

カーボン西陣織による陸水域の自然再生

蒲 生 孝 治

要 旨

特殊な織り方からなるカーボン西陣織の水質浄化効果を、京都女子大学構内にある水域（池）を基礎実験対象として検証するとともに、一級河川で全国ワーストワンである大和川への適用可能性を調べた。その結果、本カーボン西陣織は水質浄化に大きな効果を発揮し、汚染された大和川などの陸水域の自然再生に貢献しうることが明らかになった。

現在、世界遺産である京都市には約4,800箇所の寺社が存在する。この多くは庭を有しており、池や滝、小川、湧水などのせせらぎも多い。今まで、寺社の並々ならぬ努力で清浄さを維持してきたが、昨今の観光客の増加や経済的理由などから水の汚れが目立っている。特殊加工したカーボン西陣織は、汚れつつある寺社内水域の環境保全に役立ち、世界遺産“京都”の自然価値の維持に大きく貢献しうる可能性を有している。

キーワード：カーボン西陣織、水質浄化、自然再生、陸水域、大和川

I. はじめに

環境省は水質汚濁に関し、全亜鉛など人の健康保護に関する項目と、BOD¹⁾（生物化学的酸素要求量）やCOD²⁾（化学的酸素要求量）などの生活環境保全に関する項目を定めて、水利用の各段階における負荷の低減方針を示している（平15環告123）。負荷低減及び浄化手法の開発と普及を促進し、環境保全上健全な水環境機能の維持・回復を推進しているにもかかわらず、国土交通省が発表している一級河川166のうち、奈良・大阪を流れる大和川などは毎年ワーストの上位を占めており、BODやCODの濃度は高い。大和川の平成16年度のBOD濃度は1.8～8.8mg/Lで平均値は5.4mg/L、COD濃度は3.2～12.1mg/Lで平均値は8.1mg/Lであり、環境基準類型は最下位から二番目のD類である。大和川の主な汚染原因は雨が少ないうえに農業用水で水が奪われ水量が減少していること、流域への人口集中により家庭から排出される污水が急増していることなどによる（平成18年度奈良県保険環境研究センター年報）。

水質改善対策としては、一級河川の庄内川（愛知県と岐阜県）の例に見られるように、微生物による有機物を分解させる自然循環方式水質浄化システム、多孔質固形材やプラスチック系

1) 好気性細菌が、水中の有機物を酸化分解するのに必要な酸素量で、水質汚濁の指標の1つ。
2) 試水中に、過マンガン酸カリウムや重クロム酸カリウムなどの酸化剤で酸化される有機物などの物質が、どのくらい含まれるかを、消費される酸化剤の量を酸素の量に換算して示した値で、水質汚濁の指標の1つ。

接触材を利用した環境保全型ハイブリッド水質浄化システム、光触媒効果による殺菌・有機物分解浄化システム、人工ゼオライト浄化システムなどがある。また旧芝川（埼玉県）再生プロジェクトで試みられた浄化能力のある微生物の餌となる菌を使用する方法、繊維状の炭素物質と木炭を使用した方法などがある。しかしながら、今までのこれらの方法は大掛かりな装置が必要である、景観を損ねる、コストがかかるなど欠点も多い。

本稿では、上記課題を解決し、陸水域³⁾の自然再生を実現するために、高級絹織物の総称として有名な西陣織技術を用いたカーボン西陣織⁴⁾の水質浄化効果、及び汚染された河川や湖沼への水質浄化手法としての適用可能性を検討したので報告する。

Ⅱ. 炭素繊維の水質浄化作用とカーボン西陣織

1. 炭素繊維による水質浄化作用

炭素繊維（カーボンファイバー）とは、アクリル樹脂や石油、石炭からとれるピッチ等の有機物質を繊維化して、特殊な熱処理工程を経て造られる繊維状の炭素物質である。

一般に、水質浄化材に用いられる炭素繊維は、PAN（ポリアクリロニトリル）系樹脂を炭素化して作られる繊維で、一般工業用とは異なり水中での広がりを持たせるため特殊なサイジング処理が施されている。従来水質浄化材は約7ミクロンの微細なフィラメントが12000本集まり房となっているものを使用して作られている。炭素繊維には無数の穴があり、表面積がかなり広がっており、たくさんの汚れを吸着することができる。また、同時に炭素繊維には微生物を集める力があり、微生物の力を借りて水質を浄化することができる。

