

II—26 直接ろ過法における濁質流出率の動き

北見工業大学 正会員 海老江 邦 雄
北見工業大学 学生員 藤 縄 憲 通

1. ま え が き

ろ層の濁質流出率と損失水頭は、いずれもろ過池の維持管理上極めて重要な指標である。本研究では、ろ過の経過とろ層の深さ方向に伴う濁質流出率の動きなどの検討を通して、ろ過現象を動的に把握することを目的とした。

濁質流出率に関しては、既に、R.Eliassen¹⁾、T.R.Camp²⁾、A.K.Deb³⁾、K.J.Ives⁴⁾らによる鉄フロックや非凝集性カオリン粒子を対象にした研究がある。これらの研究では試料の採取はいずれも連続滴下法によっているが、同法には抑留濁質量の増加に伴って測定誤差が次第に大きくなるという欠点のあることがFox and Cleasby⁵⁾によって指摘されており、水処理で実際に遭遇する凝集性濁質に対しては適用が難かしいと考えられる。

本研究では、ろ層内抑留濁質の直接採取法を新たに採用し、カオリンと硫酸アルミニウムとからなる凝集性濁質を対象に、各種ろ過条件下におけるろ過2時間、ろ層5cmごとの濁質流出率を明らかにした。その上、濁質流出率の動きや変動に対する各因子の寄与率などについて検討したが、それらの結果を以下に報告する。

2. ろ層の物質収支式と濁質流出率の計算

原水がろ層内に持ち込む濁質のろ層各部における物質収支については、つぎの岩崎⁶⁾の式で示される。

$$\partial C / \partial L + (1/V) \cdot \partial S / \partial T = 0 \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 ∂C はろ層の微小厚さ ∂L (cm)における濁質濃度の減少量 (mg/l)、 V はろ速 (cm/hr.)、 ∂S は微小時間 ∂T (hrs.)内における ∂L 内の抑留濁質の増加量 (mg/cm³)である。(1)式を差分表示すると、

$$\Delta C / \Delta L + (1/V) \cdot \Delta S / \Delta T = 0 \quad \cdots \cdots (2)$$

となる。これを ΔL 区間での減少濁質濃度 ΔC について整理したのち、分子と分母にろ層の断面積 A (cm²)を掛けると、

$$\begin{aligned} \Delta C &= -(\Delta S \cdot A \cdot \Delta L) / (A \cdot V \cdot \Delta T) \\ &= -\Delta S' / (Q \cdot \Delta T) \quad \cdots \cdots (3) \end{aligned}$$

となる。ここで、 $\Delta S' = \Delta S \cdot A \cdot \Delta L$ で ΔT 時間内における抑留濁質の増加量 (mg³)、 $Q = A \cdot V$ は原水の流量 (cm³/hrs.)である。

一方、原水濁質濃度を $C_0 = 20$ (mg/l) (一定)、また、ろ層を上から一定の厚さ ΔL で区切りある時間間隔内における第 n 番目 ($n = 1 \sim 12$)のろ層の濁質流出濃度を C_n (mg/l)とすると、この時間間隔における当該ろ層の濁質流出率 $100 r_n$ (%)と濁質流出率の減少量 $100 p_n$ (%)は、

$$r_n = C_n / C_0 = (C_0 - \sum_{i=1}^n \Delta C_i) / C_0 \quad \cdots (4)$$

$$p_n = (C_n - C_{n+1}) / C_0 = \Delta C_n / C_0 \quad \cdots (5)$$

で与えられる。本研究では、 $\Delta T = 2$ hrs.、 $\Delta L = 5$ cm、ろ速として120、240、360 m/d (それぞれ $V = 5, 10, 15$ m/hrs.) $A = 53.0$ cm²を採用した。したがって、2時間・5cmごとの抑留濁質増加量 $\Delta S'$ さえ、後述の抑留濁質の直接採取法にて実

