

高速砂ろ過の基礎的特性

海老江邦雄

(昭和46年3月31日受理)

Fundamental characteristics of high-rate filtration through uniform sand filters

by Kunio EBIE

This is an experimental study of high-rate filtration with uniform sand, using the micro-floc feeding system shown in Fig. 1. The purpose of this study was to examine the effects of influent water turbidity, filtration rate, and the size of uniform sand on the length of the filter run and the quality of filtrate. The filter run was terminated when a 10 ft. net loss of head in the filter was reached.

The results obtained show that, among other factors, the filtering velocity is contributive to the length of the filter run and also that the size of uniform sand is more contributive to the filtrate quality than others.

In addition, a sand filter should be designed on the basis of the higher filtering velocity. Some more observations are presented.

1. 緒 言

都市上水道などの水処理プロセス中、原水に含まれるフロックの除去(固液分離)に関する単位操作は沈殿とろ過である。従来、伝統的に前者は90%以上のフロックを沈殿させることを目標に、また、後者は残りのフロックに対して補完的に、あるいは水の仕上げ用として運転されてきた。

一方、最近に至り、種々のろ過装置が開発されたなかにマイクロフロック法あるいは薬注ろ過法などと言われる、フロックの大部分をろ過池に負担させる、いわばろ過池中心の水処理方式が現われた。これによると、凝集剤注入量は、今まで沈殿池で沈殿しうるほどの大きなフロックの形成を目指していたのに対して、これらでは、砂層でろ過しうる程度の微細なフロックの形成を基準とされるため、フロック体積が大幅に減少し、原水の平均濁度がある程度高くても(20~30度)それに応じて沈殿池を省略または縮少して十分対応させることができる。

今日までこうした方式の長所・短所についてはいくつか^{1),2)}論ぜられているが、砂ろ過は非常に多くの物理的・化学的原因に影響される複雑な現象であるため、理論的にはもちろんのこと実験的にもいまだ十分に解明されたとは言えない。

今回の実験においては、沈殿池を省き、急速混和後の原水を直接ろ過する上記のタイプの

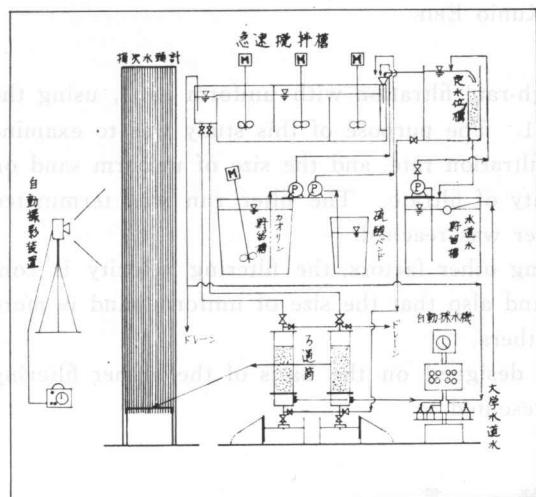
モデルプラントを用い、ろ過に影響する多くの要因から原水濁度（2水準）、ろ過速度（5水準）、ろ過砂（3水準）をとりあげ、これらの要因がろ過継続時間やろ過水濁度にどの程度影響するかを把握することのほかに、砂ろ過の基礎的な諸特性をより一層理解することを目的とした。

2. 実験

2-1 実験装置の概略

実験に使用した装置は本学河海工学実験室内に設置された小型水処理装置で、その概略を第1図に示す。水の流れに従って以下簡単に説明を加える。本学水道水は、いったん水道水貯留槽に入り、ここから定水位槽までポンプにて揚水され、必要量(3.5 ℥/分)のみ計量の後、急速混和槽に導かれる。この際、余分な水量は堰をオーバーフローして水道水貯留槽に戻される。あらかじめ所定の高濃度に調整しておいた人工加濁用のカオリンと、凝集剤としての液体硫酸アルミニウムは、急速混和槽流入部において、薬注ポンプによって加えられる。その後原水は槽内を上下迂流すると同時に3本のフラッシュミキサーによって急速混和を受け凝集反応が進行する。

急速混和槽内の滞留時間は全ての実験において6.0分である。その後、微細なフロックを形成した原水は急速混和槽末端に設けられたφ1インチのビニールホース内を流下して2本のろ過筒にそれぞれ流入する。このろ過筒は三面がステンレス、前面のみが透明アクリル板で作られており断面は70×70mmの正方形で長さは1mである。実験ではこの筒の内部に砂が充填され、原水はこの砂層中を流下する過程でフロックがしだいに抑留されて清浄となり、圧力水室に出て来る。その後、浮子式流速調整器を経由して捨水される。また、ろ過筒の側部には砂層下端より上方に5cm間隔で1筒あたり14個のピーコックが付けられており、これらと損失水頭測定用マノメーターとはビニールホースによって連結されている。自動採水器は急速混和槽下端よりの原水と砂層によりろ過されて圧力水室に出てきたろ過水の一部を一定時間ごとに採水するためのものである。



第1図 実験装置の概略

Fig. 1. Schematic Diagram of Experimental Apparatus

ロックを形成した原水は急速混和槽末端に設けられたφ1インチのビニールホース内を流下して2本のろ過筒にそれぞれ流入する。このろ過筒は三面がステンレス、前面のみが透明アクリル板で作られており断面は70×70mmの正方形で長さは1mである。実験ではこの筒の内部に砂が充填され、原水はこの砂層中を流下する過程でフロックがしだいに抑留されて清浄となり、圧力水室に出て来る。その後、浮子式流速調整器を経由して捨水される。また、ろ過筒の側部には砂層下端より上方に5cm間隔で1筒あたり14個のピーコックが付けられており、これらと損失水頭測定用マノメーターとはビニールホースによって連結されている。自動採水器は急速混和槽下端よりの原水と砂層によりろ過されて圧力水室に出てきたろ過水の一部を一定時間ごとに採水するためのものである。

