

連載

生物屋の緩速ろ過池研究

その14 藻の繁殖は栄養塩濃度より 水深、気圧が大きく影響していた

信州大学名誉教授 中本 信忠

研究を始めた当時は1923年から稼働していた3つのろ過池が現役だった。

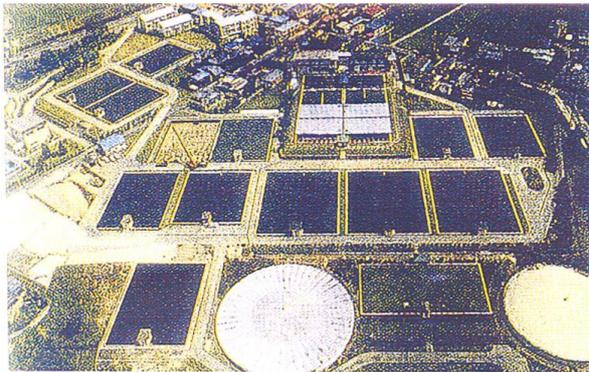


図1 1984年当時の染屋浄水場

垂直であった。ろ過池のろ過面積は、全て780平方メートルで同じであった。
1968（昭和43）年に菅平ダム湖が完成すると上田市の水道水に異臭味が生じ、その原因調査を信州大学繊維学部の方が調査し、菅平高原の農耕地、宿泊施設の影響でダム湖において植物プランクトンが繁殖したのが原因ということになった（図3）。

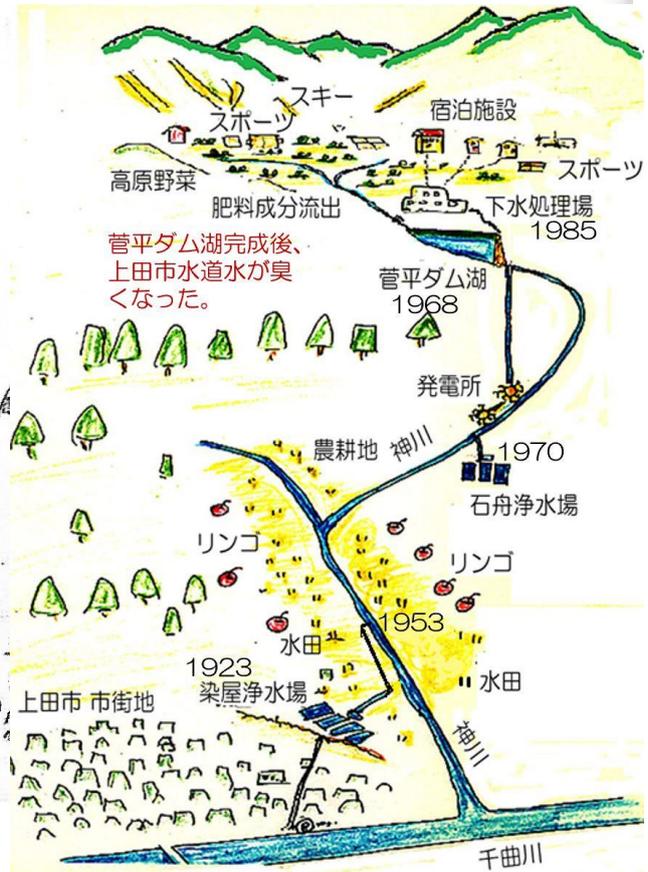
戦後の高度成長期は、河川の水質汚濁が酷くなり、湖沼が富栄養化し、植物プランクトンが大繁殖し大問題になっていた。当時、湖沼での藻の繁殖は水中のリンが制限要因になり繁殖量が決まると言われていた。
農作物が成長するためには肥料

2 高原からのリン流出が問題

の濃度は約1ミリグラム、リン酸態リンの濃度は約0.04ミリグラムであった（図4）。

1 植物プランクton屋がる 過池の藻の研究を始めた

上田市染屋浄水場（図1）は千曲川の伏流水をポンプで揚水し、1923（大正12）年にろ過池が3つ完成した。戦後1953（昭和28）年から神川から取水し自然流下で、ポンプの動力費がかからない方法で染屋浄水場に導水し、ろ過池を増設し、現在はろ過池が13池になった（図2）。



