

ヨシ群落のワイズユースを考えるとときに*

生嶋 功**・前河 孝志***・森田 尚***

琵琶湖にとってヨシは大切な植物であると一部の人はふるくから気づき、湖岸にそって植栽されたこともあった。ヨシ帯が琵琶湖の生態系にとって必要であることは関連科学の情報が根拠をあたえ、また湖の風致からいっても主要な要素であると広く認識されるようになった。そして1993年に琵琶湖のヨシ群落の保全に関する滋賀県条例がつけられるにいたったのである。このようなかたちで評価されたのは、わが国でははじめてのことである。ヨシ帯のワイズユースをさぐりだすときの基礎的な知見をのべた。

はじめに

ヨシ群落のなかは想像する以上に多様性にとみ、量的にも大きい生物群集が存在するために、ヨシ群落が水質や湖底などにおよぼしている影響は大きいことが想像される。このような観点からヨシ群落の内部と外部について、湖水中の溶存性や懸濁性の物質およびその量を比較検討することはまともをえたものと思われるが、これらを詳述した論文の数はまだおおくない。

ヨシとヨシをとりまく水環境に重点をおいた論文に、ヨシの成長と水中や底泥から栄養をとる様式をあつかったもの(名取、1987)やヨシ植物の付着生物が高い光合成活性をもっていることをあきらかにしたもの(Tanimizu et al., 1981; Higashi et al., 1981)がある。吉良(1991)は琵琶湖のヨシ群落を安曇川河口域に典型的とする不安定型のヨシ帯と、土壌や波浪の影響が安定した湖岸にせまい幅で発達した安定型のヨシ帯に区別し、ヨシを水辺の先駆種と考えてヨシ帯の保全にかそうとする実行案、さらにヨシ帯の水質浄化機構に重点をおいたヨシ帯生態学の総説をかいた。

われわれはヨシ (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) の個体群を中核としている生態系の総合的な情報の重要性にたいして、共通の認識と興味をもって研究してきた。その内容は沿岸帯の物質循環にかかわる諸要素の量的把握と諸要素相互間の関係およびこれらの諸要素が沿岸帯における浄化とどのように関連し

機能しているかを明らかにし、定量的に評価することであった。さらにヨシ群落内の水塊と沖の水塊との物質交換や循環を知ることであった。ここではヨシをとりまく水環境の特性にかかわる基礎的な知見を紹介する。

調査実験水域と方法

琵琶湖の近江八幡市牧地先に自生している約74aのヨシ群落(以下においてはヨシ帯という一般的な用語をつかう)を中心に、1988年から調査を開始した。岸から8m、35mおよび沖の開水面に接するヨシ帯のそれぞれの地点におけるヨシの茎密度(本数)はそれぞれ91本 m^{-2} 、182本 m^{-2} および92本 m^{-2} であった。また抽水ヨシの水中央部の茎の表面積をヨシ帯あたりの総面積として集計すると約73aとなり、この大きさはヨシ帯の面積にはほぼ匹敵した。水質分析用の採水や流速測定をおこなった位置は、上記ヨシ帯の中央部(以下ヨシ帯内部とする: Y2地点)およびヨシ帯外縁から沖に向かって約45mおよび450mすすんだ開水面(ヨシ帯外部とする: P5およびP10地点)である。

流速は三次元のメモリー式電磁微流速計(アレック電子株式会社: 16M型)で測定した。試水についての必要項目の分析は上水試験方法(1978)、日本工業標準調査会のJIS K 0102(1974)およびJIS K 0101(1979)によった。1991年にヨシ帯内外の底泥の脱窒活性を定量した。内径40mmのアクリル円筒を湖底にさしこみ、底泥の

*第15回全国水草研究会大会(1993年7月24日、大津市琵琶湖研究所において)の講演題目:「ヨシ群落内外の水質特性」をもとに加筆した。

千葉大学理学部海洋生態系研究センター、*滋賀県水産試験場

層状構造をこわすことなく採集した3g(湿重)をバイアルビンにとり、アセチレン阻害法で定量した。N₂Oの検出はガスクロマトグラフ(Shimadzu:GC-9AM)によった。これらの定量法を図1に示した。

