

ヨシによる沿岸域栄養塩除去に関する基礎的研究

細井由彦*・城戸由能**・橋本一郎***・三木理弘****

1. 緒 言

閉鎖性の海域や湖沼においては、富栄養化が水質環境上の大きな問題となって久しいが、いまだに有効な改善が行われているとは言えない。その環境保全を進める上で、流入する栄養塩の削減及び流入した栄養塩の水域からの除去が重要であることは言うまでもない。とくに近年生態系を利用した水質保全対策が注目されてきており、沿岸部においては湿地に生育しているヨシを利用することも考えられている。ヨシ原は野鳥などの生物の生息の場でもあり、また岸に入射する波を弱めるような波浪制御の効果なども期待され、水質制御に利用することができれば、自然を残した多目的な沿岸保全策となり得る。

ヨシ原の水質浄化能力に関してはすでにいくつかの研究が行われてきており、鈴木ら(1988)によりよくまとめられている。細見・須藤(1991)はヨシを中心とした水生生物が繁茂する湿地における水質浄化の現地実験を行い、物質収支より浄化機能を算定している。細川ら(1991)はヨシ原における栄養塩の吸収特性と、懸濁物の沈降特性について検討を加えている。栄養塩吸収については、現地ヨシ原におけるヨシの成長の観測からのアプローチと、室内実験による塩分濃度の影響について詳しい検討を行っている。

従来より報告されているヨシ原の水質浄化の要因は、ヨシによる栄養塩の吸収、ヨシ原内における滞留による沈澱、茎に付着した微生物の作用などが中心である。これらの要因について、現地における観測や室内実験により定量化の努力が行われている。しかしながら現地においては、時間のスケールが年規模になり、ヨシ原全体の特性が総括的に取扱われており、一方で実験室レベルでは数日間の栄養吸収特性に関する研究等が中心である。両者の間を関連づける所まではいたっていない。

ヨシ原を適切に管理して水質浄化力を高めて行くためには、実験室における詳細な観察と、現地環境におけ

る観測とのいずれも欠かすことができず、それらを統合して検討を加えていくことが重要である。とくにヨシ原を積極的に利用することを目標とするならば、ヨシ原内の沈澱や付着微生物の作用もさることながら、ヨシ自身が持つ栄養塩の吸収力を、積極的に評価することが必要である。

本研究では、沿岸部の水質浄化にヨシ原をうまく管理して利用することを念頭におき、実験室における基礎的な検討を行い、それをもとにヨシ原での水質浄化力にまで検討を進めてみた。まず室内実験により、ヨシによる栄養塩の吸収特性や、栄養塩の溶出制御特性について調べた。これをもとにヨシ原の栄養塩除去能力を検討した。さらに冬季に枯れたヨシを放置した場合の栄養塩の水域への回帰について検討した。

2. ヨシによる栄養塩の吸収

(1) 水耕栽培による栄養塩吸収実験

ヨシによる栄養塩の吸収特性を調べるために、鳥取市湖山池の岸边に生息しているヨシで、高さ50 cm程度のもを選び、周囲を約30 cmの深さまで掘って、地下茎や根ごと採取した。地下部分を傷つけないように土を洗い流し、蒸留水に半日つけた後に実験に使用した。

栽培液は各実験の目的に応じて、蒸留水にアンモニア性窒素、亜硝酸性窒素、硝酸性窒素、リン酸を加えて作

表—1 実験Iの栄養塩濃度条件

実 験	PO ₄ -P (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)	NO ₂ -N (mg/l)	NO ₃ -N (mg/l)	葉面積 (cm ²)
実験 I	A-1	—	1.00	—	28.3
	A-2	—	—	1.00	28.3
	B-1	0.163	—	1.00	22.6
	B-2	0.163	1.00	—	22.6
	C-1	0.163	1.00	0.10	12.8
	C-2	0.326	1.00	0.10	12.8
	D-1	0.326	1.00	0.10	—
	D-2	0.163	1.00	0.10	—
	E-1	0.652	1.50	0.20	13.0
	E-2	0.652	1.50	0.20	—
	F-1	0.326	1.00	0.10	31.1
	F-2	—	1.00	0.10	14.2
	F-3	0.326	1.00	0.10	3.00

