

ダム貯水池における水質保全対策

Restoration Techniques for Reservoir Management

Recently, aeration/circulation techniques has attracted attention as an effective means to improve water quality of eutrophic impounding reservoirs. Artificial aeration/circulation of reservoirs is commonly used for managing the ecological consequences of eutrophication.

Unlike other techniques that prevent nutrient influx from watershed, aeration / circulation affects nutrient cycling within reservoirs only. Still, it is useful for enhancing water quality by alleviating a variety of problems arising from thermal stratification and deoxygenation of hypolimnion.

This paper presents the restoration techniques for reservoir management and aeration / circulation devices.



環境装置事業部 管理室
石丸 豊
Yutaka Ishimaru

まえがき

わが国の1950年代から1970年代にかけての経済成長は、水需要を激増させその結果、生活排水、工場排水および農業排水などが多量に増加したことから自然の浄化能力を上まわる汚濁負荷が河川や湖沼などに流入し、水質汚濁や富栄養化を引き起した。その後排水規制が強化されたが、水の循環や交換の悪い貯水池・湖沼などの閉鎖性水域では、ほとんど改善がみられないままである。このような状況をふまえ、国は従来の水質汚濁防止法の枠を超えた総合的な法制度である湖沼水質保全特別措置法（湖沼法）を1984年7月に制定し、さらに湖沼法に基づき1987年の1月と3月には指定湖沼（琵琶湖、霞ヶ浦、児島湖、印旛沼および手賀沼）に係る湖沼水質保全計画を策定した。

このように湖沼の水質保全に対する関心は高まるとともに、具体的な対応がとられつつある。

一方、近年の経済の低成長にもかかわらず、多目的ダムの建設は水質源の確保、国土の保全という国の施策の根幹のため、これまで約280にのぼるダムが完成し、現在300を超えるダムを建設中である。

このような情勢のなか、湖沼、ダム貯水池および海洋における水質保全装置のニーズは、益々増大するであろう。そこで本稿では、貯水池などの水質保全を図るために考えられる技術および装置、特に曝気、循環装置について述べることにする。

1. 貯水池の富栄養化

富栄養化とは、本来、陸水学における自然湖沼の遷移系列上の漸進的変化に対応する現象である。すなわち、生物生産性の低い貧栄養湖が、生物生産性の高い富栄養湖に移り変わっていくまでのプロセスをさすものである。

自然湖沼におけるこのような遷移速度は非常に遅く、数百年から数千年の年月がかかるが、近年人間による生産活動域の拡大化により、湖沼内に流入する栄養塩濃度が、急速に増加した湖沼が多い。このような湖沼では、自然の状態よりきわめて早い速度で栄養塩濃度が増加し、植物プランクトンの大増殖が起こるようになった。この現象も富栄養化とよぶが、全く自然要因による富栄養化と区別するために、人為的富栄養化ともよばれている。現在われわれが問題とする富栄養化は、ほとんどが人為的富栄養化であるといつてよい。¹⁾

ここで、改めて富栄養化を定義すれば、「水域において栄養塩類（植物プランクトンや水生植物の栄養源となる、リン、窒素、炭素などが増加し、藻類の現存量を高め、生態系の構成状態と代謝が、量的・質的に急速に変って行くこと」となる。

このような「富栄養化」は、ダム貯水池（以下貯水池と称す）についても例外ではなく、最近では、流域の開発が進んだ、あるいは周辺の人口が増加した貯水池において、リン、窒素などの栄養塩類が流入し、それらが滞留蓄積した結果、水の華や淡水赤潮などの植物プランクトンの異常増殖現象がおり、水質悪化による諸問題が多く発生する原因となっている。²⁾

