

休耕田を利用した農業集落排水処理水の 植生浄化能力に関する実験的検討

PROMOTION OF WATER QUALITY CONSERVATION BY PHYTOREMEDIATION IN THE PADDY FIELD

矢島 啓¹・岡 真理子²

Hiroshi YAJIMA and Mariko OKA

¹正会員 博(工) 鳥取大学助教授 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

²非会員 博(理) 鳥取大学助手 農学部生物資源環境学科 (〒680-8573 鳥取市湖山町南4-101)

The wastewater treatment systems in rural areas are often constructed in the upper region of rivers. However, the nutrients remain at high levels even in the water treated by the system. Phytoremediation is a purification method which use the function of plants, and is advantageous in having small impacts on the environment and in having low maintenance costs. To clarify the efficiency of the phytoremediation technique, an experiment which utilized paddy fields has been conducted in the town of Chizu, located in the origin part of River Sendai, for more than four years. Although the removal rate was different in every year, nitrogen and phosphorus were removed by the method. Especially, the growing of lesser bullrush (*Typha angustifolia* L.) was highly effective in the removal of nutrients until June, because the plant biomass production was most vigorous and the plant absorbed large amounts of nutrients. Moreover, the amount of nutrients discharged into the river decreased because the outflow from the field became half the volume of the inflow into the paddy field by the permeation of water into the soil.

Key Words : Paddy field, nutrients, phytoremediation, rural sewage system, water quality

1. はじめに

近年, 閉鎖性水域をはじめ富栄養化した水体における栄養塩除去のため, 水生植物等の自然浄化機能を活用した浄化法が注目されるようになってきている。この植物を用いた浄化法は, 河川・湖沼の水質の悪化に対して生物が本来持つ機能を生かした方法であり, 有機物をはじめ, 窒素・リン等の栄養塩類を除去することができ, 環境へ与える負荷が少なく, 維持管理の負担が少ない浄化法である。また, 資源循環型の水質浄化システムであるといえ, 自然のもつ浄化機能の活用による, 潤いのある水辺景観の創出にも役立つ。そのため, 農村地域における水質浄化法として期待されている。

現在, 国内においても植生浄化に関する室内実験や, 実用化を目指した様々な検討が行われており, 実験施設の建設が進められてきている¹⁾。鳥取県では, 県東部の主流河川である1級河川千代川(流域面積: 1192 km², 幹川流路延長: 52 km)の源流部に位置する八頭郡智頭町芦津において, 平成13年度から農業集落排水の3次処理として植物による水質浄化実験を行っている²⁾。本論文で

は, 平成15年度以降に得られた研究成果を中心に, 休耕田を利用した農業集落排水処理水の植生浄化能力について述べる。

2. 植生浄化実験の概要

(1) 実験初年度(平成13年度)の概要

半反の田を幅約3 m×4本の水路に整形し, 平成13年6月24日に, ハス, スイレン, カキツバタ, キショウブ, ショウブ, ガマの6種の植物各150株を移植した。植栽面積は約300 m², 処理水量は約 92 m³/日, 滞留時間は約11時間であった。この初年度において, 処理施設からの放流時と実験池の出口における各栄養塩の濃度から平均の除去率を算定すると, 無機態窒素(Inorg-N)は-16%, 全窒素(T-N)は-10%, リン酸態リン(P₀₄-P)は-4%, 全リン(T-P)は8%となっており, 必ずしも大きな効果を得ることはできなかった。この原因として, 休耕田を耕したことにより, 土壌から多量の栄養塩が溶出していることが考えられた。

