

# 高屋川における各期の河床付着生物膜の 繁茂特性と付着物組成との関連に関する実験

津田将行\*・尾島勝\*・竹澤克裕\*\*

FIELD EXPERIMENT ON GROWTH CHARACTERISTICS OF BIOMASS  
AND SEDIMENT COMPOSITION DURING FOUR SEASONS IN THE TAKAYA RIVER

Masayuki TSUDA, Masaru OJIMA, Katsuhiko TAKEZAWA

## ABSTRACT

This study is a field experiment in the Takaya river on growth characteristics of epiphytic Algae and sediment composition during four seasons. The Takaya river which a branch of the Asida river through in Fukuyama City is a heavy contaminated river.

In this paper, it is discussed that the growth characteristics of chlorophyll-a and pheophytin with about analysis of the time series change, and, in addition, discussed that the characteristics of sediment composition, such as, dry weight, ignition loss, organic matter and inorganic matter.

キーワード：クロロフィルa, フェオフィチン, 季節変化, 付着物組成, 現地実験

*Key Words : Chlorophyll-a, phaeophytin, Time series change, Sediment composition, Field experiment*

## 1. はじめに

本研究は、河川の自浄作用に係る実験的研究である。自浄作用の対象物質は、有機物、窒素、リンなど生物の栄養源でもある汚濁物質である。とくに都市河川や河口湖・湖沼などの閉鎖性水域では自浄能力を超える汚濁物質が存在し、汚濁が著しい。

本研究の対象河川である高屋川は一級河川芦田川水系の一  
支川であり福山市の下流域を流下している強汚濁河川である。

我が研究グループは、過去10数年にわたり芦田川河口域の水質改善に係る現地調査や実験を続けてきた。高屋川における水質の現状を数値的に示せば最下流基準観測点(横尾)の平成15年の平均値はBOD5.60mg/l, DO6.69mg/l, T-P0.268mg/lである。BODの汚濁負荷源は生活系が81%を占め、T-Pの汚濁負荷源は48%が生活系、47%が畜産系である。

本研究はこのような強汚濁水質条件の下に河川原水を直接導水して現地実験を行い、付着藻類の繁茂特性を季節的に比較考察し、河床付着物組成との関連についても分析検討する

ものである。

本研究を遂行するにあたり、参考にした論文を参考文献[1-7]に挙げておく。

## 2. 実験および調査概要

実験水路は高屋川が芦田川に合流する地点より約1.5km上流の左岸側河道内に平成6年に建設された大型原位置実験水路である。平成16年度まで実験目的や手法を少しずつ変えて、水質浄化に関する実験を行っている。

水路全長60m, 有効断面1.0m×1.0mの直線水路が3本並設され、各水路間は天端幅1.0mを実験作業スペースとして確保している。

本実験では図-1に示したように、岸側の水路2本を使用する。各水路の上流端、中央部、下流端にそれぞれ1.0m, 0.6m, 0.5mの堰板を設け、水路長30mの上流ブロックと下流ブロックに分ける。各ブロックの下流側堰板から2m離れて図のように木製架台(比重1.0)を4m設置し、その上にステンレス製のグレイチングを敷き、人工付着床とするレンガ(21cm×10cm×6cm)

\*建築・建設学科 \*\*大学院土木工学専攻

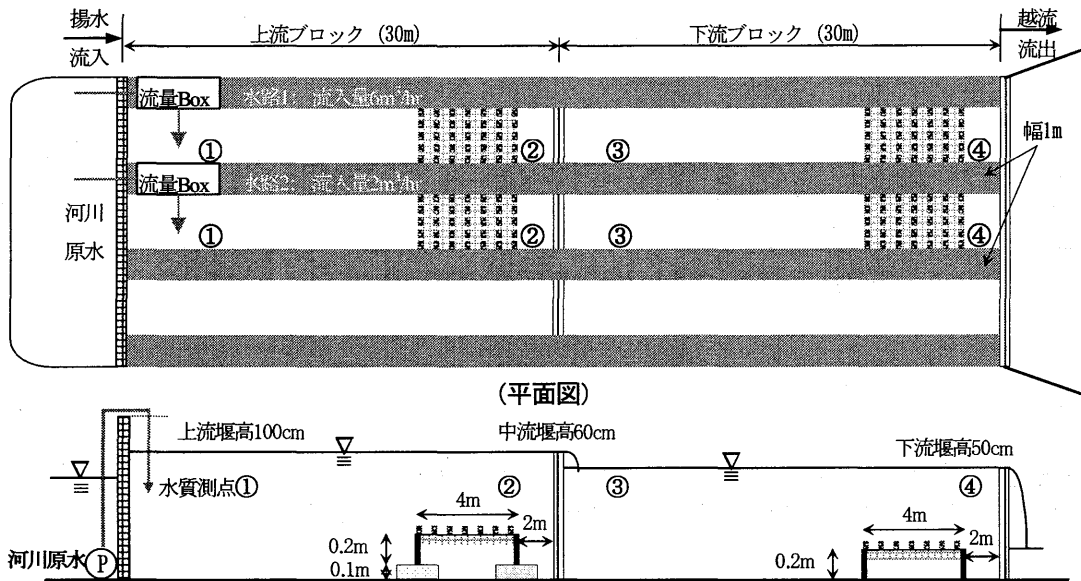


図-1 実験水路緒元 (縦断面図)

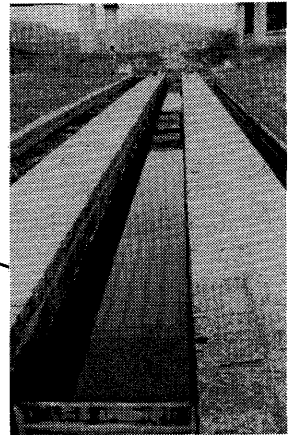


写真-1 人工付着床配置図

を写真-1のように5個×7列=35個を当間隔に置く。レンガ上面のみを実験面として使用し、上面までの水深が等しくなるよう上流ブロックでは10cmの脚台を設けた。

通水条件は水路1に6.0m<sup>3</sup>/hr(100l/min)、水路2に2m<sup>3</sup>/hr(33.3l/min)を水中ポンプ、流量制御ボックスを用いて定常導水する。

水質調査項目は、原水及び各水路ブロックの①～④の合計9測点で以下の水質項目を調査した。調査項目は現地水温、pH、DO、電気伝導度(EC)、濁度、酸化還元電位(ORP)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り浮遊物質(SS)、化学的酸素要求量(COD<sub>C</sub>)、全窒素(T-N)、アンモニア性窒素(NH<sub>4</sub>-N)、硝酸性窒素(NO<sub>3</sub>-N)、亜硝酸性窒素(NO<sub>2</sub>-N)、全リン(T-P)を分析した。またサンプルをガラス繊維濾紙(Whatman社製 GF/B 1μm)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。

本論文の主要考察対象は各ブロックの採取レンガの付着物であるから、上流ブロックをA、下流ブロックをBと記して、実験条件の異なる6A、6B、2A、2Bの4種の実験データとする。実験結果に大きく影響を及ぼすと考えられる各ブロックの平均滞留時間は6A:約3.0時間、6B:約2.8時間、2A:約9.0時間、2B:約7.6時間である。

