

# 鉄系凝集剤 PSI の使用及び急速攪拌条件の適正化による 低温濁水の凝集沈澱処理性の改善

Improving the Treatability of Turbidizing Substance of Low Temperature Water Source  
by the Use of Iron-based Coagulant PSI and the Optimization of Rapid Mix Conditions

北見工業大学 フェロー 海老江 邦 雄 (Kunio Ebie)  
” 学生員 川 口 倫 由 (Tosiyuki Kawaguchi)  
” 学生員 ○水 森 豊 (Yutaka Mizumori)  
” 阿 部 員 征 (Kazumasa Abe)

## 1. ま え が き

積雪寒冷地に位置する浄水場では、冬期の低水温時に起こる濁質などの凝集沈澱処理性の低下が、緊急に解決すべき課題となっている。低水温、即ち、粘性上昇時には、凝集剤注入率の上昇法が採用されているが、さらなる処理性改善を図るために、重く大きなフロックの形成に繋がるアルミニウム系から鉄系凝集剤への変更や有機性ポリマーの併用に関する研究が進められている。

しかしながら、わが国の殆どの浄水場では、凝集剤として硫酸アルミニウムからより強力な PAC に変更しているにもかかわらず、依然として、硫酸アルミニウム使用時と変わらない比較的弱く短い急速攪拌条件 ( $G_R$  値  $150s^{-1}$ 、 $T_R$  値 1min 程度) を採用していることから、まず始めに、 $G_R$  値及び  $T_R$  値の最適化による凝集沈澱の処理性を明確にしておくことが必要と考えた。

既報では、わが国で最も多用されている凝集剤 PAC を用い、急速攪拌条件の適正化による濁度、凝集剤由来のアルミニウム及び吸引時間比 STR の処理性、及び低水温における改善効果を明らかにした。

本論では、分子量 25 万～50 万 Da の鉄系凝集剤 PSI-1 (Si と Fe のモル比が 1 : 1) を用い、 $G_R$  値及び  $T_R$  値の適正化による濁度、STR などの低減効果と特徴とを確認すること、及びそれらを PAC 使用時の効果と比較検討することを目的とした。

## 2. 実験方法及び条件

### 2.1 実験装置及び G 値の算出

写真 1 は、新しく製作した凝集実験装置である。同装置は、短形の攪拌槽(縦 200mm×横 200mm×300mm)及び攪拌機(10～800rpm に設定可能)などから成っており、その最大の特徴は、通常のジャーテスターでは出せない大きな攪拌強度(最大  $G$  値  $3,900s^{-1}$  程度)で凝集実験を行える点にある。 $G$  値の算出にあたっては次式(1)を用いた。

$$G = \{C \cdot A \cdot v^3 / (2 \cdot \gamma \cdot V)\}^{0.5} \dots (1)$$

ここで、 $C$ : 攪拌係数 (1.5 を採用)、 $A$ : 攪拌翼の面積 ( $m^2$ )、 $v$ : 攪拌翼の周辺速度 (m/sec)、 $\gamma$ : 動粘性係数 ( $m^2/sec$ )、 $V$ : 攪拌槽容量 ( $m^3$ ) を表わす。

実験には、表 1 に示す北見工業大学水道水(深井戸水)を定温室内に予め貯留して、水温が 2.0 及び 20.0°C (これらの水温における動粘性係数は、 $1.671 \times 10^{-6}$  及び  $1.004 \times 10^{-6} m^2/s$  で、前者は後者より 1.66 倍大きい)に調

整したものを用いた。即ち、水温調整の後、表 2 の粒径分布を持つカオリンと凝集剤とを所定量注入して実験に共した。凝集剤としては、Si・Fe 比が 1:1 の PSI ( $Fe_2O_3$ :2.9%含有、 $SiO_2$ :2.2%、以下、PSI-1 と記述)を用いた。

