

連載

生物屋の緩速ろ過池研究

その1 道具ができて研究が進む

信州大学名誉教授 中本 信忠



雑誌の白黒写真を元の写真のカラーにし、赤字で説明を追記した。

1. 糸状珪藻の培養系に感動

私は「緩速ろ過池で繁殖する藻は良い藻」と教わり、卒論学生と調査を始めた。生物系の応用学部の学生に「生物は役立つ」と実感してもらいたく、このテーマに飛びついた。

上田市の緩速ろ過池で繁殖していた藻は糸状になる藻だった。水深約1メートルのろ過池の底を箱メガネを使って注意深く観察すると藻は真綿を敷き詰めた様であった(図1)。



図1 真綿状の藻類被膜

光合成により生産した酸素の気泡の浮力で真綿状の藻は底から浮上し水面に盛んに浮いてきていた。

水中では砂層上の藻類被膜は真綿状の布団みたいでゼラチン状でない。

浮いた藻は水面のスカムなどを排出する越流管から流出していた(図2)。



図2 越流管から流出する藻

浮いてきた藻は手で簡単に掬い取ることができた(図3)。浄水場にある削り取った砂山は藻臭がしていたが、生きている藻は藻臭はなかった。

私は大学院生時代、単細胞の珪藻や緑藻を大量培養するために装置をつくり大変に苦労した経験があった。自然界のろ過池で糸状になる珪藻メロシラ(茶筒珪藻)一種類が大量に繁殖し、ろ過池が糸状珪藻の培養系みたいになっていくのに感動した。

2. 過去の研究を調べる

緩速ろ過と出会った1984年当時は、緩速ろ過は古い技術で効

率が悪いと考えられ研究対象ではなかった。

私はまず、緩速ろ過の研究の過去から現在までを調べることにした。日本水道協会雑誌を創刊号から全ての発表題目を調べた。戦前の1935(昭和10)年〜1939(昭和14)年にかけて大阪市水質試験所の近藤正義さんが精力的に「上水道に於ける濾膜の生物学的研究」を発表していた。そこで図書館を通して複写依頼した。近藤さんの論文は古い漢字が多く読むのが大変であったが興奮して読んだ。

近藤さんはろ過池の砂層上部の藻類を調べ、珪藻が多く、遺骸も



図3 藻は手でとれる

生きている藻は臭くない

大阪市では、ろ過継続は2週間程度だった。

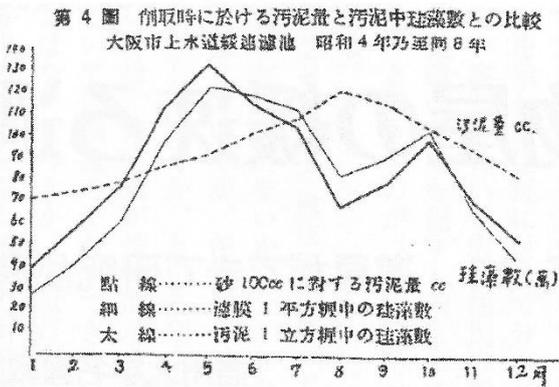


図4 藻類被膜の季節変化

多いと発表していた。ろ過池の削り取り時の砂層上部の藻類量は、春先から増加し、桜が咲く頃に最大となり、夏は少なくなり、初秋に再び増加していた(図4)。この季節変化の様子は、湖の藻類の季節変化と似ていた。

近藤さんは藻類だけでなく微小動物、細菌まで精力的に全てを調べていた。だから、その後、緩速ろ過に関して研究報告がないのに納得した。私は研究論文として発表するには、どうしたら良いか、近藤さん以上に何ができるかと躊躇した。

戦後は濁り対策で凝集剤を使う急速ろ過はアメリカ式の最新技術なので、導入が盛んであった。しかし、急速ろ過では藻臭を除けず、藻対策が課題であった。

東京都水道局に勤めていた小島貞男さんは水源での藻類繁殖の制御と、ろ過池について精力的に研究し発表していた。水道関係者である近藤さんや小島さんはろ過池

での藻類群集の生物生産力、酸素収支などについては関心がなかったようだ。そこでこれらを研究すれば学会で発表できる新しい事実を見つけることができる可能性があると思ひ研究を始めた。

