

平成 24 年度アオコ調査結果報告書

1. 調査の目的

アオコの原因となるラン藻類の発生状況を定量的に把握し、その変動要因を明らかにするために西浦及び北浦において調査を実施した。ラン藻類の定量はラン藻に含有する色素である「フィコシアニン」濃度の測定により行った。

2. 調査の内容

調査は表 1 のとおりで、気象のデータについては表 2 のとおりである。

表 1 アオコ調査の概要

項目	内容
調査期間	6 月 19 日～8 月 31 日までの延べ 13 回（高浜入りの臨時調査を含む）
調査場所	<p>※必要に応じて上記以外の地点の調査も行った。</p>
調査項目	<ul style="list-style-type: none"> ○現場観測：水温，溶存酸素等 ○室内分析：栄養塩濃度（全窒素，全リン，硝酸態窒素，亜硝酸態窒素，アンモニア態窒素，リン酸態リン），フィコシアニン濃度，クロロフィル a 濃度等 ○ラン藻類の種組成
調査方法	<ul style="list-style-type: none"> ○採水：水面から 20cm 深までの湖水を定量的に採水 ○色素（フィコシアニン：蛍光光度計，クロロフィル a：吸光光度計） ○栄養塩濃度等：各種分析装置で計測 ○ラン藻類の種組成：プランクトンネットで濾過採取したものを検鏡

表 2 気象データの概要

項目	地点	観測機関
気温，降水量，日照時間	土浦，銚田，鹿嶋 （平年値は 1981 年～2010 年の平均値）	気象庁
風向風速	掛馬沖，釜谷沖	（独）水資源機構
	土浦，湖心	霞ヶ浦河川事務所

3. 調査結果と考察

1) フィコシアニン濃度の経日変化

フィコシアニン濃度の時間変化を図1に示す。土浦は、期間を通して他の調査地点に比べて概ね高めで推移するとともに、変動幅も大きかった。特に7/7や8月下旬は顕著に高く、8/9は低かった。一方で、湖心は期間を通して低めで推移し、特に8月中旬以降は顕著に低かった。このように土浦と湖心は対照的な変動を示した。安塚沖は7月下旬まで低めで推移したが、8月に入ると急増し、その後は土浦に次いで高めで推移した。武井沖は6月下旬～7月上旬にかけてやや高めになり、その後は横ばいで推移した。

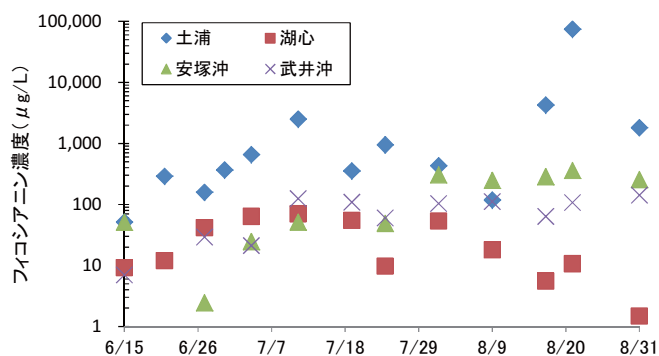


図1 フィコシアニン濃度の地点別変化

2) ラン藻類の種組成の変化

ラン藻類の種組成比（体積による）を図2に示す。土浦、武井沖ともに期間を通して *Microcystis* が最も優先した。また、土浦は7月上旬頃まで *Microcystis* の他に *Anabaena* や *Aphanizomenon* が出現し、武井沖は6月中旬に *Anabaena* が優占した。なお、*Microcystis* や *Anabaena* は霞ヶ浦においてアオコを形成する最も主要なラン藻である。

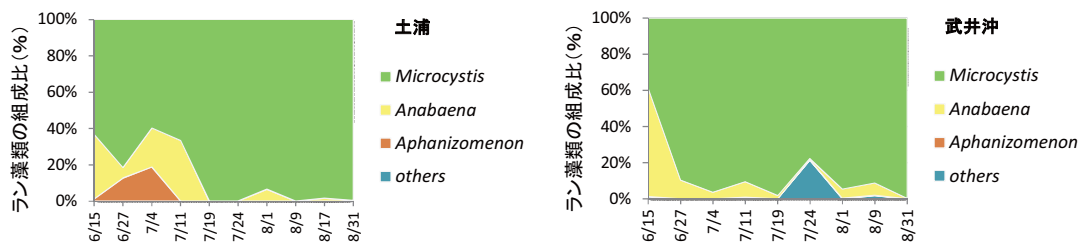


図2 ラン藻類の種組成比の経日変化（体積による）

3) ラン藻類の出現量とフィコシアニン濃度との関係

ラン藻類の体積とフィコシアニン濃度の関係を図3に示す。土浦は有意な相関関係があった ($P < 0.01$)。また、8/17の調査結果（図の青点）を除くと極めて高い相関関係となった。武井沖は有意な相関がなかったものの、7/24の調査結果（図の青点）を除くと有意な相関関係があった ($P < 0.05$)。 *Microcystis* や *Anabaena* などアオコの原因となるラン藻類が出現していたことを併せると、フィコシアニン濃度は、アオコの原因となるラン藻類の発生状況を反映していたと考えられる。

