

## 2-3 精密濾過、分離膜技術の研究開発

Than Ohn（科学技術交流財団）

入谷英司、向井康人、片桐誠之（名古屋大学）

富田美穂、米川均、野口基治（日本ガイシ（株））

### 1. 研究の目的と概要

本研究では、ハイブリッド型リアクターおよび難分解性物質の微生物処理による処理水を、さらに循環再利用可能な親水用水レベルまで高度処理する技術の開発を目的としている。本 WG の研究開発の特徴であるディスポーザーの導入は廃水の負荷の著しい増大に繋がり、これに伴い、リアクター処理水中の有機物や微生物等の濃度は通常的生活廃水を処理した場合に比べ、高くなることが予想される。そのため、このような負荷の高い処理対象廃水にも対応できる高度処理技術の開発が必要となる。高度処理技術として砂濾過、活性炭吸着、オゾン酸化、膜濾過など種々な手法が考えられるが、バクテリアの完全除去が可能であり疫学的に安全な水質を保証できることや洗浄操作が容易で透過流束の高い回復性をもつこと、さらには設備的にも極めてコンパクトな設計が可能であることなど多くの利点をもつ膜濾過法に本研究では着目し、精密濾過、分離膜技術の研究開発を行う。

膜濾過操作における最も大きな問題点は、操作の進行に伴う濾過ケーキの形成と膜の閉塞により処理効率が著しく低下することである。操作の効率を維持するためには、生成ケーキや膜閉塞を引き起こす閉塞物質を周期的に取り除く必要があり、現在までに様々な方法が試みられている。また、クロスフロー濾過や回転円筒濾過などダイナミック濾過によるケーキレス濾過法もあるが、これらの方法は大量のエネルギーを必要とするため、本研究ではエネルギー消費が小さいデッドエンド方式の全量濾過と周期逆洗操作を併用した精密濾過について検討する。

精密濾過による高度処理により、大腸菌等のバクテリア類や懸濁微粒子など膜細孔より大きな物質は膜面上で完全に捕捉することが可能であるが、有機性高分子物質やリンなど膜細孔より小さく、膜を透過してしまう可能性のある物質に対しては、強力な高分子凝集剤の Polyaluminum chloride (PAC) による処理を施し、凝集・粗大化させることにより膜面上で捕捉することができる。しかし、捕捉物質による濾過ケーキの形成や膜閉塞によって濾液の流動抵抗が増加し、濾過効率を著しく低下させるため、処理水の一部を用いた物理逆洗操作を周期的に繰り返し行うことにより膜面を洗浄する。こうした周期逆洗型精密濾過操作の最適化を図るためには、膜面上に堆積する生成ケーキの特性や膜閉塞機構を究明する必要がある。本研究では、実験的に求めた生成ケーキの特性や膜閉塞機構に基づき、消費エネルギーの最小化と処理水質の向上の観点から、最適な精密濾過の操作条件、逆洗条件などを決定する。

次に、以上のラボ実験により得られた基礎データに基づき、実証試験を行うためのオンサイトマルチモード精密濾過システムを設計・製作する。オンサイト実験では、物理逆洗で除去しきれない不可逆的なファウリング物質による処理効率の低下に対し、薬品注入による化学洗浄も併用した物理・化学併用逆洗操作を導入するなど、さらなる膜閉塞防止策を検討する。オンサイト実験に基づき、実用化をめざした高性能な精密濾過処理技術の創製を図る。

## 2. フェーズ I の成果

### 2-1. 目的及び目標

1. 小型精密濾過システムを製作するとともに分離膜および凝集剤を選定し、基礎データを蓄積する。
2. 以下の目標値を達成するための最適な操作条件を究明する。

処理水質：親水用水水質以上（BOD<3mg/L, 濁度<1mg/L, 大腸菌群数:非検出）

処理速度：1m/d 以上

消費動力：0.15kWh/m<sup>3</sup> 以下

実験方法：ラボ実験

3. オンサイトマルチモード精密濾過装置の設計及び製作を行う。

### 2-2. 方法及び結果

#### 2-2-1 精密濾過による下水二次処理水の高度処理に関する調査研究

近年、環境負荷の低減や水資源の確保の観点から、下水処理水の循環再利用の重要性が認識されつつある。現在、下水二次処理水の 80%程度は塩素処理後に河川へ放流されており、残りの約 20%は高度処理（三次処理）後に一部は河川へ放流され、残りは再利用されている。高度処理には、砂濾過、活性炭による吸着、オゾン酸化法、膜分離等が使用されている。それらの高度処理手法のうち膜分離法は高い処理水質が得られ、処理操作や洗浄が簡便であるなど多くの利点をもつことがわかった。

廃水の高度処理において、膜分離技術は重要な要素技術の一つであり、分離する懸濁微粒子の大きさや溶解性物質の分子量によって主に精密濾過(Microfiltration, MF)、限外濾過(Ultrafiltration, UF)および逆浸透 (Reverse Osmosis, RO)に分類することができる。各分離膜の分離サイズおよび分離対象物質を比較すると図 1 のようになる。また、各分離膜の特徴を表 1 にまとめた。なお、最近では RO と UF の中間の分離性能をもつナノ濾過(Nano Filtration, NF)も開発されている。

10 <sup>-7</sup> mm 1Å		10 <sup>-6</sup> mm 10Å	10 <sup>-5</sup> mm 100Å	10 <sup>-4</sup> mm 1000Å	10 <sup>-3</sup> mm 1µm	10 <sup>-2</sup> mm 10µm
H <sub>2</sub>	Cl <sup>-</sup>	し 卵	各	コ	油	ラ
O <sub>2</sub>	OH <sup>-</sup>	よ 白	種	ロ	エ	テ
CO	H <sup>+</sup>	糖	ウ	イ	マ	ッ
H <sub>2</sub> O	Na <sup>+</sup>	ル	イ	ド	ル	ク
	Ca <sup>++</sup>	ブ	ル	シ	シ	ス
		ミ	ス	リ	ヨ	
		ン		カ	ン	

