

(51) 水生植物(マコモ)の年間を通した窒素・リン吸収量の評価

Evaluation of Annual Amount of Nitrogen and Phosphorus Absorption in an Aquatic Plant (*Zizania latifolia*)

江成敬次郎*, 小浜暁子**, 玉置智***, 山廻辺典夫***
菊地奈美子***, 山岸正幸****, 藤田光則**, 中山正与*****

Keijiro ENARI*, Akiko KOHAMA**, Satoshi TAMAOKI***, Norio YAMANOBÉ***
Namiko KIKUCHI***, Masayuki Yamagishi****, Mitsunori FUJITA**, and Masatomo NAKAYAMA*****

ABSTRACT; In this study, experiments in a water culture system inhibiting the nitrification and denitrification were conducted in 2001 (May-Dec.), 2002 (May-Dec.), 2003 (Jan.-May) and 2004 (Jul.-Nov.) to evaluate the annual amount of nitrogen and phosphorus absorption in the aquatic perennial plant, *Zizania latifolia*.

The results were as follows: The amount of nitrogen and phosphorus absorption of a *Z. latifolia* was increased significantly in the early growth stage (from May to Jul.) and the maximum value of them was taken in September, the values were 680mg and 154mg, respectively. The amount of nitrogen and phosphorus absorption per wet weight of *Z. latifolia* were changed from $15\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, $2.7\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (in May) to $0.03\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, $0.01\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (in Jan.), respectively. The amount of nitrogen and phosphorus absorption for the whole year was calculated as about 3,600mg and 720mg, respectively.

KEY WORDS; *Zizania latifolia*, nitrogen absorption, phosphorus absorption, annual amount

1. はじめに

水域の浄化に様々な植物の利用が注目され、多くの知見^{1)~5)}が得られてきているが、一年生植物または多年生植物を対象に、生長過程の一部の窒素・リン除去能力に関する研究が多い。一方、多年生植物を用いて効果的に植生浄化を行うためには、多年生植物の年間あるいは複数年を通した栄養塩吸収特性を把握することが重要であると考えられる。著者らは、これまでイネ科の多年生水生植物であるマコモ (*Zizania latifolia*) を用い、マコモの窒素・リン吸収速度と根圏部における硝化、脱窒との関係、著しい生長の変化が観察された期間中(5月~12月)における植物体1本当たりの窒素・リン吸収量および植物体中窒素・リン含有量変化などを明らかにしてきた^{6)~11)}。しかし、これらは根茎から発芽させた1年目のマコモ単年分のデータであり、また越冬期間中やその後の実験は行われていなかった。本研究では、それぞれ異なる目的で行った既往の2年分(2001年, 2002年)の5月から12月までの実験結果, 2003年の1月初旬から新芽の生長が見られた5月までに得られた実験結果, さらに2004年7月から12月までの実験結果を年間吸収量の評価という視点から整理し、水生植物マコモ1本当たりの年間を通した窒素・リン吸収特性や吸収量の変化を明らかにすることを試みた。

*東北工業大学大学院工学研究科環境情報工学専攻 (Dept. of Environmental Information Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku Institute of Technology)

**東北工業大学工学部環境情報工学科 (Dept. of Environmental Information Engineering, Tohoku Institute of Technology)

***元東北工業大学大学院工学研究科土木工学専攻 (former Dept. of Civil Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku Institute of Technology)

****元東北工業大学大学院工学研究科環境情報工学専攻 (former Dept. of Environmental Information Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku Institute of Technology)

*****東北工業大学大学院工学研究科建設システム工学専攻 (Dept. of Civil Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku Institute of Technology)

2. 実験方法

2.1 実験材料

マコモ (*Zizania latifolia*) 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、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¹²⁾。本研究では、伊豆沼・内沼環境保全財団より提供されたマコモの越冬根茎を 4 月に発芽させ、実験開始時期まで水耕栽培を行ったものを用いた。

2.2 実験期間

実験は 2001 年、2002 年、2003 年、2004 年に行った。実験期間は表 1 に示したように、1 月から 12 月までの 12 ヶ月間を 4 週間ごとに区別した。そして、それぞれの月に対応する期間 (4 週間) を、月期 (例: 5 月期) と表記する。

