

植物（マコモ）を利用した水質浄化における窒素・リンの物質収支
CONSIDERATIONS ON THE MATERIAL BALANCE OF NITROGEN AND PHOSPHORUS
IN THE RHIZOSPHERE OF A PLANT (INDIAN RICE)

杉山 智洋#, 江成敬次郎*
Tomohiro SUGIYAMA#, Keijiro ENARI*

ABSTRACT; The purposes of this study are to consider a relation between growth of plant (Indian rice, *Zizania latifolia*) and absorption of nitrogen and phosphorus, and the mechanisms of the water purification in the rhizosphere of plant.

The change of water quality in the rhizosphere was measured in the pot cultivation. The material balances were considered based on the experimental data and results were as follows;

	removal nitrogen	removal phosphorus
Condition A (without plant):	29.1g	0.407g
Condition B (with plant) :	83.2g	3.87 g
Absorption by plant :	29.4g	2.96g
Recovery rate :	54.3%	85.5%

From consideration of the material balances, it was understood that nitrogen and phosphorus absorption by Indian rice account for 54.3% of removal nitrogen and 85.5% of removal phosphorus, respectively.

KEYWORDS: Aquatic Plant, N and P Removal, Indian Rice, Material balance, Constructed Wetland.

1. 研究の背景と目的

水域の富栄養化防止方法として、水生植物を利用した水質浄化システムがある。

宮城県北部の伊豆沼でも、冬期に飛来する水鳥などによる水質汚濁が問題となり、その防止対策として水生植物（マコモ）を利用した水質浄化が行われている。この水質浄化の特徴の一つは、マコモの地下茎が、水鳥により食べられるために、植物を刈り取り、回収せずに窒素・リンを除去することができると言うことである。しかし、その水質浄化機能を定量的に評価するまでには至っていない。

そこで、本研究は、植物（マコモ）の根圏（根の近傍）での水質変化を、実際に植物（マコモ）を栽培して測定し、除去量と植物（マコモ）に蓄積された窒素・リン量から物質収支について検討することを目的として行われた。

2. 実験装置と実験方法

マコモによる砂層栽培実験の実験装置を、図-1に示す。この装置は、80ℓのポリバケツに、採水器を取り付けたものである。

実験装置は、2セット用意し、1つは砂のみを入れたブランク用とし、もう1つにはマコモを移植した。ここでは、ブランク用を条件A、マコモを移植したものを条件Bとした。

実験装置に砂を高さ35cmまで詰め、その後にマコモを移植し流入水を流した。流出口は砂層上の水深が約10cmになるようにポリバケツに穴をあけた。使用した砂は、あらかじめ条件A、Bの流入水と同じ濃度のN、P液に約10日間つけ込み吸着飽和状態にして使用した。

* 東北工業大学土木工学科

Department of Civil Engineering, Tohoku Institute of Technology

現在、株式会社三水コンサルタント

SANSUI CONSULTANT Co., Ltd.

採水場所は、図-1に示す9カ所のほか、流出と流入の全部で11カ所である。このうち、採水点1、2、3を周辺部1、採水点4、5、6を周辺部2、採水点7、8、9を中心部として、各部ごとに高さ方向の変化を考察した。

流入水は、塩化アンモニウムと第一リン酸カリウムを成分とし、条件A、Bとも $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度で 50mg/l 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度で 3.0mg/l として与えた。また、流入水は、下方から上方へ連続的に供給されており、供給速度は7月2日～9月9日の間（第1期；68日間）は、約8 $\text{L}/\text{日}$ 、9月9日～11月8日の間（第2期；61日間）は、約16 $\text{L}/\text{日}$ である。

測定項目は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、アルカリ度、pH、の6項目であり、また、マコモの草丈の変化も測定した。

