

## (2) モデル材料を用いた針型珪藻の抑留特性と砂ろ過池の閉塞に対する検討

Characteristics of Deposit in Filter Using Model Materials for Slender Type Diatoms  
and Effective Parameters to Clogging of Rapid Sand Filter

今野 弘\* 佐藤敦久\*\* 真柄泰基\*\*\*

Hiroshi KONNO, Atsuhisa Sato, Yasumoto MAGARA

**ABSTRACT** ; Most of algae which affect the filter clogging are slender type diatoms like *Synedra*, *Fragilaria* and *Asterionella*. In this study, model materials for diatoms and sand are used. A deposited amount of diatoms on a grain of a filter, a deposit distribution in the filter and the penetration depth of diatoms in the filter are discussed based on filtration experiments.

The amount of 95 per cent of total deposit is captured within the layer as thick as 30 times of the diameter of a filter grain under the condition of size of a filter grain from 2 to 6 times of diatom length. The ratio of deposited amount on a grain to filter depth is a main factor to estimate the degree of lean of amount of unlateral deposit at the surface layer part of filter layer and it decreases with the diameter of a filter grain. The result in this study shows useful points to design the thickness of filter for protection of filter clogging.

**KEYWORDS** ; rapid sand filtration, filter clogging, diatom, anthracite, dual-media filter

### 1. 序 論

水質汚濁の進んだ水源原水は健康への影響だけでなく、水処理のプロセスやシステムに対しても困難性をもたらしている。一般に、富栄養化した水源で増殖する藻類は、粘土のような自然の懸濁物質よりは相対密度が低い<sup>1)</sup>。それ故藻類は、一般にコロイド粒子よりは大きなサイズを持っているものの、他の懸濁物質よりは、沈降速度が遅い<sup>2)</sup>。藻類の凝集やフロック形成に関しては、長い間研究が行われ、それらの現象の特殊性が明らかになってきている<sup>2)-10)</sup>。他方、浄水処理システムにおける急速砂ろ過池の閉塞の問題は、湖沼や貯水池のような閉鎖性水域の富栄養化のために以前から問題になっていた。これまで多くの研究者によってろ過池の閉塞に関する藻類の種類やろ過の運転条件についての研究が報告されてきた<sup>4), 11)-18)</sup>。ろ過閉塞を引き起こす藻類の多くは、シネドラ、フラギラリアそしてアステリオネラのような針型の珪藻である。報告や論文の多くは、閉塞の主な原因や急速ろ過法における対策について指摘している。藻類の抑留は、藻類の特性やろ過の因子、つまり第一に針型珪藻の濃度や長さ、ろ材径やろ速などに関係している。藻類の表面状態や代謝有機物の凝集現象に対する影響についての研究も進行しているものの、未だ不明な点が多い段階といえる。一方では、生物を実験材料にした場合、生物環境の設定や実験条件の維持に困難性を伴うこともよく知られている。そこで、本研究では、針型珪藻の長さや濃度およびろ材やろ過速度など物理的諸条件とろ過閉塞との関係を明らかにすることを目的にして、針型珪藻や砂の代わりに物理的条件が設定しやすいモ

\* 東北工業大学土木工学科 (Dept. of Civil Engineering, Tohoku Institute of Technology)

\*\* 八戸工業大学土木工学科 (Dept. of Civil Engineering, Hatinohe Institute of Technology)

\*\*\* 国立公衆衛生院水道工学部 (Dept. of Water Supply Engineering, The Institute of Public Health)

デル材料を用いて、抑留比、ろ材一個当りの抑留量、藻類の進入深さなどについて検討した。

## 2. 実験

### 2.1 実験装置

実験装置は、図-1に示した。ろ過筒は透明なアクリル製である。ろ過筒本体は組立式で、ろ層本体部の直径100mm、長さ20mm、40mm、100mmの各円筒を重ね合わせて、ろ層部を構成できるように製作されており、組合せによってろ層厚が調整出来るようになっている。それぞれの円筒に刻まれたネジとO-リングによって、水密的にろ過筒を組み立てることができる。したがってろ過筒は解体も可能で、ろ過後にはろ材と抑留された物質を測定することができるように設計されている。

