

閉鎖性水域における汚水浄化法の開発

森元光雄¹・大成博文²・佐賀孝徳³・前田邦男⁴・斎藤 隆⁵

¹正会員 WRS研究所代表者(〒742-21 山口県大島郡大島町東屋代789)

²正会員 工博 徳山工業高等専門学校教授 土木建築工学科(〒745 徳山市久米高城3538)

³正会員 工博 徳山工業高等専門学校助教授 土木建築工学科(〒745 徳山市久米高城3538)

⁴正会員 技術士 中電技術コンサルタント(株)(〒734 広島市南区出汐2丁目3番30号)

⁵正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 斎藤 隆(〒755 宇部市常盤台2557)

数十ミクロンを平均径とするマイクロバブルの大量発生と、それを含む水域内全体の緩やかな循環流の形成を可能とするエアレータを開発した。それを、室内外における汚水浄化実験に適用しその有効性を確認した。とくに、ヘドロを含む浮遊性汚濁物質の低減に著しい効果が明らかとなり、ゴルフ場池の現地実験においては、実験開始668時間後に、濁度と浮遊物質(SS)で約90%の減少率が得られた。

Key Words : waste water purification, aerater, micro-bubble, closed water area, control of water quality

1. 結論

今日もなお、わが国の水環境の汚染が、徐々に進行している。なかでも、湖沼や内湾などの閉鎖性自然水域においては、富栄養化、異臭の発生、透明度の低下、赤潮・青潮などの発生に伴う深刻な水質の悪化が指摘され、そこでの環境基準(COD)の達成率は、海域において80.9%、湖沼において44.6%というきわめて低水準に留っており¹⁾、その改善が緊急の課題となっている。

このような大容量の水域の汚水浄化を可能とする技術の開発においては、以下の大きな問題点が存在している。

- ①従来の生物処理は量的に限界があり、広領域には適用できない。
- ②各種成層などによる水域内の汚濁を進行させる水理現象を制御することが難しい。
- ③洪水や降雨の影響を受けやすい。
- ④装置が大型で費用が莫大である。

従来の閉鎖水域の汚水浄化法^{2)~6)}においては、なかでも曝気による水質制御法の有効性が注目されている。その基本は、気泡の上昇に伴う循環流の形成が、各種成層を破壊して水質を一様化させるとともに、水中での溶存酸素量を増加させることによって、汚水浄化を試みようとしたものである。しかし、大規模な循

環流の形成には、可能な限り大きな気泡塊の上昇が必要であり、一方、水中での溶存酸素効率を高めるためには、大量の微細気泡の発生が必要とされる。ところが、この循環流の形成と微細気泡の発生を同時に可能とすることは水理学的に容易ではなく、そこに従来技術における最も根本的な問題のひとつが存在していた。

そこで本研究では、これらの問題点を解決するために、次の視点に基づくエアレータの開発が試みられた。

(Ⅰ) 酸素溶存と汚濁物附着効果を高める数十ミクロンのマイクロバブルを大量に発生させることを、省エネルギー型の簡単な機械装置で可能とする。

(Ⅱ) エアレータから、(Ⅰ)のマイクロバブルとともに、比較的大規模な気泡塊を連続的に噴出させ、その浮上効果および周囲流体の連行によって、水域の鉛直断面内に大規模な循環流を形成させ、水域全体の攪拌効率を向上させる。

この2点を特徴とするエアレータが、室内外での汚水浄化実験に適用され、有益な結果が得られた。

2. 旋回式エアレータ

(1) 構造の概要

図-1に旋回式エアレータの断面図を示す。円筒ならびに漸縮円筒の内部は4枚の固定螺旋板で構成されている。コンプレッサーから供給された空気は円筒下部

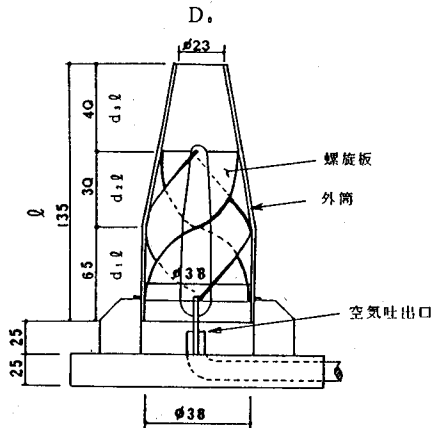


図-1 旋回式エアレータ断面図 (S型)

