



生物屋の緩速ろ過池研究

その18 生物は必死で増えようとしている。
ろ過池の微生物の活躍を考える。

信州大学名誉教授 中本 信忠

緩速ろ過は生物群集が増えることで、水質を浄化する。

1 生物は増えようとしている

戦後の日本は目覚ましい復興をし、工業生産が盛んになり景気が良くなった。その際、工場廃水が

河川に垂れ流され、河川へ大量の有機物が排出された。水中ではそれらを微生物が分解した。その際、

水中の溶存酸素を大量に使い、酸素欠乏状態になり、魚が死に、硫化水素臭がする河川になった。まるで200年前のロンドンのテムズ河の状態になった(図1)。

この頃から、水域での水質汚染



図1 200年前のテムズ河

と生物が注目されるようになった。自然界での生物の活躍、生物群集間の食物連鎖、生産と分解、物質循環について研究された。

生物は機会があれば、増えようとし、自分らの勢力を拡大しようとする。光合成をする植物は太陽光を吸収し、栄養塩を吸収して増える。動物は餌があると増える。

農耕地では生産量を増やすために施肥するが、肥料成分の一部は河川に流出した。工業でも材料を

全て無駄なく使えば良いが、廃棄物が必ずでてきた。自然界の微生物が廃棄物中で少しでも餌となるものを利用して増えた。微生物

だけでなく、あらゆる生物が必死で増えようとしているのが自然の姿であった。

私は戦後の高度成長期、公害という社会問題が台頭した1960年代に大学生だった。生産と分解、生態系、物質循環、生物経済学というのが話題になりだした時だった(図2)。

2 湖沼とダム湖でのプランクトンの栄枯盛衰

湖での植物プランクトンの季節

水道公論 2022年7月号
生物屋の緩速ろ過池研究
その10 ルーツは生物経済学

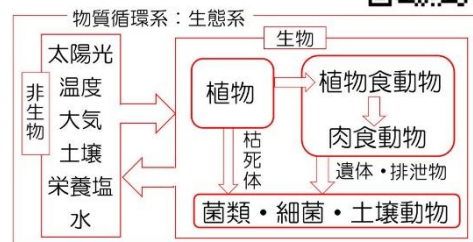


図2 1960年代は生物と環境が注目された

自然界での生物の活動は非生物的要因(環境)と関係がある。

産業革命時代の英国ロンドンのテムズ河は屎尿でお菌黒ドブ状態だった。

湖沼のプランクトンの栄枯盛衰は、 環境の変化、餌の変化で生じる。

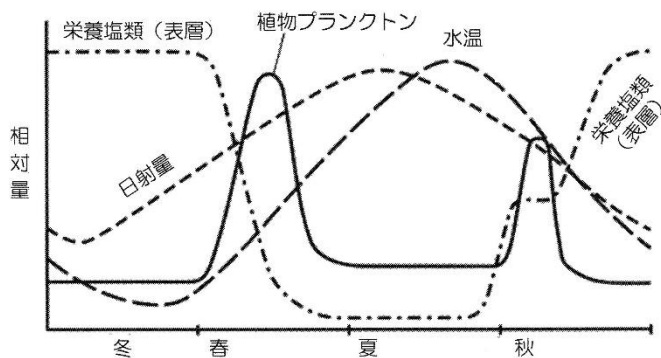


図3 湖の植物プランクトンの季節変化

私は水道水源ダム湖の下久保ダム湖（神流湖）流入部で渦鞭毛藻ペリディニウムが春先から初夏まで大繁殖しているのを1973（昭和48）年に調べた（図5）。河川からダム湖へ変わる境界では、流れがある河川で繁殖する生物から流れが急に止まった湖という新しい環境に適した生物が繁殖しだす現象に気づいた。ダム湖流入部はゆっくりとした流れに変わるの