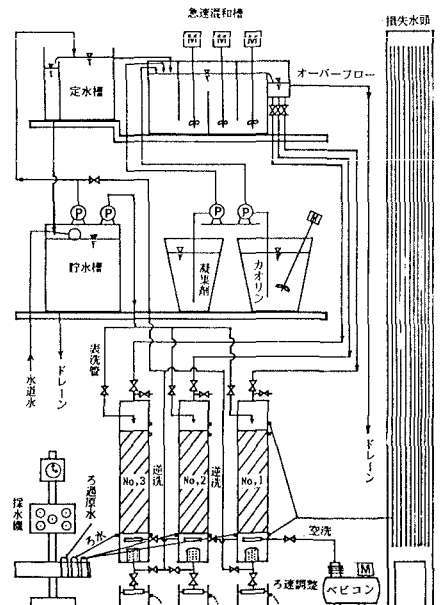


図1 ろ過実験装置の概要

験的に決定しておけば、(3)～(5)式を用いて各層の濁質流出率とその減少量を逐次計算することが可能となる。

3. ろ過装置と実験条件など

今回の実験には図1に掲げるろ過装置を用いた。ろ過筒(断面積 $A=53.0\text{cm}^2$ の矩形)には珪砂を60cm厚さ(空隙率 44.3 %)に充填した。原水は本学水道水にカオリン20mg/lと所定量の凝集剤(硫酸アルミニウム)

を加えたのち、急速混和したものである。予め設定した原水とろ層条件

で表1に示す16系列(各系列3, 6, 12, 18, 24, 36 時間ろ過)の実験を行った。実験では原水とろ過水を採水機で採水し、濁度とAl (mg/l)を測定した。また、運転開始時と終了直前にろ層5cmごとの損失水頭を測定した。Alと損失水頭の動きについては別に発表する予定なので本論では触れない。

直接採砂法による抑留濁質量の定量法は次のようである。つまり、ろ過後、ろ層内の抑留濁質を乱さないよう水抜きを行い、表2に示す14ヶ所のろ層から汚砂を直接採取した。これらの珪砂に付着する濁質については、Jar Tester で水相に剝離・懸濁させたのち一部試料を採水して濁度測定を行った。また、珪砂については乾燥重量を測定したが、これらよりろ層各部の抑留濁質量を確定した。各系列の実験終了後、ろ層各部の一連の抑留濁質量分布をもとに2時間・5cmごとの $\Delta S'$ を決定し、それらから最終的に必要とする濁質流出率を算定した。

