

II-3

水深の浅い水路の水理・水質特性について

北海道開発局開発土木研究所 正員 佐藤 徳 人
北海道開発局開発土木研究所 正員 中津川 誠
北海道開発局開発土木研究所 正員 西村 豊

まえがき

ダム貯水池や比較的水深の深い湖沼を対象とした富栄養化現象については、比較的多くの調査・検討がなされているが、浅い湖沼、特に停滞性水路については検討された事例は少ない。また、検討するにあたり、水深の浅い停滞性水路では、水深の深い湖沼とは水質変化特性・水理特性が異なるものと推測され、現状を把握しておく必要がある。このような観点から、水深の浅い停滞性水路のモデル水域として、千歳川流域の農業排水路を設定し、平成2年度より現地調査として流動調査・水質調査を実施した。対象水路は、水深が1～1.5 m程度と浅く風の影響を受けて混合しやすく土壌は火山灰、シルト質などの細粒成分が主体である。また、周辺には畑地が多く、施肥を介して栄養塩類の流入が考えられる。このような状況下にある水路の流動・水質特性の状況を現地調査から整理した。特に流動メカニズム、富栄養化の程度、濁水現象について考察し、将来の水質変化について示唆を与えるものとした。

1. モデル水域の概要と調査内容

1-1 モデル水域の概要

調査対象となったモデル水域(図1)は、千歳川流域の農業排水路(14号幹線排水路)として掘削されたものである。この地域は石狩川が野幌丘陵東部から太平洋に注いでいた時代の流路にあたり、周辺域には低湿地帯泥炭層が広く発達している。モデル水域は昭和63年3月から掘削が開始され、平成元年12月に終了しており、排水路を通じ千歳川に合流している。形状は流下方向に約1,800m、横断方向に約130mの水路で、水深は1.0～1.5m程度、1/5,000程度の緩い勾配をもつ水路で、水深に対して流下方向の距離が大きいため、流動に関しては、風の影響を強く受けると考えられる。モデル水域周辺の気温は、夏期には比較的高く、8月の最高で30℃を越えるときがあるが、冬期はかなり低く月最低で-20℃以下となる。風については、夏は南よりの風、冬は北よりの風が卓越し、春に比較強い南風が吹く傾向がある。大きさは、月最大風速で10.0m/s程度、月最大風速平均で5.0m/s程度であり、周辺環境にも影響を与えている。また、降水量は、7月～10月に多く、年降水量は、1,000mmと全道の平均的な値を示している。モデル水域は、14号幹線排水路と暗渠排水を集水したものが周辺から流入している。近傍の定期調査を見ると全般的に河川水に比較して、T-N、T-P、SSがやや高い値を示しており、流入水は、栄養塩類を多く含む水質にあると言える。

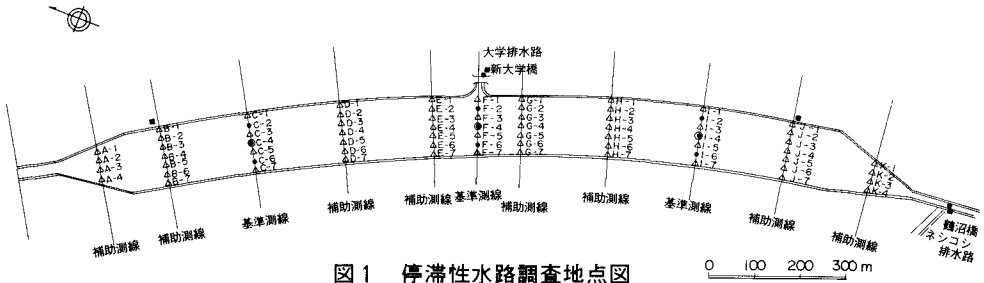


図1 停滞性水路調査地点図

1-2 調査内容

現地調査は、平成2年度より2か年にわたり、植物プランクトンの影響で水質に変化が起これと考えられる

Characteristics of Hydraulics and Water Quality in the Shallow Channel
by Norito SATOH, Makoto NAKATSUGAWA and Yutaka NISHIMURA

