

# 生物屋の緩速ろ過池研究

## その5 藻の繁殖とろ過継続

信州大学名誉教授 中本 信忠

### 1. 異なる環境の境で新しい生物が繁殖

私は東京都の水道水源の神流湖（下久保ダム湖）の流入部が異常に変色しているのを見てくれと頼まれ、昭和47（1972）年に調査した。河川水がダム湖に入る場所がコーヒーを流した様に変色し、その原因が分からず問題にしていた。変色した部分を採水し、持参した携帯顕微鏡で観察すると鞭毛藻のペリディニウムであった（図1）。私は海洋での赤潮現象と似ているので「淡水赤潮」として発表した。

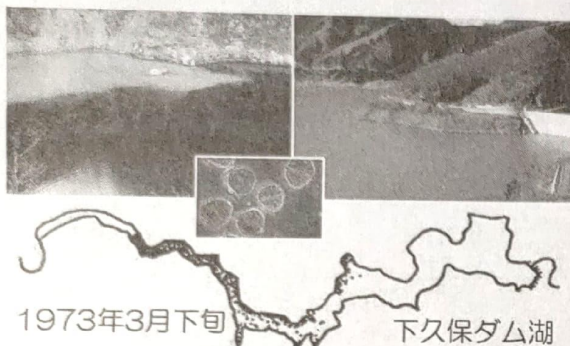


図1 ダム湖流入部での鞭毛藻の淡水赤潮

その後、この「淡水赤潮」現象は日本各地のダム湖や湖で普通に見られることが分かった。環境が変わる境界で新しい環境に適した生物が繁殖するのは自然現象であった。この藻が大繁殖している場所は、景観は悪いが異臭味はしていなかった。

### 2. 明治時代から藻の繁殖は嫌われた

緩速ろ過はアメリカ大陸へ伝わったが、ろ過池が沈殿池で沈みにくい細かな濁りで目詰まりした。そこで濁り対策で凝集剤を使う急速ろ過と呼ばれる新しい技術が明治中頃に開発された。しかし水源で繁殖した藻は凝集剤と反応せず、急速ろ過池を目詰まりさせた。そこで水源貯水池で殺藻剤を散布し藻を繁殖させないようにした。また死滅した藻は急速ろ過池を目詰まりさせ、藻臭を生じさせ活性炭が使われるようになった（図2）。凝集剤を使う濁り対策、藻の繁殖対策での殺藻剤散布というアメリカでの最新技術は日本でも注目された。当時の水道事情に関し小出悟郎さんは「水道生物学の黎明

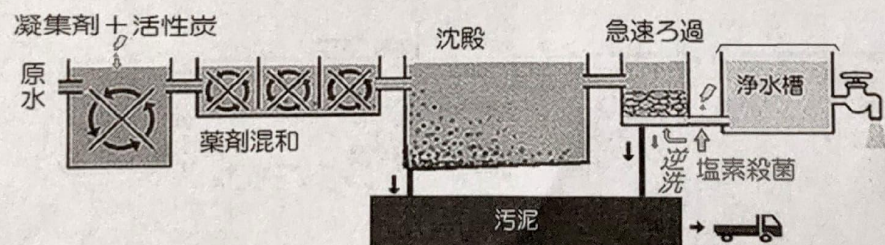


図2 薬剤処理の急速ろ過の概略図

期」（日本水処理生物学会誌24（1937—45, 1988））として明治37（1904）年に発足した上水協議会の議事録を紹介していた。  
①明治38（1905）年、第2回議事録に「東京市のろ過池中にアオミドロが繁殖するので、殺



図3 削り取り作業が困難な糸状緑藻の繁殖（ロンドン）

藻のため硫酸銅を添加しアオミドロとバクテリアを殺す効果があった。

②明治39（1906）年、第3回では神戸市より「貯水池に発生する藻の駆除法」が提議された。

③明治40（1907）年、第4回では服部広太郎博士が「水中植物に関する講演」で、「硫酸銅による殺藻処理」の外国事例を報告し、日本でも必要性があると指摘した。

現在の日本でも緩速ろ過池を長らく過継続すると、細胞が大きい糸状緑藻のアオミドロやクラドホラが繁殖すると削り取り作業が大変になる。英国のテムズ水道でも

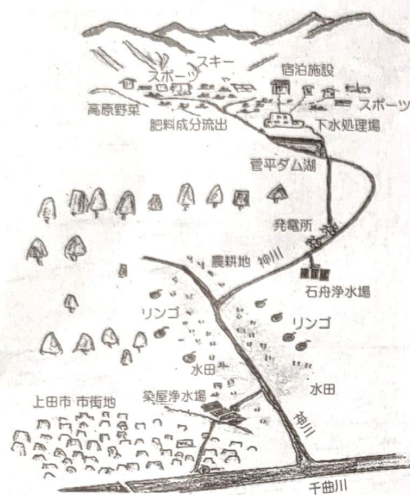


図4 上田市の浄水場とその背景



図5 下水処理水がダム堰堤際へ流入し直ぐに放流される

糸状緑藻は毛布状の雑草 (blanket weed) と呼び、削り取りが大変なので嫌がられていた (図3)。

明治時代はアメリカでの最新の殺藻処理も学んでいた。日本の水道界も藻の繁殖を嫌い、殺藻処理が普通に行われるようになった。

3. ダム湖が完成したら水道水に異臭味

昭和43（1968）年に菅平ダム湖が完成したら上田市の水道水は異臭味がした。その原因調査を信州大学繊維学部先生が行った。菅平高原の農耕地から肥料成分や宿泊施設から排出される汚濁物質がダム湖を富栄養化させたと結論付けられた。藻の繁殖を抑制する