研究した当時は、千曲川の支流神川から自然流下で導水していた。上流は菅平高原だった。

1923年当時は、千曲川から揚水していたが、戦後1953年から神川から導水するようにした。

菅平高原は火山灰土で、高原野菜の栽培が盛ん。



図3 高原野菜と高地スポーツが盛んな菅平高原

火山灰土は、リンを吸着するので、河川に施肥したリンが流出しない。

としての窒素とリンの元素の重さ割合で窒素16、リン1の栄養塩が必要というのは農業の常識であった。湖沼での藻の繁殖は農作物の肥料要求量の原理と同じであった。湖沼中の栄養塩を調べ、窒素は十分であるがリンが制限状態であると言われていた。

菅平ダム湖流入水の窒素量は約1ミリグラム、リン酸態リンの濃度は約0.04ミリグラムで（図4、前出）、リンの割合は25対1で、リンの割合が極端に少ないことが明白であった。

菅平高原の火山灰土はリンの吸着能は高いことが知られていた。高原から流出するリン成分を少しでも減らすために、宿泊施設がある地区に下水道を整備し下水処理をして、リン成分の流出を減らすことを1974（昭和49）年の報告書（図5）で指摘された。

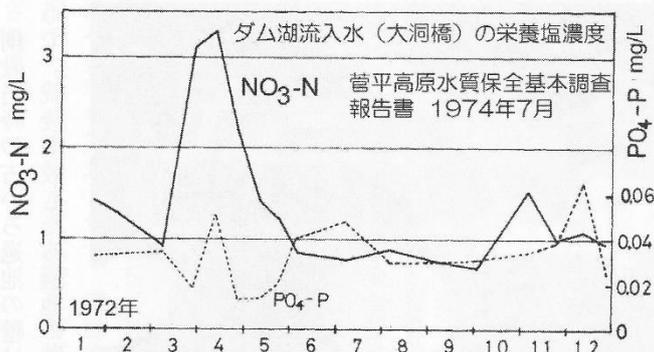


図4 菅平ダム湖への流入栄養塩1972年

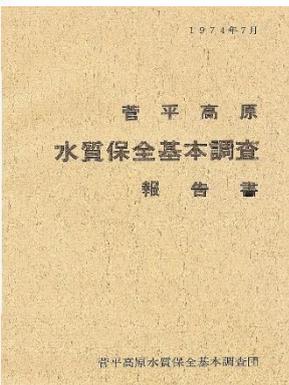


図5 水源保全報告1971年

その結果、1985（昭和60）年にダム湖の直上に下水処理場が完成した。しかし下水処理は有機物を生物群集による無機化処理であり、肥料成分（栄養塩）状態にして排出するので、この処理水をダム湖に流入させると、植物プランクトンをさらに増やすことになるとわかって問題になった。

そこで下水処理水がダム湖の植物プランクトンの繁殖に影響させないように、下水処理水をダム湖左岸にパイプで送水し、堰堤際に放流した。この水をすぐにダム湖から放流されるようにした（図6）。この水は発電所経由で河川に放流された。しかし発電所のすぐ直下に石舟浄水場の取水堰があった。そのため石舟浄水場の水道原水は菅平ダム湖の下水処理水の影響が大きくなった（図2、前出）。

ダム湖での植物プランクトン繁殖の制限要因のリンは宿泊施設と結論。下水処理場が建設された。

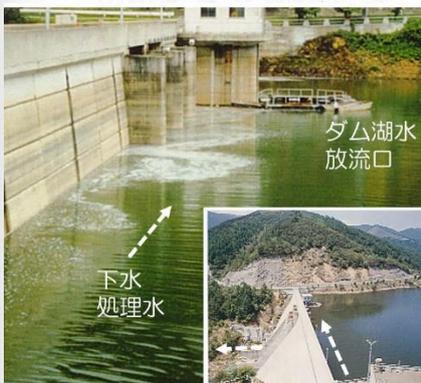


図7 下水処理水がダム際へ

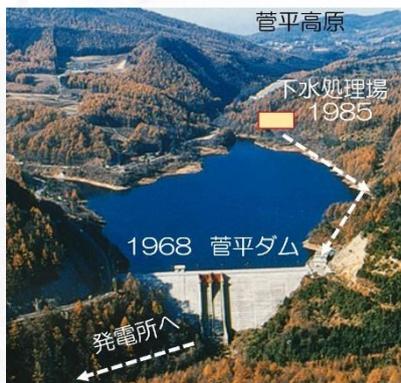


図6 菅平ダム湖

下水処理水がダム湖へ流入すると、更に、植物プランクトンが繁殖するとわかり、ダム際に放流し、そのまま、ダムから放流された。

東京都の水道水源ダム湖での淡水赤潮現象を研究していた。
川から湖の境界で、新しい環境に適した生物が繁殖する。

ダム湖への栄養塩の流入負荷を調査。

と流入水中の栄養塩の関係を調査した。

3 ダム湖流入水を調べる

上田から約20キロメートル離れた菅平ダム湖へ頻繁に通って調査をした。菅平高原には筑波大学の実験センターがあり、センターでダム湖の富栄養化の話をしたところ、河川水の採水に協力してくれることになった。

