

湖沼におけるCODの年・月・日単位の変動特性と 負荷量の評価手法に関する研究

A study on evaluation methodology for COD loads and COD characteristics fluctuation in lakes by the day-month-year timescale

17N3100030B 寺島 大貴 (河川水文研究室)
Daiki TERASHIMA/ River Engineering and Hydrology Lab.

Key Words : Water quality, COD, Pollutant load, External load, Internal load

1. はじめに

戦後の経済成長に伴い、大気汚染、水質汚濁、土壌汚染、騒音、振動、地盤沈下、悪臭等の公害が社会問題となった。これに対して、昭和45年に各公害に対する個別の法律や対策を制定し、国、地方公共団体や事業場の責務を明確化するなどを取りまとめた公害対策基本法が制定された。さらに、水質汚濁に関しては昭和45年に水質汚濁防止法が加えられ、工場からの排水基準が定められるようになった。その結果、工場排水に起因する有機物質や重金属による水質汚濁は改善傾向を示した。しかし、湖沼やため池といった閉鎖性水域では水の滞留時間が長く、汚濁の進行速度が早いことから水質改善が見られなかった。そこで、昭和59年に閉鎖性水域を対象とする水質改善を図り、湖沼水質特別措置法が制定された。その際、とくに水質改善が迫られる水域を指定湖沼に選定し、現地観測や数値解析等の調査・研究が盛んに行なわれ、水質改善に向けた取り組みが行われてきた。それでもなお、湖沼の有機汚濁指標として用いられる化学的酸素要求量(COD: Chemical Oxygen Demand)の環境基準達成率は海域や河川と比べ低い達成率となっているのが現状である。ここで、現存する湖沼の中でも、湖沼の水質環境基準を保つために特に総合的な施策が必要として指定された11の指定湖沼におけるCODの経年変化から、手賀沼、印旛沼、霞ヶ浦(以下、3湖沼とする)のCOD経年変化の増減の時期が重なっており、CODの変動に類似性があることを見出した(図-1)。特に、手賀沼で水質改善対策として北千葉導水事業が行われる2000年以前に、顕著な類似性が見られる。同図は結果の1つでもあり、本研究では上述したようなCODの変動特性に着目した。

上記3湖沼は独立した湖沼であり、湖沼面積や湖沼形状、流域面積が異なるにも関わらず、CODの経年変化に類似性が見られるのはある要因が関係していると考えられる。その要因を明らかにすることが可能であれば、今後の水質改善計画に有益な知見を提示するものとなる。これまで、湖沼水質に関して数多くの研究が

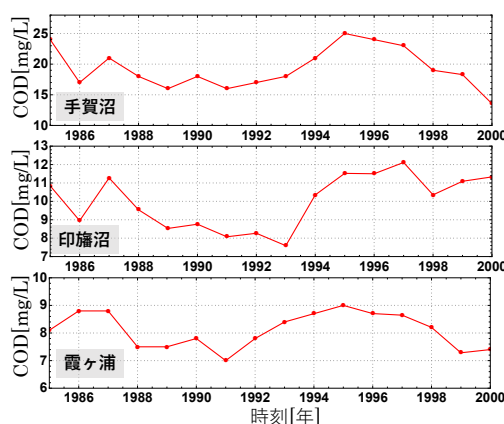


図-1 手賀沼・印旛沼・霞ヶ浦におけるCODの経年変化

(3湖沼ともに1987年～1990年、1996年～2000年にかけてCODは減少し、一方で1990年～1996年にかけて増加していることからCOD経年変化に類似性が見られる)

行われてきたが、そのほとんどは個々の湖沼を対象とした水質変動特性の解明²⁾や汚濁負荷源の特定³⁾としており、複数の湖沼を対象に水質変動特性の解明を目的とした研究はされていない。

そこで、本研究では複数湖沼に共通する水質変動特性に着目し、水質変動に及ぼす要因を明らかにすることを目的とした。

2. 研究手法

本研究では、CODの変動に及ぼす要因を外部負荷要因と内部負荷要因の2つに大別し、その中から負荷割合の大きいものに注目していき、さらに、その負荷の中でも大きい負荷に着目することを繰り返すことで、水質変動に及ぼす要因を選定した。そして、最終的に選定した要因とCODの変動の関係を調べた。