2-2 実験条件

2-2-1 原水濁度と凝集剤注入量

過去の多くの砂ろ過実験は主として5度付近の低濁度を採用していたが、今回はより高濁時

第1表 ジャーテストによる最適注入条件
Table 1. Optimum Alum Dasage by Jar Test

実験	急速混和		緩速混和		カオリン添加量	液体硫酸アルミニウム(固形換算)	上澄水濁度	濁度除去率%	pH
	rpm	分	rpm	分					
I	150	5	40	15	10	30 (15)	0.9	91	6.8
II	150	5	40	15	20	40 (20)	1.2	94	6.7

におけるろ過の諸特性を観察するという目的で二種類の濁度の原水、すなわちカオリン添加量が 10 p.p.m. と 20 p.p.m. のものを調整した。しかしながら実際には、本学水道水の一時的な濁りやポンプの注入誤差などのために、前者（実験 I）では平均 11.8 度、後者（実験 II）では 22.8 度となった。なお、これらの各実験に対する凝集剤の最適注入量の決定にあたっては、あらかじめ I 社製の Jar Tester により一連の凝集実験を行なっておいた。その結果、第 1 表の値を使用することにした。ここで上澄水濁度とは、所定の急速混和および緩速混和を行ない、その後 30 分間静置させた試料の上澄水を傾斜法により採水して測定した濁度である。本実験のようなら過方式に対して、Jar Test により凝集剤注入量を決定すると、凝集剤が過剰となり、形成されるフロックは密度が低く水流のせん断に対して弱いと言われているが、この凝集剤量の影響については別に論ずることとして、今回は一つの基準として上記の方法による数値を採用することにした。

また、本学水道水に添加されたカオリン粒子が、急速混和槽内での凝集の過程やビニールホース内および砂層の空隙中でのフロック形成の過程において、どの程度にまで成長しているのかを把握しておくためフロックの顕微鏡写真を撮った。その結果を写真-1~8 に示す。このうち写真-1~4 は実験 I に対応するもので、カオリン 10 p.p.m., 凝集剤 30 p.p.m. であり、写真-5~8 は実験 II に対応するもので、カオリン 20 p.p.m., 凝集剤 40 p.p.m. である。なお、これらは Jar Tester にかけた 1 ℥ ピーカーから採取された試料の倍率 10×10 における写真であるが、実際の装置内においても類似の状態であろうと推測される。写真-3 と 7 は、急速混和槽末端のビニールホースからろ過筒内の砂層表面までの滞留時間が 3 分間であるため、それに相当する時間のフロック形成を受けたフロックの様子を判断するためのものである。当初 3~10 μ (写真-1 と 2) の大きさであったカオリン粒子が、凝集剤の添加をうけた後 5 分間の急速混和によって 20~40 μ (写真-2) あるいは 30~60 μ (写真-6) のフロックに成長している。また、砂層表面に達するフロックの寸法は大体 80~100 μ (写真-3) あるいは 100~200 μ (写真-7) であった。それに続いて砂層内を流下する過程および砂層に抑留されたあとには、さらにフロック形成が進行して 150~200 μ (写真-4) あるいは 250~350 μ (写真-8) にも達し、微細なフロック同志が内部に水をかかえて、密度の小さな径の大きな団粒に成長している様子がはっきりと見られる。

なお、第 2 表に本学水道水の水質試験の結果を示す。

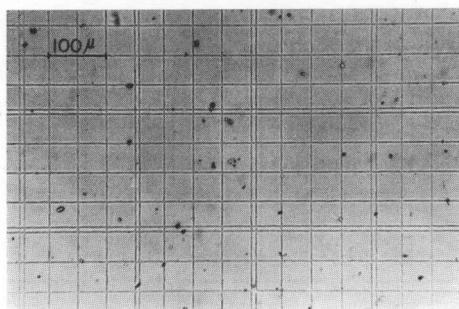


写真1 カオリン粒子（実験I；10 p.p.m.）

Photo 1. Kaolinite Particles (Experiment I; 10 p.p.m.)

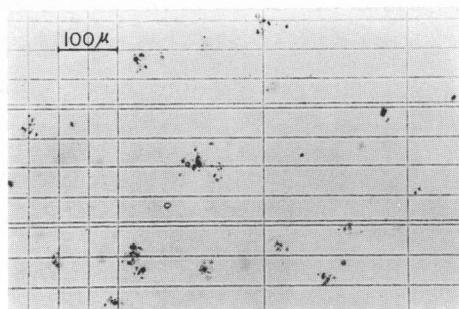
写真2 急速混和（5分間）後の微フロック
（実験I；液ばん 30 p.p.m.）

Photo 2. Micro-floc particles after Rapid Mixing (5 Min.) (Experiment I; Alum 30 p.p.m.)

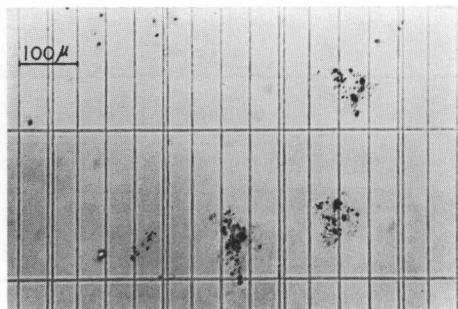


写真3 緩速混和（3分間）後のフロック（実験I）

Photo 3. Floc Particles after Slow Mixing (3 Min.) (Experiment I)