ため下水処理場が建設された (図4)。処理水がダム湖の藻を更に繁殖させると気付き、ダム湖への影響を少なくするため処理水を堰堤際に放流した (図5)。

私は東京で植物プランクトンの生態、ダム湖の富栄養化を研究していた。昭和50（1975）年10月に信州大学繊維学部繊維農学科 (後に応用生物科学科) の助手として採用された。

私は菅平高原から流出する栄養塩負荷とダム湖での植物プランクトンの繁殖の関係を調査した。菅平高原の気象を調べると夕立が2日に1回程度あるのに午前中の調査では河川水は濁っていない。夕立による濁りは翌朝の河川水に

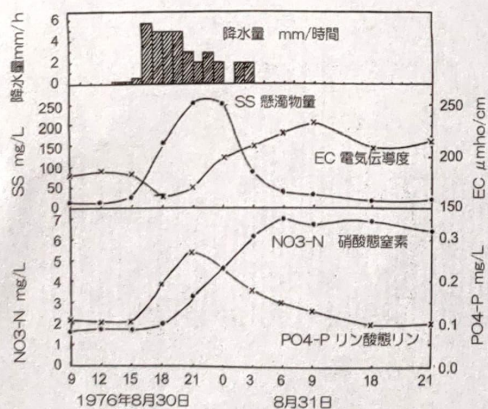


図6 山地河川の夕立による濁りは降雨時だけ

残っていない。山地河川は降雨後直ぐに濁るが短時間で降雨の影響は小さくなった。

上田市で39ミリの夕立があった時、市内の矢出沢川 (金井橋) で、その影響を調べた (図6)。この調査で河川水が濁っている時はリン酸態リンが増えるが、硝酸態窒素は逆に降雨時は少なかった。しかし、降雨後に地下水中に溶け込んだのが時間をかけて押し流され地表に現れるのが分かった。

一方、大陸河川の濁りは細かく沈殿池では沈みにくいので凝集剤が必要だった。

#### 4. おいしい水ができる緩速ろ過なのに

私は、緩速ろ過処理は急速ろ過では除けない異臭味物質も除けると教わった。緩速ろ過処理では生物群集が活躍するのが良いと理解していた。ろ過池は湖と同じで流入水中の栄養塩を使つてろ過池で藻が繁殖する。藻が繁殖すると同時にいろいろな生物群集が活躍し臭い物質も分解し、おいしい水ができると思つていた(図7)。しかし、上田市は緩速ろ過なのにダム湖ができたらず道水が異臭味出したのはおかしいと思つていた。

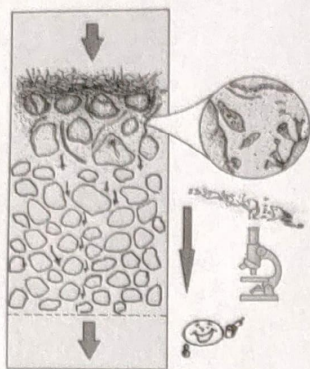


図7 上から下への流れだと砂が動かず生物が活躍できる

#### 5. ろ過池での糸状藻類の有用性

上田市水道局(当時)の浄水場

長の丸山巖さんが研究室にきて「ろ過池で藻を積極的に繁殖させるようになったら濁り水が来てもろ過閉塞しないし、おいしい水になる」と教えてくれた。私の話を聞いて殺藻剤添加を止め、積極的に藻を繁殖させるようにしたという。その方法は削り取り後にろ過を再開した時、別のろ過池から水面に浮上している藻を掬って入れるというものだった。

そこで私は過去4年間の管理日誌を調べた。昭和54(1979)年と昭和55(1980)年は降雨が少なく濁水が余り来なかったが、昭和56(1981)年と昭和57(1982)年は降雨が多く濁水が多かった(図8)。

昭和55(1980)年までは浄水場でろ過池で繁殖する藻を抑制するために、原水に前塩素と硫酸銅を添加していたが、昭和56(1981)年から殺藻剤添加を中止したところ、濁水が多い年でも、ろ過継続日数が増え(図9)、ろ過池の削り取り回数が少なかった(図10)。この結果を皆に知らせようと「緩速ろ過池における糸状藻類の有用性」として水道協会雑誌(53

