

連載

生物屋の緩速ろ過池研究

その2 砂面で藻が、砂層で細菌が繁殖

信州大学名誉教授 中本 信忠



1. 水中の砂層表面を観察

ろ過継続中の砂層の表面の藻類被膜の状態を観察したかった。そこで顕微鏡用の木製の箱に穴を開けガラスで窓をつけた箱メガネをつくった。箱メガネを水面につけ腹ばいになり、カメラを入れ水中写真を撮った(図1・2)。また、砂面上の藻類膜を簡易に採取する道具も工夫した(図3)。柄付きの天ぶらカス取り金網を塩ビ水道管に結びつけた。

水深1mの底部の砂と一緒に藻類膜を掬いとった。水中では砂面上の藻は真綿状でフワフワしていた。藻類膜の下の砂は汚れていなかった。水面から持ち上げると、真綿状の藻はべったりとなった(図4)。水中では真綿状の藻に絡みついていて細かな濁りは外れて砂の中に入り、砂が汚れてしまうのはつきりとわかった。

2. 削り取り時の砂層表面

戦前、洞澤勇さんは東京の浄水場のろ過池を調べ、削り取り時は、砂層上部だけが汚れているのを確かめていた(図5)。また、この汚

除き箱
廃棄された木製の顕微鏡箱



図1 ろ過膜採取道具と箱メガネ



図2 砂面から剥離する藻類被膜



図3 砂面の簡易採取道具

水中では砂層内は汚れない



図4 水中の藻類被膜は真綿状、水面から持ち上げるとベタとなり砂も汚れる

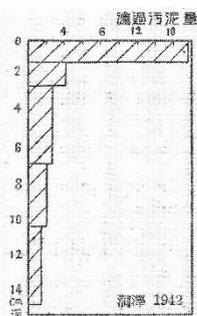


図5 砂層の汚れは砂面直下が多い

れの中の生物は珪藻が大部分であると書かれてあった(図6)。上田市の染屋浄水場でも削り取り時の砂層上部は糸状珪藻メロシラが真綿状に繁殖していたのが、水が抜かれたので砂面上にベタツとなり、砂層上部の砂は汚れていた(図7・8)。この変色した部分を汚泥とか汚砂と言っていた。し

削り取り時、水を抜くと、フワフワだった藻類被膜はベタツとなる。



図8 削り取り作業 (東京都)



図7 削り取り時の砂層上部断面 (上田市)

第28表 東京都に於ける一瀬池の藻類沈渣の生物相(洞澤 1943)

生物名	個体数 1cc 中×
藍藻類	1600
珪藻類	206400
緑藻類	3200
原生動物	8400
輪虫類	1600
その他	400
× 30 分沈後	

図6 洗浄砂の中には珪藻が多い

かし、この砂層上部の汚れの大部分は、水を抜いたため、水中では真綿状の藻類被膜に絡みついていたのが外れて、砂層に入ってしまったのもあると思われた。

洞澤さんは「原水中に混在してゐた生物體、その死骸、土壤その他に由来する浮遊物質、コロイドが砂層表面に抑留され、之が主成分となり、更にその上種々の藻類、水棲細菌等が繁殖し、それ等の生物體及至その分泌物が上記夾雑物と相働いて膠状性に富んだ沈渣を形成する。この沈渣の中砂層上に堆積し膜状になつたもの」と定義していた。海外でも砂層上でゼラチン(スライム)状になつている生物膜をドイツ語の *schmutzdecke* (泥の覆い) という用語を、英語で *dirty skin*、*Beer skin* と言われている。しかし、私は生物活躍層と呼ぶのが良いと思つている。

3. 砂層面での生物群集の発達

砂面の藻類被膜を採取して顕微鏡で観察すると糸状藻類の間に動き回る原生動物などがいるのに気づく。この藻類被膜は砂面から剥離し浮上してしまう。だからこれらの微小動物にとって藻類被膜の間は安心して活躍できる場所ではない。運動能力がほとんどない細菌などにとつても流れがある環境

は安心してゐる環境ではない。

細菌は1^{mm}程度、原生動物は数十^{mm}で、糸状藻類メロシラの細胞の大きさも数十^{mm}であり、顕微鏡でしかわからない微小生物の立場になると砂の大きさは0.5~1^{mm}程度で巨大な壁みたいである。ろ過池へ流入してくる細かな汚れは、砂層上に真綿状に発達した藻類膜に絡みつが、絡みつかなかった濁り粒子は砂の粒子の表面に付着する。砂の間や砂の表面で活躍する微小生物が、その粒子を削り取つて食べる。上から下への流れだと、砂が動かないので微小生物が安心して活躍できる。これらの