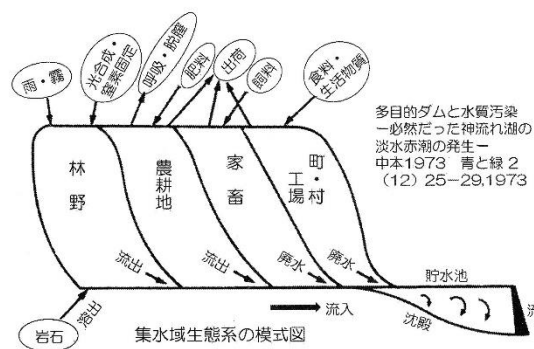


図4 ダム湖は集水域の影響を受ける

で鞭毛をもって動ける渦鞭毛藻ペリディニウムが繁殖していた。自然界には多種多様な生物がいて、生物は繁殖できそうな環境に遭遇すると、その環境に適した生物が活動しだした。細菌やプランクトンなどは、環境が悪くなると直ぐに休眠（休憩）状態になる。湖沼や河川は降雨により水位は変動する。水中では微小生物が繁殖するが、湖沼や河川の水位が下がり干上がると微小生物は生き延びるために休眠状態になる。



図5 ダム湖流入部の淡水赤潮

などの細かな生物は乾燥に耐え、風が吹くとホコリと一緒に、空気中に舞い上り、風に乗って世界中に拡散している。日本では春霞といわれる現象がある。春先は中国大陸から偏西風に乗って細かな黄砂が飛んでくる。プランクトンは世界中、どこでも同じ種類のプランクトンが出現する。しかし大きさや形態は新しい環境に適応して変わることがある。種名を調べるために海外の図鑑で調べても種名を決めるのは難

しい。プランクトンの形態や大きさが違い、別種とされていた種を培養できるようになり調べ直すと同じ種だったということもある。現在はDNAを調べて種名を判別できるようだが、簡単にはこの様な分析はできない。

公園の池や諏訪湖などの植物プランクトンは水温が低い春は珪藻が繁殖し、やがて珪藻は動物プランクトンに食べられた。水温が高い夏は動物プランクトンが食べても細胞表面が堅固で消化しにくい緑藻やアオコと言われる藍藻が代わって優占種になった。一種類の生物が一年中、優占して繁殖することは珍しく、栄枯盛衰（種類交代）が頻繁に見られた。自然界では環境の変化に相応した生物種が次々と現れていた。

ダム湖と湖沼の生物現象は似ているが、現象を理解するには柔軟な発想が必要だった。

3 緩速ろ過池での藻の季節変化

水道公論 (第59巻第3号)

1970年代になると、集水域生態系へ関心が向いた。

ダム湖の生物繁殖は集水域の影響を受ける。
川から湖、環境が変わるといって新しい生物が活躍する。

休眠状態の微小生物はどこにもいる。好環境になるのを待ち構えている。

湖沼の植物プランクトンの季節変化と、 緩速ろ過池の藻の季節変化が似ていた。

この変化は湖沼でのプランクトンの季節変化(図3、前出)と似ていた。また上田市の染屋浄水場での藻類群集の光合成活性の季節変化(図7)ともよく似ていた。藻類の光合成活性は日射量に関係し、動物や微生物は水温が高い期間は活性が大きく、捕食活動、分解作用は活発であった。

教科書にある湖沼での植物プランクトンの季節変化は単純な例で自然界には例外はいくらでもあった。日本は北海道から沖縄まで、また山岳地域から平野部の都市部ま

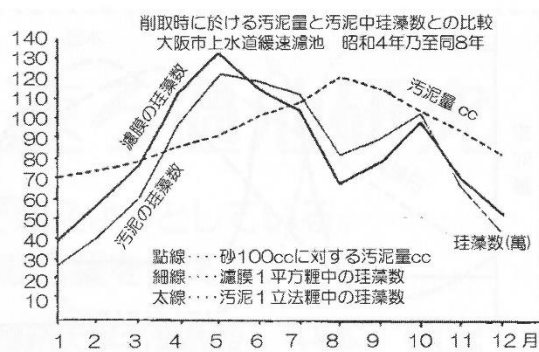


図6 柴島浄水場の藻の季節変化

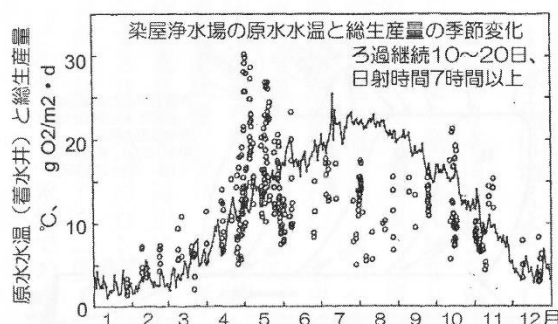


図7 染屋浄水場での光合成活性の季節変化

上田市の緩速ろ過池の藻の光合成活性
の変化も似ていた。

である。緩速ろ過池の生物現象はその地域での環境を反映して変化していた。緩速ろ過池の生物現象は多様で簡単に説明するのは難しく敬遠されている。

一方、水質や物理現象は単純な例で自然現象を解釈しやすく、技術開発が進んできた。でも緩速ろ過処理での浄化は生物群集の活躍が主である。そこでの生物現象の理解が必須であった。

