

休耕田を利用した植生浄化手法に関する研究

要旨

1. はじめに
2. 智頭町における植生浄化実験の概要
 - 2.1 植生浄化実験の実施経緯と意義
 - 2.2 平成 13・14 年度の実験概要
 - 2.3 平成 15 年度以降の実験概要
3. 植生浄化実験における調査内容と調査結果
 - 3.1 平成 15 年度の調査内容
 - 3.2 水理量に関する調査結果
 - 3.3 植物に関する調査結果
 - 3.4 水質に関する調査結果
 - 3.5 水質に関する分析結果
 - 3.6 土壌に関する分析結果
4. 休耕田における植生浄化能の時間変動に関する検討
 - 4.1 平成 16 年度の調査内容
 - 4.2 流量の時間変動
 - 4.3 水温・D0 の時間変動
 - 4.4 休耕田における浄化能の時間変動
5. 休耕田を利用した植生浄化実験における栄養塩除去能の検討
 - 5.1 休耕田における栄養塩除去
 - 5.2 植物による栄養塩除去
 - 5.3 竹炭による栄養塩除去
6. おわりに

参考文献

現地写真集

鳥取大学工学部 土木工学科 矢島 啓・檜谷 治
鳥取大学農学部 生物資源環境学科 岡真理子・藤山英保

要 旨

本研究は、鳥取県八頭郡智頭町芦津において、平成 13 年度から行っている農業集落排水の 3 次処理としての休耕田を利用した植生浄化実験について行った検討をまとめたものである。実験は、集落排水処理施設に隣接する一反の休耕田（約 850m²）を幅約 3m×4 本の水路に整形した実験池をフィールドとし、ハス・スイレン・カキツバタ・キショウブ・ショウブ・ガマ・ヒメガマの 7 種の植物を用いた。現地調査は、原則毎月 2 回、水質調査の他、流量の測定、水深の測定、土壌についての調査（間隙水の水質分析、土壌分析）、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の測定及び分析を行った。

本実験施設は、地元住民の要望にもとづいて始められたものであるが、4 年間の実験を通じて、地元住民だけで運営管理できる恒久的な水質浄化施設とすることができ、今後は、ヒメガマを利用する地元のガマ工芸保存会の会員を中心として運営される予定である。浄化効果については、実験開始当初、土壌への吸着による効果が大きかったが、現在では、その効果はほとんど無くなっていると考えられる。しかし、負荷量の観点からは、処理場からの放流量の約半分が土壌へ浸透しており、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、土壌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が減少することにはつながらなかった。

以上のように、本実験場で行った植生浄化実験は、植物による栄養塩の吸収という観点からは必ずしも高い浄化効果が得られなかった。しかしながら、実験場は、地元住民の交流の場や環境学習の場として利用され、また、そこで生育する植物を利用した工芸品作りによる地域活性化などに役立つなど、多面的な機能を有するに至った。

1. はじめに

かつての農村では、美しく澄んだ水を利用した農業生産が営まれてきた。しかし高度経済成長を契機として、農村地域における生活様式の多様化の進行とともに、家庭からの生活雑排水が水路に流入し、農村地域の水質悪化をもたらすようになった。一般的な農村は住居が分散しており人口密度が小さく、生産の場と生活の場とが複合化している。従って排水の質的かつ量的特性が都市部とは異なるなどの理由から、農村集落の排水処理方式として、都市に定着している従来の下水道処理技術をそのまま導入するには問題が多い。そのため、下水処理は都市部のような大規模集中方式の処理ではなく、農業集落排水処理施設のような簡易かつ小規模な処理技術の開発が求められている。しかし、農業集落排水処理施設では、水質管理が主に生物化学的酸素要求量（BOD）によって行われているため、処理施設からの放流水においても、かなりの窒素やリンなどの栄養塩が含まれている。そのため、河川上流域の水質に問題がない場合でも、湖沼や港湾などの閉鎖性の水域に栄養塩が多く含まれた水が流入し、富栄養化現象を引き起こし水の華や赤潮などの水環境の悪化につながることもある。したがって、下流域の水環境を保全するためにも、農村地域の水環境を保全することが求められ、農村が有する自然浄化機能を活用した経済的な水質保全対策が重要となっている。

近年、閉鎖性水域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、BOD に影響する有機物をはじめ、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⁾。植生浄化法を各地域において適用する場合、まず、地域特性に応じた植物の選定や栽培、刈り取り、農地への還元等の各段階で検証し、地域固有の営農形態や、住民の参加を考慮した維持管理法を確立していくことが必要である。鳥取県では、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。この実験は、智頭町親水公園連絡協議会と千代川流域圏会議が主体となって行っており、植生による栄養塩の除去と地域特性に応じた浄化施設の確立を目指している。平成 13 年度は栄養塩の除去という点において、必ずしも良い結果が得られなかった。そこで、平成 14 年度は効率的な栄養塩除去を目指し、実験池における問題点を改善し浄化効果を上げることに成功した。本研究においては、平成 15 年度以降に河川環境管理財団の助成のもとに行った研究成果を中心に、休耕田を利用した植生浄化手法に関する研究について報告する。

2. 智頭町における植生浄化実験の概要

2.1 植生浄化実験の実施経緯と意義²⁾

(1) 実施の経緯

実験を行っている場所は、鳥取県東部の主流河川である 1 級河川千代川(流域面積：1192km²、幹川流路延長：52km)の源流部(図 2-1 参照)に位置する鳥取県八頭郡智頭町である。本来なら、このような河川上流域における水質の問題は少ない。しかしながら、近年の環境問題への関心が高まる中、智頭町において農業集落排水処理施設を新設するに当たって、周辺に千代川の伏流水を飲料水として利用している地域があることから、集落排水処理施設からの放流水に対する地元住民の不安の声があがった。この対応として、平成 13 年度から地域住民が主体となり、鳥取大学と同町並びに各関連機関の支援協力を仰ぎ、処理水の 3 次処理として休耕田を利用した植物による水質浄化実験を実施することとなった。

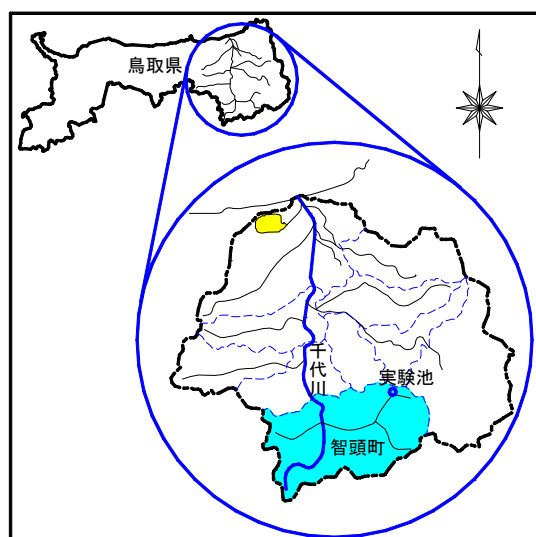


図 2-1 千代川流域及び実験池位置

本実験に関わる主な関連機関は、以下の通りである。

1) 智頭町親水公園連絡協議会

智頭町内には、これまで 9 ヶ所の親水公園が整備され、地域交流の核として機能している。同協議会は、この親水公園整備の中心となる組織である。発足は、千代川の源流に位置する智頭町においても、護岸工事が進み、川と人との本来の関係が忘れられつつあるため、もう一度生活空間としての河川を取り戻そうと、平成 6 年 8 月に設立された。町内をネットワークし、地域の声を活かし、事業主体となる町や県との連絡調整や親水公園の維持管理・活用のあり方などを検討し、県・町・地域住民がお互いの知恵を出し合い、川を軸とする地域づくりを行っている。メンバーは、親水公園を有する 7 つの集落の代表者と鳥取県の県土整備局事務所、智頭町地域整備課など約 25 人で構成されている。

2) 千代川流域圏会議³⁾

国・自治体・各種活動団体・個人等が一同に会し、千代川流域での地域おこしや川づくりを進めている組織である。同会議は、千代川を軸として、各地域で進めている取り組みの流域レベル

での交流・連携を図るとともに、流域全体の広い視野にたつて千代川をより良くするための取り組みや地域活性化への取り組みを行うことを目的とし、平成9年12月に発足した。

(2) 実験の意義

本実験は、地域住民が中心となり、農村地域に適した植物による水質浄化実験を地域住民と官学が共同で実施したことに大きな意義があると考えられる。実験地では、毎年1回のペースで小学生を対象とした植生浄化実験の解説や実験池に棲む水生生物の観察会といった環境学習のイベント(写真2-1, 写真2-2 参照)を実施し、水質浄化システムに対する一般住民の幅広い理解及び住民意識の向上に努めている。また、新たな地域活性化の取り組みとして、実験池で生育したガマを利用したガマ工芸品の製作(写真2-3 参照)や実験場が地域住民の交流の場となるよう働きかけている。



写真 2-1 実験池におけるイベントの様子



写真 2-2 植生浄化実験の解説の様子



写真 2-3 ガマ工芸品製作の様子

2.2 平成13・14年度の実験概要^{2) 4)}

実験は、半反の田を幅約3m×4本の水路に整形し、智頭町親水公園連絡協議会主催のもと平成13年6月24日に、地元振興作物を含む6種の植物の植え付けを行い開始した。植栽面積は約300 m²、植栽植物はハス、スイレン、カキツバタ、キショウブ、ショウブ、ガマを各150株、処理水量は約92 m³/日(平成13年度の実験期間中の平均)、平均水深は約13 cm、滞留時間は約11時間であった。

平成13年度に実施した植生浄化効果として、集落排水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除去率を算定すると、無機態窒素(Inorg-N)の平均除去率は16%、

全窒素 (T-N) の平均除去率は-10 %、リン酸態リン (PO₄-P) の平均除去率は-4 %、全リン (T-P) の平均除去率は 8 %となっており、必ずしも大きな成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。また、平成 13 年度の実験では、夏季における実験池内の水温が 40℃近くまで上昇する日が多く見られ、植物の虫害などの問題が発生した。

平成 14 年度には、より高い水質浄化効果を図るため、生育したガマを用いた工芸品製作による村おこし運動と連携し、実験池を当初の半反から一反に拡張した。また、平成 13 年度の経験を生かし、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 850m²、植栽植物は平成 13 年度のはす・スイレン・カキツバタ・キショウブ・ショウブ・ガマに加え、拡張した半反にヒメガマを植えた (図 2・2、写真 2・4 参照)。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 5m 程度に投入した。平成 14 年度の実験期間中の平均処理水量は約 103.8m³/日、流入させた河川水量は 45.8 m³/日(河川水流入期間中の観測結果の平均値)、平均水深は約 20cm、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。