研究対象湖沼としては、CODの経年変化に類似性が見られ、かつ水質・水理データが豊富な上記3湖沼とする。3湖沼は直線距離にして約30kmと近接した位置に存在する。表-1に3湖沼の諸元を示す。霞ヶ浦の平均水深は4mで手賀沼の0.8mに対し約4倍深い。また、湖沼面積に関しては霞ヶ浦の172km²は手賀沼、印旛沼の約10km²

に対し約17倍大きい。

本研究で扱う水質データに関して、年単位や月単位のCOD分析では、月に1回あるいは2回、国が定めた環境基準地点(手賀沼：手賀沼中央地点、印旛沼：上水道取水口下地点、霞ヶ浦：湖心・麻生沖・掛馬沖・玉造沖の4地点平均値)で行なわれている定期観測データを用いた。一方、日単位の分析では国土交通省が管理する水質自動観測所(手賀沼：手賀沼中央地点、霞ヶ浦：湖心地点)で毎時間測られている1時間水質データを用いた。

3. 研究内容

(1) 年・月・日単位のCOD変動

a) 年単位のCODの変動

3湖沼の経年変化に類似性が見られた期間の湖沼間のCOD関係を示す(図-2)。この図から分かるように、3湖沼の各湖沼間にはCODに正の相関関係が見られる。一方、ここで一例として示す琵琶湖や諏訪湖とは関係性が見られないことから3湖沼のCODの変動には類似性があることが示された。

b) 月・日単位のCODの変動

3湖沼における月単位のCODの変動を分析した。印旛沼と手賀沼のCODの変動に同様な波形が見られ、特に夏期頃に上記の2湖沼でCODの増加がピークに達し、冬期にCODが減少する変動傾向が見られた。それが複数年繰り返されており、CODの変動が類似していると言える。一方、霞ヶ浦に関してはCODの変動が他2湖沼と比べ緩やかな変動であり、3湖沼に共通するCODの変動傾向は見られなかった。

次に、存在する水質データで時間的に最も密に測定されている1時間データを用いて、日単位のCODの変動の分析を行った。ここで、1時間データでは時々刻々とCODは変動しており、湖沼間での変動の類似性を見つける上で、微小な変動成分が多かったため、日移動平均の処理を施し分析を行った。図-3に手賀沼、霞ヶ浦のCODの変動傾向に最も類似性が見られた2004年の15日移動平均を示す。この図から分かるように、1月や4月、8月に霞ヶ浦のCODにピークが見られるが、約1ヶ月遅れて手賀沼のCODにもピークが見られる。月単位の分析では、手賀沼と霞ヶ浦のCOD変動に類似性は見られなかったが、日単位の分析ではCOD変動に類似性が見られた。

(2) COD負荷量割合の算出

湖沼のCODの負荷源は湖沼内部で生産される内部負荷CODと湖沼外部からの流入する外部負荷CODに大別できる。ここで、湖沼内部での生産には植物プランクトンの細胞外分泌や死骸、底泥からの溶出による有機物が含まれ、湖沼外部からの流入には生活、工場排水

表-1 3湖沼の諸元

	湖沼面積 [km ²]	湖沼容積 [億km ³]	平均水深[m] (最大水深)	流域面積 [km ²]	流域人口 [万人]
手賀沼	6.5	1.9	0.8(3.8)	143.9	51
霞ヶ浦(西浦)	172	8.5	4.0(7.0)	2156.7	97
印旛沼	11.5	0.5	1.7(2.5)	493.9	78

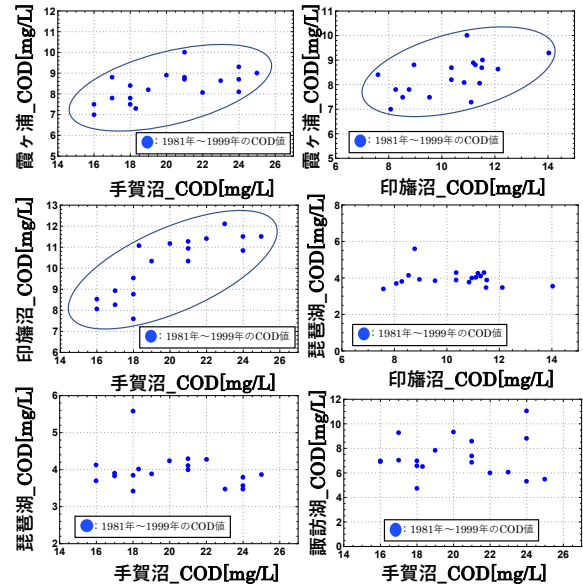


図-2 各湖沼間のCOD関係

(3湖沼の湖沼間のCODは正の相関関係を示した。一方、他の指定湖沼とは関係性が見られなかった)

