

急速攪拌の適正化による PAC・有機性ポリマーを併用する二段凝集法の処理性改善

Improving Treatability of Turbidizing Materials by Two Steps Coagulation
Using PACI and Nonionic Organic Polymer Through Optimization of the Rapid-Mix Conditions

北見工業大学工学部 フェロー 海老江 邦 雄 (Kunio Ebie)
同 上 学生員 樋口 真也 (Shinya Higuchi)
同 上 学生員 安藤 直哉 (Naoya Ando)
同 上 学生員 川口 倫由 (Toshiyuki Kawaguchi)

1. ま え が き

有機性ポリマー（以下、ポリマー）は、諸外国では凝集助剤や過助剤として古くから浄水処理に多用されてきた。それに対し、我が国では平成12年に使用が解禁されたが、その後の使用実績はまだまだ極めて僅かである。

ポリマーを凝集助剤として使用する場合、急速攪拌槽にPACなどの無機凝集剤と同時に注入するのが一般的である。しかしながら、それら凝集剤の凝集における作用機序は異なるから、図1に示すように、急速攪拌槽を直列二段に配置し、前段でPACなどの無機凝集剤による初期粒子の凝集と微フロック形成とを進行させた後、後段でポリマーによる微フロックの架橋作用を促進させる方法、即ち、二段凝集法が、従来の一段同時注入法よりも優れた凝集沈殿処理効果を発揮するものと推測される。

本論では、その二段凝集法の有効性を検証するために、PAC・ノニオン系ポリマーによるカオリン濁質の凝集沈殿実験を、急速攪拌の強度 G_R 値及び時間 T_R 値（ $=T_{RM}$ 値+ T_{RA} 値、 T_{RM} 値はPAC注入からポリマー注入までの時間、 T_{RA} 値はポリマー注入から急速攪拌終了までの時間）を変動させて実施した。その結果、凝集沈殿処理水の濁度、STR及び粒子個数濃度の動きから、この二段凝集法の有効性を確認すると同時に、処理性改善に繋がる諸知見を得たので、以下に報告する。

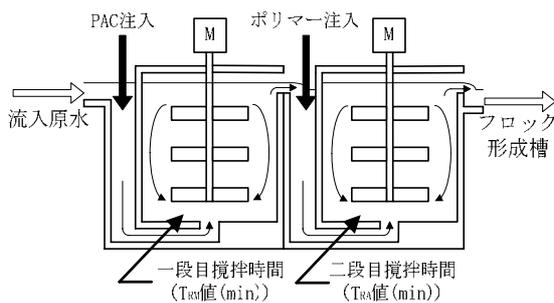


図1 二段注入凝集法の概略図

2. 実 験

図2は、回分式の凝集沈殿実験装置（最大 G_R 値 $3,000 \text{ sec}^{-1}$ ）であり、矩形水槽（容量8L）及び攪拌機で構成されている。実験には、水温 20°C に調節した大学水道水にカオリン 20 または 50 mg/L 、ポリ塩化アルミニウム（以下、PAC）を $0 \sim 80 \text{ mg/L}$ 及びポリマー（オルガノ社製、ノニオン系の有機性ポリマー、推定分子量： $1,600 \times 10^4$ 、アクリルアミドモノマー含有 $0.005 \text{ wt}\%$ 未満）を $0 \sim 0.5 \text{ mg/L}$ で注入した試料水（ $\text{pH} 6.8 \pm 0.1$ ）を用いた。また、

急速攪拌（ G_R 値 $150 \sim 1500 \text{ sec}^{-1}$ 、 T_R 値 $2 \sim 10 \text{ min}$ ）、緩速攪拌（ G_S 値 20 sec^{-1} 、 T_S 値 20 min ）、静置 20 min を採用して凝集沈殿実験を行った。所定の静置時間が経過後、上澄水を採用し、その濁度を濁度・色度計（日本電色工業製、WA2000N）で、粒子個数濃度を微粒子カウンター（富士電機システムズ製、ZVM Hybrid Particle Counter）で、及びSTRを次の方法でそれぞれ測定した。すなわち、STRについては、処理水 500 mL 及び同量の蒸留水（吸引時間は、 20°C で 60 sec ）を孔径 $0.45 \mu\text{m}$ のメンブランフィルターで吸引（到達真空度 26.7 kPa ）するに要した時間を測定し、それらの比から算出した。

