

アクアイオンシステムによる水質浄化技術の開発(その4) －淡水域の直接浄化－

木内巧米谷宏史

要 旨

わが国における河川、湖沼、海域の水質は、一時期に比べて改善されてきたものの、ここ数年は横ばいとなっており、全国ワースト5は毎年同じ名が連なっている。特に湖沼、内湾、内海などの閉鎖性水域と都市の中小河川の汚濁が著しい。これらの水域では、有機物の流入による水質の富栄養化が一因で、アオコや赤潮など植物プランクトンの異常発生現象が見られる。そこで、アクアイオンシステム（水の電気分解を応用した水質浄化装置）を用いたアオコの除去を主体とする浄化実験から、以下のことが得られた。

- ①アオコの異常発生を抑制する効果が認められる。
- ②汚濁した池の浄化には、池の規模や浄化装置の規模・能力にもよるが、池の全水量の1.5倍の水量を処理する必要がある。

1. まえがき

前報までは、アクアイオンシステムの処理能力の確認および実工事への実証が主な内容であった¹⁾。その後、小規模な装置(C-1)を用いて修景池(公園やゴルフ場などの池)の浄化を行い、主にアオコの発生を抑制する目的でゴルフ場向けの装置設計を行った。

本報告では、設計に至るまでの実験内容および浄化方式、環境基準などについてとりまとめた。

2. 淡水域の汚濁と環境基準

2.1 富栄養化

近年、国内では水域の富栄養化が進み、富栄養化していない水域を見いだすことの方が難しくなっている。富栄養化の定義は、湖沼では「水中の栄養塩が増加すること」であるが、一般には栄養塩(リン酸塩、窒素化合物)が増えた結果、植物プランクトンや水草が増えて一次生産が大きくなることまでを含めている²⁾。

湖沼の富栄養化の判定基準は、①水色、②透明度、③pH、④栄養塩類、⑤懸濁物質、⑥溶存酸素などの指標で貧栄養湖と富栄養湖に分けているが、研究者によって捉えかたが異なり、各指標間でかなりの幅がみられる。一例として、土木学会がまとめた琵琶湖の将来水質に関する調査報告書では表-1のような判定基準を示している。

2.2 水質の環境基準とアオコの異常発生

水質汚濁防止についての環境基準は、「人の健康の保護に関する環境基準」と「生活環境の保全に関する環境

基準」に分けられており、前者は有害物質九項目についての基準値とその測定方法が定められ、全国一律に適用されている。後者は河川・湖沼・海域のそれぞれの水域毎に、水素イオン濃度、生物化学的酸素要求量(BOD)または化学的酸素要求量(COD)、溶存酸素(DO)、大腸菌群数などの項目について、基準値と測定方法が定められている。なお、湖沼については窒素・リンが大量に含まれると富栄養化し、藻類の異常発生の恐れがあるため、この二項目の基準が併せて定められている。

表-1 富栄養化の判定基準³⁾

特 徴	貧栄養湖 (例:阿寒湖、十和田湖)	富栄養湖 (例:霞ヶ浦、諏訪湖)
水 色	藍色または緑色	緑色ないし黄色、水の華のため、ときには黒く着色することがある。
透 明 度	大きい(5m以上)	小さい(5m以下)
反 応	中性付近	中性または弱アルカリ性。夏季に表層はときに強アルカリ性になる。
栄養塩類(mg/l)	少量 (N<0.15、P<0.02)	多量 (N>0.15、P>0.02)
懸濁物質	少量	プランクトンおよびその残骸による懸濁物質が多量。
溶存酸素	全層を通じて飽和に近い。	表水層は飽和または過飽和。深水層では常に著しく減少する。消耗は主にプランクトン遺骸の酸化に基づく。
底生動物	種類は多い。酸素の不足に耐えられぬ種類	酸素の不足に耐える種類
植物 プランクトン	貧弱、おもに珪藻となる。	豊富、夏には藍藻の水の華をつくる。珪藻、虫藻も多い。
魚 類	量は少ない。冷水性のものがいる(マス、ウグイ)。	量が多い。暖水性のものが多い(コイ、フナ、ウナギなど)。

