光センサーによる貯水池の藻類異常増殖現象の時空間観測

Field study on phytoplankton growth by using optical sensor

横山勝英*・石川忠晴**・正岡孝浩***

By Katsuhide YOKOYAMA, Tadaharu ISHIKAWA, Takahiro MASAOKA

An optical sensor was used for the measurement of chl-a concentration in the Shichigashuku Reservoir in order to clarify the growth and decay of phytoplankton bloom which is highly unsteady and non-uniform phenomenon. The measurement shows the followings: The plankton was stratified just above the thermocline, going down with their growth by the displacement of the thermocline. The period of the bloom was only one week and it was concentrated in a rather shallow area where nutrient may be supplied from the bottom. Total mass of Chl-a integrated in the reservoir is compared with the time variation of phosphorus(P) which was estimated from water quality analysis. The result shows that most of P is consumed at the end of the bloom and that (P/chl-a) ratio of phytoplankton was almost unity which is consistent with the value of the ratio shown in a literature.

1. はじめに

比較的栄養レベルの低い貯水池でも、突然に淡水赤潮が生じることがある。淡水赤潮は1ヶ月程度の短期間に発生し消滅する非正常性の強い現象であり、また空間的にも不均一性が高いため、定期的な水質観測では現象の変化過程を十分に把握できないことが多い。

淡水赤潮に関する調査・研究は近年かなり進められているが¹⁾、そこでは採水分析により得られる植物プランクトン個体数やクロロフィルa量が指標として用いられている。しかし、採水分析は時間と労力がかかり、時空間的に密なデータを得ることが技術的に困難であるため、淡水赤潮の消長については必ずしも詳細に把握できていない。

そこで本研究では、光学センサーによりクロロフィルa濃度を手軽に計測できる水質計を用いて、時空間的に密度の高い現地観測を実施し、植物プランクトンの増殖・移動・消滅を日単位で捉えることを試みた。現地観測は宮城県七ヶ宿貯水池で実施した。この貯水池は平成元年に湛水を開始した比較的新しい貯水池であるが、近年淡水赤潮が発生するようになり、1995年6月には浄水の濾過障害が生じている²⁾。

* 学生員 工修 東京工業大学大学院 環境物理工学専攻 日本学術振興会特別研究員
(〒226 横浜市緑区長津田町4259)

** 正会員 工博 東京工業大学教授 大学院総理工環境物理工学専攻

*** 学生員 東京工業大学大学院 環境物理工学専攻

2. 現地観測の概要

観測対象地は宮城県白石川水系七ヶ宿貯水池である。貯水池の平面形と観測点を図-1に示す。七ヶ宿貯水池の総貯水容量は約1億 m^3 、最大水深は約45m、湛水延長は約5kmであり、オールサーチャージ方式で表層放流を行っている。流域面積は約240 km^2 で、その93%は森林、残りの土地利用は田畑、集落となっており、人工的な汚濁負荷量は少ないと考えられる。

七ヶ宿貯水池の平均的な栄養状態は、全リン濃度が0.01~0.02ppm、全窒素濃度が0.2~0.4ppmで、OECDの評価基準によれば中栄養程度の水質状態であると言える。またN:P比が15以上であることからリン制限状態にあると考えられる。淡水赤潮の生じる5~6月の透明度は約3mであり、補償深度は6~8m程度と考えられる。

一般に中栄養のダム湖では春先から梅雨の時期に淡水赤潮が発生すると言われており、七ヶ宿貯水池でも1995年6月には水道局の浄水施設で濾過障害が生じた。そこで本研究では1996年5~6月に集中観測を実施した。観測は原則として毎日行ったが、ダム管理所の作業船を使用する都合上、休日と強風の時は出船できなかった。ただし、湖岸橋梁から観測できるC1地点では、連続して観測を実施した。