実験期間は秋期:2005年10月14日～12月2日、冬期:2006年1月13日～3月3日、春期:2006年5月19日～7月7日のそれぞれ各7週間と、夏期:2006年7月28日～9月8日の6週間である。

レンガ付着物の調査項目と調査回数は、付着物乾燥重量、強熱減量及び無機物の分析を週3回、クロロフィルa、フェオフィチン及び付着藻類の種の同定・計数を週1回とした。

付着物乾燥重量、強熱減量及び無機物の分析は採取したレンガの表面(21cm×10cm)の付着物をブラシで擦取して、乾燥炉内(110℃)で乾燥させた後、乾燥付着物重量を測定する。また

乾燥付着物は電気炉を用いて燃焼させ強熱減量を測定する。また強熱減量計測後の炭化試料を0.4gとホウ酸リチウム(Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>)4gを混合・融解して作成したガラスビードを用いて蛍光X線分析装置(Rigaku ZSX100)により組成分析を行った。

クロロフィルa、フェオフィチン、付着藻類の種の同定・計測は現地においてレンガ上面をナイロンブラシで擦り落とし採取し、クロロフィルaとフェオフィチンについてはLorenzen法で分析を行った。種の同定・計測用の試料については、現地においてホマリソ(5%)で固定し、持ち帰った。持ち帰った固定試料から約10ml取り出し、濃硫酸を添加して酸処理を行った後、水洗して珪藻同定用の試料とした。珪藻は酸処理した試料を、その他の藻類は固定試料を400～1000倍で検鏡し、種の同定及び計数を行う。クロロフィルa、フェオフィチン、付着藻類の種の同定・計測分析は(株)日本総合科学に委託した。

### 3. 実験期間中の降雨量と河川流況

図-2には各期の1時間毎の実験水路水深(計算値)と福山雨量観測所(国土交通省)の時間雨量を示した。

実験水路水深は、実験水路より約1km上流にある国土交通省御幸流量観測所の河川水位データと実験水路水深との相関式を作成したもの[6]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用いて算出した。

実験および調査概要のところで記したように、実験水路の上流端、中央部、下流端にそれぞれ1.0m、0.6m、0.5mの堰板が設置されているので、平常時の水深は、上流ブロックが約0.6m、下流ブロックは約0.5mに制御されている。

秋期と冬期の流況は、河川水が上流堰を越える出水はなかったが、下流堰を越えて逆流する出水が秋期には1回、冬期には3回あった。その詳細を以下に示す。

秋期は11月11日に約8時間、その時の最高水深は0.89m。冬期は1月13日に約5時間、その時の最高水深は0.62m、2月26日

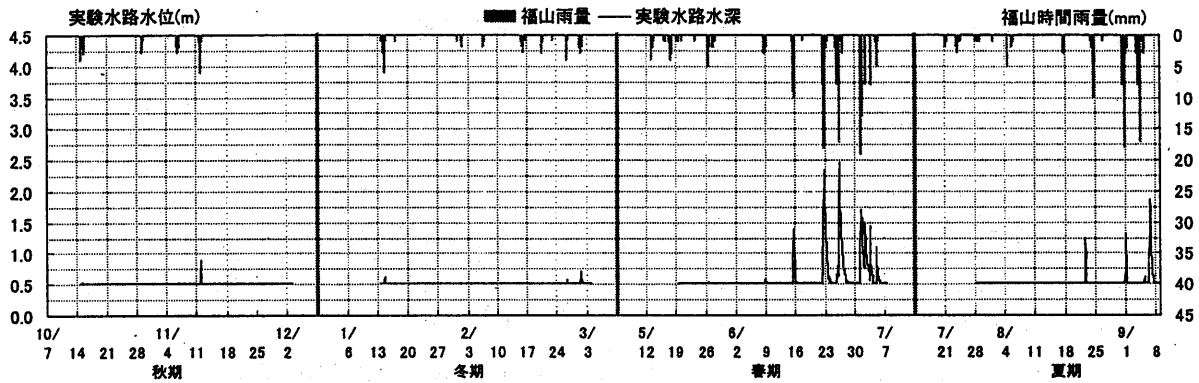


図-2 各期の実験水路水深(左軸目盛)と雨量観測データ(右軸目盛)の経時変化

に約2時間、その時の最高水深は0.59m、3月1日に約10時間、最高水深は0.72mであった。よってこれらの出水による付着物への強制的な剥離などの影響はあまり大きくないと判断した。

春期と夏期の流況は、河川水が上流堰を越える出水や下流堰を越えて逆流する出水があった。その詳細を以下に示す。

春期は6月8日に約6時間、その時の最高水深は0.58mとなり下流側から逆流していた。6月15日は約14時間、最高水深は1.41m、完全冠水状態は約7時間である。6月22日から23日までの約37時間は最高水深2.35m、完全冠水状態は約22時間である。6月24日は約9時間、最高水深0.62m、下流側から逆流していた。6月25日から27日までの約53時間は最高水深2.47m、完全冠水状態は約21時間である。7月1日から4日までの約72時間は最高水深1.72m、完全冠水状態は約27時間である。7月4日から5日までの約21時間は最高水位1.12m、完全冠水状態は約2時間である。

夏期は8月22日に約4時間、最高水深1.24m、完全冠水状態は約3時間である。8月31日は約12時間、最高水深1.33m、完全冠水状態は約5時間である。9月5日は約3時間、最高水深0.62m、下流側から逆流していた。9月6日から7日の約24時間は最高水深1.86m、完全冠水状態は約12時間であった。

よって春期と夏期における完全冠水状態は春期に5回、夏期に3回、下流から逆流だけの出水は春期に3回、夏期に1回あった。両期ともに通水期間の後半に降雨出水による冠水や逆流の生起回数が多かった。

#### 4. 付着藻類に関する考察

藻類の繁茂特性を明らかにする指標であるクロロフィルaとフェオフィチンについて比較考察する。クロロフィルaはすべての高等植物及び藻類に含まれている色素で、藻類現存量の指標となるものである。またフェオフィチンはクロロフィルaの分解産物で、死滅している藻類の指標になる。

クロロフィルaとフェオフィチンの調査日は、7日毎に行っていたが、春期の35日目となる6月23日は出水であったため中止し、その代わりに河川流況が平常となった40日目の6月30日に調査を行った。

#### 4.1 秋期と冬期のクロロフィルaとフェオフィチン

クロロフィルaの各期の経時変化を図-3に示す。秋期の各ブロック間を比較すると、21日目までは4ブロックとも大きな差異はなくほぼ同値で増加しており、21日目の4ブロックの付着量は18~21 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の範囲内であった。しかし28日目以降から実験終了時までには4ブロックで明確な差異が生じている。すなわち、6Aと6Bはそれまでとほぼ同じ勾配で増加しており、35日目以降では6Aよりも6Bの方が付着量は多く、49日目に6Aが57 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、6Bが67 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ と両ブロックとも最大値となった。2Aについてみれば6A、6Bに比べてその増加勾配は緩く、42日目に最大値48 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ となり、49日目では付着量は減少し33 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ であった。さらに2Bについてみれば28日目が最大値34 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ であり、それ以降は急激に減少し49日目には11 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ を示している。