図 1 各分離膜の対象範囲

表 1 各分離膜の特徴

<p>MF 精密濾過</p>	<p>細孔径：0.1<math>\mu</math>m～数<math>\mu</math>m 程度                  操作圧力の範囲：100kPa 程度                  主な材質：高分子素材(ポリエチレン、ポリプロピレン、ポリスルホン、ポリアクリロリトリル、酢酸セルロース、ポリイミド、ポリフッ化ビニリデン、4フッ化エチレン)、無機素材のアルミナ系セラミックス                  各素材により、耐熱性、耐薬品性、透水性、親・疎水性が異なる。微生物や微粒子の除去に対し最も経済的な濾過法である。</p>
<p>UF 限外濾過</p>	<p>細孔径：0.1<math>\mu</math>m 以下                  操作圧力の範囲：500kPa 以下                  主な材質：高分子素材(ポリスルホン、ポリアクリロリトリル、酢酸セルロース、ポリイミド、ポリフッ化ビニリデン)                  限外濾過は、分子量1,000～500,000の溶解性分子またはコロイド物質の除去に用いられている。エマルションの分離や着色性コロイド溶液からの濁度の除去等もその応用例の一つである。</p>
<p>RO 逆浸透</p>	<p>逆浸透は、溶液中の溶解性塩類によって生じる浸透圧より高い圧力をかけることにより、水から塩類を分離するプロセスである。現在開発されている膜や装置により、100kPaから6MPaまでの圧力の範囲で操作することができる。また、逆浸透を効率良く運転するためには、非常に質のよい流入水が必要になるため、精密濾過や限外濾過などの前処理が必要となる。</p>

本研究では精密濾過技術を主体とする膜処理システムを導入し、周期逆洗型精密濾過法を適用することとした。また、前段のハイブリッド型リアクターによる処理水をさらに高度処理することを目的としているが、フェーズ I では個々の要素研究が主となるため、ハイブリッド型リアクター処理水に相当する下水二次処理水を試水に用いて、周期逆洗操作を併用したセミデッドエンド精密濾過実験を行うこととした。しかし、下水二次処理水は難濾過性であり、特に、高い膜透過流束で操作を行う場合、効率的な濾過圧力の範囲内で操作を維持することが困難となる。得られた処理水についても溶解性有機物の透過が不可避なため、高い水質を望むことができない。したがって、本研究では前処理として凝集操作を導入して操作の効率化と処理水質の改善を試みた。これにより、溶解性有機物の除去も一部可能になり、より高い水質の処理水を得ることが期待できる。さらに、凝集操作は膜透過流束の向上や膜面洗浄の促進にも効果的であることがわかった。図 2 には凝集操作を施すことによる利点を示した。

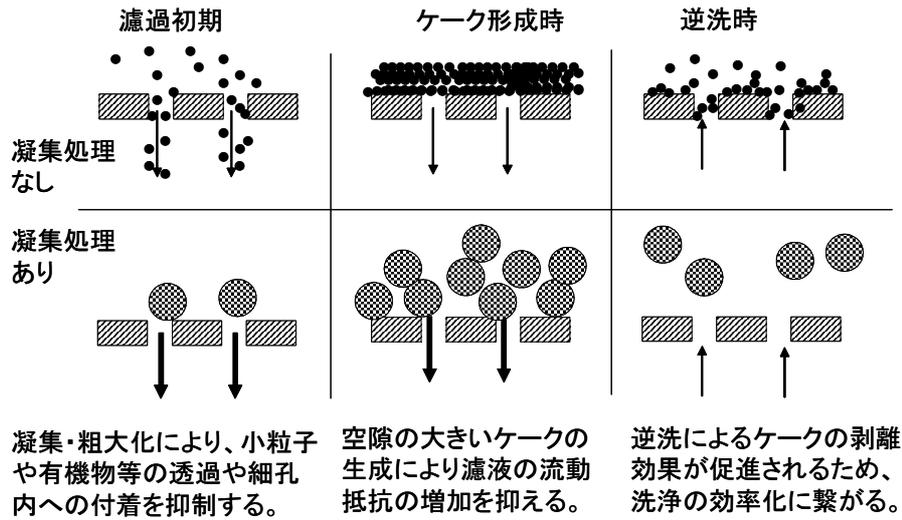


図2 凝集操作による効果

### 2-2-2 実験装置及び方法

二つの膜系列を有する周期逆洗型精密濾過装置の概要を図3に示した。実験の試料液には、名古屋市植田下水処理場より採取した塩素消毒前の生活系下水二次処理水をそのまま用い、図3に示した濾過システムにより周期逆洗型セミデッドエンド精密濾過実験を行った。冷蔵庫の中に278Kの一定温度で貯蔵された下水二次処理水は、恒温槽で293Kに調整された後、ギアポンプによってセラミック膜モジュールに圧入される。モジュール内に設置されたセラミック膜は、19穴を有するモノリス状の精密濾過膜（日本ガイシ（株）製）で、穴の内径は4mm、長さは15cmで全濾過面積は358cm<sup>2</sup>、膜細孔径は0.1μmであり、大腸菌をほぼ完全に阻止できる。試料液は、セラミック膜の内側に圧入され外側に向かって濾過され、逆洗タンクを経由して濾液として採取される。なお、逆洗タンクは逆洗に必要な量だけの濾液が貯められるような構造になっている。