菅平高原から流出する栄養塩（リン酸態リンと硝酸態窒素）を農



図8 ダム湖流入部で藻が繁殖

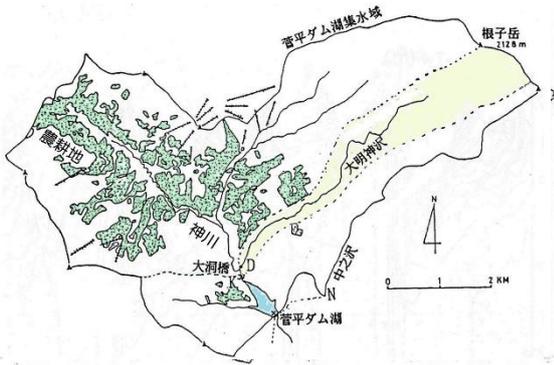


図9 集水域内の農耕地

耕地の影響がある神川のダム湖流入部（K）と農耕地の影響が直接にない大明神沢（D）の水を1983（昭和58）年、土日休日を除く毎朝、採水してもらい調べるこ

とができた（図9）。

農耕地の影響がある神川のリン酸態リンの濃度は1日中20〜30μg/Lで一年中ほぼ変わらないが、農耕地の直接的な影響が無い大明神沢は、積雪が多い冬のリン酸態リンの濃度は神川より高く、融雪期や、農業が盛んな時期は逆に低くなった（図10）。

地球化学ではリンは岩石起源で

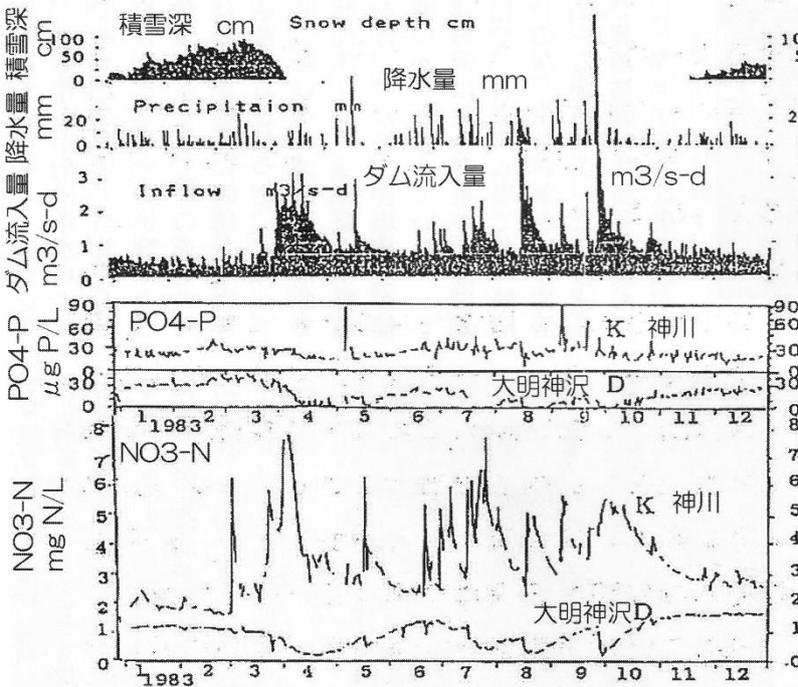


図10 ダム湖への流入栄養塩1983年

あると言われていた。菅平の大明神沢は人間活動の影響が少ない山岳河川であった。水中のリンは岩石起源で、厳寒期は融雪がなく、地下水の流れが遅く、地下水が岩石と接する時間が長くなり岩石から溶出するリン酸態リンの濃度が高くなったと考えられた。また

