物理・化学併用周期逆洗を伴う凝集下水二次処理水の 定速精密濾過特性

Filtration Behaviors in Constant-Rate Microfiltration of Flocculated Sewage Secondary Effluent Accompanied with Combined Operation of Physical and Chemically Enhanced Backwashing

M. S. ジャミ^a, タン オン^b, 入谷 英司^a, 向井 康人^a, 片桐 誠之^a

Mohammed S. Jami, Than Ohn, Eiji Iritani, Yasuhito Mukai, Nobuyuki Katagiri

Received 2 June 2004 ; Accepted 23 July 2004

Filtration behaviors of sewage secondary effluent pretreated with flocculant were studied under constant filtration rate condition using ceramic microfiltration membranes. The process consisted of the periodic operations of the filtration (fouling) and backwashing (cleaning) cycles. The system was capable of selecting two modes of membrane backwashing, i. e., physical backwashing or chemically enhanced backwashing. The time dependency of pressure drop across the filter cake in an operating cycle mainly due to the cake build-up was well described by the constant rate filtration equation for the compressible filter cake, and the increase with the cycle number in pressure drop across the membrane mainly due to the pore blocking was adequately correlated by the intermediate blocking law. Our experimental data clearly showed that the combined operation of physical and chemically enhanced backwashing was highly effective for the filtration of sewage secondary effluent when accompanied by the flocculation operation. The increased dosage of flocculant substantially reduced the cake resistance and irreversible pore plugging. Particularly, less frequent physical backwashing by addition of flocculant led to an increase in the average filtration rate.

Keywords : Microfiltration, Sewage secondary effluent, Flocculation, Backwashing, Chemically enhanced backwashing

1. 緒 言

下水処理水は、その大部分が近隣の流域河川に放流されているので、近年著しい河川の汚濁の進行を抑制し、水環境負荷の低減を図るため、より良質な処理水を得ることが重要となる。このため、従来の活性汚泥法などの二次処理をより高度化したり、二次処理の後

に更に高度処理を加えるなどの試みが増えつつある。一方では、人口や事業所等の都市部への集中、核家族化などにより、都市における水需要はますます増加し

ており、特に、渇水時には用水の安定な供給が困難な状況になっている。下水処理水は、都市の中で安定した水量と水質を確保できる貴重な水資源としても捉えることができ、地理的にも需要地に近く、水利権もないことなどから、工業用水や雑用水の水源として適しており、利用先の用途に合わせた処理を行うことにより、種々の目的に利用できる。このため、下水二次処理水の高度処理として一般的な砂濾過のほか、より高度な処理であるオゾン処理、活性炭処理、膜濾過等も最近行われるようになりつつある^{1~4)}。

中でも膜濾過は、消費エネルギーが極めて小さいことに加えて、孔のサイズを適切に選択することにより、大腸菌などのバクテリアやウイルスなどが完全に除去された処理水が得られる。そのため、処理水は、近年特に需要が増大しているせせらぎや噴水などの親水用水^{5, 6)}としても利用できる。しかしながら、膜濾過においては、濾過の進行とともに懸濁物質が膜細孔

a 名古屋大学大学院工学研究科化学・生物工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町) TEL 052-789-3374
Department of Applied Chemistry, Chemical Engineering
and Biotechnology, Nagoya University
(Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603)
b 科学技術交流財団
(〒456-0058 名古屋市熱田区六番3-4-41) TEL 052-659-2131
Aichi Science and Technology Foundation
(4-41 Rokuban 3, Atsuta-ku, Nagoya 456-0058)

を閉塞したり、膜面上に堆積して濾過ケーキとして成長するため、濾過抵抗を著しく増加させる膜ファウリングの問題がその幅広い普及を妨げる最大の問題点となっている^{7, 8)}。この膜ファウリングは、結果として、定速濾過においては圧力損失の増加、定圧濾過においては濾過速度の減少という形で操作の継続を困難にさせる。この問題点を克服するため、クロスフロー濾過をはじめ種々の手法^{9~12)}が検討されている。より汚濁負荷の小さな浄水処理^{13, 14)}の分野では、簡易上水道をはじめ近年その適用例が増えつつあり、膜濾過のマーケットとして注目されている。さらに、汚濁負荷が比較的大きく有機物の含有量が多い下水二次処理水の高度処理^{15~17)}についても、膜利用のための検討が進められつつある。