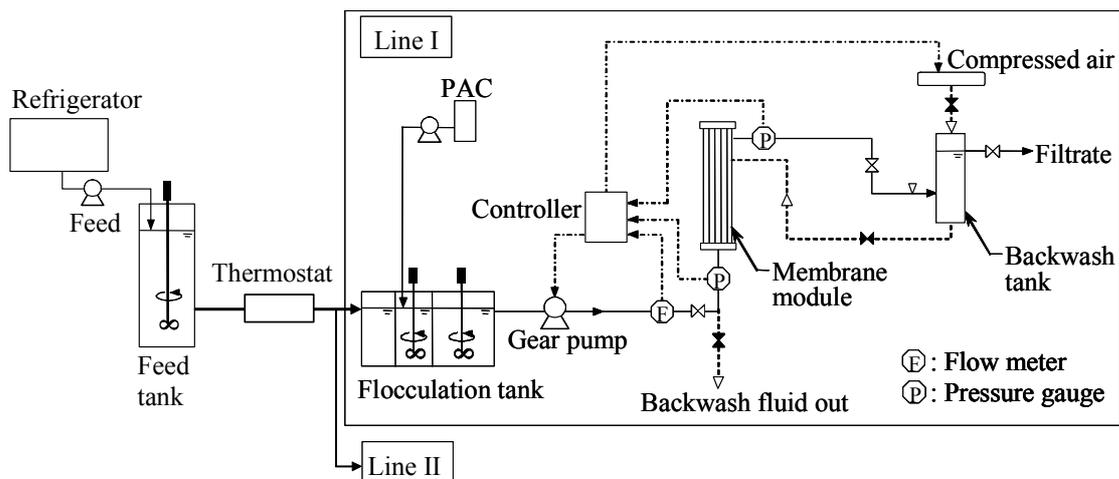


図3 ラボ精密濾過実験装置の概要

実験では、周期逆洗型の定速濾過を行った。流量計のデータに基づきギアポンプを制御することによって、膜透過流束  $J_v$  が 2.8m/d の一定値で実験を行った。圧力計のデータに基づき、各濾過サイクルの開始時からの圧力増加  $\Delta p_{cf}$  がある設定値 (30, 60, 90kPa) に達したら、いったん濾過操作を停止して物理逆洗操作を行った。以後同様に濾過と物理逆洗の周期操作を繰り返した。物理逆洗操作は逆洗タンク内の濾液 200ml を 500kPa の逆洗圧でセラミック膜の外側から内側へ透過させることにより行った。1 サイクルあたり、逆洗そのものに要する時間は約 15s であったが、操作の切り換え等を含めると、次の濾過操作に移行するまでに 5min を要し、この時間が濾過休止時間となる。濾過実験の期間中、圧力  $p$ 、膜透過流束  $J_v$  および液温を 5min 毎に測定した。また、サンプリングした濾液について、試料液と併せて、その水質を評価するため、BOD、COD、SS、濁度および大腸菌群数を JIS に準拠して測定した。

### 2-2-3 実験結果

表 2 水質の分析結果

	BOD mg/l	COD mg/l	SS mg/l	濁度 mg-Kaolin/ml	大腸菌群数 個/100ml
原水	15	14	3	3	$1.7 \times 10^4$
処理水	1.3	6.1	<1	<1	非検出
基準値	<3	-	-	<5	<50

原水、処理水の分析結果と基準値（親水用水水質）を表 2 にまとめた。表に示されるように、処理水は親水用水以上の水質を達成することができた。なお、全窒素量(T-N)の分析値は 14mg/l であり、これは、再生水としては比較的高い値であるが、窒素除去は本研究の前段のハイブリッド型リアクターによって行われる。図 4 には、濾過圧力  $p$  対 単位濾過面積あたりの濾液量  $v$  の関係を種々の逆洗起動差圧  $\Delta p_{cf}$  に対してプロットした。図のように、いずれのサイクルにおいても、操作が進行するとともに圧力が増加する傾向が得られた。さらに、その増加の仕方は徐々に顕著となる傾向が現れ、膜面上に堆積する生成ケーキは圧縮性ケーキであることが示唆される。図 5 には、図 4 の実験をさらに続

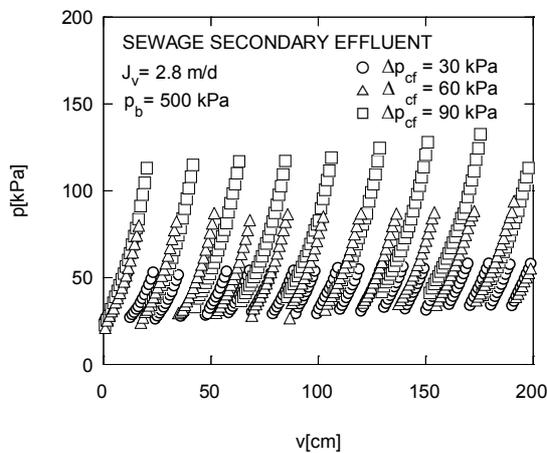


図 4 濾過圧力の経時変化

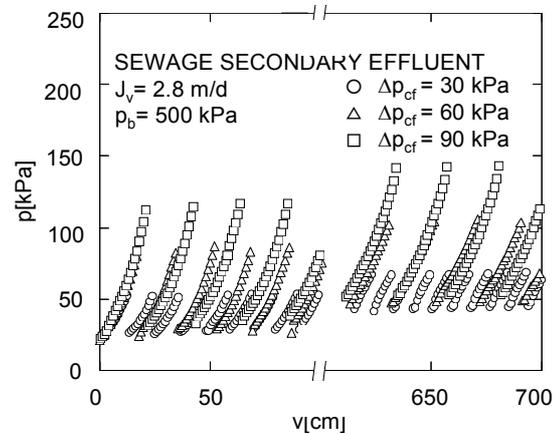


図 5 長期における濾過圧力の経時変化

けて比較的長期における結果を示した。物理逆洗を行うと圧力は低下するが、図5に示されるように、物理逆洗と濾過のサイクルの増加によって膜の初期差圧も増加し、物理逆洗により回復できない不可逆的な膜閉塞が進行する傾向を示す。そこで、次亜塩素酸ナトリウムを用いた化学逆洗を行ったところ、50kPaまで上昇した膜の初期差圧は22kPaまで低下し、清浄な膜の差圧18kPaに近いところまで回復された。この結果に基づき、フェーズIIのオンサイト実験では、物理・化学併用逆洗操作の導入を検討することとした。