池の透明性を表す項目として、クロロフィル-aと透明度がある。クロロフィルは、光合成生物がもっている光合成色素のことである。クロロフィル-a、b、c及びバクテリオクロロフィルに分類される。クロロフィル-aは光合成細菌以外の植物に普遍的に存在している。

OECD (Organization for Economic Co-operation and Development) の調査では、クロロフィル濃度とリン濃度には高い相関があることが報告されている。わが国では環境庁の分類(表-2)が示されており、全リン年間平均値が0.03mg/l以下であれば、クロロフィル-a濃度は20μg/l以下、透明度は2m以上が期待できるとされている。また、霞ヶ浦、諏訪湖のクロロフィル-a濃度とアオコの発生状況の関係が表-3のように示されている。

表-2 環境庁の分類(リン)

レベル	全リン年間平均値 (mg/l)	参考項目		
		クロロフィル夏季値 (μg/l)	透明度 (m)	溶存酸素飽和度 夏季底層値(%)
I	0.005 以下	1 以下	7 以上	50以上
II	0.01 ~	3 ~	4 ~	50以上
III	0.03 ~	20 ~	2 ~	~
IV	0.05 ~	40 ~	1 ~	~
V	0.10 ~	100 ~	~	~

(注)1.全リンに係わる目標値は、表層の値とする。
2.参考項目の数値は、湖沼表層水の全リン年間平均値に対応する期待値を示すものである。

表-3 霞ヶ浦、諏訪湖のクロロフィル-a濃度とアオコの発生状況⁴⁾

ランク	表面のクロロフィル-a濃度 (μg/l)	発生状況の概要
I	20程度	水中にアオコの微小群集が粗に浮遊している状態で湖岸からは確認できにくい
II	40~60程度 (50程度)	水面が緑色を呈し、湖岸から確認できる程の風で湖岸に吹き寄せられ、緑色の膜を作る。
III	100程度	水面に水の華が発生し、波間に漂流して視覚的に汚染が確認できる。なお、湖岸には厚い緑色膜を形成し、悪臭を放っている。
IV	150~250 (200程度)	諏訪湖等で観察される発生程度で、湖面が一面に厚い緑膜でおおわれ、湖岸でも臭気を感じる。

表-4 水域直接浄化法の種類

直 接 淨 化 法	直 接 方 式 (水域・水路利用浄化方式)	曝気法
		浄化用水希釈法
		伏流浄化法
		薄層流浄化法
		沈殿池(滞水池)法
		藻類・水生植物回収法
		接触材充填水路浄化法*
		活性炭浄化法*
		水生植物栽植法*
	分 離 方 式 (汲み上げ・バイパス浄化方式)	排水処理法の活用
		礫間接触酸化法
		砂ろ過法
		凝集沈殿法

(注)*は分離方式としても活用

2.3 水域の浄化工法

水域浄化は、発生源対策によるのが最も効果的であるが、現状の排水処理施設の整備状況や法制度では、汚濁負荷量の約40%を占める一般家庭の生活雑排水にまで規制を行うことは不可能である。そのため、汚濁が進行している水域ではその水域内で浄化を促進させが必要である。これが水域の直接浄化と呼ばれるものである。表-4に主な浄化法の種類を示す。浄化方式は河川や湖沼のその場で浄化する方式(直接方式)と汚濁水を汲み上げて装置化された反応槽の中で浄化する方式(分離方式)とに分けられている⁵⁾。アクアイオンシステムによる浄化は、直接浄化法の分離方式に属するものである。

3.1 ニッ池(東京都・東大和市)の浄化

3.1.1 浄化の概要

(1) 浄化場所

東京都東大和市湖畔3丁目1097番地内

(2) 実験期間

1991年7月8日~7月20日

(3) 池の状況

住宅街の公園内にあり、生活排水は流入していないので殆ど雨水と考えてよい。池は瓢箪形を呈し、水深は約50cm、面積は約800m²で、水量約400m³である。池内にはコイ、フナなどの魚が生息(近隣の住民による放流もある)しており、子供たちの釣り場となっている。

