ヨシによる栄養塩除去機能に関する研究

細井 由彦*・城戸 由能*・橋本 一郎**・今嶋 美幸***

1. ま え が き

ヨシ原には、以前から高い水質浄化能力があることが経験的に知られており、水辺の環境の保護にも役立つため、近年大きな注目を集めている。本研究では、ヨシ固有の水質浄化能力に着目し、はじめにヨシの栄養塩吸収能力を測定するための水耕栽培実験、次に底泥からの栄養塩溶出をヨシがどの程度制御できるか評価するための溶出実験を行った。この二つの結果から、ヨシ原間隙水中の栄養塩の挙動を数値計算により分析し、ヨシ原内におけるヨシ自身による栄養塩の吸収除去効果について検討した。

2. ヨシの栄養塩吸収特性

2. 1 ヨシによる栄養塩吸収に関する実験

本実験はヨシの水耕栽培を行い、実験期間中に栽培液に含まれる窒素・リンの濃度を測定することで、ヨシの栄養塩の吸収特性を調べるものである。実験に用いるヨシは、鳥取市湖山池の岸辺の湿地で群生していたものの中で高さ 50 cm ぐらいのものをを選び、周囲を約 30 cm の深さまで掘り、地下茎や根ごと採取する。地下部分を傷つけないように土を洗い流し、蒸留水に半日漬けた後実験に使用する。栽培液は、実験の目的に応じて蒸留水にリン酸・アンモニア性窒素・亜硝酸性窒素・硝酸性窒素の 4 つの無機栄養塩を加えて作成し、これ以外の栄養物は加えない。穴のあいた蓋付きのプラスチック製のポットをまわりからアルミホイルで覆って中に光が入らないようにし、この中に栽培液を入れる。蓋の穴からヨシを差し入れ、穴の隙間を綿栓する。光の条件は、3000 ルックスの明かりを 16 時間照明後 8 時間消灯のサイクルで与えた。実験開始後

は、毎日または 1 日おきに栽培液を採取し、上記の 4 種の無機栄養塩についてその濃度を測定する。対照実験のため、ヨシを栽培するポットとともに、同じ栽培液を与えるがヨシを栽培しないブランクのポットも用意し、ヨシを栽培したポットと比較する。これら実験方法は、細川らの実験を参考としている¹⁾。1 回の測定につき 50ml の栽培液を採水した。測定濃度と残っている栽培液の量からその時点での容器中に残っている窒素、リンの量を計算し、ブランクによる補正を行った上で実験期間中のヨシの窒素・リンの吸収量を求める。

2. 2 実験結果

図 1 は栽培液中の窒素濃度の変化の 1 例を示して

図 1 水耕栽培実験の結果

図 2 窒素濃度による窒素吸収速度の変化 No. 1

*鳥取大学工学部 Yoshihiko HOSOI, Yoshinobu KIDO

**徳長大 Ichiro HASHIMOTO

***修成建設コンサルタント(株) Miyuki IMAZIMA

いる。ヨシはアンモニア性窒素から先に吸収していることがわかる。

またアンモニア性窒素の吸収速度は硝酸性窒素の吸収速度の2～5倍程度であった。図-2は、栽培液中の窒素濃度でヨシの窒素吸収速度を示したものである。本図より窒素吸収速度は次式で表すことができる。

$$q = 0.479C \quad (1)$$

q : 窒素吸収速度(mg/day) C : 窒素濃度(mg/l)

2. 3 ヨシ原の面積あたりの栄養塩吸収能力の算定

水耕栽培によるヨシ1本あたりの栄養塩吸収能力の評価は、ヨシの地下部の密度を考慮していない。そこで砂の入った容量5リットルの栽培ポットにて半年間栽培した後、冬期になって地上部が枯れ落ちたヨシの地下茎を用いて、室内にて水耕栽培実験を行った。実験に使用するヨシには、地下茎及び根を傷つけないよう細心の注意を払って底質を洗い流した後、室温を20℃に保った研究室にて5日間実験環境に慣らす前処理を施した。この準備期間の間に、ヨシの地下茎から新芽の成長が確認された。実験に使用したヨシの湿重量は125g、栽培ポットの底面積は380cm²、栽培液の初期栄養塩濃度は窒素1.0～2.0mg/l、リン0.50mg/lであり、栽培液量は5リットルである。吸収速度の測定は、初期濃度を測定後2～3時間おいて再び濃度測定を行い、その間の濃度差から吸収速度を計算した。