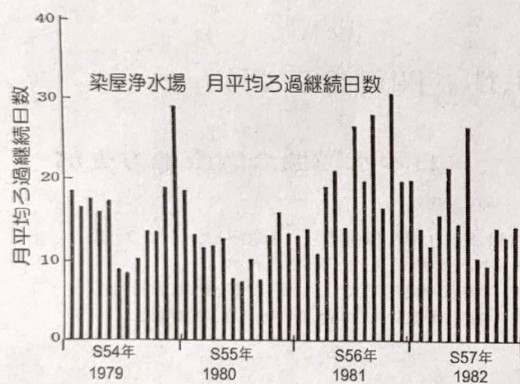


図9 染屋浄水場のろ過継続日数の月平均変化

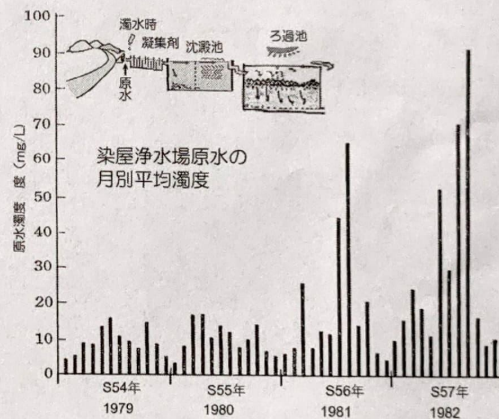


図8 染屋浄水場の原水濁度の月平均変化

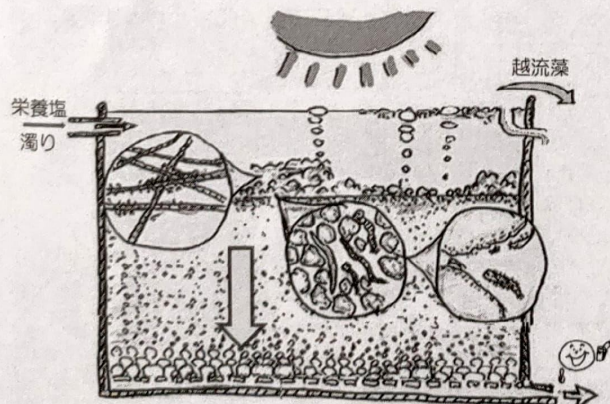


図11 生物群集が活躍する緩速ろ過池

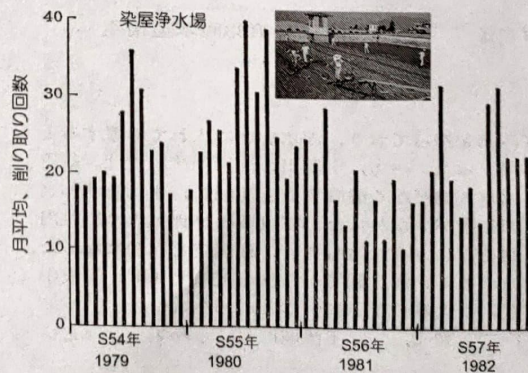


図10 染屋浄水場の削り取り回数の月平均変化

(3) 19121、1986) に発表した。

ろ過池で藻が繁殖すると同時に砂層表面および表面直下で微小生物が活躍し出したと考えた(図11)。糸状になる珪藻メロシラの光合成で酸素を生産し、流入してきた細かな濁りを絡んだまま水面に剥離浮上し、そのまま排出させ、ろ過閉塞を防止する機能があつた。藻は河川水中の栄養塩を吸収して増える。ろ過水の栄養塩、濁り物が少なくなり河川上流の清澄な水になった。

上田市の水道水に異臭味があつた当時は、濁水が来ると凝集剤を添加し、硫酸銅や前塩素処理を行い、生物群集の活性を悪くして緩速ろ過処理をしていた。そのため生物が反応する臭い物質を除けなかった。

## 6. ろ過継続日数が短か過ぎる

私が上田市の緩速ろ過池を調査し出した昭和59(1984)年頃にはろ過継続が2週間で削り取りをしていた。

維持管理指針(日本水道協会)

を調べると損失水頭(ろ過池水面とろ過水面差)を監視し、ろ過閉塞する前に削り取り作業をするにあつた(図12)。上田市でも河川の濁水が多くなる時期はろ過閉塞するからと、削り取りを頻繁にし、ろ過継続が1週間以内の時もあつた。

削り取り直後は、ろ過速度を遅くし、数日かけて徐々にろ過速度を上げようとしていた。ろ過速度を上げると損失も大きくなった。浄水場ではろ過流量やろ過池の目詰まり指標の損失(水位差)は

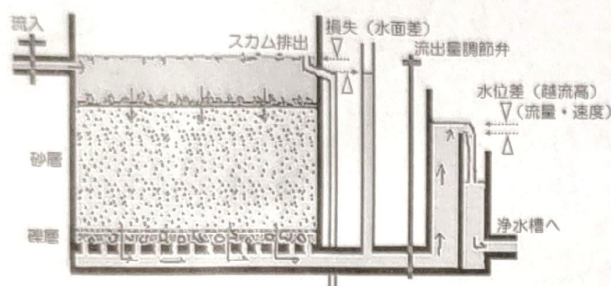


図12 ろ過池の損失と流量計測の仕組み

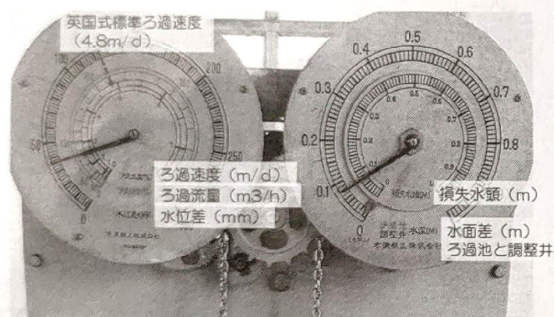


図14 損失と流量のメーター



図13 調節井の損失と流量は機械的に計測

フロート(浮き)に鎖をつけたメーターで水位を測定していた。ろ過流量をメーターを見て手動でハンドル操作をしていた(図13・14)。

## 7. 生物の役割を理解していなかった

洞澤勇さんの「上水の話」(三省堂、昭和17(1942)年)には、ろ過速度を上げるとろ過池から漏出する生物が多くなるので、ろ過速度は1日に3倍が良く、1日に6倍が限度とある(図15)。またO市とT市での水道水中に流出する生物数を調べ、水道需要が多い夏はろ過速度が速くなり流出する生物が多く、水道需要が少ない冬はろ過速度も遅く漏出する生物は少ないとあつた(図16)。

ろ過池の寿命は永久に続くのではなく一定期間を過ぎるとろ過不能になり、一般に20日から30日で寿命が来るとある。

また、ろ過膜が形成されてろ過水が清浄になるのに一般には2週間位の日数がかかることも記載されている。さらに「緩速ろ過の浄化作用は細菌、生物その他の固形物質の除去で、生物学的作用を十分に受けない溶存性の化学物質を除去する目的には使用できない」との解説がある。洞澤さんは「緩速ろ過処理は細かな砂での機械的な