次に冬期の経時変化について各ブロック間を比較すると、35日目までは4ブロックとも大きな差異はなくほぼ同形の増減変化をしており、若干ではあるが流入量の少ない水路2の2A、2Bよりも流入量の多い水路1の6A、6Bの方がやや高い値で増加しており、35日目の4ブロックの付着量は10~15 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の範囲内である。しかし42日目では6Aが27 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、6Bが20 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、2Aが21 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ および2Bが14 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ と約15 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の差異が生じており、両水路とも下流ブロックよりも上流ブロックの方が高い値を示し、この時に2Bを除く3ブロックが最大値となった。49日目では6Aが14 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、6Bが10 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、2Aが21 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ および2Bが21 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ であり、流入量の多い6A、6Bで7日前に比べて約10 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ と大きく減少しており、2Aは若干減少となったが、2Bについては増加しこの時が最大値となった。

次にフェオフィチンの各期の経時変化を図-4に示す。

秋期のフェオフィチンの各ブロック間を比較すると、クロロフィルaの経時変化と同様に21日目までは各ブロックに大きな差異はなく増加しており21日目の4ブロックの値は4~5 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ を示した。しかし28日目以降から実験終了時の49日目までについては4ブロックで明確な差異が生じており、この4ブロックの明確な差異はクロロフィルaの経時変化と同形の変化を示している。

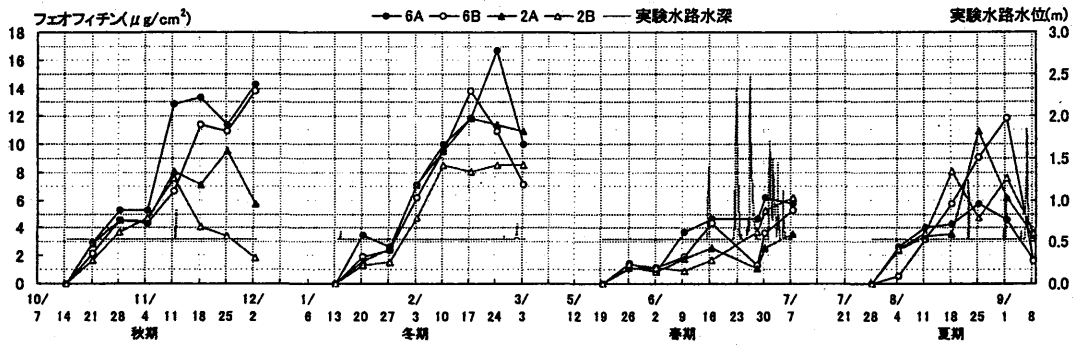


図-3 各期のクロロフィルa(左軸目盛)と実験水路水深(右軸目盛)の経時変化

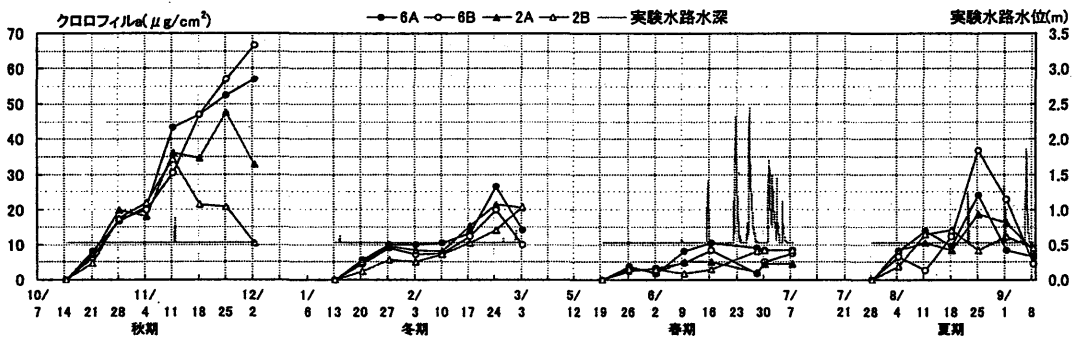


図-4 各期のフェオオフィチン(左軸目盛)と実験水路水深(右軸目盛)の経時変化

すなわち、28日目以降は6Aでは $13\sim 14\mu\text{g}/\text{cm}^2$ と4ブロックで最も高い値で推移している。また6Bは28日目以降もほぼ一定の勾配で増加し、49日目では6Aとほぼ同じ $14\mu\text{g}/\text{cm}^2$ と最大値となっている。2Aについてみれば28日目は $8.1\mu\text{g}/\text{cm}^2$ であり、42日目に最大値 $9.5\mu\text{g}/\text{cm}^2$ を示すが、49日目には $5.7\mu\text{g}/\text{cm}^2$ へと減少している。さらに2Bについてみれば28日目が $7.6\mu\text{g}/\text{cm}^2$ と最大値であり、それ以降はクロロフィルa量と同じく一様の減少傾向を示し、49日目は $1.9\mu\text{g}/\text{cm}^2$ であった。

次に冬期の経時変化について各ブロック間を比較する。冬期のクロロフィルaの経時変化は、35日目までは4ブロック間とも大きな差異はなくほぼ同形の増加傾向を示していたが、冬期のフェオオフィチンの経時変化については、クロロフィルaよりも7日早い28日目までは4ブロックとも大きな差異はなくほぼ同形の増加傾向を示している。また4ブロックの増加率を比較するとクロロフィルaの経時変化と同様に若干ではあるが流入量の少ない水路2の2A、2Bよりも流入量の多い水路1の6A、6Bの方がやや高い値で増加傾向であり、28日目の4ブロックの値は $8\sim 10\mu\text{g}/\text{cm}^2$ であった。

35日目以降については、各ブロックの変動は大きく異なっている。すなわち6Aでは42日目まで増加を続け、この時に最大値 $16.5\mu\text{g}/\text{cm}^2$ となったが、最終日の49日目では $10\mu\text{g}/\text{cm}^2$ に急減している。また6Bでは35日目に最大値 $13.5\mu\text{g}/\text{cm}^2$ となり、それ以降は減少しており最終日の49日目では $7\mu\text{g}/\text{cm}^2$ にまで急減傾向であった。一方、流入量の少ない2Aでは35日目に最大値 $12\mu\text{g}/\text{cm}^2$ となり、それ以降は漸減傾向にあり49日目には

$11\mu\text{g}/\text{cm}^2$ であった。2Bについては28日目以降 $8.1\sim 8.6\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の範囲内でほぼ一定量である。

付着藻類の生長に影響を与える因子としては水温、有機物や栄養塩類などの水質、付着基盤の種類・サイズや基盤面の位置(水深)、流速、河川流況、光条件そして魚類や底生動物などの捕食者が挙げられる。