融雪期や雨が雨がある時期は、リン酸を含まない雨水で希釈されたと考えられた。

硝酸態窒素の変化は、農耕地の影響がある神川の濃度は融雪期と降雨がある時期は濃度が高く、厳寒期で河川水量が少ない時期は、硝酸態窒素の濃度が低かった。一

ダム湖への流入水（高原野菜畑の影響がある神川と、影響がない大明神沢）を連日採水して、栄養塩濃度の変化を調べた。2年間、土日を除く、毎日午前中に採水。

上田市には、石舟と染屋の二つの浄水場がある。一つのろ過池の面積は780m²、5池と13池、合計18池もある。



図11 上田市の浄水場と水源



図12 石舟浄水場の浮上藻

方、農耕地の影響が少ない大明神沢の硝酸態窒素濃度は低く、融雪期と雨が深い時期は濃度がさらに低くなり、硝酸態窒素は、農耕地へ施肥される肥料成分の影響が大きいことが明白であった。

菅平高原の気象を調べると、降雨が一年中あることがわかった。しかし私たちの午前中の流入河川での採水では河川水は濁ってなく、降雨の影響はほとんど無かった。菅平高原では夕立が多いが、降雨後、数時間ですぐに河川水の濁りは無くなった。午前中の毎日採水

では夕立の影響を測定できていないことがわかった。山地河川の水質調査の難しさを実感した。

4 石舟浄水場を調べる

染屋浄水場のろ過池で藻類繁殖を調べていたが、比較のために約10キロ離れたところにある石舟浄水場の藻の繁殖状況を調べた(図11)。

石舟浄水場のろ過池では藻類被膜の剥離浮上が目立った。ろ過池の水深は染屋浄水場と同じで約1

メートル、ろ過池の砂層表面では藻は盛んに光合成をし、気泡を生産し、剥離浮上が染屋浄水場より盛んであった(図12)。当時の石舟浄水場は下水処理水の影響が大きく、栄養塩量が多く、ろ過池の砂面では藻類が盛んに繁殖し生物群集が活躍すると思つた。

当時、私はテムズ水道では冬でも糸状珪藻メロシラが盛んに繁殖するのは、原水の栄養塩濃度が極端に濃いからと思つていた。

緩速ろ過は生物群集の活躍による浄化で、石舟浄水場で藻の繁殖が良いのは、生物群集が盛んに活躍している証拠であった。緩速ろ過池で藻類被膜が砂面から盛んに剥離し、浮上するのは生物膜が剥

離するので良くないと言われるが、浄化機能を損なうことは無かった。剥離現象は、砂面直下で微小動物が活躍しただけで、生物群集による浄化機能が発揮するからであつた。その結果、ろ過水は、スーパークリーンの水になつていた(図13)。

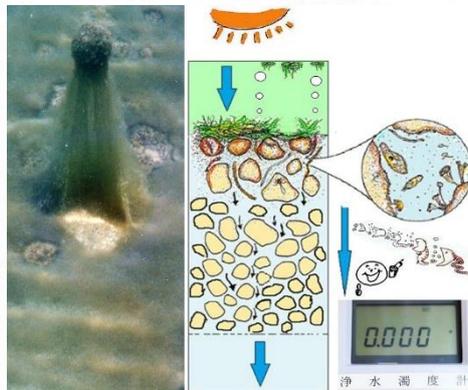


図13 藻の剥離浮上とろ過水

5 海拔高度と気泡生産

私は藻類被膜を採取し、その発達の状態を調査していた。また藻類被膜の剥離浮上は光合成による酸素生産、砂層表面での溶存酸素飽和度に関係するので注目していた。

大気圧1気圧での水温 (T:℃) と溶存酸素飽和度 (Dsat, O₂mg/

海拔700mの石舟の方が、藻の浮上が著しかった。

砂層面の藻の光合成で生産された酸素が、溶けきれずに気泡が生ずる。溶存酸素濃度が過飽和になるので気泡が生ずる。気圧、海拔高度、水深が関係する。

長野県は山国、海拔高度で溶存酸素飽和度が変わる。 湖沼調査では常に気圧を気にする必要があった。

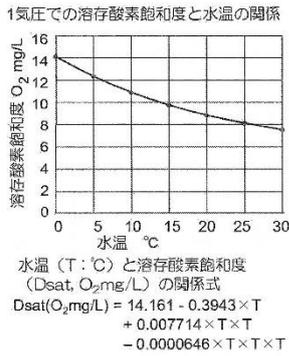


図14 水温と酸素飽和度

の関係は図14のようになる。水温が低いと飽和度は高く、水温が高いと飽和度は低くなる。

長野県には山岳湖沼が多く溶存酸素濃度は水温だけでなく海拔高度により大きく影響され、それは大気圧が海拔に関係していた。

また緩速ろ過池の水深約1mの砂面で発達した藻類被膜で気泡が生じるのは、圧力(大気圧+水圧)を受けた砂面での溶存酸素濃度が過飽和になるからであった。その溶存酸素飽和度(Dsat, O₂mg/L)は絶対酸素飽和度(Dabsat, O₂mg/L)と水圧を受けた水深(Bw, cm)と大気圧(Ba, hPaヘクトパスカル)で次式で計算できる。

