関西自然保護機構会報 21（2）：235－247, 1999

人工ヨシ湿地の浄化機能とそれを創出する技術開発

東京農工大学工学部環境化学工学研究室　細　見　正　明

PERFORMANCE EVALUATION AND CREATION TECHNOLOGY OF WETLAND SYSTEMS COMPOSED MAINLY OF REEDS

Masaaki Hosomi
Environmental Chemical Engineering Laboratory, Tokyo University of Agriculture and Technology

はじめに

湿地の英語は，wetlandであり，文字どおり湿っている土地のことで，様々な定義があるが，ラムサール条約などでは池や湖沼も含まれている。もう少し厳密に定義するならば，「湿地とは水生植物が生育し，かつ土壌の飽和状態が維持されているのに充分な期間，地表面に近く（すなわち，水深が浅い状態で）地表水が存在する土地」と言える（岡田，1994）。典型的な湿地では，ヨシ（アシ），ガマ，イグサなどの抽水植物が主に成育しているが，そのほかにも浮葉植物や沈水植物も成育している。

米国においては自然保護の観点から湿地の保護・保全が叫ばれている。これは過去において，湿地はハエ，蚊などの衛生害虫や悪臭の発生源であることから，wetlandではなく「westeland」と認識されていた。その結果，湿地は水を排除して農地に転換されたり，住宅開発や産業開発が行われたり，あるいはwastelandの通り有害廃棄物の投棄場として利用されてきた。とくに，沿岸開発に伴って埋立される場合，湿地が対象となることが多く，米国だけでなく，我が国においても半数以上の自然の湿地が消失してきた。

しかしながら，ここ数年来，この「wasteland」であった湿地が，魚介類や野生生物の生息地であること，水質改善に寄与していること，洪水調節機能があること，海岸線の侵食防止機能があること，レクリエーションや景観美からも重要であることから，「wonderland」として認められるようになった（細見，1990）。米国環境保護庁でもあらたに水局の中に湿地保全課が設けられ，その機能評価や保全のための一連の研究も含めた湿地保全施策が進められている。一方で持続的な開発を目指して，開発に伴って消失する沿岸海域のミチゲーション（代償措置）として，湿地の保全，回復，創出が図られている。

また，米国環境保護庁リスク削減工学研究所や地域事務所では湿地の水質浄化機能を利用して，湿地による下水処理に関する研究も進められている（細見，1994）。こうした湿地を利用した水質浄化は，米国，ドイツ，オランダなどでも実用化を目指した研究も行われている。

一方，内湾，湖沼等の閉鎖性水域については，航路維持や水質改善のために大量の底泥が浚渫されているが，その浚渫底泥は有効利用が難しく，その処理処分が極めて困難な状況にある。

そこで，浚渫ヘドロを利用して，水質浄化に有効とされるヨシ湿地生態系（細見ら，1997）を創出し，このヨシ湿地により対象水域の水質浄化を図る「ウェットランドシステム」（図1）を提案する。このシステムは閉鎖性水域の一部を浄化護岸

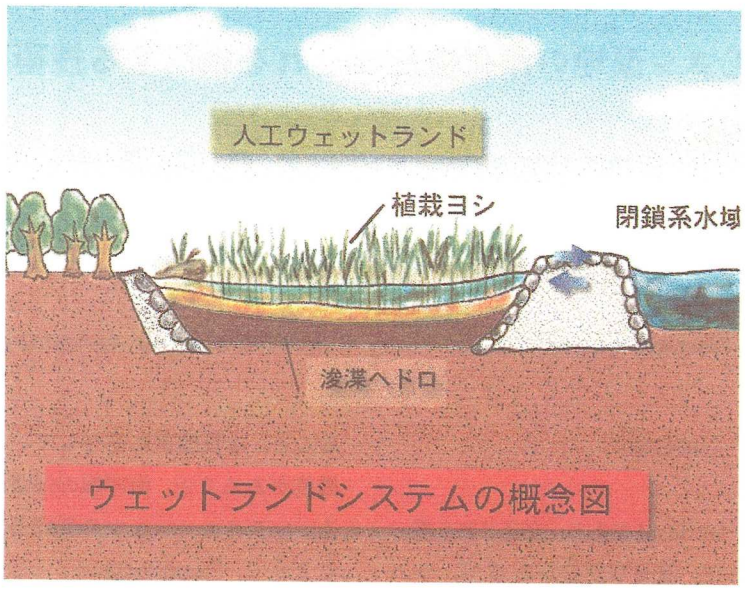


図1　ウエットランドシステムの概要.

等でしきり，同じ水域から浚渫した底泥を入れて造成し，ヨシを植栽することによって，ヨシ湿地を創出し，このヨシ湿地の水質浄化機能により水質改善を図ろうとするものである。したがって，浚渫した底泥は閉鎖性水域内で利用し，外部へ持ち出さないため，処理処分の必要がない。

何故，ヨシなのか？

このシステムにヨシを選定した理由としては，日本各地に自生し群落を形成すること，ヨシの根が地下60～100 cmまで達すること，ヨシの茎は中空であり，その深さまで酸素を供給できることなどがあり，ヨシ湿地は，多種多様な生物の生息の場を供給し，水質浄化（栄養塩の吸収等）等の機能があることが知られている。さらに，多少の塩分にも耐えられ，新たに創出する湿地生態系のパイオニア的植生と考えられるからである。結果的に，創出されたヨシ湿地は多種多様な生物の生息の場を提供し，水質浄化（栄養塩の吸収等）等の機能をもつようになる。

