

水生植物を活用した水質浄化実験(第1報)

- 豊稔池の水質浄化の試み -

Experimental Studies on Water Treatment by Aquatic Plants(1)

笹田 康子 石原 暁 土取 みゆき *冠野 禎男
Yasuko SASADA Akira ISHIHARA Miyuki TUCHITORI Yoshio KANNO

要 旨

富栄養化が懸念されている豊稔池の流入サイト水生植物を活用した水質浄化施設が設置された。この施設で年間を通じて実際に豊稔池に流入する河川水について様々な水生植物を用いた水質浄化実証実験を行った。クレソンが年間を通して窒素吸収速度が $0.46\text{g}/\text{m}^2/\text{日}$ 、りん吸収速度が $0.024\text{g}/\text{m}^2/\text{日}$ と良好な除去効果を示した。またインパチェンスも春から秋まで、窒素吸収速度が $0.55\text{g}/\text{m}^2/\text{日}$ 、りん吸収速度が $0.032\text{g}/\text{m}^2/\text{日}$ と良好な除去効果を示した。ヨシは年間を通して、窒素吸収速度が $0.18\text{g}/\text{m}^2/\text{日}$ であったが、りんの除去効果は認められなかった。植物水路における物質収支から、水質浄化は植物による吸収だけでなく、菌類や藻類、小動物の働きが浄化効果をより高めていた。水生植物を活用した水質浄化施設の1年目の効果としては、豊稔池の流入サイトの窒素濃度及びりん濃度が減少傾向を示した。水生植物を活用した水質浄化法は自然の浄化機能を利用した省エネの浄化法であり、親水性空間として身近な水環境へのふれあいの場にもなり、今後実用化が期待される手法である。

キーワード：水質浄化，水生植物，除去率，窒素吸収速度，りん吸収速度

はじめに

全国で唯一のマルチプルアーチダムを有する豊稔池において、近年、富栄養化による水質の悪化が懸念されている。地域住民、各種団体、行政が連携して豊稔池及びその集水域の水環境を改善するため、平成12年に「豊稔池みずすまし運動推進会議」が設立された。策定された「豊稔池水環境保全行動計画」の事業の一環として、平成13年度末水生植物による水質浄化施設が設置された。自然にやさしいエネルギーを用いることとし、この施設で使用される電力は、池の水面に設置された太陽光発電システムによってまかなわれている。この施設において、年間を通じて、豊稔池に流入する河川水について、各種の水生植物を利用した窒素・りん等の浄化効果を検証した。実証実験に際し、過去の報告等^{1)・12)}を参考に、栽培の管理が容易で、水質浄化能力の高い植物を選定し、植物の生育状況を観察するとともに、窒素・りんの吸収速

度を求め水質浄化能を比較し、香川県に適した水生植物を活用した浄化システムの構築を目指し、地域特性に応じた水環境改善技術の実用化を検討したので報告する。

施設の概要

1 施設の設置場所

「水生植物を活用した水質浄化実験施設」は大野原町五郷田野々、豊稔池(写真1)の上流域の柞田川左岸に位置する。(図1)

2 構造

本施設は、柞田川から取水し(写真2)、接触酸化槽から4列の植物浄化水路を経て、浄化した水を再び柞田川に放流する構造になっている。(図2、写真3)

接触酸化槽は容量 6m^3 あり、ひも状接触材を配

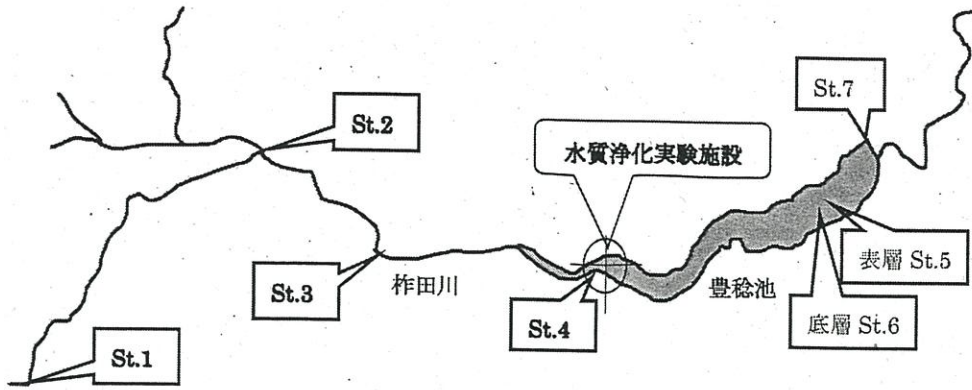


図1 豊稔池周辺の地図 (豊稔池流域調査の調査地点)

