

貯水池流動制御による水質保全対策

Countermeasures for Reservoir Water Quality Conservation by Water Current Control System

丹羽 薫^{*}・久納 誠^{**}・大西 実^{***}・山下芳浩^{****}

By Kaoru NIWA, Makoto KUNOU, Minoru ONISI and Yoshihiro YAMASITA

Unusual growth of undesirable algae caused by eutrophication has brought water quality problems of water bloom or odor in some reservoirs. Countermeasures against the phenomenon are to understand a growth mechanism of the algae and to prevent undesirable floating algae from rapid increase.

The water current control system proposed in this paper works in surface of reservoir to produce circulating layer which restricts supply of sun light and nutrition by maintaining the layer during flood and to prevent the undesirable algae from rapid increase.

Explained and reported in this paper are on the water current control system and field experiments to confirm the effect of dispersed aeration-circulation apparatus forming thick layers.

Keywords : reservoir, water quality management, eutrophication, algae-control method, aeration-circulation

1. まえがき

いくつかのダム湖では富栄養化により好ましくない藻類が異常増殖し、水の華やカビ臭といった現象が発生している。こうした富栄養化現象の対策は好ましくない藻類の増殖メカニズムを把握し、好ましくない藻類の異常増殖を阻止する施策をとることである。

本報文で提案する流動制御システムは、平常時において貯水池の表層に温水でかつ水温分布が均一の循環混合層を有光層の数倍に至る深度まで形成させ、洪水時にもこの層を温存させることにより、有光層に生息する好ましくない藻類への光と栄養塩類を制限することになり、それによって好ましくない藻類の異常増殖を阻止するシステムである。

流動制御システムの特色を述べ、さらに循環混合層を厚く形成させるには散気管方式の曝気装置が有効であることが現地実験によって確かめられたのでその報告を行う。

2. ダム湖水質環境創造システムの概要

藻類増殖の要因のうち人為的に制御可能なものを示す。

①栄養塩類の濃度（特に無機態栄養塩類）

*	正会員	建設省土木研究所水資源開発研究室	室長	（〒305 茨城県つくば市大字旭1番地）
**	正会員	同室	主任研究員	
***		同室		
****		同室	部外研究員	

②光合成反応に必要な光の条件

③藻体が付着または支持できる基質の有無（藻類の種類によりその必要性が異なる）

富栄養化対策は大きく2段階に分けると、流域段階の対策と貯水池段階の対策に分かれるが、前者は①の要因を、後者は①～③の要因を制御することになる。貯水池対策における新しい対策手法として実用の可能性が高いものとして図-1に示す『ダム湖水質環境創造システム』を提案する。本システムは富栄養化のみならず濁水長期化及び冷水化の対策としても十分な効果が期待される。