ヨシを中心とした湿地を創出する技術として，ヨシの根茎を利用した工法は数多く研究されている（Bittmann, 1965；桜井, 1991）が広範囲の湿地を創出するには甚大な労力が必要であり，かつ根茎採取後の処理にも手間がかかる。また，根茎を採取をする際に既存のヨシの生息地を破壊することにもなる。このように，ヨシの根茎を利用した工法には問題点がいくつかあり，必ずしも最適手法とはいえない。

ここでは，まず，ヨシ湿地生態系が有する水質浄化機能について紹介した上で，浚渫ヘドロを利用した「ウェットランドシステム」の確立のため，まず，浚渫ヘドロを利用して，湖沼等の閉鎖性水域でヨシを中心とする湿地を創出する技術について述べる。

ヨシ湿地による水質浄化

ヨシを利用した水質浄化法は，ホテイアオイと

異なり，ヨシだけでなく土壌の浄化能力も利用することになるので，ヨシ湿地を利用した水質浄化法と表現した方が適切である。なお，ヨシを一種のリビングフィルターとして，いかだなどを用いて水中に浮かせてヨシを水耕栽培し，水質浄化を図る方法も考えられる。この場合は，ホテイアオイと同様である。ここでは，ヨシ湿地について述べる。

ヨシを植栽した人工湿地は，自然保護の問題を克服でき，最適な水処理方式が設計しやすい（勾配をつけたり，流入及び流出の制御が容易であり，必要に応じて植栽や刈り取りが可能）ので，自然のヨシ湿地よりも単位面積当たりの浄化能力が大きい。

人工湿地（constructed wetland）は，図2のように表面流れ方式（free water surface flow）と浸透流れ方式（subsurface flow）とに分かれる(EPA, 1998；細見，1992)。前者の場合，排水は表面流れとして流入し，土壌や水生植物と接触し，水中の懸濁物質が沈殿しやすくなったり，水生植物の表面にすむ微生物が有機物を分解し，上部から処理水が流出していく。後者の場合，排水は水生植物の根の部分に入り，土壌や根の部分でろ過や吸着により，また根の部分にすむ微生物が有機物を分解したり，硝化・脱窒を進め，排水を浄化し，下部から処理水が流出していく。このように湿地では，ホテイアオイのように植物が窒素，リンを吸収する効果だけではなく，土壌の吸着作用や植物（根や地下茎も含む）の表面にすむ微生物の働きで水質浄化をはかることができる。ヨシを用いて浸透流れ方式にしたものを特別にヨシフィルターと呼んでいる。この点ではろ材を利用したバイオジオフィルターと類似している。異なる点は，バイオジオフィルターは野菜などの根が腐らないように好気条件を維持する必要があるが，ヨシフィルターは嫌気的な土壌でもヨシの根が成長するので，硝化・脱窒が期待される。

表面流れ方式湿地

ヨシを中心とした湿地（約1,200 m²）による生活雑排水の浄化事例（細見・須藤，1991；Hosomi

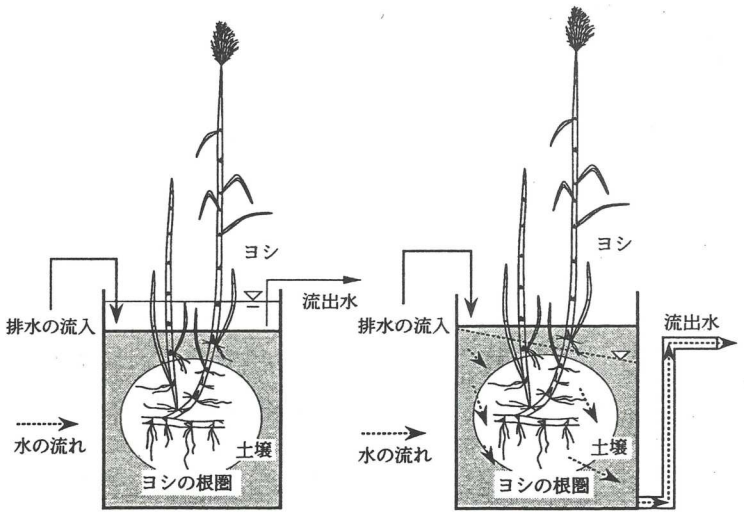


図2　表面流れ方式と浸透流れ方式.

表1　ヨシ湿地における流入水質及び流出水質（1986年～1989年）.

項　目	流入水質	流出水質	除去率
水量（m3/日）	38.9	35.9	−
BOD（mg/L）	77.3	4.4	95%
COD（mg/L）	33.6	7.5	79%
TOC（mg/L）	42.5	6.8	85%
T−N（mg/L）	6.2	2	70%
T−P（mg/L）	0.97	0.23	78%

& Sudo, 1994）を以下に示す。表1は，住宅地区からの生活雑排水が流入する地点と湿地から流出する地点での4年間の平均水質と除去率を示している。この湿地は表面流れ方式である。既に調査を始めた時点でこの湿地は，10年余り生活雑排水を受け入れていた。流出水質は，流入水質に比べかなり低く，湿地の浄化能力が大きいとがわかる。除去率でみると，BODでは95%であり，その他の有機物関連項目も80%以上と高い処理性能である。これらから年平均の湿地による水質浄化能力（1日当たり湿地面積当たり）を評価すると，BOD 2.3 g/m²/日，COD 0.85 g/m²/日，TOC 1.1 g/m²/日，全窒素 0.13 g/m²/日，全リン 0.024 g/m²/日が得られる。冬季には確かに浄化能力が若干低下するが，上記の年平均値と比べれば窒素を除けばほとんど差がない。これらの水質浄化能力から必要な処理面積が推定される。

課題としては，適切な水深を決める必要がある。深くとれば滞留時間を長くとれるが，そのかわり嫌気的になりやすく，植生も変わる可能性がある。冬には排水が流入する部分でかなり汚物が蓄積されて，景観や悪臭の問題が生じた。またハエ，カなどの発生による問題が指摘されている。この解決策として，流出水を再び流入側に循環する方法が考えられる。もし硝化された流出水が循環されるならば脱窒も期待できる。