$$Dabsat (O_2mg/L) = Dsat \times (Ba + Bw) / 1013$$

海拔0mの大気圧は1013ヘクトパスカルで10・13mの水圧に相当する。

水深1m(100cm)における水深だけの圧力 = 10hPa...①
 水深10m(1000cm)における水深の圧力+大気圧は、
 ①+大気圧 = 100hPa + 1013hPa = 1113hPa
 水深10mにおける水深だけの圧力は = 10hPa...②
 水深10mにおける水深の圧力+大気圧の圧力は、
 ②+大気圧 = 10hPa + 1013hPa = 1023hPa

海拔0mを1013ヘクトパスカルなら染屋浄水場(海拔500m)での気圧は950ヘクトパスカルで、石舟浄水場(海拔700m)は934ヘクトパスカルとなる。その差は16ヘクトパスカルとなる。

石舟浄水場は染屋浄水場のろ過池の水深を16m浅くしたのと同じ状態であった。染屋浄水場の水深1mのろ過池を84mと浅くした状態に相当していた。

石舟浄水場では染屋浄水場より藻が浮上しやすい原因は、石舟浄水場の原水の栄養塩濃度が染屋浄

水場より濃いからではなく、海拔高度が200m高く、気圧が小さくなったから気泡が生じやすいことであった。

6 高崎の浄水場では水深が深く剥離浮上が目立たない

上田市から80kmも離れている群馬県高崎市には1964(昭和39)年から稼働している若田浄水場があった。河川表流水を取水し、沈澱池を経由してろ過をしていた。ろ過池の数が10池で藻類被膜の発達を上田市と比較するのに良かった(図15)。浄水場を見学するろ過池での藻類被膜の剥離浮上が盛んでなかった。その当時、砂面上の水深が約2mと深く、水圧が原因と思った(図16)。

上田市染屋浄水場(海拔500m)と石舟浄水場(海拔700m)の海拔高度差による気泡生産の違いを実感していたので、関東平野にある若田浄水場の海拔高度は150mなので、気圧が大分大きい事に気づいた(図17)。

高崎市若田浄水場は上田より海拔高度差で350mも低く46ヘクトパスカルの差があり、水深(水



図16 砂面上の水深が深い



図15 高崎市若田浄水場

圧)で46mに相当した。また当時の若田浄水場のろ過池の水深は約2mで、気圧を考えると上田

高崎市若田浄水場を建設した当時は、ろ過池での藻の繁殖は悪いと考えていた。だから、水深を深くし底まで日射が到達しないようにとの設計だった。

日本の設計指針や維持管理指針を書く人は、平野部に住む大都会の人。だから、海拔高度に関心がなかった。でも、日本は山国。

市でのろ過池水深にして水深約2・5に相当し、砂面での水圧が大きかった。水圧だけでなく深い水深で、ろ過面に日射が到達しにくかった。そのため藻が光合成をしても気泡が生じにくく藻が浮上しにくいと思った。そこで私は長谷川宏場長（当時）に「緩速ろ過は生物群集の活躍による浄化であり、ろ過池水深を浅くして藻の活性を良くする方が良い」と助言した。場長は「キリンビールの醸造工場のために少しでも良い水質の

