

接触酸化水路と植生浄化水路における 水質浄化効果と付着藻類の消長について

THE PURIFICATION EFFECTS AND EPIPHYTIC ALGAE INVESTIGATION BY ON-SITE TWO CHANNELS WITH PLANTS AND CONTACT OXIDATION MATERIALS

津田将行¹・尾島勝²
Masayuki TSUDA, Masaru OJIMA

¹正会員 博(工) 福山大学助手 工学部建設環境工学科 (〒729-0292 広島県福山市学園町一番地三蔵)

²フェロー会員 工博 福山大学教授 工学部建設環境工学科 (〒729-0292 広島県福山市学園町一番地三蔵)

This study is one of the on-site experiments on purification of the polluted river-water. The experimental channels were constructed in the Takaya river course which is one of the downstream branch of the Ashida river. In this study, three channels which 60m long, 1m deep and 1m wide were used by reeds, coal-ash grains, and nothing paved. The river water is conducted into 3 channels by pumping during about 6 months, from May to October, 2004. The purification effects were estimated by several items of water quality and biological index, at three points so as upstream ①, midstream ③ and downstream ⑤ in each channel.

In this paper, items such as characteristics of nitrogen and phosphorus were especially considered from both particle component and the dissolved component. Epiphytic algae were evaluated due to those population density, appearance genera, etc.

Key Words : Contact Oxidation Materials, Plant Experiment, Purification of Water Quality, Epiphytic Algae

1. はじめに

近年、河川の有機物汚染の指標であるBOD基準値の達成率は全国で8割以上となり水質は大きく改善されている。一方、湖沼や内湾等の閉鎖性水域での有機物汚染の指標であるCOD基準値の達成率は低く、特に湖沼での達成率は約4割と低い。閉鎖性水域においては河川から窒素やリンなどの栄養塩類が流入し、滞留時間が長くなることで浮遊性藻類が異常増殖し、CODの上昇を招くとともに富栄養化現象が認められ、その対策として閉鎖性水域では栄養塩類の規制がされている。

しかし都市型河川では、富栄養化現象などの問題が顕在化しにくいことから、栄養塩類の規制がなされずに、河道内で生物が利用する量をはるかに超える余剰な窒素やリンが流下しており、河川での栄養塩類に関しては動態把握、流出やその制御、さらには除去や浄化に関する課題が残されている¹⁾。

著者らは後述する現地実験水路において、接触酸化法では処理水質の特性、浄化効果の持続性、堆積汚泥特性、

そして生物群の特性の評価・検討を行い²⁾、また植生浄化法では水質浄化能、水路内に生息する生物群の量や種の遷移過程について評価や検討を行ってきた³⁾。しかし接触酸化法と植生浄化法の浄化効果の同じ水理条件の下での検討はまだ行っていない。

本研究では、汚濁度の高い対象河川の河道敷内に大型実験水路を設け接触酸化法と植生浄化法による水質浄化実験を同時に行い、水質浄化能の比較や浄化効果の検討を行う。また各水路壁面に付着する付着藻類の現存量や種構成を調査し、水路相違による現存量や種構成の変化や水質との関係について評価を行う。

2. 実験および調査概要

実験水路は芦田川左支川高屋川の河道内左岸に既設の全長60m、幅1m、高さ1mの防水コンクリート製(水路勾配: 約1/1200)が3水路並行してあり、各水路間は1mである。図-1に実験水路緒元および実験水路写真を示した。岸側を接触酸化水路(以下、石炭灰水路と表す)、川側を

