

VII-11

原水 pH の変動と砂層内抑留濁質の挙動

北見工業大学 フェロー 海老江 邦 雄  
 北見工業大学 学生会員 玉川 幸 慎  
 北見工業大学 正 会 員 土 井 克 哉  
 北見工業大学 学生会員 李 宰 昊  
 北見工業大学 学生会員 林 田 武 志

1. ま え が き

急速砂ろ過は、有効な固液分離装置として浄水処理の分野で広範に用いられてきた。最近、水道水質のレベルアップが強く求められているが、凝集から急速砂ろ過の各段階における水質管理をより厳密に行なうことによって相当の水質改善を実現できると考えている。急速砂ろ過性能の影響因子は多く、ろ材径、PAC注入率、原水 pH、水温、ろ過速度など原水やろ過運転に関するものが含まれる。

本論では凝集に密接に関係する原水 pH の変動が砂層内抑留濁質の挙動に及ぼす影響について実験的に検討した。すなわち、直接砂ろ過のパイロットプラントを用いて、原水 pH を一定とした実験、および、途中で原水 pH を短時間変動させた実験を行った。また、原水 pH が変動下におけるベンチスケールのろ過装置を用いた実験においてはガラス棒上、および、砂層内の抑留物の挙動を実体顕微鏡を通して詳細に観察した。

本論では、それらの実験における原水 pH の変動前後における損失水頭とろ過水濁度の動きとろ層内観察から、原水 pH の変動が抑留濁質の挙動に及ぼす影響を定性的、定量的に検討している。

2. 実 験 方 法

図 1 は、本実験に用いた直接砂ろ過のパイロットプラントである。ろ過筒内には有効径 0.61 (小砂)、0.71 (中砂)、0.94 (大砂)mm (いずれも均等係数 1.4) の珪砂を空隙率 44.3% で厚さ 60cm に充填した。実験にあたっては、これを成層化してろ過を開始した。また、ベンチスケールのろ過装置ではガラス棒 (直径 0.5mm) をろ過筒の断面中央部に水平に固定した実験、および中砂を空隙率 44.3% で厚さ 6cm に充填した実験を行なった。ろ過速度はいずれも 120m/day とした。ろ過原水は、本学水道水にカオリンを 20mg/l、凝集剤として PAC を 7.5 または 15mg/l (ベンチスケールのろ過装置では 10mg/l)、pH 調整剤 (塩酸、または水酸化ナトリウム) を注入した後、急速混和したものである。原水 pH については pH コントローラによって連続的に調整した。ろ過中は、ろ層の経時の損失水頭を測定すると同時に、所定時に原水・ろ過水の一部を自動採水機で採取し、運転終了後にそれらの濁度 (積分球式濁度計) を測定して現象の解析に用いた。

3. 実験結果と考察

3-1 原水 pH 一定の 18 時間ろ過

1) 損失水頭とろ過水濁度の動き

図 2 は、ろ過の経過に伴う全損失水頭の値を示している。また、表 1 は直接砂

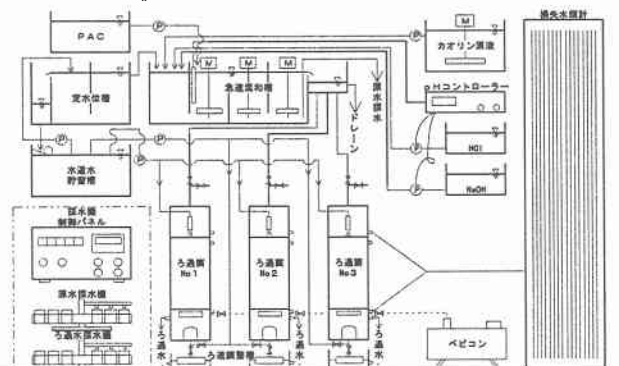


図 1 直接砂ろ過のパイロットプラント

Effect of pH in Influent Water on the Removal of Suspended Particles in Direct Sand Filtration by Kunio EBIE, Yukinori TAMAKAWA, Katsuya DOI, Jae-Ho Lee and Takeshi HAYASHIDA

