

◆ 報 文 ◆

低湿地における水質浄化特性

濱田知幸* 森田弘昭**

1. はじめに

低湿地の水質浄化機能を活用して水環境の保全を図ろうとする浄化技術に関する実験や研究が各機関で実施^{1~4)}されつつあるが、実汚濁水を用いた水質浄化特性に関する知見はいまだ十分に蓄積しているとは言えず、特に長期的な連続実験によって最適な汚濁水の負荷条件や最適な管理方法について考察した報告⁵⁾は少ない。本報では、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年間の実験を行い、人工低湿地の水質浄化機能について研究を行った結果を報告する。

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1981年度に建設した。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た。実験槽は、長さ31.2m、幅11m、深さ1mの大きさで仕切板によって、縦断方向に任意の幅で分割することが可能である。本研究では、ヨシを植栽する槽と湿地のみのコントロール槽を

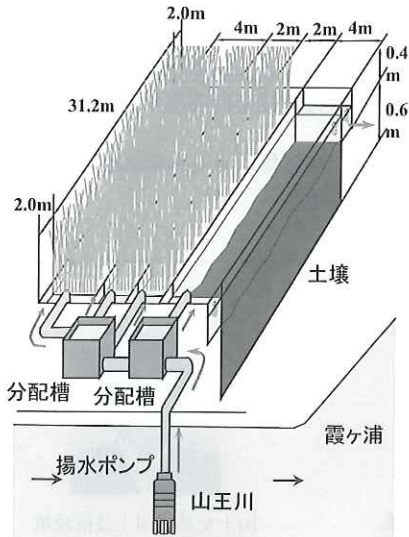


図-1 実験施設の概要

Water Purification Properties of the Wetland

設定した。(図-1)

2.2 実験条件

(1) 通年調査

表-1に実験条件の総括表を示す。

表-1 実験条件 - 滞留時間、水深 -

年度 ケース	82	83	84	85	86
Run1	2	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

※3 水深以外の単位は時間

水深は、ヨシが正常に生育できると報告⁶⁾されている水深及び霞ヶ浦の水生植物の生育実態を考慮して10cmと20cmに設定した。設定した実験条件は、1年間固定し、原則月2回の採水と分析を行った。

(2) 特別調査

①物質収支調査

ヨシ槽の物質収支を把握するために、85年度の夏季(8/20~8/23)と冬季(2/11~2/14)に72時間の連続調査を行った。採水は、原水流入部とヨシ槽の出口地点で午前10時から3時間間隔で行った。分析項目は、K_rN(ケンダール態窒素)、溶存態K_rN、NH₄-N(アンモニア態窒素)、NO₂-N、NO₃-N、TP(総リン)、溶存態TP、SS、クロロフィルa、COD、溶存態COD、DOである。

②ヨシによる栄養塩の吸収量及び回帰量の推定

ヨシによる栄養塩の吸収量を把握するためには、地上の葉茎部はもとより、地下茎を含めて定量する必要があるが、大型の屋外施設では地中に地下茎が幅横し、ヨシ1本当たりの植物体量を特定することが困難であった。そのため、生育、枯死を繰り返す地上部の植物体における栄養塩の吸収量と回帰量を計測した。85年に実験施設内のヨシを定期的に採取しその栄養塩含有量を分析した。

単位面積あたりのヨシに蓄積される栄養塩量は、次式で計算した。

$$L = W_1 (100 - w_1) \cdot N \cdot R_1 \cdot 10^5$$

ここで

L: 1m² 当りに蓄積された栄養塩量 (g・m⁻²)

W₁: ヨシ一本当たりの重さ (g)

w₁: ヨシの含水率 (%)

N: 1m² 当りのヨシ本数 (-)

R₁: ヨシ乾燥重量当たりの栄養塩含有率 (mg・g⁻¹)

回帰量は、ヨシが水中に倒伏し微生物によって分解され栄養塩を放出する状況を想定して実験的に求めた。ヨシ槽で任意に9本のヨシを選択し、生育途中に落下した葉も実験に供することができるようにヨシが枯死しはじめる10月に大型のネットを覆った。ネットはヨシの近傍に立てた支柱から懸垂した。ヨシが完全に枯死したと考えられる1月に、これらを刈り取り、9本全部を12ℓの水槽に浸せきし、水槽内の栄養塩の濃度変化を観測した。枯死し倒伏する時期の現地条件を考え、水温は10℃に設定し、暗条件下で実験を行った。