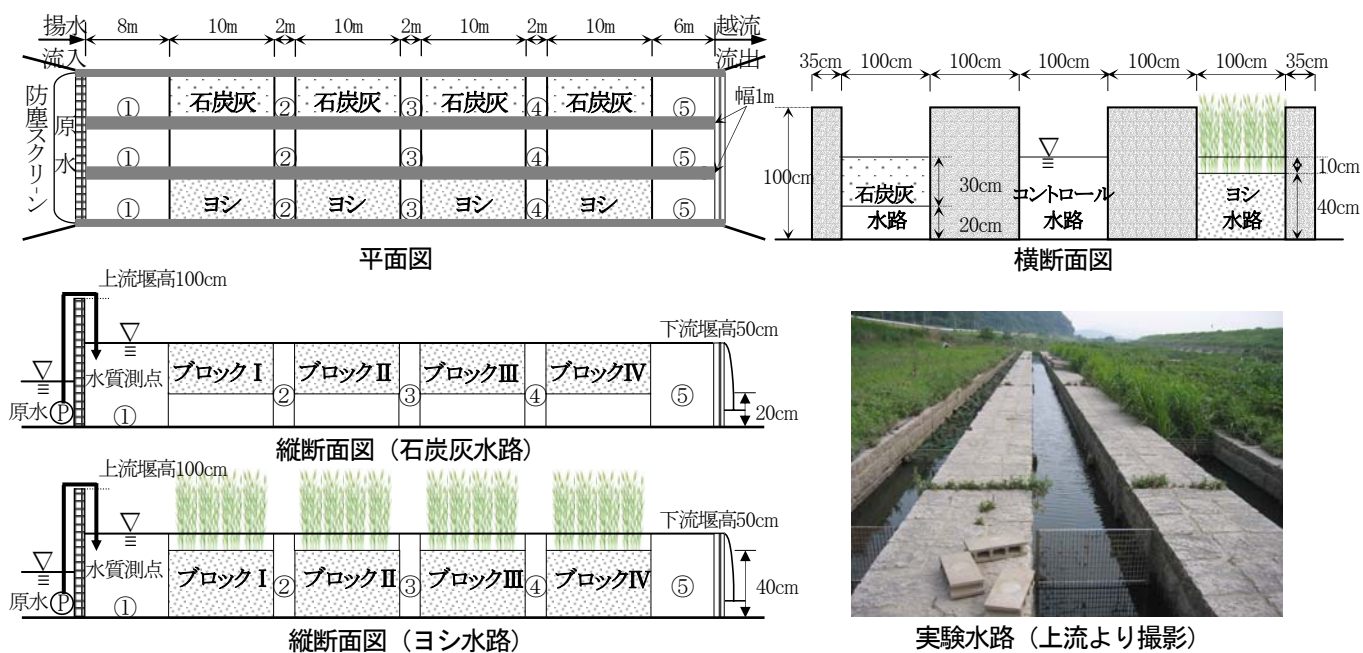


図-1 実験水路緒元および実験水路写真

ヨシ植栽水路(以下、ヨシ水路と表す)とし、中央は他の2水路と等量を通水するだけの比較対象のコントロール水路とする。

石炭灰水路とヨシ水路については、それぞれ10mを1ブロックとし、1水路当たり4ブロックを設け、そこへそれぞれ石炭灰敷設およびヨシ植栽をしている。以下に各水路の設置状態を示す。

石炭灰水路の石炭灰は、火力発電所から排出された石炭灰を有効活用したPFBC灰(加圧流動床灰)粒状物を使用する。PFBC灰の主要な化学組成は SiO_2 が44.3%、 CaO が24.9%、 Al_2O_3 が12.5%でありこの3種で約8割の成分を占めており、PFBC灰は室内実験によりリンの吸着、溶出防止等の効果が確認されている⁴⁵⁾。

その石炭灰水路は発生汚泥を水路底部へ堆積させるために各ブロックに高さ20cmの木製のサナを設置した。その上に1袋約15kgの石炭灰を幅1mに対し3袋、1ブロック10m区間に32～35列を2段積みとして敷設した。各ブロックの単位面積当りの平均重量は 304.2kg/m^2 、平均空隙率は46.6%である。

ヨシ水路は著者らが現地近くのものを2001年に移植し毎年初夏から晩秋にかけて水質浄化実験を行い、初冬には各ブロックの全てのヨシの刈取りを行っているものをそのまま続けて使用する。ヨシ移植時の初年度の初期条件は、現地河川砂州の砂質土を各ブロックに厚さ40cmで敷き、そこへ5～10本を1株として、 1m^2 当り5～8株、1ブロック当り70～80株を植え付けた。

実験期間は2004年5月から同年10月までである。3水路とも上流堰高1m、下流堰高(水路水深)約0.5mであり、通水は5月26日から各水路に $1.7\text{m}^3/\text{hr}$ ($28.3\text{l}/\text{min}$)を水中ポンプにより連続流入させて自然流下している。この時の平均滞留時間は石炭灰水路：約11時間、コントロール水

