

豊田市内の調整池の現状と水質浄化の試み

Water quality and purification efforts of regulating pond in Toyota, Aichi prefecture

白金晶子¹⁾・八木明彦²⁾

Akiko SHIRAGANE and Akihiko YAGI

要約

水質および景観に問題を抱える豊田市内の運動公園の調整池（ほてい池）において、池の現況を調査し、様々な水質浄化を試みて効果を検証した。現況調査の結果、1年を通して池周辺で悪臭が漂うことは無かったが、池の濁度は常に高く、水草の大繁茂が確認された。流入水と流出水を比較すると、TNは流出水で減少したが、TP、Chl. *a*量は流出水で増加し、底泥からのリンの溶出が示唆された。夏期には池内の溶存酸素濃度が 3 mg l^{-1} を下回った。

ほてい池でこれまでに行われた3つの水質浄化法と新たに試みた方法の効果を検証した結果、ジェットエアレーターの設置は設置後、数年間は効果が見られたが、近年、十分に効果が発揮されていないことが明らかとなった。植生を繁茂させた迂回路路による浄化法は水路の流入部と流出部で水質に変化が見られなかったことから、浄化効果は確認できなかった。井戸水の導水は近年、井戸水の窒素濃度が上昇してきたことから、流入水のTP濃度は減少したが、TNは高濃度となっていた。新たに試みた人為的な水位低下による浄化法は冬期において、ほてい池の水質浄化に一定の効果があることが示唆された。

キーワード：調整池、水質浄化、水位低下、修景池

はじめに

市街地や公園などに造成される調整池は数少ない身近な水環境として、人々に憩いの場を提供するとともに、魚類や水鳥など野生生物の生息場として重要な役割を担っている。一方、市街地の調整池は流域からの流入水による汚濁負荷や長い滞留時間の影響で、池の水質悪化がしばしば問題となる（鳥多，1996）。富栄養化は植物プランクトンの大発生や水草の異常繁茂の要因となるだけでなく、植物プランクトンの沈降や水草の枯死により底泥に堆積し、溶存酸素の低下や栄養塩の再溶出を引き起こす。これに伴い、魚類の種数や個体数の減少、底泥からのメタンガスの発生や景観の悪化により親水性を大きく低下させる。

豊田市運動公園内（愛知県豊田市高町）の調整池として1990年に造成されたほてい池も、1990年代中旬以降ホテイアオイの大繁茂、2000年代前半には水質悪化に伴う底泥の浚渫、魚類の大量死など常に問題となっていた。このためほてい池では様々な水質浄化法が試みられたが、現在も悪臭がする、常に濁っている、植物プランクトンが大発生する、水草が大繁茂し水面全体を覆うなどの問題が指摘され、修景池としての機能が損なわれている。そこで、ほてい池の現況を把握するとともに、こ

れまでに行われた水質浄化法について検証し、さらに新たな浄化法を試みたので報告する。

調査地と方法

ほてい池は1980年代から造成が始まった豊田市運動公園の調整池として1990年に完成した。調整池の流域面積は95.07 ha、貯水面積は10,690 m²、水深は約1 mである（図1a）。流域の土地利用は畑地・原野が約6割、一般市街地が約4割で、下水道は整備されていない。調整池への流入水は雨水、生活排水に加え、井戸水が導水されている。池への流入水の流入カ所は2ヶ所で、1ヶ所は池北側の水路（流入N、図1b）、もう1カ所はほてい池の東側に位置する既設の調整池、上池（流入E、図1c）からである（図2-1）。池の下流には堰が設けられており、流出水は堰を越流して排水され（図1d）、水無瀬川となる。

1. 現況調査

調査はほてい池の現況を把握するため、2011年5月から2012年4月まで月1度の頻度で行った。池への流入量および流出量は流速（コスモ理研 小型流速計3631）、水路幅、水深から算出した。池への流入ヶ所は2ヶ

所だが、調査開始当初は流入 E からの流入がほとんど無かったため、流入 N のみで流量、水質を測定した。9 月の調査において流入 E からの流入が確認されたため、水質調査を開始したが、流量については流入 E からの流入量が少なかったため測定できなかった。11 月には流入 E からの流入量が増加し、流量測定を開始した。流出量は堰の下流で測定した。ただし、池への流入量については流入 N で 8 月、9 月、流入 E で 2 月、4 月、流出水については 2 月に流量が少なかったため測定不能であった。

池への流入水および流出水について、現場で水温、電気伝導度 (EC, 東亜 DKK ポータブル電気伝導度計 CM-31P), pH (HORIBA pH Meter D-12), 濁度 (共立理化学研究所 WA-PT-4DG デジタル濁度計) を測定した。採水した試水を持ち帰り、全窒素 (TN), 全有機炭素 (TOC) は TOC 計 (島津製作所 全有機炭素計 TOC-VETNM-1) で測定し、全リン (TP) はペルオキソ二硫酸カリウム分解法、リン酸態リン ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) はモリブデン青法、クロロフィル *a* (Chl. *a*) は 90% アセトンで抽出し、蛍光法 (Turner design 10-AU Fluorometer) で測定した。降水量は調査地に隣接するアメダス観測地点「豊田」(北緯 35 度 07.9 分, 東経 137 度 10.6 分) のデータを用いた (気象庁, 2014)。2012 年 1 月 18 日には流入水の水質、水量の日周変化を把握するため、7 時から 22 時まで 3 時間おきに現地測定および試水を持ち帰り水質分析を行った。

2011 年 7 月 14 日および 10 月 19 日は池にボートを浮かべ、池心の表層、中層 (水深約 50 cm), 底層 (水深約 1 m) の水質について流入水・流出水と同様の測定、分析を行った。加えて、溶存酸素濃度 (DO, HACK 蛍光式溶存酸素計 HQ30d), 酸素飽和度について 7 月 14 日は池心および地点 a-e の 5 地点 (図 2-1), 10 月 19 日は池心および地点 e-g の 4 地点で測定し、7 月 14 日には池心において底泥直上の溶存硫化物 (S^{2-} , 光明理化学製北川式検知管 200SB) を測定し、底泥を採集して色、臭気を確認した。

2. 浄化法の検討

a) ジェットエアレーターの設置

2004 年 3 月下旬に水質浄化の目的でほてい池に 3 基のジェットエアレーター (リョーエイ製) が設置された (図 1e)。ジェットエアレーターは吐出し口径 80 mm, 吐出量 $0.5 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$, 出力 3.7 kW の水中ポンプ (鶴見製作所 KTZ33.7) を使用し、池に浮かべた。稼働時間