カーボン繊維の水質浄化効果のメカニズムは、多孔質の炭素繊維に無数の穴を形成することによって表面積を大きくし汚濁物質や細菌を吸着させる。また、炭素に日光が当たると超音波を発生し、その超音波で微生物が呼び寄せられ、付着した微生物が活発な生物膜を形成し炭素に吸着した汚れを分解する。そして、炭素に付着した微生物を餌に魚が集まり、産卵場所や稚魚が育つ場となり、生物多様性の回復に繋がっていくと言われている。

2. カーボン西陣織

炭素繊維は、水質浄化に有効ではあるが、ねじれの力に弱く、ねじりの力が加わった場合ちぎれてしまうという大きな問題点があった。今まで、使用後数ヶ月で、流れの強い海や河川などでは、従来の織り方のムカデ型炭素繊維ではちぎれてしまうことが多かった。河川の水質浄化用として実用化するためには、この問題の解決は必要不可欠である。また、河川は天候に

3) 陸水域とは、水域のみならず、移行帯から水域と関連する陸上部という場を含めて成立する生態系の場であり、河川、湖沼、湿原などさまざまな形態、開放的な系、閉鎖的な系、あるいは不安定な系、安定な系などを有し、それぞれが個性的な構造や機能をもつ。

4) 炭素繊維と訳されるカーボンファイバーを西陣織の技法で織り上げた布のこと。カーボンファイバーは、重さは鉄の4分の1ながら、引っ張り強度は10倍さらに耐熱性、導電性がある。

よって流れの速さが大幅に変わるため、どんな流れの速さにも対応できる強度は必須である。

さらに、従来のムカデ型炭素繊維では汚濁物の濃度が高い場合には、大量の付着物が付き、水中の揺らぎが抑制されて微生物を呼ぶ力が弱くなり、炭素繊維本来の働きが弱まってしまう。そのために何度も汚れをとる作業を必要とし、その際に炭素繊維をいためてしまうという課題もあった。

炭素繊維のこのような問題点を解決したのが下記に示した特殊加工を施したカーボン西陣織である。これは、渋く黒光する見た目を生かした着物として、京都市に本社のある西陣織メーカー・フクオカ機業が商品化しているものである。フクオカ機業のホームページによると、カーボン西陣織とは「カーボンファイバーをハイ・ファブリックス織りと呼ばれる西陣織の織物技術で平面状に織りあげた布」のことである。一般に、炭素繊維は、ほぐれないよう加工することが不可欠であったが、加工すればするほど強度が弱くなる。そのため工程はできるだけ少なくなければならない。フクオカ機業は、横糸を連続して耳付きで織る技法、すなわちハイ・ファブリックス織りによって繊維がほぐれず、かつ、西陣の技法を取り入れることで繊維にストレスをかけずに炭素繊維の強度を保持することに成功した。

本研究に用いたこの水質浄化用のカーボン西陣織は非常にきめ細かい繊維を使用し、表面に微生物が付着しやすいように起毛処理を施したものである。これらの技法によって速い流れでも解けず、耐久性・長寿命化を可能にした水質浄化用のカーボン繊維を完成した。また、この繊維は無機系付着物の自然落下にも大きな効果があることがわかっている。図1にハイ・ファブリックス織りによるカーボン西陣織を従来のものと比較して示す。