前報^{18, 19)}では、精密濾過膜を用いたデッドエンド濾過において、得られた濾液を使用して周期的に逆洗を行ってファウリングの低減を図るセミデッドエンド精密濾過が、あらかじめ行う凝集処理の有無にかかわらず、下水二次処理水の高度処理として効果的であることを明らかにした。しかしながら、この場合にも、逆洗回数の増加とともに、逆洗ではもはや充分には濾過抵抗を回復できないことを見出し、それが実用化を阻む大きな問題点となることを指摘した。

そこで、本報では、濾液をそのまま用いた物理逆洗に加え、逆洗後に濾過抵抗の十分な回復が得られない場合には、濾液に洗浄液をインラインで加えて行う化学逆洗も併用したセミデッドエンド精密濾過の有効性を検討する。また、前報^{18, 19)}の実験室レベルの成果をさらに発展させるため、本報では、下水処理場にパイロットプラントを設置してデータを収集し、より実レベルに近い状況下で検討を行った。本報では、種々のプロセス・パラメータの中で、その適切な設定が最も困難であるといわれている前処理で使用する凝集剤の添加量について検討を試みた。

2. 実験

2.1 実験試料

実験の試料液には、植田下水処理場（名古屋市）の下水二次処理水を用いた。この処理場は完全分流水で、名古屋市東部の生活廃水を標準活性汚泥法で処理しており、その処理量は日量 66,000m³ であり、試料液には活性汚泥処理後の最終沈殿池の上澄液で塩素消毒前のものを用いた。試料液の前処理の凝集操作には、凝集剤としてアルミニウム含有量 10wt% のポリ塩化アルミニウム（PAC）（多木化学（株））を、化学

Fig. 1 Schematic diagram of experimental filtration apparatus

逆洗に使用する薬品には、塩素含有量 12wt% の次亜塩素酸ナトリウム（共立機巧（株））をそれぞれ用いた。

2.2 実験装置と方法

濾過実験には、本研究のために特別に試作した Fig. 1 の全自動精密濾過システム（壽化工機（株））を用いた。本システムでは、主に、前処理のための凝集槽、膜モジュール、逆洗ユニットからなる一連の膜濾過システムが 3 系列ある。消毒前の下水二次処理水が開渠からスラリーポンプによりいったん試料液供給タンクに貯められた後、ヘッド差によって 3 系列のそれぞれの凝集槽に送られる。各系列が制御系によって独立に運転できるようになっており、同時に 3 系列の実験を行うことにより、下水二次処理水の性状の変動によらず、相互の実験データの比較が可能となる。得られた実験データは、電話回線を通して下水処理場から名古屋大学の研究室へ送られ、終日にわたるデータ収集が無人で可能である。

分離膜には、長さ 1m、直径 3cm のモノリス（円筒）状で α -アルミナ製のセラミック精密濾過膜（日本ガイシ（株））を使用した。この分離膜は、内径 4mm の 19 個の孔を持つ中空構造になっており、その全有効膜面積 A は 0.239m² で、液はその中空部分の表面で濾過され円筒外面から濾液が集められる。膜は非対称構造で、公称孔径が 0.1 μ m のものを用いた。膜モジュール入口と出口に取り付けられた圧力計の測定値の差から、濾過抵抗に起因する圧力損失 p が、また、デッドエンド濾過方式のため、膜モジュール入口に設けた流量計の測定値から濾液流量が求められ、これらの圧力計、流量計の測定値を制御系にフィードバックし、ギアポンプの回転数を制御して所定の条件での操作が行える仕組みになっている。濾過で得られ