ろ過で水質が最も良好となる時期にあたる清澄期 (3~12 時間) のろ過水平均濁度である。原水 pH の値に関係なくろ材径が小さいほど、PAC 注入率が高いほど損失水頭は大きくなっている。PAC 注入率が高くなるとブロック体積が増大することは良く知られているが、原水 pH 4、5 の損失水頭が非常に低く、またろ過水濁度が高かったのは、PAC による凝集が十分に進行しなかったためである。また、海老江らは硫酸アルミニウムを凝集剤として用いた場合、原水 pH 8、9 では損失水頭が中性領域より減少すると報告しているが、PAC を用いた今回の実験では損失水頭が上昇しており、PAC の凝集はアルカリ性領域にまで及ぶことが分かった。つぎに、ろ過水質を見ると、原水 pH 6 以上で比較的低濁となっている。最良の結果は、原水 pH 7 で小砂使用の場合に起こっており、濁度の暫定基準である 0.1mg/l 以下を達成している。

## 2) ろ過水平均濁度の分散分析

表 2 は、ろ過水の初期漏出期と清澄期における平均濁度の変動に及ぼす各因子の寄与率を、三元配置法 (主因子は原水 pH:  $pH$ 、ろ材径:  $D$ 、PAC 注入率:  $P$  の 3 個で、水準はそれぞれ 6、3、2) を用いて算出した結果である。これによると、原水 pH の寄与率は、いずれの時期においても 80% 以上と非常に高く、以下ろ材径 (5% 弱)、PAC 注入率 (1% 弱) の順となった。このことは良質なるろ過を得るためには、原水 pH の調整、すなわち、濁質の適切な凝集が最も重要であることを示している。

### 3-2 原水 pH の 1 時間変動に伴うろ過

#### 1) 損失水頭、ろ過水濁度などの動き

図 3、4 は原水 pH の短時間変動による損失水頭、およびろ過水濁度の動きの一例 (pH 4 の場合) を示している。原水 pH の変動中は、時間とともに損失水頭が回復し、それに伴ってろ過水濁度が上昇している。また、原水 pH の短時間変動の損失水頭の動きを見ると、原水 pH の変動前よりも損失水頭は急な上昇傾向 (1 時間当たりの損失水頭増加量は原水 pH の短時間変動後の方が原水 pH の変動前よりも 2.01~3.14 倍大きくなった) を示している。これは、原水 pH の変動によって抑留物を剥離させた部分にブロックが優先的に捕捉されているためではないかと考えられる。

表 3 は、原水 pH の短時間変動実験により得られた結果をまとめたものである。全体的傾向として、原水 pH の変動が大きくなるに従って損失水頭が大きく回復し、濁質流出量が増加している。さらに、ろ材径が小さくな

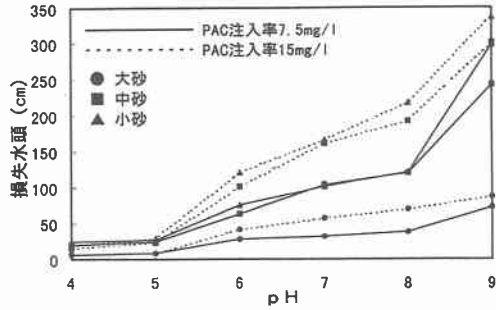


図 2 18 時間ろ過における全損失水頭

表 1 清澄期におけるろ過水平均濁度

pH	PAC 注入率 7.5mg/l			PAC 注入率 15mg/l		
	大砂	中砂	小砂	大砂	中砂	小砂
4	8.89	5.89	4.40	11.48	9.86	8.91
5	5.40	0.72	0.46	4.69	1.68	1.08
6	0.34	0.17	0.15	0.21	0.19	0.11
7	0.19	0.13	0.09	0.11	0.08	0.05
8	0.22	0.15	0.12	0.14	0.09	0.10
9	0.22	0.17	0.14	0.15	0.13	0.10

表 2 ろ過水平均濁度に及ぼす寄与率

因子	初期漏出期		清澄期	
	自由度	F 検定 寄与率 (%)	自由度	F 検定 寄与率 (%)
pH	5	** 83.3	5	** 81.8
D	2	** 4.9	2	** 4.0
P	1	** 0.5	1	** 1.0
pH × D	10	** 7.8	10	** 7.2
pH × P	5	** 3.0	5	** 4.9
誤差	12	0.5	12	1.3
総変動	35	100.0	35	100.0

