

東北工業大学 江成敬次郎、斎藤孝市、斎藤 茂
○西村友樹、佐藤 保
宮城県伊豆沼・内沼環境保全財団 柴崎 徹

1. 目的

水中の窒素・リンを除去する操作には、窒素は生物学的硝化・脱窒法、リンについては、凝集沈殿法あるいは生物学的脱リン法などある。しかし、これらの操作は、大きな除去効果が期待できる反面、建設、維持管理において多額の費用がかかってしまう。それに対し、水生植物による窒素・リンの除去操作は、コストやエネルギー消費が少ないという利点を持っている。水生植物は生長したり、生命を維持するために水域中の窒素・リンを体内に取り入れる。そのため、水生植物を育てる環境さえ整えれば、水中の窒素・リンの除去が期待できる。また、水生植物群落は、様々な生物の生息を可能にし、生態系の安定にも寄与している。他にも、生い茂った水生植物は人々にやすらぎを与えたり、水生植物の根が沿岸の浸食を防ぐことなどから、自然環境に適した処理として二次的、三次的価値も期待されている。

宮城県にある伊豆沼は、白鳥等の冬鳥の飛来地で有名なところである。この白鳥類は、冬季の餌としてマコモの根を好んで食べる。マコモは夏季において水域中の窒素・リンを体内に取り入れ、冬季にこれらを地下茎に蓄えるという特徴を持っている。このため、水域中の窒素・リンを人為的操作を介さずに除去できると期待されている。

水生植物による窒素・リンの除去作用は、水生植物による吸収の他に、窒素では根圏における微生物の働き（特に硝化、脱窒作用）があり、リンでは土壌による吸着があげられる。従って、マコモ自体の窒素・リンの除去能力を解明するには、これらの影響を除く作業が必要である。このため、我々はマコモの水耕栽培を行い、マコモ単体による窒素・リンの除去能力を定量的に評価することを試みた。

2. 実験方法

本実験では春に伊豆沼のマコモ栽培地から採取したマコモの地下茎から発芽させた苗を使い、水耕栽培を行った。そして、マコモがある程度大きくなった時点で、実験を開始した。実験に用いた水耕栽培装置を図2-1に示す。まず、透明ビニール袋に所定量の栽培液とマコモを入れ、紐で茎と透明ビニール袋の口を一緒に縛る。こうして、栽培液の水分が蒸発しないようにした。次に、マコモの入った透明ビニール袋を黒ビニール袋の中に入れ、ポリバケツの中に入れる。黒ビニール袋は、直射日光によるマコモの根焼けを防ぐための紐である。さらに、マコモが転倒しないように、ポリバケツに固定した紐で黒ビニール袋の口とマコモの茎を縛った。茎及び葉の部分は、袋から出ているようにした。このようにして、一週間ビニールハウス内に置いた。毎週一回、栽培液の残存量とマコモ重量（湿潤）の測定を行い、同時に栽培液の採水を行った。採水した栽培液は $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の各濃度とpHを測定するために用いられた。水耕栽培に用いた栽培液の組成は、表2-1に示した通りである。なお、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度は栽培時期により表2-1に示した値で適宜変化させた。それらの条件は、考察に必要な都度ふれることとする。栽培液量は、実験開始時の0週（7/3）から7週（8/21）までを1.0ℓにし、その後は1.5ℓとした。これは、マコモが大きくなったためである。

実験に使用したマコモは50本で、10本ずつ5つの組にして、栽培条件をセットした。それらのマコモに $\text{NO}_3\text{-N}$ 10～ $\text{NO}_3\text{-N}$ 19～ $\text{NO}_3\text{-N}$ 50～ $\text{NO}_3\text{-N}$ 59と番号を付けた。

3. 結果と考察

ここでは、栽培液の濃度条件を一定にして栽培した $\text{NO}_3\text{-N}$ 10～ $\text{NO}_3\text{-N}$ 19の10本のマコモについて考察する。なお、この10本のマコモの内、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 11と12は、途中で枯れて測定不能となったため、以後の考察は残りの8本のマコモを対象とする。

実験結果の例として、図3-1と3-2に、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 10と19のマコモの水耕栽培時における吸水量と栽培