③ヨシ槽における底泥性状と溶出量調査

底泥の性状変化を観測するために、ヨシ槽の流入端と観測橋のある中間部、流出端付近の3カ所の表層1cm程度の底泥を各槽毎に採取した。分析項目は、TN (総窒素)、TP、IL (強熱減量) と乾燥重量である。溶出量は次のような方法で求めた。まず、採取した底泥を内径52mm、長さ1000mmのアクリルパイプに約400mmの厚さになるように充填しその上に約500mmの深さになるように低湿地の越流水を満した。これを10℃、20℃、30℃の恒温室に設置し、暗条件下で放置し、直上水の水質変化から、単位面積当たりの溶出量を求めた。DO条件は空気あるいは窒素ガスの送気によって制御した。

(3) 水質分析方法

溶存態はろ紙 (Whatman GF/C filter) でろ過したものを試料とした。NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N、Kr-N、TP、PO₄-Pは、オートアナライザーで分析した。クロロフィルaは上水試験法、BOD、COD、SS、ILは下水試験方法を参考にした。DOは自動分析計を用いた。

3. 結果と考察

3.1 栄養塩の浄化機能

5年間の調査結果を実滞留時間と年間平均除去率で整理したものを、窒素とリンにわけて図-2と図-3に示す。

年間平均除去率とは、年25回行った調査で得られた除去率の平均値である。実滞留時間とは、塩化リチウムなどのトレーサー物質を使ってモメント法 (重心の移動を計測する方法) で滞留時間を求めたものである。窒素については、2時間程度の短い滞留時間では浄化機能が安定しないが、

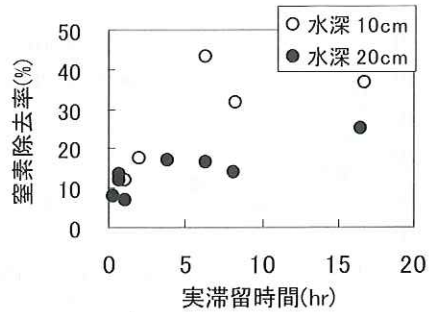


図-2 年間窒素除去率と実滞留時間の関係

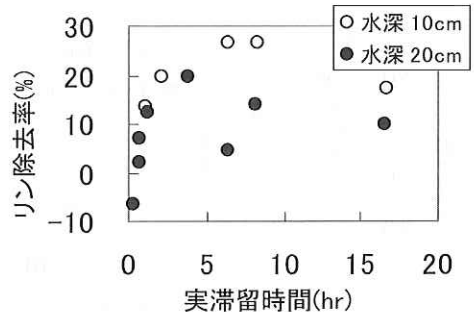


図-3 年間リン除去率と実滞留時間

2時間以上になると滞留時間と除去率の間に弱い正の相関がみられ、水深10cmの設定で、6時間以上の滞留時間があれば、30%の除去率が期待できることがわかった。

リンについては、滞留時間が2時間以下の場合には除去率と滞留時間の関係は直線的に変化するが、それよりも長い滞留時間では、除去率は25%程度を上限に横ばいしないしは低下傾向になる。

窒素、リンとも同じ滞留時間の場合には、水深が20cmよりも10cmの方が、すなわち水面積負荷が小さい方が除去率が高く、沈殿による浄化作用の寄与が高いことが推測された。水面積負荷は、沈殿池の設計基準に用いられており、原水栄養塩に粒子態成分が多く、水面積負荷が小さくなれば、沈殿効果すなわち除去率が向上するものと考えられる。そこで実験結果を水面積負荷で整理し、図-4と図-5に示す。窒素・リンとも水面積負荷の低下により除去率の向上が見られ、栄養塩の除去には、粒子態栄養塩の沈殿も寄与しているものと考えられる。

栄養塩除去に及ぼす温度の影響について考察を行う。実験施設の水温が20℃以上であった時の分析値と20℃以下の時の分析値にわけて実験結果を再整理し、図-6と図-7に示す。