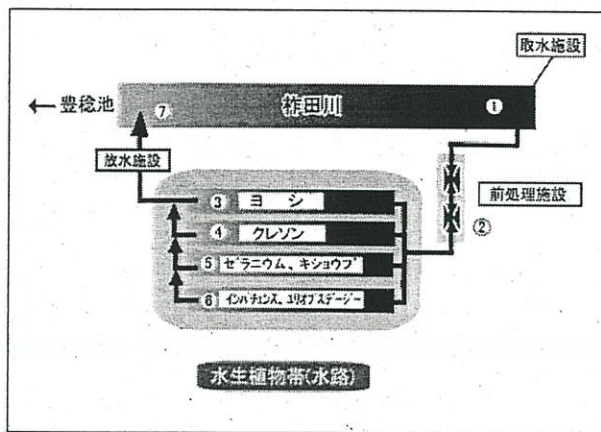


図2 水生植物を活用した浄化システムの仕組み

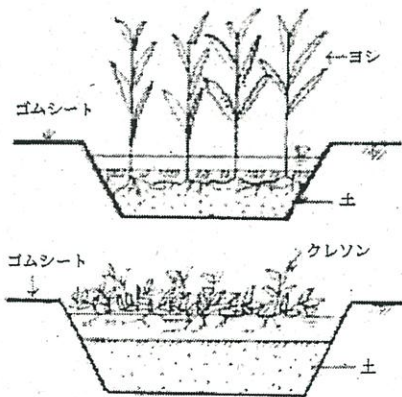


図3 表面流れ方式による湿地型浄化法

置し、水中の有機物質の無機化を促すとともに浮遊物質を除去するため設置された。

植物浄化水路は、長さ20m、幅2m、深さ0.3mの水路に防水シートをはり、ヨシ、クレソン、キショウブは「表面流れ方式による湿地型浄化法」¹⁾の手法により土壌をいれ人工湿地をつくり、表面に取水を流入させ、土壌や植物と接触する過程で水質を浄

化し、表面から処理水を排出させる方式を採用した。(図3)

インパチェンス、ゼラニウム、ユリオプスデージーは「水耕栽培法」²⁻³⁾の手法により、植物を植えた浮上床(0.9m四方の発泡スチロールパレット)を水路上に浮かべる方式を採用した。パレットは15cm間隔で直径3cmの穴を開け、植物固定のために4~5cm角のウレタンを用いた。強風時の飛散防止として、各浮上床を連結して畦にひもで固定した。(図4)

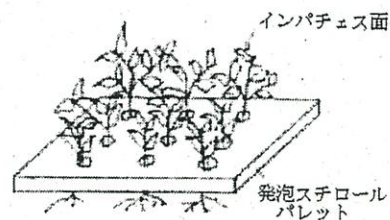


図4 水耕栽培法

III 実験方法

1 実験期間

平成13年度末に施設が完成し浄化システムが稼動してから、前駆栽培期間をおき、平成14年5月30日を初回とし、毎月1回の頻度で水質調査を実施している。本報は約1年間の調査結果を解析したものである。

2 実験方法

豊稔池の流入河川水約60m³/日程度を図2の浄化施設に導入し、7地点において水質調査した。流入

河川水の水量測定、植物の成長測定等は維持管理業者に委託して調査した。また、時期に応じて、植物体の窒素・りん含有量を測定し、吸収量をもとに物質収支の算定を試みた。

各植物の水質浄化能は、窒素・りんの「除去率」と「吸収速度」を求め、比較評価した。

除去率(%) = (流入濃度 - 流出濃度) / 流入濃度 × 100

吸収速度(g/m²/日) = (流入濃度 - 流出濃度)(mg/l) × 流量(m³/日) ÷ 植物帯面積(m²)

(1) 水質調査箇所

7 地点(図2参照)

河川水流入水

接触酸化槽処理水

植物浄化水路(ヨシ)流出水

植物浄化水路(クレソン)流出水

植物浄化水路(ゼラニウム・キシウブ)流出水

植物浄化水路(インパチェンス・ユリオプスデージー)流出水

浄化実験施設処理水

(2) 水質調査

月1回の頻度で12項目(pH, EC, DO, BOD, COD, SS, T-N, T-P, NO₃-N, NO₂-N, NH₄-N, PO₄-P)をJIS K 0102により測定した。

(3) 水量測定

週1回の頻度で、流入量と植物浄化水路4箇所に分流する地点に三角堰を設け水深を計測し換算して流量測定、放流量はバケツ法で測定した。

(4) 植物生長測定

植物帯を10等分し、1等分毎の代表植物体の草丈を測定した⁴⁾。週1回の頻度で実施し、各植物帯とも調査開始時に枯れ株を補植し、正常な状態で測定した。

(5) 植物体成分分析

収穫期等必要に応じて、植物種毎に生体重を計測し、110℃で乾燥して乾物重を計るとともに、乾物あたりの窒素・りんの含有量を作物分析法委員会編「栄養診断のための栽培植物分析測定法」⁵⁾により測定した。

3 供試植物

水質浄化実験に用いた植物の特徴を世代時間、生活型、利用型別に表1に示す。

表1 試供植物の特徴

植 物 名	科	特 徴
ヨシ	イネ科	多年草の抽水植物, 野草
クレソン(オランダガラシ)	アブラナ科	多年草の抽水植物, 野菜
インパチェンス	ツリフネソウ科	一年草の陸上植物, 花卉
ゼラニウム	フウロソウ科	多年草の陸上植物, 花卉
キシウブ	アヤメ科	多年草の抽水植物, 花卉
ユリオプスデージー	キク科	多年草の陸上植物, 花卉