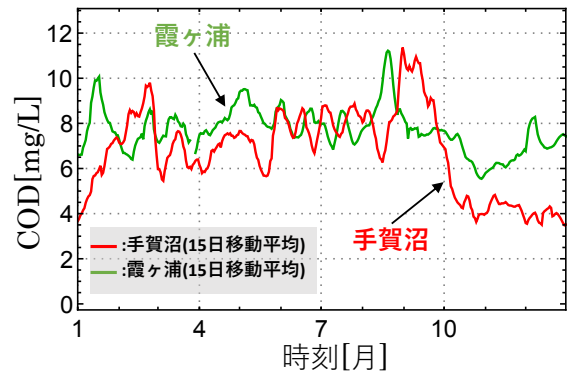


図-3 手賀沼、霞ヶ浦の15日移動平均のCODの変動
(日単位の手賀沼と霞ヶ浦のCOD変動では、霞ヶ浦のピーク約1ヶ月後に手賀沼のピークが見られ、明瞭な類似性が見られた)

や森林・田畑を負荷源とするもの、湖沼内で行われる生質等が含まれる。これまで、COD負荷割合を算出する手法は著者の知る限り3つある。1つ目は年間の実測COD値の最小値を外部負荷CODと仮定する手法⁹⁾。2つ目は植物プランクトンの指標として用いられるChlorophyll-a(Chl-a)とCODの相関が高いことから、回帰的にChl-aが0となる時のCODを外部負荷CODとする手法⁹⁾。3つ目は植

物プランクトンにより生産されるCODの殆どが不溶性CODであることから、不溶性CODを内部負荷CODとする手法⁹⁾。これら3つの中で、データの有無や物理的な根拠を加味し、本研究では2つ目の手法を用いる。既存の手法に加えて、本研究では季節変動を取り入れた内外部負荷を算出する手法を提案する。具体的には、図-5の上段左図に示すように、この散布図の上側には7、8月の夏期の観測値、下側には11、12月の冬期の観測値になっていたことから、外部負荷CODに幅を持たせることは、季節変動を表現していることを意味する。幅の捉え方として、統計学分野で不確実性の評価に用いられる信頼区間を一例に導入した。信頼区間を考慮した外部負荷CODの算出結果を図-5の下段に示す。回帰直線から求めた外部負荷CODは、3湖沼とも外部負荷CODが60%以上を占めていることが分かった。一方、季節変化を表現した95%信頼区間の上側では3湖沼とも外部負荷CODが約90%、95%信頼区間の下側では約50%を占めていることが分かった。つまり、1年間の中で変化する外部負荷CODの季節変化を考慮しても3湖沼の外部負荷CODの占める割合は50%以上である事が分かった。なお、手賀沼に関しては1998年以前のChl-aデータが存在しないため、それ以降の負荷割合を示している。

(3) COD外部負荷に湖沼内COD値の関係性

上記の手法により外部負荷CODの占める割合が大きいことから、次に外部負荷CODに着目した。一般的に、外部CODの負荷源は家庭排水、畜産、市街地、湖面降雨等に分けられる。さらに、これらの外部負荷CODの流入経路は河川、畜産用排水路、直接的な湖面流入に分けられる。上記3湖沼では、流域における土地利用割合や人口等から算出された外部負荷COD割合と外部負荷CODの流入経路から、そのほとんどが河川を通じた流入であることが報告されている^{7,8,9)}。