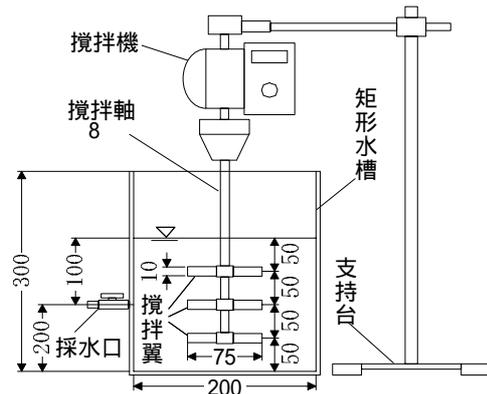


図2 回分式凝集沈殿実験装置の概略図（単位 mm）

3. 有機性ポリマーの効果

PACなどの無機性凝集剤で形成されたフロックは、小径であると同時に低密となる場合が多い。そこで、それらのフロックの沈降性を高めるために、多くの浄水場では凝集剤を多量注入する方法を採用している。寒冷地の低水温時における対応はその典型的な場合の例と言えよう。その結果、著者らが指摘しているように、沈殿処理水の濁度は改善されるが、凝集剤残留量が増加するためにSTRは上昇し、ろ過継続時間の短縮や発生汚泥の増加などの深刻な問題を惹き起こしている。

ノニオン系有機性ポリマーは、PACなどより分子量は極めて大きく、長く鎖状の分子構造を持っているため、微量の注入によって、凝集後の微フロックを効果的に架橋作用によって取り込み、結果として、沈降速度が大きなフロックを形成する。ポリマー使用で期待できる効果は、低水温時、フミン質濃度が高い場合などにおけるフロックの沈降性改善、主凝集剤注入率の低減化による汚泥発生量の抑制、汚泥の脱水性改善など、種々の面における有効性が挙げられている。その反面、浄水処理にお

ける効果的な適用法の開発を始め、ポリマー溶液の長期安定保存法、低コスト製品の開発などが、今後における普及促進上の課題となっている。

4. 実験結果及び考察

4.1 PAC及びポリマー単独使用時の処理性

1) PAC単独使用時の処理性

我が国の浄水場は、濁質の処理性を高めるために、PAC注入率の上昇法を採用している。図3は、カオリン濁度5、25及び50度の原水を、PAC注入率上昇法で凝集沈澱処理した結果である。急速撹拌としては、 G_R 値 150sec^{-1} 、 T_R 値 5minを採用した。同図から、いずれの原水濁度の場合にも、処理水濁度はPAC注入率の上昇とともに急速に低下している。それに対し、STRは、PAC注入率 10 mg/Lまでは上昇するが、その後は一旦低下して、PAC注入率 50~60 mg/L 辺りで最低となった後、再び上昇に転じている。このSTRの動きで注目すべきは、最低のSTRでも、いまだに3を超える大きな値となっていることである。STRは残留アルミニウムと高い相関を示すから、高いSTRは残留アルミニウム濃度が高いことを示唆している。そこで、低いPAC注入率のもとにおける処理性の改善を目的に、凝集助剤としてポリマーを効果的に使用する方法を探索する実験を以下に行っている。

