

急速攪拌の適正化が直接ろ過における濁質の処理性に及ぼす効果

Effects of the Optimization of Rapid Mixing on Finished Water Turbidity in Direct Filtration

北見工業大学 フェロー 海老江 邦雄 (Kunio Ebie)
 同大学大学院 学生員 ○川 口 倫由 (Toshiyuki Kawaguchi)
 同大学大学院 学生員 浅野 優 (Masaru Asano)
 同大学大学院 学生員 水森 豊 (Yutaka Mizumori)
 同大学大学院 学生員 樋口 真也 (Shinya Higuchi)

1 ま え が き

我が国では、1,996年に発生したクリプトスポリジウム原虫の蛇口水からの流出事故が契機となり、濁質粒子の分離効率の向上が緊急の課題となっている。そのため、低濁原水を消毒のみの処理で給水している多くの浄水場は、直接ろ過法などの転換を急いでいる。直接ろ過法は、急速ろ過法に組み込まれているフロック形成池及び薬品沈澱池を持たないため、急速攪拌槽の運転条件、及び凝集剤の選定及び注入条件は、その後にくるろ過の処理性、即ち、粒子の分離効率に大きく影響する。

松井ら¹⁾は、最適な急速攪拌時間をカオリンの一次粒子が減少し始める時間 (T_A (sec)) から微フロックの破壊が優位になる時間 (T_B (sec)) の間にあると考え、急速攪拌強度、凝集剤注入量及び原水濁度が、それらの時間に与える影響をPDA及び微粒子カウンターを用いて検討し、次の2つの式を示した。

$$T_A = \frac{a}{C_{Al}^x \times C_K^y \times G_R^z} \quad T_B - T_A = \frac{b}{G_R(C_K + cC_{Al})} \quad \dots 1)$$

ここで、 C_{Al} : Al 濃度 (mg/L)、 C_K : カオリン (mg/L)、 G_R : 急速攪拌強度 (sec^{-1})、及び a, b, c, x, y, z : 係数。

我が国で多用される急速攪拌の強度 (G_R 値) 及び時間 (T_R 値) については、ポリ塩化アルミニウム (PAC) が主用されている現在においても、硫酸アルミニウム (Alum) 使用時と同様の弱い G_R 値 ($100 \sim 200 \text{sec}^{-1}$)、短い T_R 値 ($60 \sim 600 \text{sec}$) が一般に採用されている。しかしながら、Alum よりも分子量が大きい PAC に適する攪拌条件は、Alum 使用時より高強度で長時間になることが報告されている²⁾。

本論では、凝集剤 PAC を用いた場合における注入率及び G_R 値の向上が、(1) 微粒子の集塊化及び微フロックの破壊に及ぼす効果 (回分実験)、(2) ろ過性能 (ろ過水濁度及び損失水頭発生量) に及ぼす効果 (連続実験) について検討した後、(3) 直接ろ過に最適な急速攪拌時間の定式化を試みた。

2 実験及び解析の方法

2-1 原水及び凝集剤

実験には、北見工業大学水道水 (深井戸水) にカオリン粒子 (関東化学製) を加えて濁度を 1mg/L に調整した原水を用いた。その原水の粒径分布を表1に掲げる。また、凝集剤としては PAC を用いた。

2-2 実験装置

回分実験には、矩形水槽 (縦 $200 \text{mm} \times$ 横 $200 \text{mm} \times$ 高さ 300mm)、攪拌装置 ($10 \sim 800 \text{rpm}$ 、3 段の攪拌翼、最大 G_R 値 $3,000 \text{sec}^{-1}$) を、連続実験には、図1に示す直接ろ過

表1 カオリン 1mg/L 中の粒子径別の個数

粒径 (μm)	個数 (個/mL)	割合 (%)
1~3	20582.75	76.74
3~7	5288.32	19.72
7~10	684.36	2.55
10~15	236.78	0.88
15~20	20.57	0.08
20~30	9.73	0.04
30~	3.03	0.01
合 計	26825.54	100.000