これらの問題の発生は、貯水池内の物理的、水質的条件と生態系が複雑に関係しており、一概に言えないが、夏期において水域に温度躍層が形成される成層型の貯水池では顕著である。この成層型の貯水池では、太陽エネルギーによる表層の水温上昇により温度躍層が形成されると、上下の水の対流・混合が妨げられ、貯水が停滞し、表層では植物プランクトンが大量増殖する。また底層では、表層から沈降してくる植物プランクトンが分解のために酸素を消費することから還元状態となり、鉄、マンガン、アンモニア性窒素などとともに栄養塩が溶出してくる。これが貯水池の循環期、すなわち秋から冬期にかけて外気温とともに表層水温も低下し自然対流が起こる時期になると水域全体に拡散する。これらの現象のくり返しにより貯水池の富栄養化は急速に進行し、第1図に示すようなメカニズムで水質悪化による諸問題を発生させることになる。

2. 貯水池の水質保全対策

富栄養化を制御し貯水池の水質保全を図る対策として、汚濁発生負荷源を対象とする流域対策と、貯水池の中で行う貯水池内対策とに分けることができる。現在考えられている水質保全対策の主な手法を示す。³⁾

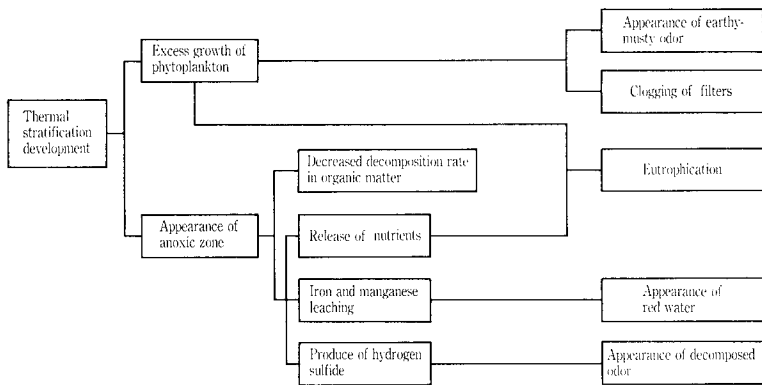
2.1 流域対策

1) 排水処理

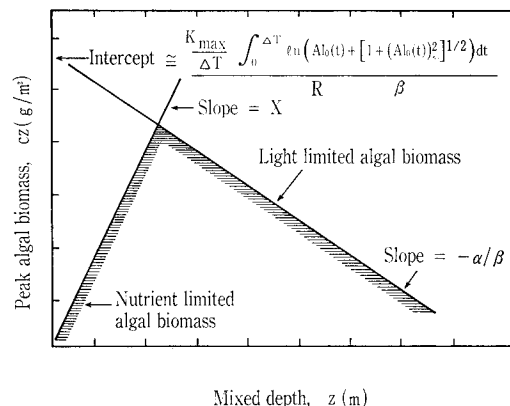
都市下水、工業排水を高度処理して水域への栄養塩負荷を減少させる。

2) 土地利用の制限

直接的、間接的な汚濁の可能性やその影響を限定するための土地利用の制限



第1図 貯水池における水質悪化のメカニズム
Fig. 1 Mechanism of impounded water pollution



第2図 混合される水深と最大プランクトン濃度との関係図
Fig. 2 Generalized plot of peak algal biomass as a function of mixed depth for both nutrient and light limitations.