(4) 目的

小規模なアクアイオンシステム(C-1型)を用いて、公園池浄化の可能性を試みる。

(5) 浄化方法

1) 浄化の方式

浄化の方式は、直接浄化法分離方式である。この方式で浄化を行う場合、池水の流れの遅い部位から取水し、流れの速い部位に処理水を放流することが重要である。そこで、当該池の場合は図-1のように取水・放流の場所を設定した。

2) 使用機材

使用したC-1(1m³/hr型装置)の諸元を表-5に、構成及び処理フローを図-2に示す。

3) 運転方法

流量はC-1の標準処理能力の1.5倍相当の1.5m³/hr、電流も同様に1.5倍の45A/m³とした。

4) 計測項目

2時間毎に、電解電圧と電流、原水及び処理水の濁度、pHの計測を行った。濁度及びpHの計測機器を表-6に示す。

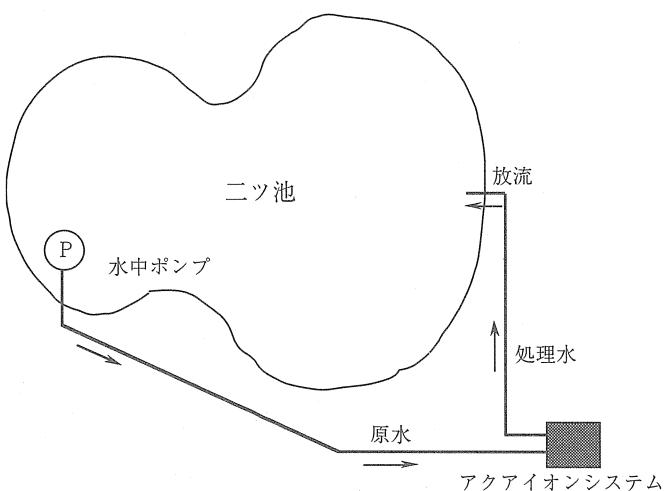


図-1 濾過の方式

表-5 C-1の諸元

区分	寸法(mm)	数量	容積(l)
全槽	2,000 ^L ×1,000 ^B ×1,220 ^H	1	960
電極板間隔	900 ^B ×1,160 ^H ×2 ^T	20(枚)	
電極板	50		

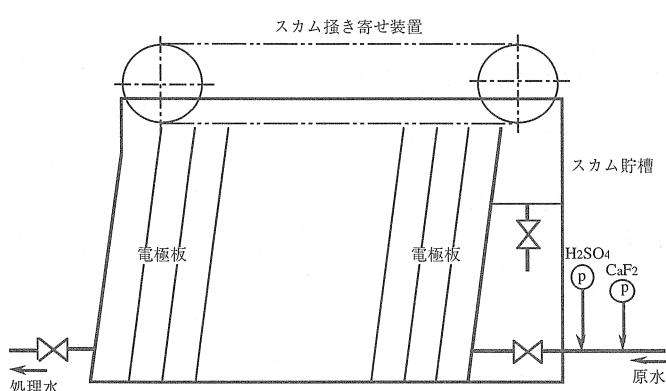


図-2 C-1の構成と処理フロー

表-6 計測機器

名称	仕様	製造会社名
濾度計	型式; TB51 0.1~200mg/l 積分球方式散乱光度法	セントラル科学
pH計	型式; D-11 pH 0~14	堀場製作所

3.1.2 濾過結果

(1)濾度の計測結果

濾度の計測結果を表-7に示す。なお、装置(C-1)の入口を原水、出口を処理水と称し、濾度の濃度は1日の平均値で表した。処理水の濾度にはばらつきが認められるが、除去率は75.6~96.8%の範囲内であった。浄化後は、池底が確認できるまで濾度は改善されている。

(2)分析結果

運転開始日(7月9日)採水の分析結果を表-8に示す。採水は運転開始直後から処理水の濾度を測定し、処理が安定した時点で行った。

濾度、SSについて除去率94~98%を示し、濾質分の除去に大きな効果があった。また、富栄養化の原因となる有機物(COD_{Mn})や全窒素、全リンの除去率も高く、94~96%を示した。クロロフィル-a、大腸菌については、処理水の濃度が各々「検出されず」と0で除去率100%であった。

