

(29) 水生植物(マコモ)の植物体中窒素・リン含有量の生育に伴う変動と
窒素・リン収支に関する考察

Seasonal Changes of Nitrogen and Phosphorus Content of Aquatic Plant (*Zizania latifolia*) and
Mass Balance of Nitrogen and Phosphorus in the Water Culture System of *Zizania latifolia*

江成敬次郎^{*}, 山廻辺典夫^{**}, 小浜曉子^{*}, 中山正与^{***}

Keijiro ENARI^{*}, Norio YAMANOE^{**}, Akiko KOHAMA^{*}, and Masatomo NAKAYAMA^{***}

ABSTRACT;

A recent development to control eutrophication is done by the ecological engineering, which involves using plants for water purification. A number of researches about a water purification system have been conducted and the nutrient removal efficiency has been evaluated. However, there are few studies about the mass balance of nutrient content and the amount of absorption by aquatic plants. In this study, an experiment in a water culture system inhibiting the nitrification and denitrification was conducted to evaluate nitrogen and phosphorus content of aquatic plant *Zizania latifolia*, which is beneficial for nutrient absorption and nutrient elimination from an enclosed system serving as food for migrating swans, and the amount of nitrogen and phosphorus absorption from May to December in 2002 (32 weeks).

The results were as follows: *Z. latifolia* grew as time, and the maximum wet weight of a *Z. latifolia* was taken in September (562g) and the maximum dry weight of a *Z. latifolia* was taken in October (78.5g). The Nitrogen and phosphorus content of a *Z. latifolia* was increased from May to October, and the maximum values taken were about 2080mg and about 400mg, respectively. Finally, the nitrogen and phosphorus mass balance of the content of *Zizania latifolia* and the amount of removal from the culture solution from May to October (except September) was evaluated as 70%~110%.

KEY WORDS; *Zizania latifolia*, nitrogen absorption, phosphorus absorption, nitrogen content, phosphorus content

1. はじめに

近年、植物を水質浄化に利用する試みが多く、施設において様々な手法を用いて行われている¹⁾。植生浄化は、主に水中の窒素・リン除去を目的としており、窒素については、植物による吸収、根圏における生物学的硝化および脱窒、土粒子による吸着、またリンについては、植物による吸収、土粒子への吸着といった自然浄化機能を利用したものである。既往の研究により、それぞれの実験施設における窒素・リン除去量・除去速度が評価されてきているが、浄化速度に対して、植物がどれだけの浄化能力を発揮しているかについては不明瞭な点が多い。たとえば窒素では、Gersbergら²⁾が水生植物のヨシによる取り込みの割合を12~16%と報告している一方、細見ら³⁾、Rogersら⁴⁾は60%と報告している。これらの値は、植物体中の窒

^{*}東北工業大学工学部環境情報工学科(Department of Environmental Information Engineering, Tohoku Institute of Technology, enari@tohtech.ac.jp)

^{**}東北工業大学大学院工学研究科土木工学専攻(Department of Civil Engineering, Graduate School of Tohoku Institute of Technology) (現松下産業株式会社)

^{***}東北工業大学工学部建設システム工学科(Department of Civil Engineering, Tohoku Institute of Technology)

素含有量から算出されており、Gersbergらは窒素含有量を1%、細見は茎が0.7%、葉が2.8%という値を用いている。さらに、他の研究では、ヨシ地上部の窒素含有量は1.46~3.41%という報告がされており⁵⁾、その値に差が大きいことがわかる。また、植物体中の窒素・リン含有量は時期的・部位的に変動することが明らかになっており⁶⁾、植物体中の含有量から窒素除去速度などを求める場合は、植物の特性を把握しなければならないといえる。

著者らは、これまでの研究で、イネ科の多年生水生植物であるマコモ(*Zizania latifolia*)を用い、実際の水質浄化施設における窒素・リンの物質収支⁷⁾や、水耕栽培におけるマコモ1本あたりの生育期間中窒素・リンの吸収量を明らかにしてきた^{8)~11)}。しかし、栽培液中からの窒素・リンの減少をマコモによる吸収として評価するためには、植物体中窒素・リン含有量を測定し、植物体中にどのくらい同化されたかを評価する必要がある。ここで問題になるのは、マコモ体中窒素・リン含有量を測定するためには植物体を破壊する必要があるが、破壊してしまうと同じ個体の経時変化を把握することができないこと、さらに個体間のバラツキが大きいことである。

そこで、本研究では、マコモを構成する主要成分である窒素・リンの部位別含有量の時期的変化を把握し、さらに栽培液からの吸収量に対するマコモ体中窒素・リン含有量、すなわち収支を明らかにするために、2002年5月から2002年12月までの8ヶ月間、マコモを用いて硝化・脱窒を抑制した系において水耕栽培実験を行った。マコモ体中窒素・リン含有量の経時変化は、含有量測定のために分解するマコモと、全実験期間栽培するマコモとを区別し、それらの湿潤重量や乾燥重量を用いて、分析に供したマコモ体中窒素・リン含有量を全実験期間栽培したマコモの窒素・リン含有量に換算することにより求めることを試みた。