### 2.2 実験方法及び条件

攪拌槽内の原水 8L に所定量の凝集剤を注入した後、凝集実験(急速攪拌  $G_R$  値  $150 \sim 1,500s^{-1}$ 、 $T_R$  値 1～10min 及び緩速攪拌  $G_S$  値  $20s^{-1}$ 、 $T_S$  値 20min、その後、40 分間の静置)を行った。この場合の表面負荷率は 0.25cm/min となる。その後、上澄水を採水して濁度、Fe 濃度などの分析・測定に供した。凝集 pH 値については、1N-HCl と 0.5N-NaOH とを用いて凝集領域内の pH6.3 に設定した。濁度については、濁度・色度計 (日本電色工業製、WA2000N) を用いて測定した。また、Fe 濃度については、1,10-フェナントロリンを用いた吸光度法で定量した。

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 <sub>4</sub> 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

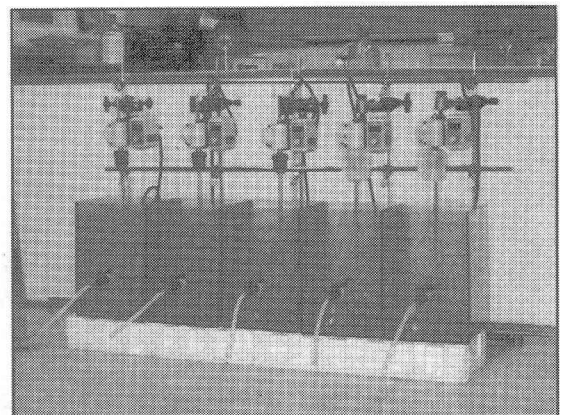


写真 1 凝集実験装置

### 2.3 吸引ろ過試験及びSTRの算出

凝集沈澱の処理性評価を目的に、濁度及びFeの他に、吸引時間比 STR(Suction Time Ratio) (無次元) を新規に採用した。このSTRについては、既に著者らが報告しているように、凝集剤残留量及びろ過池の損失水頭発生量と相関が高い指標であり、次式(2)で算出される。

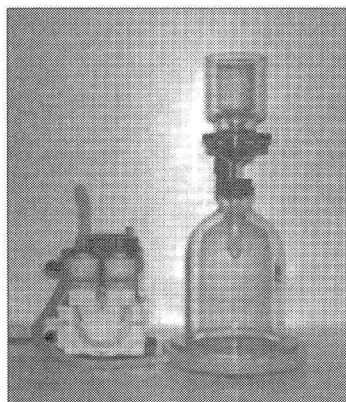


写真2 吸引ろ過装置

凝集実験後に採取した沈澱処理水及び蒸留水500mLの吸引時間については、写真2に示すように、直径47mmのメンブランフィルター

(平均孔径0.45μm、多孔度78%、ADVANTEC製)を吸引ろ過装置(減圧容器、減圧用フィルターフォルダー、吸引ポンプ、到達真空度:26.7kPa)に装着して測定した。なお、基準となる蒸留水500mLの吸引時間は、水温20℃では60s、2℃では110sであった。

凝集実験後に採取した沈澱処理水及び蒸留水500mLの吸引時間については、写真2に示すように、直径47mmのメンブランフィルター(平均孔径0.45μm、多孔度78%、ADVANTEC製)を吸引ろ過装置(減圧容器、減圧用フィルターフォルダー、吸引ポンプ、到達真空度:26.7kPa)に装着して測定した。なお、基準となる蒸留水500mLの吸引時間は、水温20℃では60s、2℃では110sであった。

$$\text{STR (無次元)} = \frac{\text{試料水 500mLの吸引時間 (s)}}{\text{蒸留水 500mLの吸引時間 (s)}} \dots (2)$$

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 従来の急速攪拌条件における処理性

最初に、浄水場で一般に採用されている急攪条件  $G_R$  値  $150\text{s}^{-1}$ 、 $T_R$  値  $1\text{min}$  のもとで、水温20及び2℃に調整された試料水を用いて、凝集剤注入率を順次増加させる凝集実験を行った。図1は、それらの実験における処理水の濁度、Fe及びSTRの動きを示している。