次に河川を通じた外部負荷CODに着目した。河川を通じた負荷量は、一般的に次式で表される。

$$L = C \times Q$$

ここに、 L : 負荷量(g/s), C : 水質濃度(mg/L), Q : 流量(m^3/s)である。この式で用いられる水質濃度と流量は一般的に水質濃度に比べ流量の値は十分に大きいことは知られている。流量に着目した。流量の算出については、水文学分野でピーク流量を簡易的に求める際に使われる、合理式を用いた。この式を用いることで、年間に湖沼へ流入した総流入量を求めた。

$$Q = \frac{1}{3.6} \times f \times A \times r$$

ここに、 Q : 流量(m^3/s), f : 流出係数, A : 流域面積(km^2), r : 降雨量(mm/h)である。なお、流出係数に関し

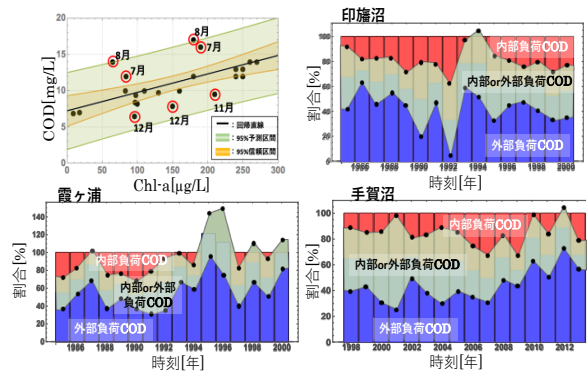


図-4 3湖沼のCOD内・外部負荷割合

(上左図に示す様に上側が主に夏季、下側が冬季であることに着目し、季節変化を考慮した外部負荷CODの算出を行った。その結果、3湖沼ともに季節変化を考慮し信頼区間の幅から算出した外部負荷CODは約50%以上を占めていることが分かった)

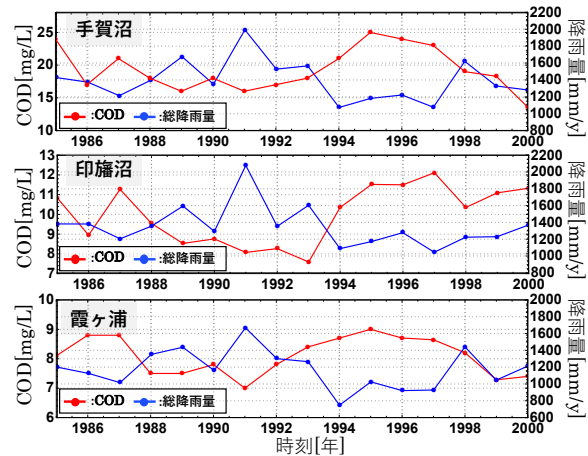


図-5 3湖沼のCODと年総降雨量の関係

(3湖沼ともCODと年総降雨量に負の相関が見られた。降雨量が多い年にCODが減少し、降雨量の少ない年にCODが増加している)

ては、各湖沼の土地利用割合から算出した値を用いた。算出した結果、1990年～2005年の15年間、3湖沼の土地利用割合はほとんど変化しておらず、流出係数はほぼ同じ値であった。また、流域面積も変化していないことから、各年で異なるのは降雨量だけである。そこで、降雨量とCODについて分析を行ったところ、両項目に負の相関関係があることが分かった。その結果を図-5に示す。特に、1989年から1991年にかけて、降雨量が多い年にCODが減少し、1992年から1997年にかけて、降雨量の少ない年にCODが増加していることが分かった。上記の理由として、降雨量が多い年、つまり湖沼への総流入量が多い年は、湖沼水が下流へと押し出された又は希釈されたことによりCODが減少したと考えられる。上記の結果から、3湖沼のCODの変動が類似していた理

由として、降雨量及び流入量が大きく関係していたことが分かった。これは、降雨量及び流入量の増減により、その年のCODの変動がある程度、推測できる。ただし、2000年以降、3湖沼のCODの変動に類似性が見られなかったことを考慮すると、各湖沼で数多く行われている水質改善対策が、降雨量や流入量によるCODの変動量以上にCODを変動させていると考えられる。

(4) 流入負荷量に関する新たな評価手法の提案

これまで、外部負荷CODに着目し、降雨量及び総流入量と関係があることを述べてきたが、実際に水質改善を行う際に、平水時又は洪水時、どちらの河川状況時に対策を行うことが効果的であるかが重要である。本研究では、確立統計的手法を用いた新たな流入負荷量の評価手法を提案した。一例として、印旛沼の主要流入河川である鹿島川を対象とした。算出方法は以下の手順で行った。

Step1 : 各河川の1年間分の流量データから作成される流況曲線図は経験分布であることから、累積分布関数が求まる。つまり、累積分布関数を微分することにより求まる確率密度関数は、1年間の流量の分布を指している。

Step2 : 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)を用いて水質汚濁負荷量 $L(Q)$ を算出する。

