

夏季手賀沼における外部流入・内部生産負荷 に関する検討

EXTERNAL INFLOW AND INTERNAL PRODUCTION LOADINGS OF LAKE TEGANUMA IN SUMMER

二瓶泰雄¹・丸山寛樹²・尾関利文³・山崎裕介⁴

Yasuo NIHEI, Hiroki MARUYAMA, Toshifumi OZEKI and Yusuke YAMASAKI

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

²非会員 学 (工) 東京都世田谷区役所烏山総合支所 (〒157-8555 東京都世田谷区南烏山6-22-14)

³非会員 学 (工) 大林組 清水第四トンネル工事事務所 (〒424-0112 静岡県静岡市清水伊佐布817-2-1)

⁴学生員 修 (工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻博士後期課程
(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

To clarify the pollutant loads in Lake Teganuma, which is one of well-known eutrophied lakes in Japan, we performed field measurements on external inflow and internal production loadings from June to October in 2003. The external loadings of T-N, T-P and COD through main inflow rivers and the North-Chiba water conveyance channel were discussed quantitatively. The percentage of the internal production loading for COD in total loadings was from 45 to 65 % under normal atmospheric conditions. The measured results suggested an adequate correlation between the internal production loading for COD and the solar radiation although the discharges from the channel and the inflow rivers were not correlative to the internal production loading for COD.

Key Words : Lake Teganuma, water quality, internal production, external inflow loading, COD

1. 序論

全国有数の富栄養化湖沼である手賀沼の水質汚濁化の要因としては、主要流入河川である大堀川と大津川經由による流域からの汚濁物質が過剰に流入することや、沼内における有機物の内部生産や底泥からの栄養塩溶出等が指摘されている^{1)・2)}。手賀沼に対する水質浄化対策は数多く行われており³⁾、例えば、流域における下水道整備の促進により、汚濁負荷のうち大半を占めていた生活系負荷が近年では大幅に削減されている^{4)・5)}。一方、沼内では、利根川水を浄化用水として沼内へ注水する、という北千葉導水事業が2000年から本格的に稼動開始しており、CODの年平均値が18mg/l (1999) から8.2mg/l (2002) へと大きく減少している。

このように最近の手賀沼及びその周辺域の水質環境は大きな変貌を遂げており、汚濁機構の基礎となる、水質環境に関する外部流入・内部生産負荷特性について、既存の知見⁶⁾を適用できるかどうかは不明である。また、内部生産負荷には、北千葉導水路からの浄化用水量や気象状況といった外部条件が大きな影響を及ぼしていると考えられるものの^{7)・8)}、

それらの関連性は十分には明らかにされていないのが現状である。

そこで本研究では、手賀沼及び流入河川における水理・水質・気象に関する総合的現地観測を実施し、夏季手賀沼における河川經由の外部流入負荷や沼内での内部生産負荷の実態を把握する。ここでは、まず、①手賀沼への外部流入負荷として、主要流入河川と北千葉導水路からのN, P, COD負荷量について懸濁態・溶存態別に算出する。次に、②内部生産負荷として、湖沼における代表的な環境指標の一つであるCODに着目し、沼内におけるCODの空間分布からCODの内部生産量 (内部生産COD) を算出するとともに、その内部生産CODと外部条件 (浄化用水量や気象条件等) との関連性を検討する。

2. 現地観測の概要

(1) 観測サイト

千葉県北西部に位置する手賀沼は東西方向に細長い湖沼であり、本手賀沼と下手賀沼より構成される。相対的に大きい本手賀沼 (以下、手賀沼と略す) の湖沼面積は5.5km²、水容量は470万m³、平均水深は

