

植物を利用した水質浄化に関する基礎的考察

A FOUNDATION OF CONSIDERATION ON WATER PURIFICATION USING AQUATIC PLANTS

鈴木 淳**、 江成 敬次郎*
Jun SUZUKI, keijiro ENARI

ABSTRACT; This report describes studies of the function of water purification using aquatic plants and its mechanisms. The purposes of this study are to consider the mechanisms for the purification and the material balances of nitrogen and phosphorus in the rhizosphere using Indian Rice (*Zizania latifolia* Trucz). The results obtained in this study are as follows:

1. Eliminated ammonium nitrogen 17.8 g
 - ・Adsorption to sand 7.6 g
 - ・Absorption by aquatic plant + Nitrification 10.3 g
2. Eliminated phosphorus 0.79g
 - ・Adsorption to sand 0.35g
 - ・Absorption by aquatic plant 0.44g

It was confirmed that nitrification occurred in the rhizosphere. But the quantitative assessment of nitrification is the subject for the future. From these results, the relationship between the water purification and the growth of aquatic plant was confirmed in some degree.

KEYWORDS; water purification, aquatic plants, rhizosphere, Indian Rice, nitrogen, phosphorus

1. はじめに

窒素、リンなどの栄養塩類を含む生活排水等の流入による湖沼などの閉鎖性水域における富栄養化は、依然として解決が必要とされる問題である。このような富栄養化に対する改善策やその防止策として、植物を利用した栄養塩類の除去法がある。この方法の原理としては、植物にとって必須の栄養物質である窒素やリンを植物によって水中から取り除かせるというものである。また、それと同時に、アシなどの抽水植物では、その根の近傍で、硝化・脱窒作用が生じているという報告もある¹⁾。最近では、その適用事例も多く、その効果が報告されているが、現在の段階では水生植物による水質浄化の定量的評価やそのメカニズムについてはまだ確認されていない。

そこで本報告では、水生植物（マコモ）の栽培実験を行い、根圏における水質変化を測定し、水生植物による水質浄化の定量的評価とメカニズムについて検討した。

2. 実験方法

本実験では、植物による水質浄化メカニズムやその定量的評価をするために、実際に人工的な廃水を流し、マコモという水生植物を栽培し、その根圏において水質がどのように変化するかを測定した。

実験装置は、図1のようなものを製作した。この装置は、80ℓのポリバケツに9カ所穴を開けたものである。そこに採水器を差し込み、根の近傍の水を採水した。また、実験で用いられる流入水（塩化アンモニウム (NH_4Cl) とリン酸第一カリウム (KH_2PO_4) の混合液)は、1日に8ℓの割合で実験装置の下方から上方へ連続的に供給される。採水器は、中心部と周辺部に配置し、周辺部の高さは左右3cmずらして配置してある。また、図に示すように、実験装置全体を中心部と4つの周辺部の5つの部分に分けて以下の考察を行った。

実験は、6月14日～11月13日の間に行った。流入水濃度は、6月14日～9月22日までが $\text{NH}_4\text{-N}$ で5mg/ℓ、 $\text{PO}_4\text{-P}$ で0.3mg/ℓ、9月24日～11月13日までが $\text{NH}_4\text{-N}$ で50mg/ℓ、 $\text{PO}_4\text{-P}$ で3mg/ℓである。ここの考察は、9月24日～11月13日までのデータを用いて行われている。

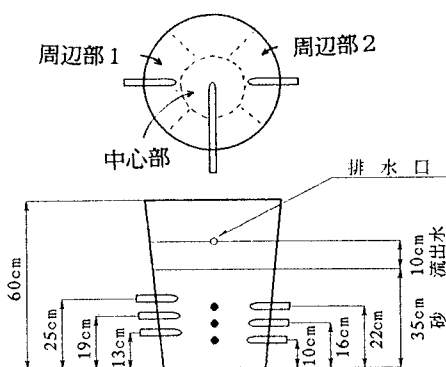


図1. 実験装置

*東北工業大学土木工学科
#現在 建設省東北地方建設局

Department of Civil Engineering, Tohoku Institute of Technology
Tohoku Regional Construction Bureau, Ministry of Construction

しておらず、それ以降やや減少しているようだ。

このような結果より、マコモの上部器官は、8月中旬ないし下旬まで成長を続け、その後は、草丈、茎数ともほとんど成長しなくなり、10月中旬頃から枯れ始めるという成長過程をたどると考えられる。