路：約16時間、ヨシ水路が約8時間となる。

水質に関しては、調査測点は各水路内の最上流部測点①、水路中央部測点③、最下流部測点⑤とし、調査項目は現地で水温、pH、DO、電気伝導度(EC)、濁度を測定した。採水したサンプルは速やかに実験室に持ち帰った。また各水路の4つのブロック区間それぞれの中間地点において水面下約0.5mの水を減圧吸引により採水しその場で酸化還元電位を測定した。実験室では全窒素(T-N)、アンモニア性窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)、硝酸性窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)、亜硝酸性窒素($\text{NO}_2\text{-N}$)、全リン(T-P)、化学的酸素要求量(COD_Cr)を分析した。またサンプルをガラス繊維濾紙(Whatman社製 GF/B $1\mu\text{m}$)で濾過した濾過サンプルについてもT-N、T-Pを計測しており、それぞれ溶解性全窒素(D.T-N)、溶解性全リン(D.T-P)とした。

水質調査および分析は6～7月は現地観測を週1回の計8回、採水分析は2週間に1回の計4回、8～9月は現地観測、採水分析ともに月2回、10月は現地観測、採水分析ともに月1回である。また酸化還元電位については8月19日から測定を始め、それ以降は現地観測に合わせて測定した。

付着藻類の調査測点は水質調査測点と同測点の①、③、⑤であり、調査日は通水開始後の2週目、6週目、10週目、15週目、19週目の6月9日、7月7日、8月9日、9月13日、10月6日に行った。調査方法は各測点の水路壁面の 100cm^2 ($10\times 10\text{cm}$)内を金ブラシで強く擦り落とし採取し、ホルマリン(5%)で固定し、その一部を酸処理、珪藻同定用試料とし、種の同定及び計数を行った。生物調査及び分析は(株)日本総合科学に委託した。

3. 通水期間中の実験水路流況

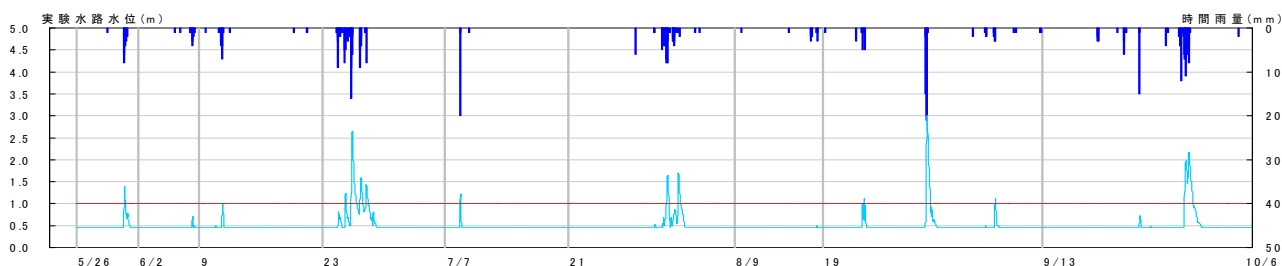


図-2 実験水路水位(左軸目盛)と雨量観測データ(右軸目盛)

図-2には1時間毎の実験水路水位データ(計算値)と対象域である福山の時間雨量を示した。

実験水路水位データ(計算値)は、2004年5月から同年10月まで本実験水路において植生浄化実験を行った時に自記連続水位計より計測したデータの実験水路の下流堰高を超えた時の水位と、その時の実験水路より約1km上流にある国土交通省の御幸流量観測所の河川の時間水位データを用いて実験水路水位相関式を作成したもの³⁾に今回の実験期間中の御幸流量観測所の時間水位データを代入して求めたものである。

前述したように実験水路の平常水位は下流堰高の約0.5mに制御されている。図中の水路水位が0.5mから1mまでは河水水が水路下流堰板を超えて逆流している状態であり、水路水位が1m以上は河水水が水路上流堰板を越え、実験水路は完全に冠水状態である。

実験水路水位が1m以上の冠水時間と出水履歴を月別にみると5月は4時間の1回、6月は1時間と35時間の2回、7月は1時間の1回、8月は15時間、2時間および14時間の3回、9月は2時間と24時間の2回と台風による出水が多く、10月は無冠水であった。

4. 水質調査結果および考察

(1) 水質項目に関する考察

図-3には水温、DO、pH、電気伝導度の原水と各水路の最下流測点⑤における時系列変化を示した。また酸化還元電位については各水路の平均値を示した。

水温は、原水貯留池水深はおよそ30cmと浅いために他の測点より若干高い値を示す。直接射光のコントロール水路と光が届きにくいヨシ水路の水温差はあまりなく、全期間についてみれば6月から7月28日まで上昇傾向であり、それ以降は低下傾向であった。