### 2.2 実験条件および方法

ろ過閉塞の原因藻類としての針型珪藻の密度の実測例では<sup>1)</sup>、シボウ 1.1g/cm<sup>3</sup>、フナリア 1.2~1.5g/cm<sup>3</sup>、アステリア 1.13g/cm<sup>3</sup>などと報告されている。針型珪藻のモデル材料の選択では、密度ができるだけ実藻類に近く、円筒形で加工しやすいものを対象とした。その結果釣り用の糸を採用した。釣り糸は号数によって太さが調整されており、特にアユ釣り用のものは直径が細く、軽くできている。表面性状や生物学的特徴を合致させることは無視せざるを得なかった。実測の結果、糸の密度は、1.50g/cm<sup>3</sup>であり、直径は、0.064mmである。針型珪藻の実際の大きさは、直径が3~10μm程度で、長さは100~250μm程度であるので、加工のしやすさも考慮して、糸の長さは2mmとした。それ故、実験の尺度はほぼ10倍となる。実験の相似則については、流体内にろ材のような物体があり、かつろ過のような低速流においては粘性力が支配的であると考えて、レイノルズ則を用いた。ろ材の材料は砂の代わりに球形のガラスビーズを用いることにし、ろ材径はふるい分けによって調製した。材料やろ過運転の条件の詳細を表1に示した。モデル藻類の個数濃度は、500個/ℓとした。ろ過速度20m/d、ろ過時間10hを標準ケースとした。ろ過速度40m/dの場合には、総ろ過流量を標準ケースの場合と同じになるようにろ過時間を5時間とした。なお、原水は水道水にモデル藻類を懸濁させたもので、それ以外の懸濁質や凝集剤は添加していない。ろ過実験終了後ろ過筒を分解して、抑留藻類とろ材の重量を測定して抑留状態を考察した。

## 3. 結果および考察

### 3.1 ろ層への抑留量分布と抑留率

本実験装置ではろ層内部への抑留によって発生する損失水頭およびその変化が測定できるようになっているが、ろ材径が実際より10倍も大きいことなどのため発生する損失水頭が小さく、またその変化量もごくわ

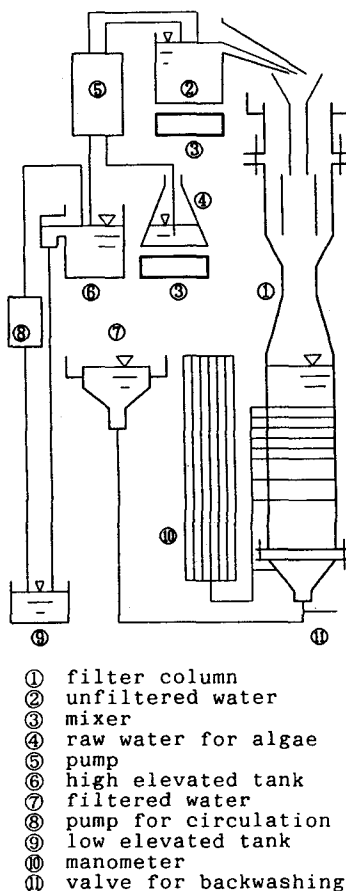
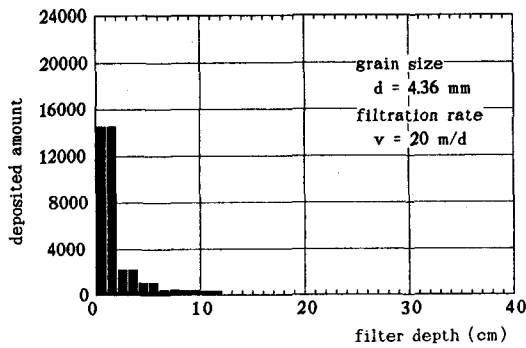


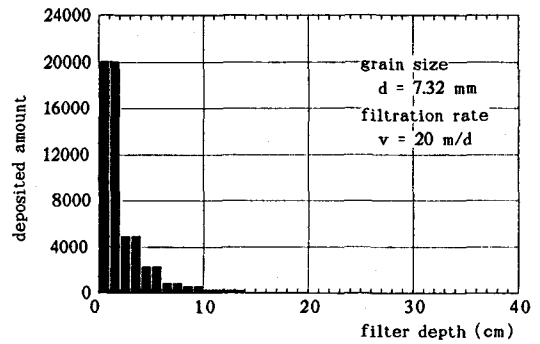
Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Experimental condition

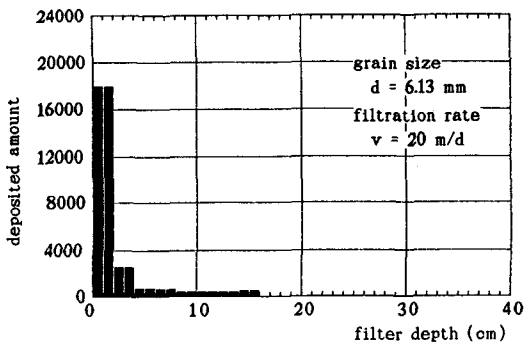
|                     |                       |       |       |      |
|---------------------|-----------------------|-------|-------|------|
| filter              | diameter (mm)         | 4.38  | 8.13  | 7.32 |
|                     | thickness (cm)        | 10.32 | 12.16 | 14   |
| algae               | length (mm)           | 2.00  |       |      |
|                     | diameter (mm)         | 0.064 |       |      |
|                     | number (n/l)          | 500   |       |      |
| operation condition | filtration rate (m/d) | 20    | 40    |      |
|                     | filter run (h)        | 5     | 10    |      |



