

# 琵琶湖湖底堆積物の脱窒活性

森田 尚\*・前河孝志

Denitrification activity in sediments from Lake Biwa

Takashi Morita\*・Takashi Maegawa

キーワード：脱窒、湖底堆積物

脱窒過程は富栄養化要因の一つである窒素を、硝酸態から生物の生産に利用されにくい窒素ガスに変換することにより不活性化し、系外へ拡散除去する過程と捉えることが出来るため、水域の浄化という観点からは重要と考えられている。滋賀県水産試験場では昭和63年度から平成6年度まで水産庁委託事業、赤潮対策技術開発試験の一環として湖沼沿岸帯浄化機能改善技術開発試験に取り組み、平成7年度から平成11年度まで漁場富栄養化対策事業に取り組んだ。その中で、琵琶湖の沿岸帯、沖帯および周辺内湖での脱窒活性を把握し、琵琶湖の物質循環過程の中での役割を評価する調査を行った。その際に得られた結果は平成3、4、5、6年度の赤潮対策技術開発試験報告書<sup>3) 4) 5) 6)</sup>および平成9年度漁場富栄養化対策事業報告書<sup>7)</sup>に報告済みであるが、本報告では赤潮対策技術開発試験で得られた脱窒に関する調査結果をもとに、琵琶湖内の地点による特性と環境条件の変化に対する脱窒活性の反応について総括する。

## 材料および方法

**方法1 スラリー法による潜在的な脱窒活性の測定** 堆積物を懸濁状態にして硝酸を添加し、振とう培養後にアセチレン阻害法を適用して脱窒活性を測定した。測定に供した底質試料はアクリル製のパイプ(内径40mm、長さ1m)を用いて柱状採取した。採取後実験室へ持ち帰り、上層から2cm間隔に切断し、3g(湿重)をバイアル瓶(容量約67ml)に秤取し、密栓して、気相をN<sub>2</sub>ガスで置換した。各バイアル瓶にKNO<sub>3</sub>水溶液(60μmol/l)7mlを注入後、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>ガス5mlを注入し、20°Cの恒温室内で振とうした。C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>ガ

ス注入後、1分、6.5分および12分後にガスタイトシリンジで気相中のガス1mlを採取し、N<sub>2</sub>O濃度を測定した。気相中のN<sub>2</sub>O濃度からブンゼン係数を用いて瓶内全体のN<sub>2</sub>O量を算出した。N<sub>2</sub>O量の時間による増加量から、測定に供した底質の単位時間単位重量あたりのN<sub>2</sub>O発生速度を求め、底質の見かけの比重を用いて単位体積あたりのN<sub>2</sub>O発生速度に換算し、さらにアクリルパイプの断面積から単位面積あたりのN<sub>2</sub>O-N発生速度に換算した値を潜在的な脱窒活性(脱窒ポテンシャル)とした。

**方法2 柱状試料を用いた脱窒速度の測定(1)** 底質を柱状採取し、Sørensen(1978)<sup>8)</sup>の方法に準じて採取時の堆積構造を保った状態でアセチレン阻害法を適用し、脱窒速度を測定した。柱状底質試料の採取にはアクリル製のパイプ(内径40mm、長さ30cm)を使用した。このパイプにはあらかじめ縦方向に1cm間隔で直径5mmの穴を多数開け、それぞれの穴にガスクロマトグラフ注入口用のシリコンセプタムをはめ込んでビニールテープで固定しておいた。採取した柱状試料は上下を密栓して実験室へ持ち帰った。上部の栓をスターラー攪拌子付きのシリコン栓に交換し、蒸留水にC<sub>2</sub>H<sub>2</sub>ガスを通気して作成した飽和アセチレン水を、柱状試料の側面からシリコンセプタムの注入口を通して注射器で上層水中に10ml、堆積層中に1cm間隔ごとに0.6ml注入した。その後直ちに、現場水温に近い温度に保った水槽中に立てて固定し、1時間から3時間培養した。培養中は、上層水をスターラーで静かに攪拌した。培養時間終了後、直ちに堆積層を1cm間隔で切断し、10%中性ホルマリン10mlを注入したバイアル瓶(容量約67ml)

\*現所属：滋賀県琵琶湖環境部環境管理課(Environmental Management Division, Department of Lake Biwa and the Environment, Agency of Shiga Prefecture, Kyoumachi 4-1-1, Otsu, Shiga 520-8577, Japan)

に入れて密栓し、激しく振とうした。上層水からも 10ml を抜き取りバイアル瓶に入れて同様に処理した。振とう後、バイアル瓶内の気相中の  $N_2O$  濃度を測定し、その濃度から前の方法と同様に瓶内全体の  $N_2O$  量を計算し、上水層と切断した柱状底質試料各層の  $N_2O$  量に換算した。上水層および全堆積層の  $N_2O$  量の合計を堆積層全体での  $N_2O$  量として、培養後の  $N_2O$  量から別に求めたスタート時の  $N_2O$  量を引き、培養時間で割って  $N_2O$  の増加速度を求めた。さらに測定に使用したアクリルパイプの断面積から、単位面積当たりの  $N_2O$ -N 増加速度を計算し、脱窒速度とした。

**方法 3 柱状試料を用いた脱窒速度の測定(2)** 方法 2 の中で、培養後に試料を層別に切断してバイアル瓶に分取する手順を省略し、 $N_2O$  の損失を防ぐために方法の一部を改良した。スターラー攪拌子付のシリコン栓で密栓する前に、上層水中に直径約 1cm のガラスビーズ 3 個を入れた。3 時間培養後、側面の注入口からホルマリン原液を上層水中と堆積層中 5ヶ所に各 1ml 注入し、振とう機にかけて攪拌し、コア内の粘土層から上の堆積層を上層水と混ぜて完全に懸濁させた。その懸濁液から 10ml を注射器で抜き取り、あらかじめホルマリン 10ml を入れて密栓しておいたバイアル瓶（容量約 67ml）に注入し、振とうした。振とう後、バイアル瓶の気相中の  $N_2O$  濃度を測定し、瓶内全体の  $N_2O$  量を計算して、柱状試料全体の  $N_2O$  量に換算した。別に求めたスタート時の  $N_2O$  量を引き、培養時間で割って  $N_2O$  の増加速度を求め、単位面積あたりの  $N_2O$ -N 増加速度に換算したものを脱窒速度とした。