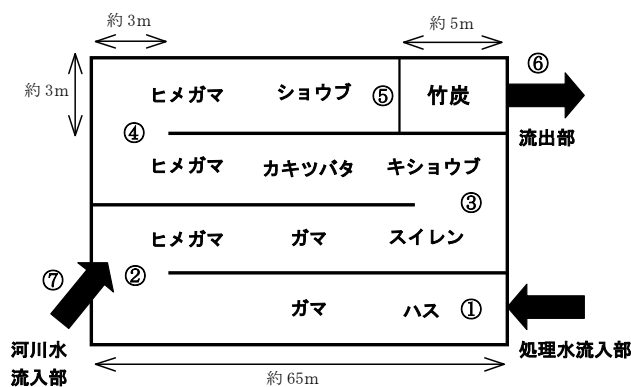


図 2・2 実験池概要



写真 2・4 実験池の様子

2.3 平成 15 年度以降の実験概要

平成 15 年度以降の実験においては、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、水温上昇は問題とならないことが分かったため、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 年度に特別な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応はとらなかった。ただし、平成 14 年度は猪により実験池があらされたため、周囲に柵を施すことにした。

平成 15 年度の実験池の平均水深は約 15.5cm、植栽植物は前年度と同じハス、スイレン、カキツバタ、キショウブ、ショウブ、ガマ、ヒメガマである。ただし、ヒメガマについては、前年度 12 月に一度刈り取っている。また、処理水量は約 95.8m³/日(平成 15 年度実験期間中の処理水日放流量の平均)、滞留時間は約 33 時間である。

3. 植生浄化実験における調査内容と調査結果

3.1 平成 15 年度の調査内容

(1) 調査の概要

現地調査は、平成 14 年度と同様に月に 2 回、晴天が 2~3 日続いた翌日に行った。調査内容として、水質調査の他、流量の測定、水深の測定、土壌についての調査（間隙水の水質分析、土壌分析）、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の測定及び分析を行った。流量の測定は処理水流入部、流出部ともに 5L のビーカーを用い、適量な量が貯まる時間をストップウォッチで計測し算定した。水深の測定ポイントは図 2・2 の①~⑤である。ヒメガマは平均的な大きさのものを 5 個体刈り取り、長さ(地上の葉の部分)と葉数を測定し、70℃で一晩乾燥後、乾燥重量を測定し、月に 1 度窒素 (N) ・リン (P) ・カリウム (K) の含有量の分析を行った。以下に水質調査、土壌調査、植物の分析調査の内容を示す。

(2) 水質調査

基本水質調査として、図 2・2 の①~⑥において、水温・pH（東亜電波工業社製HM-12P使用）及びDO（YSI社製SCOOT85 使用）の測定を行った。水温に関しては、現地調査時の測定の他に、実験期間中の時間的変化を知るために流入部・竹炭ゾーン前（以下、竹炭前）・流出部に水温計（Onset社製Stow Away Tidbit使用）を設置し、1 時間ごとの水温の測定を行った。さらに、現地調査時に、流入部・竹炭前・流出部の 3 箇所です採水し、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。T-N・T-Pについては、硫酸分解後測定を行った。また、無機栄養塩のNH₄-N・NO₂-N・NO₃-N・PO₄-Pについては、0.45 μ m のメゾフィルターで濾過した試料を用いて測定を行った。

(3) 土壌調査

図 2・2 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。土壌は底泥の深さ 5cm 程度の部分を角型スコップで 2 杯分(約 800ml)採取し、170℃で 24 時間炉乾燥させ、シャーレに入れ保管した。その試料を分解器にかけ、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、T-N・NH₄-N・NO₂-N・NO₃-N・T-P・PO₄-P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。

(4) 植物の分析調査

ヒメガマについては収穫後、鳥取大学に持ち帰り、70℃で恒量に達するまで乾燥して乾燥重量を測定した。また、乾燥試料を粉碎して窒素、リン、カリウムの含有量を測定した。ただし、窒素は硫酸分解後、ネスラー法により測定した。リンは、硫酸分解後、バナドモリブデン酸法により測定した。カリウムは、硫酸分解後、フレイム光度法により測定した。

3.2 水理量に関する調査結果

(1) 流入部・流出部における流量

現地観測において測定した流入部・流出部の流量の計測結果を表 3-1 に示す。この表より、各流量は観測日によってばらついていることが分かる。特に流入部においては、現地観測中でも流量の変化が分かるほどその時間変動が大きかった。そのため、観測した流量をその日の流入量と考えることは難しい。そこで、智頭町役場で管理している奥山形農業集落排水処理施設への日流入量が実験池への流入量に等しいと考え、この流量を用いて考察を行う。このデータより求めた流量を表 3-2 に示す。

表 3-1 に示す流出部での平均流量は、表 3-2 に示した処理施設への平均流入量の約半分と小さく、実験池においては、土壌への浸透や蒸発があると考えられる。これについては、平成 16 年度に行った追加調査による考察を第 4 章において行う。

表 3-1 観測で得た流量

	流入部 (L/s)	流出部 (L/s)
2003/5/16	2.35	0.24
2003/6/2	0.01	0.27
2003/6/16	0.10	0.65
2003/7/9	1.31	0.47
2003/7/25	0.55	1.42
2003/8/13	3.80	0.81
2003/8/29	2.50	0.37
2003/9/18	3.15	0.45
2003/10/8	0.07	0.65
2003/10/22	0.01	0.60
2003/11/5	3.14	0.47
2003/11/19	0.01	0.45
2003/12/18	0.01	0.49
平均	1.31	0.56

表 3-2 役場の管理データによる流入量

	日流入量 (m ³ /日)	毎秒流入量 (L/s)
2003/5/16	88.0	1.02
2003/6/2	100.5	1.16
2003/6/16	100.2	1.16
2003/7/9	94.3	1.09
2003/7/25	95.2	1.10
2003/8/13	143.3	1.66
2003/8/29	95.3	1.10
2003/9/18	93.2	1.08
2003/10/8	92.4	1.07
2003/10/22	92.0	1.06
2003/11/5	96.3	1.11
2003/11/19	81.4	0.94
2003/12/18	73.3	0.85
平均	95.8	1.11

(2) 観測水深と滞留時間

図 2-2 の①~⑤に示した各ポイントにおける水深の観測結果から得られた全地点の観測期間の平均水深は 15.5cm であった。平成 14 年度は夏場に実験池内の水温上昇を抑えるため、河川水を流入しており、実験期間中の平均水深は 19.4cm であった。平成 15 年度は河川水の流入はなく、前年度よりも浅くなっていた。また、滞留時間=集落排水からの放流量/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。

3.3 植物に関する調査結果

(1) 全体の生育状況

各植物の現地における生育状況の写真を付録に示す。

・ハス

6月頃から急激に繁殖し、その後8月まで生長しつづけた。9月には、つぼみや花がみられた。10月には枯れ始め、11月にはすべての葉がかれている状態であった。

・スイレン

6月の時点でかなり繁茂し、7月には花がみられた。8月までは葉が大きくなり、水上へと伸びる旺盛な生長状態であった。しかし9月以降の生長はみられず、11月になると、葉は水面まで下がった状態になった。

・カキツバタ

8月には密集して繁殖し、10月までその状態が続いた。実験期間中を通して、背丈の高いものの中で倒れているものがあつた。

・キショウブ

6月までは繁茂していたが、7月頃から枯れた部分がみられるようになり、11月にはほとんどのものが倒れて、枯れている状態であった。

・ショウブ

7月までに水面が見えなくなるくらい繁茂していた。9月になると枯れ始め、11月には大部分が枯れていた、またこのショウブの植栽ゾーンには雑草が目立った。

・ガマ

6月の時点でかなり密集して繁殖し、7月の終わりまでその状態が続いた。9月頃から枯れはじめるものがみられ、11月には倒れているものも多くみられた。

・ヒメガマ

6月には背丈が150cm程度あり、密集した状態であった。その後も生長し続け8月にはかなり密集した状態であった。8月の終わりには穂をつけたものもみられた。9月には枯れて倒れたものもみられたが、大部分は10月まで枯れずに生えていた。

(2) ヒメガマの高さと葉数

実験で使用した植物の中で一番のバイオマスを持つヒメガマに着目し、現地観測時にヒメガマの平均高さと平均葉数を調べた。その結果を図3・1に示す。平成14年度は春に苗植えをした年でもあり、夏場には特に著しい生長をみせた。平成15年度の第1回目の調査日である5月16日には、ヒメガマは150cmに達していた。そのため、その後は前年度のような著しい伸びは無かったが、8月まで生長がみられた。9月になると一部枯れ倒れているものもみられたが、大部分のヒメガマは11月の刈り取りまで倒れずに残っていた。平成15年度の刈り取りは、11月6日から11月19日の間に地元住民によって行われた。

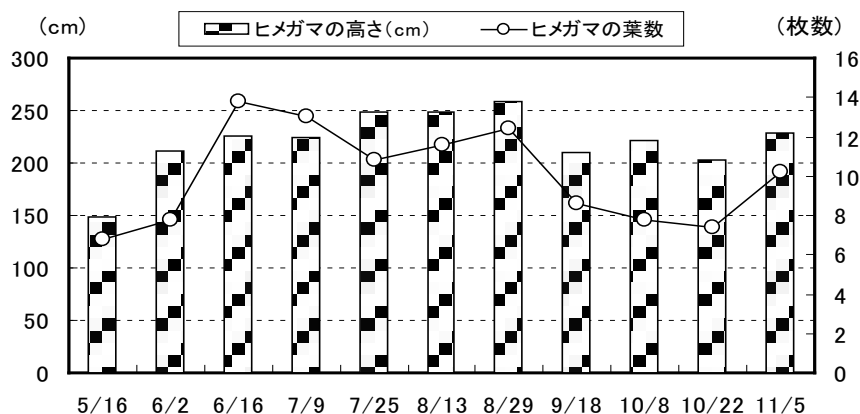


図 3-1 ヒメガマの高さと葉数の変化

(3) ヒメガマの分析結果

図 3-2 にヒメガマの高さと 1 個体あたりの乾燥重量の変化を示す。1 個体あたりの最大の乾燥重量は、6 月 16 日（1 月 1 日からの経過日数であるユリウス日で 167 日）の 128.2g であった。6 月から 11 月上旬までヒメガマの高さは 200cm 以上あるが、乾燥重量でみた場合、6 月 16 日に最大値を示した後急激に減少し、11 月 5 日（ユリウス日：309 日）には 11g と大きく減少していた。