表1 各系列の実験条件

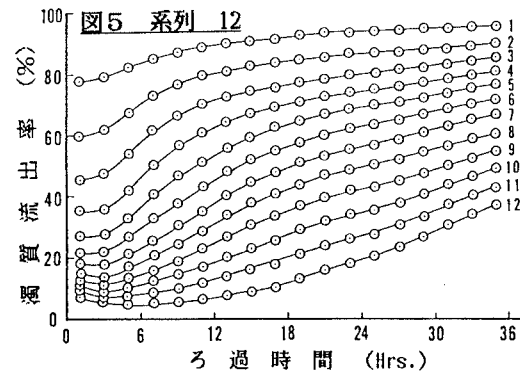
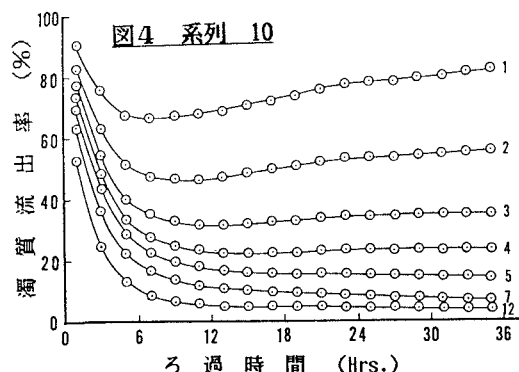
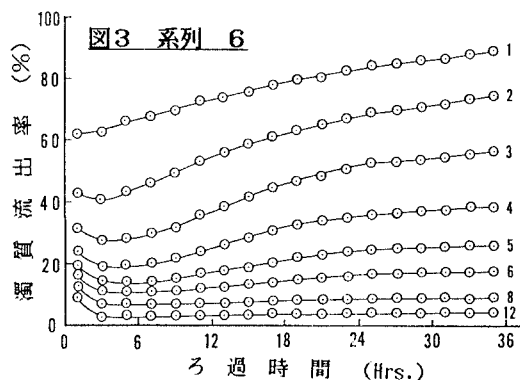
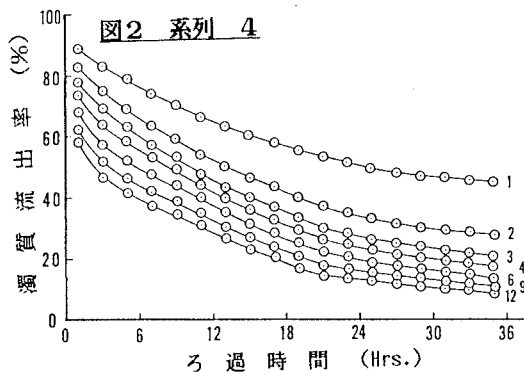
系列 No.	ろ速 m/d	ALUM mg/l	珪砂 mm	系列 No.	ろ速 m/d	ALUM mg/l	珪砂 mm
1	120	5	0.59~0.74	9	240	20	0.59~0.74
2	120	10	0.59~0.74	10	240	5	0.81~1.00
3	120	20	0.59~0.74	11	240	10	0.81~1.00
4	120	5	0.81~1.00	12	240	20	0.81~1.00
5	120	10	0.81~1.00	13	360	5	0.59~0.74
6	120	20	0.81~1.00	14	360	10	0.59~0.74
7	240	5	0.59~0.74	15	360	5	0.81~1.00
8	240	10	0.59~0.74	16	360	10	0.81~1.00

表2 汚砂の採取位置

NO.	部 位	NO.	部 位
1	0~1cm	8	14~15cm
2	1~2	9	20~21
3	2~3	10	25~26
4	3~4	11	30~31
5	4~5	12	35~36
6	7~8	13	45~46
7	10~11	14	55~56

4. 実験結果と考察

4・1 濁質流出率の推移型など



濁質流出率の算出結果の一部を図2～5に示した。濁質流出率の推移型は、ろ過性能の普遍的な指標として用いられるろ過阻止率⁷⁾の推移型を予測する上で重要と考えられるが、今回実施の条件下における特長的な推移型としては、谷型、下降型および上昇型が認められた。ろ層の濁質捕捉メカニズムからは、ろ過初期にろ層の熟成と関連する初期漏出域が、ついで清澄域が、さらに、ろ過終期にはろ層の劣化と関連する終期漏出域が出現すると推測されることから、濁質流出率の基本的な推移型は広幅の谷型であると考えられる。前掲の図などから、谷型もしくは谷型類似の推移は系列 2,5,14,16の全層や系列 3,6,7,8,9,10,12,13,15の上、中あるいは下層など、相当広範に認められ、推測の正当性を証明している。

また、初期漏出が長時間化した下降型推移は系列 1,4の全層や系列 7,8,10,11,13,15の中から下層で出現している。さらに、初期漏出が極めて短時間で終り、外見的にはろ過開始時から終期漏出が現われている上昇型推移は系列3,6,9,12のほぼ全層(下層の一部を除く)で確認された。

このような異なる推移型の出現には、ろ速と凝集剤注入率の相乗効果ともいえるろ層への単位時間あたりの濁質供給量(体積)の多寡が強く関係している状況が認められる。例えば、全体的傾向として、凝集剤注入率が低く、ろ速が遅い場合、つまり、凝集が不十分で単位時間あたりの濁質供給量が少ない場合には下降型、凝集剤注入率が高く、ろ速が速い場合、つまり、粗大な凝集性濁質が供給される場合には上昇型、濁質条件がその中間の場合には谷型推移を辿る傾向が多く見受けられる。しかしながら、例えば、系列5の下層のように、供給量が少ないにもかかわらず谷型であるものや、系列7,10の上層では谷型であるのでそれらより供給量の多い系列8,11ではより深層まで谷型になると予測されるにもかかわらず下降型になっているなど部分的には例外も認められる。