3) 工業製品の改善

洗剤の無リン化やリン代替品の開発（滋賀県などで実施）

4) 流路転換

流入する高栄養塩類濃度河川の流路を変更して、貯水池の集水域外へ流す。

5) 流入水処理

溶存性栄養塩類（主にリン）の除去。流入水に対するエアレーション。生物学的収穫（ホテイアオイなどの養殖）

2.2 貯水池内対策

1) しゅんせつ

栄養塩類を含む湖底をしゅんせつすることにより栄養塩類の溶出や回帰を減少させる。

2) 栄養塩類の不活性化

凝集剤や吸着剤を用いて池内の栄養塩を不活性化、沈殿分離する。

3) 選択放流, 選択取水

底層部の栄養塩類に富んだ水の放流や良質の層からの取水を行う。

4) 物理的制御

植物プランクトンの除去および水生植物、魚の収穫

5) 化学的制御

殺藻剤（硫酸銅など）の散布による殺藻

6) 底泥処理

薬品（アルミニウム、ジルコニウム塩）やフライアッシュの底泥表面上への散布により栄養塩類の溶出を押える。

7) 曝気および循環

全層曝気は温度躍層をなくし、貯水池全体を循環させることにより底層部の溶存酸素量を増加させる。また深層曝気は温度躍層を破壊させることなしに底層部の溶存酸素状態を改善する。

以上述べたような各対策手法があるが、水質保全対策として流域対策を実施することが最も効果的で抜本的である。

しかしながら既に富栄養化した貯水池をある程度良好に

保つためには、対症療法的対策すなわち貯水池内対策も重要である。なかでも曝気および循環は、コスト、時間、無害性の点から多く採用され成果をあげている。次にその曝気および循環法について詳しく述べる。

3. 貯水池の曝気および循環

現在の曝気および循環法は、その目的、機能より3つに大別される。

1) 全層曝気循環法（特長）

- 温度躍層を破壊
- 底層部のDO増加と栄養塩類, Fe, Mn の溶出防止
- 植物プランクトンの増殖抑制, 臭気防除

2) 深層曝気（特長）

- 温度躍層は破壊せず
- 底層部のDO増加と栄養塩類, Fe, Mn の溶出防止
- 冷水魚の増殖, かんがい用水表水温度の低下防止

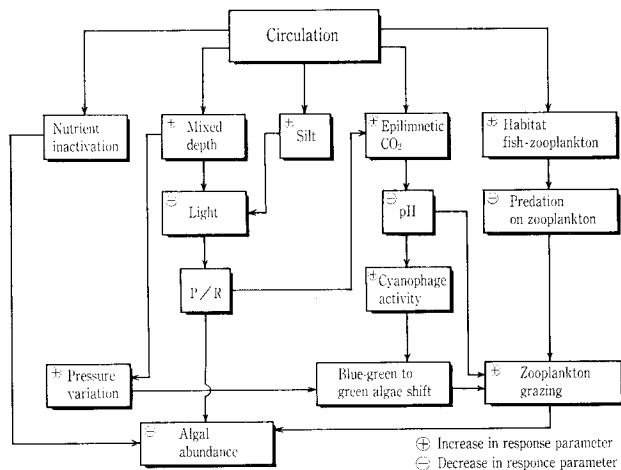
3) 2層分離曝気循環法（特長）

- 表層部と底層部の両方を曝気循環させる
- 1) 2) 両法の特長を発揮する。

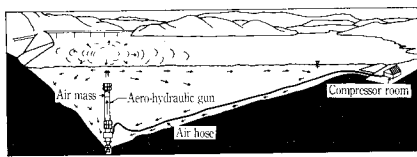
3.1 全層曝気循環法

本方式は、貯水池全体を混合攪拌するために温度躍層がなくなり、表層と底層の温度差はほとんどなくなることから成層破壊法（Destratification）とも言われる。本方式はポンプまたはエアリフトでもって無酸素状態の底層水を揚水し、表層部の酸素が十分な水と混合させることにより酸素供給も行う。この方式の特長は、底層への酸素供給による底層水の水質改善のみならず、植物プランクトンの増殖抑制に有効なことである。