表-1 旋回式エアレータの標準仕様

型式	De 入口内径 (mm)	Do 出口内径 (mm)	ℓ 長さ (mm)	Qa 標準空気量 (ℓ/min)	H 適用水深 (m)
S	38	23	135	5~30	0.5~1.5
M	120	60	348	50~150	1.5~3.0
L	150	75	450	160~640	3.0~10

表-2 実験水槽および実験条件

	L 水槽幅 (cm)	S 水槽幅 (cm)	D 水槽深さ (cm)	H 水深 (cm)	使用エア レータ	Qa 供給空気量 (ℓ/min)
CASE A	60	60	60	40	S	6
CASE B	76	190	186	130	M	120
CASE C	100	600	100	53	S	20~80

の吐出口から間欠的に噴出される。この気泡塊の上昇に伴い円筒下部から水が吸い込まれ、円筒内の固定螺旋板部では、気液 2 相流塊の強制的旋回に伴う混合が発生する。そして上部の漸縮円筒部では、旋回上昇成分がより増加され、出口部で大気泡塊と微細気泡の両方が連行水流とともに、エアレータ内外の圧力差によって噴出される。

表-1, 2に示すエアレータと水槽で、本エアレータから発生する微細気泡径、噴出気泡流動幅とその循環流の規模を調べた。表-2に示してある供給空気量は、予備実験で得られた空気吐出口からの空気の一部がエアレータ外に流れないこと、さらには底部に堆積したヘドロを一挙に巻き上げないことに注目して決められた。

(2) 循環流内の気泡径分布

写真-1はエアレータから噴出した気泡の流動状態と

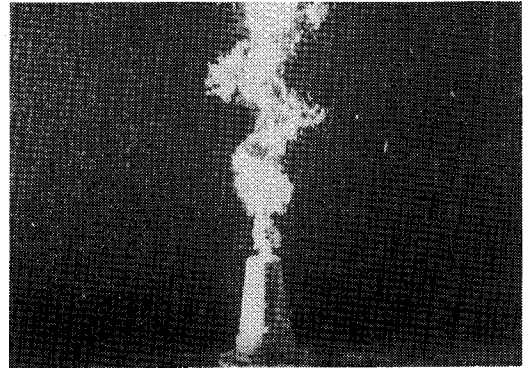


写真-1 噴出する気泡の流動状況(CASE A)

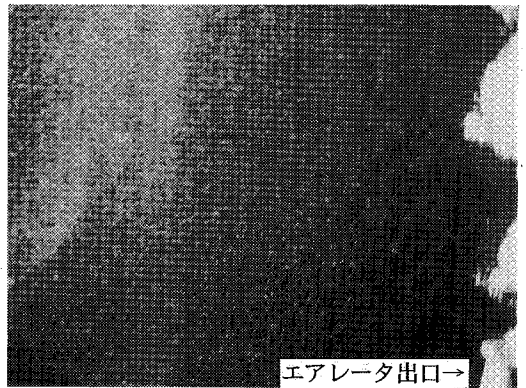


写真-2 微細気泡による白濁の様子(CASE B)

循環流内における微細気泡の写真である。エアレータ出口では、安定した濃度で連続して気泡が噴出されている。微細気泡の発生は、エアレータ内の気液 2 相流塊同士の強制的な旋回・混合によって形成されると考えられる。エアレータの出口からは、マクロな気泡と同時にこの微細気泡が噴出される。前者は周囲の流体を連行させながら上部に浮上して水表面に達し、水槽内全体を流動する循環流を誘起する。後者は、この循環流によって水槽内に長時間滞留することが可能となり、写真-2に示されるような白濁状態が常時形成される。この微細気泡と循環流形成を実現させたことに本エアレータの特徴がある。

写真-3に、槽内に形成された微細気泡の接写断面視の一例を示す。写真内の白い流跡は、撮影時間内に動いた気泡の軌跡であり、その横幅を読み取ることによって、気泡径が求められる。ただし、写真中には、数 mm 程度の気泡も認められるが、それは撮影中のハレーションによって形成されたものであり、それらは除外された。また、実際の読み取りにおいては、写真を約 10 倍程度に引延ばし、それをを用いて、気泡径が拡大レ

