

ポイントソースに由来する環境堆積負荷量の 推定手法とその適用に関する研究

市木 敦之¹・山田 友博²・佐々木 暁人³・天野 耕二⁴・山田 淳⁴

¹正会員 立命館大学助教授 理工学部環境システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Email: a-ichiki@se.ritsumei.ac.jp

²株式会社日本総合研究所

³高槻市

⁴正会員 立命館大学教授 理工学部環境システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

流域におけるポイントソース由来の環境堆積物は、降雨等の水理的掃流力を介して流出し、新たにディフューズソースとして受水域の水質へ影響を及ぼしているものと考えられる。本研究では、琵琶湖集水域を例として、汚濁物の挙動特性について定量的かつ面的な解析を行うことにより、汚濁物の分布性状を予測し、これを地理情報システム上に記述した。これにより、発生源としてはポイントソースながら流出源としてはディフューズソースとして振る舞うポイント由来ディフューズ汚濁負荷の挙動・現存特性が明らかとなり、流域における汚濁物流出管理のための意義ある情報を示すことが出来た。

Key Words : *diffuse source, GIS, point source, pollutant accumulation, pollutant runoff*

1. はじめに

ポイントソースに由来する汚濁物を管理するためには、流域に点在するポイントソースの位置や発生負荷量を正確に把握しておくことはもとより、発生した汚濁物が環境中に排出されて後の一連の堆積・流出過程やその分布性状を明らかにしておくことが重要である。流域内のポイントソースより排出された汚濁物の中には、晴天時に流出する成分の他に、流域の中で移動と堆積を繰り返しながら存在する成分もたいへん多いと推察できる。こうした環境中における堆積汚濁（本研究では環境堆積物と呼称し、その現存量を環境堆積負荷量とする）は、降雨等の水理的掃流力を介して再び流出し、新たにディフューズソースとして受水域水質へ影響を及ぼしているものと考えられる。本研究は、琵琶湖集水域を例として、ポイントソースに由来する汚濁物の発生・堆積・流出負荷量とその分布特性を面的に（地図上で）明らかにすることを目的とする。

琵琶湖は、我が国最大の湖であると同時に、近畿圏1400万人の水源となっており、云うまでもなく最も重要な湖のひとつである。琵琶湖の集水面積は広大でかつ大小100以上の流入河川を有しているため、こうし

た集水域で発生し、河川や小水路を通じて琵琶湖へ流入した汚濁物は、長い滞留時間を通じて直接的に、あるいは湖内の底質成分となって間接的に琵琶湖水質に影響している。殊に滋賀県では、いわゆる市街地において2010年度末までに下水道整備を完了させる計画を立てており、下水道人口普及率の目標値を85%として、現在も整備進捗の途上にある¹⁾。そのため、流域内のポイントソースで発生した汚濁物の中には、何ら排水処理施設を経ずに、あるいは浄化槽や農村集落排水処理施設からの処理放流水として、環境中へ放出されるものが少なくない。ここでは、琵琶湖集水域における地理情報データベースと流入河川での流量・水質の実測結果を用いることにより、琵琶湖流域における汚濁物の挙動特性について定量的かつ面的な解析を試みた。琵琶湖集水域における流量・水質調査の対象流域を図-1に示す。本研究では、滋賀県環境白書²⁾に記載の環境基準点から流量データ等の欠損がない25箇所の観測地点を選定した。流量・水質の測定は、関連自治体によってほぼ月1回の頻度で、主として晴天時に行われており、1983～1998年の測定データを用いることとした。解析に使用した測定項目は、流量およびSS, COD, TN, TPの各水質項目である。ここに選定

した河川の本川流路延長は 2.25~41.05km である³⁾。
琵琶湖流入河川のうち、これらを超えるものは野洲川
(本川流路延長 65.25km)、安曇川(同 57.94km) およ
び日野川(同 46.71km) の3河川ある³⁾が、本研究で
意図するポイントソースは、河口より 40km 以上の上