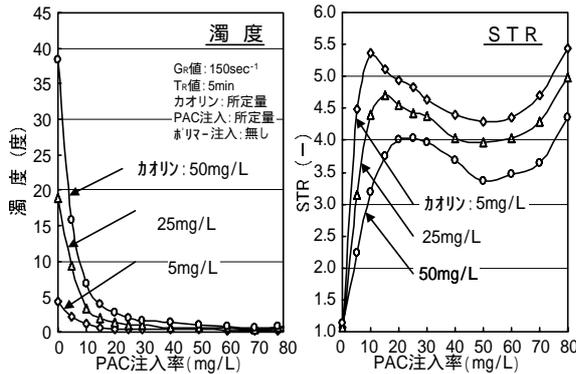


図3 PAC注入率の上昇に伴う処理性

2) ポリマー単独使用時の処理性

図4は G_R 値 150sec^{-1} 、 T_R 値 5min でポリマーの注入率を上昇させた実験の結果を示している。ポリマー注入率 0.1mg/L で処理水濁度は最低となったが、原水濁度5度の場合の除去率は 10.8% (4.63 4.13) 50度の場合には 48.3% (38.3 19.8度) と低かった。その後、ポリマー注入率の上昇に伴って濁度は上昇し、0.5mg/L 注入時には全く注入しない場合と同程度の濁度である。他方、STR はポリマー注入率の上昇に伴って直線的に、また原水濁度が高いほど僅かずつ上昇している。

図5は、原水濁度 50 度にポリマーを 0.1、0.3 及び 0.5mg/L を注入した試料を対象に、 G_R 値を上昇させた実験の結果である。 G_R 値 150sec^{-1} で濁度及び STR は最低値となり、 150sec^{-1} より高い G_R 値を採用するとそれらは上昇に転じた。また、 G_R 値が 1000sec^{-1} を越えると STR が低下しているのは、ポリマーの高分子鎖が壊れたためと考えられる。

以上の結果、ポリマー単独使用時は 0.1mg/L と非常に小さい注入率、及び G_R 値 150sec^{-1} で最大の効果を発揮し

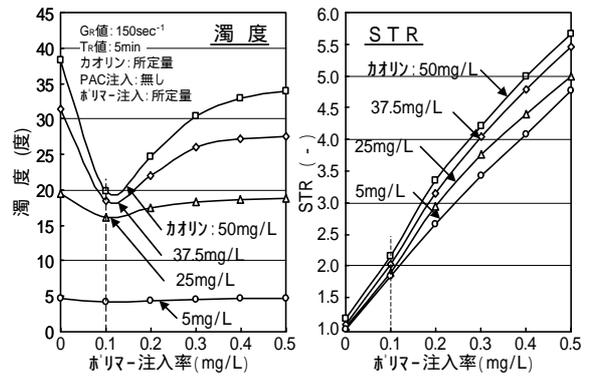


図4 ポリマー注入率上昇に伴う処理性

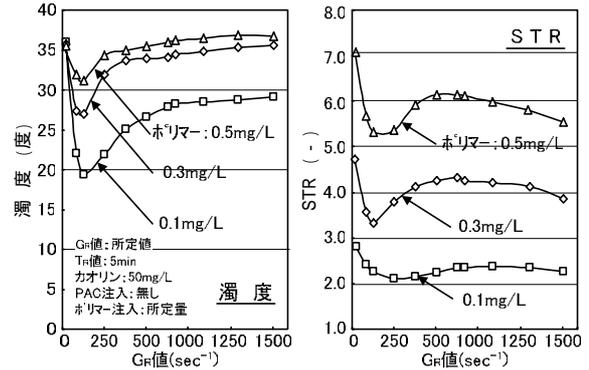


図5 G_R 値上昇に伴う処理性

たが、効果の程度は低かった。

4.2 PAC・ポリマー併用時の処理性

1) 多用されてきた急速撹拌条件における処理性

既存の浄水場で多用されている急速撹拌条件 (G_R 値 150sec^{-1} 及び T_R 値 2min) で、PAC・ポリマーの併用実験を行った結果を表1に掲げる。ここでは、原水濁度 20 度のもとで、 T_{RM} 値を延長させた場合の処理水濁度及び STR を示している。なお、PAC 注入率 10mg/L、ポリマー注入率 0.1mg/L を採用した。PAC・ポリマー同時注入時 (T_{RM} 値 0 min) の濁度は、PAC 単独注入時より僅かに改善 (6.81 6.49 度) されたが、STR は僅かに上昇した。 T_{RM} 値を 0 1min にすると、濁度は 6.49 4.67 度へ低下して最低となった。 T_{RM} 値を更に延長させると濁度は上昇に転じ、 T_{RM} 値 2.0min 時 (緩速撹拌の直前) の濁度は PAC 単独注入時と同程度になったが、STR は 21.4% 上昇している。これは、 T_{RA} 値が短過ぎるため (T_{RM} 値 2min では T_{RA} 値は 0min)、ポリマーによる架橋効果が小さく、凝集剤残留量が増加した結果と考えられる。