豊稔池流入水系の水質

豊稔池に流入する水系の水質汚濁の実態を把握するため、平成11年度から図1の調査地点(st1~st7)で季節毎に年4回水質調査を実施した。

図5に3年間の豊稔池流域の窒素濃度の年平均値の推移を、図6にりん濃度の推移を示す。測定地点別水質変化は、毎年ほぼ同等で推移しており、最上流部の唐谷堰(st1)では清澄であるが、豊稔池流入前の法泉寺前(st3)でやや汚濁が進み、CODで2.7~3.0mg/l、T-Nは2.2~2.3mg/l、T-Pは0.12~0.15mg/lであった。豊稔池では表層(st5)でCODが4.6~5.2mg/l、T-Nは1.0~1.5mg/l、T-Pは0.040~0.046mg/lを示し、底層(st6)でCODが6.8~8.6mg/l、T-Nは2.0~2.9mg/l、T-Pは0.14~0.23mg/lと窒素・りんの蓄積の進行により内部生産が増大し有機物が生産される構図が推定された。

平成11年度から平成13年度の豊稔池水系の底質調査結果を表2に示すが、T-Nは2.6~2.9mg/g・dry、T-Pは0.48~0.78mg/g・dryを検出、強熱減量は9.0~10%、CODが45~56mg/g・dryと底質の富栄養化の進行が見られた。硫化物が0.33~0.39mg/g・dry検出され底質は還元状態で貧酸素状態と推定された。

以上から上流域の窒素・りんの過剰供給によって、豊稔池が富栄養の湖沼⁶⁾に推移していく様子が伺えた。この遷移⁶⁾をくいとめるには池に流入する窒素・りんの汚濁負荷の低減が重要な課題と考えられる。

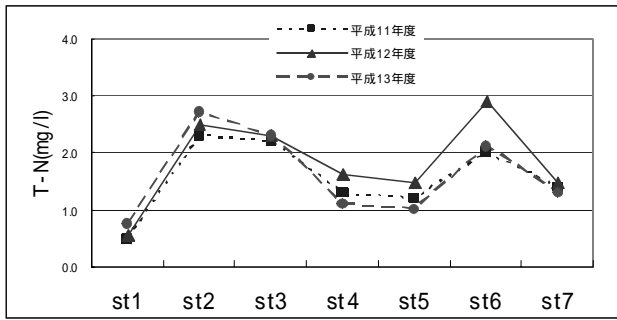


図5 豊稔池流域の窒素濃度

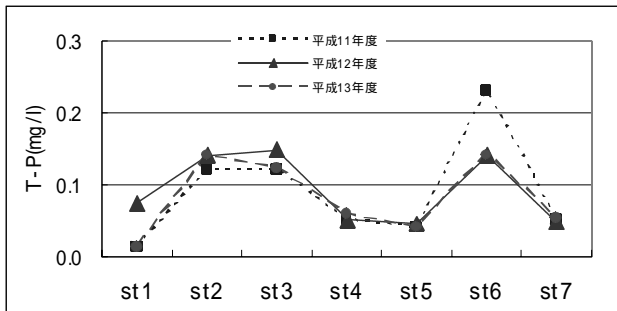


図6 豊稔池流域のりん濃度

表2 豊稔池流域の底質調査結果

水域	年度	強熱減量 (%)	COD (mg/g·dry)	T-N (mg/g·dry)	T-P (mg/g·dry)	硫化物 (mg/g·dry)
唐谷堰	11	2.3	<2	0.09	0.15	<0.05
	12	2.4	<2	<0.05	0.19	<0.05
	13	3.6	8.2	0.31	0.20	<0.01
豊稔池	11	9.0	45	2.6	0.48	0.33
	12	9.9	49	2.7	0.81	0.39
	13	11	56	2.9	0.78	0.34

実験結果及び考察

1 供試植物の生育状況

(1) ヨシ

図7に植物草丈の季節変動を示すが、3月植付け後生育状況は良好で5月～8月で約2m以上に成長し、8月～9月にかけ出穂し、11月～12月には地上部が枯死し、根茎で越冬し春先には盛んに新芽が出て再生された。初年は11月に刈り取りしたが、早めに刈り取りする必要がある。夏以降地下部に貯蔵養分を十分蓄える貯蔵養分依存型の植物²⁾なので、窒素・りんを最大限に回収するにはバイオマスが最大になる晩夏に地上部を刈り取りす

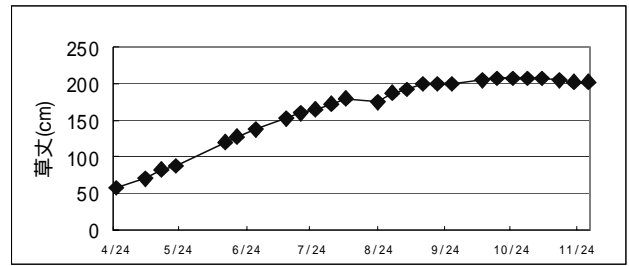


図7 ヨシ草丈の季節変動

べきであるが、翌年の再生芽が少なく生育も貧弱になるとの報告がある⁷⁾。(写真4)