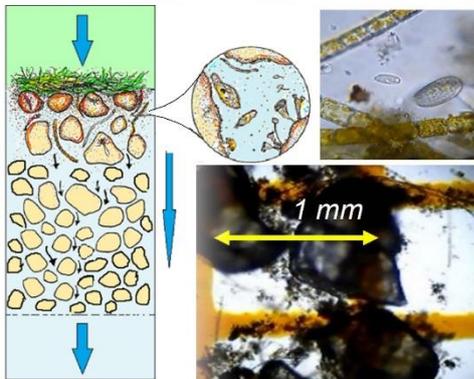


図9 砂層の様子、砂の大きさと微小生物

活躍している生物は、砂の上と砂面直下だけ
砂と比べると生物は極端に小さい

生物は餌がくる砂層表面直下に集まつている(図9)。

砂層上部の変色した部分を汚泥汚砂というが、生物群集が活躍している層である。この変色した部分を除くのは、浄化機能を除くことである。目詰まりさせる部分だけを除くようにするのが良い。

戦前は釘入れといい、表面を削り取りした後に、砂面を地ならし用T字型の棒(トンボ)の下面に釘をつけたもの(レーキみたいなもの)で表面の汚れを掻き混ぜて鋤き込むこともしていた。生物群集による浄化機能を早く発揮させるように藻や微生物の削り残しを均一に掻き混ぜるようにしていた。

ルトナー(E. Ruttner 1966)

3)の陸水学の本に、流れがある河川水でも底の礫の後ろや礫間の淀みがある場所は流れが弱く、生物が流されにくいので活躍しやすいと書かれていた(図10)。実際に増水が頻繁でない溪流の岩に水苔などが張り付いているのを見ることがある(図11)。この水苔の間にはいろいろな動物がいる。生物群集は、流れている水の中より転がらない岩の表面に付着したり水苔



流れている水中では生物は安心して活躍できない。
礫の表面や陰、流れが緩やかなところで生物は活躍する。

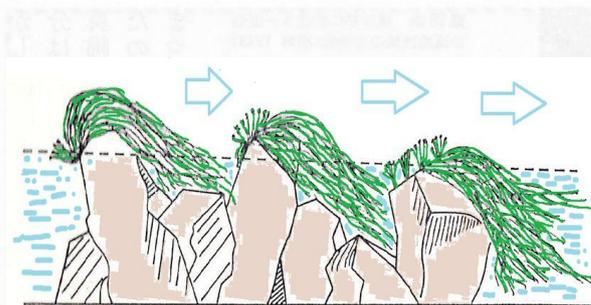


図11 溪流の岩の上で繁殖する水草

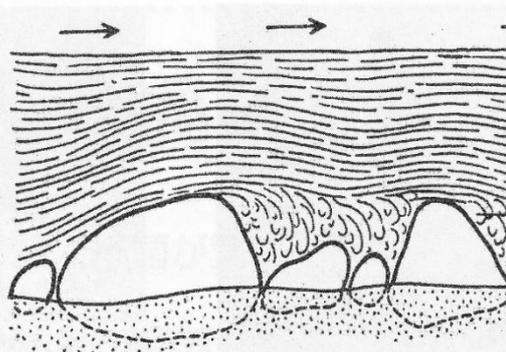


図10 河川の水の流れと底の礫

台所で使った食器などに水を入れたままにし翌朝、容器がヌルヌルになるのに気づくことがある。ガラスの食器でもプラスチックでも同じくヌルヌルになる。また浴槽の水を流さないで一晩置くと浴槽の表面はヌルヌルになる。このヌルヌルになるのは壁面で大きな1ミリの細菌などが繁殖し、多糖類の粘質を細胞外に出し微生物(細菌)膜が形成されるからである(図12)。細菌の繁殖速度(分裂速度)は条件が良いと数十分と早い。