植物プランクトンの発生・増殖には地形や水深が影響を及ぼすと考えられるので、観測点を図-1に示すように配置した。すなわち、旧河道で水深が深いAシリーズの4点、旧河岸段丘で浅瀬のBシリーズの2点、入江のCシリーズの4点と補足点D1、D2の合計13点である。

本観測では、アレック電子製の有線式水質計（クロロテックACL-1180）を用いてクロロフィルa（以下Chl-aと記述する）、水温、濁度の鉛直分布を計測した。この測定機はChl-a濃度を蛍光光度計で測定するため、計測値の出力は瞬時であり、水深40mを25cm程度のピッチで計測するのに要する時間は5分程度である。したがって機動的観測が可能であり、全計測地点での測定を3時間程度で終了できた。

水質計の蛍光反射強度から求められたChl-a濃度は、水質分析による実際のChl-a濃度と同じではない。すなわち両者の関係は植物プランクトンの種類や活性度などに依存するため、各観測ごとにキャリブレーションしなければならない。そこで、宮城県仙南仙塩広域水道事務所が同時期に行ったの採水分析によるChl-a濃度のデータを用いて、筆者らの測定結果との相関関係を求めた。

図-1 貯水池平面図と観測点

写真-1 アステリオネラの顕微鏡写真

図-2 クロロフィルa鉛直分布の比較

3. 観測結果

3-1 植物プランクトンの優占種とクロロフィル a 濃度の検定

観測期間中の植物プランクトンの優占種は珪藻類のアステリオネラであった。写真-1 にアステリオネラの顕微鏡写真（撮影倍率200倍）を示す。中栄養程度のダム湖でみられる淡水赤潮の優先種としては、渦鞭毛藻類が多く報告されているが³⁾、七ヶ宿貯水池ではほとんど観測されていない。

Chl-aの鉛直分布の一例を図-2 に示す。実線は筆者らが用いている水質計の値（A1地点）で、○は水道事務所の分析値（取水塔）である。Chl-aが高濃度の時には両者の分布型が相似であり、水質計によるChl-a濃度の計測が有効であることを示している。ただし、表層付近の濃度の対応関係は必ずしも良くない。この理由は次のように考えられる。この水質計は光を用いて計測するので、表層付近では太陽光の影響を受けてしまい正しい値が得られない恐れがある。その限界については別途詳細な検討が必要とされるが、現時点では不明である。そのため本研究では0～2 mにおける測定値は採用しないこととした。

以上をもとに、図-3 に示す相関図を作成した。相関関係はほぼ一価の関係で表されているので、最小自乗法により図中に示す回帰式を作成した。以後は、この回帰式を用いて出力値を補正した。

3-2 植物プランクトンの消長と鉛直分布の変化

図-4 にC1地点のChl-a鉛直分布の時系列を、図-5 に同地点の水温分布を等値線図にして示す。図は縦軸が水深、横軸が時間を表している。また、図-6 に観測期間の気象条件（雨量、日射、気温、風）を示す。Chl-a濃度の時間変化を気象因子と比較すると、風が弱く穏やかな曇天

図-3 クロロフィル a 相関図

図-4 クロロフィル a 鉛直分布の等値線図（C1）

図-5 水温鉛直分布の等値線図（C1）

図-6 気象条件（雨量・日射・気温・風）

の時(6/8)に急激に増殖して、降雨後に晴れて風が出た日(6/12)にピークが消滅しており、消長の時間スケールは数日単位であることが理解できる。

また、Chl-a濃度は、初期の段階では6ppbで鉛直方向にほぼ一様であったが、3週間程度でピーク水深が徐々に深くなりながら25ppb程度に増加している。通常、植物プランクトンは補償深度内で生産活動が行われるとされている。七ヶ宿貯水池の補償深度は約6～8mであるが、Chl-a濃度のピークが6～8mに現れていることから、植物プランクトンは補償深度ぎりぎりのところで生産されているものと考えられる。さらに、図-5の水温構造と比較するとピーク濃度は躍層付近に現れ、躍層位置の低下に伴ってピーク水深が深くなってゆくことが分かる。このことから、この時期の植物プランクトン(アステリオネラ)の運動能力はかなり低く、水温躍層や流れ・乱れの影響を受けて受動的に集中・発散するものと推測される。