(2) クレソン

図8に植物草丈の季節変動を示しているが、3月植付け後生育状況は良好で1年を通じて繁殖力が旺盛であった。6月過繁茂状態で水路底の茎や葉が腐って再負荷となり水質の悪化を招いたので、花が咲く時期等(5月末、7月末、10月末が目安)に早めに刈り取りをする必要があるとわかった。11月以降冬季は休眠状態であったが、越冬後2月頃から再生芽が多くみられ長期間の栽培が可能であった。繁茂した地下茎が閉塞を起こし、流入水と十分に接触しない現象が生じる報告がある⁸⁾が、地下茎の間引きも必要である。(写真5)

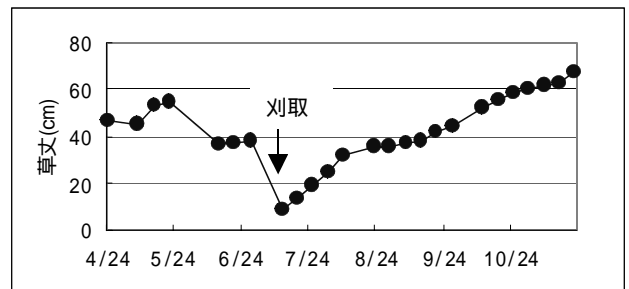


図8 クレソン草丈の季節変動

(3) インパチエンス

3月末40m²の水路に850株植付けた。図9に植物草丈の季節変動を示すが、生育状況は良好で4月～7月旺盛に生育、梅雨明け～9月上旬は高温と日焼けのため生育が停滞し、9月中旬以降回復した。8月の一時期を除き順調に開花し多くの花を咲かせ続けた。6月～7月過繁茂による生育不良となったので、剪定して風通しをよくした。日よけの設置や、害虫駆除など花卉の水耕栽培には

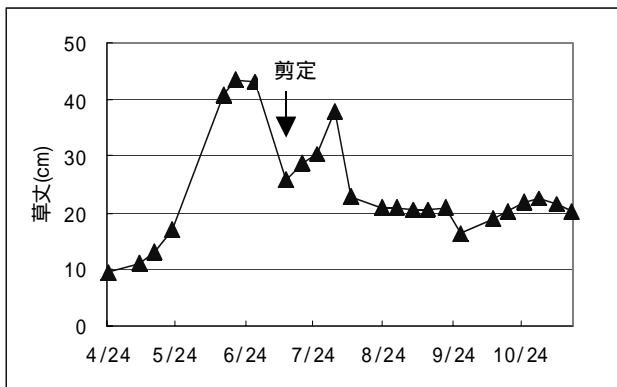


図9 インパチエンス草丈の季節変動

きめ細かな管理が必要だと感じた。1年草のため11月には、冬季の植物への植替えが必要である。

(写真6)

(4) ゼラニウム

3月末40m²の水路に850株植付けが、当初から生育状況が悪く、枯れ株が次第に増加し、7月に殆ど枯れたので撤去した。

(5) キショウブ

ゼラニウムを撤去した後、11月に10cm程度の苗を560株、40m²の水路に植付けたが、冬季は休眠状態で成長は無かった。4月頃から急激に生育し、6月開花時には約150cmの草丈に生育した。株も増殖が良好であった。

(6) ユリオブスデージー

インパチエンスの刈取り後冬季の代替植物として、11月植付けたが、2月降霜により殆ど枯れたので撤去した。

2 植物の浄化能の調査

(1) 天候等

豊稔池は海拔約200m位の山間部に位置しているので、平均気温は高松地方気象台の平年値と比べると約2℃低く、降水量は90%、日照時間は80%とやや低い気象概況であった⁹⁾。台風の影響もなく大きな気象災害のない年であったが、浄化施設の設置場所が山に囲まれた山間から開けた池に注ぎ込む河川の岸に位置するので強風が吹きパレットが飛ばされる事故が発生した。飛散防止として、パレットに農業用ネットとひもで被覆した。

(2) 流量、滞留時間

浄化施設の流入水量と各植物水路の滞留時間を図10に示す。柞田川の川床に揚水ポンプを設置し、吐出槽から接触酸化槽に流入する構造になっている。流量は平成15年度に完成予定の農業集落排水施設の排水を処理することを想定して、その最大排水量である60m³を目途としたが、水温上昇防止のため夏場は増やした。

ヨシの滞留時間は平均5.6時間で2.8~9.9時間の変動であった。クレソンは平均6.6時間で3.9~10時間の変動であった。インパチエンスは平均11時間で8.3~19時間の変動であった。最適滞留時間の確認は今後の課題である。