2.3 実験条件

植物による窒素・リン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、土壌による吸着の影響や、土壌中に含まれる有機物などの影響をなくすため、水耕栽培で実験を行った。本実験に用いた水耕栽培装置の概要を図 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。栽培液組成を表 2 に示す。栽培液の供給量は生育にあわせ 1L から 8L の間で変化させ、交換頻度は 2001 年、2002 年は 1 週間ごと、2003 年、2004 年は 2 週間ごととした。それぞれの年度の実験目的が異なっていたため、供給量や供給頻度はこのように一定ではないが、この点については考察で検討を行った。なお、いずれの期間においても窒素・リンの供給量が不足するということはない。硝化を抑制するため、栽培液に ATU (1-Allyl-2-thiourea) を $2\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ となるように添加し、また、脱窒を抑制するためエアポンプで曝気を行った。これらを東北工業大学の全天候型ガラスハウス内に設置した。使用したマコモの初期本数は 2001 年 5 本、2002 年 3 本、2003 年 5 本、2004 年 5 本であった。

2.4 測定項目および分析方法

測定項目は栽培液の量、窒素・リン濃度と植物体の湿潤重量およびガラスハウス内気温とした。栽培液は交換前後の液量を電子天秤 (SHIMADZU 社製 LIBROR EB-20KH) を用いて測定した。栽培液交換時に栽培液を約 100mL 採取し、孔径 $0.45\mu\text{m}$ のメンブランフィルターでろ過後、窒素・リン濃度をオートアナライザー (BRAN+LUEBBE 社製, AACS-II) で測定した。気温は自動温度測定器 (T AND D 社製, おんどり TR-72) を用いて測定した。

表 1 実験期間

月期	年			
	2001	2002	2003	2004
5	5/9-6/5	5/14-6/10		
6	6/6-7/3	6/11-7/8		
7	7/4-7/31	7/9-8/5		7/13-8/9
8	8/1-8/28	8/6-9/2		8/10-9/6
9	8/29-9/25	9/3-9/30		9/7-10/4
10	9/26-10/23	10/1-10/28		10/5-11/1
11	10/24-11/20	10/29-11/25		11/2-11/30
12	11/21-12/19	11/26-12/23		
1			1/6-2/2	
2			2/3-3/2	
3			3/3-3/30	
4			3/31-4/27	
5			4/28-5/25	

表 2 栽培液組成

化合物	濃度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
NH_4NO_3	80.0
$\text{NaH}_2\text{PO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	31.2
K_2SO_4	52.3
$\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	44.1
$\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	122.0
$\text{C}_{10}\text{H}_{12}\text{FeN}_2\text{NaO}_8\cdot 3\text{H}_2\text{O}$	16.4
H_3BO_3	3.01
$\text{MnSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	2.17
$\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.075
$\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.201
$\text{Na}_2\text{MoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.024

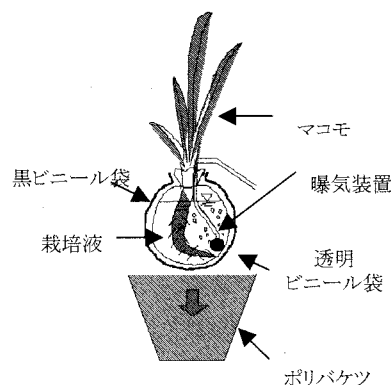


図 1 実験装置の概要

3. 実験結果および考察

3.1 気温変化

図2に2001年, 2002年の5月期～12月期(2001年12月期は測定機器の故障のためデータが得られなかった), 2003年1月期～5月期および2004年7月期～11月期のガラスハウス内月平均気温変化および仙台管区気象台データ¹³⁾の各月平均気温を示した。ガラスハウス内の平均気温は5月期, 6月期は約21℃だったが, 7月期に急激に上昇し約27℃に達した。9月, 10月期は約2.7℃ずつ低下し, 11月期以降は約5℃ずつ低下した。1月期に年間最低気温 7.7℃を示したが, 5℃を下回ることにはなかった。一方, ガラスハウス内気温と仙台管区気象台データから算出した平均気温とを比較すると, 傾向は類似していたが, ガラスハウス内の方が年間平均で約5℃高かった。

