

急速攪拌の適正化技術の適用による凝集処理後に残留する初期粒子数の低減化

Reducing Primary Particles Concentration Through Innovative Technology
for the Optimization of Rapid Mixing

北見工業大学 フェロー 海老江 邦雄 (Kunio Ebie)
 同大学大学院 ○学生員 川口 倫由 (Toshiyuki Kawaguchi)
 同大学大学院 落合 壽昭 (Hisaaki Ochiai)
 同大学大学院 学生員 樋口 真也 (Shinya Higuchi)
 同大学大学院 学生員 田村 繁生 (Shigeo Tamura)

1 ま え が き

我が国では、総浄水量の76.5%が急速ろ過法、19.6%が消毒法、3.8%が緩速ろ過法を採用して浄水処理(平成14年度)を行っている。これらの中で、消毒法及び緩速ろ過法を採用している浄水場では、原虫クリプトスポリジウムの蛇口からの流出事故が契機となり、直接ろ過法または膜ろ過法への転換を急いでいる。いずれの処理法を用いた場合にも、粒子分離効率を向上させるためには、粒子分離の前処理段階である急速攪拌で、確実な凝集・微フロック形成を行い、原水中の初期粒子の個数濃度をできる限り減少させておくことが重要である。

凝集剤注入後の凝集・微フロック形成は、主に2つの段階を経て進行する。最初の段階は、注入した凝集剤が加水分解・重合反応を起こすと同時に粒子の荷電を中和させる段階であり、次の段階は、荷電中和された粒子群を凝析した凝集剤で集塊化させる段階である。この2つの段階を経過すると、形成された微フロックは、水流のせん断力によって破壊、成長を繰り返し、粒子個数濃度は、動的な平衡状態となる。初期粒子の表面の活性度が減少することによる破壊及び大型微フロックの微細粒子への破壊の2種類があると指摘^{1), 2)}されている。

直接ろ過層を通過する粒子径と個数濃度とを計測^{3, 4)}したところ、径1~3 μmの粒子数が多かった。このことから、その径の粒子個数濃度を急速攪拌段階でいかに低減化させるかに関して回分式凝集実験⁵⁾を行った。その結果、2つの知見が得られた。その1つは、凝集剤注入後における原水中の径1~3 μmの初期粒子個数濃度は、集塊化準備期⇒集塊化進行期⇒集塊化安定期を経て減少していくこと。2つ目は、この径の初期粒子数を最も減少させるためには、急速攪拌強度(G_R 値)を凝集剤に固有の適性値に設定すべきであるということである。本論では、急速攪拌段階における径1~3 μmの初期粒子の個数濃度を更に低減化させるために行った実験の結果を報告する。即ち、 G_R 値を凝集剤の最適値に設定した凝集・微フロック形成において、集塊化安定期に大型の微フロックが破壊を惹き起こさないように G_R 値を低下させることが、径1~3 μmの粒子個数濃度の大幅な減少につながることを報告したい。

2 実 験

2.1 装 置

図1に掲げる回分式凝集実験装置は、矩形水槽(縦200mm×横200mm×高さ300mm)、攪拌機(10~800rpmに設定可能、3段の攪拌翼(1段あたり6枚の翼))、粒子

カウンター(富士電機システムズ製:ZVM型)、流量ポンプ(50mL/min)及びデータ記録用PCで構成されている。

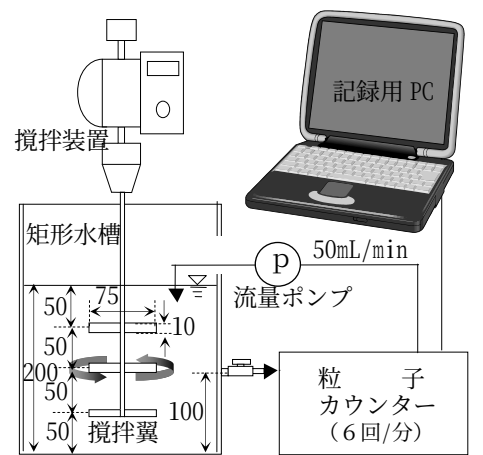


図1 回分式凝集実験装置の模式図 (mm)

