

高知城堀のアオコ発生要因の考察 (第1報)

桑尾房子・白木恭一*・堀内泰男

*平成18年3月退職

キーワード：アオコ、クロロフィルa、リン、窒素

1. はじめに

高知城の城堀(図1)は、高知県庁舎と議会棟の三方にめぐらされた延長約480m、水面積約6,400m²、水深0.5~1.5mの堀で、堀の南西部(A)から地下水約730リットル/分をほぼ常時供給し、主に北東部(H)から下水道に排出しているが、この堀では夏期にアオコがしばしば大量に発生し、観光資源である堀の景観を悪くしている。このため、アオコ発生の要因を明らかにし、発生予防に資するための調査を実施したので報告する。

2 調査内容

2.1 高知城堀の概要(図1)

地点Aの打込み井戸(深さ23.5~28.5m)から吐出した地下水は、東方へD、E、F、Gを経て(一部はGの手前で下水道に排出)Hの下水道排出口に流れている。また、地点Bは行き止まりで、水は滞留している。

水深を平均1mと仮定すると、地下水はおよそ6日間で堀を満たす計算になる。降水を除き堀へ流入する水はなく、堀には鯉や草魚が生息し、F点の橋の上からは市民や観光客らにより鯉に餌が時折与えられている。

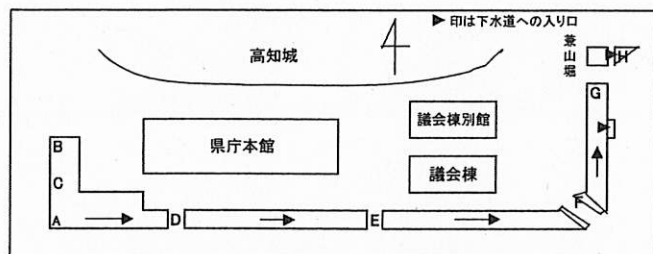


図1 高知城堀の採水地点

(1998年7月(A,B,C,D,E,F,G,H), 2005年4月~10月(A,D,E,F))

2.2 採水地点、調査期間および採水方法

アオコの発生時期を控えた1998年7月29日の調査では地点A、B、C、D、E、F、G、Hの順

(9時48分から37分間)に、2005年の調査(4月~10月(9回))ではA、D、E、Fの順に11時前後(38分以内)に、地点Aでは落下地下水を、地点B、C、Gは岸から、D、E、Fは橋の中央から、Hは排水溝からいずれも表層水を採取した。

2.3 測定項目

測定項目は気温、水温、pH、SS、DO、BOD、COD、全窒素(T-N)、硝酸態窒素(NO₃-N)、亜硝酸態窒素(NO₂-N)、硝酸態および亜硝酸態窒素(NO_{2,3}-N)、アンモニア態窒素(NH₄-N)、全溶解性窒素(TDN)、全リン(T-P)、リン酸態リン(PO₄-P)、全溶解性リン(TDP)、MBOD(modified BOD)¹⁾、MBOD-N¹⁾、MBOD-P¹⁾、クロロフィルa(Chl-a)である。

3 結果および考察

3.1 堀へ流入する地下水の水質(表1)

リンは全てリン酸態リンで、1998年の0.10mg/lに比べ2005年は0.13±0.00mg/lと高かった。その他の項目は両年で変化はほとんど無かった。

全窒素は、無機態窒素0.36mg/l(1998年)、0.36±0.01mg/l(2005年)で、両年共に有機態窒素は含まないと考えられた。

窒素およびリンの濃度は、水域の富栄養化の目安(窒素0.15mg/l、リン0.02mg/l)²⁾を越えており、また藻類の優占種を決定する因子とされるN/p比は3.6(1998年)、2.7(2005年)でアオコ発生の条件³⁾が備わっていた。

また、植物プランクトン中のクロロフィルa、リン、窒素比は1:1:7~10の関係があると報告されている¹⁾。この関係式より、地下水の無機態窒素とリン酸態リンの含有量から、クロロフィルa量の潜在的生産量を求めると、窒素が制限因子になる場合は36~51μg/lで、リンが制限因子となる場合は100μg/l(1998年)、130μg/l(2005