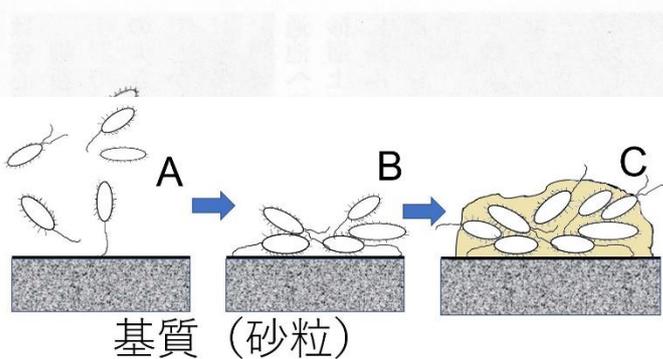


図12 砂の表面での細菌の繁殖

4. 砂の表面で最初に細菌が繁殖

の間で繁殖する。
水中より底の砂礫の表面、落葉などの表面は、水の流れがゆるやかで、微小生物が安心して活躍できる場である。緩速ろ過池での上から下への流れは砂が動かず、微小生物が安心して活躍できる環境である。ゆっくりの速度というのは流速を表すのではなく生物群集にやさしいという意味であった。

遊んでいた細菌が附着する。微生物が安心して活躍し分裂して増え微生物膜を形成し多糖類の粘質を出す。この砂粒表面で発達した微生物膜を原生動物などが餌として捕食する。しかし河川は降雨などで増水すると細かな砂は流されて砂礫面は擦すられるので、増水が頻繁な河床の砂礫面では微小生物は安心して繁殖できない。
光合成をする藻の細胞分裂の速

13)。
また、ドイツで覆い緩速ろ過池とオープンろ過池を20年間のデータを調べ、オープンろ過池

度は1日に1回程度である。それに比べ細胞の大きさが小さい細菌などの分裂速度は非常に早い。実験に良く使われている大腸菌は条件が良ければ約30分に1回分裂する。1日(24時間)で48回分裂するならば約280兆個になる。緩速ろ過池でも削り取り後に、砂粒の表面に濁りが吸着すると、その表面で微小生物がすぐに活躍しだす。だから削り取り後、数時間から半日でもろ過水がきれいになる。砂層表面下で活躍する微小生物の繁殖は水温に関係し、入ってくる餌(栄養物質)の質や量にも関係する。動き回ることができる微小生物は、さらに餌を求めて砂層表面近くに集まる。

附着した面で細菌は安心して増殖する。



砂層表面、直下しか細菌はいない。
細菌の餌（栄養）がくるところ。

の方が、細菌除去率は良いと紹介していた。ヘーゼンは生物が関係しているかもしれないと記述していたが、濁り除去には細かな砂での機械的な篩い作用が主と考えていた。

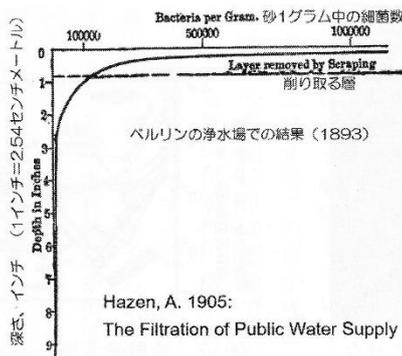


図13 砂層の細菌分布

5. 覆いろ過池でも生物は活躍

英国は暖流の影響で厳寒にならないが、北米大陸では冬期1月の平均気温が0℃以下になる(図14)。ヘーゼンは厳寒期にろ過池が凍結すると、砂面の削り取り作業が困難になるので、凍結防止としてろ過池を覆うことを勧めていた。覆い緩速ろ過池では砂面で藻が繁殖できない。しかし、藻が繁殖

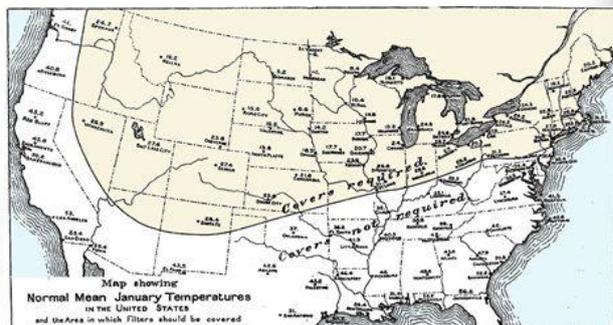


図14 1月の平均気温が0℃以下ならろ過池を覆うことを勧めた

北米大陸内部の冬は厳寒だ。

しなくても砂が動かないので砂の表面で細菌が繁殖し、細菌膜が形成され、それを食べる微小動物が繁殖する。細菌や微小動物が活躍するので、ろ過水は病原菌がいないう安全でおいしい水になる。私は生物群集が多く、その活性を良くするのが良いと思っている。

