

◆ 報 文 ◆

低湿地の水質浄化機能の影響要因に関する調査

濱田知幸* 森田弘昭**

1. はじめに

湖沼の水質改善を図るためには、流入汚濁負荷を発生源で削減する立地規制や排水規制、下水道整備等の諸施策が、第一にとるべき対策であるが、当該湖沼に流入する汚濁負荷のうちこれらの施策によっても削減することが難しい面的負荷の割合が大きい場合には、流域変更や農業における減肥、流入河川の直接浄化などの対策が必要になる。

低湿地浄化法は、流入河川の直接浄化対策の一つで汚濁した河川水を水生植物が繁茂した湿地帯に導入し、汚濁負荷の除去を図ろうとするもので、この水質浄化機能を活用して湖沼の水質浄化を図ろうとする実験や研究が各機関で実施^{1~3)}されつつある。しかし、これらの研究は、直接的な水質浄化機能の解明に重点をおいたものがほとんどで、浄化機能に影響を及ぼす各種要因に関する知見は少ない。しかし、ヨシ群落が密生した低湿地の外力に対する物理的な特質が水質浄化機能に影響を与える可能性は、高いと考えられ、神田⁴⁾らは、規模の大きいヨシ群落の内部は、ヨシによって風や日照が遮られるため、大気や地表水の運動が抑制された静穏な環境が出現すると報告している。

そこで、著者らは、低湿地の浄化機能に影響を及ぼす各種要因に関して知見を得るために霞ヶ浦の湖岸帯にヨシを植栽した低湿地実験施設を建設し、実際の汚濁河川水を導入して5年間の実験を行った。本報ではこの研究成果を紹介する。

2. 実験方法

2.1 実験施設の概要

実験施設は、鉄筋コンクリート製で霞ヶ浦の高浜入りに流入する山王川左岸の河口付近に建設した。低湿地を模した実験槽には付近の湿地帯の土壌を搬入し厚さ60cmになるように敷きつめ、中間地点の採水や観察を容易にするために横断方向に

観測橋を設置した。図-1に実験施設の概要を示す。

山王川から水中ポンプで揚水された河川水は、二つの分配槽に送水され所定の流量に調整した後、各系列の実験槽へ流入させることができる。実験槽に供給する水量を設定した後は、晴天時でも雨天時でも一定の水量しか流入しないが、原水の水質は、河川水の水質変動を直接受けることになる。流出水は越流堰を越え、排水渠を通じて山王川に排出される。

2.2 実験条件

実験施設には、1981年10月に施設周辺に繁茂している天然のヨシを移植し、山王川の水を通水したがヨシの成育期を過ぎていたことから、この年は移植されたヨシの成育は見られず、地下茎が浮き上がる障害が生じた。しかし、翌1982年の4月には移植したヨシが発芽し、その後順調に成育して実験を開始することができた。1982年以降、底泥の浚渫や枯死したヨシの回収などは一切行わず、自然状態のままで実験を継続した。設定水深は、あまり深すぎるとヨシそのものが成育できず、浅すぎると汚濁河川水の水質浄化施設として十分な容積を確保できないおそれがある。そこで、ヨシが正常に成育できると報告⁵⁾されている水深及び霞ヶ浦の水生植物の成育実態を考慮して10cmと20cmに設定した。滞留時間は0.53時間～24時間の範囲に設定し、槽容積と滞留時間から供給水量は、1分間に6.5lから390lの範囲で送水した。表-1に実験条件の総括表を示す。

表-1 実験条件 (滞留時間及び水深)

年度 ケース	1982	1983	1984	1985	1986
Run1	2h	24	16	8	8
Run2	4	16	8	1	1.6
Run3		8	4	1※ 1	0.53
対照	4	24	16	8	8
			16※ 2	8※ 2	8※ 2
水深	10cm		20cm		