表3 平均濁質流出率と抑留濁質量(5,20,40,60cm厚)

ろ層位置 cm	ろ速 m/d	珪砂 0.59~0.71 mm					珪砂 0.84~1.00 mm				
		硫酸アルミ mg/l			平均	S ₀ kg/m ²	硫酸アルミ mg/l			平均	S ₀ kg/m ²
		5	10	20			5	10	20		
5	120	44.2	68.9	61.9	58.3	1.50	60.2	78.6	77.4	72.1	1.01
	240	65.6	58.7	84.0	69.4	2.21	75.4	66.8	89.9	77.4	1.63
	360	59.2	86.0	(84.8)	76.7	2.53	68.9	90.9	(94.8)	84.9	1.64
	平均	56.3	71.2	76.9	68.1	2.08	68.2	78.8	87.4	78.1	1.43
20	s	3.15	2.08	1.67	2.30		2.30	1.53	0.91	1.58	
	120	22.9	26.7	12.6	20.7	2.85	36.4	47.2	30.1	37.9	2.24
	240	17.0	14.2	47.0	26.1	5.32	28.3	23.2	65.0	38.8	4.41
	360	21.8	53.5	(48.5)	41.3	6.34	31.2	69.9	(63.0)	54.7	4.89
40	平均	20.6	31.5	36.0	29.4	4.84	32.0	46.8	52.7	43.8	3.85
	s	5.64	4.93	4.61	5.06		4.90	3.83	3.41	4.05	
	120	18.2	11.0	3.9	11.0	3.20	28.6	27.2	8.2	21.3	2.83
	240	8.1	7.0	14.7	9.9	6.49	13.1	11.8	39.2	21.4	5.66
60	360	12.9	29.7	(22.9)	21.8	8.45	18.9	49.2	(34.2)	34.1	7.12
	平均	13.1	15.9	13.8	14.2	6.05	20.2	29.2	27.2	25.6	5.20
	s	6.26	6.06	6.21	6.18		5.75	5.10	5.24	5.36	
	120	16.1	5.7	2.4	8.1	3.31	24.0	16.5	3.9	14.6	3.07
	240	6.1	5.2	5.6	5.6	6.80	9.3	7.8	15.9	11.0	6.41
	360	10.3	20.8	(12.7)	14.6	9.22	14.4	37.1	(19.8)	23.8	8.23
	平均	10.8	10.6	6.9			15.9	20.5	13.2		
	s	6.42	6.45	6.70			6.06	5.72	6.25		

推移型に及ぼす各因子の影響の程度に

ついては、凝集剤注入率が最も大きく、ろ速、ろ材径の順であろうと推測される。こうした傾向はろ過阻止率に対しても同様であろうと推測される。また、初期漏出の下降勾配は殆んどの場合、終期漏出の上昇勾配より急であること、および初期漏出と