私は緩速ろ過池の研究を始めるまでは湖沼や海洋での藻類の生態に関心があり、日本および海外の生態学や水環境関係の学会誌を見ていた。これらの学会誌には緩速ろ過池に関する発表はなかった。そこで水道協会雑誌を購入し、世界の水道関係の情報も得ようとしてアメリカ水道協会の会員にもなった。

3. 砂層上の藻採取道具の完成

大学院時代は海洋や湖沼、河川

での植物プランクトン調査をしていた。これらの分野は研究者が少なく、研究者が自分の研究目的に合わせて道具を工夫し、工夫をした人の名前の道具を使って論文を発表していたのを知っていた。都立大学理学部生物学科でも工作室があり、研究者は実験装置や道具を工夫していた。

ろ過池では砂層表面で藻が繁殖するのでプランクトンネットは使えなかった。しかし、ろ過継続中の砂層表面の生物膜を採取できる道具は売られていなかった。

近藤さんは、湖沼の底の泥を採取する採泥器を小型化したのを使っていた(図5)。この道具では砂層表面だけでなく砂層を厚く採取され砂面は大きく穴が開いてしまう。小島さんは吸引ポンプを用いて砂面上の藻を採取していた。この道具でも砂面上だけでなく砂も吸引されてしまう。

私はろ過継続中のろ過池の砂層を痛めず砂層表面の藻類被膜だけを定量採取する道具を自分で工夫するようになった。幸い繊維学部には工場があり金工を手伝ってくれる職員がいた。

「この道具は、砂層を傷めつつある。」

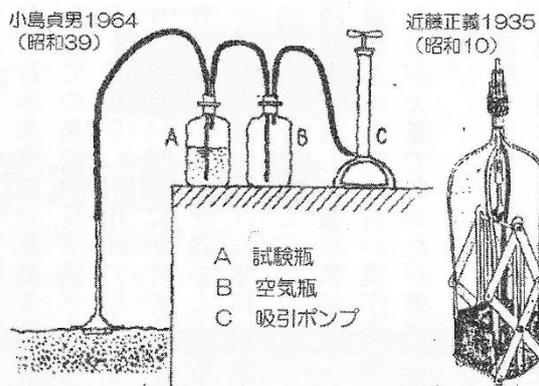


図5 過去の藻類被膜の採取道具

採水機や採泥器などはステンレスか真鍮の道具でつくられているのが多かった。しかし自分で旋盤やボール盤を使って細工をするにはステンレスは固くて工作は大変だった。そこで真鍮棒を購入し試作を繰り返した。直径70mmの真鍮棒に断面積10平方センチの穴を削り、アクリル管を差し込んだ。中に重い棒を宙づりし、砂面を叩くようにした(図6)。砂面上の藻と付着物は管内で濁り水になり、それを手動ポンプで吸引した。