なお、本繊維は平成18年10月テレビ朝日「素敵な宇宙船地球号—大都会ドブ川の奇跡—」で全国的に紹介された。

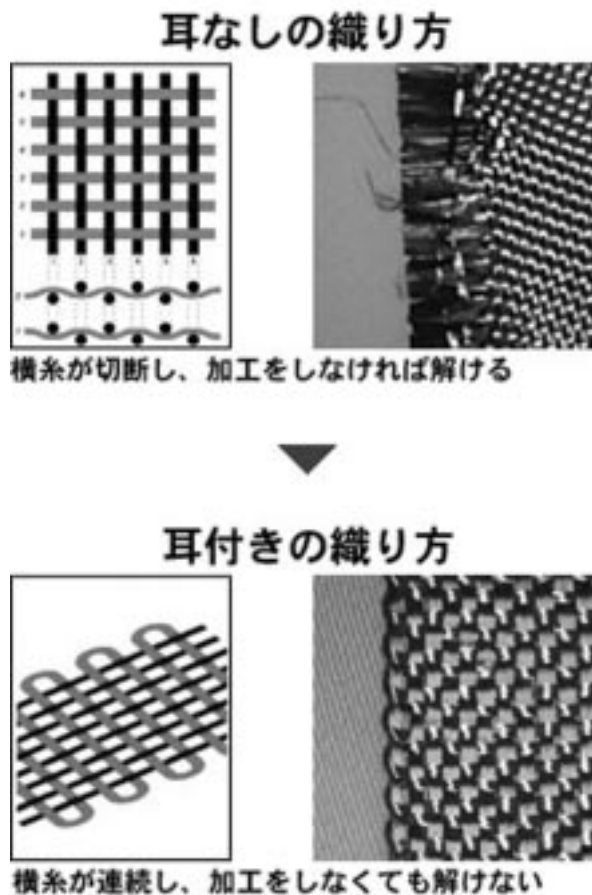


図1. 水質浄化実験に使用したカーボン西陣織

Ⅲ. 研究目的と方法

本研究の目的は、西陣織の手法を使った特殊な織り方からなるカーボン繊維の水質浄化効果を、京都女子大学構内にある水域（池）を基礎実験対象として検証するとともに、一級河川で全国ワーストワンである大和川（奈良県）へのカーボン西陣織の適用可能性を調べることである。

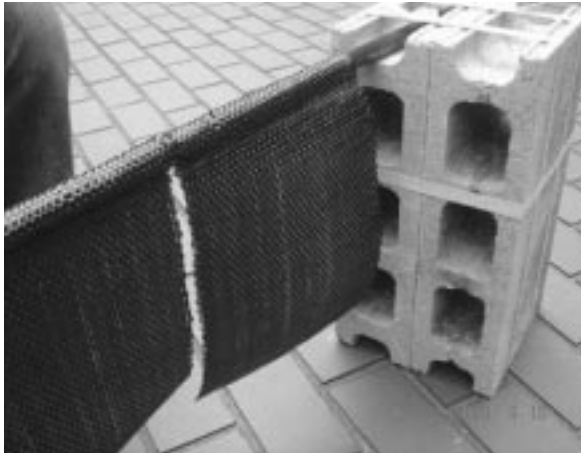
1. 京都女子大学構内での基礎実験

京都女子大学構内にある面積約50m²・水深約1mのコンクリート壁面から成る水域（池）内に、前記のカーボン西陣織を設置して、その効果と実用性を調べた。西陣織は、横20cm×縦28cmを20枚、横20cm×縦33cmを10枚、噴水の正面と右側面の2か所に2列で設置した。測定は写真による観測と気温、水温、pH（水素イオン濃度指数）、COD、BODによる数値測定を行った。pH測定にはケニス製のポータブルpH計EcoScanPH5を、COD測定には共立理化学研究所製の簡易水質測定用パックテストWAK-CODを、BOD測定には共立理化学研究所製の簡易水質分析WA-BOD-2（河川用）を使用した。測定箇所は、炭素繊維が設置されている手前（南側）と右側（東側）、炭素繊維から最も遠い奥（北側）、水草群集がある左側面（西側）の4ヶ所の各水面と水中の計8箇所とした。カーボン繊維は微生物を集め生息させることで水を浄化する機能を有する。集まる微生物の実像観察用にはケニス製ケニス実体顕微鏡LB-600HM（40～600倍）を標準マイクロルーラー付きで使用した。

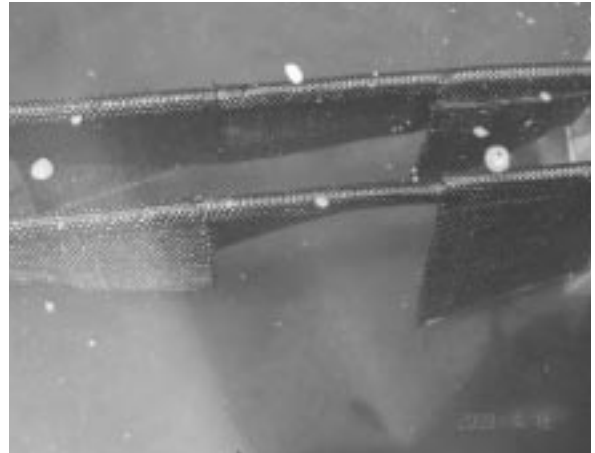
実験期間は2008年4月～10月である。写真1にカーボン西陣織を設置した水域（池）の外観、写真2に池に取り付けたカーボン西陣織の外観を示す。