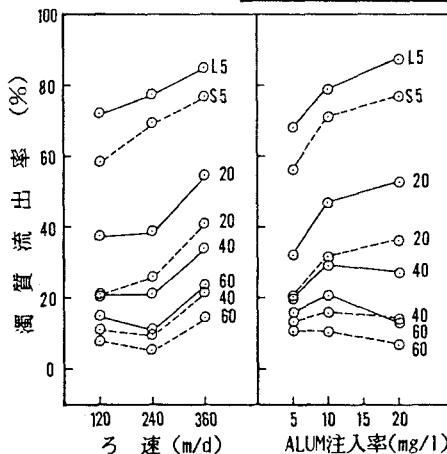


図6 濁質流出率の動き

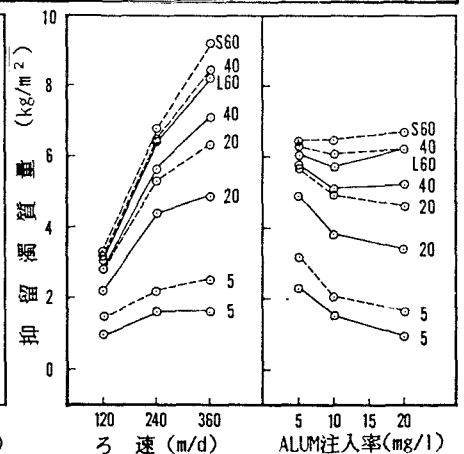


図7 抑留濁質量の動き

凝集剤注入率と関連性が非常に強いことなどが認められた。特に、初期漏出の抑制には凝集剤注入率を上昇させることが効果的であろうと考えられる。

4・2 濁質流出率と抑留濁質量の動き

4つのろ層厚さ(5, 20, 40, 60 cm)を通過するろ過36時間の平均濁質流出率と抑留濁質量の動きを表3と図6, 7 (S:珪砂0.59~0.71, L:0.84~1.00mm, 以下同じ)に掲げた。

濁質流出率については、ろ材径が小さく、深層ほど低い値となっている。ろ速と凝集剤注入率の上昇とともに濁質流出率は全般的に高くなっている。

ろ速に関しては、中層より深い部分でろ速240m/dにおける濁質流出率が極小値をとっており、効果的なろ速領域の存在を示唆している。他方、抑留濁質量につ

いては、5cm層ではほぼ飽和状態になっているがろ層全体としてはろ速の上昇とともに著しく増加しており、高ろ速ほどろ層空隙が有効に利用されることを示している。

また、凝集剤注入率に関しては、上層では凝集剤注入率の低いほど、下層では

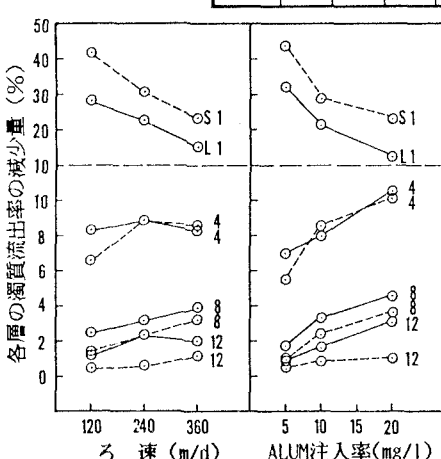


図8 濁質流出率の減少量の動き

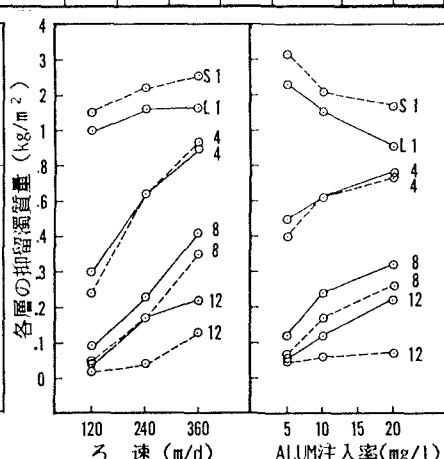


図9 各層の抑留濁質量の動き

20mg/lになると、濁質流出率が低下している。これらに対する抑留濁質量の動きについては、上層では凝集剤注入率の低いほど多量となるが、60cm層では凝集剤注入率による差異は殆んど認められない。

表4と図8, 9は、4つの5cm厚さのろ層における濁質流出率の減少量と各層の抑留濁質量の動きを示したものである。

始めに、濁質流出率の減少量については、上層(S1, L1)ではろ速と凝集剤注入率が上昇するほど低下し、内部抑留傾向を示した。それに伴って、下層(S8, S12と L8, L12)では逆に濁質流出率の減少量の上昇する傾向が現われている。ろ材径の効果については、上層では径の小さい方の濁質流出率の減少量が大いだが、中層のS4, L4を境として、下層では逆転している。中層は径に関係なくほぼ等しい減少量を示している。