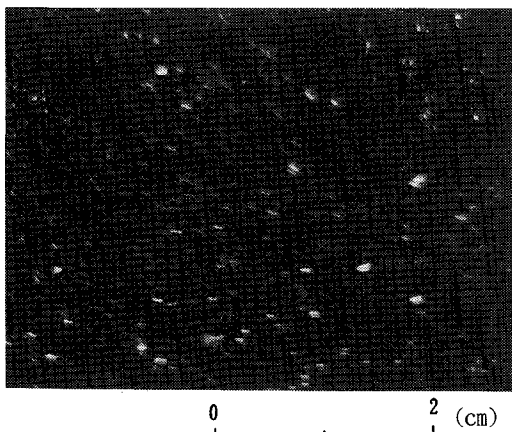


写真-3 微細気泡の接写断面視(CASE B)

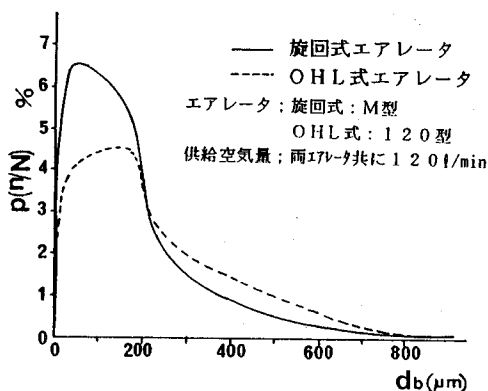


図-2 存在気泡径の頻度分布(CASE B)

レンズを通して読み取られた。この場合の最小読み取り誤差は10ミクロン程度であった。

図-2に、その気泡径の頻度分布の一例を示す。縦軸は気泡径の頻度、横軸は読みとり気泡径である。また、同図には、比較のために同タイプの「OHL式エアレータ」と呼ばれるエアレータを用いて、同じ手法で求められた値も示されている。これにより、本エアレータは、数十ミクロンの気泡径を最頻度とし、その大部分の発生頻度範囲が20~200ミクロンであることが明らかである。また、OHL式と比較すると、微細気泡の発生頻度の増加と数百ミクロン程度の気泡の発生の減少が明らかである。

ところで、著者らは、従来の水処理用散気装置のいくつかについて、その発生気泡径のほとんどが数百ミクロン以上であったことを観察している⁷⁾。そこで以後は、微細気泡のうち、その気泡径が数十ミクロン以下の気泡を「マイクロバブル」と呼ぶことにする。

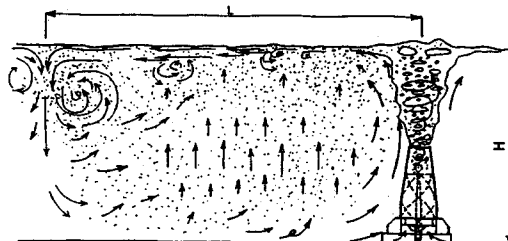


図-3 循環流の縦断面スケッチ

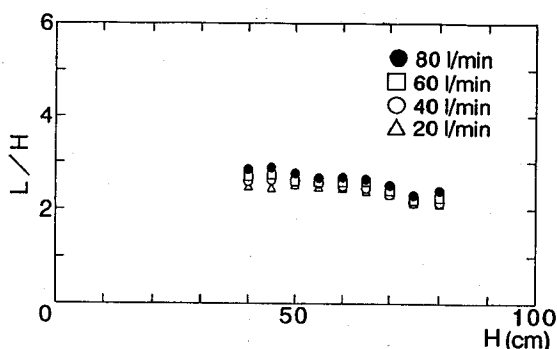
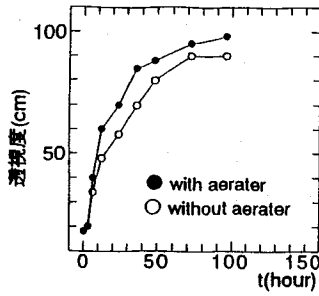


図-4 循環流の広がり幅(CASE C)