同図における濁度の動きを見ると、いずれの水温においても、PSIの注入率の増加に伴って低下している。また、注入率の増加に伴って、20℃と2℃とにおける処理水濁度は次第に接近している。PSI-1の注入率2.0mg-Fe/Lにおける濁度差は1.53度であったが、この差は次第に小さくなり、注入率4.0mg-Fe/L以降においては殆ど認められない。

つぎに、Fe及びSTRの動きを見ると、いずれの水温においても、注入率の増加とともにこれらの値は低下し、注入率3.0mg-Fe/Lで最低値をとり、その後は徐々に上昇している。これは、注入率の上昇に伴って、フロックが低密となり、特に濁質の取り込みが少なかった一部のフロックが沈澱できずに残存したものと考えられる。また、水温20℃と2℃とにおけるFe及びSTRとの処理性については、処理水濁度の場合とは異なり、低水温における処理性が低く、2℃では20℃におけるより、処理水のFeは0.11mg/L、STRは1.1程度高い。この傾向は、注入率を増加させても殆ど変化していない。

表3は、具体的な目標濁度(処理水濁度0.5及び1.0度)の達成に必要なPSI-1の注入率及び処理水水質をまとめたものである。同表から、水温2℃で処理水濁度1.0

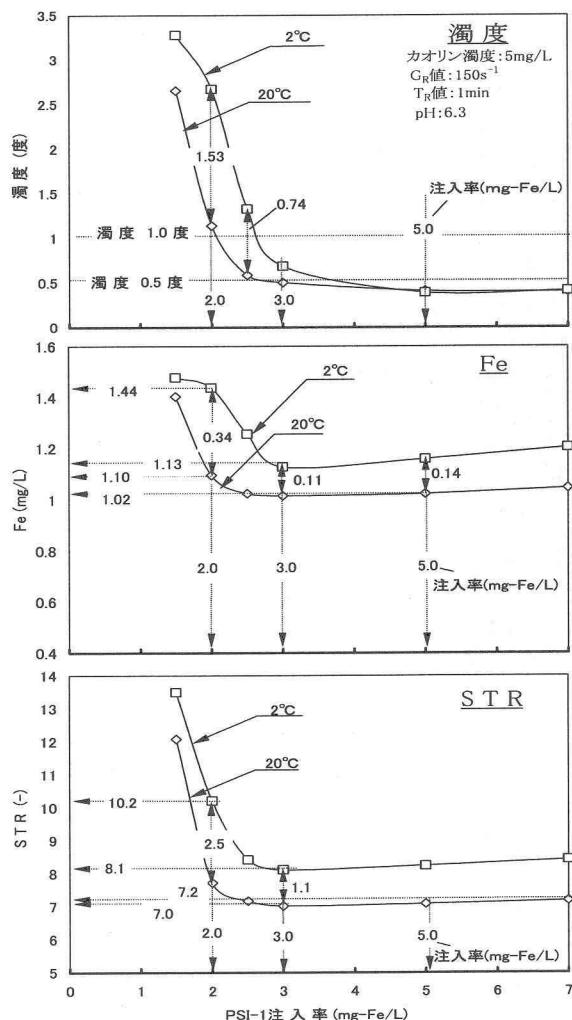


図1 注入率の上昇に伴う処理性

表3 目標濁度の達成に必要な注入率と処理水水質

目標濁度 mg/L	水温 °C	注入率 mg/L	Fe mg/L	STR -
1.0	20	2.1	1.04	7.4
	2	2.65	1.2	8.3
増加量(2-20℃)		0.55	0.16	0.9
0.5	20	3.12	1.02	7.1
	2	3.9	1.14	8.2
増加量(2-20℃)		0.78	0.12	1.1

度を達成するのに必要な注入率は、20℃の場合に比べて0.55mg-Fe/L高い。この傾向は、処理水濁度を0.5度とした場合にも同様である。したがって、低水温時に濁度の処理性を向上させるためには、常温時よりも高いPSI-1注入率が必要となる。さらに、注目すべきは、処理水のFe及びSTRの値がいずれの水温においても高止まりとなっている点である。これに関しては、後に説明するように、攪拌条件の適正な設定が必要であることを示唆している。