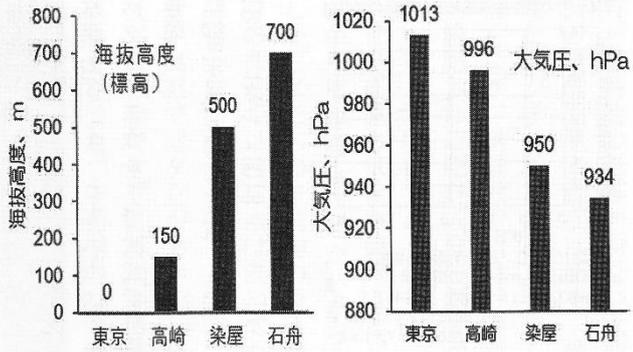


図17 海拔高度と大気圧

緩速ろ過は、生物群集の活躍による浄化と考えると、設計思想が変わる。

水深が浅いと冬でも藻が盛んに繁殖。

水道公論 2022年1月号 58巻1号70-80
生物屋の緩速ろ過池研究 その4



<https://youtu.be/p2PKxIN1IZY>

図19 水深と生物の解説

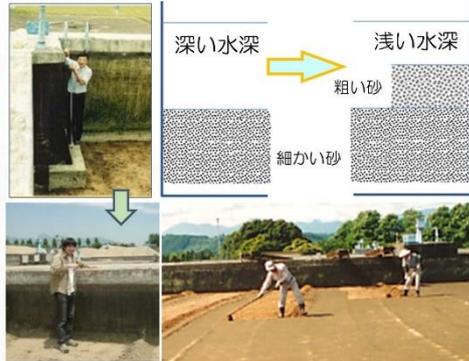


図18 浅くしたろ過池

水を供給したいと考えていたので私の助言を受け入れ水深を浅くした(図18)。高崎市若田浄水場で水深を浅くした経緯は、本誌(水道公論)2022年1月号で「ビールが守った生物浄化」と解説した



図20 厳寒期の千曲川河原で糸状珪藻

7 浅いと藻が盛んに繁殖する
上田市内を千曲川が流れている。1923(大正12)年に千曲川の河床に集水埋管を埋め伏流水を取水していた。千曲川の河原に行くときの間から濁りが無い水が湧き出しているところがある。その場所には糸状藻類が繁殖していた(図20)。厳寒期でも糸状珪藻が大繁殖をしている。浅瀬の礫面には気泡が付いていた(図21)。厳寒期でも浅瀬で日射量が十分当たる場所では付着藻類が光合成をし酸素を盛んに生産していた。



図22 凍結防止法



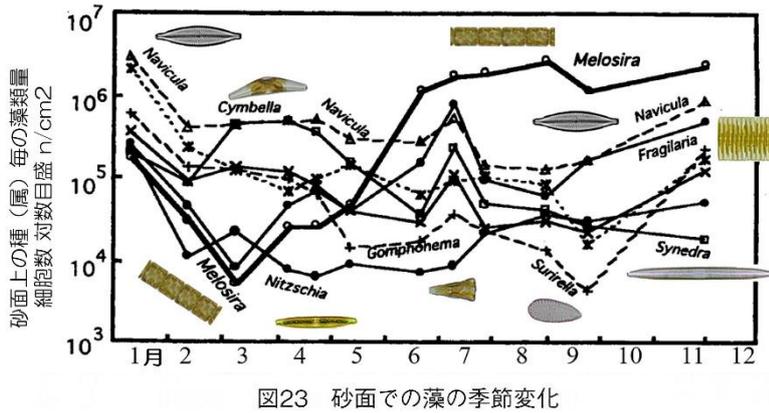
図21 礫面の気泡

染屋浄水場では厳寒期にろ過池水面が凍結しないようにろ過池流入水を水面近くで水平に強制的に流れをつくるようにしている(図22)。

冬期は上田市染屋浄水場のろ過池の水面が凍結する。凍結防止の工夫をしている。

藻の光合成のためには、水深が浅ければ浅いほど良さそうだ。

水深1mのろ過池の砂層表面の藻を調べると、厳寒期は、砂面での糸状藻類は繁殖しないで、河床で繁殖した付着藻類が砂面に蓄積していた。



状藻類が繁殖しにくい厳寒期に(図23)、ろ過池水面に栄養塩を添加したペットボトルを浮かべて、藻類繁殖の可能性を確かめたところ、藻が繁殖した(図24)。そこでプラスチック風呂桶を使ってろ過砂を入れ、砂面上水深を5cm程度と浅くしたら、水深1mのろ過池では糸状珪藻メロシラは繁殖しなかったが、浅いモデル水槽では

浅ければ、厳寒期でも藻が繁殖した。



図25 浅い水深で藻が繁殖



図24 ボトルで藻が繁殖

糸状珪藻メロシラの繁殖が凄かった(図25)。これらのことから染屋浄水場で厳寒期に糸状珪藻メロシラが繁殖しないのは、冬は太陽高

斜め壁の浅い所では、藻が盛んに繁殖する。



図26 浅い斜め壁で藻が繁殖

度が低く日射量が少なく、ろ過池の深い砂面に十分の日射量が到達しないからであった。染屋浄水場にある創設当時のろ過池の壁面は斜めで、戦後増設したろ過池の壁は垂直であった。斜め壁のろ過池は、ろ過池での藻類繁殖が良かった。また浄水場職員は斜め壁のろ過池は、ろ過閉塞しにくいとも言っていた。このろ過池を注意深く観察すると、ろ過池の砂面の削り取り後、開始すると

