Ⅶ－９　　平成16年度　土木学会北海道支部　論文報告集　第61号

急速撹拌の適正化による凝集沈澱及び急速ろ過の処理性改善

Improving the Treatabilities in Coagulation/Sedimentation and Rapid Filtration through the Optimization of Rapid-mixing

北見工業大学　フェロー　海老江　邦　雄　(Kunio Ebie)
”　○学 生 員　水　森　　豊　(Yutaka Mizumori)
”　　安　藤　直　哉　(Naoya Ando)
”　学 生 員　樋　口　真　也　(Shinya Higuchi)
”　　木　村　大　介　(Daisuke Kimura)

1．ま　え　が　き

クリプトスポリジウム原虫の流出事故に伴って、ろ過処理水の水質基準が厳しくなった。多くの浄水場は、これまで比較的弱く短い急速撹拌の下で凝集剤注入率を上昇させ、凝集沈澱水濁度を基準値の0.5～1.0度程度まで処理した後、ろ過を行っている。しかしながら、このような処理方法に頼っている限り、多量の凝集剤が注入されるため、沈澱汚泥量の増加及びろ過損失水頭の急上昇によるろ過時間の短縮の問題が付きまとってしまう。

著者らは、それらの問題を解決するためには、急速撹拌G_R値及びT_R値の適正化が最も効果的であること、また、そうした場合には、凝集剤注入率を減少させても凝集沈澱の処理性改善に繋がることを指摘している。これを実施設に適用することを考えると、急速撹拌G_R値の改善は比較的容易であるが、急速撹拌T_R値の延長は、敷地スペースの確保、急速撹拌槽の拡張を伴うため、すぐに実行できることではない。しかしながら、処理水水質の改善に及ぼす効果を明らかにしておくことは重要である。

本論は、G_R値及びT_R値の適正化に伴う凝集沈澱及びろ過の処理性を把握するとともに、処理性改善の効果を明確化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

急速ろ過プロセスの全工程を備えた図1に掲げる2系列の連続流の実験装置を用いて凝集沈澱・ろ過実験を行った。1系列あたりの1日最大処理水量は10m^{3}であり、急速混和槽、フロック形成槽、フィン付傾斜板沈澱槽、砂ろ過筒などによって構成されている。系列1のろ層は単層(珪砂、有効径:0.60㎜、層厚:60㎝、ろ過速度:120m/d)、系列2のろ層は複層(アンスラサイト+珪砂、有効径：1.0+0.60㎜、層厚：20+40㎝、ろ過速度 120m/d)とした。なお、同装置の仕様は、表1に掲げる通りである。また、急速混和槽は6槽に分割され、回転数可変(0～600rpm)の撹拌機を用いたことにより、撹拌T_R値及びG_R値を自由に設定できる点が大きな特徴である。

撹拌G値の算出にあたっては、次の式(1)を用いた。

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

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

2.2　実験方法及び条件

実験においては、北見市広郷浄水場浄水にカオリン5mg/L(濁度で5度に相当)を加えた試料水を用いて、Al系凝集剤PACを所定量の20ppm注入した後、急速、緩速撹拌及び静置（急速撹拌G_R値150，450s^{-1}、T_R値1，3，5min及び緩速撹拌G_S値20s^{-1}、T_S値20min、その後、静置：表面負荷率として0.20cm/min）した後の処理水を一旦沈澱水受槽に貯留した。その後、砂ろ過筒へ導入させた。凝集pH値については、1N-HClと0.5N-NaOHとを用いてpH6.8±0.1に設定した。なお、採取した凝集沈澱処