窒素においては同じ滞留時間、水深の場合、水温が高い方が除去率が高く、リンの場合は、水温

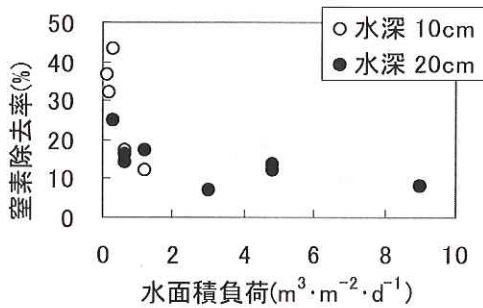


図-4 年間窒素除去率と水面積負荷の関係

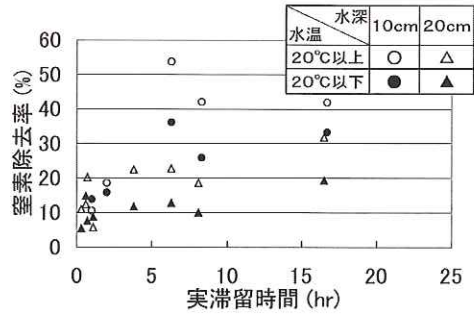


図-6 窒素除去率と実滞留時間の関係

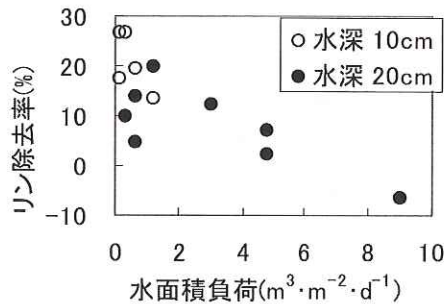


図-5 年間リン除去率と水面積負荷の関係

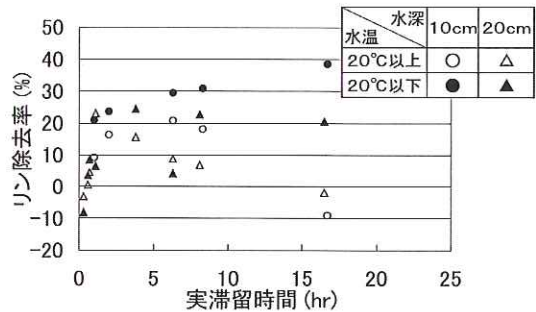


図-7 リン除去率と実滞留時間の関係

が低い方が除去率が高かった。

これは、窒素の除去においては、生物的な浄化機能の寄与する割合が大きく、水温の上昇とともにその浄化機能が高まり、結果として除去率が高くなったと推測される。一方、リンの除去においては、浄化機能の主たる部分は、沈殿効果であり水温の上昇とともに、底泥や枯死植物体からのリンの溶出が見かけの浄化機能を低下させているこ