浸透流れ方式湿地：ヨシフィルター

ここでは実際の生活排水をヨシフィルターで処理した実験を紹介する（Hosomi *et al.*, 1995）。FRP製の水槽（95×80×60cm）をプラスチック板で半分に仕切り，2槽にしたうちの一方に黒ボク土，もう一方に川砂を敷き詰め，これら両方の土壌にヨシを植栽した。この水槽を下水処理場に設置した。この下水処理場は茨城県土浦市内にあり，約600戸の住宅から排出された生活排水を活性汚泥法により2次処理を行っている。この水槽に流入下水をヨシフィルター上端部からポンプ，タイマー，電磁弁からなる排水供給装置によって半連続的に流入し，ヨシの根圏を通す浸透流れ方式で下端部から流出させた。下水の水面積負荷は，0.05 m/日である。

実際の下水を流入させたときのT-N，T-P，BODに関する流入水質と流出水質データを基に，表2に除去率とヨシフィルターへの流入量，ヨシフィルターからの流出量，さらにはヨシフィルターでの除去量のうち，冬期に刈り取ったヨシで系外除去量をまとめた。BODについては，川砂系及

表2　下水流入系ヨシフィルターにおける窒素とリンの物質収支.

項　目	ヨシフィルター種の類	除去率	流入量［g］	流出量［g］	除去量［g］
全窒素	川砂系（T-N）	82%	453	92	361　(58.9)*
	黒ボク土系	89%	453	53	400　(82.8)*
全リン	川砂系	93%	51.7	3.4	48.3 (3.4)*
	黒ボク土系	96%	51.7	1.4	50.3 (16.7)*

* 括弧内の値は冬期に刈り取ったヨシで系外除去量とする.

び黒ボク土系ヨシフィルターの除去率は，それぞれ93%及び99%であった。ヨシの刈り取りによる窒素除去量は，ヨシフィルター全体での窒素除去量のうち，川砂系では16%，黒ボク土系では21%を占めていた。同様に，リン除去量についてみると，ヨシの刈り取り効果が川砂系では7%，黒ボク土系では9%を占めていた。表1の表面流れ方式に比べ，浸透流れ方式の方が窒素，リン，BODとも除去率が高い。

川砂系及び黒ボク土系のヨシフィルターにおける2年間の平均除去速度（g/m^2/日）は，BOD 7.7～8.0，T-N 1.2～1.4，T-P 0.17～0.18，であった。特に，窒素では，表面流れ方式と比べると10倍程度除去性能が向上した。これは，ヨシが地上部から茎，地下茎を通じて酸素を根に運ぶ能力を持っていることによる。輸送された酸素により根のごくまわりが好気的となり，排水中のアンモニアは酸化されて硝酸性窒素となる。しかし，根から少し離れたところでは嫌気的になっており，そこで排水中の有機物が効率的に利用されて，硝酸性窒素は脱窒されて窒素ガスとなる。窒素ガスは拡散で根の部分から地上部に輸送される。このように根や茎は窒素ガスや酸素の通気管として作用する（図3）。

浸透流方式のヨシ湿地における課題は，短絡流や目詰まりをいかに防げるかである。目詰まりで表面に湛水すれば表面流れ方式と同様の悪臭，カなどの問題が生じる。排水の流入口部での目詰まりを防ぐため，流出口部の水位を自由に調節できる構造が望ましい。窒素の除去速度を支配しているのは，硝化である。硝化を制限するのは根圏への酸素輸送速度であり，これを克服するために，間欠流入方式の有用性を確認する必要がある（Hosomi *et al.*, 1996）。

欧米での事例

Brix（1994）は，欧米各国で採用されている人工湿地のデータを収集し，水質浄化性能について整理した。具体的には，70の表面流れ方式の人工湿地と104の浸透流れ方式の人工湿地を対象として，湿地の規模（表面積），水面積負荷，流入水および流出水濃度の比較，除去速度定数，についてまとめた。

湿地の規模を表面積でみれば，浸透流れ方式では，ほとんどが1 ha以下で小規模のものが多いが，表面流れ方式では1～1000 haまで様々である。また，水面積負荷では，表面流れ方式の場合，

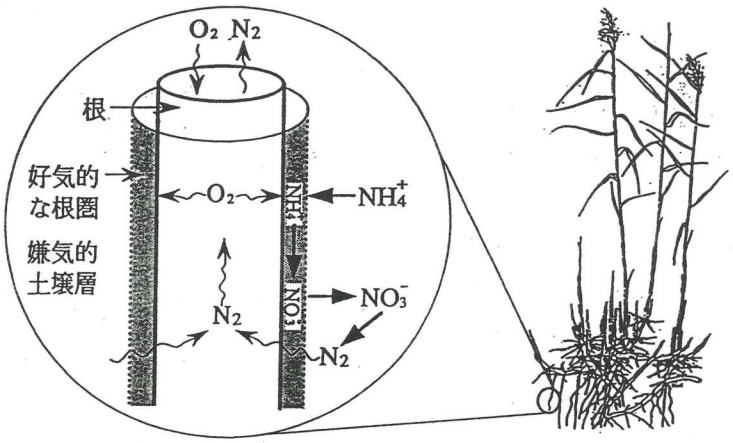


図3　ヨシの地下茎及び根圏における硝化と脱窒.