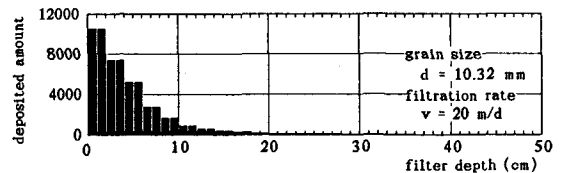
(a)  $d=4.36\text{ mm}$ ,  $V=20\text{ m/d}$



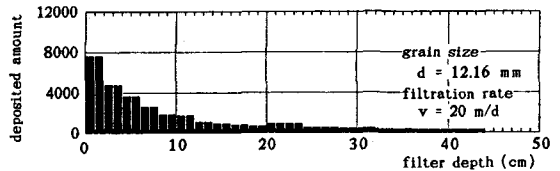
(c)  $d=7.32\text{ mm}$ ,  $V=20\text{ m/d}$



(b)  $d=6.13\text{ mm}$ ,  $V=20\text{ m/d}$



(d)  $d=10.32\text{ mm}$ ,  $V=20\text{ m/d}$



(e)  $d=12.16\text{ mm}$ ,  $V=20\text{ m/d}$

Fig.2 Deposited amount on each filter layer

ずかのためマノメータによっては測定できなかった。図-2は、各ろ過条件における2~4cmの厚さのろ層の抑留量分布を示したものである。抑留量は、ろ過筒を分解して、各ろ層深さごとに抑留されたモデル藻類を回収して乾燥し、その重量から数に換算した。換算の際には、モデル藻類の密度を用いて計算した。これら全体の図からモデル藻類は表層からろ層内部にかけて順序よくろ層に抑留されていることがわかる。図-2 (a)~(e)までの図により、同一のろ過速度におけるろ材径による抑留量分布の違いを比較することができる。比較的小さなろ材径の場合ほど、表層2cmへの抑留の偏りが顕著に見られる。

ろ材径が大きくなるにしたがって、表層への偏りが少なくなり、ろ層の深くまでモデル藻類が進入することがわかる。実験では、総ろ過流量を一定とするろ過が行なわれ、また未ろ水のモデル藻類濃度も一定に保つように配慮されている。しかし、実際には流入濃度が一定でないため、実験ケースによってろ層内に抑留された総量が一定ではなかった。そのため、図-2で各ろ層深さに抑留された絶対値を比較しても、抑留部位の違いについては、検討できない。そこで図-3にろ材径が異なる場合の各ろ層での抑留率の分布の違いを示した。抑留率は、ろ層内に抑留された総量に対する各ろ層深さでの抑留量の割合を示したものである。この図から前述の表層への偏りの程度が、より明確に比較できる。つまりろ材径がより小さな場合においては、抑留率は、表層2cmでの70~80%近くにもなり、深さ4cmの部位のろ層では、10~15%程度と極端に低下する。その後10cm程度のろ層までで、抑留がほぼ終了することになる。つまりモデル藻類は、ろ材のより深い所には

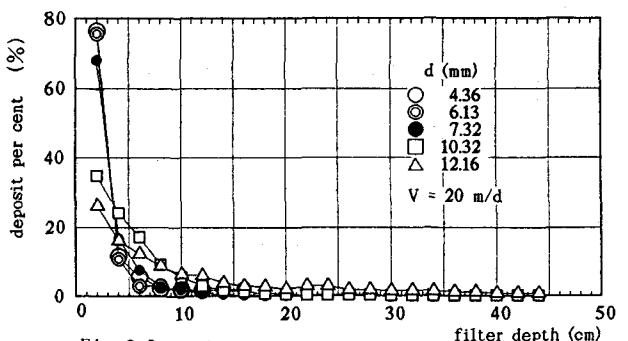
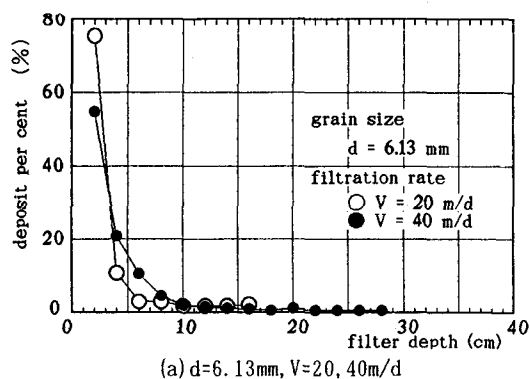
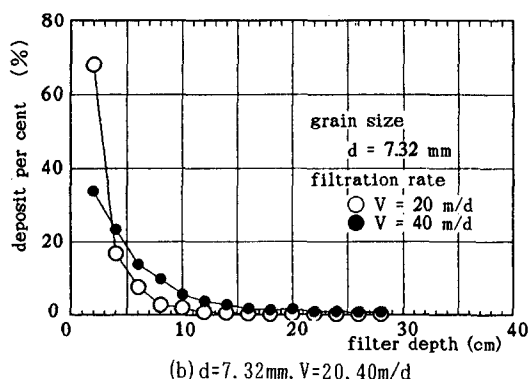