膜面上に堆積した生成ケーキの特性を明らかにするために、図6には濾過圧力と膜の初期差圧との差( $p-p_m$ )対濾過時間 $\theta$ の関係を両対数プロットで示した。その結果、プロットは一本の直線で表すことができた。ここで、濾過速度式について説明する。定速濾過( $J_v$ 一定)における( $p-p_m$ )と $\theta$ の関係は一般に(1)式で表される。

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

ここに、 $p$ は濾過圧力、 $p_m$ は膜の初期差圧、 $\mu$ および $\rho$ はそれぞれ濾液粘度および濾液密度、 $\alpha_{av}$ は平均濾過比抵抗、 $s$ は固形分の質量分率、 $m$ はケーキの湿乾質量比である。圧縮性濾過ケーキを生成するスラリーの濾過では、濾過のしにくさの指標となる $\alpha_{av}$ をSperry型の式 $\alpha_{av} = \alpha_0(p - p_m)^n$ で書き換えることができ、結果的に(2)式を得る。

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

図6の直線関係は、濾過挙動が(2)式に従っていることを意味している。図の直線勾配から生成ケーキの圧縮性の指標となる圧縮性指数 $n$ を算出することができる。本研究での $n$ の値は0.35となり、中程度の圧縮性を有することが明らかとなった。

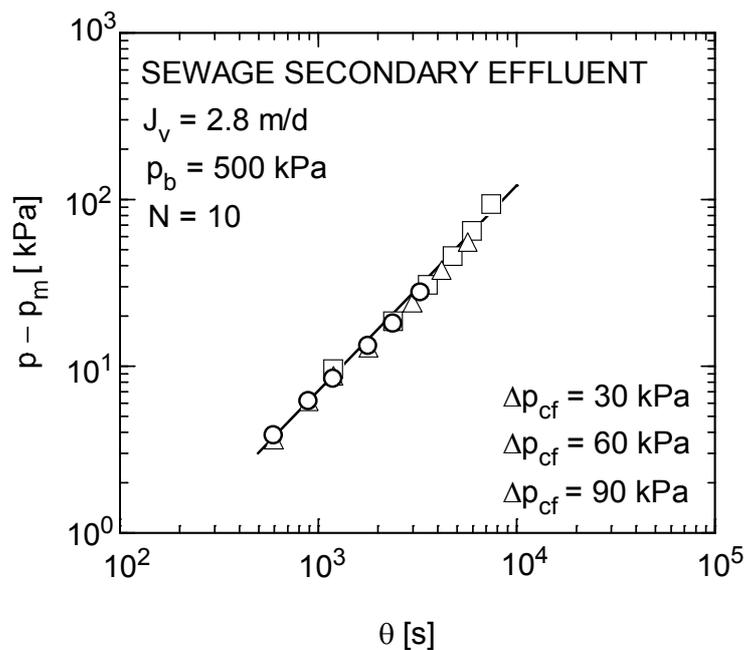


図6 生成ケーキの特性

次に、図7において膜閉塞モデルを提案する。このモデルでは、実際の濾過挙動の観察結果に基づき、操作開始からサイクル数  $N_t$  までは膜の閉塞が急激に進行し、それ以降は緩やかに進行するという2段階の閉塞区間を想定した。

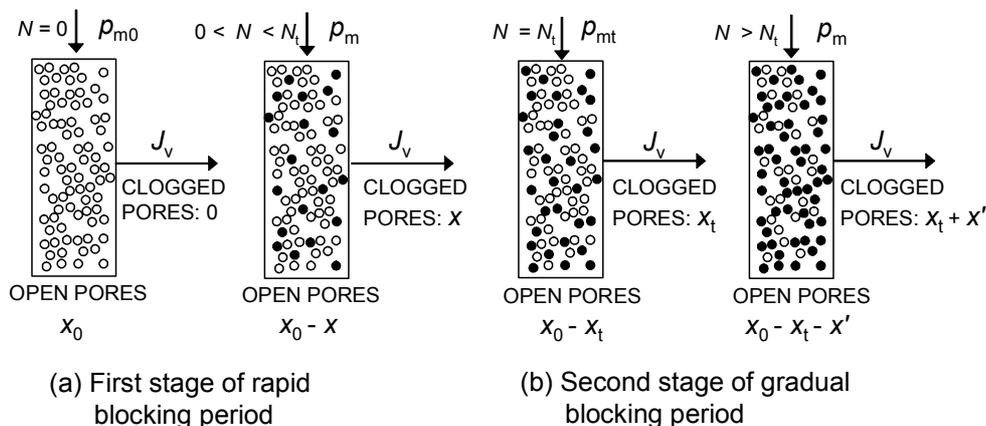


図7 膜閉塞のモデル

膜閉塞が急激に進行する第1段階(a)における膜透過流束  $J_v$  は、 $N=0$  および  $0 < N < N_t$  のそれぞれについて、

$$J_v = kx_0 p_{m0} \quad (3)$$

$$J_v = k(x_0 - x) p_m \quad (4)$$

で表すことができる。膜閉塞のメカニズムを中間閉塞と仮定し、中間閉塞式(5)を用いて式(3)および(4)を整理すると、式(6)で示されるように各サイクルの初期差圧  $p_m$  をサイクル数  $N$  の関数で与えることができる。

$$x = x_0 \{1 - \exp(-\eta N)\} \quad (5)$$

$$p_m = p_{m0} \exp(\eta N) \quad (6)$$

膜閉塞が緩やかに進行する  $N \geq N_t$  の第2段階(b)についても同様に考え、式(3)~(6)を順次書き改めると式(3')~(6')となり、同様に  $p_m$  を  $N$  の関数で与えることができる。

$$J_v = k(x_0 - x_t) p_{mt} \quad (3')$$

$$J_v = k(x_0 - x_t - x') p_m \quad (4')$$

$$x' = x_0 - x_t [1 - \exp\{-\eta'(N - N_t)\}] \quad (5')$$

$$p_m = p_{mt} \exp\{\eta'(N + N_t)\} \quad (6')$$

図8には、膜閉塞の挙動を明らかにするために、初期差圧  $p_m$  の実験結果をサイクル数  $N$  に対して片対数プロットした。モデルでも示したように、 $p_m$  は初期の急激な増加とその後の緩やかな増加の2区間に分かれた。膜閉塞は初期サイクルにおいてある程度急激に進行した後、閉塞と剥離のバランスによって緩やかに進行するものと考えられる。図の直線勾配から膜閉塞の因子  $\eta$  および  $\eta'$  を求めることが