は毎日 8 時から 18 時までの 10 時間である。効果を検証するため、設置前後で豊田市が測定した水質データ (未発表) を比較した。

b) 迂回水路の造成

ほてい池の造成と同時に、汚濁した流入水を池へ流入させずに下流へ迂回させるため、ほてい池の周囲に迂回水路が造成された (図 1f, 図 2-1)。迂回水路は延長 164 m, 水路幅約 1 m で、池北側からの流入水 (流入 N) を直径 20 cm の塩ビパイプで取水して通過させ、池下流の水無瀬川へ排水した。水路内には植生を繁茂させ、植生による水質浄化が試みられたが、本調査時には塩ビパイプが土砂で詰まり、迂回水路は干上がった状態であった。そこで迂回水路での植生による水質浄化の効果を検証するため、土砂を取り除いて迂回水路に流入水を流した。2011 年 9 月 13 日に水路内の植生調査を行い (図 1g), 2011 年 11 月 2 日に水路の流入部、中央部、流出部の水質調査を行った。迂回水路内の流入部から流出部までの流達時間を把握するため、2012 年 5 月 29 日に食塩をトレーサーとして電気伝導度を測定した。

c) 井戸水の導水

ほてい池に隣接する水道水源の 2 ヶ所の井戸 (猿投四郷水源第 3 号井および猿投四郷水源第 4 号井, 図 2-2) は 2008 年 5 月に水質悪化のため水道水としての利用が停止された。これに伴い、水質監視と水質改善の目的で井戸からの放水が開始され、ほてい池へ導水された。導水量は流入 N に流れ込む水路へ約 $50 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1}$, 流入 E 上流の上池へ約 $1 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1}$ である (豊田市, 未発表)。井戸水の導水前後におけるほてい池の TN, TP の既存データ (豊田市, 未発表) および導水に利用された井戸水の硝酸態窒素 ($\text{NO}_3^- \text{-N}$) と亜硝酸態窒素 ($\text{NO}_2^- \text{-N}$) の合計値 (豊田市上下水道局, 1997-2013) を用いて、導水によるほてい池の浄化効果を検証した。さらに井戸水以外の流入水の水質を把握し、井戸水の水質と比較するため、2011 年 10 月 18 日に流入 N と流入 E に加えて、その上流 7 地点の計 9 地点 (図 2-2) において流入水を採水し、現況調査と同様の現地測定、水質分析を行った。

d) 人為的な水位低下

ほてい池の水は池末端の堰の横に、直径 20 cm, 池底から約 50 cm の水深に設置された管のバルブを開閉し抜くことができる。この管を利用して、ほてい池の貯水量を減らし、水位を低下させることによる水質浄化を試みた (図 1h)。想定した浄化のメカニズムは①貯水量を減らす、②水の滞留時間の短縮、③植物プランクトンの抑制、④池水の透明度の向上・汚泥の蓄積の鈍化である





図1 ほてい池の様子. a) ほてい池全景 (2012.4.20), b) 流入N (2014.3.11), c) 上池 (2011.7.15), d) 流出部 (2011.7.1), e) ジェットエアレーター (2011.4.12), f) 迂回水路 (2011.6.22), g) 迂回水路の植生調査 (2011.9.13), h) 水位低下時のほてい池全景 (2013.12.17), i) 水草がほてい池全面を覆う (2011.7.14), j) 水位低下時のアオコの出現 (2013.8.14).

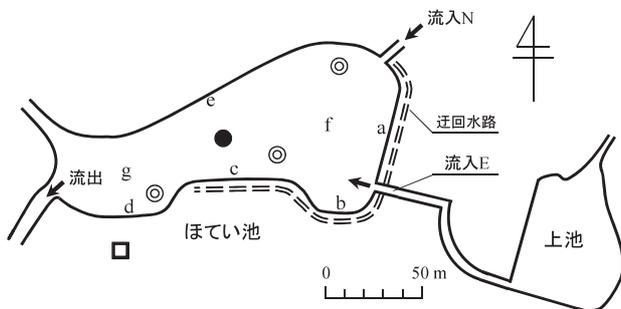


図2-1 調査地点図. 池心 (●), アメダス観測地点「豊田」 (□), 溶存酸素測定地点 (a-g), ジェットエアレーターの設置地点 (◎) を示した.

(堤, 2006; 農村振興局農村環境課, 2012).

水抜きは2012年9月18日～12月5日, 2013年8月1日～9月25日, 2013年11月28日～2014年2月26日の3回行った. 管のバルブを開け, 池の水位が管の高さである約50 cmまで下がるように務めた. 水を抜く前, 抜き始めた後に週1回から2週間に1回の頻度で, 堰直上の水深を測定し, 流出水を採水して現況調査と同様の現地測定, 水質分析を行った.

結果

1. ほてい池の現況

a) 流入水・流出水

流入量, 流出量: 池への流入量はまとまった降雨後の5月に $0.029 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ と最大であったが, 測定不能時を除くと, その他の月は $0.010\text{--}0.019 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ の間で推移した (図3). 池からの流出量は $0.014\text{--}0.026 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ の間で推移し, 晩秋から冬にかけて減少する傾向が見られた. 2012年1月18日における7時から22時までの流入量の日周変化

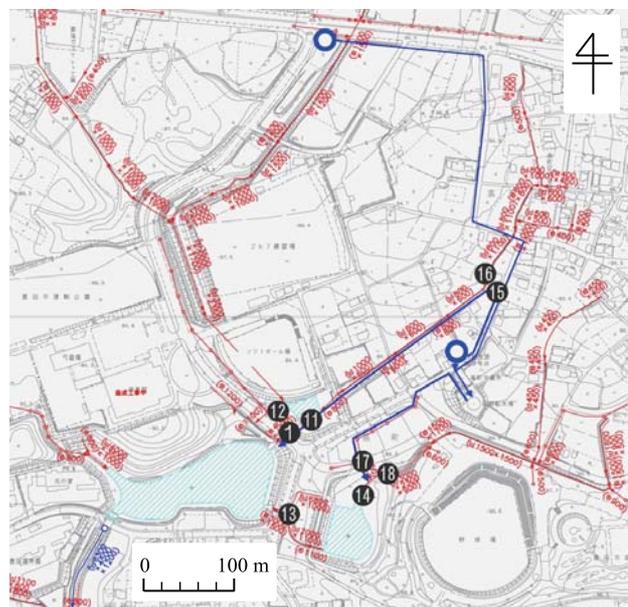


図2-2 ほてい池への流入水の調査地点図. 井戸の場所 (青丸, 下: 猿投四郷水源第3号井, 上: 猿投四郷水源第4号井) および井戸水の導水経路 (青矢印).

は22時の流量が最大であったが, 1日を通して大きな変化は見られず, $0.015\text{--}0.018 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ の間で推移した.