法を採用した装置を使用した。いずれの装置においてもハイブリット微粒子計 (富士電機製: 型式 ZVM) を接続

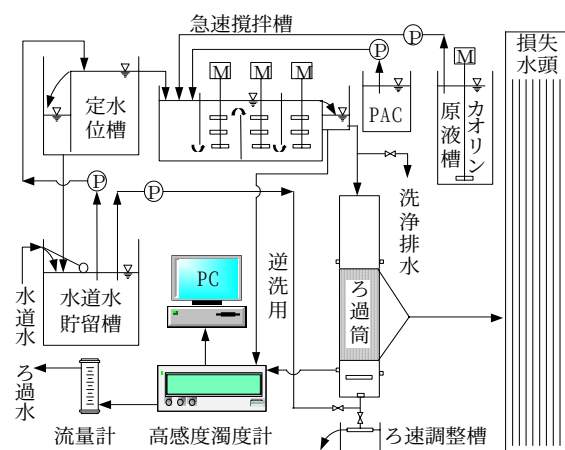


図1 直接ろ過実験装置

し、急速攪拌槽内の微粒子数を測定した。なお、 G_R 値は次式から算出した。

$$G_R = ((C \times A \times v^3) / (2 \times \gamma \times V))^{1/2} \quad \dots 2)$$

ここで、 C : 攪拌係数 (1.5)、 A : 攪拌翼面積 (m^2)、 v : 攪拌翼の周辺速度 (m/sec)、 γ : 動粘性係数 (m^2/sec)、及び V : 矩形水槽の有効容量 (m^3)。

2-3 実験の条件及び方法

回分実験においては、前述の攪拌槽に水温 20°C に調整した原水を 8 リットル入れて所定の急速攪拌 (G_R 値 $150 \sim 1,500 \text{sec}^{-1}$) を行う。その後、所定量の PAC (注入率 $2.5 \sim 10 \text{mg/L}$) を注入する。PAC 注入後における試料水中の微粒子の個数変化 (測定径範囲 $1 \sim 3$ 、 $3 \sim 7$ 、 $7 \sim 10$ 、 $10 \sim 15$ 、 $15 \sim 20$ 、 $20 \sim 30$ 及び $30 \mu\text{m}$ 以上) を、 10 秒間隔で 60 分間計測した。凝集 pH は、 0.1N-NaOH 溶液を用い、 6.8 ± 0.1 の最適凝集領域に調整した。連続実験においては、原水 (水温 13.5°C) に所定量の PAC (注入率 $1 \sim 10 \text{mg/L}$) を注入後、所定の急速攪拌 (G_R 値 $150 \sim 1,500 \text{sec}^{-1}$ 及び T_R 値 $1 \sim 10 \text{min}$) を施した後、十分に急速攪拌槽内水質が安定 (滞留時間の 10 倍) となった後の試料水の粒子個数 (測定径範囲は回分実験と同様) を計測

した。この試料水を珪砂(有効径:0.61mm、均等係数 1.39 及び比重 2.60)を厚さ 600mm(空隙率 44.3%)に充填したろ過筒へ流入させ、ろ速 120m/日で 18 時間のろ過を行った。微粒子アナライザー付きの高感度濁度計(富士電機製:型式 ZYU)でろ過水中の濁度及び微粒子個数(測定径範囲 1~3、3~7 及び 7 μm 以上)を 1 分間隔で計測した。また、損失水頭については、ガラス管マンノメーターを用いてろ層 5 cm 毎の値を測定した。

2-4 解析方法

(1) 集塊化開始時間

図 3 は、 G_R 値 150sec^{-1} 及び PAC 注入率 5 mg/L の回分実験における T_R 値の延長に伴う粒径区分ごとの微粒子個数変化を示している。同図から、PAC の注入後の微粒子