つぎに、ろ速と抑留濁質量との動きについては、4・1で見たように、S1, L1層ではほぼ飽和状態となっているが、ろ速が速いほどS4, L4層における濁質抑留量は顕著に増加しており、上層での抑留量の減少分を補う形のろ過が進行したことを示している。また、凝集剤注入率と抑留濁質量との関係については、濁質流出率の減少量の場合と類似の傾向となった。

表4 各層の濁質流出率の減少量と抑留濁質量の動き

ろ層の位置 cm	ろ速 m/d	珪砂 0.59~0.71 mm					珪砂 0.84~1.00 mm				
		硫酸アルミ mg/l			平均	s kg/m ²	硫酸アルミ mg/l			平均	s kg/m ²
		5	10	20			5	10	20		
0~5 (1)	120	55.9	31.2	38.1	41.7	1.50	39.8	21.4	22.7	28.0	1.01
	240	34.5	41.4	16.1	30.7	2.21	24.7	33.3	10.1	22.7	1.63
	360	40.8	14.0	(15.3)	23.4	2.53	31.2	9.1	5.3	15.2	1.64
	平均	43.7	28.9	23.2	31.9	2.08	31.9	21.3	12.7	22.0	1.43
15~20 (4)	120	2.5	8.5	8.9	6.6	0.24	3.7	7.7	13.4	8.3	0.30
	240	7.9	7.9	11.0	8.9	0.64	9.5	9.8	7.5	8.9	0.64
	360	6.1	9.5	(10.3)	8.6	0.93	7.6	6.5	(10.7)	8.3	0.90
	平均	5.5	8.6	10.1	8.0	0.60	6.9	8.0	10.5	8.5	0.61
35~40 (8)	120	0.8	2.5	0.9	1.4	0.05	1.5	3.6	2.4	2.5	0.09
	240	1.0	0.9	5.4	2.4	0.17	1.9	1.7	6.0	3.2	0.23
	360	1.3	3.9	(4.4)	3.2	0.35	1.8	4.6	(5.2)	3.9	0.42
	平均	1.0	2.4	3.6	2.3	0.19	1.7	3.3	4.5	3.2	0.25
55~60 (12)	120	0.5	0.8	0.2	0.5	0.02	1.0	2.1	0.6	1.2	0.04
	240	0.4	0.3	1.0	0.6	0.04	0.7	0.8	5.7	2.4	0.17
	360	0.5	1.4	(1.8)	1.2	0.13	0.9	2.2	(2.9)	2.0	0.22
	平均	0.5	0.8	1.0	0.8	0.06	0.9	1.7	3.1	1.9	0.11
	s	0.04	0.06	0.07	0.06		0.06	0.12	0.22	0.13	

4・3 濁質流出率の分散分析と寄与率の動き

ろ速、ろ材の径および凝集剤注入率を主因子とする三元配置法によって、一定のろ過時間までの平均濁質流出率と一定のろ過経過後の2時間平均濁質流出率の分散分析を行い、最終的に各因子の寄与率⁶⁾を計算により求めた。

前者の平均濁質流出率について計算した寄与率の結果の一部を表4と図10に、さらに、後者の2時間平均濁質流出率についての寄与率の動きを図11に掲げた。

初めに、図10における凝集剤注入率の寄与率については、他のいずれの主因子によるよりも大きな変動が認められる。特に、ろ過初期の寄与率は極めて大きく、30～60cm層では85%前後に達すると同時に深層ほど大きな値を示している。しかしながらろ過の経過とともに急速に低下して5、15cm層では6時間、30～60cm層では12時間程度で最低値を示し、その後、寄与率は再び上昇して行く。ろ過36時間後には、5cm層を除けば、浅層ほど高い寄与率を示している。ろ層5cmのみは、ろ過18時間後に極大値を示しその後は再び下降して行く。