とが推測された。浄化機能に関するこれらの推測については、物質収支調査結果の検討を通じてより詳細に考察する。

3.2 ヨシ槽における物質収支

(1) 窒素の収支

夏季及び冬季のヨシ槽（実滞留時間 6.3h）における窒素収支を図-8 と図-9 に示す。

各図の中の数字は、窒素の収支を一日当り、

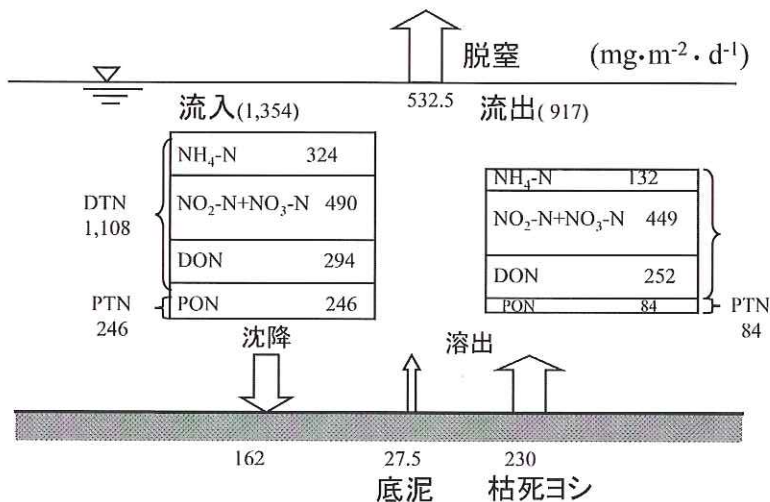


図-8 夏季におけるヨシ槽の窒素収支

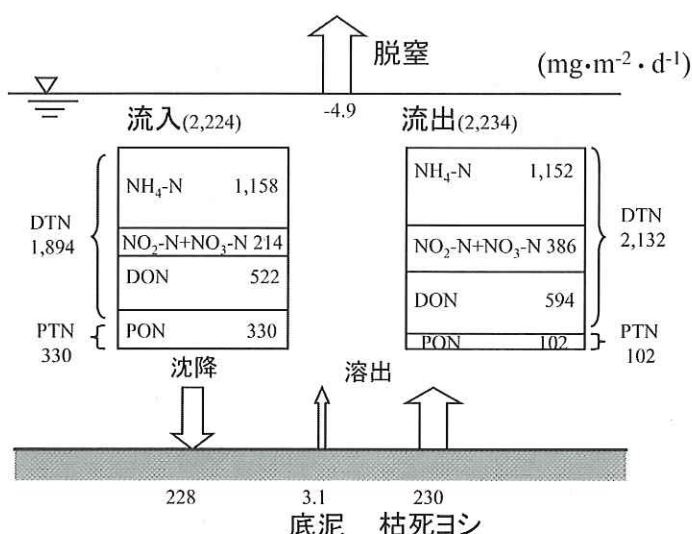


図-9 冬季におけるヨシ槽の窒素収支

1 m^2 当りの重さで表したものである。PONを粒子態窒素の総量とし、流入と流出の差を、沈殿したものと仮定した。また、底泥と枯死ヨシ植物体から溶出する窒素は、すべて $\text{NH}_4\text{-N}$ と仮定した。これは、実験で求めた溶出した窒素の形態が、有機体窒素と $\text{NH}_4\text{-N}$ であり、そのうち6~9割が $\text{NH}_4\text{-N}$ であったことによる。なお、底泥からの溶出速度は、夏季及び冬季の溶出速度の差を反映させているが、ヨシ体からの回帰実験は、10℃しか行っていないため、夏季にはより大きな回帰速度になっている可能性がある。このことはリンについても同様である。さらに、溶出と回帰を含めたDTN（溶存態TN）の流入と流出の差分を脱窒によるものと考えた。ヨシ槽における窒素の収支を総括的にみると、流入水と流出水の水質分析結果から、夏季においては32%の窒素が除去されているが、冬季には他の研究例^{3) 5) 7)}と同様に浄化機能が低下した。これらの実験結果は5年間の窒素除去の温度特性を20℃以上とそれ以下にわけて考察した本研究の実験結果（図-6）と整合している。形態別の窒素収支から、夏季には491.5 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ の硝化速度が観測され、さらに532.5 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ の脱窒速度が測定された。流水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ は、植物プランクトンや水生植物に吸収され減少することが予見されるがヨシ槽では原水中のクロロフィルa濃度が7 $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ から4.7 $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ と減少していること、溶存酸素の日周変動が見られないことから植物プランクトンや水生植物の活動はあってもわずかであり、これらによる $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸収はなかったものと考えられる。また、ヨシは地下茎から必要な栄養塩を吸収する

こと、底泥の溶出実験では $\text{NH}_4\text{-N}$ が直上水中に溶出してくることからヨシによる流水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸収はなかったと考えられる。これらのことから、流水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ の減少がすべて硝化によるものと仮定し、その減少速度は、一次反応に従うとすると、夏季の硝化速度定数は2.57 d^{-1} となる。冬季は、0.3 d^{-1} となり、夏季の硝化速度定数の約12分の1であった。夏季には大きな脱窒速度が観測されたが、冬季の脱窒速度はほぼゼロであった。脱窒作用は、温度におおいに依存する事が報告⁸⁾されており、物質収支調査における夏季と冬季の脱窒量の違いは夏季25℃、冬季10℃の水温差が原因の一つと考えているが、さらに夏季と冬季では、夏季1.2 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、冬季4.1 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ と水中の溶存酸素濃度に大きな差がありこれも原因の一つと考えている。これらの物質収支調査結果は、前節で窒素除去について水温が高い方が除去率が高い現象の理由として提案した、高水温が生物的窒素除去活性を高めるという推測を支持するものとする。