例えば、長野県飯綱高原にある飯綱浄水場の緩速ろ過池は、私たちが調査した1992年当時完全に覆っていた。緩速ろ過は生物群集による浄化なので、藻を増やして生物群集を多くする方が良く

6. 糸状珪藻が常に繁殖するとは限らない

私は上田市の染屋浄水場では糸状珪藻メロシラが大繁殖し、しかも4月中旬から12月まで常に優占している特別な環境であると学会で発表した(図17)。

しかし、1月から菅平高原からの雪解けの影響がある期間は、砂面での藻の繁殖が悪かった。上田市の染屋浄水場の原水は菅平高原からの神川の表流水で1〜2月の河川水温はほぼゼロで、最低気温もマイナス10度位に簡単になり、ろ過池の水面は凍結してしまう。そこで防止のため流入水を水面へ水平に流れをつけるようにして凍結防止をしている(図18)。この期間の生物の活性は低いが活動をしている。

また、3〜4月は菅平高原の雪解水により河川水温は低く、ろ過



図16 日射が入る様にした (当時)



図15 長野県飯綱浄水場 (当時)

上田市の冬はろ過池水面は凍結する。削り取り作業が楽なように凍結防止。



図18 ろ過池水面を凍結させない工夫

ろ過池水面は1~2月の凍結、3月はまだ雪解け水で低温。厳寒期は、ろ過池では糸状珪藻は増えられない。

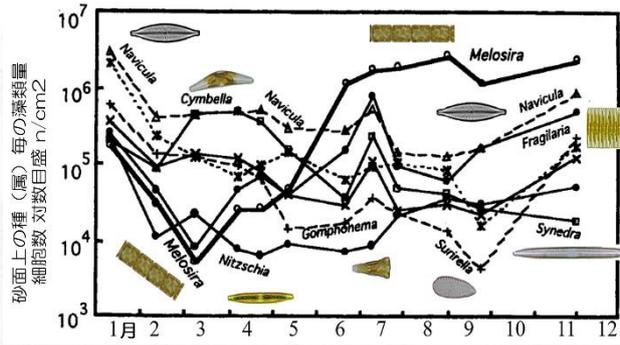


図17 染屋浄水場ろ過池砂面上の藻類の季節変化

池流入水は少し濁っている。この時期のろ過池の砂層表面は流入河川の礫面で繁殖する付着藻類（主に珪藻）が流れ込み、砂面に蓄積

していった。上田市のろ過池で糸状珪藻メロシラが活発に繁殖し出すのは雪解けの影響がなくなり桜が咲き終わった4月中旬からで、草木の葉の展開する時期と一致していた。

学会での私の発表を聞いていた小島貞男さん（当時、日本コン中央研究所長）から「必ずしも糸状珪藻が常に繁殖するとは限らない。上田だけでなく、いろいろな浄水場を見学しなさい」と助言してくれた。小島さんは理科教師を育てる東京高等師範学校（現在の筑波大）卒で、東京都水道局でろ過池での藻対策で苦労したことがあった。小島さんは私だけでなく誰にでも親身になり適切な助言をして

くれた。私は上田市での現象が普遍的であると思って発表をしていたが、私が「井の中の蛙」であったと気づかせてくれた。山国の長野県にある小さな緩速ろ過の浄水場を見学した。また、日本各地で開かれる学会の機会に各地の浄水場を見学した。小さな自治体の浄水場は無人で見回りをしているだけである（図19）。このような浄水場のろ過池では茶色の糸状珪藻でなく糸状になる緑藻が繁殖していたり（図20）、藻がほとんどいないろ過池もあった。また、ろ過池で藻が繁殖しにくくするためろ過池の水深を2メートル以上と深くしている浄水場もあった。

7. 糸状珪藻が最初に目につく
上田市で調査を始めた当時は、藻の繁殖は悪いと考えていた。そこで、ろ過継続2~3週間中砂面の削り取る作業をしていた。削り取り作業は汚泥、汚砂と呼び茶色に変色した部分をきれいに除いていた。この作業によりろ過池で活躍する生物群集（浄化の主役）は取り除かれていた。

ろ過池は上から下への流れが常にあり、河川から流入している小さな細菌や付着珪藻はきれいな底の砂粒の表面に付着する。また、砂粒の隙間から砂層内部へも入る。砂層上部では砂の表面に直ぐに細菌類が付着し細菌類の生物膜が形成され、細かな濁り物質の吸着効果が促進される。しかし、細菌に