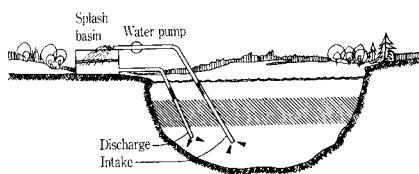
植物プランクトンの増殖は、光合成と呼吸との差によって決まる。したがって植物プランクトンがある程度増殖すると、植物プランクトン自身の光しゃへい効果により、ある深さより深くなると、栄養塩濃度より光強度が増殖の制限要因となる。そして呼吸と光合成とのバランスがとれると、単位面積当たりの植物プランクトン増殖量はある一定値で制限される。光によって制限された最大プランクトン増殖量と、湖水が混合される水深との関係を第2図に示す。



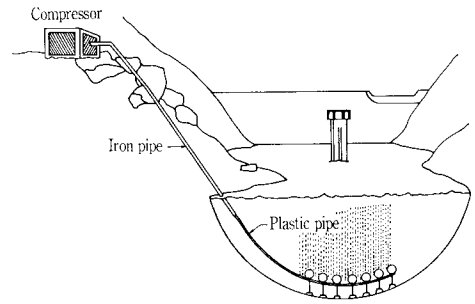
第3図 循環による植物プランクトンへの影響
Fig. 3 Beneficial effects of artificial circulation on phytoplankton



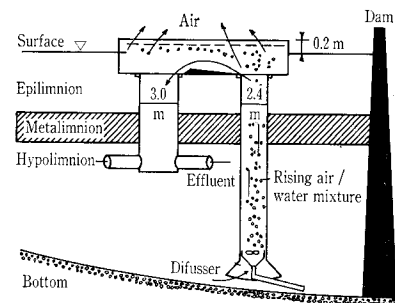
第5図 全層曝気装置（間欠空気揚水筒型）
Fig. 5 Intermittent aero-hydraulics gun type



第6図 深層曝気装置（ポンプ揚水型、スイス）
Fig. 6 Mechanical aeration system of hypolimnion aeration from Lake Bret, Switzerland (Mercier and Perret, 1949; Mercier and Gay, 1954; Mercier, 1955).



第4図 全層曝気装置（多孔パイプ型、米国）
Fig. 4 Destratification system installed at El Capitan reservoir, California.



第7図 深層曝気装置（エアリフト型、西ドイツ）
Fig. 7 A full air lift, hypolimnetic aerator used in Wahnbach Reservoir, West Germany (Bernhardt, 1974)

混合される水深が大きいくほど、最大増殖量は光に制限されて減少する。すなわち貯水池の人工的混合により植物プランクトン生産量を低下させることができる。⁴⁾

また循環により藍藻類の増殖が抑制され、緑藻類や珪藻類に移行する事例は報告されている。（第3図参照）⁵⁾

当社における全層曝気の実施例（大阪府滝畑ダム）においては淡水赤潮の原因となる渦鞭毛藻類の *Peridinium bipes* が優占種であったが、循環によって急速に減少し珪藻類に移行した。（第1表参照）

代表的な全層曝気装置として多孔パイプ型（第4図）と間欠空気揚水筒型（第5図）があるが、効率的には後者が優れておりわが国においては最も多く採用されている。

3.2 深層曝気法

深層曝気法は、スイスの湖で1949年初めて実施され、その後、主に欧米で発展してきた。本法は温度躍層を破壊させず底層部に酸素を供給する方法である。このため生態系に大きな影響を与えず、かつ冷水魚の増殖に効果があるため欧米のニーズ（釣りなどのレクリエーション）に適合している。わが国において稼動している深層曝気装置は実験装置を含めて現在2カ所ある。一庫ダムは、実用装置が稼動している唯一の貯水池であり、ここでは常用洪水吐から放流する際の硫化水素臭の発臭防止のために設置され1984年より運転を開始している。本装置は、西ドイツの Wahnbach 貯水池に設置された深層曝気装置（第7図）と同型