できる。さらに式(6)および(6')をまとめると式(7)で整理できる。

$$p_m = p_{mi} \exp(\gamma) \quad (7)$$

ただし、 $N \leq N_t$ :  $\gamma = \eta N$ ,  $p_{mi} = p_{m0}$ ;  $N \geq N_t$ :  $\gamma = \eta' (N - N_t)$ ,  $p_{mi} = p_{mt}$ である。図9には $p_m$  対  $\gamma$ をプロットした。因子 $\eta$ および $\eta'$ に対する逆洗起動圧力 $\Delta p_{cf}$ の依存性を考慮することにより、図のように $p_m$ と $\gamma$ の関係が $\Delta p_{cf}$ と無関係に一本の直線で表すことができた。

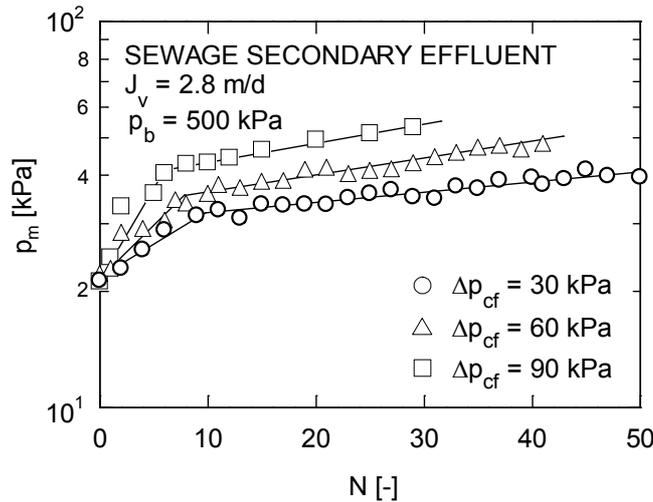


図8 サイクルの増加による初期差圧の変化

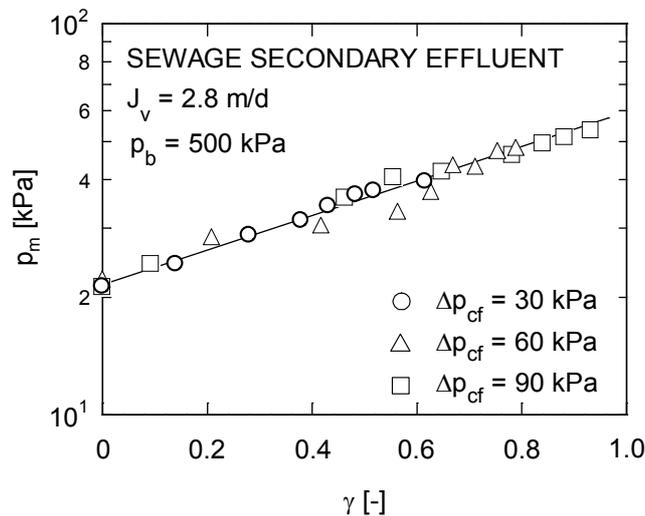


図9 膜閉塞モデルに基づく初期差圧の変化

前に述べた  $n$  の値と(6)および(6')式で表される  $p_m$  の変化を(2)式に代入すれば、各サイクル毎の濾過圧力  $p$  の経時変化を推定することができる。さらに  $p$  の経時変化を(8)式に適用すれば、逆洗液量を考慮した単位有効処理液量当たりの消費エネルギー  $E$  を算出することができる。

$$E = \frac{\int_0^v p dv + p_b v_b}{v - v_b} \quad (8)$$

ここに、 $p_b$  および  $v_b$  はそれぞれ逆洗圧力および単位膜面積あたりの逆洗液量である。

図 10 には、消費エネルギー  $E$  対 有効処理液量  $(v - v_b)$  の実測値と推定値の比較を示した。図のように推定結果と実験値は良い一致を示し、本研究で提案した数式モデルの妥当性が確認された。さらに、図 11 には長期間にわたって消費エネルギーを推定し、有効処理液量に対してプロットした。図の結果から、ある有効処理量に対し、消費エネルギーを最小にする最適な物理逆洗起動圧力が存在することが示唆される。さらに、種々の逆洗起動条件と消費エネルギーの関係を種々の有効処理液量に対して推定計算した結果を図 12 に示した。いずれの曲線も極小値をもち、有効処理液量毎に消費エネルギーを最小にする最適な物理逆洗起動条件を決定することができた。