水温, pH, 電気伝導度, 濁度: 流入水温は流入Nで最高 24.6°C , 最低 11.2°C で, 9月から測定を開始した流入Eでは最高 28.4°C , 最低 7.7°C であった. 流出水温は最高 31.1°C , 最低 7.1°C と大きく変化した (図4). 流入水は井戸水が導水されているため, 流入Nの水温の変動幅は流出水に比べ小さくなったが, 流入Eは上池を通過するため, 流出水に近い変動幅となった. 流入水のpHは流入Eで4月に9.6と非常に高い値であったが, その他の月および流入Nでは7前後と期間を通して安定していた (図4). 流出水のpHは8を超える月が多く,

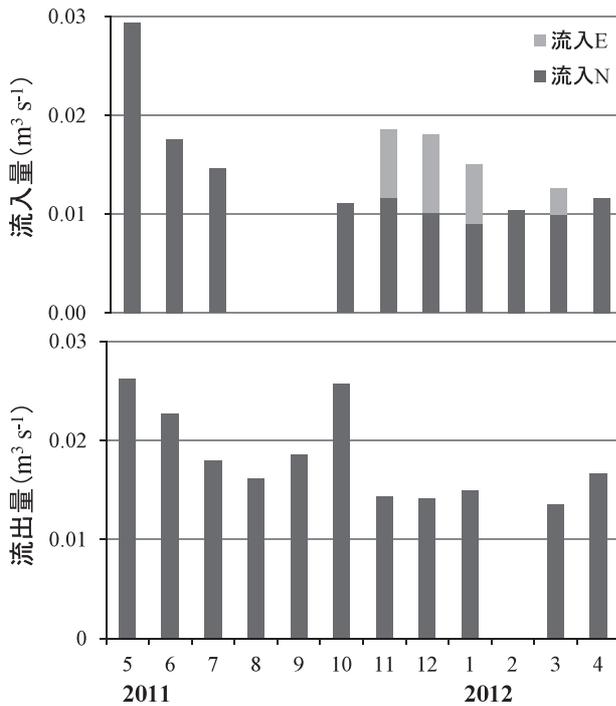


図3 ほてい池の流入量および流出量の経月変化(2011年5月-2012年4月)。

高い値で推移した。電気伝導度は流入Nの平均が 12.9 m S m^{-1} 、流入Eが 10.4 m S m^{-1} で、流入Nで高くなる傾向が見られ、流出水の平均は 11.2 m S m^{-1} であった(図4)。流入水の濁度は流入Nで0.1-1.6度の低い値で推移したが、流入Eでは4.6-10.2度の間で推移した(図4)。流出水では7月と4月を除いて、測定限界となる20度を常に超えていた。

窒素, リン, 炭素, クロロフィル a 量: 流入水のTNは流入Nで $4.01-5.20 \text{ mg l}^{-1}$ の安定した高い値で推移し、流入Eでは $3.05-5.03 \text{ mg l}^{-1}$ の間で推移した。流出水は $1.30-4.28 \text{ mg l}^{-1}$ と大きく変動し、冬季に高い値を示した(図4)。期間を通じて流出水は流入水に比べ低濃度であった。流入水のTPは流入Nで $0.14-0.26 \text{ mg l}^{-1}$ 、流入Eで $0.07-0.15 \text{ mg l}^{-1}$ と比較的安定した値で推移した(図4)。流出水では $0.09-0.50 \text{ mg l}^{-1}$ と大きく変動し、5月に最も高い値を示した。TPは流入水に比べ、流出水で総じて高濃度となる傾向が見られた。TN/TP比は流入Nで19.2-32.3と比較的安定していたが、流入Eでは12月に72.9と非常に高い比となり、12月以外は26.9-41.1であった(図4)。流出水も12月に48.1とTNの割合が高く、続いて1月が26.4であったが、他の月は4.1-14.3の低い比で推移した。PO₄³⁻-P濃度は流入Nで $0.11-0.24 \text{ mg l}^{-1}$ 、流入Eで $0.03-0.07 \text{ mg l}^{-1}$ と流入Eで低くなる傾向が見られた(図4)。流出水では $0.05-0.41 \text{ mg l}^{-1}$ と大きく変動したが、5月、6月を除いて流入N

に比べて低濃度で、流入Eに比べて高濃度であった。流入水のTOCは流入Nで $2.55-8.57 \text{ mg l}^{-1}$ 、流入Eで $3.64-7.96 \text{ mg l}^{-1}$ の間で推移した(図4)。流出水は $5.21-13.63 \text{ mg l}^{-1}$ の間で推移し、流入水に比べ常に高い値となり、流入、流出とも冬季に濃度が減少する傾向が見られた。植物プランクトン量の指標とされるChl. a 量は流入Nで常に $1 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$ 以下と低い値であったが、流入Eでは11月に $75.2 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$ で最大となり、他の月は $12.4-25.3 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$ の間で推移した(図4)。流出水は $12.2-92.3 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$ と大きく変動し、8月に最大となった。

流入水の水質の日周変化を図5に示した。流入NはTNが7時に 2.20 mg l^{-1} であったが、10時以降は 5 mg l^{-1} 前後の高濃度で推移した。TOCは $2.94-5.89 \text{ mg l}^{-1}$ 、TPは $0.17-0.31 \text{ mg l}^{-1}$ 、PO₄³⁻-Pは $0.13-0.27 \text{ mg l}^{-1}$ で推移し、10時および夜間に高くなる傾向が見られた。流入EはTN、TOCともに7時が $2-3 \text{ mg l}^{-1}$ 程度であったが、10時以降TNは増加し 5 mg l^{-1} 前後の高濃度で推移し、TOCは 3.5 mg l^{-1} 程であり変化しなかった。TP、PO₄³⁻-Pはそれぞれ 0.08 mg l^{-1} 、 0.06 mg l^{-1} 前後の低い値で推移した。

b) 池内

水草: 予備調査で訪れた2011年4月は水草が見られず、池の水は澄んだ状態であった。5月末には濁っており、ウキクサ、ヒシなどが繁茂し始めていた。6月に外来種のホテイアオイも確認され、7月にはウキクサ、ヒシ、ホテイアオイの順で優占し、池全面を覆い尽くした(図1i)。7月下旬には豊田市による池内の水草の駆除作業が行われ、多少のウキクサ以外は池の外に搬出された。8月以降ウキクサは確認されたが、期間を通して水草が大繁茂することは無かった。

水質, 底質: 池の水深は1m程で、7月、10月ともに池心の表層、中層、底層の水質は同程度であったが、7月の水温は表層、中層、底層でそれぞれ29.3、27.4、27.0°Cで鉛直方向に差が見られた。7月および10月の池心のTNはそれぞれ $1.8, 2.6 \text{ mg l}^{-1}$ 、TPは $0.2, 0.3 \text{ mg l}^{-1}$ 、TOCは $10, 9.5 \text{ mg l}^{-1}$ 、Chl. a 量は $35, 32 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$ 程であった。7月の池心および地点a-eにおける底泥直上のDOは $2.33-5.51 \text{ mg l}^{-1}$ 、酸素飽和度は31.1-73.0%で、非常に低い値が確認され、底泥表層のDOは 0 mg l^{-1} であった。10月の池心および地点e-gにおける底泥直上のDOは $7.51-8.68 \text{ mg l}^{-1}$ 、酸素飽和度は81.2-92.8%で、十分な酸素が認められた。7月は池心の底泥直上でS²⁻が検出されなかったが、採泥した底質は表面が灰色で、