表1 T_{RM} 値の延長に伴う処理性 (G_R 値 150sec^{-1} 、 T_R 値 2 min、カオリン 20mg/L)

凝集剤	T_{RM} 値 (min)	T_{RA} 値 (min)	濁度 (度)	STR (-)
PAC	—	—	6.81	5.94
PAC	0	2.0	6.49	6.04
PAC	0.5	1.5	6.23	6.14
+	1.0	1.0	4.67	6.10
ポリマー	1.5	0.5	5.47	6.36
	2.0	0	6.92	7.21

2) T_R 値の延長に伴う処理性

図6は、PAC及びポリマー単独注入時に T_R 値を上昇させた実験の結果である。いずれの凝集剤を使用した場合

にも、 T_R 値の延長に伴って濁度及び STR は急速に改善されており、 T_R 値延長の重要性が明らかになった。しかしながら、ポリマー単独注入時における濁度の処理性は、いまだに不十分である。また、PAC 使用時の STR は、 T_R 値が 60min を超えると殆ど 1、即ち、凝集剤は殆ど残留しなくなった。他方、ポリマー使用時には、 T_R 値を 2 10min への延長によって 3.2 2.3 へと改善されているが、さらに延長させても 2.1 程度に止まっており、10min 以上に延長させてもポリマーによる改善効果は小さい。

図 7 は、PAC 単独時、PAC・ポリマー同時注入(T_{RM} 値 0min)、及び二段凝集(T_{RM} 値 2.5min)で T_R 値を延長(二段凝集法では T_{RA} 値が延長)させた実験の結果である。全体として、 T_R 値を延長させると濁度、STR とともに改善されている。 T_R 値 5min における濁度は、PAC 単独時で 3.76 度に対し、同時注入で 2.97 度、二段凝集法で 2.34 度となり、ポリマー併用の二段凝集法で大きな効果が発現している。しかしながら、 T_R 値の延長に伴ってその差は縮まり、 T_R 値 10~15 辺りで逆転している。逆転後には、PAC+ポリマーの同時注入法が最も良く、二段凝集法による処理性が最も悪くなっている。STR は、 T_R 値の延長によって差は広がっている。この STR の傾向は、図 6 で示した PAC またはポリマーのみで処理した結果と同じである。すなわち、同時注入の場合、多量の PAC と少量のポリマーとが混在しているため、処理性が PAC に左右されるのに対し、二段凝集の場合、PAC 単独による凝集・微フロック形成の進行後にポリマーを注入しているため、処理結果はポリマーの処理性に強く影響されている。

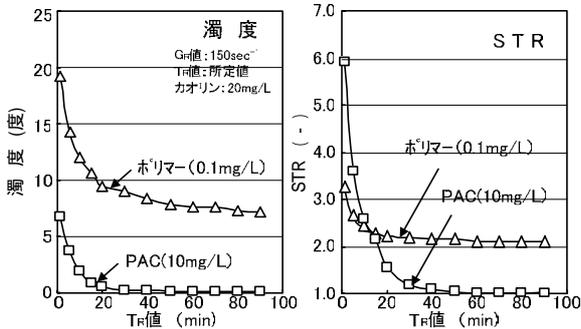


図 6 T_R 値の延長に伴う処理性 (PAC 及びポリマー単独時)