この道具でろ過継続中の砂層を傷めず、砂も吸引しないで、砂層

ろ過継続中のろ過池の砂層上の真綿状の藻だけを採取できた。

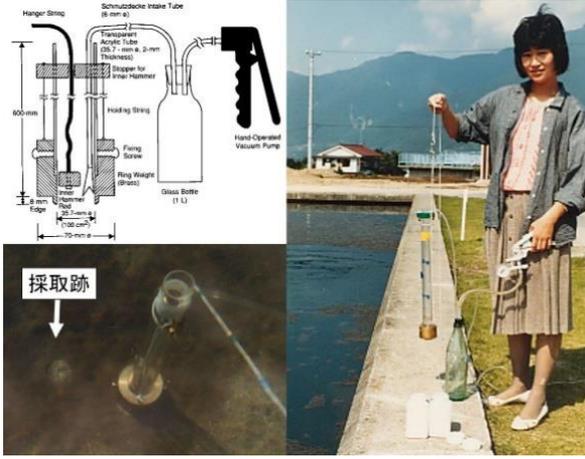


図6 藻類被膜の採取道具

この道具ができ、ろ過継続中の砂面上の藻類被膜を、面積当たり、どれだけかを正確に採取できるようになった。

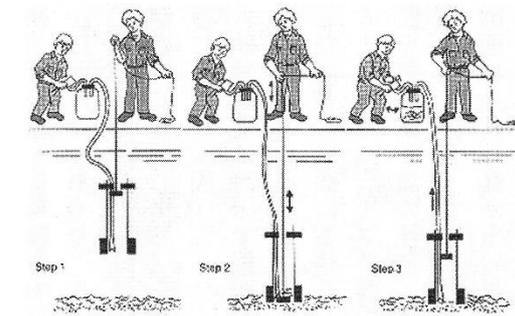


図7 採取道具の使い方

アメリカ水道協会で紹介してくれた。

表面（10平方メートル）の藻類膜だけを吸引採取できるようになった。当時、ファンタやコーラは壊れないように1リットルのガラス瓶にビニールコートされたのが売られていたので吸引瓶として用いた。吸引した濁り水は10平方メートルの砂面にあった藻類の懸濁水であった。この道具ができ、ろ過継続中の藻類被膜を簡単に採取でき面積当たりの藻類量を定量評価できるようになった。なお、後に、ガラス瓶の代わりに1リットルの透明プラスチックのメスシリンダーを使うようになった。

アメリカ水道協会の会員には月刊誌の他に協会新聞、情報誌「OP flow」が送られてきた。この情報誌に小道具コンテストの案内があったので応募したところ、アメリカ水道協会から特許を取ったとの連絡があった。私は世界中の水道関係者にこの道具を使ってもいいかと返事をした。その後、この道具の詳細と使い方を解説する記事がOP flowの1997年7月号に掲載された（図7）。

4. ろ過池で繁殖する藻は糸状

上田市では、ろ過池で藻が過剰に繁殖するのは良くないと考えていた。そこでろ過継続2週間程度で定期的に削り取り作業をしていた（図8）。また例外的に長くるろ過池を続けているろ過池もあった。

藻類被膜採取道具が完成したので、削り取り直後からろ過継続に伴う藻類量の変化を簡単に調べることができるようになった。上田市では雪解け水の影響が小さくなる4月中旬から12月まで糸状珪藻



図8 砂面汚泥の削り取り作業

現在は、機械で削り取り作業をしている。

メロシラだけが大量繁殖をしていた。近藤さんは藻類量を表すのに藻類の細胞数で表していた。しかしろ過池で繁殖する藻はいろいろな藻が繁殖し、細胞の大きさも異なり、細胞数だけでは藻類量（現存量）としては正確には表せなかった。また、種類ごとに細胞数を計数するのは大変であった。

私は単位面積当たりの藻類量を定量的に表すため、採取した藻類混濁水をガラス繊維ろ紙でろ過し藻類を濃縮した。ろ紙で集めた藻類は有機溶媒中で摩砕し光合成色素クロロフィルを抽出し分光光度計で濃度を測定した。

藻の繁殖が一番良い6月、ろ過継続に伴う藻の繁殖量の変化を調べた。藻類量は削り取り直後は少ないが、最初の1週間は急激に増加し、対数目盛で表すと直線的に増加していた（図9）。その後10日目位になると藻類量はほとんど変わらなくなった。藻類が繁殖する量と越流管から流出する量が釣り合い、ろ過池が糸状珪藻メロシラの連続培養状態になったと考えられた。

削り取りをした直後は、河川の

上から下への流れがあるろ過池では糸状に立体的になることが出来る珪藻メロシラの繁殖が目立つ。

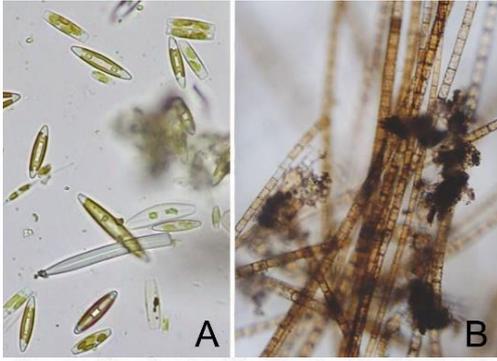


図10 河床の礫面の付着藻類(A)とろ過池で繁殖する糸状珪藻メロシラ(B)

