

# 琵琶湖の水陸移行帯の湿地における脱窒とそれに影響を及ぼす環境因子

赤塚 徹志

環境動態学専攻

## 第1章 緒言

琵琶湖の水陸移行帯には、内湖とよばれる潟湖群や流入河川河口域の三角州周辺域を中心に湿地景観がみられる。これらの湿地は、集水域からの汚濁物質が琵琶湖へ流入する際に、それらを緩衝する場として琵琶湖の水質形成に寄与する。特に琵琶湖のような人為的な富栄養化が懸念される湖沼では、その水陸移行帯における脱窒過程は富栄養化の原因物質である硝酸イオンを除去する浄化機能として重要な役割を担っていると考えられる。しかし、琵琶湖生態系の中で窒素負荷を軽減する場としての重要性は近年まであまり認識されず、水陸移行帯の湿地は干拓事業による農地開発や湖岸堤の建設によりその多くが消失してきた。したがって、水陸移行帯の湿地における脱窒による浄化機能を明らかにすることで、湿地が有する環境科学的な意義を再認識することは重要である。

本研究では、水陸移行帯の湿地における硝酸イオンの供給状況、堆積物の乾燥・湿潤に伴う酸化・還元環境の変動、ヨシの生育による環境因子の変動が脱窒に及ぼす影響について調査し、琵琶湖生態系の中での水陸移行帯の湿地の機能について窒素浄化の観点から論じた。

## 第2章 水陸移行帯の湿地における硝酸イオンの供給が脱窒に及ぼす影響

湿地への硝酸イオンの供給量の差異が脱窒に及ぼす影響をみるために、農業排水の流入がある湿地(湿地A)と水の流入が降雨である湿地(湿地B)と、対照域として水陸移行帯の他の景観である砂浜において調査を行なった。

堆積物直上水の硝酸イオン濃度は、湿地Aで検出限界以下 $\sim 6.8\text{mgN l}^{-1}$  (av. 1.2)と定点間における変動はみられたものの高い値で推移したのに対し、湿地Bで全て検出限界以下であった。硝酸基質を添加しない脱窒速度は、湿地Aで $6.7\sim 22\text{mgN m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 、湿地Bで $0.2\sim 0.8\text{mgN m}^{-2}\text{d}^{-1}$ と、湿地Aで明らかに高い傾向を示した(図1)。このことから、現場脱窒速度は、堆積物直上水の硝酸イオン濃度の差異に影響されるといえた。

硝酸基質を添加した潜在脱窒速度は、湿地Aで $12\sim 22$ (av. 18) $\mu\text{gN cm}^{-3}\text{d}^{-1}$ 、湿地Bで $11\sim 28$ (av. 18) $\mu\text{gN cm}^{-3}\text{d}^{-1}$ であった。これらの値に湿地間で

差はみられなかったが、対照域とした砂浜 (av. 7.2)と比較して高く推移した。堆積物中の有機物量は、湿地で $11\sim 110\text{mg cm}^{-3}$  (av. 65)、砂浜で $7.5\sim 19\text{mg cm}^{-3}$  (av. 13)と湿地で高く、湿地における高い潜在速度はこの豊富な有機物により維持されると考えられた。

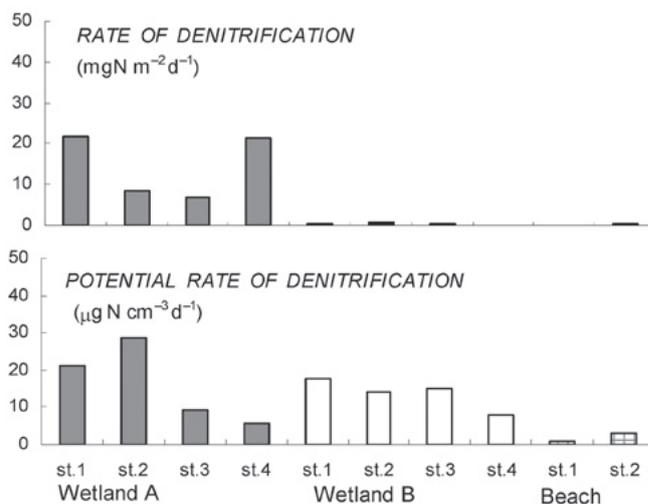


図1 硝酸イオンの供給状況の異なる湿地と、対照域とした砂浜における脱窒速度

## 第3章 水陸移行帯の湿地における堆積物の乾燥・湿潤過程が脱窒に及ぼす影響

湿地における堆積物の冠水と干出による堆積物乾燥度の変動が脱窒に及ぼす影響をみるために、湿地の冠水域(F1-F3)と干出域(E1-E7)における調査と、堆積物を乾燥化ならびに湿潤化してその酵素反応定数(Vmax、Ks)の変動をみる実験を行なった。