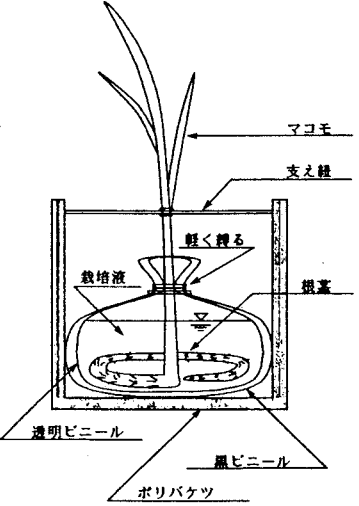


図2-1 水耕栽培装置

表2-1 栽培液の成分組成 (mg/l)

成分	濃度	成分	濃度
K	23.4	S	16.5
Ca	12.0	Mg	14.8
Fe	2.50	B	0.54
Mn	0.05	Cu	0.02
Zn	0.05	Mo	0.01
N	24.0		
P	6.0、18.0		

液のT-N濃度、 PO_4 -P濃度の経過変化を示す。これらの図から、T-N濃度、 PO_4 -P濃度と吸水量の経過変化は次のようにまとめられる。

図3-1に示したNO. 10では、T-N濃度は上下に大きく変動しながら、13~14週あたりまで減少する。その後、徐々に増加し、20週以降は12mg/L~18mg/Lでほぼ一定になった。 PO_4 -P濃度は7週までやや上昇し、8週以降では13、14週を除いて低い値が続く。なお、 PO_4 -Pの供給濃度は7週まで18mg/L、これ以降6mg/Lとした(但し、13、14週は18mg/L)。濃度変化を供給濃度と比較すると、T-N濃度は3週目を除くすべての週で供給濃度を下回った。 PO_4 -P濃度は、7週まで供給濃度より高く、8週から12週においては低くなった。15週以降は供給濃度と同じ、ほぼ6mg/Lで一定となった。次に、吸水量は12週まで緩やかに上昇し、最大値は540gであった。その後18週まで減少し、18週以降は100g前後で一定となった。

図3-2に示したNO. 19では、T-N濃度は1、2週及び11週付近を除いて、21週目までほとんど0であった。21週以降では上昇し、23、24週でおよそ11mg/Lになった。 PO_4 -P濃度はNO. 11とほぼ同様の濃度変化を示している。濃度変化を供給濃度と比較すると、T-N濃度は栽培期間中常に供給濃度を下回っている。 PO_4 -P濃度はNO. 10とほぼ同様の結果となっている。次に、吸水量はNO. 10と同様の変化であるが、NO. 10に比べ全体的に高く、最高値は13週でおよそ900gであった。18週以降では140g~300gの間に収まっている。

次に、マコモが実際どのくらいのT-N、 PO_4 -Pを吸収したのかを考察するために、吸収量を算出した。吸収量は、供給時の栽培液量に供給濃度を掛けた値から、測定時の栽培液量にその時の濃度を掛けた値を引いたものである。そして、栽培期間中の平均的な変化を見るため、それぞれの積算値を求めた。さらに、吸水量についても、積算吸水量を求めた。

一例として、NO. 10と19のマコモの水耕栽培におけるT-N積算吸収量、 PO_4 -P積算吸収量、積算吸水量、マコモ重量の経過変化を図3-3に示した。これらのグラフの傾きは、いずれも変化速度を表している。図3-3の曲線の変化傾向を見ると、それぞれの増加傾向は3つの期間(例えばT-N吸収量では、前期; 1~7週、中期; 7~17週、後期; 17~24週)に分けて考えることが出来る。そして、NO. 10と19以外のマコモについても同様の変化を示しているので、3つの期間に分けて考えることにした。

T-N積算吸収量、 PO_4 -P積算吸収量、積算吸水量、マコモ重量の経過変化を3つの期間に分けて直線近似し、最小二乗法によって勾配を求めた。こうして、1日当たりの吸収量、吸収量、重量増加量を求めた。この結果を表3-1に示す。

