

流動制御によるダム湖水質保全対策効果のシミュレーションによる検討

Study of Effect of Current Control for Restoring Reservoir Water Quality by Simulation Model

丹羽薫*、久保徳彦**、福渡隆**、古里栄一***

By Kaoru NIWA and Norihiko KUBO and Takashi FUKUWATARI and Eiichi FURUSATO

Current control using dispersed aeration is one way to suppress algal blooms by controlling the hydraulic state of the reservoir artificially. We have studied current control method in both the planning stage and the practical stage. This report estimates the effect of measures to improve water quality using a simulation model in the planning stage.

We examined the effect of current control to improve the water quality of reservoirs, by simulation using a modified one-dimensional model for current control using dispersed aeration, the parameters of which were determined by experiments in several reservoirs. The results show that current control is effective but that aeration must be stopped in case of flood and that care must be taken not to upwell dense turbid water when resuming aeration.

Keywords: water quality, current control, reservoir, aeration, simulation

1. まえがき

散気方式の曝気装置を用いた流動制御は、ダム湖の水質環境を保全する一手法としてダム湖の流動を人為的に制御して藍藻類等の異常増殖を抑制する方法である。著者らは計画及び管理の両側面から現地実験を中心に流動制御による水質保全手法の検討を行っている。本報では、主に計画段階の有効な手法として検討を進めているシミュレーションの方法および対策効果の検討について述べる。

2. 流動制御の概要

流動制御システムは、ダム湖に温水で水温分布が均一である循環混合層を、表層から水深概ね15～20mまで厚く形成させ、中小洪水時にもこの層を温存させることにより、表層に生息する藍藻類や鞭毛藻類への栄養塩類と光とを抑制し、それによって藍藻類等の異常増殖を抑制しようとするシステムであり、図-1に模式図を示す。このシステムの基幹設備である循環流制御設備（散気方式の曝気装置）により期待される効果を表-1に示す。

* 正会員 建設省土木研究所環境計画研究室 室長
(〒305 茨城県つくば市大字旭 1)

** 正会員 建設省土木研究所環境計画研究室 研究員
(同上)

*** 正会員 (株)環境調査技術研究所(前土木研究所部外研究員)
(〒108 東京都港区芝浦4-9-25 芝浦スクエアビル13階)

本報では表-1に示す効果を表現することのできるモデルを用いて、現地実験を行った耶馬溪ダム（提高62m、総貯水容量2,330万 m^3 、湛水面積1.1Km 2 、流域面積89Km 2 ）を対象にして解析を行った。

3. モデルの概要

流動制御の水質保全効果を表現するモデルは、従来からダム貯水池の水理水質解析に多く用いられてきた鉛直一次元富栄養化モデルに、曝気装置によって生じる流動を表現する流動モデルを組み込んだものである。尚、モデルの作成の詳細は既報を参照されたい¹⁾。

図-2に流動モデルの水平流速鉛直分布を示す。これは、散気方式の曝気装置によって生じる流動の内、貯水池全域に生じる比較的流速の小さな流動（図-1の第2循環流）を水平流としてモデル化したものであり、曝気装置近傍の流速の大きい上昇流および下降流（図-1の第1循環流）ではない。

図-2の流動の内、表層流の Q_u は第1循環流に引き寄せられる求心的な流動であり、下層流の Q_d は曝気装置直上の上昇流に直接引き寄せられる求心的な流動である。また、中層流の Q_m はこれらが混合し等密度層に密度流として貫入してゆく遠心的な流動である。尚、 Q_u および Q_d の鉛直方向における流速分布は3角形近似している。鉛直一次元モデルでは、これらの水平流速を熱量および質量保存式の水平移流項に組み込んだ。従って、曝気による鉛直混合は熱量及び質量収支式中の鉛直移流項により表現され、この鉛直流速は連続式により補完される層毎の水平移流差分に相当する。

これら3層の流動成分の流量は、表-2に示す経験式で求められる。流動による水平流量式のうち、 Q_u は、耶馬溪ダムに於ける現地実験結果から Q_m と曝気水深、吐出空気量、曝気上部の密度差（水温差）との関係を検討し、同定した。一方、流速が小さく現地実験で測定が困難な Q_m と Q_d とは、耶馬溪ダムに於ける現地実験結果の水温鉛直分布経時変化を指標として鉛直一次元モデルのシミュレーションで同定した。この再現計算結果を

