

2. 生物ろ過膜と浄化機能 (ver.3)

2.1 生物ろ過膜（シュムッツデッケ）とズーグレア

生物ろ過膜は、ろ過砂表面に沈積又はそこで合成される物質の薄いマットで、シュムッツデッケ (Schmutzdecke) といわれる。この言葉は、「汚れた被膜 dirty skin」と訳されるドイツ語で、当初、アメリカで使われていたが、今は広く使われている。また、シュムッツデッケは、生又は死細菌から成るゼラチン状の粘性被膜（ズーグレア zoogloea といわれる）で覆われている。ズーグレアは、シュムッツデッケに加えてろ過層表面近くの砂層にも存在する。

2.1.1 生物ろ過膜の機能

緩速ろ過池の浄化の大部分は、生物活性が高いズーグレアに覆われた生物ろ過膜で起こる。非生物的な炭酸塩沈積物のろ過膜では、砂層上部のズーグレアが機能する。

緩速ろ過池の浄化の大部分は、生物活性が最も高い生物ろ過膜で起こっている。生物ろ過膜では、細菌類に加えて、糸状藻類や他の多くの生物、例えばプランクトン、付着藻類、原生動物、ワムシなどが生息している。細菌類の活性は高く、通過する水の有機物を捕捉、消化、分解している。ろ過池の水 (supernatant water) に含まれる藻類の死細胞や原水中の生存細菌も、ともにこのろ過膜内で消費・分解され、そのプロセスの中で無機塩が作られる。同時に窒素化合物も分解され、酸化される。ある種の色度成分は除去され、不活性の懸濁物質のかなりの部分が機械的に篩分けされる。

新設のろ過池の稼動直後で生物膜が形成されていない時、大腸菌群の除去率はほぼ 0 であるが、生物膜が形成された後は、除去率は $2\text{-log}(99\%)$ から $4\text{-log}(99.99\%)$ になり、緩速ろ過における生物膜の重要性が示される。大腸菌は生物ろ過膜の付着面に滞留している時間内に、死滅するか捕食者に捕食されるので、その減少は、付着に加えて死滅や捕食にも影響される。

生物ろ過膜が形成されるまでは、ある程度の成熟 (ripening) 期間が必要となり、その期間は、原水の水質、ろ過速度やその他の因子に影響される。ある条件下での最大量まで生物ろ過膜が発達すると、そのろ過池は成熟 (mature) しているといわれる。生物ろ過膜の発達最大量は、有機物などの栄養制限 (nutrient-limited) の水では、栄養が豊富 (nutrient rich) な水よりかなり少ないことが示されている。大腸菌群の除去率に関して、栄養制限の水を利用する緩速ろ過の場合、生物ろ過膜が成熟してから $2\text{-log}(99\%)$ の除去率が期待されるが、栄養豊富な場合は $3\text{-log}(99.9\%)$ 、場合によっては $4\text{-log}(99.99\%)$ も期待される。

ろ過膜の特性は、条件により大きく異なり、非生物的なろ過膜が形成されることもある。コロラド州 Empire のろ過池のろ過膜は、厚さ 1mm で、軽く懸濁し易い黒い炭酸塩の沈積

物 (deposit) である。ここでは、原水濁度が 0.5 度を超えることはほとんどない。Schuler からも、ペンシルバニア州で緊密にパックされ、砂に付着してないろ過膜について報告している。ろ過膜の削り取りを 4 月に行い、続く 75 日の稼働ではろ過膜内に生物的な増殖は見られなかったが、砂層の表面には多様な生物相のズーグレアがみられたとのことである。コロラド州立大学のパイロットプラントでは明確な生物ろ過膜の形成はみられなかったが、表面の削り取りにより、損失水頭が回復したことから、その有効性が示されたとしている。

生物ろ過膜がズーグレア状の場合、浄化に基本的な役割を果たすが、まれなケースとして炭酸塩沈積物の場合、その下の砂層のズーグレアの成熟度が重要となる。

2.1.2 生物ろ過膜と損失水頭

生物ろ過膜は損失水頭の上昇の原因となり、清掃により回復する。

生物ろ過膜の厚さは損失水頭に関係するが、両者が比例するとは限らない。生物ろ過膜が削り取りなど清掃により除去された後、ろ過層の損失水頭は初期の清浄ろ過層のレベル (clean-bed level) までに戻る。ろ過継続の最終段階では、損失水頭はろ過池の高さで許容されるだけのレベルとなる。生物ろ過膜の特性が何であれ、ある種の沈積はどの緩速ろ過池でも起こり、損失水頭の上昇の原因となる。

[維持管理] 生物ろ過膜の除去により損失水頭が回復する。

2.1.3 粒子除去における生物ろ過膜と砂層の相対的な役割

生物ろ過膜及び砂層は粒子除去や有機物分解に寄与している。生物ろ過膜が生物学的に成熟していれば、その役割は大きくなるが、成熟していなければ、砂層がより重要となる。

緩速ろ過では、ほとんどの粒子除去は生物ろ過膜で起こるといわれている。しかし、砂層も一定の役割を果たすとの報告もある。Bellamy らによれば、大腸菌群の除去率は、ろ過速度 0.12m/hr で、成熟した生物ろ過膜及び砂層 (mature sand bed) の場合 3-log で、生物ろ過膜を削り取った後でも 2-log であることから、成熟した砂層が除去に大きく寄与していた。また他の研究では、ろ過池に栄養塩を添加した実験を行い、大腸菌群の除去率が、未添加のろ過池の 2-log に対して 3-log となった。ろ過池に添加した栄養塩により砂層の生物学的な成熟速度が加速され、全体的な成熟度が上がったと考えられる。

ろ過層の上端は細菌の生育密度が最も高く、粒子除去に最も効果的な部分である。Hazen は、ろ過層表面で 10^6 個/g の細菌が生育し、深さと共に指数関数的に減少し、2cm の深さで 10^5 個/g になると報告している。一方、Collins らは、表面で 10^9 個/g から 30~45cm で $10^6 \sim 10^7$ 個/g になると報告している。生物ろ過膜にせよ砂層にせよ、代謝に寄与する細菌

(metabolizing bacteria) が存在しているところで、種々の有機物や栄養塩が除去されるが、生物ろ過膜と砂層がどの程度の寄与をするかは一定ではない。生物ろ過膜が生物学的に成熟していれば、その役割は大きくなるが、成熟していなければ、砂層のズーグレアがより重要となる。

[維持管理] 生物ろ過膜の形成が十分でない場合、砂層のズーグレアの成熟が重要となるので、生物ろ過膜の清掃時には、損失水頭の回復を確保した上で砂層上部のズーグレアを残すこと、必要以上に乾燥させてズーグレアを変質させないことが重要である。