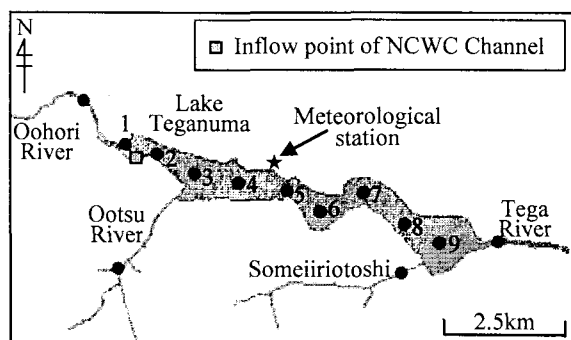


図-1 手賀沼流域の概要と観測地点（NCWC Channelは北千葉導水路を示す）

0.86mである。図-1に示すように、手賀沼における流入河川は大堀川、大津川、染井入落の3河川であり、流出河川は利根川と接続する手賀川である。

北千葉導水路（North-Chiba Water Conveyance channel; NCWC channel）は、利根川から取水された河川水を、手賀沼（注水点は図-1中四角印）と大堀川、坂川へと運んでいる。手賀沼と大堀川への最大注水量はそれぞれ $10\text{m}^3/\text{s}$ 、 $1.0\text{m}^3/\text{s}$ である。手賀沼の滞留時間は、浄化用水を注入しない場合には約13日であるのに対して、上記の浄化用水の最大量を手賀沼へ注水すると4日弱となる。ただし、北千葉導水路からの浄化用水量は、利根川の余剰水状況により一定とならず、利根川の流量が少ない場合や洪水時には注水量は最大量よりも大幅に少ない。

（2）観測方法

手賀沼における外部流入・内部生産負荷特性を把握するために、①定期的な採水・CTD調査と②メモリ内蔵型測器を多数用いた連続モニタリング、③降雨時流入河川における短期集中水理・水質調査、という3種類の水環境調査を行った。また、④気象観測を上記の観測と同期する形でを行った。

まず、①では、図-1に示すStns.6、8を除く沼内7地点と、流入河川（大堀川、大津川、染井入落）3地点、流出河川（手賀川）1地点、浄化用水注水口1地点において、2003年7月10日～10月9日まで週一回の間隔で計14回にわたり表層採水・CTD調査を行った。CTD調査における観測項目としては、クロロフィルa（Chl.a）濃度、DO、水温等とした。また、採水されたサンプル水を本学実験室に持ち帰り、COD、窒素、リン、Chl.a濃度に関する分析を下水試験方法97年度版⁹⁾に準じて行った。

②の調査では、手賀沼内9地点及び主要流入河川2地点（大堀川、大津川）において、2003年7月16日～10月10日にて自記式測器を設置した。測定項目としては、水位、水温、濁度、Chl.a濃度等である。この

うち、水位計測には自記式水位計（Diver, Eijikelkamp社製）を、Chl.a濃度計測にはワイパー付き蛍光光度計（COMPACT-CLW, アレック電子㈱）をそれぞれ用いた。

③の観測では、大堀川と大津川を対象として、2003年9月20日～21日における降雨イベント（総降雨量：102mm，最大時間雨量：7mm）において、短期集中的な水理・水質調査を行った。ここでは、流入河川における水質負荷量を計測するために、観測項目としては流速と水質項目（濁度、SS、COD、窒素、リン、Chl.a濃度）としている。流速に関しては、大堀川では高解像度超音波ドップラー流速分布計（WorkHorse ADCP Sentinel 1200kHz, RD社製）により¹⁰⁾、大津川では河川用電磁流速計（AEM-1D, アレック電子㈱）により各々計測した。流速計測と同時に表層採水を行い、持ち帰ったサンプル水を①の観測と同様に実験室にて分析を行い、水質項目を計測した。

④の気象観測では、手賀沼中央部（図-1）にて、風向・風速、気温、湿度、日射量に関する連続観測を2003年7月23日～10月10日において実施した。

3. 外部流入負荷

（1）算出方法

2つの主要流入河川（大堀川と大津川）と北千葉導水路経由の外部流入負荷量を算出する方法を記述する。なお、もう一つの流入河川である染井入落に関しては、流量が他の二つの河川よりも小さいことが確認されているので、ここでは省略する。

まず、大堀川と大津川に関しては、次の2つの手順に従って算出する。

- Step 1: H - Q 曲線（ H : 水位, Q : 流量）を作成し、自記式測器で計測されている水位データから流量を求める。
- Step 2: 水質負荷量 L を流量 Q のべき関数として表す L - Q 式（ $L = aQ^b$, a, b : 係数）を用いて、Step 1 で得られた流量 Q より水質負荷量 L を算出する。

上記のうち Step 1 においては、水位と流速、断面形状の観測データを用いて、現地観測結果と数値解析を併用する河川流量推定法¹¹⁾に基づいて流量を算出する。そこで得られた流量 Q と水位 H に対する相関図を作成し、各河川における H - Q 曲線を求める。次に、 L - Q 式を得るために、③の観測で得られた流量 Q と水質負荷量 L の相関図より L - Q 式を作成する。ここでは COD, N, P に関する全成分 (T-COD, T-N,