以上、 $G_R$  値  $150\text{s}^{-1}$  及び  $T_R$  値  $1\text{min}$  を採用する場合、凝集剤注入率の上昇法では、水温低下による処理水濁度の低減化の達成は可能であるが、Fe及びSTRを十分に改善することは望めず、ろ過時間の短縮や発生汚泥量の増加を招くこととなる。

#### 3.2 急速攪拌 $T_R$ 値の適正化に伴う処理性

PSI-1注入率、 $G_R$  値をそれぞれ2.0mg-Fe/L及び  $150\text{s}^{-1}$

に固定し、急速攪拌時間  $T_R$  値を上昇させた凝集実験を行い、図2に示した。

同図の濁度の動きを見ると、いずれの水温においても、 $T_R$  値の上昇に伴って濁度は急激に低下し、処理性は大幅に向上している。即ち、 $T_R$  値を1→5min とすることで、20°Cでは1.14→0.43度(改善率62.3%)、2°Cでは2.67→0.60度(同77.5%)となっており、特に、水温2°Cにおける改善が著しい。また、20°Cと2°Cとにおける濁度差は、 $T_R$  値1minで1.53度(水温2→20°C、濁度2.67→1.14mg/L)、 $T_R$  値5minでは0.17度(水温2→20°C、濁度0.60→0.43mg/L)となり、大幅に縮まっている。さらに、 $T_R$  値5min以降では、いずれの水温においても、 $T_R$  値1minの場合に必要であった1/2程度の凝集剤注入率2.0mg-Fe/Lで、濁度を0.5度近辺まで低下させることができた。

Fe及びSTRについても、濁度と同様の処理傾向が得られた。すなわち、処理水中のFe及びSTRは、 $T_R$  値を1→5min とすることによって、いずれも大幅に低下(20°Cと2°Cとの平均で見ると、Feは1.27→0.63mg/L(改善率50.4%)、STRは8.9→4.5(同49.4%))すると同時に、水温によるFeの処理性の差は0.34→0.12mg/L、STRについては2.5→1.6に縮小している。これらのことから、現在、広く採用されている $T_R$  値1minを5min程度に設定するだけで、処理性を大幅に改善しうること、また、水温低下に伴う処理性の悪化についても大幅に抑制しうることが