2. 実験方法

2.1 実験材料

マコモはイネ科の多年生抽水植物であり、日本全国各地の湖沼、河川岸、水路などの浅い水中に群生しており、ヨシとともに代表的な水生植物である。生育域はヨシより幾分水域側で、水深0.2~0.5mの止水域を好む。主に地下茎で増殖し、種子または根茎で越冬する。冬季には地上部は枯死するが、根茎は泥中を横走し、5~6月ごろに根茎の先端にある越冬芽から新芽を出す^{12), 13)}。本研究で用いたマコモ(*Zizania latifolia*)は伊豆沼・内沼環境保全財団より譲渡された越冬根茎をガラスハウスで発芽・生育させたものである。

2.2 実験期間

実験期間を表1に示す。実験期間は5月14日から12月24日までの8ヶ月間であった。8ヶ月を4週間ごとに区別し、それらを1期、2期……8期とした。

2.3 実験条件

植物による元素吸収量を評価するには、植物による吸収以外の要素を排除する必要がある。本研究では土壌による吸着を防ぐため、水耕栽培で実験を行った。さらに硝化を抑制するため、ATU(1-Allyl-2-thiourea)を $2\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ となるように添加し、脱窒を抑制するためエアープンプで曝気を行った。本実験に用いた水耕栽培装置を図1に示す。透明ビニール袋に栽培液を入れ、マコモの苗を根が浸るように入れた。それらを黒ビニール袋で覆い、口元を結わえてポリバケツに設置した。使用したマコモの本数は35本で、その内わけは個体間にバラツキがあることを考慮して以下のとおりとした。初期値測定用として5本、栽培用として30本を用いた。栽培用のマコモは1期~3期までは各期終了時

表1 実験期間

期間	期
5/14~6/11	1
6/11~7/9	2
7/9~8/6	3
8/6~9/3	4
9/3~10/1	5
10/1~10/29	6
10/29~11/26	7
11/26~12/24	8

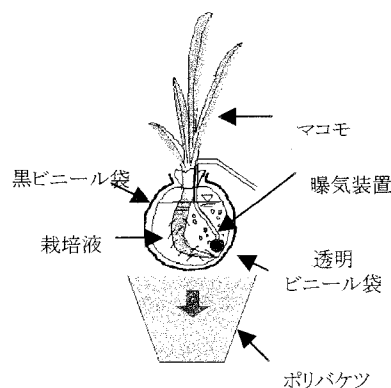


図1 実験装置の概要

に5本ずつ、4期～8期では3本ずつ採取し、各期終了時に含有量の分析に供した。従って、8期(12月)まで栽培されたマコモは3本である。

2.4 栽培液

栽培液組成を表2に示す。栽培液の供給量は5月14日～7月23日までは5Lで、7月30日～12月24日までは8Lとした。

2.5 分析方法および測定項目

分析対象は栽培液と植物体である。栽培液は1週間ごとに交換し、このとき残存栽培液量を、天秤(SHIMADZU 社製 LIBROR EB-20KH)を用いて測定した。あわせて栽培液を約100mL採水し、これを孔径0.45μmのメンブランフィルターでろ過した後、窒素・リンの濃度をオートアナライザー(BRAN+LUEBBE 社製 AACS-II)で測定した。ろ過後のメンブランフィルター上には、脱落した植物体や微生物が多少(SSとして3～20mg・L⁻¹程度)捕捉されていた。この栽培液中にSSとして存在する窒素・リン量について、SS

を20mg・L⁻¹、生物体中窒素・リン含有量をそれぞれ4%、0.5%⁶⁾と仮定すると、既往の研究¹⁾から明らかになっていた装置内の残存栽培液量によって、SS中の窒素量は5mg～22mg、リン量は0.6mg～2.8mgと概算される。この値は栽培液からのマコモの窒素・リン吸収量に対してそれぞれ2.4%～7.3%、1.3%～4.7%であった。そのため、今回の実験ではろ過により捕捉されたSS中窒素・リンの収支については考慮しなかった。

植物体の湿潤重量、乾燥重量、窒素およびリン含有量は以下の方法で求めた。湿潤重量は各期に、3～5本のマコモを水耕栽培液から引き抜き、そのまま1分間静置して根茎に付着した栽培液を落とした後、測定した。その後それぞれ部位別(根、茎、葉)に切り分け、各部位の湿潤重量を測定した。なお、根、茎、葉は以下のようにして区別した。まず根と地上部の区別は、色の変わり目を境に区別した。黄色部分を根とし、緑色部分を地上部(茎+葉)とした。また茎と葉の区別は赤黒色の節より下部を茎、上部を葉とした。

根、茎、葉に切り分けた後、それらをアルミホイルで包み、80℃で24時間風乾した後、各部位の乾燥重量を測定した。それらをミルサー(IWATANI社製 MILLSER IFM-300D)で粉末にした後、CNコーダー(Yanaco社製 MT700)で窒素含有量を測定した。また粉末試料を硝酸と過酸化水素を用いてマイクロウェーブ(ROLABO社製 A301)により分解して液体状にし、オートアナライザーによりリン濃度を測定した。

2.6 マコモ1本あたりの窒素・リン含有量の評価方法

マコモ1本あたりの窒素・リン含有量は、マコモ各部位の乾燥重量1gあたりの含有量と、各部位の乾燥重量を乗じることで求められる。しかし、本研究では分析に供するマコモは各期で分解してしまうため、1本のマコモ体中窒素・リン含有量の経時変化を同一個体で明らかにすることができない。同一個体で経時変化を測定できるのは全体の湿潤重量だけである。そこで、まず、各期に分析に供したマコモ全体の湿潤重量に対する各部位の湿潤重量の割合から、8期まで栽培したマコモの各部位の湿潤重量を算出した。さらに、分析に供したマコモの各部位の湿潤重量に対する乾燥重量割合から、8期まで栽培したマコモの各部位の乾燥重量を算出した。この乾燥重量と測定された1gあたりの含有量から窒素・リン含有量(計算値)を求めた。