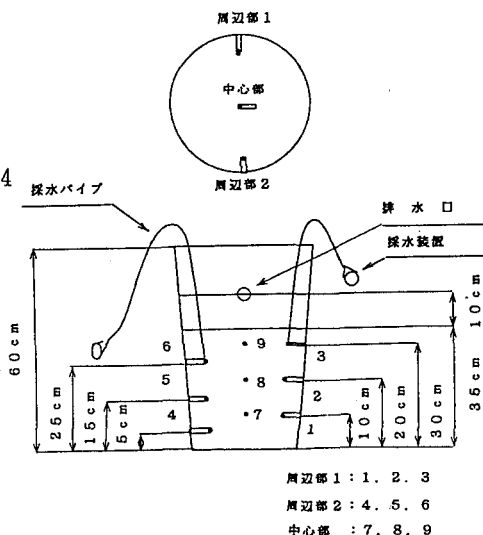


図-1. 実験装置

3. 結果と考察

(1) 根圏における水質変化

ここでは、根圏における各水質項目の濃度変化を周辺部1を例として考察する。

図-2、3、4、5は、 T-IN （全無機性窒素）、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の周辺部1での高さによる濃度変化を示す。この値は、第1期、第2期のそれぞれの平均値である。まず条件Aについて考察する。第1期の T-IN 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ では、中間部の濃度が一番低い。第2期では、下から上へと多少の減少傾向がみられる。 $\text{NO}_2\text{-N}$ は第1、2期とも下部で高く、上部にいくにつれて減少がみられた。 $\text{NO}_3\text{-N}$ は、中間部まで増加し、その後減少がみられた。 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は、流入水には含まれてはいない。従って、どちらも砂層中で生成されていることになる。また、第1期と第2期を比較すると、各項目とも第1期の濃度が低かった。

次に条件Bについて考察する。 T-IN 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は、第1、2期とも流入から上部にいくにつれて減少がみられた。 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ では、流入から下部の間で増加し、下部から上部にかけて減少がみられた。第1期と第2期を比較すると、条件Bでは、各項目とも第2期の濃度がやや低かった。

ここで、マコモがない条件Aとマコモがある条件Bを比較すると、条件Bの方が T-IN 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の減少が大きかった。条件Aは、マコモがないため、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の減少は主として硝化、吸着、微生物による吸収によるものと考えられる。しかし、条件Bは、これらによる減少に加えてマコモの吸収も原因として考えられる。また、 T-IN 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ だけでなく硝化によって生ずる $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ についても条件Bの濃度が低い。この原因として条件Bの硝化の進行が小さいことも考えられるが、マコモは $\text{NO}_3\text{-N}$ も吸収できると考えられるため、この段階では要因を特定することはできない。このように、条件AとBを比較すると、全体的に条件Bの濃度が低くなっている。これは、基本的にマコモの吸収によってもたらされたものと考えられる。

図-6は、周辺部1での高さによる $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の変化を示す。これらの値は第1期、第2期のそれぞれの平均値である。条件Aでは、第1期では下部から上部にかけて減少がみられたが、第2期では濃度変化はほとんどみられなかった。また、第1期と第2期を比較すると、第1期の濃度が低かった。

条件Bでは、流入から下部あるいは中間部の間で減少がみられるが、中間部から上部の間では、変化はあまりみられなかった。第1期と第2期を比較すると、第2期の濃度が低かった。

マコモがない条件Aとマコモがある条件Bを比較すると、第1期の濃度変化は変わらないが、第2期では条件Bは条件Aに比べて濃度が低くなりかなりの差がみられた。これは、第1期ではマコモの吸収が少なく、条件A、Bともに $\text{PO}_4\text{-P}$ の吸着が主であったと考えられる。しかし、条件Bは第2期に入りマコモの吸収が増加し、そのために濃度に差がでたと考えられる。

図-7は、周辺部1でのpHの高さによる変化を示す。この値も各期の平均値である。

条件AのpHでは、第2期で下部から上部へと若干pHが減少している。また、第1期と第2期を比較すると、第2期の方が低かった。

条件BのpHでは、第2期では高さによる違いが多少でてきた。第1期と第2期を比較すると、第2期が低くなった。

マコモがない条件Aとマコモがある条件Bを比較すると、第1期で条件Bが条件Aよりやや低かったが第2期ではほとんど変わらなかった。

以上の結果より、T-IN, $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ については、条件Bの濃度が低くなっており、この要因はマコモの根による吸収であると考えられる。

(2) . 根圏における総量変化

ここでは、根圏における窒素、リンの総量変化について考察する。図-8, 9, 10, 11は、T-IN, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ の第1期、第2期の周辺部1での高さによる総量変化を示す。ここでの総量は、測定された経日変化から平均値を求め、各条件の高さ別の水量を乗じて求められている。この高さ別の水量は、次のようにして求められた。流入量から流出量と蒸発量を差し引いて蒸散量を求めた。蒸発量は、マコモのない条件Aでの流入量-流出量とした。そして、この蒸散量を3等分し高さ毎に1/3ずつ蒸散すると仮定して、高さ別の水量が求められた。

初めにT-IN, $\text{NH}_4\text{-N}$ のグラフを比較するとその変化傾向は、ほとんど同じであった。これはT-INにおける $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合が大きいためである。そこで、T-IN, $\text{NH}_4\text{-N}$ を合わせて考察する。

