

資料

鰻池及びダム湖における水温と水質の状況について

坂元克行 尾辻裕一 貴島 宏
永井里央 長井一文

1 はじめに

公共用水域の水質の常時監視は、水質環境行政の基本となる水質汚濁防止法に位置づけられた事務であり、水環境の変化を継続的に把握し、対策に結びつけることがその主な目的である。

本県では、おおむね1975年から水質調査が開始され、1981年以降は、ほぼ現在同様の調査が継続されている。

本報では、長年蓄積した公共用水域の水質データを利用し、一定の期間内に県内主要湖沼の水質がどのような変化をたどったのかについて解析・検討を行ったので報告する。

2 解析の概要

2.1 対象地点

過去に同様の解析例のない県内湖沼のうち、継続的な調査が実施されている以下の3湖沼5地点を対象とした。

鰻池	基準点(湖心)
高隈ダム貯水池	基準点1(堰堤側), 2(流入側)
鶴田ダム貯水池	基準点1(流入側), 3(堰堤側)

なお、全ての地点で表層(水深0.5m層)の調査結果を用いた。

2.2 対象期間

対象期間は、鰻池は1983～2011年度、高隈ダム貯水池は1997～2011年度、鶴田ダム貯水池1984～2011年度とした。鰻池と高隈ダム貯水池は奇数月の年6回、鶴田ダム貯水池は毎月の年12回の調査として扱った。

2.3 対象項目

水温、COD、pH、DO、全窒素、全りん、クロロフィルaを対象とした。なお、対象期間の一部でのみ調査が実施されている項目については、実施期間のみを対象とした。また、継続的な調査が行われていない項目については対象外とした。

解析の対象としない参考項目として、全水深(図及び表中では項目名に※を付加する。)を扱った。

2.4 解析方法

季節変動と不規則変動を考慮した状態空間モデルを用いた季節調整法¹⁾による分析を行いトレンドを求めた。

ここでは便宜上、調査を年6回行っている地点では季節変動周期を12区間(2年周期)とし、調査を年12回行っている地点では季節変動周期を12区間(1年周期)として、Web Decomp²⁾を用いて算出した。

次に、項目ごとのトレンドを比較できるように、項目ごとに対象期間におけるトレンドの平均値と標準偏差を求め、トレンドと平均値の差を標準偏差で除することで標準化変量を求めた。なお、全水深については、ダム湖において人為的な管理がなされていることから実測値を使用した。

また、各項目の実測値を用いて、季節変動などを取り除いた解析対象期間内での傾向を見るために、時系列と採水月を考慮し説明変数とした重回帰分析を行った。

3 結果と考察

対象地点別に行った、トレンドの解析結果を図1～5に、重回帰分析の解析結果を表1～5に示す。

3.1 鰻池

鰻池基準点の結果について図1及び表1に示す。

図1より、水温のトレンドは期間の始めより上昇し、1998年度をピークとして、その後低下傾向にあることが分かった。

また、表1より、期間を通しての1年あたりの変化は $+1.78 \times 10^{-2} \text{°C}$ であった。

図1より、CODのトレンドは期間の始めより下降して、1986年度より上昇していた。その後、1992年度をピークとして下降に転じ、2006年度より再び上昇しつつある

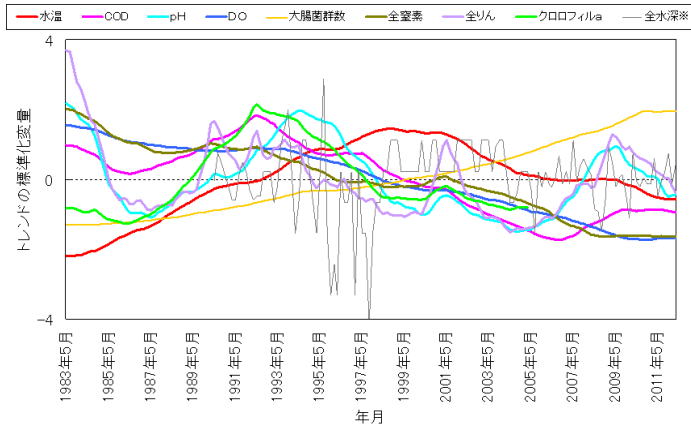


図1 鰻池基準点における各項目のトレンド

ことが分かった。

クロロフィルaのトレンドは、CODのトレンドと同時期に同じ傾向で変化していた。このことから、鰻池のCODは植物性プランクトンの増殖（内部生産）が関与していることが推定される。