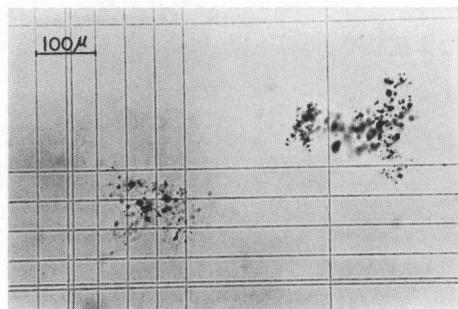


写真4 緩速混和（20分間）後のフロック（実験I）

Photo 4. Floc Particles after Slow Mixing (20 Min.) (Experiment I)

第2表 水道水の水質

Table 2. Characteristics of Tap Water Quality

水温 (°C)	9.5	Mn ²⁺ (mg/ℓ)	0.08
pH	6.9	Fe ²⁺ (")	0.10
濁度 (ppm)	<1	Fe ³⁺ (")	0.06
COD as O ₂ (mg/ℓ)	0.91	Cl ⁻ (")	4.18
Ca ²⁺ (")	8.43	SO ₄ ²⁻ (")	16.6
Mg ²⁺ (")	2.26	SiO ₂ (比色) (")	32.8
硬度 as CaCO ₃ (")	30.5	電気伝導度 (μS/cm)	94.1

2-2-2 ろ過砂の代表径とその分布

水道施設基準によると³⁾、急速ろ過用の砂は有効径 0.45~0.75 mm, 均等係数 1.70 以下となっている。また、都市の実情を調べてみると、有効径 0.5~0.6 mm, 均等係数 1.4~1.6 程度の砂を使用しているところが多いようである。しかし、Ling⁴⁾が粒径のそろった均等砂の方がより効率的なろ過を行ないうると報告して以来、それと意見を同じくするいくつかの論文^{5),6)}

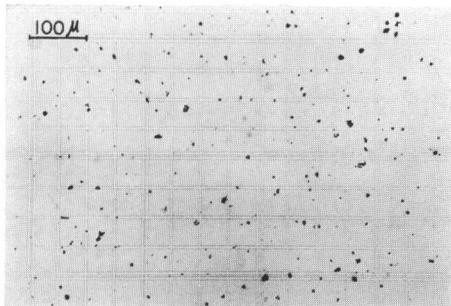


写真5 カオリン粒子（実験II；20 p.p.m.）

Photo 5. Kaolinite Particles (Experiment II; 20 p.p.m.)

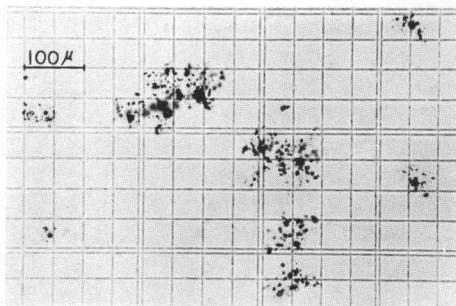


写真7 緩速混和（3分間）後のフロック（実験II）

Photo 7. Floc-Particles after Slow Mixing (3 Min.) (Experiment II)

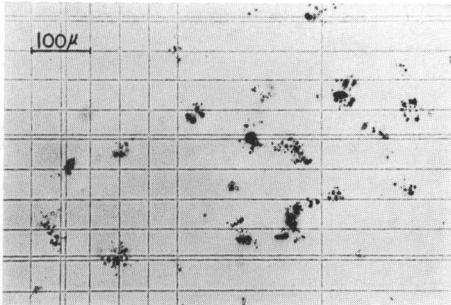


写真6 急速混和（5分間）後の後フロック（実験II；液ばん40 p.p.m.）

Photo 6. Micro-floc Particles after Rapid Mixing (5 Min.) (Experiment II; Alum 40 p.p.m.)

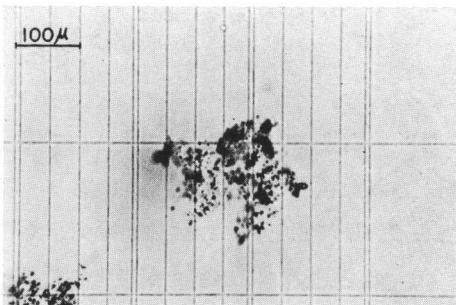


写真8 緩速混和（20分後）後のフロック（実験II）

Photo 8. Floc Particles after Slow Mixing (20 Min.) (Experiment II)

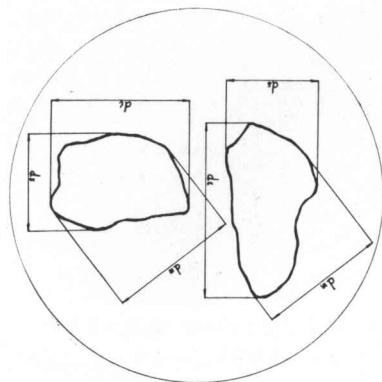
がみられる。今回はこれらの結果をもとに、さらに砂の成層化による実験データーのバラツキを少なくしようということもあって、いわゆる均等砂を使用することにした。また、実際に使用した均等砂の諸性質をあらかじめ以下のように詳細に検討しておいた。

原砂は有効径 0.62 mm, 均等係数 1.4 の I 社製のろ過用珪砂である。この原砂から、JIS 標準ふるいを用いて次の三種類の砂をふるい分けた。

- (1) 大砂 (ふるい 1.00 mm を通過しふるい 0.84 mm にとどまったもの)
- (2) 中砂 (ふるい 0.84 mm " ふるい 0.71 mm ")
- (3) 小砂 (ふるい 0.71 mm " ふるい 0.59 mm ")

ふるい分けの方法は、適量の砂をふるい内に仕込み厳密に手ぶるいしたものと、水洗・乾燥させ、再度入念に手ぶるいを行なった。これを今回の実験に使用したわけである。

さらに、このふるい分けされた三種類の砂の中から無作為に小量のサンプリングを行ない、それにつき 500 個の砂の第 2 図に示すような三種類の代表径を顕微鏡の視野内で測定した。測定にあたっては、接眼レンズの筒内にまえもって検定しておいたマイクロメーター