夏で、出水等の流出が少ない期間に行なった。流動調査は、図1のようにモデル水域の縦断方向に150m間隔を基本として11測線設置し、1測線横断方向に20mピッチを基本に2層（2割・8割水深）で行った。また、水質調査は、モデル水域内及び流入出水質の分布状況を把握するために、流動調査と同一日に水深2層で行なった。さらに水域内の負荷量収支を明らかにするため、底質試料採取を流動調査と同一日に、雨水の採取をモデル水域近傍で降雨時に大型のロートを使って行なった。室内実験は、今後検討を考えている水質予測モデルのパラメータを得るため、モデル水域内で採水したものを用いて生産速度・分解速度・溶出速度を求める各種試験を行った。調査項目の詳細は、表1に示す。

2. モデル水域の流動状況と変化特性

2-1 現地調査結果

水路内の水の流動は、水深が1.0～1.5m程度と浅く、勾配が緩やかで停滞しているため、風の影響を強く受ける。最初に、鉛直（水深）方向の流動特性をみる。図2には平成3年9月5日のF-4地点の鉛直流速分布を示すが、このときの風は1.5m/s、表面流速は1.5cm/sと観測されており、表面流速は風速の1%程度となっていた。また、表面付近と底面付近の流向が異なる鉛直分布もみられている。一般に表面流は風速の2～4%と見積もられ、霞ヶ浦の現地観測結果でも1～5%の範囲にあった。本事例で表面流速がやや小さくなっているのは、水深がきわめて浅いため河床底面の摩擦が効いているからと考えられる。なお、風によって生じる水面勾配は、風によるせん断力と水深に関係しているが、風速が大きいくほど、また水深が浅いくほど水面勾配が大きくなるのが解っている。次に、水平方向の流動特性をみる。図4には、平成3年8月29日調査時の流速分布の観測結果を示しているが、このときは、南よりの平均5.9m/sの風が吹いていた。このときとくに測線H、I、Jに着目すると、流れは河岸付近では風向と同一、中央部では逆流して風上側に向かっている。これは、図3に示すように、水路は河岸付近で浅く、中央部で深くなっているということから生じる水平循環流と見られる。すなわち、先に示した事実から、水深の浅いところでは深いところに比べて水面勾配が大きくなり、水路中央部が盛り上がるような水面勾配が横断方向に生じる。これによって河岸側はますます順流方向に流速が大きくなり、反流として中央部では逆流するという結果となる。このように、浅い水路の流動形態は河床形状に規定され、河岸付近で浅く中央部で深い断面では河岸付近で順流、中央部で逆流と言う流れのパターンが現れることになる。なおこの事例では閉じた水路の流動を観測したものだが、流

表1 調査の詳細（例：平成3年8月29日）

流動調査	水質調査	底質調査	雨水調査	その他
表層 (2割水深)	水温 DO pH	BOD COD T-N	DO pH BOD	生産速度 分解速度
底層 (8割水深)	BOD SS COD 強熱減量 含水率 粒度分布 NO ₂ -N NO ₃ -N NH ₄ -N K-N PO ₄ -P T-P D-K-N D-PO ₄ -P D-T-P D-COD	T-P SS COD 強熱減量 含水率 粒度分布	SS COD NO ₂ -N NH ₄ -N K-N PO ₄ -P T-P D-K-N D-T-P D-COD	溶出速度

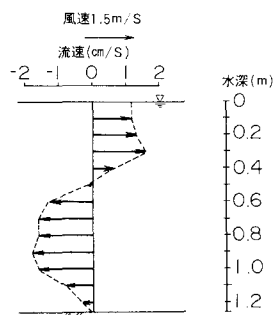


図2 流速鉛直分布
(F-4 地点 平成3年9月5日、9時)

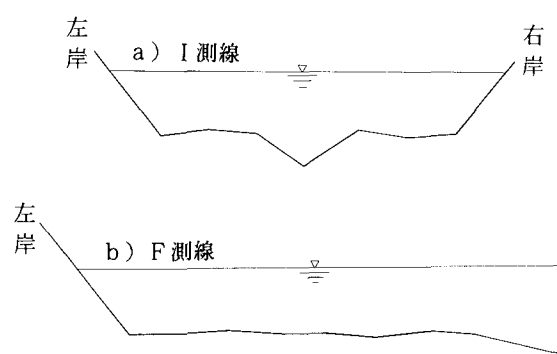


図3 モデル水域横断面図

下方向に延々と連なる水路の場合は、流速差（水位差）に伴う渦度成分は現れるものの、逆流はしない。

2-2 流動のシミュレーション

現地観測で得られた結果を数値シミュレーションで検証してみる。流れの数値シミュレーションは、水質成分の収支を現すモデルと合わせて水路水質の将来予測を行う上で必要なものである。最初に現場条件を考えてモデルの選定を行うが、水路の水深が浅いこと、また水平方向の流動に主に着目する意味から2次元1層モデルを用いることにする。基礎式は以下に示すとおりで、ここでは、密度が一定、静水圧分布、流速の水深方向の変化が小さいことなどが仮定され、また、この場合、移流効果は風によるせん断力に比べて小さいとみなして移流項は省略されている。