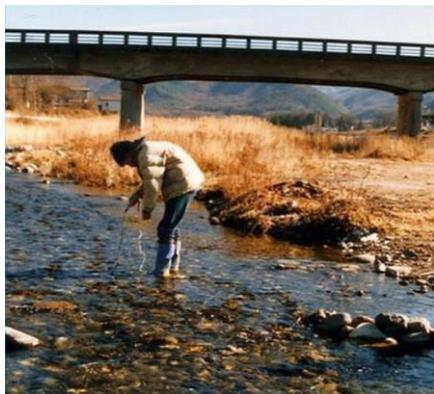
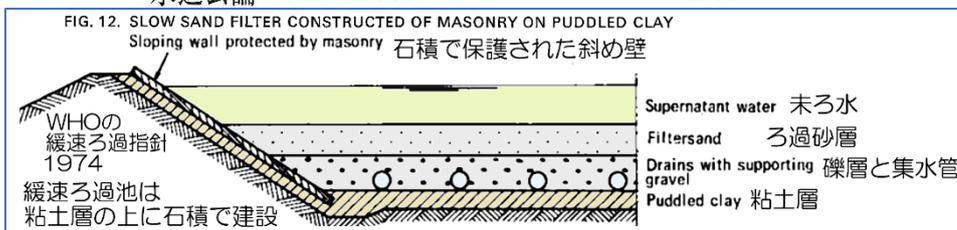


図27 冬の河原の礫面には藻

8 氷の下でも藻が繁殖

すぐに水面近くの斜め壁には糸状珪藻メロシラが繁殖しだしていた(図26)。創設当時の斜め壁のろ過池では、砂面の削り取り直後でも生物群集が活躍しやすく、砂面での生物活性が、すぐに良くなりやすい構造であった。

私は、千曲川の源流から新潟の河口までの河川調査もしていた。厳寒期、海拔1100m付近の佐久市川上村で河原に降りて行くと、河原の礫面には茶色の糸状珪藻の繁殖が目立った(図27)。冬期は流水量が安定し、砂礫が転がらない。水温が低く捕食動物の影響がほとんどなく、付着藻類が繁殖しやすい。



大正12年のろ過池の壁は斜め、藻の繁殖には良い設計。耐震性も良い。

河川の水面が凍結しても、その下で、糸状藻類は盛んに繁殖する。

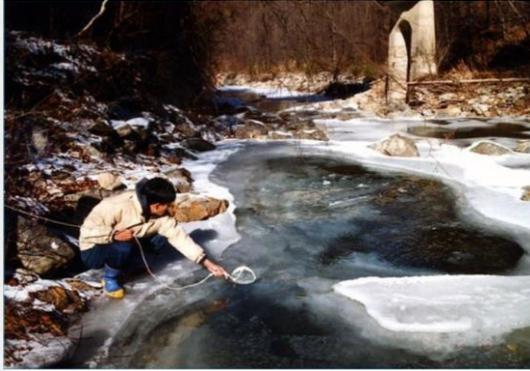


図29 凍結した河原の調査



図28 礫面の糸状珪藻（水中）

かった。礫面では細胞が小さく成長速度が速い茶色の珪藻が優占していた（図28）。
海拔1200m付近では、河川

上田市の気象データは染屋浄水場の敷地内で測定されている（図31）。1、2月の平均気温は0程度で、最低気温の平均はマイナス5度程度である（図32）。ろ過池の水面は、流入口付近は流れがあるので凍結しないが、流入口から離

9 生物活性のために水深を浅く



図30 礫面の糸状珪藻

の水面が凍結していた（図29）。水の下で水が流れている河床の礫を手にとってみると糸状珪藻がびっしり付着していた（図30）。河床が安定し、降雨による濁りが入ってこないなら、日射量が少しでもあると礫表面で藻が繁殖していた。