以上の物質収支調査結果から、窒素の除去には粒子態窒素の沈殿除去も寄与しているが、脱窒作用が大半であることが明らかとなった。しかし、冬季には、脱窒作用は期待できない。さらに、低湿地における窒素の内部負荷である底泥からの溶出と枯死ヨシ体からの回帰を比較すると、後者の方が圧倒的に大きく、低湿地における浄化機能をさらに強化するのであれば、枯死したヨシの回収を検討する必要がある。しかしながら、低湿地の内部負荷要因である底泥からの溶出速度及び枯死ヨシ植物体からの回帰速度と脱窒速度を比較する

と脱窒速度の方がかなり大きいため、人工低湿地の底泥汚濁が進んだとしても、二つの内部負荷が窒素除去率を負にするほどの影響は持たないと思われる。このことから低湿地に特別な管理を加えなくても、すくなくとも夏季の脱窒による窒素除去は、半永久的に期待できるものと考えられる。

(2) リンの収支

ヨシ槽におけるリンの収支を、図-10と図-11に示す。各図の中の数字は、窒素の収支と同様に、リンの収支を一日当たり、1m²当りの重さで表したものである。粒子態リン (PTP) の流入負荷量と流出負荷量の差を沈殿によって除去されたものとした。総リンベースの収支差分のうち PTP の沈殿除去を越える分、すなわち溶存態リンの消失分を不明として表現している。

TP の流入負荷量と流出負荷量の差から夏季に

おいて 22%、冬季において 21% のリンが除去されているがいずれもこの年度の年間平均除去率 (5%) と比べるとかなり高い除去率が得られている。これは物質収支調査時の原水リン濃度 (夏季 0.490mg・l⁻¹, 冬季 0.675mg・l⁻¹) が、年間平均流入原水濃度 (0.42mg・l⁻¹) よりも 1.5 倍ほど高かったことが原因のひとつと思われる。ヨシ槽におけるリンの除去には、粒子態リンの沈殿作用が大きく寄与しているが、粒子態リンそのものの除去率は、夏季 50%、冬季 90% と大きな季節変化が見られる。この格差について明確な理由を説明することはできないが、現地観測から類推すると夏季には、植物体の分解物のような細かい懸濁物が流出水中に観測されるのに対し、冬季には、極めて清澄な流出水が観測されることから、夏季の活発な微生物によるヨシ枯死植物体などの有機物の分解作用