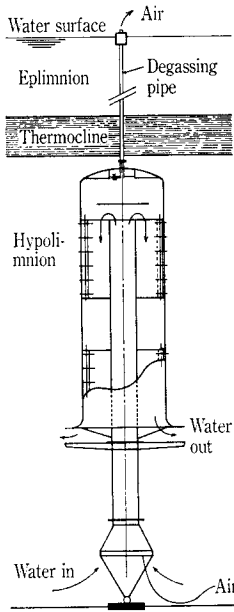
第1表 滝畑ダムにおける優占種の推移

Table 1 Dominant species in Takihata reservoir
Sampling point: Surface at damsite

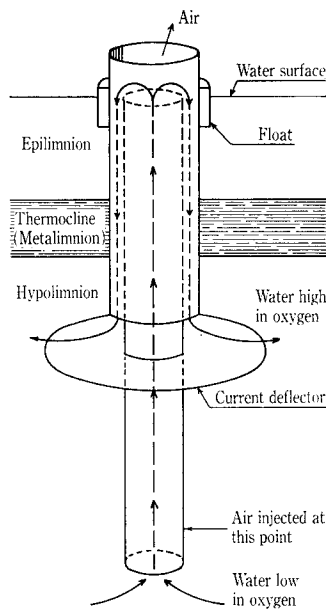
Date	Ranking	Dominant species	cells per ml
1986. 3. 14 Before aeration/ circulation	1	<i>Peridinium bipes</i>	454
	2	<i>Asterionella formosa</i>	348
	3	<i>Synedra acus</i>	33
1987. 2. 19 eleven months later	1	<i>Melosira italica</i>	908
	2	<i>Peridinium bipes</i>	53
	3	<i>Melosira distans</i>	12
1987. 9. 1	1	<i>Synedra acus</i>	274
	2	<i>Melosira distans</i>	167
	3	<i>Melosira granulata</i>	40

note: start of operation, 1987. 3. 15

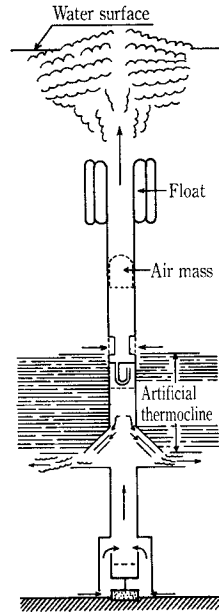
である。もう1カ所は、実験装置規模（揚水量 170 m³/h）で当社が納入した神戸市千苅貯水池である。本装置も Wahnbach と同型式であるが、1986年度の実験における底層部水質改善効果の確認を得て実用装置を1988年3月、設置される予定である。この神戸市千苅貯水池は、有効貯水量1161万トンの水道専用貯水池であり日本最初のカビ臭発生の報告がなされた貯水池として有名である。本貯水池では選択取水が可能であり、あえて全層曝気をせず底層部の水質改善を目的とする深層曝気法が採用された。また実用装置の構造は、当社が開発した新しい深層曝気装置が予定されている。（第8図参照）この装置は Fast によって実施された装置（第9図）に改良を加え、水面上に浮かぶ



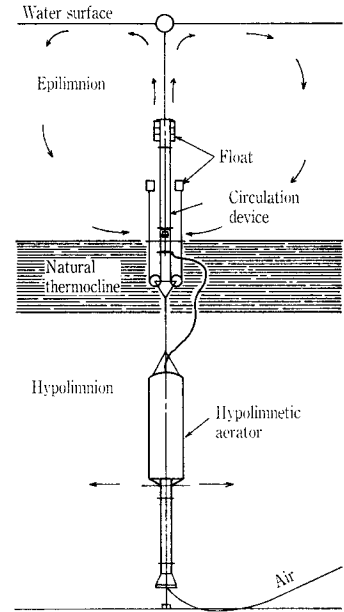
第8図
 深層曝気装置（水没式エアリフト型）
Fig. 8
 Hypolimnetic aerator used in Sengari Reservoir, Japan (1988)



第9図
 深層曝気装置（エアリフト型，米国）
Fig. 9
 A full air lift, hypolimnetic aerator used in Hemlock Lake, Michigan (Fast, 1971).