年) のレベルであった。

表1 堀に供給される地下水の水質

採水地点	単位	1998年7月29日	2005年4-10月 mean ± SD (測定回数)
水温(°C)	°C	17.8	18.1±0.4 (9)
色相		無色透明	無色透明 (9)
pH		7.8	7.5±0.4 (9)
SS	mg/L	<1	<1 (8)
DO	mg/L	5.1	5.6±0.5 (6)
DO飽和率	%	0.55	0.62±0.05 (6)
BOD	mg/L	<0.5	<0.5 (1)
COD	mg/L	<0.5	<0.5 (8)
MBOD	mg/L	N.T.	16.3±1.0 (8)
MBOD-N	mg/L	N.T.	16.3±1.6 (6)
MBOD-P	mg/L	N.T.	42.7±4.9 (5)
NH ₄ -N	mg/L	0.02	N.T.
NO ₂ -N	mg/L	<0.005	(NO _{2,3}) 0.32±0.02 (5)
NO ₃ -N	mg/L	0.34	
TDN	mg/L	0.36	N.T.
TN	mg/L	0.36	0.36±0.01 (9)
PO ₄ -P	mg/L	0.10	0.13±0.00 (5)
TDP	mg/L	0.10	N.T.
TP	mg/L	0.10	0.13±0.00 (9)
Chl-a	μg/L	<1	<1 (9)

N.T.: not tested

3. 2 植物性プランクトン発生と水質の変化

3. 2. 1 植物性プランクトンの発生状況

(1998年)

3. 2. 1. 1 栄養塩としての窒素の動態

図2に地点別クロロフィルaと各態窒素濃度の消長を示した。

吐出口から流下した地下水の無機態窒素 (IN) は、水の滞留している地点B, Cで大幅に低下し、これに反してクロロフィルaは一気に増加し、地点Dで46 μg/lであった。またクロロフィルaは、地点Eでいったん減少し、地点G~Hでさらに低下した。

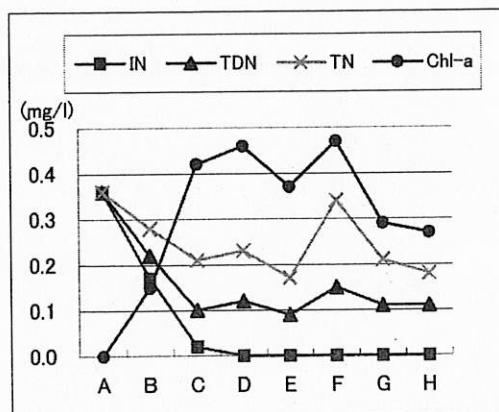


図2 地点別クロロフィルと各態窒素濃度

図3に、各地点での消費された無機態窒素により產生されるクロロフィルaの推定値と実測値について示した。推定値は $\text{Chl-a} = \text{IN} \times 8.5$ (中央値8.5mg/l) の関係式¹⁾から $\text{chl-a} = \text{IN} \div 8.5$ を用いた。クロロフィルaの推定値と実測値は良く近似し ($R = 0.884$ ($P = 0.004$)), 地下水の無機態窒素が植物性プランクトン生成に利用されていることが確認された。

また溶解性有機態窒素 (全溶解性窒素 - 無機態窒素) と不溶解性窒素 (全窒素 - 全溶解性窒素) はほぼ等量で、共にクロロフィルa量との相関性が高い ($R = 0.909$ ($P = 0.002$), $R = 0.618$ ($P = 0.034$)) ことから、不溶解性窒素は植物性プランクトンに、また溶解性有機態窒素はその分泌物や分解産物に由来するものと推測された。