DO、pH、電気伝導度についてみると、石炭灰水路の変化は他の測点に比べて顕著な相違が現れていることがわかる。すなわち石炭灰水路についてDOは貧酸素状態に近い状態であり、またpHや電気伝導度の値は他測点より高いことがわかる。光合成が活発なときにはpH値が高くなることがあるが⁶⁾、石炭灰を使用した室内実験においても石炭灰を使用しない場合に比べてpHが高い値をしていること⁴⁾や電気伝導率の値が高いから、光合

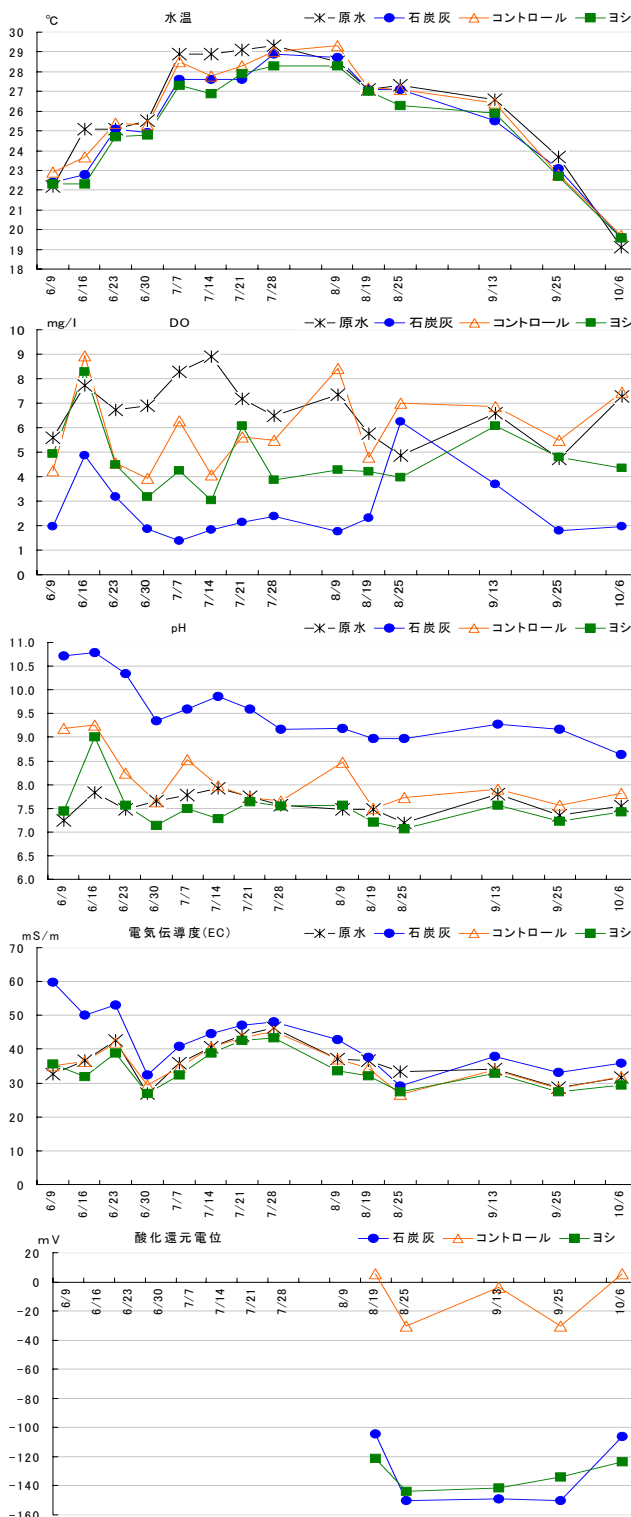


図-3 現地観測結果の時系列変化

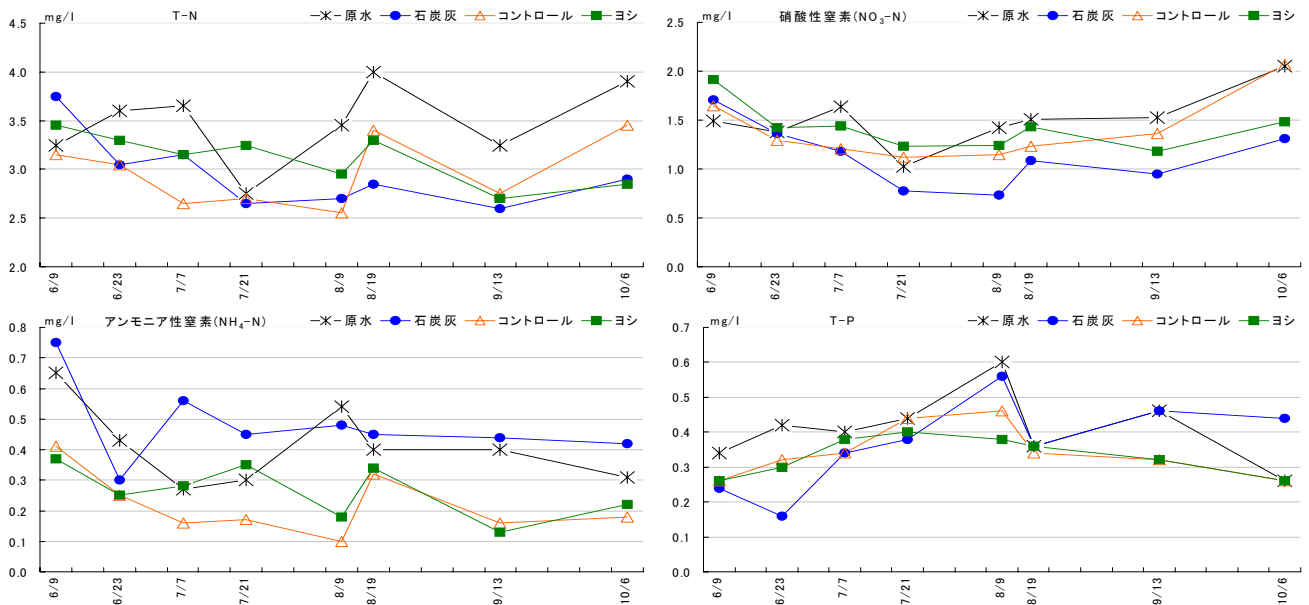


図-4 水質分析結果の時系列変化

成作用よりも石炭灰からの溶出が大きく、またDOについても光合成による酸素供給よりも分解などによる酸素消費の方が大きいものと推察できる。コントロール水路とヨシ水路のDOを比較するとコントロール水路内の方が高い値を示している。これは、ヨシ路内はコントロール水路内と比較して遮光効果などによって光合成作用はあまり活発でなく、また土壌表面での分解による酸素消費があるために低い値であると推察できる。

図-4にはT-N、NO₃-N、NH₄-N、T-Pの原水と各水路の最下流測点⑤の分析値の時系列変化を示した。

T-Nについて各水路を比較すると、3水路とも原水に比べて濃度値が低くなっており、特に8月9日まではコントロール水路が、8月19日以降は石炭灰水路の濃度値がそれぞれ低いことがわかる。すなわちこれらの時系列変化をみれば、8月以降ではいずれの水路においても高い除去率を示し、良好な浄化効果が発現していることがわかる。次に各形態別の時系列変化について述べる。NH₄-Nについては概してコントロール水路が他の水路と比較して低く、石炭灰水路は3水路で一番高く推移し、むしろ原水濃度値よりも高い値を示している。