$$\text{連続式:} \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$x\text{方向の運動量方程式:} \quad \frac{\partial M}{\partial t} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \{ \tau_x(s) - \tau_x(b) \} \quad (2)$$

$$y\text{方向の運動量方程式:} \quad \frac{\partial N}{\partial t} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \{ \tau_y(s) - \tau_y(b) \} \quad (3)$$

ここで、 h は水面から固定までの深さ（水深）、 x および y はそれぞれ流下方向および横断方向の軸、 M および N はそれぞれ x および y 方向の流量フラックスで、 $M = u h$ および $N = v h$ 、 u および v はそれぞれ x および y 方向の水深方向に平均された流速、 $\tau_x(s)$ および $\tau_y(s)$ は水面に作用する x 及び y 方向のせん断応力、 $\tau_x(b)$ および $\tau_y(b)$ は河床に作用する x 及び y 方向のせん断応力を表す。

計算条件は、平成3年8月29日調査時の再現を試みたものとなっており、表2に示す。この条件で計算をした結果が図5に示されたもので、これを見ると、観測値と同様、河岸側の浅いところでは風向きに対して順流、中央部で逆流と言う水平順還流が再現されていることが解る。また、順流の大きさは、両者共に1～5 cm/sとなっており、シミュレーションは、観測結果を良く再現していると言える。このように、浅い停滞性水路の水平方向の流動は、河床形状が大きく影響することが観測・シミュレーションから検証された。

表2 計算条件

計算対象領域	停滞性水路および流入水路
格子間隔	1.5 m
格子数	2007
計算時間間隔	0.2 sec
粗度係数	0.02
初期水位	4.6 m (水深約1.0～1.5 m)
風向・風速	風向 149° 風速 5.9 m/s
境界条件	閉鎖性水域とし、流入・流出量は与えない 岸に垂直な方向の流量フラックスを0としたが、上記風向、風速のみ与える