た濾液はある一定量が逆洗水槽に貯められる構造になっており、物理逆洗時にはその濾液をそのまま、また、化学逆洗時にはその濾液に所定量の次亜塩素酸ナトリウム水溶液を送液ポンプで加えて調製した逆洗液を、コンプレッサーによる圧縮空気により圧入し、各逆洗操作を行った。逆洗操作では、逆洗の後、圧縮空気による膜モジュール内のフラッシングと、その後の水張り等の濾過準備工程を伴う。化学逆洗では、そのほか、逆洗の前に濾液に次亜塩素酸ナトリウム水溶液を添加する工程を伴う。前処理の凝集混和槽は連続する三つの槽からなり、2番目の槽にPACを所定量添加し150rpmで25minの急速攪拌を行った後、3番目の槽では40rpmで50minの緩速攪拌が行われ、懸濁質を凝集させフロックを成長させる。

実験は、膜透過流束 J_v が4.0m/dの定速条件下で行い、サイクル内での濾過圧力の上昇分が70kPa ($=\Delta p_{cf}$) に達した時点で物理逆洗を行った。物理逆洗に使用した濾液の量は1.5lで、逆洗圧力は500kPa、正味の逆洗時間は40s、雑時間を含めた逆洗時間 θ_{pb} は160sである。また、サイクル内の初期圧力 p_m が60kPa ($=p_{mi}$) に達したら、そのサイクルでの濾過圧力の上昇分が70kPaに達した時点で化学逆洗を行った。化学逆洗に使用した逆洗液の量は6lで、液中の次亜塩素酸ナトリウム濃度は1000mg/lに調整し、逆洗圧力は500kPa、正味の逆洗時間は40s、雑時間を含めた逆洗時間 θ_{cb} は610sである。試料液中の凝集剤の添加濃度 C_f は0.5, 3.0mg/lに設定し、凝集剤が無添加の場合と比較した。実験中に濾過抵抗に起因する差圧 p 、濾液流量 $Q(=J_v A)$ の経時変化を測定した。また、サンプリングした濾液について、試料原液と併せて、その水質評価を行うため、SS、大腸菌群数、濁度、BODおよびCODの各値をJIS規格に準拠して測定した。また、試料原液と凝集剤を添加した試料液の両者について、レーザー回折式粒度分布測定装置((株)堀場製作所製、LA-920)により粒度分布を求めた。

3. 結果と考察

Table 1は、試料原液と濾液の水質分析結果であり、各測定項目の分析結果の平均値を、親水用水の基準値⁶⁾とともに示した。試料液のSSは2.4mg/lであり、極めて小さく、希薄懸濁液の濾過が本研究で対象となっていることが分かる。濾液からは、病原菌の存在の指標となる大腸菌はまったく検出されず、親水用水の基準を満たしていることから、濾過処理水の広範

Table 1 Analytical result of quality of feed and filtrate

Parameter	Feed	Filtrate	Standards
SS (mg/l)	2.4	< 1	—
<i>E. Coli</i> (counts/100ml)	2.6×10^4	Nil	< 50
Turbidity (mg-kaolin/l)	2.6	< 1	< 5
BOD (mg/l)	7.0	1.6	< 3
COD (mg/l)	7.6	5.0	—

な用途が期待できる。Fig. 2には、凝集処理によって生成したフロックの粒度分布に及ぼす凝集剤添加濃度 C_f の影響を示した。凝集剤を添加するとフロックが形成されるため、粒径は増大し、その傾向は C_f の増大とともに顕著となった。また、凝集剤を添加した場合には粒度分布が単峰性を示さなかった。これは、下水二次処理水の成分が複雑なため、成分により凝集効果が異なること、凝集操作時における剪断による生成フロックの崩壊等が起因していると考えられるが、詳細は不明である。図の粒度分布から算出したフロックの面積平均径 d_g は、 $C_f=0, 0.5, 3.0\text{mg/l}$ の場合、それぞれ5.9, 86, 300 μm となった。

凝集剤の添加濃度 C_f が0.5mg/lの結果について、濾過差圧 p を単位膜面積あたりに得られた積算濾液量 v_e に対して Fig. 3にプロットした。本研究では、濾過期間中には定速濾過操作を行っているため、積算濾液量 v_e は積算濾過時間 θ_e に比例する。濾過の進行とともに、膜細孔内での溶解性有機物の吸着や懸濁質による膜閉塞と、それらに引き続いて生じる膜面上への懸濁質の堆積による濾過ケーキの成長により、濾過抵抗が次第に増加し、一定濾過速度を維持するため