マコモがない条件Aとマコモがある条件Bを比較すると、条件Aよりも条件BでT-IN, $\text{NH}_4\text{-N}$ の除去量が多い。

しかし、条件Aでもかなりの除去量がみられる。条件Aの $\text{NH}_4\text{-N}$ 除去量は、硝化によるものと微生物などによる吸収、そしてT-IN除去量には、脱窒と微生物などによる吸収が考えられる。条件Bでは、条件Aの減少の原因に加えてマコモによる吸収が考えられる。また、第1期と第2期で比較すると、条件Aは、第1期と第2期で同じ

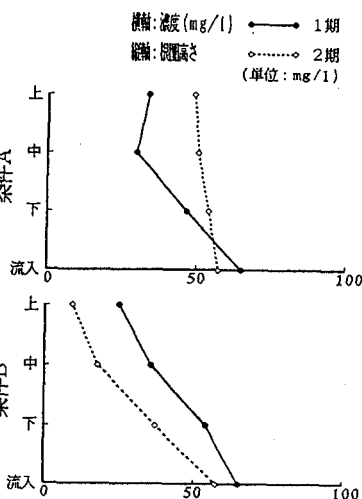


図-2. T-IN濃度の平均値

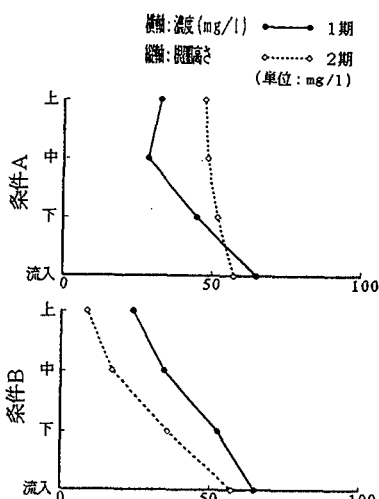


図-3. $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の平均値

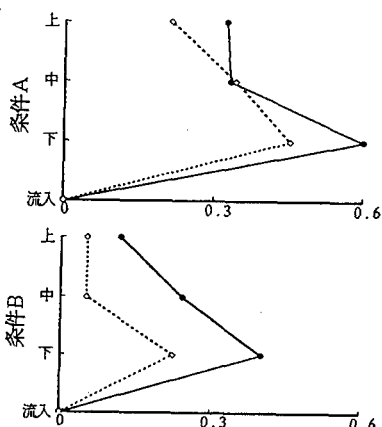


図-4. $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度の平均値

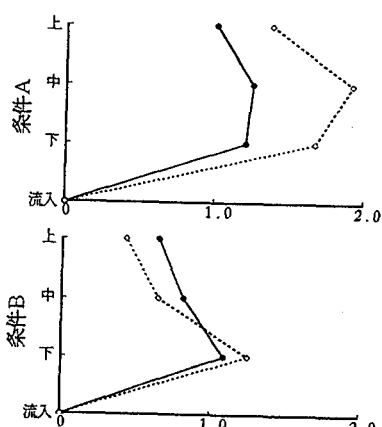


図-5. $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の平均値

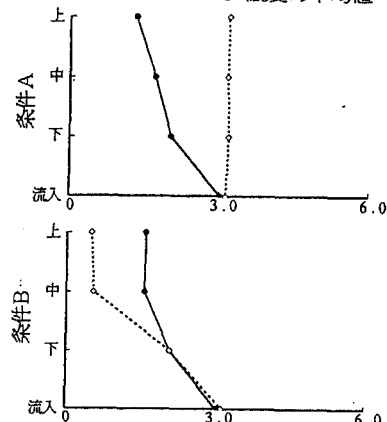


図-6. $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の平均値

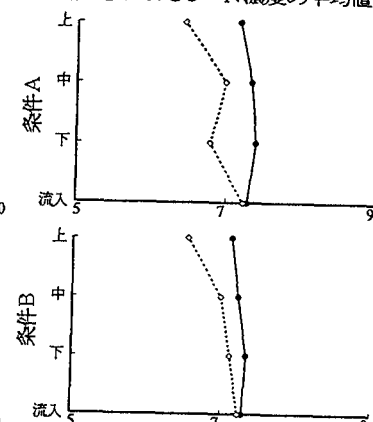


図-7. pHの平均値

くらいの除去量であった。条件Bでは、第1期より、第2期の除去量が大きかった。これはマコモの根茎の発達により吸収が増加したためと考えられる。

次に $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ について考察する。条件Aの $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 総量が条件Bに比べて大きい。特に $\text{NO}_2\text{-N}$ については、条件Bでは下部で少しみられる程度であった。 $\text{NO}_3\text{-N}$ についても条件Bは、条件Aの半分以下であった。根圏や土壌中において、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は $\text{NH}_4\text{-N}$ の硝化によって生成し、脱窒やマコモの吸収によって減少する。条件Aと条件Bとの相異はマコモの有無であり、条件Bでの $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が少ない原因の一つは、マコモが $\text{NO}_3\text{-N}$ も吸収しているためと考えられる。