※1 設定流量の5割を中間地点からステップ注入

※2 遮光ネットで水面を被覆

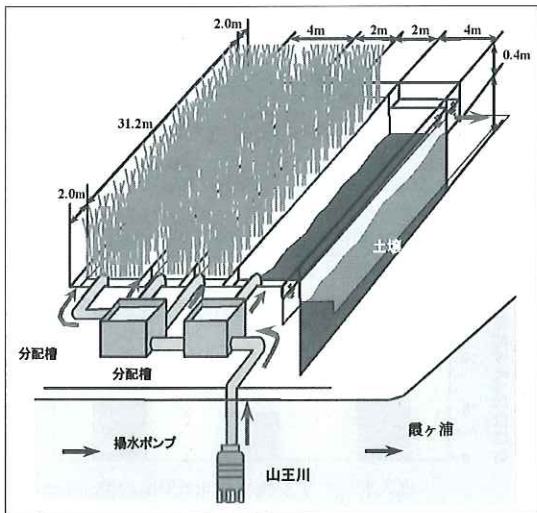


図-1 実験施設の概要

3. 実験結果

3.1 風の抑制作用

低湿地内のヨシなどの植生は、風の影響を弱め底泥の巻き上げを防止することによって、低湿地内の浄化機能を保全する作用があることが考えられるためヨシ槽の内部とヨシ槽の外部の風速を実測した。

図-2に3系列のヨシ槽の中央のヨシ槽の中間部で風速を測定した結果を示す。測定日は1985年10月8日である。ヨシの直上部では $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 前後の風速が観測されたがヨシ槽内部に入るに従って風速が減衰し、水面上では、ほぼ無風で生育したヨシ群落による防風作用を確認することができた。

次に、風による底泥の巻き上げの有無を水質データで確認するために、ヨシ槽と水生植物が繁茂していない無植栽槽のSSの処理状況を比較検討した。SSの測定は、風速の測定日と同時に行った。結果を表-2に示す。

流入水のSS濃度が、 $9.6\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ に対し、ヨシ槽と無植栽槽の流出水のSS濃度は、それぞれ $2.2\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 、 $6.6\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 、除去率で見ると73%、31%となり、ヨシ槽と無植栽槽では明らかにSS除去率に差が見られた。このことは、無植栽槽の水面にさざ波が発生し、所々で底泥が巻き上げられるのが肉眼でも確認できた。

定期調査の結果と比較して見ると、ヨシ槽のSS除去率は、平均70%であり、強風日とほぼ同じであるが、無植栽槽では、定期調査では53%の除去

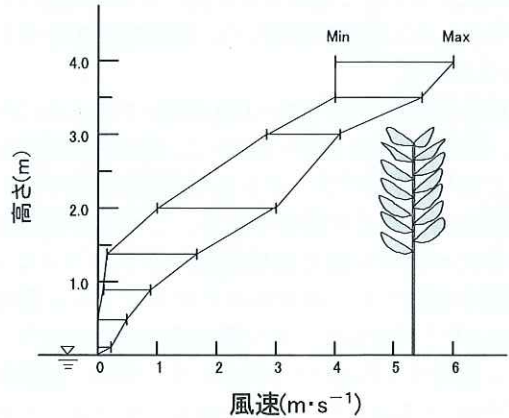


図-2 ヨシ群落による風の抑制効果

表-2 ヨシ群落による浮遊物質の浄化効果

観測日 (1985)		流入水	流出水	
			ヨシ槽 (HRT8h)	無植栽槽 (HRT8h)
強風日調査	10/8	9.6	2.2(73%)	6.6(31%)
定期調査	7/23	5.6	3.8	4.2
	8/20	24	3.8	5.0
	9/17	7.8	2.4	5.2
	10/1	4.2	1.5	3.3
	10/15	13.9	4.2	6.6
	11/12	5.8	3.0	4.6
	平均	10.2	3.1(70%)	4.8(53%)

単位: $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$

率が強風日には31%に低下している。なお、無植栽槽は、通常遮光ネットを展開させ風の影響を受けないようにしているとともに、ヨシ槽と同程度の密度になるように木製の円柱を設置してある。

以上の結果より、ヨシ群落は風の影響を弱め、底泥の巻き上げを防止し、交換溶出を抑制する作用のあることがわかる。森田⁶⁾が明らかにしたように、底泥の巻き上げによる交換溶出は、静止溶出に比べ大きな栄養塩負荷速度を持っており、ヨシ群落は、交換溶出速度と静止溶出速度の差だけ栄養塩を貯留していることになり、この貯留速度がヨシ群落の湖沼の富栄養化抑制に寄与する防風作用の効果と考えられる。