* 正 会 員 工 博 鳥取大学教授 工学部社会開発システム工学科

** 正 会 員 工 博 鳥取大学助教授 工学部社会開発システム工学科

*** 正 会 員 工 修 (株)長大

**** 学生会員 鳥取大学大学院工学研究科博士前期課程

成した。穴のあいた蓋付きのポットのまわりをアルミホイルで覆って遮光したものに、栽培液を1000 ml 入れ、蓋の穴からヨシを差し入れて固定し栽培した。光は3000ルクスで、16時間照明の後8時間消灯のサイクルとした。この実験方法については細川ら(1991)の方法を参考にしている。

実験開始後適当な時間間隔で栽培液を採取し、栄養塩の濃度を測定した。以上の実験を実験Ⅰとし、その条件を表一に示す。表中のアルファベットが同じものは同時に行った実験であり、表に記載した以外の、ヨシの採取時期や実験中の温度などの条件は同じである。

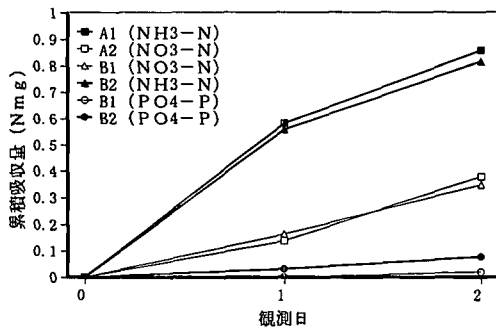
実験Ⅰではヨシ1本あたりについての栄養塩の吸収を扱っているが、さらに地下部の茎や根の密度を自然生育状態に近い状態で実験を行った。容量5 l のポットに砂を入れて屋外において、半年間ヨシを栽培した。冬になり地上部が枯れ落ちたヨシの地下部の底質を洗い流した後、20℃の環境下で5日間水中で前培養を行った。この準備期間中に地下茎からは新芽の成長がみられた。その後リンとアンモニア性窒素を含む5 l の栽培液を用いて、実験Ⅰと同様の水耕栽培実験を行った。これを実験Ⅱとする。

(2) 実験結果

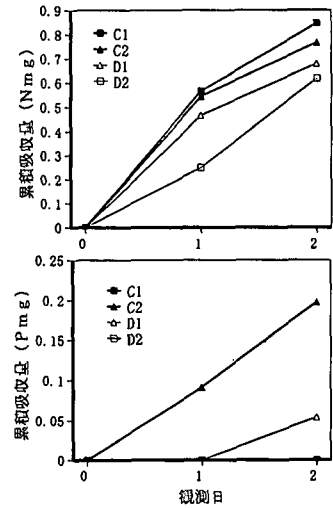
a) 実験Ⅰの結果

実験Ⅰ-A, Bの結果を図一に示す。A, Bの1と2はそれぞれ同じヨシを用いて、最初の2日間と後の2日間で、窒素についてはそれぞれアンモニア性窒素と硝酸性窒素のみを与えている。いずれの場合にもアンモニア性窒素の吸収が硝酸性窒素に比較して大きいことがわかる。実験Bのリンの吸収を見ると、アンモニア性窒素が存在して吸収の活発であった実験B2の方がリンの吸収も多くなっていた。

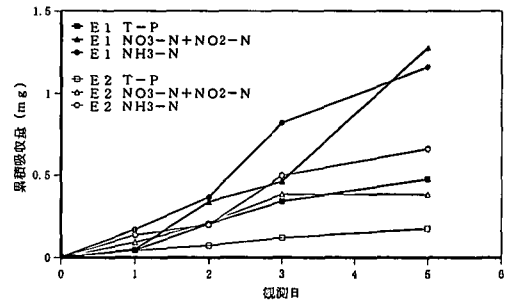
実験Ⅰ-C, Dの結果を図二に示す。ここにおいてもC, Dの1と2はそれぞれ同じヨシを用いて2日間ごとに栽培液の水質条件を変化させている。葉を残した実験Cの方が葉を除去したDより窒素の吸収が速くなって