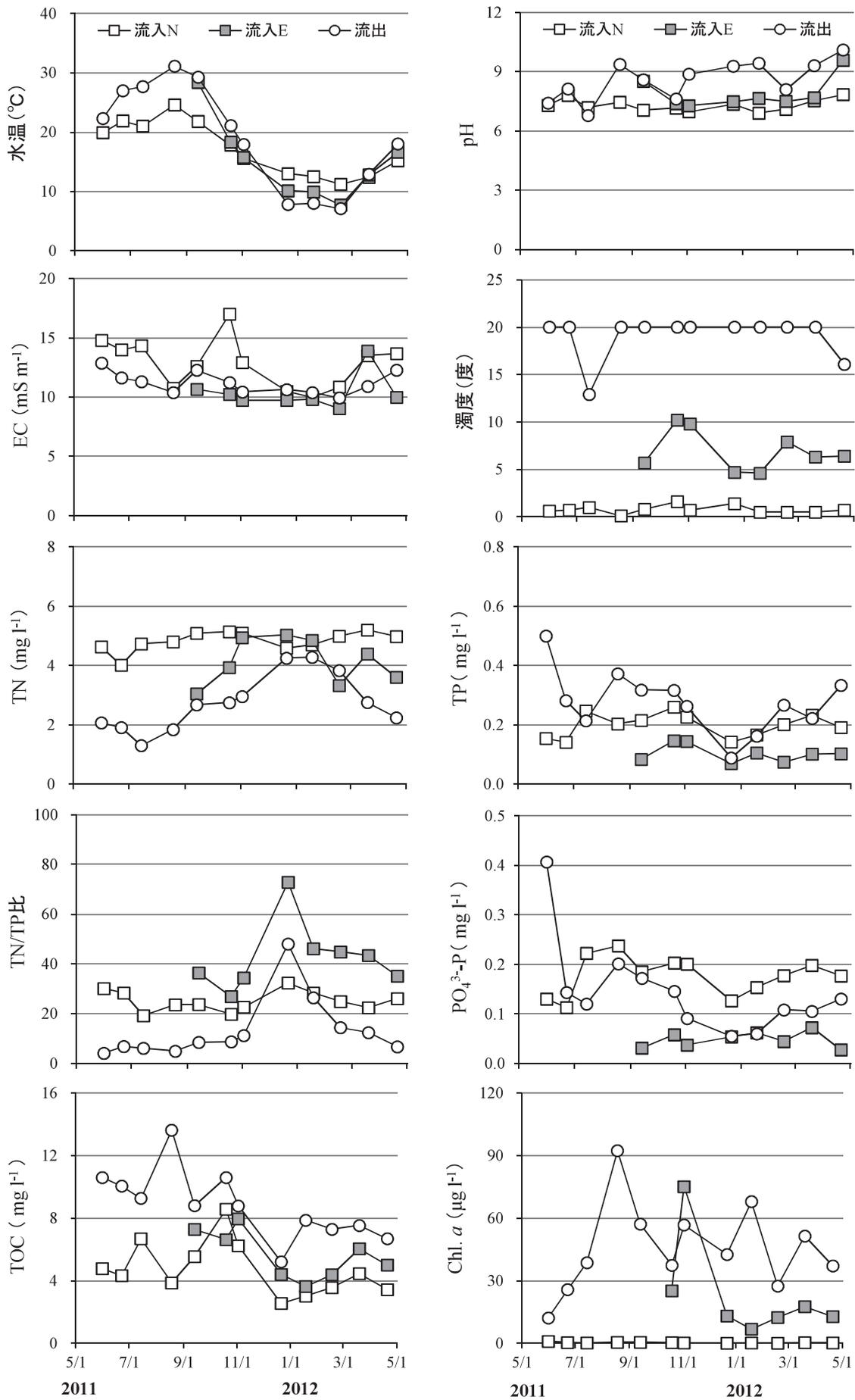


図4 ほてい池の流入・流出水質の経月変化(2011年5月-2012年4月).

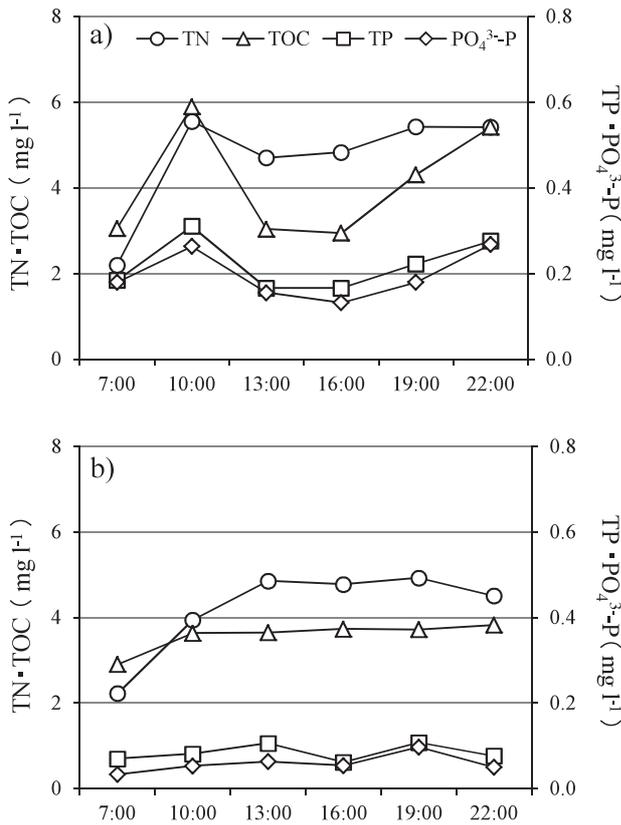


図5 流入水質の日周変化(2012年1月18日). a) 流入N, b) 流入E.