結果と考察

ヨシ帯内外の流速の比較

ヨシ帯の内部(Y2)と外部(P5)の湖流を水平方向と垂直方向成分にわけ、それぞれのベクトルを毎10分に一回の間隔で測定し、記録した。図2は水平方向の流れをしめす。X軸は東西方向を、Y軸は南北方向をしめた。ヨシ帯内部のベクトルはあらゆる方向に向かい、その大きさは外部のそれらに比べて小さい。外部の湖流の方向は卓越風の方向およびその逆方向の場合が多く観測された。ヨシ帯内外の水平および垂直両方向の流速の頻度分布を表1に示した。流速頻度はL字型分布ときには対数正規型分布にちかものである。流速の観測には Losee and Wetzel (1993) が試みたように、測定間隔にたいする流速の自己相関(係数)をよりどころにした解析が必要になるであろう。ヨシ帯内部と外部の最多水平流速はそれぞれ0.5~1 cm s⁻¹および1~4 cm s⁻¹で、平均流速は0.67 cm s⁻¹および1.92 cm s⁻¹で内外の平均流速の比は約1:3であった。

ヨシ帯内部の垂直流は上から下方向に、水平流とほぼ同じ流速でもぐり込んでいた。ヨシ帯外部では上下両方

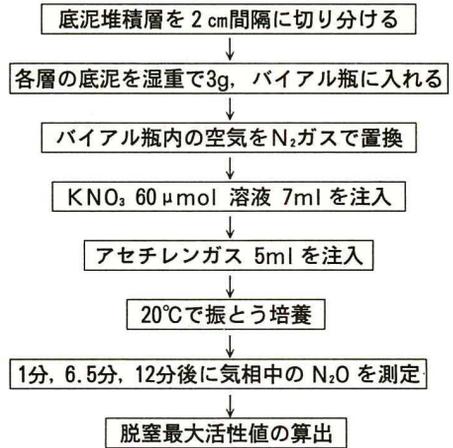


図1 脱窒最大活性測定のための作業手順

向の垂直流れが観測され、内部と同様に上から下への流れが卓越しており、平均垂直流速は水平流速の約10%であった。沖では卓越風によって生じたと考えられる表層流が岸方向に向かい、その流速はヨシ帯にはいると約1/3に減少し、下にもぐり込むことがあきらかになった。流速と方向は時々刻々に変化し、卓越風の風向や風速に強く影響されるほかに、河川流入水、地形、ヨシ帯の大きさや形、消波堤の有無などによって複雑に変化することがあきらかになった。

流速のヨシ帯内外の平均流速値をつかい一日あたりに換算すると、それぞれは579 m day⁻¹および1659 m da

表1 ヨシ帯内外(Y-2とP-5地点)の水平流速(1991.6.11-6.28測定)と垂直流速(1990.5.11-5.28測定)の頻度分布。

	水 平 流		垂 直 流	
	流速(cm s ⁻¹)	頻度 (%)	流速(cm s ⁻¹) 方向	頻度 (%)
ヨシ帯内部	0.5 以下	44	0 -0.5 (下→上)	2
	0.5-1	37	0 -0.5 (上→下)	27
	1 以上	19	0.5-1 (上→下)	63
			1 -1.5 (上→下)	7
			1.5-2 (上→下)	1
ヨシ帯外部	1 以下	13	0.5-1 (上→下)	3
	1-2	26	0 -0.5 (上→下)	51
	2-3	25	0 -0.5 (下→上)	34
	3-4	16	0.5-1 (下→上)	9
	4	20	1 -1.5 (下→上)	1