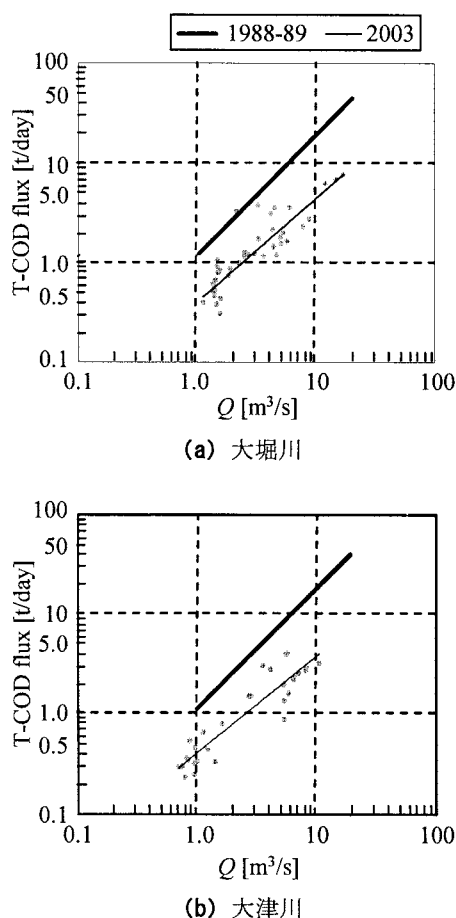


図-2 T-CODのL-Q式(図中の点は本研究で得られた観測値, 細線はその観測値に対する近似式である. 太線は同河川での1988・89年に行われた観測結果に対するL-Q式を表す¹²⁾.)

T-P), 懸濁態成分(P-COD, P-N, P-P), 溶存態成分(D-COD, D-N, D-P)に対する係数 a , b を求めた. その一例として, 大堀川と大津川におけるT-CODに関する相関図とL-Q式を図-2に示す. ファーストフラッシュの影響により観測データにばらつきが見られるものの, 近似式の相関係数は概ね9割に達し, 流量と水質負荷量の高い相関性を有する.

次に, 北千葉導水路の水質負荷量を求める際には, 浄化用水の日平均注水量データ(国土交通省利根川河川下流事務所提供)に, ①の採水観測より得られた各水質濃度を掛ける. なお, 水質濃度データの取得時間間隔は, およそ1週間であるので, その間の水質濃度は線形補間して与えている.

(2) 平均負荷量及び懸濁態・溶存態の寄与率

外部流入負荷の大局的な特徴を見るために, 観測期間中の大堀川, 大津川, 北千葉導水路における流量と水質負荷量の平均値を図-3に示す. 図中では, 水質負荷量を懸濁態・溶存態成分に分けて表示している. まず, 流量に関しては, 北千葉導水路からの

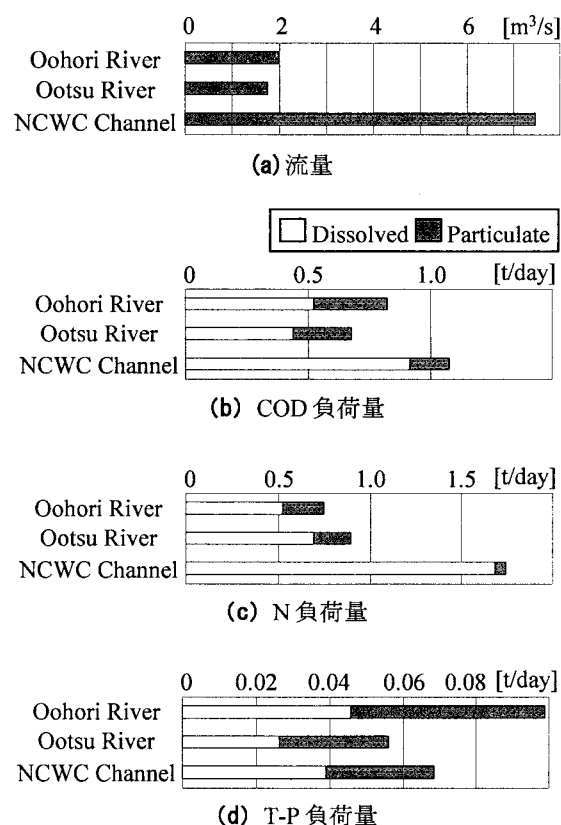


図-3 大堀川と大津川, 北千葉導水路の流量・水質負荷量(懸濁態・溶存態別)