2.2 ろ過膜での藻類の効果

藻類は、厳密にはろ過メカニズムに関与しないが、ある種の藻類は生物ろ過膜の作用に重大な影響を及ぼし、場合によっては、有効なものでもあり障害になることもある。

2.2.1 原水とろ過池水の藻類

ろ過池で優占する藻類は、原水の水源地で優占していた藻類とは異なる。

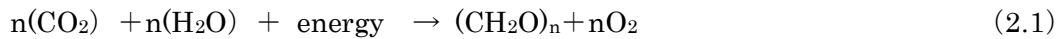
表流水は藻類を含んでおり、流水、河川や湖での自然の再生産プロセス (natural reproductive process) に寄与している。水域の環境条件 (pH、温度、化学組成、濁度、栄養塩の濃度、流れの深さと速度、光の量、その他の因子) により、異なった種(species)が優占 (predominate) する。浅く流れの速い流水で見られる藻類は、その流水が流入する深い池や貯水池で優占する藻類とは同じものではない。これと同じように、緩速ろ過池は水源地とは異なる環境であり、そこで優占する藻類は原水の水源地とは異なるものになる。加えて、伏流水や地下水を水源地とする場合でも、ろ過池水特有の藻類が優占する。原水及びろ過池水の藻類は、溶存酸素濃度の変動やろ過水への漏出など、ろ過の効率に影響を与える。

2.2.2 ろ過膜藻類の基本的な作用—光合成と分解

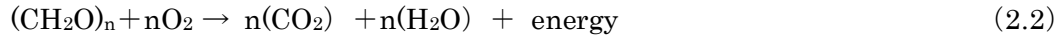
ろ過膜藻類は、光合成により増殖し、死により細胞が分解する。

ろ過膜では、主に付着性藻類が繁殖するが、ろ過池水同様その環境条件に応じたものが優占する。藻類は、独立栄養生物 (autotrophic organism) のため光合成 (photosynthetic process) により増殖する。光合成には光が必要となるので、ろ過池が覆蓋されている場合には、不活性な状態となる。非覆蓋のろ過池の場合でも、原水の濁度が高く光が遮断されるような場合には、藻類の増殖は阻害される。

緩速ろ過の浄化プロセスに関して最も重要な藻類の特性は、水中のミネラル分 (二酸化炭素、硝酸、リン酸) から有機物の細胞物質を作り上げることである。炭素のサイクルは、次の式で示される。



また、(2.1)の逆の反応が、藻類の死とともに細胞物質が放出されてろ過層の細菌類に消費されるときに起こる分解 (decomposition) である。

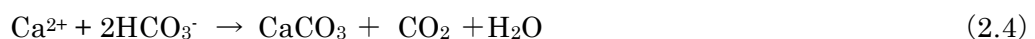


両反応のどちらが大きいかは、藻類が、群集 (population) として、成長状態か定常状態か、あるいは衰退状態にあるかによって決まる。

2.2.3 光合成と分解による水質変化

藻類の光合成により、溶存酸素濃度が増加し、二酸化炭素が減少する。また、二酸化炭素の減少に伴い、炭酸塩が沈殿することがある。夜間は分解による逆反応が起こり、ろ過膜が嫌氣的になると、水質障害が発生する。

藻類が活発な成長期にある限り (温帯地方 temperate climate の春季や夏季、熱帯地方 tropical area ではより長い期間)、反応 (2.1) が支配的になり、酸素が増え、二酸化炭素が減少する。酸素濃度は、時には理論的な飽和濃度の 3 倍にまでなりうる。一方、二酸化炭素が減少すると (2.3) 式によりアルカリ性となる。この場合、大気中から二酸化炭素が溶け込むとともに、(2.4) 式のように重炭酸イオンが解離(dissociate)して二酸化炭素が補給される。後者は、水の硬度 (hardness カルシウムおよびマグネシウム) が高い場合に重要となり、不溶性の炭酸塩が沈殿する。原水中の硬度が高い場合には、藻類の繁殖による炭酸塩の沈殿 (bio-induced carbonate precipitation) が増加するにつれてろ過閉塞が起こるので、ろ過層表面を定期的に除去する必要がある。



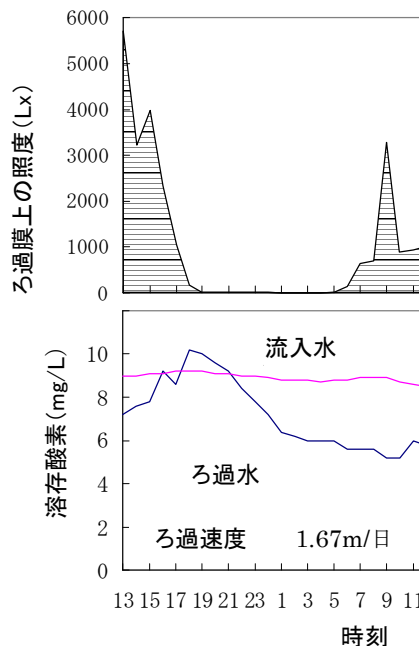
藻類群集が定常状態になると、式 (2.1) と (2.2) のバランスがとれた状態になる。式 (2.1) の光合成は太陽光を必要としているが、式 (2.2) による有機物の分解は常に起こりうる。このため、昼間には溶存酸素濃度が増え、夜間には溶存酸素が減少する日周変動が起こり、厳しい条件下では、夜間、生物ろ過膜が嫌氣的な状態になることがある。この影響は、有機物の蓄積が多くなる生物膜成熟後には、ろ過速度が遅いほど大きくなるので、ろ過速度を遅くすることあるいはろ過を中断することは避ける必要がある。

[維持管理] 生物ろ過膜成熟後には、ろ過速度を遅くすることあるいはろ過の中断は避ける。

—ろ過膜上の日射とろ過水の溶存酸素の変動—

—名古屋市の事例（参考資料7より）—

ろ過水はろ過膜部分通過後約6時間



—ろ過速度とろ過水の溶存酸素の低下—

—名古屋市の事例（参考資料7より）—

生物ろ過膜成熟後は、ろ過速度が遅いほど、溶存酸素の最低値は低くなる。

ろ過速度 (m/日)	DO 最低値 (mg/L)
1.67	5.2
1.25	4.6
0.83	1.6
0.42	0.0

2.2.4 ろ過膜藻類の浄化への寄与

藻類の光合成による溶存酸素は、ろ過膜を好氣的に保ち、有機物はろ過膜成熟期間を短縮する。

藻類の光合成により作られる酸素は、ろ過膜の好氣的な状態を保つのに寄与し、有機物やアンモニア、溶存マンガンなどの生物化学的な酸化を可能とする。酸素により酸化的な活性が高くなると、原水に含まれる有機物質が分解される機会がそれに応じて増加していく。

また、同じく産生される有機物は、ろ過膜表面あるいはろ過層上部の砂粒子上のズーグレアの形成を促進し、ろ過膜成熟期間を短縮する。原水水質が良く有機物濃度が低い場合ほど、この藻類による効果は相対的に重要となる。藻類の産生する新しい有機物は、古い有機物より分解され易い。ろ過水中の平均溶存酸素濃度は、覆蓋のろ過池と非覆蓋のろ過池でほとんど違いがないが、非覆蓋ろ過池の酸素消費量は覆蓋ろ過池の約10倍という報告もある（1.5mg/Lに対して15 mg/L）。これは、前述の式（2.1）と（2.2）に示した炭素サイクルに加えて、非分解性有機物が分解性有機物に変換されることにもよる。

2.2.5 藻類による障害

水温低下や水質変化によるろ過膜藻類の一時的な大量死は、障害を引き起こす。加えて、ろ過継続日数を短くすることもある。
また、ろ過池水の浮遊藻類（植物プランクトン）も制御が必要である。