また、個体間のバラツキがあるため、3～5本のマコモの測定値の中央値で評価することとした。

3. 実験結果および考察

3.1 マコモ重量の経時変化

3.1.1 マコモ湿潤重量の経時変化

マコモの各部位湿潤重量は、分析に供したマコモの各部位湿潤重量を測定することにより求められる。

表2 栽培液組成

化合物	濃度 (mg・L ⁻¹)
NH ₄ NO ₃	80.0
NaH ₂ PO ₄ ・2H ₂ O	31.2
K ₂ SO ₄	52.3
CaCl ₂ ・2H ₂ O	44.1
MgCl ₂ ・6H ₂ O	122.0
C ₁₀ H ₁₂ FeN ₂ NaO ₈ ・3H ₂ O	16.4
H ₃ BO ₃	3.01
MnSO ₄ ・5H ₂ O	2.17
CuSO ₄ ・5H ₂ O	0.075
ZnSO ₄ ・7H ₂ O	0.201
Na ₂ MoO ₄ ・2H ₂ O	0.024

ここで、図2に、8期まで栽培したマコモと、各期で含有量分析に供したマコモの、各期終了時の湿潤重量の経時変化を示した。なお、このデータは8期まで栽培したマコモおよび各期に分析に供したマコモ各3本(または5本)の中央値である。

各期に分析に供したマコモの湿潤重量と8期まで栽培したマコモの湿潤重量について、母平均の差の検定を行ったところ、0, 3, 4, 6期において、有意水準5%で差があることが明らかになり、これらを同じ個体とみなし、各期の各部位湿潤重量の経時変化を評価することが困難であることがわかった。一方、マコモ全体の湿潤重量に対する各部位の湿潤重量の割合について検討すると、図3(値は3~5本のマコモの中央値および標準偏差)に示すように、同時期の3~5本のマコモについては、比較的個体間の差が小さかった。

そこで、各期に分析に供したマコモの各部位の湿潤重量割合の中央値を、8期まで栽培したマコモの湿潤重量の中央値に乘じ、各部位の湿潤重量を算出した。その結果を図4に示した。根は実験期間を通し、増加した。一方茎、葉は4期にピークを示したが、4期以降は減少する傾向がみられた。実験末期になると地上部では枯死量が大きくなって減少しているが、根の重量は増加していることがわかった。

3.1.2 各部位の湿潤重量に対する乾燥重量割合

各期に分析に供したマコモについて、各部位の湿潤重量に対する乾燥重量割合を表3に示す。これらは各期で測定に供された3~5本のマコモの中央値である。

根は実験期間中 6.6~10.0%であり、生育時期に伴う大きな変化は見られなかった。茎は実験期間の前半は10%台前半であったが、実験期間後半には17%~18%となった。また、葉は0期~4期に約25%であったが5期以降増加し、8期には54%に達した。衰退期に入り、とくに葉に水分が供給されなくなったためと考えられる。また、生育期間中のマコモ全体の乾燥重量割合は11.5%~14.8%であった。

3.1.3 各部位の乾燥重量

各部位の乾燥重量を8期まで栽培したマコモについて評価する。しかし、各部位の乾燥重量は8期まで栽培を続けたため各期での評価ができない。そこで、表3に示した各期終了時の各部位の湿潤重量に対する乾燥重量割合に、図4に示した8期まで栽培したマコモの各部位の湿潤重量を乗じて、8期まで栽培したマコモの各部位の乾燥重量を求めた。

各部位の乾燥重量の経時変化を図5に示す。全体でみると6期に最大となり、78.5gであった。しかし7期以降は減少し、実験終了時の8期では67.0gまで減少していた。部位別にみると、根は時期