Fig. 2 Effect of dosage of flocculant on particle size distribution

Fig. 3 Typical result of relation between pressure differential and filtrate volume per unit membrane area

に、濾過差圧 p は増大する。物理逆洗を行うと、生成濾過ケーキが剥離するため、濾過差圧は大きく減少し、再び比較的低い濾過差圧で定速濾過を始めることができるようになる。しかしながら、この定速濾過と物理逆洗からなる一連の周期操作を繰り返すと、物理逆洗によって十分に低い濾過差圧が得られなくなり、物理逆洗後の濾過操作における初期差圧はサイクル数の増加とともに次第に増加する。そこで、化学逆洗を行うと、濾過差圧は、一連の操作開始時の初期差圧、すなわち清浄な膜自体によって発生する差圧とほぼ等しい程度まで回復し、その後の操作の継続が可能になる。これは、物理逆洗だけでは除去できず、膜細孔内でいわゆる不可逆的閉塞や吸着を引き起こす懸濁質や溶解性有機物が、化学逆洗を行うことによって、除去できたことを意味する。物理逆洗と化学逆洗の開始を定める各設定値 Δp_{cl} と p_{mf} を適切に設定することにより、経済的な圧力範囲内で定速濾過操作を続けることができる。本実験では、 $\Delta p_{cl} = 70 \text{ kPa}$ および $p_{mf} = 60 \text{ kPa}$ の条件下で、実験開始時の清浄な膜の初期差圧が 40 kPa であったので、図のように、操作はおおよそ 40 kPa と 130 kPa ($= p_{mf} + \Delta p_{cl}$) の圧力範囲内で行われた。

Fig. 4 には、3 系列の膜モジュールを用いて、凝集剤添加濃度 C_f を変化させて同時に行った濾過実験の濾過差圧 p 対 濾液量 v_c の関係を比較して表した。凝集剤をまったく添加しない場合には、圧力の増加の仕方がより急激であるため、1 サイクルあたりに得られる濾液量が小さく、したがって、ある一定の濾液量を得るために必要なサイクル数は増加し、物理逆洗を頻繁に行う必要が生じた。また、物理逆洗後の濾過抵抗の回復も比較的鈍く、3, 4 回のサイクルごとに化学逆

Fig. 4 Relation between pressure differential and filtrate volume per unit membrane area for different dosages of flocculant

洗が必要となった。凝集剤添加濃度を $0.5, 3.0 \text{ mg/l}$ と増加させるにつれ、サイクル内の圧力上昇の仕方は緩やかになり、また、物理逆洗後の濾過抵抗の回復も顕著となることから、凝集剤添加の効果は著しいことが分かる。

各サイクル内での濾過抵抗の増加挙動を評価するため、**Fig. 5** には、代表的な濾過サイクルについて、濾過差圧 p からそのサイクルにおける初期差圧 p_m を減じた値 ($p - p_m$) を各サイクル内での濾過時間 θ に対して両対数紙上にプロットした。凝集剤の添加の有無にかかわらず、ほぼ直線関係を示し、次式で表される圧縮性ケーキを生成する定速濾過におけるケーキ濾過速度式²⁰⁾によって、各サイクル内での濾過抵抗の増加挙動を記述することができた。希薄懸濁液の濾過ではあるが、濾過ケーキの成長が濾過抵抗増大の主要因

Fig. 5 Logarithmic plot of pressure differential across filter cake against filtration time