全窒素のトレンドは、期間の全体として緩やかな下降を示している。その中で、1990年度、1992年度、1997年度、2001年度に小さな変化が確認できる。

一方、全りんのトレンドは、全窒素の小さな変化と同じ時期である1990年度、1992年度及び2001年度に変化が見られ、全窒素のそれよりも大きく変化している。また、2009年には全りんのトレンドのみが大きな変化を示していた。

鰻池に流入する流量の多い河川はないことから、汚濁の流入源は、主に直接集水域における自然系由来と生活系由来であると考えられる。全窒素のトレンド変化が小さいことを考慮すれば、全りんのトレンド変化は湖底からの溶出など系内におけるイベントに起因するものと推定できる。このことは、全りんの1990年度から1994年度にかけてのトレンドが、尾辻ら³⁾により示された近隣の池田湖における全りんのトレンドとも類似していることで裏付けられる。

pHのトレンドは、全りんのトレンドと同じ時期に変化することが分かった。

湖沼の場合には、その時々降水量等に応じて水位が変化するものであることから、図には、調査時における全水深の標準化変数を示した。表1より、全水深の期間を通しての標準偏差は1.13mと小さいことが分かった。図1より、1995年度から1997年度にかけては、水深換算で9m程度もの変化を示しているが、対象項目のトレンドに同調するものは確認できなかった。

大腸菌群数のトレンドは、期間の始めから終わりまで

表1 鰻池基準点における解析結果

項目	トレンド		回帰分析	単位
	平均値	標準偏差	変化/年	
水温	1.99×10	2.62×10^{-1}	1.78×10^{-2}	°C
COD	2.5	1.2×10^{-1}	-1.2×10^{-2}	mg/L
pH	8.1	9.8×10^{-2}	-3.5×10^{-3}	—
DO	9.0	1.2×10^{-1}	-1.8×10^{-2}	mg/L
大腸菌群数	8.8×10^2	4.5×10^2	7.7×10	MPN/100mL
全窒素	1.6×10^1	2.0×10^2	-2.5×10^{-3}	mg/L
全りん	7.3×10^{-3}	1.9×10^{-3}	-6.9×10^{-5}	mg/L
クロロフィルa	2.8	7.1×10^{-1}	3.6×10^{-3}	µg/L
全水深※	5.57×10	1.13	1.71×10^{-2}	m

一様に上昇し、表1より、1年あたりの変化は 7.7×10 MPN/100mLであった。

3. 2 高限ダム貯水池

高限ダム貯水池における基準点1（堰堤側）の結果について図2及び表2に、また基準点2（流入側）の結果について図3及び表3に示す。

図2より、基準点1における水温のトレンドは期間の始めから段階的に上昇、2008年度をピークとして、その後やや下降していることが分かった。表2より、基準点1における水温の期間を通しての1年あたりの変化は $+9.94 \times 10^{-3} \text{°C}$ であった。

図3より、基準点2における水温のトレンドの変化は、基準点1とほぼ同じであることが分かった。表2より、基準点2における水温の1年あたりの変化は $+9.76 \times 10^{-3} \text{°C}$ であり、基準点1とほぼ同じであった。

基準点1、2におけるCOD、pH及びDOについては、図2、3より、各項目とも同様なトレンドの変化を示していた。それぞれ、期間の始めより2000年度にかけて上昇し、2002年度まで下降した。再び2003年度まで上昇した後、2006年度にかけて下降した。更に2009年度まで上昇してその後下降と、期間中3回の増減を繰り返していた。

このように、CODとpH、DOのトレンドが同じように変化していることは、CODが内部生産に由来しているためであると推定できるが、植物性プランクトンの増減の指標となるクロロフィルaについての継続調査が行われておらず検証できなかった。

次に、内部生産に関わる栄養塩類の指標となる全窒素及び全りんのトレンドについて着目する。基準点2（流入側）における全りんのトレンドは、COD等の変化と時期が完全には一致していないものの、ある程度は同様に変化するように見て取れる。全窒素のトレンドは、