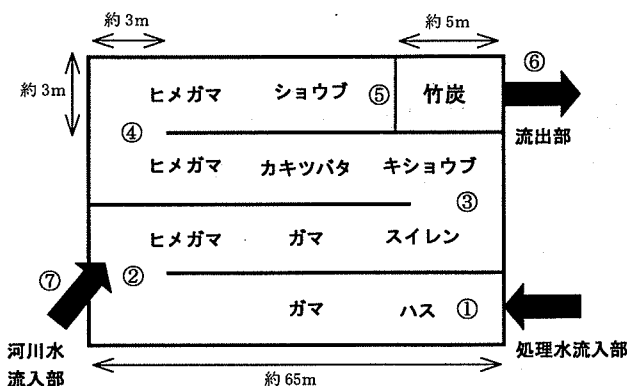


図-1 実験池の概要



写真-1 実験池の様子

(2) 実験2年目（平成14年度）の概要³⁾

実験池を一反に拡張し、実験初年度に問題となった夏季における実験池内の水温上昇を抑えるため、6月から8月の間は近接している川より河川水を流入させた。植栽面積は約850 m²であり、拡張した半反にヒメガマを植えた（図-1、写真-1）。また、多孔質で水質浄化効果があるといわれている地元産の竹炭150 kgを実験池の出口付近5 m程度に投入した。平成14年度の滞留時間は約39時間（河川水流入期間は約26時間）であった。

平成14年度の河川水の影響を考慮した実験池全体の除去率を算定した結果、平均でInorg-Nが53.0%、T-Nが34.0%、PO₄-Pが16.6%、T-Pが4.7%となっており、前年度の結果と異なり、高い栄養塩の除去率となった。

(3) 実験3年目（平成15年度）以降の概要

前年度の実験結果から、植物の成長とともに水面への日射は遮られ、夏季の水温上昇は問題とならないことが分かったため、平成15年度以降は、水温の低下を目的とした河川水の流入を行わないことにした。また、平成13年度に問題となった植物の虫害は、平成14年度に対策を行わなかったが問題が生じなかったため、平成15年度以降についても対策はとらなかった。

植栽植物の中で、ヒメガマは、前年度12月に一度刈り取っているが、それ以外の管理は行っていない。

3. 植生浄化実験における調査内容と調査結果

(1) 実験3年目（平成15年度）の調査概要

5月16日から12月18日の間、月に約2回、晴天が2～3日続いた翌日に現地調査を次のような形で計13回行った。

a) 水理調査

流量の測定（処理水流入部、流出部で実測）、水深の測定（図-1に示す①～⑤の5箇所）を行った。

b) 水質調査

基本水質項目として、図-1の①～⑥において、水温・pH及び溶存酸素（DO）の測定を行った。また、水温に関

しては、流入部、竹炭ゾーン前（以下、竹炭前）、流出部の3箇所に水温計を設置し、1時間ごとに測定を行った。さらに、現地調査時に、流入部・竹炭前・流出部の3箇所で採水し、T-N・アンモニア態窒素（NH₄-N）・亜硝酸態窒素（NO₂-N）・硝酸態窒素（NO₃-N）・T-P・PO₄-Pについて、ハック社製DR2010を用いて水質分析を行った。また、無機栄養塩のNH₄-N・NO₂-N・NO₃-N・PO₄-Pについては、0.45 μmのメンフィルターで濾過した試料を用いて測定を行った。

c) 土壌調査

図-1の①・③・⑤の3箇所において、水路底部の土壌の採取を行った。土壌は底泥の表層から深さ5cm程度までの部分を角型スコップで採取し、170℃で24時間炉乾燥後分解器にかけ、T-N・T-Pについて分析を行った。間隙水については、採取した土壌を30分間、遠心分離機にかけて間隙水を分離させ、各栄養塩について水質分析を行った。測定方法は水質分析と同様である。

d) 植物調査

用いた植物の中で一番バイオマスの大きいヒメガマの成長測定及び元素分析を行った。月に2回平均的な大きさのヒメガマを5個体刈り取り、草丈を測定し、70℃で一晩乾燥後、乾燥重量を測定した。さらに、窒素（N）・リン（P）の含有量を測定した。Nは硫酸分解後、ネスラー法により測定した。Pは、硫酸分解後、バナドモリブデン酸法により測定した。