また、写真及び肉眼による観察結果より、マコモの根の広がりについては、周辺部1については、表面的には根や根毛（水分や養分を吸収すると考えられるもの）があるかどうかかわからないが、地下茎（茎のようなもので、そこからマコモの茎が発芽する）がかなり発達していた。中心部については、多少の根や根毛はあるが、あまり多くなく、周辺部1と同様に地下茎が発達していた。そして、周辺部2については、根や根毛が多く、密集しており、根が実験装置解体後もその形を保っていた。

4. 1. 2 根圏における水質変化

水質の変化としては、高さ方向による違いと場所による違いがあるので、ある場所の高さによる違いを検討し、次に、ほぼ同じ高さにおける濃度変化を例にとって場所の違いを考察する。ただし、ここでは、実験期間の後半を対象にしている。

まず、周辺部1を例として取り上げ、高さによる違いを検討する。図5に、周辺部1の採水地点No. 1～No. 3における $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度と経過日数との関係を示す。この図より、No. 3→No. 2→No. 1という順番で濃度が上がっていることがわかる。これは、No. 3が流入源に最も近く、流入水は下から上に向かって流れているためである。この装置の砂層の間隙（間隙率38%）と流入量（8ℓ/day）から算定される水理学的滞留日数は、約3.8日であり、高さの違いから推定される濃度上昇開始日の差は、約1日となる。この日数と比較すると実際の差は約10日であり、10倍程度大きい。この差は、砂に対する $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸着によって生ずると考えられる。つまり、No. 3付近に流入 $\text{NH}_4\text{-N}$ が到達すると、No. 3付近の砂に $\text{NH}_4\text{-N}$ が吸着する。吸着が継続すると流入水が、No. 2、No. 1に到達してもそこでは濃度が上がらない状態になっている。その後、No. 3付近の砂が飽和状態に達すると、No. 2でも同様の変化が生じる。このようなものが高さによる違いのメカニズムとして考えられる。また、 $\text{PO}_4\text{-P}$ でも同様な結果が得られている。

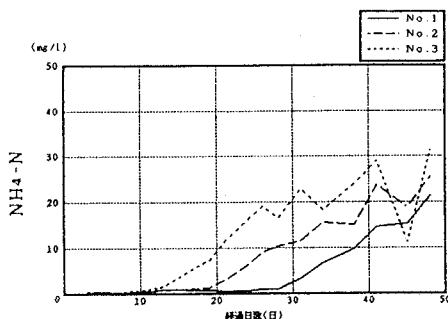


図5. $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の経日変化

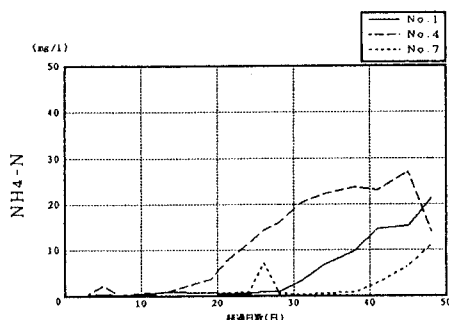


図6. $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の経日変化

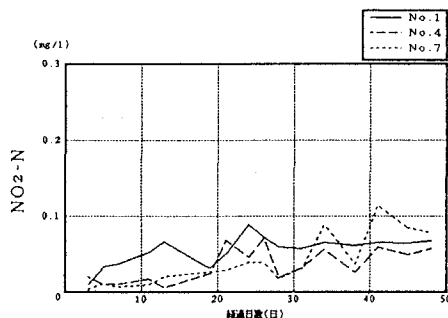


図7. $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度の経日変化

次に、各部の違いを検討するために、各部の一番上の採水地点を例にとり考察する。図6は、採水地点No. 1, No. 4, No. 7における $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度と経過日数との関係を示したグラフである。この図より、中心部（No. 4）が早い日数で濃度上昇を始め、周辺部1（No. 1）と周辺部2（No. 7）が続いて変化していることがわかる。また、図7には、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度と経過日数との関係を示した。この図より、 $\text{NO}_2\text{-N}$ については、周辺部1（No. 1）がやや大きいもののそれほど大きな違いはなく、同様な傾向を示していることがわかる。 $\text{NO}_3\text{-N}$ については、図8に示してある。この図より、全体的に変動が大きい、 $\text{NO}_2\text{-N}$ と同様に、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は、周辺部1（No. 1）がやや大きく、次いで中心部（No. 4）、周辺部2（No. 7）となっているが、各部ともほぼ同様な変化をしていることがわかる。 $\text{PO}_4\text{-P}$ については、図9に示してあるが、これも $\text{NO}_3\text{-N}$ と同様に、中心部（No. 4）、周辺部2（No. 7）と比べて、周辺部1（No. 1）がやや大きいことがわかる。

