

GISを用いた手賀沼流入河川の汚濁負荷解析

GIS ANALYSIS ON POLLUTANT LOADS IN AN INFLUENT RIVER INTO LAKE TEGANUMA

二瓶泰雄¹・服部裕司²・小久保武³・大竹野歩⁴

Yasuo NIHEI, Yuji HATTORI, Takeshi KOKUBO and Nobu OOTAKE

¹正会員 博(工) 東京理科大学講師 理工学部土木工学科(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

²学生員 学(工) 東京都立大学大学院 都市科学研究科都市科学専攻修士課程

³学生員 学(工) 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻修士課程

⁴正会員 修(工) 東京都北区都市整備部地域整備課

To clarify the cause of pollutant loads in Oohori river, one of the main influent rivers into Lake Teganuma, we have attempted to perform a GIS analysis on pollutant loads in Oohori river. The comparison between the calculated and observed pollutant loads for COD, T-N and T-P indicates that the calculated results give acceptable agreements with observed results. We also compare the calculated pollutant loads in 1991 and 2002, showing that the contribution of the domestic waste water appreciably decreases with the increase of extension rate of sewerage and then the industrial waste water and non-point source are relatively dominant. The spatial distribution of the point and non-point sources in the watershed is examined with the GIS analysis.

Key Words : Lake Teganuma, GIS, pollutant loads, water quality, Oohori River

1. 序論

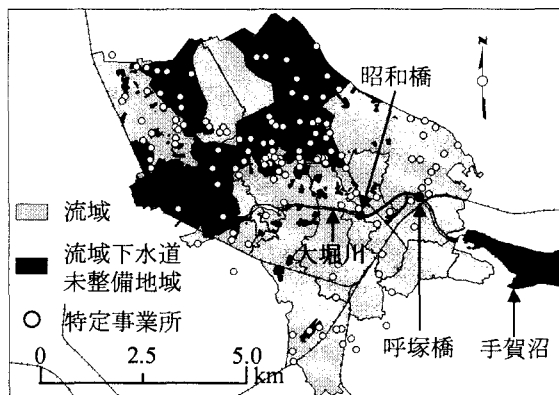
著しく富栄養化が進行している手賀沼^{1)・2)}における水質改善・管理を適切に行っていくためには、湖沼内における個別的・局所的な水質モニタリングや水質改善対策³⁾を実施するのみならず、流域全体における総合的な汚濁負荷削減対策を立案・実施していくことが急務となる⁴⁾。そのためには、水質悪化の主要因である流域からの過剰な汚濁負荷流入量をモニタリングすることにより、河川経由の汚濁負荷量の実態や汚濁負荷発生・排出要因を検討することが必要不可欠となる。

このようなことを研究背景として、著者らはここ数年手賀沼への主要流入河川の一つである大堀川における水環境調査を実施し、そこでの水質環境や汚濁負荷特性について検討している^{5)~7)}。それらの研究結果のうち、降雨時における大堀川での水質負荷特性に関しては、大堀川全域を対象とした3つの降雨イベントにおける観測結果より、降雨イベント毎に水質環境が大きく変化すること、その変化に対して底質環境が密接に関連していることが示された^{6)・7)}。一方、非降雨時における汚濁負荷特性については、流域内において明確な地域差が現れて

いることが明らかとなったものの⁶⁾、その汚濁負荷特性と下水道整備状況等といった流域環境情報との関連性は不明な点が多く、流域内における汚濁負荷発生要因の検討は十分に行われていない。

また、このような流域環境情報の整備にはGISが有効であり⁸⁾、小林・平間⁴⁾はGISを利用して原単位法に基づく手賀沼流域の汚濁負荷解析を実施している。この解析は1991年度を対象として行われており、その当時と最近では下水道整備状況等が大きく変化しており、そこで得られた知見が最近の動向を反映していないことが予想される。さらに、原単位法に基づく解析結果の精度は、現地観測結果との比較を通して検証されているものの、その比較は流入河川河口部でのみ行われており、実際に必要となる小流域毎の解析精度の検証は行われていない。

本研究では、大堀川流域を対象としてGISに基づく汚濁負荷解析を行い、大堀川流域における汚濁負荷量の実態やその発生要因を明らかにすることを試みる。具体的には、まず、GISを用いて大堀川流域における面的な環境情報を整備し、その結果を反映させて原単位法に基づく汚濁負荷解析を実施する。次に、GISを用いた汚濁負荷解析結果と現地観測等に基づく実測結果を比較して、GIS解析