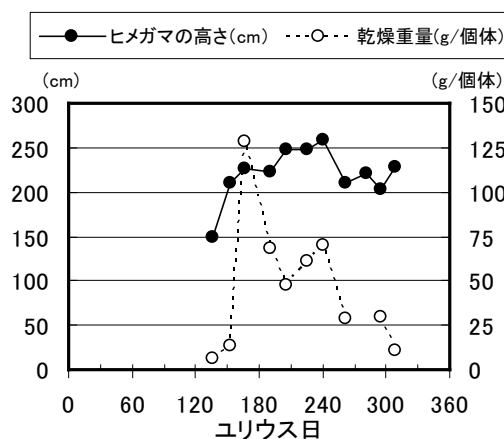


図 3-2 ヒメガマの高さと乾燥重量の変化

また、N・P・Kの含有率を図 3-3～図 3-5 に示す。一般にヒメガマなどの抽水植物は、N・Pの含有率は生長初期にもっとも高く、その後、急速に減少することが知られている⁵⁾。これらの図からわかるように、今回の分析においてもおおむねその傾向がみられる。また、過去に行われた霞ヶ浦における分析結果では、窒素の含有量としては、生育初期（4 月）の窒素含有量 2.04%、リン含有量 0.341%、最大成長期の窒素含有量 0.88%、リン含有量 0.118%という値がある⁶⁾。今回の分析結果もこれと同等の含有量である。さらに、N・Pの含有量の時系列を評価するため、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図中に示した。

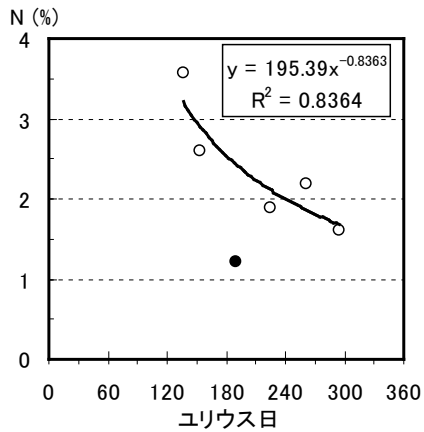


図 3-3 ヒメガマの N 含有率

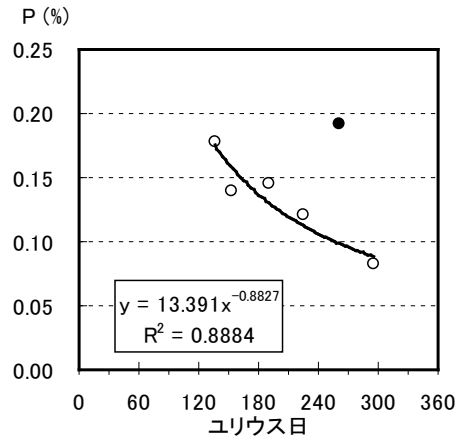


図 3-4 ヒメガマの P 含有率

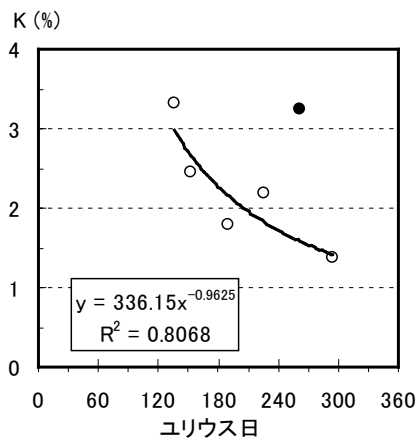


図 3-5 ヒメガマの K 含有率

実測で得られた 1m^2 当たり 60 個体として 1m^2 当たりの乾燥重量を求めたものを図 3-6 に示す。最大成長期には、 1m^2 当たり 8kg のバイオマスがあることが分かる。また、さきに求めた P・K 含有率の相関式を用いて 1m^2 当たりの N・P の含有量を求めたものを図 3-7 に示す。6月 16 日 (ユリウス日 : 167 日) には地上部だけで、 1m^2 当たり 208g の窒素が、11.2g のリンが存在している。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)に地下茎に輸送し蓄えることにより減少していると考えられる。

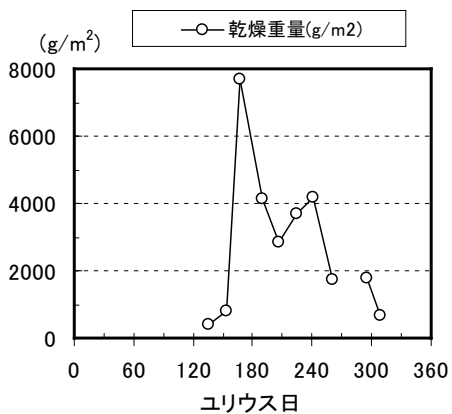


図 3-6 ヒメガマの乾燥重量の変化

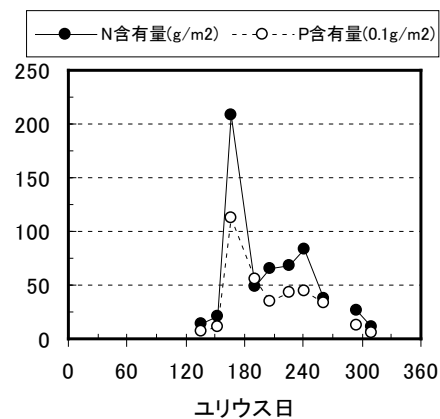


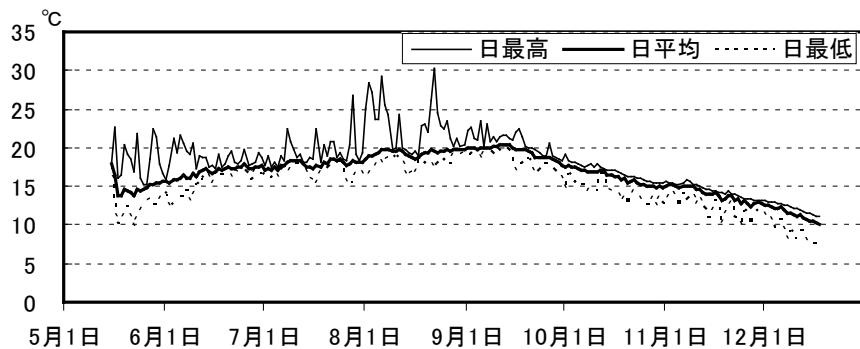
図 3-7 ヒメガマの N・P 含有量の変化

3.4 水質に関する調査結果

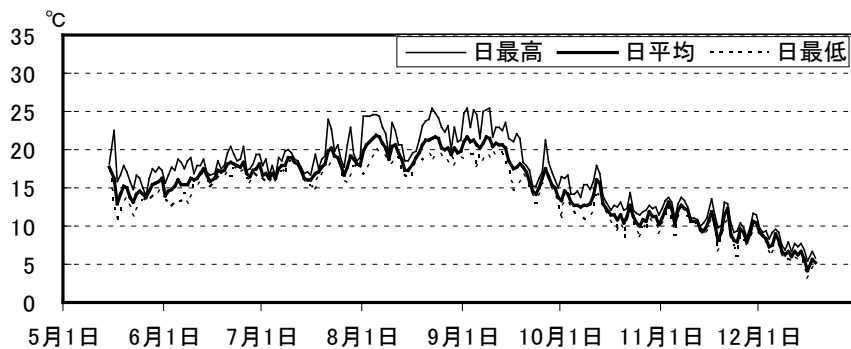
(1) 水温・pH・DO について

《水温》

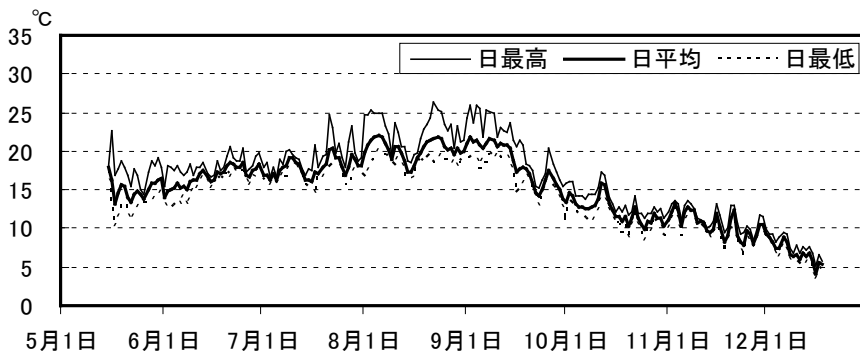
流入部・竹炭前・流出部における1時間毎の水温変化の様子を図3-8に示す。流入部の水温計を設置したのは図2-2のポイント①であり、放流される処理水の直接的な水温ではない。流入量は時間的変動が大きいため、少ない流入量時には実験池内のポイント①において水は滞留していることがある。そのため、流入部において8月には30℃近くまで水温が上昇する日がある。しかし、竹炭前や流出部においては、植生に覆われているため、最大でも25℃程度までの水温上昇にとどまっている。



(a) 流入部における水温変化



(b) 竹炭前における水温変化



(c) 流出部における水温変化

図3-8 実験水路における1日毎の最高・平均・最低の水温変化

現地観測時に行った水温の測定結果を**図 3-9(a)**に示す。各観測ポイントの水温は、①において 9.7°C~24.6°C、②において 7.0°C~25.0°C、③において 5.4°C~24.9°C、④において 4.9°C~25.2°C、⑤において 4.2°C~25.6°C、⑥において 4.4°C~26.6°Cであった。各ポイント間でばらつきがないことから、実験池内がほぼ同じ水温であったことが分かる。また、9月18日以降の観測日では、ポイント①の水温が他のポイントよりも高くなっていた。これは、秋以降の気温低下とともに実験池内の水温も低下するが、放流水の水温は年間を通して変化の少ないため相対的に水温が高くなっていることによる。

《pH》

pHの測定結果を**図 3-9(b)**に示す。各観測ポイントのpHは、①において 6.24~7.08、②において 6.02~7.00、③において 5.97~6.98、④において 6.02~6.97、⑤において 5.93~6.95、⑥において 5.83~6.99の値であった。どの観測日も各ポイントのpHは同程度の値を示している。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⁷⁾。実験期間を通して、実験池のpHは 5.83~7.08の間であり、pHに関しては、植物の生育しやすい状況であったといえる。