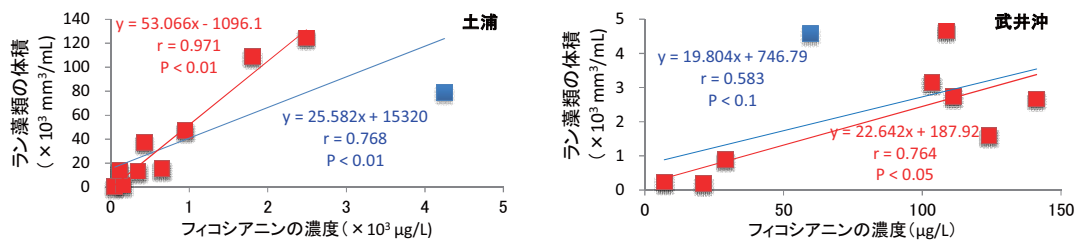


図3 ラン藻類の体積とフィコシアニン濃度の関係（赤は特定の調査日を除いた結果を示す）

4) 植物プランクトン群集に占めるラン藻類の割合

フィコシアニン/クロロフィルa比（以下、P/C比と記す）を図4に示す。クロロフィルaは全ての植物プランクトンに含まれる色素であるが、フィコシアニンはラン藻類等の特定の藻類にのみ含まれる。日野ら(1995)¹はP/C比が植物プランクトン群集に占めるラン藻類の優占の度合いを示す指標になるとしている。その結果、培養した複数種のラン藻のP/C比が、種ごと、株ごと、成長段階ごとに異なるが、それらの最大値の平均は6.83であった。この数値がラン藻類の優占した状態を表現していると考え本件に適用すると、土浦では7/7と8/21はP/C比がこの数値を上回っていることから、ラン藻類が優占していたと推定される。また、その他の期間の数値をみると、土浦は全期間、安塚沖は8月以降にラン藻類が50%近くか、それを大きく上回る割合だったと推定される。一方で、湖心や武井沖は概ね50%以下の水準で推移したと推定される。

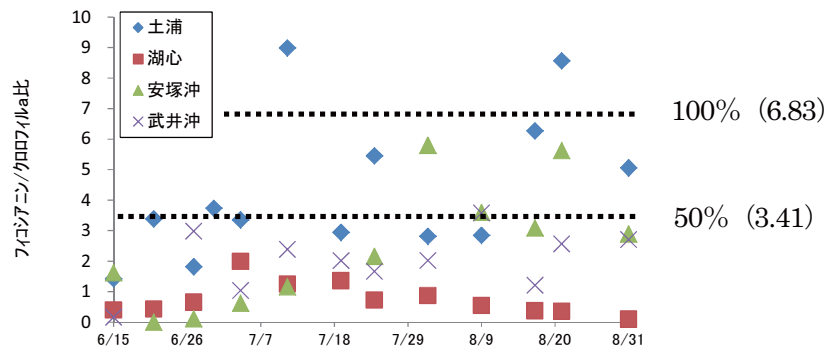


図4 フィコシアニン/クロロフィルa比の経日変化（点線はラン藻類の推定優占率）

5) 高浜入りのフィコシアニン濃度の分布（調査日：8/15）

高浜入りのフィコシアニン濃度の分布を図5に示す。高浜入りの深奥部の地点で高い傾向がみられるが、地点による濃度の違いが大きかった。

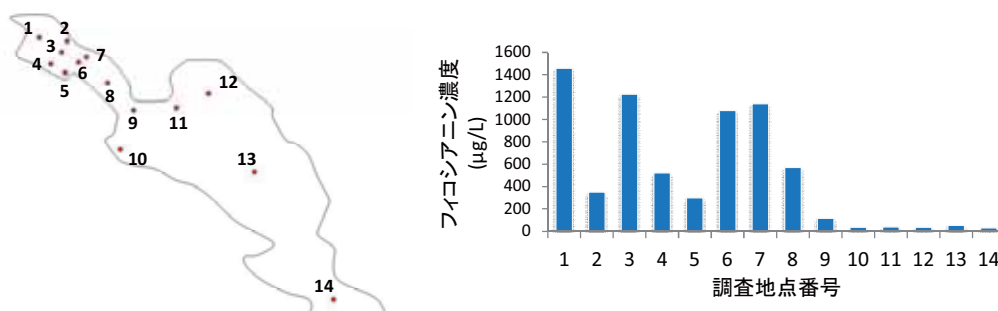


図5 高浜入りのフィコシアニンの濃度分布

6) 気象等の状況

①気温

気温を図6に示す。平年と比べて7月初旬まで概ね低め、以降は概ね高めで推移した。ただし、7/20～7/23や8/8～8/10は著しく低かった。

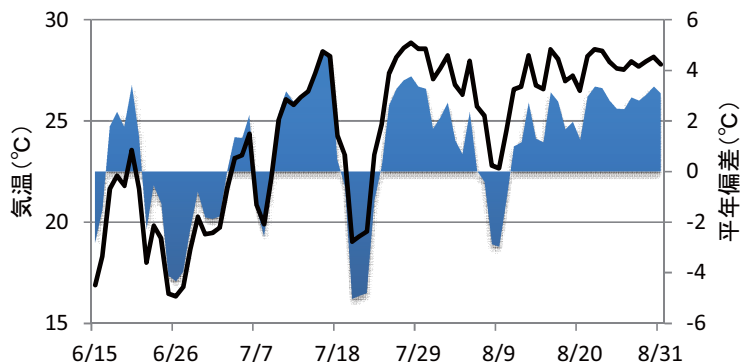


図6 気温及び平年偏差の経日変化（実線は気温で土浦、銚田、鹿嶋の平均値、青色は平年偏差）

②降水量

降水量を図7に示す。平年と比べて土浦や銚田では7月下旬～8月下旬まで著しく降水量が少なかった。鹿嶋でも7月下旬や8月下旬に降水量が少なかった（8月上旬に総降水量は多かったが、短時間の集中豪雨によるものである）。