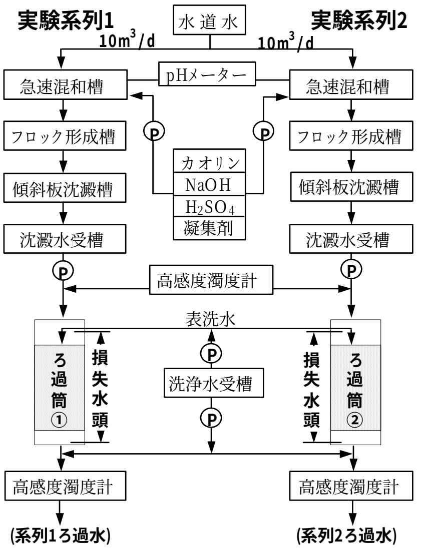


図1　急速ろ過プロセス実験装置

表1　急速ろ過プロセス用実験装置の仕様

装　置	仕　　様
急　速 混和槽	サイズ:縦300×横750×450mm 回転数:0～833rpm 撹拌翼:十字型(横20×縦10mm×6枚)×4段 撹拌軸:φ10mm×700mm×6本
フロック 混和槽	サイズ:縦400×横400×高さ700mm×4槽 変速機:4基、回転数:0～100rpm パドル:縦軸型(縦500×横50mm×4枚)×4基
沈澱槽	サイズ:縦400×横1600×高さ700mm 傾斜板:縦390×横390×高さ390mm×4基
砂ろ過筒	サイズ:幅70×奥行70×長さ1950mm 表洗:0.2～0.4m/min、逆洗:0.4～1.5m/min
流　量 制御弁	流量調整範囲:10～100 ㍑/時 作動差圧:0.1～1.0kgf/cm^2
高感度 濁度計	前方散乱による微粒子カウント方式 濁　度:0.000～2.000mg/L(カオリン) 粒子数:0～10^{5}個/mL 粒子径:0.5～1、1～3、3～7、7μm以上
損　失 水頭計	ガラス管マノメーター:φ10×高さ2700mm ろ層5cmごとの損失水頭測定可能

理水及び、ろ過処理水については濁度、Al 濃度などの分析･測定を行った。凝集沈澱水濁度は、濁度･色度計（日本電色工業製、WA2000N)、ろ過水濁度は高感度濁度計(富士電機 ZYU 型)を用いて、また Al 濃度については、吸光光度法(オキシン法)で測定した。

２．３　吸引ろ過試験及び STR の算出

写真１　吸引ろ過装置

凝集沈澱の処理性を評価するために、濁度及び Al の他に、吸引時間比 STR(Suction Time Ratio)(無次元)を採用した。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、式(2)を用いて算出した。

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 1 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 については、試料水と同水温のものを用いた。

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

３．実験結果及び考察

３．１　G_R値･T_R値の上昇に伴うろ過の処理性

最初に、多くの浄水場で採用されている撹拌条件（以下；従来条件と記載する、G_R 値 150s^{-1}, T_R 値 1min）及び、PAC による濁度処理に対する最適撹拌条件(G_R 値 450s^{-1}、T_R 値 1, 3, 5min)とした合計 4 条件において、凝集沈澱及びろ過処理を行った。表 2 は、それらの実験で採取した凝集沈澱処理水の濁度、Al 及び STR の平均値を示している。

同表における濁度については、従来条件(濁度:1.03 度)→G_R 値 450s^{-1}･T_R 値 1min(同:0.87 度)→G_R 値 450s^{-1}･T_R 値 3min(同:0.75 度)→G_R 値 450s^{-1}･T_R 値 5min(同:0.61 度)の順に処理性は改善されている。STR については、濁度の場合と同様の撹拌条件の順に処理性が改善されている。しかしながら、G_R 値 450s^{-1}･T_R 値 5min を除くすべての条件においては、STR の処理目標値である 2.0 付近を大幅に超過しており、注目される。

ついで、これら沈澱処理水を 24 時間ろ過後の損失水頭

表２　急速ろ過プロセス用実験装置における凝集沈澱処理の結果

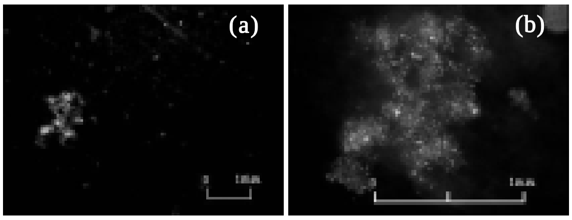
凝集剤	G_R値 (s^{-1})	T_R値 (min)	濁度 (度)	Al (mg/L)	STR (-)
PAC	150	1	1.03	0.51	5.6
	450	1	0.87 (15.5)	0.50 (2.0)	5.1 (8.9)
	450	3	0.75 (27.2)	0.46 (9.8)	4.2 (25.0)
	450	5	0.61 (40.8)	0.38 (25.5)	2.8 (50.0)