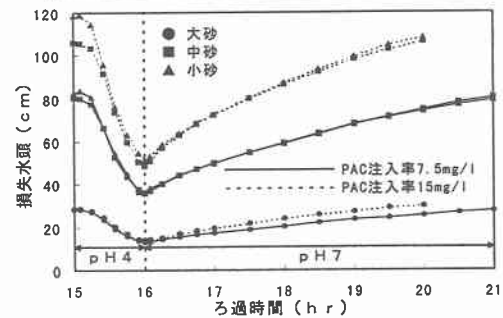


図 3 短時間 pH 変動による損失水頭の動き

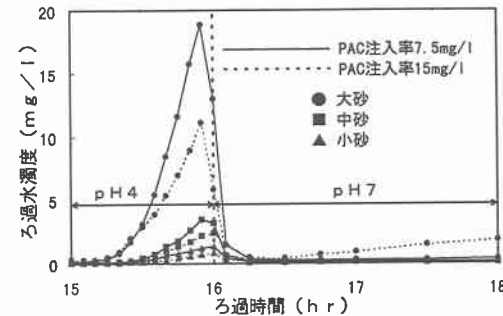


図 4 短時間 pH 変動によるろ過水濁度の動き

るに従って損失水頭の回復幅は増加するが、濁質流出量は減少している。これらの表中の数値で特徴的な点は、損失水頭の回復率に比べて濁質流出率が極めて低い点である。これは、損失水頭の回復は抑留ブロック中のPACの溶解に起因するが、今回の条件では主に抑留量の多い表層部におけるブロックの溶解が進行したものと考えられる。また、PAC注入率の低い方において濁質流出量が多くなっているのは、PAC注入率が低いと損失水頭が表層部に集中せず、ブロックの内部抑留が進行していたためではないかと考えられる。

### 2) 原水pH変動時の損失水頭とろ過水濁度の分散分析

表4は、原水pHの短時間変動中における損失水頭回復率と濁質流出率の変動を分散分析（主因子は原水pHの変動：pH、ろ材径：D、PAC注入率：Pで水準はそれぞれ3、3、2）した結果である。損失水頭回復率については、原水pHによる寄与率が99.1%と極めて大きい。濁質流出率については、原水pHによる寄与率は24.6%、ろ材径は36.0%となっている。これは原水pHの短時間変動によるブロックの溶解量が同じであったとしても、ろ材径が小さいほどろ層下部において剥離濁質の再捕捉量が増加したためと考えられる。

### 3) ろ層各部の損失水頭の動き

表5は原水pHの短時間変動前（ろ過開始から15時間）、変動後（同16時間）、全損失水頭が変動前の値に上昇（同20、または21時間）するまでのろ層5cmの損失水頭、および、全損失水頭の動きを示している。はじめに、原水pHの変動前後における損失水頭の動きを見ると、ろ層0~5cm間における損失水頭の回復量が最も多く、ろ層15~20cm以下の部位では原水pHの変動の影響は殆ど認められなかった。そこで、全損失水頭の変動に対する0~5cm間の回復量の割合を見ると、原水pH4の場合には49.7~78.1%、原水pH5の場合には53.2~93.9%、原水pH6の場合には52.6~80.0%となり、いずれの条件においても50%以上を占めていた。また、全損失水頭が原水pHの変動前とほぼ同一の値にまで上昇した時点で、ろ層5cmの損失水頭の動きを見ると、上昇時にはろ層0~5cm間では減少しているが、その下層では若干大きくなっている。これは、原水pHの変動に起因して上層部のブロックの溶解により、原水pHの変動後内部抑留が進行したためと考えられる。