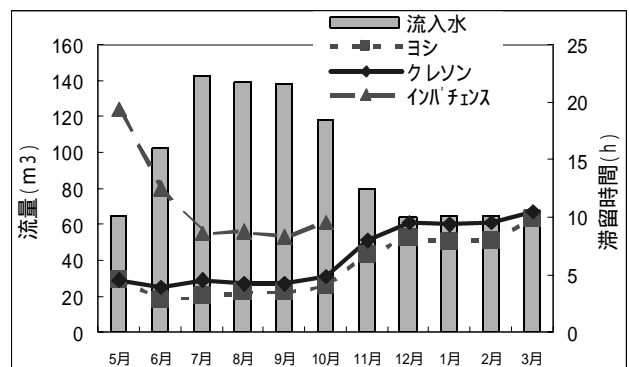


図10 流入水量及び各植物水路の滞留時間

(3) 窒素の除去効果

図11に流入水の接触酸化槽後の窒素濃度の季節変動を示す。窒素濃度は1.4~3.4(年間平均2.5)mg/lで、夏季が低く、冬春季が高く推移していた。

図12に各植物の窒素除去率の季節変動を示す。クレソンは7~73(年間平均33)%の除去率で一番高い除去効果が認められた。6月に過繁茂による水質悪化を招いたが、それ以降順調に生育し、夏季で38%、冬季でも18%の除去率を示した。次いでインパチエンスが7~78(夏秋平均31)%の除去効果が認められた。5~7月の除去効果が高く50%を超えていたが、8~10月は低下し10%の除去率であった。ヨシは最大38(年間平均10)%の除去率で、5~8月は好調であったが、それ以降は低調で11月はマイナスであった。これら植物による水質浄化実験施設全体としては、年間平均21%、5~6月は約40%の除去効果が認められた。

図13に除去率と流入水量から求めた単位面積当

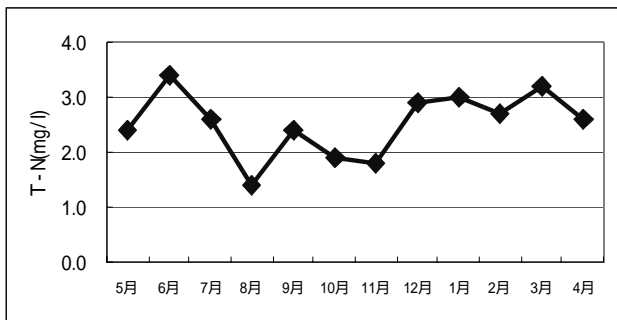


図11 流入水の接触酸化槽後の窒素濃度

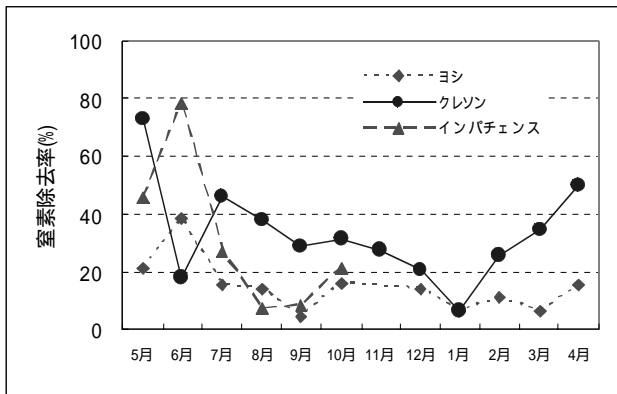


図12 各植物の窒素除去率

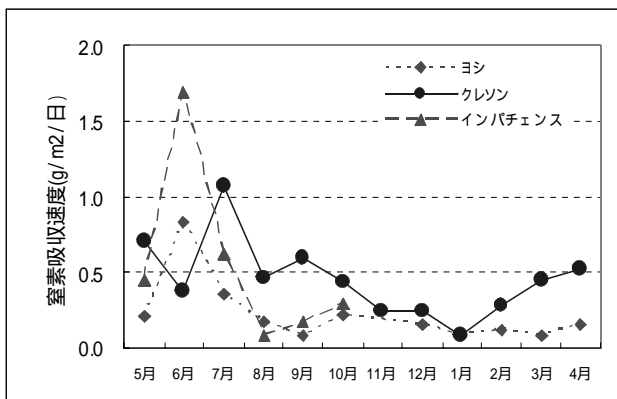


図13 各植物の窒素吸収速度

たりの吸収速度を示す。年間平均で比較するとインパチエンスが最も高く0.09~1.7(平均0.55)g/m²/日, 次いでクレソン0.08~1.1(年間平均0.46)g/m²/日, ヨシは-0.35~0.83(年間平均0.18)g/m²/日であり, 各植物が河川水の窒素を効率良く吸収することが確認できた。同程度の窒素濃度の浄化実験では, 茨城の溜池で流入水の窒素濃度が1.6~4.3g/m³でクレソンの吸収速度0.18~0.33g/m²/日の報告¹⁰⁾と比較しても評価できる結果であった。

クレソン以外の植物は効率良く窒素を吸収する

のは5~8月がピークであり, 10月以降春になるまで効率が低下するので, 低温時期での成長可能な植物の選定が今後の課題である。

(4) りんの除去効果

図14に流入水の接触酸化槽後のりん濃度の季節変動を示す。りん濃度は0.049~0.36(年間平均0.18)mg/lで窒素に比べると変動が大きく, 夏季(6~8月)が高く, 冬季が低かった。

図15に各植物のりん除去率を示すが, クレソンが最も高く最高58%で年間平均21%であった。ただし6月には過繁茂によるりんの再負荷で流入量の2倍量の溶出があったのでこの値は除いて計算した。6月の刈取後は順調に生育したので, 5月と11月に増大する2つの山が認められた。9月以降, 流入水のりん濃度が低下したが, りんの効率良い吸収が持続されたため高い除去率を示す結果となったと思われる。冬季はりんの除去効果は無くマイナスの除去率を示した。次にインパチエンスが高く, 最高33%で平均20%の除去率であった。ヨシはりんの除去能力は殆ど無かった。水質浄化実験施設全体としては, 春夏季で20%あったが, 年間平均では9%の除去率であった。