となっていることが分かった。

$$(p - p_m)^{1-n} = \frac{\mu \alpha_0 \rho s J_v^2}{1 - ms} \theta \quad (1)$$

ここに、 μ は濾液粘度、 ρ は濾液密度、 s は試料液中の固体の質量分率、 m は濾過ケーキの湿乾質量比である。また、 α_0 、 n は、ケーキの平均濾過比抵抗 α_{av} とケーキの圧力損失 $(p - p_m)$ との関係を表すために利用されたべき乗式²¹⁾ ($\alpha_{av} = \alpha_0 (p - p_m)^n$)における実験定数で、特に n を濾過ケーキの圧縮性指数という。差圧 $(p - p_m)$ は、同一時間で比較すると、凝集剤を添加し、その添加量が多いほど小さくなり、凝集によって濾過抵抗の小さなケーキが生成されることが分かり、これは、Fig. 2の粒度分布の結果で粗大なフロックが形成されることに起因している。また、生成ケーキの特性の圧力依存性を示すEq. (1)の圧縮性指数 n の値は $C_f = 0, 0.5, 3.0 \text{ mg/l}$ に対してそれぞれ0.31, 0.25, 0.19となり、比較的圧縮性は小さい。通常の凝集系²²⁾とは異なり、凝集剤添加量が多いほど n の値は小さくなり、ケーキの成長に伴う濾過差圧の増加が緩やかになる。これは、凝集操作で生成したフロックの強度が大きいためと考えられるが、凝集操作や凝集機構と関連し、さらに検討の余地がある。なお、本研究ではサイクル内での濾過圧力の上昇分が70kPaに達するごとに物理逆洗を行っており、また、サイクル数の増加とともにサイクル内での初期圧力 p_m は次第に増加していく。そのため、Eq. (1)から明らかのように、 n が大きいほど、サイクル数の増加とともに1サイクルに要する時間の減少の仕方が急激となる。

次に、物理逆洗後も回復されないで残る不可逆的な膜閉塞の挙動を評価するため、Fig. 6には、各サイクルにおける初期差圧 p_m とサイクル数 N との関係を示した。凝集剤添加濃度 C_f の増加とともに、差圧 p_m の増加の仕方は緩やかになり、 $C_f = 3.0 \text{ mg/l}$ の濃度では、43回の物理逆洗を行った後に初めて化学逆洗の必要性が生じた。プロットは、 $C_f = 3.0 \text{ mg/l}$ の濃度におけるサイクルの初期と終期を除くと、凝集剤の添加の有無によらず、各サイクルごとにほぼ直線関係を示し、次式で表される定速濾過における中間閉塞法則^{18, 23, 24)}によって、サイクル数の増加に伴う不可逆的な膜閉塞の進行挙動を記述することができた。

$$p_m = p_{m0} \exp(\eta N) \quad (2)$$

ここに、 p_{m0} は周期逆洗型定速濾過開始時 ($N = 0$) の

Fig. 6 Semi logarithmic plot of initial pressure in cycle against cycle number

初期圧力で、定速濾過実験と同じ膜透過流束で純水を膜に透過させた時の圧力損失に等しい。また、 η は実験定数でFig. 6のそれぞれの直線勾配を表し、この値が大きいほど膜閉塞の進行が顕著であることを示す。凝集剤添加濃度 $C_f = 0, 0.5, 3.0 \text{ mg/l}$ に対して η はそれぞれ0.16, 4.3×10^{-2} , 6.8×10^{-3} となり、凝集剤添加量が多いほど小さくなり、不可逆的な膜の閉塞の進行が緩やかになることが分かる。凝集剤添加濃度の増大によって η の値が低下することは、凝集処理した下水二次処理水は膜の閉塞を起こしにくい、または、膜を閉塞しても物理逆洗によって容易に洗浄できることを意味しており、低圧縮性で濾過比抵抗の小さなケーキの生成だけでなく、この点においても凝集処理の効果が大きいことが分かる。

得られた濾液の一部は逆洗に用いられるので、正味の処理量を考える場合にはその分だけ差し引く必要が

Fig. 7 Relation between number of physical backwashing and net filtrate volume per unit membrane area

Fig. 8 Relation between number of chemically enhanced backwashing and net filtrate volume per unit membrane area

ある。Fig. 7には、物理逆洗数 N_{pb} を、単位膜面積あたりの積算濾液量 v_c から物理逆洗と化学逆洗に要した積算逆洗液量 v_b を減じた正味積算濾液量 ($v_c - v_b$) に対してプロットした。凝集剤の添加量によらず、プロットはほぼ直線関係を示し、各実験ごとに、それぞれのサイクルで得られる正味濾液量にはあまり差がなく、定速操作を行っていることから、時間が経過しても物理逆洗の頻度が増えるわけではないことが分かった。凝集剤を添加すると、ある正味濾液量を得るのに必要な物理逆洗数 N_{pb} は次第に減少するが、その減少の仕方は凝集剤添加濃度の増加とともに小さくなり、凝集剤のわずかな添加においても効果が大きいことが分かる。