しかしNO₃-Nは石炭灰水路が他の水路よりも濃度値が低い。NH₄-Nの濃度値を高くする要因としては、動植物の死骸や排泄物の分解、底泥からの溶出などがあり、また濃度値を低くする要因としては硝化作用や藻類による摂取などが挙げられる。石炭灰水路内では後述する付着藻類の細胞数は他水路と比べてあまり大きな細胞数の差がないことからNH₄-Nは他水路と同程度の摂取はされていると推察できる。

しかし図-3に示したように石炭灰水路は他の水路に比べてDO値が低く、また接触材の下部は酸化還元電位は還元性であることから、硝化作用はあまり活発ではなく、付着藻類や植物プランクトンなどの生物に一度摂取され

たものが死骸となり分解され、NH₄-Nが溶出してきたと推察できる。

また石炭灰水路のNO₃-N濃度値が低いことは、石炭灰水路内が貧酸素や還元性状態にあることで脱窒作用の可能性が大きいものと推察できる。

T-Pについて、通水開始から7月21日までは石炭灰水路の濃度値が他水路に比べて低い値を示している。しかし8月9日以降は石炭灰水路の濃度値は原水濃度値とほぼ同値であり、また最終日の10月6日においては原水濃度値よりも高い値を示している。リンについては嫌気的な条件において水中に溶出するし、また好気的な条件でも底生生物の代謝や堆積した生物などの分解によって溶出することがあるので、この石炭灰水路ではどちらの要因が大きいかを推定することは困難であるが、現地実験よりPFBC灰による浄化効果の耐久性は約2ヶ月であった。またコントロール水路とヨシ水路を比較すると8月9日までには若干ではあるがヨシ水路の方が濃度値は低いことがわかる。しかし8月19日以降この2水路の濃度値はほぼ同値で推移しており、水路相違はあまり認められなかった。