流にはほとんどない。

2. 研究の方法

琵琶湖集水域からの汚濁物流出に関する研究はこれ
まで幾つか行われてきており、筆者らは、流域におけ
る汚濁物の挙動を図-2 に示す概念により整理して記
述できることを示してきた⁴⁾。他方、増田らは、琵琶
湖流入河川において晴天時に観測された基底流出負荷
量から、当該流域におけるポイントソース排出負荷量
(L_{pu}) を差し引くことにより、流域内のディフュー
ズソース負荷量を推定する方法を提案している⁵⁾。し
かしながら、流域内の汚濁源から環境中に排出された
汚濁物 (L_{pu}) には、晴天時に公共用水域へと流出す
る成分 (L_{ps}) と、流域内に堆積して降雨時の流出負
荷量 (L_{pr}) となる成分があることが考慮されておら
ず、現実を正しく記述するには到っていない。本研究
では、まず、琵琶湖集水域における流域フレームと原
単位を用いて、流入河川毎に流域のポイントソースに
おける汚濁物の発生負荷量を発生源別に算定した。こ
の後、琵琶湖流入河川における流出水質のデータベ
ースと式(1)~(4)を用いて、この発生負荷量を、晴天時に

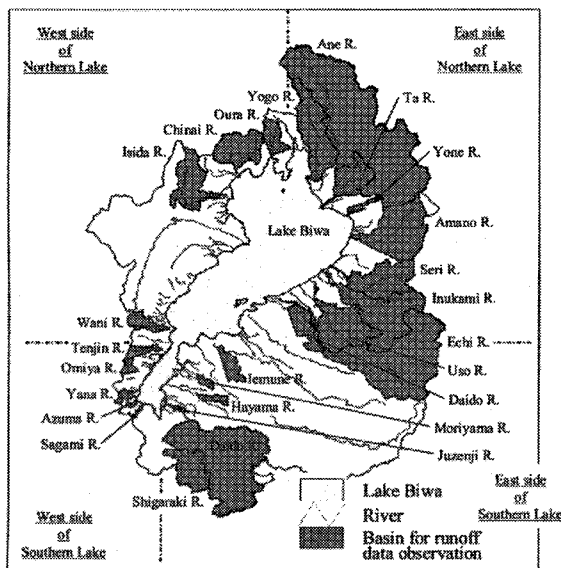
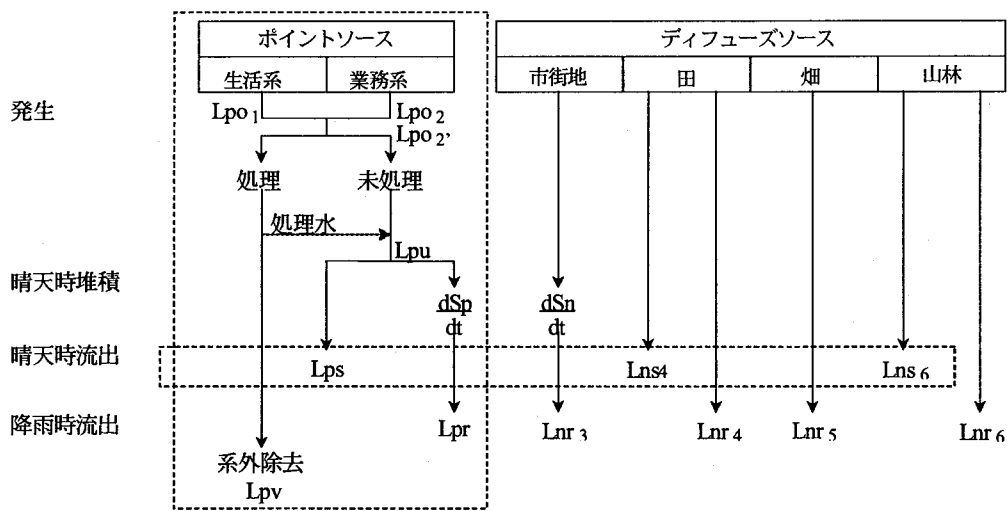


図-1 琵琶湖集水域の概要



ここに、

L: 流出負荷量 (kg/d) S: 堆積負荷量 (kg)

p: ポイントソース (1:生活系, 2:業務系(二次産業), 2':業務系(三次産業))

n: ディフューズソース (3:市街地, 4:田, 5:畑, 6:山林)

o: 発生 u: 排出 v: 除去 s: 晴天時 r: 降雨時

図-2 集水域における汚濁物の挙動の概念図

琵琶湖へ流入する成分と流域内に堆積してディフューズソースとなる成分に分離することで、各流域における汚濁物の発生・堆積・流出負荷量の分布性状をそれぞれ予測し、地理情報システム上に記述した。