図-12は、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の第1期、第2期の周辺部1での高さによる総量変化を示す。

条件Aは、第1、2期ともほとんど総量変化はみられなかった。しかし、条件Bは、第1期より、第2期の除去量が大きかった。これも $\text{NH}_4\text{-N}$ 同様、マコモの根茎による吸収が増加したためと考えられる。マコモがない条件Aとマコモがある条件Bを比較すると、マコモがある条件Bで大きな減少がみられた。

以上のような結果より、 T-IN 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ については、条件Bで、第1期より第2期で大きな除去量がみられた。これは、マコモの根の発達による吸収の増加が考えられる。

$\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ については、条件Aの $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の総量が条件Bに比べて大きかった。これは、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の硝化によって生成された、 $\text{NO}_3\text{-N}$ をマコモが吸収しているためと考えられる。

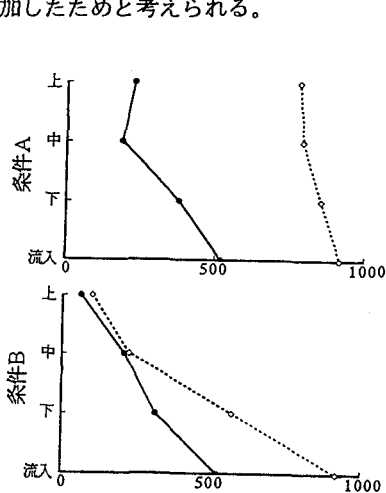


図-8. 根圏における T-IN 総量変化

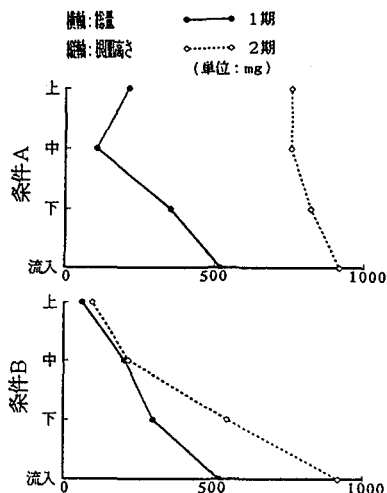


図-9. 根圏における $\text{NH}_4\text{-N}$ 総量変化

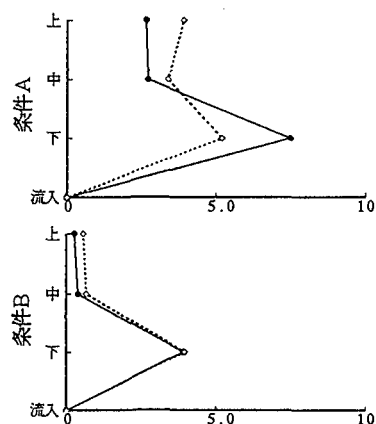


図-10. 根圏における $\text{NO}_2\text{-N}$ 総量変化

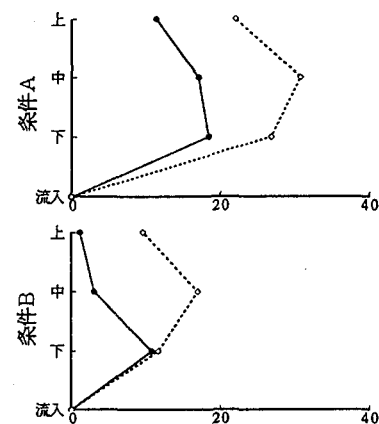


図-11. 根圏における $\text{NO}_3\text{-N}$ 総量変化

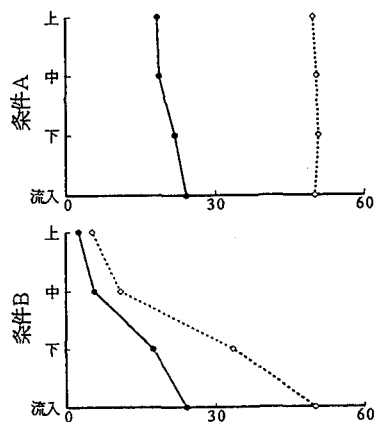


図-12. 根圏における $\text{PO}_4\text{-P}$ 総量変化

(3) 窒素・リンの物質収支

ここでは、窒素・リンの物質収支について考察する。窒素・リンの除去量とその内訳を表-1, 2に示した。ここでの除去量は、図-4, 5のT-I N, PO₄-P総量変化から、1日当たりの除去量として求められたものである。その除去量に第1期では68日、第2期では61日をかけて期間毎の除去量を求めた後に、それらを加えて累積除去量を算出した。