3.2 マコモの外観および湿潤重量の経時変化

マコモは4月に根茎から芽が出始め, 地上部, 根茎ともに5月期～10月期に著しく生長した。この期間は, 地上部, 特に葉は濃緑色を呈していたが, 11月期以降は褐色化し, 12月期～2月期には倒伏した。そして3月期後半に再び新芽が観察された。

マコモの湿潤重量の経時変化を図3に示した。結果はすべて各月期で得られたデータの中央値を示した。図中の範囲は最大値・最小値を示す。2001年, 2002年において, マコモの実験初期(5月)の湿潤重量は中央値で約11gであった。5月期から8月期の間に指数関数的に増加し, 10月期頃最大に達した(2001年 636g, 2002年 563g, 初期重量の約60倍)。その後, 地上部が枯れ, また一部が枯れ落ちてしまったのに伴い湿潤重量は減少し, 12月期は最大値の約90%であった。2003年1月に実験を開始したマコモは初期湿潤重量333gであったが, 2月期, 3月期には前月期と比較して3～4%ずつ減少した。一方, 3月期後半から重量が増加し始め, 5月期には390gに達した。2004年7月期に実験を開始したマコモは開始時期の湿潤重量が57gであり, 2001年, 2002年の同時期の個体(165g)の約35%であった。その後増加し, 11月期に最大(210g)に達したが, 2001年, 2002年の同時期の約36%であった。これらのことから, ガラスハウス内で生育させたマコモの湿潤重量の変化特性として, 4月に発芽した1年目の個体は発芽後1ヶ月の5月から8月にかけて指数関数的に増加すること, 特に5月, 6月の重量増加が後の生長に影響を及ぼすこと, 10月頃に最大に達し, 5月の約60倍以上となること, その後は各月3～4%ずつ減少し2月頃最低となること, 一方2年目の個体は3月後半に根茎から新芽が出て, 重量も増加するが, 発芽後1～2ヶ月間の重量増加は1年目ほど著しくはないこと, などが明らかになった。

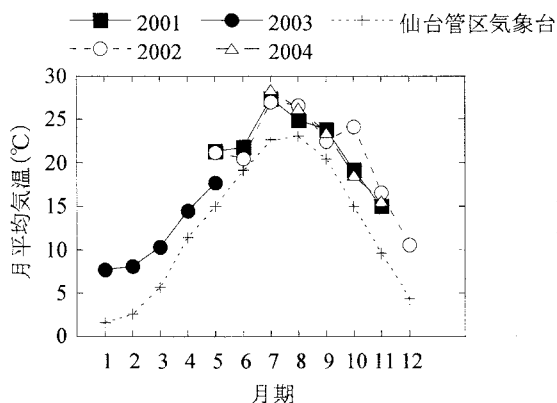


図2 月平均気温変化(2001-2004)

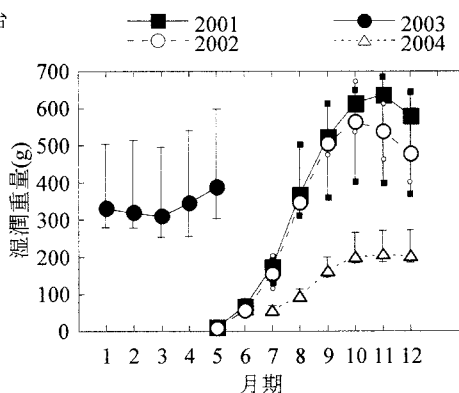


図3 マコモ湿潤重量の変化(2001-2004)

3.3 窒素・リン吸収量の経時変化

前報¹¹⁾において, 栽培液からの窒素・リン減少量とマコモ体中窒素・リン含有量との収支は 70～110%であり, 枯死体の回収を考慮すれば本実験条件における栽培液からの窒素・リン減少はほぼマコモによる吸収とみなすことができると判断されたため, 本報でも栽培液からの窒素・リン減少をマコモによる吸収として評価した。

以下にマコモ1本, 1週間(2003年1月～4月期および2004年は2週間)当たりの窒素, リン吸収量の算出方法を示した。

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

ここで、

R : 1週間当たりの窒素・リン吸収量(mg)

C_0 : 各週の初期栽培液濃度(mg・L⁻¹)

Q_0 : 各週の初期栽培液量(L)

C_7 : 1週間後の栽培液濃度(mg・L⁻¹)

Q_7 : 1週間後の栽培液量(L)