$$Lpv = (Lp01 + Lp02 + Lp02')X/100 \quad (1)$$

$$Lpu = (Lp01 + Lp02 + Lp02')(1 - X/100) \quad (2)$$

$$Lps = Lpu(1 - y/100) \quad (3)$$

$$dSp/dt = Lpu(y/100) - Lpr \quad (4)$$

ここに、X:下水処理施設によるポイント負荷の除去率(%), y:流域におけるポイント負荷の堆積率(%)である。本来、式(3)における y は、汚濁物の沈殿堆積による効果と狭義の(沈殿堆積を除く)自浄作用による効果を包含しているものであるが、ここで対象とするような流路延長の短い河川における流出負荷量の減少については、前者がきわめて大きい比率を占めること⁹⁾が知られている。また、研究対象としているポイント負荷の発生源は、さらに河口に近いところに分布しており、上流部の山林域にはほとんどないことから、y をポイント負荷の堆積率と定義するものである。

琵琶湖集水域の地理情報データベースを作成する際に利用した原データは、大きく分類すると空間データと属性データに分けられる。ここでは、地理情報データベースの作成に、ソフトウェアとして ArcView (ESRI 社)を用いた。空間データとしては、行政界や流域界、土地利用、処理方式別の下水処理区域界などを用いた。デジタル地図は、「動くアトラス」(滋賀県琵琶湖研究所)⁹⁾と国土地理院発行の数値地図より入手し、これに琵琶湖集水域の各自治体が発行している紙地図からデジタイジングしたデータを加えて、空間データとした。なお、このうち琵琶湖流入河川と土地利用に関する空間データは、既存の研究成果⁹⁾をもとに再構成した。また属性データとしては、国勢調査等により得られる人口や産業別従業者数、産業出荷額、処理方式別の下水処理人口などを用いるものとし、空間スケールはそれぞれ、人口および産業別従業者数は町丁大字単位、農業集落排水施設処理人口は処理場単位、その他の属性データは市町村単位での集計データを収集した。なお、いずれのデータも収集年度は、1980~1998 年とした。

3. 結果と考察

(1) 流入河川流域におけるポイント負荷の挙動特性

琵琶湖流入河川流域を、図-1 のようにその位置によって北湖・南湖の各東岸・西岸の4カテゴリーに分類して、各カテゴリーにおける下水処理方法を先述の地理情報データベースに基づいて整理すると、図-3 に示

されるようになる。早くから下水道整備の進んだ南湖流域に比べて、北湖流域では下水道普及率が低く、それ以外の下水処理方法が85%以上を占めている。一部の農業集落排水処理施設や合併浄化槽、単独浄化槽は、処理放流水として汚濁物を流域内に排出するのに加えて、単独浄化槽や尿処理の場合には、さらに雑排水は未処理のまま流域内に排出されるため、こうした下水道未整備地域では、ポイントソース由来の汚濁物が環境中にかなり多く現存しているものと推察される。

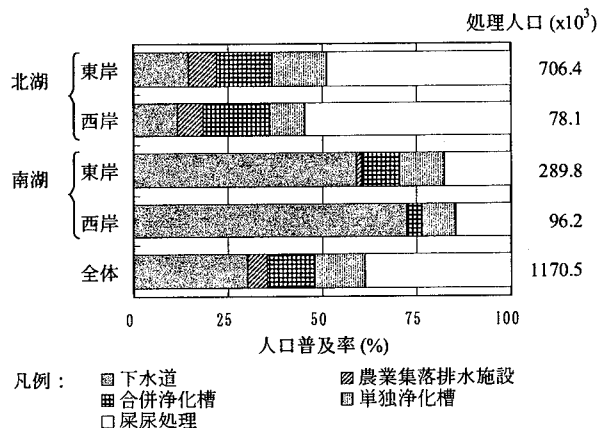


図-3 琵琶湖集水域における汚水の処理形態別人口 (1995)

