〈論 文〉

湖沼の水環境保全のための流域総合管理手法

小林 節子* 平間 幸雄*

Method of Total Management of Catchment Area
for Water Environment Preservation of Lakes

Setsuko KOBAYASHI* and Yukio HIRAMA*

* The Chiba Prefectural Laboratory of Water Pollution, 3-5-1, Inage-Kaigan, Mihama-ku, Chiba 261 Japan

Abstract

Water quality deterioration in lakes is caused by social and economic factors. For future water environment preservation it is necessary to analyze integratedly the constituents of the catchment area and to structurally remove the cause of water pollution. The method of total management of the catchment area was studied here about Lake Teganuma.

The catchment area of Lake Teganuma was divided into 168 small sections, and multiple relationships among information such as land utilization, population density, extension rate of sewerage and effluent load of chemical oxygen demand, total phosphorus and total nitrogen were examined.

High multiple relationships with correlation coefficients of 0.924~0.997 were obtained among the effluent load density of chemical oxygen demand, total phosphorus and total nitrogen, the population density using onsite small scale nightsoil treatment facilities and those using nightsoil treatment facilities. And high multiple relationships with correlation coefficients of 0.630~0.867 were also obtained among the effluent load density, the total population density and the extension rate of sewerage. These reflected the fact that the major constituent of effluent load to Lake Teganuma is domestic waste water. As the result, sections where water purification measures should be preferentially taken could be grasped.

In order to solve this problem fundamentally, it is necessary in future to manage synthetically the catchment area, that is, to review the present sewerage system planning and the present land utilization planning including city planning.

Key words: basin management, land utilization, population density, effluent load, Lake Teganuma

1. はじめに

これまでの湖沼の水質保全は、どちらかと言うと、環境基準点の水質改善のみに目が向けられており、また、実質的な浄化対策は点的汚濁源に対する規制を中心に行われてきており、流域構造にまで踏み込んだ施策はほとんど行われてこなかった。湖沼の水質悪化は、

流域の社会活動、経済活動の帰結として引き起こされたものであることから、水質保全を図るためには、長期的には流域構造を総合的に解析し、汚濁の原因を構造的に取り除くことが必要である。

この流域総合管理は、湖沼の水環境の改善を流域全体の中で位置付けて解決しようとするものであり、流域の身近な河川や水路の水環境を回復する中で、湖沼

* 千葉県水質保全研究所 〒261 千葉市美浜区稲毛海岸 3-5-1

の水環境の回復も図ろうとするものである。このような方向は、これからの地域づくりにとっても重要な意味をもつものと思われ、このための手法の確立が必要とされている。

全国湖沼の中で水質がCODでワースト1である手賀沼は、水面積650ha、水容量560万 m^3 、平均水深0.9mの小さい浅い湖沼であるが、首都近郊に残る数少ない美しい自然があり、休日には多くの人々が沼辺を楽しみにやって来る。手賀沼は水質汚濁が一気に進んだ1972年から、浮葉植物や沈水植物がほとんどなくなり、同時に魚類や水鳥類も激減した経緯を持つ¹⁾。湖沼が地域の人々と共にあるためには、水質改善を図り、それと共に豊かな生態系を回復し、また、湖畔林などの湖沼景観の保全を図っていくことが必要であり、これらは、これからの湖沼の環境保全の必須条件であると考えられる。

手賀沼の水質改善は、湖沼水質保全計画の下で進め

られてきており^{2),3)}、第一期計画(1986~1990年)では、それ以前のCOD約 $24\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ から約 $18\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ へと低下し、一定の成果は得られたものの、第二期計画(1991~1995年)では横ばいの状況にある。手賀沼の水質改善の行政目標としては、短期的にはアオコの大量発生を抑制することであり、中期的には現在のCOD約 $18\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ から比較的豊かな生態系がみられた昭和40年代中頃のCOD $10\sim 11\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ へ下げることであり、そのための浄化対策が検討され始めている⁴⁾。このような中期的な目標をもちつつ、水辺環境の回復を図り、さらに、環境基準(COD $5\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)へ近づけるためには、長期的には手賀沼流域を総合的に管理していくことが必要である。

流域管理手法については、福島⁵⁾は霞ヶ浦流域を対象として、計算機を用いた流域管理支援システムの開発を行っており、原沢⁶⁾はこのシステムに基づいて分散度、開発度等の流域指標を導入した管理手法を

Fig. 1 The catchment area of Lake Teganuma
I, II, III, IV: Catchment area of Ohori River, Otsu River, Someiri-Otoshi River and direct inflowing regions, respectively
(Numerical values in the figure are code numbers.)

