

G_R 値の適正化による沈澱処理水の残留濁質と凝集剤量の低減化

Reducing Turbidity and Amount of Coagulant in Settled Water Through Enhancing G_R-values

北見工業大学工学部 フェロー 海老江 邦 雄 (Kunio Ebie)
 北見工業大学大学院 学 生 員 ○山 木 暁 (Satoru Yamaki)
 同 上 学 生 員 東 義 洋 (Yoshihiro Azuma)
 同 上 学 生 員 川 口 倫 由 (Toshiyuki Kawaguchi)

1. ま え が き

わが国の急速攪拌は、設計指針値に基づき、G_R 値 100～200s⁻¹、T_R 値 1～5min 程度の比較的弱く、短い条件下で行われている。多くの浄水施設においては、沈降分離が容易な粗大フロックの形成を目的に、過剰ともいえる凝集剤の注入が行われている。これは、凝集剤を過剰注入すれば、凝析集塊物によって浮遊粒子を取り込む Sweep 型の凝集が圧倒的に卓越して、粒子の分離効率が向上すると理解されているためである。しかしながら、Sweep 型の凝集を目指した凝集沈澱処理は、汚泥発生が増加するだけでなく、処理水に残留した凝集剤が砂ろ過池を短時間で閉塞させるなどの諸問題を引き起こすことになる。

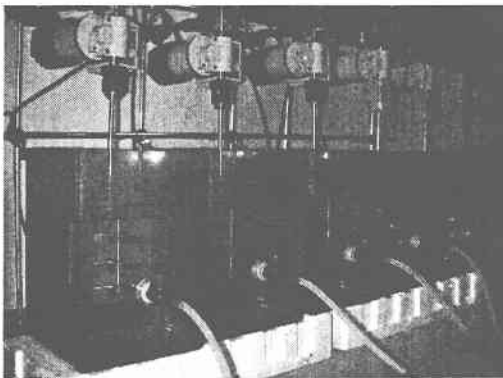
著者らは、沈澱処理水水質のレベルアップと凝集剤注入率の低減化には、急速攪拌時における G_R 値の適正化、すなわち、G_R 値を上昇させて凝集剤の分散性を向上させることが重要と考えている。

本論では、広範な G_R 値の下でカオリン模擬原水を用いた凝集実験を行うことにより、Al 系および Fe 系凝集剤の適正な G_R 値を明らかにし、沈澱処理水に残留する濁度および凝集剤量を低減化しうることを示した。また、沈澱処理水水質のレベルアップは、沈澱処理後に配置される砂ろ過池の損失水頭の抑制につながると考え、損失水頭の発生に寄与する沈澱処理水中の因子を二元配置法による分散分析で明らかにした。その結果、いくつかの知見が得られたので、ここに報告する。

2. 実 験

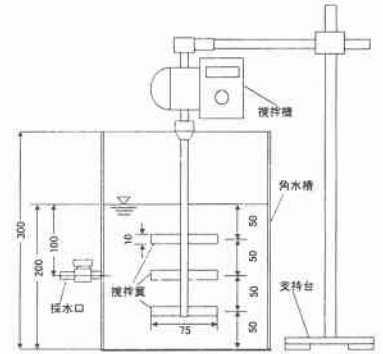
1) 凝集実験装置および攪拌 G 値の算出

本論では、通常のジャーテストで採用する攪拌強度よりも更に高い攪拌強度下で検討することを目的に、写真－1と図－1に示す凝集実験装置を新規に製作した。本装置は、水槽(容量 8 L)と攪拌機(回転数：10～800rpm



写真－1 凝集実験装置

の任意値に設定可能)とから成り、高い攪拌強度(最高値：3000s⁻¹ 程度)での凝集実験が可能である。攪拌翼(30mm×10mm×6枚)は攪拌軸に同一形状のものを等間隔で3段に取り付け、水槽内を均一に攪拌できるようになっている。なお、