ヨシの栽培面積からヨシ原1m²あたりに換算したヨシの窒素・リンの吸収速度は、窒素で最大1440mg/day（初期窒素濃度1.95mg/l）から692mg/day（初期窒素濃度0.60mg/l）、リンで最大246mg/day（初期リン濃度0.50mg/l）から85.4mg/day（初期リン濃度0.48mg/l）であった。

図-3は、窒素吸収速度を縦軸にとり窒素濃度を横軸にとって表したものである。最小二乗法により近似直線を計算した結果、傾き29.9の結果を得た。1m²

図3 窒素濃度による窒素吸収速度の変化No.2

あたりに直した傾きは786であり、1m²あたりのヨシ原の窒素吸収速度 q^* は(g/m²/day)次の式のようにになる。

$$q^* = 0.786C \quad (2)$$

3. ヨシによる栄養塩溶出制御効果

ヨシの栄養塩吸収は、地下茎から伸びる根によって底質間隙水から行われる。水中から直接栄養塩を吸収しているホテイアオイなどの植物なら、水耕栽培実験の結果を実際の栄養塩吸収速度として評価することが可能である。しかしヨシの栄養塩吸収による水質浄化能力は、単純な水耕栽培実験の結果からのみ判断することはできない。そこでヨシを底質に植え、水を加えたより自然に近い条件で栽培した場合の水質浄化能力を検討するための実験を行う。また実験結果に基づく数値計算モデルにより、ヨシ原の窒素吸収能力について考察する。

3. 1 栄養塩溶出制御実験

実験の概要を図-4に示す。ヨシを栽培する容器は水耕栽培実験に用いたものと同じプラスチック製ポットを用い、底質として体積間隙率50%の砂を用意する。栽培ポットには、底質をポットの底面から10cmの高さまで入れる。底質間隙水は、窒素濃度1.0mg/l、リン濃度0.1mg/lである。この底質中にヨシを植え付ける。実験に用いるヨシは、湖山池の湖畔にて地下茎や根を傷めないように底質ごと採取したものを大学内で栽培し、高さ20～30cm程度にまで成長したものをを用いた。直上水には、蒸留水を与える。また対照実験のため、同じ底質と直上水を入れ、ヨシを栽培しないブランクのポットを用意し、ヨシを栽培した場合と

図4 栄養塩溶出制御実験

比較する。

底泥からの容出を、容器中にある直上水の水質の変化から観測する。測定項目は、アンモニア性窒素・亜硝酸性窒素・硝酸性窒素・総窒素・リン酸・総リンの6項目である。測定は1～3日おきに行い、1回の測定につき150 mgの直上水を採水した。測定方法は水耕栽培実験と同様である。直上水の栄養塩測定濃度と残存量から、その時点での直上水中にある栄養塩量を知ることができる。実験開始後、この直上水中の栄養塩量の変化より、底質から直上水への栄養塩溶出量を求め、ヨシを栽培している場合と栽培していない場合（ブランク）とを比較して、ヨシの栄養塩溶出制御効果を評価する。

3. 2 結果

実験結果の一例を図-5に示す。ヨシの栽培していないブランクのポットでは、底質からの窒素の溶出により窒素濃度が大きく上昇しているが、ヨシを栽培したポットでは窒素濃度が変化していない。窒素に関してヨシの溶出制御効果はかなり大きいものと期待できる。

リンについては、ヨシの栄養塩吸収速度が大きいことも影響して溶出制御効果をはっきりと確認することができなかった。実験全体としてブランクのポットでも、リン残存量が時間に対して右下がりになる結果が多かったことから、底質による吸着の効果が大きかった可能性が考えられる。

ブランクポットの直上水中栄養塩残存量から、ヨシを栽培したときの直上水中栄養塩残存量を引いたものを、ヨシによる溶出制御量とする。最大で0.19 (mg/day)の溶出抑制効果が確認できた。