**方法 4 ガラスカップを用いた表層堆積物の脱窒速度の測定** 沖合、内湾、港湾での湖底表層堆積物の採取にはエックマンバージ採泥器を使用し、船上でバットに移した後、直ちに泥温を測定し、堆積層の真上からガラスカップ（高さ 50mm、内径 33mm の円筒型）を鉛直に差し込み、表層 50mm までの堆積物構造をガラスカップ内に封入した。ヨシ群落内等、浅い所の堆積物は、ガラスカップを直接手で湖底表面に鉛直に差し込んで採取した。封入に使用したガラスカップは上面に直径 5mm の空気抜き穴を設けてあり、堆積層にカップを差し込んだ際、上部に空気を残さないように追い出した後、ガスクロマトグラフ

注入口用のシリコンセプタムで密栓した。また、ガラスカップの下部の口には、塩化ビニール板の蓋をかぶせてゴムで密閉した。底質の採取と同時に、湖底直上水をバンドーン採水器などで採取した。

封入した表層堆積物試料は実験室へ持ち帰った後、ガラスカップ下部の口にかぶせた塩化ビニール板の蓋を取り、アクリルパイプ用シリコン栓の上に乗せ、堆積層の下面をシリコン栓に密着させた。ガラスカップ上部の空気抜き穴をふさいだシリコンセプタムを取り、アクリルパイプ（ヨシ群落の柱状堆積物試料採取に使用したのと同じ規格）を上からかぶせてシリコン栓に固定した。堆積物と同時に採取した湖底直上水をサイホンで静かに注入し、アクリルパイプの上部まで満たした後、試料の堆積構造を崩さないよう注意しながら、先を鉤型に曲げた金属棒を用いてガラスカップを堆積物試料から外して抜き取った。アクリルパイプ内に攪拌用のガラスビーズ（直径約 1cm）2 個を入れ、スターラー攪拌子を取り付けたシリコン栓で密栓した。側面の注入口から注射器でアセチレンガス飽和蒸留水を上層水中に 10ml、堆積試料中に 1cm 間隔で 4ヶ所から各 1ml を注入し、直ちに現場水温に近い温度に保った水槽中に立てて固定し、1 時間から 3 時間培養した。培養時間終了後、側面下部の注入口 5ヶ所からホルマリン原液を各 0.2ml 堆積物中と堆積物表面の上層水中に注入して反応を停止させた。アクリルパイプを上下に転倒し、中の堆積物を完全に懸濁、均質化させた。その懸濁液 10ml を注射器で抜き取り、あらかじめ 10%ホルマリン 10ml を入れて気相を窒素ガスで置換しておいたバイアル瓶（容量約 67ml）に注入した。バイアル瓶を十分に振とう攪拌した後、気相から 0.3ml を抜き取り、電子捕獲型検出器付きガスクロマトグラフで  $N_2O$  濃度を測定した。バイアル瓶内の気相中  $N_2O$  濃度から計算によってアクリルパイプ全体の  $N_2O$  量を求めた。別に、アセチレンガス飽和蒸留水を注入直後にホルマリンを注入して反応を停止させたものから、スタート時の  $N_2O$  量を求めた。スタート時と培養後の  $N_2O$  量の差より脱窒速度を計算した。

**ガスクロマトグラフによる  $N_2O$  の測定**  $N_2O$  濃度の測定には電子捕獲型検出器付ガスクロマトグラフ（島津 GC-9AM）を使用した。ガスクロマトグラフには  $C_2H_2$  ガスによる検出器への悪影響を防ぐため、バ

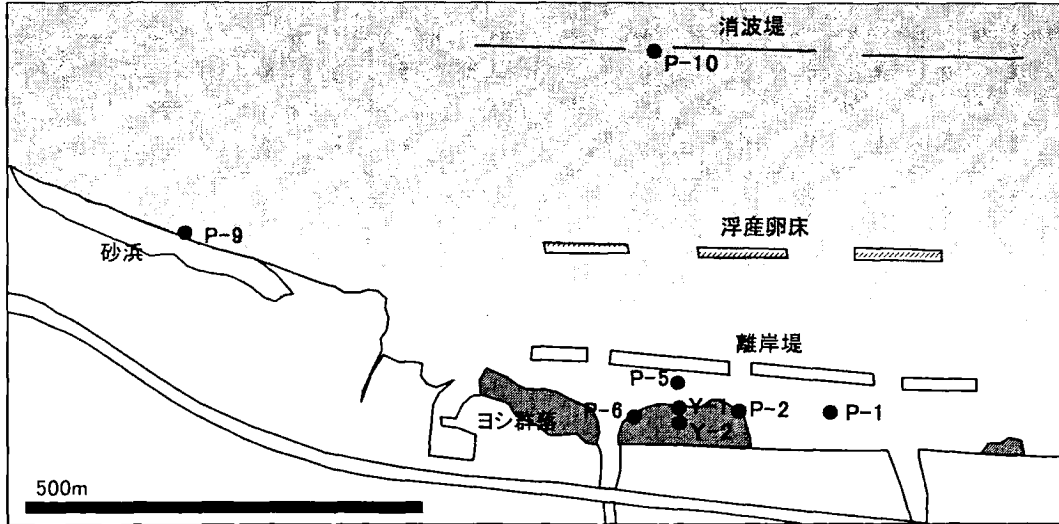


図1 ヨシ群落を中心とした沿岸帯の脱窒活性測定試料採取地点 近江八幡市牧町地先

ックフラッシュ流路を取付けた。ガスクロマトグラフの条件は以下の通りとした。

カラム：ステンレス製、長さ 2m、直径 3mm、充填剤ポラパック Q (80~100mesh)