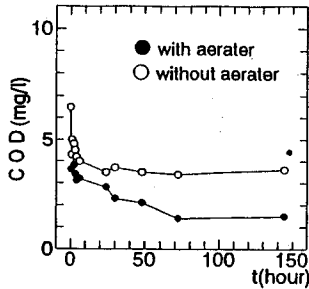
(3)循環流の規模

エアレータ下部からの吸い込み、上昇気泡流とその水面衝突後の表層流によって形成される循環流の規模を明らかにするために、比重が1.002~1.008で平均径が300 μ mの粒子をトレーサーにして循環流を断面視することで水槽内の流動状態を調べた。流動状態の概略を把握するために、粒子の軌跡をスケッチした一例が図-3である。図中の矢印は目視による循環流の流向を表す。表層流には明確な横渦運動が形成され、流下に伴い規模を増大してきた横渦によって下降流が誘起されている。下降流が形成される断面の水表面では水表面に浮かぶ粒子によって境界が作られている。エアレータ中心から水表面の粒子で形成されている境界までを循環流幅Lと定義して、水深と供給空気量を変えて長水路で測定した結果(CASE C)が図-4である。この広がり幅Lは送風量の変化とは無関係にほぼ一定で水深の約2~3倍の値を示している。このことは、対象とする水域において、エアレータの最適設置間隔が水深の約4~6倍であり、広領域においても比較的少ないエアレータの設置で十分であることを示している。

以上のことから、本エアレータの特徴は、マイクロバブルの発生とより強力で安定した循環流の形成を水



(a)透視度



(b)COD

図-5 Kダム水質試験結果(CASE A)

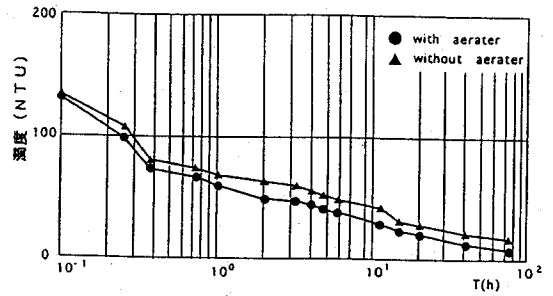


図-6 濁度の計測結果(CASE A)

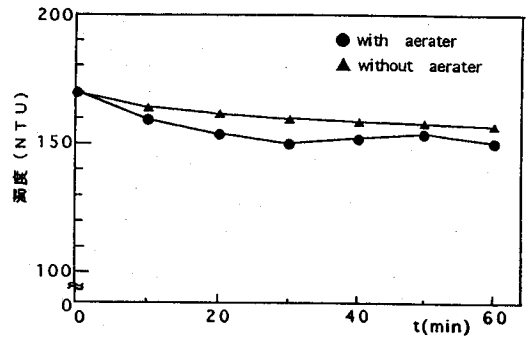


図-7 粘土鉱物微粒子沈降実験の結果(CASE A)

深の2~3倍の範囲で可能とすることにあることが明らかである。

3. 汚水浄化実験

旋回式エアレータの浄水機能を調べるため、4種類の汚水を用いた室内実験と汚濁の進んだゴルフ場貯水池での現地実験を行った。

(1)室内汚水浄化実験

使用した汚水は次の4種類で、その概略を説明する。

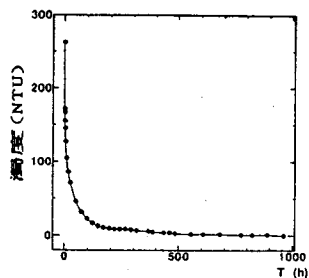
- ①山口県Kダムの湖水と湖底ヘドロの混合汚水；貯水量が少なく、毎年夏場に水質の悪化が指摘されている。
- ②山口県T湖の湖水と湖底ヘドロの混合汚水；飼育している鳥の餌や糞に加えて、一部には生活排水の流れ込みがあり、平均数メートルの湖底に1メートル以上のヘドロが堆積している。有機質の含有率が高い汚水である。
- ③粘土鉱物微粒子の混合水；ミクロンオーダーのシリカを主成分とする微粒子。
- ④福岡県O市M遊園地の池水；夏場には臭気を発し、

飛散水による服の汚れが問題となっている。生活排水が池内に流れ込み、湖底のヘドロは真黒で腐乱状態に近く、池水悪化の原因となっている。

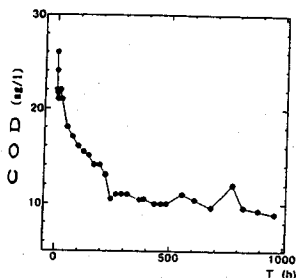
山口県Kダムの汚水浄化実験では、この湖水と底部ヘドロを採取し、それを実験水槽S内に入れて十分攪拌、その後24時間静置して行われた。ブローヤからの空気供給量は、マイクロバブルの大量発生とともに、循環流が底部のヘドロを巻き上げないという条件を確かめて⁸⁾、6ℓ/minとされた。この空気量は、底部のすべてのヘドロと浮遊物質を巻き上げて、浄化機能を低下させずに、かつ微細気泡を大量に発生させる状態を観察して決めた。