流量・水質測定結果のある25流域について、地理情報システムを用いてそれぞれ算定した流域からのポイント負荷排出量(Lpu)と河川負荷量(Ls)の実測値の関係を図-4に示す。なお、河川における負荷量は、農地由来の汚濁物が含まれる灌漑期とそうでない非灌漑期によって大きく異なるため、ここでは灌漑期・非灌漑期別にプロットを分けている。今、あるひとつの流域について、ポイント負荷排出量と晴天時の河川負荷量の関係をみた場合、図-5に示されるように、晴天時河川負荷量(Ls)は、流域内のディフューズソース由来の汚濁負荷量(Lns4+Lns6)に、ポイントソースから排出された負荷量(Lpu)のうち流域内に堆積せずに流出してきた成分(100-y(%))を加えた和とみなすことができる。筆者らは、京都市を流下する複数の都市河川における実測調査結果をもとに、こうした関係は比負荷量を用いて式(5)のように定式化できることを示した¹⁰⁾。

$$Ls/A = a3(Lpu/A3)(1 - y/100) + a4(Lns4/A4) + a6(Lns6/A6) \quad (5)$$

ここに、A:流域面積(km²), Ai:土地利用iの面積(km²), ai: Ai/A (流域に占める各土地利用比率), ただし、i=3(市街地), 4(田), 6(山林)である。ここで、流域におけるポイント負荷の堆積率(y(%))と、田および山林からの比流出負荷量(Lns4/A4, Lns6/A6)が、いずれも流域に依らず一定であると仮定し、加えて、非灌漑期には Lns4/A4

はゼロ、かつ灌漑期・非灌漑期とも $L_{ns6}/A6$ は一定と仮定すると、実測された L_s/A と流域の地理情報より算定した $L_{pu}/A3$ や $a_i(i=3,4,6)$ を式(5)に代入して、灌漑期・非灌漑期別に重回帰分析を行うことにより、表-1 に示す結果を得る(いずれも1%有意)。流域におけるポイント負荷の堆積率($y(\%)$)は、懸濁性の強い水質項目ほど大きく、かつどの水質項目においても灌漑期・非灌漑期ともほとんど同じ値となっている。これは、こうした値が水質項目ごとの物性に依存して定まることを示唆しているものと考えられる。表-1 の値をパラ

メータとして式(5)に入力すると、各河川における晴天時の比流出負荷量(L_s/A)を算定することができる。式(5)による河川比負荷量の計算値と実測値の関係を図-6 に示す。いずれの水質項目についても、相対誤差($= | \text{計算値} - \text{実測値} | / \text{実測値} \times 100(\%)$)の平均値は109~221%となっており、実測データ自身の変動係数が年平均値にして30~99%と元々ばらつきがあることを考慮に入れると、概ね良好な再現性が得られるといえる。