3. 3 数値計算によるヨシの溶出制御効果の検討

先の栄養塩溶出制御実験の結果から、ヨシによる栄

図5 栄養塩溶出制御実験の結果

養塩溶出制御効果は、特に窒素についてかなり高いことが確認された。次にこれまでのヨシによる栄養塩吸収実験及び栄養塩溶出制御実験の結果をもとに、ヨシ原内底質中の窒素の挙動、及び直上水の窒素濃度の変化を有限要素法による数値計算により評価する。ここで未知のパラメーターとして、底質中の窒素の拡散係数Dと底質-水界面での窒素の交換係数kの2つがある。計算値と実験値との比較により、まずこの2つのパラメーターの同定を行う。

栄養塩溶出制御実験に用いた栽培ポット内の様子を、図-6のようにモデル化する（以下ポットモデルと呼ぶ）。栄養塩はヨシの根から吸収されるが、これを地下茎に集中させてモデル化している。奥行き方向の濃度の分布は一樣と仮定するので、2次元座標系で計算する。

ヨシ原内底質内間隙水中にある窒素には、濃度差により拡散作用が働く。また直上水と底質との境界面でも、濃度差による窒素の移動が行われる。これを表したのが次の式(3)、式(4)である。

$$\frac{\partial C^*}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C^*}{\partial X^2} + D \frac{\partial^2 C^*}{\partial Y^2} - q \quad (3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{h} k (C_0 - C) \quad (4)$$

D：拡散係数 K：物質交換係数 C^* ：底質間隙水物質濃度 C：直上水物質濃度 C_0 ：境界面底質側物質濃度 h：水深 q：ヨシの吸い込み速度で、ヨシの存在するところでのみ値をもつ

このポットモデルでは、窒素の硝化や脱窒といった水質浄化効果は含めず、ヨシ固有の栄養塩吸収同化機

図6 ポットモデル

能にのみ依存したモデルである。扱う窒素も溶存性の無機態窒素のみを対象とし、直上水内では窒素は完全混合の状態にあり、その濃度は均一であるとする。ヨシの吸い込み速度 q は、栄養塩吸収実験から得た結果をポットモデルに適用できるよう換算して使用する。

計算には有限要素法を用いた。²⁾ 拡散係数と交換係数を変えながら計算を行い、実験の測定値に近い計算値を出したパラメータを試行錯誤的に絞り込んでいった。結果として、拡散係数 $10 \text{ cm}^2/\text{hour}$ 、交換係数 $0.05 \text{ cm}/\text{hour}$ を採用した。この結果をもとに、ポットモデルの直上水の窒素濃度の変化の計算結果を図-7に示す。

3. 4 表層流れ方式のヨシ原の水質浄化能力の検討

これまでの結果を用いて、表層流れ式の人工ヨシ原で窒素除去を行った場合の効果について検討する。直上水の窒素濃度が常に一定なら、ヨシの吸収により直上水中から底質間隙水中へ移動する窒素の量も一定になる定常状態が存在する。直上水の窒素濃度がある値のときの、底質間隙水中への窒素の吸い込み速度を $S \times C$ という関数で表す。 S は底質への吸い込み係数、 C は直上水窒素濃度である。吸い込み係数 S を求めるため、先のポットモデルを使用する。常に直上水の濃度を一定に保ちながら、底質への窒素吸い込み速度が定常になるまで計算した。その結果、1ポットあたりの吸い込み速度係数は $S_{\text{ポット}} = 0.0146 \text{ l}/\text{hour}$ の値を得た。ただし吸い込み速度 $S_{\text{ポット}} \times C$ の単位は、 mg/hour である。 $S_{\text{ポット}}$ の値を 1 m^2 あたりに換算する。ポットの面積は 0.0136 m^2 である。吸い込み速度の単位が $\text{g}/\text{m}^2/\text{hour}$ になるように換算すると、 $S = 1.03 \times 10^{-3} \text{ m}/\text{hour}$ である。底質への窒素吸い込み速度は

図7 数値計算によるポットモデルの直上水窒素濃度の変化

$q_d \text{ g}/\text{m}^2/\text{hour}$ は式(4)のようになる。

$$q_d = 1.03 \times 10^{-3} C \quad (4)$$

直上水中に存在する窒素量の変化は、次の式で与えられる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = - \frac{S C}{h} \quad (5)$$