また、水質分析用の試験汚水は水槽内の汚水の上部において採取された。さらに、エアレータを取り外して単管からの曝気状態でのエアレーション実験が行われ、それらが比較された。このエアレータの有無による比較の目的は、マイクロバブルの汚水浄化における役割を明らかにすることにある。ここで、エアレータを取り外した場合には、ほとんどマイクロバブルの発生がなかったことが目視で観察された。

図-5に、透視度とCODの結果が示されている。エアレータの効果によって、透視度が早期に向上し、C

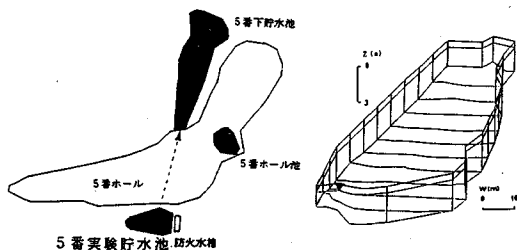


(a)濁度



(b)COD

図-8 水質の経時変化(CASE A)



(a)実験池付近の略図

(b)立体構造

図-9 実験池付近の略図と実験池の立体構造

OD値もより低下していることが明らかである。また、DO、pHについては大きな変化が認められなかった。

山口県T湖についても、この湖底部より採取された腐敗状態のヘドロを用いて、上記と同一の実験がなされた。図-6には、その濁度の計測結果が示されている。この図においてもエアレータの効果は明らかであり、濁度は、実験開始後1時間を経過した時点から、それが無い場合と比較して約3倍の時間低減を示している。

この傾向は、図-7に示される平均粒径 $1.2\mu\text{m}$ の粘土鉱物微粒子の沈降実験においても明らかであり、エアレータによる沈降促進効果が認められる。

次に、福岡県O市のM遊園地の池水ヘドロを用いて、長時間の浄化実験がなされた。本実験においても、採

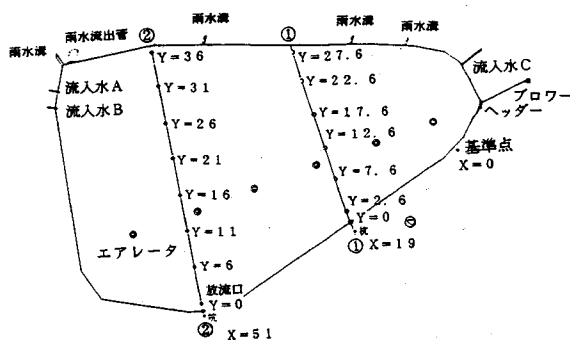


図-10 17レー配置地点(◎印点)と水質観測断面(①, ②)

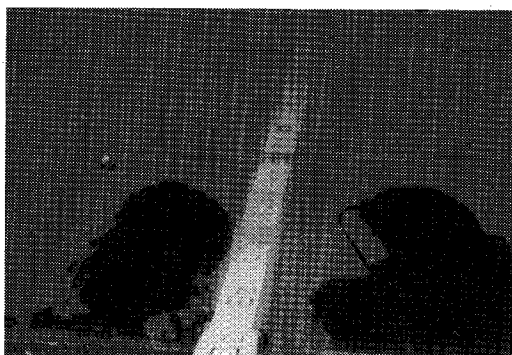


写真-4 浄化が促進された実験池(25日経過後、箱尺目盛は約130cmまで読めた。)

取後攪拌と1日の静置がなされた。当然のことながら、実験開始前の試験水は、茶黒色で、透視度は0に近い状態であった。図-8には、その濁度とCODの分析結果が示されている。これより、濁度においては、10時間でその90%以上が減少し、その後も徐々にその低減が続いて960時間で濁度は1~2程度まで低減した。また、CODにおいては、濁度の低減傾向よりは緩慢であるが、徐々に減少し、最終的には 7mg/l 程度までに至った。本実験においては、底部に堆積したヘドロにも重要な変化が認められ、その色は茶黒色から、薄茶色へと変化し、臭気も消えた。