図－１ 大堀川流域の概要
(下水道未整備地域と特定事業所)

結果の妥当性について検討する。さらに、GIS解析結果に基づいて、流域内の汚濁負荷発生要因を明らかにする。

2. 大堀川流域の概要

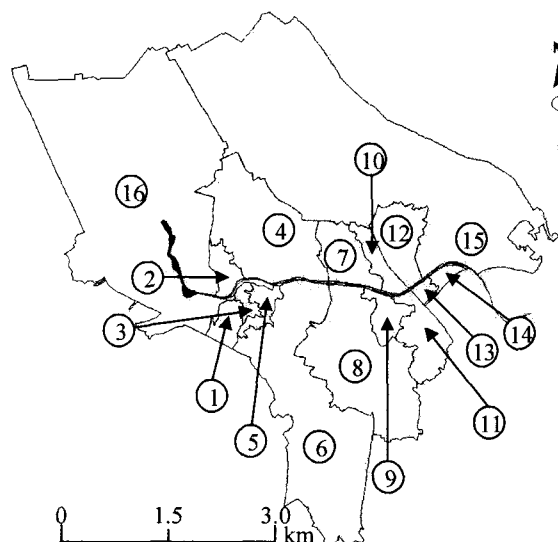
大堀川は、千葉県流山市、柏市を流下して手賀沼西部に流入する都市河川である(図－１)。この大堀川の流路長は12.9km、流域面積は31.2km²である。本論文では、汚濁負荷解析を行うにあたり、大堀川流域における環境情報として、人口分布、下水道整備状況(流域下水道、合併浄化槽、単独処理浄化槽別の人口分布を算出)、土地利用分類、規制特定事業所分布などをデータベース化している。ここで規制特定事業所とは、湖沼水質保全特別措置法により排出規制を課せられた事業所であり、具体的には、製造工場や学校、病院、小売店などから構成されている。

これらのデータのうち、1991年度⁴⁾と2002年度における大堀川流域全体の人口、下水道整備率、土地利用特性を表－１に示す。1991年度と2002年度の結果を比べると、人口や土地利用特性については明確な変化が見られないものの、下水道整備率に関しては55%(1991年度)から84%(2002年度)に大幅に増加していることが分かる。また、土地利用特性としては、両年度ともに、市街地が75%を占めており、流域の市街化が顕著となっている。このような市街化された流域において雨水をスムーズに排水するために、大堀川流域は45の雨水排水区に分割されており、各排水区内における雨水は雨水路を流れ樋管を通して大堀川に流入する。

流域環境情報の空間分布の一例として、下水道未整備地域と規制特定事業所の空間分布を図－１に示す。なお、これらの流域環境情報を整理・統合化する際には、GISソフトウェア(ArcGIS8.2, ESRI社)を使用している。このような流域環境情報を用いて後述する汚濁負荷解析を行う際には、現地観測結果等と比較するために、流域環

表－１ 大堀川流域の基本的な環境情報
(1991年度と2002年度)

年度		1991	2002
人口(万人)		15.4	16.5
下水道整備率(%)		55	84
土地利用特性(%)	市街地	75	75
	山林	9	13
	畑	13	11
	水田	3	1



図－２ 小流域区分図

境情報を大字町丁目別ではなく雨水排水区別に整理する。実際には、図－２に示すように大堀川流域内を16の小流域に分割して、データ整理・汚濁負荷解析を実施する。

3. 研究方法

(1) 原単位法に基づく汚濁負荷解析方法

汚濁負荷解析を行う際には、点源負荷(生活系、産業系負荷)と面源負荷を算出する必要があり、対象水質項目としては、COD、TN、TPの3つとなる。まず、点源負荷のうち生活系負荷に関しては、生活排水処理形態別人口(流域下水道、合併浄化槽、単独浄化槽の各使用人口)⁹⁾を求める。そこで得られた各人口に対して、表－２に示されている排出負荷原単位を乗ずることにより、生活系負荷を算出する。上記の原単位のうち流域下水道に関しては、その処理水が大堀川流域外に排出されるため、その排出負荷原単位を0としている。次に、産業系負荷に関しては、規制特定事業所¹⁰⁾を対象として、事業所毎に自治体に提出されている排水量と湖沼水質保全特