浄水場はろ過池と浄水タンクだけ。無人だ。



図20 ろ過継続が長いろ過池には緑色の固い糸状藻類が繁殖



図19 山間には無人の緩速ろ過施設がある

ろ過継続が長くなっても砂層内は汚れていない。

長野県須坂市西原浄水場

よる生物膜は簡単には確認できない。ろ過池で最初に目につくのは砂層表面で真綿状に繁殖し出す糸状珪藻メロシラであった。水深約1メートルの砂層表面では日射が当たり藻類が光合成活動をして成長していた。

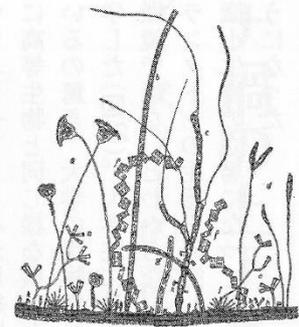


図21 キンギョ藻の茎の表面に附着藻などが繁殖している様子

ルットナー(1963)の本には、浅い沼で繁殖しているキンギョ藻(フサ藻)の葉が底に落ち、その葉の表面には顕微鏡で見ないとわからない付着性の微小の藻や原生動物が繁殖する絵(図21)がある。ろ過池で繁殖する糸状緑藻クラドホラに小判珪藻が附着しているのが見られることがある(図22)。砂層表面での珪藻などが繁殖しだす様子と同じと思われる。

珪藻の細胞壁は珪酸質で細かな穴があいたザル状構造になっている。また、粘性物質を細胞外へ分泌し砂の表面に附着しやすく、立体的に成長することもできる珪藻がある。細胞外に分泌した粘液を上手に流動させ砂の表面を移動する珪藻もいる。

ろ過池の新しい砂層表面は砂が動かないのでまず細菌類が繁殖し、次に光合成をする藻が繁殖し出す。



図22 糸状緑藻に小判珪藻が繁殖

附着珪藻の細胞の大きさは数十ミクロンで、条件が良いと1日に一回程度で分裂して増える。砂面という環境では立体的に糸状になれる珪藻が有利であった。水温が低い上田市

では糸状珪藻メロシラが最初に目立つ藻類だった。水温が高い地域やろ過継続が長いろ過池では糸状になれる緑藻も繁殖していた。糸状緑藻が繁茂する浄水場を調査したら最初に細胞の大きさが小さい糸状珪藻が繁殖し、後に手で触っても固く細胞の大きさが糸状珪藻メロシラの数倍と大きい糸状緑藻になっていった。珪藻から緑藻へ遷移するという現象があった。

私たちはろ過池での細菌の繁殖の様子は肉眼では見えないが、細胞が大きい糸状珪藻の繁殖は裸眼でも最初に目につき、手でも掬える生物であった。

8. 環境に適した藻が繁殖

植物が繁茂するには十分な日射と栄養塩が必要である。湖沼では流入してくる河川水中の栄養塩を利用して日射が十分当たる水面近くで浮遊性の植物プランクトンが繁殖する。河川は水が横に常流しているので浮いて繁殖する植物プランクトンは流されてしまうので繁殖できない。そこで、礫面で附着して繁殖する藻が繁殖する。緩速ろ過池はゆっくりとした流れ

が上から下へ向かう流れがあるので湖などの植物プランクトンは繁殖できなかった。浅い砂層の上では河床の礫面で繁殖する附着藻類は繁殖し出しても、その上に新たな藻類などが繁殖するので、立体的に成長できる糸状藻類の繁殖に適した環境であった(図23)。

湖沼や河川の礫面、緩速ろ過池では最初に小さな珪藻類が繁殖するのが一般的であった。その後、細胞が少し大きく堅固な緑藻類も繁殖した。

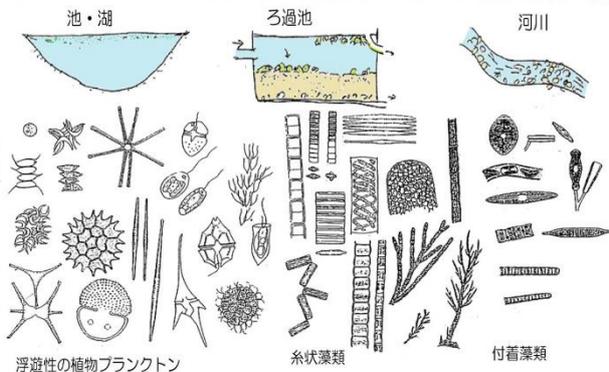


図23 流れと繁殖する藻の違い

環境が違えば、その環境に適した藻類が繁殖する。

注意深く観察すると、真綿状になる糸状珪藻メロシラは砂面に堅固に付着しているわけではなかった。光合成が盛んだと、簡単に剥離浮上した。砂面上に単に横たわっている (Lying down) 状態みたいだった。