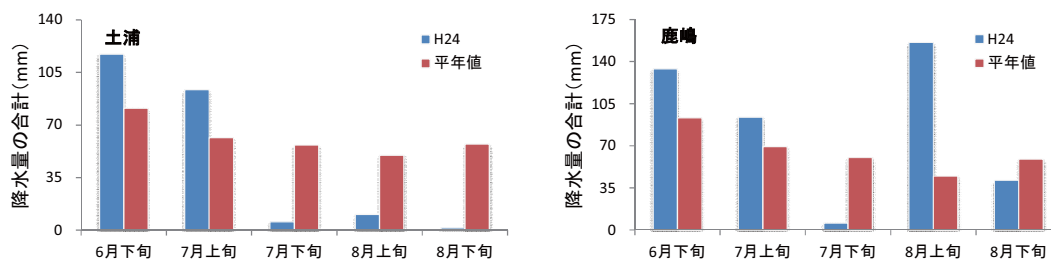


図7 旬別の降水量の変化

③日照時間

日照時間を図8に示す。平年と比べていずれの旬でも長かった。特に8月下旬は長かった。

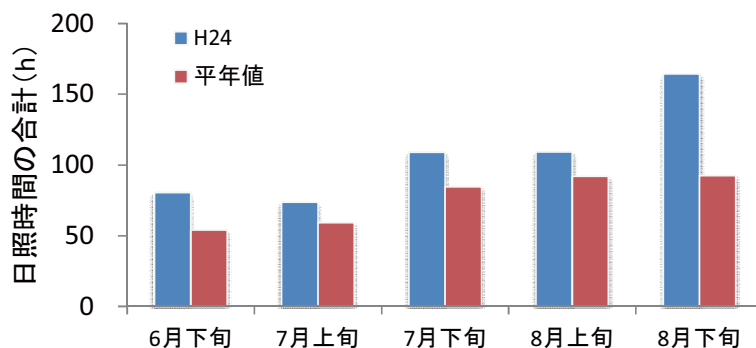


図8 日照時間の経旬変化（H24年は土浦、銚田、鹿嶋の平均値）

④風向

風向の出現頻度を図9に示す。観測地点毎に若干異なるが、全期間（6月下旬～8月下旬）を通して、南南西～北北東方向で高く、北北東～南南西方向で低かった。特に北北東～北北西方向は高く、東～南南東方向は低かった。月別では6月下旬に南南西～西方向が、8月下旬に北北西～北北東方向が卓越した。西浦は土浦入りや高浜入り、北浦は西岸や鉾田方向への風が卓越していたことになる。一方で、西浦は麻生方向、北浦は東岸や鯉川方向への風はほとんど吹かなかったことになる。

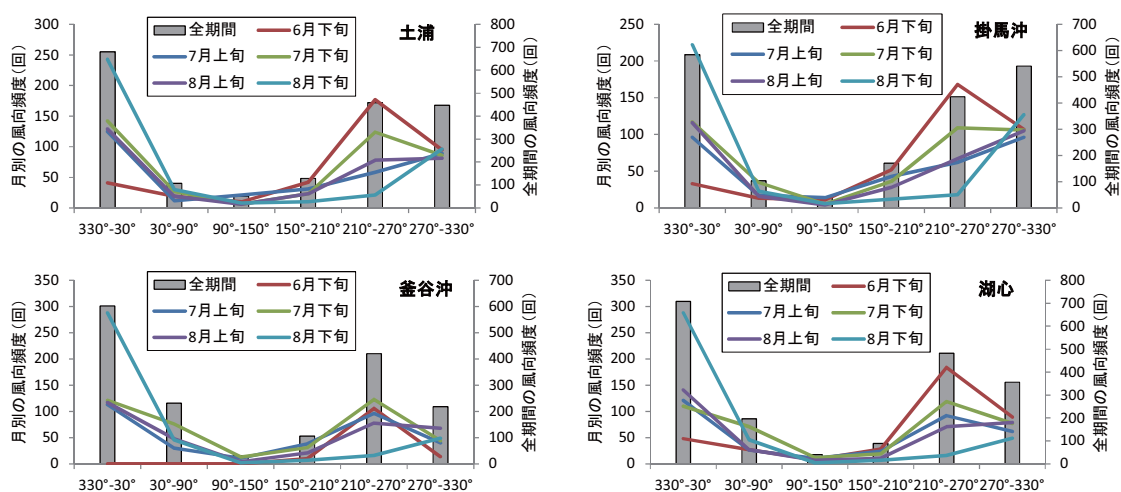


図9 旬別の風向出現頻度（風の吹く方向で示す。方角と方位の関係は以下の通り）

330° -30° 北北西～北北東, 30° -90° 北北東～東, 90° -150° 東～南南東, 150° -210° 南南東～南南西, 210° -270° 南南西～西, 270° -330° 西～北北西