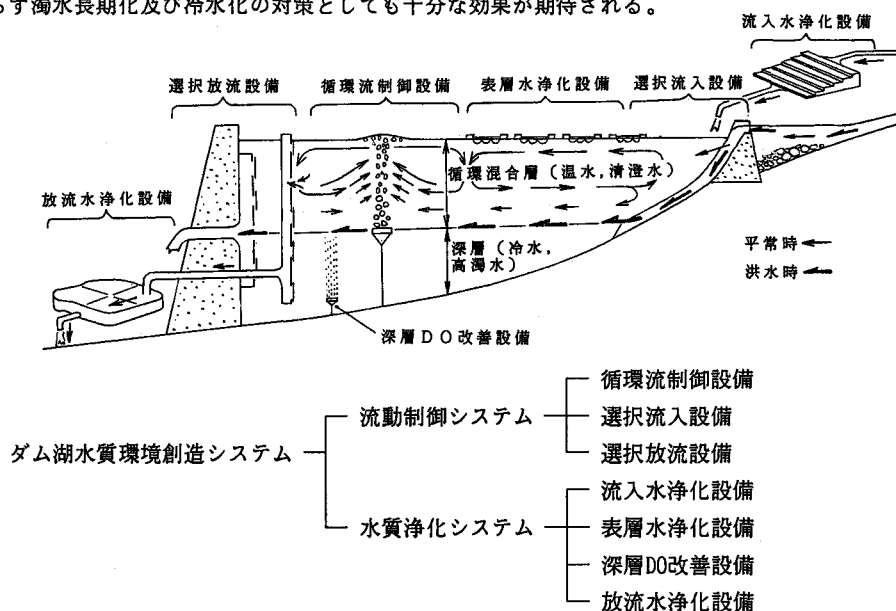


図-1 ダム湖水質環境創造システム

以下、本報文では『ダム湖水質環境創造システム』の一翼を担う『流動制御システム』について述べる。

3. 流動制御システム

3.1 流動制御システムの概要

流動制御システムは、平常時において貯水池の表層に温水でかつ水温分布が均一の循環混合層を有光層の数倍に至る深度まで形成させ、洪水時にもこの層を温存させることにより、有光層に生息する好ましくない藻類への光と栄養塩類を制限することになり、それによって好ましくない藻類の異常増殖を阻止するシステムである。

従来、選択取水設備及び曝気循環設備がそれぞれ単独の目的で設置されてきたが、貯水池内の水温躍層標高を積極的にコントロールして貯水池内流動を制御しようとするものではない。ここで提案する流動制御システムは、洪水時放流口を有光層の数倍の深度にあたる標高に設け、循環流制御設備により安定した水温躍層を放流口標高付近に作り、高濁水及び高負荷栄養塩類を含む流入水をできるだけすみやかに貯水池から放流させる。さらに貯水池上流端においてもこの働きを強化するために選択流入設備を新たに設けるものである。

3.2 循環流制御設備

循環流制御設備は、有光層で生息する好ましくない藻類への光と栄養塩類を制限するために、散気管方式の曝気装置を用いて、貯水池の表層に温水でかつ水温分布が均一の循環混合層を有光層の数倍に至る厚さになるように形成させる設備である。

循環混合層では水温鉛直分布がほぼ均一であるため、常に循環しやすい状態にある。循環混合層が有光層の

数倍に至る深度まで存在すれば、有光層で生息する藻類はしばしば有光層の下に深く追いやられることになり、藻類の光合成できる時間を大幅に短くすることにより、藻類の異常増殖を阻止することができる。また循環混合層が温水でしかもその厚さが有光層の数倍あれば、栄養塩類を多く含んでいる洪水時の流入水を深層部へ導くことができ、藻類が生息している有光層への栄養塩類の混入を減少させることになり、藻類の異常増殖防止に役立つ。

濁水長期化対策としては、洪水時の高濁水を貯水池の深層部へ導き、表層の清澄水を温存するのが望ましい。散気管方式で循環混合層を厚くすることは、濁水長期化対策にもなる。一方、散気管方式により循環混合層を厚く形成していく場合における水面付近の水温は、日射による熱エネルギーをはじめとする湖水と大気との熱収支バランスにより定まるが、日射エネルギーが優勢であるため、水面付近の水温低下はほとんどなく、むしろ循環により日射エネルギーが循環混合層下部にまで移送され循環混合層全体の水温は上昇する。従って冷水化対策として表層取水を行っている場合、取水可能な層が厚くなるため有利となる。

散気管方式の曝気装置は位置を容易に上下動できる構造になっており、自動水質観測装置を監視しながら貯水池及び流入水の水質状況に応じて貯水池流動を制御することが可能である。洪水時は曝気を停止し、洪水終了後は清澄水の下限水深に曝気装置の位置を一致させてから曝気を開始する。その後は清澄水の下限水深の降下に伴い曝気装置の位置を降下させることにより、循環混合層を再形成させる。

3.3 選択流入設備

選択流入設備は、貯水池上流端において、洪水時の流入水を、温水及び清澄を保っている循環混合層と極力混合させることなく、ほぼ確実に深層部へ導くことができる設備である。

