

原水温度の低下が濁質の凝集・微フロック形成の動力学に及ぼす効果

Effects of Low-Water Temperature on the Coagulation Kinetics of Suspended Particles Using PACl Coagulant

北見工業大学 フェロー 海老江 邦 雄 (Kunio Ebie)
同 上 学生員 ○田 村 繁 生 (Shigeo Tamura)
同 上 落 合 壽 明 (Hisaaki Ochiai)
同 上 学生員 川 口 倫 由 (Toshiyuki Kawaguchi)
同 上 学生員 安 藤 直 哉 (Naoya Ando)

1. ま え が き

我が国における浄水場の多くは、現在、急速ろ過システムで水道水を製造している。同システムによる浄水処理効率を高めるためには、基本的な現象の解明及び施設設計の最適化などに関わる種々の問題の解決が必要となるが、積雪寒冷地においては、低水温時における処理性低下の抑制が最も緊急で重要な課題と考えられる。

原水の低温化につれて浄水の処理性が悪化するの、水の粘性上昇が主因であり、その粘性上昇は、凝集からフロック形成、沈澱及び急速ろ過で構成される全ての粒子分離プロセスの処理性に影響している。

急速ろ過システムで最初に配置される処理施設は、急速攪拌槽である。それゆえ、急速攪拌槽内で進行する凝集・微フロック形成の成否は、全体の処理効率に最も大きく影響する現象と考えられる。本論では、その急速攪拌槽内で起こる凝集・微フロック形成の動の実験とその解析とを通して、水温低下時の急速攪拌による粒子の集塊化、及び処理性低下に及ぼす影響とその抑制方法について検討した結果を報告する。

2. 実 験

1) 実験条件及び装置

原水には本学水道水を使用し、これを所定の水温(2-20±0.1℃)、所定のカオリン濁度となるよう調製したものを試料水とした。凝集剤には、Al系凝集剤としてPAC(5-10mg/L=0.25~0.52mg-Al/L)、Fe系凝集剤として塩化第二鉄、PSI-025 及び-100(0.52mg-Fe/L)を用いた。なお、凝集剤注入率については、モル濃度で統一した(0.00927mmol-metal/L)。実験には、図1に示す矩形水槽及び攪拌機、粒子カウンター(富士電機システムズ製:

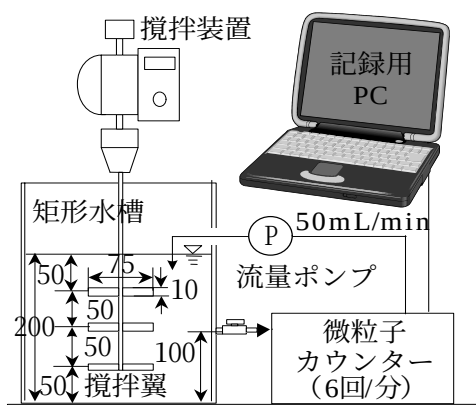


図1 回分式凝集実験装置の構成図(mm)

ZVM型)⁴⁾、ポンプ及びデータ記録用PCで構成される回分式凝集実験装置を使用した。なお、実験で採用した急速攪拌強度 G_R 値(sec^{-1})については、(1)式から算出した。

$$G_R = \sqrt{\frac{C \cdot v^3 \Sigma(B \cdot H)}{2\gamma \cdot V}} \quad \dots (1)$$

ここで、C:攪拌係数(1.5を採用)、B:攪拌翼幅(m)、H:攪拌翼高さ(m)、v:攪拌翼の周辺速度(m/sec)、 γ :動粘性係数(m^2/sec)、V:攪拌槽の容量(m^3)である。

急速攪拌条件として150及び450 sec^{-1} を採用し、所定量の凝集剤を注入した直後から、試料水に含まれる径別の粒子個数濃度の経時変化(測定径1-3、3-7、7-10、10-15、15-20及び20-30 μm)を10秒間隔で60分経過まで測定した。

2) 解析方法及び解析項目

図2は、凝集剤注入直後からの粒径1-3 μm の粒子個数濃度の経時変化、及びその解析方法を示している。同図に示すように、凝集剤注入直後における粒子の集塊化現象は、集塊化準備期→集塊化進行期→集塊化安定期の順に進行している⁵⁾。ここで、集塊化準備期とは、凝集剤を注入してから、凝集剤が化学的に安定化して粒子の荷電を調整するとともに、粒径1-3 μm の粒子が水流の速度勾配の影響を強く受けて集塊化が開始するまでの時間 T_s (min)である。また、集塊化進行期とは、粒径1-3 μm の粒子個数濃度が減少して、より大きな微フロックに成長していく期間であり、集塊化の開始時から終了時までの時間に相当する。更に、集塊化安定期とは、粒径1-3