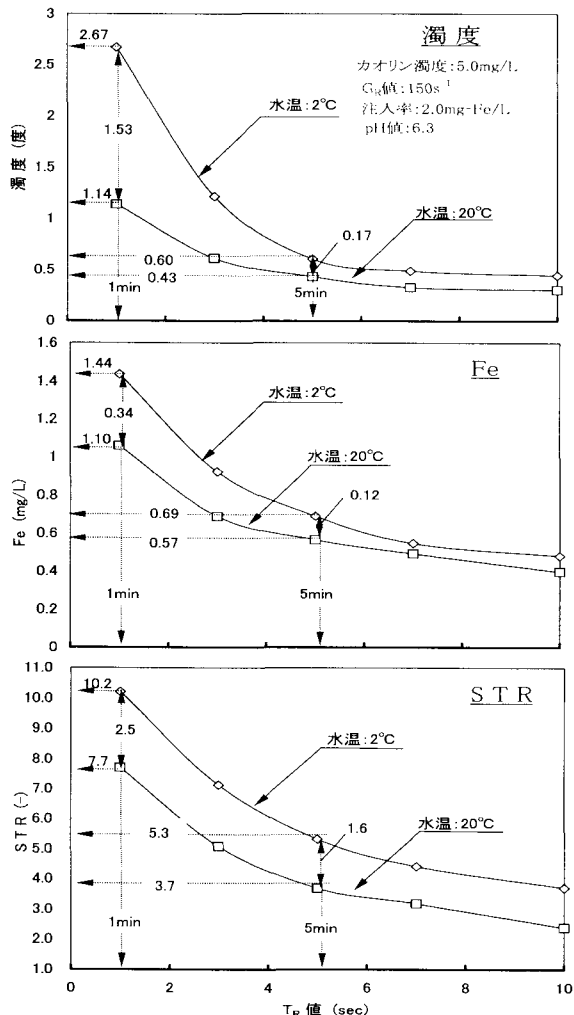


図2  $T_R$  値の上昇に伴う処理性

明らかになった。

### 3.3 急速攪拌 $G_R$ 値の適正化に伴う処理性

$T_R$  値を図2で処理性がほぼ安定化した5minとし、 $G_R$  値については、順次上昇させて凝集実験を行い、その結果を図3に掲げる。

処理水濁度は、 $G_R$  値の上昇に伴って、さらに低下して行き、水温20°Cでは $G_R$  値600 $s^{-1}$ 近辺、水温2°Cでは $G_R$  値450 $s^{-1}$ 近辺で最低値をとる。しかしその後、フロックの劣化が影響しているためか、濁度は急に上昇している。

処理水のFe及びSTRの動きを見ると、 $G_R$  値の上昇に伴う推移パターンは濁度と同じであるが、これらが最低となる最適 $G_R$  値は異なっている。すなわち、Feの最適 $G_R$  値は、濁度の最適 $G_R$  値よりも大きく、水温2°C及び20°Cで、それぞれ600、1,000 $s^{-1}$ 付近に出現している。また、STRの最適 $G_R$  値はFeの場合よりもさらに大きく、水温

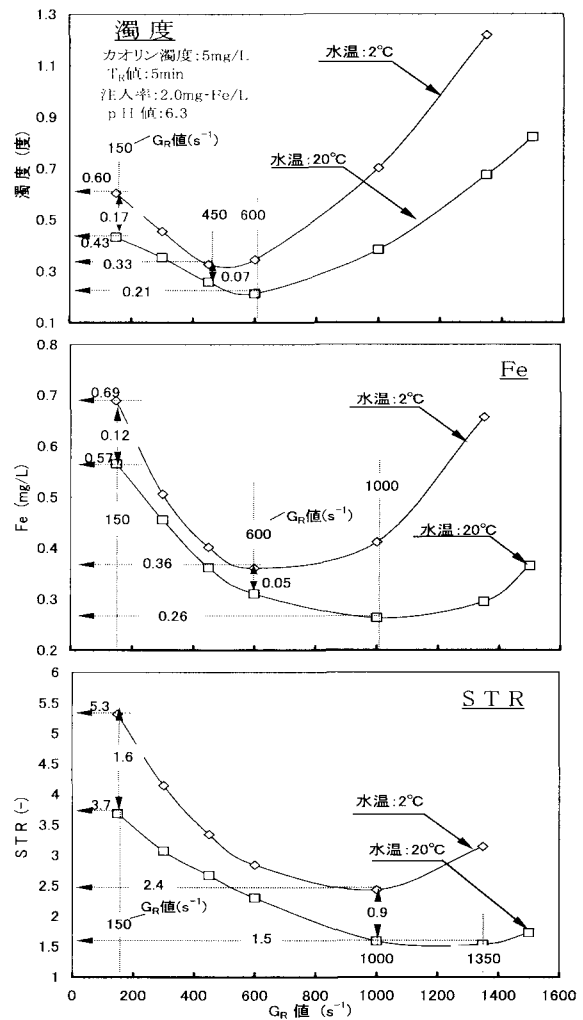


図3  $G_R$  値の上昇に伴う処理性

表4 従来及び最適の急攪条件における処理性比較

水温 (°C)	$T_R$ 値 (min)	$G_R$ 値 ( $s^{-1}$ )	濁度 (mg/L)	$G_R$ 値 ( $s^{-1}$ )	Fe (mg/L)	$G_R$ 値 ( $s^{-1}$ )	STR (-)
20	1	150	1.14	150	1.10	150	7.7
	5	600	0.43 (81.6)	1000	0.26 (76.1)	1350	1.5 (80.5)
2	1	150	2.67 (-134.2)	150	1.44 (-35.9)	150	10.2 (-50.0)
	5	450	0.60 (71.1)	600	0.36 (67.3)	1000	2.4 (68.8)
増加量 (2→20°C)	1	150	1.53	150	0.34	150	2.5
	5	最適値	0.11	最適値	0.10	最適値	0.9