5. 付着藻類の調査結果および考察

水路冠水状態(水路水位1m以上)から付着藻類の調査日までの経過日数を6月調査から10月調査までをそれぞれ順に示すと、8日後、8日後、6日後、5日後、6日後であり、水路冠水状態からの経過日数にはあまり差はない。

このときの水利条件は、断面平均流速：9.4×10⁻²cm/s、摩擦速度：4.5cm/s、フルード数：4.3×10⁻⁴、レイノルズ数：467であり、摩擦速度が4～5cm/sを超えると剥離率が増加する⁷⁾ことから本実験はちょうど剥離率が増加する限界であると考えられる。

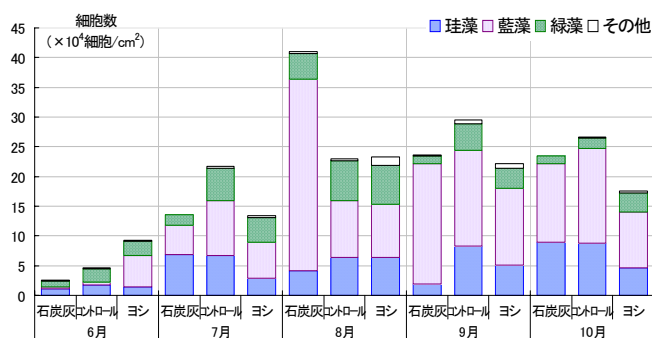


図-5 付着藻類の細胞数

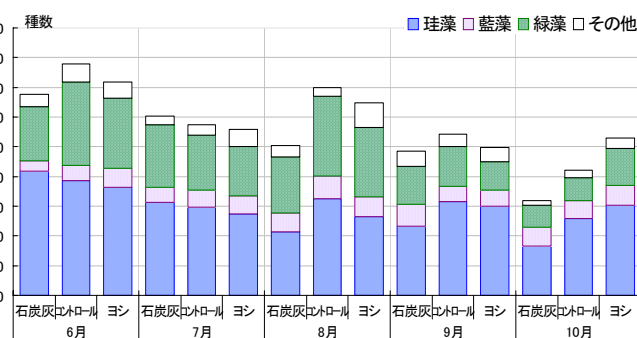


図-6 付着藻類の出現種数

(1) 細胞数, 出現種数, 優占種

図-5に網別平均細胞数を示した。3水路とも6月調査が最も少なく経時的にほぼ増加傾向にあり石炭灰水路とヨシ水路は8月調査、コントロール水路は9月調査が最大である。網別にみると6月調査においては石炭灰水路は珪藻綱、コントロール水路は緑藻綱、ヨシ水路は藍藻綱と各水路での優占綱に明瞭な相違が認められる。また7月調査においては石炭灰水路が6月調査と同様に珪藻綱、コントロール水路とヨシ水路では藍藻綱であった。しかし8月調査から10月調査までは3水路とも藍藻綱となり各水路の優占綱の差異や調査日の違いによる明瞭な相違はなくなった。

次に網別平均出現種数を図-6に示した。平均出現種数は平均細胞数とは逆の傾向を示していた。すなわち3水路とも6月調査が最も多く、経時的にほぼ減少傾向にありヨシ水路は9月調査、石炭灰水路とコントロール水路は10月調査が最少であった。網別にみると6月調査から10月調査まですべて珪藻綱が優占綱であり、出現種数については相違がないことがわかる。

優占種1位についてみると、6月調査では珪藻綱 *Fragilaria pinnata*, *Cyclotella* spp., 藍藻綱 *Homoeothrix varians*, 緑藻綱 *Coelastrum astroideum*, *Micractinium pusillum*などで各測点で網も種も異なっていた。7月調査は珪藻綱 *Nitzschia palea*, 藍藻綱 *H. varians*であった。しかし8月調査、9月調査および10月調査の優占種1位は全測点で藍藻綱であり、特に *H. varians* がほとんどの測点で優占種1位であった。このことより通水開始直後は各測点で優占種の相違が認められるが時間経過とともに優占種が均一化され、特に藍藻綱 *H. varians* は全調査日で優占種1位となっていた。