表-1 循環流制御設備の水質保全効果

効果	湖水に与える流動作用	藻類に及ぼす効果
1	表層付近の水温が均一であり厚さ15~20mの循環混合層を形成し、密度流で循環する	循環混合層に於ける光制限及び表層における藍藻類の優占阻止
2	栄養塩類(P04-P等)を含んだ平常時の流入水を循環混合層の下層に導く	循環混合層の藻類への栄養塩制限及び易沈降性藻類（緑藻類や珪藻類）による栄養塩固定後の沈降
3	栄養塩類(P04-P等)を含んだ中小洪水を水温躍層に導き、速やかにダム湖から放流する	循環混合層に存在する藻類（特に表層の藍藻類）に対する栄養塩制限

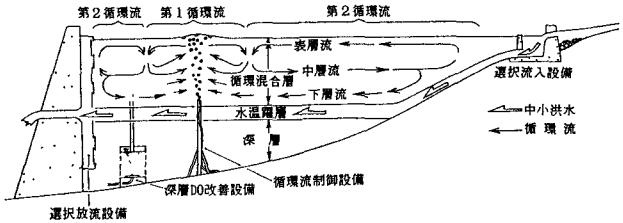


図-1 流動制御システムの模式図

表-2 流動モデル基本式

$Q_u = k_u \times H \times \Sigma (A_n)^{1/2} \times \Delta \rho^{1/2} \dots \dots (1)$
$Q_m = Q_u + Q_d \dots \dots \dots (2)$
$Q_d = k_d \times H \times \Sigma (A_n)^{1/2} \times \Delta \rho^{1/2} \dots \dots (3)$
Q_u ; 第2循環流の表層流量 ($m^3/sec.$)
Q_m ; 第2循環流の中層流量 ($m^3/sec.$)
Q_d ; 第2循環流の下層流量 ($m^3/sec.$)
K_u ; 表層流量の係数 (= 0.36)
K_d ; 下層流量の係数 (= 0.18)
H ; 曝気水深 (m)
A_n ; 吐出空気量 (l/mm)
$\Delta \rho$; 表層流と下層流との密度差 (g/cm^3) ($= \rho_d - \rho_u$)

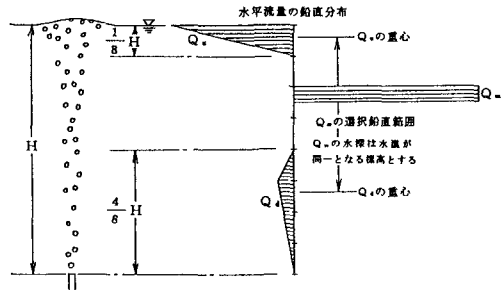


図-2 流動モデルにおける水平流速の鉛直分布

注：流速分布の内、左方は鉛直一次元モデルにおける当該層からの流出を、右方は流入を示す。

図-4に示す。更に、この流動モデルは同じく散気方式の曝気装置の現地実験を行った平成4年夏期の釜房ダム（提高45.5m、総貯水容量4,530万 m^3 、湛水面積3.9 Km^2 、流域面積195 Km^2 ）の水温鉛直分布の経時変化を用いた検証も行っており、図-3に示すように十分な精度も得られている。

尚、流動制御時のシミュレーション実施にあたっては、境界条件の一つである流入河川水温や拡散係数等一部のパラメーターに留意する必要がある¹⁾。

4. モデルによる流動制御の効果検討

これまでに述べたモデルを用いて流動制御による水質保全効果を検討した。流動制御が実施されておらず水の華等の藻類異常増殖現象が発現した平成2年の耶馬溪ダム貯水池を対象とし、表-3に示す流動制御の運用方法でシミュレーションを実施した。稼働期間は成層期の内、特に表層に一次躍層の形成されやすい受熱期として当該ダムにおける観測結果を元に4月1日～8月31日とし、吐出空気量は平成6年度の耶馬溪ダム現地実験を元に検討した適正空気量とした。また、下流への冷水現象の発生を抑制するために曝気開始後1ヶ月間は曝気水深を10mとし、その後は循環混合層の厚さを考慮し水深20mとした。尚、出水時およびこの後の高濃度水塊の巻き上げを防ぐために、流入量が20 m^3/s を超えた場合は曝気を停止し、再開時はこ