ここに、 L : 負荷量(g/s), Q : 流量(m³/s)である。

Step3 : 流量の確率密度関数 $f(Q)$ と水質負荷量 $L(Q)$ の積により、新たな外部負荷量を算出する。

$$\text{外部負荷COD} = L(Q) \times f(Q)$$

ここに、外部負荷COD(g/s), $f(Q)$: 流量の確率密度関数, $L(Q)$: 負荷量(g/s)である。

図-7に上記の手法により算出した結果を示す。この図にある平水量とは、1年間を通じ185日はこれより下がない流量を示しており、豊水量は95日より下がない流量を示している。これは、流況曲線図を作成する際に用いられる指標であり、豊水量とは洪水時を示している。ヒストグラムは流量とCOD濃度から回帰的に求めたCOD負荷量を示しており、新手法を用いることで、湖内への流入負荷COD量の分布のピーク時を見ることで、1年間に流入する負荷量が平水時又は洪水時、どちらに多く流入するかの判断が可能になった。この評価手法による結果、印旛沼では平水時に洪水時以上のCOD負荷量が流入していることから、平水時に水質改善対策を行うことが、効果的であると言える。

3. まとめ

(1) 3湖沼のCOD経年変化に類似性が見られ、月単位では手賀沼と印旛沼、日単位では霞ヶ浦と手賀沼にCOD

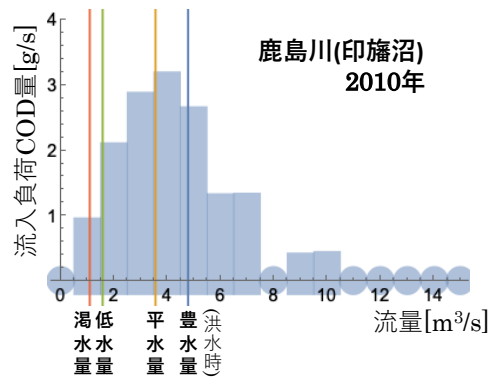


図-6 印旛沼に流入する負荷量の評価

(新たな負荷量の手法により、年間に流入する負荷量が平水時又は洪水時どちらに多く流入しているか評価できるようになった。)

変動の類似性が見られた。

(2) 新たに季節変化を考慮した内・外部負荷割合を算出する手法を用いた結果、3湖沼とも外部負荷CODの割合が50%以上を占めていることが分かった。

(3) 年総流入量及び降雨量とCODに負の相関関係があることが分かった。つまり、降雨量の増減によってCODが変導する成分量があることから、湖沼内における水質改善対策に加え、大気現象を考慮した対策及び評価が必要であると言える。

(4) 新たな負荷量の評価手法を用いることにより、平水時又は洪水時どちらに負荷が多いか評価することが可能になった。これは、例えば地方の住宅に単独浄化槽の設置を考える際、その民家からの排水が湖沼にどれほど影響を与えているか評価に用いることが出来る。

参考文献

- 1) 環境庁：平成 28 年度公共用水域水質測定結果, pp.9-15
- 2) 神谷宏, 大城等, 嵯峨友樹, 佐藤紗知子, 野尻由香理, 岸真司, 藤原敦夫, 神門利之, 菅原庄吾, 井上徹教, 山室真澄：浅い湖沼における滞留時間と栄養塩濃度が湖沼での COD 生産に与える影響, 応用生態工学 17(2), 79-88, 2015.
- 3) 鈴木誠治, 田端俊雄, 久保田治夫, 高村義親：河川流出負荷の日内時刻変動-霞ヶ浦流入河川の流出負荷に関する研究(V)-, 農業土木学会論文集 66 号, 1976.
- 4) 中西弘, 浮田正夫：海域における COD 生産について, 1975.
- 5) 福島武彦, 天野耕二, 村岡浩爾：湖沼水質の簡易な予測モデル, 第 9 巻, 775-785, 水質汚濁研究, 1986.
- 6) 白鳥孝治：印旛沼の水質の現状と課題, NPO 法人環境研究所年報 No.1, 2005.
- 7) 茨城県：「霞ヶ浦に係る湖沼水質保全計画」(第 7 期), 2016.
- 8) 千葉県：「印旛沼に係る湖沼水質保全計画」(第 7 期), 2016.
- 9) 千葉県：「手賀沼に係る湖沼水質保全計画」(第 6 期), 2010.