節いろ過が主で、流入してくる濁りが砂層面に蓄積するのでろ過池の寿命がある」と思っていたのだらう。

戦前に大阪市の柴島浄水場で熱

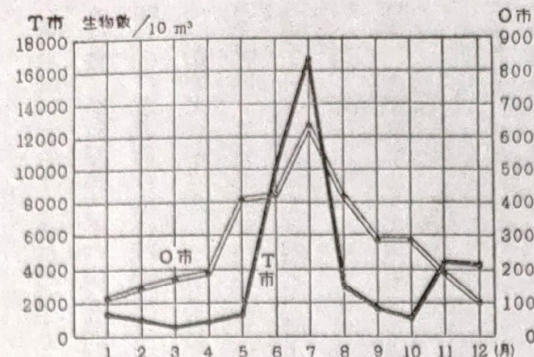


図16 水道水中へろ過流出する生物数の季節変化 (洞澤、1942)

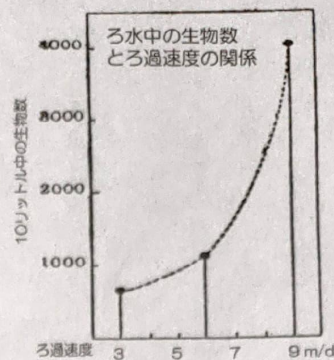


図15 ろ過流速とろ過池から流出する生物数の関係 (洞澤、1942)

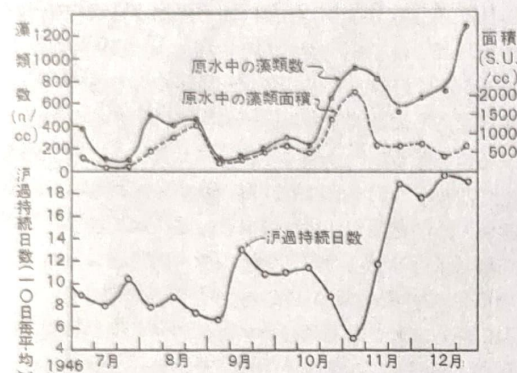


図17 境浄水場の原水中の藻類数とろ過持続日数の変化

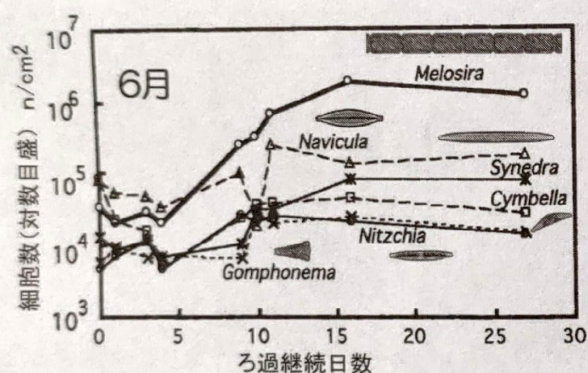


図18 6月の染屋浄水場での藻の繁殖は削り取り後2週間で定常状態になった

心に研究をした近藤正義さんも「ろ過継続は2週間程度」と報告していた。また戦後、東京都水道局で活躍した小島貞男さんの報告でも東京都浄水場では、夏は原水中の藻類が少ないが、ろ過継続(持続)は平均10日程度と短かった(図17)。

私は6月にろ過継続に伴う砂層面での藻の発達を調べ、藻類被膜が十分に発達する夏でも2週間程度必要とわかった(図18)。

世界の状況を知りたく、アメリカ水道協会雑誌を購読した。論文を読むとWHO(世界保健機関)から緩速ろ過指針(Huisman and Wood, 1974)が出版されていた(図19)。なお、現在はネットで見る。

## 8. WHOの緩速ろ過指針

この指針は急速ろ過での異臭味問題、薬品のリスクを解説し、薬を使わない安全な浄化処理を勧めるために出版された。ろ過池を設計するのには役立つものである。17ページには「ろ過速度は普通は1日に2・4倍から9・6倍で、ろ

<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/38974/9241540370.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

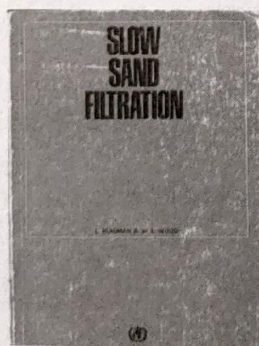


図19 WHOの緩速ろ過指針 (1974)

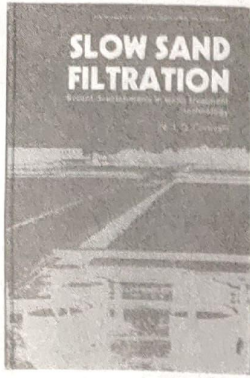


図20 緩速ろ過国際会議  
論文集 (1988)

過継続は原水の濁りが少ないなら数週間から数カ月間続いている」と記載されていた。また削り取りは素人が行っているところである。

しかし私が上田市の浄水場を調査して気付いたような藻の役割、食物連鎖が重要とまでは言及していない。また藻類がろ過池で過剰に繁殖するリスクについて書かれてあるが、水深を浅くすると、砂を大きくしろ過速度を上げれば良いなどの記述はなかった。

## 9. 国際緩速ろ過会議

昭和63 (1988) 年にロンドン大学 (Imperial College London) で開催された緩速ろ過国際会議の論文集を見つけた (図20)。この本は世界の緩速ろ過に関する当時の最新情報が詰まっていた。