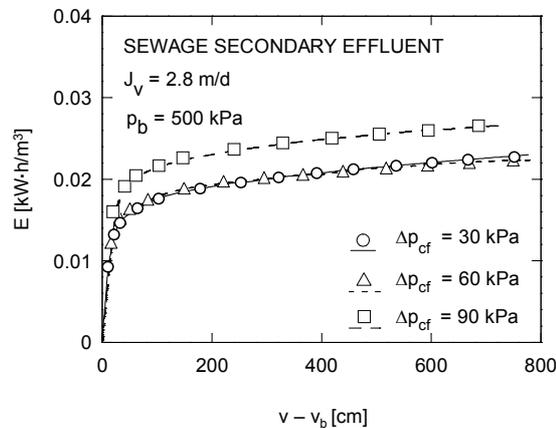


図 10 消費エネルギーの推定結果と実験結果の比較

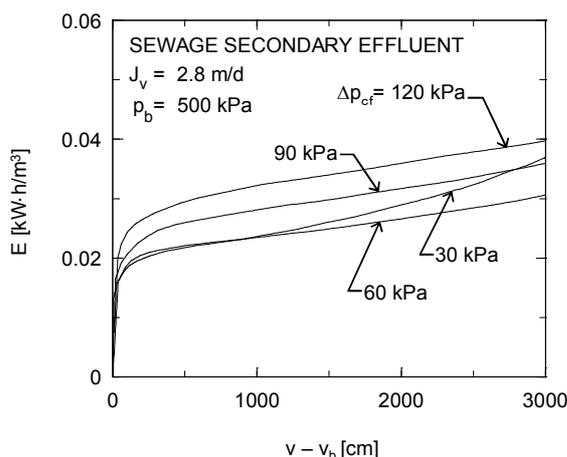


図 11 消費エネルギーの推定結果

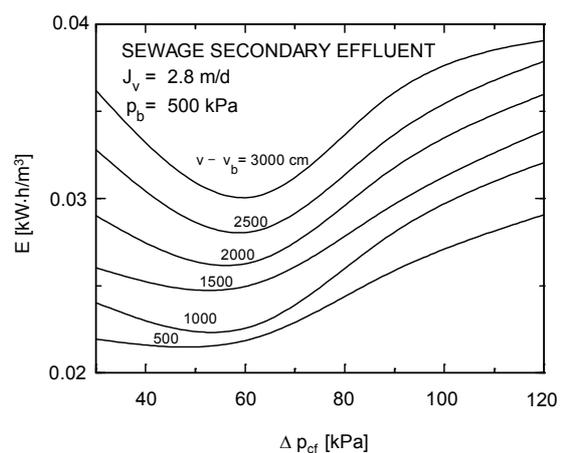


図 12 逆洗起動差圧の最適化

### 2-3. フェーズ I の考察及びまとめ

以上のように、生成ケーキの特性および膜閉塞の挙動を明らかにしつつ数式モデルによって種々の操作条件における消費エネルギーを解析し、この結果に基づき最適な操作条件を提出することができた。さらに、性能的にも比較的高い膜透過流速で処理でき、なおかつ大腸菌等をはじめとするバクテ

リアの完全除去により疫学的に安全な水質が確保できた。

フェーズⅠの主な成果をまとめると以下のようなになる。

1. 小型精密濾過実験装置の設計・製作を行い、操作手法を決定した。
2. 分離膜はモノリス状のセラミック膜、凝集剤は PAC、実験試料には名古屋市植田下水処理場より採集した下水二次処理水を用いて周期逆洗型精密濾過操作の最適化を検討した。
3. 処理水質、膜透過流束および消費エネルギーは、比較的短時間のラボ実験の範囲では、目標値を達成している。
4. 以上の基礎データに基づき、図 13 で示した 3 つの膜系列を有するオンサイトマルチモード精密濾過装置の設計・製作を行い、設置工事を終了した。フェーズⅡに向けて、本装置の調整運転を行った。



図 13 オンサイトマルチモード精密濾過装置

### 3. フェーズⅡの成果

#### 3-1. 目的及び目標

フェーズⅠで達成した処理水質や膜透過流束および消費動力の結果をオンサイト実験でも再現することがフェーズⅡの目的である。下水二次処理水を原水に用いたオンサイト実験を長期間行い、消費動力が  $0.15\text{kWh/m}^3$  以下で  $2\text{m/d}$  以上の膜透過流束を実現し、安定した親水用水水質を得ることを第一の目標とした。また、微生物処理工程とのトータルシステム化を目指して、ハイブリッド型リアクター処理水を原水に用いた場合でも同様に安定した処理が継続できるような操作指針を提出することを第二の目標とした。

#### 3-2. 方法及び結果

##### 3-2-1 実験装置及び方法

図 14 にはオンサイト精密濾過システムの概要を示した。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三系列ある。消毒前の下水二次処理水が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、ヘッド差によって三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、三系

列同時に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。

分離膜には、長さ 1m、直径 3cm のモノリス状でアルミナ製のセラミック精密濾過膜（日本ガイシ（株）製）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、その全有効膜面積は 0.239m<sup>2</sup> 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 0.1μm 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。前処理の凝集混和槽は連続する三つの槽からなり、二番目の槽に PAC を所定量添加し 150rpm で 33min の急速攪拌を行った後、三番目の槽では 40rpm で 66min 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。