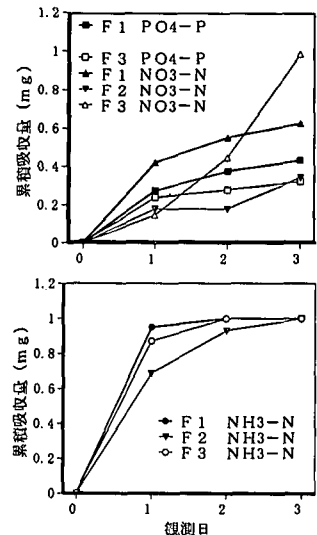
図一 実験Ⅰ-A, Bの結果



図二 実験Ⅰ-C, Dの結果



図三 実験Ⅰ-Eの結果



図四 実験Ⅰ-Fの結果

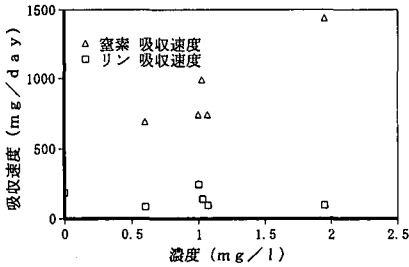


図-5 実験IIの結果

いる。葉のある場合には窒素の吸収にリン濃度の影響はみられないが、ない場合にはリン濃度が高い方がやや窒素の吸収が速くなっていた。しかしここではリンの濃度の範囲が小さく、明確な影響の有無を見るためには、さらに濃度の差異の幅を広げた実験が必要である。

以上のような結果より葉のある場合と、地下茎、根のみの場合の差異、および無機態窒素の吸収の選択性を再度確かめるために実験Ⅰ-Eを行った。その結果を図-3に示す。アンモニア性窒素が選択的に吸収される傾向が見られるとともに、葉のある場合の方が吸収が速いことが認められた。

実験Ⅰ-Fはリンおよび硝酸性窒素の濃度を変化させて行った。その結果は図-4である。1と3を比較するとアンモニア性窒素の吸収に硝酸性窒素の濃度の違いは影響を及ぼしていない。1、3に比べ2はアンモニアの吸収がやや遅い。この原因として葉の面積の違いとリンの有無が考えられる。実験Ⅰ-B及びCより葉の有無は窒素の吸収に影響を及ぼすが、実験Ⅰ-Aより葉がある場合には、その面積による差異は余り認められないことより、この違いはリンの有無によるものではないかと推定される。

b) 実験IIの結果

実験で用いた容量5l、面積380cm²の容器で半年間に生育したヨシの地下部の湿重量は125gであった。実験IIの結果を図-5に示す。本図では1m²あたりの吸収量に換算して示している。窒素としてはアンモニア性窒素を用いている。先の実験Ⅰにおける窒素の吸収速度は最大でも1mg/日程度であったのに比べ、ここでは1000mg/日となっている。ヨシの茎密度は最大時に100本/m²以上(Wathugala, 1984; 細川・他, 1991; 細井・他, 1995)になるが、それを考慮してもここで得られた結果は大きなものである。ヨシの栄養塩の吸収を定量化する実験を行う場合、茎だけで考えるのではなく地下部についても十分な注意を払う必要がある。

この実験では水中の栄養塩濃度を種々変えている。図より窒素については吸収速度と栄養塩濃度との間にほぼ正の相関関係が認められた。

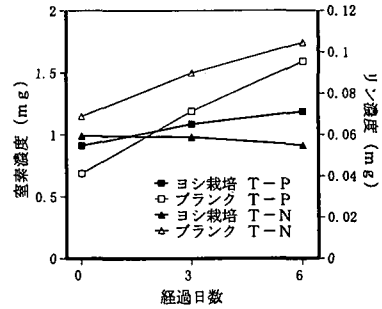


図-6 実験IIIの結果

3. ヨシによる栄養塩の溶出制御

(1) 栄養塩溶出制御効果に関する実験(実験III)

ヨシの存在が底質からの栄養塩の溶出にいかなる影響を及ぼしているかを調べる実験を行った。水耕栽培で用いたものと同じポットを使用し、栽培土壌を入れ、一方にはヨシを植え他方はプランクとした。栽培土壌として湖山池の土壌を用いた。

栽培土壌の上に栄養塩を加えない水を注水し、この直上水中の窒素濃度の経時変化を測定して、土壌からの溶出の様子を調べた。

(2) 実験結果

実験結果を図-6に示す。プランクには直上水中の窒素濃度の増加がみられるが、ヨシを植えた場合には窒素濃度の変化がほとんど見られず、ヨシの存在により溶出が制御されているのがわかる。

(3) 数値計算による検討

以上の結果を数値計算により検討するために図-7のようなモデルを考えた。実験で設置したようにヨシの地下部が水平に存在しそれに直角方向の2次元で考える。土壌内および直上水中の窒素の挙動を次式で表す。

$$\frac{\partial C^*}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C^*}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 C^*}{\partial y^2} - r \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{h} k (C_0^* - C) \quad \dots\dots\dots (2)$$