表-2 排出負荷原単位

種類	形態	COD	T-N	T-P
生活系負荷 (g/人/日)	流域下水道	0.00	0.00	0.00
	合併浄化槽	2.70	3.70	0.55
	単独浄化槽	21.5	5.30	0.83
面源負荷 (kg/km ² /日)	水田	11.9	3.27	0.33
	畑	3.31	6.92	0.09
	森林	3.49	0.58	0.08
	市街地	10.3	3.02	0.15
	降雨	4.72	2.75	0.12

表-3 事業種別排水規制値の一例 (T-N)

	日平均排水量	a	b
食料品製造業	500m ³ 未満	35.5	1.0
	500m ³ 以上	23.6	1.0
旅館業、共同調理場、 飲食業	500m ³ 未満	40.2	0.9
	500m ³ 以上	26.8	0.9
病院施設		40.2	0.9
その他の業種	500m ³ 未満	34.0	1.0
	500m ³ 以上	22.7	1.0

別措置法に基づく規制基準値を用いて算出している。具体的には、各特定事業所の水質負荷量 L は、届け出排水量 Q を用いて、次式のように与えられる。

$$L = aQ^b / 1000 \quad (1)$$

ここで、 L と Q の単位はそれぞれ kg/day、m³/day であり、 a 、 b は事業種別・排水量別に定められた定数¹¹⁾ であり、例えば、TN の場合の値を表-3 に示す。また、面源負荷に関しては、流域内の土地利用状況を市街地、森林、畑、水田の4つに分類し、各々の面積を求める。この土地利用形態別面積に、表-2 に示されている排出負荷原単位を掛ける。また、降雨による負荷に関しても、表-2 中の原単位と面積の積により算出し、市街地、森林、畑、水田からの負荷と加算して面源負荷とする。

なお、生活系負荷に対して用いられている排出負荷原単位は、湖沼水質保全計画で採用されている値であり、小林・平間による汚濁負荷解析⁴⁾ においても用いられている。また、ここでの流達率に関しては、既存の研究¹²⁾ を参考にして、1.0 としている。畜産系負荷に関しては、家畜頭数が少ないために、上述した点源負荷には考慮していない。

(2) 汚濁負荷量の実測値の取得方法

a) 非降雨時における点源負荷量調査

まず、生活系負荷と産業系負荷から構成される点源負荷の面的分布を実測するために、面源負荷の影響が少な

表-4 大堀川河口部(呼塚橋)の点源負荷量に関するGIS解析結果と観測結果

		unit:kg/day		
水質項目		COD	T-N	T-P
原単位法	生活系負荷	400	84	11.6
	産業系負荷	270	286	48.2
	点源負荷合計	670	370	59.8
観測値		714	401	46.9
流達率		1.07	1.08	0.78

く点源負荷が顕著となっていると考えられる非降雨時を対象とした汚濁負荷量調査を実施した。ここでは、図-2 に示されている小流域の汚濁負荷量を計測するために、各小流域の下流端となる樋管もしくは河川内の橋において調査を実施した。観測日は、2001 年 6 月 27 日、10 月 15 日、2002 年 7 月 22 日、と計 3 回とし、各観測時ともに 1 昼夜連続で調査を実施した。測定項目としては、水位、流速、水質項目(濁度、BOD、COD、T-N、T-P、SS)とした。各項目の測定方法の詳細は、二瓶ら⁶⁾ を参照されたい。これらの結果を用いて、各観測での小流域における汚濁負荷量の日平均値を算出する。そのようにして得られた 3 回の観測結果を平均して、16 の小領域の点源負荷の実測値とし、GIS を用いた解析結果と比較する。