⑤風速

風速の出現頻度と平均風速を図10に示す。風速4m/s以下を弱風、4m/sを超えた場合を強風とすると、土浦は弱風が卓越し、特に8月下旬は最も多くなった。掛馬沖は6月下旬～7月上旬まで強風の日が多く、8月下旬は弱風の日が多かった。湖心では強風が卓越し、土浦とは対照的であった。釜谷沖は強風の日が多かったが、8月下旬は弱風の日が多かった。

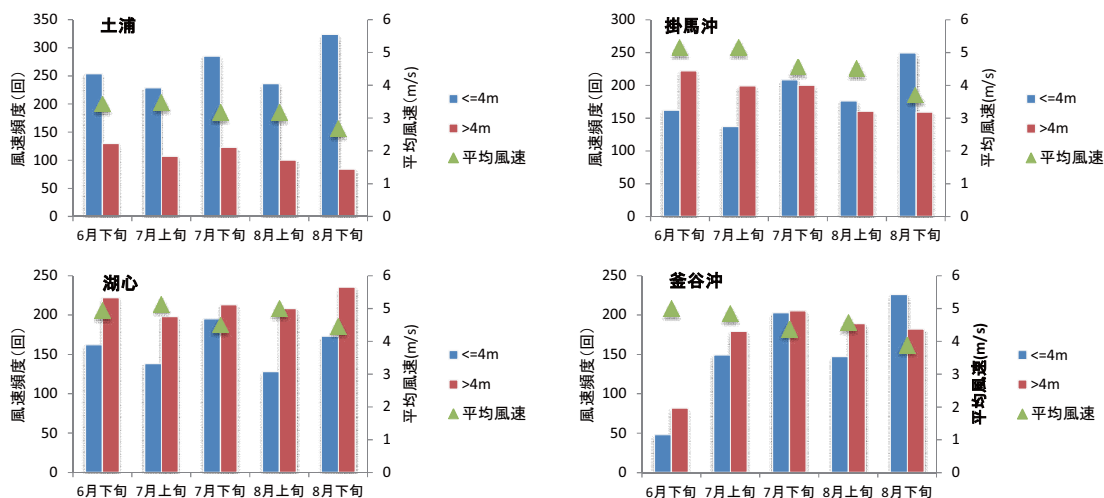


図10 旬別の風速出現頻度と平均風速

⑥ 昨年の風向風速との比較

湖心における昨年の風向風速との比較を図 11 に示す。風向は H23, H24 とともに南南西～北北東 (210° ～30°) 方向で高く、北北東～南南西 (30° ～210°) 方向で低く同様の傾向を示した。風速は昨年と比べると、7 月下旬と 8 月下旬に弱かった。

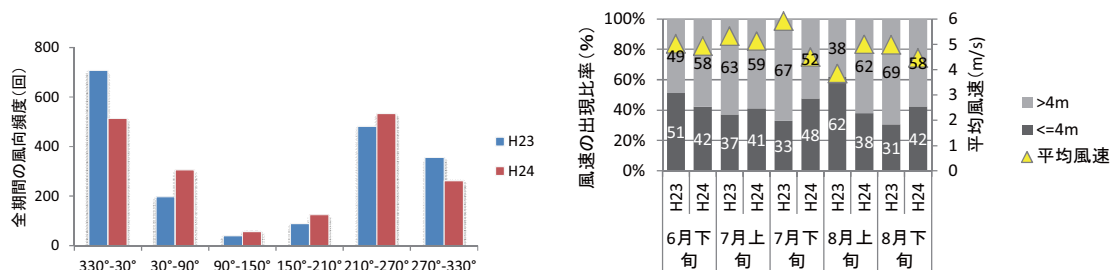


図 11 湖心における昨年の風向風速との比較 (左図：全期間の風向の出現頻度, 右図：風速の出現比率と平均風速)

⑦ 気象とフィコシアニン濃度の関係

アオコの原因となるラン藻類の増殖及び群体形成に適した気象条件として、気温が高く (水温が高く)、風の弱い日が続き (風速 4m/s 以下²⁾、湖水の滞留時間が長く、日射量が多いことなどが挙げられる。今年の 7 月以降の気象を平年と比べると、高気温、少雨 (湖水の滞留時間が長くなる)、長い日照時間で、アオコの発生しやすい気象条件だったと考えられる。特に 8 月下旬はこの傾向が顕著で、湖心を除いて弱風の日が多かったことから極めて好条件であったと推測される。また、風向は西浦では土浦入りや高浜入りの方向、北浦は北や西方向の頻度が高く、アオコはこれらの場所へ集積しやすかったと考えられる。実際に 8 月下旬の高浜入りでは、深奥部でフィコシアニン濃度が高かった。また、土浦は期間を通して弱風の日が圧倒的に多く、集積したアオコが拡散しにくかったと考えられる。気象とフィコシアニン濃度の変化を比較すると、土浦のフィコシアニン濃度は、8 月下旬には著しく高くなっておりアオコの発生しやすい気象条件とよく一致した。一方で、湖心のフィコシアニン濃度は 8 月下旬に低下していて一致しなかった。この原因は不明であるが、他の地点より風が強い日が多く (風速 4m/s を超える)、アオコが形成されにくいことや、吹き溜まることなどが理由として考えられる。また、安塚沖では 8 月以降、武井沖では 7 月上旬頃からフィコシアニン濃度は横ばいで推移し、8 月下旬に急増することはなかった。この原因について気象条件から説明は出来なかった。ただし、この時期に武井沖よりも安塚沖でフィコシアニン濃度が高かった理由としては、図 12 に示したとおり、北へ向かうほどフィコシアニン濃度が高くなっていったことや、北方向への風が卓越していたことを併せて考えると、ラン藻類が北に吹き寄せられていた可能性が示唆される。