以上のように、マイクロバブルを大量に発生させる本エアレータは、浮遊性ヘドロを高濃度に含む汚水の短長期にわたる浄化に有効であることが明らかである。しかし、マイクロバブルを含む循環流の形成による汚水浄化の詳細な機構については不明であり、今後の重要な究明課題としたい。

(2)ゴルフ場調整池における現地実験

a)実験池とエアレータの配置

実験池は、同ゴルフ場5番ホール横の雨水流出調整

表-3 水質分析結果

経過時間 (hour)	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	濁度 (NTU)	T-N (mg/l)	T-P (mg/l)
0	5.4	9.4	22	19	1.2	0.33
48	-	9.4	13	12	-	-
164	-	9.9	10	7.7	-	-
428	3.5	8.1	4	3.1	1.1	0.2
668	3.0	7.8	1.4	2.4	0.77	0.1

表-4 隣接池の水質分析結果

測定場所	経過時間 (hour)	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	濁度 (NTU)
5番 ホール池	0	9.9	10	23	20
	428	8.9	7.5	16	15
	668	3.9	5.7	7.8	9.8
5番 下貯水池	0	-	9.5	20	22
	428	8.0	10	12	9.0
	668	4.0	7.4	6.5	8.8

用の貯水池であり、この付近には、図-9(a)に示すように2つの池があり、その1つには、本実験池からの越流水が、パイプで流入している(同図矢印の方向)。また、降雨時には、本実験池に5箇所からの流入があり、とくに図-10に示した雨水流出管からは、上流の貯水池から大量の泥水が水中へ流入していた。一方、常時の流入水にはA、B、Cがあり、A、Bは防炎用水から流出し(それぞれ約1ℓ/min程度で水質はCOD2mg/l以下の清澄な水)、Cは油や錆を伴うポンプ室からの流入で0.1ℓ/min以下のわずかな流入であった。

実験開始時点の水質はCODで9.4mg/l、透視度は20cm程度であり、地面全体は茶褐色を呈していた。また、池底には約10cmのヘドロと土砂の堆積があった。また、本貯水池の水深は、3m弱であり、細部の水深計測と測定の結果、総貯水量は5,500m³であった(図-9(b)に貯水池の立体構造を示す)。

図-10には、本貯水池におけるエアレータの設置点(◎印、6箇所)と水質計測断面(x=19.51m)が示されている。エアレータの配置位置については、2台組のエアレータ装置とホースをクレーンでつり上げて設置したために、クレーンの長さによって制約されて岸寄りとなってしまった。エアレータはM型が採用され、貯水池底

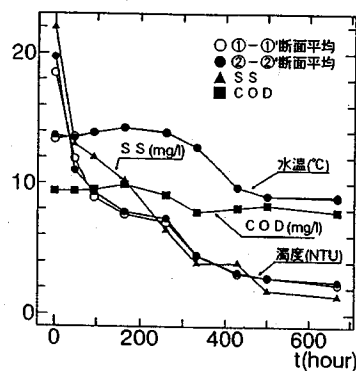


図-11 水質の経時変化

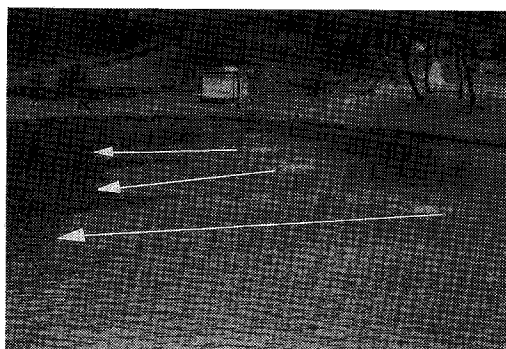


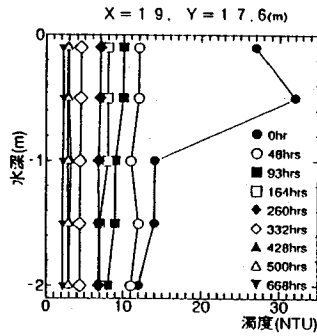
写真-5 エアレーションによる波紋

部に直線的に6本配置された。エアレータ間隔は、池底に大石や落木があり、循環流が停滞することも考慮して図-4で示された結果よりも若干短くして10m(L/H=2、Lはエアレータ間隔)とした。ブロワーの出力は0.25kw、送風量は360ℓ/minであり、エアレータ1本あたりの送風量は、60ℓ/minとした。1本当たりの送風量は、予め室内実験でマイクロバブルが大量に発生することが確かめられ、さらには現場においては、底質のヘドロを大量に巻き上げないことを確認して決められた。ブロワーからの空気は、パイプを経てエアレータに供給されたが、その空気量は各流量計を見ながらバルブで調整された。実験開始日は1994年11月1日であり、それ以後連続運転が行われた。