ろ過開始は活性が悪いが、1週間位で活性が良くなる。

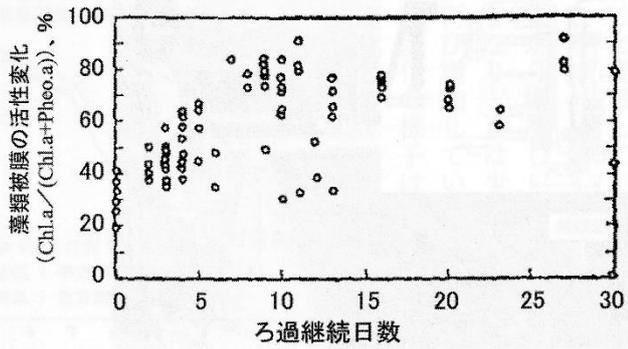


図9 砂面上の藻類量の変化

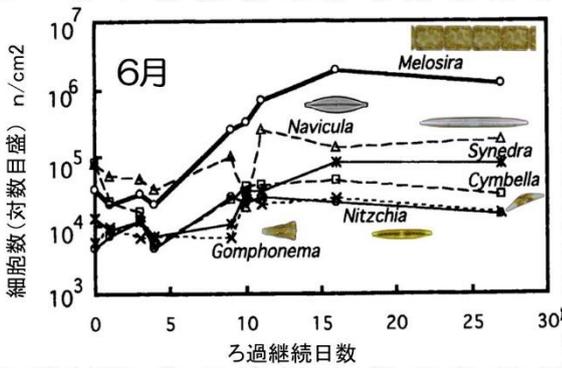


図11 種類毎の藻類の変化

礫面で繁殖する単細胞の付着珪藻がほとんどであった。ろ過を始めて数日で糸状になる珪藻メロシラが盛んに繁殖し出し、やがて優占種になった(図10)。

砂層面では河床で繁殖した単細胞の珪藻も増えるが、それは流入した藻が砂層面に蓄積したものと考えられた(図11)。砂面の藻類被膜を顕微鏡で藻の種類(属)毎に細胞数を計数した。なおろ過池の砂面は糸状珪藻が多いので細胞数の計数は大変だが、試水を酸処理をして連結した細胞をバラバラに

して計数をした。

珪藻研究では試料を酸処理し、珪藻の殻を詳細に観察し種名を同定していた。私は藻類の活性状態に興味があり、ろ過継続中の藻の状態を調べたかった。そこで削り取り時(ろ過継続0日)の砂層表面の藻を固定せずに生のまま顕微鏡により観察した。すると河床の礫面で繁殖する付着珪藻が主で、細胞の中が空の殻だけの珪藻が多かった。糸状珪藻メロシラは少なかった(図12)。

削り取り直後(ろ過継続0日)の砂層表面は砂層内部が現われている。砂層内部へ入り込んだ珪藻は光が当たらないので活性が悪くなる。この珪藻が表面が削られたので表面に現れたと考えた。

ろ過継続11日目の砂層表面は糸状珪藻メロシラが大部分で珪藻の細胞内は原形質が充満していた。河川から流入してきたと思われる単細胞の付着珪藻も空の細胞もあるが原形質が充満している珪藻も多く見られた(図13)。

ろ過池は上から下への流れがあり、日射が砂面に届き砂面上で立体的に糸状になれる藻類に適して

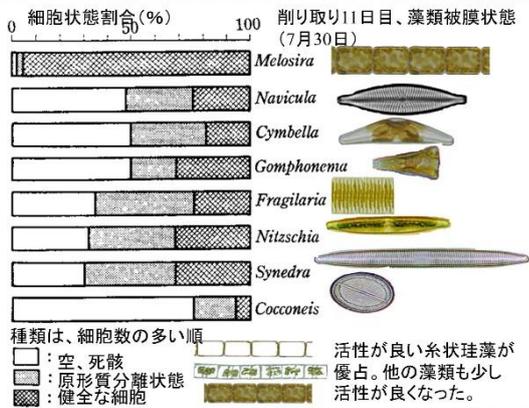


図13 ろ過継続中の藻の状態

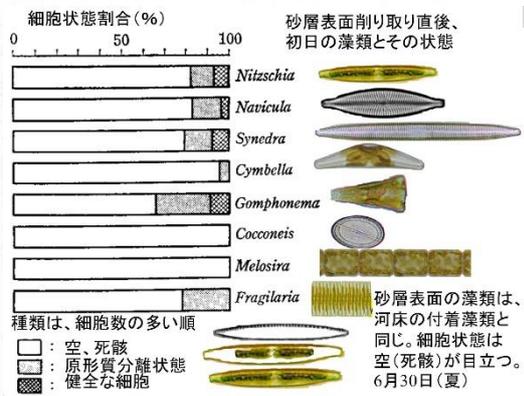
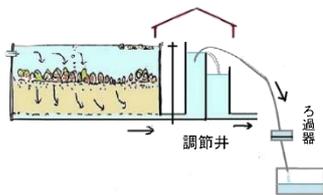