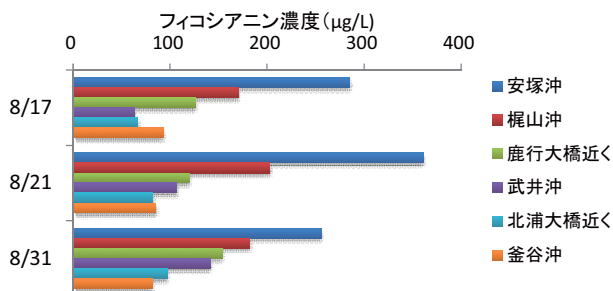


図 12 北浦における 8 月下旬の地点別フィコシアニン濃度

⑧水温とフィコシアニン濃度の関係

水温の経日変化を図13に示す。6月中は25℃以下、7月以降は25℃以上で推移し、8月以降は30℃を超える場所があった。土浦や武井沖で優占が確認された *Microcystis* は、他の藻類に比べて高水温に適応していると考えられている。水温とフィコシアニン濃度の関係を図14に示す。土浦と湖心は有意な相関関係はなかったが (P>0.05)、土浦では数日を除外すると有意な相関関係があった (P<0.01)。安塚沖と武井沖は有意な相関関係があった (P<0.01)。湖心を除いた3地点は25℃を超えたあたりからフィコシアニン濃度が急増する傾向があった。矢木ら (1981)³は *Microcystis* を用いた室内実験で、25℃以上で比増殖速度が急激に高くなることを示したが、この結果と今回の調査結果は良く一致した。

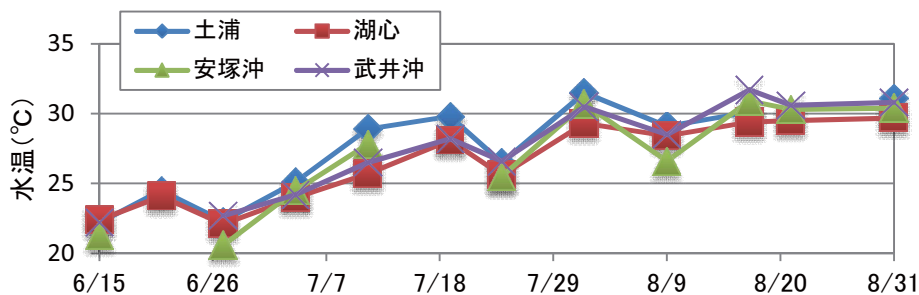


図13 水深10cmにおける水温の経日変化

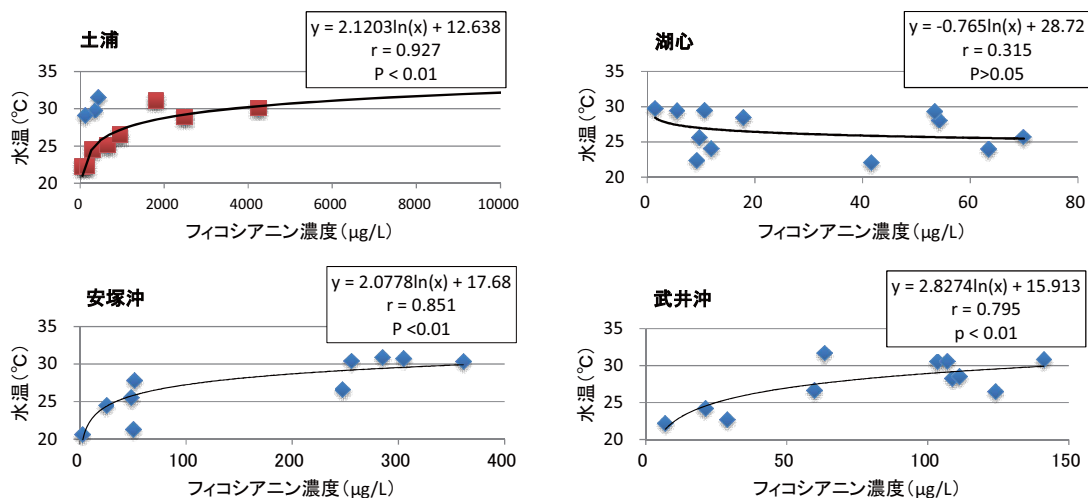


図14 水温とフィコシアニン濃度の相関関係

7) 栄養塩の状況

①窒素成分の変動とフィコシアニン濃度の関係

窒素成分の変動とフィコシアニン濃度の関係を図15に示す。アオコの原因となる *Microcystis* は窒素成分として硝酸態窒素 (NO₃-N) を好むとされている^{4,5}。土浦や湖心はフィコシアニン濃度が高い時に、武井沖は7月下旬以降に硝酸態窒素が枯渇しており、このような時には窒素制限状態であったと考えられる。一方で、安塚沖はフィコシアニン濃度が高まった7/19以降はそれ以前に比べると低くなったものの、全期間を通して硝酸態窒素は1mg/Lを下回ることはなかった。