b) 年間汚濁負荷量の算出

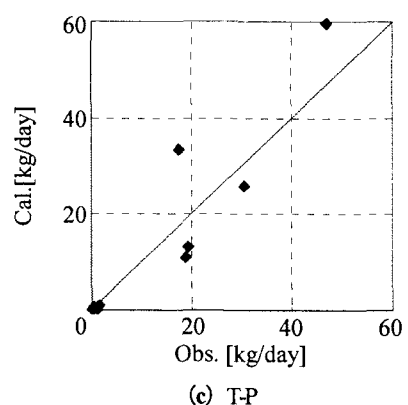
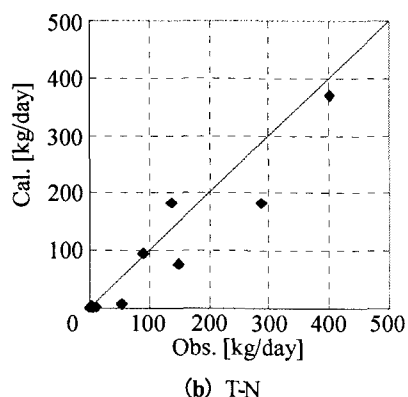
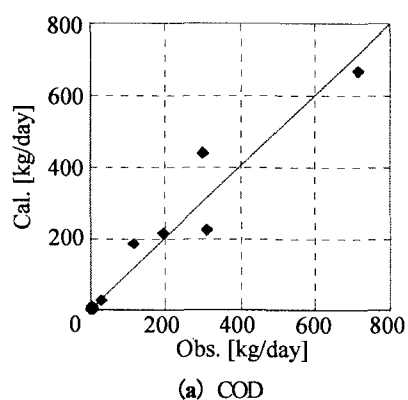
面源負荷を含めた形で流域からの汚濁負荷量の実測値を算出するために、自治体で観測されている観測値等を用いて、年間の汚濁負荷量を算出する。ここでは、解析対象地点を大堀川中流部(昭和橋)とし、千葉県による河川水位(測定間隔:1 時間)と柏市による COD、T-N、T-P(測定間隔:約 2 週間)の実測値に加えて、著者らが別途行っている観測結果⁹⁾ についてデータ解析を行う。解析対象期間は 2000 年 1 月 1 日から 2001 年 12 月 31 日の 2 年間とし、2000 年と 2001 年における年間汚濁負荷量を求める。

具体的な算定手順¹³⁾ としては、まず、水位の実測値と流量観測結果から得られた $H-Q$ カーブを用いて流量の時系列データを算出する。次に、水質汚濁負荷量に関しては、降雨影響の見られない非降雨時には実測水質データと流量の積により求め、降雨時には、著者らが作成した流量-水質負荷量モデル ($L-Q$ 式)⁷⁾ より算出する。

4. 結果と考察

(1) 原単位法による汚濁負荷解析精度の検討

3. (1) において示された原単位法に基づく汚濁負荷量の算定精度について検証するため、3. (2) で示した方法による実測結果と原単位法による解析結果を比



図－3 小流域における汚濁負荷量の現地観測結果と GIS による解析結果の比較

較することを試みる。まず、小林・平間⁴⁾と同様に、最も基本的な算定精度の検証として、流域全域における点源負荷の解析値と実測値を表－4に示す。ここでは、大堀川河口部に位置する呼塚橋（図－1）における非降雨時の汚濁負荷量調査結果と、GISにより得られる生活系・産業系負荷の合計値が示されている。また、表中の流達率は、実測値をGISによる解析値で除したものである。この表より、流達率としては、CODは1.07、T-Nは1.08、TPは0.78となっており、どの水質項目においても実測値と解析値は概ね一致している。また、これらの再現性は、小林・平間の解析結果⁴⁾と同程度であることが分かる。

次に、点源負荷量に関する流域内の面的分布の算定精度を検討するために、雨水排水区に基づいて区分した小

表－5 年間汚濁負荷量の実測値と解析値の比較（大堀川中流部、昭和橋）

		unit:kg/day		
解析値	水質項目	COD	T-N	T-P
	点源負荷	439	183	25.8
	面源負荷	239	107	4.6
	総排出負荷量	678	290	30.4
観測値	水質項目	COD	T-N	T-P
	非降雨時	425	228	34.8
	降雨時	282	89	11.0
	総排出負荷量	707	317	45.8
流達率		1.04	1.09	1.51

流域（図－2）を対象として、現地観測結果とGISによる解析結果を比較したものを図－3に示す。この図においても、表－4の場合と同様に、現地観測結果としては非降雨時に実施された結果を与えている。これらを見ると、全ての水質項目において、現地観測結果と原単位法による解析値が概ね一致していることが分かる。これらの結果より、本論文で用いているGISを用いた汚濁負荷解析による点源負荷の算定精度は、小流域においても良好であることが明らかとなった。