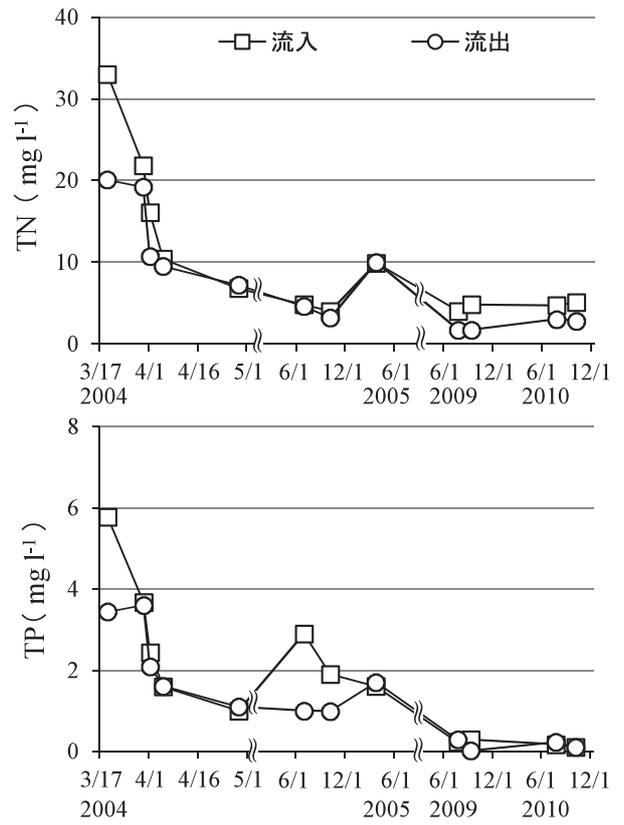


図6 流入水, 流出水の過去の水質(2004年3月-2010年9月, 豊田市提供).

中は黒く、近づくと硫化水素臭がした。

2. 水質浄化法の検討

a) ジェットエアレーターの設置

2004年3月下旬にジェットエアレーター3基が設置される前、設置された後の流入水、流出水の水質の変化を図6に示した。設置前後の2004年3月から4月初旬は流入水、流出水ともにTN、TPの濃度が大きく改善し、流入水と流出水を比較すると、流出水の方が濃度が低くなる傾向が見られた。一方、2004年4月下旬から2005年3月の期間、TNは流入水と流出水の濃度が似通っていたが、TPは流出水で濃度が低くなる傾向が続いた。2009-2010年はTN濃度が流入水に比べ、流出水で減少する傾向が見られたが、TPは変化がなかった。さらに、現況調査ではTN濃度が流入水に比して、流出水で減少し、TPは増加する傾向が見られた(図4)。

b) 迂回水路の造成

迂回水路の水質を表1に示した。流入、中央、流出部の水質を比較するとほとんど変化が見られなかった。水路の水深は10 cm程で、流入部から流出部までの水の流達時間は56分であった。水路内の植生はヨシ、スス

表1 迂回水路の水質.

	TN (mg l ⁻¹)	TP (mg l ⁻¹)	TOC (mg l ⁻¹)	Chl. a (μg l ⁻¹)
流入部	5.10	0.23	6.24	0.2
中央部	4.92	0.31	7.03	0.1
流出部	4.78	0.26	6.56	0.2

キなどの高茎草本が優占しており、植被率は84%であった。

c) 井戸水の導水

2008年5月からほてい池に導水された井戸水のNO₃⁻-NおよびNO₂⁻-Nの合計値について、1996年からの経年変化を図7に示した。2005年まで3号井は1 mg l⁻¹前後、4号井は1.5 mg l⁻¹前後であったが、2006年頃から両井戸とも濃度が上昇し始め、3号井は5 mg l⁻¹を超え、4号井は2008年以降、約3 mg l⁻¹で高位安定した。2004年6月以降におけるほてい池への流入水(流入N)の水質は導水前の2005年3月に高いTN濃度が確認されたが、その他の導水前の濃度と導水が開始された2008年以降の濃度を比較すると、大きな変化は見られなかった(図6)。一方、流入水のTPは導水前に比べ、導水後に濃度が低くなった。

2011年10月18日に流入N、流入Eに加えて、その

表2 ほてい池への流入水の水質。調査地点は図1-1を参照。

地点	水温(°C)	pH	電気伝導度 (mS m ⁻¹)	TN (mg l ⁻¹)	TP (mg l ⁻¹)	TOC (mg l ⁻¹)
1	18.2	7.7	14.7	4.76	0.16	5.31
11	18.0	7.3	11.4	3.59	0.10	3.04
12	18.2	7.4	23.1	5.02	0.34	10.17
13	20.7	7.6	9.9	3.50	0.12	6.02
14	17.8	7.1	15.2	8.53	0.52	5.54
15	16.8	6.3	7.9	4.11	0.11	5.72
16	21.2	7.4	29.4	8.40	0.39	12.02
17	17.1	6.7	8.4	4.48	0.01	1.86
18	20.7	7.4	32.0	20.44	1.80	14.33

表3 3回の水位低下の試みによる池の観測値。値は期間中の平均値、カッコ内は標準偏差を示した。

期間	水深 (cm)	滞留時間 (d)	降水量 (mm d ⁻¹)	TN (mg l ⁻¹)	TP (mg l ⁻¹)	PO ₄ ³⁻ -P (mg l ⁻¹)	TOC (mg l ⁻¹)	Chl. <i>a</i> (μg l ⁻¹)	
水抜き前	2011/5/31- 2012/4/20	100	7.8	—	2.74 (±0.96)	0.28 (±0.11)	0.15 (±0.09)	8.86 (±2.21)	45.6 (±21.3)
1回目	2012/9/18- 12/5	80	6.2	2.3	2.24 (±0.81)	0.38 (±0.05)	0.08 (±0.06)	9.37 (±2.29)	46.1 (±19.3)
2回目	2013/8/1- 9/25	94	7.3	5.3	2.56 (±0.76)	0.52 (±0.13)	0.15 (±0.11)	10.97 (±2.32)	46.1 (±20.3)
3回目	2013/11/28- 2014/2/26	62	4.8	2.0	4.80 (±0.69)	0.39 (±0.12)	0.04 (±0.03)	8.58 (±1.01)	27.4 (±11.6)

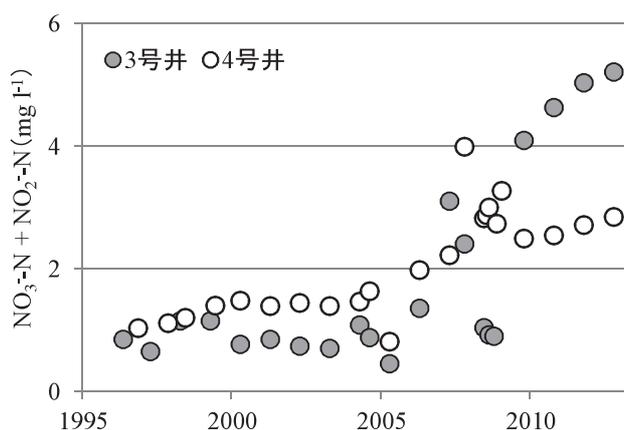


図7 導水に用いられた井戸水(猿投四郷水源第3号井, 4号井)の硝酸態窒素および亜硝酸態窒素濃度(1996-2012年, 豊田市上下水道局, 1997-2013)。