また、一ヶ月期当たりの吸収量は対応する期間の1ヶ月(4週)間分として算出した。吸収量は各年各月期の3～5本のマコモの測定値の中央値で評価した。

(1) 窒素・リン吸収量の経月変化

図4、図5に各月期窒素、リン吸収量の経時変化を示した。ややばらつきが大きい場合もあったが、今回は中央値を代表値とみなして評価した。各月期窒素吸収量は2001年、2002年ともに5月期から7月期にかけて急激に増加し、2001年は9月期、2002年は8月期に最大(中央値でそれぞれ630g、745g)となった。この時期の各1ヶ月間でマコモは1本当たり450mg～750mgの窒素を吸収した。2004年は実験開始時期が遅かったため、吸収量が2001年、2002年と比較して小さかったものの、9月期に最大値(294mg)を示した。窒素吸収量が2001年、2004年の8月期に減少した原因として、気温が前後の週より約3℃～6℃低下した期間が1～2週間あった(データには示さず)ためと考えられる。イネは、夏季の温度が窒素吸収に影響を及ぼすことが知られている¹⁴⁾ことから、マコモもその特性を有していると考えられた。10月期以降は減少傾向がみられた。11月期の吸収量について、年による違いが大きく、2001年、2002年、2004年の各11月期吸収量は約380mg、約140mg、約160mgであった。この違いが生じた原因

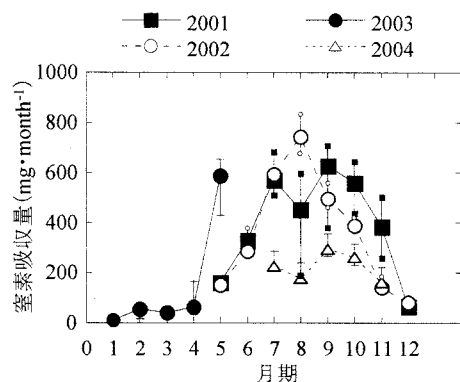


図4 窒素吸収量変化(2001-2004)

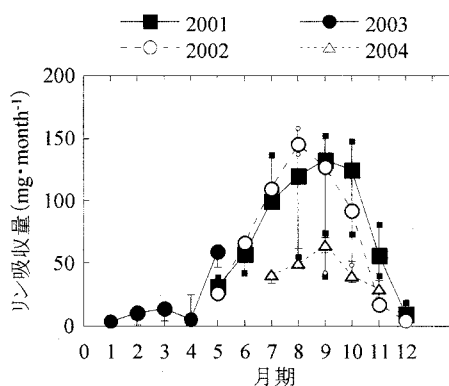


図5 リン吸収量変化(2001-2004)

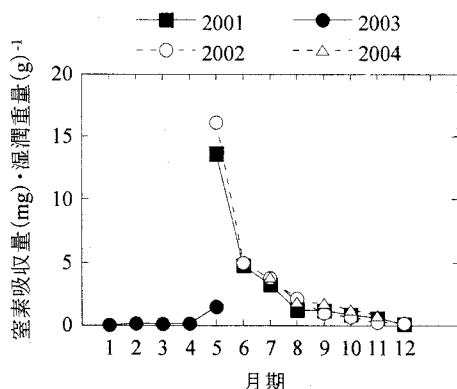


図6 単位重量当たり窒素吸収量変化(2001-2004)

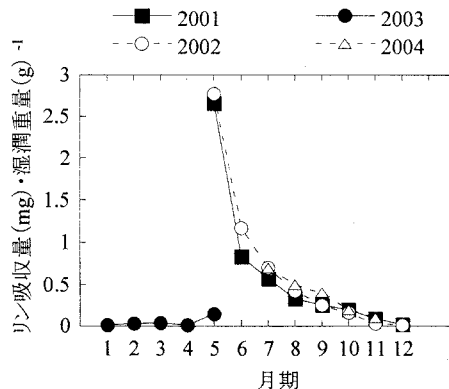


図7 単位重量当たりリン吸収量変化(2001-2004)