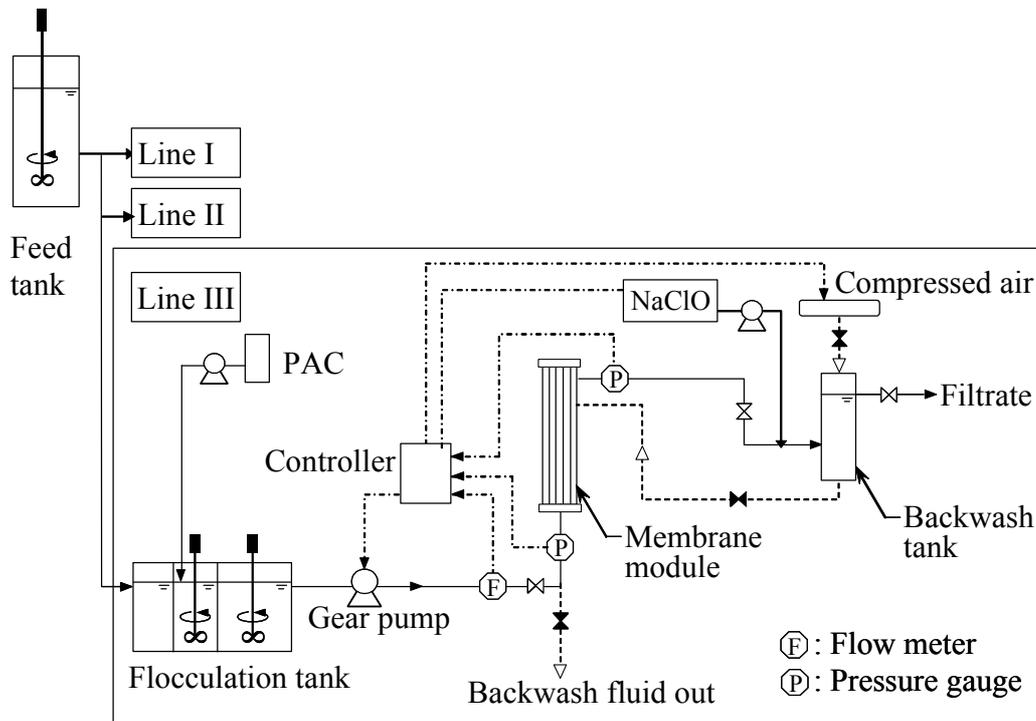


図 14 オンサイトマルチモード精密濾過実験装置の概要

実験は、膜透過流束  $J_v$  が 2.8m/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  $\Delta p_{cf}$  が 60kPa 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は 160s である。また、サイクル内の初期圧力  $p_m$  が 80kPa ( $=p_{mf}$ ) に達したら、そのサイクルでの濾過圧力の上昇分が 60kPa に達した時点で種々の濃度の次亜塩素酸ナトリウムによる化学逆洗を行った。次に、初期圧力  $p_m$  が 25, 50 および 80kPa に達したら、そのサイクルでの濾過圧力の上昇分が 60kPa に達した時点で種々の濃度の次亜塩素酸ナトリウムによる化学

逆洗を行った。逆洗圧力、逆洗時間は、物理逆洗の場合と同じである。試料液中の凝集剤の添加濃度は 3mg/l に設定した。実験中に濾過抵抗に起因する膜間差圧  $p$  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、BOD、COD、SS、濁度および大腸菌群数の各値を JIS 規格に準拠して測定した。

### 3-2-2 オンサイト実験結果

表 3 は 2 年間分の試料原液と処理水の水質分析結果である。試料液の濁度は 3mg/l 前後であり、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わかる。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、親水用水の基準も満たしていることから、処理水の広範な用途が期待できる。

表 3 原水および処理水の水質変動

	BOD [mg/l]		COD [mg/l]		SS [mg/l]		濁度[mg-Kaolin/l]		大腸菌群数[個/100ml]	
	原水	処理水	原水	処理水	原水	処理水	原水	処理水	原水	処理水
14年 4月	14.0	0.6	10.0	6.0	4	<1	2	<1	1.0X 10 <sup>5</sup>	非検出
14年 6月	4.8	0.9	6.1	3.5	3	<1	3	<1	4.5X 10 <sup>4</sup>	非検出
14年 8月	3.9	1.2	8.0	4.5	2	<1	3	<1	2.5X 10 <sup>4</sup>	非検出
14年 10月	3.8	0.5	7.4	3.9	1	<1	2	<1	2.8X 10 <sup>4</sup>	非検出
14年 12月	6.9	1.5	8.4	4.8	4	<1	3	<1	9.7X 10 <sup>4</sup>	非検出
15年 2月	15.0	1.7	8.3	4.4	3	<1	1.1	<1	9.7X 10 <sup>4</sup>	非検出
15年 4月	7.7	1.3	8.4	5.4	3	<1	3	<1	2.6X 10 <sup>5</sup>	非検出
15年 6月	3.7	0.9	6.8	4.8	2	<1	2	<1	3.3X 10 <sup>5</sup>	非検出
15年 8月	5.6	2.6	6.6	5.2	2	<1	2	<1	3.2X 10 <sup>4</sup>	非検出
15年 10月	6.7	2.3	6.4	5.1	2	<1	2	<1	3.4X 10 <sup>4</sup>	非検出
15年 12月	10.2	1.4	16.0	4.9	2	<1	2.2	<1	8.5X 10 <sup>4</sup>	非検出
16年 3月	17.0	1.9	11.0	6.6	3	<1	5	<1	1.9X 10 <sup>5</sup>	非検出

オンサイト実験では、膜閉塞の抑制を目的として物理・化学併用逆洗操作を適用し、膜閉塞の機構や薬品洗浄による回復率に及ぼす操作条件の影響などを検討した。いずれの膜系列も化学洗浄起動初期差圧を 80kPa に設定し、化学洗浄液中の薬品（次亜塩素酸ナトリウム）濃度をそれぞれ 625、1250 および 2500ppm に設定した場合の初期差圧  $p_m$  の経日変化を図 15 に示した。図のように、濾過開始から約 9 日間で 3 系列とも初期差圧が 80kPa に達したため、その直後に化学逆洗操作が起動された。化学逆洗後の膜差圧を比較すると、薬品濃度が高いほど、膜の回復性が高いことがわかる。特に、薬品濃度が 2500ppm の場合、ほぼ新しい膜の状態に近いところまで回復した。

次に、3 つの膜系列において化学逆洗起動初期差圧と薬品添加濃度をそれぞれ 25kPa-625ppm (RUN1), 50 kPa-1250ppm (RUN2), 80kPa-2500ppm (RUN3) に設定し、実験を行った。 $p_m$  の経日変化を図 16 に示し、化学逆洗時における単位処理量あたりの薬品使用量と圧損による消費エネルギーを表 4 に示した。RUN1 の場合、低濃度で高頻度の化学逆洗を行ったため、逆洗サイクル毎に化学逆洗が起動することになり、初期差圧の著しい増大は抑えられるものの単位処理量あたりの薬品使用量は顕著に大きくな

る。一方、RUN2 および RUN3 の場合、化学逆洗の頻度はかなり低くなるため、薬品使用量は少なくて済む。これらの結果に基づいて圧損による消費エネルギーを算出した結果、表 4 に示したように、RUN1, RUN2, RUN3 の順で消費エネルギーは大きくなった。