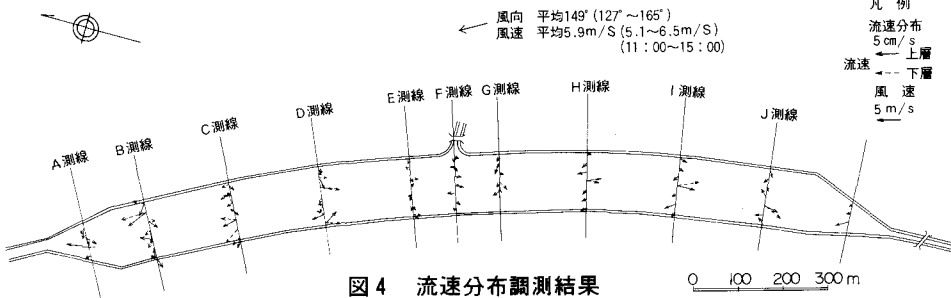


図4 流速分布観測結果

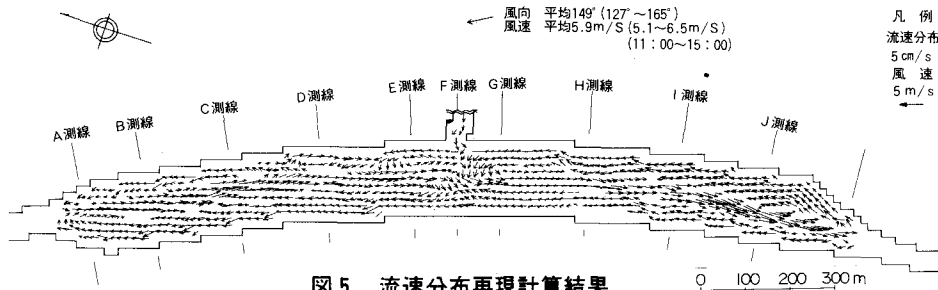


図5 流速分布再現計算結果

3. モデル水域の水質状況と変化特性

3-1 水質調査結果

夏季及び秋季の水質変化として、水路下流側のC-4地点の平成3年8月29日の水質鉛直分布を図6に示す。夏季及び秋季の水質分布ともに表層と底層(2割・8割水深)の温度差は無く、富栄養化の一因と考えられる温度躍層は形成されていない。DOは表層のほうが低層よりも高い値を示す傾向があり、SS, COD, N類, P類は、低層のほうが高い値を示していた。このような現象が生じたのは、先に述べたように、水路の形成過程と気象条件によると考えられる。夏季においても温度躍層が形成されず混合が進んでいるのは、2節で示したように風が流動状況に影響を与え、さらに水質に影響が及んでいるためといえる。ただし、流速を2~3 cm/sと考えるとモデル水域の流下方向の移動には、約1日程度必要であり縦断方向には充分均一になっていないものと考えられる。また、SS, COD, N類, P類が表層より底層で若干高い値を示しているのは、風の影響での底質のまき上がりが起こっていることによると考えられる。図7に示すように、植物プランクトンについては、流入水路にあたる鶴沼橋よりも水路内部のほうが高い値を示していることや、藻類増殖の特徴である水質の季節変化を見ると、図8に示すように動・植物プランクトンと

ともに水温が高い時期に高い値を示していることから、水域内でプランクトンの内部生産が起こりつつあることが示唆できる。さらに、平成2年度及び3年度、2か年の調査結果を比較すると、プランクトンの内部生産に起因する項目は、一般に高くなる傾向にある。特にSSについては、図9に示すように2年度は対象水路全体