本実験において付着基盤の種類・サイズや基盤面の位置(水深)は各期において同じ条件である。

まず秋期と冬期のそれぞれの期における流速の相違による繁茂特性の相違について考察を行う。両期ともに全体的にクロロフィルa、フェオオフィチンとも流入量の少ない水路2の2A、2Bよりも流入量が3倍多い水路1の6A、6Bの方がやや高い値を示している。戸田ら[1]の室内実験によると、流速が速いほど河川水中の栄養塩類の取込み速度が大きいため、クロロフィルa量は大きな値を示すことを示唆していることから、本実

表-1 秋期と冬期の原水の水質項目の平均値

	水温 °C	DO mg/l	T-P mg/l	T-N mg/l	NO <sub>3</sub> -N mg/l	NO <sub>2</sub> -N mg/l	NH <sub>4</sub> -N mg/l	COD <sub>Cr</sub> mg/l
秋期	14.5	8.57	0.275	3.68	1.69	0.111	0.59	16.4
冬期	7.0	9.67	0.314	5.40	1.64	0.168	1.88	25.3

表-2 秋期と冬期における日射量の累積量(MJ)

	7日目	14日目	21日目	28日目	35日目	42日目	49日目
秋期	109	191	273	341	406	481	539
冬期	58	122	179	252	313	392	469

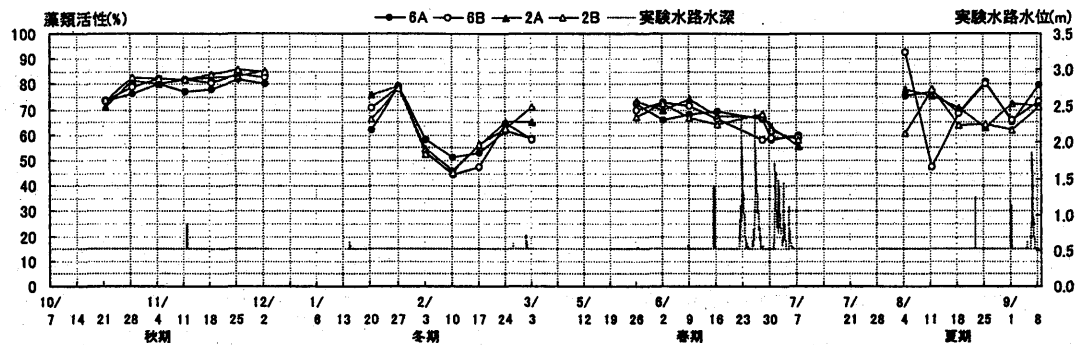


図-5 各期の藻類活性(左軸目盛)と実験水路水深(右軸目盛)の経時変化

験の現地水路実験においても、季節的な相違に関係なく滞留時間が短く、流下速度が速いために付着藻類の生長にプラスに働き両期ともクロロフィルa量やフェオフィチン量も多くなったものと推察できる。

次に秋期と冬期のクロロフィルaとフェオフィチンの繁殖特性の相違について考察を行う。

秋期と冬期における原水の水温、有機物や栄養塩類などの水質調査結果を表-1に、また光条件については実験水路近郊の国土交通省芦田川河口堰管理支所の日射量を通水開始からの累積量を表-2に示す。

秋期と冬期の有機物の指標であるCOD<sub>Cr</sub>、T-PやT-N等の栄養塩については表-1に示すように十分にある。大きな差異を示したのは水温と日射量であり、水温については秋期が14.5℃、冬期が7.0℃と約7.5℃の差異がある。また日射量については冬期よりも秋期の方が日射量は多いことがわかる。

付着藻類の生長は、初期の誘導期の後に基質を利用しながら指数関数的に増加する対数増殖期、さらに時間が経過すると残存基質が少なくなり、見かけ上一定となる定常期を迎え、そして最終的には死滅期に到り、死滅や自己分解により減少し始める。ここで、クロロフィルa+フェオフィチンに対するクロロフィルa量の割合(=クロロフィルa/(クロロフィルa+フェオフィチン)×100(%))で評価される藻類活性値を図-5に示す。秋期では7日目が71%~74%であったが、14日目は流入量の多い水路1では76%と79%であり、流入量の少ない水路2では81%と83%と80%以上である。21日目以降については4ブロックとも80%以上であり、4ブロックとも藻類の死滅・自己分解に比べて、生産・増殖が高い。ここで秋期の各ブロックの藻類活性の平均値で示すと、6Aが78%、6Bが81%、2Aが81%、そして2Bが82%であり、両水路とも下流ブロックの方が藻類活性は高く、特に2Bは他のブロックに比べてクロロフィルa量、フェオフィチン量ともに付着量は少なかったが、藻類活性としては一番高いことから、クロロフィルaの生産・増殖に対して死滅量や自己分解が少ないことがわかる。

次に冬期では7日目が62%~76%であり秋期に比べて割合の範囲が大きく、14日目は78%~79%と4ブロックの差

異がなくなり藻類活性は高いことがわかる。しかし21日目以降は減少傾向にあり、28日目には44%~51%であり、生産・増殖よりも死滅の割合の方が高いことがわかる。28日目以降は高くなっているが、42日目には62%~65%、49日目には流入量の多い水路1で58%、流入量の少ない水路2で65%と71%である。ここで冬期の各ブロックの藻類活性の平均値を示すと、6Aが61%、6Bが60%、2Aが63%、そして2Bが62%と4ブロックに大きな差異はなく、秋期に比べて藻類活性はあまり高いことがわかる。

よって水温や日射量などの要因によって冬期の方がクロロフィルaの増殖は活発でなかったといえる。しかしフェオフィチンは秋期と冬期の相違はなくほぼ同値でありクロロフィルaの増殖に関係なく、藻類は死滅・分解されているといえる。

#### 4.2 春期と夏期のクロロフィルaとフェオフィチン

春期と夏期については、前章の実験期間中の河川流況のところでも記したように、両期とも通水期間の後半に降雨出水による冠水や逆流の生起回数が多かったため、その影響を比較するために、春期については21日目(6月9日)までを春期前半、28日目(6月16日)以降を春期後半とし、夏期については21日目(8月18日)までを夏期前半、28日目(8月25日)以降を夏期後半として、両期ともそれぞれ21日目までを前半とし、28日目以降を後半に分けて考察を行う。

クロロフィルaについて春期前半についてみれば、14日目までは各ブロック間にはあまり差異はないが、21日目では明確な差異が生じた。すなわち、流入量が多く水深が深い6Aが最も多く8.1μg/cm<sup>2</sup>、流入量が少なく水深が浅い2Bが最も少なく1.8μg/cm<sup>2</sup>であり、このときの差異は約4倍であった。

春期後半についてみれば、28日目前日に冠水したものの4ブロックともに前調査に比べて値は増加しており、出水による剥離の影響はあまりないことがわかる。この時に6A、6Bおよび2Aが最大値を示しており、それぞれ10.5μg/cm<sup>2</sup>、8.6μg/cm<sup>2</sup>および5.2μg/cm<sup>2</sup>であった。しかしその後は図に示されるとおり、6A、6B、2Aではその後の出水の影響によりクロロフィルa量はほとんど増えず、むしろ減少傾向にあるが、2Bだけは出水の影響が少なく値は増え続けて、49日目には28日目より約3倍増の8.6μg/cm<sup>2</sup>と最大値を示していた。