(2) 水量に関する調査結果

現地観測において測定した流入部での流量は時間変動が大きいため、役場で管理している処理施設への日流入量を実験池への流入量に等しいと考えた。観測を行った日の平均流量は1.11 l/sであり、実測による実験池からの流出量は0.56 l/sであった。この流量の減少については、4章において検討する。また、図-1の①～⑤における全地点の観測期間の平均水深は15.5 cmであり、滞留時間＝処理施設からの放流量（平成15年度実験期間中の平均で約95.8 m³/日）／平均水深／実験池面積として求めた滞留時間は、約33時間となった。

(3) 植物に関する調査結果

実験池においては、ハス、スイレン、カキツバタが季節に応じ、美しい花をさかせた。ヒメガマを含め全体的に密集した繁茂状態であり、初期に移植した株数よりかなり増加していた。ここで、注目したヒメガマの高さと1個体あたりの乾燥重量の変化を図-2に示す。横軸は1月1日からの経過日数であるユリウス日で表した。第1回目の調査日第137日(5月16日)には、高さは150 cmに達しており、その後8月まで生長がみられた。全期間を通じ、1 m²あたり約60個体とかなり密集した状態であった。1個体あたりの最大の乾燥重量は、第167日(6月16日)の128.2 gであった。6月以降においてもヒメガマの高さは200 cm以上あったが、乾燥重量でみた場合、6月16日を最大に、その後急激に減少し、第309日(11月5日)には11 gと大きく減少していた。

また、N・P含有率を図-3に示す。一般にヒメガマなどの抽水植物は、N・P含有率は生長初期に最も高く、その後、急速に減少する⁴⁾。この図においてもその傾向がみられた。さらに、図中に●で示した点を除いたデータを用いて、ユリウス日と含有率との関係を示す相関式を作成し示した。1 m²あたりの乾燥重量を求めると、最大生長期には8 kgのバイオマスがあることになる。また、求めたN・P含有率の相関式を用いて1 m²あたりのN・Pの含有量を求めたものを図-4に示す。第167日には地上部だけで、1 m²あたり208 gのNが、11.2 gのPが存在している。その後は、生長時(春季)に地上部に蓄えた栄養分を老化期(秋季)に地下部に輸送し蓄えることにより減少していると考えられる。

(4) 実験池における水温・pH・DOに関する調査結果

詳細なデータはここでは示さないが、現地観測時の測定結果、各観測ポイントの水温はほぼ同じ水温であった。また、水温の連続測定結果から、流入部の水温は8月に30℃近くまで上昇する日があったが、竹炭前や流出部においては、植物に覆われているため、年間を通じ最大でも25℃程度までの水温上昇にとどまっていることが分かった。また、実験池の各観測ポイントのpHは、5.83～7.08の間であり、どの観測日も各ポイントのpHは同程度であった。さらに、実験池内の各観測ポイントのDOは、0.48～12.64 mg/lの間であったが、観測を行ったほとんどの日において2 mg/l以下の低溶存酸素状態が発生していた。

以上より、本実験池の水温は、今回実験に用いた植物の生育にとって好ましく、pHについても、一般に植物の養分吸収に影響が表れるのは、pH4以下あるいはpH9以上の場合であるといわれていることから⁹⁾、植物の生育条件として問題がないことが示された。また、DOの測定結果から、実験池内において低溶存酸素状態が発生していたが、ヒメガマのような抽水植物では、根へ酸素を供給する機能を有しているため、これは問題とならず、実験