面識があったダンカン (Annie

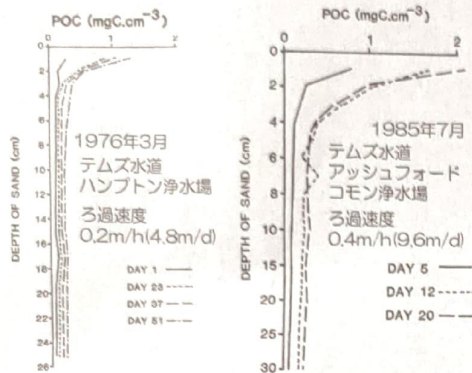


図21 テムズ水道ろ過池でのろ過継続に伴う砂層状態の変化

Duncan Royal Holloway College, London) 教授が「緩速ろ過池の生態」という論文を発表していた。ダンカン教授は、テムズ水道のろ過池で砂層の生物群集を調べていた。削り取り時にろ過砂を詰めた円柱を砂層に挿入し、ろ過継続中に円柱を引き抜き砂層内へ侵入する汚れを調査していた (図21)。砂層上部に懸濁物中の有機物は多く、砂面から急激に少なくなり、4センチメートルと深い砂層と同じで少なくなっていた。ろ過継続を50日間も長くしても砂層内の有機物量は増えていなかった。

また驚いたことに、英国式標準ろ過速度は1時間に20センチメートル (1日

ろ過閉塞指標: 損失水頭 ( $\Delta H$ )  
損失水頭 ( $\Delta H$ ) はろ過速度 ( $V$ ) に比例する。  
 $\Delta H = kV$   
英国標準ろ過速度 20 cm/h (4.8 m/d :  $V_n$ )  
NHL (標準化損失水頭:  $H_n$ ) は  
実測の損失頭を英国標準ろ過速度で  
ろ過した場合に換算する。  
NHL: 標準化損失水頭:  $H_n$  (cm)  
 $H_n = (H \times V_n) \div V$   
実測の損失水頭:  $H$  (cm)  
実測のろ過速度:  $V$  (cm/h or m/d)  
標準ろ過速度:  $V_n$  (20 cm/h or 4.8 m/d)

図22 標準化損失水頭の計算法

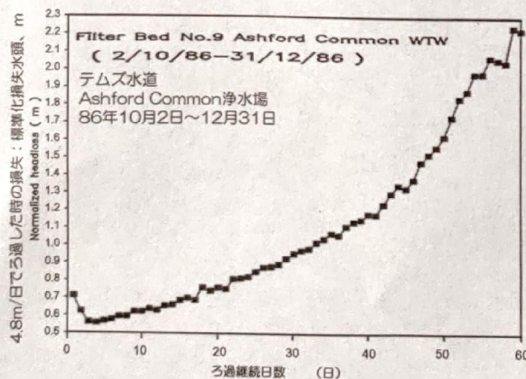


図23 テムズ水道でのろ過継続と標準化損失水頭の関係

に4・8メートル) なのに、テムズ水道では昭和60 (1985) 年に、1時間に40センチメートル (1日に9・6メートル) と早いろ過速度で稼働させていた。

## 10. 標準化損失水頭

国際会議論文集では、ろ過継続に伴うろ過池の状況を把握するために標準化損失水頭 (Normalized Head Loss) という指標が世界中で使われていた。この指標は実測の損失を英国式標準ろ過速度 (1日に4・8メートル) でろ過した場合に換算した値 (図22) で、日本では使われていない指標であった。

テムズ水道の研究者に「誰が言い出した指標か、いつ頃から使われているのか」を問い合わせた。「昔から世界中で普通に使っている」と返信をもらった。また「テムズ水道ではろ過継続は数ヶ月続け、標準化損失水頭で1・25メートル位は普通で、2・5メートル程度まで使う」と教えてくれた (図23)。



図24 バケツモデルで損失とろ過速度の関係を解説した



図25 標準化損失水頭の解説論文

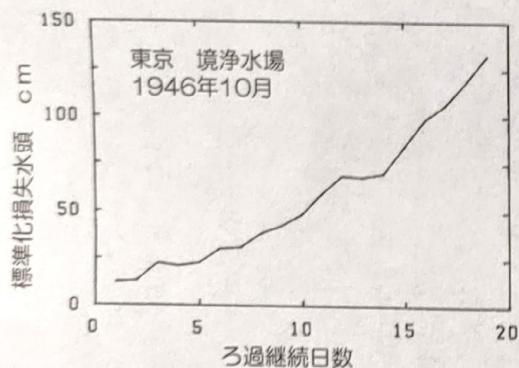


図27 東京都境浄水場でのろ過抵抗の変化

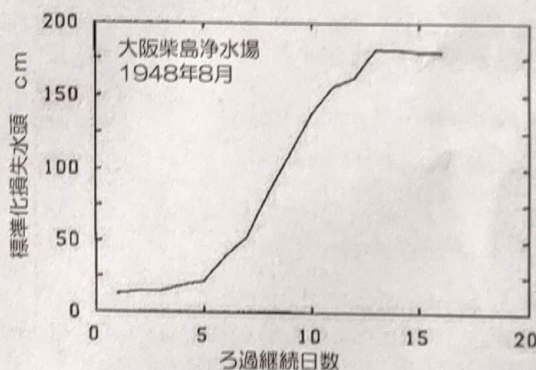


図26 大阪柴島浄水場でのろ過抵抗の変化

処理生物学会誌に「緩速ろ過池のろ過閉塞指標としての標準化損失水頭と藻類」(中本・坂井、図25)

を平成4(1992)年に発表した。なお、この論文はネットでも見ることができる。

大阪の柴島浄水場の緩速ろ過池で、昭和23(1948)年8月の1日4日です。ろ過した場合は損失水頭の変化を川島普さんが示していたので、標準化損失水頭に換算してみた(図26)。ろ過開始後5日間、ろ過速度が遅いと思われ、標準化損失水頭は増えなかったが、ろ過速度を4日にすると日に日に標準化損失水頭は大きくなり2週間で1・7日にもなった。