Fig.3 Deposit per cent in filter layer

( $d=4.36\sim12.16\text{ mm}$ ,  $V=20\text{ m/d}$ )

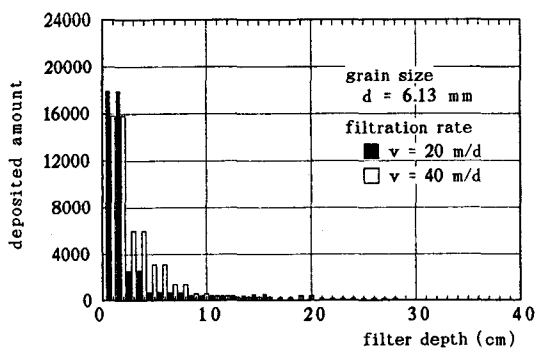


(a)  $d = 6.13 \text{ mm}$ ,  $V = 20, 40 \text{ m/d}$

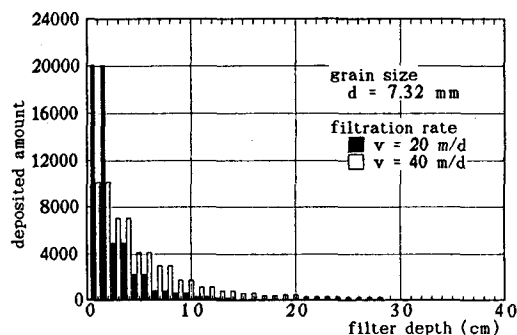


(b)  $d = 7.32 \text{ mm}$ ,  $V = 20, 40 \text{ m/d}$

Fig. 4 Deposited amount on each filter layer



(a)  $d = 6.13 \text{ mm}$ ,  $V = 20, 40 \text{ m/d}$



(b)  $d = 7.32 \text{ mm}$ ,  $V = 20, 40 \text{ m/d}$

Fig. 5 Deposit per cent in filter layer

進入しない。より大きなろ材径の場合には、表層2cmでの抑留率は、25~35%程度と低く、モデル藻類はろ層深くまで進入することになる。図-3をみると、ろ材径が4.36~7.32mmと、10.32~12.16mmでは表層2cmでの抑留率が、前者が70~80%なのに対して、後者は25~35%と大きく減少している。これは今回の実験条件においては、ろ材径7.32mmと10.32mmに約3mmの違いがあり、他のろ材径条件と比べても極端に離れているための結果であり、一般にはこの表層での抑留の偏りの程度は、ろ材径が大きくなるにしたがって、小さくなっていくと考えられる。小さくなったその分だけ、モデル藻類はろ層深くまで進入することになることが理解できる。

このことを、モデル藻類のサイズとろ材径との関係でいえば、モデル藻類のサイズの約3.6倍程度のろ材までは、10cm程度までのろ材深さではほぼ100%抑留が終了するのに対して、約5.2倍以上（ろ材径10.32mm）になると、表層10cmからさらに内部へ進入して抑留されるモデル藻類が増加することといえる。モデル藻類のサイズの4~5倍のろ材径を境に、ごく表層での抑留の偏りの程度が若干異なることが予想される。ろ過速度の違いによる表層への抑留の偏りを比較してみるために、図-4を作成した。

図-4 (a), (b)は、ろ過速度の違いによる抑留量分布をそれぞれのろ材径において比較して示したものである。これらの図からろ過速度を速くすることは、ろ材径を大きくすると同じように表層への抑留の偏りを少なくするように働き、また、その効果は、ろ材径が大きいくほど顕著に表れることを示している。この結果を前述と同様に抑留比率で比較したものが、図-5 (a), (b)である。図-5 (a)からろ過速度を速めることによる表層への抑留の偏りは緩和されるが、それより、ろ材径がわずかに大きい図-5 (b)の場合には、その傾向がより顕著に表れていることがわかる。