平均値は大堀川や大津川の約4倍であり, 北千葉導水路からの注水が顕著となっている. 次に, 水質負荷量のうちT-COD, T-N負荷量については北千葉導水路からの値が一番大きくなっており, 特に, T-N負荷量に関しては北千葉導水路と両河川の差は顕著となっている. また, T-P負荷量に関しては大堀川の値が最大となっている. このように, 北千葉導水路からの流量は大堀川・大津川より大きいものの, 水質負荷量の大小関係は, 水質項目によっては流量の大小関係と一致しない項目がある. 観測期間中における水質濃度の平均値(表-1)を比較すると, 北千葉導水路における水質濃度はどの項目に関しても, 大堀川や大津川の水質濃度より低い値となるものの, その差はT-Pが最も大きく, T-Nが最も小さいことがわかる. このような水質濃度の結果により, 北千葉導水路と両河川の間における水質負荷量の大小関係が水質項目毎に変化する.

次に, 全負荷量に対する懸濁態・溶存態成分の寄与率に着目する. 両流入河川における懸濁態成分の割合については, Nが22~30%, Pが53%, CODが36%となっている. 一方, 北千葉導水路における懸濁態成分の寄与率に関しては, Nが3%, Pが43%, CODが15%である. これらの結果より, 懸濁態成分の寄与率の大小関係は, 両河川と北千葉導水路と

表－１ 観測期間中の平均水質濃度（単位：mg/L）

	T-N	T-P	T-COD
Oohori River	4.17	0.35	4.32
Ootsu River	5.60	0.31	4.56
NCWC Channel	2.42	0.11	1.68

表－２ 1988・89年と2003年のL-Q式に基づくT-COD
負荷量の比較（単位：t/day）

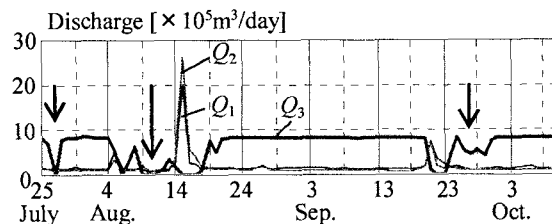
		1988-89	2003
Oohori River	Total	2.96	0.82
	Rainy	1.38	0.32
	Non-rainy	1.58	0.50
Ootsu River	Total	2.57	0.68
	Rainy	1.58	0.32
	Non-rainy	0.99	0.36

もに、Pが最も大きくNが最も小さい、ということは共通しているものの、寄与率の大きさとしては、全項目において北千葉導水路の結果は、両河川の値より下回っていることが分かる。

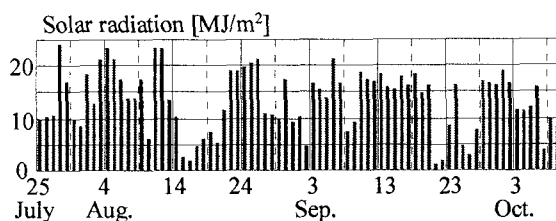
（３）1988・89年と2003年の外部流入負荷の比較

次に、現在と過去における流入河川の水質負荷特性を比較するために、本論文の観測結果（2003年）により得られたL-Q式と、1988-89年に行われた水質調査結果から算出されたL-Q式¹²⁾を比較したものを図－２に示す。これより、両河川ともに1988・89年におけるT-COD負荷量が、2003年よりも大きい。またL-Q式の傾きに関しては、大堀川では、両者ともに同程度であるのに対して、大津川では、1988・89年の方が2003年の値よりも大きいことが分かる。

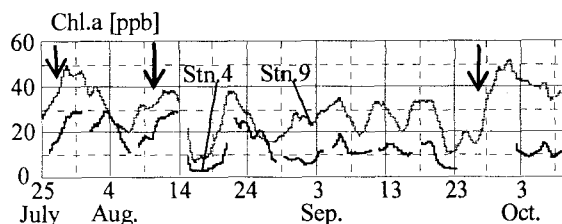
これらのL-Q式を用いて、本観測期間中に得られた流量の観測値より試算されたT-COD負荷量を表－２に示す。ここでは、T-COD負荷量の総量とともに、降雨時と非降雨時（平常時）に分けた形でT-COD負荷量が示されている。まず総量に関しては、両河川ともに1988-89年の結果が2003年の値の3.6～3.8倍となり、2003年での負荷量は約15年前のおよそ1/4～1/3程度に減少していると言える。また、この負荷量の減少に対しては、降雨時の負荷量の減少量が顕著となっている。これより、大堀川や大津川では、1988年から2003年の間に、点源負荷とともに^{4)・5)}、降雨時に卓越する面源負荷が大幅に減少したことが示された。