最近貯水池上流端に堆砂除去、水質浄化、及び親水性向上を目的として副ダムが造られつつあるが、選択流入設備はこの副ダムの越流部に工夫を加えたものである。選択流入設備を図-2に示す。平常時における流入水の栄養塩類が少ない場合は循環混合層へ流入させる。平常時における流入水の栄養塩類が多い場合や小洪水時の高濁水は管路を通して循環混合層と全く混合することなく深層部に導く。大洪水時の高濁水は水中導流壁間の開水路を通して循環混合層と極力混合させることなく深層部へ導く。

洪水時の高濁水には掃流土砂及び浮遊土砂が多く含まれるが、副ダムにより掃流土砂はカットされるため、管路や水中導流壁間の開水路には浮遊土砂しか通過しない。浮遊土砂はフラッシュにより除去できるので水路の維持管理は容易である。

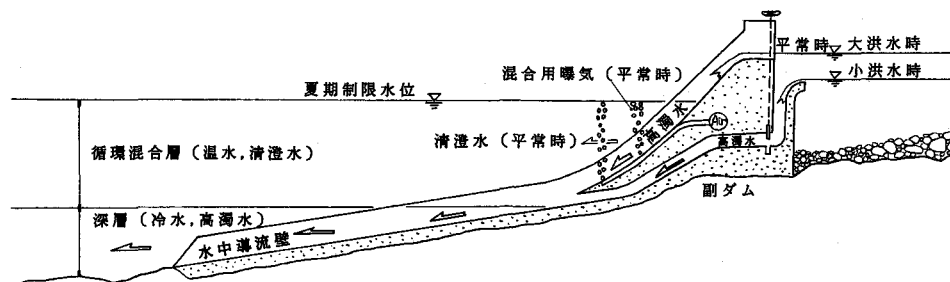


図-2 選択流入設備

3.4 選択放流設備

選択放流設備は、平常時には清澄水を表層から、洪水時には高濁水を深層からというように任意の標高より多量の水を放流できる設備である。大洪水時に貯水池深層に流入して来た大量の高濁水を洪水時の間に放流できてしまえば、大洪水時といえどもかなりの量の清澄水を維持することが可能となる。

4. 洪水時流入水の栄養塩類濃度測定実験

Aダムに流入する本川にて小洪水時における栄養塩類濃度の測定を行った。図-3に測定結果を示す。洪

水時に貯水池に流入するT-P、P0₄-Pの総量は流入水量と栄養塩類濃度の積であり、平常時に比べるとはるかに多量の栄養塩類が貯水池に入ったことがわかる。このように洪水時の流入水は貯水池の富栄養化対策にとって非常に重要である。

5. 散気管方式の曝気装置による貯水池流動実験

5. 1 循環混合層の形成実験

丹羽らが現地観測してきたKダム（堤高45.5m、総貯水容量4,530万m³、湛水面積3.9km²、流域面積195.25km²）では、現在大型タイプの空気揚水筒1基を含む6基の間欠式揚水筒方式の曝気装置を稼働させている¹⁾。本実験は間欠式揚水筒方式を平成4年8月10日より約1ヶ月のあいだ散気管方式に6基とも切り換え、その期間の貯水池の水温鉛直分布を追跡した。なお両方式ともコンプレッサーの動力は同一とした。図-4に貯水池の曝気装置近傍の水温鉛直分布を示す。(a)は平成3年夏期であり、間欠式揚水筒方式である。(b)は平成4年夏期である。なお両期間とも大出水や強風はなかった。

図-4に示すように散気管方式に変えると水温鉛直分布が大幅に変動する。図-5は図-4(b)において、散気管に切り換えた翌日とその17日後の水温鉛直分布をとり出して、両方式の比較を容易にした図である。散気管方式のほうが気泡に連行される水量が多いために、循環効率が高くなり、循環混合層が厚くなっているのがわかる。また図-5の時期における河川水温は概ね20℃であるが、散気管方式は間欠式揚水筒方式に比べ、循環混合層が高温でしかも厚いために、洪水時の流入水を10m程度も深く深層部へ導くことができる。