表-7 濾度の測定結果

日付	7/9	7/10	7/11	7/12	7/13	7/14	7/15	7/16	7/17	7/18	7/19
原水	26.8	26.7	23.0	21.4	22.7	21.5	16.7	14.0	15.7	13.3	
処理水	0.85	1.51	1.96	5.14	5.53	4.54	3.56	3.12	3.25	2.19	

表-8 原水および処理水の分析結果

項目	原水	処理水
色度(度)	5	3
濾度(度)	160	2
BOD(mg/l)	11	6.4
COD _{Mn} (mg/l)	45	2.2
SS(mg/l)	180	10
強熱減量(%)	53	6
鉄(mg/l)	3.7	0.29
クロロフィル-a(μg/l)	61	検出されず
大腸菌群数(MPN/100ml)	240	0
アルミニウム(mg/l)	1.7	2.1
全窒素(mg/l)	1.4	0.08
全リン(mg/l)	1.1	0.06
臭気	かび臭	微かび臭
全クロム(mg/l)	検出されず	0.07

3.1.3 考察

(1)濾度

原水(池水)の濾度は表-7からも分かるとおり、日を追って低下している。運転期間中の処理水量を求めるに、335m³(9.5日間)であった。池の水量が約400m³であるから、約84%の水が装置(C-1)を通過し処理され

たことになる。このとき池の状態は、底が見えるまで透明度が回復しており、処理前と比較すると歴然とした処理効果が現れている。

この結果をもとに、数式による池の濃度変化予測を行う。条件として、流入負荷や外乱はないものとし、浄化装置の処理水濃度は一定と仮定した場合、濃度予測式と運転日数の関係は次式で表わされる。

$$a_n = (a_0 - a)(1 - \alpha)n + a \quad \dots \dots \dots \quad (\text{式}1)$$

$$n = \frac{\log(a_n - a) - \log(a_0 - a)}{\log(1 - \alpha)} \div \log(1 - \alpha) \quad \dots \dots \dots \quad (\text{式}2)$$

$$\alpha = v/V_t \quad \dots \dots \dots \quad (\text{式}3)$$

ここに、

V_t ; 池の水量(m^3) v ; 装置の処理量($\text{m}^3/\text{日}$)

α ; 循環比(v/V_t) a_0 ; 原水濃度(度)

a ; 処理水濃度(度) a_n ; n 日目の濃度(度)

表-7から $V_t=400$ 、 $v=36$ 、 $a_0=26.8$ 、 $a_n=13.3$ 、 $a=1.51$ の場合、式1～3から $n=8.08(\text{日})$ となる。つまり、処理水の濁度が1.51度（日平均）であれば、計算上は8日間で濁度13.3度（日平均）まで浄化できることになる。

実験では処理水の濁度にかなりばらつきがあるものの、約10日で濁度13.3度まで浄化されたことから、計算値は実験値とほぼ一致することが分かる。したがって、直接浄化法分離方式では池水の全量分を処理すれば、十分に浄化効果が現れるといえる。

②クロロフィル-a

原水濃度は $61(\mu\text{g}/\text{l})$ で表-3のランクⅡ程度であるが、目視では表-3の発生状況の概要に示すような水面に緑色の膜を作るほどのアオコ発生は認められず、クロロフィル-a濃度とアオコの発生状況には、その水域特有の関係があることを認識した。

③全窒素・全リン

池水は全窒素、全リンとともに、富栄養化の判定基準値をはるかに越えている。

窒素については、全窒素の除去率が94.3%であることと、クロロフィル-a除去率が100%を示していることから、植物プランクトン中の有機性窒素が全窒素濃度の大部分を占めていたことが分かる。