北部気候帯では、水温は秋には低下し、ろ過膜藻類の生育条件が悪くなるので藻類の死滅を引き起こすことがある。また、別の理由により（例えば、殺藻性 **algicidal** の工場廃棄物が原水中に混入するなど）生育条件が悪くなると、藻類の大量死が起こることもある。これらにより、分解され易い有機物の放出、酸素の消費、二酸化炭素の生成が起こり、嫌気的な状態となる可能性が増し、二酸化炭素濃度が高くなると **pH** 値がより低くなる。たとえば、ろ過水の溶存酸素濃度が十分でも、ろ過層の一部が死んだ藻類に覆われると、その直下で還元が起こり、嫌な味をつける油状物質 (**etheric oil**) が産生されることがある。この場合、ろ過停止及びろ過池の清掃が必要となる。このような状態は、1つ以上のろ過池で同時に起こるので、ろ過水の量と質の確保に重大な問題を引き起こす。

藻類が非常に多く繁殖することの潜在的なリスクとしては、頻繁にろ過池清掃をする必要性が発生し、ろ過停止期間の割合が増加し、清掃のための労力もそれだけ必要となることである。温帯地方では、このリスクが特に温度上昇期に大きくなり、突如藻類の大繁殖が起こり、温度下降期にはそれらが大量死することがある。熱帯地方では、他の気象条件や季節変動で、同様な現象が起こりうる。

また、糸状のろ過膜藻類の光合成により、多くの微細気泡が藻類に付着することで浮力が付き、藻類が砂層から離れて浮上することがある。水面近くでは気泡が大気中に揮散するので再び沈降するが、水流や風向によりろ過池の特定の場所に集積すると、堆積したろ過膜藻類が腐敗することがある。このため、浮上した藻類を越流管から排出させるなどの作業が必要となる。

また、ろ過池水で浮遊藻類（植物プランクトン）が繁殖することがある。ろ過池の滞留部分や走光性により表面に集積する場合は、ある種の連続培養系となるので、原水中の窒素やリンなどの栄養塩が少なくても大量繁殖することがある。また、ろ過池を清掃するための落水の際に砂ろ過層に浮遊藻類が侵入し、生物ろ過膜を清掃した後もろ過層上部に残り、充水する時再びろ過池水に浮遊し大量繁殖する例もみられる。浮遊藻類は、分解による酸素消費、漏出による濁度検出や着色障害などの影響がある。このため、越流管からの排出やろ過速度を高く保ち滞留部分や表面での集積を防ぐなどにより、その量を制御することが必要となる。また、ろ過池清掃において、浮遊藻類が砂ろ過層上部に残らないように留意する必要もある。

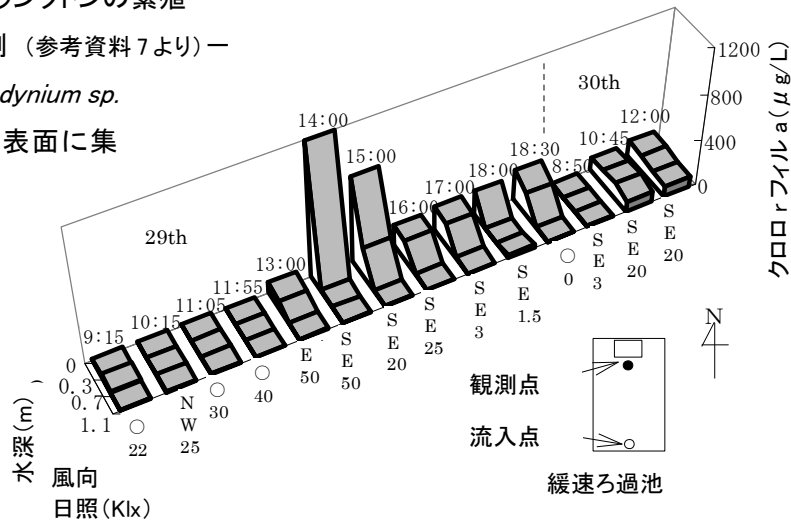
[維持管理] 浮上したろ過膜藻類は、越流管から排出させる。ろ過池水の浮遊藻類は、越流管からの排出やろ過速度を上げて制御をする。

—ろ過池水での植物プランクトンの繁殖—

—名古屋市での事例（参考資料7より）—

走光性のある *Gymnodinium sp.*

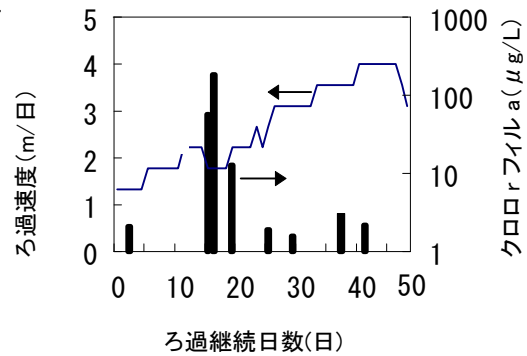
が光と風により池の水表面に集積する。



—ろ過速度とろ過池水での植物プランクトンの繁殖—

—名古屋市での事例（参考資料7より）—

ろ過速度が増加し下向きの流速が増大すれば、植物プランクトンの増殖は抑制される傾向がある。



2.2.6 ろ過膜藻類の種類

糸状藻類は、濁質の捕捉、ろ過閉塞の防止など効果的なろ過膜を形成する。

糸状藻類(filamentous)は活性の高い生物ろ過膜を形成し、捕捉のための担体となるズーグレア量を増加させ、細菌類やその他の生物の増殖を促進することで、捕捉や吸着効果をさらに高める効果がある。生物ろ過膜が十分形成されていれば、砂ろ過層に到達する懸濁粒子量を減少させるので、ろ過池清掃までの時間を長くすることができる。さらに、生物ろ過膜に到達した大腸菌や病原微生物を捕食しその数を減少させる原生動物や他のより高等な生物に、よい生育環境を提供する。いくつかの研究によれば、この藻類そのものが病原微生物など原水中の細菌類に有害な物質を産生するので、細菌の残存可能性を低下させるとも言われている。

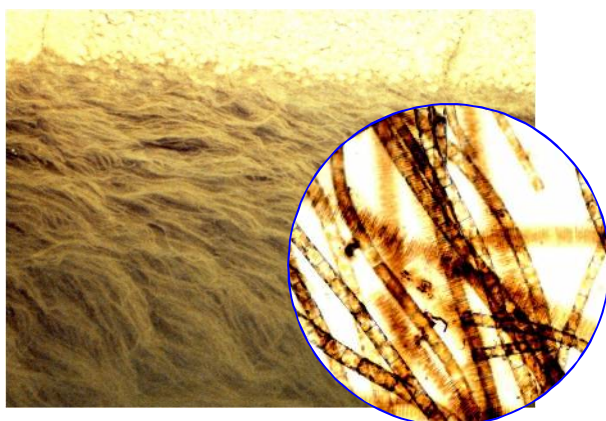
糸状藻類が主体の場合、密に織り込まれ強度のある繊維のようなマットを形成する。太陽光が十分の場合、純酸素の気泡がこのマットで作られ、その浮力を増加させることで、附着していた砂粒子と共にろ過層上部から持ちあげられる。これにより、ろ過抵抗が減少し、時には急激にろ過速度が増加することがあるが、この場合既にろ過砂部分にもズーグレアは形成されており、ろ過層深く濁質が混入することは少ないと考えられる。