ろ速変動の寄与率は、ろ過開始から6時間頃まで上昇し、その後の寄与率はいずれの層でも10～20%程度となり、ろ過時間、ろ層深さによる変動は最も少い。さらに、ろ材径の寄与率については、ろ過初期には浅層の寄与率ほど高いが、ろ過時間が長くなると逆転して深層ほど高くなる。また、ろ過経過に伴う寄与率の変動は浅層ほど大きい。例えば、5cm層では35%程度であるのに対し60cm層では10%程度である。さらに、ろ過24時間以降の各層の寄与率は5～15%程度以下と他の因子に比較して低い値をとっている。

ろ速変動の寄与率は、ろ過開始から6時間頃まで上昇し、その後の

表5 寄与率解析結果(ろ過36時間平均濁質流出率)

要 因	自由度	ろ 過 時 間 (hrs.) (流出部位……ろ層 60cm)						
		2	6	12	18	24	30	36
ろ 速 V	2	3.3	4.4	10.2	16.4	22.3	25.0	27.3
珪 砂 S	1	2.9	4.8	7.1	10.0	13.1	15.2	16.6
凝集剤 A	2	86.8	77.2	55.1	35.8	20.1	10.1	4.3
交互作用	8	6.8	13.1	24.7	30.5	34.7	35.2	31.8
(V*S)	(2)	(0.2)	(0.3)	(0.4)	(0.2)	(-0.1)	(-0.5)	(-1.7)
(V*A)	(4)	(6.4)	(12.4)	(24.0)	(30.4)	(35.1)	(36.3)	(34.4)
(S*A)	(2)	(0.2)	(0.4)	(0.3)	(-0.1)	(-0.3)	(-0.6)	(-0.9)
そ の 他	4	(0.2)	(0.5)	(2.9)	(7.3)	(9.8)	(14.6)	(19.9)
合 計	17	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.1	99.9

*1……三元配置法による分散分析

*2……ろ速として 120、240、360m/d、砂の径として0.59～0.74、0.81～1.00mm、凝集剤として硫酸アルミニウム5、10、20mg/lを採用した。

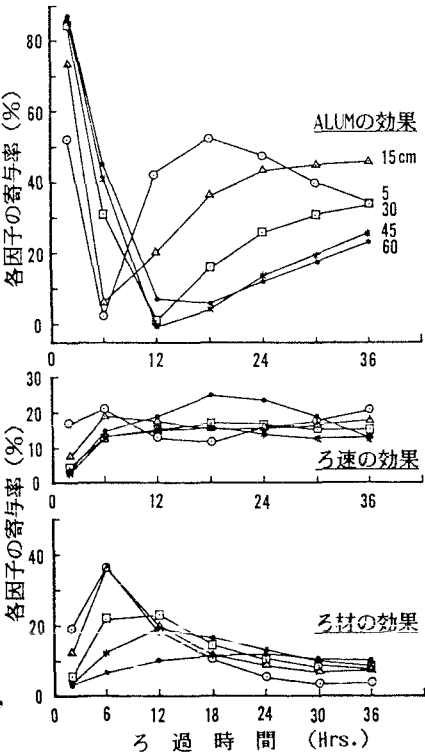


図10 寄与率(2時間平均濁質流出率)

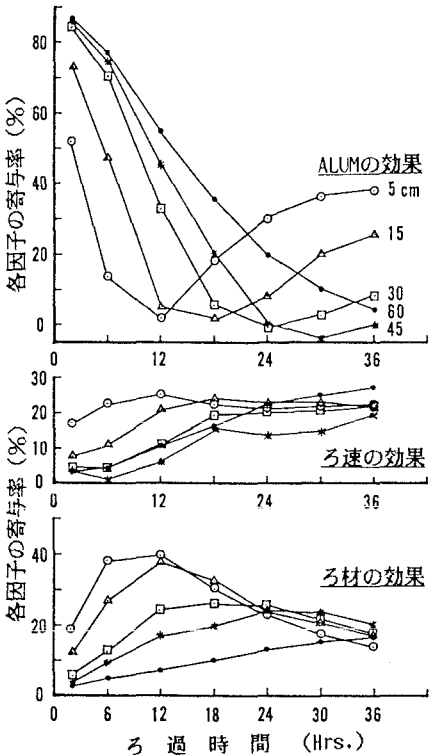


図11 寄与率(平均濁質流出率)