上流7地点で採水した流入水の水質を表2に示した。TNはすべての地点で3.5 mg l⁻¹以上の高い濃度で、地点14, 16は8.5 mg l⁻¹程、地点18は20 mg l⁻¹と非常に高濃度であった。TPは地点17で非常に低い濃度であったが、その他の地点は0.1 mg l⁻¹以上で、特に地点18では1.8 mg l⁻¹と非常に高い濃度が確認された。

d) 人為的な水位低下

1回目の試みは2012年9月18日に水を抜き始めたが、池の水深は降水毎に上昇し、最低58 cm、最高100 cm、平均80 cmで、目標の50 cmを維持することはできなかった(表3, 図8)。現況調査で得られた平均流入水量

0.016 m³ s⁻¹から、池の水の滞留時間を求めたところ、水抜き前後で平均7.8日から6.2日へ減少するに留まった。流出水の濁度は常に20度を超え、池の水は常時、濁っていた。TNは平均2.24 mg l⁻¹で、TOCは10月17日に3.81 mg l⁻¹と低い濃度であったが、この時以外は10 mg l⁻¹前後の値で推移した(図9)。TP濃度は水抜き直後からやや増加し、その後0.4 mg l⁻¹前後で高位安定した。一方、PO₄³⁻-P濃度は水抜き直前に0.24 mg l⁻¹であったが、調査期間を通じて減少し続け、12月5日には0.01 mg l⁻¹となった。水抜きから8日後には流入・流出口から遠い水域で、現況調査では確認されなかったアオコの発生が顕著となった(図1j)。Chl. *a*量も80.6 μg l⁻¹と調査期間中で最も高い値が観測され、その後も18.8-65.4 μg l⁻¹と昨年度と同程度の高い濃度で推移した(図8)。

2回目は夏期の試みとなったが、3回の中で最も降水量が多く、期間中の平均水深は94 cmで、ほとんど水位が下がることはなかった。池の水の滞留時間は7.3日で、現況調査とほぼ同様であった。流出水の濁度は常に20度を超え、1回目と同様に池の水は常に濁っていた。流出水のTN, TP, PO₄³⁻-P, TOC濃度の平均値は現況調査と同様もしくは高い値となった。また、水抜きから7日後には1回目と同様、アオコの発生が見られ、8月中のChl. *a*量は常に50 μg l⁻¹を超えており、期間を

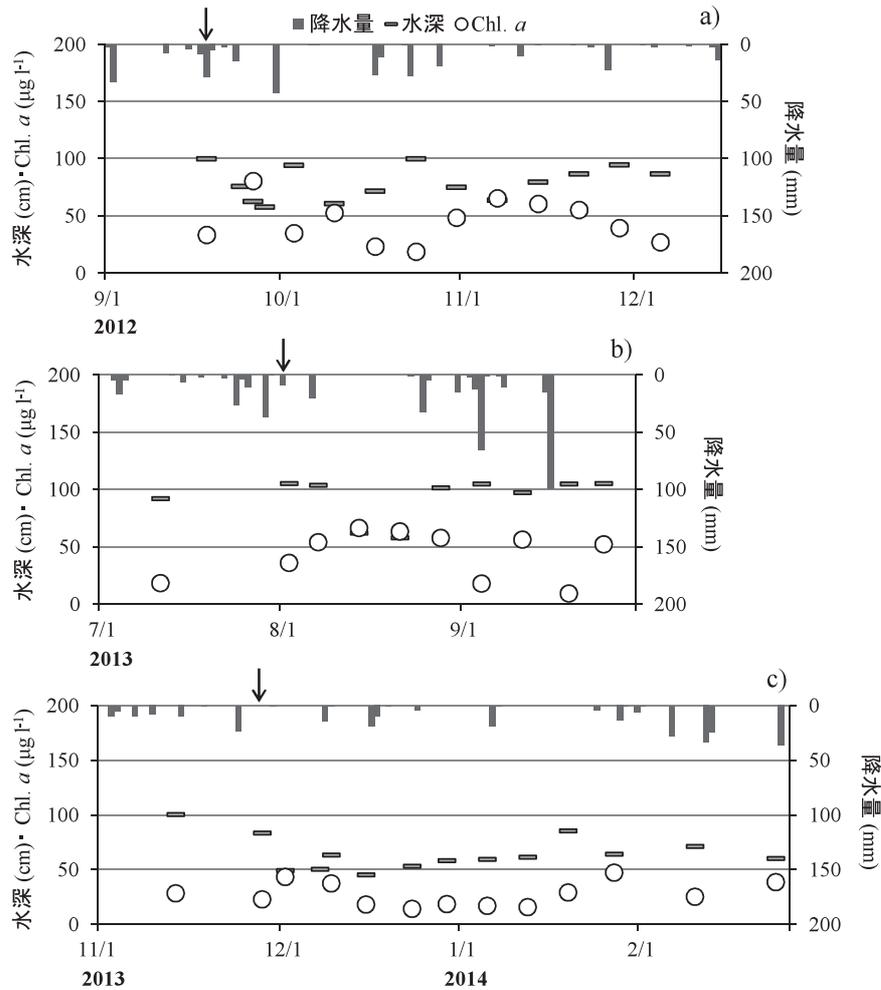


図8 水位低下による水質浄化の試みにおける降水量, 水深, クロロフィル a 量の変化.
 a) 1回目:2012年9月18日-12月5日, b) 2回目:2013年8月1日-9月25日,
 c) 3回目:2013年11月28日-2014年2月26日). ↓は水抜き開始日を示した.

通しての平均値は $46.1 \mu\text{g l}^{-1}$ で, 現況調査と似通った濃度であった.

3回目は晩秋から冬期の試みとなり, 調査中の降水量は最も少なかった. 池の水深は最低 45 cm, 最高 85 cm, 平均 62 cm で, 3回中最も水位を下げる事ができた. 池の水の滞留時間は 4.8 日で, 現況調査の 2/3 以下となった. 濁度は 12月25日まで常に 20 度を超えていたが, その後は 10-20 度で推移した. TN の平均は 4.80mg l^{-1} で, 3回中で最も高い濃度であったが, TP, TOC は現況調査の平均に近い値であった. 一方, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, Chl. a 量の平均値は 3回の試みで最も低い値となり, それぞれ平均 0.04mg l^{-1} , $27.4 \mu\text{g l}^{-1}$ であった.