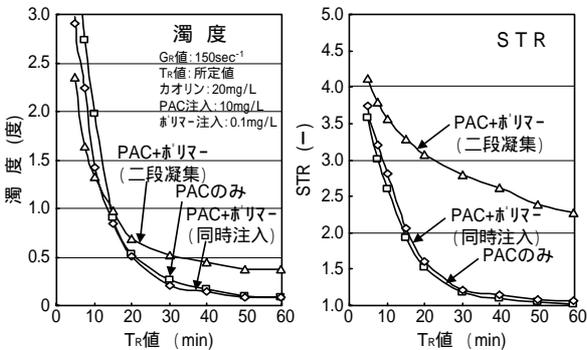


図 7 T_R 値の延長に伴う処理性 (PAC・ポリマー併用時)

3) T_{RM} 値及び T_{RA} 値の変動に伴う処理性

図 7 で二段凝集法の効果が発現した T_R 値 5 及び 10min のもとで、 T_{RM} 値を延長させた実験の結果を図 8 に示す。

処理水濁度が最低となった T_{RM} 値は、 T_R 値 5min (図 8 の (1)) の場合には 2.5min、 T_R 値 10min (図 8 の (2)) の場合には 7.5min であった。また、 T_{RA} 値 2.5min で T_{RM} 値を 2.5 (図 8 の (1)) 7.5min (図 8 の (2)) とすると、処理水濁度の改善は 61.0% (2.34 0.94 度)、 T_{RM} 値 2.5min で T_{RA} 値を 2.5min (図 8 の (1)) 7.5min (図 8 の (2)) に延長させると、改善は 43.3% (2.34 1.33 度) となり、 T_{RA} 値 2.5min が確保されれば、 T_{RM} 値の延長は濁度改善に大きく寄与することが分かった。

二段凝集法の採用によって、処理水濁度は改善できるが、STR は PAC 単独時よりも高くなっている。しかしながら、ポリマー単独注入の場合、 T_R 値 10min までの範囲では T_R 値を短くすればするほど STR は上昇している。それにもかかわらず、二段注入法の場合、 T_R 値 5min では T_{RM} 値が 1.2~3.7min、 T_R 値 10min では 2.5~7.5min の範囲内ではほぼ一定値となっており、 T_{RA} 値の短縮に伴う STR の上昇は抑えられている。

表 2 は、 T_R 値 10min における処理水中の粒子個数濃度を示している。 T_{RM} 値による変動が最も激しかった径 1 μm の粒子は、 T_{RM} 値 7.5min 時に最低の 7,442 個/mL (PAC 単独時の 19,672 個/mL に対し 62.2% 減少) となった。それに比べ、 T_{RM} 値 0min 時には、PAC 単独時よりも増加している。このように、PAC とポリマー同時注入時には、PAC 単独時よりも層に流入する捕捉効率が低い微細粒子が増加するので、ろ過水水質など固液分離効率への影響が懸念される。

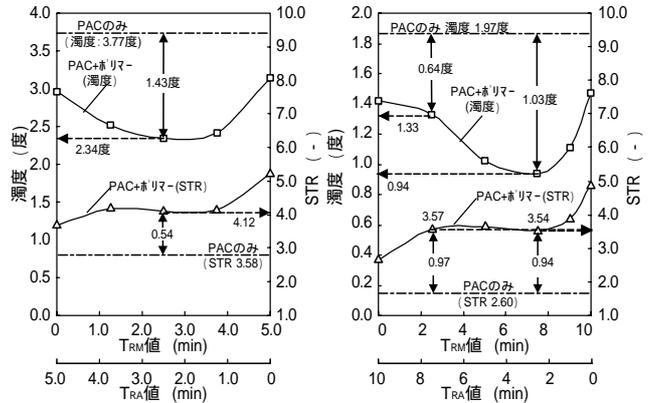


図 8 T_{RM} 値の延長に伴う処理性 (1) T_R 値 5min の場合 (2) T_R 値 10min の場合

表 2 T_{RM} 値の延長に伴う粒子個数濃度

凝集剤	T_{RM} 値 (min)	粒子個数濃度 (個/mL)			
		1-3 μm	3-7 μm	7-15 μm	15 μm -
PAC	—	19,672	2,823	1,174	798
PAC + ポリマー	0	21,735	2,830	1,202	246
	2.5	16,330	2,474	1,124	246
	5.0	9,829	2,541	1,130	255
	7.5	7,442	2,450	1,092	281
	9.0	8,754	2,547	1,001	245
	10.0	14,438	3,050	972	225