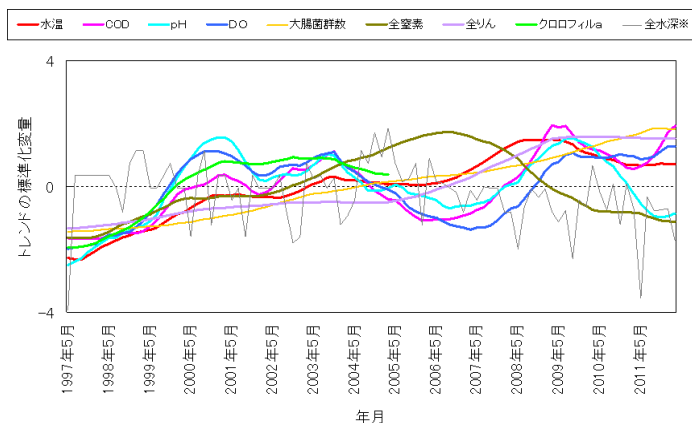


図2 高隈ダム貯水池基準点1における各項目のトレンド

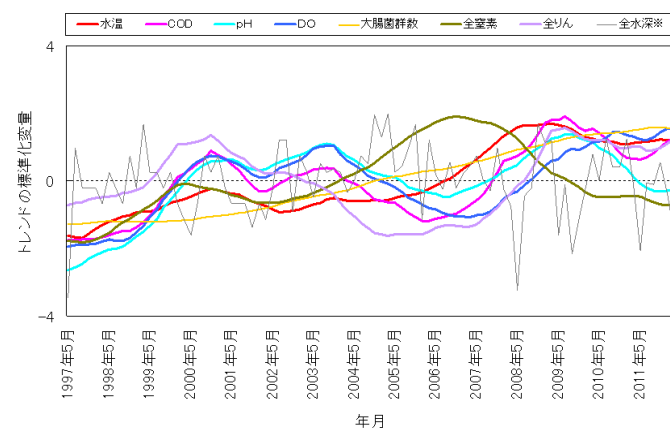


図3 高隈ダム貯水池基準点2における各項目のトレンド

両地点で同じ変化を示すが、COD等のそれとは全く異なる変化をしている。基準点1（堰堤側）における全りんのトレンドは、COD等の変化とは異なり、緩やかな上昇と横ばいを示している。これは溶存酸素と鉄が存在する水域では、流入したりん酸態りんが比較的短時間で湖底に沈降することが理由であると考えられる。

これらのことから、高隈ダム貯水池のCODについては、栄養塩類（特にりん）の流入に制限される内部生産由来であると推察される。

ダム湖の場合、その時々降水量や運用状況等に応じて極端に水位や水の入れ替わる頻度が変化するものであり、詳細な検討が必要であるが、水の入れ替わりに関するデータは入手できなかった。また、水質に対する水位の影響は確認できなかった。

大腸菌群数のトレンドは、鰻池と同様、期間を通して一様に上昇し、回帰分析より求めた1年あたりの変化は、表2、3より、基準点1が 2.8×10^2 MPN/100mL、基準点2が 1.2×10^2 MPN/100mLであった。

表2 高隈ダム貯水池基準点1における解析結果

項目	トレンド		回帰分析	単位
	平均値	標準偏差	変化/年	
水温	1.93×10	3.13×10^{-3}	9.94×10^{-3}	°C
COD	2.9	5.8×10^{-1}	9.3×10^{-2}	mg/L
pH	7.9	1.5×10^{-1}	1.2×10^{-2}	—
DO	1.0×10	2.7×10^{-1}	2.7×10^{-2}	mg/L
大腸菌群数	1.8×10^3	7.6×10^2	2.8×10^2	MPN/100mL
全窒素	8.0×10^{-1}	6.4×10^{-4}	3.5×10^{-4}	mg/L
全りん	1.5×10^{-2}	7.8×10^{-5}	2.4×10^{-4}	mg/L
クロロフィルa	1.3×10	4.0×10^{-2}	5.6×10^{-1}	µg/L
全水深※	2.41×10	2.57	1.61×10^{-1}	m