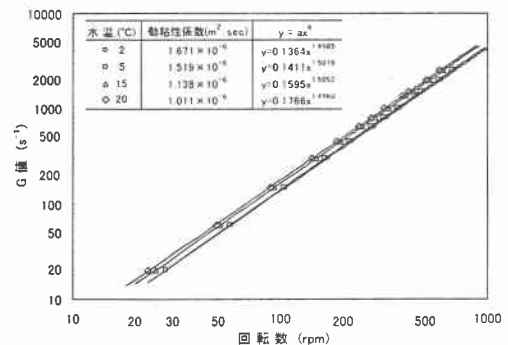


図－1 凝集実験装置

水槽に 8L の水を容れた際の攪拌機の回転数(rpm)と次式(1)で算出される攪拌 G 値(s⁻¹)との関係は図－2に示す通りである。

$$G = \sqrt{\frac{C \cdot A \cdot v^2}{2 \cdot \gamma \cdot V}} \dots\dots (1)$$

ここで、C:攪拌係数(1.5を採用)、A:攪拌翼の面積(m²)、v:攪拌翼の周辺速度(m/sec)、γ:動粘性係数(m²/sec)、V:攪拌槽容量(m³)



図－2 攪拌機の回転数と G 値の関係

2) 実験方法および条件

原水としては、表－1に示す北見工業大学の水道水を定温室内で 20±0.1℃に調整したものに、表－2の粒径分布を持つカオリンを所定濃度となるように加えたものを使用した。凝集剤としては、Al 系凝集剤である硫酸アルミニウム(以下、Alum)とポリ塩化アルミニウム(PAC)、Fe 系凝集剤である塩化第二鉄(FeCl₃)と鉄：シリカのモル比が 1:3 のポリシリカ鉄凝集剤(PSI-3)の 4 種類を用いた。

凝集実験については、上述の原水 8L に凝集剤を注入した後、急速攪拌(G_R 値 60～2500s⁻¹、T_R 値 300sec)、緩速攪拌(G_S 値 20s⁻¹、T_S 値 1200sec)、40min 静置(表面負

表－1 北見工業大学水道水水質（深井戸水）

項 目	測 定 値	項 目	測 定 値
水 温 (°C)	9.5	蒸 発 残 留 物 (mg/L)	231
pH 値 (—)	6.5	塩 素 イ オ ン (mg/L)	16.1
濁 度 (mg/L)	<1.0	KMnO ₄ 消 費 量 (mg/L)	0.5
アルカリ度 (mg/L)	57	全 鉄 (mg/L)	0.15
硬 度 (mg/L)	74.7	マ ン ガ ン (mg/L)	ND

表－2 カオリン 1mg/L 注入時の
粒子数(個/mL)とその割合(%)

サイ ズ (μm)	0.5～1.0	1.0～3.0	3.0～7.0	>7.0
個 数 (個/mL)	1,137,028	43,656	5,621	243
割 合 (%)	95.83	3.68	0.05	0.02

荷率 0.25cm/min)の条件下で行い、上澄水を採水して水質分析に供した。なお、Tr 値、Gs 値および Ts 値をいかに設定するかによって、凝集沈澱の処理性が影響されることは勿論である。ここでは、予め行った確認実験の結果から適当と判断される上述の値を採用した。一方、静置時間については、設計指針値として一般的に用いられてきた表面負荷率として 0.4～0.9cm/min では沈降する濁質粒子が残留していたので、粒子の分離性能をより正確に評価するために、処理水濁度がほぼ安定する表面負荷率として 0.25cm/min を採用した。凝集 pH 値に関しては、1N-HCl と 0.1N-NaOH とを用いて、Al 系凝集剤の場合には pH6.8±0.1、Fe 系凝集剤の場合には pH6.0±0.1 に設定した。Al 濃度はオキシン法で、Fe 濃度は 1,10-フェナントロリンによる吸光光度法で定量した。

3) 吸引ろ過試験および STI 値の算出

吸引ろ過試験の手順では、写真－2 に示す吸引ろ過装置(減圧容器、減圧用フィルターホルダー、吸引ポンプ：到達真空度 26.7kPa)を用いて、試料 500ml のろ過



写真－2 吸引ろ過装置

時間を測定した。この際のメンブランフィルターの孔径は 0.45μm であった。

STI(suction time index)値は、ろ過抵抗の指標になるものであり、以下の式から算出される。なお、基準とした蒸留水(20±0.1°C)の吸引時間は、63sec であった。

$$\text{STI 値(無次元)} = \frac{\text{試料水 500mL の吸引時間(sec)}}{\text{蒸留水 500mL の吸引時間(sec)}}$$