懸濁態窒素 (P-TN) とフィコシアニン濃度の関係を図16に示す。土浦や湖心や武井沖で有意な相

関関係があった(P<0.01)。これは、懸濁態窒素がほぼラン藻類に含有した形態で存在していたことによるものと考えられる。一方で、安塚沖は両者に有意な相関関係がみられず、ラン藻類に含有した以外の形態で存在していた可能性がある。

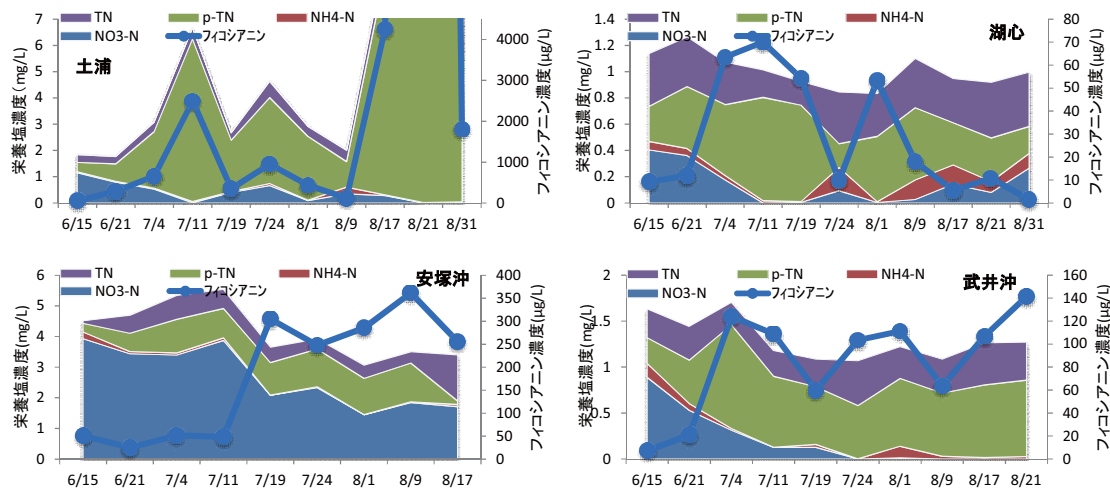


図 15 窒素成分とフィコシアニン濃度の経日変化

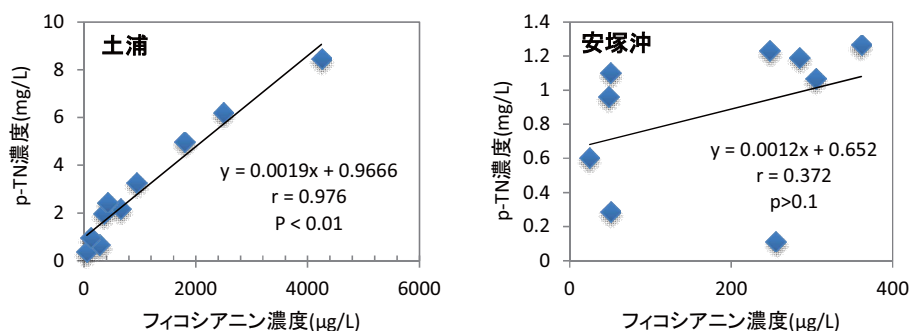


図 16 懸濁態窒素濃度 (P-TN) とフィコシアニン濃度の関係

②リン成分の変動とフィコシアニン濃度の関係

リン成分の変動とフィコシアニン濃度の関係を図 17 に示す。アオコの原因となるラン藻はリン成分としてリン酸態リン ($\text{PO}_4\text{-P}$) を利用する。リン酸態リン濃度が夏季としては低めと考えられる 0.01mg/L を下回ったのは、土浦は 6 月下旬～7 月上旬及び 8/21、湖心は 6 月下旬～7 月上旬及び 8/1、安塚沖は 7 月上旬～8 月上旬、武井沖は 6 月下旬～7 月上旬であった。

懸濁態リン (P-TP) とフィコシアニン濃度の関係を図 18 に示す。土浦や安塚沖、武井沖で有意な相関関係があり、湖心では 6/21 を除くと有意な相関関係があった。これは、窒素成分の場合と同様に、懸濁態リンがラン藻類に含有した形態で存在していたことによるものと考えられる。