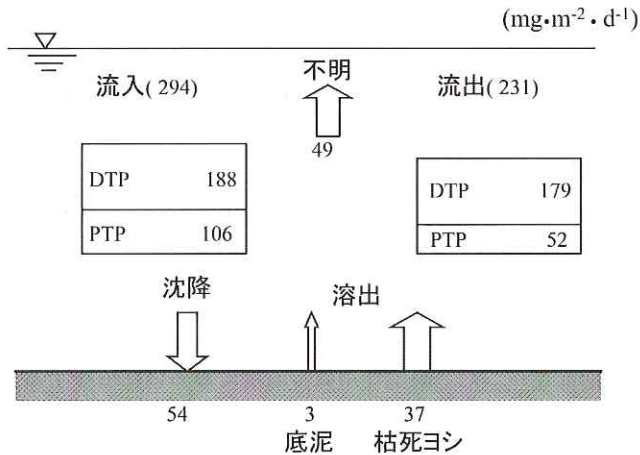


図-10 夏季におけるヨシ槽のリン収支

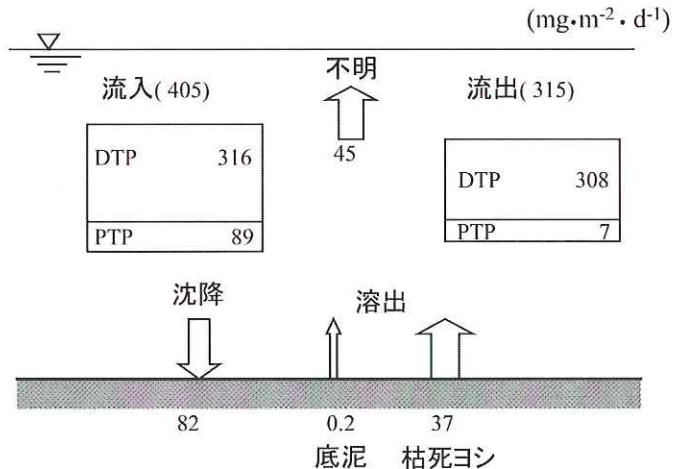


図-11 冬季におけるヨシ槽のリン収支

の結果が反映されているものと思われる。

底泥からの溶出量は、夏季に $0.2\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ から $3\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ と大幅に増大するが実滞留時間が 6.3h の本ケースの場合には流入負荷量が (200 ~ $400\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) に対し、その影響は極く小さい。よって、底泥及び枯死ヨシ体からのリン溶出量が水温の増加に伴い上昇し、高水温期の低湿地のリン除去率が低下するという前節の推定のうち底泥からの溶出に関する推定は量的に成り立たない。

枯死したヨシからの回帰量 $37\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ は、リン除去の大半を担う粒子態リンの沈殿量 $54\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ (夏季) と $82\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ (冬季) と比べてもかなり大きな数値であり、滞留時間が長くなり、単位面積当りの負荷量が小さくなるとヨシからの回帰量の相対的な寄与度が増加し、低湿地の総括的なリン除去率の低下に影響を与え得るものと推測される。

4. 結 論

山王川の河川水を対象とした、人工低湿地における水質変化について実験的な検討を行い次のような知見を得た。

- 1) 通年の栄養塩の除去能力は、窒素で水深 10cm、滞留時間 6 時間以上の条件で 30% 程度であった。リンは、滞留時間 2 時間以上で 25% 程度で、滞留時間が長くなると除去率は低下する。
- 2) 除去能力に与える温度の影響は、窒素とリンでは異なる結果となった。すなわち、窒素では、高水温 (20℃ 以上) の方が除去率が高く、リンでは低水温 (20℃ 以下) の方が除去率が高かった。
- 3) 窒素の除去の大半は、脱窒によるものと推定されたが、冬季には期待出来ない。
- 4) ヨシ槽内の内部負荷である枯死ヨシ植物体からの回帰と底泥からの溶出は枯死ヨシからの回帰量の方が圧倒的に大きく、ヨシ槽における窒素除去効率をさらに強化する場合は、枯死したヨシの回収を検討する必要がある。
- 5) リンの除去の大半は粒子態リンの沈殿によるものであるが、夏季には除去率が低下する。
- 6) リンについても窒素と同様に、枯死ヨシ植物体からの回帰量がヨシ槽のリン除去効率に与える影響が大きく、リンが保存物質であることを考えると枯死ヨシ植物体の回収が行われない場合、夏季には流出量が流入量よりも大きくなる可能性がある。

参 考 文 献

- 1) 細川恭史、三好英一、古川恵太：ヨシ原による水質浄化の特性、港湾技術研究所報告、第 30 巻第 1 号 (1991)
- 2) Jorgensen, S.E., Nielson, L.K., Ipsen, L.G.S. and Nicolaisen, P: Lake restoration using a reed swamp to remove nutrients from non-point sources, Wetland Ecol. Manag., 3, pp.87-95. (1995)
- 3) 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、第 20 巻、第 9 号、pp.622-628 (1997)
- 4) 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、Vol.66 (1998)
- 5) 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, pp.674-681 (1991)
- 6) 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)
- 7) 田畑真佐子、加藤聡子、川村 品、鈴木潤三、鈴木静夫：ヨシ植栽水路における河川水中の窒素・リンの除去効果、水環境学会誌、第 19 巻、第 4 号、pp.331-338 (1996)
- 8) 戸田任重・石塚加織：高濃度硝酸態窒素含有地下水の流入する溜池における脱窒速度の制限要因について、日本陸水学会第 58 回大会 (1993)

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
Tomoyuki HAMADA

森田弘昭**



国土交通省都市・地域整備局下水道部下水道事業課町村下水道対策官、工博
Dr. Hiroaki MORITA