第2図 顕微鏡で測定した代表径 (d_s , d_m , d_l)

Fig. 2. Representative Sand Sizes (d_s , d_m , d_l)

らかになった。

(1) 今日まで、普通、平均径として使用されてきた相隣るふるい目の幾何平均径は、実際に測定された粒径と比較して過大であり、 d_m に対して 1.34~1.43 倍、 d_s に対しても 1.12~1.15 倍である。平均径としては大体、幾何平均径の $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 倍を考えると良いようだ。

(2) d_s と通過ふるい目とが非常に近似していることや、標準偏差が三種類の代表径の中で一番小さいことから、ふるい分けの律則径として短径が考えられる。

(3) 幾何平均径と三種類の砂の各代表径との比が大・中・小砂でほとんど差がないことから、粒子の形状は統計的に相似とみて差し支えないことがわかった。

(4) 粒径を横軸に、その粒径までの累加個数百分率を縦軸にとって対数確率紙上にプロットすると第3図で明らかなようにほぼ直線となり、個数についての粒径分布は対数正規分布をなすことがわかった。これらのグラフから個数についての有効径と均等係数を求めて第4表に示す。均等係数には著しい差はなく、強いて言えば平均径・長径・短径の順であった。また、短径の有効径が幾何平均径とほぼ等しくなることがわかった。

さらに引き続き、使用した4種類のふるい目の実際の寸法を砂の場合と同様の方法により顕微鏡下で測定した。第4図に示すふるいのⒶおよびⒷの任意の部分からそれぞれ縦10ヶ、

第3表 顕微鏡により測定された砂の平均寸法
Table 3. Average of Sand Sizes by Microscope

(単位: mm)	幾何平均 d_A	短 径 d_s	平均 径 d_m	長 径 d_l	d_s/d_A	d_m/d_A	d_l/d_A
小砂	0.65	0.75	0.93	1.07	1.15	1.43	1.63
中砂	0.77	0.88	1.08	1.21	1.14	1.40	1.57
大砂	0.92	1.03	1.23	1.38	1.12	1.34	1.50

(31 目盛 = 1 mm) を挿入しておいた。

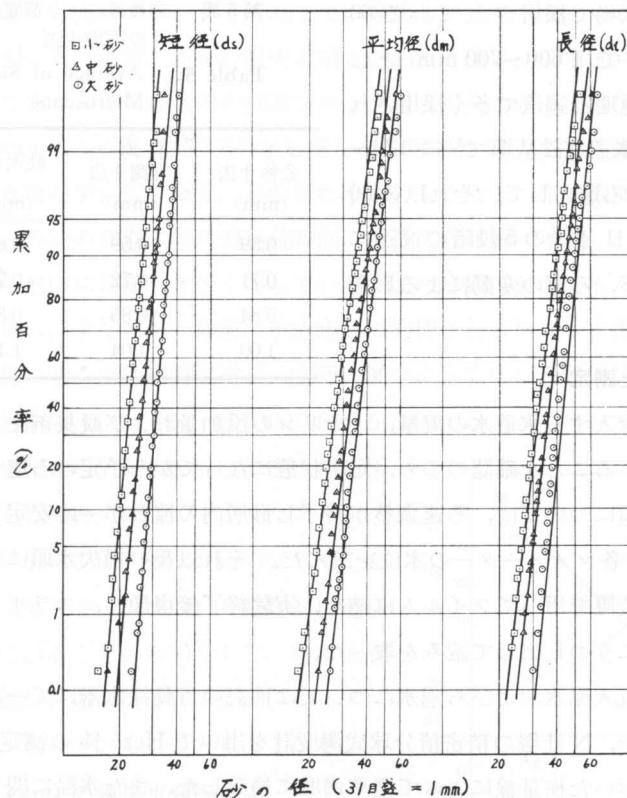
ここで

(1) 平均径 (d_m)……砂の位置に関係なく粒子はどちらの方向にもならぶ確率は同一であるから、すべての粒子につきある一定方向の二平行線ではさまれた粒径として求めた。

(2) 短径 (d_s)……任意の二平行線ではさまれた観察される粒径のうちの最小径。

(3) 長径 (d_l)……任意の二平行線ではさまれた観察される粒径のうちの最大径である。

大・中・小の三種類についてそれぞれ 500 個宛測定された平均値を第3表に示す。これから次に記す事が明



第3図 対数確率紙による砂の径の分布

Fig. 3. Logarithmic Normal Distribution of Sand Sizes

第4表 砂の有効径と均等係数

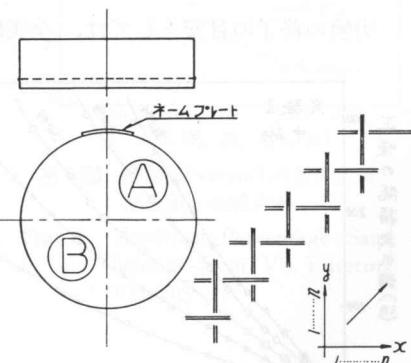
Table 4. Effective Size and Uniformity Coefficient

	短 径		平均 径		長 径	
	有効径 (mm)	均等 係数	有効径 (mm)	均等 係数	有効径 (mm)	均等 係数
小 砂	0.65	1.18	0.74	1.27	0.90	1.23
中 砂	0.75	1.18	0.91	1.24	1.03	1.23
大 砂	0.92	1.15	1.03	1.23	1.19	1.22

横10ヶの寸法を測定し、合計40ヶの算術平均値を求めこれらを第5表に示した。この結果、節目の寸法は個々には多少の変動があるものの平均値としては、ほぼふるいの公称寸法⁷⁾と一致していることが確認された。