一方、珪藻のような小型藻類が優占する場合、マットは形成されにくくろ過表面の抵抗が増す。このような藻類が大量繁殖すると急速なる過閉塞が起こり、ろ過継続時間が短くなり、維持管理上の問題やろ過水水質の低下を引き起こす。

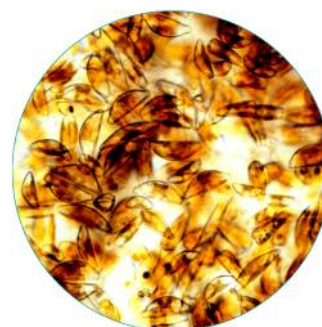
藻類の繁殖や優占種は、原水水質や気象条件などに影響される。太陽光、栄養塩、適正な温度があれば、増殖は促進される。二酸化炭素、硝酸塩、リン酸塩のようなミネラル分を含む低濁度の清澄な水は、藻類増殖に最適な水である。一般に、他のミネラル分に比べてリン酸塩が相対的に少ないというケースが多い。というのは、水源の水のリン含有量が少ないか、リンが粘土粒子への付着や鉄との沈殿などにより水中から除かれるからである。

—ろ過膜藻類の種類—

—名古屋市での事例（参考資料7より）—



糸状藻類 *Melosira varians* のろ過膜と顕微鏡写真



珪藻 *Cymbella minuta*

—藻体に吸着される粒子— —名古屋市での事例（参考資料7より）—

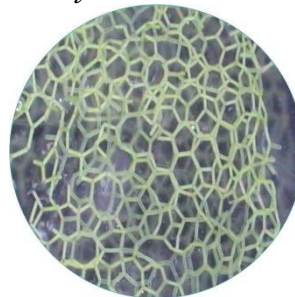
同じ糸状藻類でも、*Melosira varians*は藻体に粒子を吸着させやすく、粒子除去に効果的なろ過膜を形成する。

100 - 強熱減量 / (1 - C)、Cは藻体内のケイ酸含有量 0.32 (*M. varians*) 0 (その他)

ろ過膜藻類の種	粒子吸着量 (%)
<i>Melosira varians</i>	58.4
<i>Spirogyra</i>	6.4
<i>Hydrodictyon reticulatum</i>	0.4

Spirogyra アオミドロ

Hydrodictyon reticulatum アミミドロ



2.2.7 ろ過池の覆蓋

ろ過池の覆蓋は、藻類に起因する障害の防止、凍結防止、水面への落下物による汚染防止、ろ過池清掃が天候に左右されないなどの効果がある。一方で、藻類による浄化への効果が失われる。

温帯や寒帯では、藻類による障害に加えて、冬季に水面が凍結する可能性もある。このため、ろ過池を覆蓋して、太陽光を遮り藻類が繁殖しないようにすることが行われている。しかしながら、このことは構造物の建設費用も考慮すると、特に温帯地方ではあまり考えるべきではない。藻類には、いろいろな長所もありうるからである。

ろ過他の覆蓋により、ろ過継続期間も長くなり安定し、ろ過池清掃も、昼夜を問わず、あるいは荒天時であっても可能となる。覆蓋ろ過池に藻類がない場合は、幾分浄化機能が低下する可能性があるが、これを補う長所として、風によってもたらされる汚染物質や鳥による汚染を排除できるという利点がある。

藻類の繁殖が起こる熱帯の条件下では、藻類の大量死滅が少なく、氷結も起こらないので、ろ過池清掃は定期的に行えばよく、その頻度も高くはならないので、ろ過池覆蓋の長所もあまりない。ろ過池清掃に伴い、生死にかかわらず全ての藻類は除去される。新しい藻類が原水によりもたらされ式(2.1)による反応が支配的となり、溶存酸素が増加し有機物が分解されやすくなる。同時に、二酸化炭素含有量が減少することで水の腐食性が低下し、栄養塩や有機物を減少させて、ろ過への負荷を減少させる。非覆蓋のろ過他の生物ろ過膜による捕捉と浄化機能は、水道水の衛生性 (hygienic quality) を保ち、ろ過閉塞を減少させ、ろ過継続時間を長くするという一方で、総合的なろ過効率に寄与している。

2.2.8 パイロット実験の必要性

藻類の種類や成長速度は予測しがたく、経験がなければ、設計前にパイロット実験が必要である。

優占種や藻類の成長速度を支配するいくつかの変数は、ある特定の場所での経験を基に想定する場合を除いて、本質的には予測することができない。経験がなければ(すなわち、同じような条件で現在ろ過池が稼働していなければ)、大規模な実施設計を設計する前にパイロットプラントで経験を重ねることは価値がある。研究は、全ての季節や気候が考慮できるように、1年を通して継続する必要がある。

2.3 生物ろ過膜の小動物の影響

生物ろ過膜には、付着性のろ過膜藻類の他、原生動物やユスリカなどの小動物が生息している。これらは、緩速ろ過の浄化機能に寄与するとともに、同時に障害を起こすこともある。

2.3.1 小動物の働き

小動物は、細菌類の捕食や有機物の分解無機化により、緩速ろ過の浄化機能に寄与している。また、生物ろ過膜に蓄積した有機物の摂食により、損失水頭が改善することがある。

生物ろ過膜には、原生動物、ユスリカやミズムシなどの節足動物、ミズミミズなどの環形動物、線虫類などの袋形動物が生息している。原生動物は細菌類を捕食し、さらに大型の動物に捕食される。また、ユスリカは、ろ過膜上の藻類やろ過膜に蓄積した有機物を餌として摂食する。ミズミミズもろ過膜に蓄積した有機物を餌として摂食する。線虫類は細菌類を摂食するといわれている。

これらの食物連鎖は、細菌類の除去や有機物の分解無機化に寄与するばかりでなく、摂食により生物ろ過膜上に微細な穴をあけ、損失水頭を改善する働きもある。また、ユスリカのように羽化して緩速ろ過池から飛散する昆虫類は、有機物を系外に取り出すという効果もある。また、緩速ろ過池に魚類が生息する場合は、これらの小動物を捕食し、植物連鎖を進めるとともに小動物による障害を抑える作用もある。

2.3.2 小動物による障害

小動物がろ過水中に混入すると、大きな水質障害となる。

小動物の共通の障害としては、ろ過水への混入である。これらの動物は、その大きさから通常はろ過層を通過することはほとんどないが、ろ過池の削り取り時にろ過層の下端まで水位を下げると小動物が砂利層まで退避し、ろ過水に混入することがある。また、壁面短絡流により、ろ過水に混入することも考えられる。

線虫がろ過水に混入した場合、塩素消毒に抵抗性があるので、消化器官に存在する一般細菌や大腸菌が残存する可能性もある。また、緩速ろ過池が都市部にある場合、羽化したユスリカの飛散が周辺住宅地に影響することがあるので、その対策が必要となる。