多くは0.05 m/日以下であるが，浸透流れ方式ではそれよりも高く，0.05～0.20 m/日のものが多い。

この様な人工湿地での窒素除去は主に硝化・脱窒による。硝化・脱窒過程においては，酸素供給能力が律則段階になることがよくある。すなわち，水生植物による大気中の酸素を根圏部へ輸送する能力が窒素除去率に影響を与える。浸透流れ方式では酸素供給能力を過剰に見積もられた結果，除去率が30～40%程度となっている。一方，負荷速度が小さい場合，表面流れ方式では50%を越えることもある。

湿地内での分解除去は，一次反応に従い，かつ湿地内の流れは押し出し流れにより支配されていると仮定すれば，流入濃度と流出濃度との関係は，(1) 式のようになる。

$$C_{out} = C_{in} \exp[-k/HLR] \qquad (1)$$

ここで，C_{in}：流入濃度 (mg/l)　C_{out}：流出濃度 (mg/l)　k：1 次反応速度定数 (m/年)　H
HLR：面積負荷速度 (m/年)

(1) 式を変形すると，(2) 式のようになる。

$$k = HLR \ \ln[C_{in}/C_{out}] \qquad (2)$$

(2) 式から，流入濃度と流出濃度，滞留時間から各湿地での分解速度定数k (この場合，速度定数，面積負荷速度共に m/年としている) を求めることができる。

著者が検討したヨシ湿地での汚染指標毎の一次反応速度定数を求めた結果を表3にまとめた。この結果は先述した式 (2) を用いて算出した。また，同時に Brix[12] によって104の浸透流れ方式で計算されたk値も示した。Brix[12] が引用した浸透流れ方式の人工湿地と比較すると，今回の調査結果はいずれの項目においても高いk値を示した。また，川砂と黒ボク土とを比較をすると，黒ボク土の方が浄化効果が高い土壌であることがわかる。

人工湿地生態系の創出技術－ヨシの植栽方法

ヨシ湿地生態系を創出するためには，まず，ヨシを植栽することが基本技術となる。ヨシの植栽手法は1) 茎植え，2) 地下茎植え，3) ブロック植え (株植え)，4) 播種，5) 種子苗植えの5つが考えられる。1) ～3) のようににヨシの根茎を利用した工法は数多く研究されている (Bittmann, 1995；桜井，1991) が，植え付け用のヨシを得るために現存のヨシ原を破壊しなければならないこと，切り口の処理および運搬が困難であること，植栽作業が大変であること等の欠点がある。また，浚渫ヘドロ上での植栽作業を考えると，その作業が一層困難となることが予想される。広範囲のヨシ原を創出するうえでは必ずしも最善の方法とは言えない。

4) の播種は，八郎潟の埋立干拓の際に当初，ヨシの蒸発散能力を利用する目的でヨシ種子を大量播種した例があり，目的は違ったが実際に広範囲にヨシ湿地生態系を創出することができたとされている。ただ，詳細な結果については報告され

表3　ヨシフィルターと浸透流れ人工湿地の一次反応速度定数.

ヨシフィルター及び湿地の種類	kBOD [m/yr]	kT-N [m/yr]	kT-P [m/yr]
川砂ヨシフィルター*	59	27	46
黒ボク土ヨシフィルター*	82.5	33	60
浸透流れ方式人工湿地 (Brix,1994)	39.3	12.7	6.6

* 流入・流出濃度は平均値を使用，滞留時間は18.25 m/yr.

ていない。また，水域を対象にする場合，種子が定着しにくいことから目的場所に創出するのが難しく，発芽後湛水するとすぐに枯れてしまう可能性があるので着種場所をしっかりしないと創出は困難である。

5）の種子苗植えは，ここで紹介する手法で，ヨシ苗は腐葉土からなる簡易土壌などに種子を播種して育ち，創出する場所の水位よりある程度高く成長した状態で植栽を行う。育苗場所の確保や手間などに工夫が必要であるが，それらを改善できれば茎植え手法の問題点を解決でき，ヨシ湿地生態系の創出に有効な一手法になる。

種子苗植えによる植栽手法の検討

ここでは浚渫ヘドロを利用したヨシ湿地生態系の創出技術の確立が目的である。そこで，ヨシの植栽に必要な大量のヨシを供給する技術として，ヨシを種子から発芽させて育苗する技術ならびに浚渫ヘドロへのヨシ植栽手法に関する基礎的な実験を行う必要がある。特に，この手法の基礎となるヨシ種子の発芽に関してはまだ未解明な部分が多い（Kim *et al.*, 1985；高橋・近藤，1991）ので，ヨシ種子の発芽率向上を目的とした低温処理方法，ヨシ種子の発芽に及ぼす照度変化条件，温度条件，塩分濃度の影響についての検討が重要である。

ヨシ種子の発芽試験

ヨシ種子として，淡水域で生育しているヨシから採取した種子を晩秋に採取する。発芽試験には籾の状態で使用し，ピンセット等で籾のなかに種子が入っていると確認されたものを用いる。籾の中に種子が入っている割合は，通常30～40%である。塩水は，自然海水を蒸留水で設定条件の塩分濃度に希釈したものを用いる。発芽試験では，ガーゼを3枚敷いたシャーレにヨシ種子100個を播き，水位が約5mmになるまで蒸留水あるいは塩水を入れる。

低温処理の効果

ヨシの発芽効果を高める方法として，低温処理がある。低温処理方法として，ヨシ種子を1）蒸留水に浸して14日間5℃の恒温室に保存，2）蒸留水に浸して5日間5℃の恒温室に保存，3）蒸留水に浸して3日間5℃の恒温室に保存，4）蒸留水で希釈した塩分濃度0.5%の自然海水に浸し，14日間5℃の恒温室に保存，5）蒸留水で希釈した塩分濃度0.5%の自然海水に浸し，5日間5℃の恒温室に保存，の5条件で処理する。その後，31℃，24時間明条件（照度2200lux　白色蛍光灯）のもとで，前記1）～3）については蒸留水に，4）及び5）については塩分濃度0.5%の自然海水に浸して発芽試験を行い，各低温処理方法の発芽への影響の違いを比較する。もちろん，低温処理をしない対照系も設ける。