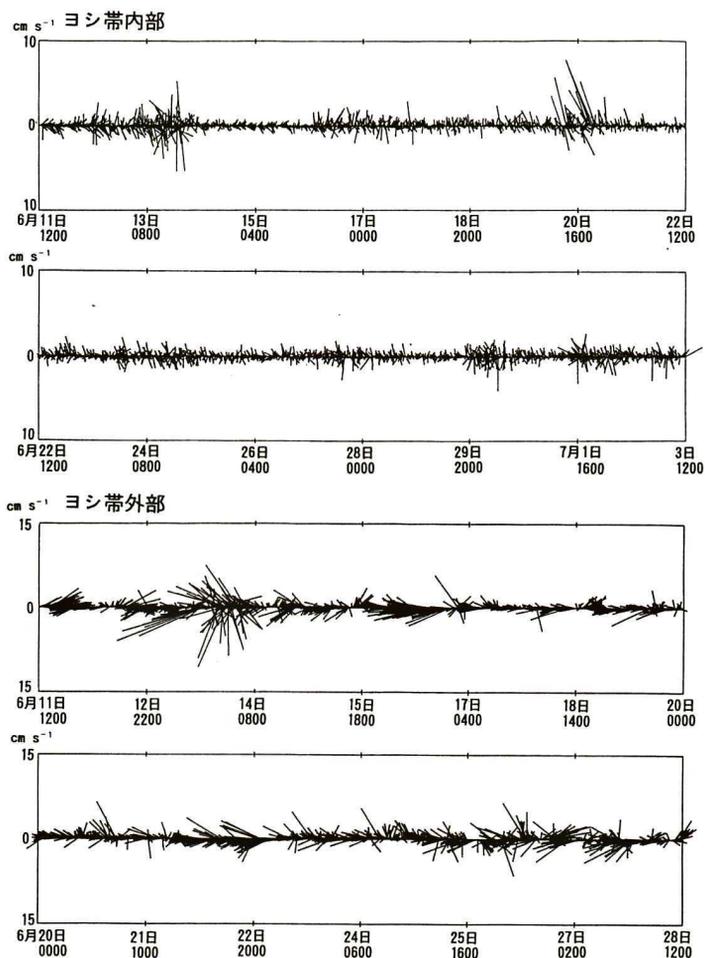


図2 ヨシ帯の内部 (Y-2) を上図に、外部 (P-10) を下図に、それぞれの水平流のベクトルをかいた。内容は本文参照 (1991年に測定)。

y^{-1} となった。1日あたりの平均の水の移動距離は、ヨシ帯の幅の約10倍に匹敵することから、ヨシ帯内外の水塊は数時間単位で交換していることが想定された。沖部とヨシ帯は数時間で水塊が入れ替わるであろう。したがってヨシ帯内部と外部の水中の物質の移動はこの程度の規模で起こっている可能性がある。

新井 (1990) は琵琶湖南湖の矢橋 (ヨシ密度: $50 \sim 60$ 本 m^{-2}) と草津川河口 (ヨシ密度: $20 \sim 30$ 本 m^{-2}) のヨシ帯内と外部で色素法と電磁流速計 (ACM-200PC) をもちいて水平湖流を測定した。両地点におけるヨシ帯内部の水平流速はそれぞれ $0.5 \sim 1$ および $1 \sim 2$ $cm s^{-1}$

で、いずれの場合も最低流速は約 0.5 $cm s^{-1}$ で水はつねに移動しているとした。なお、両地点のヨシ帯外部では $5 \sim 10$ $cm s^{-1}$ の流速を観測した。これらの値はわれわれが測定した流速の大きさに符合した。

ヨシ帯内外の10項目の水質比較

ヨシ帯内外 (Y-2 と P-10) の10項目の水質を多角形表示法でしめし、両者を比較した (図3)。多角形の頂点に pH、DO、BOD、COD、T-N、T-P、クロロフィル-a (chl-a)、炭水化物 (carb)、浮遊物質 (SS) および浮遊粒子数 (part) をとり、中心と角とをむす