温度：注入部 115℃、カラム部 70℃、検出部 330℃

キャリアーガス：N<sub>2</sub> 15ml/min

バックフラッシュガス：N<sub>2</sub> 60ml/min

**ヨシ群落を中心とする沿岸帯堆積物の潜在的な脱窒活性の測定** 1991年9月11日に近江八幡市牧地先のヨシ群落内およびその周辺水域を含む沿岸部の8地点(図1)で堆積物を柱状採取し、方法1で潜在的な脱窒活性を測定した。同時に、同じ地点で採取した表層堆積物試料について、性状を記録し、灼熱減量、pH、酸化還元電位、酸素消費量、炭素、窒素、リン含有量を測定した。

**ヨシ群落内外の沿岸帯堆積物の脱窒速度の測定**

1991年11月12日、12月9日、1993年1月7日、1993年8月23日および1994年5月11日に、近江八幡市牧地先のヨシ群落の内部および外縁部において堆積物を採取し、脱窒速度を測定した。測定は、1991年11月と1993年1月は方法2、1991年12月と1993年8月は方法3、1994年5月は方法4で実施した。また、1994年5月27日に湖北町尾上のヨシ群落内の1地点で表層堆積物を採取し、方法4で脱窒速度を測定した(図1および図2)。方法4を適用した際には、同時に上層水中にNO<sub>3</sub>-Nを1~2mg/lの濃度で添加して培養する処理区を設けて同様に測定した。

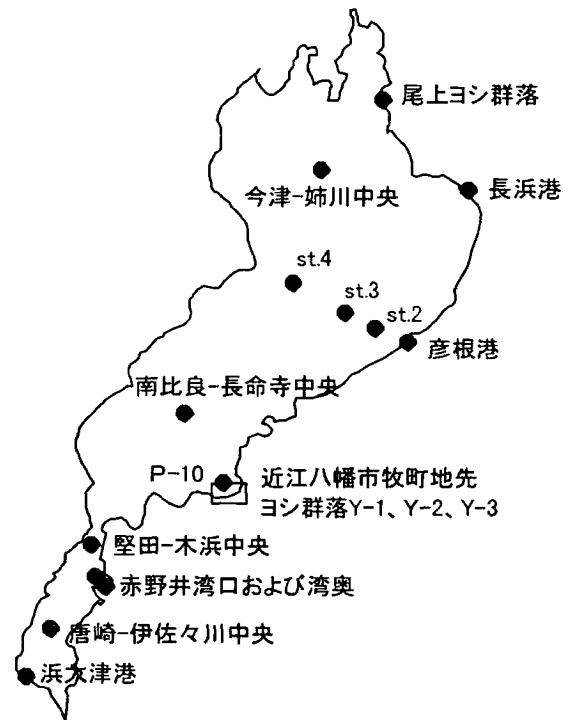


図2 琵琶湖全域での脱窒調査試料採取地点

**琵琶湖全域での湖底堆積物表層における脱窒速度の測定** 琵琶湖全域での脱窒による浄化量を評価するため、沖合、内湾、港湾を含む13地点で方法4を用いて脱窒速度を測定した。琵琶湖には沿岸帯から水深100mを超える沖帯まで多様な環境条件の場が存在し、温度条件は水深と季節によって変動する。沖合の水温やNO<sub>3</sub>-N濃度は北湖の水深20~40mの水温躍層よりも深い部分では年間を通じて比較的安定して

いるが、浅い部分や南湖では夏の成層期に減少、冬の循環期に増加という周期的な変動をする。このため調査は1月の循環期と6月の成層期に実施した。1994年1月24日、26日、6月6日、8日に琵琶湖の沖合、内湾および港湾内の複数の調査地点(図2)で採取した湖底表層堆積物について、脱窒速度を測定した。測定は方法4により行った。同時に上層水中に $\text{KNO}_3$ 水溶液で $\text{NO}_3\text{-N}$ を1~2mg/lの濃度で添加して、同じ操作を行う測定区を設けた。

**結果および考察**

**沿岸帯堆積物の潜在的な脱窒活性の比較** 表1に1991年9月11日に近江八幡市牧町地先のヨシ群落を中心とする沿岸帯で堆積物を採取した地点の環境条件と堆積物の外観、表2に方法1で測定した潜在的な脱窒活性と堆積物性状の分析結果を示した。ヨシ群落外縁部のY-1、P-2、P-6とヨシ群落中央部の地点であるY-2では堆積深8cmないし10cmまでの層別の結果を得た。1,800~2,000mgN/m<sup>2</sup>・dayの高い活性の認められた層は表層から4cmまでの層であり、それよりも下の層では急激に活性が低下した。採取した堆積物の層構造をみると、ヨシ群落外縁部と中央部の地点では表層4cmないし7cmまでが腐植質や分

解していないヨシ植物体の堆積層で、それより下は粒径500μm以下の細砂の層であった。P-6地点では、腐植質、ヨシ植物体の堆積層が最も厚く堆積深7cmまで認められたが、潜在的な脱窒活性もそれに対応して、6~8cm層まで他の地点に比べて高い活性を示していた。

ヨシ群落周辺地点のP-5、P-1地点では0~2cm層のみの測定であるが、1,100mgN/m<sup>2</sup>・day前後の潜在的脱窒活性が見られた。これはヨシ群落内4地点のうち、外縁部のP-2地点を除く3地点の0~2cm層と比較すると約55~62%の活性であった。P-5、P-1地点の堆積物外観は粘土層の上に厚さ15~20cmの砂泥質が堆積しており、ヨシ群落内地点のように腐植質や未分解のヨシ植物体の堆積は認められなかった。

離岸500mのP-10地点0~2cm層での潜在的脱窒活性は657mgN/m<sup>2</sup>・dayで、同様の砂泥質の底質条件である岸近くのP-5、P-1と比べて約60%のレベルであった。砂浜域のP-9地点は粒径の大きな砂が底質の主体を占めており、好気的な環境条件であることを反映して、潜在的脱窒活性は0.5~2.6mgN/m<sup>2</sup>・dayのきわめて低いレベルであった。