4 細菌と藻類の増殖

細胞は分裂して増える。1↓2

時間軸	普通	対数
1	1	0.00
2	2	0.30
3	4	0.60
4	8	0.90
5	16	1.20
6	32	1.51
7	64	1.81
8	128	2.11
9	256	2.41
10	512	2.71
11	1024	3.01
12	2048	3.31
13	4096	3.61
14	8192	3.91

図8 細菌の増え方

↓4↓8↓16↓32↓64と倍々に増える(図8)。

細菌を培養し、その細菌数の増加量を普通目盛りで表すと、最初はほとんど増加していないように感じるが、やがて急に増加したように見える(図9のA)。急に増えた状態を見て凄いと感ずる。この細菌の増殖数を対数目盛で表すと増加割合は最初から一定で直線になる(図9のB)。

私たちは水質を分析する際、水採取し化学分析をする。検出限界以下の濃度なら、化学分析で検出できないので無いと判断する。ただし、特別の場合は吸着剤などを使って濃縮して分析をすることもあるが、普通は原水のまま水質分析をする。物理現象でも、精密計器で測定しても極微量の変化を

植物プランクトンは化学分析で検出できない極微量の栄養塩を吸収して増殖する。海洋などのプランクトン調査では、細かな網目の布のプランクトンネットで大量の水を濾して極微量のプランクトンを濃縮して調べる。湖沼のプランクトン調査でもプランクトンネットを使う(図10)。

検知することができず変化なしと判断する。

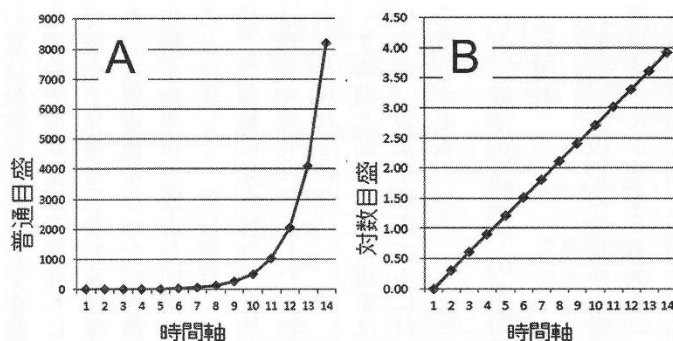


図9 細菌増殖を普通目盛りと対数目盛で表す

単細胞の生物の分裂は倍・倍と増える。

分裂して増える様子を、普通目盛りと、対数目盛で表すと、数が少ない時から、分裂速度は同じである。

ろ過池に水が入っている状態で、

砂層表面の藻を定量的に採取できる道具を開発した。

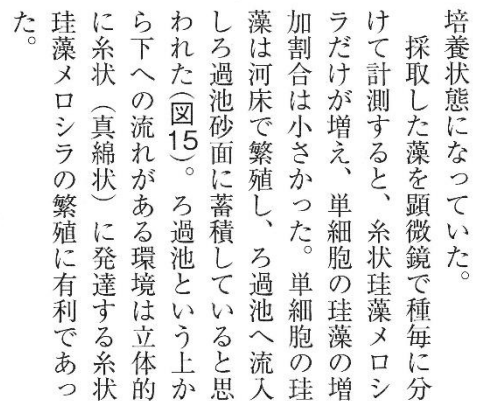
水道公論 2021年10月号
生物屋の緩速ろ過池研究
その1 道具ができ
て研究が進む <https://yoh8mxm9.com>

[illegible]

光合成が盛んだと、藻類被膜は浮いて、越流管から流れ出る。



図13 藻類被膜の発達



水道公論 (第59巻第3号)