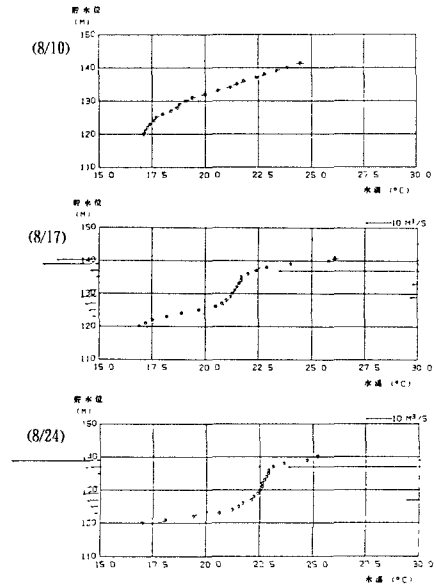


図-3 釜房ダムに於ける水温鉛直分布
再現計算結果

【計算条件】曝気標高：EL. 121m、空気量8,450 l/min （6基合計）、
曝気期間：H4 8/10～8/27（シミュレーションも同様）
【図注】 上から、8/10、8/17、8/24の実測値（丸）、計算値（点線）の比較
【矢印注】 図中の矢印は、各層の流量を表す。各図の左軸に接する矢印は層への流出成分であり、右軸の内、左側の矢印は流入成分を、右側の矢印は河川水の貫入に伴う表層部の連行による流出を示す。また、流入流出成分にはそれぞれ曝気流による水平流も含まれ、これらは矢印の基部が軸からやや離れていることにより区別される。曝気水平流の鉛直分布は図-2と対応する。なお、図-4及び図-5の水平矢印も同様の意味を示す。

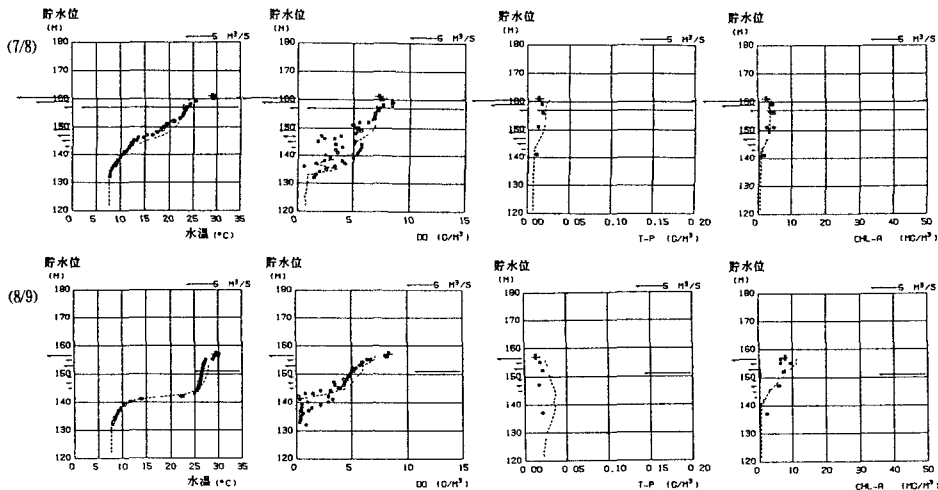


図-4 耶馬溪ダムにおける貯水池水温および水質鉛直分布再現計算結果

【条件】曝気標高 EL 141m、空気量5,000 l/min . (7/8)、1,500 l/min . (8/9)、曝気期間：H6 7/5～10/14（シミュレーションも同期間）
【図注】上側 7/8計算、下側：8/9計算、図中矢印等は図-3の脚注参照。

の水塊の巻き上げによる表層水質悪化を引き起こさないように曝気水深を変更した。この流入量はシミュレーションの境界条件で用いた流入河川の流量と負荷量との回帰式に於ける流入濁度約25度に相当する。