2-2-3 その他の条件

予備実験からろ過筒内の砂層の位置の安定を考慮して空隙率を44.4%にとることに決め



第4図 顕微鏡で測定したふるいの位置

Fig. 4. positions of Ⓐ and Ⓑ

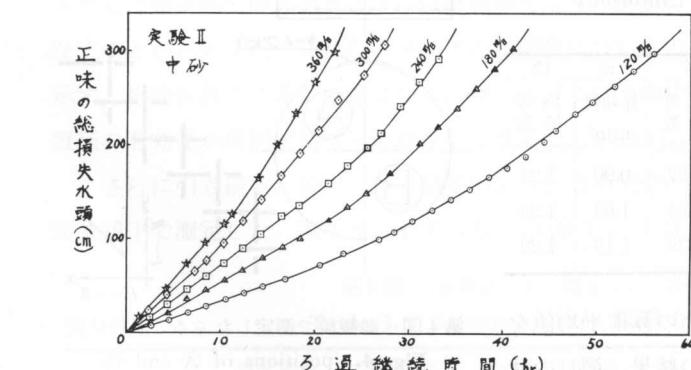
砂層厚さは通常浄水場で採用されている 60 cm (水道施設基準⁸⁾ では 600~700 mm) とした。ろ速としては急速ろ過法で多く採用されている 120 m/日 (水道施設基準⁹⁾ は 120~150 m/日) を最低のろ速として、それ以後 60 m/日 間隔に 360 m/日 までの 5 段階の高速における実験を行ない、ろ速の変動による影響を見ることにした。

2-3 実験の方法と測定

急速混和槽に流入する水道水の流量、カオリンの添加量および凝集剤注入量が規定通りポンプアップされていることを確認ののち、定常状態になってから予定のろ速でろ過を開始させた。初期の損失水頭については、ろ速調整が終了し砂層内の流れが一応安定したと思われる状態 (15~20 分後) で各マノメーターの水位を読んだ。それ以後の損失水頭については、一定時間ごとに自動撮影装置を用いてフィルムに納め、実験終了後現像し、スライドプロジェクターにてスクリーン上にうつし出して読みを取った。

他方、ろ過筒流入原水およびろ過水については前記の自動採水器にて一定時間ごとに採水し、これらの濁度を、N 社製の精密積分球式濁度計を用いて Heze % の測定を行なったのち、あらかじめ作っておいた検量線によって標準濁度に換算した。また水温に関しては、ろ過筒内に温度計を付けて隨時検温したが、室温の変動につれてわずかづつ変動し、12~16°C の範囲であったので解析には無視しうるとして考慮しなかった。

実験の終了の目安としては、全実験を通して正味の総損失水頭が 3 m に達した時期とした。



第5図 総損失水頭の伸展状況

Fig. 5. Total head loss VS. Filtering Time

砂層の洗浄は、各回ごとに内部の砂をサイフォン作用にて抜き出し、洗浄したのち、所定の空隙率に厳密に調整して次の実験に備えた。

3. 結果と考察

3-1 正味の損失水頭

今回の砂ろ過に関する実験のうち、実験 II の中砂を用いた各ろ速における正味の総損失

水頭の発展状況を第 5 図に示す。このように、ろ過の経過にともない損失水頭が増加するのは砂層内に徐々にフロックが抑留されて空隙が減少し、それにともない水流の抵抗がしだいに大

第5表 顕微鏡により測定されたふるい目の平均寸法

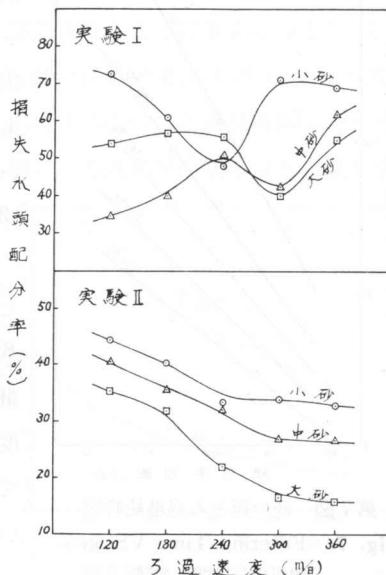
Table 5. Average of Sieve Sizes by Microscope

ふるいの 公称寸法 (mm)	平均の 実測寸法 (mm)	最大寸法 (mm)	最小寸法 (mm)
0.59	0.59	0.63	0.53
0.71	0.72	0.76	0.68
0.84	0.85	0.89	0.81
1.00	1.04	1.13	0.97

きくなるからである。したがって、ある時期までに発生した損失水頭からろ過初期の清浄砂層の損失水頭を差し引いた、通常、正味の損失水頭といわれる値は、抑留フロック量の一つの指標として使える値である。この砂層内の抑留フロック量と損失水頭との関係を表示する式はいくつかあるが、Campによる¹⁰⁾簡略式^{注1)}がしばしば使用される。さて、損失水頭進展の全般的傾向としては、ろ速の早いものほど、砂の径の小さいものほど、原水濁度の高いものほど速やかである。また、ろ過の初期にはろ過継続時間に対して直線的に増加し、フロック抑留量の増加するにつれてしだいに勾配がきつくなっている。この時期においてもろ過水濁度はほとんど変化しないことから、すなわち、砂層に単位時間に抑留されるフロック体積は不变として良いから、当初、層流であった砂層内流速が、空隙の減少とともに遷移領域から乱流領域へと変化しつつあることを示している。第5図における360 m/日の場合についてRe数^{注2)}を計算してみると、ろ過開始時7.5であったものが、正味の損失が3m発生した時点では14.7に、またフロック抑留量の最も多い砂層の上部0~5cmについてみると同時に27.3にも達しており、Re数12程度から遷移領域に入るとされていることから判断して、特に上層部においては、ろ過の終期になると、乱流によるフロックのせん断破壊が起っているものと見てよからう。