藻の繁殖状態を、対数目盛で表すと、状態が分かり易い。

藻類の繁殖状態を、対数目盛と、普通目盛りの両方で表すようにした。

細菌の増殖パターンと、藻の増殖パターンは同じだ。

5 対数増殖と直線増殖

細胞の大きさが約1μmと小さい細菌の増殖の様子について普通は対数目盛で図示する(図9のB、前出)。細菌は条件が良いなら、その分裂速度は20分程度である。1時間に約10倍、2時間で100倍、3時間で1000倍、4時間で1万倍にもなる。培養液中の細菌は直ぐに大量の数になり、酸素や栄養が足りなくなる。やがて死滅しだす。この様子について、細菌が新しい環境に適応し活動しだす期間を誘導期(lag phase)、倍々に増える期間を対数増殖期(log phase)、細胞分裂が制限がかかっている期間を定常期(stationary phase)、細菌が死に出す期間を死滅期(death phase)に区別するのを教わった(図16)。

私は卒業研究で細菌を培養し、大学院では藻類と栄養塩の関係を調べた。緑藻や珪藻の培養実験では上手く培養できず大変に苦労した。当時、東京大学の田宮博先生がクロレラを実験室で培養し、屋外でも大量培養をしたのが有名であった(図17)。田宮先生の論文で藻類の直線増殖(直線増加) Linear growthという用語を初めて知った(図18)。この論文はアメリカのカネギー研究所から1953(昭和28)年7月に出版された藻類培養に関する論文集の中にあった。なお、この論文集は1976(昭和51)年に5刷りが出版され世界中で注目されていた。

第一次大戦後、世界中で食糧危機が問題になった。第二次世界大戦後、アメリカではクロレラを大量培養し人間の食糧・蛋白源として利用しようと考えた。カーネ

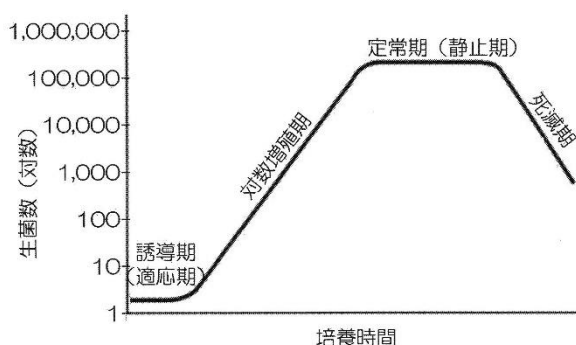


図16 細菌の繁殖期

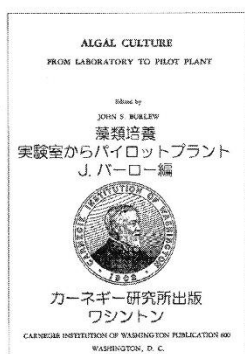


図18 カーネギー研究所論文集

Tamiya 他
p204-235
クロレラの増殖と
光・温度の関係
Mituya, Nyunoya, Tamiya
P273-281
藻類の大量培養実験
初版 1953.7.
5刷り 1976.5.
https://publicationsonline.carnegiescience.edu/publications_online/algal_culture.pdf



図17 徳川生物研での屋外培養

表していたのに注目した。1949(昭和24)年にスポア博士と進駐軍GHQは田宮先生へクロレラ的大量培養実験を依頼した。田宮先生らは豊島区目白の徳川生物学研究所の屋外での大量培養を行って1951(昭和26)年に成功させた。

田宮先生は1952(昭和27)年にアメリカ政府の要請でカーネギー研究所に行き藻類培養に関する世界中の研究情報を集めるのに協力をした。

田宮先生はクロレラをガラス製の扁平な培養瓶で培養実験をした(図19)。瓶に滅菌した空気と炭酸ガスを通気して培養し、クロレラの増殖速度を照射光量との関係を調べた。

クロレラの増え方は照射光量に関係していた(図20のA)。培養を開始し数日経過すると増える量は毎日同じ量が増えた(図20のB)。1日に増える量は照射光量に比例していた。培養瓶の中のクロレラは増えだすと培養瓶は緑色が濃くなり、照射光のほとんどの光が光合成で使われた。瓶の中の藻の増加速度は藻類量に比例するのでな