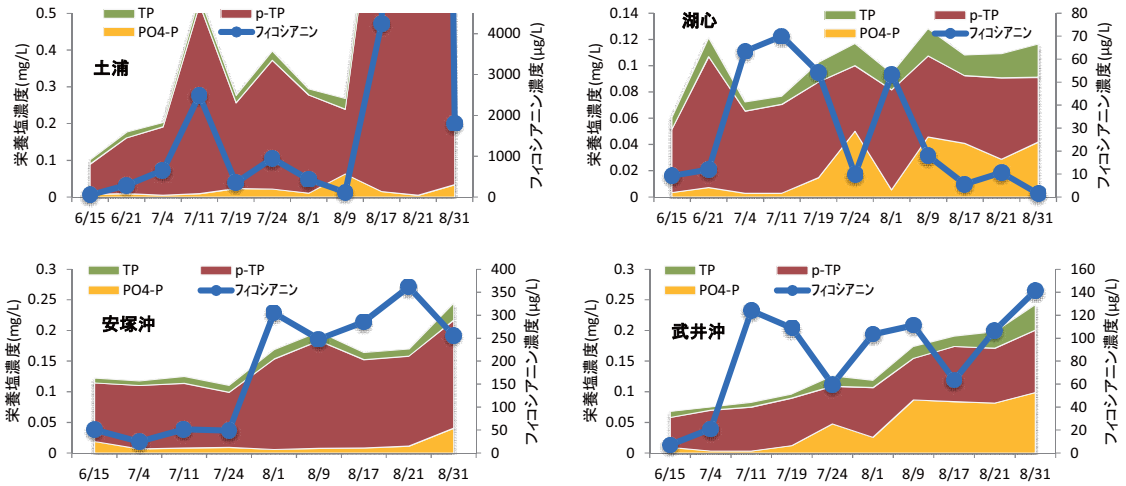


図 17 リン成分とフイコシアニン濃度の経日変化

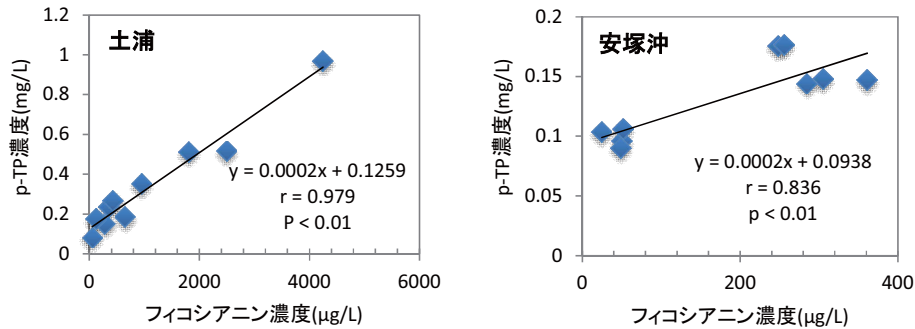


図 18 懸濁態リン濃度 (P-TP) とフイコシアニン濃度の関係

③TN/TP 比の変動とフイコシアニン濃度の関係

TN/TP 比が藻類に及ぼす影響については諸説あるが、TN/TP 比が 29 を超えるとラン藻類が出現しないとの報告や⁶、5 未満や 20 を超えるとラン藻類の出現率が低下するとの報告がある⁷。TN/TP 比の変動とフイコシアニン濃度の関係を図 19 に示す。土浦や湖心の TN/TP 比は 5~20 の範囲内で推移したが、フイコシアニン濃度との間に明瞭な関係はみられなかった。一方で、安塚沖の TN/TP 比は 7 月まで 36 以上と高かったが、8 月以降 21 以下となり、同調してフイコシアニン濃度は 8 月以降に急増したことから、TN/TP 比の変動がラン藻類の出現量 (フイコシアニン濃度) に影響を与えた可能性がある。また、武井沖の TN/TP 比は 7/4 に 19、7/11 に 20 で、以降は 20 以下で推移したが、フイコシアニン濃度は 7/11 に急増しており、TN/TP 比との関係性は明瞭ではない。

安塚沖における TN/TP 比と P/C 比 (フイコシアニンクロロフィル a 比) の関係を図 20 に示す。安塚沖では [P/C 比, TN/TP 比] が [3~6, 20 付近] の A 群と、[0~2, 40~50 付近] の B 群に分類できた。A 群は藻類に占めるラン藻類の優占度が高い場合に TN/TP 比は低めで、B 群は藻類に占めるラン藻類の優占度が低い (様々な種類の藻類が存在する) 場合に TN/TP 比が高いことを示していると考えられる。