以上のような結果をまとめると、周辺部1（No. 1）では、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ が高いことが、そして、中心部（No. 4）については、周辺部1（No. 1）、周辺部2（No. 7）と比べると、 $\text{NH}_4\text{-N}$ が相当高いことがわかる。周辺部2（No. 7）については、全体的に各濃度が低いことがわかる。このように、周辺部2（No. 7）が全体的に各濃度が低いのは、最も根や根毛が発達している部分であるためであると考えられる。

4. 2 窒素、リンの物質収支について

本実験の条件における窒素の消長としては次のようなことが考えられる。 $\text{NH}_4\text{-N}$ の減少としては、硝化反応、砂による吸着、マコモによる吸収があり、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の増加としては、硝化によるもの、減少分としては、脱窒反応、マコモによる吸収がある。また、リンについては、砂への吸着、マコモによる吸収が考えられる。

そこでまず、本実験に使用した砂の吸着特性を、 $\text{NH}_4\text{-N}$ （塩化アンモニウム）と $\text{PO}_4\text{-P}$ （リン酸第一カリウム）について調べた。回分吸着実験から、次のような吸着等温式が得られた。

$$\text{NH}_4\text{-N} : q = 3.356 \times 10^{-3} c^{0.95} \quad \text{①}$$

$$\text{PO}_4\text{-P} : q = 2.674 \times 10^{-3} c^{0.78} \quad \text{②}$$

ここで、 q は、砂1g当りの平衡吸着量（mg）、 c は、吸着質の初期濃度（mg/l）を示す。

そこで、この吸着等温式を用いて、本実験装置の砂に対する吸着量を求めた。その結果、流入濃度 $\text{NH}_4\text{-N}$ ：5.0 mg/l、 $\text{PO}_4\text{-P}$ ：3 mg/lを初期濃度と考えると、実験装置全体では、 $\text{NH}_4\text{-N}$ ：7.6 g、 $\text{PO}_4\text{-P}$ ：0.33 gの吸着量が得られた。

4. 2. 1 窒素の収支

図6をもとに、実験期間中の $\text{NH}_4\text{-N}$ の累積除去量を求めると、次のようになる。

周辺部1（No.1）：3.6 g、

中心部（No.4）：3.0 g、

周辺部2（No.7）：3.8 g

この除去量のうち、砂への吸着量を差し引くと、次のようになる。なお、各部での砂の吸着量は、砂層全体を中心部と4つの周辺部の5つに等分して考え、全体の1/5とした。

周辺部1（No.1）：2.1 g、中心部（No.4）：1.5 g、

周辺部2（No.7）：2.3 g

この除去量が、マコモによる吸収と硝化によるものと考えられる。

以上のことより、水の流れも関係すると考えられるが、周辺部2での吸着以外の除去が大きいことがわかる。なお、周辺部2は、根毛が発達していた部分である。

次に、マコモの成長量から窒素の吸収量を算定する。本実験で使用したマコモの成長量は、最初は、1.59 kgであったが、最終的には、2.47 kgまで増加した。この値とマコモの窒素含有率（2.06%）から吸収量を計算すると、18.1 gという値が得られた。しかし、この値は、150日間の成長である。ここでは、50日間の吸収量を求める必要があるが、成長はどの期間も等しいと仮定し、窒素の吸収量を全体の1/3とした。つまり、6.0 gが吸収されたものとする。ここでも、砂層全体を中心部と4つの周辺部の5つに等分して考えると、各部の窒素吸収量は、1.2 gとなる。この値を、先に求めた除去量（砂への吸着は除く）から差し引くと、次のようになる。

周辺部1（No.1）：0.9 g、中心部（No.4）：0.3 g、

周辺部2（No.7）：1.1 g

つまり、この値が硝化による除去量であると考えられる。ただし、場所による差は、吸収を一定と考えた場合のことであり、場所によって吸収量が異なるとすれば、硝化量も違ってくる。今回の実験では、これを明確に区分することはできなかった。

4. 2. 2 リンの収支

窒素と同様に、図9をもとに、実験期間中の $\text{PO}_4\text{-P}$ の除去量を求めると、次のようになる。

周辺部1（No.1）：0.12 g、

中心部（No.4）：0.09 g、

周辺部2（No.7）：0.23 g

この除去量のうち、砂への吸着量を差し引くと、次のようになる。

周辺部1（No.1）：0.05 g、

中心部（No.4）：0.02 g、

周辺部2（No.7）：0.16 g

これは、つまり、マコモによる吸収によるものと考えられる。なお、マコモのリン含有率から求めた全吸収量は、0.09 gであった。

以上のことより、 $\text{PO}_4\text{-P}$ については、中心部（No.4）では、砂による吸着が大きく、周辺部2（No.7）では、マコモへの吸収が大きいものと考えられる。