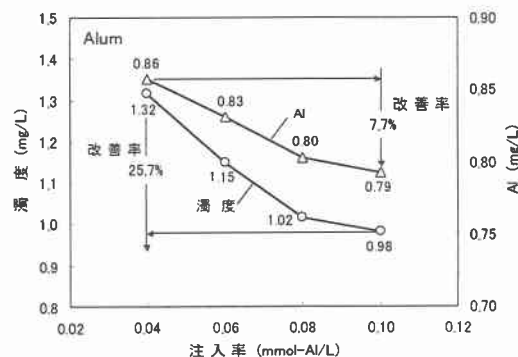
3. 結果および考察

3.1 従来の G_R 値による凝集沈澱の処理性および STI 値

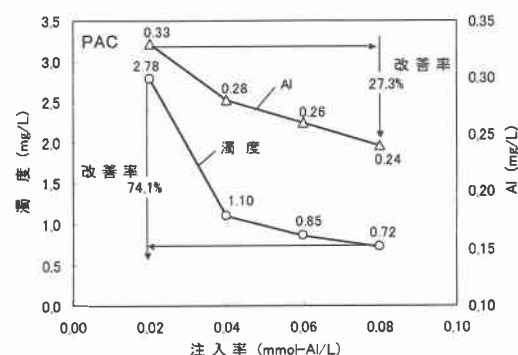
G_R 値 150s⁻¹で、カオリン濁度 5mg/L に試料を調整し、凝集剤注入率を順次増加させ、凝集試験を行った。図－3～図－6 は、沈澱処理水に残留した濁度および凝集剤量の動きを、凝集剤として Alum、PAC、FeCl₃、PSI-3 を用いた場合について示してある。同図の濁度を見ると、

いずれの凝集剤の場合にも、凝集剤注入率が高いほど低くなっている。また、凝集剤注入率を最低値から最高値に増加させた場合の処理水濁度の改善率は、Alum で 25.7、PAC で 74.1、FeCl₃ で 84.6、PSI-3 で 55.7%となり、Alum の場合を除けば、比較的高い改善率が得られている。

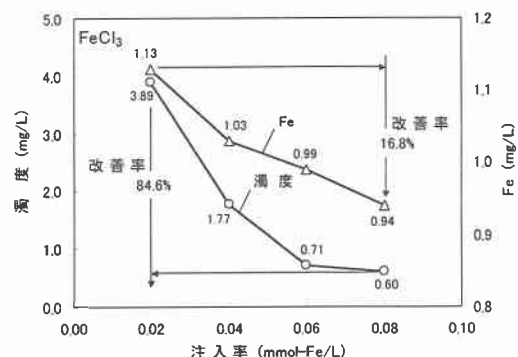
一方、凝集剤残留量(Al または Fe)は凝集剤注入率が高



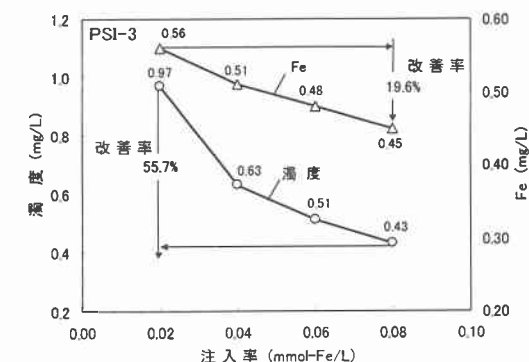
図－3 Alum の注入率に伴う処理性



図－4 PAC の注入率に伴う処理性



図－5 FeCl₃ の注入率に伴う処理性



図－6 PSI-3 の注入率に伴う処理性

い場合ほど低くなるが、処理水濁度ほど大きな改善効果は得られていない。すなわち、凝集剤注入率を最低値から最高値に増加させた場合の改善率は、Alum で 7.7、PAC で 27.3、FeCl₃ で 16.8、PSI-3 で 19.6% となっており、いずれの凝集剤も処理水濁度の改善率を大幅に下回っている。このことから、Gr 値 150s⁻¹ の凝集沈澱処理では、濁度は大幅に低下しているが、凝集剤の残留量は大幅には低下していない。