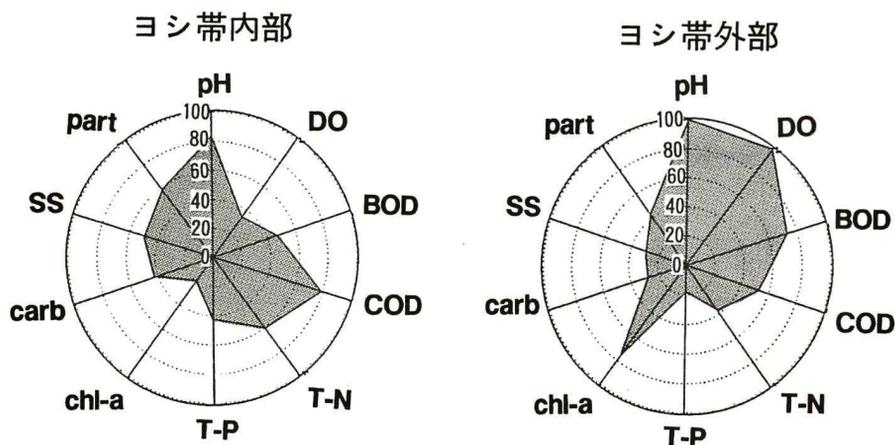


図3 ヨシ帯の内部(Y-2)を左図に、外部(P-10)を右図に、両地点における水質10項目の比較をしめす。両図の円周上に各項目の最大値(相対値:100)を、中心には最小値(相対値:0)をしめた。各項目の(最大値、最小値)は、pH(8.4, 6.8)、DO(13.0, 2.9 mg O₂ l⁻¹)、BOD(3.8, 1.5 mg O₂ l⁻¹)、COD(6.9, 3.7 mg O₂ l⁻¹)、T-N(2.49, 0.94 mg N l⁻¹)、T-P(0.153, 0.028 mg P l⁻¹)、chl-a(32.9, 0.1 μg l⁻¹)、SS(22.7, 6.7 mg l⁻¹)、part(22.3, 9.6×10² ml⁻¹) (1990.6.12測定)。

ぶ距離はそれぞれの濃度をしめた。両地点の濃度が直接比較できるように図の濃度軸には同一の相対値をもった。頂点をむすんだ多角形の形がちがいは水質のちがいをあらわしている。ヨシ帯内のpH、DO、BOD、chl-aの値は外部のそれらよりも低かった。

ヨシ帯内、ヨシ帯から約450m沖および南比良と長命寺をむすぶ線上の湖の中点(南比良沖中央)における湖水の窒素とリン濃度を表2にしめた。ヨシ帯内部のアンモニア態と亜硝酸態の窒素濃度はヨシ帯外のそれらに比べて一桁高い値をしめし、それらに対して有機態窒素の濃度に差がみられなかったことが注目された。またヨシ帯内におけるアンモニア態と亜硝酸態の窒素濃度は沖中央部の値にたいして一桁および二桁高い値をしめし、リン酸態リンでは一桁以下のちがいがあったが、有機の懸濁物質はヨシ帯内の水中に多いことによるためか全窒素と全リン濃度は中央部の値の約5倍および8倍であった。

橋と三田村(1984)は琵琶湖南湖下坂本で、幅と長さがそれぞれ約15mと25mのヨシ帯内外における窒素とリン濃度を比較した。アンモニア態、亜硝酸態、硝酸態窒素およびリン酸態リンの内部濃度は外部濃度のそれぞれ13、2.6、3.2および2.5倍と高い値をとった。これらは陸からの栄養塩類の供給、底泥からの溶出、ヨシおよびヨシ附着藻類の分解と排出によるものであるとした。

さらに特性の一つとして、表2にしめたアンモニア態窒素と亜硝酸態窒素が全窒素に対してしめる割合をもとめると、ヨシ帯内では11.8%と13.2%、ヨシ帯外で2.2%と5.3%であった。このような傾向を三田村(1989)は下坂本のヨシ帯内でみられることを指摘しており、水中の窒素化合物のなかで中間代謝的な化合物であるアンモニア濃度が高いのはより富栄養化した水域であると考察した。これらの数値の違いにヨシ群落がどのようにかわり、どのような機作によっているかを窒素、リンや炭素の元素をよりどころにして、ヨシ、付着生物、群落内生物(植物および動物プランクトン、小型動物、魚類生物、その他)の成長、死亡、摂食、排泄、移動や分解などの速度の実測値をもとめており、これらを含んだ動態のシミュレーションモデルの解析を進めている。