4) G_R 値の上昇に伴う二段凝集法の処理性

凝集沈澱効果を高める方法として G_R 値の上昇による最適化が提唱されている。図 9 及び図 10 は、 T_R 値 10min で、PAC 単独時及び 4.2 の 3) で濁度処理性が最も良かった T_{RM} 値 7.5min の二段凝集法における G_R 値の上昇に伴う処理結果を示している。ポリマー併用時には濁度は低く改善が進んでいるが、STR は逆に高くなっている。 G_R

値の上昇に伴って、いずれの場合にも濁度及びSTRは低下して行くが、PAC単独処理時の濁度は 450sec^{-1} 、STRは 1000sec^{-1} で、また、二段凝集時の濁度、STRはともに 1000sec^{-1} で最低となった。粒子個数濃度は、いずれの場合にも、 G_R 値の上昇に伴って一旦は減少するが、その後、径の大きな粒子ほど低い G_R 値で上昇（フロックの破壊）を開始している。それに対し、二段凝集時の変動幅はPAC単独時よりも小さく、高い G_R 値で上昇を開始している。これは、二段凝集時には強度が大きなフロックが形成されていたことを示唆している。また、径 $1-3\mu\text{m}$ の粒子個数濃度がほぼ最低となった 1000sec^{-1} 付近に G_R 値を設定すれば、濁度及びSTRは最低となっていることから、最良の粒子分離を行うことができると推測される。

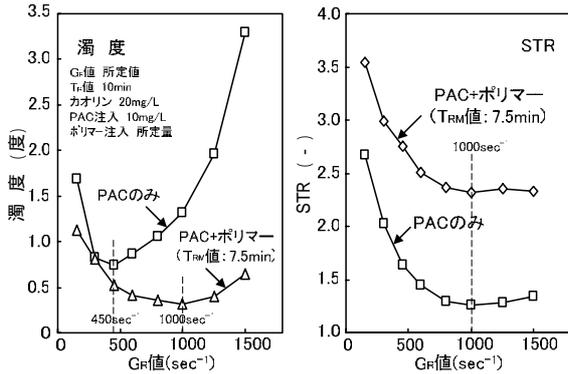


図9 G_R 値上昇に伴う処理性

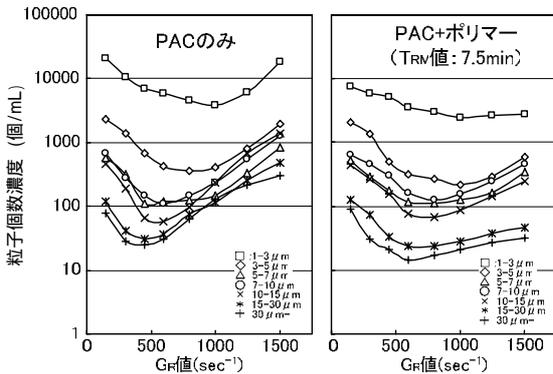


図10 G_R 値の延長に伴う粒子個数濃度

5)ポリマー注入率の低下に伴うSTRの低下

図11は、 T_R 値10minにおいて最良の処理性を示した G_R 値 1000sec^{-1} 、 T_{RM} 値7.5minの二段凝集法で、ポリマー注入率を低下させた実験の結果である。注入率の低下に伴って、STRは直線的に低下して行き、ポリマー注入率 0.06mg/L 以下で、良好なる過継続時間を確保できるとされる2.0以下となっている。ここで注目すべきは、ポリマー注入率を低下させるに伴って濁度は低下して行き、ポリマー注入率 0.05mg/L で最低値をとっている。さらにポリマー注入率を低下させると、STRは低下するが濁度は上昇に転じている。すなわち、ここで見られるように、濁度の処理性に関して最適な注入率が存在する。それに対し、表3で見られるように、浄水場で多用される急速攪拌条件(G_R 値 150sec^{-1} 、 T_R 値2min)で同時注入及び二段凝集を行った場合には、ポリマー注入率の低下で処理水濁度は上昇するが、STRは僅かに低下していた。それに