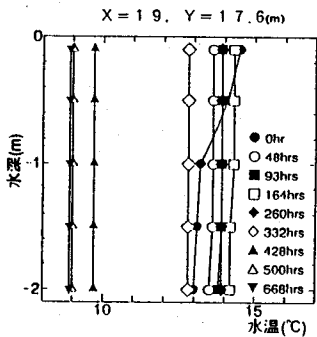
b) 水質観測の結果

実験開始後、時間の経過とともに、目視においても池水の浄化の進行が観察され得るようになった。かつての池面全体にわたる茶褐色が青緑色に変化し、その透視度は、18日経過後には1m以上に増大した。写真-4には、25日経過後に調べた透視度が箱尺目盛りで約130cmに達した。

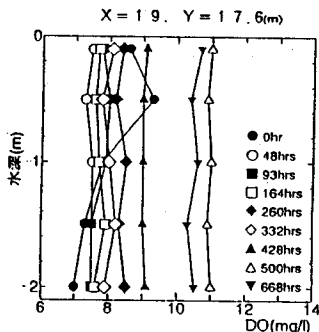
図-11に、その水質分析の結果が示されている。これらの値は、計測断面ごとにすべての計測値の総平均値である。これより、実験開始とともに、濁度と浮遊



(a)濁度



(b)水温



(c)DO

図-12 水質の鉛直断面変化

物質濃度が徐々に低下していることが明らかであり、668時間経過後の低減率は、それぞれ87%と94%である。また、これらの低減率よりは緩慢であるが、CO Dのそれは、17%であった。表-3にはBOD、窒素、リンの分析結果も示されており、水質の低減傾向が認められる。しかし、この低減はわずかであり、それをエアレーションの効果と判定するのは難しい。さらに、これらの結果と、エアレーションが行われていない2つの隣接池水の水質が表-4に比較された。この両池とも全体としては時間の経過とともに平均気温が低下し、水質改善傾向にあるが、とくに濁度とSSの値において、実験池の結果は隣接池のそれと顕著な相異を示し

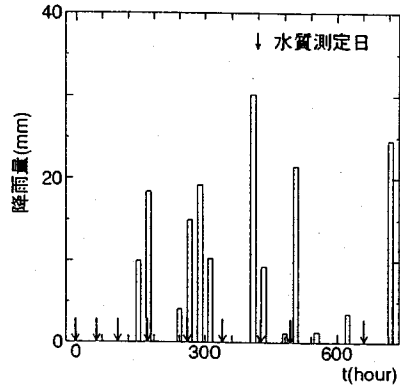


図-13 実験期間中の降雨

ていることが注目される。

写真-5には、エアレータによって形成された水面の波紋が可視化されている。ブイ直下がエアレータの設置点である。この波紋は、エアレータの設置方向よりも、それと直角方向に長い広がり(矢印方向)を示している。波紋の境界面付近がエアレータによって形成された循環流の水面付近からの下降流発生地点である(これは、本実験池においても目視で観察された)ことから、本池内のエアレータによる循環流の形成は、エアレータの並ぶ方向と直角方向により大きな広がりを見せていることが推測される。このことは、エアレータの設置間隔をより広げて、その設置本数を減らしてもよいことを示唆している。

図-12に、池内鉛直断面における濁度、水温、DO分布の経時変化の一例が示されている。これらの結果からも明らかなように、実験開始前には、水深1m付近を境界とする緩やかな温度成層の形成が認められた。この成層化が池内の汚濁に大きな影響を与えていたことは明らかである。しかし、エアレーション後はこの成層がすぐに破壊されて、48時間後の値では、濁度、水温、DOの鉛直分布の一様性が認められる。この一様性は、断面①、②のすべてのデータで確認されており、本エアレーションの効果も池内全体に及んでいることが明らかとなった。なお、時間経過とともに、全計測断面において、濁度の低下とともにDOが増加したことが観察された。実験開始後から、668時間経過中に降雨は13度あったが、その降雨量は日雨量で1mmから30mmの範囲にあった。これらの降雨によって、貯水池全体の水質が大きく変化することはなかった。図-13に実験期間中の降雨状況を示す。