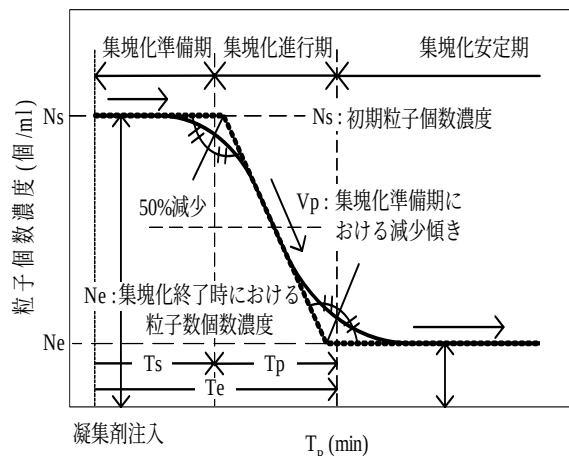
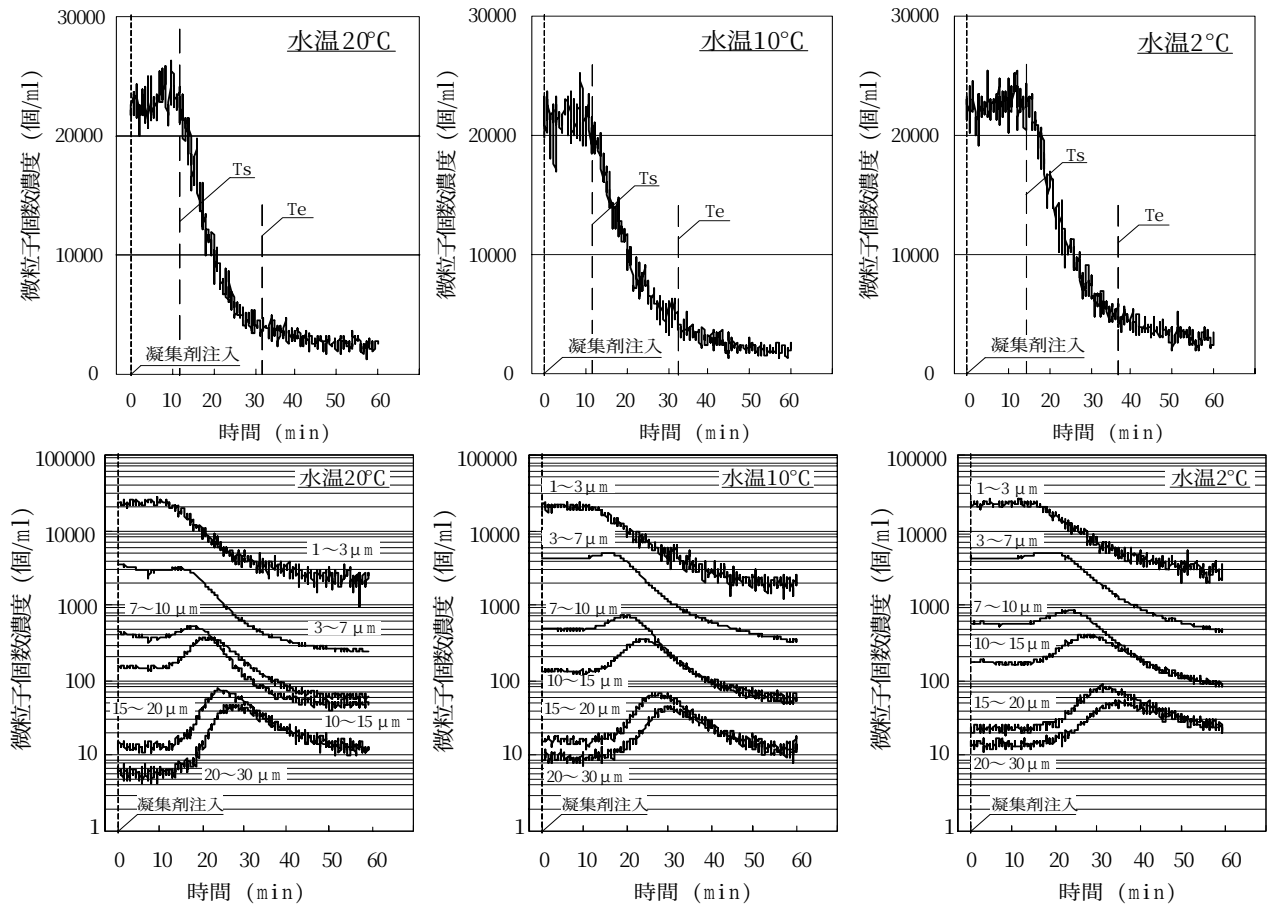