これを解いて流出端 ($x = L$) における濃度は次の式になる。

$$C = C_0 e^{-\frac{SL}{uh}} \quad (6)$$

流速 u は、流入量 Q ・ヨシ原の幅 B ・水深 h より

$$u = \frac{Q}{Bh} \quad \text{よって式(6)は次のようになる。}$$

$$C = C_0 e^{-\frac{BSL}{Q}} \quad (7)$$

C_0 : 流入水窒素濃度

式(7)より除去率 R を求める式を導出する。

$$R = 1 - e^{-\frac{BLS}{Q}} \quad (8)$$

図-8は流入水量/ヨシ原面積の比率による、ヨシ原の窒素除去率である。

ポットモデルでは、底質への窒素の吸い込みはすべてヨシによる吸収の効果であるので、直上水から底質への吸い込み速度係数 S は窒素の栄養塩吸収速度係数と同じ意味である。ポットモデルによる窒素除去率を既存の研究と比較する。細見による茨城県新治郡八郷町のヨシやガマが生息する休耕田(流入水量 $38.9 \text{ m}^3/\text{day}$ 、流入水窒素濃度 $6.2 \text{ mg}/\text{l}$ 、面積約 1200 m^2)での観測結果では、総窒素の除去率は70%であった。年平均窒素除去速度は、 $0.13 \text{ g}/\text{m}^2/\text{day}$ である。水生植物による窒素の除去効果は、除去速度 $0.082 \text{ g}/\text{day}$ 、除去率約44%である^{3) 4)}。式(8)よりこのヨシ原のヨシ自身の窒素除去率は、53%である。したがってほぼ

図8 ヨシ原の窒素除去率

現地観測の結果も表わし得ていると考えられる。

3. 5 ま と め

ヨシによる窒素溶出制御実験の結果、ヨシは窒素に対して最大 0.19 mg/day という高い溶出制御効果を持つことがわかった。実験結果を基にしたポットモデルによる数値計算より、ヨシ原底質中の窒素拡散係数は $10 \text{ cm}^2/\text{hour}$ 、底質-水界面での交換係数 0.05 cm/hour の結果を得た。表層流れ方式のヨシ原の窒素除去率について、式(8)を定式化した。吸い込み速度係数 S は、 $1.03 \times 10^{-3} \text{ m/hour}$ である。

4. あ と が き

ここではヨシによる水中の栄養塩の制御に関する基礎的検討を行った。これらの成果をもとにヨシ原現地

におけるヨシの挙動の観測を現在継続中であり、栄養塩コントロールのための最適な管理方法について検討を進めていく予定である。

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, p.212, 1991
- 2) 大西和榮, 林健次, 遠山洋, 二之宮弘: パソコンによる流れ解析, 朝倉書店, 1992
- 3) 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, 第14巻, 第10号, p.674~681, 1991
- 4) 細見正明: ヨシによる水質浄化, 土木学会衛生工学委員会編, 環境微生物工学研究法, p.353~356

酸性雨講演会

環境の酸性化による生態系影響

主 催: 大気汚染研究協会酸性雨分科会、酸性雨研究会

共 催: 大気汚染研究協会近畿支部・大気の測定と反応部会、気象拡散部会、エアロゾル部会、生物影響部会、人体影響部会、環境文化研究会、近畿地方大気汚染調査連絡会、環境技術研究協会 (一部交渉中)

日 時: 1995年7月12日 (水)
13:10~17:00 (開場: 12:50)

場 所: 大阪府立労働センター [エルおおさか]、大会議室
(大阪市中央区北浜東3-14、☎06-942-0001)
(地下鉄谷町線、京阪電鉄・天満橋駅下車西へ5分)

講 演

- (1) 乾性沈着測定法の確立に向けて
一代表表面法、三段ろ紙法、デニューダー法、スクラバー法などの現状と課題—
玉置 元則 (兵庫県立公害研究所)
- (2) スウェーデンから見た酸性雨問題
小沢徳太郎 (スウェーデン大使館)
- (3) 環境の酸性化と森林・湖沼・河川の生態系
佐竹 研一 (国立環境研究所)

[総合討論]

講演会終了後、懇親会を行う予定です。

連 絡 先: 玉置元則 (654, 神戸市須磨区行平町3-1-27, 兵庫県立公害研究所 FAX: 078-735-7817, 参加者は必ず事前に葉書か FAX で申し込んでください。先着200名)