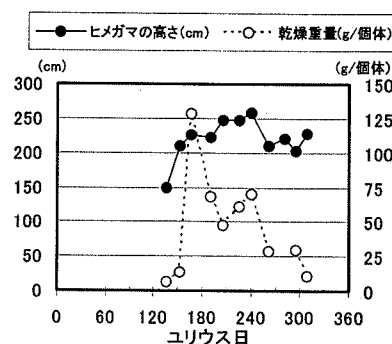


図-2 ヒメガマの高さと乾燥重量の変化

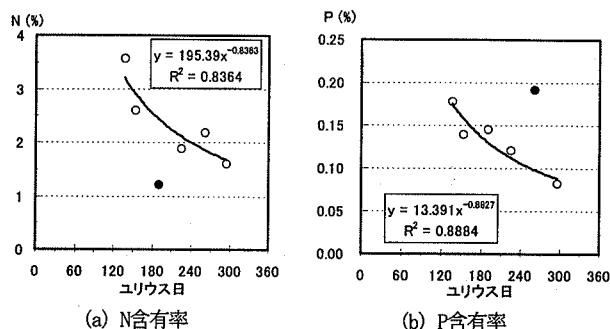


図-3 ヒメガマのN・P含有率

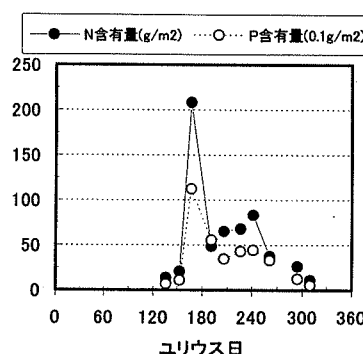


図-4 ヒメガマの単位面積あたりのN・P含有量

に用いた植物はすべて良好に成長していた。

(5) 水質に関する分析結果

a) 窒素に関する栄養塩濃度の推移

窒素に関する栄養塩濃度の変化を図-5に示す。流入部では、全測定日の平均でInorg-NはT-Nの82%を占め、その86%をNH₄-Nが占めていた。NH₄-Nが占めるこの割合は、流出部においてもあまり変化がない。さきに示したように、実験水路内は実験期間を通じて嫌気に近い状態が多いため、窒素についてはNH₄-Nが支配的な状態にあると考えられる。また、流入部と流出部の各濃度を比較すると、ほぼすべての観測日、測定項目につき、流入部よりも流出部の濃度が低くなっていた。ただし、竹炭前と流出部ではほとんど差がないことが多かった。平均値で見ると、Inorg-Nは、流入部17.3 mg/l、竹炭前11.4 mg/l、流出部11.6 mg/lであり、T-Nは、流入部22.0 mg/l、竹炭前14.4 mg/l、流出部15.2 mg/lとなった。

b) リンに関する栄養塩濃度の推移

リンに関する栄養塩濃度の変化を図-6に示す。流入部

では、全測定日の平均で、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は T-P の55%を占めている。この割合は、流出部においても47%とあまり差がない。平均値でみると、 $\text{PO}_4\text{-P}$ については、流入部2.34 mg/l、竹炭前2.11 mg/l、流出部2.21 mg/lとなっていた。 T-P については、流入部5.38 mg/l、竹炭前5.65 mg/l、流出部7.55 mg/lとなっていた。ただし、流入部の T-P が33.3 mg/lと異常に高い6月6日を除いた評価では、流入部5.53 mg/l、竹炭前5.37 mg/l、流出部5.43 mg/lとなっていた。このように、異常値を除けば、 $\text{PO}_4\text{-P}$ と T-P については、流入部から竹炭前においてわずかな濃度の減少があり、逆に、竹炭ゾーン通過後には若干の増加が生じ、流入部と流出部の濃度はほとんど差がみられなかった。

(6) 土壌に関する分析結果

詳細なデータは示さないが、土壌間隙水は、さきにした放流水に関する水質分析結果と同様に、窒素の多くは $\text{NH}_4\text{-N}$ の形で存在していた。平均値でみると、 Inorg-N は、流入部23.6 mg/l、中間部20.1 mg/l、竹炭前21.4 mg/lとなっていた。 T-N は、流入部32.5 mg/l、中間部33.2 mg/l、竹炭前32.3 mg/lとなっていた。このように、土壌間隙水においては、実験池内を流れている水より高濃度となっていた。

リンに関して平均値でみると、 $\text{PO}_4\text{-P}$ については、流入部6.75 mg/l、中間部6.92 mg/l、竹炭前6.06 mg/lとなっていた。 T-P は、流入部16.52 mg/l、中間部13.66 mg/l、竹炭前16.89 mg/lとなっている。窒素と同様に、土壌間隙水中のリン濃度は非常に高濃度となっていた。