図12 削り取り直後の藻の状態

砂層の中へは単細胞の珪藻は入り込む。光が当たらないので死骸だ。

メロシラの繁殖が目立つ。
ろ過池では糸状になれる珪藻メロシラだけが活性が良い。



ろ過水はバケツで採水すると汚れてしまう。そこで、調節井の中に塩ビパイプを入れ、サイホン効果を利用し、途中にスィネックスというろ過器でろ過をした。ろ過した後の水を貯め、その水量でろ過水量を計測した。

いる環境なので糸状珪藻メロシラだけが優占的に繁殖していた。

5. 藻の発達とろ過水質

上田市のろ過池は定期的に砂面の削り取り作業を行っていた。削り取り直後はろ過池の砂層上で藻類被膜が発達していない。そこで、藻類被膜の成長に伴ってろ過水のきれいさの変化を調べた。ろ過水は直径1センチのビニール管を用い、サイホンの原理を使って調節井から導水した。ろ過器を経由してろ過水量を測った。ろ過水中の極微小の粒子量を直径47ミリのガラス繊維ろ紙1枚で20〜60ミリのガラスの破片などがあると思われたのでクロロフィル量として計測した。なお、調査した1992年当時は精密濁度計が設置されていなかった。この方法を用いた。

砂面上の藻の発達は、削り取り直後から盛んに加え、ろ過継続2週間位で藻類量はほぼ一定になり定常状態になった。増える量と越え流管から流出する量と砂層上部で藻が微小動物で食べられてしまう量が釣り合う状態になった(図14)。

砂層上部の生物群集を除去すると、生物群集が発達するの1週間位かかる。生物群集が発達するまでのろ過水はスーパークリーンの水になる。

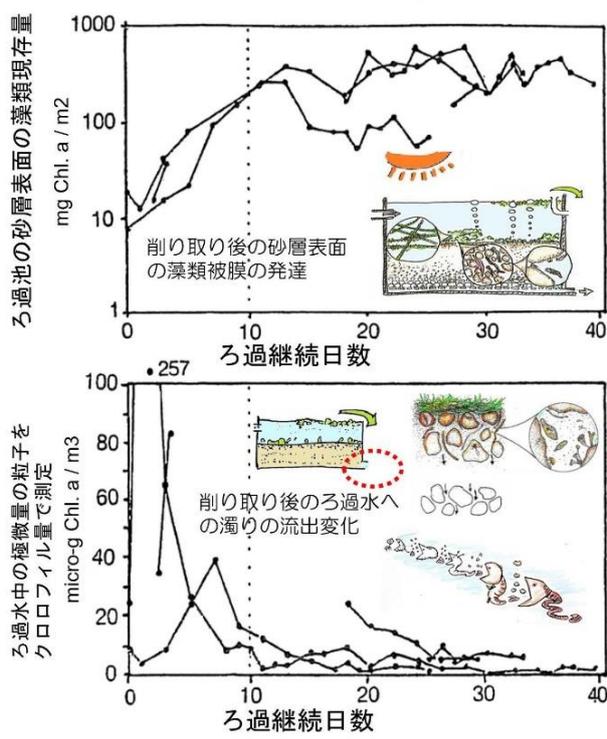


図14 ろ過継続に伴う藻類量とろ過層を通過する粒子量の変化

削り取り直後は細かな粒子(クロロフィル量として測定)は砂面で捕捉されず、ろ過を開始すると直ぐに急激に減少していた。数日すると漏出してくる粒子は極微量になり、このクロロフィル量としての値は、海洋の外洋でプランクトンがほとんどいない透明度約40ミリの黒潮海域で水深100ミリの海水の透明さと同等であった。阿寒湖、摩周湖、バイカル湖の湖水よりもきれいな水で、スーパークリーンの水になっていた。