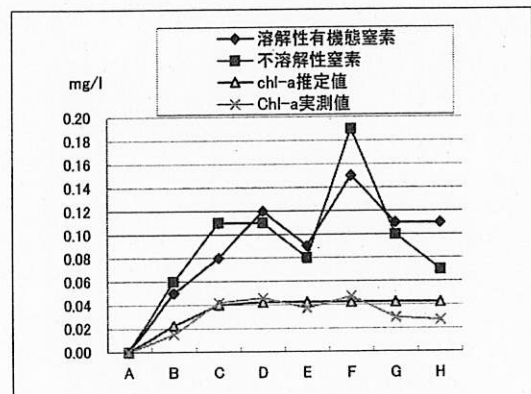


図3 窒素消費から推定されるクロロフィルa値と実測値

3. 2. 1. 2 栄養塩としてのリンの動態

図4に地点別クロロフィルaの実測値と推定値および各態のリンの消長を示した。

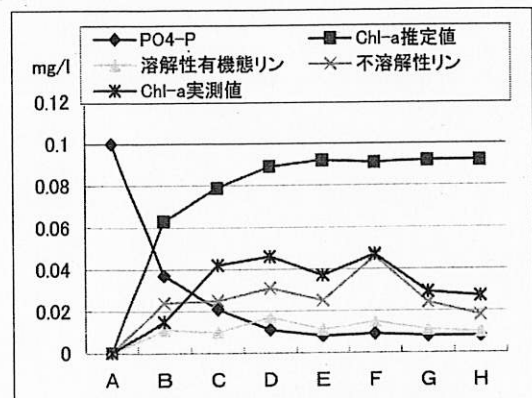


図4 リン消費から推定されるクロロフィルa値と実測値

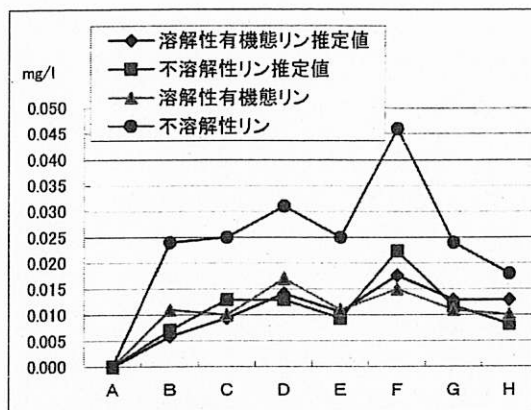


図5 溶解性リンと不溶解性リンの推定値と実測値

地下水のリン酸態リンは無機態窒素と同様に地点B, C, Dで大きく減少したが、地点E～Hにおいては0.008～0.009mg/lで推移した。

減少したリン酸態リンが、 $P\ 1\text{mg} = \text{chl-}a\ 1\text{mg}^{11)}$ の関係式に従い、全て植物性プランクトンに利用されると仮定したクロロフィルaの推定値は、地点B, C, Dでは実測値より2～4倍と多かった。このことからリン酸態リンはプランクトンの増殖以外にも消費されていることがうかがわれた。

また植物性プランクトンのリンと窒素の要求量比は1:7～10 (中央値8.5)¹¹⁾と報告されていることから、溶解性有機態窒素÷8.5が溶解性有機態リンと、不溶解性窒素÷8.5が不溶解性リンと近似値になると推定される。図5に推定値とそれらの実測値について示した。溶解性有機態リンでは推定値と実測値は近似したが、不溶解性リンの実測値は推定値より高い値を示した。この両者の差は、リン酸態リンは鉄、アルミニウムなどに吸着しやすいために、これらの元素が含まれる土粒子由来のSSに吸着したリン量を反映していることが推察された。今後、SS中のリンの含有状況など検証する必要があると思われる。

3. 2. 2 アオコ発生時における堀の水質変化 (2005年)

3. 2. 2. 1 アオコ発生に關与する無機態窒素の動態と水温

図6に7月14日から10月12日にかけてのクロロフィルa、無機態窒素($\text{NO}_{2,3}$)及び水温の関係を示した。

アオコが発生した8月11日の地点E, Fでの水

温は29.6度、31.2度、8月26日の地点Fでの水温は28.9度であった。一方、アオコの発生のない場合の最高水温が28.1度であった。すなわち堀での栄養塩類等の現状下においては、水中の無機態窒素が消失した後に空気中の窒素を固定して利用増殖出来るアオコが優占すると考えられる水温は、およそ29～31度(午前11時前後)であった。

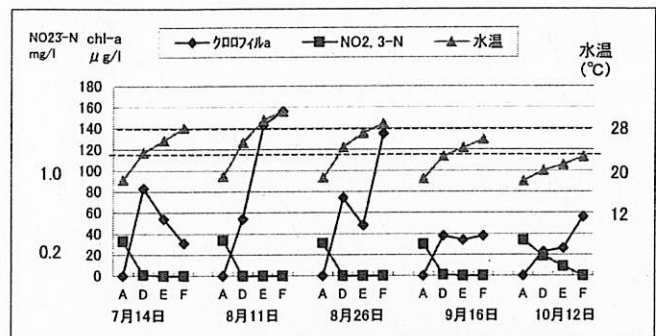


図6 アオコ発生に關与する水温レベル

3. 2. 2. 2 アオコの発生とリン酸態リン

図7に示す様に、8月11日の地点E, Fと26日の地点Fにおけるアオコ発生時のクロロフィルa量は、リン酸態リンの減少量から推定した値及び地下水の潜在的生産量を超過しており、同時に最も低下する地点Fにおいてもなお、リン酸態リン0.006～0.007mg/lが検出された。

リン酸態リンは好氣的条件でも嫌氣的条件の25～50%程度まで底泥から溶出され⁴⁾、またアオコ発生時のアルカリ化によりSSから溶出される⁵⁾と報告されている。この推計値との差について、堀は浅くて底泥表面は相当程度好氣的であること等を考えると、アオコの発生にリンが制限因子となった状況下では、リン酸態リンが供給されているものと推測された。