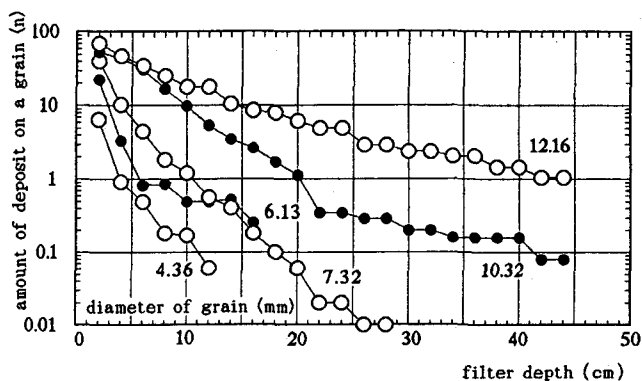
### 3.2 ろ材一個当りの抑留量分布およびその低減勾配

本実験では、抑留されたモデル藻類とあわせて、ろ層の重量も測定している。あらかじめろ材の平均密度を測定しているため、ろ材径からろ層を構成するろ材数が求められる。ろ層の抑留能力を検討するためにろ

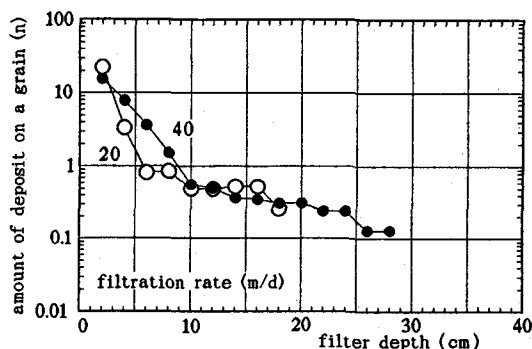
材一個当りの抑留量分布を作成した。図-6 (a), (b), (c)に、それぞれのろ過条件におけるその値を片対数紙上に示している。図-6 (a)においては、一個の抑留量分布の違いはろ材径で比較し、図-6 (b), (c)では、分布の違いの比較の因子は、ろ過速度である。ろ材径が大きいろ材ほど、絶対的なろ材一個当りの表面積が大きく、それだけモデル藻類の抑留量も多くなるわけである。実際の現象を考慮すると、ろ材表面や架橋作用による抑留であると考えられるが、ろ層の水平断面平均としてのろ材一個当りの限界抑留能力の評価は、興味深い。しかし、ろ過途中で今回の測定値では、限界値としてのろ層の抑留能力の評価できない。したがって、この図では抑留能力よりは、ろ層深さに対するろ材一個当りの抑留量の減少割合（これを本論では、低減勾配と称する；ろ材一個当りの抑留量／ろ層深さ）の意味を検討したい。

この低減勾配は、ろ過の限界に達した段階での測定値ではなく、ある一定のろ過時間における値である。ろ過係数がろ層への抑留量の増加に伴って変化するので、厳密な意味ではこの勾配もろ過過程において変化することになる。しかし、ろ過の閉塞において第一に問題になるのは、表層からろ層深さ方向への抑留量分布であり、抑留が表層に偏るほど、閉塞現象が発生しやすくなる。抑留の表層への偏りが、初期に発生すれば、閉塞が初期のうちに起こってしまう。本来ろ過の閉塞現象の検討のためには、ろ過時間の経過に伴う抑留量分布を測定する必要がある。しかし、ろ過の初期の任意の一時期であっても、ろ層内の抑留量分布の表層への偏り程度が評価されれば、そのようなろ過条件は、閉塞が発生しやすいということを予測することが出来るので、この偏り程度を評価することは有用となる。図-6における右下がりの勾配いわゆる低減勾配は、この偏りの程度を評価できる指標を意味している。各ラインは、片対数紙上で直線にはならず、若干下に凸の曲線を描いている。つまり勾配のほとんどは、ろ層が深くなるにしたがって小さくなる。したがってここでは、表層からできるだけ深い層までの直線近似できる低減勾配を各実験条件ごとに求めることにした。

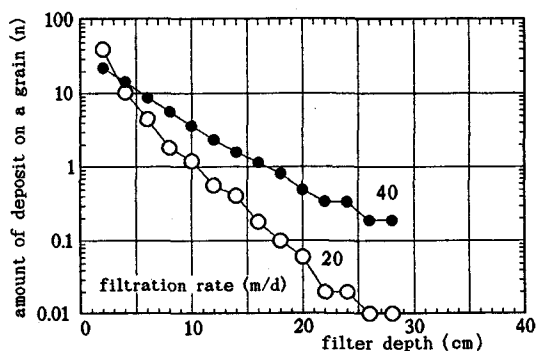
図-7にその低減勾配をろ材径に対してまとめ、一部ろ過速度をパラメータにして整理した。縦軸の値である低減勾配は、大きければ表層での抑留とそれ以下での抑留量の差が大きいことを、また逆に小さいとその差が小さいことをそれぞれ意味している。ろ過閉塞の防止という観点からは、あまり大きいのは好ましくなく、適度に小さい方が良好なろ層と評価することができる。図-7をみるとろ材径に対する低減勾配の変化は、ろ材径の増加によりほぼ直線的に低下していることがわかる。また、ろ過速度を倍増した場合、約1.5倍