現在の日本では緩速ろ過による

浄水場でも精密濁度計が設置されている場合がある。この場合、ろ過水濁度は、半日程度で0.1度以下に短時間であるのを確認できる。

6. 剥離面は直ぐに藻が繁殖

砂面上に藻類膜が発達すると藻類の剥離が始まる(図15)。剥離浮上した藻には流入してきた濁りが絡みつき、水面に浮いた藻は越え流管から流出する仕組みがあった。真綿状になる藻の繁殖は自動ゴミ取り装置みたいであった。

藻類被膜が剥離するのは、微小動物が活躍したから。

剥離面には気泡が直ぐに生じる。

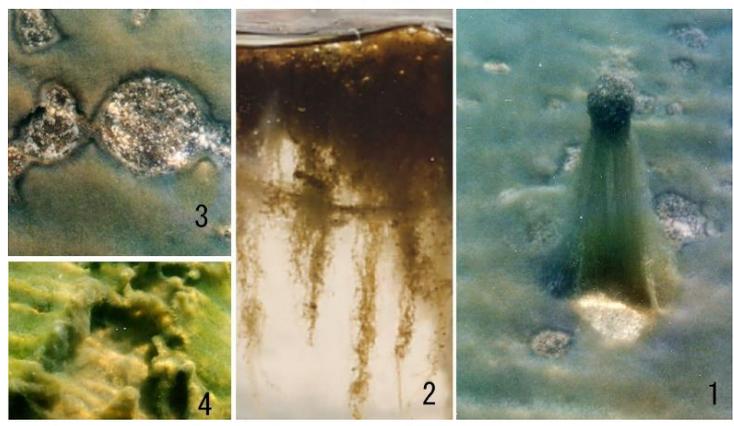


図15 砂面の藻類被膜の剥離の様子

剥離した砂面を注意深く観察すると、直ぐに気泡が付着していた。ろ過池は上から下への流れがある。この流れの速度は標準ろ過速度なら1時間に約20センチである。砂層を通過する水は、砂粒子の隙間を流れる。砂層の空隙割合は約50%なので、流速は倍の1時間に約40センチの早さで流れる。

砂面では藻が盛んに光合成をし、砂面上の水中の溶存酸素濃度は過飽和状態になっている。砂面上の

水の流れと、砂層での水の流れの急な変化という刺激で、過飽和状態の溶存酸素が気泡を生じさせていた。ビールをコップに注ぐと、その刺激で泡が生じる現象と同じである。また剥離面には直ぐに新たな藻が繁殖するのが確認された。

藻類被膜が剥離し出すのは、藻類被膜の下の砂層表面と砂層上部で微小動物が繁殖し、砂の粒子に附着していた藻が外れやすくなると考えられた。

藻類被膜が剥離しても砂面下では空腹状態の微小動物が微小の濁りを待ち構え何でも捕捉している。その結果ろ過水は常に清澄になっていた。剥離し出しても、ろ過水に濁りが漏出することはなかった。

流入水中の細かな濁りの除去と濁りを分解をする場所は、砂層上の藻類膜よりも、むしろ砂層上部で砂が変色している汚砂と言われる層で微小生物が活躍して徹底的に行われると考えた。

変色した砂層の削り取りが行われているが、砂層上の目立つ汚れだけを除去、変色している砂層を残すのが良さそうである。

7. 浄化の鍵は食物連鎖

産業革命時代の1827年、英国ロンドンで汚れたテムズ河の水を細かな砂の層を上から下へ1時間約10^{センチ}とゆつくりと流すと簡単にきれいな水ができ、英国式緩速ろ過は評判になった。その後1892(明治25)年、ドイツ、ハンプルグで緩速ろ過をすればコレラ菌まで除けることがわかった。当時は微小生物の役割については詳しくはわかっていなかった。

現在でも大きさ約1^{ミリ}の1000分の1の長さの細菌などを除くためには細かな砂の方が良いと考えられている。しかし、砂の表面、砂の間で活躍する生物が浄化の鍵である。

ろ過継続中の緩速ろ過池の砂層表面の汚泥を顕微鏡で見ると、砂の大きさは0・3〜1^{ミリ}であるが、砂の間には細かな糸屑や汚れみたいのが見える(図16)。糸屑に見えるのは糸状になる珪藻メロシラで、その他の細かな原生動物や約1^{ミリの}細菌などがある。動き回る原生動物は細かな濁りや細菌を捕捉して食べていた。また水生昆