検討している。手賀沼における流域管理も、将来的には計算機による支援システムを構築し、活用に向かう計画であるが、ここでは、その前段階として、手賀沼を対象に小区域毎の流域情報の解析を行い、今後の流域管理のあり方について考察した。

2. 方 法

2.1 流域の字（あざ）区分

小区域毎の流域情報を得るため、手賀沼流域をⅠ：大堀川流域，Ⅱ：大津川流域，Ⅲ：染井入落流域，Ⅳ：手賀沼直接流入域の4流域に区分し、大堀川流域を70，大津川流域を71，手賀沼直接流入域を26の字に区分した（Fig. 1）。図中の数字は字コードである。なお、沼南町については字別のデータが得られなかったため、流域区分のみとなっている。また、ここで対象とした手賀沼流域は、環境基準点の手賀沼中央がある水域（通称 本手賀沼）へ流入する流域とし、下手賀沼へ流入する流域は除外した。

2.2 フレームおよび排出負荷量

2.2.1 フレーム

区分した字毎に以下のフレームを関連の市・町から収集した。対象年次は1991年度である。

- ・土地利用形態別面積……水田，畑，山林，市街地の各面積
- ・生活排水処理形態別人口……流域下水道，公共下水道，合併処理浄化槽，単独処理浄化槽，し尿処理場の各使用人口

水道，合併処理浄化槽，単独処理浄化槽，し尿処理場の各使用人口

- ・家畜飼育頭数……牛，馬，豚の各頭数
- ・事業場……規制特定事業場，未規制特定事業場の業種および事業場数
- ・下水道普及率……流域下水道，公共下水道の普及率

2.2.2 排出負荷量の算出方法

湖沼水質保全計画では、汚濁負荷発生源を生活系、産業系（事業場、畜産）、面源（水田、畑地、山林、市街地、降雨）の三つに区分している。このうちの生活系および畜産の発生負荷原単位だけが環境庁から統一原単位として提示されており、生活系は（単位は $\text{g} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{日}^{-1}$ ），COD29.3（し尿10.1，雑排水19.2），全窒素12.0（し尿9.0，雑排水3.0），全リン1.17（し尿0.77，雑排水0.40）であり、畜産は（単位は $\text{g} \cdot \text{頭}^{-1} \cdot \text{日}^{-1}$ ），牛・馬はCOD530，全窒素290，全リン50，豚はCOD130，全窒素40，全リン25である。

排出負荷原単位はそれぞれの自治体が決めており、自治体の施策や湖沼の自然条件等で異なっている。Table 1 にここで使用した排出負荷原単位を示した。これらは湖沼水質保全計画で用いられているものである。

排出負荷量の算出は、生活系は合併処理浄化槽，単独処理浄化槽およびし尿処理場使用人口については、

Table 1 Unit effluent load used in this study

Pollutant sources	Detailed pollutant sources		COD	T-N	T-P
Domestic waste water ($\text{g} \cdot \text{person}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	Onsite domestic wastewater treatment facilities		2.7	3.7	0.55
	Onsite small scale nightsoil treatment facilities		21.5	5.3	0.83
	Nightsoil treatment facilities		19.2	3.0	0.40
	Public sewage system Drainage basin sewage system		Counted as effluent load from facilities Counted as effluent load from facilities		
Industrial waste water	Livestock ($\text{g} \cdot \text{head}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	Cattle, Horse	10.6	5.8	1.00
		Swine	4.4	1.4	0.85
	Factories ($\text{g} \cdot \text{factory}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	Specified factories (regulated)	Effluent water quality of on-the-spot inspection $\times$ notified effluent water volume		
		Specified factories (not regulated) General factories	Effluent water quality classified by industrial sectors $\times$ notified effluent water volume Effluent water quality of onsite domestic wastewater treatment facilities $\times$ effluent water volume of general factories		
Non-point source ($\text{g} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	Paddy field		119	32.7	3.33
	Plowed field		33.1	69.2	0.86
	Forest		34.9	5.8	0.80
	Urban district		103	30.2	1.53

Table 1 の原単位に字毎の生活排水処理形態別人口を乗じて求めた。この中でし尿処理場使用人口のし尿分は、流域外のし尿処理場からの排出負荷となるため、**Table 1** 中の原単位は雑排水のみのものである。また、ここで、公共下水道とは、市が終末処理場をもつ施設を指し、排出負荷量は処理場排水質に排水量を乗じて求め、終末処理場のある字へ排出されるとした。同様に、流域下水道使用人口分の負荷も、終末処理場からの排出としたが、この場合は、手賀沼流域外の利根川への排出となるため、手賀沼への排出負荷量はゼロとなる。