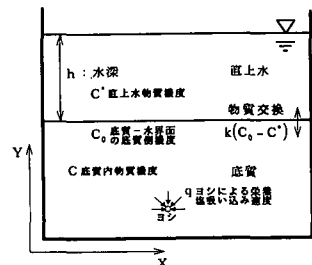


図-7 溶出制御に関する数値計算モデル

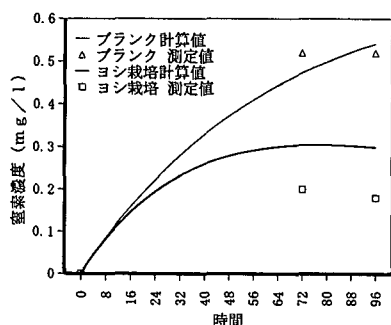


図-8 溶出に関する計算結果

ここで C^* , C はそれぞれ土壌内及び直上水中の窒素濃度, C^* は境界面における土壌側の濃度, k は直上水と土壌の境界面の間における交換係数, D は土壌内拡散係数, r はヨシの根の存在するコントロールボリュームのみに存在する, 単位体積当たりのヨシによる吸収速度で次式で示される。

$$r = \alpha C^*$$

実験 I の結果を参考に $\alpha = 9.95 \text{ (hr}^{-1}\text{)}$ とし, $D = 10 \text{ cm}^2/\text{hr}$, $k = 0.05 \text{ cm/hr}$ として行った計算結果を図-8 に示す。これよりほぼ実験結果を再現できているものと考えられる。

4. ヨシ原の水質浄化能力

3.の結果をもとにヨシ原を汚染水が流下する場合の水質浄化能力について検討を加えてみる。汚染水がヨシ原を流れる間に水とヨシ土壌間で窒素の交換があり, これがヨシに吸収されるものとする。

3.で行った検討は土壌中の方が直上水より窒素濃度が高い場合であったが, ここでは逆の場合を考えている。この場合にも交換係数は同じものが使えるものとして, 直上水の窒素濃度を種々の値に一定にして, 吸い込みが定常状態に達するまで数値計算を行い, 直上水中の窒素濃度と吸い込み速度との関係性を求め, 吸い込み速度 q' (mg/hr) として次式を得た。

$$q' = 0.0146 C \quad (3)$$

ここで C は直上水の窒素濃度 (mg/l) である。

ヨシ原のヨシ密度が実験と同じ状態であるとして 1 m^2 あたりに換算すると次式を得る。

$$q = \beta C$$

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

ここで q の単位は $\text{g/hr} \cdot \text{m}^2$ である。

ヨシ原を幅 B , 流下方向長さ L , 水深 h の駆型池と仮定し, 流入した水は一様に流れるものとする, 水質について次式を得る。

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

上式より入り口における濃度を C_0 において流出濃度を求めると次式となる。

$$C = C_0 \exp(-\beta L/uh)$$

$$= C_0 \exp(-\beta B L/Q) \quad (6)$$

したがってヨシ原の除去率 R は

$$R = 1 - \exp(-\beta B L/Q) \quad (7)$$

となる。

細見・須藤 (1991) は流入水量 $38.9 \text{ m}^3/\text{日}$, 流入水窒素濃度 6.2 mg/l , 面積約 1200 m^2 のヨシやガマの生息する休耕田における観測の結果, 窒素の除去率は 67% で, そのうちの 62% が水生植物への吸収によると報告している。すなわち水生植物による除去率は約 42% となる。彼らの条件を式 (7) に代入すると除去率は 52% となる。細見らの結果が条件の悪い冬季も含めた年間の値であるのに対し, ここで求めたものはヨシが成長する時期の数値をもとにしていることを考慮すると, 両者はほぼ似た結果であると考えられる。すなわち実験室内で行われた検討と現地による観測がほぼ一致しており, 室内実験で得られつつある知見による現地への適用が可能になると考えられる。

5. 枯れたヨシからの栄養塩の溶出

枯れたヨシが水中に倒れると分解を受け栄養塩が回帰する。その過程について実験により調べてみる。

(1) 栄養塩溶出に関する実験

冬季に自然に立ち枯れていたヨシを採取し乾燥させた後, 茎の部分を適当な長さで切りそろえたものと, 穂を用いた。これらを容量 100 ml のびんに蒸留水とともに入れ密栓した。実験 IV ではマグネチックスターラーで攪はんしながら 20°C のもとに 24 時間おいた。実験 V では自然の状態に近づけるため, 攪はんはせずに 10°C のもとにおいた。実験終了時に採水し水質を測定した。