2.4 緩速ろ過による水質変化

緩速ろ過では、本来の目的である粒子の除去の他、生物ろ過膜及びブーグレアによる種々の溶存物質の変化も起こっている。粒子には、濁度で示されるシルト・粘土成分に加えて懸濁態の重金属類や微量化学物質も含まれ、ろ過により濁度が低下するとこれらの物質も低減化することになる。また、大腸菌などの細菌類や藻類も懸濁物質のひとつであり、それらは粒子除去メカニズムに加えて、捕食による不活性化の効果もある。溶存物質には、生物酸化により除去されるものの他に、付着による減少、藻類の光合成に起因する日周変動などの変化を示すものがある。

2.4.1 粒子の除去

緩速ろ過池の粒子除去率は、2log~3log 程度である。生物ろ過膜だけでなく、砂層も補完的に機能する。

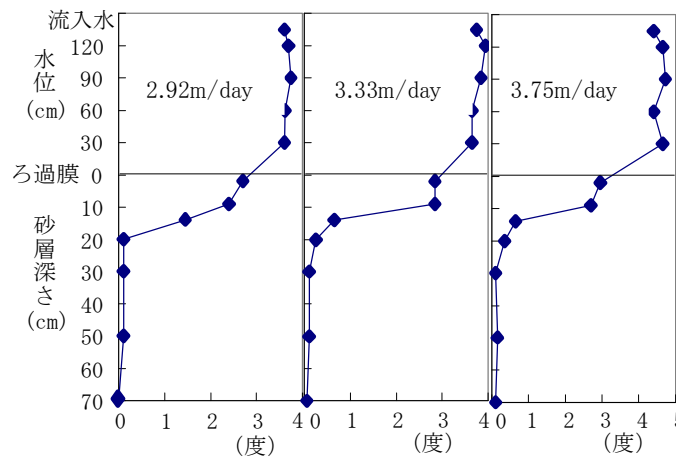
1.2 および 1.3 で述べたメカニズムにより、粒子は除去される。緩速ろ過の粒子除去率は、原水に含まれる粒子数および粒径分布により異なり、2log~3log 程度である。このため、クリプトスポリジウム対策で求められている、ろ過水濁度 0.1 度以下を維持するためには、原水濁度 10 度以下が目安となる。原水濁度が 10 度を超えるような場合には、普通沈澱あるいは粗ろ過など濁度低減化のための前処理が必要である。

また、粒子除去に生物ろ過膜と砂ろ過層がどの程度寄与しているかは、生物ろ過膜の成熟の程度とろ過速度に影響を受ける。このため、条件によっては、砂層が補完的に機能するので、安全を考慮して砂層の厚さを確保する必要がある。この場合、砂層内に粒子が保持されるので、1回の砂層表面の削り取りによる清掃では除去できないこともあるが、ろ過速度の急変などによる脱離を防ぐことで、ろ過水への影響を最小限とすることができる。

[設計・維持管理]
 緩速ろ過では、ろ過水濁度 0.1 度以下を維持するためには、原水濁度の目標値は 10 度以下である。これを超える場合には、濁度低減化のための前処理施設が必要である。
 粒子除去の補完として、一定程度以上のろ過層厚さが必要である。

— 緩速ろ過による濁度変化の例 —
 — 名古屋市の事例（参考資料 7 より） —

徐々にろ過速度を増加させた場合の砂層内の濁度分布。砂層内への濁度の侵入は生物ろ過膜の成熟度及びろ過速度に影響されるが、概ね砂層 20 cm までで、濁度が除去されている。



— 緩速ろ過による粒子除去の例 —
 — 名古屋市の事例（参考資料 7 より） —

粒子径 (μm)	2~3	3~5	5~7	7~10	10~15	15~
除去率(log)	2.60	2.60	2.69	2.65	2.64	2.16

2.4.2 細菌類及び藻類の除去

原水に含まれていた細菌類、藻類、腸管ウイルス及び原虫類も除去される。

緩速ろ過により、原水に含まれていた大腸菌などの病原性細菌及び植物プランクトンなどの藻類も除去される。この場合、生物ろ過膜及び砂層への付着のみならず原生動物による捕食の効果もある。また、腸管ウイルス (enteric viruses) やクリプトスポリジウムのオーシスト (Cryptosporidium Oocyst) などについても、同様のメカニズムによる除去が報告されている。

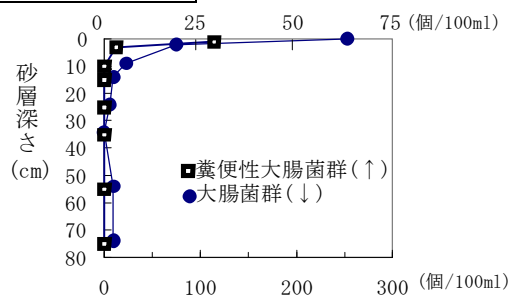
緩速ろ過による除去率 (参考資料 8 より)