この実験装置の最大の特徴は、通常のジャーテスターでは出すことができない大きな攪拌強度(最大 G_R 値3,900sec⁻¹程度)で実験が可能にある。

なお、本論の実験に採用した急速攪拌強度 G_R 値(sec⁻¹)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(m²/sec)、V: 攪拌槽の容量(m³)である。

2.2 試料水及び凝集剤

実験には、表1に示す北見工業大学水道水(深井戸水)に表2に掲げる粒径分布を持つカオリン粒子を加えた濁度1mg/Lに調製した試料水を用いた。実験は定温室内で

表1 北見工業大学水道水水质(深井戸水)

項 目	測定値
pH (-)	6.5
濁度 (mg/L)	0.03
電気伝導度 (μS/cm)	94.1
アルカリ度 (mg/L)	57.0
硬度 (mg/L)	74.7
蒸発残留物 (mg/L)	231.0
塩素イオン (mg/L)	16.1
KMnO ₄ 消費量 (mg/L)	0.5
全鉄 (mg/L)	0.15
マンガン (mg/L)	<0.005

行い、水温は20±0.1℃に制御した。また、凝集剤としては、ポリ塩化アルミニウム(以下、PAC: 示式は

$[Al_2(OH)_mCl_{6-m}]_n$ 、ここで、 $1 \leq n \leq 5$ 、 $m \leq 10$ ）を用いた。PAC は蒸留水で所定濃度に希釈したものを pH3.5 に調整して実験に用いた。また、凝集 pH は、PAC の最適凝集域である 6.8 ± 0.1 を用いた。

表2 カオリン 1mg/L 中の粒子数 (ZVM で測定)

粒子径 (μm)	個数 (個/mL)	割合 (%)
1～3	20,583	76.73
3～7	5,288	19.71
7～10	684	2.55
10～15	237	0.88
15～20	21	0.08
20～30	10	0.04
30～	3	0.01

2. 3 条件及び方法

前述の矩形水槽に試料水 8 L を入れた後に所定の急速攪拌を開始し、PAC 5 mg/L を注入した直後から、試料水中の粒子の径及び個数濃度 (測定径 1～3、3～7、7～10、10～15、15～20、20～30 及び 30 μm 以上) を 10 秒間隔で 60 分経過後まで測定した。

初期粒子中の径 1～3 μm の個数濃度を減少させるために、つぎの種類の実験を行った。即ち、最初に、安定期に残存した粒子表面の活性度について調べるために、3時間経過後まで 30 分おきに G_R 値を 150 から 1,000 へ、また 1,000 から 150 sec^{-1} へと切り替える実験を繰り返した。ついで、安定期に大型の微フロックが破壊されて径 1～3 μm の粒子個数濃度が上昇することを抑えるために、 G_R 値を低下させる最適な時期及びその最適な G_R 値について検討を行った。