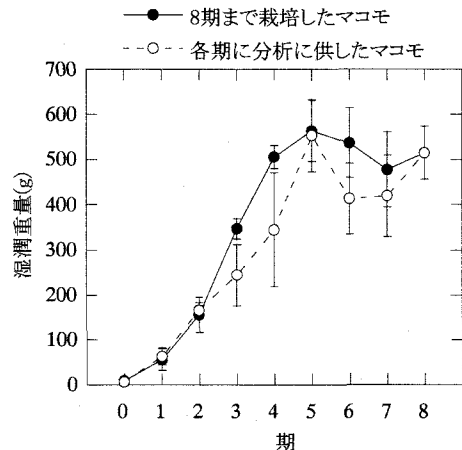


図2 8期まで栽培したマコモおよび各期に分析に供したマコモの湿潤重量

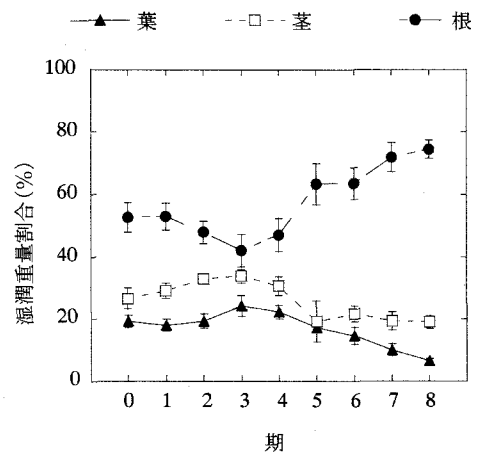


図3 マコモ全体の湿潤重量に対する各部位湿潤重量の割合

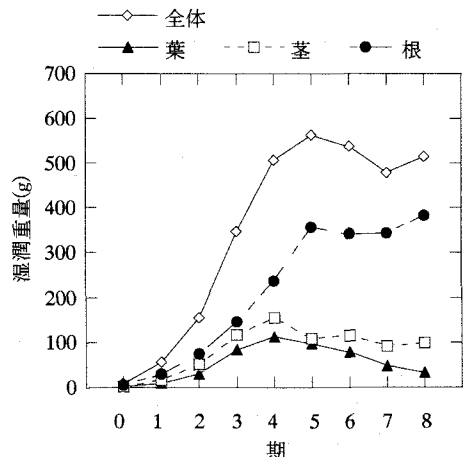


図4 8期まで栽培したマコモの各部位および全体の湿潤重量(計算値)

が経過するにつれ増加する傾向がみられ、地上部が枯れた 7 期、8 期でも減少しなかった。マコモは根茎で越冬するため、実験末期の 11 月、12 月でも生長を続けていたと考えられる。茎は 4 期以降、増加と減少を繰り返した。葉は 6 期に最大となり、29.3g であったが、6 期以降は減少し、8 期には 18.0g まで減少した。

一方、各部位の乾燥重量増加量に着目すると、全体では 3 期、4 期に大きく増加し、5 期に増加量が低下したが 6 期になると再び増加した。このような変化の原因として、気温の影響が考えられる。図 6 に実験期間中の平均気温の経時変化を示す。3 期、4 期と気温が高い時期は、重量増加量が大きく、気温が低下した 5 期は重量増加量も低下していることがわかる。しかし、6 期になり再び気温が上昇し、増加量が大きくなった。7 期以降、気温は低下し、増加量も 7 期の根以外は負の値となっている。7 期以降で乾燥重量の増加が認められなかったのは、衰退期に入りバイオマス生産量が著しく低下したのに対し、地上部の枯死量が増加し、脱落が多くなったためと考えられる。これらの結果から、以後 1 期から 6 期までを生育期と称し、7 期以降を衰退期と称す。部位別では 4 期までは葉の増加量が最も大きくなっていることがわかる。しかし 5 期以降はほとんど増加量がみられなかった。また茎は 4 期までは増加量が大きくなっているが、5 期以降は増加と減少を繰り返している。一方、根は 1 期から 7 期まで増加していることがわかる。3 期までは部位の中で最も増加量が小さかったが、4 期になると茎と同等の増加量を示し、5 期以降になると部位の中で最も大きい増加量を示した。

3.2 窒素・リン含有量の経時変化

8 期まで栽培したマコモについて窒素・リン含有量を評価するため、各期で分析に供したマコモの単位乾燥重量あたりの窒素・リン含有量を求め、得られた値に図 5 に示した 8 期まで栽培したマコモの乾燥重量を乗じ、マコモ 1 本あたりの窒素・リン含有量を算出した。

3.2.1 単位乾燥重量あたり窒素・リン含有量の経時変化

ここでは、各期で測定したマコモの乾燥重量 1g あたりの窒素含有量について評価した。なお、考察対象としたデータは各期に測定した 3～5 本のマコモの中央値である。

図 7 に、各期に測定した部位別の乾燥重量 1g あたりの窒素含有量の経時変化を示す。単位乾燥重量あたりの窒素含有量の時間的な変動をみると、葉では 0 期で最大値を示し、約 $50\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ であった。時期が経過するにつれ減少する傾向がみられ、8 期で最小値を示し、0 期の半分以下の約 $21\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ にまで減少した。一方、根、茎については 0 期から 3 期までは減少していたが、それ以降は増加していく傾向がみられた。とくに根は 8 期で最大値を示し、約

表 3 マコモ各部位の湿潤重量に対する乾燥重量割合

	根 (%)	茎 (%)	葉 (%)	全体 (%)
0	10.0	12.0	25.2	13.5
1	9.9	11.1	22.8	12.6
2	8.8	10.4	23.2	12.1
3	8.7	11.0	22.2	12.7
4	8.1	12.4	24.8	13.1
5	6.6	13.7	27.1	11.5
6	8.5	17.4	37.5	14.7
7	9.9	18.0	43.6	14.8
8	8.3	17.4	53.8	13.0

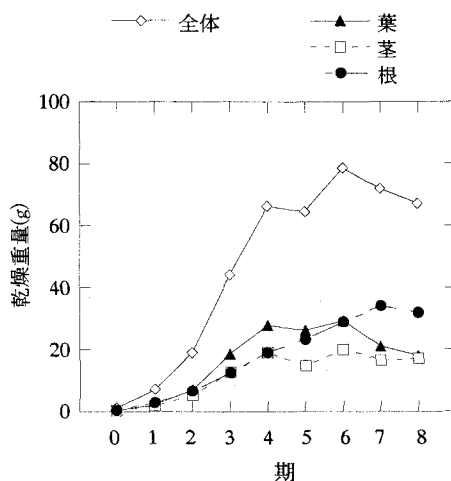


図 5 8 期まで栽培したマコモの各部位および全体の乾燥重量(計算値)