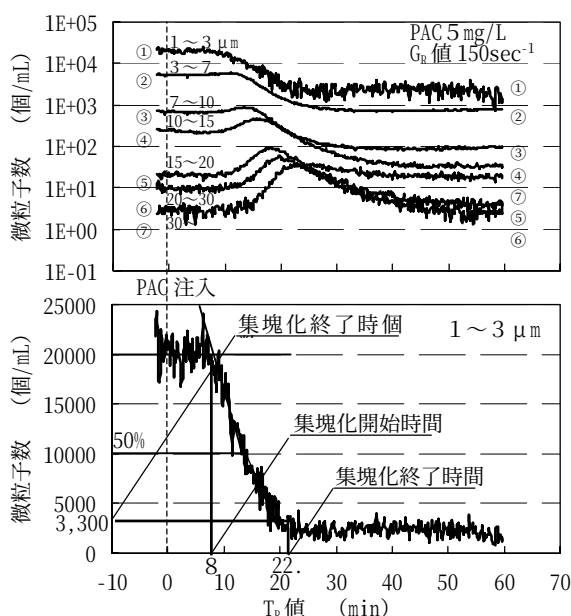


図 3 集塊化の開始時間及び終了時間の解析方法

数の経時変化を見ると、最初に 1~3 μm の微粒子個数が減少し、それに続いて次第に大きな微粒子径が減少していく様子が観察される。そこで、この径 1~3 μm の微粒子を未だ、凝集していないカオリンの一次微粒子と考え、その微粒子数が減少し始める時間を集塊化開始時間とした。尚、同時間は、下の図中に示すように凝集前の粒径を示す線と 50%減少点を通る接線との交点における時間とした。

(2) 微粒子減少及び集塊化終了の時間

図 3 上より、それぞれの粒子径は、集塊化開始時間が経過した後にある一定の時間が経過すると微粒子の減少率が低下し安定化していくことが分かる。そこで、同図下のように、安定化する時間を集塊化終了時間とし、その時の個数を集塊化終了時の個数とした。同時間は 50%減少点を通る接線と凝集後の粒径を示す線との交点の時間とし、その交点の個数を集塊化終了時の個数とした。また、微粒子減少時間 T_F は次式より算出した。

$$T_F = \text{集塊化終了時間} - \text{集塊化開始時間} \quad \cdots 3)$$

(3) 劣化開始時間

図 4 に G_R 値 $1,000\text{sec}^{-1}$ 及び PAC 注入率 5 mg/L の場合の微粒子個数変化を示す。同図のように、高 G_R 値では、一旦は形成された微フロックが時間の経過と共にせん断破

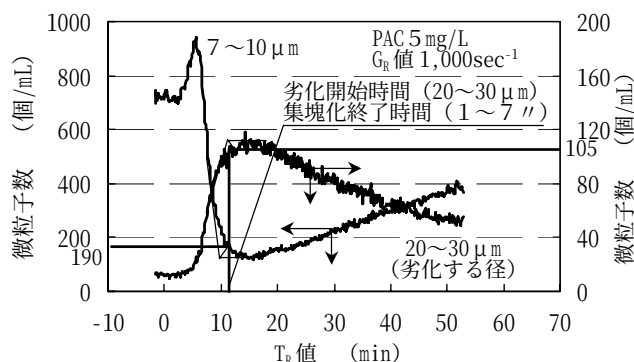


図 4 劣化開始時間の解析方法

壊され、小型の粒子が増加していく様子が観察される。そこで、形成され増加した微フロックが破壊により減少し始める時間を劣化開始時間とした。また、破壊の影響を受けて微粒子が増加する場合の集塊化終了時間は同図中に示すように計測した。

3 実験結果及び考察

3-1 PAC 注入率及び G_R 値の上昇に伴う凝集の進行

図 5 は、浄水場で一般的な G_R 値 (150sec^{-1}) を採用し、PAC 注入率を増加させた場合の集塊化の開始及び終了の時間、及び微粒子減少時間の動きの一例 (1~3 μm) を示している。同図から、それらの時間は、松井ら¹⁾らの