また小島貞男さんが東京都の境浄水場での昭和21(1946)年10月の管理例を紹介していたので、標準化損失水頭に換算してみた(図27)ところ、日ごとに損失が大きくなり、1・3日までのろ過を続けていた。

## 11. 生物が活躍すると目詰まりしない

上田市染屋浄水場のろ過閉塞度を調べた。厳寒期(1月から2月)はろ過池の水面は凍結するが、浄水場の着水井(原水)の水温はプラスであった(図28・29)。神川か

層上の水深(水深)は約1mで、上田市のろ過流量調節井室のメーターを見ると損失計は1mまでしかなかった(前出の図14)。テムズ水道とはろ過池管理の考えは異なっていた。

日本の指針では見かけ上の水面差をろ過抵抗の指標としているが、この水面差はろ過速度に比例する。私はJICA研修ではバケツモデルを使って流速と水面差(日本の指針での損失)が比例するのを説明している。日本でいう抵抗(損失)は砂面に泥などが堆積した場合に砂面近くだけで抵抗が生じ、

砂面に堆積した泥を削り取ると抵抗がなくなると解説している(図24)。

上田市の浄水場では削り取り後、最初は遅いろ過速度で、だんだんと数日かけてろ過速度を上げていた。その際、見かけの損失が段々と上がるので、ろ過抵抗が増え、目詰まりすると思っていた。見かけの損失はろ過抵抗の指標でないということを理解していなかった。私は日本でも緩速ろ過池を管理する場合、この標準化損失水頭を使つてろ過池の維持管理が必要であるのに気付いた。そこで日本水

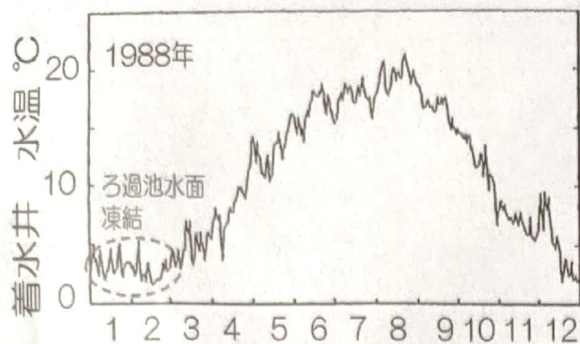


図29 染屋浄水場の着水井水温の季節変化

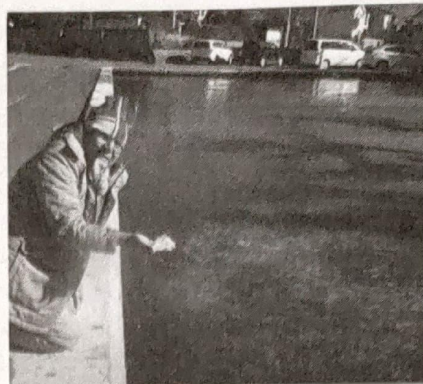


図28 染屋浄水場1月17日は水面が凍結する

ら取水し約4キロメートルの地中の導水管で暖められ浄水場へ着水していた。ろ過池砂面上の藻の季節変化を調べたところ、厳寒期は流入河川の河床の礫面で繁殖する付着藻類が蓄積し、日射量が増え水温が上

り出すと糸状になる珪藻メロシラが増え出した。菅平高原の雪解けの影響が無くなる4月下旬からろ過池水面に浮上している糸状珪藻メロシラが目立ち出した。この珪藻の繁殖は11月まで続いた(図30)。ろ過継続に伴う目詰まり度(標準化損失水頭)を月ごとに整理してみると、糸状珪藻が繁殖しない期間はろ過継続に伴い抵抗が増えていた。砂面で糸状珪藻が繁殖し出すと、ろ過抵抗が増えなくなった(図31)。

ろ過池への流入濁度とろ過流量から砂面への濁り物質の積算量との関係を調べると、水温が低い時期は少しの濁りでも目詰まりした。しかし糸状珪藻が繁殖し出すと目詰まりしなくなった。

ろ過池の抵抗が増えるのは水温が低くなり水の粘性が大きくなるからであった。また注意してみると厳寒期は、削り取り直後は抵抗が大きいが数日すると抵抗が小さくなり、その後抵抗が増えていた。その原因は削り取り時に砂層に気泡が入り込み、その気泡が徐々に消失するためと思われる。水温が高くなると粘性が小さいの砂層上

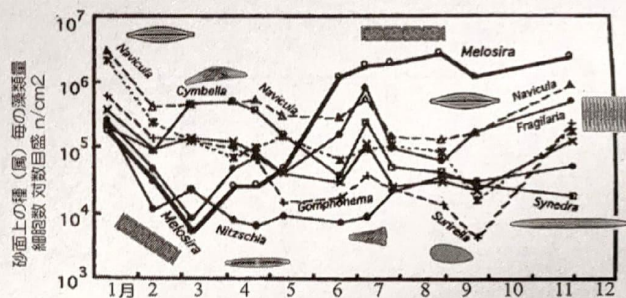


図30 染屋浄水場での砂面の藻の種類と量の季節変化

部に入り込んだ気泡が直ぐに消失した。

削り取り時は水をつくれな。そこで削り取り近くになると、ろ過速度を速くしていた。見かけの損失が連動して上がるので閉塞していると思っていた。ろ過の最後に抵抗が急に増える現象はろ過速度を急に早くしたので、砂面上に捕足されていた濁りが砂層内に入り込み、抵抗が増えたのであった。冬は流入水濁度が小さかった。夏は菅平高原で夕立が多く、原水濁度は高くなるが、夕立が無くな