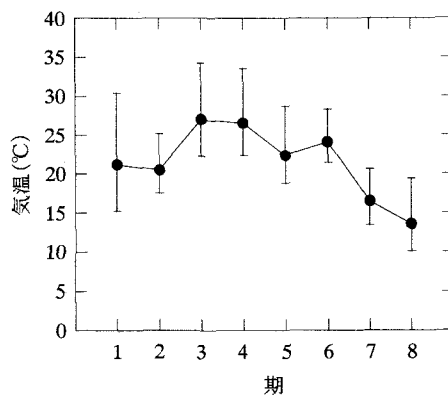


図 6 各期の平均気温

28mg・g⁻¹であった。実験開始時で単位乾燥重量あたり窒素含有量が各部位ともに大きかったのは、発芽して間もない時期の植物体は、個体自体が小さく、必要とする栄養塩を自力で獲得するのが困難であり、根の貯蔵組織に存在する物質に頼った代謝を行っているためと考えられる。また、1期から5期の間に、葉の単位乾燥重量あたり窒素含有量が大きかったのは、アミノ酸などの生成場が葉に存在する葉緑体にあるため¹⁴⁾と考えられる。衰退期に入ると葉の枯死に伴い、葉の単位乾燥重量中窒素含有量は小さくなったが、根は衰退期に入っても増加し続けた。マコモは根茎で越冬し、新芽の発芽の際に用いるための窒素を貯蔵する必要がある。地上部の単位乾燥重量あたりの窒素含有量が小さくなったのは、貯蔵組織の存在する根に輸送されたためと考えられる。実験期間中における枯死部位の重量は測定しなかったが、葉の枯死が顕著であった。茎、葉の枯死時期は異なり、茎に比べ葉の方が早く枯死時期を迎えているが、8期以降は茎の枯死も大きくなることが考えられ、茎に含有される窒素も根に輸送されると予想される。

図8に、部位別乾燥重量1gあたりリン含有量の経時変化を示す。これも各期で測定したデータである。単位乾燥重量あたりのリン含有量は、0期では各部位による差がほとんどなく、約4mg・g⁻¹であった。1期～6期までは茎に多く含有されていた。とくに5期、6期で大きく増加し、約7～8mg・g⁻¹であった。しかし、7期以降は6mg・g⁻¹程度まで減少した。一方、葉は0期から4期まではほぼ一定の値であり、約4mg・g⁻¹程度であった。しかし、5期以降は増加する傾向がみられ、8期で最大値を示し、約7mg・g⁻¹まで増加した。根は時期による大きな変化はみられず、全期間を通して約3mg・g⁻¹～4mg・g⁻¹であった。リンは窒素・カリウムとともに植物にとって三大栄養素の一つであるが、乾燥重量あたりの含有量は窒素に比べそれほど高くなかった。これはリンが環境中に極めて乏しい状態にあり、そのような環境に適応して効率よく利用する代謝過程を作り上げてきたため¹⁵⁾と考えられる。

3.2.2 植物体中窒素・リン含有量の経時変化

図5に示した8期まで栽培したマコモの各部位の乾燥重量と、図7、8で示した各期で測定したマコモの単位乾燥重量あたりの窒素・リン含有量を乗じて、8期まで栽培したマコモ1本あたりの各期の各部位における窒素・リン含有量を算出した。なお、対象としたデータは8期まで栽培した3本のマコモの中央値である。

図9に、8期まで栽培したマコモの植物体1本あたりおよび各部位窒素含有量の経時変化を示した。植物体1本あたりの窒素含有量は6期に最大値を示し、その値は約2080mgであった。7期以降の減少は主に葉の含有量の減少によるものである。葉の窒素含有量は5期に最大値を示し、約850mgであった。しかし7期以降急激に減少しており、8期ではピークの半分以下の約390mgであっ

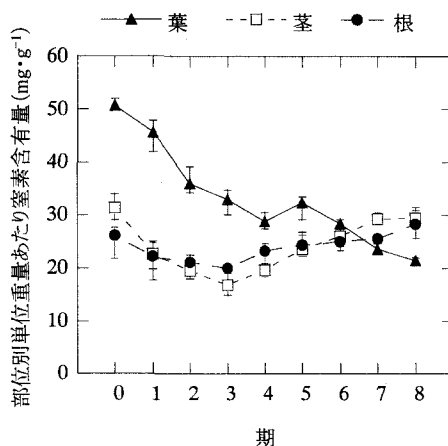


図7 部位別単位乾燥重量あたり窒素含有量

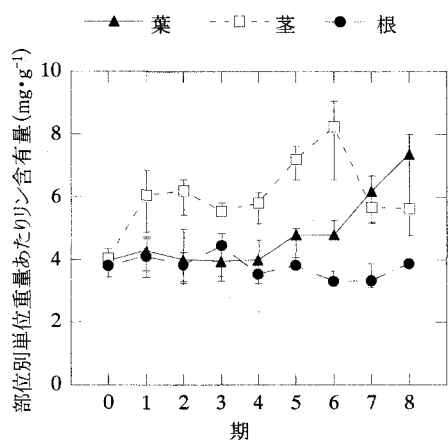


図8 部位別単位乾燥重量あたりリン含有量

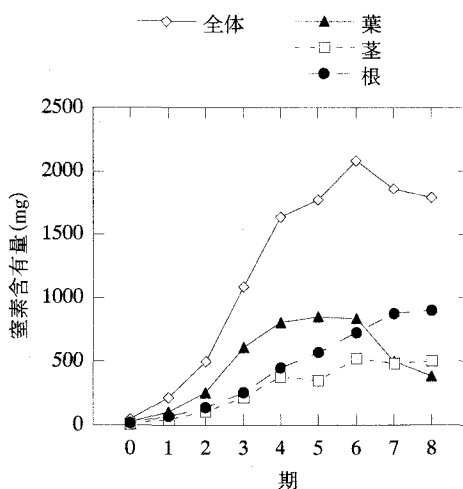


図9 8期まで栽培したマコモの窒素含有量 (計算値)