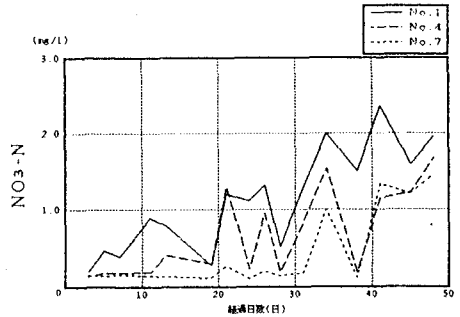


図8. $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の経日変化

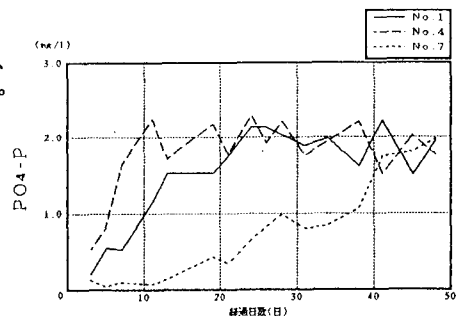


図9. $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の経日変化

4. 2. 3 根圏における硝化反応についての考察

文献によると、根の近傍では、根を通して酸素が供給され、硝化反応が生じているということが報告されている¹⁾。そこで、マコモの場合には、どの程度の硝化反応が生じているかを調べるため、簡単な実験を行ってみた。まず1つは、アルカリ度の影響をみる実験であり、もう1つは、マコモのない砂だけを用了場合に、硝化反応が生ずるのか、また、どの程度生ずるかを調べることにした。

その結果、アルカリ度が多い場合に、根の近傍で $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が増加しており、マコモのない砂だけの場合に、硝化の進行が遅いという現象が見られた。

今後、詳細に検討する必要があるが、硝化反応の条件を整えることによって、根圏における硝化反応が、より進行する可能性があると考えている。

5. まとめ

本実験の結果を全体としてみると、次のようなことがいえる。

周辺部1については、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が多い。これは、周辺部1では、地下茎が多く、多少根もあるため、根の近傍での硝化によって生じた $\text{NO}_3\text{-N}$ が、マコモによって吸収しきれずに残っているためであると考えられる。

周辺部2に関しては、一般的に窒素の全体量が少ない。これは、マコモの根の根毛が発達し、それによって供給された $\text{NH}_4\text{-N}$ および生成した $\text{NO}_3\text{-N}$ が、他の場所よりもよく吸収されたためと考えられる。本実験から得られた窒素の収支、リンの収支をまとめると、表1、2のようになる。

表1. 窒素の累積除去量とその内訳

	除去量	吸着	吸収 + 硝化	吸収	硝化
周辺部1	3.6 g	1.5 g	2.1 g (58%)	1.2 g	0.9 g
中心部	3.0 g	1.5 g	1.5 g (50%)	1.2 g	0.3 g
周辺部2	3.8 g	1.5 g	2.3 g (61%)	1.2 g	1.1 g
全体	17.8 g	7.6 g	10.3 g (58%)	6.0 g	4.3 g

表2. リンの累積除去量とその内訳

	除去量	吸着	吸収
周辺部1	0.12 g	0.07 g	0.05 g
中心部	0.09 g	0.07 g	0.02 g
周辺部2	0.23 g	0.07 g	0.16 g
全体	0.79 g	0.33 g	0.44 g

以上のような結果より、場所によって多少の違いはあるが、植物による浄化は、土壌への吸着、根の近くの硝化とその周りでの脱窒、植物体への吸収、微生物によるものなどが考えられ、それらが複雑に重なって起こっているものであることがわかった。そして、根圏の内部でも、根の発達具合によってそれぞれの役割が違ってくるということがわかった。このようなことから、植物を利用した水質浄化をより効果的に行わせるためには、今後、根圏での水質変化をより詳細に考察する必要がある。

謝辞： 本実験を行うにあたり、宮城県保健環境センター、並びに伊豆沼・内沼環境保全財団の関係者の協力を得た。ここに感謝の意を表します。また、実際の実験は、東北工大4年生の岩出、加藤、菊池、清野君らの協力も得た。併せて、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 細川他：ヨシ原による水質浄化特性， 港湾技術報告 第30巻第1号 (1991)
- 2) 大滝他：日本水性植物図鑑， 北隆館 (1980)
- 3) 鈴木：植物を利用した水質浄化に関する基礎的研究，東北工業大学大学院修士論文 (1994)
- 4) 鈴木他：伊豆沼に設置された給餌地システムの汚濁負荷削減効果についての調査研究，環境システム研究 Vol. 21 (1993)