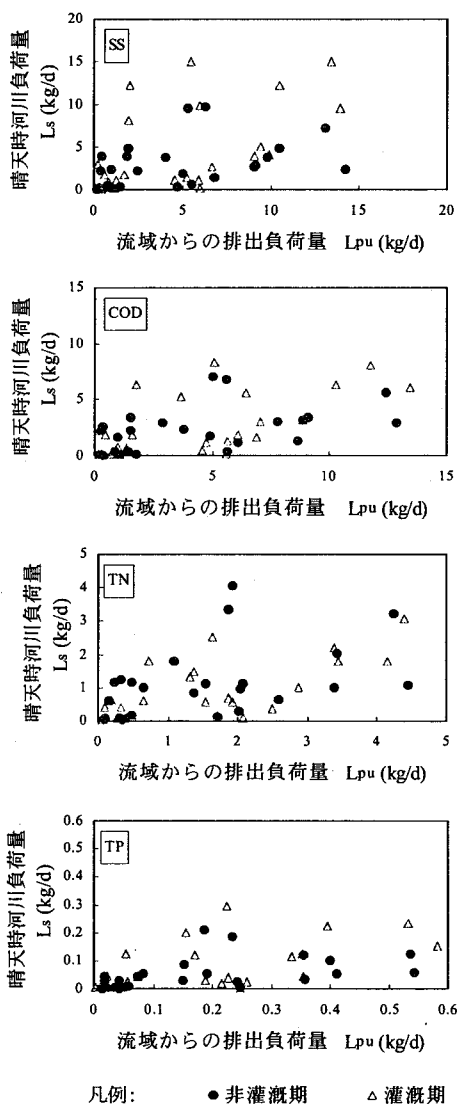


図-4 流域からの排出負荷量と晴天時河川負荷量の関係

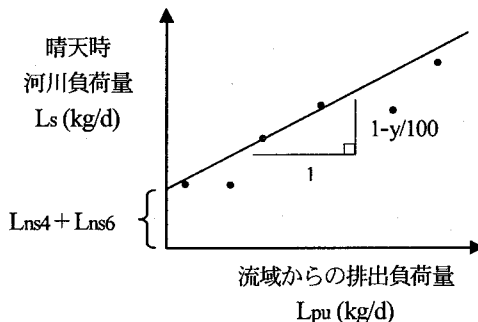


図-5 流域からの排出負荷量と晴天時河川負荷量の関係

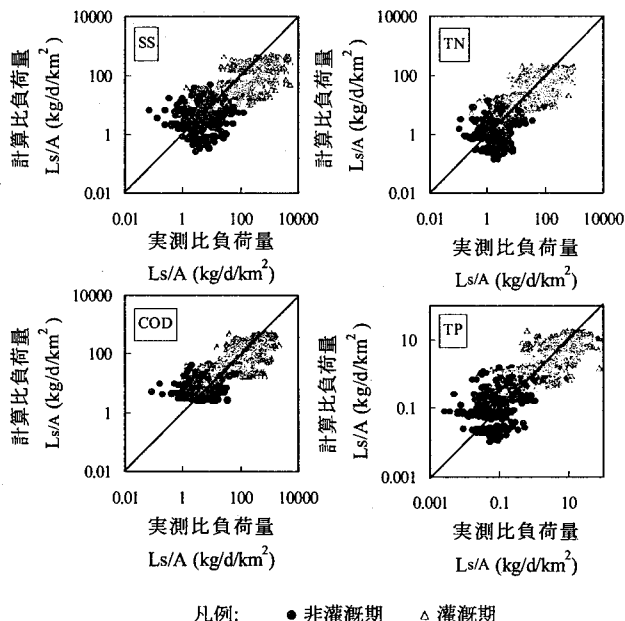


図-6 河川比負荷量に関する実測値と計算値の関係

表-1 (5)式を用いた回帰分析の結果

指標	非灌漑期					灌漑期				
	y	Lns4/A4	Lns6/A6	決定係数	データ数	y	Lns4/A4	Lns6/A6	決定係数	データ数
	(%)	(kg/d/km ²)	(kg/d/km ²)			(%)	(kg/d/km ²)	(kg/d/km ²)		
SS	61.08	0.000	4.652	0.378	322	62.68	38.776	4.652	0.559	250
COD	63.89	0.000	2.675	0.486	326	63.82	19.991	2.675	0.459	297
TN	46.70	0.000	1.726	0.423	312	50.50	2.713	1.726	0.619	220
TP	65.57	0.000	0.040	0.830	207	64.63	0.175	0.040	0.803	230

(2) 琵琶湖集水域における汚濁物の分布特性

地理情報により求めた 1995 年の流域フレーム値と表-1 のパラメータを式(5)に入力することによって、琵琶湖流入河川別に算定した晴天時の比流入負荷量を図-7 に示す。琵琶湖の西岸に比べて集水面積の大きい東岸側で比負荷量が大きいため、流入負荷量にすると東岸側からのインパクトが非常に大きいことがわかる。同様に、各流入河川流域におけるポイントソース由来の汚濁物のうち、晴天時に流域内に堆積する成分($Lpu \cdot (y/100)$)を算定し、比負荷量にして図-8 に示す。元来、都市部が多く汚濁のポテンシャルが高いとされる湖岸沿いと、近年の都市化に比べて下水道の敷設が遅れている南湖東岸部における比堆積負荷量が大きくなっている。こうした汚濁物は、ポイントソースに由来するものの、降雨を介して琵琶湖へ流入するディフューズソースとしての性格を併せて有しており、またその負荷量も大きいことから、今後集水域におけるこうした汚濁物の分布特性を考慮した流域管理が検討されていくべきであろう。次に、地理情報システムを用

いて 1983～1998 年の間の各流入河川流域フレーム値を算定し、これを用いることにより図-8 の場合と同様に、流域に堆積したポイント由来汚濁物を推定した。ただし、ここでは環境堆積物負荷量の分布を示すことを意図しており、これらの流出挙動を議論するレベルにはないことから、この間の土地利用に大きな変化がないものと仮定して、土地利用レイヤーだけを 1995 年のものに固定している。推定した琵琶湖集水域におけるポイント由来堆積汚濁物の経年変化を、負荷量と比負荷量にして図-9 と図-10 に示す。この間に集水域全域における下水道普及率は 8.9% から 55.5% へと変化したものの、多くの流域人口を抱えるにもかかわらず下水道整備が遅れている北湖東岸での堆積負荷量が大きいため、全体としてこの間のこうしたポイント由来堆積負荷量の減少量は大きくない。比負荷量でみると、集水面積が小さいわりに早くから都市化が進んで汚濁ポテンシャルが高かった南湖流域において、この間の下水道整備効果が認められ、1998 年にはほぼ北湖流域並みの汚濁ポテンシャルにまで減少している。