《DO》

図 3-9(c)・(d)にDOの測定結果を示す。各観測ポイントのDOは、①において 0.71~7.37mg/L、②において 0.72~8.58mg/L、③において 0.48~6.16mg/L、④において 0.56~6.33mg/L、⑤において 0.77~12.64mg/L、⑥において 0.90~6.83mg/Lの値であった。これらの図から分かるように、DO値は、各ポイントにおける観測日毎の変動は大きく、また、同じ観測日でもポイントの違いによる差は大きい。特徴的なことは、研究を行った実験池の水深は浅く、平均的には常にある程度の水量は流れているにもかかわらず、観測を行ったほとんどの日において 2mg/L以下の低溶存酸素状態が発生していることである。これは夏季において顕著に認められ、7月9日・7月25日・8月13日は、流入地点で 5mg/L (約 60%) であったものが、約 65m先のポイント②で 2mg/L以下となっている。これは、植物が繁茂し、ゆっくりとした流れの中では、風の擾乱に伴う大気から水面への酸素供給がほとんどなく、土壌有機物を基質として利用する微生物の活動が、分子状酸素の消失を引き起こしていると考えられる⁵⁾。一般に、土壌に含まれる酸素濃度が減少した場合、植物の呼吸の低下がみられ、根腐れ等の問題が心配される。しかし湛水条件によく適応したイネなどの沼沢植物では、この現象は認められない。これは、沼沢植物は茎葉から根へ破生通気組織がよく発達しており、その組織を通じて酸素が茎葉から根へ供給されることによる。本実験でも、植栽植物の生育状況からみて、DOが低いことによる植物の生育への悪影響はみられなかった。

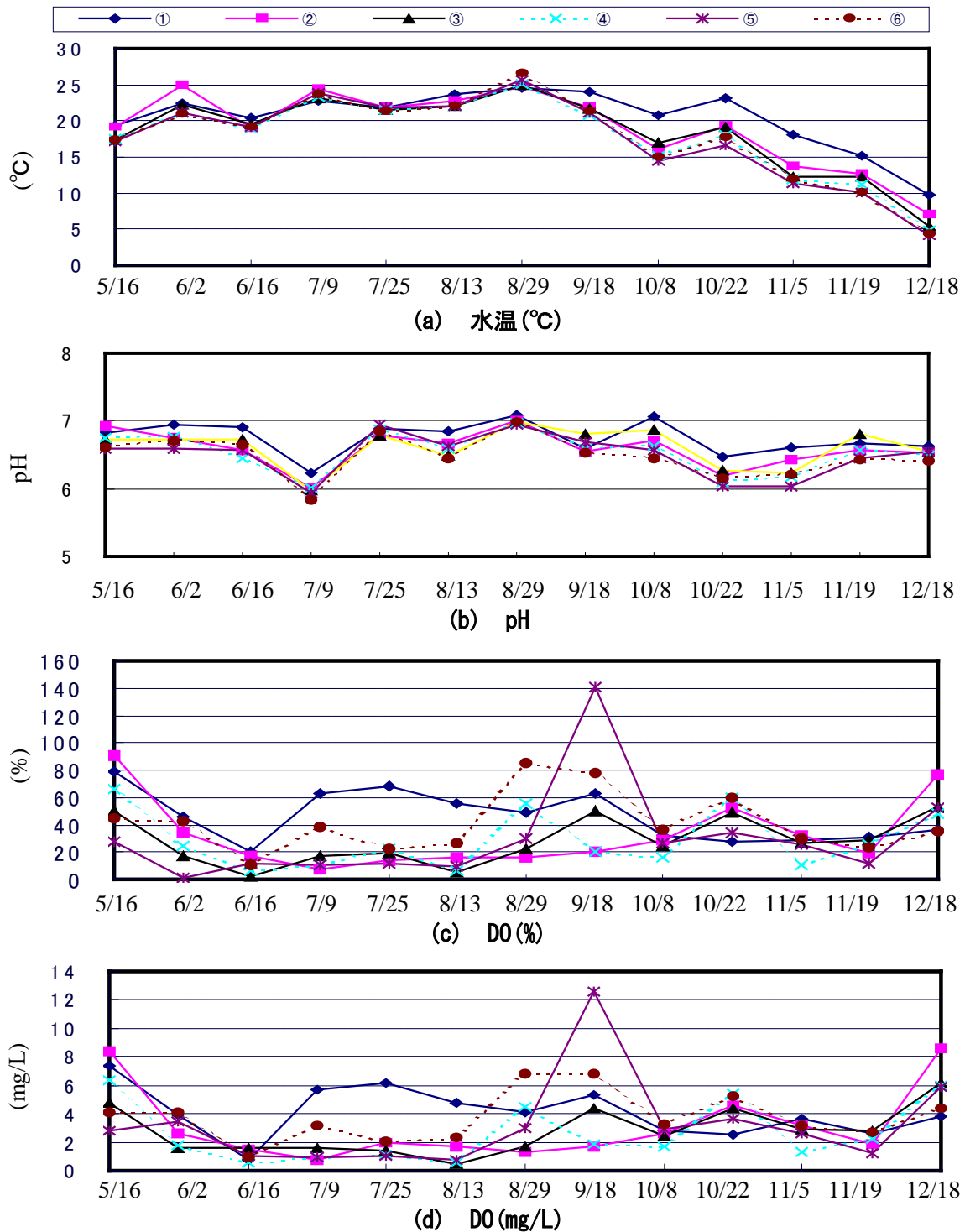


図 3-9 現地調査時の基本水質の測定結果

3.5 水質に関する分析結果

(1) 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の様子を図 3-10 に示す。流入部での水質をみると、全測定日の平均で、 $\text{NH}_4\text{-N} \cdot \text{NO}_2\text{-N} \cdot \text{NO}_3\text{-N}$ の合計で表される Inorg-N は、T-N の 82% を占めている。また、Inorg-N の 86% を $\text{NH}_4\text{-N}$ が占めている。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 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。図 3-9 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、

窒素に関する栄養塩において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か若干の増加傾向にあった。これは、水路の末端にある竹炭ゾーンで、藻が繁殖したり植物の残渣などの有機物が流入するためであると考えられる。

平均値でみると、NH₄-Nについては、流入部 15.1mg/L、竹炭前 9.9mg/L、流出部 10.3mg/Lとなっている。NO₂-Nについては、流入部 0.27mg/L、竹炭前 0.07mg/L、流出部 0.07mg/Lとなっている。NO₃-Nについては、流入部 1.9mg/L、竹炭前 1.4mg/L、流出部 1.3mg/Lとなっている。Inorg-Nについては、流入部 17.3mg/L、竹炭前 11.4mg/L、流出部 11.6mg/Lとなっている。T-Nについては、流入部 22.0mg/L、竹炭前 14.4mg/L、流出部 15.2mg/Lとなっている。

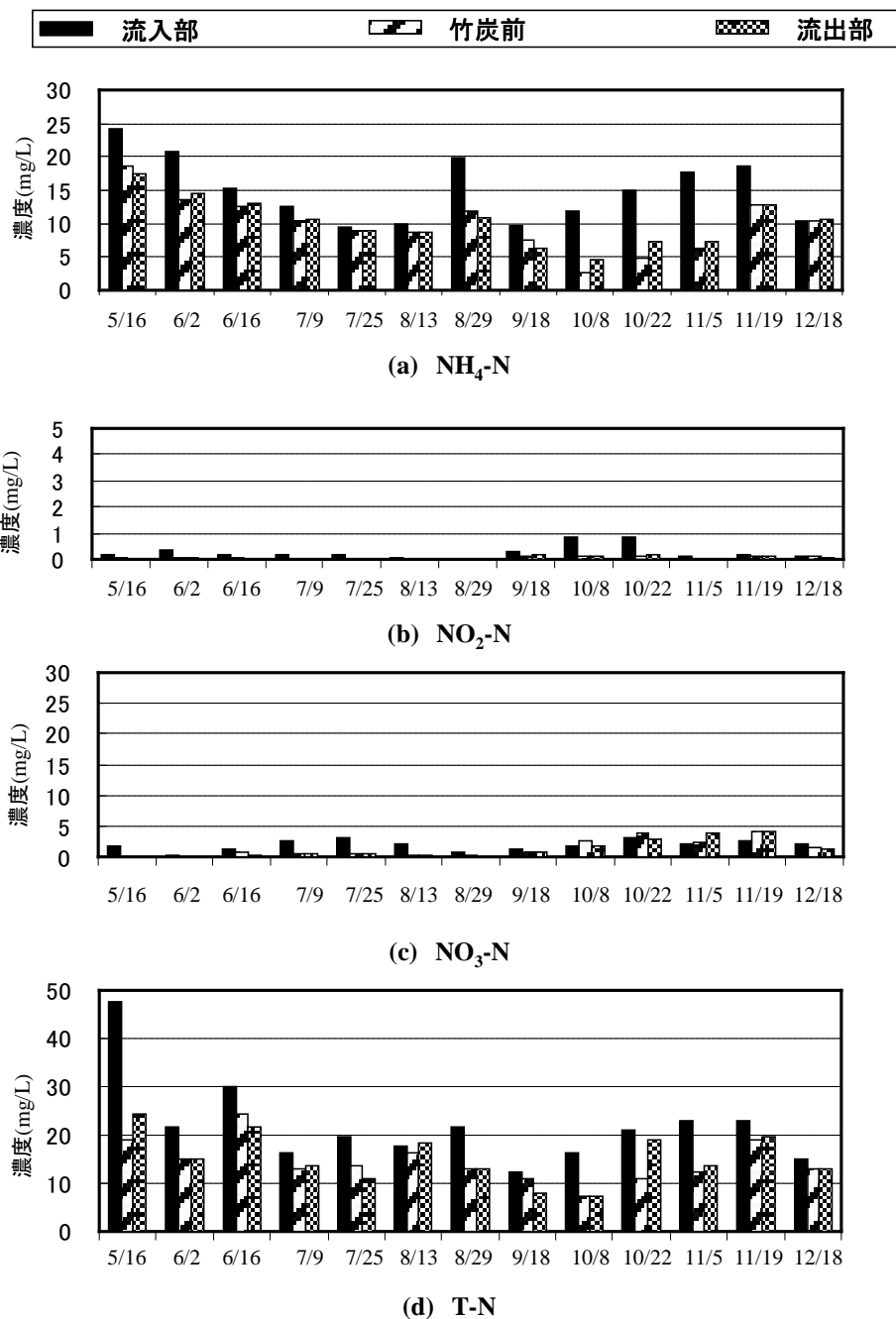


図 3-10 窒素に関する栄養塩濃度の変化

(2) 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の様子を図3-11に示す。流入部での水質をみると、全測定日の平均で、無機態リン $\text{PO}_4\text{-P}$ 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2.34mg/L、竹炭前2.11mg/L、流出部2.21mg/Lとなっている。T-Pについては、流入部5.38mg/L、竹炭前5.65mg/L、流出部7.55mg/Lとなっている。ただし、流入部のT-Pが33.3mg/Lと異常に高い6月6日を除いた評価では、流入部5.53mg/L、竹炭前5.37mg/L、流出部5.43mg/Lとなっている。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い。