さらに、点源負荷のみならず、面源負荷を含めた形で原単位法の解析精度を検討する。表－5は、3.（2）で述べた大堀川中流部（昭和橋）において算定された年間汚濁負荷量の実測値と、同地点の流域を対象としたGISによる点源・面源負荷の解析結果を示す。ここでの実測値は2000年における年間汚濁負荷量に関する総量及び降雨時と非降雨時別の負荷量を示している。まず、非降雨時における実測値と、GISによる点源負荷量の解析値を比較すると、両者は3つの水質項目とも概ね一致しており、表－4に示した呼塚橋における点源負荷量の結果と類似していることが分かる。一方、面源負荷の解析値と降雨時における汚濁負荷量の実測値を比べると、TPを除いて、両者は概ね一致していることが分かる。このTPに関する実測値と解析値に違いが生じた理由としては、面源負荷を算出する際に用いた排出負荷原単位の適用性や実測データを算出する際に用いている流量－水質負荷量モデル⁷⁾の精度の問題などが挙げられ、今後検討すべき課題である。また、点源負荷と面源負荷の合計値と年間汚濁負荷量の実測値に関して着目すると、実測値を解析値で除した値である流達率としては、CODは1.04、T-Nは1.09、TPは1.51となっている。このようにTPに関しては、上述した面源負荷量の結果を反映して解析値と実測値にやや差が生じているものの、T-NやCODについては両者は概ね一致している。

以上の結果をまとめると、TPに対する面源負荷に関する解析精度は実測値と合わせて今後検討する必要があるものの、その他の面源負荷量や点源負荷量に対する解析

表一六 1991年度⁴⁾と2002年度の汚濁負荷解析結果の比較

		unit:kg/day	
排出汚濁負荷量	項目	2002年度	1991年度
生活系負荷	COD	402.2	1794
	T-N	84.67	591.0
	T-P	11.67	71.70
産業系負荷	COD	270.6	163.0
	T-N	287.8	143.0
	T-P	48.21	80.80
面源負荷	COD	416.7	280.0
	T-N	183.8	104.0
	T-P	8.031	3.200

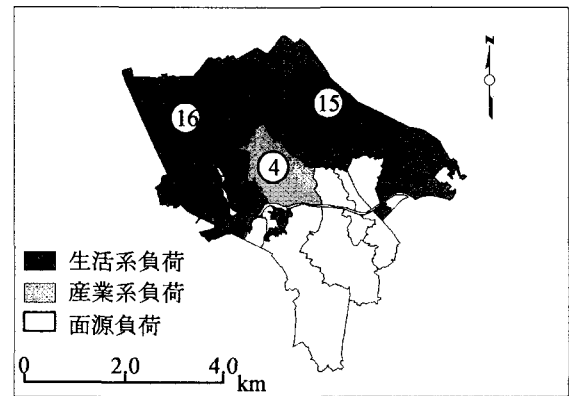
結果は、十分な精度を有していることが示された。

(2) 1991年度と2002年度の汚濁負荷量の比較

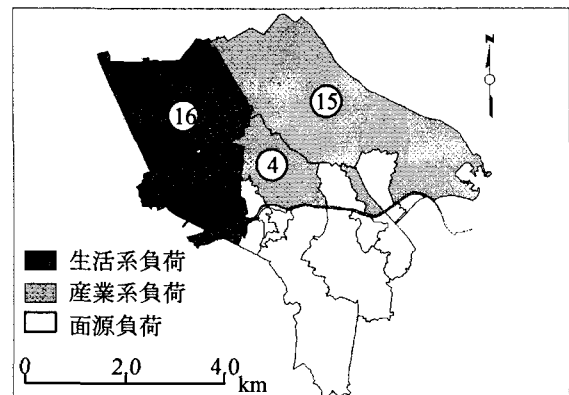
前節で記述した最近の大堀川流域における汚濁負荷特性に関する結果と過去の結果を比較するために、1991年度を対象とした汚濁負荷解析結果⁴⁾と本研究により行われた2002年度の解析結果を表一六に示す。ここでは、大堀川流域全域に対する点源負荷と面源負荷に関して、3つの水質項目ごとに示されている。まず、生活系負荷に着目すると、3つの水質項目共に、2002年度の結果は1991年度の値よりも大幅に減少しており、CODは77%、T-Nは85%、T-Pは84%削減されていることが分かる。この期間中では、表一に示しているように、下水道整備率が55%から84%に向上しており、上述した生活系負荷の大幅な削減は手賀沼流域で実施されている下水道整備対策の効果が明確に現れたためであることが分かる。