は不明だが、8月期の窒素吸収が十分でなかった場合、窒素吸収が11月期になっても継続する可能性が示唆された。また、地上部が枯死してしまった12月期でも最大時の10%以下とわずかではあるが吸収されていることが確認された。各月期のリン吸収は、窒素とほぼ同様の傾向がみられた。すなわち5月期から8月期にかけて増加し、2001年は9月期に、2002年は8月期に最大(それぞれ133mg, 146mg)となった。ただし、2001年、2004年において、8月の窒素吸収量が7月と比較して減少したのに対し、リンは増加した。このことから、この時期のリン吸収には窒素ほど温度が影響しないことが示唆された。10月期以降は減少したが、12月期においてもリン吸収は継続した(最大時の3~7%)。

植生浄化において、冬季における窒素やリン溶出等による濃度増加の可能性が懸念されているが、本実験条件(月平均気温の最低値が7.7℃)では窒素・リン濃度の増加が起らないことが示された。一方、曝気によりリン溶出が抑制された可能性もあるため、冬季の栄養塩溶出についてはさらなる検討が必要である。

(2) 年間を通した窒素・リン吸収量

マコモ1本当たりの窒素・リン年間吸収量について評価するにあたり、2001年~2004年のデータは供給栽培液量や供給頻度といった実験条件、および結果として得られた湿潤重量が明らかに異なるため、同等に扱うのは困難である。そこで、マコモ1本各月期当たりの窒素・リン吸収量を各月期初期の湿潤重量で除し、各月期の単位重量当たり吸収量を求めた。結果を図6、図7に示した。ここでは中央値を代表値としてみなし、最大値・最小値は示さなかった。これらより、単位重量当たりの窒素・リン吸収量は、実験条件の違いにもかかわらず、どの年もほぼ同様の傾向を示すことがわかった。すなわち、窒素については5月期に最も高く、2001年、2002年の値はそれぞれ $13.6\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $16.1\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ であったが6月以降は急激に減少し、9月期には5月期の10%以下となった。12月期~4月期は $0.03\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ~ $0.18\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ の間で推移した。そして次年の5月期に上昇した($1.5\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)。また、リンについては、5月期に約 $2.7\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ であったが6月以降急激に減少し、12月期~4月期は 0.01 ~ $0.04\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ の間を推移した。

この2001年~2004年の平均単位重量当たり窒素・リン吸収量に、各月期初期の湿潤重量を乗じれば、それらの総和から年間の窒素・リン吸収量が求められる。そこで、2001~2004年のデータを用い、マコモ湿潤重量の経月変化を算出した。すなわち、5月期~12月期については2001年、2002年の平均値を、次年の1月期~5月期については2003年のデータを用いて各月期間の湿潤重量変化割合を求め、それを2001年、2002年12月の平均湿潤重量に乘じた値を各月期(1月期~5月期)の湿潤重量とした。各月期の初期湿潤重量、単位重量当たり窒素吸収量、単位重量当たりリン吸収量の計算値を表3に示した。また、これら乗じて算出された年間窒素・リン吸収量の変化を図8に示した。これらの計算結果より、1年目の個体の5月から次年4月までの1年(12ヶ月)間を通した窒素・リン吸収量はそれぞれ $3,600\text{mg}\cdot\text{マコモ1本}^{-1}\cdot\text{年}^{-1}$ 、 $720\text{mg}\cdot\text{マコモ1本}^{-1}\cdot\text{年}^{-1}$ と算出された。

表3 湿潤重量、単位重量当たり窒素吸収量、
単位重量当たりリン吸収量(計算値)

月期	湿潤重量(g)	窒素吸収量 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	リン吸収量 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)
5	11	14.9	2.7
6	62	4.9	1.0
7	165	3.7	0.66
8	357	1.7	0.42
9	514	1.3	0.30
10	588	0.96	0.19
11	587	0.57	0.09
12	529	0.15	0.02
1	490	0.03	0.01
2	470	0.17	0.03
3	458	0.13	0.04
4	508	0.18	0.01
5	572	1.5	0.15