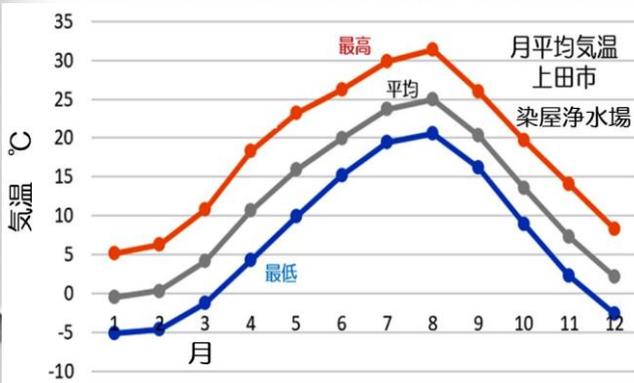


図32 上田市の月平均気温



図31 上田市の気象観測点

れた反対側の水面は凍る（図33）。厳寒期はろ過池の砂面では糸状珪藻メロシラは繁殖しないが（図23、前出）、日射量が増え気温が上がれば融雪水の影響が少なくなる4月下旬からろ過池では糸



図34 上田市のメロシラの役割



図33 1月は水面が凍結

状珪藻メロシラの剥離浮上が目立ちます。水道週間の6月初め頃は見学者が多くなる。そこで水道局では藻の役割を解説する看板をろ過池の脇に掲示してくれている

染屋浄水では、見学者用に微生物の活躍が大切という看板を作ってくれた。

染屋浄水場のろ過池は厳寒期は、水面が凍結。

高崎市では「藻は正義の味方」という看板を作った。



図35 高崎市の藻の役割看板

(図34)。高崎市水道局では、水深が深いろ過池を浅くしたので、藻の繁殖が目立つようになった。そこで藻の役割、生物群集の役割を見学者に理解してもらうように看板を作った(図35)。

また本誌(水道公論) 2022年1月号(図19、前出)で解説したように、藻類被膜の剥離浮上が上田市より顕著でない高崎市若田浄水場でも、取水堰の清掃で取水制限された時、ろ過池水深が50センチ

水深を極端に浅くすると水圧が小さくなり気泡が生じやすくなる。

10センチ以下と浅くなると砂面で気泡が盛んに生じ、藻類被膜は剥離浮上した(図36)。



図36 水深を浅くすると気泡が生じた

10 比べることで現象が明確になる

現在の水道設計指針や維持管理指針では、砂面上の水深90〜120センチと記されている。日本は山国で海拔高度が異なる場所に浄水場が建設されている。各地の浄水場を見学すると高度成長期に建設された緩速ろ過池は藻を繁殖させないように、水深を2メートル以上している浄水場もある。緩速ろ過処理は生物群集の活躍による浄化(図37)であるので生物群集にやさ

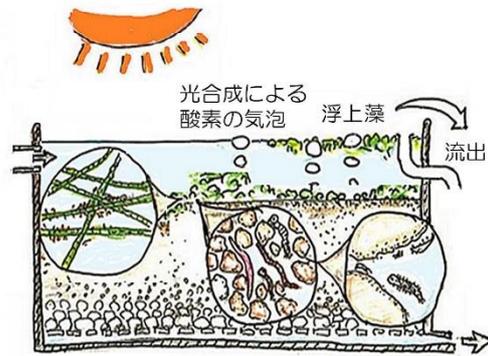


図37 ろ過池と生物群集

しくするという考えを入れ、水深を浅くする考えが必要である。私たちは気圧が自然現象に大きく関係しているのに気づきにくい、登山で密封した菓子袋がパンパンに膨れ、初めて気圧の変化に気づくことがある。また飛行機に乗り上空で空のペットボトルの栓を一旦、開けて閉めると。飛行機が着陸するとペットボトルがベシヤンコに潰れてしまうのに気づく(図38)。

日本は北海道から沖縄まで、また海拔高度も異なり、水源も河川表流水、地下水、貯水池、汚濁した河川水から清浄な河川水までと

多様である。水道関係者が日本各地の浄水場の状況を調査し情報をお互いに積極的に交換すれば、まだまだ浄化法に関し新しい考えが生まれる可能性がある。

日本の水道法では「清浄にして豊富低廉な水の供給を図り」とある。しかし地方では過疎化が進み水道料金が高くなり家計を圧迫している。私は地方では維持管理が容易な小規模の浄化施設が適していると思っている。

日本発の生物浄化法の考えは世界の水道界をリードできると思っ



図38 気圧の変化で潰れたペットボトル

私たちは、気圧の変化に気づきにくい、気圧の変化を実感することがある。