図2 粒子個数の経時変化及び解析方法


 図3 急速攪拌の経過に伴う粒子個数濃度の変化（上の図は径1-3 μ m、下の図は径別）

μ mの粒子が集塊化を終了させ、個数濃度がほぼ安定化している期間である。ここで、凝集剤注入から集塊化終了時、すなわち、安定期開始時までの時間をTe、集塊化進行期の時間をTpとした。また、Teにおける個数濃度Neが、処理性改善の重要な指標になるため、その低減化を図ることが大切である。なお、粒子個数濃度の減少速度Vp、(2)式で示す値をとる。

$$V_p = \frac{N_s - N_e}{T_p} \quad \dots\dots (2)$$

3. 実験結果及び考察

1) 水温が凝集及び微フロック形成に与える影響

図3は、原水水温20、10及び2 $^{\circ}$ C、凝集剤PAC使用時における急速攪拌(G_R 値150sec $^{-1}$)中の径1-3 μ m(上)及び1-30 μ m(下)の粒子個数濃度の経時変化を示している。表1は、同じ急速攪拌条件のもとで、水温が20から2 $^{\circ}$ Cまで低下させた実験で得られたTs、Tpなどを示している。図3(上)及び表1を見ると、Tsは水温が低下するに従って長くなっている。水温が20 $^{\circ}$ Cから2 $^{\circ}$ Cまで低下した場合、径1-3 μ mの粒子のTsは10.5分から14.5分へと4分程度長くなっているが、Tpの延長は2分程度であり、Tsよりも水温低下による影響は小さい。また、Neはで約2,400個/mlであるが、2 $^{\circ}$ Cでは約4,000個/mlとなっており、残留粒子数は約1.6倍増加している。Vpには、水温低下に伴うはっきりとした傾向は認められない。これらの結果から、水温の低下がTs及びNeに及ぼす影響はTp及び

vに及ぼす影響より大きいことが分かった。図3(下)で凝集剤注入から凝集及び微フロック形成過程に至る全体的な粒子の挙動を見ると、径1-3 μ mの粒子は集塊化準備期を経て個数濃度が減少、即ち、集塊化が進行する時期に入っていく。それに連動して、径3-7 μ mの粒子が増加し、その後に減少していく様子が認められる。このような現象は径7-10、10-15、15-20、20-30 μ mの粒子へと順に波及している。それらの過程を経過した後に、粒子個数濃度の減少割合は小さくなり、安定期を迎える。いずれにしても、水温が低下すると、径1-3 μ mの粒子だけでなく、全ての粒子の集塊化開始までの時間は長くなる。

表2は、Fe系の各種凝集剤(塩化第二鉄、PSI-025、PSI-100)を用いた同様の実験における結果である。い

表1 水温の低下に伴う凝集実験の結果

カオリン濁度:1度 G_R 値:150sec $^{-1}$						
水温 ($^{\circ}$ C)	Ts (min)	Tp (min)	Te (min)	Ns (個/ml)	Ne (個/ml)	Vp (個/ml/min)
20	10.5	21.0	31.5	21510	2444	991.9
15	10.5	22.0	32.5	23401	2972	900.0
10	11.5	21.0	32.5	23831	3730	1032.0
5	14.0	20.5	34.5	21688	3237	928.6
2	14.5	23.0	37.5	22621	3966	849.1

PAC:0.25mg-Al/L = 5mg/L

れの凝集剤においても、PAC の場合と同様の傾向が得られた。しかしながら、PAC 使用時と比較すると、Ts は 1-3 分短く、Ne は水温が同じであれば 20~30% 以上少なくなっているなど、良好な結果となっている。これは、微細粒子の処理性が高い Fe 系凝集剤の長所であろう。特に、PSI-100 を使用した場合、残留の初期粒子数は著しく少なく、水温が 20℃ から 2℃ へ低下しても、その増加は僅かな 100 個/ml 程度に止まっている。