＊　カッコ内は、従来条件(G_R値150s^{-1},T_R値1min)を基準とした改善率(%)

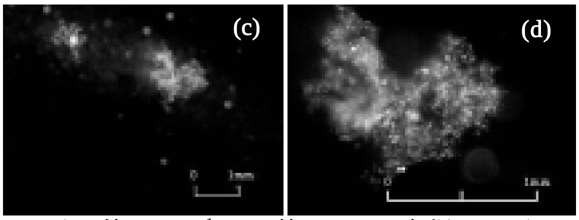
表３　急速ろ過プロセス用実験装置におけるろ過処理の結果

凝集剤	G_R値 (s^{-1})	T_R値 (min)	ろ過0～2時間 ピーク濁度 (度)	ろ過0～2時間 平均濁度 (度)	ろ過2～24時間 平均濁度 (度)	ろ過2～24時間 平均Al (mg/L)	損失水頭 (cm)
PAC	150	1	0.032	0.014	0.009	0.024	133.7
	450	1	0.034 (-6.3)	0.015 (-7.1)	0.006 (33.3)	0.030 (-25.0)	122.4 (8.5)
	450	3	0.036 (-12.5)	0.011 (21.4)	0.002 (77.8)	0.022 (8.3)	113.4 (15.2)
	450	5	0.040 (-25.0)	0.007 (50.0)	0.001 (88.9)	0.029 (-20.8)	88.0 (34.2)

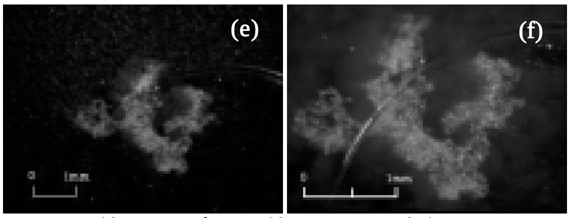
＊ カッコ内は、従来条件(G_R値150s^{-1},T_R値1min)を基準とした改善率(%)



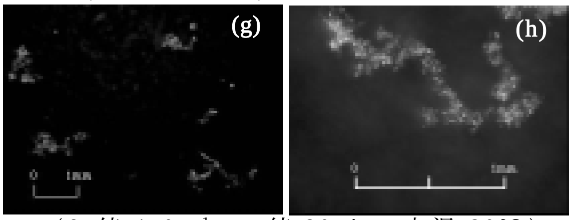
(G_R 値 450s^{-1}, T_R 値 1min、水温 20℃)



(G_R 値 450s^{-1}, T_R 値 5min、水温 20℃)



(G_R 値 450s^{-1}, T_R 値 15min、水温 20℃)



(G_R 値 450s^{-1}, T_R 値 20min、水温 20℃)

写真 2　フロック写真

を表 3 で見ると、STR が改善されるに伴って損失水頭は大きく減少している。即ち、従来条件→G_R 値 450s^{-1}･T_R 値 5min にした場合には、STR は 5.6→2.8、損失水頭は

133.7cm→88.0cm に抑えられ、ガイドラインの 48～72hrs(許容限度損失水頭 2m)を達成することができる。しかしながら、G_R 値 450s^{-1}・T_R 値 1min 及び G_R 値 450s^{-1}・T_R 値 3min においては、損失水頭は 122.4cm 及び 113.4cm といまだに大きく、十分なろ過継続時間を確保することはできない。