データは示していないが、土壌中の栄養塩含有量については、植物の成長時期による違いや季節変化等は見られなかった。

4. 植生浄化能の時間変動に関する検討

(1) 調査の概要

植生浄化能力を評価する場合、植物活動の変化による影響で植生浄化能にも時間変動を生じる可能性がある。また、処理施設からの放流水の水質が一定かという疑問もある。そこで、比較的好天に恵まれ降雨もなかった平成16年9月2日の午前6時から9月3日午後6時までの36時間連続して植生浄化能力の評価調査を行った。

具体的には、現地において風向・風速・気温・湿度の連続測定を行い、3時間おきに、流入部と流出部において流量計測を行った。また、実験池の流入部、中間部、竹炭前の3箇所において、多項目水質計を利用した水温と DO の連続測定を行った。さらに、平成15年度の採水と同様に、3時間おきに、流入部、竹炭前、流出部の3箇所まで採水を行い、水質分析を行った。

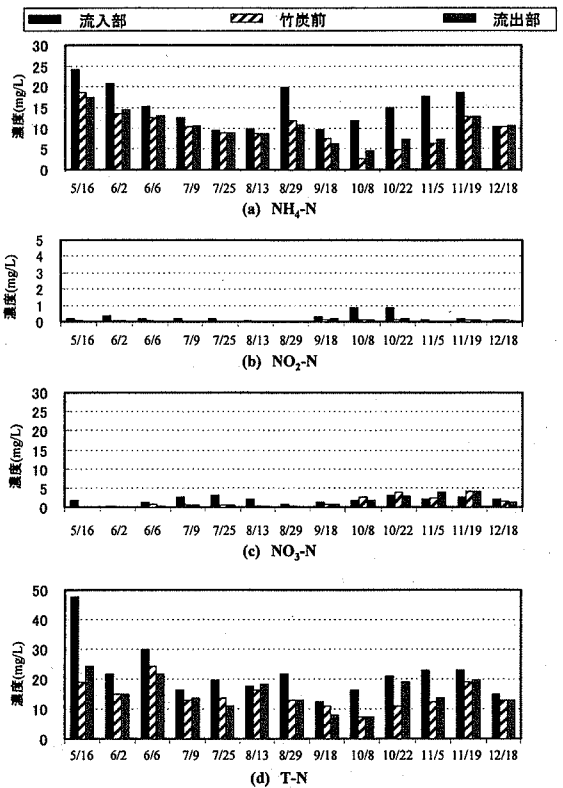


図-5 窒素に関する栄養塩濃度の変化

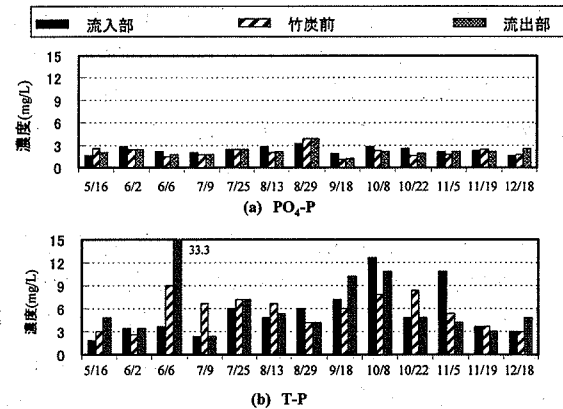


図-6 リンに関する栄養塩濃度の変化

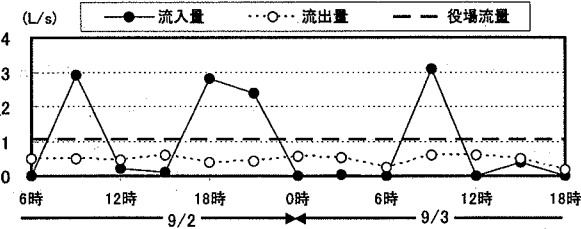


図-7 実験水路における流量の時間変化

(2) 流量の時間変動

実測で得られた流入部・流出部での流量及び処理施設への流入量を図-7に示す。実測の流入部での流量は時間的な変動が大きく、流出部での流量の時間変動は小さかった。流入部での平均流入量は0.92 l/sであり、流出量は0.46 l/sであった。また、9月2日と3日の役場の流