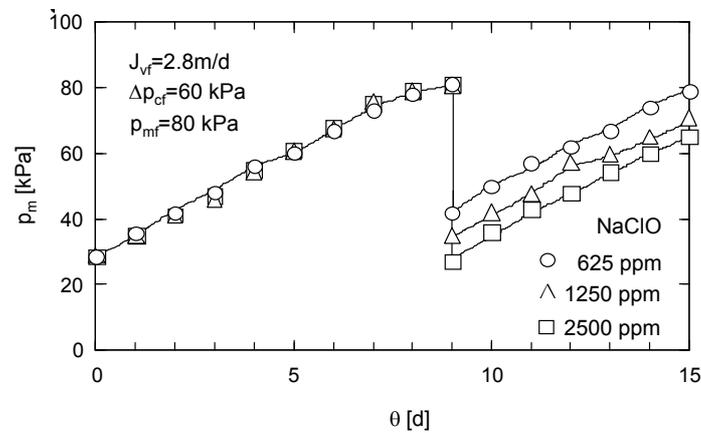


図 15 物理・化学併用逆洗操作による初期差圧の経日変化

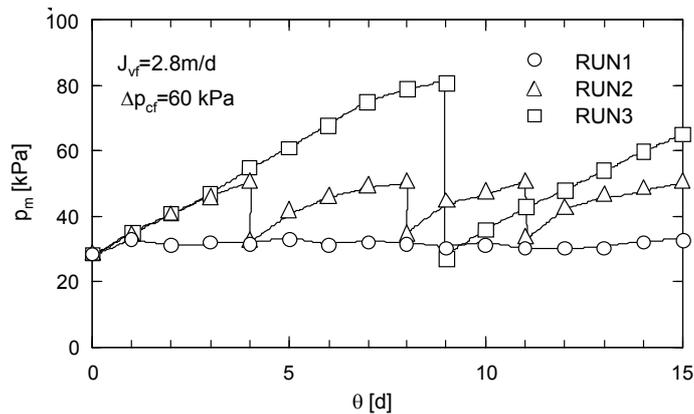


図 16 初期差圧の経日変化に及ぼす化学逆洗起動差圧と薬品濃度の影響

	化学逆洗 起動差圧 [kPa]	洗浄液中の 薬品濃度 [ppm]	単位処理量あたりの 薬品使用量 [g-10%NaClO/m <sup>3</sup> ]	圧損による 消費エネルギー [kWh/m <sup>3</sup> ]
RNN1	25	625	117	0.02
RUN2	50	1250	27	0.04
RUN3	80	2500	22	0.05

表 4 薬品使用量および消費エネルギー

### 3-2-3 ハイブリッドリアクターとのトータルシステムの検討

本研究では前段の微生物処理とのトータルシステム化への検討を目的として、マルチモード精密濾

過装置に装備された3つの膜系列のうち、系列1および2では下水二次処理水を、系列3ではハイブリッド型リアクター処理水をそれぞれ原水に用いて実験を行った。細孔径1.0 $\mu\text{m}$ のセラミック膜を使用し、前処理として凝集剤PACを下水二次処理水およびハイブリッド型リアクター処理水に対してそれぞれ0.5および2ppm-Alの添加率で添加した。逆洗起動差圧を60kPa、膜透過流束を3m/dに設定して精密濾過実験を連続的に行った結果、表5で示したように、いずれの場合も目標水質を上回る処理水質が得られた。消費動力についても、原水が下水二次処理水の場合とハイブリッド型リアクター処理水の場合のいずれも0.15kWh/m<sup>3</sup>を下回るという結果が得られた。トータルシステムの構築に向けて、長期的な操作の安定性や水質についてさらなる検討が必要であるが、その可能性は十分に実証できたものと評価できる。

表5 原水と精密濾過処理水の水質

	下水二次 処理水	精密濾過 処理水	ハイブリッド型 リアクター処理水	精密濾過 処理水
BOD [ppm]	4.4	1.4	5.5	1.9
COD [ppm]	9	4.9	10	5.3
SS [ppm]	2	<1	7	<1
濁度 [mg-Kaolin/l]	3	<1	6	<1
大腸菌群数 [個/100ml]	3.2x10 <sup>4</sup>	非検出	8.5x10 <sup>4</sup>	非検出
全窒素 [ppm]	13.4	13	7.2	6.9

### 3-3. 考察及びフェーズIIのまとめ

フェーズIのラゴ実験で得られた処理水質や膜透過流束および消費動力の結果をオンサイト実験でも再現することができた。ただし、より効率的な処理のためには、単位処理液量あたりに使用する薬品量や消費動力の両者のバランスを考慮して、最適な操作条件を決定する必要がある。操作の長期間安定性については、原水の一時的な負荷の上昇により操作圧力が急激に増加する場合を除き、安定した操作を長期的に継続できることが確認された。処理水質についても、原水の負荷変動に左右されず、長期的に安定した親水用水水質を得ることができた。

前段の微生物処理工程のハイブリッド型リアクター処理水を原水に用いた場合でも、下水二次処理水のオンサイト実験と同様に、消費動力が0.15kWh/m<sup>3</sup>以下で3m/dの膜透過流束を実現し、下水二次処理水由来の精密濾過処理水とほぼ同等の水質を得た。

## 4. 成果の達成度

1. 小型精密濾過実験装置の設計・製作を行い、名古屋市植田下水処理場より採集した下水二次処理

水を用いて周期逆洗型精密濾過操作の最適化を行った。

2. オンサイトマルチモード精密濾過装置の設計・製作を行い、名古屋市植田下水処理場に設置した。下水二次処理水を用いて物理・化学併用逆洗型精密濾過による高度処理を行い、長期間安定的に目標とする操作を継続できた。
3. ハイブリッドリアクターによる処理水を試水に用いた場合でも、目標水質並びに目標消費動力を安定的に達成できた。

## 5. 今後の課題

1. オンサイト実験で得られた成果に基づき、事業化に向けて研究成果の対外的な発表を行うなど PR に努める。
2. 前処理に凝集操作を併用した周期逆洗型精密濾過のラボ実験を継続し、各種産業廃水の高度処理および循環再利用に対応可能なシステムを構築する。
3. 取得特許の活用を進める。