3-2 表層部(0~5 cm)の損失水頭配分率

砂層内の損失水頭の分布に関して、砂層上層部の比率が極めて大きいことや、抑留フロック量の場合と同様に、上層から下層へ指数関数的に減少する様子については過去の多くの実験的研究で明らかにされている。第6図は正味の総損失水頭が3mに達した時期における砂層上部(0~5 cm)の正味の損失水頭が全体に占める割合を百分率(配分率)で表わしたものである。実験Iについてはろ速と砂の径による傾向は判然としないが、実験IIについてはろ速の上昇および砂の径の



第6図 砂層(0~5 cm)の損失水頭配分率とろ過速度

Fig. 6. Head-loss Percentage (Sand layer 0~5 cm) VS. Filtering Velocity

1) KozenyあるいはFair & Hatchによる清浄砂層の損失水頭表示式を基としており、いくつかの仮定のもとに誘導された。 $i/i_0 = P_0/(P_0 - \sigma)$ ここで、 i_0 =清浄砂層の損失水頭勾配、 i =任意のろ過経過後の砂層の損失水頭勾配、 P_0 =清浄砂層の空隙率、 σ =砂層の単位体積中の抑留フロックの体積、これら4ヶとも無次元である。

2) ここではCampによる次の式を用いた。

$$Re = Vd / \{\nu\sqrt{P_0 - \sigma(1 - P_0 + \sigma)}\}$$

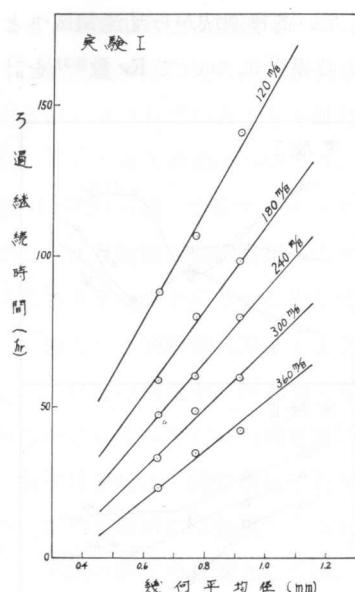
ここで V =ろ過速度(cm/sec)、 d =砂の径(cm)、 ν =水の動粘性係数(cm²/sec)、 P_0 と σ については1)参照。

大きくなるにともない、配分率が低下している。また、実験 I と II の原水濁度の高低にともなう配分率の間には、明白な差があり、低濁であるほど上層部でのフロックの抑留率が高くなっているようである(実験 I の平均 53.9%, 実験 II の平均 31.3%)。ところで実験 II におけるように、ろ速の上昇とともに、粒径の大きくなるにともない配分率が低下するのは従来より指摘されている現象である。また、低濁の方が上層部における配分率が高いのは、低濁の原水のフロック体積が小さく、同一のろ速についても空隙の閉塞が緩慢であるため、砂層の空隙中のフロックの充填の状態が密になるのに対して、フロック体積が大きい場合には充填の過程が急速に進行するので、先に抑留されているフロックと後からのフロック間に水分をより多く含んだルーズな状態で抑留が進行していくものと推測される。

したがって、第 6 図から明らかなように、後者の方が全般的に水流のせん断に対して弱く、そのため砂層内部にフロックがより多く浸入していくのだろう。この点については実験 I の水量が実験 II の 2 倍未満となっていることからも理解できる現象である。なお上層部の配分率が低下しているものほど下層における抑留率が高まっていた。

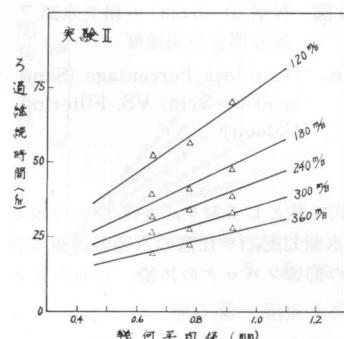
3-3 ろ過継続時間への影響

正味の総損失水頭が 3 m に達するまでのろ過継続時間と砂の径との関係をろ速をパラメーターとして第 7 図と第 8 図に示す。実験 I と II のそれぞれの実験においてろ過継続時間に大きな差異があるのは、当然のことながら濁度・砂の径・ろ速などの要因の変動に起因している。そこで、三元配置法^{11),12)}によってこれらの分散の分析を行ない、ろ過継続時間に及ぼす各要因の寄与率を求めてみると



第 7 図 砂の径とろ過継続時間

Fig. 7. Filtering Time VS. geometric mean size



第 8 図 砂の径とろ過継続時間

Fig. 8. Filtering Time VS. geometric mean size

第 6 表 ろ過継続時間の変動の解析

Table 6. Analysis of Variance for Filtering Time

要 因	自由度 ϕ	範 囲	純 効 果	寄与率 (%)
砂 の 径 D	2	篩 0.59~1.0 mm	238,292	10.1
原 水 濁 度 T	1	11.8 と 22.8 度	643,196	27.4
ろ 速 V	4	120~360 m/day	1,176,154	50.1
交互作用 D×T	2	—	71,862	3.1
D×V	8	—	19,670	0.8
V×T	4	—	154,489	6.6
そ の 他	8	—	44,969	1.9
合 計	29	—	2,348,632	100.0

第7表 ろ過継続時間の変動の解析

Table 7. Analysis of Variance for Filtering Time

要 因	自由度 ϕ	範 囲	実 験 I		実 験 II	
			純 効 果	寄与率 (%)	純 効 果	寄与率 (%)
砂 の 径	2	篩 0.59~1.00 mm	275,959	19.2	23.717	8.9
ろ 速	4	120~360 m/日	1,081,507	75.3	233,740	87.3
そ の 他	8	—	78,737	5.5	10,224	3.8
合 計	14	—	1,436,203	100.0	267,681	100.0