入量データは両日ともほぼ同じ約1.05 l/sであった。よって、役場の流量と実測の流入量は、ほぼ等しいことが分かる。これに対して、実験池からの流出量はその半分程度であり、流入量の半分は浸透と蒸発等で消失していることになる。

観測期間中の風速をみると、最大でも1.5 m/sと微風であり、それほど大きな蒸発はないと考えられる。また、日本の場合、水田での蒸発散量は1日に最大で7 mmであることが多い⁷⁾という観測データと面積が約850 m²であることから蒸発散量を計算すると、蒸発散によって失われる水量は0.069 l/sの流量に相当する。したがって、本実験池における流量の減少の大部分は土壌への浸透と考えられる。

(3) 休耕田における浄化能の時間変動

3時間ごとに得られた流入部・竹炭前・流出部における栄養塩の分析結果を図-8に示す。(a)～(d)に示すように、流入部ではNH₄-Nの形で窒素のほとんどが流入し、流出部まで各窒素の濃度は時間的にほとんど変化していなかった。すなわち、窒素に関しては、休耕田における浄化能の時間的変動は小さいと考えられる。次に、(e)、(f)に示すリンに関する栄養塩の分析結果から、流入部でPO₄-Pは1.5～4.2 mg/l、T-Pは8.4～54.0 mg/lと処理施設からの放流水質は大きく変動しており、特に、有機態リンの変動が大きかった。有機態のリンは、竹炭前・流出部に流れるまでに大きく減少することもあるが、PO₄-Pについては、流入部と竹炭前・流出部で顕著な差はみられず、その浄化能の時間的な変動はあまりみられなかった。

以上、ここで行った連続観測結果からは、植生浄化能が影響している栄養塩濃度の時間変化は認められなかった。このような結果になったのは、流量変化を考慮しない場合、実験池における滞留時間は約33時間、流量が浸透により半減することを考慮すると約50時間と一日以上あるため、どの時間に実験池から流出する水もある程度同様に植物による浄化作用を受けているからだと考えられる。また、さきの分析結果から明らかになったように、実験池内で最も大きなバイオマスとなるヒメガマの成長は6月にピークを迎え、その後バイオマスが減少するため9月には植物による大きな栄養塩の吸収を期待できないこと、実験を開始して3年が経過し、土壌におけるリンを中心とする栄養塩の吸着作用がなくなっていることが影響していると考えられる。