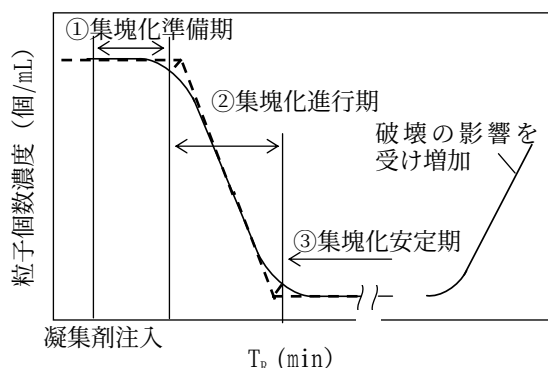


図2 凝集剤注入後における径 1～3 μm の粒子個数濃度の経時変化

3 凝集剤注入後の粒子個数濃度の経時変化

図2⁵⁾は、PAC 注入後における T_R 値（急速攪拌時間）の延長に伴う径 1～3 μm の粒子個数濃度の経時変化を模式的に示している。同図が示すように、PAC 注入後の粒子個数濃度は、集塊化準備期⇒集塊化進行期⇒集塊化安定期を経て減少していく。この集塊化安定期に入るまでの時間は、PAC 注入率及び G_R 値の上昇で早まることが分かっている。また、図3⁵⁾は、 T_R 値の延長に伴う粒子個数濃度の経時変化を示している。低い G_R 値で PAC 注入率を上昇させた場合に僅かに減少する⁵⁾集塊化安定期における径 1～3 μm の粒子個数濃度は、 G_R 値の上昇によって大幅に低下し、 G_R 値 1,000 sec^{-1} で最低となった。しかしながら、 G_R 値 450 sec^{-1} の場合には径 30 μm 以上の、 G_R 値 1,000 sec^{-1} では径 15 μm 以上の粒子個数濃度は、 T_R 値の延長に伴って一旦増加した後に、減少に転じている。それと同時に、 G_R 値 450 sec^{-1} では径 10～30 μm の、 G_R 値 1,000 sec^{-1} では径 3～15 μm の粒子個数濃度は、一旦減少した後に増加している。また、 G_R 値 450 sec^{-1} では径 1～10 μm の、 G_R 値 1,000 sec^{-1} では径 1～3 μm の粒子個数濃度が破壊による上昇と生成による減少との動的な平衡状態となっているためか、その個数濃度は減少していない。これらのことから、径 1～3 μm の粒子個数濃度を更に低下させるためには、 G_R 値 1,000 sec^{-1} を採用して粒子個数濃度を最低にした後に、粒子の破壊を抑制する方法を導入すると効果があるものと考えられる。

4 結果及び考察

4. 1 安定期に残存する径 1～3 μm 粒子の活性度

図4は、PAC 注入後の 30 分間、 G_R 値 150 sec^{-1} で急速攪拌した後、1,000 sec^{-1} ⇔ 150 sec^{-1} を 30 分おきに繰り返した場合の粒子個数濃度の変化を示している。同図において、 G_R 値 150 sec^{-1} から 1,000 sec^{-1} へ最初に上昇（図中 A）させた場合には、径 15 μm の粒子は破壊されて個数濃度は減少し、径 1～3 μm の粒子個数濃度は減少している。これは、 G_R 値 150 sec^{-1} のような低 G_R 値では、径 1～3 μm の濁質粒子が多く残留していたため、1,000 sec^{-1} へ上昇させることにより、その径の粒子個数濃度が減少したと考えられる。次に、 G_R 値を 1,000 sec^{-1} から 150 sec^{-1} へ下げる（図中 B）と、径 1～3 μm の粒子個数濃度は更に低下していく。これは、 G_R 値の減少によって径 15 μm 以