### 3-3 原水pHの変動に伴うガラス棒上抑留ブロックの挙動

#### 1) 酸性領域の場合

写真1~4は、ガラス棒上のろ過状況を示している。ろ過開始から4時間までは原水pHを7に、ついで、

表3 原水pHの短時間変動と諸挙動

PAC注入率 (mg/l)	pH	珪砂	損失水頭	損失水頭	濁質	濁質
			回復量 (cm)	回復率 (%)	流出量 (mg/l)	流出率 (%)
7.5	4	大砂	15.2	53.9	153.6	1.95
		中砂	44.2	55.1	27.3	0.34
		小砂	46.6	56.6	11.8	0.15
	5	大砂	4.7	16.8	82.2	1.03
		中砂	15.0	17.9	4.8	0.06
		小砂	22.0	22.2	3.5	0.04
	6	大砂	0.3	1.2	6.5	0.08
		中砂	3.2	3.7	3.0	0.04
		小砂	1.8	2.0	2.5	0.03
15	4	大砂	14.7	51.4	95.0	1.19
		中砂	57.5	54.2	19.8	0.25
		小砂	67.3	56.6	7.3	0.09
	5	大砂	4.9	15.3	12.8	0.16
		中砂	16.1	15.4	4.3	0.05
		小砂	19.7	15.5	3.3	0.04
	6	大砂	1.9	5.6	8.3	0.10
		中砂	4.1	3.7	2.8	0.03
		小砂	6.6	5.4	2.3	0.03

表4 ろ過諸挙動の寄与率

因子	損失水頭回復率		濁質流出率			
	自由度	F検定寄与率 (%)	自由度	F検定寄与率 (%)		
pH	2	**	99.1	2	**	24.6
D	2	**	0.2	2	**	36.0
P	-	-	-	1	**	3.4
pH×D	4	*	0.1	4	**	24.4
pH×P	2	**	0.3	2	*	1.7
D×P	-	-	-	2	**	5.2
誤差	5		0.3	5		4.7
総変動	18		100.0	18		100.0

表5 ろ層深さと損失水頭の動き (pH4の場合)

PAC (mg/l)	珪砂	時間 (hr)	ろ層 (cm)						
			0~5	5~10	10~15	15~20	35~40	55~60	0~60
7.5	大	15	11.2	7.7	3.4	1.8	0.5	0.5	28.2
		16	3.0	2.9	1.8	1.4	0.5	0.4	13.0
		21	8.8	7.8	4.1	2.3	0.4	0.4	27.6
	中	15	47.1	18.0	4.1	2.2	0.9	1.2	80.2
		16	13.1	7.8	3.4	2.2	1.0	1.1	36.0
		21	40.4	21.9	5.9	2.6	1.0	1.2	80.2
	小	15	44.8	19.1	5.0	2.8	1.2	1.3	82.4
		16	11.3	7.3	4.1	2.9	1.1	0.6	35.8
		21	35.1	21.5	7.7	3.2	1.3	1.5	79.3
15	大	15	10.3	7.1	4.0	2.5	0.6	0.5	28.6
		16	3.0	3.1	2.0	1.4	0.6	0.5	13.9
		20	8.5	7.2	4.8	3.0	0.6	0.6	29.2
	中	15	66.6	21.6	6.4	2.3	1.1	1.1	106.0
		16	21.7	10.2	4.4	2.5	1.0	1.3	48.5
		20	58.4	24.6	9.5	3.4	1.3	1.1	106.2
	小	15	54.7	32.1	12.7	5.0	1.3	1.1	118.4
		16	13.9	11.5	6.5	4.2	1.6	1.5	51.7
		20	39.3	31.0	15.8	6.3	1.7	1.5	108.2

原水 pH を酸性領域 (pH 4) に変化させて 1 時間のろ過を行い、その後再び、原水 pH を 7 に戻してろ過を行なった結果である。

原水 pH を変動させるとガラス棒上に付着していたフロックの多くが剥離する様子 (ガラス棒から直接剥離するもの、フロックの一部が溶けて剥離流出するものの 2 種類) が観察された。これは、原水 pH の変動によって、架橋的役割を果たしていたアルミニウムが溶解したため、フロック同士の結合力、また、付着力を失って剥離したものと考えられる。

つぎに、原水 pH の変動によって剥離しなかったガラス棒上のフロックを見ると、原水 pH の変動の時間経過とともにフロック体積が減少する様子が認められる。これは前述とは異なり、フロック中に含まれていた PAC が原水 pH の変動が進行するに従って徐々に溶解し、フロック体積が減少したものと考えられる。原水 pH の変動開始から約 10 分の間はフロックの剥離が主であったが、それ以降は溶解が中心になっている様子が認められる。さらに、フロックが剥離されたガラス棒上に部分的ではあるが、原水 pH の変動中に微量ながらフロックの堆積が確認できた。原水 pH の変動後は、ガラス棒上に残存したフロックや、原水 pH の変動中に新たに付着した微細なフロックが核となり、原水中のフロックを速やかに付着させている。