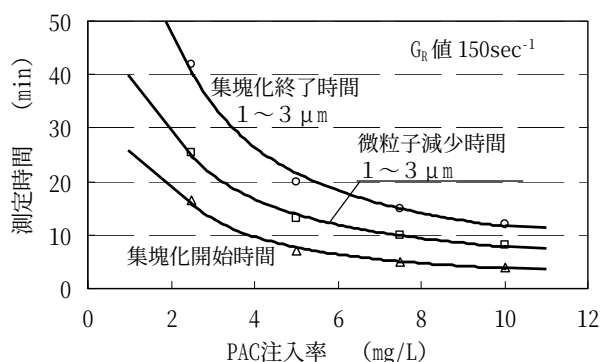


図 5 PAC 注入率増加に伴う集塊化の開始及び終了の時間、及び微粒子減少時間

指摘通り、PAC 注入率が高いほど早くなっていることが確認された。次に、PAC 注入率 2.5、5.0、7.5 及び 10 mg/L における同径の集塊化終了時の個数は、それぞれ 3,300 個/mL(低減率 84.0%)、3,200(同 84.5)、3,000(同 85.4) 及び 2,750(同 86.6) となっており、いずれの PAC 注入率においてもほぼ類似の値を示した。これらの傾向は、他の粒子径についても同様であった。このように、通常の攪拌強度下で PAC 注入率を上昇させる方法は、集塊化の開始及び終了の時間、及び微粒子減少時間を短縮させるが、集塊化終了時における個数の低減率は低下している。これは、通常の攪拌強度のもとでは、注入された凝集剤が瞬時に大きな凝析物に集塊化し、それらが微粒子を取り込む SWEEP 型凝集が卓越する。即ち、PAC 注入率を上昇させると大きな凝析物は生成されるが、微粒子を捕捉する表面積は殆ど増えていないものと考えられる。そこで、注入後の凝集剤を素早く分散させて吸着・不安定型の凝集割合を増やし凝析物の集塊化を遅延させる方法²⁾、即ち、 G_R 値を上昇させて実験を行った。表 2 は、

PAC 注入率を 5 mg/L に固定し、 G_R 値を 150 から $1,500 \text{ sec}^{-1}$ まで上昇させた場合における集塊化終了時間及びそこにおける個数を示している。予め、集塊化開始時間は、松

表2 G_R 値の上昇に伴う集塊化終了時の個数 (個/mL) 及び集塊化終了及び劣化開始時間 (min)

粒子径 (μm)	G_R 値 (sec^{-1})				
	150	450	750	1,000	1,500
1～3	3,200 (20.0)	2,950 (12.0)	2,650 (8.0)	1,600 (7.0)	2,530 (6.5)
3～7	1,180 (22.0)	750 (14.0)	610 (11.5)	680 (11.0)	1,250 (10.0)
7～10	150 (24.0)	75 (15.0)	90 (12.5)	190 (11.5)	675 (10.0)
10～15	60 (29.0)	70 (18.5)	180 (13.5)	380 (11.5)	740 (10.0)
15～20	13 (31.0)	25 (20.0)	103 (13.5)	160 (11.5)	135 (10.0)
20～30	7 (33.0)	37 (20.0)	100 (13.5)	103 (11.5)	48 (10.0)
30～	20 (41.0)	58 (20.0)	45 (13.5)	21 (11.5)	13 (10.0)

(注) 1、括弧内は集塊化終了時間を示す。2、太字は他の G_R 値と比較し集塊化終了時の個数が最も減少した粒子径を示す。3、太枠は劣化の影響を受け粒子数が増加した粒子径を示す。4、色付セルは劣化した粒子径を示す。

井ら¹⁾の指摘通り、 G_R 値を上昇させるほど早くなっていることを確認した。次に、同表から集塊化終了または劣化開始時間は G_R 値の上昇に伴い短縮していること、また、集塊化終了時の個数は径 1～3、3～7、7～10 及び 10 μm 以上の微粒子については、それぞれ G_R 値 1,000、750、450 及び 150 sec^{-1} で集塊化終了時の個数が最低となっている。この傾向は、PAC 注入率に関わらないことが確認されている。これは、高 G_R 値ほど凝集剤が素早く分散されるため、小径の微粒子数は減少するが、反面、形成された微フロックは強い水流のせん断力によって破壊され、微粒子数が増加するためと考えられる。一例を示すと、 G_R 値 $1,000 \text{ sec}^{-1}$ では、一旦は形成された 15～30 μm の微フロックは破壊されて 3～15 μm の微粒子数が増えていくが、 750 sec^{-1} では 20～30 μm の微フロックが破壊されて 7～10 μm の粒子数が増えていることから、高 G_R 値ほど、小径フロックまで破壊の影響を受けることが分かった。このように、 G_R 値を上昇させることによって集塊化終了時間は短縮するが、集塊化終了時の個数が最低となる微粒子径は G_R 値によって異なることが分かった。