完全冠水後1日後である28日目と40日目について比較すると、28日目は完全冠水時間が約7時間の短時間出水であったため砂や泥土等が藻類を被ったために剥離を免れて全測点で21日目よりも藻類量が多くなったものと推察する。しかし40日目は完全冠水時間が約43時間の長時間出水であったため強制剥離により藻類量は減少したものと推察する。

しかし出水から3日後の42日目や2日後の49日目では前回値よりもそれぞれ増加しており、藻類の増殖が活発であることがうかがえる。

夏期前半についてみれば、7日目から各ブロックの変動の差異が認められる。すなわち7日目の各ブロックの値は、2Bを除く他の3ブロックは6.7~8.6 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ であったが、2Bは3.9 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ と他のブロックに比べて顕著に少ないことがわかる。しかし2Bの経時変化は7日目から21日目まで増加を続け、21日目では14.3 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ と他のブロックに比べて多く、また夏期の2Bの最大値であった。6Aと2Aの経時変化は14日目で極値となり、それぞれ13.8 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、10.5 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ であったが、21日目ではそれぞれ減少し6Aが9.5 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、2Aが8.6 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ であった。6Bの経時変化は14日目に2.8 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ と大きく減少したが、21日目には12.4 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ と大きく増加していた。

夏期後半についてみれば、6A、6B、2Aは出水3日後の28日目にそれぞれ最大値となり、それ以降は急激に減少している。しかし2Bは21日目が最大値であり、その後は漸減して42日目には9.0 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ と4ブロックでは最高となり、次いで2Aの8.6 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、6Aの6.7 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、6Bの4.4 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ である。出水から3日後の28日目には、春期の42日目と同様に藻類の蘇生が活発であり前回値よりも増加したと推察する。また完全冠水後1日後である35日目と42日目と比較すると、35日目、42日目は完全冠水時間がそれぞれ約5時間と約12時間の出水ではあるが、両調査日とも前調査値に比べ大きく減少していた。

これは戸田ら[3]の室内実験によると、藻類量が10 $\mu\text{g}\cdot\text{chl}\cdot\text{a}/\text{cm}^2$ 以下では藻類細胞が直接基板に付着し、それ以上では直接付着した藻類の上にまた多くの藻類が付着するような状態であるとしている。よって夏期においては出水による攪乱の影響により強制剥離量が多くなり、それぞれ減少の割合が増えたものと推察できる。

次にフェオフィチンについて春期前半をみれば、クロロフィルaの経時変化と同様の変化を示している。すなわち14日目までは各ブロック間にはあまり差異はないが、21日目には明確な差が生じた。すなわち6Aが最も多く3.8 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、6Bと2Aはほぼ同値で1.9 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、2Bが最も少なく0.9 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ である。

次に春期後半についてみれば、経時的には各ブロックともに増加傾向にあるといえる。49日目の値は2Bが6.2 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ で最も多く、次いで6Aが5.7 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、6Bが5.2 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、2Aが3.6 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の順である。すなわちクロロフィルaと同じく28日目の値より約3.6倍も増加した。

次に夏期前半についてみれば、各ブロックでのフェオフィチンの値には若干差異はあるものの、実験初期から21日目ま

表-3 春期と夏期の原水の水質項目の平均値

	水温 °C	DO mg/l	T-P mg/l	T-N mg/l	NO <sub>3</sub> -N mg/l	NO <sub>2</sub> -N mg/l	NH <sub>4</sub> -N mg/l	COD <sub>Cr</sub> mg/l
春期	22.5	7.03	0.306	3.07	1.47	0.138	0.48	15.1
夏期	27.8	6.77	0.270	2.43	1.36	0.072	0.29	12.9

表-4 春期と夏期の日射量の累積量(MJ)

	7日目	14日目	21日目	28日目	35日目	42日目	49日目
春期	121	220	333	440	540	640	724
夏期	174	318	433	568	672	768	

で4ブロックとも増加傾向にあり、21日目には各ブロックの差異がみられ、両水路とも下流ブロックの方が量は多く、死滅量が多いことがわかる。

次に夏期後半についてみれば、夏期後半のクロロフィルaの経時変化と同様に6A、6B、2Aは21日目から28日目へは増加している。この28日目が6Aと2Aは最大で、その後減少傾向であった。6Bについては35日目まで増加し、その後減少していた。また2Bは21日目から28日目へは減少しており、その後もほぼ減少傾向にある。

次に春期と夏期のクロロフィルaとフェオフィチンの繁茂特性の相違について考察を行う。

春期と夏期における原水の水温、有機物や栄養塩類などの水質調査結果を表-3に、また光条件については実験水路近郊の国土交通省芦田川河口堰管理支所の日射量を通水開始からの累積量を表-4に示す。

春期と夏期の有機物の指標であるCOD<sub>Cr</sub>、T-PやT-N等の栄養塩についても表-1に示すように十分にある。大きな差異を示したのは水温と日射量であり、水温については春期が22.5°C、夏期が27.8°Cと約5.3°Cの差異がある。また日射量については春期よりも夏期の方が日射量が多いことがわかる。

ここで、クロロフィルa+フェオフィチンに対するクロロフィルa量の割合で評価される藻類活性値についてみる。

春期前半は67%~74%と高い値を示しているが、春期後半には56%~69%と春期前半に比べて若干割合が低くなっており、藻類活性が低くなっている。夏期前半は64%~78%であり、夏期後半は62%~81%と夏期前半に比べて若干ではあるが高くなっており藻類活性が高くなっていることがわかる。

よって河川出水の影響はあるものの春期に比べて夏期は水温が高く、日射量が多いことによって、夏期の方がクロロフィルaの増殖は活発であったといえる。またフェオフィチン量も夏期の方が春期に比べて多いことから死滅・分解される量も多く、藻類活性の割合は夏期の方が高いことがわかる。