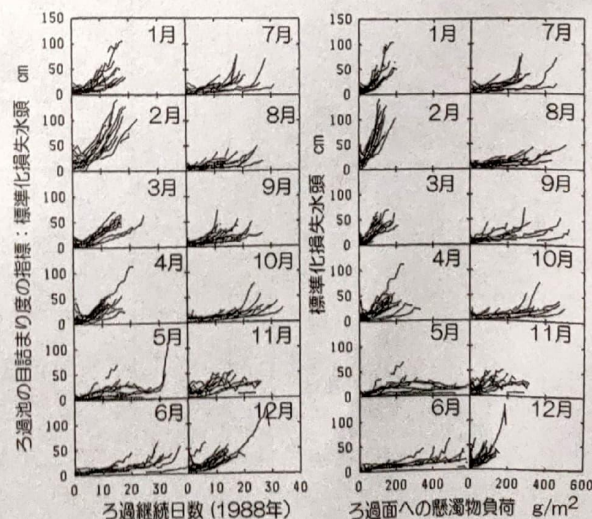


図31 染屋浄水場のろ過抵抗とろ過継続日数および砂面への濁度負荷量との関係

ると直ぐに濁度が低くなった。この浄水場では原水濁度が10度を超えると凝集剤を添加していたが、ろ過池流入水濁度を調べると沈殿池だけで濁りは沈み、凝集剤を添加する必要が無さそうであった(図32)。

なお、現在の日本水道協会の指針では「ろ過池流入水濁度が10度を超えないように」とあり、上田市でもろ過池流入水は10度を超えそうもないので、生物群集が嫌がる凝集剤の添加は必要なさそうである。

## 12. 高崎市では目詰まりしない

高崎市若田浄水場のろ過閉塞度の変化を調べた。染屋浄水場の海拔高度は500mであるが若田浄水場は150mと低く、厳寒期でもろ過池流入水水温はプラス4℃以上でろ過池水面は凍結しない(図33)。

一年で最も水温が低くなる2月と生物活性が一番良い8月のろ過池ごとのろ過継続に伴う実測の損失を図にした(図34)。実測の損失はろ過継続に伴って増えていた。ろ過抵抗の指標である損失水頭をみると、2月は直線的に増えてい

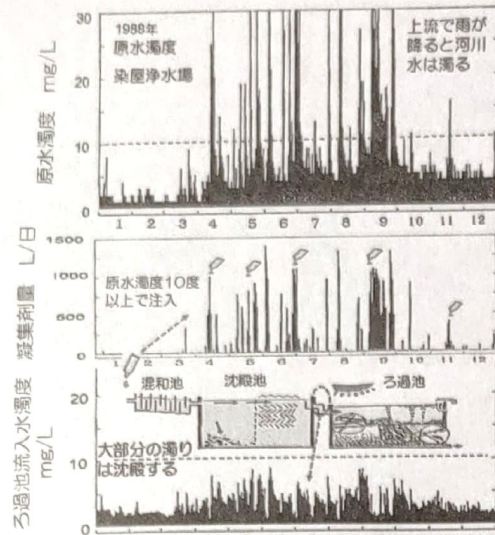


図32 染屋浄水場の着水井濁度、凝集剤添加量、ろ過池流入水濁度の季節変化

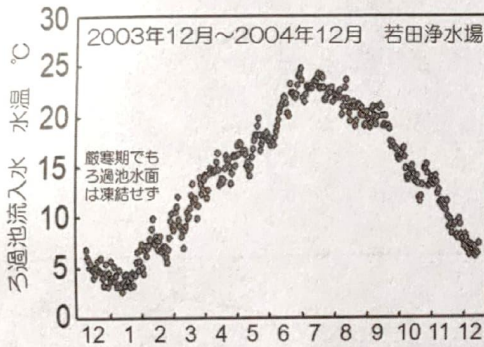


図33 若田浄水場のろ過池流入水水温の季節変化

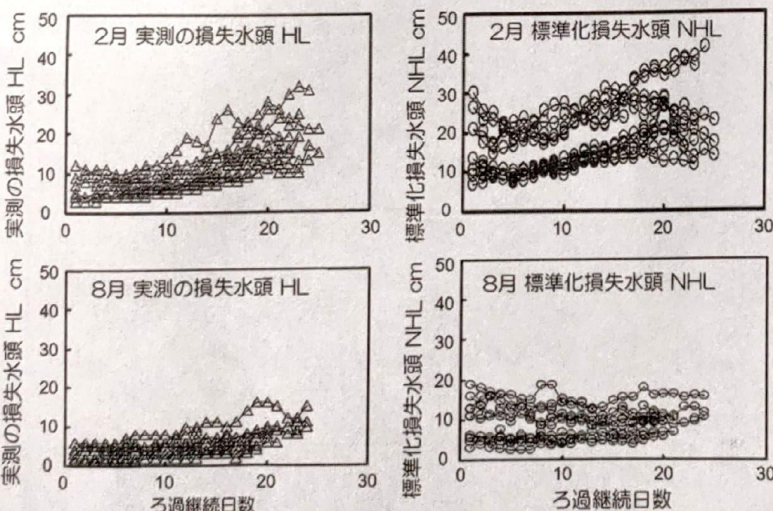


図34 冬と夏の実測の損失の変化とろ過抵抗の変化

たが8月はろ過を長く続けると抵抗はほとんど変わらないか、または少し小さくなる傾向があった。ろ過池に入ってくる濁りの量は、2月は少ないが抵抗は少しの濁りでも増えていた(図35)。8月は流入する濁りが多いが抵抗は増えず、むしろ抵抗が小さくなるようであった。ろ過継続に伴う藻類量をクロロフィルで表すと、2月の増加速度は遅いが、8月は増加速度が速く量も多くなった。しかし10日頃から急激に藻類量が少なくなった。少なくなる原因は糸状珪藻を捕食する動物が増えたのが原因だった。流入してくる濁りが多くなっても藻類が減少してもろ過