東大の田宮博先生らのクロレラ的大量培養実験の研究を参考にした。

GHQ 進駐軍が、藻を食料資源と考えていた。

田宮先生の報告で、直線増殖というのを知った。

私も、田宮先生が使った扁平フラスコと同じのを用いて、クロレラ培養実験をした。

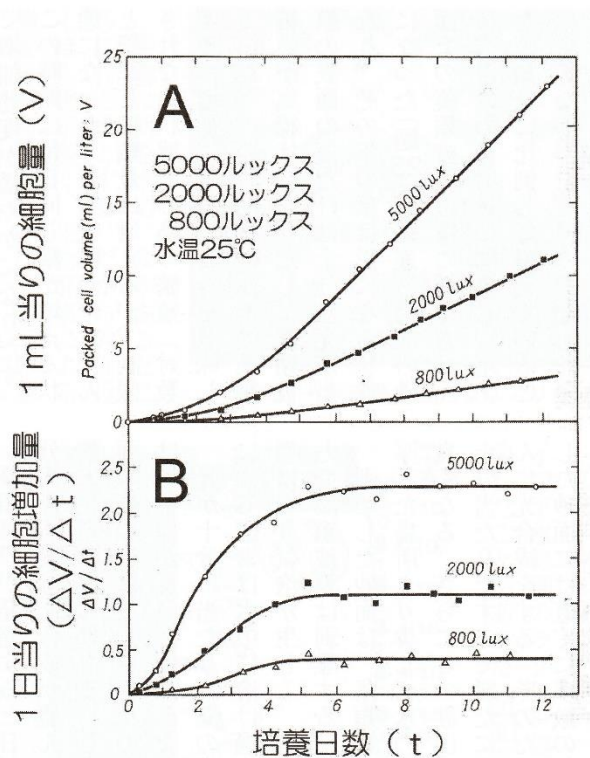


図20 藻類の直線増殖

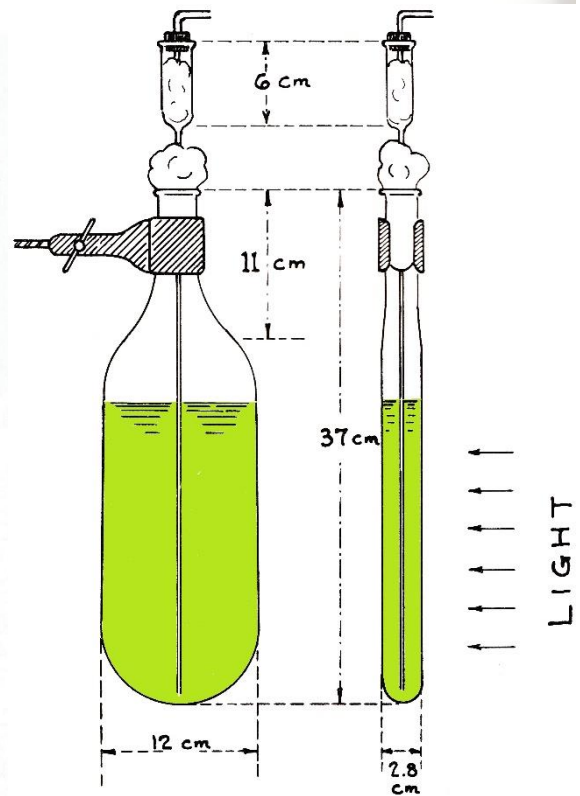


図19 扁平培養瓶

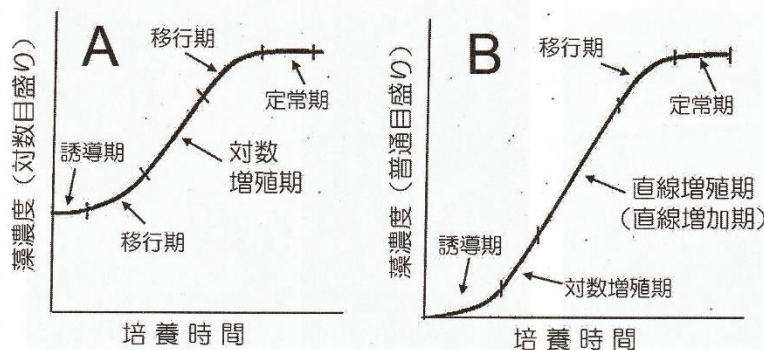
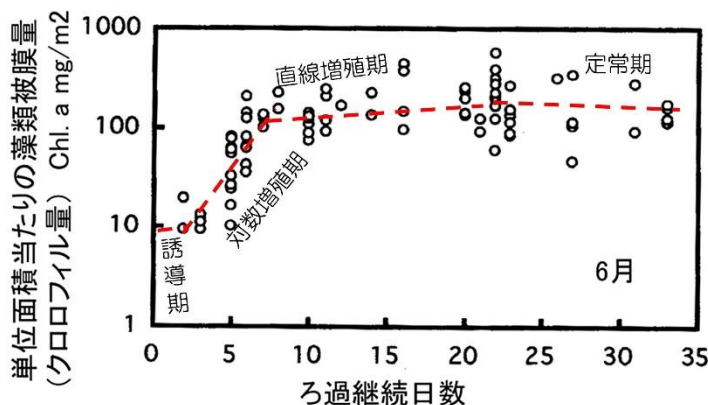