④浄化後

浄化作業終了から1ヶ月後の現地観察では、池水は浄化前と同様な状態に戻っており、浄化は継続しなければならないことが判明した。

3.2 ゴルフ場池の浄化

3.2.1 浄化の概要

(1) 浄化場所

岩手県胆沢郡金ヶ崎町永沢

金ヶ崎ゴルフ場

(2) 浄化期間

1993年9月13日～12月3日

1994年5月30日～11月23日

(3) 池の状況

金ヶ崎ゴルフ場内にある天然の池(遮水シートなどは使用していない)で、底泥から鉄分が溶出して池水は黄褐色を呈し、透明度は低いがSS分は少ない。流入は殆ど雨水で、農薬や土粒子を含む可能性がある。流出は降雨による水位上昇時に、放流ますから越流分が近隣の小川に放流される。池の規模は水深約1.5m、面積約1,300 m^2 で、水量約2,000 m^3 である。池内にはコイ、フナなどの魚影が数多く見られる。

(4) 浄化目的

当ゴルフ場内の修景池では、次の事項が問題となっている。

①夏期のアオコ発生とそれに伴う悪臭の発生。

②底質は東北地方特有の鉄、マンガンを多量に含み、溶出した鉄分により池水が黄褐色を呈し透明度が極めて低い。

③池水の滞留時間が長く、水質は悪化傾向にある。

これらの問題を解決するために、アクアイオンシステム(C-1)を用いて浄化を試みる。

(5) 浄化方法

1) 浄化方式

直接浄化法分離方式を採用した。また、浄化効果を評価するるために、浄化を施さない隣接する池を対照池に選定した(図-3)。

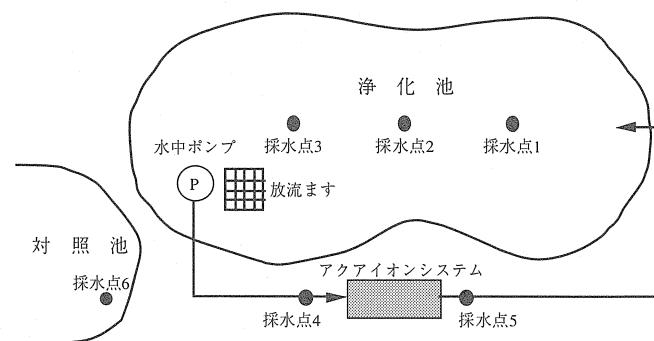


図-3 浄化方式と採水地点位置図

2)運転方法

流量は池の規模を考慮して、C-1の標準処理能力の2～3倍相当の2.0～3.0m³/hr、電流も流量に応じて湖沼水の標準処理電流の2～3倍相当の60～90A/m³とした。

3)計測項目

計測項目は、電解の電圧と電流、原水及び処理水の透視度、pHとし、計測日は隔日とした。

4)採水

採水は図-4の採水点1～6で行った。採水部位は、各々1～3は池（浄化池）の中央付近の表層、4、5は装置C-1の採水弁、6は対照池の表層からとした。

3.2.2 浄化結果

(1)1993年の結果

浄化前と浄化中（池の全水量の約1.5倍量=3,162m³処理時）における水質分析結果を表-9に示した。アクアイオンシステムの各項目毎の除去率（採水点4、5の濃度変化から求めたもの）が表-10である。また、図-4は透視度の経日変化である。

(2)1994年の結果

1994年の夏期は渇水の影響で池の水位が低下したことによって、分析結果は信頼性が乏しいので表示は割愛した。現地での計測結果より、透視度の経日変化を図-5に示す。

表-9 分析結果

	浄化池		対照池	
	浄化前 (9/13)	浄化中 (10/29)	(9/17)	(10/29)
透視度 (度)	21	32.3	17	28
色度 (度)	45	36	52	62
濁度 (度)	32	20	36	33
pH (-)	6.6	6.5	6.8	6.5
BOD (mg/l)	6.1	2.7	4.5	3.3
COD (mg/l)	17.0	6.2	16.0	8.5
SS (mg/l)	21.0	9.7	19.0	18.0
大腸菌群数 (MPN/100ml)	1,100	293	700	790
T-N (mg/l)	3.30	0.64	1.90	0.84
T-P (mg/l)	0.96	0.09	0.73	0.15
クロロフィル-a (mg/l)	0.140	0.008	0.066	0.015