一方、産業系負荷に関しては、増加傾向にある水質項目(COD、T-N)や減少傾向の項目(T-P)があることが分かる。また、産業系負荷と生活系負荷を比較すると、1991年度には、T-Pに関しては産業系負荷が生活系負荷よりもわずかに大きかったものの、T-NやCODに関しては生活系負荷が産業系負荷を大幅に上回っている。それに対して、2002年度の場合には、産業系負荷は生活系負荷と比べてやや下回る程度(COD)が大幅に上回っている(T-N、T-P)ことが分かる。これは、上述したように、下水道整備率の向上に伴って生活系負荷が大幅に削減されたためである。

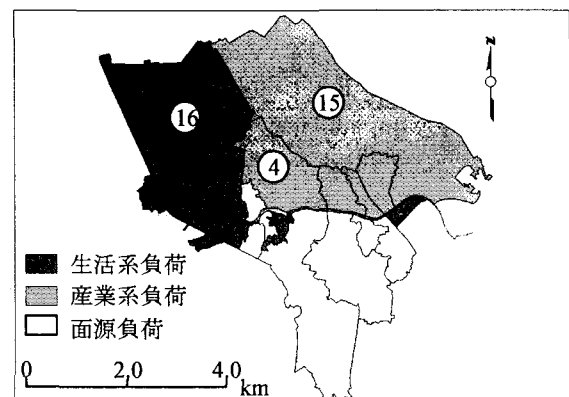
面源負荷に関しては、1991年度には、全ての水質項目において生活系負荷よりも小さかったものの、2002年度においては両者は同程度の大きさになっている。なお、1991年度と2002年度の面源負荷を比較すると、2002年度の結果の方が1991年度の値よりも大きくなっている。これは、1991年度を対象とした汚濁負荷解析⁴⁾では、面源負荷として降雨の分が反映されていなかったのに対して、



(a) COD



(b) T-N



(c) T-P

図一四 各小流域における排出負荷量の支配要因

本論文では、降雨の分を表一二の排出負荷原単位を用いて取り込んでいるためである。

以上の結果をまとめると、1991年度には生活系負荷が産業系負荷や面源負荷よりも顕著であったものの、2002年度では、生活系負荷の大幅な削減により、全負荷量に対する産業系負荷や面源負荷の寄与が相対的に増加している傾向となっていることが分かる。このようなことから、大堀川流域における汚濁負荷削減策に関しては、下水道整備状況の改善などの生活系負荷の削減策をこれまでと同様に推進していくとともに、産業系負荷・面源負荷削減に重点をおいた対策を実施していく必要がある。

(3) 流域内における汚濁負荷発生要因の検討

各小流域における汚濁負荷量に対する支配要因を調べるために、GISによる解析結果を用いて、各小流域において生活系負荷、産業系負荷、面源負荷の中で最も大きい項目を図-4に示す。図中には、COD、T-N、TPに関する結果が図示されている。これを見ると、支配的な負荷量が全ての水質項目において同一の小領域と、水質項目により変化する小領域が存在することが分かる。

前者の支配的な負荷要因が同一なケースに着目すると、小流域⑩では生活系負荷が、小流域④では産業系負荷が、大堀川右岸側の小流域の大部分では面源負荷がそれぞれ顕著となっていることが分かる。この中で小流域⑩においては、図-1に示されているように、下水道未整備地域が存在しているために、生活系負荷が卓越しているものと考えられる。また、小流域④における産業系負荷の大部分は、工業用ゴム製品製造をしている1つの事業所からの負荷であり、1991年度における汚濁負荷解析⁴⁾においても、そこでの負荷量の大きさに関しては指摘されている。さらに、大堀川右岸側における小流域では、図-1に示されているように下水道整備も進んでおり、汚濁負荷量の大きい規制事業所も見られないために、汚濁負荷の中で面源負荷が顕著になったものと考えられる。

次に、水質項目により支配要因が変化する小流域の代表例として小流域⑩では、CODに関しては生活系負荷が、T-NとT-Pに関しては産業系負荷がそれぞれ顕著となっている。これは、図-1に示すように下水道未整備地区を一部含んでいることと、産業系負荷として肉製造用工場と飲料用工場からの負荷量が大きいためである。