寄与率はいずれの層でも10～20%程度となり、ろ過時間、ろ層深さによる変動は最も少い。さらに、ろ材径の寄与率については、ろ過初期には浅層の寄与率ほど高いが、ろ過時間が長くなると逆転して深層ほど高くなる。また、ろ過経過に伴う寄与率の変動は浅層ほど大きい。例えば、5cm層では35%程度であるのに対し60cm層では10%程度である。さらに、ろ過24時間以降の各層の寄与率は5～15%程度以下と他の因子に比較して低い値をとっている。

なお、図11の結果については、図10の場合と絶対値は異なるものの、同様の推移傾向が認められた。以上、見て来たように、濁質流出率の変動に対する凝集剤注入率、ろ速、ろ材径の寄与率はろ過中一定するものではなく、ろ層深さ、ろ過時間とともに大きく変動することが明らかになった。特に、凝集剤注入率の寄与率が大幅に変動し、ろ過初期と後期に大きいことは、凝集剤注入率の多寡が初期漏出、後期漏出の程

度、有無と深く関わることを示唆していると考えられる。

5. あ と が き

各種ろ過条件で、カオリンと硫酸アルミニウムからなる凝集性濁質の2時間・5cmごとの濁質流出率の動きを検討して、つぎの結論を得た。

- (1). 濁質流出率の推移型は、基本となる広幅の谷型のほか、下降型および上昇型が認められた。
- (2). 濁質流出率の推移型には単位時間あたり濁質供給量の影響が強く認められる。単独の因子の中では、凝集剤注入率の効果が最大と推測される。
- (3). ろ速と抑留濁質量の動きについては、5cm層ではほぼ飽和状態となるが深層ほど、また、高ろ速ほど多量の濁質を捕捉する。凝集剤注入率については、注入率が低いほど浅層における抑留濁質量は多くなるが、60cm層では注入率による差異は殆んど認められない。
- (4). 各層の濁質流出率の減少量と抑留濁質の動きについては、ろ速が速いほど、ろ材径が大きいほど内部抑留の傾向をとり、抑留濁質量は上層で少く、下層で多くなる。この抑留濁質量の逆転層は15～20cm辺りとなっている。
- (5). 濁質流出率の変動に対する各因子の寄与率はろ過時間とろ層深さとともに複雑に変動する状況が明らかになった。特に、凝集剤注入率の寄与率は最大であったが、ろ過初期と終期の寄与率が大きかったことは、それぞれ初期漏出と終期漏出とに深く関わることを示唆しているものと考えられる。

最後に、本研究の遂行にあたり、ろ過装置の運転およびデータの採取に努力した北見工業大学工学部土木工学科上下水道工学研究室の卒業生に対し、心から感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1). R.Eliassen : Clogging of Rapid Sand Filters, Journal of the American Water Works Association, Vol.33, 1941
- 2). T.R.Camp : Theory of Water Filtration, Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol.90, No.SA4, August, 1964
- 3). A.K.Deb : Theory of Sand Filtration, Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol.95, No.SA3, June, 1969
- 4). K.J.Ives : Rational Design of Filters, Proceedings, Institution of Civil Engineering, London, Vol.16, 1960
- 5). D.M.Fox and J.L.Cleasby : Experimental Evaluation of Sand Filtration Theory, Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol.92, No.SA5, October, 1966
- 6). C.R.Ott and R.H.Bogan : Theoretical Evaluation of Filter Modeling Experiments, Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol.96, No.SA2, April, 1969
- 7). T.Iwasaki : Some Notes on Sand Filtration, Journal of the American Water Works Association, Vol.29, 1937
- 8). 田口 玄一 : 新版実験計画法(上), 丸善(株)出版, 1971