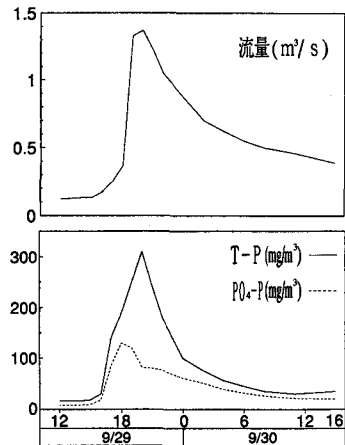


図-3 流入河川における
小洪水時の栄養塩類濃度

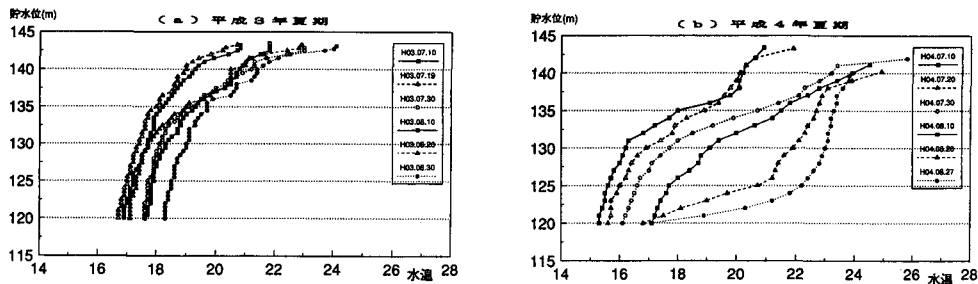


図-4 曝気装置近傍の水温鉛直分布

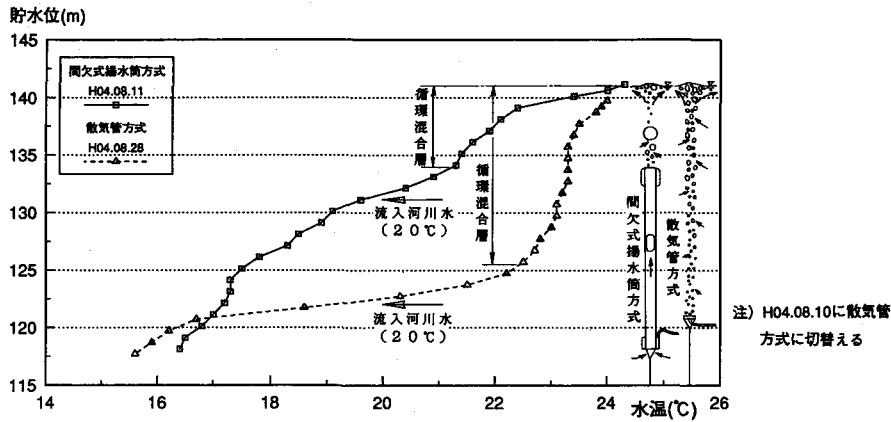


図-5 間欠式揚水筒方式と散気管方式の水温鉛直分布の比較

5.2 循環混合層の流動測定実験

大型タイプの散気管方式の曝気装置（出力22kW、空気量3,700 l/分）周辺の流動を二次元及び三次元の電磁流速計を用いて測定した。測定条件は曝気装置の設置水深が異なる2ケースとした。測定結果を図-6に示す。