Fig. 8には、化学逆洗数 N_{cb} を単位膜面積あたりの正味濾液量 ($v_c - v_b$) に対してプロットした。この場合にも、プロットは凝集剤の添加量によらずほぼ直線関係を示し、定速操作を行っていることから、物理逆洗の場合と同様に、時間が経過しても化学逆洗の頻度が増えるわけではないことが分かった。したがって、Fig. 7の結果と総合すると、各実験について時間が経過しても物理逆洗も化学逆洗もその頻度は増加せず、本操作法により定常状態での濾過および逆洗の周期的運転がほぼ実施可能なことが明らかとなった。また、凝集剤を添加すると、ある正味濾液量を得るのに必要な化学逆洗数 N_{cb} は次第に減少するが、物理逆洗の場合とは対照的に、その減少の仕方は本実験範囲では凝集剤添加濃度の増加とともに顕著となることが分かった。

処理量に関して逆洗に用いた濾液量を考慮したように、処理時間についても、各サイクルの濾過時間の加

Fig. 9 Relation between net filtrate volume per unit membrane area and total operating time

算だけではなく、逆洗のほか、操作の切り換え等を含めた濾過休止時間を濾過時間に加算して評価する必要がある。したがって、積算濾過時間を θ_c 、積算濾過休止時間を θ_r とすると、処理時間は $\theta_c + \theta_r$ となる。単位膜面積あたりの正味濾液量 ($v_c - v_b$) を処理時間 ($\theta_c + \theta_r$) に対して Fig. 9 にプロットし、凝集剤添加による処理性能の比較を行った。図中の一点鎖線は、設定した膜透過流速 J_v が 4.0 m/d の定速条件下で濾過が行われ、操作中に一度も逆洗を行わずに済む理想の場合についての仮想計算値を表す。実験結果は、いずれも直線関係を示すことから、逆洗の影響を考慮しても、ほぼ定速濾過が実施されていることが分かる。

そこで、平均濾過速度 $J_{v,av}$ をプロットの直線勾配に相当する $(v_c - v_b)/(\theta_c + \theta_r)$ として定義し、設定膜

Fig. 10 Influence of dosage of flocculant on normalized average filtration rate

透過流束 J_v に対する比 ($J_{v,av}/J_v$) を凝集剤添加濃度 C_f に対して Fig. 10 にプロットした。平均濾過速度は設定膜透過流束より小さくなるため、 $J_{v,av}/J_v$ は 1 より小さく、また、凝集剤添加濃度の増大とともに設定膜透過流束に近づく傾向を示したが、 $J_{v,av}/J_v$ の増大の仕方は凝集剤添加濃度の増大とともに小さくなり、凝集剤のわずかな添加においても平均濾過速度の増加に対する効果が大きいことが分かった。この傾向は、Fig. 7 の物理逆洗に関する傾向と一致することから、凝集剤の最適な添加による濾過ケーキ性状の変化に伴う物理逆洗頻度の制御が、濾過性能の向上のための重要な因子となることを示唆している。なお、実際には、凝集剤の添加量の最適値については、平均濾過速度だけでなく、経済性や下水二次処理水の性状の経時的な変動を考慮した安全性も加味して考察する必要がある。

4. 結 言

凝集処理した下水二次処理水を対象として、物理逆洗と化学逆洗を併用した周期逆洗操作を伴う定速濾過実験を、下水処理場に設置したパイロット・スケール

の濾過実験システムを用いて行った。濾過を行うと、濾過ケーキの成長と膜細孔の閉塞により、濾過抵抗に起因する圧力損失が増大することが分かった。また、ケーキ濾過については圧縮性ケーキの定速濾過式、膜閉塞については中間閉塞法則が適用できることを示した。ケーキ成長による濾過抵抗の増大に対しては、物理逆洗が、また、膜細孔の閉塞に対しては化学逆洗が効果的であることが分かり、これらを凝集操作と組み合わせることにより、効率的な定速操作が可能となることを明らかにした。凝集剤の添加は易濾過性のケーキの生成と膜の不可逆的な閉塞の改善に効果的であり、物理逆洗や化学逆洗の頻度、平均濾過速度による考察から、凝集剤のわずかな添加が大きな効果を示すこと、また、特にそれに伴う物理逆洗頻度の改善が、濾過特性の向上のための重要な因子となることを明らかにした。