ヨシ帯内外の脱窒活性

ヨシ帯内外の湖水に存在しているいろいろな形をした窒素化合物の濃度とそれらの循環が読みとれるように図4をかいた。窒素化合物の移行変化が直接比較できるように、それぞれの濃度は窒素元素濃度(mg N l⁻¹)でしめた。図中の数値は表2をもとに換算したもので、内部におけるそれぞれの濃度は外部のそれらの数倍から一桁高い値をとっていた。硝化作用や脱窒作用の速度は反応がおこる場のアンモニア態や硝酸態の窒素濃度など基

表2 ヨシ帯内外 (1989年6月12日測定) および南比良沖中央 (滋賀県衛生環境センター、1989年6月5日測定) における窒素濃度 (mg/l) とリン濃度 (mg/l) の比較

水質項目	測定点	ヨシ帯内 (Y2) 0.25m水深地点	ヨシ帯沖 (P10) 4.95m水深地点	中央の沖 41m水深地点
		中層の値	0.5m層の値	6層の平均値*
アンモニア態窒素		0.18	0.02	0.01
亜硝酸態窒素		0.20	0.05	0.003
硝酸態窒素		0.56	0.29	0.12
有機態窒素		0.58	0.58	0.20
全窒素		1.52	0.94	0.33
リン酸態リン		0.008	0.004	0.001以下
有機態リン		0.058	0.024	0.008
全リン		0.066	0.028	0.008
N/P比		23	34	41

*0.5、5、10、15、20および40m層での値が大きく変わらなかったために平均値でしめた。

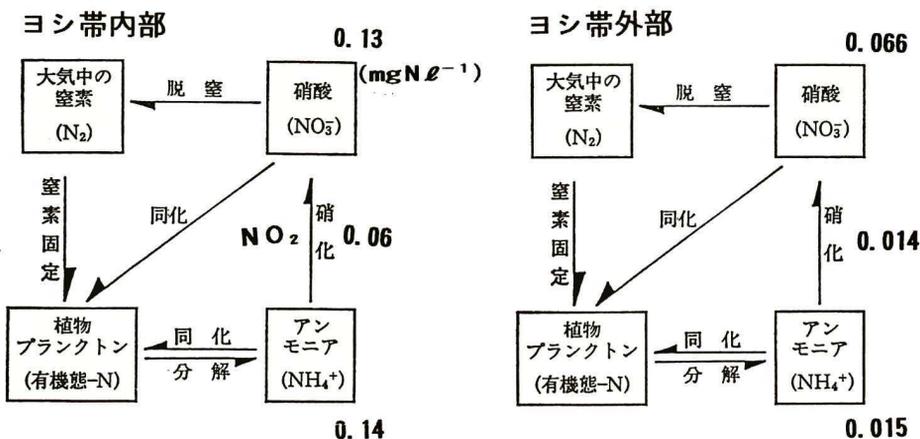


図4 ヨシ帯の内部 (Y-2) を左図に、外部 (P-10) を右図に、それぞれの地点における窒素代謝。図中の数値はアンモニア態、亜硝酸態および硝酸態窒素の濃度 (mg N l⁻¹) をしめす。

質の濃度に比例的であると考えられる。図4の数値の大きさを比較することによって、ヨシ帯内部における中間代謝化合物であるアンモニアからはじまる左回りの諸反応は外部のそれよりもより活発におこっているものと考えた。脱窒の基質となる硝酸態窒素濃度のアンモニア濃度にたいする比は、ヨシ帯の内部で93%、外部では440%となり、内部においては脱窒作用がさかんで基質となる

硝酸が消費されたために比が小さくなったと考えれば、ヨシ帯内部の脱窒作用は外部にくらべてより円滑に進行している可能性がある。底泥の0-2cm層の脱窒活性を比べると、表3にみるように、ヨシ帯内部の活性は開水沖部のそれらよりも高い。また底泥の脱窒活性を層別に見ると表層の値は高く、深くなるにしたがって活性値は低くなった。