各低温処理方法について低温処理開始日からの経過日数と発芽率との関係を図4に示す。

種子を蒸留水に浸した系において低温処理開始後21日目の発芽率に着目すると，低温処理を施した種子と未処理の種子はともに92～98%と，大きな差がみられない。しかし，各条件ごとの発芽率の経日変化に着目すると，5日間及び14日間，低温処理を施した種子の場合，1日目及び2日目の発芽率は，それぞれ20%及び94%，55%及び96%であるのに対し，未処理の種子では，0%及び64%である。

また，塩分濃度0.5%の自然海水に浸した系では，低温処理開始後21日目の発芽率が，処理日数14日間で88%，処理日数5日間で94%，そ

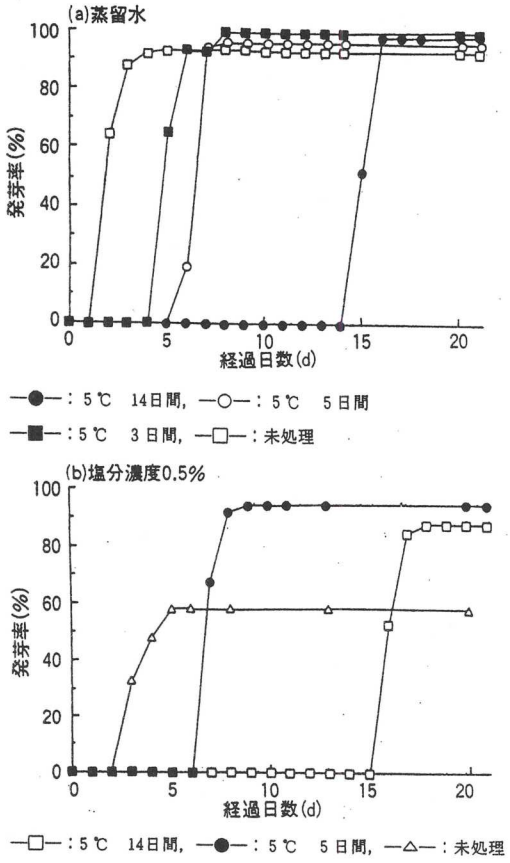


図4 低温処理日数と発芽率との関係.

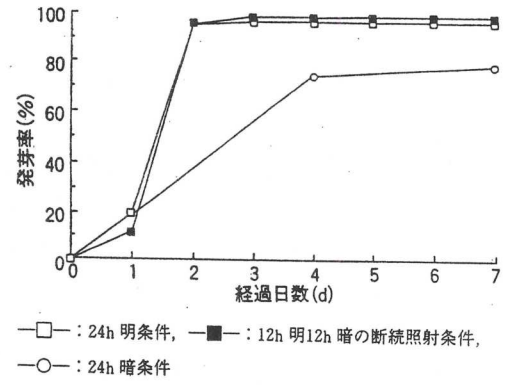


図5 発芽率に及ぼす光の影響.

れに対して未処理では59%となり，低温処理を施した種子の発芽率が未処理の種子の発芽率よりも高く，処理日数5日間の種子が処理日数14日間の種子よりもやや高い。

以上の結果から，発芽率を高めるためには，ヨシ種子を蒸留水に浸した状態で5℃で5日間保存する低温処理を施すことが望ましいと言える。

光の効果

ヨシ種子を上記の低温処理を施した後，24時間明条件，12時間明12時間暗の断続照射条件，24時間暗条件の3条件で試験を行い，31℃の恒温室で発芽への影響を調べる。

光条件と発芽率の関係を図5に示す。24時間明条件下と断続照射条件下では，ヨシ種子の7日目の発芽率がそれぞれ97%，98%で両者の差は認められない。しかし，暗条件下におけるヨシ種子の7日目の発芽率は79%となり，前の2条件の発芽率を下回る。これらの結果から，ヨシは明発芽性であるが，照射条件によって影響を受けないと考えられる。

温度の効果

低温処理を施した後，温度条件を15.5℃，23℃，26.5℃，31℃，34℃の5段階に設定し，24時間明条件（照度2200lux 白色蛍光灯使用）において発芽実験を行う。

ヨシ種子の発芽率の経日変化を図6に示す。10日目以降の発芽率はほぼ一定であるので，温度をパラメーターにして10日目の発芽率で整理すると，15.5℃，23℃，26.5℃における10日目の発芽率は，温度が高くなるに伴い，それぞれ8%，63%，93%と高くなる。しかし，26.5℃以上の温度では発芽率に大きな差（93%～98%の範囲）がみられない。これらの結果から，培養温度を30℃前後にすれば，90%以上の発芽率が期待できる。

塩分濃度の効果

低温処理を施した後，ヨシ種子を蒸留水と，蒸留水で塩分濃度0.5%，1.0%，1.5%に希釈した自

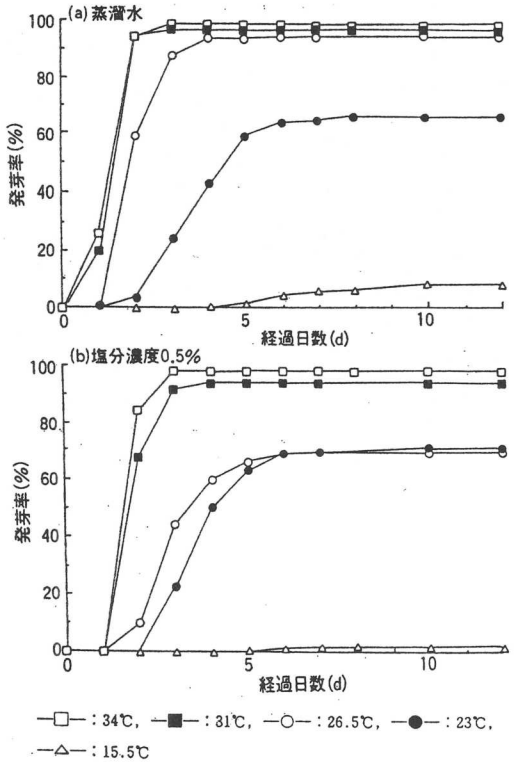


図6　発芽率に及ぼす温度影響.