径 1-3 μm の粒子の場合、Tp や Vp (v) は、水温低下の影響を殆ど受けていない。Ne だけで見れば、水温の影響を受けて増加するが、Fe 系凝集剤を使用することによって、その影響を抑制できる。水温低下の影響を強く受けるのは Ts であり、Ts は水温の低下とともに長くなっている。その結果、粒子数の安定状態に到達するまでの時間が長くなり、多くの初期粒子が後続の粒子分離施設に流入することになる。

表2 水温の低下に伴う Fe 系凝集剤による凝集実験の結果

カオリン濁度:1度 G_R 値:150sec ⁻¹ Fe系凝集剤:0.52mg-Fe/L							
凝集剤	水温 (°C)	Ts (min)	Te (min)	Tp (min)	Ns (個/ml)	Ne (個/ml)	Vp (個/ml/min)
FeCl ₃	20	8.0	22.5	14.5	21916	2149	1581.3
	10	10.0	24.5	14.5	21841	2317	1697.8
	2	13.5	28.0	14.5	21925	3170	1630.9
PSI-025	20	9.5	23.0	13.5	21274	2037	1748.8
	10	10.0	25.0	15.0	21158	1866	1677.5
	2	15.0	28.5	13.5	22521	3190	1288.8
PSI-100	20	7.5	18.5	11.0	22053	1844	2020.9
	10	9.0	20.0	11.0	21573	1741	1983.3
	2	12.5	25.0	12.5	22111	1990	1676.7

Al系凝集剤 (0.25mg-Al/L) = Fe系凝集剤(0.52mg-Fe/L)

2) PAC注入率及び G_R 値の上昇に伴う集塊化の挙動

表3は、PAC注入率及び G_R 値を上昇させた急速攪拌中における径 1-3 μm の個数濃度の経時変化を解析した結果である。いずれの水温においても、凝集剤注入率及び G_R 値の上昇に伴って、Ts、Tpはいずれも大幅に短く、即ち、水温低下の影響が小さくなっている。PAC注入率を 5 から

表3 PAC注入率及び G_R 値上昇時の凝集実験結果

G 値 (sec ⁻¹)	PAC (mg/L)	水温 (°C)	Ts (min)	Tp (min)	Te (min)	Ns (個/ml)	Ne (個/ml)	Vp (個/ml/min)
150	5	20	10.5	21.0	31.5	24909	2444	991.9
		10	11.5	21.0	32.5	23831	3730	957.2
		2	14.5	23.0	37.5	22621	3966	811.1
	10	20	7.5	8.5	16.0	26442	2027	2872.3
		10	8.0	9.0	17.0	23445	2286	2351.0
		2	10.0	9.0	19.0	22392	1962	2270.0
450	5	20	7.0	8.0	15.0	24893	1141	2969.0
		10	7.5	8.5	16.0	24616	1294	2743.8
		2	8.0	10.0	18.0	21736	1220	2021.2

10mg/Lに、 G_R 値を 150 から 450sec⁻¹に上昇させると、いず

れの水温においても、Tsは30%以上、Tpは50%以上短縮された。また、Ne及びVpについても大きく改善されて、いずれの水温においても、 G_R 値を 150 から 450sec⁻¹に上昇させることによって、Ne、Vpはともに60%以上改善されている。Ne及びVpは、PAC注入率を 5 から 10mg/Lに上昇させた場合、20~50%程度改善された。

表4は、水温 20 及び 2℃、 G_R 値 150 及び 450sec⁻¹における凝集沈殿処理で得られた処理水水質（実験条件：カオリン濁度 5 度、PAC注入率 20mg/L、 G_R 値 20sec⁻¹、Ts値 20min、静置 40min）を示している。全体的傾向を見ると、いずれの場合にも、水温の低下に伴って処理水濁度及びSTRは悪化しているが、 T_R 値の延長、PAC注入率の上昇、 G_R 値の上昇に伴ってそれらは改善されている。これらの改善は、前節で説明したように、凝集剤注入率及び G_R 値の上昇に伴うTsの短縮及びNeの減少が反映された結果と考えることが出来る。