ついで、図-7で、それぞれの凝集剤を用いた場合の STI 値を見ると、FeCl₃ < Alum < PAC < PSI-3 であった。ここで注目すべきは、前述した沈澱処理水濁度の高低と STI 値とは一致せず、最も処理水濁度が低かった PSI-3 で STI 値が最大となっている点である。さらに、凝集剤注入率を最低値から最高値に増加させた場合の改善率は、いずれの凝集剤を用いた場合にも処理水濁度の改善率を大幅に下回っている。また、凝集剤残留量の改善率に近い値をとることが注目される。このことは、STI 値に大きく影響する因子が沈澱処理水中に残留する濁度ではなく凝集剤残留量であることを窺わせる。

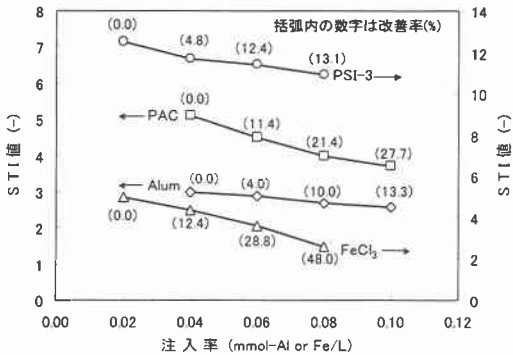


図-7 凝集剤の注入率の上昇に伴う STI 値の動き

3.2 二元配置法による STI 値に影響する因子の解析

本学水道水にカオリンおよび凝集剤を注入して、通常の沈澱処理水中に残留する程度の濁度および凝集剤量を持つ試料を調整し、以下に示す検討に用いた。

凝集剤の残留濃度が一定でカオリン濃度が増加した場合の STI 値を図-8で見ると、いずれの凝集剤の場合にも、濁度の増加に伴う STI 値の上昇は僅かである。一方、図-9のカオリン濃度が一定で凝集剤残留濃度が増加した場合には、凝集剤の残留濃度の増加に比例して STI 値が高くなっている。このことから、STI 値に大きく影響する因子は、沈澱処理水中の濁度ではなく凝集剤であることが示唆される。

そこで、PAC および PSI-3 の場合について、STI 値に影響する因子の解析を二元配置法で行った。すなわち、カオリン(0、1、2mg/L の3水準)と PAC 由来の Al または PSI-3 由来の Fe 濃度(0、0.2、0.4、0.6mg/L の4水準)とで繰り返し2回の実験を組み、各条件について急速攪拌(Gr 値 150s⁻¹、Tr 値 600sec)を行った後、直ちに試料水の吸引ろ過を行い、STI 値を算出した。

それらの STI 値に基づき、各因子の寄与率を二元配置法により解析した結果を表-3に示す。同表より、凝集剤残留量が STI 値の変動に及ぼす寄与率は、PAC の場合

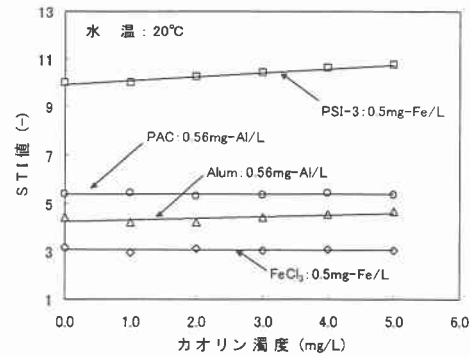


図-8 カオリン濁度に伴う STI 値の動き

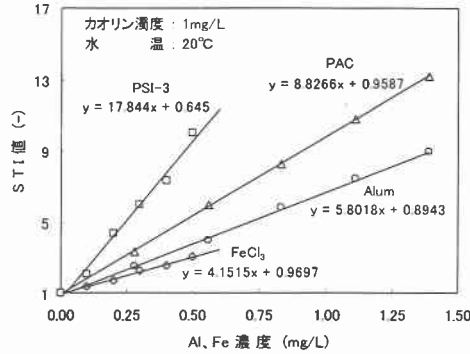


図-9 凝集剤残留量に伴う STI 値の動き

表-3 二元配置法による STI 値の分散分析

凝集剤	要因	要因変動範囲	自由度	変動	分散	寄与率
PAC	Al 濃度 (A)	0~0.6mg/L	3	146.29	48.76	99.90
	濁度 (T)	0~2.0mg/L	2	0.01	0.01	0.00
	A × T		6	0.10	0.02	0.06
	誤差		12	0.02	0.00	0.04
	計		23	146.42		100.00
PSI-3	Fe 濃度 (F)	0~0.6mg/L	3	363.30	121.10	98.13
	濁度 (T)	0~2.0mg/L	2	4.63	2.32	1.25
	F × T		6	2.18	0.54	0.58
	誤差		12	0.09	0.01	0.04
	計		23	370.20		100.00