〔謝辞〕本研究は、科学技術振興機構の愛知県・名古屋市地域結集型共同研究事業の援助を受けて行われた。また、名古屋市植田下水処理場の職員の方々のご協力を得た。ここに記して謝意を表します。

Nomenclature

A : effective filtration area	(m^2)	membrane area	(m)
C_f : dosage of flocculant in slurry	(kg/m^3)	v_c : cumulative filtrate volume per unit	
d_p : particle diameter	(m)	membrane area	(m)
d_s : area mean diameter	(m)	α_0 : constant appeared in empirical equation of	
J_v : filtration rate	(m/s)	Sperry type	($m^{n+1} \cdot s^{2n}/kg^{-(n+1)}$)
$J_{v,av}$: average filtration rate	(m/s)	α_{av} : average specific filtration resistance	(m/kg)
m : ratio of wet to dry cake mass	($-$)	Δp_{cf} : pressure differential across filter cake at	
N : cycle number	($-$)	commencement of backwashing	(Pa)
N_{cb} : number of chemically enhanced backwashing		μ : viscosity of filtrate	($Pa \cdot s$)
N_{pb} : number of physical backwashing	($-$)	η : empirical constant defined in Eq. (2)	($-$)
n : compressibility coefficient	($-$)	θ : filtration time in each cycle	(s)
p : pressure	(Pa)	θ_c : cumulative filtration time	(s)
p_m : initial pressure in cycle after backwashing	(Pa)	θ_{cb} : rest time accompanied with chemically	
p_{m0} : initial pressure at $N=0$	(Pa)	enhanced backwashing	(s)
p_{mf} : initial pressure in cycle just before		θ_{pb} : rest time accompanied with physical	
chemically enhanced backwashing	(Pa)	backwashing	(s)
Q : flow rate	(m^3/s)	θ_r : cumulative rest time at which filtration	
s : mass fraction of solids in feed	($-$)	is not operated	(s)
v_b : cumulative backwash volume per unit		ρ : density of filtrate	(kg/m^3)

References

- 1) Tebbutt, T. H. Y. : "An Investigation into Tertiary Treatment by Rapid Filtration", *Wat. Res.*, **5**, 81-92 (1971)
- 2) Tanaka, T., K. Tsuzuki and T. Takagi : "Reduction of Organic Matter in Secondary Treated Municipal Wastewater by Chemical Oxidation Processes - Comparison of Methods Involving Ozone, Ultraviolet Radiation and TiO_2 Catalyst-", *J. Japan Soc. Wat. Environ.*,