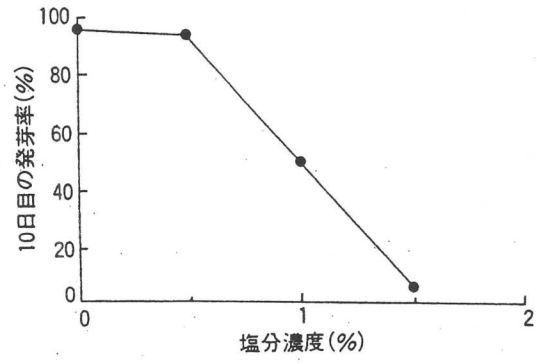


図7　発芽率に及ぼす塩分濃度の影響.

然海水の4系にそれぞれ浸して，温度条件は31℃，光条件は24時間明条件として発芽試験を行う。

10日目以降の発芽率はほぼ一定となるので，図7に塩分濃度と10日目の発芽率の関係を示す。発芽率は，塩分濃度が0％と0.5%ではほとんど差がないが，塩分濃度が1.0%に上がると発芽率が約半分に低下し，1.5%では発芽率が10%未満となる。このように塩分濃度は，発芽率に大きな影響を及ぼすので，淡水条件，あるいは塩分濃度として0.5%以下に保持する必要がある。

ヨシの種子発芽によるヨシ苗供給の可能性

以上の結果をまとめると，採取したヨシの種子から発芽させる際に，低温処理を施した上で，30℃前後の温度条件と明条件（断続照射でも可）を満たし，塩分濃度が0.5%以下であれば，発芽率が90%以上となる。これらの環境条件は，比較的容易に維持することが可能であるので，前年度の晩秋（ただし，採取にあたっては注意が必要で，時期が遅くなれば飛散して種子が得られないことがある）に採取したヨシの種子から発芽させて大量のヨシ苗を容易に供給することが可能である。

浚渫ヘドロへのヨシ植栽方法

ヨシの植栽方法については，Bittmanや桜井によって，従来から使用されている方法として，既存のヨシ湿地から採取したヨシ茎を用い，成長に必要な根茎を残して移植する方法（以下「茎植え」と呼ぶ）と，新しく提案する方法で，ヨシの種子から発芽させて育苗した苗を移植する方法（以下「苗植え」と呼ぶ）を比較する。

「苗植え」の苗の育成方法ついては，図8に示すように，採取したヨシの種子を市販の育苗用土壌（商品名：ジーフィーセブンで1個数円程度）に蒔き，水切りアミにのせて，パット内に入れて，育苗する。ヨシ種子の発芽条件を参考に，低温処理を施した上で，グリーンハウス内の室温25±2℃で行う。ここでは，軟弱で水分を多量に含む浚渫ヘドロ上にいかにヨシ苗を植栽するのかという観点から，市販の育苗用土壌を使用する。市販

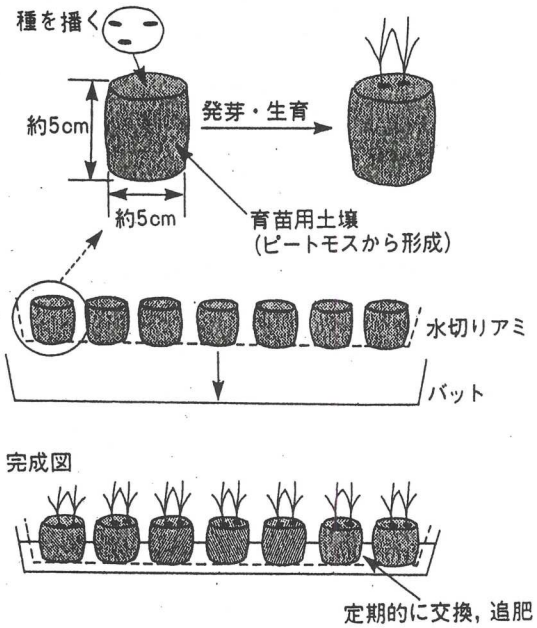


図8　ヨシ根の育成方法.

の育苗用土壌を使用すれば，ヨシ苗が生育した状態でそのまま浚渫ヘドロ上に投入が可能であることが予備試験で証明されたからである。また，育苗用の水は，実際には大量の種子を容易に育苗する観点から，水道水に液肥（ハイポネックス）を2000倍に薄めて添加したものを使用し，水は月に1～2回程度定期的に交換し，追肥して育苗する。浚渫ヘドロに移植する苗は，30 cm 程度に生育させた苗を用いる。

浚渫ヘドロへのヨシ植栽実験装置の概要を図9に示す。日照条件が良い屋外に幅 40 cm，奥行き 120 cm，高さ 80 cm のヨシ植栽用タンク（2槽）を設置する。各槽に，霞ヶ浦の浚渫工事現場から採取した浚渫ヘドロを高さ 60 cm となるように充填し，以下のようにヨシを植栽する。

5月初め頃，右側ヨシ植栽用タンクを「茎植え」，左側を「苗植え」とし，「茎植え」は2列×6株＝12本，「苗植え」は2列×9苗＝18苗，それぞれ植栽する。但し，1苗はヨシを1～3株有してい