付着藻類の定着・繁茂する過程は、初期段階では細菌の被膜が形成された後、平面的に付着する珪藻綱が出現し、長い柄で付着する珪藻綱や、ロゼット状を呈する珪藻綱、さらに糸状性の緑藻綱や藍藻綱が主体の立体的な構造の群集へと遷移する⁹⁾。上記の *H. varians* は糸状性の藍藻綱である。図-7には各測点の付着藻類の細胞数に基づく糸状体の付着藻類の割合を示した。

6月調査の石炭灰水路とコントロール水路の糸状藻類

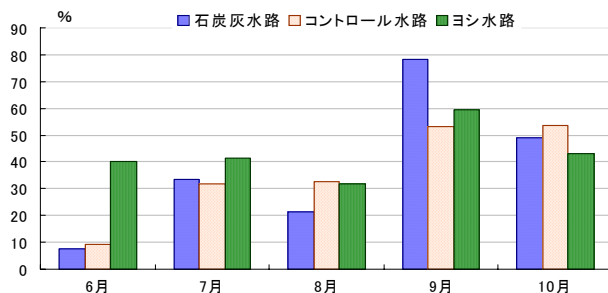


図-7 糸状藻類の割合

の割合は約10%と低いが、通水時間の経過日数が増えるにつれて占める割合が高くなっている。しかしヨシ水路は6月調査から8月調査までは割合の相違は認められないが、9月調査や10月調査においては3水路とも糸状藻類が40%以上と割合が高くなっている。Powerら⁹⁾は、出水前後では側面で付着する藻類等は出水によって流されやすいが、糸状体などの基部細胞をもつ種は、そこから伸びる仮足状突起でしっかりと石面に着生しているため、流されにくい等の違いがあるとしており、本実験においても通水日数が増えるにつれて、出水後においても糸状藻類の優占率が高いことが確認された。

(2) 付着藻類の増殖を支配する環境要因

付着藻類の消長に影響を与える因子としては水質(水温、有機物、栄養塩類)、付着基盤の種類・サイズや基盤面の位置、流速、光条件そして捕食者(魚類、底生動物)などが挙げられる。しかし本実験において付着基盤の種類・サイズや基盤面の位置、光条件については、各調査測点は開水路部であり、また付着基盤の種類は同じ花崗岩であり、付着藻類の各採取場所は各測点においてほぼ同じ水深から採取している。したがってこれらの要因によって各水路測点における細胞数、種類数などの群集構造への相違に影響があるとはあまり考えられない。よって以下においては各測点の細胞数と栄養塩類、特に溶存態の栄養塩類との関係について考察を行う。