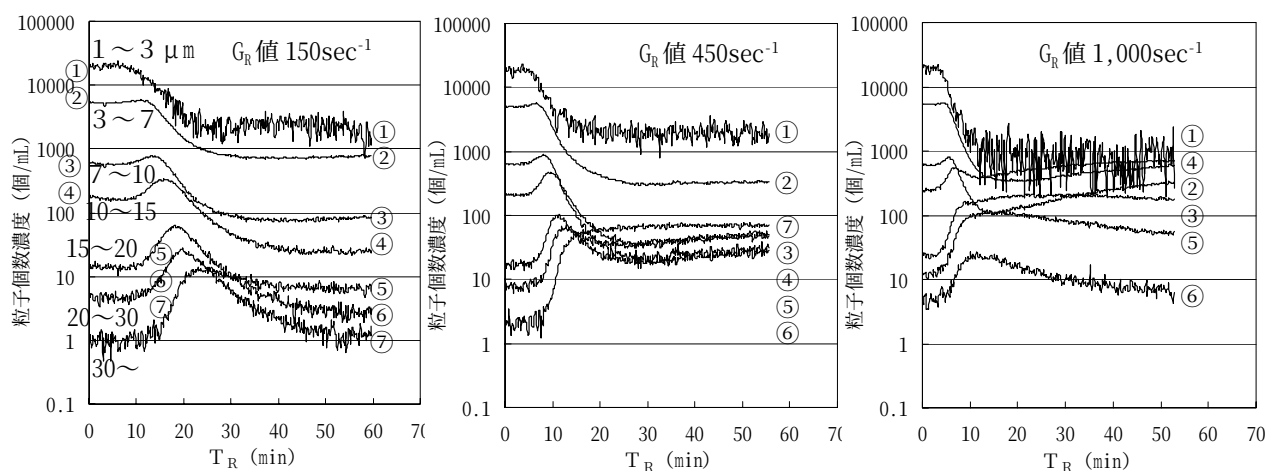


図3 T_R 値の延長に伴う粒子個数濃度の変化 (PAC: 5 mg/L)

上の微フロックの破壊が抑制されるためと考えられる。また、 G_R 値を 150sec^{-1} から $1,000\text{sec}^{-1}$ へ上げる (図中 C) と、水流のせん断力で径 $15\mu\text{m}$ 以上の微フロックが破壊され、径 $1\sim 3\mu\text{m}$ の粒子個数濃度は上昇に転じていく。

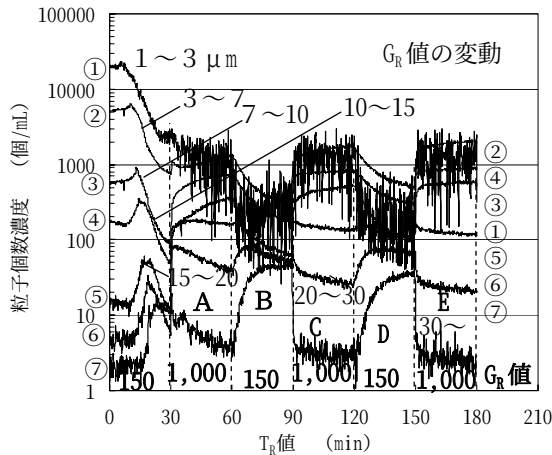


図4 G_R 値の変動に伴う粒子個数濃度の動き

G_R 値 $1,000\text{sec}^{-1}$ から 150sec^{-1} への低下を繰り返し操作 (図中 ABCDE) することによって、いずれの場合にも、径 $15\mu\text{m}$ 以上のピークの個数濃度 (図中 BD) は、しだいに低下していく。しかしながら、径 $1\sim 3\mu\text{m}$ の粒子個数濃度は、確実に低下 (図中 BD) していることから、残存粒子の表面の活性度は殆ど減少していないと考えられる。このようなことから、径 $1\sim 3\mu\text{m}$ の粒子個数濃度を更に減少させるためには、粒子の破壊を抑制する方法、即ち、 G_R 値の低下が有効と考えられる。

4. 2 G_R 値を低下させる時期の検討

図5は、 G_R 値 $1,000\text{sec}^{-1}$ で攪拌した場合、及び G_R 値を $1,000\text{sec}^{-1}$ からそれぞれ集塊化準備期 (凝集剤注入から 1.5 分後)、集塊化進行期前半 (4 分後)、集塊化進行期後半 (6 分後) 及び集塊化安定期直後 (20 分後) に G_R 値を 150sec^{-1} へ低下させた場合における径 $1\sim 3\mu\text{m}$ の粒子個数濃度の経時変化を示している。同図が示すように、集塊化準備期に G_R 値を 150sec^{-1} へ低下させた場合には、 G_R 値 $1,000\text{sec}^{-1}$ で継続させた場合と比較して、集塊化安定期に入る時刻は遅く、安定期における個数濃度の低下量が逆に少なくなっている。同様に、集塊化進行期の前