3.2 遮光作用

ヨシの生育期には、背丈が2~3mに達するとともに、大型の葉が繁茂することから、ヨシ槽内においては照度が減衰し、植物プランクトンや付着性藻類の増殖が抑制されることが想定^{4,7)}される。

そこで晴天日に、ヨシ槽内とヨシ槽外の照度の

観測及びヨシ槽と直射日光を受ける無植栽槽のクロロフィル a 濃度を観測した。観測結果を図-3 と表-3 に示す。

槽外の照度が 50,000~100,000lx であるのに対し、槽内の照度は 160~380lx で、遮光率は 99% 以上であり、植物プランクトンの増殖を抑制する可能性が高いことが推測される。この推測を検証するためにヨシ槽と無植栽槽のクロロフィル a 濃度を比較した。流入水のクロロフィル a 濃度 $7.0\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ に対して、ヨシ槽の流出水クロロフィル a 濃度は $4.7\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ と減少しているが、無植栽槽では $16.5\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ とかなり増大していることから、ヨシ槽では、植物プランクトンの発生が抑制されていることがわかる。同じ結果が植物プランクトン同定定量結果(表-4)からも読みとることが

表-3 ヨシ群落による遮光効果

観測地点	観測日	
	1985.7.14	1985.11.5
ヨシ槽水面	380	160
ヨシ槽外	54,000	103,400
遮光率	99.3(%)	99.8(%)

単位 (lx)

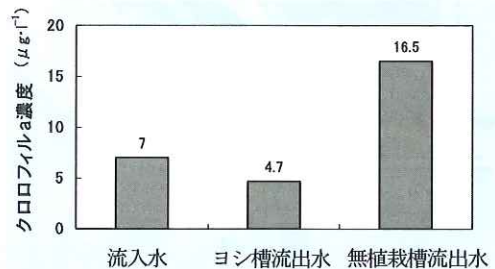


図-3 ヨシ槽におけるクロロフィル a 濃度変化

表-4 実験槽内に発生したプランクトン群

		Run1 (24h)			Run2 (16h)			Run (8h)			無植栽槽 (24h)		
		入口	中央	出口	入口	中央	出口	入口	中央	出口	入口	中央	出口
植物 プラン クトン	(Diatom algae)												
	<i>Nitzschia</i> sp.	12	8	26	12	14	6	32	22	2	20	480	430
	<i>Cymbella</i> sp.	2		2					2				
	<i>Melosira</i> sp.	2				2	2	4				30	
	<i>Navicula</i> sp.	2	6	8	2	2		4	12	2	4	70	
	<i>Diatoma</i> sp.	2					2						
	<i>Synedra</i> sp.	2		8	26		4	8	6		2	36	36
	<i>Gomphonema</i> sp.	6	4		16	8	14	8	20			72	78
	<i>Achnonthes</i> sp.	2	2		4	2		14	18		8	550	400
	<i>Eunotia</i> sp.		2									24	
	<i>Frustulia</i> sp.		2										
	<i>Fragilaria</i> sp.				6								
	<i>Cocconeis</i> sp.								2				18
	<i>Cyclotella</i> sp.						2					18	18
	<i>Melosira</i> sp.												
	<i>Tabellaria</i> sp.											48	30
動物 プラン クトン	(Green algae)												
	<i>Antistrodesom</i> sp.			2									
	<i>Cosmariun</i> sp.							2					
	<i>Senedesmus</i> sp.							2		2		18	
	合計個体数 (ml^{-1})	30	24	46	66	28	30	74	82	6	34	1,346	1,010
	平均個体数 (ml^{-1})	33											
	(Rotatoria)												
	<i>Lecane</i> sp.				2								
	<i>Brachicnus</i> sp.												
	(Crustacea)												
	Copepoda			4		2	4						
	(Protozoa)												
	Euglypha				4	2							
	合計個体数 (ml^{-1})	0	0	4	6	4	4	0	0	0	0	0	0
	平均個体数 (ml^{-1})	1			5			0			0		