写真1. 京都女子大学構内池での水質浄化基礎実験



(1) 池に設置する前



(2) 池に設置した状態

写真2. 京都女子大学構内の池に設置したカーボン西陣織

2. 大和川への適用可能性検討

大阪市立自然史博物館編著「大和川の自然」や「奈良県保健環境研究センター年報・第41号」などによると、大和川は大和高原に発し、奈良盆地中央部を西流しつつ盆地諸流を集め、県境の溪谷を抜け大阪平野を経て大阪南港に注ぐ全長約64km（奈良県側：43km）、流域面積約1070km²、流域人口約200万人の一級河川である。国土交通省が発表している全国の一級河川の内、毎年ワーストの上位（平成10年、12年、15年、17年：ワースト1位）を占めている。この原因として、河川の流量が少ないことと、流域への人口の集中などが挙げられている。

大和川の自然を取り戻すために、行政や民間、市民が協力して様々な水質浄化実験や市民に対する啓発活動などの取り組みが行われている。これまでに行われた代表的な水質浄化の取り組み事例を以下に挙げる。

(1) 瀬と淵方式による水質浄化

川が本来持っている自浄作用の場である「瀬」と「淵」を再現した水質浄化方式。

(2) 上向流接触酸化方式による水質浄化

浄化槽の中の接触材に、下から上の水流で接触酸化を図る方式。

(3) 礫間接触酸化方式による水質浄化

浄化槽の中に礫を接触材として敷き詰め、その中へ川の水を流し接触酸化を図る方式。

(4) 薄層流方式による水質浄化

川底に接触材となる礫を敷き詰め、川の水を薄く広く流すことで接触酸化を図る方式。

(5) 直接接触酸化方式による水質浄化

銅製のかご枠のなかに接触材を入れ、川の中で直接接触酸化を図る方式。

しかしながら、これらの浄化方式はいずれも大規模な工事と、広い土地を必要とし、大きな費用を要するため作れる浄化槽などの装置にも限りがある。一方、カーボン西陣織にはこれら

上記の課題が少ない。そこで、従来方式の課題解決策を検討する目的で、カーボン西陣織による水質浄化効果と自然再生の可能性を調べた。具体的には、奈良県田原本町付近の大和川を対象とし、堰で採取した水を数日ごとに分けて同種類の透明ペットボトルに入れ、一方だけに炭素繊維を浸し、約3ヶ月間水質の経時変化を観察した。

IV. 研究結果と考察

1. 京都女子大学構内での基礎実験結果

1. 1 温度とpHの変化

2008年4月～10月での各測定点における気温・水温・pHの変化を図2（水面）と図3（水中）に示す。全体として、ほぼ全ての日でpH値が7を上回っており、池全体がアルカリ性を示していること、水面のpH値は水中より高いことがわかる。特に水面の水草の地点では10を超え、かなりアルカリ性が強くなっている。晴れている日や水温が高い日ほど、また水草が多いほどpH値が高くなる傾向があることから、光合成の働きで酸性を示す二酸化炭素を消費した結果によるものと考えられる。

図3に示したように水中のpH値が水面ほど高くはならなかった原因は、水中では水面ほど太陽の光が届かないこと、水中の水草部に多くいる動物プランクトンが植物プランクトンを捕食したことによると考えられる。また、側面と手前のpH値が低い理由は、写真1に示したように側面と手前には合計30枚のカーボン西陣織繊維を設置しており、これに付着した動物プランクトンが植物プランクトンを捕食したことによると考えられる。

なお、天候については、気温と水温のグラフ棒の淵表示の赤が晴れ、黒が曇り、青が雨で表示している。晴れの日、明らかにpH値が高く、光合成によるアルカリ性化の影響が表れている。しかし、pH10を超えるアルカリ性になると水をアルカリ性化した植物自身が住み辛い環境になり、写真3に示すように、5月22日には緑で生い茂っていた水草地帯が、8月13日には黄色く変色した水草地帯になってしまった。