半及び後半に G_R 値を 150sec^{-1} へ低下させた場合にも、 G_R 値 $1,000\text{sec}^{-1}$ で攪拌し続けた場合と比較して、集塊化安定期に入る時刻は遅くなり、安定期の個数濃度は低下しなかった。これらは、初期粒子数を確実に減少させる前に G_R 値を下げた場合には、粒子同士の接触機会が減るために、粒子個数濃度が減少しなかったと考える。一方、集塊化安定期に入ってから G_R 値を 150sec^{-1} へ低下させた場合には、粒子個数濃度は大幅に低下している。したがって、 G_R 値 $1,000\text{sec}^{-1}$ で出来る限り径 $1\sim 3\mu\text{m}$ の粒子個数濃度を低下させてから G_R 値を減少させる方法が有効と考えられる。それらのことから、 G_R 値を低下させる最適な時期は、集塊化安定期であることが分かった。

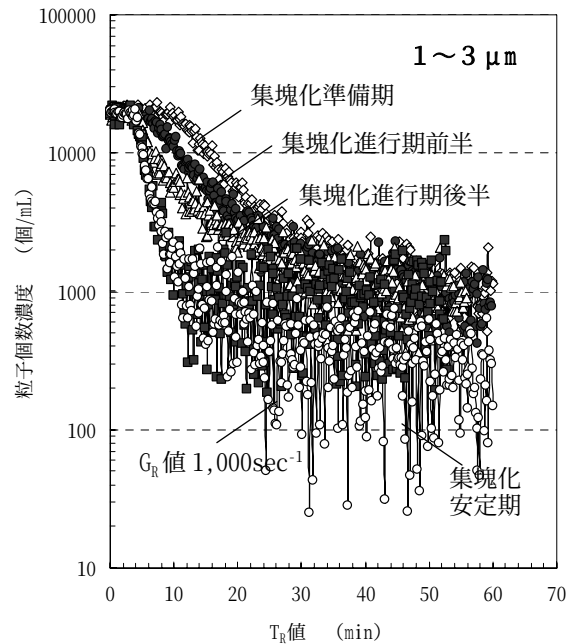


図5 G_R 値の低下に伴う径 $1\sim 3\mu\text{m}$ の粒子個数濃度の動き

4. 3 低下させる G_R 値の最適値

図6は、集塊化安定期 (凝集剤注入から 20 分後) に G_R 値をそれぞれ 450 、 150 及び 20sec^{-1} へ減少させた場合における粒子個数濃度の経時変化を示している。同図から、 G_R 値 150sec^{-1} の場合には、他の G_R 値におけるより径 $1\sim 3\mu\text{m}$ の粒子個数濃度が最も低くなっている。 G_R 値