図21 増殖を対数目盛と普通目盛で表記

く、照射光量に比例していた。光が十分で、光合成が制限されないなら、本来、クロレラは対数増殖(図21のA)するが、大量培養だと照射光が増えた藻の陰になり十分の光が全ての藻に当たらない状態になった。その結果、照射光量に依存してクロレラが増えた。田宮先生らは、この状態を直線増殖(図

自然界では直線増殖状態は普通だった。



21のB)をしていると説明している。6ろ過池砂層の藻は直線増殖している。緩速ろ過池でも藻の繁殖は、初期は対数目盛で直線的に増え、制限が無い状態で、対数増殖をしていた。しばらくすると増加の勾配がゆっくりとなる。この図14(前出)に各増殖期の名前を記入してみた(図22)。ろ過継続1週間程度

染屋浄水場の藻の発達も、最初是对数増殖をするが、直ぐに、増殖は制限状態になり、直線増殖状態になった。

糸状珪藻メロシラは砂面で、真綿状に発達する。
光合成の気泡の浮力で、浮き上がる。



図23 砂面の真綿状藻類被膜

で増加速度が緩やかになりました。
この時期は毎日同じ量が増える状態になった。藻類被膜がだんだんと肥厚し藻類量は増えるが、制限されない状態での藻の繁殖（対数増殖・増加）でないことを意味していた。この時期は砂面上の藻類被膜が真綿状になりだし、藻類被膜の表面の藻だけは十分な光が当たり、その下の藻は影になる状態になった（図23）。緩速ろ過池の砂面上の藻類被膜の藻の増え方は面積当たりの日射量に関係し、増えた藻類量に比例して増えているとは言えなかった。厚く発達した藻類被膜は光が制限された状態の直線増殖（増加）の状態と言えた。

剥離面では、直ぐに藻が繁殖する。

藻類被膜が発達すると日射が十分当たる藻は光合成が盛んになり酸素生産が盛んになる。しかし表面の藻の蔭になる真綿状の中の藻は光条件が良いとは言えなかった。光が十分に当たった藻の光合成による酸素は水中に溶け過飽和状態になり気泡が生じる。気泡の浮力で藻類被膜は剥離する。

剥離した砂面は、藻類被膜が肥厚した場所より少し、水の流れが良くなる。さらにこの砂面は光が十分当たりだすので新たに藻が盛んに光合成をする。そのため剥離した砂面には直ぐに多数の気泡が生じていた（図24）。この様な状態になると、砂面上の藻類被膜量はほぼ一定になり定常状態に入りだしたと言えた。

この様な砂面の状態でボートを浮かべてろ過池全域を調べたところ、どこでも同じ状態であった（図25）。
直線増加期、定常期も、ろ過池の砂面での1日の光合成量は、ほぼ一定で、毎日、同じ量が増えていると考えられた。