(83.8.22)

できる。なお、光を遮らない無植栽槽においては、夏から秋にかけてアオウキクサが繁殖し水面を完全に埋めつくした。

霞ヶ浦においては、夏場に植物プランクトンが大增殖し、これらが死滅して沈降することによって湖底に大量の有機物が供給される。この有機物の分解は、大量の酸素を消費し、底泥の還元状態を進行させ、リンの溶出速度を著しく促進させることが報告⁸⁾されている。実験施設に堆積した底泥を用いた溶出実験においても嫌気状態においては、好気状態の数十倍のリンの溶出速度が確認⁶⁾されている。これらのことから、ヨシによる遮光は、低湿地内の植物プランクトンの増殖を抑制し、底泥の酸化状態を保持することによって低湿地からの夏場の栄養塩溶出を抑制する効果が期待される。

3.3 溶存酸素

低湿地においては、水中の溶存酸素(以下、DO)が消費され、その濃度が低下することが報告^{9, 10)}されている。

本研究においても、図-4に示すように低DOが観測されている。流入部で表層と底層に顕著な濃度勾配が見られ、底泥のDO消費が活発なことがうかがえる。水温が高いほど、また実滞留時間が長いほど、DOの低下が大きい。低DOは、魚類等の大型水生生物には、望ましい環境ではないが、逆にこの環境を利用して種の保存を図る生物も存在¹¹⁾しており、低湿地が生物多様性に適する場となる要因の一つとなっている。一方、DO低下は

栄養塩除去に、次のような影響を与えるものと考えられる。リン除去については、既往の研究⁸⁾でも報告されているように底泥からの溶出量の急激な増大が懸念される。冬季は水温も低く、DO濃度も高いため、低湿地は沈殿池としてリンを蓄積するが、最も富栄養化ポテンシャルの高い夏季に、高水温と低DOをドライビングフォースとして蓄積した多量のリンを湖水に放出するおそれがある。窒素の除去については、DO不足により硝化が抑制され脱窒作用による窒素除去に影響を与えることが推定される。よって、低湿地浄化法を設計する際にはヨシ槽内のDO予測を行い、DO条件から見た滞留時間や水深条件を見積もることが重要になる。そこで、本節では、低湿地のDO予測方法を提案するとともに低DOの原因について考察した結果を報告する。

3.3.1 ヨシ槽におけるDOモデル

ヨシ槽を流下方向への一次元の輸送・拡散系とみなすと、ヨシ槽内の溶存酸素濃度は、式(1)で表すことができる。物質収支調査からNH₄-Nの硝化は、ヨシ槽の酸素消費に量的に寄与するものと仮定し、DO収支式に加えた。また底泥によるDO消費も従来の研究¹²⁾から十分にヨシ槽の低DOに寄与するものと考えた。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + k_2(C_s - C) + (\alpha + \beta)/h \quad (1)$$

ここで

C : 溶存酸素濃度 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)

C_s : 飽和溶存酸素濃度 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)

u : 断面平均速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

D_x : 拡散係数 ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

k_2 : 再バクテリウム係数 (s^{-1})

α : 硝化による酸素消費 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

β : 底泥等の酸素消費 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

h : 水深 (m)

実験槽は、沈殿物の堆積やヨシの流水抵抗によって、設計どおりの滞留時間の設定が難しいため、トレーサー物質として塩化リチウムを用いモーメント法で実際の滞留時間を推定した。拡散係数は塩化リチウムの流下方向の濃度分布から次のような方法で推定した。