ヨシ群落内の4地点のうち、P-2地点は他の3地点やヨシ群落外のP-5、P-1地点に比べて0~2cm層の潜在的脱窒活性が低かった。

**表1 沿岸帯調査水域各調査地点の環境条件と堆積物の外観 近江八幡市牧町地先 大規模増殖場内**

地点名	環境条件	堆積物外観
Y-2	離岸40m、ヨシ群落中央部、水深0.1m	表層4cmまで腐植質とヨシ植物体の堆積、その下は500μm以下の細砂
Y-1	離岸50m、ヨシ群落外縁部、水深0.3m	表層4cmまで腐植質とヨシ植物体の堆積、その下は500μm以下の細砂
P-2	離岸50m、ヨシ群落外縁部、水深0.5m	表層4cmまで腐植質とヨシ植物体の堆積、その下は500μm以下の細砂
P-6	離岸50m、ヨシ群落外縁部、水深0.4m	表層7cmまで腐植質とヨシ植物体の堆積、その下は500μm以下の細砂
P-5	離岸70m、ヨシ群落の沖側、水深0.8m	表層15cmまで砂泥質、その下は粘土
P-1	離岸50m、植生無し、水深0.5m	表層20cmまで砂泥質、その下は粘土
P-10	離岸500m、水深4.4m	砂泥質
P-9	離岸2m、砂浜域、水深0.5m	粒径4mm以上の砂を主体

**表2 沿岸帯の堆積物における潜在的な脱窒活性および表層堆積物の性状 近江八幡市牧町地先 同上**

地点名	潜在的脱窒活性(mgN/m <sup>2</sup> ・day)					含水率 %	IL %	pH	ORP mV	O <sub>2</sub> 消費 mg/w・g	炭素 %/dry	窒素 %/dry	リン %/dry
	0~2cm	2~4cm	4~6cm	6~8cm	8~10cm								
Y-2	1889.8	2012.7	1102.2	43.3		73.2	18.9	6.75	-220	1.62	3.05	0.30	0.11
Y-1	1823.5	1177.8	103.5	5.5	0.2	82.3	18.7	6.93	-225	1.41	5.32	0.54	0.23
P-2	802.8	1185.7	771.2	161.7		53.9	5.8	7.25	-210	1.26	2.48	0.27	0.14
P-6	2040.2	1067.4	1203.9	844.6		73.2	12.5	7.16	-200	1.46	3.09	0.31	0.27
P-5	1132.1					72.2	12.8	7.22	-141	1.71	3.34	0.32	0.25
P-1	1098.8					67.7	11.3	7.15	-205	1.26	2.96	0.33	0.21
P-10	657.4					63.6	8.2	7.30	-190	1.14	1.88	0.18	0.12
P-9	2.6	0.5	0.6			-	-	-	-	0.03	-	-	-

表3 ヨシ群落内外の堆積物による脱窒速度  $\text{mgN}/\text{m}^2\cdot\text{day}$  (カッコ内の数値は測定温度 $^{\circ}\text{C}$ )

地点名	離岸距離		1991年		1993年			1994年	
			11/12	12/9		1/7	8/23	5/11	5/27
Y-3	20m	ヨシ群落奥部					4.6 (24.0)	0.1 (18.1)	
Y-2	40m	ヨシ群落中央部	5.7 (15.0)	3.2 (16.4)			5.4 (25.0)	0.3 (18.1)	
Y-1	50m	ヨシ群落外縁部	9.0 (16.0)	11.7 (15.0)	19.1 (14.0)	39.5 (20.0)	64.5 (30.0)	25.2 (26.2)	6.7 (18.1)
P-5	70m	ヨシ群落沖	24.1 (15.6)	15.7 (16.0)					
P-10	500m	沖合		4.7 (16.0)					
尾上ヨシ群落内								2.3 (19.8)	

この地点の堆積物性状の分析結果から、含水量、灼熱減量 (IL%)、 $\text{O}_2$ 消費量、炭素量、窒素量等の項目が他の地点よりも低く、有機物含量が少ないことが示された。

以上のことから堆積物の性状が潜在的な脱窒活性に大きく影響することが示唆されたが、沿岸帯では特に腐植質や未分解の植物遺体などを多く含むヨシ群落内の堆積物が潜在的に高い脱窒活性を有していることが明らかになった。

**ヨシ群落内外の脱窒速度** ヨシ群落の内外で採取した堆積物を方法2、3または方法4を用いて現場に近い条件下で培養して測定した脱窒速度の結果を表3にまとめた。ヨシ群落内地点のうち、外縁部のY-1では5回の調査を行ったが現場に近い温度条件で測定した結果では、 $6.7\sim 25.2\text{mgN}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ の脱窒速度を認めた。ヨシ群落中央部の地点であるY-2地点や群落奥部のY-3地点での脱窒速度は $3.2\sim 5.7\text{mgN}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ であり、Y-1に比べて約5分の1から2分の1のレベルであった。また、1991年11月と12月には群落沖の地点でも測定を行ったが、群落の外縁部から20m沖のP-5の方がヨシ群落中央のY-2地点よりも脱窒速度が高い状況が見られた。約500m沖のP-10地点の値がY-2地点と同レベルであった。このことは、先の試験でヨシ群落内の方が群落外の地点に比べて潜在的な脱窒活性は高いという結果を得たことと矛盾するように思える。実際の現場では、脱窒反応の基質となる硝酸態窒素( $\text{NO}_3\text{-N}$ )濃度がヨシ群落の内外において異なり、これが制限要因となって脱窒速度に影響していると考えられるため、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度との関

表4 脱窒測定時の直上水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度  $\text{mgN}/\text{l}$ 

地点名	1991年	1993年		1994年	
	12/9	1/7	8/23	5/11	5/27
Y-3			0.02	0.02	
Y-2	0.06		0.13	0.05	
Y-1	0.38	0.39	0.51	0.27	
P-5	0.48				
P-10	0.32				
尾上ヨシ群落内					0.22

表5  $\text{NO}_3\text{-N}$ 添加による直上水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度と脱窒速度との関係(近江八幡市牧および尾上ヨシ群落)