(a) 日平均流量 (Q_1 : 大堀川, Q_2 : 大津川, Q_3 : 浄化用水量)



(b) 日射量（一日積算値）



(c) Chl.a 濃度（24時間移動平均値）

図－４ 沼内における水質環境の時間変化

４．内部生産負荷

（１）沼内における水質環境の基本特性

a) Chl.a 濃度の時間変動特性

内部生産負荷を検討する前に、沼内の水質環境の基本特性を把握するために、沼西側（Stn.4）、東側（Stn.9）における Chl.a 濃度および水質環境に対する影響因子と考えられる河川流量、浄化用水量、日射量の時系列変化を図－４に示す。ここで、Chl.a 濃度は24時間移動平均を施した結果を、浄化用水量と河川流量は日平均値を、また日射量是一日の積算値をそれぞれ表している。なお、図中の Chl.a 濃度の時系列データが不連続となっている部分は未計測期間である。これより、まず、沼西側と東側の Chl.a 値を比べると、両者は概ね類似した時間変動傾向を有しているものの、東側の Chl.a 濃度の方が西側よりも大きい。これは、沼西側に位置する流入河川河口部や浄化用水注水口から離れて東側へ行くとともに、沼内で植物プランクトンが増殖していることを示唆している。このような Chl.a 濃度の時間変化と日射量、浄化用水量、河川流量との応答性については、次の3つの結果が得られている。①著しく河川

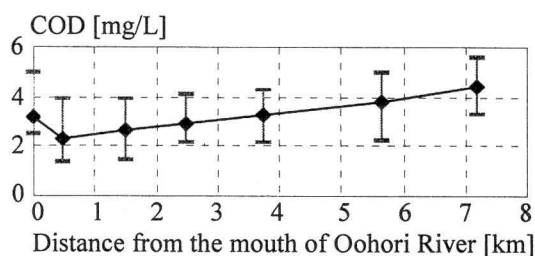


図-5 沼内における COD の縦断分布

流量が増大した降雨イベント時（8/7, 8/15-17, 9/20-22）では、沼内の Chl.a 濃度は大きく減少する。
②河川出水が見られず浄化用水量が小さくなる同図中矢印の3つの期間では、Chl.a 濃度は増加する。③浄化用水が最大注水量で一定となる期間においても、日射量の増減と対応して、Chl.a 濃度も変化している。

b) COD の空間分布

次に、水質環境の空間分布特性を見るために、一例として、沼内における COD の縦断分布を図-5 に示す。ここでは、各観測地点における全データの平均値（◆印）と最低値、最大値をそれぞれ表示している。これを見ると、COD の最小値は大堀川河口部から約 0.5km (Stn.2) の地点に現れている。Stn.2 近傍には、図-1 に示しているように、北千葉導水路からの浄化用水注水口が位置しているため、Stn.2 周辺では大堀川河口よりも COD が低下している。また、全体的には、大堀川河口からの距離とともに COD は増加している。これは、植物プランクトンの増殖に伴う有機物の生産、すなわち内部生産の影響が現れているためである。また、COD の大きさ自体は小さく、最大でも 6mg/L 弱となっている。

(2) 内部生産 COD 負荷の算定方法

手賀沼における COD の内部生産量を算定する手順を記述する。小林⁶⁾は Chl.a 濃度と COD の相関関係から内部生産 COD や外部流入 COD を簡易的に求めているが、Chl.a 濃度レベルが高い大堀川や大津川を流入河川とする手賀沼には、この方法を適用することは原理的に難しい。そこで本研究では、図-5 に示すように、COD が大堀川河口域からの距離とともにおおむね線形的に増加する、という手賀沼特有の性質を生かして、内部生産 COD を算出する。具体的には、以下の3つの手順から構成される。