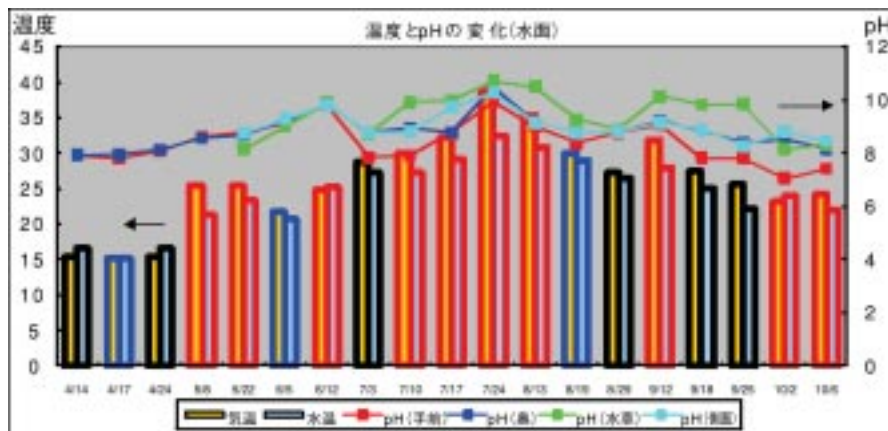


図2. 温度とpHの変化（水面）

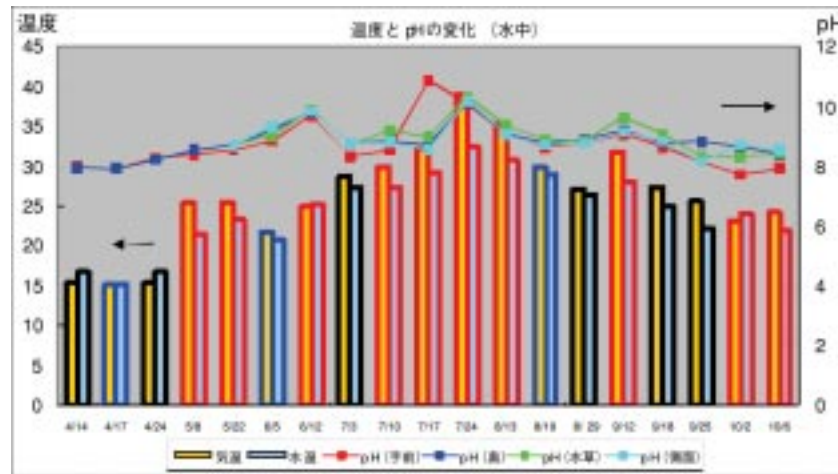


図3. 温度とpHの変化 (水中)



(1) 5月22日撮影 (2) 8月13日撮影 (3) 9月12日撮影 (4) 10月2日撮影

写真3. 京都女子大学構内池の水草の活性化状況

1. 2 CODとBOD

環境基準は、一般に河川についてはBOD、湖沼および海域についてはCODで評価される。CODに関しては、水道用水源としてはCOD 3 mg/L以下 (A級)、水産用水としてはCOD 5 mg/L以下 (B級)、農業用水としてはCOD 6 mg/L (C級) 以下が望ましい。

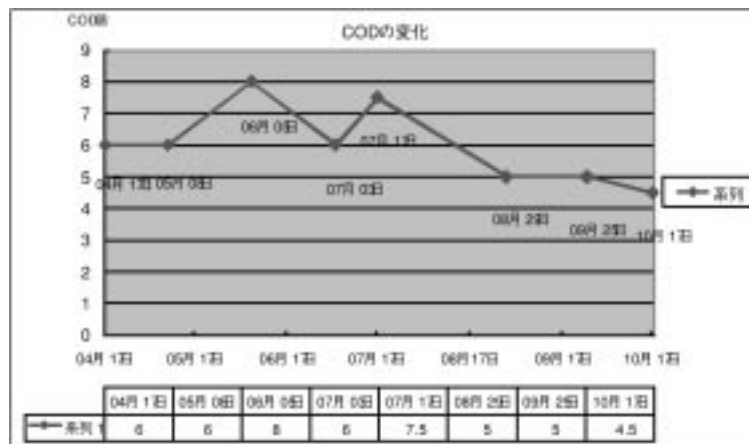


図4. カーボン西陣織によるCODの向上

京都女子大学構内の池のCODの変化は図4のとおりであった。約6ヶ月の間、多少の上下はあるものの、観測を開始した4月時点の6.0mg/Lから10月時点の4.5mg/Lまで着実に改善しており、構内池の水質はカーボン西陣織を使用することによって水産用B級まで改善した。