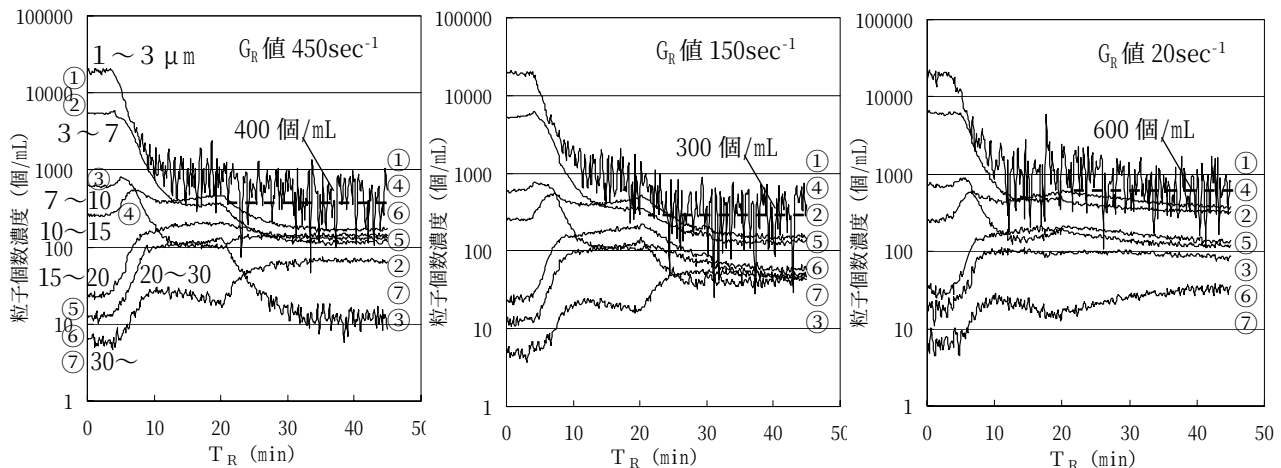


図6 G_R 値の減少及び T_R 値の延長に伴う粒子個数濃度の変化

1,000sec⁻¹で攪拌し続けた場合には、安定期における個数濃度が平均 900 個/mL あったのに対して、安定期に G_R 値を 150sec⁻¹に低下させることによって、1/3 程度の平均 300 個/mL にまで低下している。ここで、 G_R 値 450sec⁻¹の場合には、平均 400 個/mL 程度しか減少していない。これは、図中の径 15~20 μm の粒子個数濃度が、一旦減少した後に増加していることから、3で説明したように、径 30 μm 以上の粒子が破壊したためと考えられる。他方、 G_R 値を 1,000sec⁻¹から大きく 20sec⁻¹にまで減少させた場合には、粒子の破壊は見られないが、 G_R 値を下げすぎたため、径 30 μm の粒子個数濃度の増加速度が遅い。その時、粒子同士の接触割合が減少するため、径 1~3 μm の粒子個数濃度は平均 600 個/mL 程度までにしか減少していない。このように、径 1~3 μm の粒子個数濃度を確実に減少させるためには、最初に大きな G_R 値 1,000sec⁻¹で攪拌して、径 1~3 μm の初期粒子個数濃度を減少させておき、その後、 G_R 値 1,000sec⁻¹で形成された微フロクの破壊を抑制するために G_R 値を 150sec⁻¹まで減少させると、大きな効果が現れる。しかしながら、径 1~3 μm の粒子個数濃度を減少させるために必要な T_R 値が 26 分程度と長くなるため、PAC 注入率を上昇させて、その短縮化を図るためにつぎの実験を行った。

4. 4 PAC 注入率の上昇による T_R 値の短縮化

図 7 は、 G_R 値 1,000sec⁻¹で集塊化安定期まで攪拌を行い、安定期に入ってから G_R 値を 150sec⁻¹へ減少させた場合の PAC 注入率の上昇 (5、10 及び 20mg/L) に伴う粒子個数濃度の動きを示している。ここで、 G_R 値の低下は、凝集剤注入から集塊化安定期に入るまでの時間、即ち、5mg/L では 20 分後、10mg/L では 15 分後、及び 20mg/L では 10 分後とした。PAC 注入率の上昇により、凝集剤を注入してから、 G_R 値を 150sec⁻¹へ低下させて集塊化安定期に入るまでの時間は短縮している。PAC 注入率 5mg/L から 20mg/L への上昇によって、安定期に入る時間は 26

分から 16 分へと短縮し、それらの時刻における径 1~3 μm の粒子個数濃度は平均 300 個/mL から平均 80 個/mL へと減少している。以上、 G_R 値の低下法は、径 1~3 μm の粒子個数濃度を減少させるが、必要な T_R 値が長くなる。それに対し、PAC 注入率の上昇法を採用すれば、集塊化安定期に入るまでの時間が早まり、安定期における粒子個数濃度が十分に低下することが分かった。

5 ま と め

直接ろ過層から流出する粒子数が多い径 1~3 μm の粒子個数濃度を急速攪拌で確実に減少させるためには、最初に、高い G_R 値を用いて同径の粒子個数濃度が最低となる集塊化安定期まで攪拌することが必要である。その次の段階には、 G_R 値を 150sec⁻¹まで低下させて、微フロクの破壊を抑制すれば径 1~3 μm の粒子個数濃度を低下させ得ることが分かった。