畜産の排出負荷量は **Table 1** の原単位に字毎の各飼育頭数を乗じて求めた。事業場からの排出負荷量は、字毎の各事業場について排水水質に排水量を乗じて求めた。この中で規制特定事業場については、立ち入り検査の排水水質の実測データがある場合には、1991年度以前で最も新しい数値を用い、実測データがない場合は、未規制特定事業場の場合と同様に、業種別排水水質を用いた。一般事業場については合併処理浄化槽の排水水質を用いた。

面源については **Table 1** の原単位に字毎の土地利用形態別面積を乗じて求めた。

2.3 原単位法による排出負荷量と実測による流入負荷量

湖沼水質保全計画では原単位法で算出した排出負荷量から、流域対策による負荷削減量を差し引いた負荷

量全部が湖沼へ流入するとしている。すなわち、年間を通じて流達率を1としている。藤村・藤本⁷⁾による降雨時を含めた詳細な実測流入負荷量の解析結果によると、実測流入負荷量・(原単位法で算出した排出負荷量－流域対策による負荷削減量)⁻¹で表される年平均流達率は、大堀川でCOD0.95, 全窒素1.24, 全リン1.08であり、大津川でCOD0.69, 全窒素1.13, 全リン0.83の結果が得られている。これらの値からみると、原単位法で算出した排出負荷量と降雨時を含めた実測流入負荷量は、オーダーとしてよく一致していると言える。流域対策による負荷削減量は全排出負荷量に比べて小さいことから⁷⁾, 2.2で算出した字毎の排出負荷量の大きさは、概略、年間平均として手賀沼へ流入する負荷とみなしてもよいと考えられる。

従って、ここでは、原単位法で算出した排出負荷量が、実測の流入負荷量を表しているものとして解析を行った。

3. 結果と考察

3.1 字別の流域情報の解析

3.1.1 土地利用状況

4 流域の土地利用形態別面積の概要を **Table 2** に示した。

全流域面積の79%を占める大堀川流域と大津川流域についてみると、大堀川流域は流域面積3,040haであり、そのうち市街地が75%, 畑地が13%, 山林が9%,

Table 2 Outline of frames and effluent load in the catchment area of Lake Teganuma (1991)

Frames		Sub-catchment area	Ohori River	Otsu River	Someiri-Otoshi	Direct inflowing regions
Population (persons)			154,604	198,476	3,638	40,460
Population density (persons・ha ⁻¹)			50.9	46.6	4.5	29.2
Extention rate of sewerage (%)			55	33	0	59
Land utilization (ha)	Paddy field		79	273	109	93
	Plowed field		394	955	167	61
	Forest		275	520	239	90
	Urban district		2,286	2,516	301	1,143
Effluent load (kg・d ⁻¹)	COD	Domestic waste water	1,794	2,650	74	266
		Industrial waste water	163	80	16	6
		Non-point source	280	290	58	89
	T-N	Domestic waste water	591	683	16	73
		Industrial waste water	143	73	10	6
		Non-point source	104	133	26	33
	T-P	Domestic waste water	71.7	104.1	2.3	8.9
		Industrial waste water	80.8	17.2	1.9	1.0
		Non-point source	3.2	3.9	1.2	1.4

Fig. 2 Area ratio of urban district (the upper part) and plowed field (the lower part) in the catchment area of Ohori River

水田が3%であり、市街地が圧倒的に多い。従って、Fig. 2に示した字別の市街地面積率をみると、75～100%の字が多く、大部分が50%以上である。これに対して、字別の畑地面積率は(Fig. 2)、25～50%の字が流域の縁に散在しているが、中央部は0～25%となっている。

大津川流域は流域面積4,259haであり、そのうち市街地が59%、畑地が23%、山林が12%、水田が6%であり、市街地が半分以上を占めるが、大堀川流域と比べると低い。字別の市街地面積率をみると、50%以上の字がほぼ半分を占めているが、大堀川流域と比較すると、25～50%の字が多くなっている。これに対して、字別の畑地面積率は、上流部から中流部へかけて比較的高く、50～75%と25～50%の字が多いが、下流部では0～25%の字が多くなっている。

手賀沼の水質はこのような2流域の土地利用状況に大きく影響されていると考えられる。

3.1.2 排出負荷量の解析

(1) 生活系、産業系および面源の排出負荷量

4流域のCOD、全窒素および全リン排出負荷量の概

要をTable 2に示した。手賀沼へ排出される負荷量は、大堀川流域と大津川流域を合わせると、CODで91%、全窒素で91%、全リンで94%を占めている。また、汚濁源別では生活系がCODで83%、全窒素で72%、全リンで63%と高いが、全リンは産業系も34%と比較的高い比率を占めている。このようなことから、手賀沼の浄化対策は、流域対策では大堀川と大津川が、発生源対策では生活排水対策が最も重要であるが、その他リンについては産業系排水の対策も要となる。