写真 2 は、水温 20°C、G_R 値 450s^{-1}で T_R 値を上昇させた際の緩速撹拌後のフロックの性状を示している。フロック内に濃い白色で分散状態で写っている粒子がカオリン、薄い白色の部分が水酸化アルミニウム、黒い部分が空隙水である。T_R 値 1min の (a)及び(b)においては、フロックは小さく、それに取り込まれているカオリン粒子も少なく低密のようである。このようなフロックは沈降性が悪いため、沈澱処理水中に Al が残留することとなる。T_R 値を 5min 程度まで上昇させた(c)及び(d)では、フロックは大きく、取り込まれているカオリン粒子についても密になっている様子が窺える。さらに、T_R 値 15min の場合には、いくつかのフロックが更に集塊化して大きなフロックを形成している。これは、T_R 値が大きいために、凝集剤の取り込みが十分に進行し、緩速撹拌においてそれらが接合して粗大化したものと考えられる。T_R 値を 20min まで上昇させると、フロックの劣化が起こってフロックの径は減小している。このことから、STR 及び損失水頭を十分に改善するためには、G_R 値だけではなく T_R 値の適正化も重要であることが示唆された。

図 2 は、表 2 の凝集沈澱処理水をろ過した際のろ過水濁度の経時変化を示している。同図から、いずれの条件においても、ろ過初期にろ層の未熟に起因するピーク濁度、即ち、濁度の初期漏出が認められる。また、従来条件で前処理した場合には、未凝集粒子のろ過池への流入が多いためか、ろ過初期だけでなく全工程にわたって、他の条件よりも高いろ過水濁度で推移している。

以上、損失水頭及びろ過水濁度は、急速撹拌 G_R 値及び T_R 値に大きく影響されており、それらを改善するためには、G_R 値及び T_R 値の両方をできる限り最適値に近づけることが大切である。

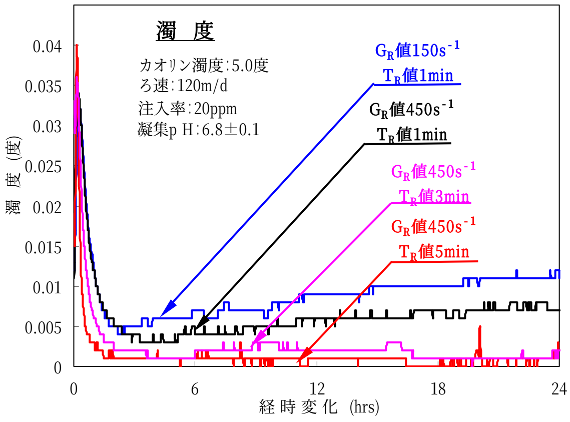


図 2　ろ過水濁度の経時変化

3．2　複層ろ過の採用による損失水頭の抑制

3.1 で説明したように、G_R 値を適正化したとしても、T_R 値をある程度延長させなければ、凝集沈澱処理水の

表 4　各ろ層深さにおける損失水頭発生量 (24hrs)

G_R値 (s^{-1})	T_R値 (min)	ろ過方式	全損失 (cm)	0～10 (cm)	10～20 (cm)	20～30 (cm)	30～60 (cm)
450	1	単層	122.4	100.6 (82.2)	21.1 (17.2)	0.7 (0.6)	0.0 (0.0)
		複層	28.6	7.3 (25.5)	4.1 (14.3)	12.8 (44.8)	4.4 (15.4)
	3	単層	113.4	101.5 (89.5)	10.7 (9.4)	0.8 (0.7)	0.4 (0.4)
		複層	26.9	7.4 (27.5)	4.8 (17.8)	8.4 (31.2)	6.3 (23.4)

＊カッコ内は各ろ層深さにおける損失水頭の抑留割合 (%)

表 5　複層ろ過におけるろ過水水質の動き

G_R値 (s^{-1})	T_R値 (min)	ろ過方式	ろ過0～2時間		ろ過2～24時間	
			ピーク濁度 (度)	平均濁度 (度)	平均濁度 (度)	平均Al (mg/L)
450	1	単層ろ過	0.032	0.014	0.006	0.030
		複層ろ過	0.125 (-290.6)	0.024 (-71.4)	0.002 (66.7)	0.031 (-3.3)
	3	単層ろ過	0.036	0.011	0.002	0.022
		複層ろ過	0.181 (-402.8)	0.017 (-54.5)	0.002 (0.0)	0.031 (-40.9)