一方、河川の水の汚れは、微生物が汚れの成分である有機物の分解に使った酸素の量（BOD）で評価する。有機物が多くあるとそれだけ微生物は多くの酸素を必要とし、BODの数値は高くなる。日本での公式のBODの測定は5日間に微生物が消費した酸素の量を測るということである。今回の測定ではまずDO0（採取してすぐの溶存酸素量）からDO5（五日後の溶存酸素量）を引いてBODを求めた。このDO（溶存酸素量）は水に溶け込んでいる酸素の量を示す。DO0が極端に低い川は水面からの酸素の供給では間に合わないほど川の中の酸素の減り方が早いということになり、非常に汚れていると考えられる。一般的に多くの魚は溶存酸素量が5 mg/L以上（良好）の水中に生息し、その下限は3～4 mg/Lであるといわれている。好気性微生物が活発に活動するためには2 mg/L以上が必要であり、それ以下では悪臭が発生する。図5に本実験の結果である京都女子大学構内池のBODの変化を示す。

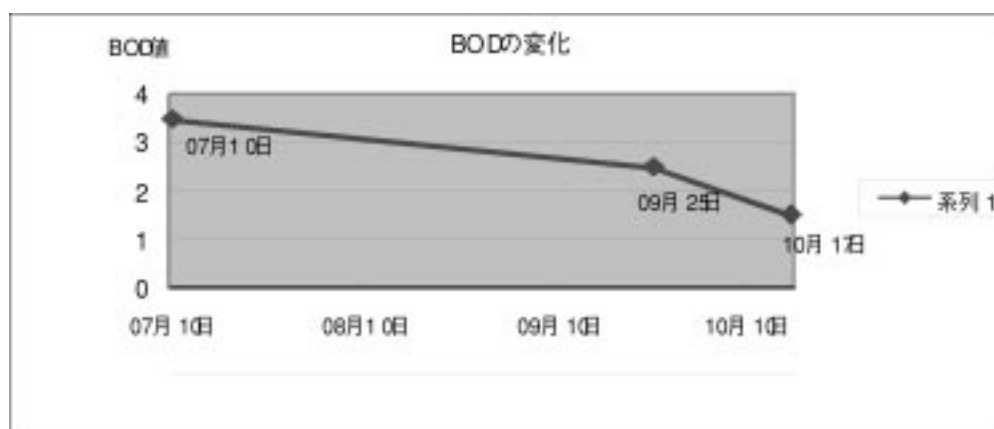
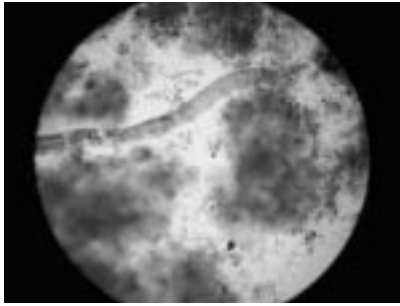


図5. カーボン西陣織によるBODの向上

7月から10月でBODは3.5から1.5に減少しており、炭素繊維はBODの低下に十分な効果を示した。また、校内の池は測定期間中BODが一貫して低く、水中には十分な酸素が溶け込んでおり、生物が生息するのに良好な環境であることがわかった。

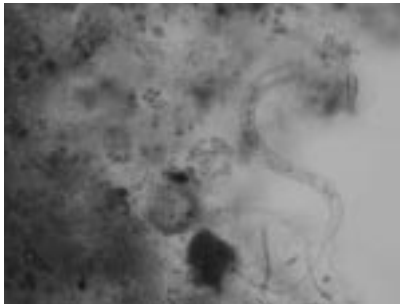
1.3 炭素繊維に集まる微生物

炭素繊維は微生物を呼び寄せることによって水質浄化を行う。では、一体どのような微生物が実際に水質浄化を行っているのだろうか。池に設置した炭素繊維の一部を採取して実体顕微鏡で観察した。写真4(1)、(2)、(3)、(4)にカーボン西陣織に生息していた主な微生物を示す。