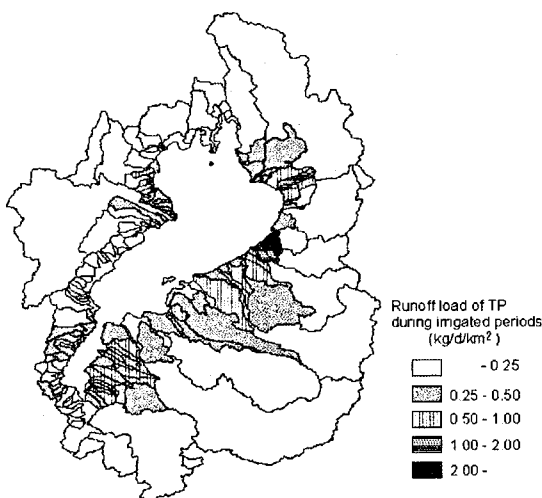


図-7 琵琶湖集水域からの TP 流入負荷量の分布特性 (1995)

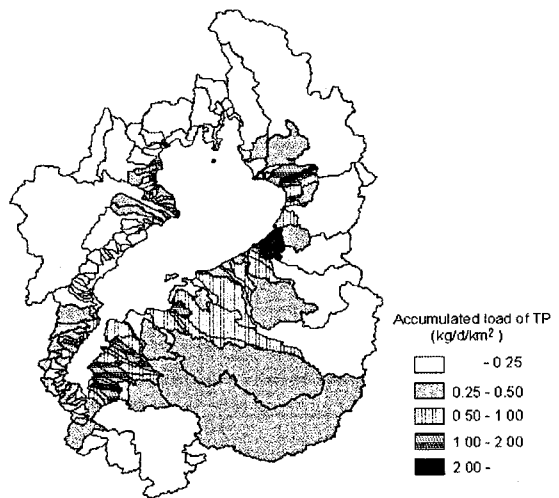


図-8 琵琶湖集水域における TP ポイント由来堆積負荷量の分布特性 (1995)