図－5に、無対策時と流動制御時との水温鉛直分布および河川水貫入層を比較して示す。6月7日時点で無対策時に比べ、流動制御時は水温差の大きい水温躍層が曝気水深とほぼ同水深に形成されている。6月15日に発生した日平均流量 $64\text{m}^3/\text{s}$ の出水の流速分布をみると、無対策時には表層から水深15mの範囲に河川水が貫入しているのに対して、流動制御時には部分的に水深20mにまで貫入層が低下しているのがわかる。尚、流動制御時の計算結果に見られる貫入層の2群分離は、本来ならば河川水温は連続的に変動するので実現象としては生じないが、以下に示す様にシミュレーションの取り扱い上生じたものであり、鉛直一次元というモデルの水理的な取り扱いにおいては、部分的な貫入層の低下として解釈が可能であると考えられる。一般に、季節や天候にもよるが河川水温は日間の水温時刻変動幅が $3\sim 5^\circ\text{C}$ に達し、流入河川水の貫入水深が制御対象の一つである流動制御のシミュレーションでは、十分な精度でこれを表現する必要がある。既報¹⁾で述べた通り、ベースのモデルでの汎用的な取り扱いとの整合をとるために、このモデルでは流入河川水温の現地測定値の0時～12時および12時～24時の平均水温をそれぞれ昼間水温と夜間水温とし、この時間の比率で水量と負荷量を分割し流入河川水温の時刻変動に伴う河川水貫入層の時刻変化を表現している。

次に、図－6に流動制御の有無を比較して貯水池表層水質の経時変化を示す。尚、図中には出水時に流動制御を停止せずに、曝気期間中水深20mで曝気を継続している場合も併せて示す。平成2年は日平均流量で $20\text{m}^3/\text{s}$ 以上の出水が5月8日、6月15日、7月2日、9月19日の4回発生しており、これに伴う高濃度河川水の表層部への流入およびその後の滞留が平成2年の耶馬溪ダムにおける水の華等の藻類異常増殖現象の要因の一つであると考えられる。図中の網掛け部は水の華現象の発生が確認された期間を示している。シミュレーション結果でも無対策時には6月から数度発生している出水後に表層の栄養塩濃度およびChl-a濃度が上昇している傾向が表現されており、無対策時のシミュレーション結果は、藻類の異常増殖現象の要因である出水による表層への栄養塩供給およびこれに伴う藻類群集の量的増大を表現していると言える。一方流動制御時は、6月19日の中小規模出水の貯水池貫入層が低下しているために出水後の表層栄養塩およびChl-aの上昇が無対策時に比べて抑制されていることがわかる。尚、出水時に下層部に侵入させた高濁度水塊を再び表層に巻き上げることを防ぐために6月15日および7月2日の出水後は表－3の基準に従って曝気数高を浅くした。図－6に示すように出水時の停止や貯水池水質鉛直分布に応じた運用を行わない場合は、例えば流動制御を実施しても無対策時と表層水質はほぼ同レベルにまで上昇してしまうことから、流動制御をより効果的に適用するためには出水時には停止し、出水後には水質鉛直分布に対応して再開時期及び再開標高を判断する様に運用すべきであると考えられる。

ここで、出水後の浅い曝気水深が藍藻類に対する光制限効果を小さくさせる事が懸念されるかもしれない。しかし藻類の異常増殖現象に対しては光制限と同レベルもしくはこれ以上に栄養塩制限としての表層負荷削減の効果が確実であり、この様な点から最大に表層の負荷削減効果を達成するためには高濃度水塊を巻き上げない運用方法が効果的である。

5. 考察

流動制御は曝気によって生じる密度流を利用したダム湖水質保全システムである。本報の流動モデルは水温鉛直分布、吐出空気量、曝気水深を任意に与えることができるので、様々なダム湖で適用可能である。この流動モデルの関数形は、従来の気泡噴流の研究における吐出空気量と揚水流量との関係²⁾とほぼ合致していることから、

表－3 流動制御（散気方式の曝気装置）の運用方法
(シミュレーション条件)

条 件	設 定 値	備 考
曝気期間	4/1～8/31	成層期間内、受熱期
吐出空気量	$3700\text{ }\ell/\text{min}$	実験結果からの最適空気量
曝気数高	水深20m(4/1～4/30は10m)	循環混合層厚15～20m
停止条件	日平均流入量 $>20\text{m}^3/\text{s}$	L-Q式濁度25度相当
再開条件 ^{注)}	曝気数高濁度 <25 度 曝気数高 $T-P<0.05\text{mg}/\ell$	環境基準値を参考に、対象ダムの水理水質特性を考慮して決定