	$\text{NO}_3\text{-N}$ $\text{mg}/\text{l}$	脱窒速度 $\text{mgN}/\text{m}^2\cdot\text{day}$	測定温度 $^{\circ}\text{C}$	現場泥温 $^{\circ}\text{C}$
Y-1	0.27	6.3	18.1	18.1
	0.27	7.1		
	1.33	25.8		
	2.26	60.8		
	4.68	150.8		
Y-2	0.05	0.3	18.1	18.4
	1.10	41.0		
Y-3	0.02	0.1	18.1	18.4
	0.02	0.1		
	1.06	21.8		
	1.93	40.1		
	4.59	87.4		
尾上	0.22	2.3	19.8	20.7
	1.41	17.5		
	2.81	50.5		

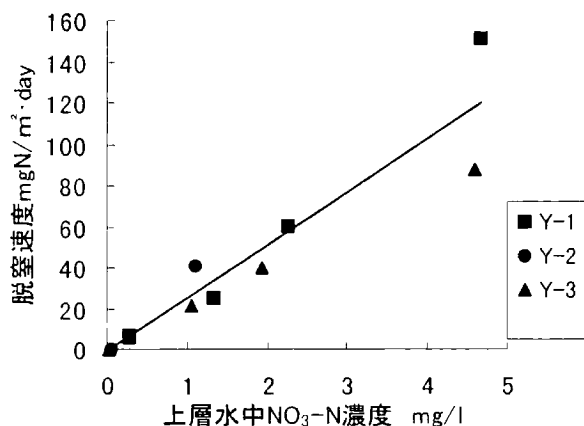


図3 直上水中のNO<sub>3</sub>-N濃度と脱窒速度との関係  
近江八幡市牧ヨシ群落堆積物 測定温度 18.1℃

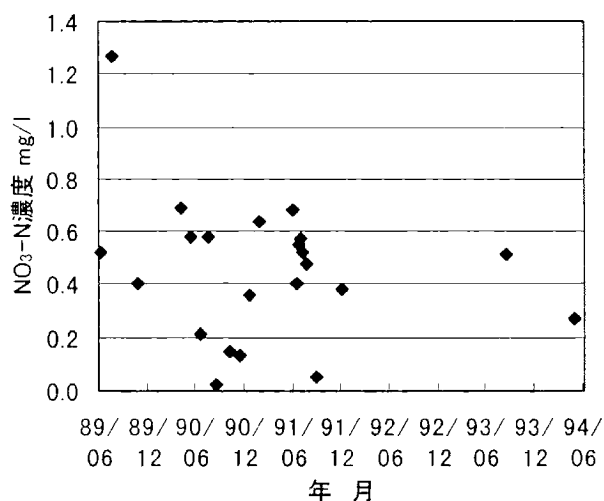


図4 ヨシ群落外縁部 Y-1 地点における NO<sub>3</sub>-N 濃度

係について検討した。表4に1991年12月、1993年8月および1994年5月に脱窒測定を行った地点の上層水中のNO<sub>3</sub>-N濃度を示した。ヨシ群落中央部のY-2地点では0.05~0.13mg/l、群落奥部のY-3地点では0.02mg/lで群落外縁部や群落外の地点の濃度範囲0.27~0.51 mg/lに比べて低い濃度であった。

方法4を用いた1994年5月の測定時に、上層水にKNO<sub>3</sub>水溶液を添加してNO<sub>3</sub>-N濃度を高めた条件での測定を合わせて実施した。表5に無添加の場合も含めてその測定結果を示した。また図3にその関係をグラフで表した。この濃度範囲ではNO<sub>3</sub>-N濃度N(mg/l)と脱窒速度D(mgN/m<sup>2</sup>·day)の間には直線的な関係が認められ、一次回帰式  $D = 25.77 \cdot N - 0.96$  で表された。この関係式はヨシ群落内3ヶ所の堆積物を用いた測定結果を基に求めたが、特に2mg/l程

度までの濃度範囲ではヨシ群落内の地点によるばらつきは小さく、一定の温度条件の下では上層水中のNO<sub>3</sub>-N濃度から近似的に脱窒速度を推定できると考えられた。赤潮対策技術開発試験報告書<sup>1)~6)</sup>の水質観測結果によると、1989年6月~1994年6月の近江八幡市牧町地先の沿岸帯水域における硝酸態窒素(NO<sub>3</sub>-N)濃度は0.01~2.09mg/lの範囲で観測された。最大値は4月にヨシ群落横に流入している農業排水路の河口部で観測された。ヨシ群落外縁部のY-1地点では8,9月に0.1mg/l以下に低下することがあり、1989年7月には1.27mg/lの最大値を記録したが、観測値の77%は0.2~0.7mg/lの範囲に認められ平均値は0.45mg/lであった(図4)。18.1℃の温度条件下での脱窒速度を回帰式によって計算すると、平均NO<sub>3</sub>-N濃度0.45mg/lの下では、10.6mgN/m<sup>2</sup>·dayの脱窒速度で窒素が浄化されると推定される。Y-1地点の水深を30cmとすると1m<sup>2</sup>あたりに含まれるNO<sub>3</sub>-N量は135mgであり、単純に割り算をすると13日間ではほとんど浄化される計算になる。現実には水の交換があり、13日間もヨシ群落内に同じ水塊が滞留することはあり得ないが、ヨシ群落の岸近くの奥部で、水深10cm程度の場所では完全に浄化されるまでの時間が3分の1の4日間程度という計算になる。このような場所では水が交換しにくいと、滞留した水塊からNO<sub>3</sub>-Nが脱窒でほとんど取り除かれることが実際に起こり得ると思われる。ヨシ群落奥部のY-3地点でのNO<sub>3</sub>-N濃度は1991年6~7月の水質調査結果<sup>3)</sup>および表4の結果では0.02~0.08mg/lの低い範囲であり、ヨシ群落内の窒素浄化にヨシ植物体や付着藻類による吸収などの要因と共に脱窒が大きく関与していることを示唆している。また外縁部のY-1地点でも8月に0.02mg/lの低い濃度が観測されている(図4)。この時の同地点での水深は20cmであり<sup>2)</sup>、夏季の渇水で水位が低下した結果、堆積物の脱窒による影響がNO<sub>3</sub>-N濃度の減少に寄与した度合いが大きいのではないかとと思われる。