第10図
 2層分離曝気循環装置（人工躍層型）
Fig. 10
 Two-layer separated type aerator



第11図
 2層分離曝気循環装置（自然躍層型）
Fig. 11
 Two-layer separated type aerator

台船や装置頂部をなくすべく水没化を図り、景観や船の航行に支障がない構造となっている。このような型式のものは本邦では初めてで注目されている。今後、運転結果も含めて機会があれば詳細報告する予定である。

3.2 2層分離曝気循環法

本法は、全層曝気循環と深層曝気それぞれの特長を發揮するために考案されたものである。⁶⁾ 全層曝気は、貯水池全体を攪拌するため流入する濁水の沈降を阻害したり、底層部の水温は表層部とかわらなくなるため冷水魚の生存を脅かすなどの問題がある。一方、深層曝気には植物プランクトンの増殖抑制力はない。しかしながら両装置を組合せ、表層部では全層曝気循環、底層部では深層曝気を同時に行えば両者の特長が生かせる。また表層部の全層曝気装置への空気供給は、深層曝気装置よりの余剰空気が活用できるため非常に合理的である。

本法には、全層曝気と深層曝気装置とが一体構造をなし各々の吹込、吐出口の位置により人工躍層を形成させる方式（第10図）と、自然の温度躍層に重点をおき水位変動に対応させる分離方式（第11図）とがある。いずれの方式も実施例はないが、当社において水槽による水理実験、数値シミュレーションによる検討が行われており、実用化も近いものと思われる。

むすび

貯水池の水質保全対策として主に曝気・循環法について解説してきたが、それらの手法の選択は対象となる貯水池の特性に応じて検討する必要がある。曝気・循環法は富栄養化した貯水池への対症療法的手法である。本来水質保全は総合的な見地から対策を講ずるべきであり、流域対策が抜本的対策であることはいうまでもない。しかしながら総

合的な対策は関係各官庁のアロケーション問題にも関係し湖沼法における「湖沼水質保全計画」のような対策をすべての問題湖沼に講じ、また実施するにはまだ時間が必要である。一方、その間も貯水池の富栄養化は進行しており、ダム・貯水池の管理者にとって水質保全を図るには曝気・循環法が取りうるべき最善の対策の一つであると考えられる。ここに本稿が、ダム・貯水池の管理者各位の参考になれば幸いである。

また当社は、曝気・循環法のみならず、水処理の総合エンジニアリング会社として排水や汚濁河川水の脱窒・脱リン技術も有するため、流域から貯水池までの水質保全技術に関し、さらに研究開発を進め豊かな水環境を守るため努力してゆく所存である。

【参考文献】

- 1) 岡田光正ほか：微生物による環境制御管理技術 マニュアル（1983）第6部第1章、環境技術研究協会
- 2) 藤本成、森北佳昭：第19回ダム技術講演討論会テキスト（1987）ダム貯水池における水質現象とその対策、（社）日本ダム会議
- 3) Russel C. Dunst et al: Lake Rehabilitation Techniques and Experiences, Water Resources Bulletin, American Water Resources Association. (1974)
- 4) M. Lorenzen and A. Fast: A Guide of Aeration/Circulation Techniques for Lake Management, EPA-600/3-77-004, (1977)
- 5) R.A. Pastorok, T.C. Ginn and M.W. Lorenzen: Evaluation of Aeration/Circulation as a Lake Restoration Technique, EPA-600/3-81-014, (1981)
- 6) 小島貞男：産業公害、富栄養化対策としての湖水強制循環法, Vol. 18, No. 9 (1982), p. 73~74
 ・神鋼ファウドラータ技報, Vol. 29, No. 1 (1985), p. 39.
 ・公害と対策, 特集/湖沼水質保全への取組み, Vol. 23, No. 9 (1987)