注：水深20mの濁度が25度以上もしくは $T-P$ が $0.05\text{mg}/\ell$ 以上の場合、2mピッチで上方に条件適合標高を探し、表層まで濁度が25度以上もしくは $T-P$ が $0.05\text{mg}/\ell$ 以上であった場合は曝気再開せず。

流体の運動を厳密には解いていない鉛直一次元モデルにおける流動の表現というレベルでは概ね汎用的であると考えられる。

また、流動制御時の貯水池水質鉛直分布の表現精度についても、拡散係数に留意することと、境界条件の一つである流入河川水温の時間変動を考慮した取り扱いをすることによって、藻類群集の量的な側面としての Chl-a 濃度も含めて流動制御による貯水池物理環境の変化による水理・水質的な影響が解析可能になった¹⁾。従って、ダム湖水質保全計画の検討段階において、流域からの目標削減負荷量の検討と直接比較して流動制御の効果を把握することやとや、ダム建設前の計画段階における流動制御による水質保全効果の定量的な検討の可能性が示唆された。更に、表-1の効果2および3の効果を十分に発揮するためには、出水時に流入した高濃度水塊の挙動に留意して運用することが必要であることが、シミュレーション結

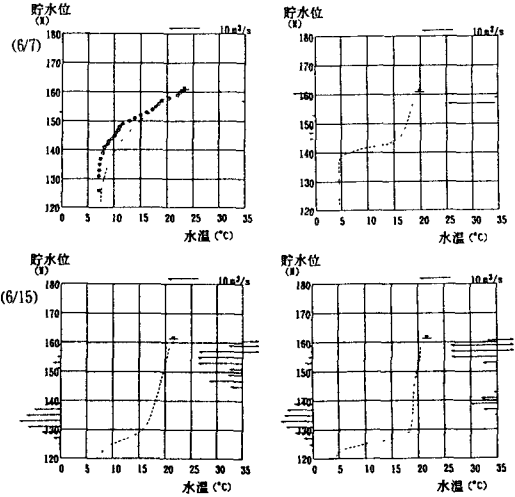
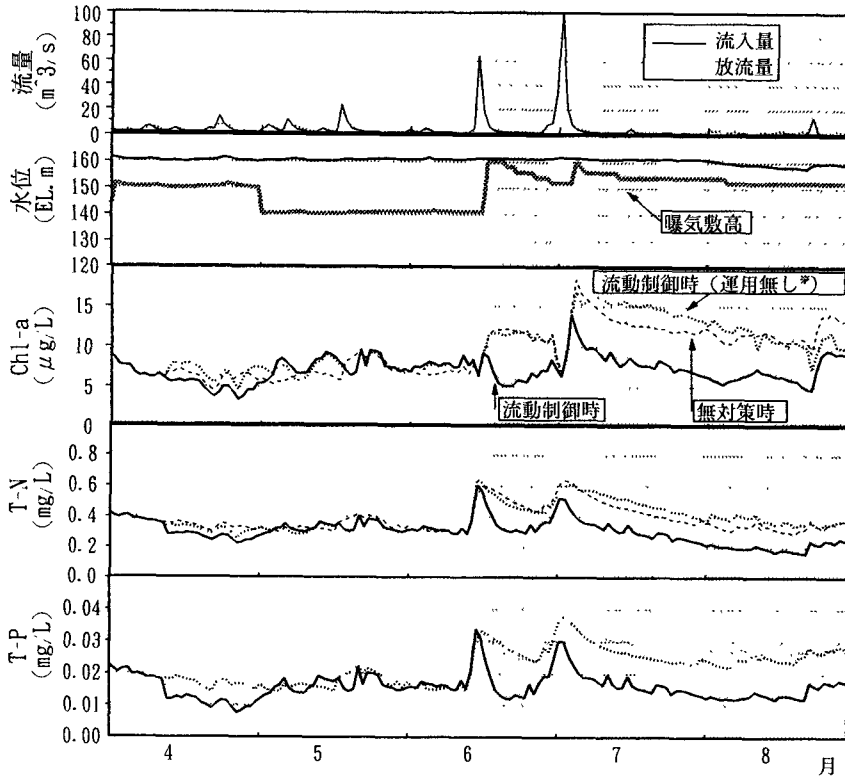