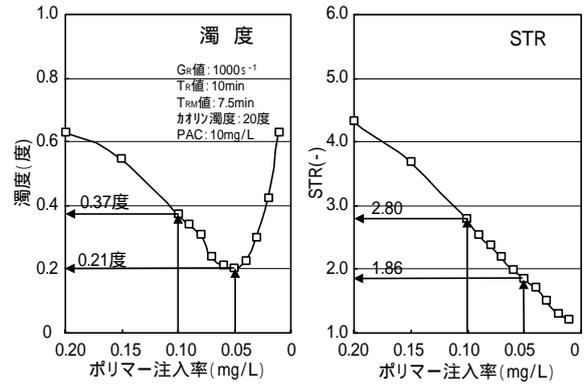


図11 ポリマー注入率の減少に伴う処理性 (G_R 値 1000sec^{-1} 、 T_R 値10min、 T_{RM} 値7.5min)

表3 ポリマー注入率の低下に伴う処理性 (G_R 値 150sec^{-1} 、 T_R 値5min、カオリン20mg/L)

ポリマー注入率(mg/L)	0.3	0.2	0.1
同時注入 (T_{RM} 値:0min)	濁度(度) 5.73 STR(-) 6.14	5.83 6.11	6.49 6.04
二段凝集 (T_{RM} 値:1min)	濁度(度) 2.60 STR(-) 6.52	3.62 6.35	4.62 6.14

対し、上述したように、PACのみによる凝集及び微フロック形成を高強度・長時間にわたってしっかりと行えば、処理水濁度の上昇を引き起こさずにポリマー注入率を低下、即ち、STRを低下させ得る領域があることを示した。

5.まとめ

PAC・ポリマー併用によって凝集沈澱処理性を高めるためには、基本的にそれらの同時注入凝集法よりも二段凝集法が有効であることを、本論で実験的に検証した。また、二段凝集法の適用にあたっては、PAC注入からポリマー注入までの T_{RM} 値を初期粒子個数が低減化するまで延長すること、ポリマー注入後の T_{RA} 値として2.5min程度確保することが本質的に重要であること、 G_R 値 1000sec^{-1} 付近で、最良の結果が得られることを示した。更に、ポリマー併用時に問題となるSTRの上昇については、十分に長い急速攪拌 T_{RM} 値のもとでポリマー注入率を低下させることによって大幅な抑制が可能であることを示した。

《 文 献 》

- 1) 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、2002.9.
- 2) 海老江 邦雄、藤縄 憲通：直接複層ろ過池の挙動に及ぼす有機性高分子凝集剤の影響、水道協会雑誌、第62巻、第8号、pp.23~32、1993.8.
- 3) 海老江 邦雄、藤縄 憲通：直接複層ろ過池の洗浄における空洗・水逆洗の効果 - PACとポリマーで凝集したカオリンフロックを抑制する場合 -、水道協会雑誌、第64巻、第7号、pp.24~33、1995.7.
- 4) J.A.Beardsley: Use of Polymers in Municipal Water Treatment, J.AWWA Vol.65, No.1, pp.85~90, Jan.1973
- 5) Committee Report: Survey of Polyelectrolyte Coagulant Use in the United States, J.AWWA, Vol.74, No.11, pp600~608, Nov.1982
- 6) Richard E.Hubel and James K.Edzwald: Removing Trihalomethane Precursors by Coagulation, J.AWWA, Vol.79, No 7, pp98~106, July.1987
- 7) K.E.Biesinger&G.N.Stokles: Effect of synthetic polyelectrolytes on selected aquatic organisms, J.WPCF, Vol.58, No.3, March.1986