＊　カッコ内は、単層ろ過を基準とした改善率(%)

STR 及びろ過損失水頭を十分に抑制することはできない。そこで、凝集沈澱処理水の STR がある程度大きい場合でも、損失水頭を抑制して十分なろ過継続時間を確保できる方法を検討した。

一般に、大きな STR を示す沈澱処理水のろ過において損失水頭を抑制するには、濁質をろ層内に分散させて捕捉すること、即ち、ろ過阻止率を低下させることが有効な方法の一つと考えられる。それを実現する方法としては、単にろ層の空隙率を増加させる方法、ろ材の径を上昇させる方法、複層ろ過の場合のように、ろ材径の上昇と同時に材質や空隙率が異なるろ層を用いる方法などがある。ここでは、上部にアンスラサイトを置いた複層ろ過による損失水頭の抑制効果を調べた。

表 4 は、G_R 値 450s^{-1}・T_R 値 1min 及び G_R 値 450s^{-1}・T_R 値 3min で得られた凝集沈澱処理水を複層ろ層でろ過した場合の損失水頭を示している。同表から、24 時間後の損失水頭は、G_R 値 450s^{-1}・T_R 値 1min の場合(STR5.1)、76.6%（122.4→28.6cm)、G_R 値 450s^{-1}・T_R 値 3min の場合(STR4.2)、76.3%（113.4→26.9cm）抑制された。これらのことは、T_R 値を十分に確保出来ない場合においても、複層ろ層を用いることによって、目標の 72 時間以上ものろ過継続時間をろ速 240m/d においても確保できること示している。ついで、ろ層深さごとの損失水頭を見ると、複層ろ層の場合、ろ層上部 20cm の抑留割合は、それぞれ 1/2 程度に低下する反面、ろ層深さ 20～60cm の抑留割合はそれぞれ大幅に上昇している。その結果、表 5 のろ過初期のピーク濁度及びろ過 0～2 時間の平均濁度はいずれも上昇している。なお、2～24 時間のろ過水 Al は僅かに上昇しているが平均濁度は十分に改善されており、良好な処理が行われたと判断できる。

以上、ろ層を複層にすることにより、損失水頭は大幅に抑制されるが、ろ過初期の濁質漏出を抑制することが必要となる。

3．3　ろ過初期の濁質漏出の抑制

ろ過初期(0～2hr)の漏出濁度を抑制するためには、ろ過開始前後において、ろ層内の熟成を早期に達成させる技術の導入が必要である。ここでは、低速スタートろ過

法及び熟成層導入ろ過法を用いてろ過初期の濁質漏出の抑制を試みた。

表 6 は、G_R 値 450s^{-1}・T_R 値 1min 及び G_R 値 450s^{-1}・T_R 値 3min を用いた場合の沈澱処理水を対象に、通常の急速ろ過法及び低速スタートろ過法(ろ速上昇 3 段, 1 段目：ろ速 40m/日、ろ過開始からの時間 0〜25min, 2 段目：80m/日、25〜50min, 3 段目：120m/日、50〜1440min)、及びろ過開始前にろ速 40m/d で 20 分間通水し、ろ層上部に薄い熟成層を形成させた熟成層導入ろ過法におけるろ過初期の濁度の動きを示している。なお、ろ過開始からろ過水濁度が 0.01 度に低下するまでを初期漏出期とした。

同表から、低速スタートろ過法の採用によって、それぞれピーク濁度は 0.125→0.091 度(改善率：27.2%)、0.181→0.106 度(同：41.4%)と低下している。一方、熟成層導入ろ過法における改善率は、通常ろ過法における結果を基準にすると、それぞれ 73.6%(濁度:0.033 度)、77.9%(同：0.040 度)であった。これらの改善率は低速スタートろ過法採用時よりも高かった。また、いずれの条件においても、ピーク濁度が抑制されるほど初期漏出時間は短くなり、ろ過安定期における平均濁度は低下した。