図-8には付着藻類の細胞数と採取時のN/P比、無機態窒素(NH₄-NとNO₂-NとNO₃-Nの和)、およびD.T.Pとの関係を示した。

原水のN/P比の平均は9.1であり、一般的な微生物体内

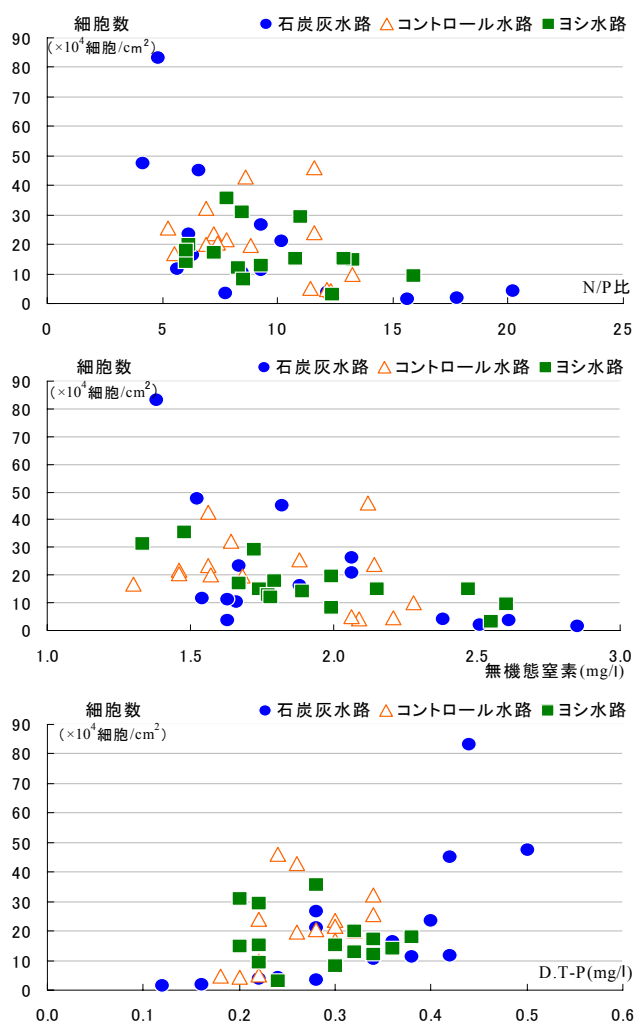


図-8 付着藻類の細胞数と栄養塩類の関係

の典型的なN/P比を表すRedfield(≈ 7.2)¹⁰⁾と比較すると8月調査と9月調査が窒素制限で、他の調査日はリン制限であった。

図に示すように全体的にN/P比が低い(窒素制限)ほど細胞数が多くなっており、特に石炭灰水路は他水路に比べN/P比や細胞数の範囲が広いことその傾向が顕著に認められる。また細胞数と無機態窒素やD.T-Pの図より無機態窒素の濃度値が増加すると細胞数は指数関数的に少なくなり、逆にD.T-Pの値が高くなると細胞数は指数関数的に多くなっていることがわかる。

6. まとめ

本研究より得られた知見を以下に示す。

1) 水質浄化効果については、石炭灰水路は他の水路と比較して、石炭灰からの溶出によりpHや電気伝導度の値は高い値を示す。DOはほぼ貧酸素状態で、河床は還元状態であることから、硝化作用によるNH₄-Nの浄化効果は認められないが、脱窒作用によりNO₃-Nの浄化効果

があり、8月下旬以降T-Nの浄化効果も認められる。T-Pについては、実験開始約2ヶ月間は浄化効果を示すが、それ以降はT-Pの溶出がみられる。ヨシ水路は水路流下によって原水濃度値よりも低い値を示すが、各水質項目とも他の水路ほどの浄化効果は認められない。

2) 付着藻類調査より3水路とも細胞数は通水時間の経過日数が長くなるにつれて多くなる傾向にあり、逆に出現種数は経過日数とともに少なくなっていた。出現していた藻の生活型は通水時間の経過日数が長くなるにつれて単細胞・群体型から糸状藻類へ変移していた。また付着藻類の細胞数はN/P比が低いとき、すなわち窒素制限ほど細胞数が多くなる傾向であり、特に石炭灰水路についてはその傾向が顕著に表れている。

参考文献

- 1) 大垣眞一郎監修/河川環境管理財団編：河川と栄養塩類-管理に向けての提言-、技報堂出版、2005。
- 2) 津田将行、尾島勝：礫間接触酸化法による強汚濁河川水の浄化効果に関する総合評価、水工学論文集、第47巻、pp1099-1104、2003。
- 3) 津田将行、尾島勝：現地河川での植生浄化水路実験による水質浄化効果と付着藻類・プランクトンの動態について、水工学論文集、第49巻、pp1537-1542、2005。
- 4) 樋野和俊ら：PFBC灰を利用した砂代替材の水質・底質浄化の活用(その1覆砂材への適用)、土木学会第59回年次学術講演会、5-196、2005。
- 5) 樋野和俊ら：PFBC灰を利用した砂代替材の水質・底質浄化の活用(その2リン吸着材への適用)、土木学会第59回年次学術講演会、5-197、2005。
- 6) 有田正光編著：水圏の環境、東京電機大学出版、1998。
- 7) 戸田祐嗣、西村明、池田駿介：糸状藻・非糸状藻の増殖・剥離・種間競争に関する室内実験、河川技術論文集、第10巻、pp483-488、2004。
- 8) アレキサンダー・J・ホーン、チャールズ・R・ゴールドマン著、手塚泰彦訳：陸水学、京都大学学術出版会、1999。
- 9) Power, M.E., and A.J.Stewart : Disturbance and recovery of an algal assemblage following flooding in an Oklahoma stream, American Midland Natural Naturalist 117,pp333-345,1987。
- 10) 楠田哲也編著：自然の浄化機構の強化と制御(第1章)、技報堂出版、1994。

(2005. 9. 30受付)