た。7 期以降、乾燥重量の減少と単位乾燥重量あたりの窒素含有量が減少したためと考えられる。一方、根の窒素含有量は時期が経過するにつれ増加しており、衰退期である8期で最大値を示し、約900mg まで増加した。根の単位乾燥重量あたり窒素含有量は衰退期に入り増加していることと、乾燥重量が衰退期で減少しなかったため、根の窒素含有量が増加したと考えられる。

図10に、8期まで栽培したマコモの植物体1本あたりおよび各部位リン含有量の経時変化を示す。植物体1本あたりのリン含有量は、窒素と同様に6期に最大値を示し、その値は約400mgであった。根の単位乾燥重量あたりリン含有量は全期間を通して大きな変化はなかったが、乾燥重量が増加したため、リン含有量は増加し、8期で約124mgに達した。葉のリン含有量は6期まで増加し、6期での値は約146mgであったが、それ以降は緩やかに減少した。葉は単位乾燥重量あたりリン含有量が衰退期に入り大きくなったが、乾燥重量が減少したため、含有量は小さくなった。6期までは茎、葉に比べ根のリン含有量は小さいが、衰退期の単位7期、8期では部位の中で根に最も多く含有されていた。衰退期の単位乾燥重量あたりリン含有量は根に比べ地上部が大きかったが、含有量は根のほうが地上部よりも大きかった。

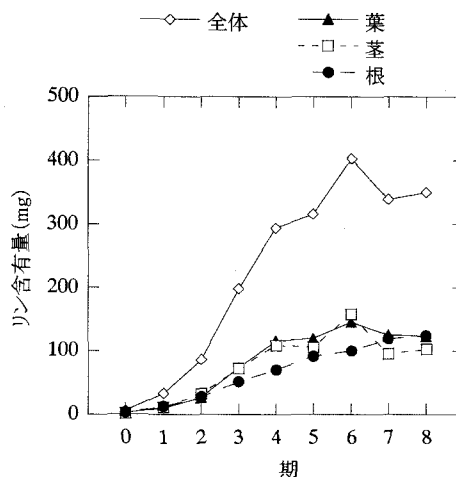


図10 8期まで栽培したマコモのリン含有量
(計算値)

3.3 収支

3.3.1 収支の定義

栽培液から減少した窒素・リン量に対して、植物体中に増加された窒素・リン量の割合を収支とする。ここでは、各期の収支について評価した。収支の求め方を次式に示す。

$$(E)_n = \{(M')_n / (L)_n\} \times 100$$

ここで、

$(E)_n$: n 期における収支(%)

$(M')_n$: n 期における植物体中元素増加量(mg)

$(L)_n$: n 期における栽培液中元素減少量(mg)

以上の式により収支を算出した。なお考察対象としたデータは8期まで栽培したマコモの中央値である。

また、 (M') は次式によって求めた。

$$(M'_R)_n = (M_R)_n - (M_R)_{n-1}$$

$$(M'_S)_n = (M_S)_n - (M_S)_{n-1}$$

$$(M'_L)_n = (M_L)_n - (M_L)_{n-1}$$

$$(M')_n = (M'_R)_n + (M'_S)_n + (M'_L)_n$$

ここで、

$(M_{RSL})_n$: 8期まで栽培したマコモのn期における根(R)、茎(S)、葉(L)の各元素含有量(mg)

$(M'_{RSL})_n$: n 期における根(R)、茎(S)、葉(L)の各元素含有量増加量(mg)

$(M')_n$: n 期における植物体中元素量(mg)

さらに、8期まで栽培したマコモの、1週間あたりの栽培液からの元素減少量の算出方法を以下に示す。なお1期あたりの栽培液中元素減少量は4週分(Lmg)とした。

$$R_m = C_0 \times Q_0 - C_7 \times Q_7$$

ここで、

R_m : m 週目の 1 週間あたりの栽培液中減少量 (mg)

C_0 : 初期栽培液濃度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

Q_0 : 初期栽培液量 (L)

C_7 : 1 週間後の栽培液濃度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

Q_7 : 1 週間後の栽培液量 (L)

以上の式により、各期の栽培液中元素減少量を算出した。

3.3.2 植物体中の窒素増加量および栽培液からの窒素減少量の経時変化

図 11 に各期のマコモ体中窒素増加量および栽培液からの窒素減少量の経時変化を示す。

マコモ体中窒素増加量は 6 期まで正の値で増加がみられ、とくに 3 期、4 期の増加量が大きかった。これはこの時期に植物体生産量が大きくなったためと考えられる。

窒素の各期の栽培液中減少量は 4 期に最大となり、約 750mg であった。5 期以降は減少する傾向がみられ、7 期以降は急激に減少した。衰退期に入り植物体生産量が著しく低下したため、窒素の吸収量も減少したと考えられる。8 期間の積算減少量は約 2920mg であった。