図16に各植物のりん吸収速度を示す。クレソンが一番良好で最高0.063(年間平均0.024)g/m²/日であり(6月の値は除いて計算した。), 次いでインパチエンスが最高0.058(平均0.032)g/m²/日であった。

前出の茨城の溜池の実験では, りん濃度が0.01~1.11mg/lの流入水をクレソンで浄化した吸収速度0.024g/m²/日の報告¹⁰⁾と比較すると, 窒素の結果同様評価のできる内容であった。

(5) 植物の窒素・りんの吸収量と収支

各植物の生産量と窒素・りんの吸収量を, 夏季と冬季に植物のバイオマスから現存量を推定し, 実際の植物の吸収量を測定した。クレソン・ヨシは水路の上流と下流でそれぞれ2箇所, 50cm×50cm四方の調査区の植物を採取し, 110℃で乾燥し乾物量を求め, さらに乾物の成分含有率を測定し, 単位面積当たりの窒素・りんの吸収量(g/m²)を得た。インパチエンスは水路の上流と下流の2箇所ですべて10株採取して分析した。

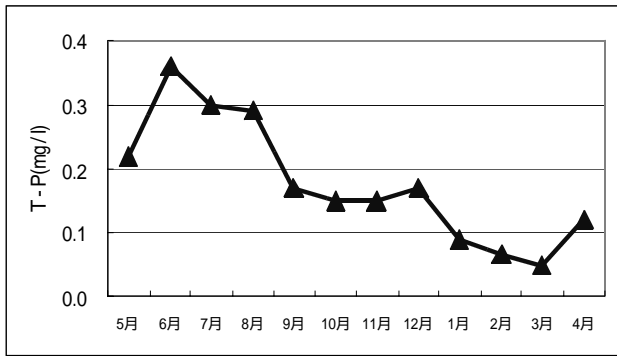


図14 流入水の接触酸化槽後のりん濃度

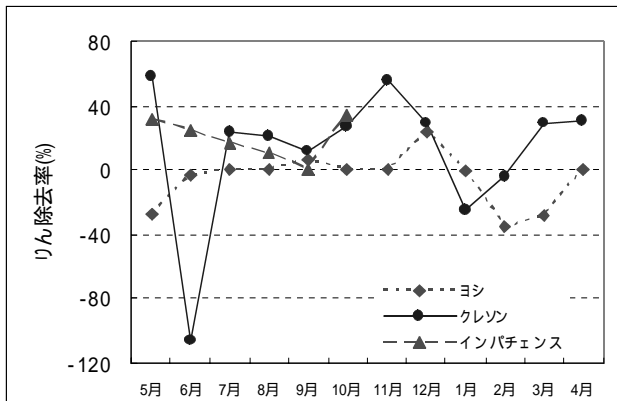


図15 各植物のりん除去率

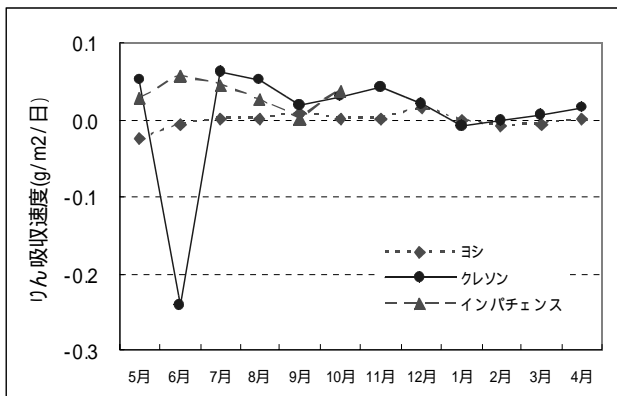


図16 各植物のりん吸収速度

図17に乾物量を、図18に窒素吸収量を、図19にりん吸収量の季節変動を示す。クレソンは春から冬にかけて一定量の乾物生産量を維持して、窒素・りんとも効果的に吸収していた。特に春夏季に窒素・りんを多く吸収する傾向が見られた。インパチェンスは盛夏に高温と日焼けによる生育不良の影響で生産量の低下を招き窒素・りん共に吸収量が低下したが、その後は順調に吸収していた。ヨシは夏季の生産量が非常に多いことがこの図でも裏付けられた。ヨシは水質からはりんの除去効果は認められなかったが、植物体には0.011～

0.067g/m²/日の吸収量があった。土壌中のりんを吸収していたのではないかと推測される。尾崎氏等の報告¹¹⁾を参考に図20に植物浄化水路における窒素・りんの収支を示す。クレソンの水路では3月～7月の間、窒素1.61g/m²/日・りん0.131g/m²/日の流入があり、窒素0.69g/m²/日・りん0.035g/m²/日の流出があったので、窒素0.92g/m²/日・りん0.096g/m²/日が除去され、植物に吸収されたのは窒素0.35g/m²/日・りん0.051g/m²/日であった。除去量と吸収量の差は植物による浄化だけでなく、水中の根や茎に付着する菌類や藻類、それを食べる原生動物や後生動物などの働き²⁾¹²⁾