3-2 ろ過性能に及ぼす PAC 注入率及び G_R 値の上昇

連続実験装置を用い、通常の攪拌条件 (G_R 値 150 sec^{-1} 、 T_R 値 1 min) で PAC 注入率を増加させた場合のろ過結果を、表 4 に掲げる。これに先立ち、同条件の急速混和槽内における微粒子数を調べたところ、微粒子数は PAC 注入率増加に伴って殆ど変化していなかった。次に、同表よりろ過結果を見ると、PAC 注入率の増加に伴って、0～1、9～10 及び 17～18 時間、いずれのろ過時間においても、ろ過水濁度は改善され、損失水頭は上昇していくことが分かる。0～1 時間における各粒子径における除去率は、1～3、3～7 及び 7 μm 以上の微粒子は、PAC 1mg/L の場合にはそれぞれ 32.47、76.15 及び 98.63% であるのに対し、PAC 10mg/L の場合には、それぞれ 97.81、99.19 及び 99.75% となっている。これらのことから、低い PAC 注入率の場合にも 7 μm 以上の微粒子の除去率は極めて高いこと、及び PAC 注入率の上昇が 1～7 μm の微粒子

表 4 通常の急速攪拌 (G_R 値 150 sec^{-1} 及び T_R 値 1 min) におけるろ過結果

PAC (mg/L)	時間 (hrs)	濁度 (mg/L)	平均粒子数 (個/mL)			損失 水頭 (cm)
			1～3 (μm)	3～7 (μm)	7～ (μm)	
1	0-1	0.231	13,899	1,265	11	5
	9-10	0.021	973	72	0	
	17-18	0.013	593	38	0	
5	0-1	0.054	2,614	227	4	42
	9-10	0.003	55	1	0	
	17-18	0.002	36	3	0	
10	0-1	0.042	450	43	2	101
	9-10	0.001	27	3	0	
	17-18	0.001	36	3	0	

(注) 1、損失水頭は、ろ過 18 時間後の値を示す。

の除去率を上昇させ、それに伴って濁度除去率を高くしていることが分かった。これらのことから、浄水場で一般に採用される急速攪拌条件で PAC 注入率を上昇させる方法では、急速混和槽内の微フロック形成が不十分となるため、ろ層内で微フロック形成が進行しているものと考えられる。その際、集塊化していない小型の微粒子はろ過水中へ漏出することとなり、PAC 注入率の割には体積が大きな微フロックはろ層表面に抑留されて、損失水頭の上昇に関わっていると考えられる。前述したように PAC 注入率を上昇させたとしても、集塊化終了時の個数が殆ど変わらないことから、損失水頭の発生量を抑えつつ直接ろ過の濁度除去率を高めるためには、急速混和槽内における 1～7 μm の微粒子数をいかに低減化させるかが重要となる。続いて、 G_R 値を上昇させた場合のろ過結果について見ていくこととする。図 7 及び表 5 は、PAC 注入率を 5 mg/L と固定し G_R 値及び T_R 値を上昇させた場合における急速混和槽内の微粒子数 (1～7 μm) の変化とろ過結果とを示している。まず、急速混和槽内におけ