99.9%、PSI-3 の場合 98.13% となった。また、Alum および FeCl₃ に関しても、PAC および PSI-3 の場合と同様な結果が得られた。したがって、STI 値の変動に大きく影響するのは、カオリン由来の濁質ではなく、凝集剤由来の Al または Fe であることが明らかとなった。

著者らは、沈澱処理水の水質をレベルアップすれば、沈澱処理後に配置される砂ろ過池の損失水頭を抑制できると考えている。これらの結果から、凝集剤残留量の低減化が非常に重要であることが分かった。

3.3 Gr 値の上昇による沈澱処理効率の改善

図-10は、カオリン濁度 5mg/L の原水を対象に、Gr 値を 60s⁻¹ から順次 2500s⁻¹ まで上昇させた場合における、沈澱処理水に残留する濁度、凝集剤量および STI 値を、凝集剤注入率ごとに示している。

まず、濁度の動きを見ると、いずれの凝集剤の場合にも、Gr 値の増加に伴い沈澱処理水の濁度は低下し、Alum の場合は 150 付近、FeCl₃ の場合は 300 付近、PAC の場合は 450 付近、PSI-3 の場合は 650s⁻¹ 付近において最低値をとっており、凝集剤の種類により最適な Gr 値が異なる点が注目される。濁度除去に対する最適 Gr 値の大きさは、Alum < FeCl₃ < PAC < PSI-3 となり、最適 Gr

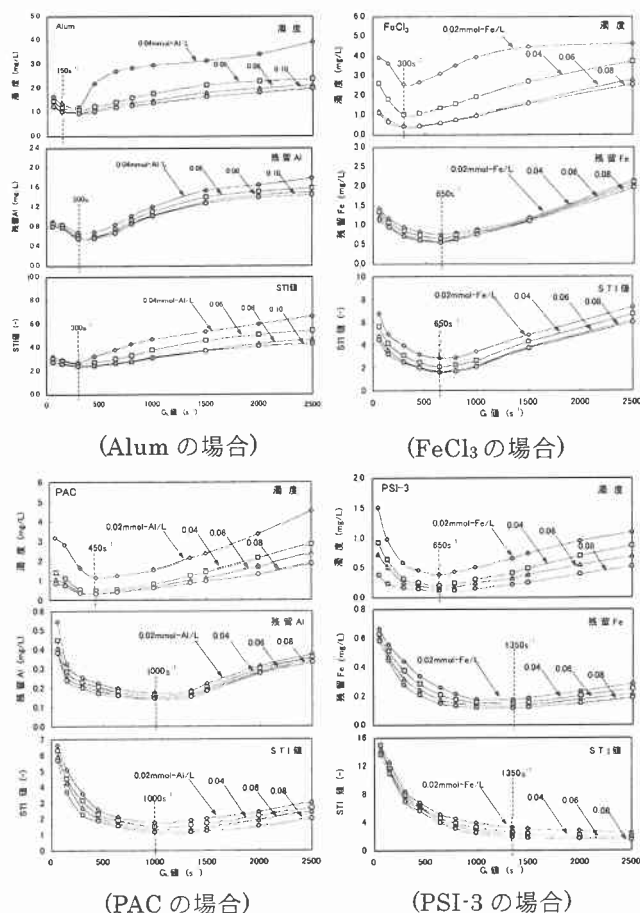


図-10 G_R 値に伴う残留濁度、凝集剤量および STI 値の動き

値は凝集剤分子量が大きいほど高くなっていることが注目される。

ついで、凝集剤残留量に関しては、濁度の場合と同様に G_R 値の上昇に伴って低下する。しかしながら、凝集剤残留量が最低となる G_R 値は、いずれの凝集剤の場合においても濁度除去に対する最適 G_R 値よりも高く、Alum で 300 付近、 $FeCl_3$ で 650 付近、PAC で 1000 付近、PSI-3 で $1350s^{-1}$ 付近となっている。この G_R 値の上昇に伴う凝集剤残留量の低減効果は、前述した G_R 値 $150s^{-1}$ で凝集剤注入率を順次増加させた場合よりも非常に高く、 G_R 値の上昇は濁度と同時に凝集剤注入率をも低減化させることがわかった。