(a)  $d=4.36 \sim 12.16 \text{ mm}$ ,  $V=20 \text{ m/d}$



(b)  $d=6.13 \text{ mm}$ ,  $V=20, 40 \text{ m/d}$



(c)  $d=7.32 \text{ mm}$ ,  $V=20, 40 \text{ m/d}$

Fig.6 Deposited amount on a grain of filter

のろ材径を採用したと同じ位の低減勾配の低下をもたらすといえる。この低減勾配は、藻類のろ層表面への抑留の偏りの程度を評価するものであると考えられるが、ろ過速度によっても大きく変化するように、今後さらに検討を重ねていきたい。

### 3.3 ろ層に対する抑留体積の比

抑留物質の体積は、抑留による体積の増加が、ろ層の空隙率の減少を引き起こすため損失水頭と密接な関係がある。図-8 (a), (b)は、各ろ過条件でのろ層の空隙体積に対する抑留体積の比を示したものである。両図の縦軸は、対数値である。抑留量対数値とろ層深さの関係の直線は、ろ過においてひとつの重要な特性を示している。

つまり急速ろ過のろ過方程式からいうと、ろ層深さに対する抑留の分布は、図-8においてほとんど直線であると推定できる。針型の珪藻であっても抑留の型の特性は、粘土のような一般の懸濁粒子とほぼ同様であると考えることができ。今回の実験においては、実験尺度を10倍として実際より大きなろ材径を用いているために、ろ層内の空隙が大きく、抑留量の増加が目に見えて損失水頭の増加をもたらすまでには至らなかった。しかしながら、ろ材径の小さなろ材ほど、表層付近で大きな抑留体積比を表わしており、これがやがてろ過閉塞をもたらすほどに増加することを示唆している。ろ過速度の増加も表層付近の抑留体積比の低下に大きな役割を果たすことも図-8 (b)から明らかである。

### 3.4 ろ層内への進入深さ

ろ材の表面の砂の上により大きな粒径のろ材を敷き均すことは、ろ層閉塞防止の方法として用いられている。一例としてアンスラサイトの敷き均しがある<sup>17)</sup>。その重要な点は、上層の粒径の大きさと層の厚さの設定である。図-9は、ろ材径に対する抑留しているモデル藻類の進入深さの関係である。図において実線は、全抑留量に対する等

抑留率を示している。図から、一般により大きな粒径の場合、抑留の進入深さは、ろ材径が小さい場合に比較して深くなる。当然ながら抑留率が90から99%に増加すると進入深さは深くなる。ただろ材径が2~8mm (モデル藻類の2~4倍) 程度までは、ろ材径による進入深さにそれほど大きな差は見られない。ろ材径が10mm (モデル藻類の5倍) を越えると、進入深さは大きく増加するようである。図-10は、ろ材の模式図である。図において、ろ材の厚さは $h$ で、ろ材径は $d$ とする。もし、ろ層がろ材径 $d$ の厚さを持っている薄い層 (これを本論はろ

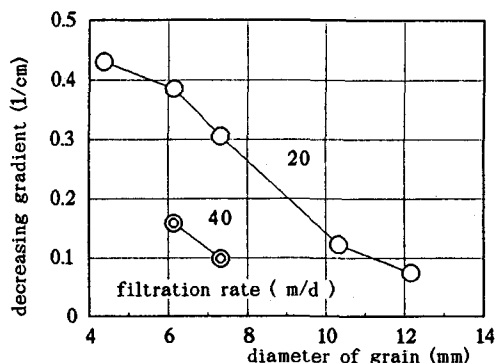
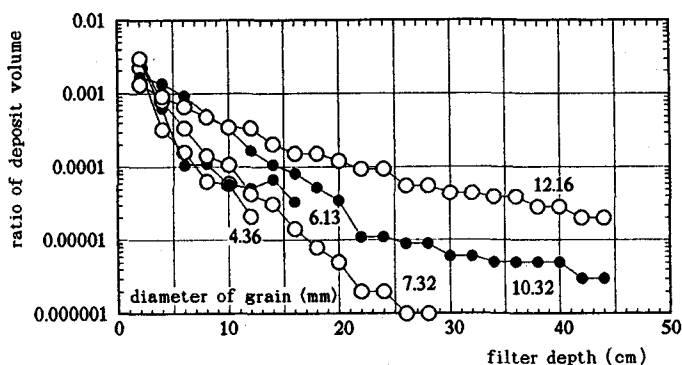
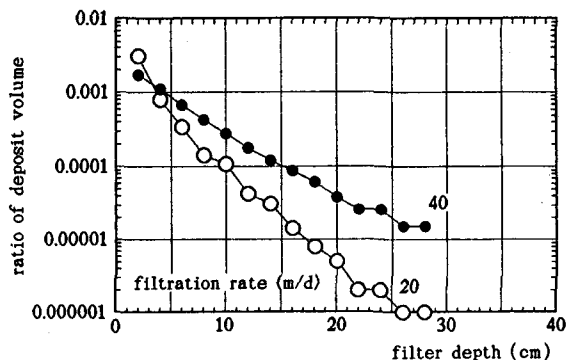