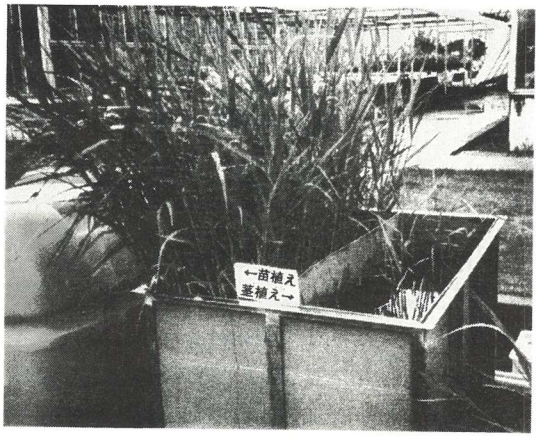


図9　ヨシ植栽実験装置の写真.

るため，ヨシの株は，総本数は45本となり，「茎植え」の4倍弱の本数となる。「茎植え」では，田植えの要領で浚渫底泥に1本1本直に差し込む。「苗植え」は，実際の施工時には，広い面積の軟弱地盤である浚渫底泥に植栽することを前提としているので，ここでは，種子から発芽させて育苗した苗をそのまま育苗用土壌ごと浚渫底泥の表面に軽く投入れる。

「茎植え」による植栽

「茎植え」による浚渫ヘドロへの植栽結果を図10に示す。図に示した生育高さは，植栽したヨシが活着して生育し，その生育したヨシの高さの平均値を示す。総本数は，植栽したヨシの茎根から新しく伸びた芽が生育し，その生育したヨシの総本数を示す。一株当たりの平均分けつ数は，当初植栽したヨシ1株が，ヨシが生育することによって，何倍に増えたかを示すものとして定義している。得られた結果は以下のようである。

5月初旬に植栽したヨシ12株の地上部は，一旦枯れて新たに7株が出芽し，その後順調に生育した。移植した初期においては，発芽生育はあまり芳しくないが，6月半ば頃から発芽生育し始め，10月には，生育高さは1 m を越える高さとなっ

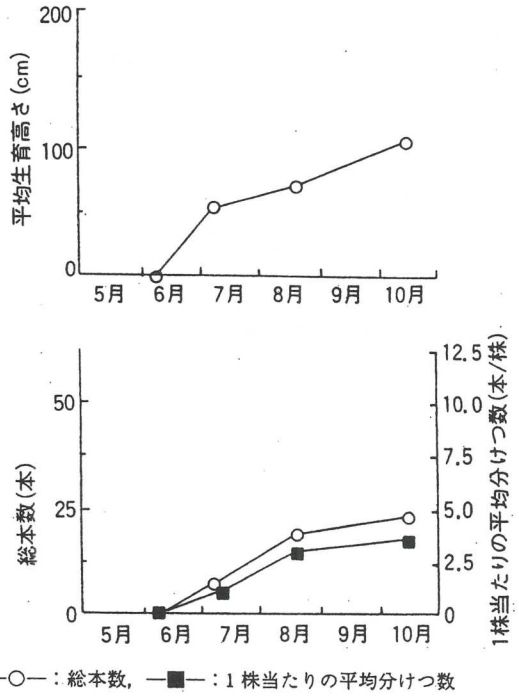


図10 浚渫ヘドロに「茎植え」したヨシの生育.

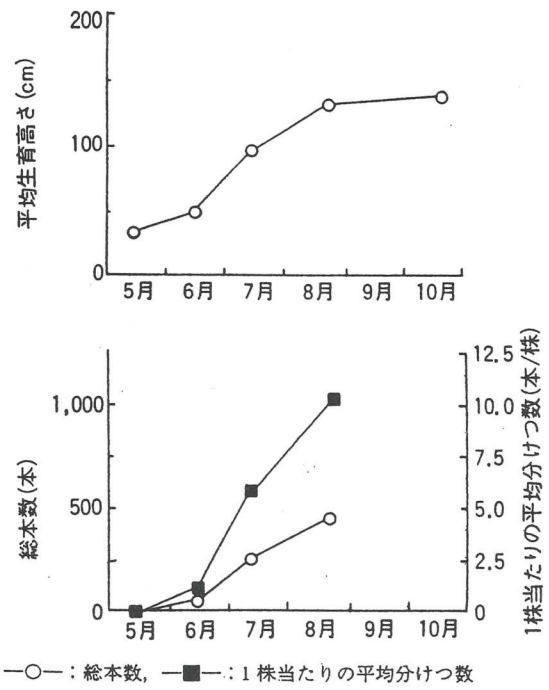


図11 浚渫ヘドロに「苗植え」したヨシの生育.

た。ヨシの総本数は24本まで増加し，一株当たりの平均分けつ数も3本/株と当初の3倍となった。活着率が58%と低かった理由としては，移植した根茎の状態にばらつきがあることが影響しているものと思われる。したがって，活着率を向上させるためには，根茎を採取する時に根を傷めないこと，運搬・保管時に乾燥させないこと等の慎重な取扱いが必要と考えられる。根茎を土も一緒に固まりとして採取して移植する方法も考えられるが，ヨシの採取に甚大な労力を要するうえ，採取場所のヨシ湿地を損傷する恐れもある。

「苗植え」による植栽

「苗植え」による浚渫ヘドロへの植栽結果を図11に示す。移植したヨシ18苗はすべて活着し，生育高さは，10月には平均して150 cm近くまで達した。ヨシの総本数は8月には500本近くまで達し，一株当たりの平均分けつ数は10本/株以上となり，当初移植した45株が，10倍以上に増加したことを示している。