3-3 植物プランクトンの空間分布

図-7にChl-a濃度の平面分布を示す。

値は濃度が集中している水深2～10mまでの鉛直分布を平均したものである。図から貯水池の北側と入江周辺で濃度レベルが高い傾向にあることが分かる。従来の調査によれば淡水赤潮は、河川水の侵入流に伴う補償流の影響によって貯水池上流端に集積する傾向が強いと報告されているが^{3) 4)}、ここではそのような分布にはなっていない。

この分布の偏りは、湖水の流動やそれに伴う栄養塩の供給などの要因によって引き起こされていると推測される。例えば、この貯水池では貯水池主軸方向に卓越した季節風が吹くため、主軸方向と直交した向きに延びている入江は穏やかな水域となっており、植物プランクトンの繁殖に適した場所となっている可能性が考えられる。また、貯水池の北側は水深が浅く、底泥から栄養塩が供給されやすいということも考えられる。実際、主軸方向の季節風が吹いた時には、浅瀬付近(B1、B2)から下流方向に向かってしばしば濁質の帯が発生する。図-8は入江の出口から対岸に向かって水質計を曳航し、濁質の帯の表層濁度を計測した例であり、図中の矢印は走行ラインを示す。図から入江の出口において濁度が上昇し、100m程度の幅の帯になっていることが分かる。この濁質の帯は、風が引き起こす流れによって浅瀬付近の底泥が輸送されていることを示唆しているが、これと共に栄養塩の輸送が生じていることも考えられる。た

図-7 クロロフィル a 濃度の平面分布

図-8 表層濁度の分布

だし、この点は今後の課題として残されている。

4. 湖内のクロロフィル a 量とリン量の関係

前述のように、七ヶ宿貯水池の N P 比は 15 以上であることから、植物プランクトンの成長に対してはリンが制限因子になっているものと考えられる。そこで本章では、観測された Chl-a 量と湖内リン量の関係について考察する。

貯水池におけるリンの収支と植物プランクトンの生産の関係を、図-9 に示すように簡略化して考える。まず河川からは溶存態と粒子態リンの両方が流入するが、このうち植物プランクトンが直接利用可能な成分は溶存態のみであると考えられる。すなわち粒子態リンはそのまま沈降し、溶存態リンの一部は植物プランクトンに取り込まれる。その結果、貯水池から放流されるリンは溶存態リンと植物プランクトンが体内に保有するリンとなる。

もちろん、実際のリンの流れはこれよりはるかに複雑である。粒子態リンが植物プランクトンに全く利用されないという保証はない。また、その全量が貯水池で沈降除去されるという仮定も完全とは言えない。さらに、植物プランクトン自体が粒子態リンとして沈降することもある。しかし、貯水池内及び放流水のリン濃度の時空間データが十分揃っていないことから、本研究ではとりあえず、上記の仮定のもとに検討を進めることとした。

図-9 貯水池でのリンの収支関係（概念図）

図-10 溶存態リンと流入量の相関

- ① 貯水池内全リン量は、貯水池の 3 水深 (0, 5, 15m) の全リン濃度に各層の貯水量をかけて積分し求めた。
- ② 植物プランクトンが利用可能なリン量 (溶存態リンの蓄積量) を Σ [流入溶存態リン量 - 放流全リン量] として求めた。まず流入溶存態リン量は次のよう求めた。著者らは流入河川において河川水質の観測を実施しているが、その結果から溶存態リンと流量の関係をプロットすると、図-10 を得る。そこで、流入溶存態リン濃度を図中の回帰式で表し、これに図-11 の流量時系列を乗じることにより算出した。また、放流水の全リンは、七ヶ宿貯水池では常時表層放流を実施していることから、貯水池表層の全リンデータに放流量を乗じて求めた。
- ③ クロロフィル a 量