カッコ内は、水温20°Cにおける従来の急速攪拌条件( $G_R$  値150 $s^{-1}$ 、 $T_R$  値1min)を基準にした改善率(%)

20°Cで1,350s<sup>-1</sup>、水温2°Cで1,000s<sup>-1</sup>近辺に現れている。

表4は、従来の攪拌条件(G<sub>R</sub>値:150s<sup>-1</sup>、T<sub>R</sub>値:1min)とT<sub>R</sub>値5min採用時の最適G<sub>R</sub>値とで得られた濁度、Fe、STRの処理性を示している。

最適G<sub>R</sub>値が凝集剤や水質項目によって異なることは既に指摘しているが、同表から、最適G<sub>R</sub>値は処理水の水温によっても変動することが確認された。加えて、いずれの水温においても、急攪条件の適正化は、処理性を大幅に改善する上で有効であることが分かった。即ち、急攪条件を適正化すれば、水温2°Cという低水温においても、20°Cにおける従来の攪拌条件で得られる濁度、Fe、STRよりそれぞれ71.1%(1.14→0.33度)、67.3%(1.10→0.36mg/L)、68.8%(7.7→2.4)改善された。また、最適攪拌条件を採用すれば、水温低下に伴う処理性低下は、従来の急攪条件に比べて、濁度、Fe及びSTRのそれぞれについて、1.42度(従来条件→最適条件、1.53→0.11)、0.24mg/L(0.34→0.10)、1.6(2.5→0.9)改善される結果が得られた。

以上、T<sub>R</sub>値とG<sub>R</sub>値との適正化は、いずれの水温においても、凝集沈殿の処理性を大幅に改善させること、しかも低水温であっても20°Cと殆ど同程度の処理性となることを明らかにした。

### 3.4 凝集剤PACを用いた場合の処理性ととの比較

表5は、PAC及びPSI-1を使用した場合、20°C及び2°Cの最適急攪条件における処理性をまとめたものである。また、凝集剤注入率(mmol-metal/L)については、ほぼ同量となるPAC注入率20mg/L及びPSI-1注入率2.0mg-Fe/Lを採用した。

同表から、いずれの水温においても、PSI-1を用いたほうが僅かであるが濁度の処理性は良くなっている。それに対して、凝集剤残留量及びそれと相関が高いSTRについては、PACによる方が低く、処理性が高い。また、PSI-1使用時のSTRは僅かに高いが、後置されるろ過の運転に支障をきたすほどとは考えられない。

今まで低水温時の処理性は、Al系よりもFe系凝集剤の方が高いと考えられていたのは、凝集沈殿の評価指標として濁度しか用いていなかったためと考えられる。残留凝集剤濃度やSTRを新たに加えて評価することが必要であろう。また、有機性ポリマーとの併用を考える前に、急攪条件の適正化によって、どの程度の処理性改善を達成できるかを、しっかりと把握しておくことが必要不可欠と考えられる。

表5 PAC及びPSI-1の最適急攪条件における比較

水温 (°C)	凝集剤	G <sub>R</sub> 値 (s <sup>-1</sup> )	濁度 (mg/L)	G <sub>R</sub> 値 (s <sup>-1</sup> )	Fe or Al (mg/L)	G <sub>R</sub> 値 (s <sup>-1</sup> )	STR (-)
20	PAC	450	0.22	1000	0.11	1000	1.5
	PSI-1	600	0.21 (0.95)	1000	0.26 (2.36)	1350	1.5 (1.00)
2	PAC	450	0.36	1000	0.21	1000	1.7
	PSI-1	450	0.33 (0.92)	600	0.36 (1.71)	1000	2.4 (1.41)