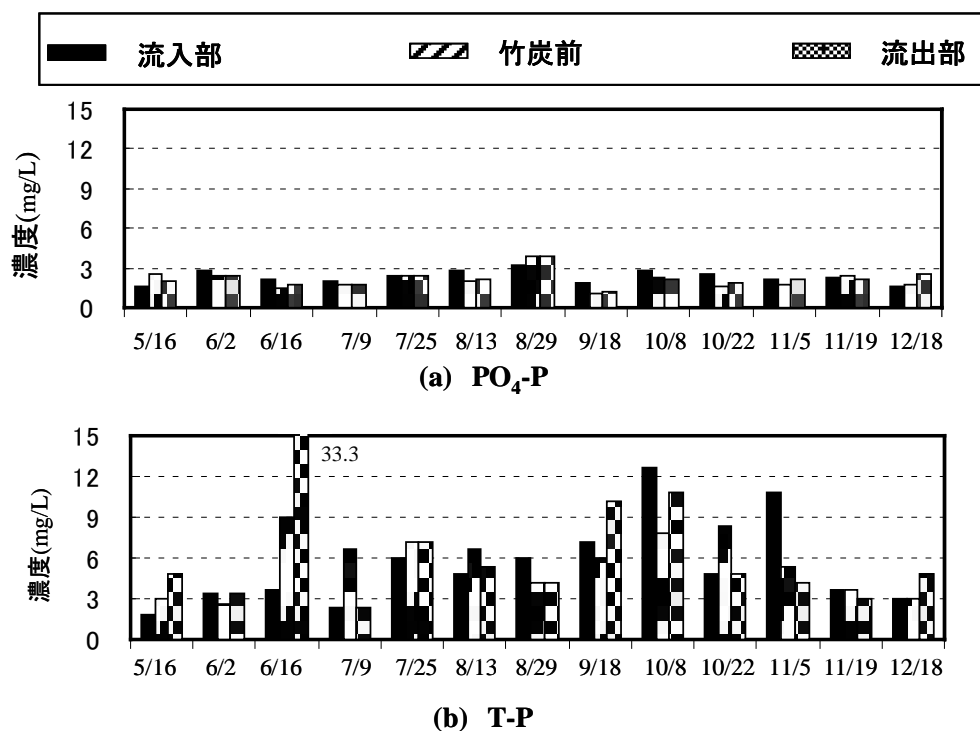


図3-11 リンに関する栄養塩濃度の変化

3.6 土壌に関する分析結果

(1) 土壌間隙水の栄養塩濃度

図3-12に土壌間隙水の窒素に関する栄養塩の濃度変化を示す。さきに示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 $\text{NH}_4\text{-N}$ の形で存在している。平均値でみると、 $\text{NH}_4\text{-N}$ については、流入部20.2mg/L、中間部(図2-2の③地点)17.8mg/L、竹炭前19.2mg/Lとなっている。 $\text{NO}_2\text{-N}$ については、流入部0.31mg/L、中間部0.22mg/L、竹炭前0.28mg/Lとなっている。 $\text{NO}_3\text{-N}$ については、流入部3.05mg/L、中間部2.10mg/L、竹炭前1.77mg/Lとなっている。 Inorg-N については、流入部23.6mg/L、中間部20.1mg/L、竹炭前21.4mg/Lとなっている。T-Nについては、流入部38.7mg/L、中間部37.0mg/L、竹炭前14.6mg/Lとなっている。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る。

図3-13に示す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6.75mg/L、中間部

6.92mg/L、竹炭前 6.06mg/Lとなっている。T-Pについては、流入部 16.52mg/L、中間部 13.66mg/L、竹炭前 16.89mg/Lとなっている。窒素と同様に、土壤間隙水中のリン濃度は非常に高濃度となっている。

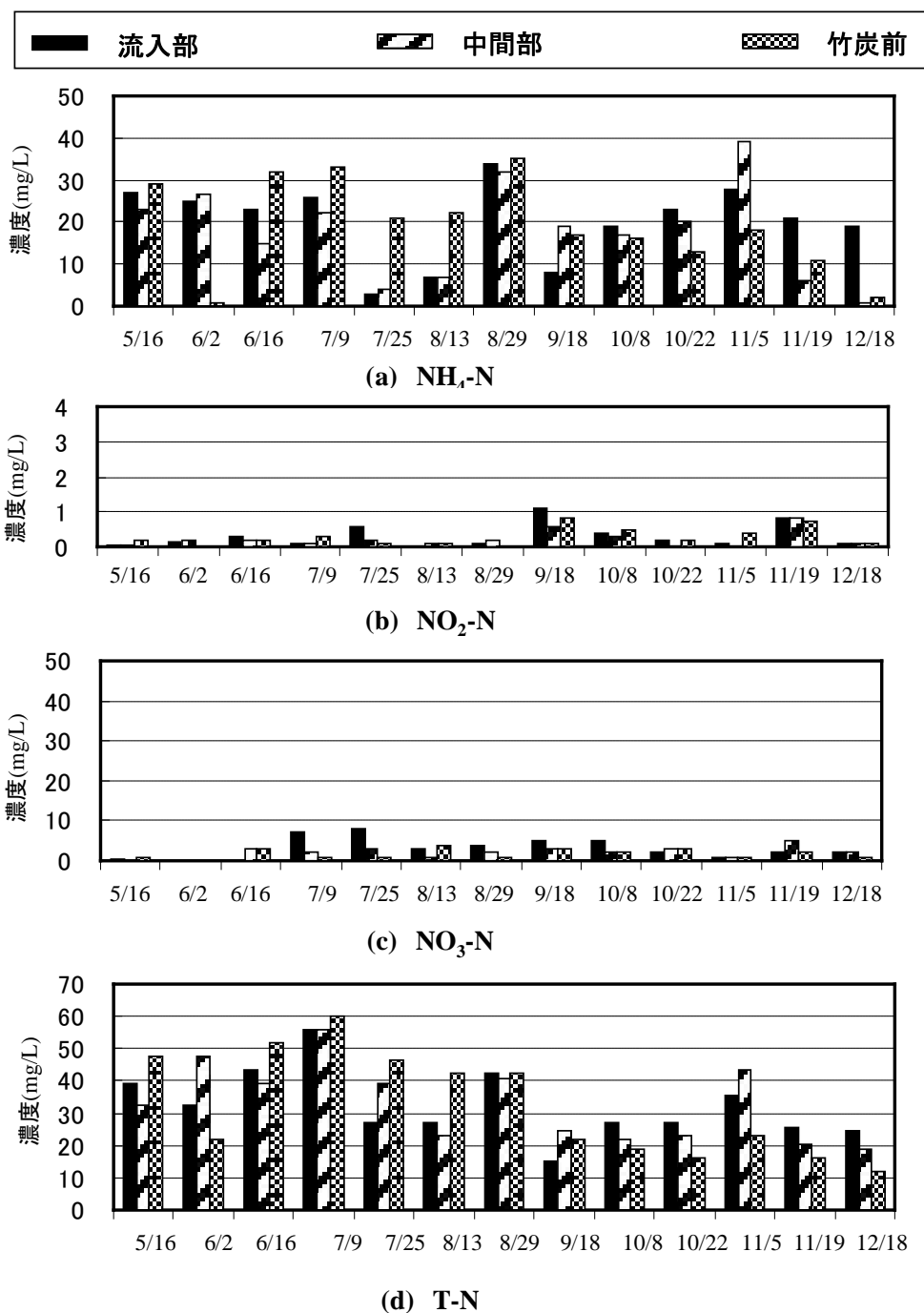


図 3-12 土壤間隙水の窒素に関する栄養塩濃度の変化

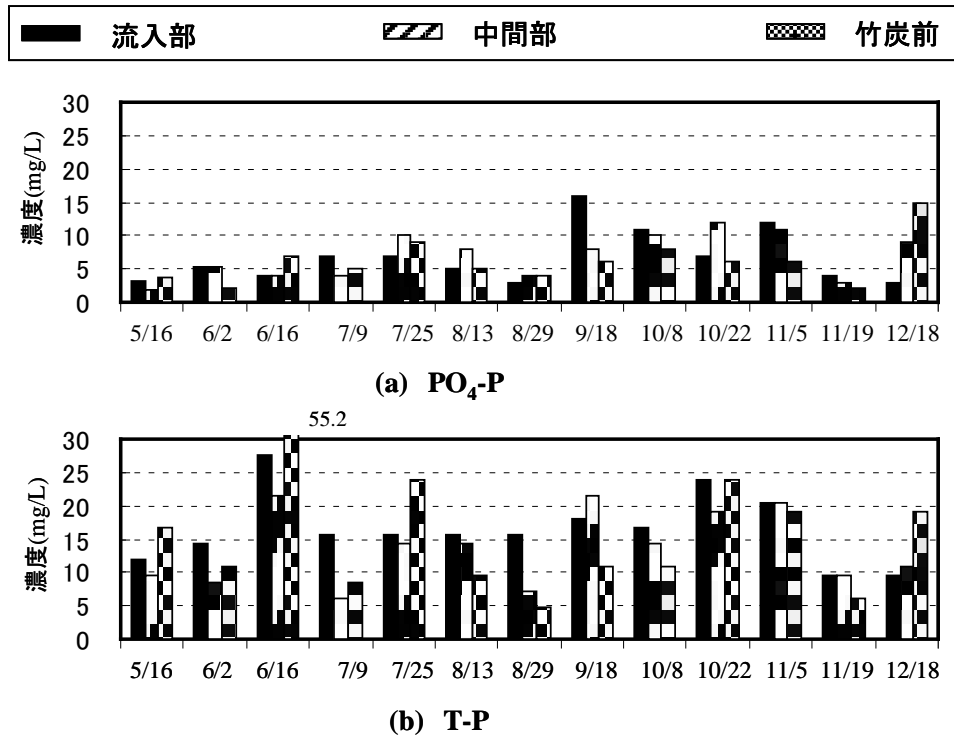


図 3-13 土壤間隙水のリンに関する栄養塩濃度の変化

(2) 土壤中の栄養塩含有量

図 3-14 に土壤中の栄養塩含有量の変化を示す。初期値とは、実験開始後に、実験池内の土壤を採取している流入部・中間部・竹炭前付近の畦の部分採取し分析したものである。植物の成長時期による違いや季節変化等は見られない。