脱窒反応に対する温度の影響については、1993年1月にY-1地点で採取した柱状堆積物試料を用いて、培養温度条件を3段階に変えて測定を行った(表3)。その結果、脱窒速度は温度に依存して変化し、指数回帰式をあてはめて近似すると脱窒速度Dと培養温度tとの間には  $D = 7.64 \cdot \exp(0.0733 \cdot t)$ 、 $Q_{10} = 2.08$  の関係が見られた。(図5)。

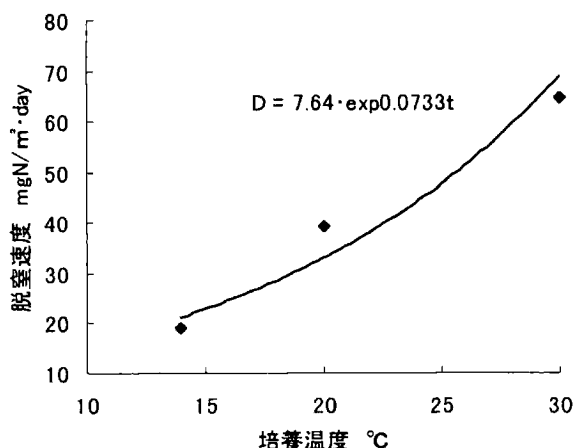


図5 培養温度による脱窒速度の違い(近江八幡市牧町地先ヨシ群落外縁部 Y-1 地点堆積物)

**琵琶湖全域における脱窒速度** 表6に琵琶湖の沖合、内湾、港湾の各所で測定した結果を示した。

北湖沖合:1月の泥温は7.8~9.0°Cの範囲であり、水深の異なる地点間での温度差は小さかった。これは全層循環により、湖内の水温が均一化していたためと考えられる。6月の泥温はst.2では12.4°Cに上

昇したが、他の4地点では1月とほぼ同じ8.2~9.3°Cの範囲であった。湖底直上水中のNO<sub>3</sub>-N濃度の範囲は1月が0.14~0.21mg/l、6月が0.21~0.25mg/lで、st.4では1月と6月の濃度がほぼ等しかったが、他の4地点では6月の濃度が1月の濃度を0.04~0.08mg/l上回っていた。脱窒速度の測定は原則として現場泥温に近い温度条件で行ったが、1月のst.3と南比良-長命寺中央では現場泥温よりもそれぞれ2.7°Cと2.4°C低い温度設定となった。現場条件を模した条件下での脱窒速度は1月が0.7~6.1mgN/m<sup>2</sup>·day、6月が1.7~4.4 mgN/m<sup>2</sup>·dayであった。2回の調査結果を合わせて解析すると、調査地点の間には有意差が認められ(p<0.05一元配置分散分析)、南比良-長命寺中央が最も低く、st.2とst.3が高い傾向を示したが、季節の違いによる有意な差は認められなかった(ウィルコクソンの符号付順位和検定)。特にst.2では1月と6月で泥温に4.6°Cの差が認められたが、その状態を模して測定した脱窒速度はそれぞれ4.2、4.3 mgN/m<sup>2</sup>·dayでほとんど差がなく、北湖沖合地点に関しては温度の違いによる脱窒への影響が認められなかった。

表6 琵琶湖各地点の脱窒速度

地点	1994/1/24,26								1994/6/6,8							
	水深 m	現場 泥温 °C	測定 温度 °C	現場濃度区		添加区		水深 m	現場 泥温 °C	測定 温度 °C	現場濃度区		添加区			
				NO <sub>3</sub> -N 濃度 mg/l	脱窒 速度 mgN/ m <sup>2</sup> · day	NO <sub>3</sub> -N 濃度 mg/l	脱窒 速度 mgN/ m <sup>2</sup> · day				NO <sub>3</sub> -N 濃度 mg/l	脱窒 速度 mgN/ m <sup>2</sup> · day	NO <sub>3</sub> -N 濃度 mg/l	脱窒 速度 mgN/ m <sup>2</sup> · day		
<b>北湖沖合地点</b>																
st.2	24.0	7.8	7.9	0.14	4.2	1.09	14.6	21.5	12.4	12.6	0.21	4.3	1.14	15.3	2.46	27.4
st.3	48.0	8.9	6.2	0.15	6.1	1.11	16.1	47.7	8.9	8.6	0.22	4.4	1.40	14.9	2.19	25.4
st.4	78.0	8.6	7.9	0.21	1.2	1.17	8.2	80.4	8.8	8.6	0.22	3.3	1.36	7.2	2.29	13.8
今津-姉川中央	86.5	8.6	7.9	0.20	2.2	1.22	6.4	85.5	8.2	8.6	0.24	3.0	1.41	8.6	-	-
南比良-長命寺中央	55.0	9.0	6.6	0.17	0.7	-	-	57.5	9.3	9.2	0.25	1.7	1.29	13.4	2.44	15.3
<b>南湖沖合地点</b>																
堅田-木浜中央	6.5	8.0	6.5	0.18	3.6	-	-	5.5	18.0	19.5	0.07	1.5	1.04	19.7	2.02	33.9
唐崎-伊佐々川中央	4.5	6.4	7.9	0.16	2.6	1.21	18.2	3.5	21.2	21.4	0.05	5.1	1.12	36.0	2.07	61.8
<b>内湾</b>																
長命寺湾牧P-10		-	-	-	-	-	-		19.7	19.5	0.07	1.6	1.19	28.2	2.03	67.5
赤野井湾口	2.0	6.6	7.9	0.23	2.5	-	-	1.9	24.5	25.5	0.18	4.1	1.20	47.9	2.37	111.7
赤野井湾奥	2.5	5.8	7.9	0.34	8.4	1.34	21.9	2.8	24.5	25.5	0.35	40.8	1.46	72.9	2.59	99.8
<b>港湾</b>																
彦根港	3.5	7.8	6.2	0.19	21.8	-	-	3.2	18.7	18.5	0.36	8.1	1.59	28.7	2.46	46.5
長浜港	3.8	6.9	6.2	0.25	14.6	1.34	51.9	3.0	18.2	18.5	0.09	1.1	1.15	31.6	-	-
浜大津港	3.8	6.4	6.3	0.31	4.7	1.39	26.6	3.2	23.2	21.4	0.05	0.5	1.02	26.6	2.20	35.9