次に、各字の排出負荷量の特徴を明らかにするため、各字の総排出負荷量のうち、①生活系負荷が最も多い字、②産業系負荷が最も多い字、③面源負荷が最も多い字の三タイプに分類し、各字の人口密度と排出負荷量密度(単位面積当たりの排出負荷量)との関係を検討した。①生活系負荷が最も多い字の数は、CODで109、全窒素で97、全リンで98、②の産業系負荷が最も多い字は、CODで2、全窒素で4、全リンで10、③の面源負荷が最も多い字は、CODで57、全窒素で67、全リンで60であった。

大堀川流域について、人口密度とCOD排出負荷量密度との関係をFig. 3に、全リン排出負荷量密度との関係をFig. 4に散布図として示した。また、大津川流域についても同様にFig. 5, Fig. 6に示した。これらの図において、各点と原点とを結ぶ直線の傾きは、その字における人口1人当たりの生活系、産業系、面源負荷を合計した総排出負荷量の原単位を表すことになる。

図中のline1からline3は、各々、単独処理浄化槽使用、し尿処理場使用および合併処理浄化槽使用の場合の排出負荷原単位(Table 1)を傾きとし、原点を通る直線を描いたものである。なお、一部の原単位については、湖沼水質保全計画との整合を図るため、Table 1の値を補正して用いた。これらは仮想的なケースとして、負荷発生源が単独処理浄化槽使用人口のみの場合(line1)、し尿処理場使用人口のみの場合(line2)、および、合併処理浄化槽使用人口のみの場合(line3)の人口密度と排出負荷量密度との関係を表している。なお、流域下水道使用人口のみの場合はX軸となる。

従って、これらの図において、line1からX軸へ近づくほど、排出負荷原単位が小さくなることから、生活排水対策が進んでいるとみることができる。

①の生活系負荷が最も多い字についてみると、Fig. 4の字コード2, 9を除きline1とX軸との間の領域に分布している。line1とY軸の間の領域にある字コード9は公共下水道終末処理場排水が放流されている字であり、また、字コード2は生活系負荷に加え産業系負荷も高い字である。このような特殊の字は個別の対策

Fig. 3 Relationship between the population density and the effluent load density of chemical oxygen demand in the catchment area of Ohori River
□ : Domestic waste water is the largest constituent of effluent load in the section.

● : Industrial waste water is the largest constituent of effluent load in the section.

× : Non-point source is the largest constituent of effluent load in the section.

Line 1, line2 and line3 are assumed cases that all effluent load in the section are caused by onsite small scale nightsoil treatment facilities, nightsoil treatment facilities and onsite domestic wastewater treatment facilities, respectively.

Fig. 4 Relationship between the population density and the effluent load density of total phosphorus in the catchment area of Ohori River. Line1 ~line3 and the symbol marks are same as in Fig. 3.

Fig. 5 Relationship between the population density and the effluent load density of chemical oxygen demand in the catchment area of Otsu River. Line1~line3 and the symbol marks are same as in Fig. 3

Fig. 6 Relationship between the population density and the effluent load density of total phosphorus in the catchment area of Otsu River. Line1 ~line3 and the symbol marks are same as in Fig. 3

が必要とされるが、その他の字については、生活排水対策の実施に当たっては、line1に近く、しかも人口密度が高い字を優先して行うのが効果的であると言える。

次に、②の産業系負荷が最も多い字について、line1とY軸との間に分布している字をみると、Fig. 3の字コード47、Fig. 4の字コード36、43、46、47、49の大堀川流域であり、Figs. 5、6の大津川流域ではみられなかった。この中でCODと全リン排出負荷量密度が共に高い字コード47は、飲料製造工場の負荷によるものである。また、全リン排出負荷量密度が特に高い字コード36と43は、合計で産業系リン負荷の5割強を占

めており、両字共に負荷の大部分はアルマイト加工業の1事業場のみによるものである。アルマイト加工業の排水処理は、今のところ技術的に困難とされており、他の業種よりゆるい排水基準が設定され、長い猶予期間が与えられているが、手賀沼の富栄養化を防止するために、早期の対策が望まれる。

③の面源負荷が最も多い字は、全体として排出負荷量密度が小さく、X軸近傍に分布している。この中で人口密度が低い字は、もともと生活系負荷が小さいが、一方、人口密度が高い字は下水道普及率が高いため、相対的に面源負荷の占める割合が最も高くなったものである。