以上のように、生活系負荷が顕著となる小流域は、下水道未整備地域を含む小流域⑩と⑥であり、産業系負荷が顕著となるのは負荷量の大きい工場を含む小流域④と⑮である。この小流域④と⑮における産業系負荷量の和が全ての産業系負荷量に占める割合は、CODでは85%、T-Nでは81%、T-Pでは83%といずれも8割を越えており、流域内における産業系負荷がこの二つの小流域に集中していることが分かる。また、面源負荷が卓越している小流域は、下水道整備状況が良好で、かつ、顕著な負荷量を発生する事業所も存在していないところであることが分かる。

5. 結論

手賀沼に流入する大堀川の流域を対象として、GISを用いた汚濁負荷解析を行い、大堀川流域における汚濁負荷量の実態とその発生要因などについて検討を行った。そこで得られた主な結論は以下のとおりである。

(1) GISに基づく汚濁負荷量の解析精度を検証するため

に、汚濁負荷量調査等により得られた実測値と解析値を比較することを試みた。その結果、点源負荷量に関しては、GISによる解析結果は、流域全域や雨水排水区に基づいて分けられた小流域毎においても、観測結果と良好に一致していることが示された。また、面源負荷量については、T-Pに関しては解析値と実測値に若干違いが見られたものの、T-NやCODに関しては両者は良好に一致しており、本論文で用いている汚濁負荷解析結果が概ね妥当であるものと考えられる。

(2) 1991年度と2002年度における汚濁負荷解析結果を比較したところ、1991年度では生活系負荷が顕著であったのに対して、2002年度では、近年の下水道整備率の向上に伴って、全負荷量に対する産業系負荷や面源負荷の寄与が相対的に増加していることが明らかとなった。

(3) 全汚濁負荷量に対する生活系、産業系、面源負荷の寄与を小流域毎に調べたところ、生活系負荷が顕著となる小流域は下水道未整備地域を含む小流域であること、流域内における産業系負荷が二つの小流域(④、⑮)に集中していることが示された。また、面源負荷が卓越している小流域は、下水道整備率が高く、かつ、顕著な負荷量を発生する事業所も存在していないところであることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 山田安彦, 白鳥孝治, 立本英機: 印旛沼・手賀沼 一水環境への提言一, 古今書院, pp.1-167, 1993.
- 2) (社)日本水環境学会編: 日本の水環境 3 関東・甲信越編, 技報堂出版, pp.153-166, 2000.
- 3) 本橋敏之助, 立本英機: 湖沼・河川・排水路の水質浄化 一千葉県の実施事例一, 海文堂, pp.1-128, 1997.
- 4) 小林節子, 平間幸雄: 湖沼の水環境保全のための流域総合管理手法, 水環境学会誌, Vol.19, No.2, pp.121-131, 1996.
- 5) 二瓶泰雄, 大竹野歩, 河嶋祐太, 酒井耕介, 増永良, 戸簾幸嗣, 出口浩: 降雨時における手賀沼流域の水環境特性に関する現地観測, 河川技術論文集, Vol.7, pp.187-192, 2001.
- 6) 二瓶泰雄, 大竹野歩, 菊間弘和, 藤本美樹: 手賀沼流域における汚濁負荷特性に関する現地観測, 河川技術論文集, Vol.8, pp.517-522, 2002.
- 7) 二瓶泰雄, 大竹野歩, 小久保武: 降雨時における手賀沼流入河川の水質負荷特性, 土木学会論文集, 2004(投稿予定).
- 8) 例えば, 高岸且: GISを用いた琵琶湖保全のための環境解析, 水環境学会誌, Vol.23, No.9, pp.553-562, 2000.
- 9) 柏市: 柏市統計書 平成13年度版, pp.16-123, 2001..
- 10) 千葉県水質保全課: 水質汚濁防止法に基づく特定事業場一覧, pp.139-169, 2002.
- 11) 千葉県水質保全課: 湖沼水質保全特別措置法に基づく規制基準のてびき, 2002.
- 12) 国松孝男, 村岡浩爾: 河川汚濁のモデル解析, 技報堂出版, pp.1-266, 1989.
- 13) 小久保武, 二瓶泰雄: 都市流域における流出率と汚濁負荷量の把握, 第58回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.369-370, 2003.

(2003.9.30 受付)