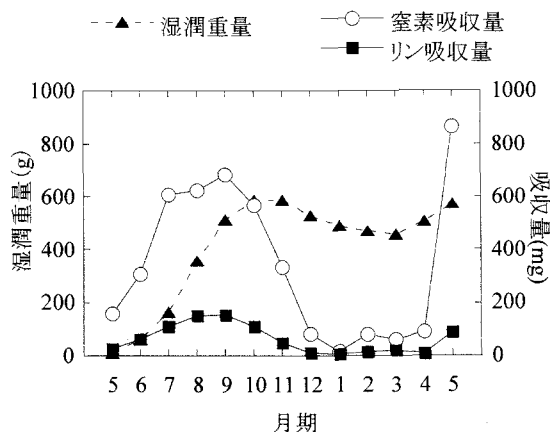


図8 1年目のマコモの湿潤重量、
窒素・リン吸収量(計算値)変化

4. 結論

マコモの1年間を通した窒素・リン吸収量を把握することを目的として、これまで(2001年、2002年の5月期～12月期、2003年の1月～5月期、2004年の7月期～11月期)に全天候型のガラスハウス内で水耕栽培実験を行って得られたデータを年間吸収量の評価という視点から整理した。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、5月の実験開始以降指数関数的に増加し、10月頃最大(初期の60倍以上)に達した。その後地上部の枯死とともに徐々に減少し、2～3月頃最小となり、その後増加することがわかった。
- 2) 窒素・リン吸収量は8月から9月にかけて最大となった(窒素、リンそれぞれ1本当たり680mg、154mg)。また、ガラスハウス内平均気温が7.7℃まで低下しても栽培液中窒素・リン濃度の増加は起こらなかった。
- 3) 一ヶ月期のマコモ単位重量当たりの窒素、リンの吸収傾向は年によらず類似していた。5月期が最大で、窒素・リンそれぞれ15mg・g⁻¹、2.7mg・g⁻¹、その後は急激に減少して9月期には5月期の約10%であった。12月から4月までは窒素・リンそれぞれ0.03～0.18mg・g⁻¹、0.01～0.04mg・g⁻¹の間を推移し、5月に増加することが明らかになった。
- 4) 1年目のマコモの1年間(5月から翌年4月まで)の1本当たり(湿潤重量11gから572gへの生長)窒素・リン吸収量は、それぞれ3,600mg、720mgと算出された。

謝辞

本研究は、文部科学省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、マコモを提供していただいた伊豆沼・内沼環境保全財団、および実験に携わった東北工業大学土木工学科および環境情報工学科の当時4年生の皆さんに御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 徐開欽, 加藤智博, 稲森悠平, 西村修, 細見正明, 須藤隆一: 浚渫ヘドロ上に創出した人工ヨシ湿地の水質浄化機能の評価, 用水と廃水, Vol.41, No.6, pp.504-512, 1999.
- 2) 福島忠雄: 生活排水が混入するため池の植生(ハス)による水質改善効果について, 農業土木学会論文集 No.142, 1989.
- 3) 中村融子, 緒方健, 志水信弘, 徳永隆司: シュロガヤツリによる池の水質浄化と水生昆虫の定着, 水環境学会誌, Vol.22, No.12, pp.1010-1015, 1999.
- 4) 尾崎保夫, 近藤正: 自然浄化機能を活用した農村地域の水質改善, 用水と廃水, Vol.37, No.1, pp.32-38, 1995.
- 5) 尾崎保夫, 高砂裕之, 阿部薫: 家庭設置型バイオジオフィルター水路の試作とその窒素、リン浄化特性, 日本水処理生物学会誌, Vol.24, p.28, 2004.
- 6) 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, pp.483-487, 1997.
- 7) 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, Vol.35, No.2, pp.85-97, 1999.
- 8) 江成敬次郎, 浦川めぐみ, 李瓊雨, 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, Vol.37, pp.229-235, 2000.
- 9) 江成敬次郎, 黒坂広一, 李瓊雨, 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NH₄-NとNO₃-Nの濃度比率の影響, 水環境学会誌, Vol.24, No.1, pp.42-47, 2001.
- 10) 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, Vol.39, No.2, pp.59-66, 2003.
- 11) 江成敬次郎, 山廻辺典夫, 小浜曉子, 中山正与: 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, 環境工学研究論文集, Vol.40, pp.269-278, 2003.
- 12) 角野康郎: 日本水草図鑑, 文一総合出版, pp.68-69, 東京, 1994.
- 13) 気象庁: <http://www.data.kishou.go.jp/>
- 14) 高橋重郎, 和田源七, 庄子貞雄: 水田における窒素の動態と水稻による窒素吸収について 第6報 温度が水稻の窒素吸収および土壌中のアンモニア態窒素の消長におよぼす影響, 日本作物学会紀事, Vol. 45, pp.213-219, 1976.