脱窒速度は、冠水域で全て検出限界以下であったのに対し、干出域では検出限界以下 $\sim 21\mu\text{gN cm}^{-3}\text{d}^{-1}$ まで大きく変動したが、堆積物乾燥度の高い定点で高くなる傾向にあった(図2)。この結果は、冠水域においてその還元的環境下で硝酸イオンが蓄積しないことに脱窒が強く制限され、逆に干出域では乾燥による酸化的環境への移行による硝酸イオンの蓄積により脱窒が促進されることを示唆した。潜在脱窒速度は、冠水域 (av. 4.6) よりも干出域 (av. 28) で高く、干出域において脱窒菌がその酸化的環境で好気(酸素)呼吸により増殖していることを示

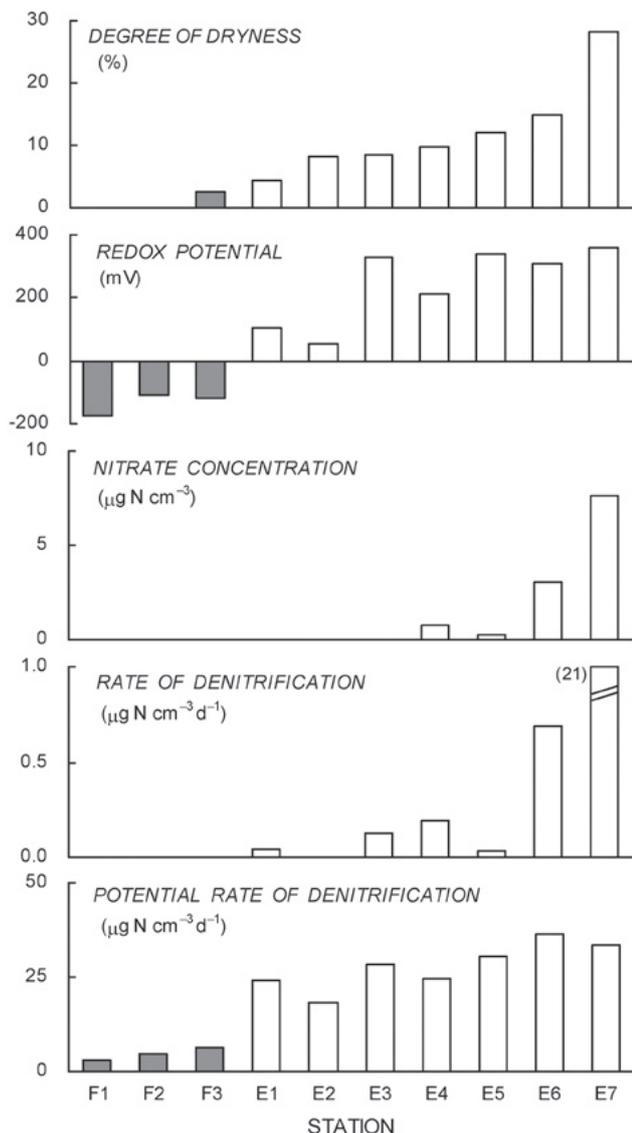


図2 冠水域と干出域における環境因子（堆積物乾燥度、酸化還元電位、間隙水硝酸イオン濃度）と脱窒速度

峻した。

堆積物の乾燥化実験では、脱窒の酵素反応定数は増加し、逆に堆積物の湿潤化実験ではこれらの定数値は減少した(表1)。Vmaxの変動は、乾燥化による堆積物の酸化的環境への移行(酸化還元電位の増大)により脱窒菌が好気呼吸で増殖し、逆に湿潤化による堆積物の還元的環境への移行(酸化還元電位に低下)により好気呼吸が低下し、かつ脱窒(硝酸塩呼吸)も硝酸イオンの枯渇により低下することで脱窒菌が減少することを示唆した。一方、Ksの変動は、堆積物の乾燥化と湿潤化に連動した硝酸イオンの蓄積・枯渇により、脱窒菌が硝酸イオンに対する基質親和性の異なる菌種に遷移することを示唆した。

表1 冠水・干出処理実験における環境因子(酸化還元電位、間隙水硝酸イオン濃度)と脱窒の酵素反応定数(Ks、Vmax)

	Eh (mV)	Nitrate (µg N cm <sup>-3</sup> )	Denitrification	
			K <sub>s</sub> (mg N l <sup>-1</sup> )	V <sub>max</sub> (µg N cm <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> )
Wetting treatment				
before	350	3.5	9.2	83
after	0	<0.1	1.8	43
Drying treatment				
before	-110	<0.1	0.4	4.5
after	380	2.2	0.9	15