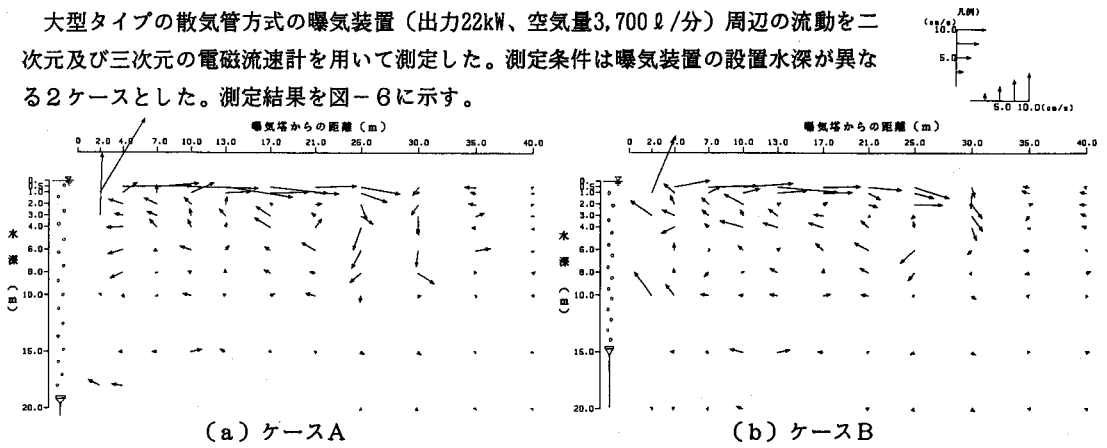


図-6 散気管方式の曝気装置による流動測定結果

散気管方式の曝気装置周辺の水の挙動は、図-7に示すような複数の循環流となっている。

第1循環流は、まず曝気による気泡の上昇に伴い気泡周辺の水が連行される。次に気泡により持ち上げられた水が水平方向に流れを変え表面流が生じる。中心から数10m離れたと水平の流れは急に鉛直下向きの流れに変わり、ある深度まで降下すると流れは気泡や表面流の方向に向かう。この第1循環流の外側には第2循環流が見られる。第2循環流は第1循環流の鉛直下向きの流れに連行されて生じており、温水である表層水と冷水である深層水を混合させ、表面水の熱をゆっくりとした密度流に乗せて貯水池全体に運ぶ役割をしている。