保存物質の一次元の物質輸送式は式(2)のように表され、投入した保存物質の質量を M とする

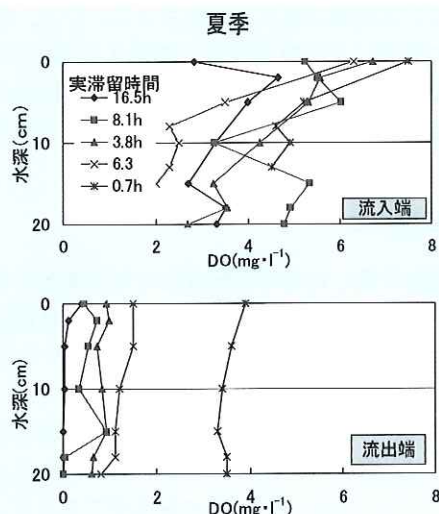


図-4 夏季におけるヨシ槽内のDO分布

と解析解は式 (3) となる。式 (3) を式 (4) のように展開し縦軸を $\ln(c\sqrt{t})$ とし、横軸を $[\frac{(x-ut)^2}{4t}]$ とすると、直線の傾きの逆数が拡散係数となる。塩化リチウムの時系列データを最小二乗法で整理し、拡散係数 $6.95 \times 10^{-3} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ を得た。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2)$$

$$C = \frac{M}{A\sqrt{4\pi D_x t}} \exp\left[-\frac{(x-ut)^2}{4D_x t}\right] \quad (3)$$

$$\ln(C\sqrt{t}) = B - \frac{1}{D} \left[\frac{(x-ut)^2}{4t} \right] \quad (4)$$

水面から水中への酸素の移動については、様々な推定方式¹³⁾が報告されているが、ここでは水表面がほぼ平面に近い場合の酸素移動速度を求めた村上¹³⁾の推定式を用いて、 $K_2 = 8.18 \times 10^{-7} (\text{S}^{-1})$ を得た。 $\text{NH}_4\text{-N}$ の硝化に伴う、酸素消費速度 α は、夏季の窒素の物質収支調査における $\text{NH}_4\text{-N}$ の流入量と回帰量の和から流出量を減じた量を硝化量とし、単位面積当りの酸素消費速度に換算して、 $2.25 \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ を得た。底泥等の酸素消費速度 β は式 (1) のキャリブレーションによって求め $2.86 \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ を得た。ヨシ槽の DO 分布再現結果を図-5 に示す。

3.3.2 ヨシ槽における DO 収支

次にヨシ槽の DO 収支を推定する。底泥等の酸素消費速度 β には流入水有機物の酸化分解に伴う酸素消費が含まれているため、これを分離する。流入水中の有機物分解による DO 消費は溶存態 BOD の減少のみを考えた。なお粒子態 BOD は、沈降して底泥による酸素消費として算出されると仮定した。72 時間の物質収支調査データから、流入溶存態 BOD 濃度、流出溶存態 BOD はそれぞれ $2.7 \text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、 $1.7 \text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ であり、DO 消費速度は $0.60 \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ と算出された。 β から

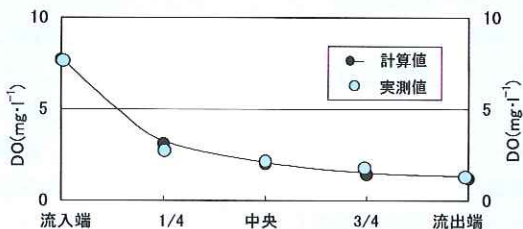


図-5 実滞留時間 6.3h のヨシ槽における DO 濃度の計算値と実測値

表-5 実滞留時間 6.3h のヨシ槽における DO 収支

DO 収支影響要因		DO 輸送速度 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)
供給要因	流入	4.62
	再バツ気	1.21
消費要因	硝化	2.25
	底泥	2.26
	流水 BOD	0.60
	流出	0.72

この消費分を減じ底泥の酸素消費速度を求めると $2.26 \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ となり、底泥の酸素消費速度の方が水中の有機物の酸化による酸素消費速度よりも数倍大きいことがわかった。なお、この底泥酸素消費速度は、下水汚泥や汚濁河川底泥の酸素消費速度に関して得られている従来の研究結果¹²⁾よりも大きく、その差は枯死ヨシ体の酸化分解による酸素消費と思われる。得られた溶存酸素収支を表-5 に示す。