なお、全窒素排出負荷量と人口密度との関係については、line1とY軸との間に位置する字は、大堀川流域では①の生活系負荷が最も多い9、②の産業系負荷が最も多い8、43、47、49であり、大津川流域ではみられなかった。

(2) 生活排水処理形態別人口密度と排出負荷量密度との関係

手賀沼の浄化対策は生活排水対策が要となることから、生活系負荷の状況を詳しく把握するため、Fig. 3～Fig. 6の人口密度を生活排水処理形態別人口密度に分け、各排出負荷量密度との関係を検討した。

Table 3に大堀川流域と大津川流域について、各字の生活排水処理形態別人口密度とCOD、全窒素、全リンの各排出負荷量密度との相関係数を示した。なお、データ処理に当たっては、産業系負荷が最も大きい字(36、43、46、47、49)、公共下水道終末処理場のある字(9)、および、人口ゼロの字(8、41、47、48、100、214)のデータを除外した。

COD、全窒素、全リンの各排出負荷量密度との相関が特に高い項目は、単独処理浄化槽使用人口密度であり、相関係数は0.918～0.996であった。相関係数の値が0.5以上の比較的高い項目としては、屎尿処理場使用人口密度が正の相関、大津川流域においては流域下水道使用人口密度が負の相関を示した。公共下水道および合併処理浄化槽の各使用人口密度との相関が低かったのは、使用人口割合が低いためである。単独処理浄

Table 3 Correlation coefficients of regression lines between population density and effluent load density

Effluent load density Population density	COD		T-N		T-P	
	Ohori River	Otsu River	Ohori River	Otsu River	Ohori River	Otsu River
Drainage basin sewage system	-0.270	-0.520	-0.301	-0.586	-0.298	-0.585
Public sewage system	-0.127	-	-0.143	-	-0.142	-
Onsite domestic wastewater treatment facilities	0.206	-0.011	0.446	0.293	0.436	0.284
Onsite small scale nightsoil treatment facilities	0.996	0.987	0.945	0.918	0.937	0.918
Nightsoil treatment facilities	0.841	0.592	0.794	0.542	0.783	0.522

Table 4 Multiple regression analysis

Pollutants	Sub-catchment area	Multiple regression equations	Multiple correlation coefficients
COD	Ohori River	$L=29.9^{**}I+26.2^{**}N+104$	0.997**
	Otsu River	$L=25.5^{**}I+17.8^{**}N+99.1$	0.997**
T-N	Ohori River	$L=8.16^{**}I+55.9$	0.945**
	Otsu River	$L=6.38^{**}I+4.09^{**}N+53.9$	0.927**
T-P	Ohori River	$L=1.28^{**}I+3.56$	0.937**
	Otsu River	$L=0.996^{**}I+0.511^{**}N+4.37$	0.924**

L : Effluent load density ($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$)

I : Population density using onsite small scale nightsoil treatment facilities ($\text{persons}\cdot\text{ha}^{-1}$)

N : Population density using nightsoil treatment facilities ($\text{persons}\cdot\text{ha}^{-1}$)

** Significant at $P=0.01$, * Significant at $P=0.05$

化槽使用および屎処理場使用の場合の相関が高かったのは、いずれも未処理雑排水負荷が高いためであり、特に単独処理浄化槽使用の場合は未処理の雑排水に加えて、処理が良好とは言えない浄化槽排水負荷が加わり、また、使用人口割合が大堀川流域35%、大津川流域44%と高いためであると考えられる。

次に、上記の各排出負荷量密度と生活排水処理形態別人口密度との関係を要約するため、排出負荷量密度を目的変数、生活排水処理形態別人口密度を説明変数として重回帰分析を行った。結果は、説明変数として単独処理浄化槽使用人口密度とし屎処理場使用人口密度の組合せを選んだ場合、Table 4 に示すように偏回帰係数は1%または5%水準で有意、重相関係数は1%水準で有意となり、重相関係数は0.924~0.997と高い値が得られ、各排出負荷量密度をよく説明できた。

なお、Table 4 に示したように、大堀川流域については全窒素と全リンの各排出負荷量密度は、単独処理浄化槽使用人口密度のみで説明される結果となった。これは、全窒素および全リンの汚濁負荷原単位は、雑排水よりも尿の方が大きい、屎処理場使用の場合は尿分の負荷は屎処理場からの排出になり、各字の負荷量とはなっていないこと、また、大堀川流域は屎処理場使用人口割合が8%と低いためであると考えられる。

以上の関係は、これまでに明らかになっている手賀沼流域の排出負荷量の実態をよく反映していると言え、手賀沼の浄化は未処理の雑排水と単独処理浄化槽排水の対策いかににかかっていることが確認できた。