考察

1. ほてい池の現況

ほてい池では悪臭がする, 常に濁っている, 植物プラ

ンクトンが大発生する, 水草が大繁茂し水面全体を覆うなどの問題が指摘されていたため, 現況を把握した. その結果, 悪臭については1年を通じて異臭が漂うことがなかったこと, 高温期においても底泥からの溶存硫化物が検出されなかったことから, 現在は改善されていると判断できた. 他方, 濁度は7月と4月を除いて, 測定限界の 20 度を常に超えていた. 流出水の植物プランクトンは1年を通じて高い濃度で推移し, 8月に $92.3 \mu\text{g l}^{-1}$ で最大となった. 加えて, 水草については5月にウキクサ, ヒシなどが繁茂し始め, 6月には外来種のホテイアオイが確認され, 7月にはこれらの水草が池の全面を覆い尽くし, 駆除作業をするに至った. 7月の池内5地点の DO 濃度は $2.33\text{-}5.51 \text{mg l}^{-1}$, 酸素飽和度は 31.1-73.0% と非常に低い値が確認された. 低濃度であった要因として, 高水温に加え, 調査が水草の駆除前に行われたことから, 水草が水面全体を覆うことで空気中からの酸素の溶解が妨げられたことが示唆された. さらに水草

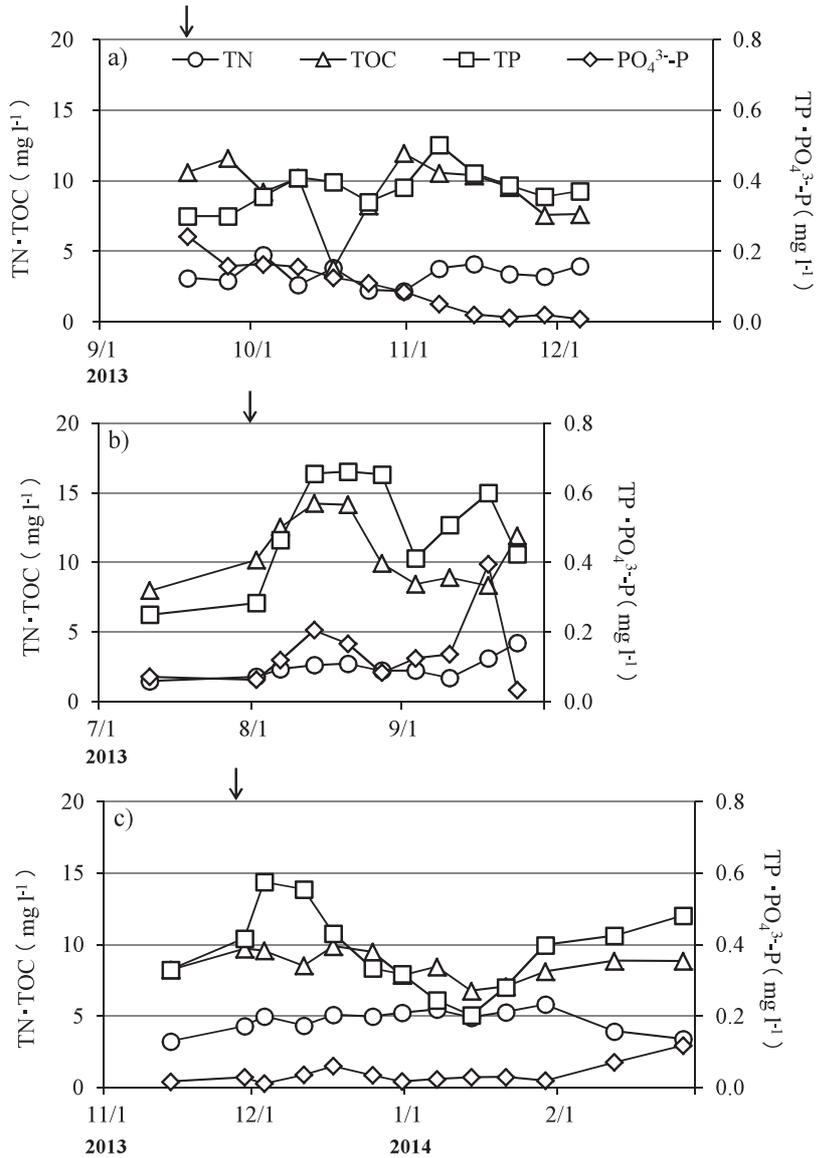


図9 水位低下による水質浄化の試みにおける水質の変化。a) 1回目：2012年9月18日-12月5日，b) 2回目：2013年8月1日-9月25日，c) 3回目：2013年11月28日-2014年2月26日。↓は水抜き開始日を示した。

の大繁茂により夜間に呼吸が卓越し、DO濃度の著しい低下を引き起こしたと推測された。従って、現在も高濁度、植物プランクトンの大発生、水草の大繁茂は継続していることが確認され、対策が必要と考えられた。一方、水草の繁殖は植物プランクトンの抑制効果、懸濁物のフィルター効果などが報告されている（Brix, 1994；島谷ほか, 2003）ことから、7月の濁度の低下は水草の大繁茂が影響していることが示唆された。今後は水草の浄化効果についても調査し、池の浄化に向けて効率的に管理する必要がある。

2. 様々な浄化法の効果

ほてい池ではこれまでに様々な水質浄化が行われ、今

回、新たな浄化法を試みた。本報告ではそれぞれの浄化法について、その効果を検証する。

a) ジェットエアレーターの設置

設置直後、流入水、流出水ともに水質が大きく改善したことから、この時期、流入負荷自体が減少したと推測された。流入水、流出水の水質を比較すると、設置後は流入水に比べ、流出水のTN、TP濃度が低くなる傾向が見られたことから、一定の効果があったと推測された。一方、現況調査ではTNは流出水の濃度が流入水に比べ減少していたが、TPは増加していた。この要因として、底泥からのリンの回帰が示唆され、ジェットエアレーターによる酸素供給が十分でない可能性が考えられた。また、現況調査において7月の溶存酸素濃度および酸素

飽和度が非常に低い値であった。ジェットエアレーターの稼働時間が8時から18時までの昼間に設定されているため、夜間に溶存酸素濃度が著しく低下したことが影響していると推測された。ジェットエアレーターの稼働時間を夜間にする、稼働時間を延長するなどの対策が必要である。さらに地点間で溶存酸素濃度に差が見られたことから、ジェットエアレーターの設置場所の移動も視野に入れて、ジェットエアレーターの効果を最大限に発揮できるように運用することが望ましい。