(2) 実験結果

実験 IV, V の結果をヨシ 1 g あたりで整理したものを表-2 に示す。

全般的に穂からの溶出が茎からのものより多くなって

表-2 ヨシ 1 g あたりの栄養塩溶出速度

実験	PO ₄ -P	T-P	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	T-N
実験 IV						
茎(3回の平均)	0.00708	0.0326	0.0484	0.00675	0.0251	0.342
最大	0.0147	0.0470	0.0575	0.0162	0.0382	0.451
最小	0.00296	0.0134	0.0410	0.00139	0.0077	0.191
穂	0.0602	0.306	0.158	0.0275	0.287	2.60
実験 V						
茎(12回の平均)	0.0132	0.0488	0.0850	0.0347	0.0553	0.460

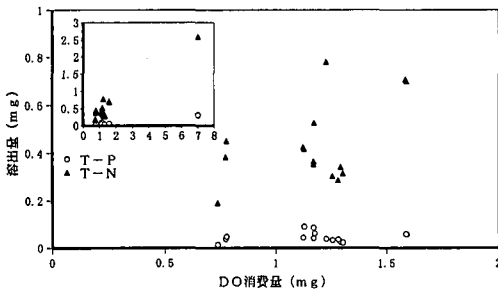


図-9 枯れたヨシからの栄養塩回帰にともなう溶存酸素消費

いる。穂は攪はんにより茎よりも細かく碎かれ栄養塩の溶出が起りやすかったものと考えられる。攪拌の有無や水温の影響は顕著には見られない。なおこの実験では試料水のろ過などは行っていないので、微小な粒子態のものも計測されている可能性がある。

いずれの実験も1日間で行ったが、当初7mg/lをこえる溶存酸素濃度であったものが、1日後にはほぼ0になっていた。溶存酸素の消費量と溶出栄養塩量の関係を見たものが図-9である。とくに窒素の溶出と酸素消費との間には相関が見られた。細川・他(1991)は水中の微生物活性を抑えることにより栄養塩の溶出が抑えられることを示し、溶出は微生物の分解作用によることが大きいと述べている。本実験における溶存酸素の減少も微生物による利用の結果であると考えられる。このように枯れたヨシの水中への放置は、栄養塩の水への回帰だけではなく、溶存酸素の消費も招くために水質保全上看過できない問題である。

実際には水中に倒れたヨシは本実験のように細かくは

なっていないので、栄養塩溶出量ももっと少なくなると考えられる。しかしヨシを栄養塩の制御に利用する場合には、冬季に枯れて水中に倒れたヨシの取り扱いを考えておく必要がある。

6. 結 言

本論文では水域の栄養塩の制御にヨシを利用するための基礎的研究として、従来の現地観測や室内実験で示されてきた結果とも比較しながら、ヨシの有している特性を定量面も含めて検討を加えた。その結果これまでの報告に対する実験的な裏付けや、新たな知見を得ることができた。現在ヨシ原における現地観測を継続しており、より現実的なモデルの開発を進めていく予定である。

本研究を行うに当たりご協力を頂いた元本学学生今嶋美幸氏(現修成建設コンサルタント)及び本学科開発情報工学研究室の学生諸氏に謝意を表する。本研究は平成6年度文部省科学研究費一般研究C(課題番号06650608)の補助を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- 鈴木孝男・武田哲・栗原康(1988): 塩性湿地, 栗原康編, 東海大学出版部, 河口沿岸域の生態学とエコテクノロジー, pp. 142-149.
- 細井由彦・城戸由能・橋本一郎・三木理弘(1995): ヨシの成長過程の現地観測とそのモデル化に関する研究, 土木学会第50回年次学術講演会.
- 細川恭史・三好英一・古川恵太(1991): ヨシ原における水質浄化の特性, 港研報告, 第30巻, 第1号, pp. 205-237.
- 細見正明・須藤隆一(1991): ヨシによる生活排水の浄化, 水質汚濁研究, 第14巻, 第10号, pp. 674-681.
- A. G. Wathugala (1984): Studies on the biological control of water pollution using emerged plants, 東北大学博士学位論文.