3.1.3 下水道普及率、人口密度および排出負荷量密度の解析

(1) 下水道普及率、人口密度および排出負荷量密

度の分布

未処理の雑排水と単独処理浄化槽排水による負荷の削減対策として、合併処理浄化槽の設置については、手賀沼流域は大部分が下水道計画区域であるため、急速な普及は望めないことから、手賀沼の浄化は流域下水道の進捗いかに依存していると言える。そこで、ここでは、字別の下水道普及率、人口密度および排出負荷量密度との関係を検討した。ここで、下水道普及率とは(流域下水道使用人口+公共下水道使用人口)・(全人口)⁻¹である。なお、公共下水道は将来は全部が流域下水道へ接続の予定である。

Table 2 に人口、人口密度および下水道普及率の概要を示した。流域総人口は約40万人であり、人口密度は大堀川は50.9人・ha⁻¹、大津川は46.6人・ha⁻¹であり、これらは霞ヶ浦の4.8人・ha⁻¹、琵琶湖の3.0人・ha⁻¹と比較すると、いかに高いかが分かる。

Fig. 7 には大堀川流域について、字別の人口密度(人・ha⁻¹)、下水道普及率(%), COD および全リンの各排出負荷量密度($\text{kg}\cdot\text{日}^{-1}\cdot 100\text{ha}^{-1}$)を示した。このように、字情報を地図上に表示することにより、各情報間の関係、各字と河川との位置関係、対策を優先すべき字などを視覚で読み取ることができる。

Fig. 7 から、大堀川流域では人口密度が最も高い区域が南側を流れる本川水系の上流部と中流部の2カ所、北側を流れる支川水系の1カ所にまとまって存在している。これに対して下水道普及率が高い(75~100%)区域は、必ずしも高人口密度の区域と重なっておらず、その結果、COD 排出負荷量密度および全リン排出負荷量密度の高い区域が残っている。なお、全窒素排出負荷量密度についても同様なことが言えた。

Fig. 7 The population density, the extension rate of sewerage and the effluent load density of chemical oxygen demand and total phosphorus (Numerical values in the figures are code numbers.)

COD, 全窒素, 全リンのいずれの排出負荷量密度階級も最も高い字は, 本川水系で字コード 3, 4, 9, 47, 201, 202, 207, 支川水系で 43, 46, 47, 103 であることが読み取れた。浄化対策の実施に当たっては, これらの字を優先して行うのが効果的であると言える。

(2) 下水道普及率, 人口密度および排出負荷量密度の関係

Fig. 7 でみられた各排出負荷量密度と人口密度および下水道普及率との関係を要約するため, 排出負荷量密度を目的変数, 人口密度と下水道普及率を説明変数として重回帰分析を行った。なお, データ処理に当たっては, 3.1.2 と同様に一部の字データを除外した。

結果は, Table 5 に示すように偏回帰係数および重回帰係数共に危険率 1% で有意となり, 重回帰係数は大堀川流域では 0.630~0.675 と比較的高い値が得られ, 大津川流域では 0.786~0.867 となり高い値が得られた。このように, COD, 全窒素, 全リンの各排出負

Table 5 Multiple regression analysis

Pollutants	Sub-catchment area	Multiple regression equations	Multiple correlation coefficients
COD	Ohori River	$L = 2.80^{**}T - 11.4^{**}S + 975$	0.630**
	Otsu River	$L = 10.1^{**}T - 16.8^{**}S + 722$	0.786**
T-N	Ohori River	$L = 0.815^{**}T - 3.46^{**}S + 296$	0.675**
	Otsu River	$L = 2.91^{**}T - 4.98^{**}S + 211$	0.867**
T-P	Ohori River	$L = 0.125^{**}T - 0.531^{**}S + 40.6$	0.659**
	Otsu River	$L = 0.442^{**}T - 0.763^{**}S + 28.4$	0.863**

L : Effluent load density (g · d⁻¹ · ha⁻¹)

T : Total population density (persons · ha⁻¹)

S : Extension rate of sewerage (%)

** Significant at P=0.01

荷量密度は, 人口密度および下水道普及率でよく説明できた。

このことは, 手賀沼への排出負荷量を削減するため

には、人口密度を減らすこと、あるいは、下水道普及率を上げることが不可欠であることを示している。

3.2 流域総合管理の今後の方向

手賀沼の水質汚濁の原因は、過度の市街地化：高人口密度：生活排水負荷の増大：低い下水道普及率にあることは、これまでも明らかであるが、今回の字別の流域情報の解析から、これらの関係がさらに明確に把握できた。