以上、複層ろ層におけるろ過初期の濁質漏出抑制には、熟成層導入ろ過が効果的であること、及びろ過初期の水質改善には、その後の清澄安定期における水質改善に繋がることが分かった。

表 6　初期漏出抑制を目的とした
ろ過法の導入による処理性

G_R 値 (s^{-1})	T_R 値 (min)	ろ 過 方 式	初期漏出期 時間 (min)	初期漏出期 ピーク濁度 (度)	安定期 平均濁度 (1.5〜2.0hrs) (度)
450	1	通常ろ過	73	0.125	0.006
		低速スタートろ過	71 (2.7)	0.091 (27.2)	0.006 (6.3)
		熟成層導入ろ過	49 (32.9)	0.033 (73.6)	0.004 (36.1)
	3	通常ろ過	81	0.181	0.008
		低速スタートろ過	76 (6.2)	0.106 (41.4)	0.006 (28.8)
		熟成層導入ろ過	49 (39.5)	0.040 (77.9)	0.004 (48.8)

*カッコ内は、通常の急速ろ過を基準とした改善率 (%)

4．研 究 の 総 括

１）最適な急速撹拌条件の採用は、砂ろ過処理水の濁度には勿論、Al 及び損失水頭の抑制にも高い効果を示すことが分かった。

２）STR と損失水頭の発生量とは高い相関を示すことから、凝集沈澱の処理性を評価する場合、ろ過抵抗指標として STR の採用は有効と考えられる。

３）十分な T_R 値を確保できなかった場合の凝集沈澱処理水をろ過する場合には、複層ろ過の採用が損失水頭の大幅な抑制に繋がる。しかしながら、それに伴いろ過初期の水質は僅かであるが悪化する。

４）複層ろ過におけるろ過水濁度の抑制には、低速スタートろ過などが効果的である。ろ過開始前にろ層上層部に僅かな熟成層を形成する熟成層導入ろ過法が特に有効と考えられる。

5．あ と が き

実験に協力いただだいた北見工業大学土木開発工学科上・下水道研究室の輪島 秀則技術員、学生各位、及び北見市企業局広郷浄水場の萩下 隆水質係長に心から感謝する。

【 参　考　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－、水道協会雑誌等、816 号、pp.11〜21(2002.9.)

2) 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.)

3) 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澱における急速撹拌 G_R 値の検討、第 53 回全国水道研究発表会講演集、pp.92〜93(2002.5.)

4) 海老江 邦雄、山木 暁、東 義洋、水森 豊、金田一 貴朗：低温濁水の急撹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.)

5) 浄水技術ガイドライン 2000：水道技術センター

6) 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、816 号、pp.11〜21 (2002.9)

7) 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.)

8) 海老江 邦雄、川口 倫由、水森 豊、阿部 員征：鉄系凝集剤 PSI の使用及び急速撹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、pp842〜845(2004.1.)

9) 海老江 邦雄、水森 豊、川口 倫由、木村 大介、阿部 員征：急速撹拌の適正化による低温濁水の凝集沈澱処理の改善、第 55 回全国水道研究発表会、pp172〜173(2004.5.)

10) 海老江 邦雄、張 一憲、樋口 真也、山田 直之：低速スタートろ過による低濁原水処理の効率化、第 54 回全国水道研究発表会、pp292〜293(2003.5.)

11)海老江 邦雄、張 一憲、川口 倫由、山田 直之：直接ろ過における粒子除去に及ぼす急速撹拌の適正化の効果、第 55 回全国水道研究発表会、pp314〜315(2004.5.)

12) 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.

13) K.Ebie,N.Yamada,I.H.Jang,T.Kawaguchi,S.Higuchi: Improving Particle Separation Efficiency in Direct Filtration of Low Turbidity source Water, Proc. Of XIII IWA-ASPAC Regional Conference in Cebu, Philippines, pp329-336(2003.10.)