## 5. 付着物組成に関する考察

### 5.1 乾燥重量、強熱減量、有機物量

付着物の乾燥重量の各期の経時変化を図-6に示す。秋期と冬期についてみてみると、当然ではあるが通水時間の経過と

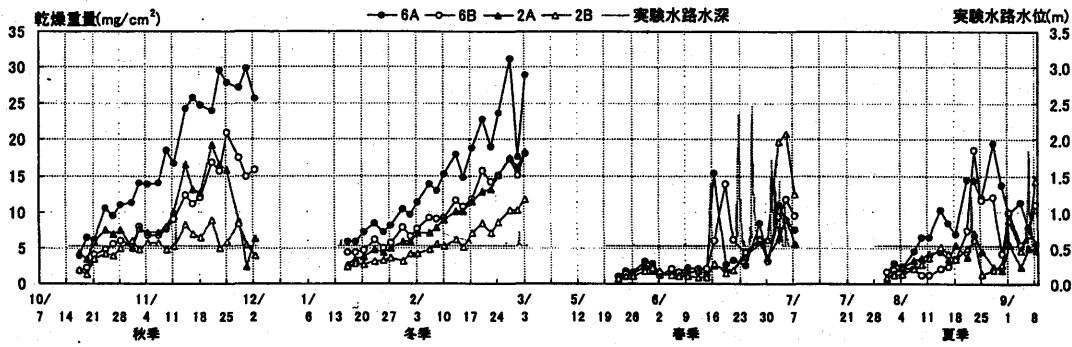


図-6 各期の乾燥重量(左軸目盛)と実験水路水深(右軸目盛)の経時変化

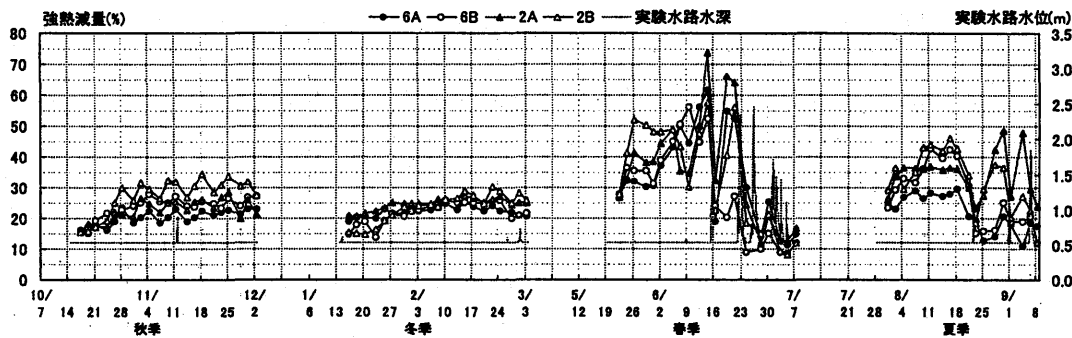


図-7 各期の強熱減量(左軸目盛)と実験水路水深(右軸目盛)の経時変化

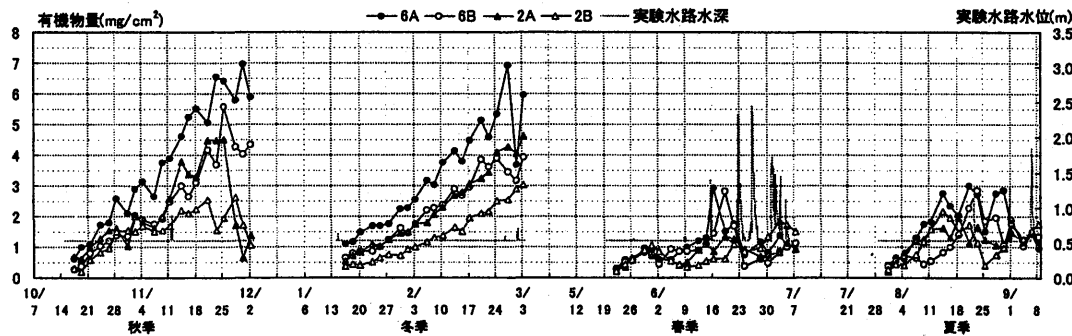


図-8 各期の有機物重量(左軸目盛)と実験水路水深(右軸目盛)の経時変化

ともに付着物量は増加するが、その増加率は流入流量が3倍多い水路1の上流ブロック6Aが最も大きく、次いで6B、2A、2Bの順となった。水路1についてみると、最終日の49日目の付着物量は両期とも6Aではほぼ $30\text{mg}/\text{cm}^2$ 、6Bでは $15\sim 18\text{mg}/\text{cm}^2$ であり、季節の相違はあまりなく上流ブロックの方が下流ブロックに比べて2倍程度多い。

水路2では秋期と冬期では経時変動に若干の差異が見られる。秋期では35日目以降での付着物量の減少が著しく、2Aでは $18\text{mg}/\text{cm}^2 \rightarrow 6\text{mg}/\text{cm}^2$ 、2Bでは $8\text{mg}/\text{cm}^2 \rightarrow 4\text{mg}/\text{cm}^2$ と変化しており、何らかの原因で付着物の剥離現象が促進したことが推測される。冬期の最終日の49日目の付着物量は2Aで $18\text{mg}/\text{cm}^2$ 、2Bで $12\text{mg}/\text{cm}^2$ となり、下流ブロックに比べて上流ブロックの方が1.5倍程度多い。

春期と夏期について前半と後半に分けてみると、春期前半

の各ブロック間の差異はあまりない。各ブロックの乾燥重量の平均値は6Aが $1.9\text{mg}/\text{cm}^2$ 、6Bが $1.7\text{mg}/\text{cm}^2$ 、2Aが $1.5\text{mg}/\text{cm}^2$ および2Bが $1.3\text{mg}/\text{cm}^2$ となる。春期後半は河川出水の影響を受け突発的に値が高く不規則な変動を示しているが、各ブロックともに経時的には増加傾向にあり、河川出水によって砂や泥土が底部に堆積したためである。

夏期前半についてみれば7日目まで4ブロックの差異はあまりない。しかし10日目以降21日目(8月18日)まではそれぞれ異なる増加特性を示しており、当然ではあるが流入量が多い上流ブロック6Aの増加率が最も大きい。また6Aで多くの流入物質が沈殿して下流側の6Bまではほとんど流送されていない。一方、流入量が1/3少ない水路2では上流ブロックと下流ブロックでの増加率にほとんど差がないことがわかる。夏期後半についてみれば、流入量の多い水路1では、6A、6Bとも最大

で20mg/cm<sup>2</sup>程度の付着物量が計測されたが、平均値は6Aで12.1mg/cm<sup>2</sup>、6Bで9.7mg/cm<sup>2</sup>となる。一方、流入量の少ない水路2では付着物量はあまり増えず、平均値は2Aで4.1mg/cm<sup>2</sup>、2Bで5.8mg/cm<sup>2</sup>となった。

次いで両期の強熱減量の経時的変動を図-7に、計算によって算出した有機物量の経時変動を図-8に示す。

秋期と冬期についてみると、強熱減量の割合は図-7から明らかのように、2Bが最も高く、次いで2A、6B、6Aの順となり、2Bでは30～35%で定常となり、6Aでは20～23%で定常である。

また春期と夏期についてみると、春期前半は4ブロックとも経時的には増加傾向にあり50%程度の値である。春期後半は河川出水の影響により約15%程度にまで激減している。

夏期前半は14日目までは4ブロックともほぼ増加傾向であるが、その後はほぼ定常となり、45%～35%の値である。夏期後半は25日目の河川出水のより4ブロックとも20%程度にまで減少し、それ以降は6A、6Bでは20%程度で推移するが、流入量の少ない2A、2Bでは出水後は、速やかに値は回復して40%以上になるが、出水時にはその影響を強く受けて低下している。

よって強熱減量に関しては各期において流入量の少ない水路2の水路の方が値は高い傾向にある。

図-8に示した有機物量について、秋期と冬期は乾燥重量の経時変化と相似形の変化であり、最終日の49日目では、6Aで6.0mg/cm<sup>2</sup>～6.5mg/cm<sup>2</sup>、6Bで4.0mg/cm<sup>2</sup>～4.5mg/cm<sup>2</sup>、2Aで4.0mg/cm<sup>2</sup>～4.5mg/cm<sup>2</sup>、2Bで3mg/cm<sup>2</sup>程度である。したがって沈殿付着物が多くなる上流ブロックの方が下流ブロックに比べてほぼ1.5倍程度多いことになる。