第6表³⁾のようになつた。これから明らかなように、継続時間に対してはろ速の影響が一番大きくて50.1%を占め、次いで、濁度、砂の径、濁度とろ速の交互作用の順番であった。さらに、実験IとIIのそれぞれについて、二元配置法³⁾によって個々の寄与率を求めてみると第7表のようになつた。どちらの場合にもろ速の影響が非常に大きいことに変わりはないが、相対的に見れば実験Iの濁度の低い場合の方が変動に対する砂の径の効果が大きく現われている。なお、一般的傾向としては、総損失水頭が速やかに出現するものほど継続時間は短くなるわけであるから、砂の径が大きくなるほど継続時間は増し、ろ速が早くなるほど、また原水濁度が増すほど粒径の影響は小さく、つまり勾配がゆるくなっている。これらの結果から、通常の浄水場の水処理におけるような濁度の低い原水を標準(120~150 m/日)のろ速でろ過する場合には、砂の径の選択いかんによって、直接、損失水頭の伸び率、すなわち処理水量が大きく左右されることが示唆される。

また、砂の径が幾何平均径0.65~0.92 mm程度では、ろ過継続時間(t)と砂の径(D)との関係は第7,8図で明らかなように、 $t=aD+b$ の直線式で表示して大差ないようである。第9図は、グラフの勾配 a とろ速の関係を示すものであって、縦軸の a の値は砂の径0.1 mm增加(減少)させた場合におけるろ過継続時間の延長(短縮)時間数を示し、砂の径の操作の目安として有益に使用できる。

3-4 一定損失水頭時のろ過水量

第10図の曲線は正味の総損失水頭が3 mに達するまでの時間におけるろ床1 m²あたりに換算したろ過水量(m³/m²)とろ速との関係を砂の径をパラメーターとして表わしたものであるが、この図からろ水濁度が2度以下のものについてみると、ろ速が240 m/日近辺もしくは300 m/日程度の位置に水量の最大値が存在する。こうした結果となる理由については先にも説明

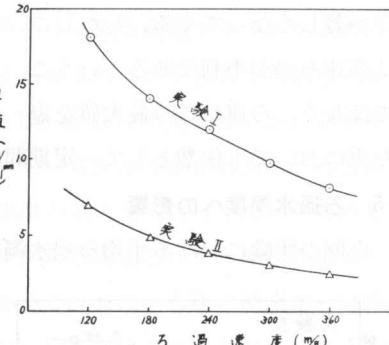
第9図 ろ過速度と a 値

Fig. 9. a-value VS. Filtering Velocity

3) {(生データ)×100-500}について補助表を作つて計算を行なつた。

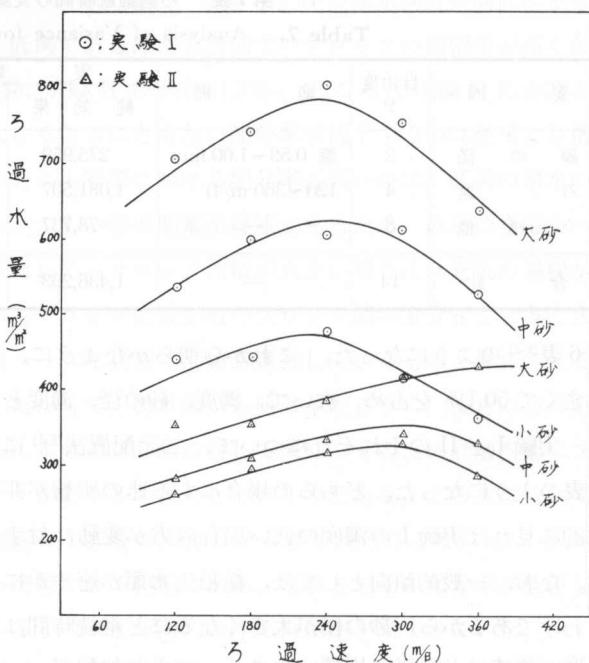
したところであるが、個々の実験者によりこの最大値の存在するろ過の位置が、例えば下津によれば¹³⁾ 300 m/日、三宅ら¹⁴⁾によれば 200~250 m/日と一致していない。これは砂層におけるフロックの抑留現象が、フロックの水流によるせん断破壊に対する強度なるものに本質的に関係するためで、このフロック強度がおののの実験で異なるためだろうと推測される。したがって、損失水頭を一定に限って考えた場合には、ある限度までは高速であるほど多量のろ過水量を得られるが、それを過ぎると今度は水量の割には損失水頭の伸びが著しくなってくる。しかしこれは高速ろ過が不利であるということではなく、ろ速がこの最大値を過ぎた点においても依然として一定期間内の処理水量においては高速の方が多いのである。

3-5 ろ過水濁度への影響

今回の実験における平均ろ過水濁度の変動状況を第 11 図に示す。ここでは図示しないが

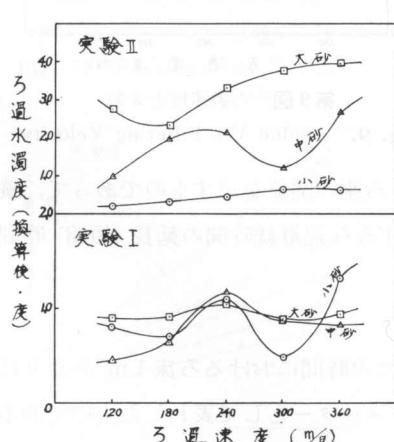
個々の実験のろ過経過にともなうろ過水濁度の変化の状況は、すでに述べられているような三つの部分 ((1) 初期のブレークスルー期、(2) 安定清浄期、(3) 終期のブレークスルー期) のうちほとんどが (1) と (2) の過程までであった。終期のブレークスルーがわずかに見られたのは実験 II の大砂でろ速 240~360 m/日であった。