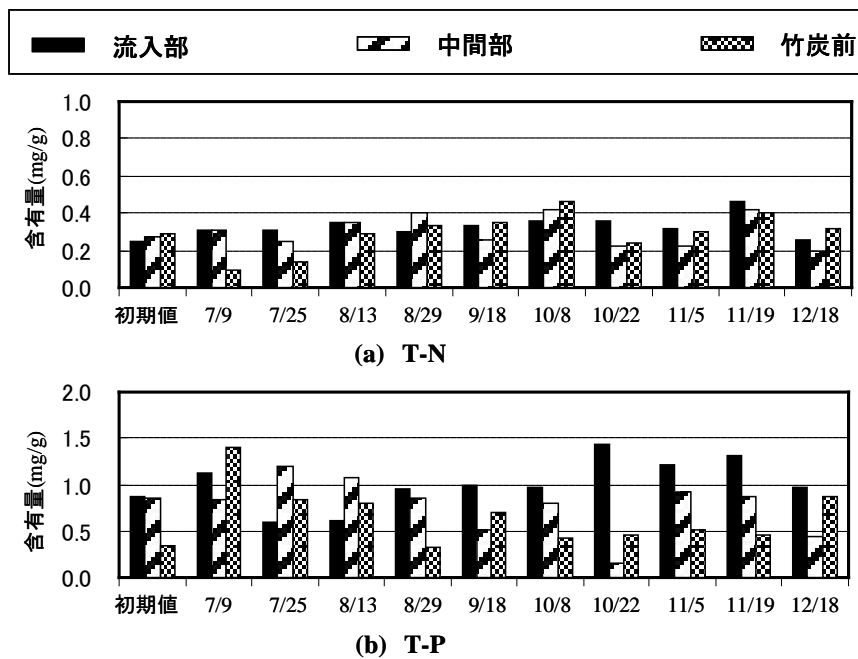


図 3-14 土壤における窒素とリンの含有量の変化

4. 休耕田における植生浄化能の時間変動に関する検討

4.1 平成16年度の調査内容

植生浄化手法に関する研究は、月数回程度の水質分析結果にもとづいてなされていることが多い。本研究においても平成15年度までは、月2回の水質分析結果から植生浄化能を評価してきた。しかしながら、植物活動は日中と夜間で大きく異なり、それらの影響が植生浄化能の時間変動として表れる可能性がある。また、集落排水処理施設からの放流水の水質が一定であるかの疑問も残されている。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時間連続の調査を行った。具体的な調査項目は次のとおりである。

① 気象調査

現地において風向・風速の連続観測を行うとともに、気温・湿度の連続測定も行った。

② 水理調査

平成16年9月2日午前6時から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。

③ 水質連続調査

実験池の流入部（**図 2-2**の①）、中間部（**図 2-2**の③）、竹炭前（**図 2-2**の⑤）の3箇所において、多項目水質計（Hydrolab社製）を利用した水温とDOの連続観測を行った。ただし、流入部においては、集落排水処理施設からの放流水を一旦バケツに溜め込み、その中に計測器を設置した。用いた計測機に計装されているセンサーの違いから、流入部のみpHのデータも取れている。

④ 採水及び水質分析

平成15年度の採水と同様に、平成16年9月2日午前6時から3時間おきに、流入部、竹炭前、流出部の3箇所では採水を行い窒素とリンに関する栄養塩の水質分析を行った。

4.2 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智頭町役場が1日ごとのデータとして保存している農業集落排水処理施設への流入量を**図 4-1**に示す。実測の流入部での流量は時間的な変動が大きく、それに対し、流出部での流量の変動は小さいことが分かる。流入部での平均流入量は0.92L/sであり、流出量は0.46L/sである。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1.05L/sである。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。

蒸発を考えるために、観測期間中の風速を**図 4-2**に示す。この図より、観測期間は最大でも1.5m/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7mmであることが多い⁸⁾という観測データと面積が約850m²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0.069L/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であることがあきらかとなった。

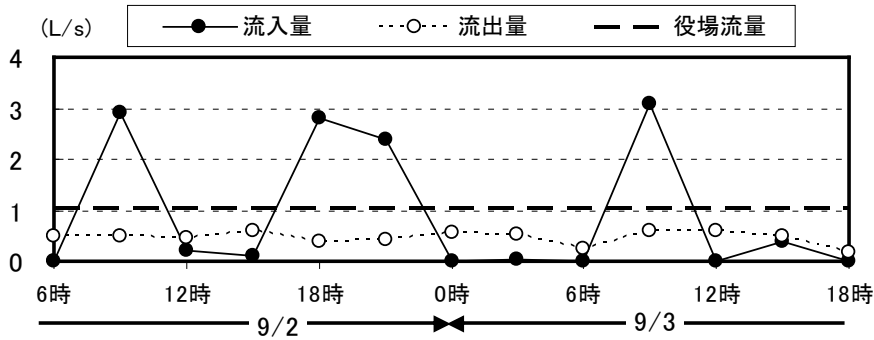


図 4.1 実験水路における流量の時間変化

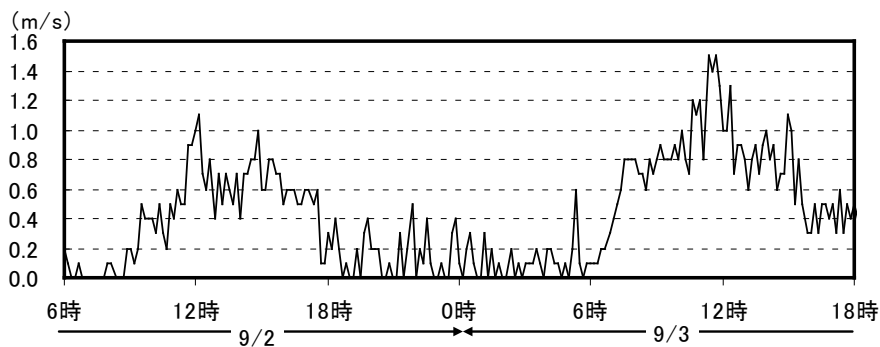


図 4.2 現地における平均風速の時間変化

4.3 水温・D0 の時間変動

多項目水質計で得られた流入部・中間部・竹炭前での水温・D0 (・ pH) の時間変化を図 4.3 に示す。図 4.3 (a) に示す水温変化から、中間部・竹炭前ではゆるやかに日中水温が上昇し、夜間下降するのに比べ、流入部では 25℃ の水温を一定に保ちながら、その後急激に水温が下降する現象がみられる。これは、集落排水処理施設からの放流水の水温 25℃ 程度 (時には 30℃ 程度まで上昇) であり、放流がない時には、バケツにたまった放流水の水温が、それより低い外気温の影響で下降するためであると考えられる (同図中に示した気温の変化を参照)。よって、流入部の水温が 25℃ 以下に下降している時間帯を放流がない時間帯と考え、図中にハッチを施した。

図 4.3 (b)・(c) に示す D0 の時間変化をみると、流入部では、処理施設からの放流量の時間変化にともなう影響を受けている。この影響が少ない時間帯から判断すると、放流される処理水の D0 は約 50% (4.5mg/L) 程度と考えられ、実験池への流入時点ですでに十分な D0 がないことが明らかになった。また、中間部と竹炭前においては、ほぼ常に D0 が 10% (1mg/L) 以下の嫌気状態となっていることがわかる。

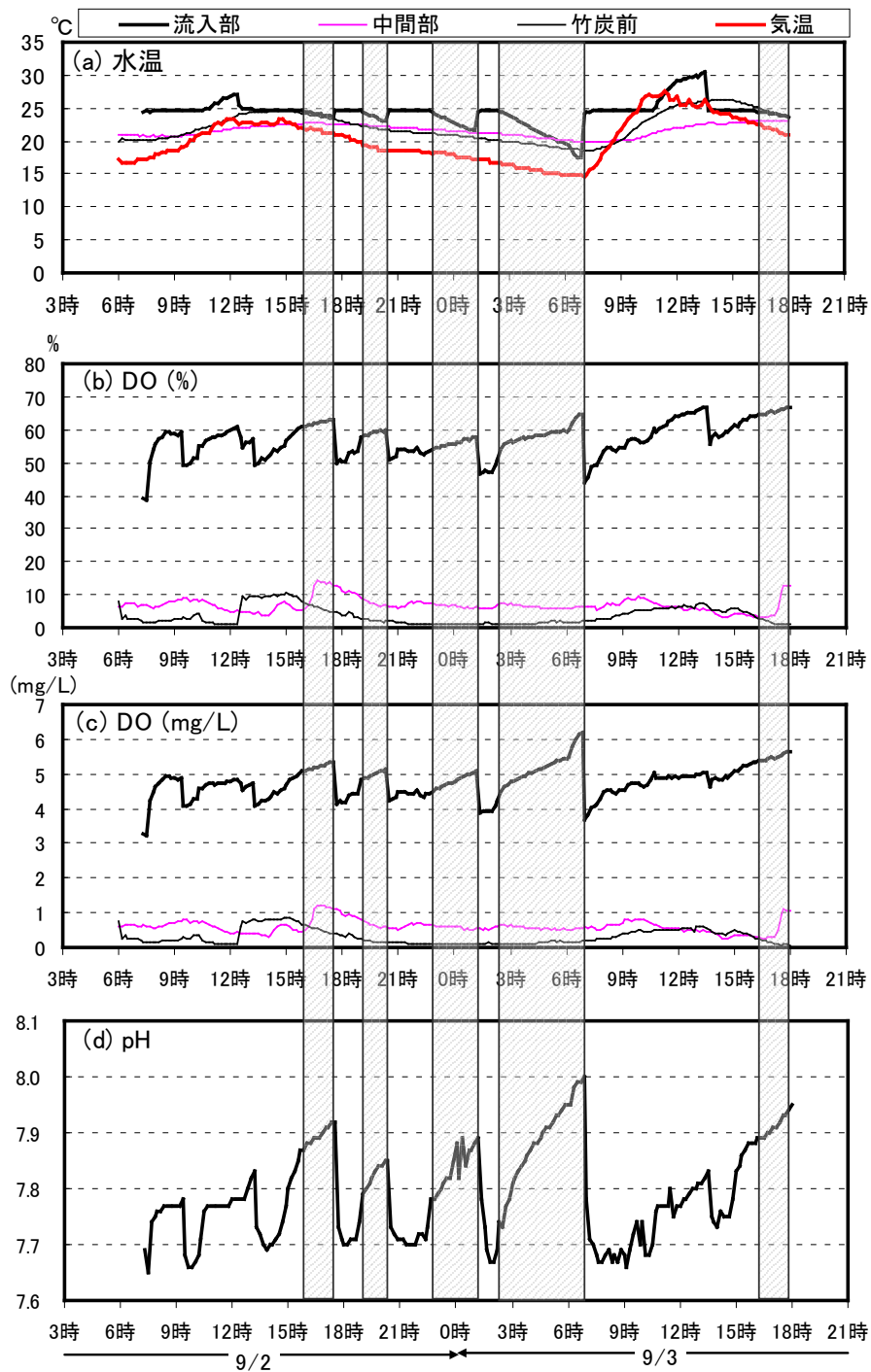


図 4-3 多項目水質計による水質の時間変動

(ハッチをした領域は、集落排水処理施設からの放流がない時間帯と考えられる)