図4の左回りを可能にする硝化作用は酸素が存在する条件を、さらに脱窒作用は無酸素条件を必要とする。ヨシ帯内ではヨシの茎の付着藻類は Tanimizu et al. (1981) や Higashi et al. (1981) が指摘したように日中は盛んな光合成で水中の酸素発生機の役割をしている。ヨシ帯内部(Y-2)の中層水の溶存酸素飽和濃度は約50%に、開水面にちかいヨシ帯の外縁部では、その値が95%に達することが溶存酸素濃度の日周変化測定記録(7月)で確認できた。さらに、これとは別の経路も存在する。ヨシの茎につく葉鞘基部の節から空気が植物体の下部におくられて、これにともなって輸送された酸素量は拡散による場合の30—100倍に達するという。このように、底泥中の根系に酸素が供給される現象が実験によって確かめられた(Armstrong and Armstrong, 1990)。根系をとりまく底泥はもともと還元状態にあるが根のごく近辺の土壤に酸素が供給されるのである。他方、夜になると、前記両地点における中層水の溶存酸素飽和濃度はそれぞれ約10%および40%に低下し、底泥内部やその表面ではもっぱら微生物、ベンソスやヨシの根の呼吸による酸素消費によってであろうか無酸素状態となった。すなわちヨシ帯内部の水塊や底泥周辺域は、無酸素状態と有酸素状態からなる環境が矛盾なく共存する場所であることが判明した。このような環境条件があって脱窒活性が維持されているのであろう。

ヨシ帯の水中部分は微生物、プランクトン、付着生物、貝類や小型生物の生息場所であり、魚類の産卵や餌場、稚魚の生活の場所、水鳥の生活圏となり、多様性にとんだ生物群集の共存が可能なヨシ生態系とよぶべき空間である。われわれはこれを有機的なマトリックスとして詳細に情報をとりつづけている。

引用文献

- 新井 正 (1990) 湖沼沿岸帯の水の流動に関する研究。立正大学文学部研究紀要 (6): 1 - 16.
- Armstrong, J. and Armstrong, W. (1990) Light-enhanced convective the roughflow increases oxygenation in rhizomes and rhizosphere of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. *New Phytol.* 114: 121-128.

表3 ヨシ帯内部(Y-2)と外部(P-5とP-10)の脱窒最大活性速度($\text{mol N}_2\text{O-N cm}^{-3} \text{ h}^{-1}$), 1991.9.11測定。

底泥の深さ (cm)	Y-2	P-5	P-10
0-2	281	168	97.8
2-4	299		
4-6	163		
6-8	6.4		

Higashi, M., Miura, T. and Iwasa, Y. (1981) Effect of feeding of snails on the biomass and productivity of an algal community attached on reed stems. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 21: 590-595.

吉良竜夫 (1991) ヨシの生態おぼえがき。滋賀県琵琶湖研究所所報 9: 29-37.

厚生省環境衛生局, 水道環境部 監修 (1978) 上水試験方法. 189 - 276, 503 - 508. 日本水道協会.

Loose, R. F. and Wetzel, R. G. (1993) Littoral flow rates within and around submerged macrophytes communities. *Freshwater Biol.* 29: 7-17.

三田村緒佐武 (1989) 湿地帯における汚濁物質の挙動と浄化能力. 第7回琵琶湖研究シンポジウム. 滋賀県琵琶湖研究所: 24 - 30.

名取史織 (1987) 水質浄化におけるヨシ帯のみなおし. 生嶋功 (編) 『水の華の発生機構とその制御』東海大学出版会: 153 - 156.

日本工業標準調査会 (1974) 工場排水試験方法. JIS K 0102. 28-87. 日本規格協会.

日本工業標準調査会 (1979) 工場用水試験方法. JIS K 0101. 95 - 99. 日本規格協会.

Tanimizu, K., Miura, T. and Higashi, M. (1981) Effect of water movement on the photosynthetic rate of algal community attached to reed stems. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 21: 584-589.

橘 淳治, 三田村緒佐武 (1984) 琵琶湖下坂本のヨシ帯における窒素とリンの分布. 水野寿彦退官記念誌: 246-252.