5. 休耕田における栄養塩除去能の検討

(1) 休耕田における栄養塩の除去率

流入部と流出部における栄養塩濃度の変化から、実験池における栄養塩の除去率を求めた。図-9(a)に示す窒素

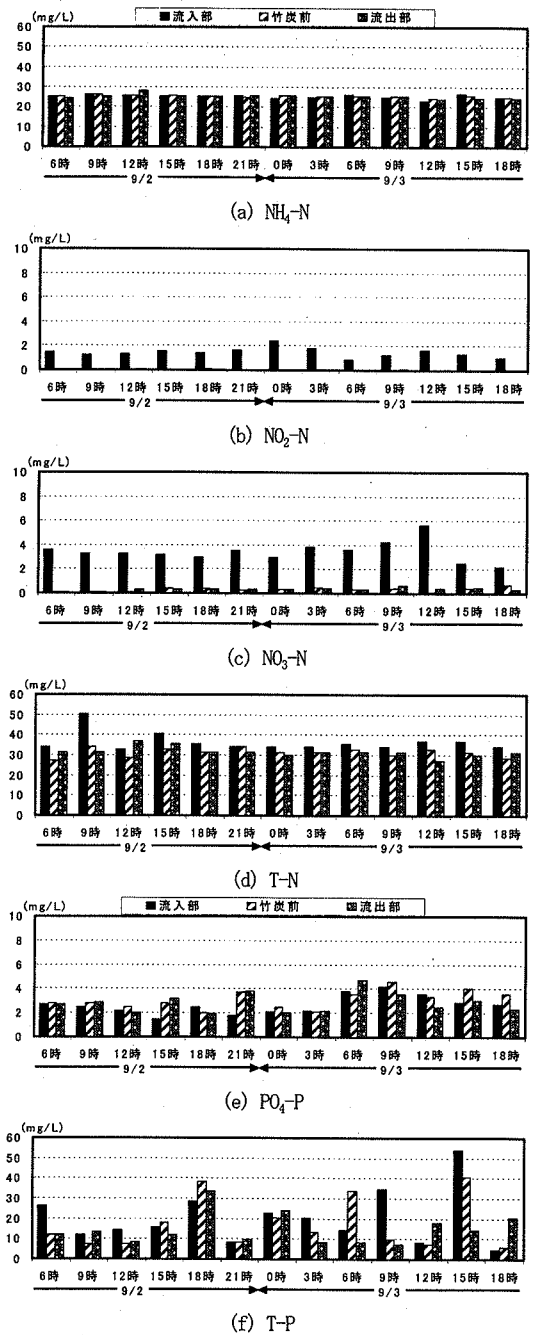


図-8 連続観測における栄養塩濃度の変化

に関しては、8月13日のT-Nを除きすべて正の除去率を示していた。平成15年度の平均除去率は、Inorg-N : 33.2%、T-N : 29.8%であった。窒素に関する除去率は、次に示すリンの除去率に比べて大きく、植物による吸収よりも脱窒による除去効果が大いと考えられる。

図-9(b)に示すリンに関しては、特にT-Pにおいて、マイナスの除去率となることが多くみられた。これは、平成15年度・16年度の結果から明らかなように、有機態リンは、年間を通じた変動だけでなく時間的な変動も大きく、リンに関しては、窒素にはあまり含まれていない有機態の物質が、処理施設からの放流時に高濃度に含まれているのではないかと考えられる。平成15年度の平均除

去率は、 $PO_4\text{-P}$: 8.9%, 極端に大きな負の除去率となる6月16日を除いた平均で $T\text{-P}$: -14.9%であった。

また、さきに述べたように、実験池内における流入流量は、流出時に半分程度に減少している。そこで、流量変化を考慮した負荷量の変化から栄養塩の除去率を求めた。窒素に関する平均の除去率は、 Inorg-N : 66.1%, $T\text{-N}$: 64.9%であった。リンに関する平均の除去率は、 $PO_4\text{-P}$: 52.8%, $T\text{-P}$: 42.6% (6月16日は除く) と大きな除去率となった。

(2) 実験池における栄養塩の除去速度

本実験池における栄養塩の除去速度を求める。窒素に関する平均の除去速度 (単位は $\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$ 。括弧書は、流量変化を考慮しない場合) は Inorg-N : 1.28 (0.64), $T\text{-N}$: 1.60 (0.73)。リンに関する平均の除去速度は、 $PO_4\text{-P}$: 0.15 (0.02), $T\text{-P}$: 0.32 (0.01) (6月16日を除く) であった。ここで、ヒメガマに着目して植物による吸収からみた栄養塩除去の評価を行う。5月16日からバイオマスが最大となった6月16日までの1ヶ月間のヒメガマの全植栽面積約 300m^2 における吸収量を、実験池の植生面積 850m^2 における平均的な吸収量に換算すると、窒素 : $2.2\text{ g}/\text{m}^2/\text{day}$, リン : $0.12\text{ g}/\text{m}^2/\text{day}$ となった。平成15年度の実験池への流入負荷量の平均値は、 $T\text{-N}$: $2.5\text{ g}/\text{m}^2/\text{day}$, $T\text{-P}$: $0.61\text{ g}/\text{m}^2/\text{day}$ である。したがって、ヒメガマの最生長期には、かなりの窒素やリンを除去していることになる。しかしながら、図-9に示した除去率は、ヒメガマの成長期においても、他の時期と比較して、特には高くなっていない。これは、ヒメガマの成長期には必ずしも水中の栄養塩を利用するのではなく、土壤に浸透・吸着している窒素やリンを利用してからであると考えられる。