表4 20 及び 2℃における凝集沈殿処理水の品質

水温 (°C)	G_R 値 (sec ⁻¹)	T_R 値 (min)	濁度 (mg/L)	STR (-)
20	150	1	0.915	5.48
		5	0.547	3.12
	450	1	0.650	4.63
		5	0.216	1.78
2	150	1	3.006	8.64
		5	0.730	4.84
	450	1	1.221	7.98
		5	0.355	2.47

3) 急速攪拌に伴う凝集剤に由来する粒子個数の動き

図5及び図6は、水温 20、10 及び 2℃の膜ろ過水（微粒子数が極めて少ない）に PAC のみを注入した凝集実験で得られた径 1-3 μm の粒子個数濃度及び径 1-30 μm の粒子個数濃度の経時変化の状況を示している。また、それらの実験で得られたTs、Tpなどについては、表5にまとめている。

始めに、図5はPAC注入後における粒子個数濃度の全体的な経時変化を示している。これらの図から、いずれの水温においても、攪拌時間の経過とともに、凝集剤凝析物が比較的小さな粒子（1-7 μm ）から中間径の粒子（7-10 μm ）へ、更には比較的大きな径の粒子（10-30 μm ）

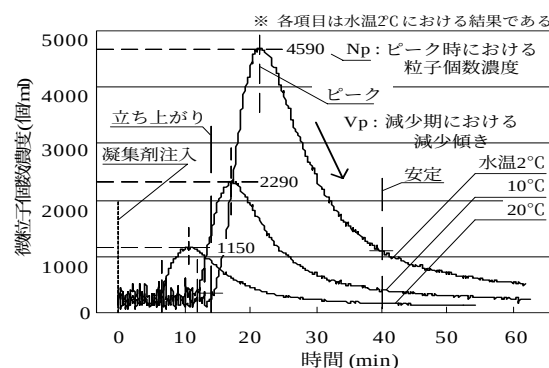
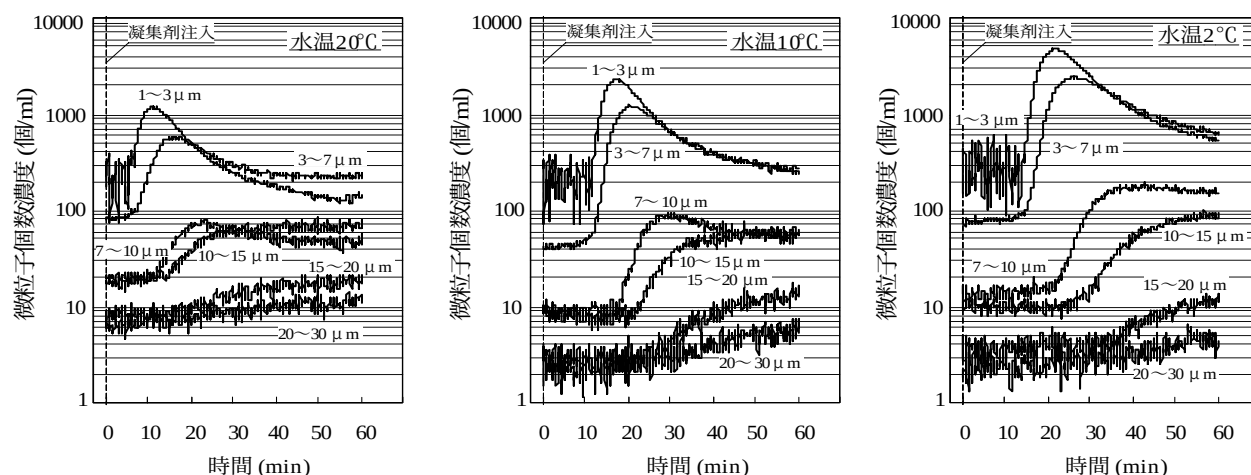


図6 凝集剤のみ注入時の急速攪拌による
径 1-3 μm の粒子個数濃度の経時変化

図5 PACのみ注入した場合の各水温における粒径別個数濃度の経時変化 (G_R 値 150sec^{-1} 、PAC5 mg/l)

へと次第に集塊化している様子が見られる。また、試料の水温低下が、ピーク時の個数濃度や急速攪拌 60 分後に残留する粒子個数濃度などに影響を及ぼしている様子が認められる。