抵抗が増えなかった。水温が高い8月は砂層内で捕食動物が活躍し砂層に入ってくる濁りを食べるために動きまわり、水の通りを良くしたので、抵抗が増えないと考えた。

この浄水場では台風時の濁り水が来ても凝集剤を使わず、沈殿池だけでろ過を続けていた。生物群集が嫌がる薬剤の影響がないので生物群集が活躍できるのでろ過を続けてもろ過抵抗は一年中大きくならないと考えた(図36)。

この浄水場では一年中藻が繁殖できる環境であった。生物群集が活躍できればろ過抵抗は増えない。さらにこの浄水場の砂は緩速ろ過用の砂の上に急速ろ過用の大きな砂で1層補砂し浅くした。何度も繰り返し砂を洗浄し、大きな砂の

割合が多くなっていた(図37)。大きな砂でも砂面上、砂層上部で生物群集が活躍し、ろ過抵抗も増えず、ろ過水濁度は上田市と同じで0・000度の水になった。

### 13. 生物の活躍が鍵

明治時代から日本では緩速ろ過に対し誤解をしていた。誰でも新しい技術が好きであった。大阪の

柴島浄水場では導水路で硫酸バンド、硫酸銅、前塩素を添加し、また東京都の境浄水場では水源貯水池で硫酸銅を散布していた。ろ過池で微小生物が活躍できず、流入懸濁物質が砂面に蓄積し、ろ過抵抗が日ごとに増え、ろ過継続日数が極端に短かった。

日本各地の浄水場を見学すると、ろ過池は目詰まりしないので日数で削り取り作業をしている浄水場が多かった。目詰まりしないなら本来なら削り取り作業は必要ない。山の湧水は何もしないで常においしい水が自然に流出している。緩速ろ過は自然界の生物群集による浄化の仕組みの活用である。細か

かった。生物群集が嫌がる凝集剤や殺藻剤などを使わないなら、ろ過池で生物が活躍でき目詰まりせず、ろ過水はスーパークリーンでおいしい水になる(図38)。

な砂は必要なかった。ろ過速度も速くても濁りが通過することはない。日本の指針を生物浄化法の考えで設計や維持管理方法を修正する必要がある。そだ。

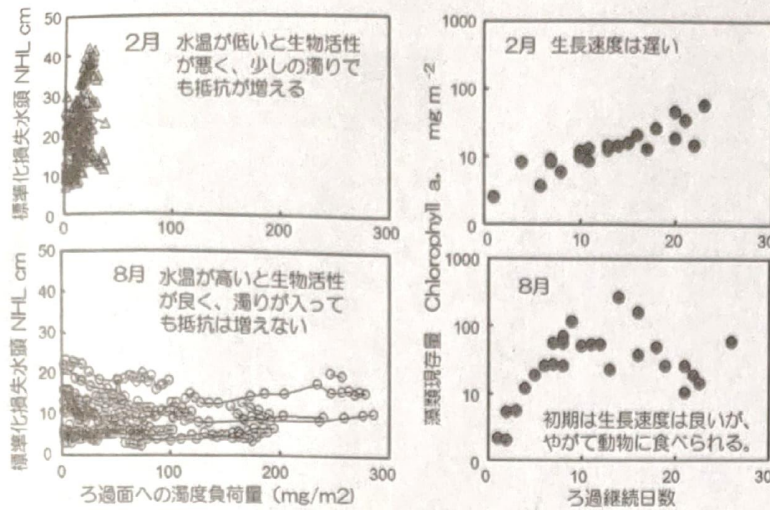


図35 冬と夏のろ過池へ濁り負荷とろ過抵抗の関係および藻の現存量の変化

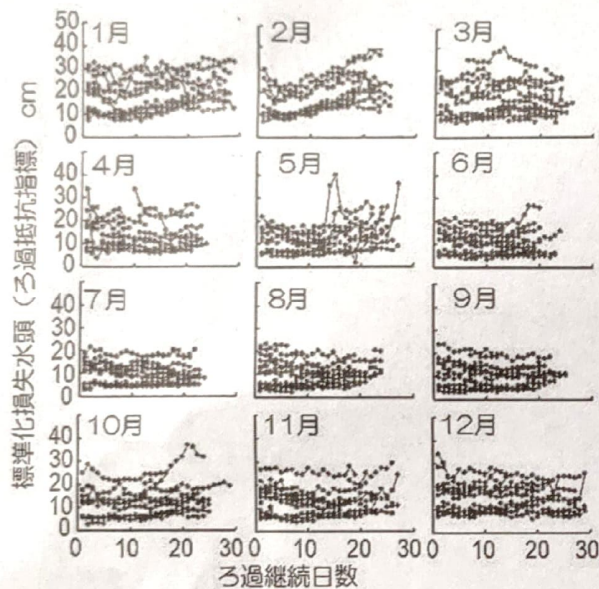


図36 若田浄水場のろ過継続とろ過抵抗の季節変化



図38 染屋浄水場のろ過水濁度は常に0.000度

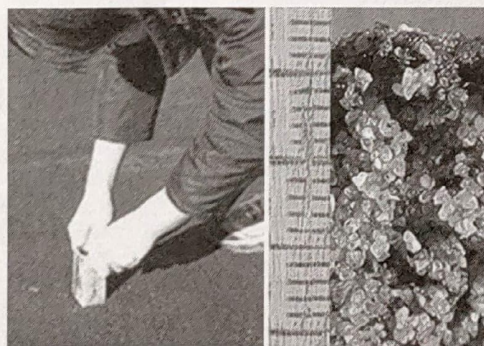


図37 若田浄水場の実際のろ過砂