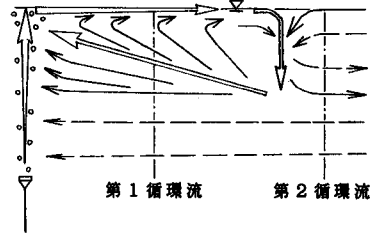


図-7に第1及び第2循環流の概算値を示す。第2循環流の数値は貯水池全体の流動に対しては小さいものであり、貯水池全体での循環には大きく寄与していないと思われる。

一方、第1及び第2循環流の挙動により、図-8に示すように貯水池の中央部や流入部付近の水溫鉛直分布は曝気装置近傍の水溫鉛直分布とはほぼ等しくなる。

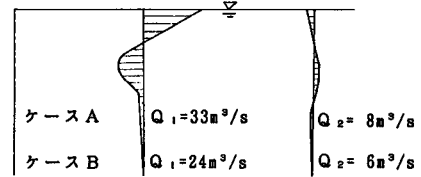


図-7 流動模式図

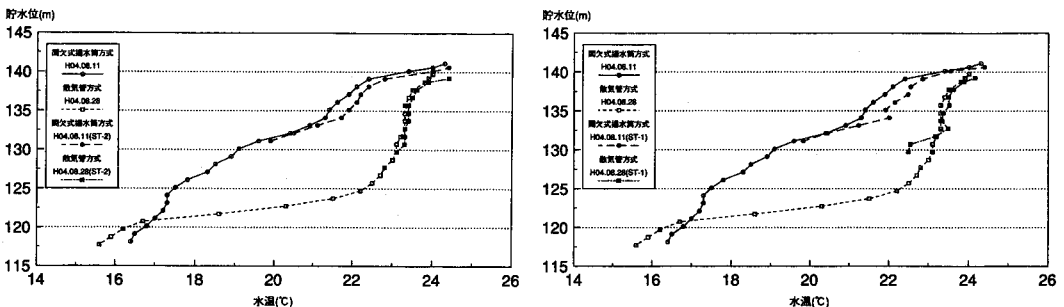


図-8 貯水池中央部及び流入部での水溫鉛直分布

このようにして、一旦厚い循環混合層が形成されると日々の気象によって有光層の水温が循環混合層下部の水温より低下する機会が多く生じるようになる。有光層の水温が循環混合層下部の水温よりも低下すると密度差により有光層の水は循環混合層下部の水と入れ替わり易い状態となり、強風時などはその働きが顕著になる。図-9に貯水池中央部における水温鉛直分布の経時変化を示す。このデータをもとに、水面からの鉛直方向の平均水温勾配が $0.1^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 以下である水深を求め、その経時変化を図-10に示す。表層における水温がほぼ均一である層の厚さは、間欠式揚水筒方式では最大でも7mであったが、散気管方式では10m以上の日が週に数日出現している。このことは循環混合層を厚く形成させると、週に数度有光層の水が鉛直方向に10m以上も移動するような循環流を生じ易い状態になっていることを示し、好ましくない藻類の光合成の時間を短くすることに大きく貢献することを示す。

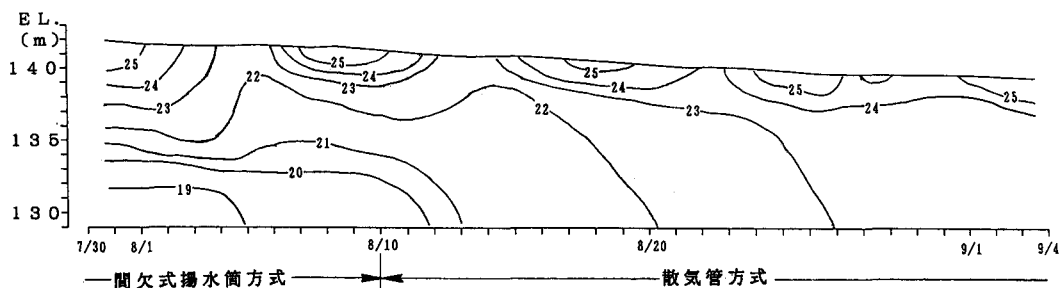


図-9 貯水池中央部の水温鉛直分布の経時変化

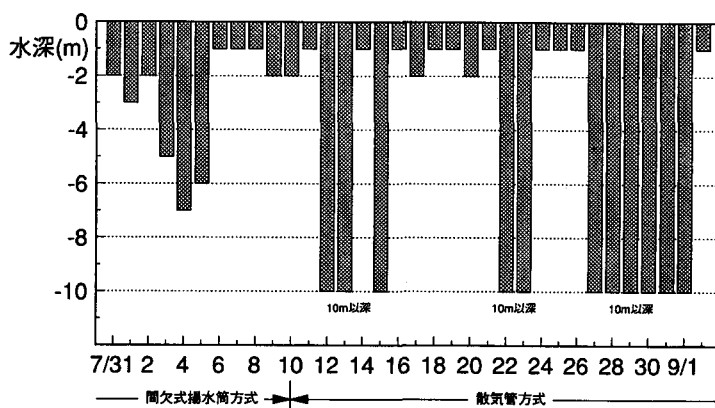


図-10 水面からの平均温度勾配が $0.1^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 以下である水深の経時変化

6. まとめ

- (a) 曝気循環により水温躍層標高を有光層の数倍に至る水深に制御し、それに合わせて洪水時における流入水の流入標高及び放流水の放流標高を制御する流動制御システムは、有光層で生息する好ましくない藻類への栄養塩類の供給を減少させることになり、藻類の異常増殖を抑制するのに効果が高いと考えられる。
- (b) 循環混合層を有光層の数倍に至る深度まで形成させると、循環混合層では水温鉛直分布がほぼ均一となって上下方向の深い循環流がしばしば生じることになり、有光層で生息する好ましくない藻類の光合成時間を大幅に短くすることにより、藻類の異常増殖を制御するのに効果が高いと考えられる。
- (c) 循環混合層を厚く形成させるには、間欠式揚水筒方式より散気管方式の方が効率が低い。

参考文献 1) 丹羽薫, 天野邦彦, 三浦進: 貯水池富栄養化対策としての曝気循環法に関する検討, ダム工学 No. 3, 1991