つぎに、図6で径 $1\sim3\mu\text{m}$ 粒子のみの個数濃度の動きを見ると、いずれの水温においても、凝集剤注入→粒子個数濃度が立ち上がり→ピーク（減少開始点）→安定状態への順に推移している。同図で特徴的な点は、①水温が低下するにつれて、凝集剤注入から立ち上がりまでの時間が長くなっていること、及び②水温が低い場合ほど、粒子個数濃度の上昇が長く続くと同時にピークの個数 N_p が増加していることである。①の傾向については、1) 及び 2) で示した実験結果中の T_s に類似の動きである。したがって、表5で見られるように、水温低下に伴って V_p が上昇する結果となっている。

表5は、PAC注入率を5から10 mg/L、 G_R 値を150から 450sec^{-1} へ上昇時の解析結果を示している。凝集剤注入率を上昇させると、いずれの G_R 値においても、粒子個数の立ち上がりまでの時間が低下すると同時に、温度低下による変動が小さくなっている。また、PAC注入率10 mg/Lで G_R 値を上昇させた場合にも、立ち上がりまでの時間は短くなっている。このように、PAC注入率及び G_R 値の上昇に伴って、 V_p 値が大きな値となっていることから、それらの上昇は、水温低下による集塊化プロセスの進行の遅れを抑制する上で大きな効果を発揮することが分かった。

表5 PAC注入率及び G_R 値の上昇時の凝集実験結果

G_R 値 (sec^{-1})	PAC (mg/L)	水温 ($^{\circ}\text{C}$)	立ち上がり (min)	ピーク (min)	安定 (min)	減少期間 (min)	N_p (個/ml)	N_e (個/ml)	V_p (個/ml/min)
150	5	20	5.5	10.5	25.5	15.0	1144	168	65.0
		10	11.0	17.0	32.0	15.0	2284	355	128.6
		2	14.5	21.5	40.0	18.5	4589	692	210.6
	10	20	6.0	9.0	20.0	11.0	494	88	36.9
		10	6.0	10.0	23.0	13.0	2247	330	147.5
		2	6.0	9.5	25.0	15.5	7817	461	474.6
450	5	20	5.0	10.0	18.0	8.0	267	85	22.7
		10	7.5	11.0	20.0	9.0	1041	170	96.8
		2	8.0	11.5	24.0	12.5	3898	344	284.3
	10	20	3.0	5.5	11.5	6.0	309	125	30.8
		10	3.0	5.5	12.5	7.0	8085	269	1116.6
		2	3.5	5.5	14.5	9.0	8757	371	931.8

4. あとがき

水温の低下に伴う急速攪拌中の粒子数の動きに関しては、 T_s は長くなり、 N_e は増加するが、 T_p 及び V_p (v) には大きな変化は認められなかった。この傾向は、Fe系凝集剤使用の場合にも同様に認められた。凝集剤注入率及び G_R 値を上昇させることによって、 T_s 及び T_p の短縮、 N_e 及び V_p の個数減少をそれぞれ大幅に達成することが出来た。また、凝集剤のみ注入した場合の立ち上がりまでの時間などから、 T_s は凝集剤注入直後から凝集剤凝析物が集塊化を開始して濁質粒子と比較しうる大きさにまで成長する時間と考えられる。水温低下による集塊化進行の遅れについては、凝集剤注入率及び G_R 値の上昇によって改善を図ることが出来ることが分かった。それらによる改善は、凝析物の絶対量の増加及びそれに伴う接触効率の上昇が原因であると推測される。

【参考文献】

- 1) 海老江 邦雄・川口 倫由・浅野 優・水森 豊：直接ろ過用低濁原水の凝集挙動に及ぼす急速攪拌などの因子の影響、第56回全国水道研究発表会講演集、pp.118-119、2005年
- 2) 海老江 邦雄・水森 豊・川口 倫由・安藤 直哉：急速攪拌の適正化による低温原水の凝集沈殿処理性の改善、第56回全国水道研究発表会講演集、pp.120-121、2005年
- 3) 海老江 邦雄・川口 倫由・樋口 真也・木村 大介：鉄系凝集剤による低濁原水の凝集挙動に関する研究、第56回全国水道研究発表会講演集、pp.134-135、2005年
- 4) 海老江 邦雄・一戸 正憲・山口 太秀・川口 倫由：急速攪拌が沈殿処理水に残留する粒子数に及ぼす影響、第56回全国水道研究発表会講演集、pp.124-125、2005年
- 5) 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、第715号、pp.42-49 (1994.4.)