対象	除去率
大腸菌	1-3 log
腸管ウイルス	2-4 log
ジアルジア・シスト	2-4+ log
クリプトスポリジウム・オーシスト	>4 log

—砂層内での大腸菌群および糞便性大腸菌群の変化—

—名古屋市の事例 (参考資料 7 より)—

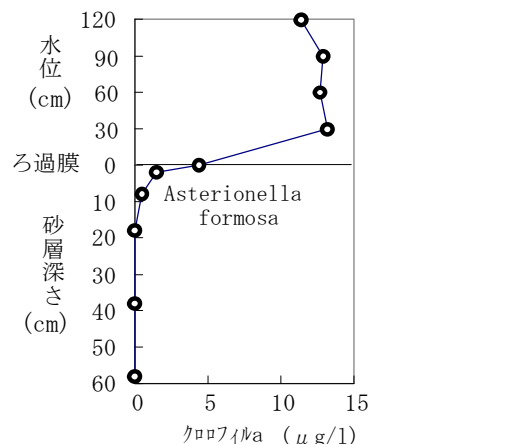
生物ろ過膜および砂層表面で、ほとんど除去されている。



—砂層内での植物プランクトンの変化—

—名古屋市の事例 (参考資料 7 より)—

珪藻類 *Asterionella formosa* は、生物ろ過膜および砂層表面で、ほとんど除去されている。



2.4.3 溶存無機成分の変化

ろ過膜藻類の光合成により、ろ過水中の栄養塩、アルカリ土類金属および総アルカリ度が日周変動する。

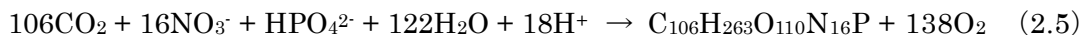
硝化により、アンモニアおよび亜硝酸が除去される。

生物酸化により、マンガンおよび鉄が除去される。鉄の還元的イオンが存在しない場合は付着により除去される。

アルミニウムと亜鉛は水酸化物形成により除去されるが、両性金属であるため pH 依存性が高い。
アルカリ金属類および陰イオン類は緩速ろ過過程でほとんど変化しない。

(1) ろ過膜藻類の光合成による栄養塩の日周変動

ろ過膜藻類は、窒素、リンなどの栄養塩を取り込み、光エネルギーを利用して炭酸ガスから有機物を生産する。

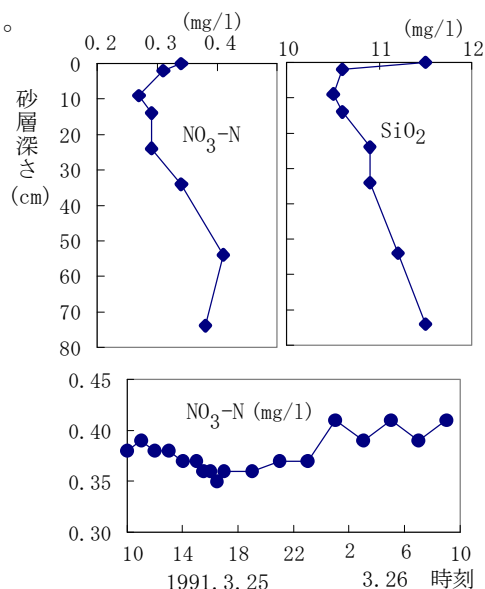


光合成は昼間のみ起こり、呼吸 (respiration) や分解により逆反応が起こるので、ろ過水中の溶存酸素や栄養塩濃度は日周変動する可能性がある。窒素では硝酸性窒素の日周変動が顕著であり、後述のように亜硝酸態窒素およびアンモニア態窒素は硝化によりろ過水中で検出されなくなる。リンは、オルトリン酸の鉄やカルシウムとの反応もあり、微量の場合日周変動は顕著ではない。また、珪藻が主体のろ過膜の場合には、溶性ケイ酸も日周変動するが、ろ過砂からの溶出の影響を受けることもある。

一硝酸態窒素と溶性ケイ酸の砂層内の変化とろ過水の日周変動

一名古屋市の事例 (参考資料 7 より)

水は下向きに流れるので、砂層内の値は、その場所での変化より、ろ過膜における変化の時間的変動を反映したものになる。



(2) ろ過膜藻類の光合成に伴う炭酸カルシウムの沈殿によるアルカリ土類金属 (カルシウム、マグネシウム、ストロンチウム、バリウム) および総アルカリ度の日周変動

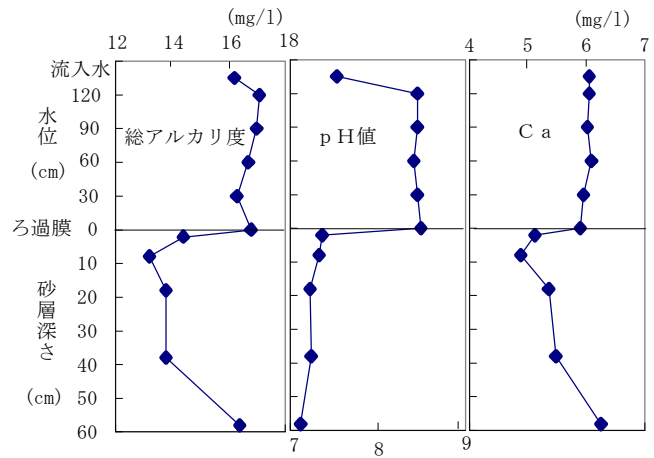
ろ過膜藻類が光合成を行う時、水は下向きに流れるので、必要な二酸化炭素は大気からではなく(2.4)式により補給されるので、光合成に引き起こされる炭酸カルシウムの沈殿 (bio-induced carbonate precipitation) により、ろ過膜直下で総アルカリ度 (重炭酸イオン HCO₃⁻) とカルシウムが減少する。

一般に、光合成により水中の二酸化炭素が減少すると pH 値が上昇するが、炭酸カルシウムの沈殿により二酸化炭素が供給される場合には、pH 値は変化しない。また、マグネシウム、ストロンチウムおよびバリウムのアルカリ土類金属は、カルシウムと共沈して炭酸塩の

沈殿を生成するので、これらも日周変動する。

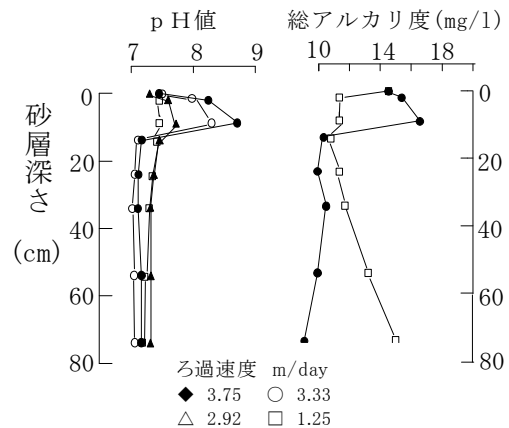
ろ過膜藻類の光合成に伴う炭酸カルシウムの沈殿

一名古屋市の事例（参考資料7より）
ろ過池水で植物プランクトンが繁殖しており、その光合成では pH 値の上昇が起こるが、ろ過膜藻類の光合成の場合は炭酸塩の沈殿反応を伴うので pH 値が下がっている。



一砂層内の pH 値および総アルカリ度の変化一

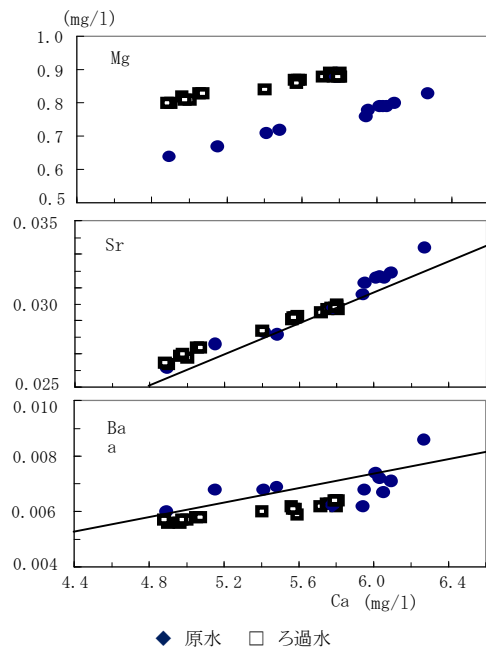
一名古屋市の事例（参考資料7より）
ろ過速度が速くなると、沈殿反応が起こるまでに水が砂層内を進んでいくので、光合成と沈殿反応が別の場所で起こることになる。この場合、ろ過膜直下に高 pH 値ゾーンが出現し、金属類の水酸化物生成による除去に寄与する。



一カルシウムとマグネシウム、ストロンチウム、バリウムの相関関係一

一名古屋市の事例（参考資料7より）

マグネシウム、ストロンチウム、バリウムは、カルシウムと相関関係があり、ろ過池で同じ挙動を示す。



(3) 硝化によるアンモニアおよび亜硝酸の除去

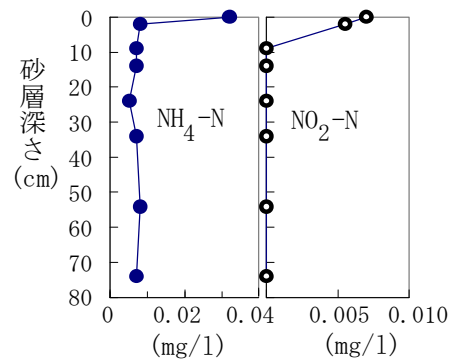
生物ろ過膜が好氣的に保たれていると、アンモニア態窒素および亜硝酸態窒素は、硝化菌の作用により硝酸態窒素に変わるので、ろ過水中の濃度は極めて低濃度となる。