3.3.3 植物体中のリン増加量および栽培液からのリン減少量の経時変化

図 12 に各期のマコモ体中リン増加量および栽培液からのリン減少量の経時変化を示す。マコモ体中リン増加量は窒素と同様に 6 期まで増加がみられ、とくに 3 期、4 期のリン増加量が大きい。その理由は窒素と同様のことが考えられる。各期の栽培液中減少量は窒素と同様の傾向がみられた。4 期に最大となり、約 160mg であった。5 期以降は減少する傾向がみられ、とくに 7 期以降の栽培液中減少量は急激に減少した。積算減少量では 8 期間で約 590mg であった。

3.3.4 各期の窒素・リン収支

5 期以降、地上部は枯れはじめ、実験室内の床に脱落した。とくに衰退期の 7 期、8 期はその量が大きくなった。脱落した部分には生長過程で蓄積された窒素・リンの数%が含有されていたと考えられるが、今回の実験では、枯死脱落した個体についての十分な回収測定を行えなかったため、収支を評価する際、誤差が非常に大きくなる可能性がある。そのため収支については 1 期～6 期までの評価とした。

図 13 に各期の窒素およびリンの収支の経時変化を示す。

窒素は、1 期～4 期までは 111%～74%の収支が得られた。しかし 5 期では 28%まで減少し、6 期では 80%程度の収支となった。リンは、1 期～4 期までは 107%～66%の収支が得られている。しかし窒素と同様の 5 期に収支が減少し、約 17%まで減少した。6 期になると再び約 80%の収支が得られた。

このように、1 期～6 期までの各期の窒素・リンの収支は、5 期を除いた期では約 70%～110%の収支が得られた。5 期に収支が減少した原因は次のように考えられた。5 期では乾燥重量の増加量が全体で負の値になっている(図 5 参照)。しかし、植物体中窒素・リン増加量の 5 期の値は、1 期～4 期に比べ減少しているが、増加が認められる(図 11 参照)。これらの変化傾

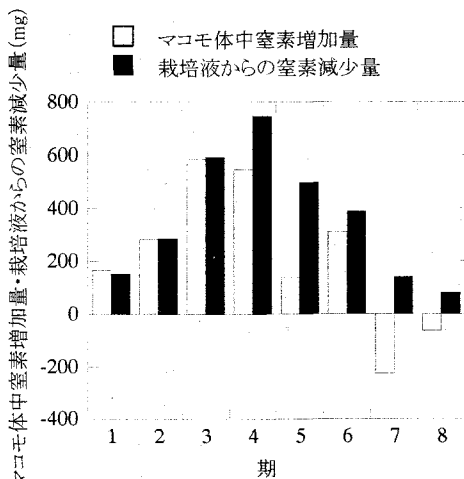


図 11 各期のマコモ体中窒素増加量および栽培液からの窒素減少量

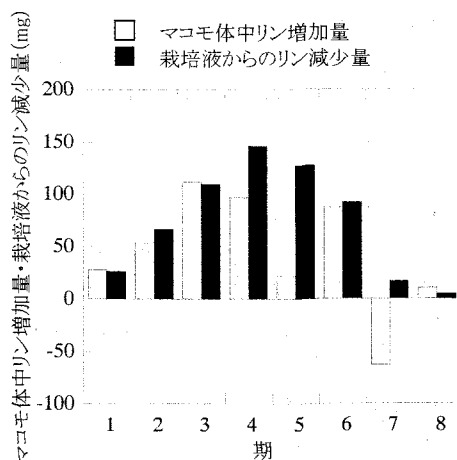


図 12 各期のマコモ体中リン増加量および栽培液からのリン減少量

向には、表3に示した乾燥重量割合の5期の値が、前後に比べて小さいことが影響しているが、次のようなことも考えられる。5期では気温の低下により(図6参照)、乾燥重量の増加量が小さくなったと思われるが、全く生産量がなかったわけではなく、地上部の枯死脱落量が生産量を上回ったため、みかけの乾燥重量増加量は負の値となったと考えられる。そのため5期で収支が低下したのは、地上部の枯死脱落量が大きかったためと考えられる。

以上、これまで、栽培液中から減少した窒素・リン量と水生植物の体内増加量の収支は不明であったが、本研究により、硝化・脱窒、吸着を抑制・排除した系において、8月上旬くらい(3期)まではほぼ良好な収支が得られることが明らかになった。その後の時期では収支が低下した。この原因の一つとして、地上部の枯死脱落量が影響していると考えられる。すなわち、脱落した部分には生長過程で蓄積された窒素・リンの数%が含有されていたと考えられたため、枯死脱落した植物体の十分な回収を行い、その含有量も考慮して収支を示さなければならないことが明らかになった。