さらに、実験中の池内の水生微生物が観察され、ツリガネムシ、珪藻、緑藻などの動植物の生息が確認された。

以上のことから、本エアレータは広領域の閉鎖性自

然水域の濁度と浮遊物質の低減について有効であり、その特徴は水域内の浮遊物質の低減と成層破壊に伴う水質の均一化にあることが明らかである。

4. 結論

広領域の閉鎖性自然水域の汚水浄化のために、省エネルギー型で濁度と浮遊物質低減を可能とするエアレータが開発された。そのエアレータの性能試験と、それをを用いた汚水浄化実験が室内外で行われ、その有効性が確認された。以下に、本論における主要な結論を示す。

(1) 巡回式エアレータは、数十ミクロンを最頻値とするマイクロバブルを大量に発生させ、同時にそれを含む安定した循環流を水深の約2~3倍の範囲で形成させる。

(2) 閉鎖性自然水域におけるマイクロバブルを含む循環流の形成は、高濃度の浮遊性ヘドロ、粘土鉱物微粒子を含む汚水の浄化に有効である。

(3) 巡回式エアレータは、水域内の成層を破壊することによって水質の均一化を実現し、とくに浮遊物質の著しい低減を可能とする特徴を有する。ゴルフ場池の浄化実験では、668時間の経過後に濁度および浮遊物質濃度で約90%低減した。

なお、今回の現地実験は、財政支出の都合上、実験期日を夏場にすることができなかった。今後の課題として、より高精度の省エネルギー型エアレータの開発とマイクロバブルを含む循環流の汚水浄化機構を詳細に解明するとともに、より系統的な生物化学的な研究を行うことが重要と思われる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、文部省科学研究費補助金、河川管理財団及び山口県産業技術開発機構より助成をいただいた。また、ゴルフ場池浄化実験においては、大島工機(株)環境事業部の皆さんの協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 環境庁：環境白書総説，pp. 314-336，1994.
- 2) 田中喜久次：福岡県大濠公園の水質改善と保全，緑の読本，資源環境対策特集・公園の水と水辺の管理(Ⅱ)，pp. 35-42，1994.
- 3) 西牟田定：水中礫間浄化ユニットによる池水の浄化，資源環境対策，Vol. 29，pp. 69-74，1993.
- 4) 横田俊男，釣巻一弥：間欠式空気揚水筒による水質浄化，緑の読本，資源環境対策特集・公園の水と水辺の管理(Ⅱ)，pp. 35-41，1994.
- 5) 丹羽薫，久納誠：総合的な貯水池水質保全対策技術の開発，ダム技術，No. 75，pp. 37-46，1992.
- 6) 宮永洋一：貯水池における水理学的富栄養化対策の可能性に関する検討，第28回水理講演会論文集，pp. 297-302，1984.
- 7) 森元光雄，大成博文，渡辺勝利，佐賀孝徳：微生物活用排水処理装置におけるエアレーションの方法について，徳山工業高等専門学校研究紀要，第14号，pp. 161-166，1990.
- 8) 森元光雄，大成博文：エアレーションによる自然閉鎖水域の汚染浄化，徳山工業高等専門学校研究紀要，第16号，pp. 89-95，1992.

(1995. 8. 31受付)

A DEVELOPMENT OF WASTE WATER PURIFICATION TECHNIQUE IN CLOSED WATER AREA

Mitsuo MORIMOTO, Hirofumi ONARI, Takanori SAGA,
Kunio MAEDA and Takashi SAITOU

A new water purification technique in closed water area polluted by muddy and waste water was developed by use of the aerators which can generate a large quantity of micro bubble, which diameter is less than 100 μ m, and form large-scale circulating flow in the whole water area.

The efficiency of the new technique was experimentally proved for the several kinds of waste water quality in laboratory and fields. The results indicate that the both of turbidity and concentration of suspended solid in the waste water of a pond were decreased by about 90% in 668 hours.