また、実験 II の大砂を用いた 5 個の実験はろ過水平均濁度がすべて飲料水判定基準¹⁵⁾の 2 度をオーバーしていた。これから、濁度と砂の径が今回採用した程度の場合には、液体硫酸アルミニウムだけによる凝集では不十分のようであり、助剤あるいはより強力な凝集剤が必要のようである。また、砂層上部の損



第 10 図 ろ過速度と損失水頭 3 mまでのろ過水量

Fig. 10. Volume VS. Filtering Velocity
(Head loss: 3.0 m)



第 11 図 ろ過速度によるろ過水濁度の変動

Fig. 11. Effluent Turbidity VS.
Filtering Velocity

失水頭配分率と同様に、実験 I のろ過水濁度の変動傾向は判然となかったが、実験 II の場合にはろ速の上昇にともない、砂の径の大きくなるにともないろ過水濁度が高くなっている。実験 II の場合につき二元配置法による変動解析を行なったが、その結果を第 8 表に示す。砂の径の影響が著しく、ろ速の効果は意外に小さかった。

3-5 ろ速の高速化の可能性

ろ速の高速化について、従来より種々議論されているが、一応今回の実験範囲内でその可能性の限度について考えてみよう。まずろ過水濁度の観点からは、実験 II の大砂以外はほぼ基準を満たしているようである。また今回は正味の損失水頭 3 m 時までろ過を行なったが、多くの浄水場における限界の損失水頭は 2 m 前後であるから、それを基準に考えるならば、ろ過水濁度は若干清浄となってくるため、この点においても上記の実験範囲では安全のようである。今回は凝集剤の注入量が Jar Test の結果によっており、そのうえ液体硫酸アルミニウムのみであって、形成されたフロックはせん断に対して弱いと考えられるにもかかわらずろ過水がこの程度であることを考え合わせると、実際の浄水場の 120~150 m/日での運転はいかに安全率が高いか、また換言すれば、いかに非能率的な運転を行なっているかがうかがわれる。ろ速の高速化は、フロックの砂層内部への浸入を促進させ、洗浄水量の増大をもたらすなどの欠点もあるが、需要水量の増大にともなう必然的方向でもあり、また実際問題として、今回の結果から判断して、少なくとも現在の倍程度の高速ろ過は可能であろう。また、ろ速の高速化と同時により経済的・効率的なろ過池の運転操作が要求されるであろうが、これにあたっては Mintz ら¹⁶⁾の示すように、限界の損失水頭と限界のろ過水濁度がちょうど同一時期に発生するよう運転するべく、各要因をコントロールするなど、既存施設の効率的利用にあたり工夫すべき点も少なくない。

4. 結 言

今回は沈殿池を省いて、急速混和後の原水を直接ろ過するタイプの装置を使い、また、最適凝集剤注入量を Jar Test により決定し、ろ過に影響する多数の要因から原水濁度、砂の径、ろ速を選び、合計 30 個の実験を行ない、いくつかのろ過の特性を明らかにした。そのなかで今まで伝統的に採用されてきたろ速 120 m/日、総損失水頭 2 m という運転条件は非能率的であり、より高速で、より大きな損失水頭（継続時間）までの運転が可能であると考えられる。その限界などをより確実化するためには、ろ過に大きな影響を及ぼすと思われる要因のうち、

第 8 表 ろ過水濁度の変動の解析
Table 8. Analysis of Variance for Filter Effluent Turbidity

要 因	自由度 ϕ	範 围	純効果	寄与率 (%)
砂 の 径	2	篩 0.59~1.00 mm	454	80.7
ろ 速	4	120~360 m/日	26	4.6
そ の 他	8	—	83	14.7
合 計	14	—	563	100.0

あと少なくとも、凝集剤の種類や量、空隙率について、さらに検討する必要があると思われる。

終りに、データー整理や図面の作成にあたり御苦労願った教務職員、安藤 裕君に謝意を表する。

(第21回 全国水道研究発表会にて一部発表、昭和45年6月18日、島根県松江市)

文 献

- 1) 小林三樹： 水道協会雑誌、No. 390, p. 33-43 (1967-3).
- 2) 林 芳郎： 第21回 全国水道研究発表会講演集, p. 180-181 (1970-6).
- 3) 水道施設基準解説, p. 179 (1966), 日本水道協会.
- 4) J. T. Ling: Proc. ASCE. Vol. 81, Seperate No. 751, p. 1-34 (1955).
- 5) 佐藤・谷口： 第18回 全国水道研究発表会講演集, p. 152-153 (1967-5).
- 6) 佐藤敦久： 第19回 全国水道研究発表会講演集, p. 170-171 (1968-5).
- 7) 大山義年： 化学工学 II, p. 14 (1963-10), 岩波全書 254.
- 8) 3) の p. 179.
- 9) 3) の p. 176.
- 10) T. R. Camp: Proc. ASCE, Vol. 90, No. SA 4, p. 1-30 (1964).
- 11) 松井進作： おはなし統計的手法 (1968), 日本規格協会.
- 12) 田口玄一： 実験計画法 (上) (1967), K.K. 丸善.
- 13) 下津毅一： 水道協会雑誌, No. 398, p. 21 (1967-11).
- 14) 三宅・平賀・高坂： 第20回 全国水道研究発表会講演集, p. 178-179 (1969-5).
- 15) 上水試験方法 (1965年版), p. 2 (1967), 日本水道協会.
- 16) D. M. Mintz: Special Subject No. 10, International Water Supply Congress and Exhibition at Barcelona (1966).