#### 第4章 水陸移行帯の湿地におけるヨシの成長・枯死過程に伴う環境因子の変動が脱窒に及ぼす影響

湿地におけるヨシの成長・枯死に伴うヨシ群落域の環境因子の変動が脱窒に及ぼす影響をみるために、冠水域における水ヨシ群落域と干出域における陸ヨシ群落域で調査を行なった。

水ヨシ群落域では、硝酸基質を添加しない脱窒速度は検出限界以下であり、脱窒は硝酸イオンに強く制限された(表2)。一方、陸ヨシ群落域では、硝酸イオン濃度が高く、そのため脱窒は全ての基質添加条件で測定された。また、対照域と比較すると、水ヨシ群落域と陸ヨシ群落域ともに、硝酸基質添加での脱窒は対照域(ヨシ非生育域)で高く、これはヨシ群落域では硝酸イオンが微生物による窒素の有機化に利用される割合が高く、それが脱窒に抑制効果をもたらすことを示唆した。

脱窒に対する有機物(グルコース)の添加効果(CN/N)は、水ヨシ群落域よりも陸ヨシ群落域で高かった(表3)。このことは、陸ヨシ群落域における脱窒が有機物の影響を受けやすい環境にあることを示唆した。さらに、陸ヨシ群落域では、脱窒に対する硝酸イオンの添加効果(N/no ad、CN/C)は対照域と比較して低かった。このことは、陸ヨシ群落域において硝化で生成された硝酸イオンが効率的に脱窒に利用されることを示唆した。

表2 ヨシの成長・枯死段階別のヨシ群落域と対照域における脱窒速度とそれらの比（-は基質未添加、Cは有機基質、Nは硝酸基質、CNは硝酸・有機基質添加での脱窒速度を示す）

Phase	Substrate	Water area			Land area		
		① Reed ( $\mu\text{g N cm}^{-3} \text{d}^{-1}$ )	② Control ( $\mu\text{g N cm}^{-3} \text{d}^{-1}$ )	①/②	① Reed ( $\mu\text{g N cm}^{-3} \text{d}^{-1}$ )	② Control ( $\mu\text{g N cm}^{-3} \text{d}^{-1}$ )	①/②
Growth (Apr.-Jul.)	-	0.0	0.0	-	16	15	1.0
	C	0.0	0.0	-	22	23	0.99
	N	21	45	0.47	25	47	0.54
	CN	25	53	0.47	37	63	0.58
Stationary (Aug.-Oct.)	-	0.0	0.0	-	26	28	0.94
	C	0.0	0.0	-	43	39	1.1
	N	22	33	0.67	28	35	0.80
	CN	28	40	0.70	45	46	0.97
Senescent (Nov.-Mar.)	-	0.0	0.0	-	5.2	4.4	1.2
	C	0.0	0.0	-	6.6	8.9	0.74
	N	7.7	19	0.41	6.8	14	0.50
	CN	7.7	17	0.45	8.9	16	0.56

表3 ヨシの成長・枯死段階別の有機基質の添加と未添加、硝酸基質の添加と未添加での脱窒速度の比

Phase	Ratios	Water area		Land area	
		Reed	Control	Reed	Control
Growth (Apr.-Jul.)	C/-	-	-	1.4	1.5
	CN/N	1.2	1.2	1.5	1.3
	N/-	-	-	1.6	3.2
	CN/C	-	-	1.6	2.8
Stationary (Aug.-Oct.)	C/-	-	-	1.7	1.4
	CN/N	1.3	1.2	1.6	1.3
	N/-	-	-	1.1	1.3
	CN/C	-	-	1.0	1.2
Senescent (Nov.-Mar.)	C/-	-	-	1.3	2.0
	CN/N	1.0	0.9	1.3	1.2
	N/-	-	-	1.3	3.1
	CN/C	-	-	1.3	1.8

## 第5章 総合考察

脱窒速度は、硝酸イオンが負荷される場で高く、湿地は流域からの窒素負荷を軽減する機能を有した。脱窒の潜在活性は、琵琶湖生態系の他の景観（沖域、砂浜）と比較して高く、湿地は高い浄化能を有する場といえた。また、堆積物の乾燥により脱窒の最大速度が増大した。このことは、堆積物の干出が湿地の脱窒菌数の維持に寄与していることを示唆した。陸ヨシ群落域では、対照域（ヨシ非生育域）と比較して硝酸イオンの添加効果が小さく、硝化により生成された硝酸イオンが効率的に脱窒に利用されると考えられた。このように、水陸移行帯における脱窒とそれに影響を及ぼす因子の多様性は、流域からの窒素負荷量の変動に対して窒素の浄化という観点から広い応答範囲を維持していた。水陸移行帯を排水処理の場のごとく扱うのには疑問を感じるが、琵琶湖生態系の中で水陸移行帯の湿地は流域からの栄養物質の負荷に対して一定の窒素浄化機能を有する場といえる。