- 22, 926-931 (1999)
- 3) Decarolis, J., S. Hong and J. Taylor : "Fouling Behavior of a Pilot Scale Inside-out Hollow Fiber UF Membrane during Dead-End Filtration of Tertiary Wastewater", *J. Membrane Sci.*, **191**, 165-178 (2001)
- 4) Hasar, H. and C. Kinaci : "Comparison of a sMBR and a CASP System for Wastewater Reclamation and Re-use", *Filtr. Sep.*, **41** (1), 35-39 (2004)
- 5) Okun, D. A. : "Water Reclamation and Nonpotable Reuse : an Option for Meeting Urban Water Supply Needs", *Desalination*, **106**, 205-212 (1996)
- 6) Kogoshi, M., M. Suzuki and T. Asano : "Present State of Wastewater Reclamation and Reuse in Japan", *Water Environmental Engineering and Wastewater Reclamation and Reuse* (Mizukankyo no Kogaku to Sairyo), T. Asano and N. Tambo eds., pp. 151-172, Hokkaido University Press, Sapporo, Japan (1999)
- 7) Iritani, E., Y. Mukai, Y. Tanaka and T. Murase : "Flux Decline Behavior in Dead-End Microfiltration of Protein Solutions", *J. Membrane Sci.*, **103**, 181-191 (1995)
- 8) Iritani, E., Y. Toyoda and T. Murase : "Effect of Solution Environment on Dead-End Microfiltration Characteristics of Rutile Suspensions", *J. Chem. Eng. Japan*, **30**, 614-619 (1997)
- 9) Tarleton, E. S. and R. J. Wakeman : "Understanding Flux Decline in Crossflow Microfiltration : Part I - Effects of Particle and Pore Size", *Trans IChemE, Part A (Chem. Eng. Res. Des.)*, **71**, 399-410 (1993)
- 10) Shorrock, C. J. and M. R. Bird : "Membrane Cleaning : Chemically Enhanced Removal of Deposits Formed during Yeast Cell Harvesting", *Trans IChemE, Part C (Food Bioprod. Proc.)*, **76**, 30-38 (1998)
- 11) Hoof, S. : "Semi Dead-End Ultrafiltration in Potable Water Production", *Filtr. Sep.*, **37** (1), 28-30 (2000)
- 12) Kim, J. -S., S. Akeprathumchai and S. R. Wickramasinghe : "Flocculation to Enhance Microfiltration", *J. Membrane Sci.*, **182**, 161-172 (2001)
- 13) Jang, N., Y. Watanabe, S. Minegishi and R. Bean : "The Evaluation of Dead-End Ultrafiltration Membrane Process Combined with Pre-Coagulation/Sedimentation", *J. Japan Water Works Assoc.*, **70** (2), 2-15 (2001)
- 14) Jang, N., Y. Watanabe, R. Bean, G. Ozawa : "The Study of Physical Cleaning in Dead-End Ultrafiltration Membrane Process under a Constant Flux", *J. Japan Water Works Assoc.*, **70** (6), 42-53 (2001)
- 15) Al-Malack, M. H. and G. K. Anderson : "Coagulation-Crossflow Microfiltration of Domestic Wastewater", *J. Membrane Sci.*, **121**, 59-70 (1996)
- 16) Lodge, B., S. J. Judd and A. J. Smith : "Characterization of Dead-End Ultrafiltration of Biotreated Domestic Wastewater", *J. Membrane Sci.*, **231**, 91-98 (2004)
- 17) Shon, H. K., S. Vigneswaran, I. S. Kim, J. Cho and H. H. Ngo : "Effect of Pretreatment on the Fouling of Membranes : Application in Biologically Treated Sewage Effluent", *J. Membrane Sci.*, **234**, 111-120 (2004)
- 18) Ohn, T., M. S. Jami, E. Iritani, Y. Mukai and N. Katagiri : "Filtration Behaviors in Constant Rate Microfiltration with Cyclic Backwashing of Coagulated Sewage Secondary Effluent", *Sep. Sci. Technol.*, **38**, 951-966 (2003)
- 19) Jami, M. S., T. Ohn and E. Iritani : "Filtration Behaviors in Microfiltration with Cyclic Backwashing of Sewage Secondary Effluent under Constant Rate and Constant Pressure Conditions", *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, in press (2004)
- 20) Shirato, M., T. Aragaki, R. Mori and K. Sawamoto : "Predictions of Constant Pressure and Constant Rate Filtrations Based upon an Approximate Correction for Side Wall Friction in Compression Permeability Cell Data", *J. Chem. Eng. Japan*, **1**, 86-90 (1968)
- 21) Sperry, D. R. : "A Study of the Fundamental Laws of Filtration Using Plant-Scale Equipment", *Ind. Eng. Chem.*, **13**, 1163-1165 (1921)
- 22) Heeley, G. and S. R. Richards : "Use of Flocculants to Aid the Dewatering of Peat", *Fuel*, **69**, 53-59 (1990)
- 23) Hermia, J. : "Constant Pressure Blocking Laws - Application to Power-Law Non-Newtonian Fluids", *Trans IChemE*, **60**, 183-187 (1982)
- 24) Iritani, E., H. Sumi and T. Murase : "Analysis of Filtration Rate in Clarification Filtration of Power-Law Non-Newtonian Fluids-Solids Mixtures under Constant Pressure by Stochastic Model", *J. Chem. Eng. Japan*, **24**, 581-586 (1991)