表3-1よりT-N吸収量、 PO_4 -P吸収量、吸水量、重量増加量について考察する。T-N吸収量は7~17週が最も大きく、次に17週以降で、1~7週では最小であった。一方、 PO_4 -P吸収量では1~12週での値が、13週~19週での値よりも大きい。吸水量は3~16週の値が大きく、次いで1~3週、16週以降の順であった。また、重量増加量は1~5週の値よりも、5~16週までの値の方が大きい。従って、T-N吸収量、 PO_4 -P吸収量、吸水量、重量増加量は、どれも栽培期間中の8~12週において、1日当たりの値が大きいことが言える。また、マコモ重量が17週以降増加していないにもかかわらず、T-N吸収量に大きな値が出ていることが特徴である。

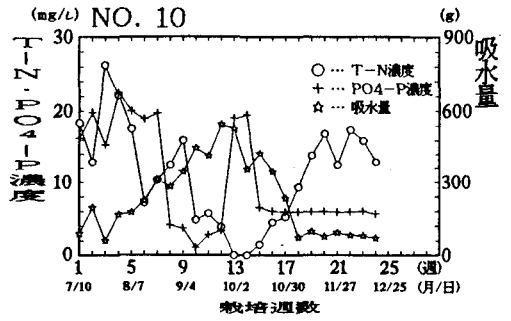


図3-1 T-N・ PO_4 -P濃度と吸水量の経過変化

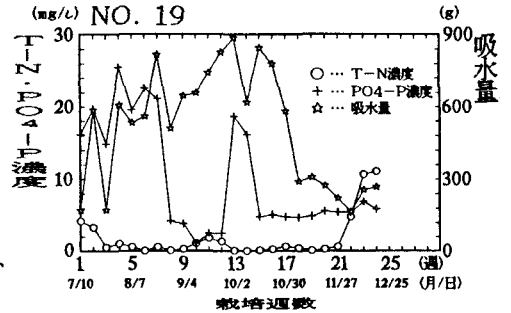


図3-2 T-N・ PO_4 -P濃度と吸水量の経過変化

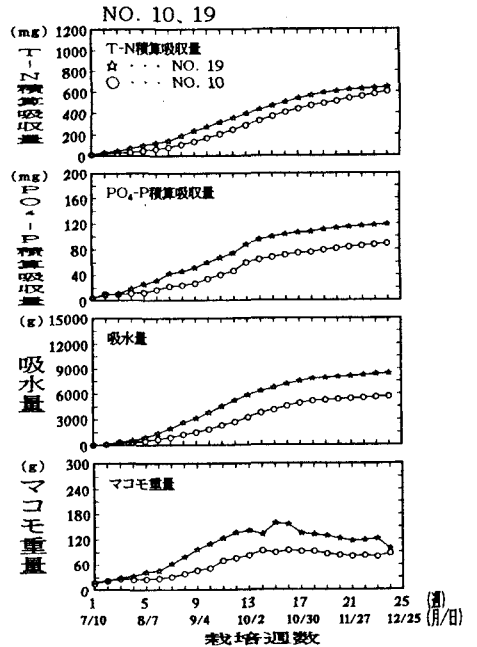


図3-3 積算吸収量・吸水量・マコモ重量の経過変化

次に、1日当たりのT-N吸収量を吸水量で除して、吸収T-N濃度を求めた。これは、計算上マコモがこの濃度をT-Nを吸収していることを示している。そして、この吸収T-N濃度をはじめの栽培液T-N濃度で除して、T-N濃縮倍率を求めた。PO₄-Pについても同様の計算を行い、吸収PO₄-P濃度とPO₄-P濃縮倍率を求めた。これらの値も表3-1に示した。

表3-1 一日当たりの吸収量、吸水量、重量増加量について

NO. 10		週																											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24				
T-N吸収量 (mg/日)		1.61								5.30								3.18											
PO ₄ -P吸収量 (mg/日)		0.570												0.361															
吸水量 (g/日)		22.4								59.7								11.9											
重量増加量 (g/日)		0.313								1.22																			
吸収T-N濃度 (mg/l)		71.8								88.8								267											
吸収PO ₄ -P濃度 (mg/l)		25.4								9.55				6.05				30.3											
T-N濃縮倍率 (倍)		2.56								3.17								9.54											
PO ₄ -P濃縮倍率 (倍)		1.41								1.59				0.336				1.01				5.05							