表3 高隈ダム貯水池基準点2における解析結果

項目	トレンド		回帰分析	単位
	平均値	標準偏差	変化/年	
水温	1.92×10	3.21×10^{-3}	9.76×10^{-3}	°C
COD	2.9	5.4×10^{-1}	-8.6×10^{-2}	mg/L
pH	7.9	1.1×10^{-1}	1.7×10^{-2}	—
DO	1.0×10	2.7×10^{-1}	3.9×10^{-2}	mg/L
大腸菌群数	1.1×10^3	3.3×10^2	1.2×10^2	MPN/100mL
全窒素	8.1×10^{-1}	4.9×10^{-4}	5.6×10^{-4}	mg/L
全りん	1.5×10^{-2}	2.5×10^{-3}	1.3×10^{-4}	mg/L
全水深※	1.84×10	2.14	1.93×10^{-2}	m

3. 3 鶴田ダム貯水池

鶴田ダム貯水池における基準点1（流入側）の結果について図4及び表4に、基準点3（堰堤側）の結果について図5及び表5に示す。図4、5より、水温は両基準点とも期間の始めより1994年度まで低く推移し、その後1998年度まで上昇、2007年度までは高く推移し、その後下降するというトレンドを示すことが分かった。期間を通しての1年あたりの変化は、表4、5より、基準点1では $+4.46 \times 10^{-2}$ °C、基準点3では $+4.33 \times 10^{-2}$ °Cと両基準点ともほぼ同じであり、鰻池や高隈ダム貯水池より変化が大きいことが分かった。

図4、5より、CODは両基準点とも期間の始めから1991年度までは下降し、基準点1では1994年度から、基準点3では1996年度から上昇していた。基準点1では2007年度を、基準点3では2005年度をピークとして、その後、下降していることが分かった。また、CODと水温のトレンドが、おおむね同調した動きで変化しているとも見て取れた。これは高隈ダム貯水池と同様であり、大きな流入河川のない自然湖沼である鰻池とは対照的である。

CODの変化が内部生産に由来すると仮定すれば、水

温が上昇した場合には、植物性プランクトンの増殖速度が速くなることから、CODと水温は直接的な関係を有する。また、両ダム湖の場合には、河川等からの流入により常に豊富な栄養塩の供給がなされ、全窒素、全りんとも高い濃度である。これらのことから、両ダム湖のCODは主に内部生産の速度に制限されていると推定できる。対照的に栄養塩の濃度が低い鰻池の場合には、CODは内部生産の速度よりも、系内における栄養塩循環に制限を受けているものと推定される。両ダム湖と鰻池の間には、全窒素濃度で5倍、全りん濃度で2倍の差があるにも関わらず、CODの差はわずかしかない。CODと栄養塩濃度の関連については諸説存在するが、湖水の入れ替わりの程度を検証すれば説明できることが予想される。

クロロフィルaのトレンドは、基準点1（流入側）ではCODのトレンドと同調した変化をしているものの、基準点3（堰堤側）では両トレンドは同調していなかった。このことから、内部生産のCODに対する影響は、基準点1の方が、より支配的であると考えられた。

鶴田ダム貯水池において、最も特徴的なトレンドの変化を示したのが全窒素とpHである。期間中において、小さな凸まで数えると10数回もの増減を繰り返している。その変化は両基準点とも明確に確認できる。水位の変動とは同調しておらず、また、他の湖沼と比較しても、このような濃度変化が自然的現象として生じることは想像し難い。このことは、鶴田ダム貯水池の上流域に存在する事業場等から、ダム湖全体の水質に十分な影響を与える高濃度かつ大量の窒素成分が、ある程度の期間を空けながら幾度も排出されたのが原因ではないかと予想される。

pHのトレンド変化は全窒素の変化と完全に一致していないが、pHの変化は湖沼内における内部生産等のイベントや、湖沼に流入する水質など複数の要因で形成されることから説明できる。pHのトレンド変化からは、全窒素の調査が開始された1996年度以前より、鶴田ダム貯水池が同様の影響を受けてきたことが推察される。