アンモニア態窒素は、塩素と反応し浄水の残留塩素を低下させるので、その硝化による除去は浄水処理上重要である。また、硝化反応は酸素を必要とするので、アンモニア態窒素が高濃度になると、溶存酸素濃度が低下し、ろ過水中にアンモニアが含まれるようになる。硝化の酸素消費量から計算するとアンモニア態窒素で 2mg/L 程度、正常な処理のためには 0.5mg/L の原水濃度の限界値が示されており、緩速ろ過が汚濁の少ない原水を必要とする理由の一つである。また、ろ過膜有機物の分解によるアンモニア態窒素の供給もあり、嫌気的な状態を作らないような管理によってこの影響を抑える必要がある。

一砂層内でのアンモニア態窒素 (NH₄-N)
および亜硝酸態窒素 (NO₂-N) の変化—
—名古屋市の事例 (参考資料 7 より)—

原水の生物利用可能な有機物量 (BOD) が低く、
アンモニアの酸化は生物ろ過膜で起こり、少し
遅れて亜硝酸の酸化が起こる。



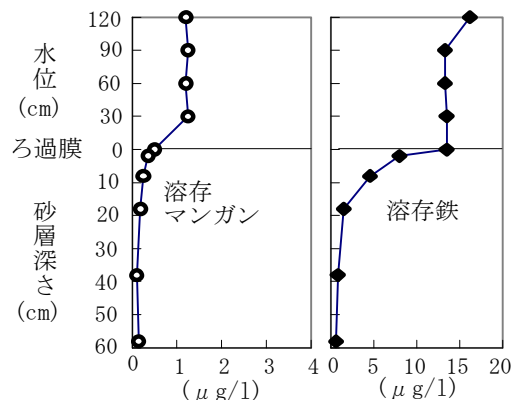
(4) 生物酸化によるマンガンと鉄の除去

緩速ろ過により、溶存状態のマンガンと鉄が生物酸化されて、水中から除かれる。その反応は、好気細菌の関与により、還元的イオン (Mn²⁺、4Fe²⁺) が酸化されて不溶性の酸化物、水酸化物を作ることであり、通常は鉄の酸化の方が速く起こる。



ところが、溶存酸素が十分ある酸化的水中では、Fe²⁺は酸化され易いため殆ど残存せず、溶存鉄は微細なコロイドや Fe(III)とフミン質などのキレート錯体が主体であると考
えられている。この場合、緩速ろ過池では、還元イオンの酸化ではなく、コロイドや錯体の
ろ過膜および砂層への付着や抑留によって溶存鉄が除去されるので、溶存マンガンの酸化除
去より遅くなる。

—砂層内での溶存マンガンおよび溶存鉄の変化—
 —名古屋市の事例（参考資料7より）—
 マンガンはろ過膜で生物酸化により除かれる。
 鉄は、微細なコロイドやキレート錯体を形成
 しており（分子量1万以上の分画が90%を
 占める）、生物酸化ではなく付着で除かれて
 いる。



溶存金属(0.45 μm 以下)と分子量 10000 以下の成分、両者に差がある成分は、溶存状態
 ではなく、微細なコロイドやキレート錯体を形成している。

金属	Al	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Li
0.45 μm 以下	0.007	0.011	6.7	0.001	0.010	1.4	0.004
分子量 1 万以下	0.005	0.011	6.6	0.001	0.001	1.5	0.004
金属	Mg	Mn	Na	P	Si	Sr	Zn
0.45 μm 以下	1.1	0.001	6.7	0.020	5.3	0.043	0.003
分子量 1 万以下	1.1	0.001	6.6	0.019	5.3	0.042	0.003

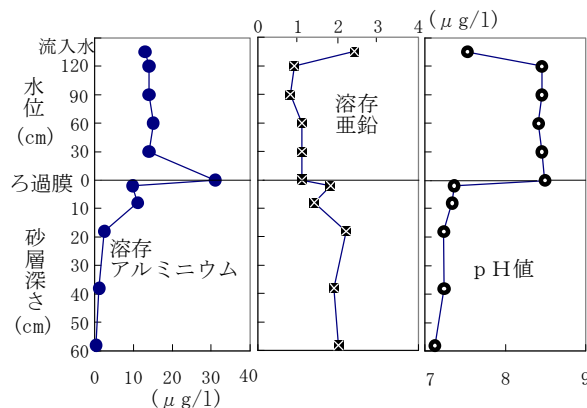
(5) 水酸化物形成によるアルミニウムおよび亜鉛の除去

アルミニウムと亜鉛は水酸化物を形成し、pH 値が7付近では、次のような反応が支配的
 と考えられる。



これらの反応では、両性金属であるアルミニウムと亜鉛の挙動は pH 値に大きく影響される。
 アルミニウムは、pH 値が上昇するとアルミニウムが溶出により増加し、pH 値が低下する
 と沈殿および付着により濃度が低下する。亜鉛は、アルミニウムとは逆に、pH 値が上昇
 すると酸化物の生成および付着により濃度が低下し、pH 値が低下すると水酸化物イオンが生
 成して水中の濃度が上昇する。

—砂層内での溶存アルミニウムおよび
 溶存亜鉛の変化—
 —名古屋市の事例（参考資料7より）—
 アルミニウムは、高 pH 値によるろ
 過膜から溶出があり、その後 pH 値の
 低下と共に減少する。亜鉛は逆の傾向
 を示し、pH 値の低下と共に砂層内の
 水中濃度が増加している。



(5) その他の無機物の挙動

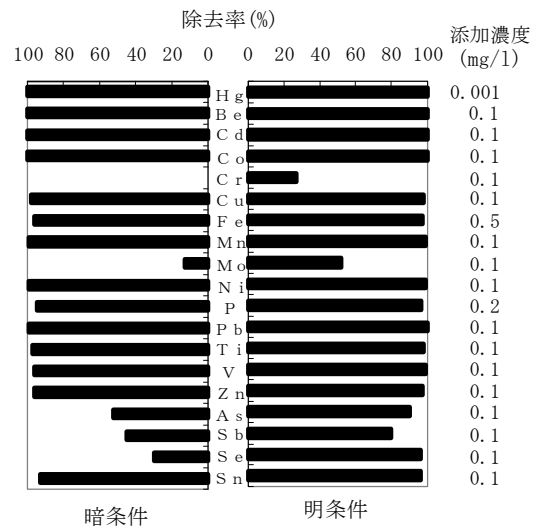
緩速ろ過池では、アルカリ金属類（ナトリウム、カリウム、リチウム）、陰イオン類（塩化物イオン、硫酸イオン、フッ化物イオン）は、ろ過材からの溶出がない限り、ほとんど変化しない。これらは、緩速ろ過池で起こる生物の関与する反応、炭酸塩の沈殿、生物酸化反応、不溶性水酸化物の生成に関係しない物質、あるいは水中での存在量に比べてこれらの反応の寄与が極めて小さい物質である。