春期と夏期では両期とも乾燥重量の経時変化と相似形の変化である。春期よりも夏期の方が有機物量は多く、また各期の両水路とも下流ブロックよりも上流ブロックの有機物量が多い。

図-6～図-8に示された結果からは、各期において流入流量が3倍も多い水路1の方が水路内に供給されるSS量が多くなり、沈殿付着物も多くなることは当然想定できる。しかし、沈殿付着物に占める有機物量の割合は逆に流入流量が少なく、滞留時間の長い水路2の方が明らかに多くなり、しかも下流ブロックの方が多。このことから流速が遅く攪乱の影響が相対的に少ないほど付着藻類の増殖に適していることを推測される。

## 5.2 付着物の無機物組成

付着物の元素組成の秋期と冬期が21回、春期が20回および夏期18回の分析結果の平均値を表-5に示した。

人工付着材(レンガ)の組成の順位と割合は、SiO<sub>2</sub>が68.9%と

表-5 レンガの組成成分と各期の付着物組成成分の平均値

		秋期				冬期					
(%)	レンガ	(%)	6A	6B	2A	2B	(%)	6A	6B	2A	2B
SiO <sub>2</sub>	68.90	SiO <sub>2</sub>	53.15	50.81	51.34	48.45	SiO <sub>2</sub>	52.41	53.10	50.88	52.47
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.80	強熱減量	20.30	23.84	22.75	27.47	強熱減量	22.30	21.96	24.79	23.52
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.55	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.55	11.62	11.67	10.10	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.84	11.73	11.04	10.81
K <sub>2</sub> O	3.06	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.43	4.84	5.02	4.38	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.17	4.95	5.07	4.57
MgO	1.37	K <sub>2</sub> O	1.85	1.71	1.76	1.64	K <sub>2</sub> O	1.71	1.80	1.67	1.99
F	1.13	CaO	1.62	2.16	2.30	3.27	CaO	1.57	1.63	1.62	1.77
CaO	1.05	MgO	1.50	1.52	1.58	1.47	MgO	1.22	1.28	1.12	1.31
Na <sub>2</sub> O	0.92	Na <sub>2</sub> O	1.28	1.15	1.20	1.09	Na <sub>2</sub> O	1.22	1.18	1.20	1.09
TiO <sub>2</sub>	0.74	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.65	0.67	0.63	0.63	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.85	0.79	0.87	0.73
強熱減量	0.21	TiO <sub>2</sub>	0.58	0.52	0.54	0.45	TiO <sub>2</sub>	0.55	0.52	0.51	0.46
MnO	0.11	MnO	0.50	0.54	0.52	0.47	MnO	0.54	0.57	0.61	0.56
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.06	SO <sub>3</sub>	0.18	0.23	0.22	0.26	SO <sub>3</sub>	0.16	0.18	0.19	0.20

		春期				夏期					
(%)		(%)	6A	6B	2A	2B	(%)	6A	6B	2A	2B
SiO <sub>2</sub>		SiO <sub>2</sub>	43.18	46.32	41.23	42.49	SiO <sub>2</sub>	52.98	48.25	43.03	46.86
強熱減量		強熱減量	34.04	29.44	36.40	35.05	強熱減量	22.00	27.41	34.25	32.72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.31	10.28	8.75	9.07	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.63	10.81	9.43	8.66
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.21	4.42	3.91	3.88	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.01	4.87	4.37	3.97
K <sub>2</sub> O		K <sub>2</sub> O	2.73	2.37	2.98	2.64	K <sub>2</sub> O	1.75	1.63	1.49	1.46
CaO		CaO	1.49	1.66	1.51	1.65	CaO	1.54	1.76	2.29	1.72
MgO		MgO	1.14	1.18	1.05	1.08	MgO	1.36	1.30	1.28	1.17
Na <sub>2</sub> O		Na <sub>2</sub> O	1.12	1.35	1.06	1.25	Na <sub>2</sub> O	1.27	1.21	1.02	1.09
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.91	0.85	0.74	0.79	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.67	0.75	0.85	0.78
MnO		MnO	0.52	0.50	0.46	0.39	TiO <sub>2</sub>	0.54	0.49	0.44	0.40
TiO <sub>2</sub>		TiO <sub>2</sub>	0.46	0.50	0.43	0.44	MnO	0.45	0.48	0.42	0.27
SO <sub>3</sub>		SO <sub>3</sub>	0.45	0.42	0.42	0.42	SO <sub>3</sub>	0.20	0.28	0.29	0.33



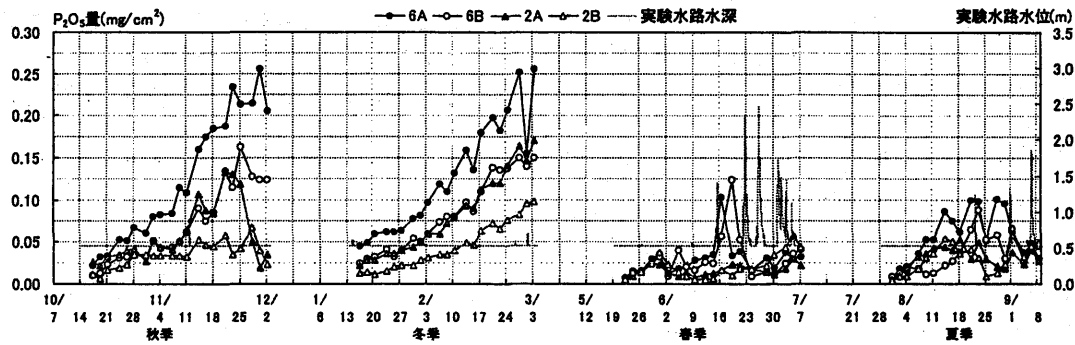


図-9 各期のリン量(左軸目盛)と実験水路水深(右軸目盛)の経時変化

一番多く、次いで $Al_2O_3$ 16.8%,  $Fe_2O_3$ 5.6%,  $K_2O$ 3.1%であった。ちなみに強熱減量は0.2%であり、 $P_2O_5$ は0.06%と非常に少ないことがわかる。

次に各期の付着物の組成の主要な組成についてみると、4期ともに同じであり、 $SiO_2$ が一番多く、次いで強熱減量(有機物)、 $Al_2O_3$ および $Fe_2O_3$ であった。

各期の組成の割合にみると、各期において割合が一番多い $SiO_2$ は秋期が48.5%~53.2%、冬期が50.9%~53.1%、春期が41.2%~46.3%、および夏期が43.0%~53.0%であり、冬期が一番多く、春期が一番少ないことがわかる。有機物は秋期が20.3%~27.5%、冬期が22.0%~24.8%、春期が29.4%~36.4%、および夏期が22.0%~34.3%であり、春期が一番多く、秋期や冬期が少ないことがわかる。 $Al_2O_3$ は秋期が10.1%~12.5%、冬期が10.8%~11.8%、春期が8.8%~10.3%、および夏期が8.7%~11.6%であり、秋期が多く、夏期が少ないことがわかる。 $Fe_2O_3$ は秋期が4.4%~5.4%、冬期が4.6%~5.2%、春期が3.9%~4.4%、および夏期が4.0%~5.0%であり、秋期や冬期が多く、春期が少ないことがわかる。よって、主要な4種が各期によって大きく異なっていた。