## 2) アルカリ性領域の場合

写真 5~8 は、3-3 の 1) と同様に、変動時の原水 pH をアルカリ性領域 (pH 9) に設定してろ過を行なったものである。写真から分かるように、酸性領域の原水 pH の変動とは異なり、フロックの剥離、溶解は見られなかった。むしろ、ガラス棒上の付着フロック量が増加している。これは、前にも述べたように、原水 pH をアルカリ性領域に設定することにより、フロック体積が増加するためである。さらに、原水 pH の変動後もフロックの剥離と溶解は見られなかった。このように、アルカリ性領域で原水 pH を変動させても、付着フロックに与える影響は殆どないと考えられる。

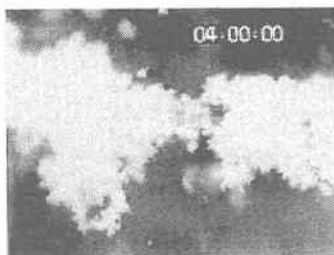


写真1 pH 7→4→7

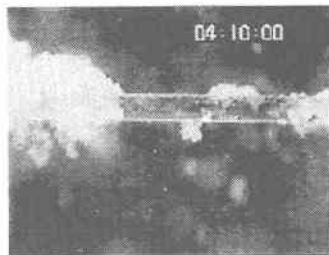


写真2 pH 7→4→7

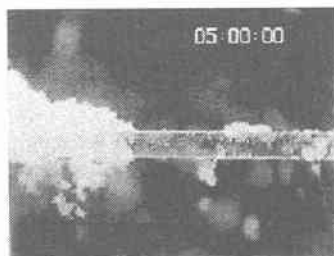


写真3 pH 7→4→7

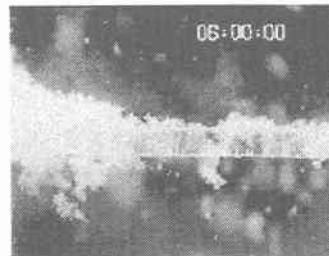


写真4 pH 7→4→7

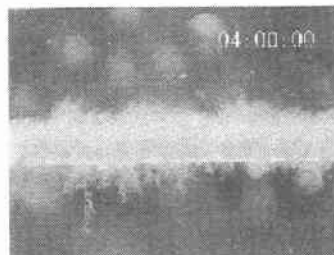


写真5 pH 7→9→7

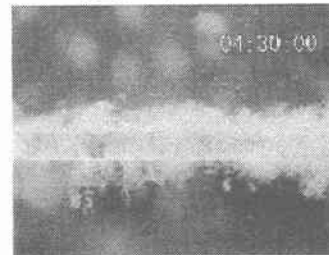


写真6 pH 7→9→7

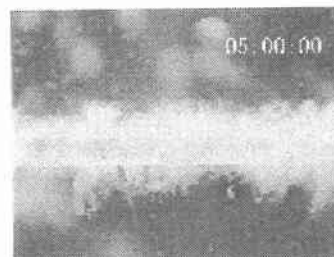


写真7 pH 7→9→7

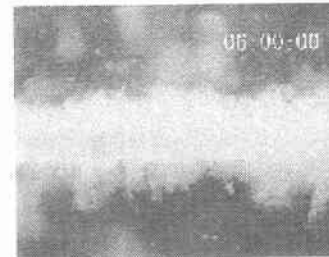


写真8 pH 7→9→7

### 3-4 原水 pH の変動が砂層内抑留フロックの挙動に及ぼす影響

本実験は、3-3 の 1) と同様の条件で、ろ過筒内にガラス棒ではなく珪砂を充填しろ過を行なった場合である。写真 9~12 はろ層上部（表層から 1cm）、写真 13~16 はろ層中部（表層から 3cm）、写真 17~20 はろ層下部（表層から 6cm）、写真 21、22 は原水 pH の変動に伴うろ過水を撮影したものである。