浚渫ヘドロへのヨシの植栽方法の比較

「苗植え」は「茎植え」に比べ，活着率が良く，活着したものも順調に生育したことから，ヨシの移植方法としては確実な方法であると考えられる。さらに，「苗植え」の場合，ヨシの種子を採取するための労力が少なく，採取場所のヨシ湿地を損傷することがないため，既存の湿地生態系への影響が少ない。したがって，ヨシ湿地を人工的に創出するために，大量のヨシを供給し植栽する方法として，種子から発芽生育させた苗を植栽する「苗植え」は実用性が高い方法であると考えられる。

さらに，浚渫ヘドロを利用する観点から，実際の植栽については，水分を多く含む軟弱な地盤での植栽作業を考慮する必要がある。ここで使用し

た育苗用土壌における種子の発芽率は，シャーレを用いた発芽試験結果とほぼ同様の80%以上が得られている。従って，1個の育苗用土壌に対して，数粒の種子を蒔くことにより，ほとんど全ての育苗用土壌についてヨシ苗を得ることができる。しかも，生育したヨシ苗は，そのまま浚渫ヘドロ表面に投入することができるので，軟弱地盤での作業が容易になると予想される。

また，1年後にヨシ植栽用タンクからヨシを取り出して見たところ，ヨシ植栽用タンクの底部のすみずみまでヨシの根茎が発達しており，とぐろを巻いている状態であった。浚渫ヘドロは採取した時には黒灰色であったものが赤茶色になっており，中空構造となっているヨシの地下茎を通じて，浚渫ヘドロの中に酸素が供給され酸化されたものと考えられる。このことから，湿地の基盤土壌として，また浚渫ヘドロの処理処分，ヘドロの改善効果を合わせて有効に活用できると考えられる。

おわりに

生物を用いた水質浄化は，エネルギーをそれほど必要とせず維持管理が容易であることから安価で地球にやさしい方法である。しかし，必要とする面積は，活性汚泥法等の装置型に比べれば大きい。さらに，浄化の基本が生物であるので，当然温度や日照条件などの影響を受ける。したがって，水生植物を用いた水質浄化法の限界も知っておく必要がある。しかし，植物が枯れ，温度が低下する冬の浄化能力については，ヨシを用いた方法では夏に比べ若干低下するものの依然として高いことは注目される。今後，ヨシを用いた水質浄化法の実用化が期待される。

ヨシを種子から発芽させて育苗して植栽手法により，浚渫ヘドロを利用したヨシ湿地の創出が可能である。ヨシ種子の発芽に際しては，低温処理を施した上で，30℃前後の温度と明条件（断続照射でも可）を満たし，塩分濃度が0.5%以下であれば，発芽率が90%以上となる。これらの環境条件は，比較的容易に維持することが可能であるので，前年度に採取したヨシの種子から発芽させて大量のヨシ苗を容易に供給することが可能である。

また「苗植え」は「茎植え」に比べ，浚渫ヘドロへの活着率が良く，活着したものも順調に生育する。さらに，「苗植え」の場合，ヨシの種子を採取するための労力が少なく，採取場所のヨシ湿地を損傷することがないため，既存の湿地生態系への影響が少ないので，種子から発芽生育させた苗を植栽する「苗植え」は実用性が高い方法であると考えられる。

参考文献

Bittmann, E. (1965) der biologische Wasserbau an den Bundeswasserstrassen, Bundesanstalt fur Gewasserkunde Koblenz, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 17－28.

Brix, H. (1994) Use of constructed wetlands in water pollution control: Historical development, present status, and future perspectives, Water Quality International '94, Vol.4, 245－259.

細見正明（1990）湿地による水質浄化，用水と排水，32，716－719.

細見正明，須藤隆一（1991）湿地による生活排水の浄化，水質汚濁研究，14，674－681.

細見正明（1992）湿地による水質浄化，水，34，61－68.

Hosomi, M., Murakami, A., and Sudo, R. (1994) A four-year mass balance for natural wetlane system receiving domestic wastewater. Water

Science and Technology, 30, 235－244.
細見正明（1994）ヨシ人工湿地による水質浄化法，用水と排水，36, 40－43.
Hosomi, M., K. Kisaka, Y. Nakagawa, M. Yumiki, and A. Murakami (1995) Three-year treatment performance of reed filter bed systems used for domestic wastewater and secondary effluent, International Conference on Natural and Constructed Wetland for Wastewater Treatment and Its Reuse, Natural and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Reuse-Experiences, Goals and Limits R. Ramadori, L. Cingolami, L. Cameroni(ed.) Perugia, pp. 151－160.
Hosomi, M., K. Kisaka, Y. Nakagawa, M. Yumiki, and A. Murakami (1996) Behavior of pollutants in vertical Subsurface flow wetland systems with intemitted lodings, 5th International Converence on Wetland Systems for Water Pollution Control, Vienna, Austria (15－19 September 1996) I /14-1-18.
細見正明，吉ヶ江隆廣，樫内孝信，須藤隆一（1997）浚渫ヘドロを用いたウェットランドシステムの開発に関する基礎的実験－人工ヨシ湿地の創出，用水と廃水，39, 580－586.
Kim. K. S., Moon. Y. S., Lim. C. K. (1985) Effect of sodium chloride on germination of Atriplex gmelini and Phragmites communis, Korean J. Botany, 28, 253－259.
岡田光正（1994）湿地の特性とその機能，水環境学会誌，17，142－148.
桜井善雄（1991）抽水植物群落復元技術の現状と課題，水草研究会会報，43，1－8.
高橋新平，近藤三雄（1991）水辺の緑化に関する実験的研究：日本緑化工学会誌，16，31－38.
U. S. EPA (1988) Constructed Wetlands and Aquatic Plants Systems for Municipal Wastewater treatment. U. S. EPA. ORD CERI, EPA/625/1-88/022.