ここで付着物組成成分と人工付着板(レンガ)の組成成分を詳しく比較すれば、 $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 等の無機質成分の割合はほとんど変わっていないのに対して、有機質成分の指標と考えられる強熱減量値は100倍以上に、 $P_2O_5$ 値は10倍以上に増えていることがわかる。藻類の示性式は $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P$ であり、菌体の示性式は $C_{60}H_{87}O_{23}N_{12}P$ であることからPはC、H、O、Nに次ぐ重要な元素である。そこでこの $P_2O_5$ に注目する。

表-5より $P_2O_5$ の各期の平均値は、秋期では6A:0.65%、6B:0.67%、2A:0.63%、2B:0.63%と若干ではあるが流入量の多い水路1の方が割合は高い。冬期では6A:0.85%、6B:0.79%、2A:0.87%、2B:0.73%であり、水路差はあまりなく、両水路とも上流側のブロックの値が高いことがわかる。

春期では6A:0.91%、6B:0.85%、2A:0.74%、2B:0.79%であり、秋期と同様に若干ではあるが流入量の多い水路1の方が割合は高かった。夏期では6A:0.67%、6B:0.75%、2A:0.85%、2B:0.78%であり、流入量の少ない水路2の方が割合は高く、秋期や春期とは異なる傾向を示していた。各期を比較すると、

春期の割合が全体的に高く、秋期の割合が低かった。

さらに乾燥重量と $P_2O_5$ の組成割合より、 $P_2O_5$ 量を算出したものを図-9に示す。図-8に示した有機物量と同様に、時間の経過とともに増加する傾向を示している。各期の平均値は秋期で6A:0.125 $mg/cm^2$ 、6B:0.070 $mg/cm^2$ 、2A:0.059 $mg/cm^2$ 、2B:0.035 $mg/cm^2$ 、冬期で6A:0.128 $mg/cm^2$ 、6B:0.083 $mg/cm^2$ 、2A:0.082 $mg/cm^2$ 、2B:0.045 $mg/cm^2$ となり、全ブロックで冬期の方が $P_2O_5$ 量が多いことがわかる。

ここに算出された値は、図-3及び図-4に示したクロロフィルaやフェオオフィチンの値に比べて明らかに大きい。図-3に示したとおりクロロフィルa量は秋期が冬期よりも数倍多いのに対して、図-7に示したとおり有機物量は両期においてほとんど差異はない。したがって、秋期では藻類を主とした生物群が繁茂し、冬期では細菌類を主として生物群が繁茂したものと推察できる。

春期では6A:0.030 $mg/cm^2$ 、6B:0.030 $mg/cm^2$ 、2A:0.016 $mg/cm^2$ 、2B:0.021 $mg/cm^2$ 、夏期では6A:0.057 $mg/cm^2$ 、6B:0.026 $mg/cm^2$ 、2A:0.031 $mg/cm^2$ 、2B:0.031 $mg/cm^2$ となり、春期と夏期は出水の影響によって付着物量が少ないために $P_2O_5$ 量も、秋期や冬期に比べて著しく少ないことがわかる。春期と夏期を比較すると全ブロックで夏期の方が $P_2O_5$ 量が多いことがわかる。

## 6. まとめ

本研究は強汚濁河川を対象として、秋期と冬期でのそこに生息する藻類等の繁茂特性と付着物組成との関連について明らかにすることを目的として現地実験を行ったものである。

本研究より得られた知見を以下に示す。

1) クロロフィルaについて、河川出水の影響のなかった秋期と冬期を比較すると、4ブロックとも秋期の方が藻類量は多く、藻類活性が高いことがわかる。また各期の流入量の相違を比較すると流入量の相違による藻類量を比較すると流入量が3倍多い水路1の6A、6Bの方がやや高い値を示している。

春期と夏期の両期については河川出水の影響のない21日目までの期間を前半とし、それ以降から実験終了時までの河川出水の影響のあった期間を後半として比較すると、前半、後半とも夏期の方が藻類量は多く、藻類活性が高いことがわか

る。また両期の流入量の相違を比較すると、春期、夏期とも14日目までは各ブロック間の差異は認められないが、21日目以降は、春期では流入量が多い水路が高く、夏期では流入量の相違による差異はあまりなかった。

2) 死滅している藻類であるフェオフィチンについて、秋期と冬期との大きな差異はなかった。また秋期と冬期での流入量の相違を比較するとクロロフィルaと同様に流入量が多い水路の方がやや高い値を示している。

春期と夏期の両期の前半ではクロロフィルaと同様に夏期の方が多し。しかし流入量の相違による差異はなかった。

3) 付着物について秋期と冬期の乾燥重量は、流入量が多い方が多かったが、逆に強熱減量は流入量が少ない方が高く、秋期では16%~35%、冬期では15%~30%と秋期の方が高かった。

春期と夏期では、前半については、乾燥重量は春期で各ブロック間に大きな差異はないが、夏期では流入量の多い水路の上流ブロックが多く、4ブロックとも夏期の方が多かった。強熱減量は春期で4ブロックともほぼ50%程度と高く、夏期では45~35%であった。

4) 付着物の組成分析については、主要な成分についてみると4期とも同じでSiO<sub>2</sub>が一番多く、次いで強熱減量(有機物)、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>およびFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の順に少なくなっていた。藻類や細菌の重要な元素であるP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>割合は、秋期が0.67%~0.63%、冬期が0.87%~0.73%、春期が0.91%~0.74%、夏期が0.85%~0.67%と春期のおける割合が高いことがわかる。

謝辞：本実験を遂行するにあたり、現地実験などに関しては国土交通省福山河川国道事務所に補助を受け、また蛍光X線分析に関しては本学工学部建築・建設学科の田辺和康准教授に指導助言を受けた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- [1] 戸田祐嗣, 赤松良久, 池田駿介：水理特性が付着藻類の一次生産特性に与える影響に関する研究, 土木学会論文集, No.705/II-59, pp161-174, 2002.
- [2] 佐々木貴史, 刈屋宏章, 伊藤歩, 川口博, 相澤治郎, 海田輝之：酸性河川における水質と堆積物が付着藻類の増殖-岩手県赤川を対象として-, 環境工学研究論文集, 第40巻, pp127-138, 2003.
- [3] 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.
- [4] 戸田祐嗣, 辻本哲郎, 藤本憲臣：取水量の大きな砂河川における河床付着藻類の繁茂について, 河川技術論文集, 第11巻, pp541-546, 2005.
- [5] 大本照憲, 田中貴幸, 馬場太郎：付着藻類の生長過程に水理量を与える影響, 河川技術論文集, 第12巻, pp425-430, 2006.
- [6] 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.

[7] 松尾友矩編著：水質環境工学(第8章), 技報堂出版, 1993.