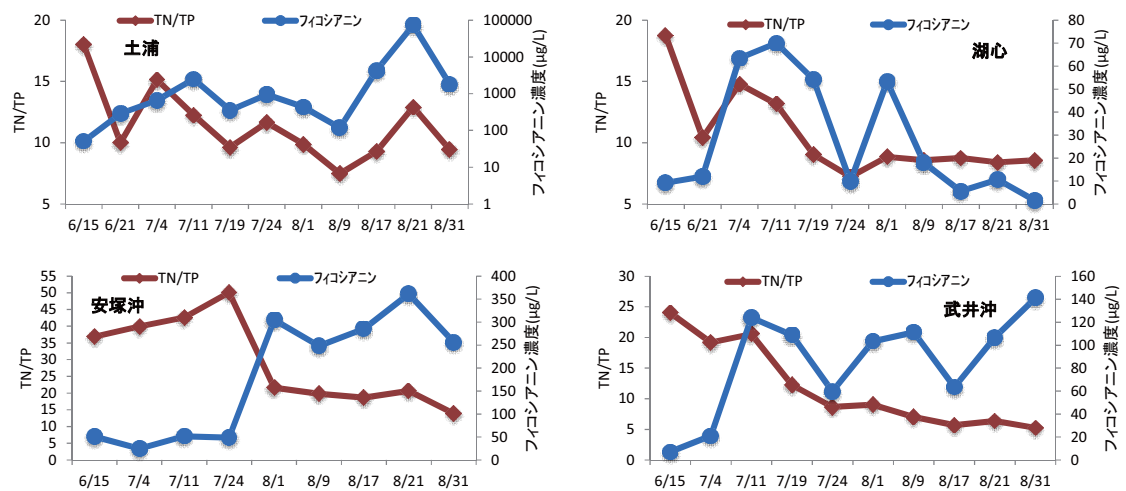


図 19 TN/TP 比とフィコシアニン濃度の関係

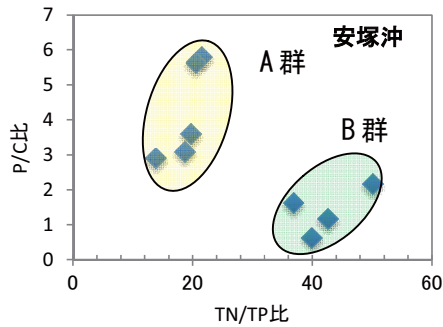


図 20 安塚沖における TN/TP 比と P/C 比の関係

4. 北浦でアオコの発生量が少なかった理由

北浦では平成 23 年に銚田川を中心としてアオコが多量に発生して大きな問題となった。このことから、今年も多量の発生を推測していたがほとんど発生しなかった。

気象庁によれば今年の東日本の気温は 8 月下旬から 9 月中旬にかけて 1961 年以降で 1~2 位であり、著しく高かったと発表している⁸。また、8 月下旬は弱風であり、降水量も少ないなど、気象条件はアオコの発生にとってかなり良い条件であったと考えられる。したがって、アオコの発生量が少なかったのは気象条件以外に原因があったと考えられる。栄養塩についてみると武井沖での調査結果から 7 月下旬以降はリン成分が十分存在していたものの、窒素成分は枯渇しており、制限因子になっていると推測された。したがって広い範囲でこのような傾向であったならば、窒素成分の枯渇がアオコの原因となるラン藻類の増殖を抑制した可能性がある。また、武井沖のラン藻類の種組成は群体を形成してアオコになる *Microcystis* が優占していたが、北浦下流域の現場では湖水が著しく緑色を呈していて、一見するとアオコが発生しているように見えたのだが、採水して観察するとアオコが確認できないことがあった。このことは、今年発生した *Microcystis* が群体になりにくい性質のものであったことを示しているのかもしれない。

5. アオコの発生予測について

今回のアオコ調査では、アオコの調査結果に併せてアオコの発生予測も行い、「アオコ情報」として霞ヶ浦環境科学センターのホームページ上で公表した。アオコの発生予測については主に気象庁の予報を頼りに「気温が高く」、「降水量が少なく」、「日射量が多い」場合にアオコが発生しやすくなると判断した。しかしながら、風に関する気象予測が得られなかったことや、定量的な予測には課題があるので、今回の調査結果を踏まえて、今後の予報のあるべき方向性について考えてみる。

予測については、「いつ」、「どこで」、「どれくらい」発生するのかをどの程度まで予測できるかを検討する必要がある。「いつ」という点については、水温が 25℃付近から急激にフィコシアニン濃度が増加したことから、水温の測定により時期の予測は可能であると考えられる。次に「どこで」という点については、風下方向でフィコシアニン濃度が高まる傾向があったことから、風向（厳密には風によって引き起こされる湖流）の予測が不可欠となるが、西浦では土浦入りや高浜入り、北浦では西岸や北部へ季節的な卓越風が存在することから、これらの場所では、ある程度発生を予測することが出来るかもしれない。「どれくらい」については、風が強い（4m/s を超える）場合にはアオコが拡散すると考えられていることや、フィコシアニンが発生量の目安になることから、フィコシアニンを測定することにより、絶対量としては難しくても、相対量として予測できる可能性がある。実際には、気象や栄養塩濃度などの予測モデルを活用し、予測の初期値として実測値が得られれば、定量的な予測に近づけることが可能と考えられる。さらに、時空間的に情報量が多い方が予測精度は高まると考えられることから、今後は、テレメトリー技術（自動連続観測装置による観測）やリモートセンシング技術（人工衛星による面的な観測）を予測に活用することも考えられる。

6. 参考文献

- 1 日野修次・高野敬志 (1995) 湖沼におけるラン藻優占度の推定, 国立環境研究所研究報告 (F-72-'95)
- 2 岩佐義朗編著 湖沼工学 372-374
- 3 矢木修身・岡田光・須藤隆一・萩原富司・高村義親 (1981) *Microcystis* の増殖特性. 国立公害研究所研究報告 25 号
- 4 大槻 晃・河合崇欣・相崎守弘 (1981) 霞ヶ浦高浜入りにおけるリンおよび溶存態窒素の動態, 国立公害研究所研究報告 22 号
- 5 朴 虎東・横山淳史・沖野外輝夫 (2003) 諏訪湖におけるアオコ毒素 microcystin の動態, 山地水環境教育研究センター研究報告 1 : 79-97
- 6 V. H. Smith (1983) Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton, science, 22, 669-671.
- 7 藤本尚志 福島武彦 (1995) 湖沼における藻類種と環境因子との関係, 国立環境研究所研究報告 (F-72-'95)
- 8 平成 24 年 8 月下旬～9 月中旬の北日本と東日本の高温について 気象庁ホームページより

霞ヶ浦環境科学センター

担当：湖沼環境研究室

住所：〒300-0023 茨城県土浦市沖宿町 1853 番地

TEL 029 (828) 0963 (dial in)

FAX 029 (828) 0968