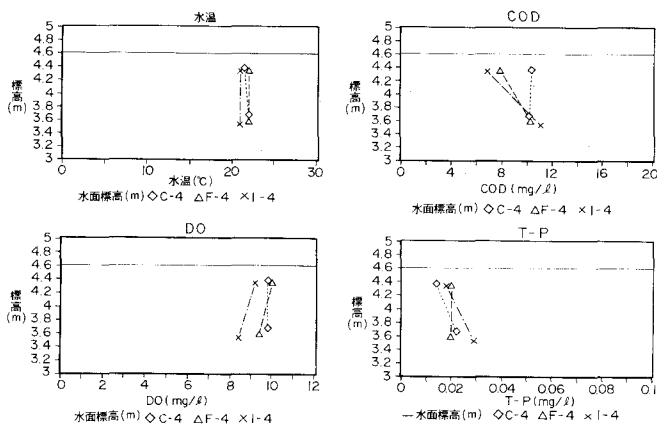


図6 水質鉛直断变化

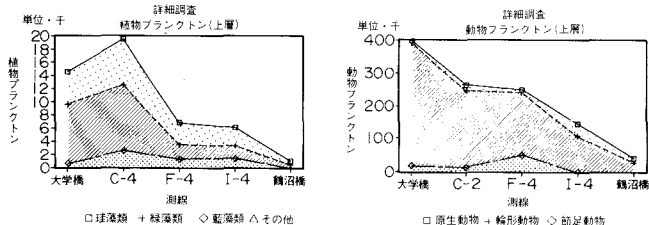


図7 水質縦断变化

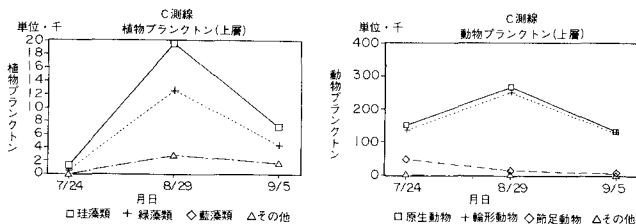


図8 水質の季節変化

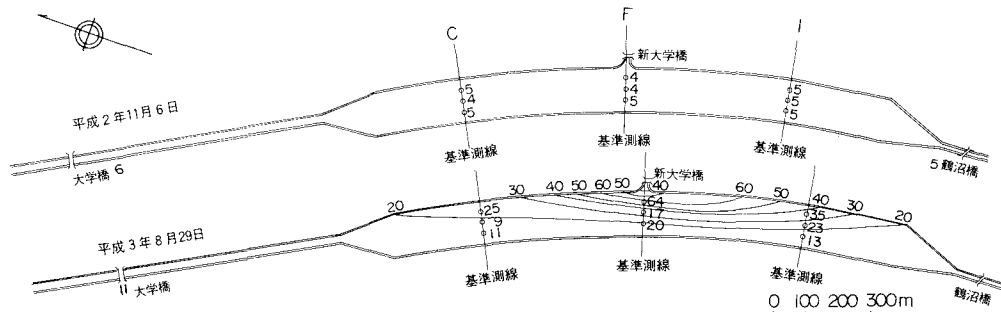


図9 平成2年と平成3年の比較

を見るとほぼ均一であるのに対して、3年度は現場の目視で濁りが顕著に解るほどに上昇していた。この2か年の差は、方法・時期・気象等調査条件は類似しているにも拘らず現れており、現状が水質変化の過渡期にあるという見方をすれば、今後の推移を注意深く見守る必要がある。以上のように、対象水域の水質特性は流動に影響されて全層が混合され、このような状況下でプランクトンの内部生産が起こっていることを考え合わせ、水質変化の将来予測を行っていかねばならない。

4. モデル水域の底質状況と変化特性

4-1 底質調査結果

先に述べたように、平成3年度の現場状況を見ると、平成2年度に比べ水の濁りが際立っており、その原因を考えるためにも底質の状態を明らかにしなければならない。図10には底質調査結果を示す。この中の粒度成分の内訳をみると、平成3年度には、シルト以下の極めて細かい粒度成分が卓越してきている。また、C-4地点では他の2地点に比べ窒素・リン・有機物含有量が元来多かったが、平成3年度には他の2地点においても底質中にこれら成分の増加が見られている。底質の状態の変化は水質にも大きく影響を及ぼし、特に栄養塩類の供給においていえる。しかしながら、平成3年度の濁水化は水位が全体的に低下し、また細粒分の増加にもより、風によって底質が巻き上げられたことが大きく作用したと考えられる。風による底質の巻き上げと濁水の広がり、2節で示したような浅い水路の流動特性である鉛直・水平混合の発生から十分想定されるものである。このような底質の巻き上げは水中への栄養塩類の供給を促進し、植物プランクトンの増殖にとって好ましい条件を作るとも考えられる。

4-2 濁水発生に関する若干の考察

濁水化が起きるか否かは、河床材料が掃流状態で移動するか、浮遊状態で移動するかの、いわゆる浮遊限界を考えることが目安になる。すなわち、浮遊状態の条件下では砂粒が懸濁化することを意味する。いま、砂粒の沈降速度を w_f 、流れの乱れによる上方への移動速度を u_s とすると u_s が w_f より大きければ浮遊化が起こる。

なお、 u_s は摩擦速度 u_* によって以下のようにあらわせることがわかっている。

$$u_s = 0.6u_* \sim 0.93u_* \quad (4)$$

このことから、浮遊条件としては以下になる。

$$\frac{u_*}{w_f} > 1.67 \quad (5)$$

ここで、沈降速度 w_f を知る必要があるが、これは次の Rubey の実験式から得られる。

$$\frac{w_f}{\sqrt{Sgd}} = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{Sgd^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{Sgd^3}} \quad (6)$$

ここで、 ν は水の動粘性係数 ($0.01\text{cm}^2/\text{s}$)、 S は砂粒の水中比重 (1.65)、 d は砂粒の粒径、 g は重力加速度 ($980\text{cm}/\text{s}^2$) を表す。また、河床摩擦速度 u_{*b} は風によるせん断力 τ_{wi} との関係から次式で得られる。