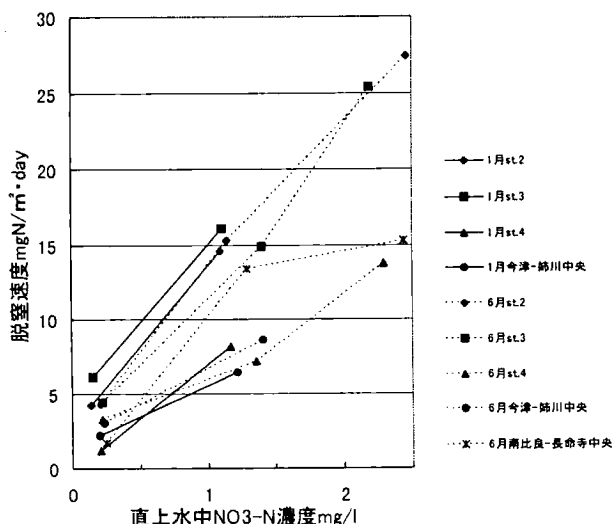


図6 直上水中のNO<sub>3</sub>-N濃度と脱窒速度との関係  
北湖沖合堆積物試料 現場泥温を模した測定

図6にKNO<sub>3</sub>水溶液を添加し、直上水中のNO<sub>3</sub>-N濃度を変えて測定した結果を示した。NO<sub>3</sub>-N添加によって脱窒速度は増加し、3段階のNO<sub>3</sub>-N濃度で測定した6月のst.2, st.3およびst.4では、直上水中のNO<sub>3</sub>-N濃度と脱窒速度の間に直線的な関係が認められた。1月と6月にNO<sub>3</sub>-N添加の測定をあわせて実施したst.2, st.3, st.4および今津-姉川中央の結果を2回の反復データとして、NO<sub>3</sub>-N無添加の場合とNO<sub>3</sub>-Nを1μg/l添加した場合に分けて検定を行うと、地点間には有意差が認められた (p<0.05 二元配置分散分析)。最小有意差法を用いた多重比較検定によりst.2とst.3およびst.4と今津-姉川中央のそれぞれの間には有意差が無いが、他の地点の組み合わせの間には有意差が認められた (p<0.05)。st.4と今津-姉川中央は水深が約80mあり、他の調査地点よりも深いことによる要因が、脱窒活性が低くなる方向に関与しているものと考えられる。

南湖沖合：調査した2地点での1月の泥温はそれぞれ8.0と6.4℃、6月は18.0と21.2℃で、6月の方が10.0~14.8℃高い条件であった。実験室での測定温度には現場泥温に対して±1.5℃の差が生じた。現場直上水中のNO<sub>3</sub>-N濃度は1月が0.18と0.16mg/l、6月が0.07と0.05mg/lで6月の方が低い条件であった。脱窒速度は1月が3.6と2.6mgN/m<sup>2</sup>·day、6月が1.5と5.1mgN/m<sup>2</sup>·dayで、1月に比べて6月の方が堅田-木浜中央では低く、唐崎-伊佐々川中央では高い結果となった。

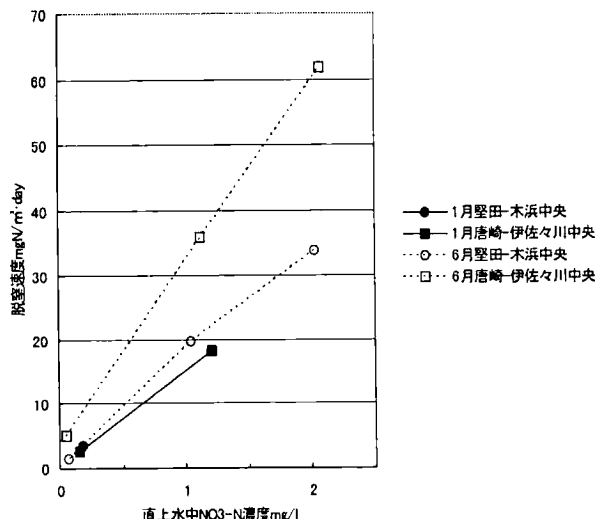


図7 直上水中のNO<sub>3</sub>-N濃度と脱窒速度との関係  
南湖沖合堆積物試料 現場泥温を模した測定

図7にKNO<sub>3</sub>水溶液を添加し、直上水中のNO<sub>3</sub>-N濃度を変えて測定した結果を含めて示した。3段階のNO<sub>3</sub>-N濃度で測定した6月の測定結果では、直上水中のNO<sub>3</sub>-N濃度と脱窒速度の間に直線的な関係が認められた。6月の堅田-木浜中央の試料に対してNO<sub>3</sub>-N添加した区では高い脱窒速度が観測された事から、この地点では低いNO<sub>3</sub>-N濃度が脱窒の制限要因になっているものと考えられた。しかし6月の唐崎-伊佐々川中央では堅田-木浜中央よりも低いNO<sub>3</sub>-N濃度のもとで高い脱窒速度が観測され、NO<sub>3</sub>-Nの添加によりさらに高くなった。6月の両地点では泥温が3.2℃、測定温度が1.9℃異なり、単純には比較出来ないが堅田-木浜中央よりも脱窒活性が高かった可能性がある。