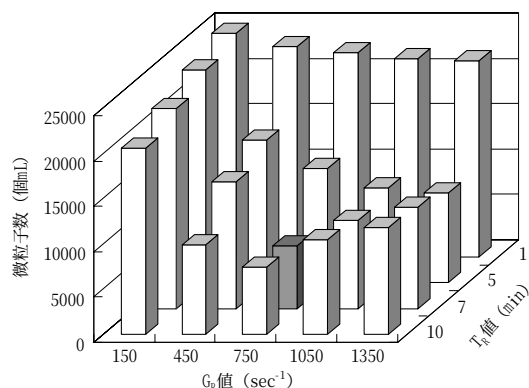


図 7 急速混和槽内における G_R 値及び T_R 値の上昇に伴う 1～7 μm の微粒子数の動き

る微粒子数は、 G_R 値及び T_R 値の上昇に伴って、 G_R 値 450 sec^{-1} までは G_R 値及び T_R 値の上昇に伴って次第に低下している。それに対し、 G_R 値を 750 sec^{-1} に上げると、 T_R 値 7 min 辺りで最低値を示し、 T_R 値を更に長くすると、前述したような微フロックの破壊が優位になるためか、次第に微粒子数は増加していく。 G_R 値を更に上昇させると、集塊化終了時間が短くなるため、次第に短い T_R 値で微粒子数が最低値をとっている。これらの組み合わせの中で、急速混和槽内における 1～7 μm の微粒子数が最少となったのは、 G_R 値 750 sec^{-1} 、 T_R 値 7 min の組み合わせであった。この結果と表 10 に示すろ過水濁度の処理性とは、大きな関連が見られた。即ち、 G_R 値を上昇させ

表5 G_R 値及び T_R 値上昇に伴うろ過の処理性
(PAC: 5mg/L, G_R : 150~1,050sec⁻¹)

G_R (sec ⁻¹)	T_R (min)	STR (-)	初期漏出期 (0~1hr)			1~18hr	損失 水頭 (cm)
			ピーク 濁度 (度)	1hr 後 濁度 (度)	平均 濁度 (度)	平均 濁度 (度)	
150	1	3.02	0.091	0.024	0.051	0.004	42.1
	5	2.77	0.087	0.013	0.043	0.002	36.7
	7	2.60	0.084	0.011	0.039	0.002	35.8
	10	2.50	0.081	0.010	0.037	0.002	34.9
450	1	2.81	0.082	0.017	0.044	0.002	36.5
	5	2.15	0.057	0.008	0.031	0.001	25.8
	7	1.89	0.053	0.006	0.027	0.001	24.1
	10	1.75	0.053	0.005	0.025	0.001	23.3
750	1	2.50	0.076	0.011	0.037	0.002	32.2
	5	1.71	0.048	0.006	0.024	0.001	19.4
	7	1.51	0.046	0.005	0.022	0.001	18.2
	10	1.82	0.049	0.007	0.026	0.002	17.3
1,050	1	2.50	0.073	0.011	0.037	0.002	29.3
	5	1.56	0.048	0.005	0.023	0.001	17.9
	7	1.67	0.049	0.007	0.024	0.001	16.4
	10	2.09	0.053	0.009	0.030	0.003	15.1

ると同時に T_R 値を延長させた際のろ過水濁度の動きは、 G_R 値 150 及び 450sec⁻¹では T_R 値 10min まで、750sec⁻¹では 7min まで低下して最低値をとっている。しかしながら、 G_R 値を更に上昇させて 750sec⁻¹にすると T_R 値 10min で、また、1,050sec⁻¹では 7min 辺りから次第に漏出する微粒子数が増加している。また、損失水頭の発生量についても、 G_R 及び T_R 値を上昇させると抑制されている。このように、急速混和槽内における 1~7 μm の微粒子数が最低値となる撹拌条件に設定すると損失水頭を抑制しつつ、ろ過水濁度を改善することが出来る。

3-3 直接ろ過の最適急速撹拌時間の定式化

以上のことを踏まえて、直接ろ過において最適急速撹拌時間を径 1~7 μm の微粒子の集塊化終了時間と考え、松井らによって与えられている関数を用いて定式化を試みた。ここで、微粒子減少時間の式を破壊による微粒子数の増加を考慮し、以下のように変換して用いた。

$$T_A = \frac{1.21 \times 10^3}{C_{Al}^{1.19} \times G_R^{0.52}} \quad \dots\dots 4)$$

$$T_B - T_A = \frac{5.68 \times 10^4}{G_R^{0.48} (1 + 21.1 C_{Al})} \quad \dots\dots 5)$$

ここで、 T_A : 集塊化開始時間 (sec)、 T_B : 集塊化終了時間 (sec)、 C_{Al} : Al 濃度 (mg/L)、 C_K : カオリン濃度 (mg/L) 及び G_R : 撹拌強度 (sec⁻¹)。