貯水池に存在する全 Chl-a 量は、各地点の Chl-a の鉛直分布に、地形を考慮して分割した各ブロックの体積をかけて積分した。

以上の計算の結果を図-12 に示す。図中の破線・実線はそれぞれ、融雪出水が始まる直前からの累積流入・放流リン量、貯水池内の蓄積量である。

蓄積リン量は融雪出水に伴って 5 月中旬まで急増している。これを貯水池内の現存リン量 (●) と比較すると、5 月中旬までは両者の勾配がほぼ同じであることから、貯水池内のリン量の増加は主に融雪出水による溶存態リンの供給によってもたらされていると推測される。一方、Chl-a 量 (△) は融雪出水の低減期以降 (5 月から 6 月中旬) に増加している。これは、図-13 に示す水温上昇に伴い、融雪出水が輸送した溶存態リンを摂取して植物プランクトンが増殖したものと考えられる。その後、6 月初旬に Chl-a 量のピーク時期を迎えるまで、全リン現存量は減少する。この傾向は [流入リン量 - 放流リン量] の累積から推定される蓄積リン量

とは一致しておらず、この点についてはさらに詳細な検討が必要と考えられる。

さていずれにしても、図から分かるようにChl-aの変化量は500kgのオーダーであり、一方現存全リンの変化量は約400kgである。従って七ヶ宿貯水池において、はこの時期のアステリオネラを優占種とする植物プランクトンの[Chl-a]/[P]比は約0.8であると考えられる。福島らは⁵⁾、霞ヶ浦における植物プランクトンの[Chl-a]/[P]比は0.67（珪藻類が優先種となる冬季（1981.11～1982.5）の値）と報告しており、筆者らの推定値はオーダーとして大きくずれていないと言えよう。つまり、前述のリン量の収支計算はかなり大まかではあったが、リン量とChl-a量の推移の関係を比較的良好に表現できたものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、七ヶ宿貯水池においてクロロフィルa濃度が蛍光光度計により計測できる水質計を用いて、植物プランクトンの時空間分布を高密度に観測し、次の結論を得た。

(1) 5月から6月にかけて異常増殖する珪藻類のアステリオネラは、水温成層や流れ

・乱れの影響を強く受けて、空間的に偏った分布を形成する。鉛直方向には補償深度付近に、平面的には北岸から入江にかけてクロロフィルaの高い濃度が観測された。

(2) 貯水池内のクロロフィルa量とリン量を計算した結果、植物プランクトンが溶存態リンを取り込んで繁殖の様子が確かめられた。

謝辞：建設省七ヶ宿ダム管理所には観測の便宜を図っていただき各種データの提供を受けた。また、宮城県仙南仙塩塩域水道事務所にはプランクトンと水質に関するデータの提供を受け、様々な助言を頂いた。ここに記して謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 村上敬吾：中禅寺湖の淡水赤潮、水質汚濁研究、vol. 14, NO. 5, pp. 276-280, 1991.
- 2) 宮城県仙南仙塩塩域水道事務所：七ヶ宿ダムにおけるプランクトンの調査結果, 1995
- 3) 中本信忠：神流湖の淡水赤潮、水質汚濁研究、vol. 14, NO. 5, pp. 281-285, 1991.
- 4) 松尾直規・山田正人・宗宮功：貯水池上流端における流動特性と淡水赤潮現象との関係、水工学論文集、第40巻, pp575-581, 1996.
- 5) 福島武彦・相崎守弘・村岡浩爾：浅い湖における沈殿量の測定法方とその起源、国立公害研究所研究報告、NO. 51, pp. 73-87, 1984.

図-11 流入量時系列

図-12 リン量とクロロフィルa量の関係

図-13 水温時系列 (A1、6m)