Fig.7 Decreasing gradient of deposited amount profile to diameter of grain



(a)  $d=4.36 \sim 12.16 \text{ mm}$ ,  $V=20 \text{ m/d}$



(b)  $d=7.32 \text{ mm}$ ,  $V=20, 40 \text{ m/d}$

Fig.8 Ratio of deposit volume to filter

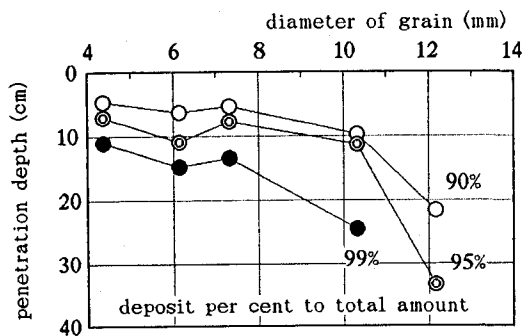


Fig.9 Penetration depth of deposit in filter  
( $V=20\text{m/d}$ )

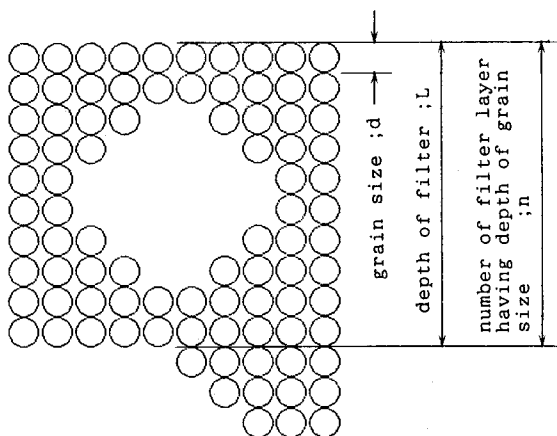


Fig.10 Schematic diagram of filter

材径厚ろ層と称する)で構成されると考えると、厚さ  $L$  のろ層は、厚さ  $d$  の薄い層を  $n$  層持っていることになる。概略、この薄い層の数(ろ材径厚ろ層数)  $n$  は  $n = L/d$  で計算される。この考え方は藤田によって初めて提示され、その意義を明らかにするとともに実際のろ過池はほとんど  $n=1000$  (ろ材径は調和平均径)で運転されていると報告している<sup>19)</sup>。

図-11は、このろ材径厚ろ層数  $n$  を使って、ろ層へのモデル藻類の進入深さを示したものである。実線は、図-9と同じく全抑留量に対する等抑留率を示している。図-11からこのろ材径の条件では、少なくとも抑留量の95%は、ろ材径厚ろ層数  $n$  が30層以内で除去されることがわかる。このろ材径の範囲はモデル藻類の長さの2~6倍のサイズということになる。

これらのことは、ろ層閉塞の防止のための砂層の上のろ層の厚さの設計に有用な資料となる。図-11は、ろ過速度  $20\text{m/d}$  のもとでの結果である。進入深さに対するろ過速度の影響については、等抑留比率に対するろ材径厚ろ層数  $n$  の増加をもたらすことが予想されるが、この点についてはさらに検討を重ねたい。

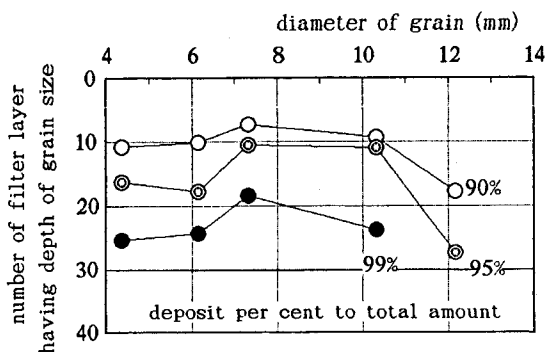


Fig.11 Penetration depth ( $n$ ) of deposit in filter ( $V=20\text{m/d}$ )