表-10 アクアイオンシステムによる除去率

	色 度	濁 度	SS	BOD	COD	T-N	T-P	T-Fe	Chl-a
9月17日	12.9	61.8	30.0	70.4	54.7	64.7	79.1	—	90.0
10月 1日	80.6	81.1	43.9	47.1	57.3	76.7	95.0	68.4	92.9
10月20日	81.5	83.3	69.0	82.4	55.4	72.8	89.3	63.8	85.1
10月29日	35.7	11.5	72.7	10.3	12.3	25.0	30.0	39.7	61.5
12月 3日	83.9	29.6	54.2	80.0	20.0	29.2	34.0	43.5	54.5

(注)1.単位；%

2.T-Fe；全鉄 Chl-a；クロロフィル-a

3.2.3 考察

(1)1993年の結果について

①濁質

SS、濁度、透視度などの池の濁質分に係わる項目については、浄化前と比べて大きな改善効果が認められた。目視では浄化後の池水中に土粒子は認められなかったことから、粘土分、シルト分の除去された結果であると判断される。

②色度

当該池は、東北地方特有の鉄、マンガンを多量に含む底質を有し、溶出した鉄分により黄褐色を呈している。夏季においては、黒色に変化することもあるという。この現象は、次のように説明される。

鉄の場合pHが6.0以上であると水酸化第二鉄(Fe(OH)₃)となって、褐色の沈殿物を生じる。ところが溶存酸素が枯渇し、嫌気性条件になると還元されてFe²⁺となって溶出する。マンガンの場合は、好気的条件下では酸化され

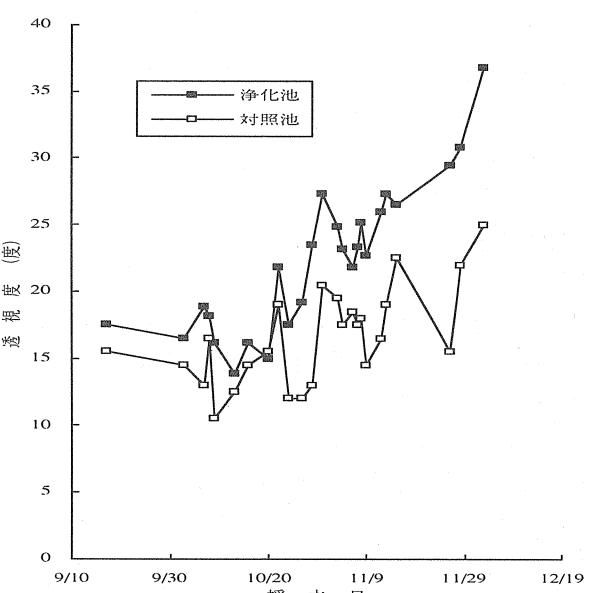


図-4 透視度の経日変化(1993年)

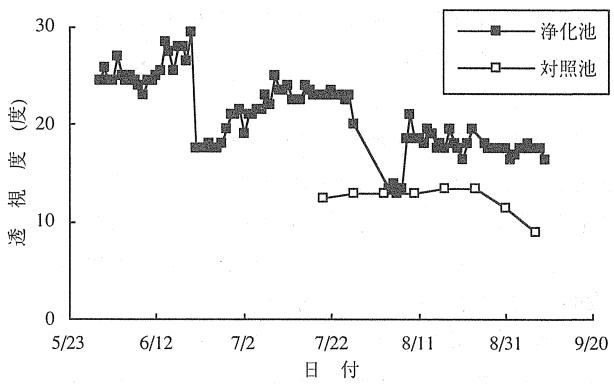


図-5 透視度の経日変化(1994年)

て二酸化マンガン(MnO_2)となり沈殿しているが、鉄と同様に嫌気性条件になると還元されて Mn^{2+} となって再び水中に溶解してくる。溶出の時期が異なるのは MnO_2 と $Fe(OH)_3$ の酸化還元電位の違いである⁶⁾。

夏季に池の底層で嫌気性条件となるのは、上層ではアオコの発生に伴い光合成によって酸素が過飽和となるが、死骸が沈殿するとこれを分解するために、溶存酸素が多量に消費されるためである。