手賀沼の水質改善の中期目標である昭和40年代中頃のCOD $10\sim 11\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ を早期に実現する手立てとして、1995年度完成予定の北千葉導水事業に加え、リン除去施設の設置が検討されており、これらが実施されれば、中期目標が達成できると予測されている^{4),8)}。手賀沼の水質浄化は長年にわたり地域から切望されていることから、これらの対策により早い時期に中期目標の達成を図ることは必要なことである。しかしながら、本来これらの対策は暫定的なものであることから、さらに環境基準のCOD $5\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ へ近づけるためには、長期的には発生源対策が要となる。

3.1.3において、排出負荷量密度を下げるためには、人口密度を下げるか、あるいは、下水道普及率を上げることが必要であると言えた。この二点に絞って考えてみると、このうちの下水道普及率に関しては、現在の財政状況からみて、近い将来普及率が飛躍的に増大することは困難である。このため、まず必要なことは5年～10年後の可能な限り明確な普及率を明らかにすることである。これは、環境基準の達成は下水道完備が前提となっており、下水道計画は他のすべての対策の上位にあるが、計画期間が長期にわたることから、見通しが不明瞭であり、その結果、水質改善の見通しも不明瞭となっているからである。

これが明確になれば、5年～10年後の水質目標を達成するために必要な負荷削減量のうち、下水道による削減量では不足の分を、他の部局のどのような対策で補えばよいかが明確になる。これは、水質改善の責任を下水道だけに負わせるのではなく、各々の行政部局の役割分担を明らかにすることであり、問題解決へ向けて各行政部門の実質的な共同作業が必要となる。

特に、長期的にみた発生源対策として、出される汚れを家庭単位や小区域単位でできるだけ少なくするシステムを確立することが重要である。そのひとつとして、現在、技術開発が進んでいる窒素やリンも高度に除去できる小規模・中規模の合併処理浄化槽の設置の普及を促進することが望まれる。これは、湖沼の窒素とリン濃度のバランスの重要性が指摘されている⁹⁾ことから必要なことであり、また、湖沼の水環境保全

の今後の方向として、身近な川へ水を戻し、地域の中に根づいた川づくりをしていく上でも必要である。

このようなことからみると、現在の手賀沼流域下水道終末処理場の処理水は、手賀沼系外の利根川へ放流されていることから、将来の河川流量の不足が懸念されており、また、市街地化が進んだ流域で下水道進捗率を上げることは、年々困難になることが予想されるため、将来的には現行の下水道計画の見直しも必要になってくるのではないかと考えられる。

次に人口密度を下げることであるが、この問題は現在の都市計画、土地利用計画の見直しにつながる。土地利用が環境保全機能に与える影響として、加藤¹⁰⁾は将来宅地化が進んだ場合に、水質浄化機能等の8種の環境保全機能がどのように低下するか予測を行っている。Osborne ら¹¹⁾は土地利用形態と河川水質との関係から、都市化が河川水質を支配している主要因であることを明らかにしている。また、Gilliland¹²⁾は土地利用等の地理情報と畑地から流出する汚染ポテンシャルとの関係を、Ng ら¹³⁾は都市化が河川水量に及ぼす影響を明らかにしている。

手賀沼の場合も、流域の著しい都市化が水質汚濁の主原因であり、下水道の進捗の効果も人口増加に打ち消されているのが実状である。都市計画、土地利用計画の見直しは難しい問題ではあるが、ここまで掘り下げて解決の方向を見い出さない限り、湖沼の水質保全はあり得ないのではないかとと思われる。

1992年にブラジルで開催された地球サミットを軸に、市民の環境問題への関心は大きく広がってきている。また、1993年に制定された環境基本法では民間団体の自発的活動の促進もひとつの柱となっている。1.で述べたように、これからの湖沼の保全とは、水質の改善、豊かな生態系の回復、湖沼景観の保全の内容を含んだ地域づくりのシンボルとなるような水環境を回復し、創造していくことである。これが実現できるかは、行政と市民がいかに合意を形成し、共同し合えるにかかっていると思われ、湖沼の環境保全は長期的にはこのような力に依拠した都市計画、土地利用計画の見直しを含む新たな社会システムを作っていくことが不可欠ではないかと思われる。

流域総合管理は、将来的には、ここまでの内容を含んでいると考えられる。

4. ま と め

湖沼の水質悪化は、流域の社会活動や経済活動の帰結として生じたものであることから、これからの水質保全の方向として流域を総合的に管理していくことが必要である。そのため、ここでは、手賀沼を対象とし

て、流域総合管理の手法について検討した。

1) 手賀沼流域を168の小区域に分割し、土地利用形態別面積、人口密度、下水道普及率、COD、全窒素、全リンの各排出負荷量密度等の流域情報の相互の関係を検討した。