これらから、原水 pH の変動中はろ層内に抑留されていたフロックがどの部位にも依らず、剥離、溶解されているが、ろ層下部ではフロックが剥離、溶解が進行する一方で、ろ層上部、中部で剥離されたフロックを再捕捉している状況が認められた。また、原水 pH を変動させても、砂層内空隙には非常に多くのフロックが抑留されている。原水 pH を変動させても剥離するフロックは、ほんの一部でしかなく、殆どが溶けて流出していることが分かる。また、ろ層内では原水が流れづらい部分が散在している。そのような部分に pH を変動させた原水が流入しても、原水が流れやすい部分に比べて原水 pH の変動による影響は非常に小さいため、フロックの剥離、溶解は受けづらい。ろ層の下に流出してくるろ過水中には、原水 pH の変動開始から約 10 分までは非常に粒径の大きなフロックが含まれていたが、それ以降は非常に粒径の小さなフロックのみの漏出となった。すなわち、原水 pH の変動によって、まず最初は付着強度の弱いフロックが剥離される。隅角部に捕捉されたフロックや付着強度の強いフロックは、剥離されずに停滞しているが、原水 pH の変動が進行するに従って、フロック中の PAC が溶解する過程で剥離流出していく。また、PAC によって十分に凝集されていない非常に粒径の小さなフロックは原水

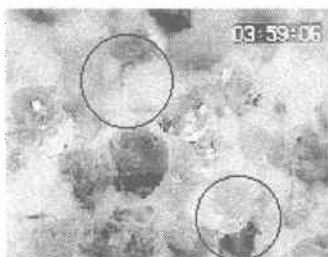


写真 9 ろ層上部

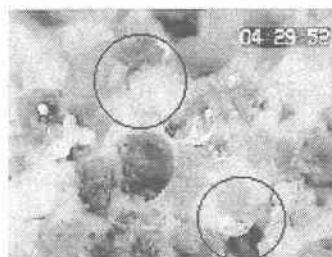


写真 10 ろ層上部

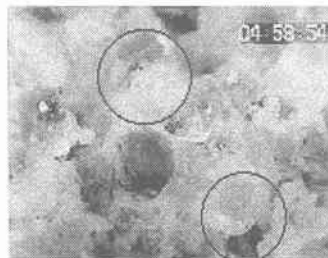


写真 11 ろ層上部

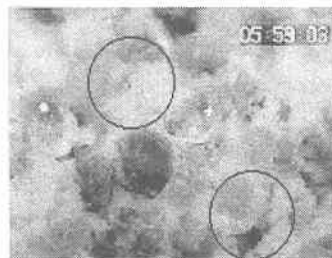


写真 12 ろ層上部

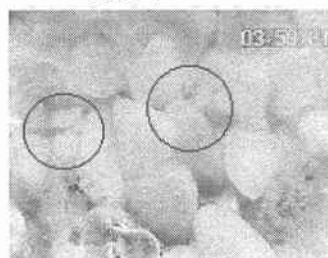


写真 13 ろ層中部

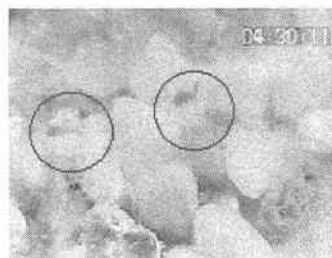


写真 14 ろ層中部

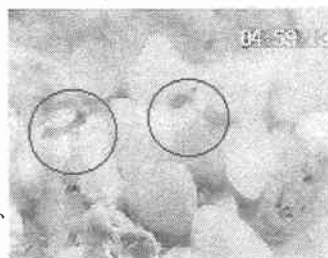


写真 15 ろ層中部

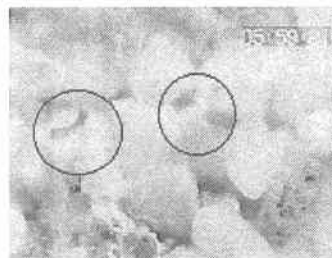


写真 16 ろ層中部



写真 17 ろ層下部

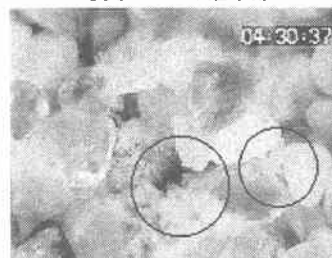


写真 18 ろ層下部

pHの変動初期には、剥離フロックとともにろ層から漏出する。それ以降は、ろ層内には付着強度の強いフロックしか残っていないため、原水中のフロックが殆ど抑留されずに溶解PACとともに漏出しているためと考えられる。また、原水pHの変動後はどのろ層部位にもフロックが捕捉されているのが分かる。これは、原水pHの変動によりろ層内に抑留されていたフロックの一部が剥離、溶解されて原水の通り道が広がり、ろ層全体がフロックを捕捉しやすい状態になったためと考えられる。