他方、水位低下の試みによる水質浄化において、ジェットエアレーターを稼働することができず、夏期から秋期の試みではアオコの発生が顕著となった。ジェットエアレーターを稼働させていた現況調査ではアオコの発生が確認されなかったことから、アオコの抑制にはジェットエアレーターによる水の攪拌作用が効果を上げていると推測された。

b) 迂回水路の造成

植生浄化法では湿地に植栽されたヨシ等の水生植物による栄養塩の吸収、土壌への吸着、沈殿・ろ過の促進などが期待される（島谷ほか，2003；河川環境管理財団・河川環境総合研究所，2007）。湿地での植生浄化によりTN、TPの除去率を50%確保するには流入水の滞留時間が5時間、水深10cmが必要とされている（建設省河川局，1990）。また、流入水量を水面積で除した水面積負荷を考慮すると、迂回水路のような表面流れ方式による湿地では、水面積負荷が $0.3\text{--}0.6\text{ m}^3\text{ m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ で、TNおよびTPの除去率の目安がそれぞれ15%、30%とされている（河川環境管理財団・河川環境総合研究所，2007）。ほてい池に設置された迂回水路では流入水の滞留時間が1時間未満で、現況調査で得られた平均流入水量 $0.016\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ から、迂回水路の水面積負荷を求めると、 $8.4\text{ m}^3\text{ m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ であったことから、浄化効果が得られなかったと考えられた。浄化効果を得るには滞留時間を長くし、湿地の面積を広げることが必要である。

c) 井戸水の導水

流入N、流入Eとその上流7ヶ所の水質を分析したところ、導水経路および水温から地点17はほぼ井戸水だけの水質と考えられ、TPはほとんど検出されなかったが、TNは 4.48 mg l^{-1} と高濃度であった。同様に導水経路および水温から、地点15も井戸水の割合が高いと考えられたが、TPが高濃度であったことから、生活排水の流入率も高いと推測された。地点12、16、18は生活排水のみが流入しており、TP濃度は高かった。特に地点18は高濃度で、地点17の井戸水と混合して上池

へ流入する地点14においてもTP濃度が高い値であった。これらのことから、井戸水の導水により、流入水のTP濃度は減少していたが、TNは高濃度となっていた。近年、井戸水の窒素濃度が上昇しており、導水による希釈効果が薄れていることから、対策が必要である。

d) 人為的な水位低下

水位低下による水質浄化の試みを3回行ったが、1回目、2回目は水位を大きく減らすことができなかった。1回目、2回目の調査では水深とChl. *a*量の間には負の相関が認められたことから、降水により流出水量が増加し、植物プランクトンが池から流失したと考えられた。3回目の調査では水深とChl. *a*量の間には相関は認められなかった。

池の水位低下はジェットエアレーターを故障させる恐れがあるため、調査中は稼働を停止した。これに伴い、池内では水が動く場所と動かない場所に区分けされた。水位低下の試み1回目が秋期、2回目が夏期の試みであったため、水の動かない場所ではアオコの発生が顕著となった。アオコの発生には少なくとも1週間以上の滞留時間が必要とされている（中野・田中，2012）ことから、ジェットエアレーターの停止がアオコの発生に寄与していると推察された。一方、3回目の試みではChl. *a*量の平均値が1回目、2回目に比して半減し、現況調査における冬期のChl. *a*量と比較しても減少していたことから、冬期の水位低下はほてい池の浄化に一定の効果があったことが示唆された。

3回の試みについてN/P比を見ると、1回目は開始2週間後に10を超えたが、その後は10以下で推移した（図10）。2回目の試みではレッドフィールド比（重量比）の7.2より低い値で推移した。3回目は開始直後の10前後から25近くまで上昇し、その後、減少した。一般的にN/P比が10以下の水域では窒素制限となり、20以上ではリンが制限的に作用する（門田，1987）ことから、1回目、2回目は窒素制限、3回目はリン制限であったと推察された。現況調査においても冬期にN/P比が上昇し、リン制限となっていたが、他の時期はN/P比がおおよそ10以下で窒素制限となっていた。藤田ほか（2009）は水温と溶出速度の関係を求めたところ、TPは水温が 19°C 以上で底泥からの溶出が沈降を上回ったとしている。従って、冬期は底泥からのリンの溶出が抑制されたことにより、水位に関わらずリン制限であったと推測された。今後は高水温期における底泥からのリンの溶出を抑制するとともに、今回検証された各浄化法をより効果的に利用し、ほてい池の浄化に取り組むことが

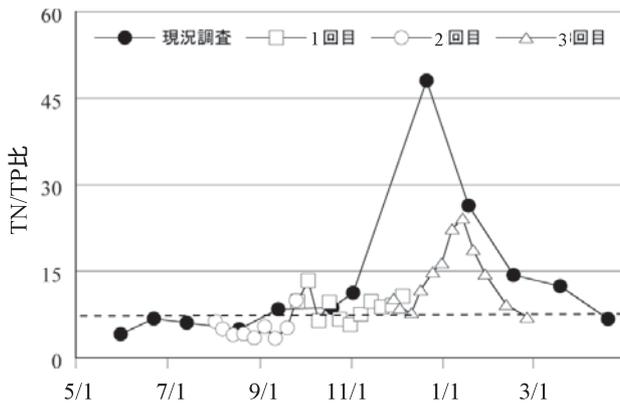


図 10 現況調査および3回の水位低下の試みにおける TN/TP 比 (現況調査:2011 年 5 月-2012 年 4 月, 1 回目:2012 年 9 月 18 日-12 月 5 日, 2 回目:2013 年 8 月 1 日-9 月 25 日, 3 回目:2013 年 11 月 28 日-2014 年 2 月 26 日). 点線はレッドフィールド比を示した.

下水道局.
堤 正人 (2006) 矢筈ダム冬場の水位低下による水質対策. リザーバー, 12: 13-14.

1: 豊田市矢作川研究所:
〒 471-0025 愛知県豊田市西町 2-19 豊田市職員会館 1F
2: 愛知工業大学 都市環境学科
〒 470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247

望ましい.

謝辞

本報告を執筆するにあたり, 豊田市役所公園課, スポーツ課, 上水運用センター, 猿投支所から資料を提供頂いた. 記して厚くお礼申し上げます.

引用文献

- Brix H. (1994) Functions of macrophytes in constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 29(4): 71-78.
- 藤田和男・鷹野 洋・坂本祐基, 宮崎 清 (2009) 児島湖底泥からの窒素・リンの溶出. 岡山県環境保健センター年報 33: 25-28.
- 門田元編 (1987) 淡水赤潮. 恒星社厚生閣.
- 河川環境管理財団・河川環境総合研究所 (2007) 植生浄化施設計画の技術資料 [2007 年版]. 河川環境総合研究所資料 第 26 号. 河川環境管理財団・河川環境総合研究所.
- 建設省河川局監 (1990) 霞ヶ浦の自然を生かした植生浄化施設. 日本河川水質年鑑.
- 気象庁 (2014) 気象統計情報. <<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>>
- 中野伸一・田中拓弥 (2012) アオコってなに? —ラン藻の大発生についてもっと知るために—. 京大大学生態学研究センター.
- 農村振興局農村環境課 (2012) 農業用貯水施設におけるアオコ対応参考図書. 農林水産省.
- 島多義彦 (1996) 腐植土壌による調整池等の自浄作用回復と水質浄化. 農業土木学会誌, 64(4): 7-13.
- 島谷幸宏・細見正明・中村圭吾 (2003) エコテクノロジーによる河川・湖沼の水質浄化—持続的な水環境の保全と再生—. ソフトサイエンス社.
- 豊田市上下水道局 (1997-2013) 水道水質報告書. 豊田市上