表-10からもT-Feと色度の除去率には相関があることは明白であり、10月1日、10月20日の運転状態を保つことが出来れば、浄化池の色度はもっと改善出来たものと思われる。色度と濁度の除去率にも相関があり、濁度による運転管理が可能であることが判明した。

③浄化の目安

通算処理水量が3,000m³を越えた時点（10/20=稼働日数約42日）で各項目において浄化効果が現れており、3.1の結果も考慮すると池の全水量の1.0～1.5倍の量を処理することが当面の浄化の目安と考えられる。一般に、アオコの発生を防止するには、5～9日⁷⁾で全水量を1巡処理できる装置(循環率=0.11～0.20)が必要といわれている。しかし、池の規模や流入負荷、浄化装置の処理能力などの要素がどのように関わっているかは解明されていない。

(2)1994年の結果について

①水質分析結果

1994年の夏季は好天が続き全国的に渴水状態となり、当ゴルフ場でも散水用水の確保に苦労したようである。当該池もその影響を受け水量の減少に伴って、水位が約1m低下した。このような水量の減少は、水中の各汚濁物質濃度にも影響を及ぼすため、8月以降の水質分析結果は信頼性の乏しいものとなった。

②透視度

透視度の経日変化(図-5)から、浄化池と対照池の差は明確である。ただし、6月中旬と7月下旬の透視度低下は、それぞれ降雨、発電機の故障による運転休止が原因であるが、降雨後や休止後の運転で徐々に回復していることから渴水の影響がなければもっと効果が上がったものと思われる。

③アオコ発生の抑制効果

浄化池では、7月下旬の運転休止期間中(7日間)にアオコの発生がみられたが、運転再開後はアオコの発生が認められないことから、当システムにはアオコが発生するのを抑制する効果があることが伺える。

アオコ発生の抑制効果の要因は解明されていないが、電解殺菌の原理は、生細胞が電極(陽極)に接触すると細胞と電極間で電子移動が生じ、電極反応によって細胞内

補酵素の酸化還元反応が起こり、細胞の活性が低下することによるとされている。アクアイオンシステムは電解を応用した装置であり、このような殺菌効果がアオコの発生抑制に係わっているのではないかと推察される。

4.まとめ

これまでにアクアイオンシステムを用いて雨水の溜め池の水、生活雑排水で汚濁した湖沼水、濠の浚渫余水などを処理し、データを蓄積してきた。今回の報告では、中小規模の池の浄化を目標とした実装置の設計資料にそれらのデータを適用することができた。修景池の浄化については、以下のようにまとめられる。

①池の規模が2,000m³程度であれば、循環率(日処理水量/池の水量)0.036で浄化効果が顕著に現れるまでに約40日必要である。

②アオコの発生周期は5～9日といわれており、アオコ発生の抑制を目的とする場合、凝集沈殿法では循環率0.11～0.20の装置規模が必要であるとされているのに対して、アクアイオンシステムでは殺菌効果の相乗作用によって循環率を小さくできるものと考える。

③溶解性の鉄に起因する色度の改善については、電解が適正な電圧、電流で行われていることの確認と濁度による処理効率の管理を行えば、安定した効果を得ることが可能となる。

謝 辞

本研究にあたり、東大和市役所や金ヶ崎ゴルフコースの皆様には多大なご協力を頂きました。ここに厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 松本 陽一ほか、アクアイオンシステムによる水質浄化技術の開発(その2), 五洋建設技術研究所年報, VOL.22, 1992
- 2) 森下 郁子：ダム湖の生態学, 山海堂、pp.40～45
- 3) 岩佐 義朗：湖沼工学, 山海堂、pp.225
- 4) 下村 達男：「湖沼・お濠・公園池等の水質浄化実例」講習会テキストpp.1-7
- 5) 稲森 悠平、林 紀男、須藤 隆一：水路による汚濁河川水の直接浄化、用水と廃水、VOL.32 No.8, 1990 pp.33
- 6) 岩佐 義朗：湖沼工学, 山海堂、pp.292
- 7) 下村 達男：「湖沼・お濠・公園池等の水質浄化実例」講習会テキストpp.1-14～1-15