図-5 貯水池水温鉛直分布および河川水貫入層の比較

【計算条件】表-3 参照

【図注】上: 6/7, 下: 6/15, 左: 無対策時, 右: 流動制御時 (出水時停止運用)

【矢印注】図-3の脚注参照。6/15日の出水では、図の右軸から左へのびる矢印で表される河川水の流入水深が低くなっていることがわかる。



注) 網かけ部は藍藻類の異常増殖現象が確認された期間を示す。

※) 出水時に曝気装置を停止せずに、曝気水深を貯水池水質鉛直分布に応じて変化させずに表-3の曝気数高で運用したケースである。

図-6 無対策時と流動制御時における貯水池表層水質の比較

結果から示された。尚、表－3に示した再開基準は絶対的なものではないので、対象貯水池毎に保全目標や水理水質特性を考慮して最も効果の上がる基準を採用すべきである。

しかしながら、流動制御による水質保全効果の内、富栄養化現象に対する効果メカニズムはこれだけでなく、表－1の効果1である流動制御による藻類群集の質的側面すなわち優占種あるいは優占綱の変化を期待している。つまり、流動制御もその1手法に相当する曝気循環の効果として従来から言われている、優占種の藍藻類から緑藻類および珪藻類への変化である。この現象は国内外を問わず現地観測での報告例は多いが、複雑な因果関係を含んだ発生メカニズムは生理学的にも生態学的にも定量的な説明は殆どされておらず、推測される要素が指摘されている程度である。³⁾しかし、藍藻類等の優占を抑制するという様な水質保全目標を設定した場合は、水質保全計画に於ける目標もしくは許容栄養塩濃度等が従来言われている富栄養レベルとは異なる可能性もあり、この様なことを検討するためには流動制御による藻類群集への質的な影響、つまり表－1の効果1を十分に表現できるモデルを用いる必要がある。そこで筆者らは、異なった生育特性を有する複数の藻類群集の直接あるいは間接的な相互関係を表現するモデルを作成している¹⁾。しかし、物理環境の変化に対する藻類群集の応答性について実測値を用いた検証が十分で無いことから、本報では十分な精度で検証された部分である藻類の量的指標であるChl-aで表現及び検討できる範囲に於ける検討を行った。尚、数値モデルにおける藻類の表現は群集全体の量すなわち光合成色素量であるChl-a濃度で取り扱い、藻類の出現種もしくは出現綱等の相互関係は表現しないことが多いのが現状であり、この様な従来の富栄養化問題の検討精度は本モデルは達成していると考えている。今後の流動制御の計画面の研究においては、数値モデルにおける藻類群集の質的側面の表現についても、実験やモデル解析も合わせて研究を進めていく予定である。

6. まとめ

①ダム湖の水理水質解析に用いられることの多い鉛直一次元モデルを改良し、流動制御による水理・水質・藻類に対する影響を表現することのできるシミュレーションモデルを作成した。

②このシミュレーションモデルを用いて、流動制御による貯水池水質保全効果の検証および効果的な運用方法について検討した。その結果、流動制御の効果を十分に発揮するためには、出水時に停止し再開時に高濃度水塊を巻き上げないように曝気装置を運用することが必要であることが確認された。

<参考文献>

- 1) 丹羽薫・久納誠・古里栄一；流動制御によるダム湖水質保全対策に於けるシミュレーション手法の検討，土木学会環境システム委員会環境システム研究，Vol. 23, 1995
- 2) 浅枝隆・池田裕一・Jorg Imberger；不連続な密度界面を持つ成層中における Bubble Plume の挙動と成層の時間推移，土木学会論文集，No. 438, 1991
- 3) R. A. Pastorok, Mark W. Lorenzen, Thomas C. Ginn Environmental Aspects of Artificial Aeration and Oxygenation of Reservoirs: A Review of Theory, Techniques, and Experiences, NTIS Technical Report E-82-3, 1982