以下に、今回の実験で得られた知見をまとめる。

- 1) 凝集剤注入後、集塊化安定期に入ってから、 G_R 値の増減を繰り返す実験から、集塊化安定期に残留する径 1~3 μm の粒子表面の活性度は、急速攪拌を 3 時間継続させても、ほとんど減少しないことが分かった。
- 2) G_R 値 1,000sec⁻¹で攪拌を開始し、その後の集塊化準備期及び集塊化進行期に G_R 値を下げた場合には、 G_R 値 1,000sec⁻¹で攪拌を継続した場合に比べて、集塊化安定期に入るまでの時間が長くなり、安定期における径 1~3 μm の粒子個数濃度は上昇する。しかしながら、集塊化安定期に G_R 値を減少させると、同径の粒子個数濃度は大幅に減少する。
- 3) 径 1~3 μm の粒子個数濃度を低減化させるためには、 G_R 値 1,000sec⁻¹で攪拌を開始し、集塊化安定期に G_R 値を 150sec⁻¹へ下げる方法が有効である。
- 4) 集塊化安定期に単に G_R 値を下げる方法だけでは、必要な T_R 値が長くなる。しかしながら、PAC 注入率の上昇法を導入すれば、早い時期に集塊化安定期に入るので、 T_R 値を短縮化できる。

6 あ と が き

本研究の実験データの採取にあたってご協力をいただいた北見工業大学工学部土木開発工学科四年生の渡辺研一君に感謝の意を表す。

《 参 考 文 献 》

- 1) Parker, D.S. Et al. 1971. Physical Conditioning of Activated Sludge Floc. Jour. Wtr. Poll. Cont. Fed., 43:9:1817
- 2) Parker, D.S. 1972. Floc Breakup in Turbulent Flocculation Process. Jour. San. Engrg. Div., SA1:2:79.
- 3) 海老江 邦雄ら、急速攪拌の適正化による直接ろ過の高効率化に関する研究—凝集剤として PAC 及びろ剤として珪砂を用いた場合—、水道協会雑誌、第 848 号、2006 年
- 4) 海老江 邦雄ら、急速攪拌の適正化が直接ろ過における濁質の処理性に及ぼす効果、土木学会北海道支部、論文報告集、VII-10、CD-ROM、2005 年
- 5) 海老江 邦雄ら、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、118:119

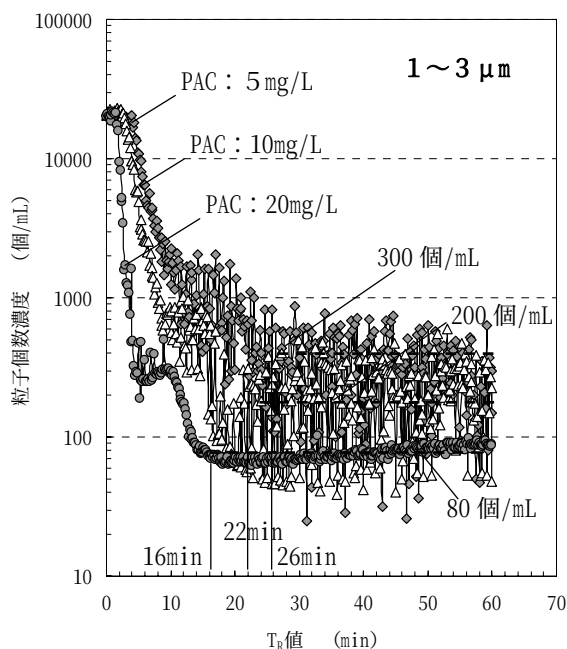


図 7 G_R 値を低下させた場合の PAC 注入率の上昇に伴う径 1~3 μm の粒子個数濃度の動き