砂への吸着量は、乾燥砂1g当たりの窒素・リン含有率の測定値(表-3)と実験装置内の乾燥砂重量(表-4)から求められた。

マコモへの吸収量は、マコモの乾燥重量(表-5)と窒素・リン含有率の測定値(表-6)からT-I N, PO₄-P吸収量として求められた。この時、マコモを、葉、株、地下茎の3つに分けて、各部分毎の含有率を求めた後にそれらを加えて全吸収量を算出した。表-1, 2の結果より、この吸収量と除去量を比較する。表-1, 2の条件Aの除去量をマコモの吸収以外の微生物などによる除去量と考える。また、本実験では、前述したように実験開始時に条件A, Bの砂を窒素・リンの吸着飽和状態にした。従って、窒素に関して条件Bの吸着が条件Aに比べて小さいのは、吸着していた窒素が脱着したと考えられる。そこで、条件Aと条件Bの吸着量の差を条件Bの除去量に加えることとする。このようにして求めた結果を表-7に示す。この除去量に対するマコモ吸収量の割合は、T-I Nが54.3%、PO₄-Pが85.5%となった。条件Bのリンについては、高い回収率になった。しかし、窒素では、回収率が低くなった。ここで窒素・リンの消長は、図-13のようなことが考えられる。つまり、窒素の消長には、リンに比べて多くの微生物反応が関与する。この為、このような回収率の違いがでたと思われる。このことは、植物が存在することによって砂層中の微生物反応が活性化されたということを示唆しているものと考えられる。

4. 結論

本実験で次のような知見が得られた。

- マコモの窒素・リンの吸収量は、マコモの根圏の発達状態と関連がみられた。そして、硝化・脱窒にも影響を与えることも考えられた。
- 物質収支の結果から、窒素除去量の内54.3%、リン除去量の内85.5%は、マコモの吸収で占められた。
- 植物による水質浄化は、植物体への吸収だけではなく、土壌や根の近傍での硝化、その周辺での脱窒など、土壌中の微生物による浄化も含めた、いくつかの浄化作用が結びついて行われていると推察される。
- 根圏土壌と非根圏土壌では微生物による除去量も違ってくるものが考えられた。

表-1. 窒素の除去量とその内訳

	除去量 (g)	吸着 (g)	吸収 (g)
条件A	29.1	16.1	
条件B	80.3	13.2	29.4

表-2. リンの除去量とその内訳

	除去量 (g)	吸着 (g)	吸収 (g)
条件A	0.407	0.299	
条件B	3.87	0.297	2.96

表-3. 乾燥砂1g当たりの窒素, リン含有率

	窒素 (%)	リン (%)
条件A	0.023	0.426×10^{-5}
条件B	0.019	0.426×10^{-5}

表-4. 乾燥砂の重量

	重量 (kg)
条件A	70.2
条件B	69.6

表-5. マコモの乾燥重量

	重量 (g)
条件B	
葉	527.3
株	638.8
地下茎	862.2

表-6. マコモ1g当たりの窒素, リン含有率

	窒素 (%)	リン (%)
条件B		
葉	1.49	0.120
株	1.56	0.130
地下茎	1.34	0.173

表-7. 窒素・リンの物質収支

	窒素	リン
条件Aの除去量	29.1 g	0.407 g
条件Bの除去量	83.2 g	3.87 g
除去量の差	54.1 g	3.46 g
マコモの吸収量	29.4 g	2.96 g
回収率	54.3 %	85.5 %

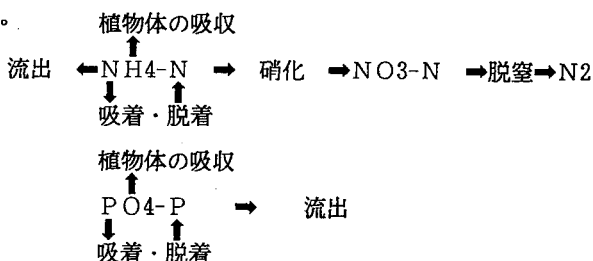


図-13 根圏における窒素・リンの消長