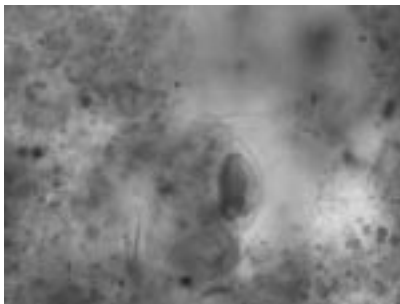
(1) アエオロソマ (9月25日)

アエオロソマと呼ばれる体幅1mm環形動物で、ミミズのように動き、観察している時にも水の中の汚れを食べながら動いている様子が見られた。処理槽のなかでよく見られる微生物である。



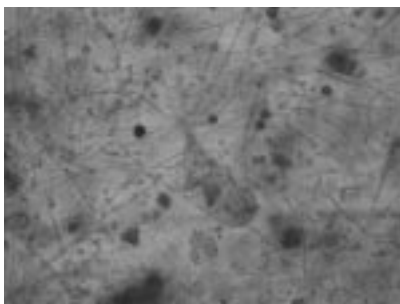
(2) ディプロガスター (10月2日)

センチウの一種のディプロガスターと呼ばれる体幅0.5mm～3mmの袋形動物であり、細菌を食べる微生物である。



(3) マギレミジンコ (10月2日)

マギレミジンコと呼ばれる体長0.4～1.3mmの中型のミジンコである。マギレミジンコのようなミジンコの仲間は植物プランクトンを捕食するため、水質浄化に非常に役に立つ微生物である。



(4) ツボワムシ (10月2日)

ツボワムシと呼ばれる体長0.1mm～0.2mmの植物プランクトンやバクテリアを餌とする小さな動物プランクトンである。

写真4. カーボン西陣織に付着していた微生物

植物プランクトンは数が増えるとアオコという別名で呼ばれるものである。水の汚れの原因は植物プランクトンにあることが多い。植物プランクトンは太陽からのエネルギーを使い、水中の窒素やリンを栄養源にして水を汚す有機物をつくるからである。植物プランクトンは遊泳力を持たないため、川など流れの速いところでは流されてしまうが、今回実験した池のような水が流れない場所では発生しやすい。実際、4月の炭素繊維投入時に池が緑色に濁っていたのは、水を緑色に濁らせる原因となる植物プランクトンが発生していたからである。水質を浄化するためには、この植物プランクトンの数を減らす必要があった。それには植物プランクトンを捕食する動物プランクトンを増やすのが効果的であり、動物プランクトンが増加すると水は透明になることが霞ヶ浦などの事例で明らかになっている。従って、動物プランクトンを増やすことは水質を浄化するためには必要不可欠である。

今回、顕微鏡で発見した微生物は植物プランクトンを捕食する動物プランクトンで、池の水の透明度を上げるのに非常に役に立つ生き物である。4月の炭素繊維投入時に緑色に濁っていた池が10月の回収時には透明になっていたのは、これらの微生物の働きによるものと考えられる。これらの微生物は炭素自体にいたのではなく、炭素に付着した藻に住み付き餌を食べていたのである。顕微鏡で観察している間にも汚れを食べている様子が見られた。炭素繊維の周りにメダカなどが多く集まっていたのも、これらの動物プランクトンを食べるために集まってきたのであり、このことから動物プランクトンが炭素繊維の周りに多く集まっていたことがわかった。

2. 大和川への適用検討結果

写真5(1)に水採取から約1週間後の大和川の水の外観写真を、写真5(2)に水採取から約1ヶ月後の大和川の水の外観写真を、写真5(3)に同約2ヶ月後の大和川の水の外観写真を示す。写真5(1)に示すように水を採取した際にはアオコが大量に発生し水は濁っていた。

写真5(3-1)の炭素繊維なしの水は黄ばんでいるのに対して、写真5(3-2)の炭素繊維を投入した水は透明で炭素繊維表面には藻類のようなものが生え、生態系が生じていることが分かる。炭素繊維が大和川の水中の微生物の活動を活発にし、生態系を生み出したことが観察された。

これら一連の実験から、大和川の水でもカーボン西陣織は水質浄化能力を発揮し、水を清浄にすると共に生態系の活性化を促すことがわかった。また、大和川はたびたび水量が増加し、河川が氾濫することもあるため、炭素繊維が容易に劣化しないようにする必要がある。この点でも強度が強く耐久性に優れたカーボン西陣織は陸水域の自然再生に有効であると思われる。