以上の検討結果より、人工低湿地の栄養塩除去機能に影響を与える DO 条件は、底泥の酸素消費速度や硝化速度等を事前に求めることによって予測することができることがわかった。また、低湿地における低 DO は、底泥による酸素消費及び水中の有機物の分解に伴う酸素消費と硝化が原因であり、底泥による酸素消費速度が最も大きいことがわかった。さらに、再バツ気による最大酸素供給速度よりも酸素消費速度の方が大きく、本実験よりも実滞留時間 (6.3h) が長い場合には、水中の溶存酸素は消費されつくすものと考えられ、大幅な有機物除去や硝化の進行は期待できず、底泥からのリン溶出量の増大も懸念される。なお、現状以上の脱窒による窒素除去を期待する場合には、未硝化の窒素を酸化するために人工低湿地内に酸素供給装置を設けるか、流入原水に対して前処理を行い原水の硝化を進める必要がある。

4. おわりに

低湿地を模した屋外実験施設に実汚濁河川水を通水させ、水質浄化機能に影響を与える各種要因について実験的な考察を行い次のような知見を得た。

- (1) 強風時にヨシ群落内部の風速を測定した結果、ヨシ群落は、優れた防風効果を持つことがわかった。このことを SS の除去率で見ると、ヨシ槽 73%、無植栽槽 31%とヨシ群落が底泥の

巻き上げを抑制していることがわかった。

- (2) 晴天時にヨシ群落内部と外部の照度を測定し、ヨシ群落の水面上での遮光率が99%以上であることを明らかにした。また、ヨシ槽と無植栽槽流出水のクロロフィルa濃度を測定し、ヨシ槽ではクロロフィルaが減少しているのに対し、無植栽槽では逆に上昇していることから、遮光による植物プランクトン抑制効果があるものと推測した。
- (3) ヨシ槽のDO低下の理由は底泥による酸素消費と硝化によるものが大きく、前者の割合が大きい。
- (4) 事前に有機物の分解に伴う酸素消費速度や硝化速度を実験的に求めるとともに、再バクテリア係数や原水水質を分析することによって低湿地の窒素除去及びリン除去に関する基礎的な設計資料を得ることができる。

参考文献

- 1) 細見正明、須藤隆一：湿地による生活排水の浄化、水質汚濁研究, 14(10), pp.674-681, 1991.
- 2) 相崎守弘、中里広幸：富栄養化湖水の浄化のための水耕生物ろ過法を用いた人工湿地の開発、水環境学会誌, 20(9), 622-628, 1997.
- 3) 建設省土木研究所：河川、湖沼、ダム貯水池等の浄化手法についての総合的検討, p66, 1998.
- 4) 神田学、日野幹夫：植性による気候緩和効果に関する基礎的研究, 第33回水理講演会論文集, pp.685-690, 1989.
- 5) 田中周平、藤井滋穂、山田淳、市木敦之：ヨシ生育に及ぼす水位および地盤変化の影響、水環境学会誌, 第24巻, 第10号, 2001.
- 6) 森田弘昭：洪水時の汚濁負荷が湖水質に及ぼす影響について、環境工学研究論文集, 37, pp.455-465, 2000.
- 7) 小島貞夫、飯田耕作、滑川明夫：水面の部分遮光による藻類の制御、日本陸水学会第64回大会講演要旨集, p30, 1999.
- 8) 細見正明：湖沼底泥からの窒素・燐溶出とその制御に関する研究、大阪大学学位論文, 1987.
- 9) James J. Sartoris, Joan S. Thullen, Larry B. Barber, David E. Salas : Investigation of nitrogen transformation in a southern California constructed wastewater treatment wetland Ecological Engineering, 2000.
- 10) 浜田篤信：霞ヶ浦の湖岸修復と生態系復元、水環境学会誌, 24(10), pp.645-651, 2001.
- 11) 佐久間昌孝、花里孝幸：水草帯における溶存酸素濃度の経時的、空間的变化と微小動物群集、日本陸水学会第63回大会講演要旨集, p46, 1998.
- 12) 茂庭竹生：底泥の酸素消費量に関する室内実験、水質汚濁研究, 9(4), pp.231-238, 1986.
- 13) 土木学会：水理公式集平成11年度版, p605., 丸善, 東京, 1999.

濱田知幸*



国土技術政策総合研究所
下水道研究部下水道研究
室研究員
Tomoyuki HAMADA

森田弘昭**



同 下水道研究室長、工博
Dr. Hiroaki MORITA