$$u_{*b} = \sqrt{\tau_{wi}/\rho} \quad (7)$$

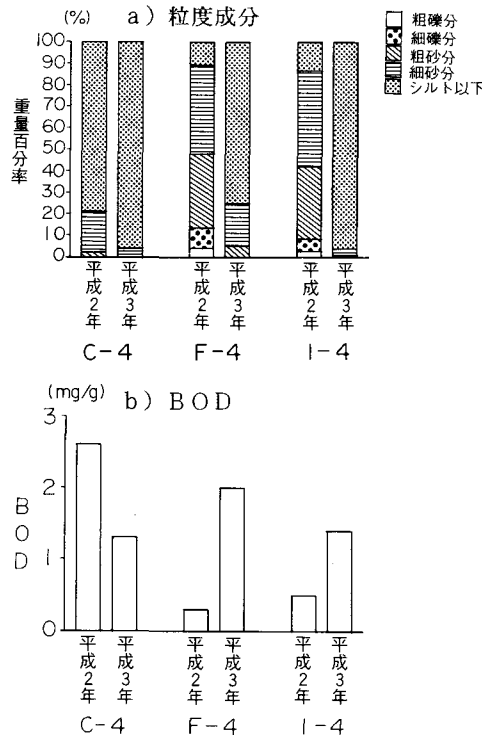


図10 底質分析結果

$$\tau_b = -n\tau_{wind} = -n(\rho_a \cdot C_f \cdot w^2) \quad (8)$$

ここで、 n は水面せん断力 τ_{wind} と底面摩擦力 τ_b との比で、乱流では0.1程度であると言われている。 ρ_a は空気密度 ($1.21 \times 10^{-3} \text{g/cm}^3$)、 C_f は抵抗係数 (0.001)、 ρ は水の密度 (0.9982g/cm^3)、 w は風速 (cm/s) をあらわす。

以上のような式に本モデル水域の条件を当てはめて濁水化の判定を行う。浮遊条件は主に砂粒のサイズと風速で決まるが、この場合、粒径を粒度試験で得られた底質の代表粒径 (ここでは大体50%粒径) である 20μ (0.002cm)、卓越風速を 5m/s として計算し、 u_{rb} は 0.078m/s 、 w_r は 0.036m/s という結果を得た。これから、 u_{rb}/w_r は 2.2 となって浮遊条件を満足することとなる。このように、比較的強い風が卓越して河床せん断力が大きくなるような水路で、しかも底質が数 μ から数十 μ の細かいシルト質である場合には、砂粒の懸濁化の起こりやすい条件となる。

あとがき

今回に調査及び検討は、比較的事例の少ない水深の浅い停滞性水路について行った。本報告の要旨を以下に要約する。

- 1) 対象水路における流動特性は、風と河床形状に大きく影響され、河岸付近で浅く中央部で深い断面では水平循環流が現れることが、現地調査結果及びシミュレーションで確認された。
- 2) 風によって、水路全体が混合されることで温度躍層はできず、水質も鉛直方向ではほぼ一樣になることが確認された。ただし、平面的にはプランクトンの数において水路内での内部生産による影響とみられる分布が現れていた。
- 3) 風に伴う流動によって起こる底質の巻き上がりにより、対象水路内に栄養塩類の供給がなされていることが推察された。
- 4) 対象水路は、シルト質以下の極めて細かい粒度成分が卓越することで、濁水化のおきやすい条件にあることが確認された。

以上の検討結果から、対象水路の水利・水質特性は強い風による混合に大きく影響されることが現地観測データから明らかになった。また、対象水域の水質状況を一般的な指標と比べてみると、植物プランクトンの異常発生の可能性は否定できないものの、現地はそのような事態には至っていない。これは、この地域の気象特性等によるものと考えられ、掘削後間もない対象水路であることを考え合わせれば、水質の状態が安定するまで今後の推移を見守る必要がある。なお、これについては、温度躍層ができて富栄養化が促進される水域より、風による常態的な循環でそれが抑制されている可能性も考えられる。さらに、現地においては栄養塩類のカット等の対策工が予定されており、それによる水質改善効果についても今後の追跡調査が必要である。

このような状況を踏まえ、今後は現地調査を継続して水質の状況の推移を調べていくとともに、水質成分の流入負荷量、内部生産量を加味して水域内の物質収支を明確にして、対象水域への水質シミュレーションモデルの適用を図り、将来の水質予測を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 松谷 治、道上正規、鈴木幸一；湖山池における吹送流観測：第32回水理講演会論文集 1988, 2
- 2) 環境庁国立公害研究所；陸水域の富栄養化に関する総合研究 (Ⅲ)、霞ヶ浦 (西浦) の湖流：国立公害研究所研究報告第19号 1981
- 3) (財) 国土開発技術研究センター；ダム貯水池富栄養化対策の手引き (案)；昭和61年3月
- 4) 土木試験所河川研究室；現場のための水理学：1988, 1