一方、STI 値は、いずれの凝集剤の場合にも、凝集剤残留量が最低となる G_R 値において最低となる。このことは、前節で述べた二元配置法の分析結果を証明しており、凝集剤残留量の低減化が STI 値の低下につながることを明らかにしている。

以上の結果、 G_R 値の上昇は濁度除去および凝集剤残留量を大幅に低減化させる。また、凝集剤残留量をさらに低減化させるには、濁度除去の最適値を越えた高い G_R 値に設定することが必要である。

4. ま と め

今回、カオリン模擬原水を対象に、広範な G_R 値の下で凝集実験を行い、以下の知見を得た。

1) G_R 値 $150s^{-1}$ 下の凝集沈澱処理では、凝集剤注入率の

増加に伴う処理水濁度の低下は、凝集剤残留量の低下を上回った。

2) 二元配置法で STI 値に影響する因子を分析したところ、いずれの凝集剤を用いた場合にも、沈澱処理水中の濁度ではなく凝集剤量が大きく寄与していた。

3) G_R 値の上昇は、沈澱処理水濁度の大幅な低下につながる。また、濁度除去の最適 G_R 値は、Alum の場合に 150 付近、 $FeCl_3$ の場合に 300 付近、PAC の場合に 450 付近、PSI-3 の場合に $650s^{-1}$ 付近にあり、凝集剤ごとに最適 G_R 値が異なる。

4) G_R 値の上昇は、沈澱処理水の凝集剤残留量を大幅に低下させ、これに伴って STI 値も低下する。また、凝集剤残留量および STI 値が最低となる G_R 値は、Alum で 300 付近、 $FeCl_3$ で 650 付近、PAC で 1000 付近、PSI-3 で $1350s^{-1}$ 付近にあり、濁度除去の最適 G_R 値よりも更に高い値である。

5) G_R 値の上昇は沈澱処理水水質のレベルアップだけではなく、凝集剤注入率の低減化にもつながることがわかった。

5. あとがき

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上下水道工学研究室の卒論生、芹沢宏幸および佐久真光一の両君に感謝の意を表す。

【 文 献 】

- 1) A. Amirtharajah and K. M. Mills : Rapid-Mix Design for Mechanism of Alum Coagulation, Jour. AWWA, Vol.74, No.4, pp.210~216, 1982.4
- 2) 松井 佳彦・丹保 憲仁 : 急速攪拌時の PDA 出力に基づく成長フロクの沈降速度の評価、水道協会雑誌、688 号、pp.20~25、1992.1
- 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攪拌条件に関する研究、水道協会雑誌、715 号、pp.42~50、1994.4
- 4) 丹保 憲仁 : 水処理における凝集機構の基礎的研究 (III)、硫酸アルミニウムによる粘土系濁質の凝集、水道協会雑誌、365 号、pp.25~37、1965.2
- 5) 海老江 邦雄、李 富生、湯 浅 晶 : 改良ジャーテースト法による天然有機着色成分の直接ろ過性の評価、環境工学研究論文集、第 32 巻、pp.9~18、1995
- 6) 海老江 邦雄、東 義洋、浅 香 博則、山木 暁、萩 下 隆 : 凝集処理における攪拌条件の最適化に関する基礎的検討、第 52 回全国水道研究発表会講演集、pp.96~97、2001.5
- 7) 海老江 邦雄、東 義洋、山木 暁、李 宰昊 : 凝集沈澱処理に及ぼす急速攪拌条件の基礎的検討、平成 13 年度全国土木学会第 56 回年次学術講演集、土木学会 CD-ROM、VII-232、2001.10
- 8) Camp, T. R. : Flocculation and Flocculation Basin, Proc. ASCE, Vol.79, No.283, pp.1~18, 1955