- ① 図-6 に示すように、大堀川河口部からの累積体積 ΣV と COD の相関図を作成し、両者に対して直線近似式 ($COD = \alpha \Sigma V + \beta$) を作成する。
- ② この近似式中の ΣV に手賀沼の総体積 ΣV_0 を代入し、それに河川水と浄化用水の総流入量 Q を掛け合わせて、手賀沼における総 COD 負荷 (=

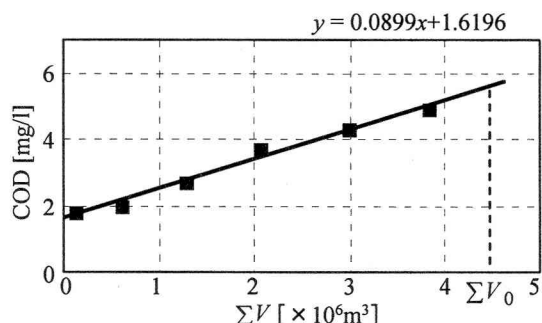


図-6 大堀川河口域からの累積体積 ΣV と COD の相関図 (ΣV_0 : 手賀沼の総体積)

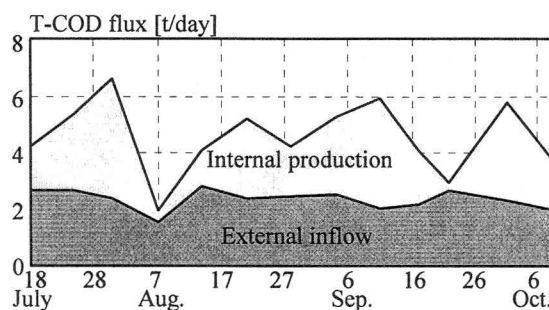


図-7 外部流入・内部生産 COD 負荷の比較

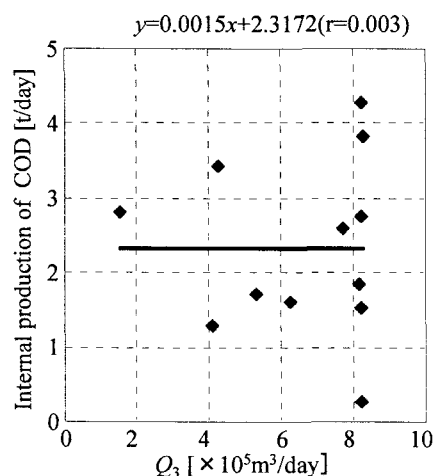
外部流入負荷+内部生産負荷)を算出する。

- ③ 総 COD 負荷と ③. で求めた外部流入 COD 負荷の差を取り、内部生産 COD 負荷を求める。

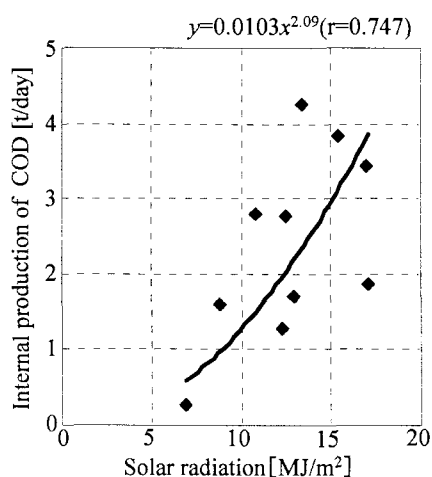
(3) 内部生産 COD 負荷の時間変動特性とその要因

図-7 は、観測期間中における外部流入・内部生産 COD 負荷の時系列変化を示す。これより、内部生産 COD 負荷は、外部流入負荷と比べて大きく変化しており、特に、大きな河川出水イベントの直後（8/7, 9/22）には内部生産 COD は大きく減少している。全 COD 負荷に対する内部生産 COD 負荷の割合は、河川出水イベント直後の時には 9~30%と低いものに対して、それ以外の時には 45~65%となっており、その平均値は 51%である。小林⁶⁾は、北千葉導水事業開始前である 1969~1994 年における調査結果を用いて、手賀沼における全 COD に占める内部生産 COD の割合を 30~60%としている。この結果と比べると、北千葉導水事業稼働後である 2003 年の結果（本論文）の方がやや大きいことが分かる。