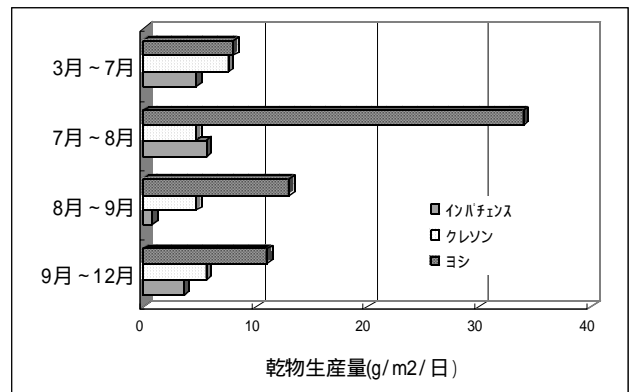


図17 乾物量の季節変動

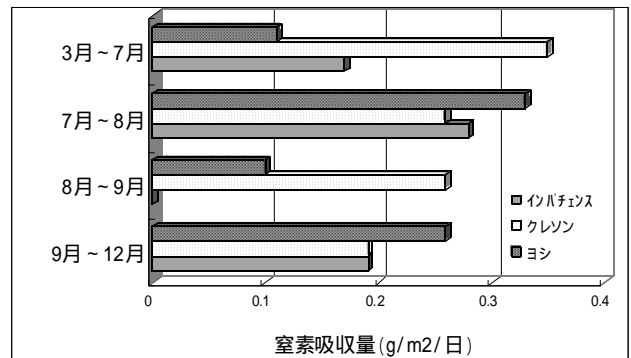


図18 窒素吸収量の季節変動

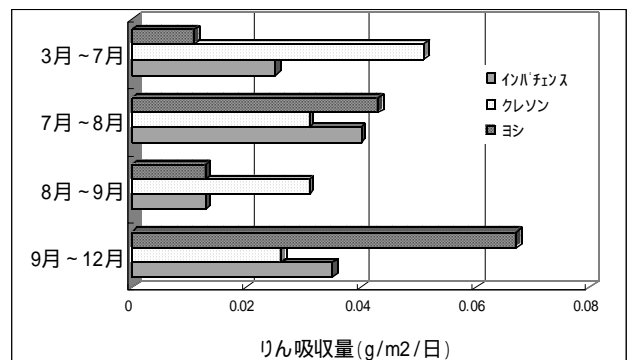


図19 りん吸収量の季節変動

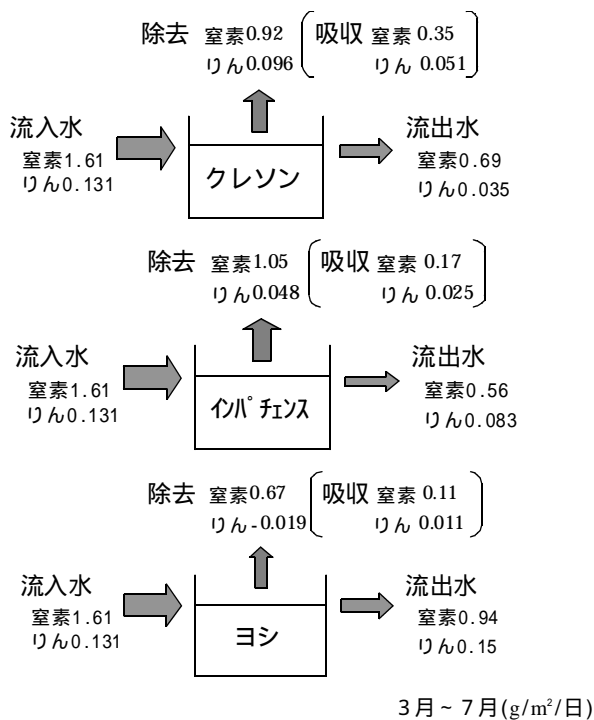


図20 植物浄化水路における窒素・りん收支

が水質に影響して、相乗の浄化効果をもたらしていると考えられる。

(6) 豊稔池流入水の浄化効果

図21に平成14年度の流域調査結果を示す。水生植物を活用した水質浄化施設が稼動して1年目の効果として、豊稔池の流入口(st4)で窒素濃度及びりん濃度が減少傾向を示した。