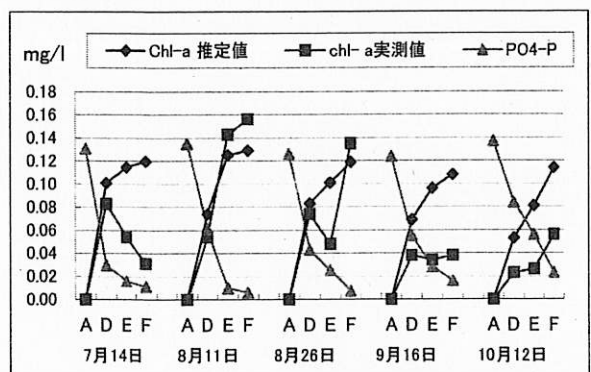


図7 リン酸性リン消費より推定されるクロロフィルa値と実測値

3. 2. 2. 3 アオコ発生時のMBOD, MBOD-N, MBOD-Pの動態

通常時とアオコ発生時のMBOD, MBOD-N, MBOD-Pの量的関係を図8に示す。通常時の7月14日では、地点D～Fで $MBOD \approx MBOD-N < MBOD-P$ の関係が成り立ち、全地点で栄養塩・窒素が植物性プランクトン増殖の制限因子であった。一方、アオコが発生した8月11日の地点E, Fと26日の地点Fでは $MBOD \approx MBOD-P \approx MBOD-N$ が成り立ち、リンが制限因子に変わった事が示唆された。

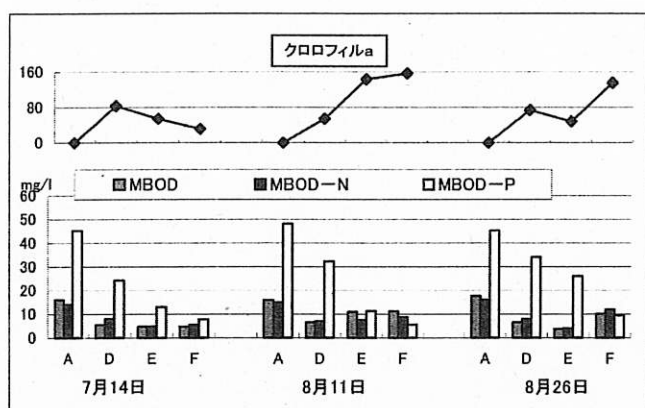


図8 各地点におけるMBOD, MBOD-N, MBOD-P

4 まとめ

- 1 水源である地下水のクロロフィルa量の潜在的生産量は、窒素が制限因子の場合は $36 \sim 51 \mu\text{g/l}$ 、リンが制限因子の場合は $100 \mu\text{g/l} \sim 130 \mu\text{g/l}$ と推計された。またそのN/P比(2.7～3.6)からアオコ発生の条件が備わっていた。
- 2 空気中の窒素を固定して利用増殖出来るアオコが優占すると考えられる水温は、およそ $29 \sim 31$ 度であった。

3 アオコ発生のない時では、 $MBOD \approx MBOD-N < MBOD-P$ の関係式から、窒素が植物性プランクトン増殖の制限因子となり、アオコ発生時には $MBOD \approx MBOD-P \approx MBOD-N$ からリンが制限因子となった。

4 通常時は、地下水から供給されるリン酸態リンの一部が植物性プランクトン生産に使われ、残余は底泥や土粒子SSに吸着・蓄積し、一方、リン酸態リンが制限因子となるアオコ発生時には、底泥等から供給されていると推定された。アオコの発生予防のためには、今後、底泥等の分析とともに、制限因子であるリンの収支や挙動等を詳細に調査検討する必要がある。

文 献

- 1) 中本信忠：生物利用可能栄養物質を評価するMBOD法。月刊下水道, 17- 23, Vol.18(2), 1995.
- 2) 青木透, 森邦広：利根川最上流域本川及び各支川の各態窒素リン濃度の変化。第35回日本水環境学会年会講演集, 5, 2001.
- 3) 藤本尚志, 福島武彦, 稲森悠平, 須藤隆一：全国湖沼データの解析による藍藻類の優占化と環境因子の関係。水環境学会誌18(11), 63-70, 1995.
- 4) 鈴木穰, 津森ジュン：底泥-水間の物質移動に関する調査。平成16年度下水道関係調査研究年次報告集, 209- 216, 2004.
- 5) 手塚公裕, 佐藤洋一, 中村玄正：富栄養湖の藻類増殖に及ぼす流入浮遊物質からのリン溶出の影響。水環境学会誌29(2), 87- 92, 2006.