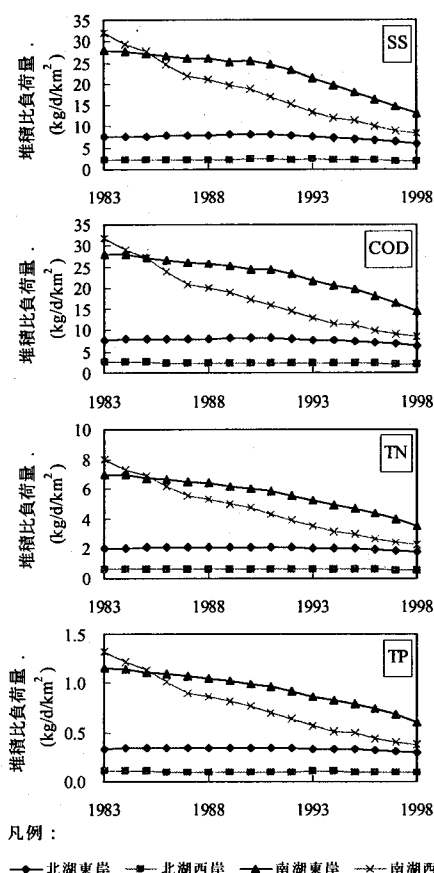


図-9 琵琶湖集水域におけるTPポイント由来堆積比負荷量の変遷

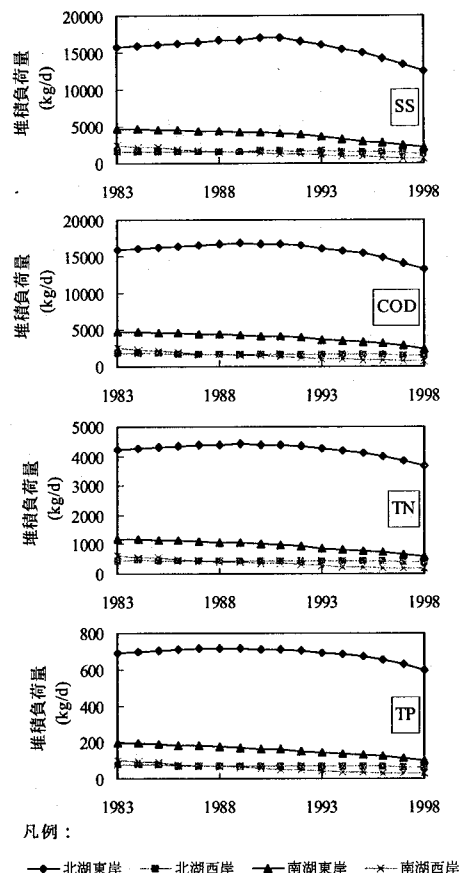


図-10 琵琶湖集水域におけるTPポイント由来堆積負荷量の変遷

4. 結論

本研究では、琵琶湖集水域における汚濁物の挙動特性について定量的かつ面的な解析を行うことにより、汚濁物の分布性状を予測し、これを地理情報システム上に記述する方法論について示した。これにより、発生源としてはポイントソースながら流出源としてはディフューズソースとして振る舞うポイント由来ディフューズ汚濁負荷の挙動・現存特性が明らかとなり、受水域への汚濁物流出管理のための意義ある情報を示すことが出来た。これまで、たとえば流域における下水道の整備効果は、流入河川の基準点における晴天時水質・負荷量の改善効果をもって評価されてきている。しかしながら、ポイントソースにおいて発生した汚濁物の多くが、このように環境中でいったん堆積した後、降雨を介して流動していることから、その負荷量を明らかにして、それらの分布特性をふまえることにより、合理的な流域管理施策の検討・評価が可能となる。

謝辞：本研究の一部は、財団法人日本環境整備教育センター平成17年度浄化槽に関する調査研究助成（「浄化槽に由来する環境堆積負荷量の推定手法とその適用に関する研究」）の補助を得て実施されたものである。関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 滋賀県琵琶湖環境部下水道計画課：平成11年度版滋賀県下水道事業，pp.2，1999。
- 2) 滋賀県：環境白書—資料編—，1984-1999。
- 3) 滋賀県土木部河港課：河川・港湾・漁港調査，1988。
- 4) Ichiki, A., Yamada, K. and Ohnishi, T.: Prediction of Runoff Pollutant Load Considering Characteristics of River Basin, Water Science and Technology, Vol.33, No.4-5, pp.117-126, 1996。
- 5) 増田貴則，市川新，植田泰行，稲岡美紀：河川環境基準監視調査データとGISを用いた琵琶湖流域の晴天時の面源からの汚濁負荷推定，環境システム研究，Vol.27, pp.199-206, 1999。

- 6) Camp, T. R.: Fields Estimates of Oxygen Balance Parameters, Proc. ASCE, Vol.91, SA5, pp.1-16, 1965.
- 7) 杉木昭典:水質汚濁(現象と防止対策), 技報堂, pp.325-330, 1974.
- 8) 滋賀県琵琶湖研究所:動くアトラス, 1988.
- 9) 増田貴則:GISを活用した流域環境情報の統合化とその現象解析・計画論への適用に関する研究—琵琶湖流域を対象として—, 京都大学博士学位論文, 2000.
- 10) たとえば, 市木敦之, 山田淳, 大西敏之: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.22, pp.68-77, 1994.

A GIS-BASED STUDY ON POLLUTANT DISTRIBUTION IN A CATCHMENT BASIN

Atsushi ICHIKI, Tomohiro YANADA, Akito SASAKI, Koji AMANO and Kiyoshi YAMADA

Accumulated pollutants, which derive from point sources in Lake Biwa watershed, are considered to be flushed into Lake Biwa by stormwater and have an influence on water quality of the lake as diffuse source pollutants. This study has clarified characteristics of pollutant generation, accumulation and runoff around the Lake Biwa watershed, and shown distribution of such pollutant loads onto a digital map of the watershed. As a result, the characteristics of runoff pollutants which are generated from point sources and accumulated as diffuse sources in the basins, such as the domestic wastewater discharged through no treatment facilities, have been shown.