内湾：赤野井湾口および湾奥における1月の泥温はそれぞれ6.6℃と5.8℃、6月の泥温は両地点24.5℃であったのに対し、測定温度は1月が泥温より1.3~2.1℃高く、6月は1.0℃高い設定となった。直上水中のNO<sub>3</sub>-N濃度は1月が0.23と0.34mg/l、6月が0.18mg/lと0.35mg/lで湾奥で、1月6月共に高い値であった。脱窒速度はNO<sub>3</sub>-N濃度が高いことを反映して湾奥で高く、6月にはNO<sub>3</sub>-N無添加で40.8mgN/m<sup>2</sup>·dayの極めて高い値を示した。図8にKNO<sub>3</sub>水溶液を添加し、直上水中のNO<sub>3</sub>-N濃度を変えて測定した結果を含めて示した。6月の測定ではNO<sub>3</sub>-N添加してNO<sub>3</sub>-N約1.2~1.4mg/lでは湾口47.9、湾奥72.9、NO<sub>3</sub>-N約2.4~2.6mg/lでは湾口111.7、湾奥99.8の



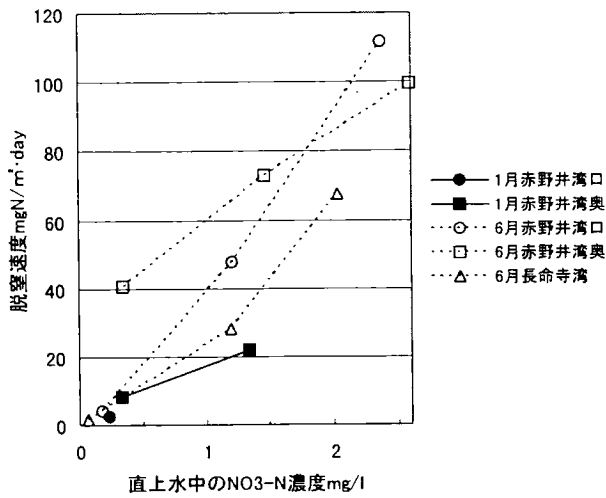


図8 直上水中のNO<sub>3</sub>-N濃度と脱窒速度との関係  
内湾堆積物試料 現場泥温を模した測定

脱窒速度が観測され、2.4~2.6mg/lでは両地点の差が見られなくなった。赤野井湾口部の堆積物でも、夏の高温時にNO<sub>3</sub>-N濃度が十分に高いときには高い脱窒活性を示すと考えられる。

6月の調査時には、長命寺湾でも測定を行った。現場泥温は19.7℃、NO<sub>3</sub>-N濃度は0.07mg/lであり、南湖沖合に近い条件で、脱窒速度は1.6 mgN/m<sup>2</sup>·dayであった。これは堅田一木浜中央地点の結果に近い値であった。NO<sub>3</sub>-Nを添加すると南湖沖合と同等の脱窒活性が認められた。

港湾：1月の泥温は6.4~7.8℃で彦根港が最も高かった。6月は18.2~23.2℃で浜大津港が最も高い温度であった。現場泥温を模した測定温度は1月が6.2~6.3℃で彦根港では現場泥温よりも1.2℃低い設定となった。6月は18.5~21.4℃で浜大津港では現場泥温よりも1.8℃低い設定となった。直上水中のNO<sub>3</sub>-N濃度は1月が0.19~0.31mg/l、6月が0.05~0.36mg/lで1月は浜大津港が最も高く、6月は彦根港が最も高い値を示した。脱窒速度は1月の彦根港と長浜港でそれぞれ21.8、14.6mgN/m<sup>2</sup>·dayの特異的に高い値が認められたが、6月には温度が10℃以上上昇したにもかかわらず、それぞれ8.1と1.1 mgN/m<sup>2</sup>·dayに低下した。長浜港ではNO<sub>3</sub>-N濃度が下がったことも一因と考えられるが、彦根港では6月のNO<sub>3</sub>-N濃度は0.36mg/lの高い値を示しており、堆積物のもつ脱窒活性そのものが下がったと解釈するの

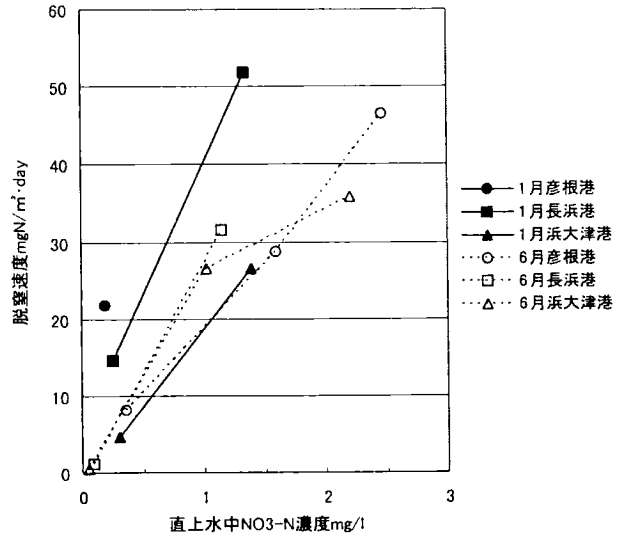


図9 直上水中のNO<sub>3</sub>-N濃度と脱窒速度との関係  
港湾堆積物試料 現場泥温を模した測定

が妥当と思われる。図9に示すとおり、NO<sub>3</sub>-Nを添加した場合にも1月に比べて活性は低く、南湖沖合や長命寺湾と同等の脱窒活性であった。

## 文 献

- 1) 滋賀県水産試験場 (1990) 平成元年度赤潮対策技術開発試験報告書
- 2) 滋賀県水産試験場 (1991) 平成2年度赤潮対策技術開発試験報告書
- 3) 滋賀県水産試験場 (1992) 平成3年度赤潮対策技術開発試験報告書
- 4) 滋賀県水産試験場 (1993) 平成4年度赤潮対策技術開発試験報告書
- 5) 滋賀県水産試験場 (1994) 平成5年度赤潮対策技術開発試験報告書
- 6) 滋賀県水産試験場 (1995) 平成6年度赤潮対策技術開発試験報告書
- 7) 滋賀県水産試験場 (1998) 平成9年度漁場富栄養化対策事業報告書
- 8) Sørensen, J. (1978) Denitrification Rates in a Marine Sediment as Measured by the Acetylene Inhibition Technique Appl Environ Microbiol. 36(1): 139-143.