2) 手賀沼流域面積の79%を占める大堀川と大津川流域の小区域毎の市街地面積率は、大堀川流域は75~100%区域が多く、大津川流域は50%以上の区域がほぼ半分を占めており、手賀沼流域は著しく都市化が進んでいる。

3) 小区域毎の総排出負荷量については、生活系負荷が最も多い区域は、CODで109、全窒素で97、全リンで98であり、最も多く、単位面積当たりの排出負荷量密度も大きい値であった。産業系負荷が最も多い区域は、CODで2、全窒素で4、全リンで10あり、この中で全リンについてはアルマイト加工業による排出負荷の比率が大きかった。また、面源負荷が最も多い区域は、CODで57、全窒素で67、全リンで61であったが、いずれも排出負荷量密度としては小さい値であった。

4) 生活系の負荷が大部分を占める手賀沼の汚濁の原因を反映して、小区域毎のCOD、全窒素、全リンの各排出負荷量密度と、単独処理浄化槽使用人口密度および屎尿処理場使用人口密度との間に、重相関係数0.924~0.997の高い相関が得られ、手賀沼の浄化は未処理の雑排水と単独処理浄化槽排水の対策いかにかかっていることが確認できた。

5) 小区域毎のCOD、全窒素、全リンの各排出負荷量密度と、人口密度および下水道普及率との間に、重相関係数0.630~0.867の高い相関が得られたことから、手賀沼への排出負荷量を削減するためには、人口密度を減らすこと、あるいは、下水道普及率を上げることが不可欠であることが示された。また、これらの解析から、今後浄化対策を優先して行う必要のある区域を把握することができた。

6) 下水道普及率を上げることに関しては、当面の下水道の普及見通しをできる限り明らかにすることが望まれる。その上で、手賀沼の目標水質を達成するために必要な負荷削減量のうち下水道で不足な分を、他のどのような対策で補うかを明確に持つことが重要であり、将来的には、現行の下水道計画の見直しも必要とされる。

7) 人口密度を下げることに關しては、現行の都市計画や土地利用計画の見直しが必要とされる。流域総合管理手法は、将来的にはこのような見直しを含め、湖沼の水環境を保全するための新たな社会システムの検討まで含まれると考えられる。

謝 辞

本研究を行うに当たり御協力いただいた千葉県環境部水質保全課湖沼班の方々、ならびに、流域データを提供していただいた柏市、我孫子市、流山市、松戸市、鎌ヶ谷市および沼南町の環境担当課の方々に深く感謝の意を表します。

(原稿受付 1995年5月30日)

(原稿受理 1995年10月2日)

参 考 文 献

- 1) 小林節子 (1982) 手賀沼の汚濁と生態系 (I, II), 用水と廃水, 24, 965-976, 1209-1220.
- 2) 千葉県 (1987) 手賀沼に係る湖沼水質保全計画.
- 3) 千葉県 (1992) 手賀沼に係る湖沼水質保全計画.
- 4) 千葉県環境部水質保全課 (1993) 手賀沼浄化の新たな手法の開発調査報告書.
- 5) 福島武彦, 原沢英夫, 天野耕二, 海老瀬潜一 (1990) 流域管理とその支援システム (第1報), 環境システム研究, 18, 129-135.
- 6) 原沢英夫, 福島武彦, 天野耕二 (1992) 流域管理とその支援システム (第2報), 環境システム研究, 20, 93-100.
- 7) 藤村葉子, 藤本千鶴 (1992) 印旛沼・手賀沼流入河川の汚濁負荷量に関する調査研究 (XIV) - 両河川流入総負荷量の推定(3) -, 千葉県水保研年報, 143-158.
- 8) 小林節子, 西村肇 (1993) 湖沼のリン循環諸過程の現況把握にもとづいた湖沼のCOD水質予測法, 水環境学会誌, 16, 711-722.
- 9) 稲森悠平, 高井智丈, 須藤隆一 (1993) 窒素・リン対策の最新動向と除去技術, 資源環境対策, 29(8), 12-23.
- 10) 加藤好武 (1988) 流域のもつ環境保全機能の総合評価とその変動予測 - 茨城県桜川流域の例 -, 環境情報科学, 17(4), 21-30.
- 11) Osborne, L.L. and Wiley, M.J. (1988) Empirical relationships between land use/cover and stream water quality in an agricultural watershed, *J. Environ. Manage.*, 26, 9-27.
- 12) Gilliland, M.W. and Boxter-Potter, W. (1987) A geographic information system to predict non-point source pollution potential, *Wat. Resour. Bull.*, 23, 281-291.
- 13) Ng, H.Y.F. and Marsalek, J. (1989) Simulation of the effects of urbanization on basin streamflow, *Water Resour. Bull.*, 25, 117-124.