この内部生産 COD 負荷の支配要因を探るために、内部生産 COD 負荷と日射量、浄化用水量、河川流量との相関関係を検討した。図-8 は、内部生産 COD 負荷と浄化用水量、日射量の相関図を示す。ここで日射量と浄化用水量は、滞留時間を考慮して、内部生産 COD 負荷を算出した日を含めて4日間の平均値である。まず内部生産 COD 負荷と浄化用水量を比



(a) 浄化用水量 Q_3 (4日平均)



(b) 日射量 (4日平均)

図-8 内部生産 COD と日射量, 浄化用水量との関係

べると, 両者の間には明確な相関関係を見出すことができず, 近似式の相関係数は0.003と極めて低い。同様な結果は, 河川流量についても確認されている。一方, 内部生産 COD 負荷と日射量の場合には, 多少ばらつきは見られるものの, 両者の間の近似式の相関係数は0.75となっている。これより, 内部生産 COD 負荷は, 浄化用水量や河川流量よりも日射条件の影響を大きく受けていることが示唆された。

5. 結論

夏季手賀沼を対象とした総合的な水理・水質・気象観測を実施し, 手賀沼における外部流入負荷や内部生産負荷に関して検討を行った。そこで得られた主な結論は以下のとおりである。

- 1) 大堀川と大津川, 北千葉導水路からの外部流入負荷を算出した結果, 水質負荷量の大小関係は, 水質項目によっては流量の大小関係と一致しな

い項目があることが示された。

- 2) 2003年と1988・89年における汚濁負荷量を比較したところ, 2003年の方が汚濁負荷量は減少していること, その減少には面源負荷の影響が点源負荷よりも相対的に大きいことが示された。
- 3) 全COD負荷に対する内部生産COD負荷の寄与率は, 平常時には45-65%であり, 1969-1994年に対する解析結果⁶⁾よりやや増加している。
- 4) 内部生産COD負荷は浄化用水量や河川流量とはほぼ無相関であり, 日射量とは有意な相関性を持っていることが明らかとなった。

謝辞: 現地調査では東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生諸氏には多大なる御助力を頂いた。また, 水質分析に際しては, 同学科出口浩助教授に様々な便宜を図って頂くとともに, 同大学院生今野篤氏に多くの協力を頂いた。本研究の一部は, 下水道振興基金研究助成金(研究代表者: 二瓶泰雄)によるものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 山田安彦, 白鳥孝治, 立本英機: 印旛沼・手賀沼 — 水環境への提言 —, 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) 本橋敬之助, 立本英機: 湖沼・河川・排水路の水質浄化 — 千葉県の実施事例 —, 海文堂, pp.1-128, 1997.
- 4) 二瓶泰雄, 服部祐司, 小久保武, 大竹野歩: GISを用いた手賀沼流入河川の汚濁負荷解析, 水工学論文集, Vol.48, pp.1459-1464, 2004.
- 5) 砂田岳彦, 二瓶泰雄, 今野篤, 尾関利文: GISを用いた手賀沼流域の汚濁負荷解析, 土木学会年次学術講演会講演概要集第2部, Vol.59, pp.583-584, 2004.
- 6) 小林節子: 手賀沼の抜本的な水質改善へ向けた富栄養化の解析, 用水と廃水, Vol.39, No.6, pp.479-486, 1997.
- 7) 山崎裕介, 二瓶泰雄, 猪爪高見, 西村司: 浄化用水量の変化が手賀沼の水質環境に及ぼす影響, 河川技術論文集, Vol.9, pp.505-510, 2003.
- 8) 福島武彦, 上西弘晃, 松重一夫, 原沢英夫: 浅い富栄養湖の水質に及ぼす気象の影響, 水環境学会誌, Vol.21, No.3, pp.180-187, 1998.
- 9) (社)日本下水道協会: 下水試験方法上巻 — 1997年版 —, pp.136-201, 1997.
- 10) 二瓶泰雄, 飯田裕介, 佐藤慶太: 都市河川における流速・SSの鉛直構造に関する高解像度 ADCP 調査, 水工学論文集, 2005 (印刷予定)。
- 11) 二瓶泰雄, 木水啓: 新しいデータ同化手法に基づく河川流速・流量推定法の提案, 土木学会論文集, 2004 (投稿予定)。
- 12) 藤本千鶴, 藤村葉子: 印旛沼・手賀沼流入河川の汚濁負荷量に関する調査研究 (Ⅷ) — 両湖沼流入総負荷量の推定 (2) —, 千葉県水保研年報, pp.103-112, 1990.

(2004.9.30 受付)