カッコ内は、各水温におけるPACの最適急攪条件における濁度、Al or Fe、STRを基準とした倍率  
T<sub>R</sub>値はすべて5minに固定

## 4. 研究の総括

- 1) 比較的弱く短い急攪条件(G<sub>R</sub>値150s<sup>-1</sup>、T<sub>R</sub>値1min)における凝集実験では、凝集剤としてPACを用いた場合と同様に、PSI-1注入率の増加によって、濁度については十分に改善できるが、Fe及びSTRについては処理性が低いため、更なる改善策を採ることが必要であることがはっきりした。
- 2) 急速攪拌時間T<sub>R</sub>値1→5minの延長によって、またG<sub>R</sub>値を上昇させて最適化(2°Cでは450s<sup>-1</sup>、20°Cでは600s<sup>-1</sup>近辺)することによって、PAC使用の場合と同様に、いずれの処理項目についても大幅に改善しうることが分かった。
- 3) 急速攪拌G<sub>R</sub>値及びT<sub>R</sub>値の最適化によって、低水温時においても、比較的少ない凝集剤注入率で凝集沈殿処理効率を大幅に向上させうること、及び低水温時の処理性の悪化の程度を縮小させうことを明らかにした。この点についても、PAC使用時の場合とほぼ同じ傾向であった。
- 4) 凝集剤PACとPSI-1の処理性比較から、いずれの凝集剤、いずれの水質項目についても、低水温のもとでは僅かに劣化することは避けられないが、G<sub>R</sub>値、T<sub>R</sub>値の適正化によって、後置のろ過池の運転に支障をきたさない程度まで処理性を高めることを示した。

## 5. あとがき

今回は回分式実験の結果を報告したが、今後は連続流の実験プラントで検証し、実用化につなげることを目指し、研究を続けたい。

最後になるが、北見工業大学上・下水道工学研究室の輪島秀則技官及び学生各位に感謝の意を表す。

## 【参考文献】

- 1) 海老江 邦雄、東 義洋、山木 暁：凝集沈殿の処理性改善に関する基礎的研究—G<sub>R</sub>値の上昇による濁度とSTIの低減化—、水道協会雑誌等、816号、pp.11~21(2002.9.)
- 2) 長谷川 孝雄、鬼塚 卓也、江原 康浩、橋本 克紘、丹保 憲仁：新しい無機高分子凝集剤の研究(IV)—有効成分濃度の向上と保存安定性の改善—、第43回全国水道研究発表会講演集、pp.163-165(1992.5.)
- 3) 海老江 邦雄、水森 豊、東 義洋、山木 暁、金田一 貴朗：鉄系凝集剤PSIによる濁質処理の効率化、平成14年度土木学会北海道支部論文報告集、pp.1020-1023(2003.2.)
- 4) 長谷川 孝雄、鬼塚 卓也、江原 康浩、橋本 克紘、丹保 憲仁：新しい無機高分子凝集剤の研究(III)—重合ケイ酸のゼータ電位—、第42回全国水道研究発表会講演集、pp.193-195(1991.5.)
- 5) 海老江 邦雄、山木 暁、東 義洋ら：Al系・Fe系凝集剤を用いた凝集沈殿における急速攪拌G<sub>R</sub>値の検討、第53回全国水道研究発表会講演集、pp.92~93(2002.5.)
- 6) 海老江 邦雄、山木 暁、東 義洋、水森 豊、金田一 貴朗：低濁水の急攪条件の適正化による処理性改善、平成14年度土木学会北海道支部論文報告集、pp.1020-1023(2003.2.)
- 7) 浄水技術ガイドライン2000：水道技術センター
- 8) 海老江 邦雄、東 義洋：鉄系凝集剤による濁質処理の効率化に関する基礎的研究、水道協会雑誌、第826号、pp2-13(2003.7.)
- 9) K.Ebie and Y.Azuma: Reducing turbidity and coagulant residue in treated water through optimization of rapid mix conditions, Water Science and Technology: Water Supply, Vol. 2, No.5-6, pp.103-110, IWA Publishing 2002.