全りん及び大腸菌群数のトレンドは、期間の全体で単調な増加として示された。

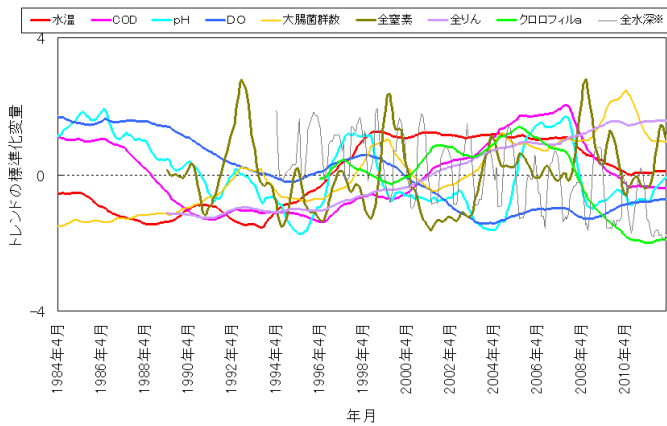


図4 鶴田ダム貯水池基準点1における各項目のトレンド

表4 鶴田ダム貯水池基準点1における解析結果

項目	トレンド		回帰分析	単位
	平均値	標準偏差	変化/年	
水温	1.95×10	4.90×10^{-1}	4.46×10^{-2}	°C
COD	2.7	1.5×10^{-1}	4.5×10^{-3}	mg/L
pH	7.8	1.9×10^{-1}	-8.6×10^{-3}	—
DO	1.0×10	6.0×10^{-1}	-7.0×10^{-2}	mg/L
大腸菌群数	2.7×10^3	1.7×10^3	2.0×10^2	MPN/100mL
全窒素	9.5×10^{-1}	6.7×10^{-2}	1.6×10^{-3}	mg/L
全りん	5.7×10^{-2}	6.3×10^{-3}	9.8×10^{-4}	mg/L
クロロフィルa	1.3×10	1.9	-2.5×10^{-1}	µg/L
全水深※	3.11×10	9.33	-1.15	m

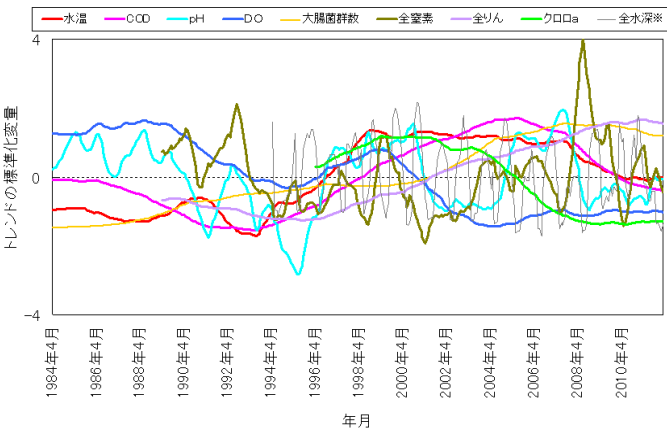


図5 鶴田ダム貯水池基準点3における各項目のトレンド

表5 鶴田ダム貯水池基準点3における解析結果

項目	トレンド		回帰分析	単位
	平均値	標準偏差	変化/年	
水温	1.96×10	4.85×10^{-1}	4.33×10^{-2}	°C
COD	2.9	2.0×10^{-1}	1.1×10^{-3}	mg/L
pH	8.0	2.2×10^{-1}	-2.1×10^{-3}	—
DO	1.1×10	7.5×10^{-1}	-8.5×10^{-2}	mg/L
大腸菌群数	1.7×10^3	8.7×10^2	1.1×10^2	MPN/100mL
全窒素	9.0×10^{-1}	7.7×10^{-2}	3.2×10^{-4}	mg/L
全りん	5.1×10^{-2}	4.6×10^{-3}	7.0×10^{-4}	mg/L
クロロフィルa	1.8×10	3.5	-2.5×10^{-1}	µg/L
全水深※	7.10×10	7.20	2.33×10^{-2}	m

4 まとめ

以上の結果から、以下のことが分かった。

- 1) 長期的かつ継続的な調査により得られた測定値からトレンドを求め、項目間の比較を行うことにより、水域における長期的な水質変動状況の把握と、水質形成要因の推定を行うことができた。このことから、長期間継続的に実施されている公共用水域の常時監視調査の有用性を再認識することができた。
- 2) 水温の変化が水質（特にCOD）に及ぼす影響は、全ての水域に当てはまる画一的なものとは言えず、各水域における水質形成要因を考慮する必要がある。

参考文献

- 1) Genshiro Kitagawa, Will Gersch ; A smoothness priors-state space modeling of time series with trend and seasonality, J Am Stat Assoc, **79**, 378～389 (1984)
- 2) 統計数理研究所 ; <http://ssnt.ism.ac.jp/inets/inets.html>
- 3) 尾辻裕一, 坂元克行, 他 ; 池田湖における水温と水質の状況について, 本誌, **12**, 85～91 (2011)