重金属で懸濁態のものは粒子とともに除去できると考えられる。このため、水銀など自然水中で懸濁態の割合が高いものは、除去されやすい。また、溶存成分については、鉄、マンガン、銅の酸化物と共沈するもの、鉄のように有機物と錯体を作るもの、不溶性水酸化物を作るものもあり、これらによる除去効果が期待できる。また、負に帯電するオキソ酸イオンを作るもの（ヒ素、六価クロム、モリブデンなど）は除去されにくい。

一緩速ろ過による重金属類の除去一

一名古屋市の事例（参考資料7より）一

緩速ろ過カラム実験による重金属類の添加除去実験。明条件の方が、pH 値の上昇により除去率が高い。オキソ酸を作る Cr (VI)、Mo、As、Sb、Se の除去率が低い。



2.4.4 溶存有機成分の変化

溶存有機炭素は、生分解のみならず付着によっても減少する。
 生物分解により、微量有機化学物質も減少するが、関与する微生物の馴致が必要となる。また、微量有機化学物質のうち疎水性のものほど、懸濁態になり易く除去され易い。

(1) 溶存有機炭素の除去

溶存有機炭素（DOC: Dissolved Organic Carbon）の除去は、配水管内での細菌増殖を抑制し、消毒副生成物の生成量を減らすという意味で重要である。緩速ろ過には天然有機物（NOM: Natural Organic Matter）の除去効果があるが、その除去メカニズムは生物分解と付着によるものである。溶存有機炭素について、いくつかの指標が使われている。生分解性溶存有機炭素（BDOC: Biodegradable DOC）は、微生物による異化（dissimilation）で、無機化される有機物である。同化性有機炭素（AOC: Assailable Organic Carbon）は、微生物

に取り込まれる有機物であり、配水管内での細菌増殖に関係する。トリハロメタンなど消毒副生成物の前駆物質として知られているフミン質は、既に生物分解を受けた分解生成物であり、緩速ろ過では主に付着により減少する。

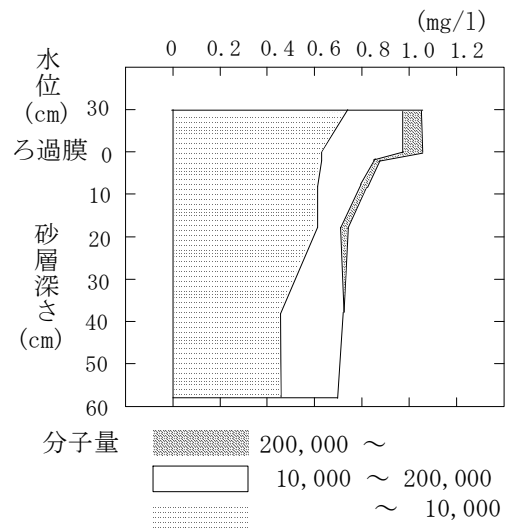
緩速ろ過による有機物の除去率 (参考資料 8 より)

対象	除去率
溶存有機炭素 (DOC)	<15-30 %
生分解性溶存有機炭素 (BDOC)	<80 %
同化性有機炭素 (AOC)	<65 %
トリハロメタン前駆物質 (THMFP)	<20-35 %

一砂層内での溶存有機炭素の変化一

一名古屋市の事例 (参考資料 7 より)一

溶存有機炭素のうち、分子量 1 万以下の有機物が多く、それらは砂層内で徐々に減少していく。20 万以上の高分子有機物のフラクションは少ないが、それらはろ過過程で除かれている。BOD は 1mg/L 程度と低いので、生分解性の有機物は少なく、ほとんどが付着によって減少していると考えられる。



一緩速ろ過によるトリハロメタン生成能の変化一

一名古屋市の事例 (参考資料 7 より)一

緩速ろ過において、懸濁態および溶存態の有機物の減少により、トリハロメタン生成能は減少 (平均 37%) している。

(2) 微量有機化学物質の除去

緩速ろ過では、生物分解と付着により、天然又は人工の微量有機化学物質も除去されることが知られている。生物分解は、対象化学物質の分解に寄与する微生物が生物ろ過膜に存在することで起こるため、微生物の馴致 (acclimation) が必要となる。このため、藻類の産生する物質など比較的長期間暴露されている物質の除去率は高くなるが、人工有機化学物質などの突発的な汚染の場合生物分解は起こり難い。微量有機化学物質の生物分解による濃度変化は、濃度の一次式に従うことが知られている。

$$C_t = C_0 \exp(-kmt) \tag{2.11}$$

- ここで、 C_t : 時間 t における微量有機化学物質の濃度
 C_0 : 初期の微量有機化学物質の濃度
 k : 反応速度定数 (微量有機化学物質、水温により異なる)
 m : 生物分解に寄与する微生物濃度
 t : 接触時間

条件により除去率は大きく異なるが、生物分解により除去又は濃度が減少する可能性のある微量有機化学物質の例として、藻類産生物質(かび臭物質:2-メチルイソボルネオール、ジェオスミン、藍藻毒:ミクロキスチンなど)、環境ホルモン(エチニルエストラジオール、 17β -エストラジオールなど)、化学物質(フェノール、ブロモフェノールなど)、医薬品(ジクロフェナク、ナプロキセン、イブプロフェンなど)、農薬(モリネート、2,4-D など)があり、近年問題となっている物質も含まれている。

一方、付着による微量有機化学物質の除去に関して、疎水性の有機物は、生物ろ過膜および砂層有機物に付着し懸濁態になり易いので、それによる除去効果がある。疎水性の尺度は、水-オクタノール分配係数によって示され、例えば、ダイオキシン類の2,3,7,8-TCDDはlogPowが6.8で、ほとんど懸濁態に含なり易いので、緩速ろ過による除去効果は高いと考えられる。一方、トリクロロエチレンは、logPowが3.4で、ほとんど溶存状態のままであるため、除去効果は低いと考えられる。(図 2.3)

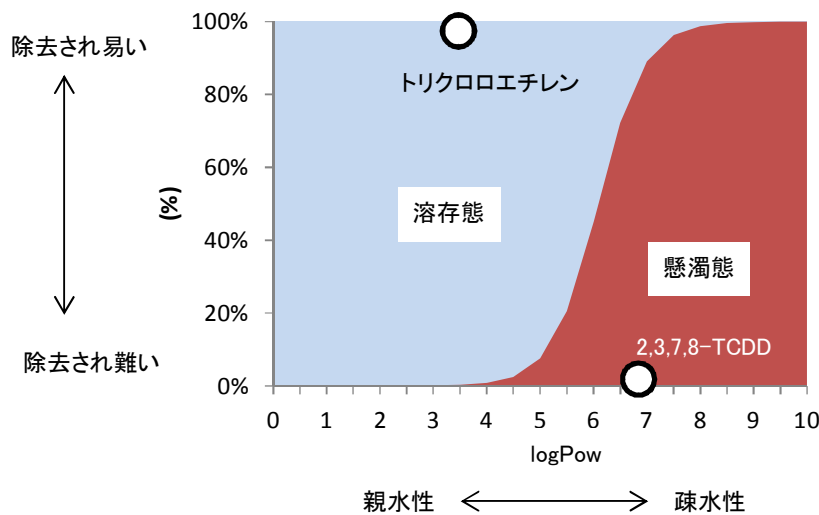


図 2.3 水中での有機物の logKow と懸濁態割合