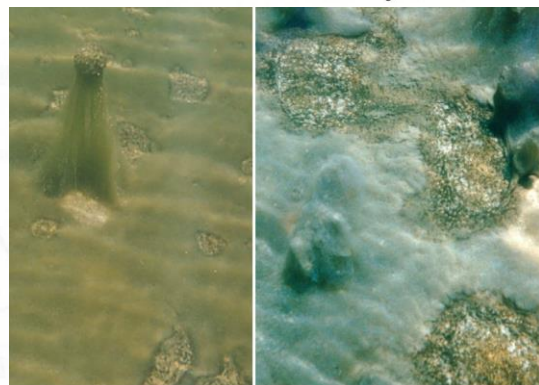


図24 剥離面は活性が高くなる



図25 ボートで藻類被膜を調べる

ろ過池で、ボートを浮かべ、全域を調べたら、藻類被膜は、どこでも同じだった。

7 砂が動かないと生物は安心して活躍

緩速ろ過池では上から下への流れが常にある。浅い水深のろ過池の砂面にまで太陽光が届く環境だと光合成をする藻が増えだす（図26）。流れがある環境だと糸状になり立体的になれる藻類の繁殖に有利である。上田市では最初に目立つ藻が糸状珪藻メロシラであった。砂層の大きさが1ミより小さな砂粒の表面には水中の溶存有機物を利用する細菌が増えた。やがて細菌を捕食する原生動物などがでてくる（図27）。細胞の大きさが1ミの20分の1位の大きさの細胞が連なった細かな糸状の珪藻メロシラは水生昆虫のユスリカ幼虫の良い餌であった（図28）。

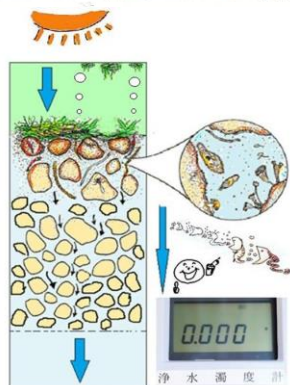


図26 ろ過池は各種生物が活躍

藻や微小動物は、砂面と砂面直下しかいない。
微小動物は餌を求め、砂面近くにしかいない。

活躍している微小生物を砂の大きさと比較した。

水道公論 2021年11月号
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

<https://youtu.be/UJTK15EHVKY>

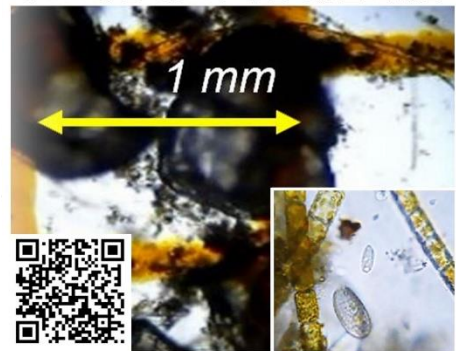


図27 砂の大きさより小さな生物が活躍

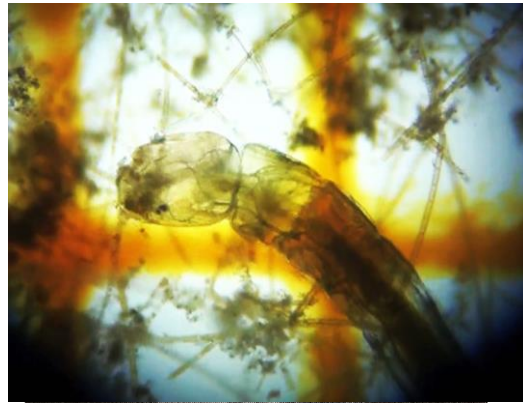


図28 糸状珪藻を食べるユスリカ幼虫

生物は餌を求め、餌があるところに行こうとする。だから砂面近くは生物が多く、生物群集による捕捉分解活性が良い。その下の層には、砂面直下で捕捉分解されな

藻を食べる動物も元気だ。

砂面近くは餌が豊富で生物も多い。

砂層深くは、別の生物が活躍。微小生物の餌の質が違うから。

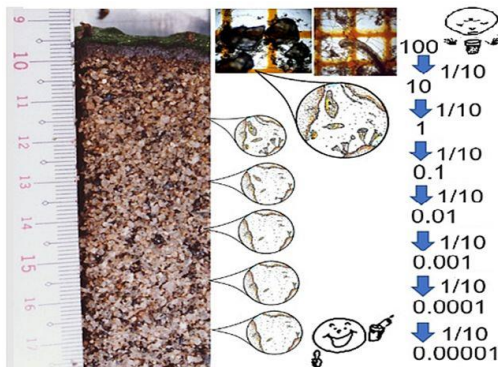


図29 上から下へ段々ときれいになる

私は1999（平成11）年にタイで下水処理のラグーン処理を勉強したことがあった（図30）。地方

8 環境の変化で活躍する生物群集が異なる

かった物質や微小動物の排泄物などの破片などが流されてくる。ここでは細菌や原生動物など微小の生物が活躍する。これらの微小生物の分裂速度は、大きな生物より速く、この場所で活躍できる生物が待ち構えていて活躍する。砂層では、下に行くに従い、段々と確実に生物が使える物質、反応する物質が少なくなる（図29）。