4.4 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・流出部の3箇所における、窒素に関する栄養塩の分析結果を図4-4に示す。窒素に関しては、流入部では $\text{NH}_4\text{-N}$ 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いことが分かる。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。

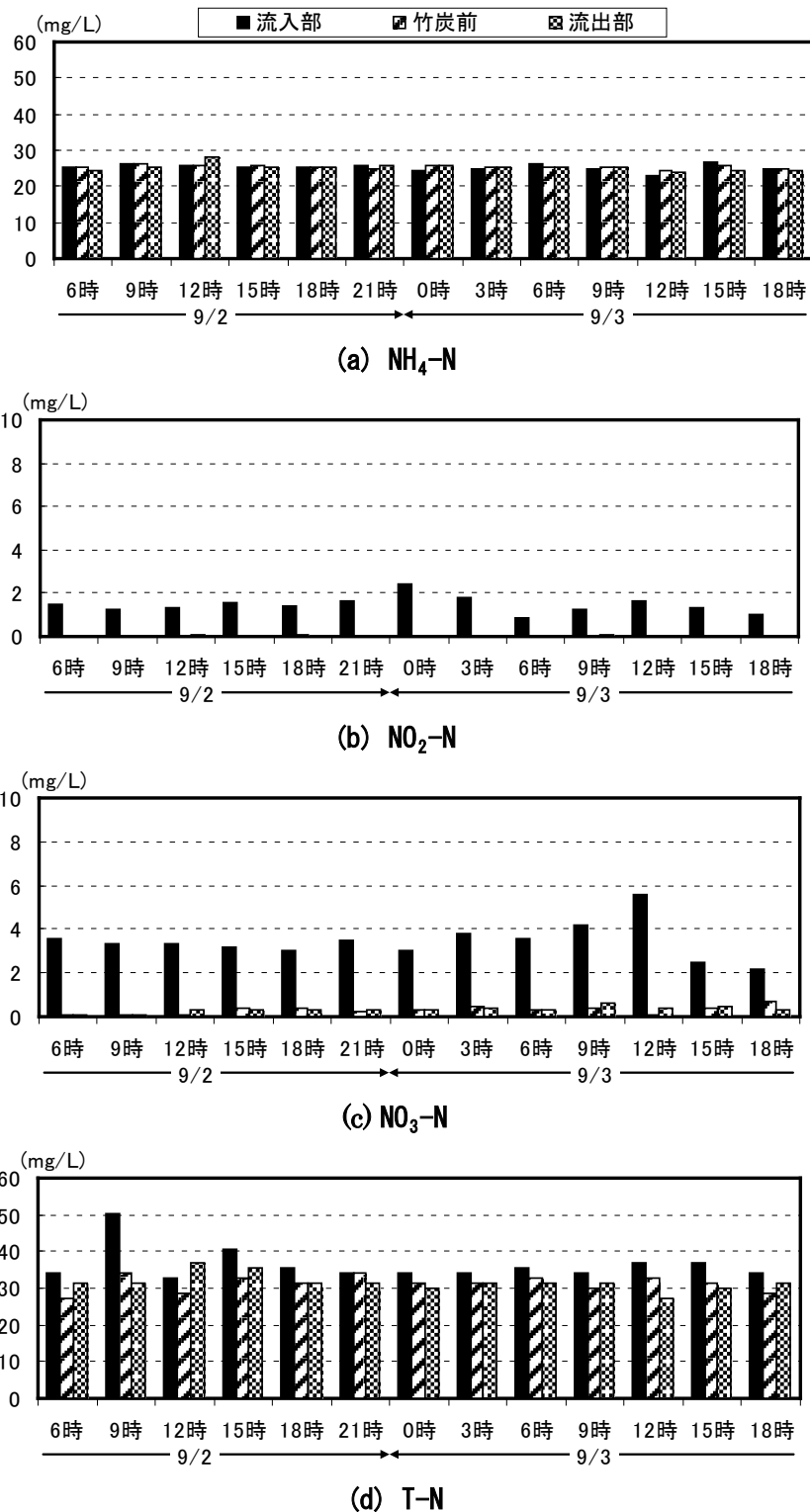


図4-4 窒素に関する栄養塩濃度の時間変化

次に、3 時間ごとに得られた流入部・竹炭前・流出部の 3 箇所における、リンに関する栄養塩の分析結果を図 4・5 に示す。リンについては、流入部において、 $PO_4\text{-P}$ で 1.5~4.2mg/L、T-P で 8.4~54.0mg/L と大きく変化しており、特に、有機態リンの変動が大きいことが分かる。有機態リンは、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、 $PO_4\text{-P}$ 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ないと考えられる。

このように平成 16 年度に行った連続観測結果からは、植生浄化能が影響と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、実験池における滞留時間が流量変化を考慮しない場合約 33 時間、流量が浸透により半減するのを考慮すると約 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な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植物による大きな栄養塩の吸収を期待できなく、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もなくなってきていることも影響していると考えられる。

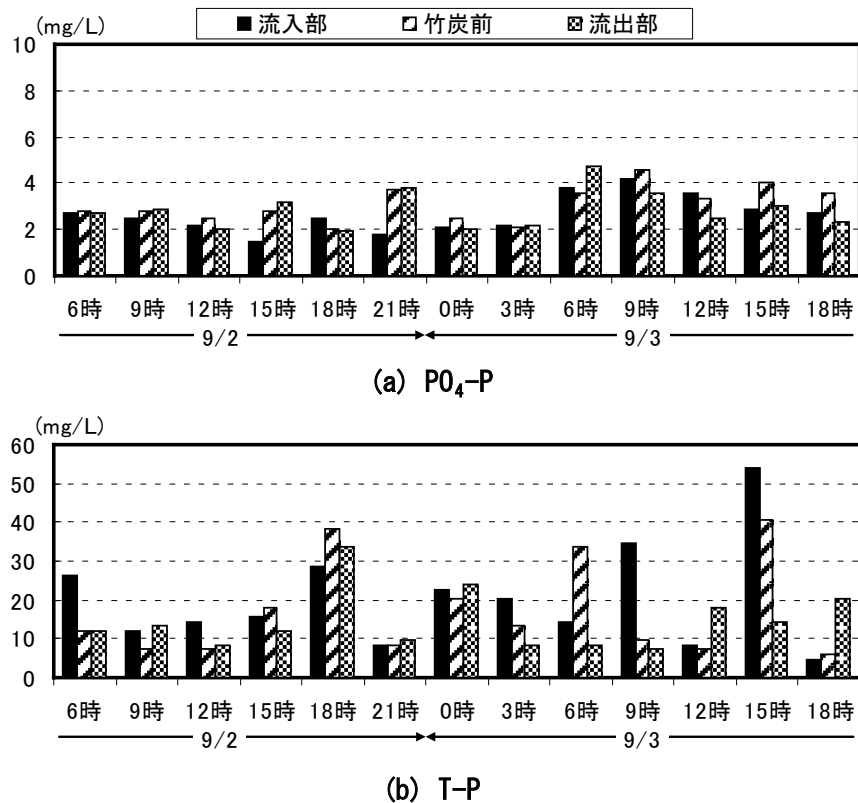


図 4・5 リンに関する栄養塩濃度の時間変化

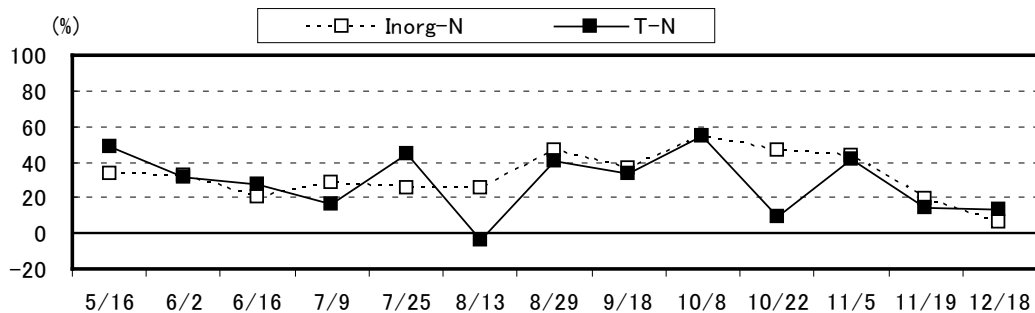
5. 休耕田を利用した植生浄化実験における栄養塩除去能の検討

5.1 休耕田における栄養塩除去

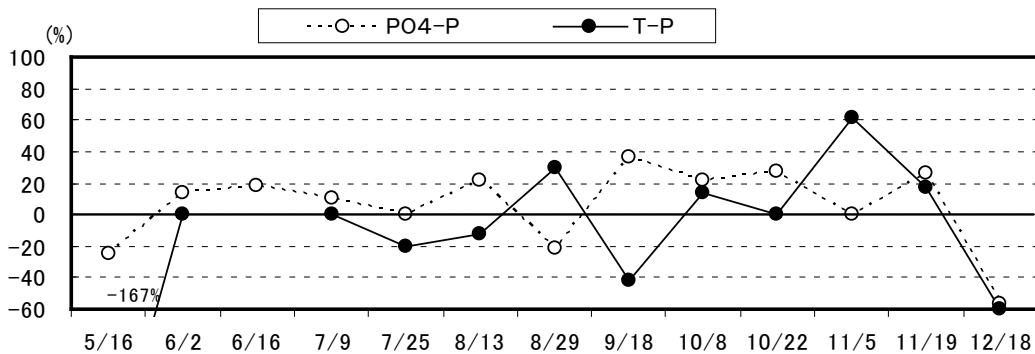
(1) 濃度変化からみた除去率

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4-6(a)に示す窒素に関しては、8月13日のT-Nを除きすべて正の除去率を示している。特に、10月8日にInorg-N：54.6%、T-N：54.2%と最大の除去率を示している。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きいと考えられる。