集塊化終了時間及び微粒子減少時間の計算値と実験値

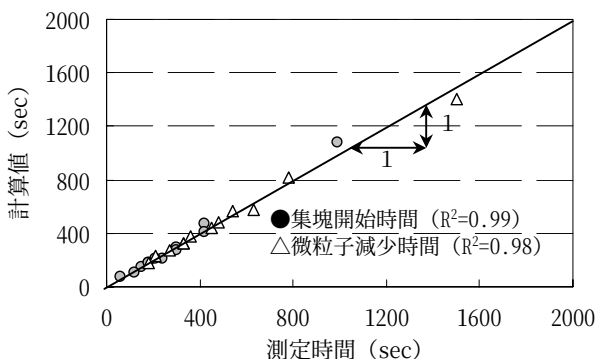


図8 測定値と計算値との相関性

との相関関係を図8に示す。同図から計算値と実験値とはよく一致していることが分かる。

浄水場で採用されている G_R 値 150sec⁻¹ の条件下で集塊化終了時間を 1min にするために必要な PAC 注入率は、上述の式から約 100mg/L となる。しかしながら、PAC 注入率の上昇は、ろ過池における損失水頭の発生量の増加に繋がるため、急速撹拌強度を今回の実験結果のように 1~7 μm の微粒子数が最低となる G_R 値への設定が直接ろ過における処理性向上にとって極めて重要であることが分かった。

4 ま と め

1) 浄水場で一般に採用されている急速撹拌のもとで、PAC 注入率を 2.5~10mg/L まで上昇させると、集塊化開始及び集塊化終了の時間が短縮することを明らかにした。また、集塊化終了時における粒子個数は、いずれの PAC 注入率においてもほぼ類似の値を示した。

2) PAC 注入率を固定して G_R 値を上昇させると、集塊化開始及び集塊化終了の時間が短くなるを明らかにした。

また、径 1~3、3~7、7~10 及び 10 μm 以上の微粒子の場合、それぞれ G_R 値 1,000、750、450 及び 150sec⁻¹ において集塊化終了時の個数が最低となることを示した。

4) 浄水場で一般に採用される急速撹拌では、微フロック形成が不十分であるため、ろ層内で微フロック形成が継続して進行する。そのような場合、注入率の割には体積が大きな微フロックがろ層表面に抑留されるため、損失水頭を上昇させていると考えられる。

5) ろ過水濁度は、急速混和槽内における 1~7 μm の微粒子数と関連性が強く、 G_R 値 150 及び 450sec⁻¹では T_R 値 10min まで、750sec⁻¹では 7min まで低下して最低値をとり、 G_R 値を更に上昇させて 750sec⁻¹にすると、 T_R 値 10min で、また 1,050sec⁻¹では 7min 辺りから、微フロックの破壊が優位になるためか次第に微粒子数は増加していく。

6) 直接ろ過においてろ過水濁度が最低となる急速撹拌時間は 1~7 μm の微粒子の集塊化終了時であると考え、集塊化開始時間 T_A 及び微粒子減少時間 $T_B - T_A$ は式 4) 及び 5) のように定式化できる。

5 謝 辞

一連の実験に協力いただいた北見工業大学工学部土木開発工学科の杉山雄亮君に感謝の意を表す。

《 参 考 文 献 》

1) Yoshihiko Matsui, Akira yuasa, Yuji Furuya, and Tasuku kamei: Dynamic Analysis of Coagulation with Alum and PACl, Jour, AWWA, Vo.190, pp.96~106, (1998)

2) 海老江 邦雄、東 義洋、山木 暁: 凝集沈澱の処理性改善に関する基礎的研究 - G_R 値の上昇による濁度と STI の低減化 -, 水道協会雑誌、第 816 号、pp.11~21、2002 年

3) 松井 佳彦、小川 和延、丹保 憲仁: PDA と微粒子カウンターを用いた最適急速撹拌条件に関する研究、水道協会雑誌、第 715 号、pp.42~49、1994 年

4) 松井 佳彦、丹保 憲仁: 急速撹拌時の PDA 出力に基づく成長フロックの沈降速度の評価、水道協会雑誌、第 688 号、pp.20~25、1992 年