熱帯モンスーン圏における藻類を利用した水質浄化の可能性

一タイにおける安定化池の現地調査から—
中本信忠・竹内準一 2002

国際協力研究
18(1): 7-28,
2002.

https://www.jica.go.jp/jica-ri/IFIC_and_JBICI-Studies/jica-ri/publication/archives/jica/enkyu/02_35/pdf/35_03.pdf

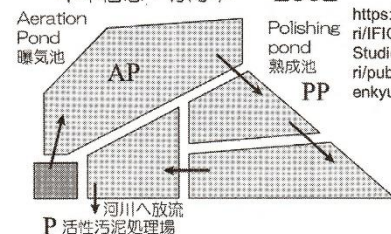


図30 回分式だと池毎に違う生物群集が活躍

良い。回分処理は効率が

回分処理の方が良さそう。

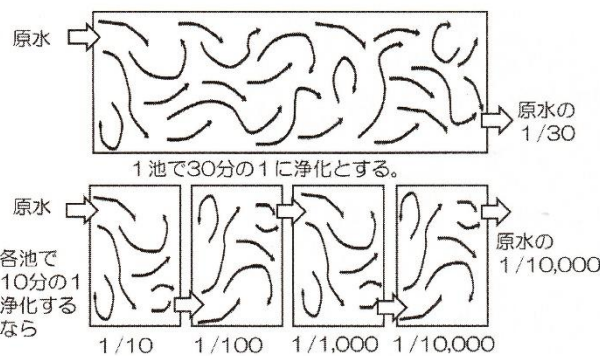


図31 回分処理の浄化効率

ラグーンでは活躍している生物群集は異なり、回分処理で浄化処理効率は良かった。
一つの大きなラグーンで一見、効率が良いようでも、同じ面積（容積）で、同じ流速でも回分処理の方が遥かに効率が良い（図31）。しかも、それぞれの池でその水質に合った異なる生物群集が活躍し徹底的に分解する。

回分処理だと、池毎に、異なる生物群集が活躍。

細かな砂の間の流れは、層流。生物にやさしい。

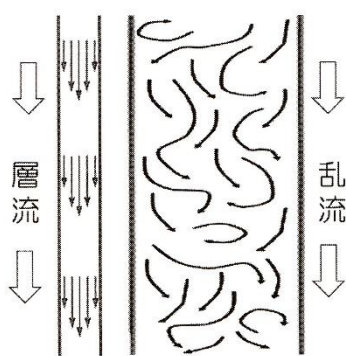


図32 層流と乱流

砂の隙間は小さい。川の流れは渦を巻いて流れていて、細かな濁りなどは沈みにくい。この状態を乱流と言われている。しかし、緩速ろ過池の砂層の隙間は小さく、一方通行の流れで、砂の間の流れは、一方通行にそって流れている。この状態を層流という(図32)。乱流状態だと、濁りも沈みにくく、乱流の流れでは微小生物は流されやすいので安心して活躍できない。しかし、砂の隙間が小さいと、ゆっくりとした穏やかな流れで層流状態になっている。砂粒の表面近くは極遅い流れになり、砂の表面では細菌や微小生物が安心して活躍

9 徹底的に生物浄化した水は甘く感ずる水

日本発の考えの生物浄化法を評価してくれないかな。

している。砂の間でも渦流が生じにくい。

緩速ろ過池の砂層では上から下への一方通行の流れがある。砂が動かず、上から下へと徐々に生物が利用できる物質(餌)の状況が変わる。その環境に適した異なる生物が利用できる物質を待ち構え、必死で捕捉分解をしていた。回分処理の効率を良くしていた(図33)。この処理行程は自然界の土壌断面での生物の分布、有機物の分

解の様子と似ていた(図34)。

生物群集が徹底的に分解した残り、生物と反応できない物質しか残らない。この水(ろ過水)は「刺激がなく甘く感ずるおいしい水」である。北海道の蝦夷富士と言われる羊蹄山の麓に甘露水というおいしい湧水がある(図35)。正に「生でおいしい水」である。

日本各地に名水と言われる湧水が多数ある。それは、自然界で活躍する生物群集が徹底的に分解し



図33 浄化法と濁度



図35 甘露水



図34 緩速ろ過の砂層は土壌断面と似ている

生物が反応する物質が無くなったスーパークリーンで「おいしい水」である。

自然界での浄化の仕組みの賢い活用だ。