4. 結論

マコモを構成する主要成分である窒素・リンの部位別含有量の時期的変化を把握し、さらに栽培液からの吸収量に対するマコモ体中窒素・リン含有量、すなわち収支を明らかにすることを目的とし、硝化・脱窒・吸着を抑制した系において5月から12月までの8ヶ月間(開始時を0期、以降4週間ごとに1, 2...8期とする)、実験を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) マコモの湿潤重量は、全体では5期(9月)に最大となり、このとき562gであった。また、根、茎、葉の湿潤重量割合は生育時期によって変化することが明らかになった。3期(7月)の根・茎・葉の割合はそれぞれ42.1%, 33.8%, 24.2%であったが、8期(12月)の根・茎・葉の割合はそれぞれ74.5%, 19.0%, 6.5%であった。
- 2) 実験期間中のマコモの湿潤重量に対する乾燥重量割合について、マコモ全体では11.5%~14.8%であった。また、根は6.6%~10%, 茎は12~18%, 葉は25%~54%であった。
- 3) 乾燥重量1gあたり窒素・リン含有量は生育時期によって大きく変化することが明らかになった。また、マコモ1本あたり窒素・リン含有量は、6期(10月)に最大値を示し、その値はそれぞれ約2080mg, 約400mgであった。
- 4) 部位別の窒素・リン含有量経時変化より、窒素含有量は、3期(7月)~6期(10月)は葉が大きく、7, 8期(11, 12月)では根が大きいこと、また、リン含有量は、3期(7月)~6期(10月)は葉と茎が大きく、7, 8期(11, 12月)では茎が小さいことが見られた。
- 5) 栽培液から減少した窒素・リン量に対して、植物体中に増加された窒素・リン量の割合を収支とすると、1期~6期までの各期の窒素・リンの収支は、5期を除いた期では窒素・リン共に約70%~110%の収支となった。

謝辞

本研究は、文部省科学研究費補助金基盤研究(C)(2)課題番号 13650603 およびハイテクリサーチセンター整備事業の援助を受けて遂行された。心から感謝申し上げます。また、実験に携わった佐々木光毅君、福土蔵君、古川昇平君、横山孝行君(当時4年)に御礼申し上げます。

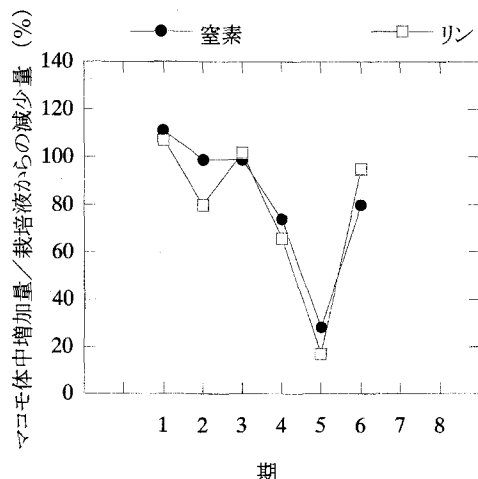


図13 各期のマコモ体中窒素・リン増加量に対する栽培液からの窒素・リン減少量の割合

参考文献

- 1) 綿谷寿美, 石垣智基, 森一博, 池道彦, 藤田正憲: 水域直接浄化に関する事例解析とデータベースシステムの構築, 環境工学研究論文集, 37, 247-258 (2000).
- 2) R.M.Gersberg, B.V.Elkins, S.R.Lyon and C.R.Goldman : Role of Aquatic Plants in Wastewater Treatment by Artificial Wetlands, *Wat.Res.*, 20, (3), 363-368 (1986).
- 3) 細見正明, 須藤隆一: 湿地による生活排水の浄化, 水質汚濁研究, 14 (10), 674-681 (1991).
- 4) K.H.Rogers, P.F.Breen, A.J.Chick : Nitrogen Removal in Experimental Wetland Treatment Systems: Evidence for the Role of Aquatic Plants, *Res.J.WPCF*, 63, (7), 934-941 (1991).
- 5) 桜井善雄: 水辺の緑化による水質浄化, 水と緑の読本, 889-909 (1988).
- 6) 渡辺義人, 桜井善雄: 抽水植物の成長・枯死過程における植物体中 N, P 含量の変動とその現存量, 環境科学研究報告書, B-341-RO2-2, 26-37 (1988).
- 7) 江成敬次郎, 杉山智洋: 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, 環境システム研究, 23, 483-487 (1997).
- 8) 江成敬次郎, 西村友樹, 佐藤保, 齋藤茂, 齋藤孝市: 水生植物(マコモ)の吸水量評価に関する研究, 日本水処理生物学会誌, 35 (2), 85-97 (1999).
- 9) 江成敬次郎, 浦川めぐみ, 李瓚雨, 伊崎和夫, 中山正与: 水生植物(マコモ)の根圏における硝化作用の抑制手法の検討とそれによる窒素吸収と硝化の比較, 環境工学研究論文集, 37, 229-235 (2000).
- 10) 江成敬次郎, 黒坂広一, 李瓚雨, 伊崎和夫, 中山正与: 水生植物(マコモ)の無機態窒素吸収特性に対する無機態窒素濃度及び $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ の濃度比率の影響, 水環境学会誌, 24 (1), 42-47 (2001).
- 11) 小浜曉子, 江成敬次郎, 玉置智, 中山正与: 水生植物(マコモ)による窒素・リン吸収量の評価, 日本水処理生物学会誌, 39, (2), 59-66 (2003).
- 12) 廣田伸七編著: ミニ雑草図鑑～雑草の見分け方, 全国農村教育協会, 46-47, 東京 (2001).
- 13) 角野康郎: 日本水草図鑑, 文一総合出版, 68-69, 東京 (1994).
- 14) 山田晃弘, 菊山宗弘: 植物の生理, (財)放送大学教育振興会, 75-77, 82-84, 86-87 (2000).
- 15) 植物栄養・肥料の事典編集委員会: 植物栄養・肥料の事典, 朝倉書店, 東京 (2002).