(1) 1週間後の浄化効果（右が炭素繊維入り）

採取後約1週間（8月20日）の大和川の水。採取時には濁って、反対側が見えなかった水が透明になってきていた。

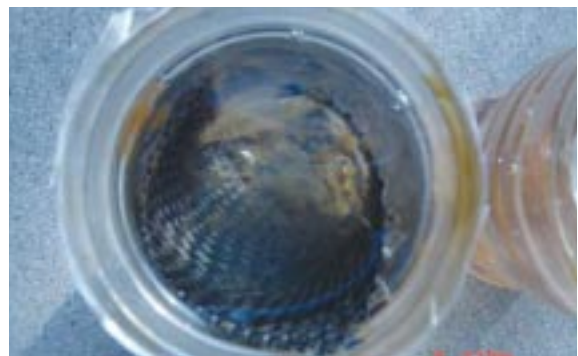


(2) 1ヶ月後の浄化効果（右が炭素繊維入り）

採取後1ヶ月（写真5(2)）と2ヶ月（写真5(3)）の大和川の水。炭素繊維なしの水は黄ばんできているのに対し、炭素繊維を投入した方の水は透明である。また、何も入っていない方は鉄の臭いがしたが、炭素繊維を投入している方は無臭であった。



(3-1) 炭素繊維なし



(3-2) 炭素繊維入り

(3) 2ヶ月後の浄化効果

写真5. カーボン西陣織による大和川の水質浄化実験

V. おわりに

短期間の研究ではあったが、特殊加工したカーボン西陣織は大和川などの陸水域の自然再生に大きな効果があることがわかった。より低価格化が図られれば本格的に市場導入される日は近い。

現在、世界遺産である京都市には約4,800箇所の寺社（神社1,770箇所、寺院3,030箇所）が存在する。この多くが庭を有しており、池や滝、小川、湧水などのせせらぎも多い。寺社の並々ならぬ努力で清浄さを維持してきたが、昨今の観光客の増加や経済的理由などから水の汚れが目立っている。本研究の成果は、汚れつつある社寺内水域の環境保全に役立ち、世界遺産の自然価値の維持に大きく貢献しうる可能性を有している。未曾有の経済大不況下、カーボン繊維による西陣織の水質浄化への適用をきっかけに、伝統ある京都の西陣織が新たな市場を開拓し、再活性化されることを期待している。

本研究を行うにあたり、カーボン西陣織をご提供いただいた（有）フクオカ機業の福岡裕典社長、炭素繊維に関する情報提供と本学水域（池）へのカーボン繊維設置にご協力いただいた松田隆年氏、そして本学学生であった現・奈良県職員の亀井奈津子氏に深く謝意を表す。

引用・参考文献

- 大垣眞一郎監修，財団法人 河川環境管理財団編集（2007）『河川の水質と生態系—新しい河川環境創出に向けて—』技報堂出版。
- 大阪市立自然史博物館叢書（2007）『大和川の自然』大阪市立自然史博物館。
- 蒲生孝治、亀井奈津子（2009）「カーボン西陣織による陸水域自然再生の可能性検討」『日本環境学会第35回研究発表会講演予稿集』216-219頁。
- 亀井奈津子（2009）『カーボン西陣織で日本一汚い川は救えるか』2008年度京都女子大学現代社会学部卒業論文。
- 環境省HP「水質汚濁に係る環境基準について」（平成15年11月5日環境省告示123）
<http://www.env.go.jp/kijun/wt2-1-1.html>。
- 京都西陣 有限会社フクオカ機業HP「フクオカの酸素繊維 織り方の特長と販売受付」（2008. 11. 11）
<http://www.fukuoka-k.co.jp/products/merit.html>。
- 国土交通省 近畿地方整備局 大和川河川事務所HP「大和川の基本情報」（2008. 8. 14）
<http://www.kkr.mlit.go.jp/yamato/index.php>。
- 財団法人 河川環境管理財団・河川環境研究所（2007）「庄内川水質浄化実験 実験結果報告書」『河川環境総合研究所資料』20, ISSN 1347-751X。
- 半谷高久・高井雄・小倉紀雄（1999）『水質調査ハンドブック』丸善。
- 松本光弘・兎本文昭（2006）「大和川の水質の特性と多変量解析による評価」『平成18年度奈良県保険環境研究センター年報』41, 39-43頁。