#### 4. 結論

急速砂ろ過の閉塞問題の解析のため珪藻や砂のかわりにモデルの材料を使って実施した研究の結果をまとめると、つぎのようになる。

- (1) 比較的小さなろ材径の場合ほど、表層2cmへの抑留の偏りが顕著に見られる。この表層での抑留の偏りの程度は、ろ材径が大きくなるにしたがって小さくなる。小さくなったその分だけ、モデル藻類はろ層深くまで進入することになる。
- (2) モデル藻類サイズの4~5倍のろ材径を境に、ごく表層での抑留の偏りの程度が異なると考えられる。
- (3) ろ過速度を速めることによって表層への抑留の偏りは緩和されるが、ろ材径が大きくなると、その傾向がより顕著に表れてくる。
- (4) ろ材一個当りの抑留量のろ層深さに対する比、いわゆる低減勾配は、モデル藻類のろ層表面への抑留の偏りの程度を評価できる指標であり、これはろ材径の増加によりほぼ直線的に低下する。また、ろ過速度を倍増すると約1.5倍のろ材径を採用したと同じ位の低減勾配の低下をもたらす。

- (5) モデル藻類のような針状の物質であっても抑留のパターンの特性は、粘土のような一般の懸濁物質とほぼ同様で、ろ層内の抑留体積はろ層深さ方向に指数関数的に減少する。
- (6) ろ過閉塞の防止上、発生する損失水頭から考えて、ろ材径が大きいくほど有利である。また、ろ過速度が速いとその分損失水頭は増加するが、表層での抑留体積比減少には効果的である。
- (7) モデル藻類の2～4倍程度のろ材径までは、ろ材径による進入深さにそれほど大きな差は見られないが、ろ材径がモデル藻類の5倍を越えると、進入深さは大きく増加するようである。
- (8) モデル藻類の長さの2～6倍のろ材径の範囲においては、抑留量の95%は、ろ材径厚ろ層数が30層以内で除去される。この点は、ろ材の閉塞防止のためのろ層の厚さの設計のために大切な知見である。

**謝辞** 本研究は、日本水道協会の研究委員会「浄水処理における藻類の除去に関する研究」の一部として実施されているものである。委員の方々のご協力に感謝し、また本研究のための実験に協力してくれた東北工業大学学生（遠藤 仁、佐藤和博、川村浩司、高橋 誠の諸君；当時）に感謝致します。

#### 参考文献

- 1) Reynolds C.S.; The Ecology of Freshwater Phytoplankton, Cambridge Univ. Press (1975)
- 2) Konno H.; Settling and coagulation of slender type diatoms, Water Science and Technology, 27 (11), 231-240 (1993)
- 3) Bernhardt H. & J. Clasen ; Studies on the removal of planktonic algae by flocculation and filtration, The Proc. 8th ASPAC-IWSA Regional Water Supply Conference, 2, ss44, 1-17 (1992)
- 4) Konno H. & A. Sato; On study for sand filter clogging by diatoms, The Proc. 5th ASPAC - IWSA Regional Water Supply Conference, ss6, 1-8, (1985)
- 5) Bernhardt H. ; Investigation of algae born organic substances and their effect on water treatment, Proc. of the Japanese-German Workshop on Waste Water and Sludge Treatment, 583-637 (1982)
- 6) 真柄泰基、国包章一、相沢貴子：藻類の生産する有機物の凝集障害に関する基礎的研究，水道協会雑誌，55 (4)，33-39 (1986)
- 7) Hassan E.A. et al ; Effect of clay on algae removal from Nile water, Indian J. of Tech., 23, 25-27 (1985)
- 8) Ayoub G.M. et al ; Seawater induced algae flocculation, Wat. Res., 20 (10), 1265-1271 (1986)
- 9) Ayoub G.M. et al ; Algal separation by the Lime-seawater process, J. WPCF, 58 (9), 924-931 (1986)
- 10) Sridhar P. et al ; Algae flocculation in reservoir water, Biotech. & Bioeng., 32, 345-347 (1956)
- 11) Naghavi B. et al ; Algae removal by fine sand/silt filtration, Wat. Res., 20 (3), 377-383 (1986)
- 12) Folkman Y. et al ; Filtration of Chlorella through dune-sand, ASCE, 96 (SA3), 675-690 (1970)
- 13) Borchardt J.A. et al ; Sand filtration of algal suspension, J. AWWA, 53 (12), 1493-1502 (1961)
- 14) Davis E. et al ; Sand filtration of particulate matter, ASCE, 92 (SA), 47-59 (1966)
- 15) 斎藤昭二：藻類による浄水障害ーかび臭、ろ過障害、着濁，水道協会雑誌，62 (6)，2-16 (1993)
- 16) 今野 弘：藻類の表面状態と凝集の関わり，環境工学研究フォーラム講演集，29，138-140 (1992)
- 17) 国富 進，相沢 靖：藻類プランクトンによる濾過閉塞障害についてーアスラサイト敷き均しによる濾過閉塞防止効果，20 (11)，72-77 (1984)
- 18) Al-Ani M.Y.; Clogging-front behaviour in dual-medium filters, Aqua, 39 (3), 188-196 (1990)
- 19) 藤田賢二：急速ろ過池の設計に関する研究，東京大学学位論文，28-48 (1976)