虫ユスリカの幼虫や、線虫など多数の微小動物が動き回っていた。

砂層上で繁殖する藻は光合成で酸素を生産する。また藻類や藻類の死骸は砂層上部で活躍する微小動物の餌にもなっている。この変色した層では食う食われるという食物連鎖が成り立っている。微小生物は餌と酸素が必要である。緩速ろ過は上から下への流れがあるので溶存酸素が常に上から供給され、また砂が動かないので、微小生物は安心して活躍できた(図17)。

藻は光が当たる砂層の上。
微小動物は餌がある砂層上と砂層直下だけ。



図17 生物は砂層上部で活躍

顕微鏡で見ないとわからない微小動物は標本はできないし、固定すると何だかわからなくなる。



図16 砂層で活躍する微小生物

食う食われるの食物連鎖が浄化の鍵

しかし、急な水質変化などがあると微小生物は萎縮して活動が鈍る。この時は入ってきた汚れを捕捉できず、生物活性層を通過してしまうことがある。ただ、この時でも、変色した層より下の砂の表面に汚れが吸着する。砂層では空腹状態の微小生物が動き回り、吸着した少しの汚れも削り取り食べてしまう。その結果、砂層を通過した水は、常にスーパークリン

の水になる。現在の水道水基準の浄水濁度は2度（ミルク／リットル）、クリプト原虫対策での目標濁度は0.1度以下にしたが、上田市の緩速ろ過による浄水濁度計は常に0.000度を示していた。

生物群集が活躍し褐色になっている砂層数センチの厚みを水が通過する時間は数分である。この短時間で浄化がほぼ完全に行われている。変色していない砂層は1センチもあるが、この層は保険的な層である。緩速ろ過は時間がかかるイメージがあるが、瞬間浄化である。

8. 道具ができて研究が進んだ

現在でも世界中で緩速ろ過とい

う言葉で浄化の仕組みを誤解している。機械的な篩いろ過で濁りや細菌は除去されると思われている。その原因は、ろ過継続中の砂層状態を調査しにくかったことである。削り取り時の砂層状態を見て砂層上部が変色している部分を汚泥、汚砂と言っている。ろ過砂の間で活発に動き回る極微小の生物を簡単には見れないので生物群集による浄化とは実感しにくい。



図18 生物膜採取道具と箱メガネ

科学は確かな証拠が必要で、生物学では何という名前前の生物かを調べることから始まる。生物学では図鑑や標本で確かめることが大切であった。目に見える大きさの生物に関する研究は容易だが、顕微鏡で見ないとわからない微小生物の研究をするのは大変だった。昔は顕微鏡写真や動画を簡単には撮ることもできなかった。

私は現場主義の生物屋で、ろ過継続中の藻の活躍に興味があった。箱メガネで水中を観察し、ろ過継続中の砂面で活躍する生物だけを採取できる道具を開発した（図18）。最初は真綿状に発達する糸状珪藻メロシラの役割に注目していた。生物膜と言われる藻類被膜がなくなっても水質が良く、浄化は

変色した砂層部分で活躍している空腹状態の微小生物群集の役割が重要であるのに気づいた。そこで私は緩速ろ過という用語に対し生物群集が活躍するというイメージを連想させる生物浄化法 Ecological Purification System と呼ぼうといいだした。

寄稿のご応募と 連絡先のご案内

水道公論では、読者の方々とのコミュニケーションを潤沢にし、広く誌面を活用していただくため、原稿の受付やご相談を随時行っています。

今、日本の社会は大きく変わろうとしています。私たちは多くの知見に触れて情報を相互に豊にもって、社会の一員としてこれからの日本の社会づくりに参加していきたいものです。

原稿は、論文、随筆、話題一般、提言、主張、意見、紀行、翻訳などジャンルは問いません。字数も特に規定しません。皆様の自由闊達なご寄稿を期待しております。奮ってご相談ください。

◇連絡先

Tel 03-3264-6724

Fax 03-3264-6725

E-mail natori@suido-gesuido.co.jp

出版企画事業部 水道公論部 名取

日本水道新聞社

道具は何でも手作りのした。顕微鏡用の木製ケースの側面にガラスを貼って箱メガネを自作した。