6. おわりに

本論文では、鳥取県八頭郡智頭町芦津において休耕田を利用して行っている農業集落排水処理水の植生浄化実験に関し、その植生浄化能力の実験的検討を行った。

本実験施設における浄化効果は、実験開始当初、土壤への吸着による効果が大きかったが、現在は、その効果はほとんど無いと考えられる。しかし、周辺河川に与える栄養塩負荷量という観点からは、処理場からの放流量の約半分が土壤へ浸透しており、大きな浄化効果を有していた。また、植物による栄養塩の除去については、ヒメガマのバイオマスが一番大きく、6月頃までの生長期の除去効果は大きい。しかしながらヒメガマは、土壤間隙水に含まれる栄養塩をかなりの割合で吸収していると考えられるため、必ずしもバイオマスの増加は、処理水の栄養塩濃度の減少にはつながらなかった。

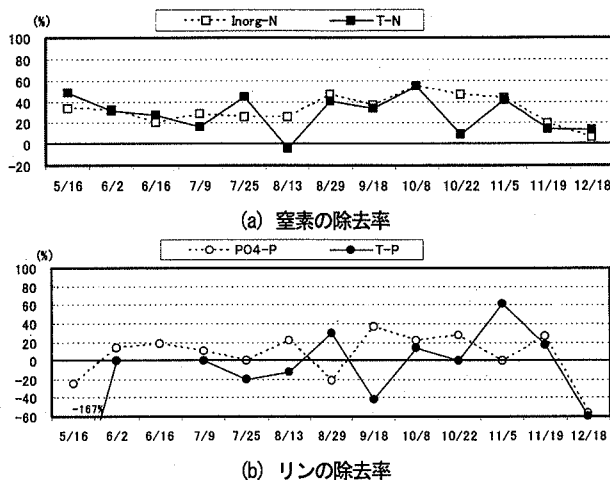


図-9 濃度の変化からみた栄養塩の除去率

謝辞：本研究は(財)河川環境管理財団の〔河川美化・緑化〕調査研究助成事業の補助を受けて実施しました。また、現地調査および分析は、工学部水工学研究室および農学部生物環境化学研究室内の学生諸氏の協力を得ました。実験を開始するにあたり、鳥取大学道上正規学長の助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 河川環境総合研究所：植生浄化施設の現状と事例，河川環境総合研究所資料第3号，2000。
- 2) 矢島啓他：千代川源流智頭町における休耕田を利用した水質浄化プロジェクト，第6回水資源に関するシンポジウム論文集，pp.195-200，2002。
- 3) 矢島啓・吉川栄・末継洋子：休耕田を利用した水質浄化システムの構築に関する研究，第31回環境システム研究論文発表会講演集，pp.213-218，2003。
- 4) 宗宮功編著：自然の浄化機構，技法堂出版，pp.69-70，pp.136-138，1990。
- 5) 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「閉鎖性水域の浄化容量」，pp.26-37，1988。
- 6) 村山登・平田熙他：作物栄養・堆肥学，文永堂出版，pp.57-60，1994。
- 7) 田淵俊雄・千賀裕太郎他：地球環境工学概論，文永堂出版，p.110，1994。
- 8) 陽捷行(編著)：環境保全と農林業，朝倉書店，pp.64-77，1998。
- 9) 河川環境総合研究所：植生浄化施設計画の技術資料，河川環境総合研究所資料第5号，pp.2-14，2002。

(2005. 4. 7 受付)