NO. 19		週																											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24				
T-N吸収量 (mg/日)		3.61								5.95								5.50											
PO ₄ -P吸収量 (mg/日)		1.09												0.605															
吸水量 (g/日)		54.0								99.6								35.3											
重量増加量 (g/日)		1.53								1.96																			
吸収T-N濃度 (mg/l)		66.9				36.3								59.8								156							
吸収PO ₄ -P濃度 (mg/l)		20.2								10.9								6.08				17.1							
T-N濃縮倍率 (倍)		2.39				1.30								2.14								5.57							
PO ₄ -P濃縮倍率 (倍)		1.12				0.606								1.82				0.338				1.01				2.85			

T-N濃縮倍率とPO₄-P濃縮倍率の経過変化を図3-4に示す。まず、T-N濃縮倍率を見る。栽培期間中の8本のマコモのT-N濃縮倍率がすべて1を上回ることから、T-Nについては年間を通して水中のT-N濃度の減少が行われていることが確認された。また、T-N濃縮倍率は4週頃まで2～5倍付近であったものが、4～7週では濃縮倍率が下がり、8週から17週では2倍～3.5倍程度となった。18週以降の濃縮倍率は17週以前と比べ散らばりがあるが、全体的にかなり大きくなっている。この上昇はマコモ重量が増加していないにもかかわらず、T-N吸収量が大いことを考えると、栽培液中で脱窒が行われ、見かけ上マコモが水中のT-Nを吸収したことになり、濃縮率が上昇した可能性があるが、詳細は今後の検討課題である。

次に、PO₄-P濃縮倍率を見る。PO₄-P濃縮倍率は4～7週と13～17週においてほとんどのマコモで1以下となったが、それ以外の週では1を上回っている。また、18週以降のPO₄-P濃縮倍率は、それ以前と比べてかなりばらつきが見られるが、どのマコモも濃縮倍率は約3倍以上となっている。このように、PO₄-P濃縮倍率は時期によって1以下となることもあり、植物による吸収だけでは必ずしも濃度減少を期待できないことが分かった。

4. まとめ
水生植物（マコモ）の水耕栽培によって、N、P吸収に関して次のような結果が得られた。

- * T-N吸収量、PO₄-P吸収量、吸水量の経過変化は大きく3つの時期に分けられた。そして、これらの一日当たりの変化量は、8～12週（8月下旬～9月下旬）において1番高く、例えばNO. 19では、それぞれT-N吸収量：5.95mg/日、PO₄-P吸収量：1.09mg/日、吸水量：99.6g/日となった。
- * 水生植物の生育期間中は、吸収作用だけでもT-N濃度が減少していることが分かった。しかし、18週以降は水耕栽培でも脱窒が生じている可能性が考えられた。
- * PO₄-P濃度は4～7週、13～17週において、濃縮倍率が1以下であったことから、水生植物の吸収による濃度減少が年間を通して行われているとは限らないことが分かった。

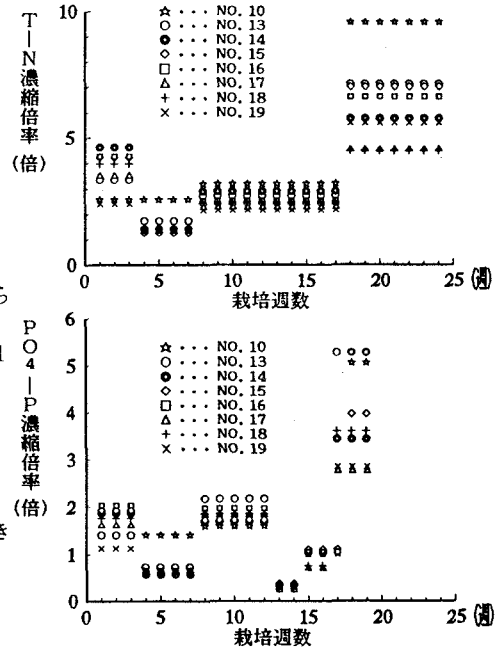


図3-4 T-N・PO₄-P濃縮倍率の経過変化