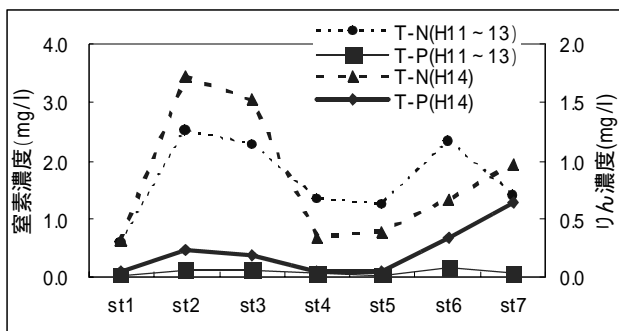


図21 豊稔池流域の窒素・りん濃度

(7) 今後の課題

今回、実規模プラントによる浄化実験が実施できたが、定量的な研究結果が得られる機会は以外に少なく¹¹⁾長期的な調査研究の積み重ねの必要性を強く感じた。

植物を活用した水質浄化システムの他地域への

導入にあたって留意すべき課題を整理した。

収穫バイオマスの有効利用法の開発。

浄化能力の季節変動に対応できる植物の検索及び組合せ利用や冬季、簡易ビニールハウス利用等による浄化能力の向上。

各地域の気候や風土にあった植物を活用した水質浄化システムの開発。

植栽によって親水性を高め、潤いのある水辺景観の創造に活用。

植物の浄化能力を効率良く維持するための管理マニュアルの作成。

まとめ

「水生植物を活用した水質浄化実験施設」において、1年間を通じて豊稔池に流入する河川水の浄化の実証実験を行った結果は次のとおりであった。

1. クレソンは年間を通じて窒素・りん共に除去効果が高い植物であり、窒素吸収速度は年間平均0.46g/m²/日、りん吸収速度は年間平均0.024g/m²/日であった。
2. インパチエンスは春から秋まで多くの花を咲かす窒素・りん共に除去効果が高い植物であり、窒素吸収速度は夏秋平均0.55g/m²/日、りん吸収速度は夏秋平均0.032g/m²/日であった。冬季に代替植物との植替えが必要である。
3. ヨシは年間を通じて窒素の除去効果があり、窒素吸収速度は年間平均0.18g/m²/日であったが、りんの除去効果は認められなかった。
4. 植物浄化水路における窒素・りんの收支から、水質浄化は植物の吸収によるものだけでなく、付着する菌類や藻類、小動物の働きが浄化効果をより高めていた。
5. 水生植物を活用した水質浄化施設が順調に稼動して1年目の効果として、豊稔池の流入口で窒素濃度及びりん濃度が減少傾向を示した。

植物を活用した水質浄化は、自然の浄化機能を利用した省エネルギーの浄化法であり、施設自体が親水性空間として身近な水環境へのふれあいの場にもなり、今後実用化が期待される手法である。

参考文献

- 1) 細見正明：ヨシ人口湿地による水質浄化法，用水と排水，36(1)，40 - 41，(1994)
- 2) 神奈川県環境科学センター企画調整部 新田：草花を用いた水質浄化ハンドブック，24 - 38，神奈川県環境科学センター，(1994)
- 3) 平野 浩二：花卉の水耕栽培による団地浄化槽2次処理水中の栄養塩除去，資源環境対策，31(12)，49 - 50，(1995)
- 4) 沼田 真：植物生態の観察と研究，28，東海大学出版会，(1978)
- 5) 作物分析法委員会：栄養診断のための栽培植物分析測定法，64 - 72，(株)養賢堂，(1978)
- 6) (株)日本水質汚濁研究協会：湖沼環境調査指針，247，公害対策技術同友会，(1982)
- 7) 浜端善雄：水質浄化と植物，171 - 182，ソフトサイエンス社，(1996)
- 8) 大矢昌弘，遠田和雄：塩性植物と接触ばっ気の組み合わせによる水質浄化法の検討(第2報)，横浜公害研究所報告，14，121 - 135，(1990)
- 9) 高松地方気象台：香川県の気象，(2002)
- 10) 小山田勉：各植物の水面における生育適応性と水質浄化，昭和62年度研究成果情報(関東，東海農業) 149 - 150，(1987)
- 11) 尾崎保夫，阿部 薫：植物を活用した資源循環型水質浄化技術の課題と展望 - 潤いのあるの農村景観を目指して - ，用水と排水，35(9)，771 - 782，(1993)
- 12) 田村良三，若槻一晴，北嶋永一，劉 元海：植物を利用した水質浄化システム(第3報) - 年間を通しての水質浄化 - ，新潟県保健環境科学研究所年報，16，76 - 81，(2001)

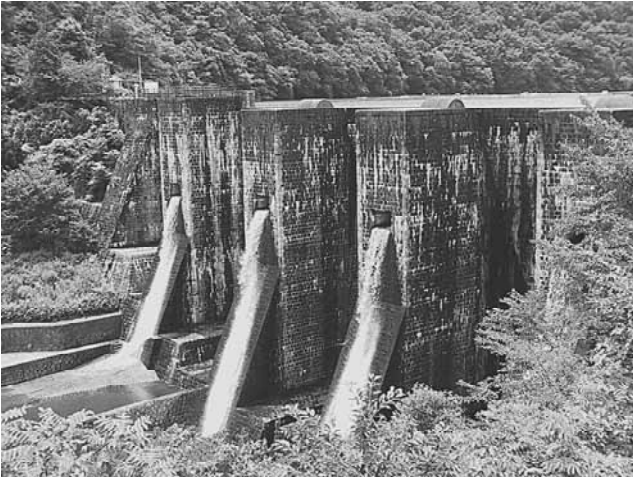


写真1 豊稔池



写真2 流入河水(柞田川)ポンプ設置部



写真3 水質浄化施設



写真4 ヨシ水路



写真5 クレソン水路



写真6 インパチェンス水路