図4-6(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、T-Pから $\text{PO}_4\text{-P}$ を差し引いた有機態リン(Org-P)は、年間を通じた変動だけでなく時間的な変動も大きく、T-Nにはあまり含まれていない有機態の物質が、リンに関しては、集落排水処理施設からの放流時に高濃度に含まれていることがある影響ではないかと考えられる。最大の除去率は、9月18日の $\text{PO}_4\text{-P}$ ：36.8%、11月5日のT-Pが61.1%であった。また、平成15年度の平均除去率は、 $\text{PO}_4\text{-P}$ ：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-P：-14.9%であった。



(a) 窒素の除去率

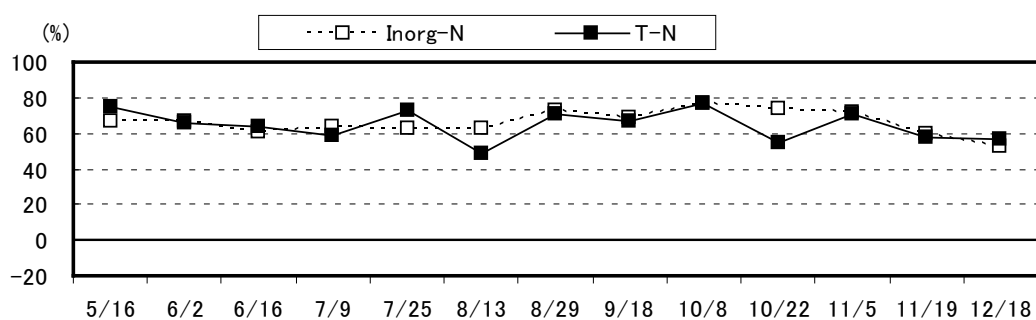


(b) リンの除去率

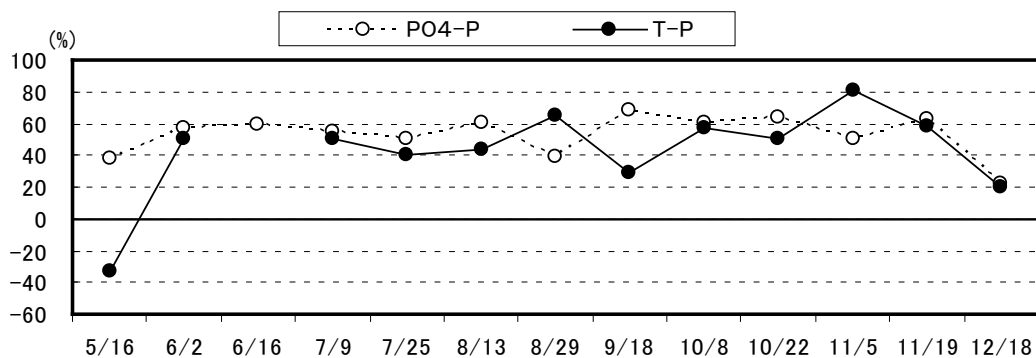
図4-6 濃度の変化からみた栄養塩の除去率

(2) 負荷量の変化からみた除去率

4章で述べたように、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る。ただし、処理水の流入量は、実測値では時間的変動が大きく代表性がないことから、役場で管理している1日ごとの処理施設への流入データを用い、流出部での流量は流入量の半分とした。また、栄養塩濃度は実測で得られた値を用いた。算定された栄養塩の除去率を、**図4-7(a)・(b)**に示す。窒素に関する平均の除去率は、Inorg-N : 66.1%、T-N : 64.9%であった。リンに関する平均の除去率は、PO₄-P : 52.8%、T-P : 42.6% (6月16日は除く)であった。



(a) 窒素の除去率



(b) リンの除去率

図4-7 負荷量の変化からみた栄養塩の除去率

(3) 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はInorg-N : 1.28 g/m²/day (流量変化を考慮しない場合 0.64 g/m²/day)、T-N : 1.60 g/m²/day (流量変化を考慮しない場合 0.73 g/m²/day)。リンに関する平均の除去速度は、PO₄-P : 0.15g/m²/day (流量変化を考慮しない場合 0.02 g/m²/day)、T-P : 0.32g/m²/day (流量変化を考慮しない場合 0.01 g/m²/day) (ただし、6月16日は除く)であった。

この除去速度は、栄養塩の除去に優れているとされているホテイアオイのT-N : 0.5~1.6g/m²/day、T-P : 0.1~0.3 g/m²/day⁸⁾と同程度の浄化能力が得られている。

5.2 植物による栄養塩除去

植生浄化の作用としては、①沈殿の効果、②土壌の効果（脱窒・吸着・分解等）、③植物の効果、④負の効果（土壌・植物からの回帰）がある¹⁰⁾。その中で、③の植物による効果についても、植物による吸収のほかに、植物の存在による接触沈殿効果などがある。ここでは、植物による吸収からみた栄養塩除去を、実験に用いた植物の中で最も大きなバイオマスとなるヒメガマに着目して検討を行う。

3章における検討で1m²当たりのヒメガマの窒素・リンの含有量が求められている。調査を開始した5月16日からヒメガマの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300m²における吸収量を、実験池の植生面積850m²における平均的な吸収量に換算すると、窒素：2.2g/m²/day、リン：0.12 g/m²/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-N：2.5g/m²/day、T-P：0.61 g/m²/dayである。したがって、ヒメガマの最成長期には、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 4-6**や**図 4-7**に示したヒメガマの成長期の窒素やリンの除去率は、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、土壌に浸透・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。

5.3 竹炭による栄養塩除去

竹炭には水質浄化の効果があるといわれている。竹炭は多孔質といい無数の穴を持っているため、そこに微生物が着生し、有機物の臭いの元になる不純物を始め、有害な化学物質を分解する。水質浄化に利用すると、有機物等の汚染物質が減少するといった効果が期待される。

本実験においても竹炭による浄化を期待したが、**図 3-10**、**図 3-11**から竹炭による浄化はほとんどみられなかった。特に6月6日のT-Pにおいては竹炭ゾーンにおいて大きく濃度が上昇する結果となっていた。これは、竹炭ゾーンに竹炭の様子が見えないほど藻が繁殖しており、そこから有機物質が流出したからであると考えられる。このように本実験施設では、竹炭による浄化効果がないばかりか、水質を逆に悪化させる原因にもなっていた。今後、藻の繁殖を防ぐためには、水面を覆って日射を遮断するなどの対策が必要と考えられる。

6. おわりに

本研究では、鳥取県八頭郡智頭町芦津において、平成13年度から行っている休耕田を利用した農業集落排水処理水の植生浄化実験について、現地調査を中心に行いその植生浄化能力などについて様々な角度から検討を行った。本研究で得られた成果をまとめると以下のようになる。

- 1) 本実験施設は、地元住民の要望にもとづいて始められたものであり、これまで4年間、大学等がその運営をサポートしてきた。その結果現在では、地元住民だけで運営管理できる恒久的な水質浄化施設とすることができた。今後は、ヒメガマを利用する地元のガマ工芸保存会の会員を中心として運営される予定である。また、現地において、毎年1回のペースで4年の間、地元だけでなく流域住民に対する水環境学習イベントを実施し、一般住民に水環境の大切さを伝える重要な施設としての機能も果たすことができた。
- 2) 植生浄化実験を開始して2年目が一番大きな浄化効果を得ることができた。しかしこれは、土壌への吸着効果による影響が大きく、実験を開始して4年経過した現在では、その効果はほとんど無くなっていると考えられる。また、負荷量の減少という観点からみた場合、土壌へ流量の半分程度が浸透し減少していることによる浄化効果は大きく、今後も本施設において窒素やリンの50%程度以上の除去率が期待できる。さらに窒素については、脱窒作用があるため、リン以上の浄化効果が見込める。
- 3) 本実験で用いた植物の中では、ヒメガマのバイオマスが一番大きく、これによる栄養塩の吸収が一番大きい。しかしながら、ヒメガマのバイオマスオスの増加は6月頃までしか期待できなく、一年を通して安定した植物による栄養塩の吸収効果は期待できないことが明らかとなった。さらに、実験池における水質分析結果から、ヒメガマの生長は、水中の栄養塩から吸収するのではなく、すでに浸透し、土壌あるいは土壌間隙水中に存在するものを利用して可能性が高く、実験池を流下する処理水の栄養塩除去という観点からは必ずしも効果がないことがあきらかとなった。

謝 辞

本研究を行うにあたり、鳥取県智頭町役場からは貴重な実験フィールドを提供して頂いただけでなく、農業集落排水処理施設の流入量等に関するデータも提供して頂きました。また、年1回現地で開催したイベント時には、多大な便宜を図って頂きました。さらに、本実験の準備段階から現在まで、芦津集落を始めとする多くの智頭町民の方々や、千代川流域圏会議（事務局：国土交通省鳥取河川工国道事務所河川管理課）の皆様には、様々な形で協力して頂きました。

現地調査および分析は、鳥取大学工学部土木工学科水工学研究室および農学部生物資源環境学科生物環境化学研究室内の学生諸氏の協力を得ました。また、研究を開始するにあたり、鳥取大学道上口学長のご助言を頂きました。

ここに記して、研究にご協力いただいたすべての方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) 財団法人河川環境管理財団河川環境総合研究所 (2000) : 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.
- 2) 矢島啓・前橋登志行他 (2002) : 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.
- 3) <http://www.tottori-mlit.go.jp/conference/>.
- 4) 矢島啓・吉川栄・末継洋子 (2003) : 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.
- 5) 宗宮功編著 (1990) : 自然の浄化機構, 技法堂出版, pp.69-70, pp.136-138.
- 6) 渡辺義人・桜井善雄 (1988) : 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」(沿岸域の生態系の構造と機能ならびに環境保全), pp.26-37.
- 7) 村山登・平田熙・矢先仁也・但野利秋・堀口毅・嶋田典司・前田乾一共著 (1984) : 作物栄養・堆肥学, 文永堂出版, pp.57-60.
- 8) 田淵俊雄・千賀裕太郎他 (1994) : 地球環境工学概論, 文永堂出版, p.110.
- 9) 陽捷行(編著) (1998) : 環境保全と農林業, 朝倉書店, pp.64-77.
- 10) 財団法人河川環境管理財団河川環境総合研究所 (2002) : 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.

現地写真集



写真 付-1 芦津植生浄化実験場



写真 付-4 流入部



写真 付-2 奥山形農業集落排水処理施設



写真 付-5 竹炭ゾーン



写真 付-3 実験池全景(7月9日)



写真 付-6 流出部



写真 付-7 実験地の全景

写真 付-8 ヒメガマ



写真付-9 ハス

写真付-10 スイレン



写真付-11 カツバタ

写真付-12 キショウブ



写真 付-13 ショウブ

写真 付-14 ガマ