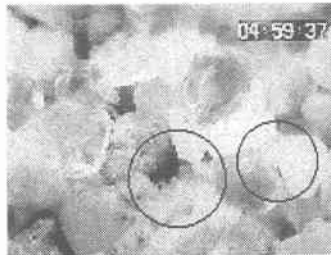


写真19 ろ層下部

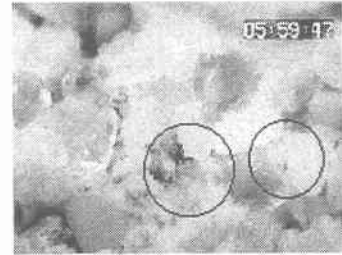


写真20 ろ層下部



写真21 ろ層下(ろ過水)

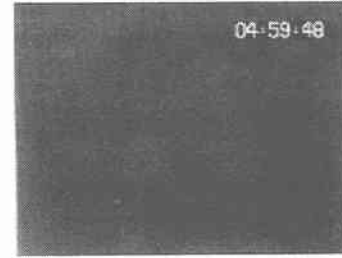


写真22 ろ層下(ろ過水)

#### 4. ま と め

今回の研究で得られた知見は以下の通りである。

- 1) PACを凝集剤として用いた場合、酸性領域を除く、中性からアルカリ性領域において高いろ過性能が認められた。
- 2) 原水pH7以上の領域でろ過水は低濁となり、原水pHの上昇とともに損失水頭は上昇した。それゆえ、最適のろ過条件は損失水頭、およびろ過水濁度が低くなる原水pH7において得られることが分かった。
- 3) 原水pHの短時間変動においては、損失水頭回復率に比べて濁質流出率は非常に低かった。これは、損失水頭発生量が大きい上層部の抑留フロックに含まれるPACが溶解、流出するとともに、剥離濁質の下層部での再捕捉が起こったためと考えられる。
- 4) 原水pHが酸性領域に変動した場合の抑留フロックに与える影響については、付着強度の弱いものほど速やかに剥離され、付着強度の強いものは徐々に溶解流出する様子が認められた。
- 5) 原水pHの変動に伴い抑留フロックの溶解流出が進行すると、原水の通り道が広がり、残存したフロックが核となってフロックの抑留が進行するため、原水pHの短時間の変動後は、フロックの抑留が進行し、損失水頭の上昇が速やかになるものと考えられる。

#### 【 参 考 文 献 】

- 1) 海老江邦雄：急速ろ過ろ層における抑留物質の挙動(Ⅱ)、水道協会雑誌、第498号、pp15～37(1976.3)
- 2) 海老江邦雄：急速ろ過ろ層における抑留物質の挙動(Ⅲ)、水道協会雑誌、第507号、pp20～34(1976.12)
- 3) 海老江邦雄：急速ろ過ろ層における抑留物質の挙動(Ⅳ)、水道協会雑誌、第508号、pp18～37(1977.1)
- 4) 海老江邦雄：ろ過水のアルミニウム濃度に及ぼす直接砂ろ過因子の影響、水道協会雑誌、第771号、pp29～37(1993.12)
- 5) 佐藤敦久：急速砂ろ過におけるろ過機構に関する研究(Ⅱ)、水道協会雑誌、第430号、pp13～27(1970.7)
- 6) 角田省吾・青柳由重：直接凝集ろ過に関する実験的研究、水道協会雑誌、第486号、pp2～10(1975.3)
- 7) 田口玄一：新版 実験計画法 上、丸善株式会社(1962.3発行)
- 8) 丹保憲仁・小笠原絢一：浄水の技術—安全な飲み水をつくるために—、技報堂出版(1985.11発行)