国際学会で真綿状の糸状珪藻について発表したら、外国の研究者から、砂丘地などにある浅い浸透池 Seepage Lake で良くみられる現象と教えてくれた。

9. 活躍する生物の大きさ

小さな生物は種類が多く、大きさも形もいろいろで、生物量を表すのに個体数では意味が無く苦労をした。細菌は約1 μ m、細かな原生動物は10 μ m位から数百 μ m。細かな珪藻や緑藻などのプランクトンも同程度の大きさである。1 μ m以下の大きさの微小動物も多数いるが目立たない。これらの生物は顕微鏡でしかハッキリみることができない。私たちは大きさが数 μ m位の生物からやつと気づくことができる。微小動物も岩陰などについて目立たない。ろ過池で繁殖する糸状になる珪藻や緑藻は太陽光が当

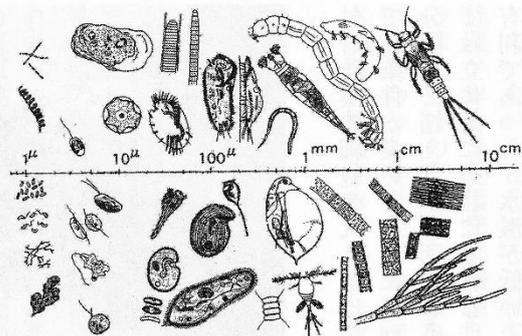


図24 水中の微小生物の大きさ

たる場所で繁殖し目につきやすい(図24)。

10. 浄化に役立つ生物

私は高校の生物部で、顕微鏡で見ないとわからない原生動物のゾウリムシやアメーバが単細胞なのに高等生物と同じ様な機能をしているの驚き、大学の生物学科に進学した(図25)。大学院に進学し顕微鏡で見ないとわからない植物プランクトンの生態を研究し、常に微小生物の立場になって考えるようになった。

理学部から応用学部の信州大学

高校生のとき、単細胞のゾウリムシに驚いた。

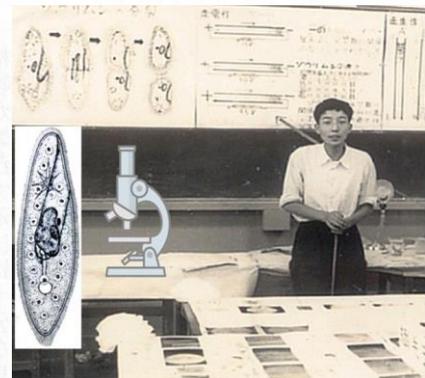


図25 ルーツは高校の生物部

繊維学部就職し緩速ろ過池で繁殖する藻の役割研究を始めた。藻類より小さな微小生物の重要性にも気づいたが、細菌は丸い形で、細胞内の構造は普通の顕微鏡ではわからない。まず目につく糸状珪藻メロシラが浄化に役立つことに気づいてもらおうとした。

緩速ろ過は英国で200年前に完成し安全な水ができることがわかった。当時は顕微鏡でしか見ることができない生物群集の活躍による浄化と気づかなかった。緩速ろ過 Slow Sand Filter という名前では生物群集の活躍とは想像できない。また、砂層表面や砂層上部に生物膜が発達すると言われている。膜という用語では、1枚のろ

紙のような生物群集のイメージがある。しかし、図9のように、実際は砂層上部1〜2 μ mの厚みの中、砂層上、砂層表面、砂層直下、その下の砂層で上から下へとだんだんと活躍する生物群集が異なっている。この変色した砂層で、いろいろな生物群集がそれぞれ役割を持って活躍している。そこで私は単なる機械的な篩いろ過をイメージしてしまいう緩速ろ過でなく生物浄化法 Ecological Purification System と言い直そうと2005年に提案した。生物浄化法は自然界での生物現象の賢い活用、スマートテクノロジーである。

私は大学で得た知識や知恵を皆に伝えられていないと思っている。そこで、2021年2月に技術解説本『おいしい水のつくり方②』を千曲会(信州大学繊維学部同窓会)から出版してもらった。

おいしい水のつくり方-2
緩速ろ過でなく生物浄化法
信州大学名誉教授 中本信志

