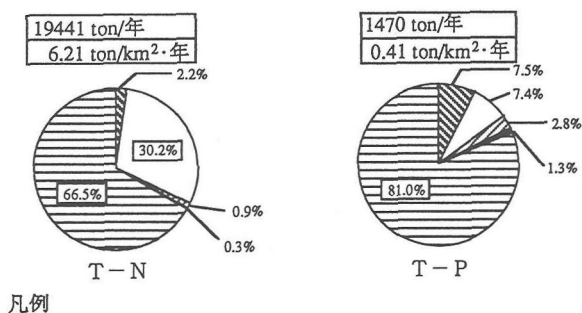
晴天時：☐ ポイント負荷 ☐ 自然系負荷 (非市街地)
降雨時：▨ ポイント由来負荷 ▨ ノンポイント負荷 (市街地)
☐ ノンポイント負荷 (非市街地)

図-6 (2) 琵琶湖集水域における
流出源別負荷の分布
(T-P・1990年現在)

表-7 琵琶湖への市街地
ノンポイント年間
比流入負荷量

項目	区分	年間比流入負荷量 (ton/km ² ・年)
		流域面積比
T-N	北湖東岸	0.015 (0.2)
	北湖西岸	0.008 (0.1)
	南湖東岸	0.055 (1.0)
	南湖西岸	0.032 (0.8)
	全 域	0.032 (0.3)
T-P	北湖東岸	0.005 (1.3)
	北湖西岸	0.003 (0.9)
	南湖東岸	0.020 (1.5)
	南湖西岸	0.012 (1.2)
	全 域	0.006 (1.3)

()内：流域からの総流入負荷量
に占める 比率 (%)



凡例

上段：年間流入負荷量
下段：年間比流入負荷量

晴天時：☐ ポイント負荷 ☐ 自然系負荷 (非市街地)
降雨時：▨ ポイント由来負荷 ▨ ノンポイント負荷 (市街地)
☐ ノンポイント負荷 (非市街地)

図-7 年間琵琶湖流入負荷量とその流出源比率

5. おわりに

本研究では、都市域中小河川および琵琶湖集水域を対象とした、マクロモデルによるシミュレーション解析により、汚濁物流出における市街地ノンポイント負荷量の位置づけを定量的に明らかにした。その結果、年間降水量や流域の下水道整備状況により異なる市街地ノンポイントソースからの流出負荷量とそれが流域からの総流出負荷量に占める比率が示された。本モデルを用いた同様の手法により、様々な汚濁物流出特性を巨視的に把握することが可能となる。今後、流出汚濁負荷量の容易な予測が行えるよう、マクロモデルを用いた汚濁物流出シミュレーション手法のシステム化を図り、さらに多様な流域スケールや時間スケールでの解析を試みたいと考えている。

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近藤才寛君をはじめとする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)和田安彦(1994) ノンポイント負荷の制御ー都市の雨水流出と負荷制御法ー, 技報堂出版
- 2)たとえば和田安彦, 田内和三(1980) 非点源負荷の定量と水域環境への影響度の評価, 第16回衛生工学研究討論会講演論文集, pp.168-173
- 3)市木敦之, 山田淳, 大西敏之(1994) 流域特性を考慮した汚濁物流出プロファイルの予測, 環境システム研究, Vol. 23, pp. 68-77
- 4)市木敦之, 山田淳, 大西敏之(1995) 流域特性を考慮した年間汚濁物流出負荷量の予測Ⅱーマクロモデルによる栄養塩流出シミュレーションー, 第29回日本水環境学会年会講演集, pp. 351
- 5)和田安彦, 三浦浩之(1991) 都市化した中小河川の水質に及ぼす下水道等整備効果のモデル解析, 土木学会論文集, No. 429/Ⅱ-15, pp. 97-105
- 6)國松孝男(1981) 琵琶湖集水域の河川水, 地下水, 降水および琵琶湖流水の水質, びわ湖とその集水域の環境動態ー昭和55年度報告ー, 文部省「環境科学」報告集, B105-R12-12, pp. 82-105
- 7)土木学会・衛生工学委員会(1976) 琵琶湖の将来水質に関する調査結果の概要, 近畿地方建設局琵琶湖工事々務所
- 8)岩井重久, 井上頼輝(1985) 閉鎖性水域の非特定発生源(その2), 環境技術, Vol. 14, No. 2, pp. 59-64
- 9)國松孝男(1986) 河川による物質流送, 琵琶湖集水域の現状と湖水への物質移動に関する総合研究, 1982-1984年度, 琵琶湖研究所プロジェクト研究記録集, No. 85, A2
- 10)國松孝男, 村岡浩爾編(1989) 河川汚濁のモデル解析, 技報堂出版