

法は、洗浄液によって活性汚泥の硝化反応が損なわれることはなく、廃液も出ないことから十分実用的であると考えられた。

膜の薬品洗浄1回あたり15～20ℓ程度の次亜塩素酸ナトリウム溶が必要となるため、今後、膜分離型小型合併処理浄化槽が普及した場合、運搬時の塩素ガス対策等についても検討する必要があると考えられた。

(3) 膜分離型小型合併処理浄化槽で使用する種汚泥について

膜分離型小型合併処理浄化槽では運転開始直前にばっ気槽に種汚泥を投入する事が必須となるが、種汚泥として使用することのできる汚泥に他にどのようなものがあるか、また市販のシーディング剤が利用できないか検討を行った。

その結果、合併処理浄化槽及び活性汚泥法の産業廃棄物処理施設の余剰汚泥脱水ケーキは、種汚泥としての使用が可能であることが確認された。今回使用したシーディング剤については、急激なフラックスの低下が認められ、使用できないことがわかった。

脱水汚泥が使用できれば、保存と運搬が容易にできるようになるため、膜分離型小型合併処理浄化槽の種汚泥の添加ががより迅速にできるようになると考えられた。

これらの、種汚泥の検討結果は、膜分離型小型合併処理浄化槽の維持管理性の向上に有用な知見となると考えられた。

第3章 メッシュろ過による汚泥濃縮に関する研究

3.1 はじめに

小・中規模の浄化槽においては汚泥の濃縮・貯留が困難であることが多く、汚泥搬出の制約が排水処理を困難にすることがある。汚泥貯留槽の容量を削減するとともに、搬出汚泥量自体を削減するためには、汚泥濃縮が重要な課題である。しかしながら、小・中規模施設における機械設備の導入は、経済的な困難性に加えて操作性や稼働率の問題などから容易ではない。

小・中規模の浄化槽においては、とりわけ簡易な装置と簡易な操作で汚泥濃縮を行うことが求められる。このような方法として、重力濃縮とメッシュろ過を併用するタイプの回分式濃縮方法についてこれまで検討を進めてきた。メッシュには100、150、200 μm の目開きのものを使用した結果、9,000 mg/ℓ の汚泥を100 μm のメッシュでろ過した場合、ろ過水のSSは25 mg/ℓ 以下に維持され12時間で概ね20-10%に減容化できることが示された。

本研究では、さらに目開きの大きなメッシュについても検討を行うとともに、ろ過面積、沈殿操作の影響、凝集剤の添加効果についても検討を行った。

3.2 実験方法

3.2.1 実験装置

汚泥濃縮装置は図3-1に装置概要を示すように、容量15 ℓ の円筒形容器にメッシュを用いて作成した平膜型のろ過モジュール（膜面積1,064 cm^2 または532 cm^2 ）を取り付け、ろ液は装置下部から流出するようにした。ろ過分離材としては、目開きの異なる3種類のナイロンメッシュ（100、200、500 μm ）を用いた。

この装置では水位差のみでろ過分離を行い、ろ液は装置下部から流出する。初期の水位差は65 cm でありメッシュの全表面がろ過に利用されるが、ろ過の進行とともに水位が低下すると、ろ過分離材の上部は露出しメッシュ全体がろ過に利用されなくなる。また、汚泥はメッシュによる分離濃縮とともに沈降によっても濃縮される構造となっている。ろ過モジュール下部にはデッドスペースがあり、濃縮汚泥の貯留槽となっている。その部分の容積は0.45 ℓ であり投入汚泥量の約3%であり、最大0.45 ℓ まで濃縮が可能である。

3.2.2 実験条件

供試汚泥は、大学内の生活排水処理施設（長時間ばっ気活性汚泥法）の返送汚泥を用い、初期汚泥濃度は約3,000~9,000 mg/ℓ の範囲とした。濃縮操作はすべて回分式で行い、装置

に汚泥15ℓを投入し、ろ過時間は通常6時間とした。

汚泥を供給した直後からろ過を開始した場合と、汚泥供給後1時間静置してからろ過を開始した場合について比較するとともに、ろ過面積の影響について検討を行った。さらに、汚泥を直接ろ過する条件に加えて、凝集剤 ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$) を添加した場合についても検討を行った。これらの実験条件を表3-1にまとめて示す。

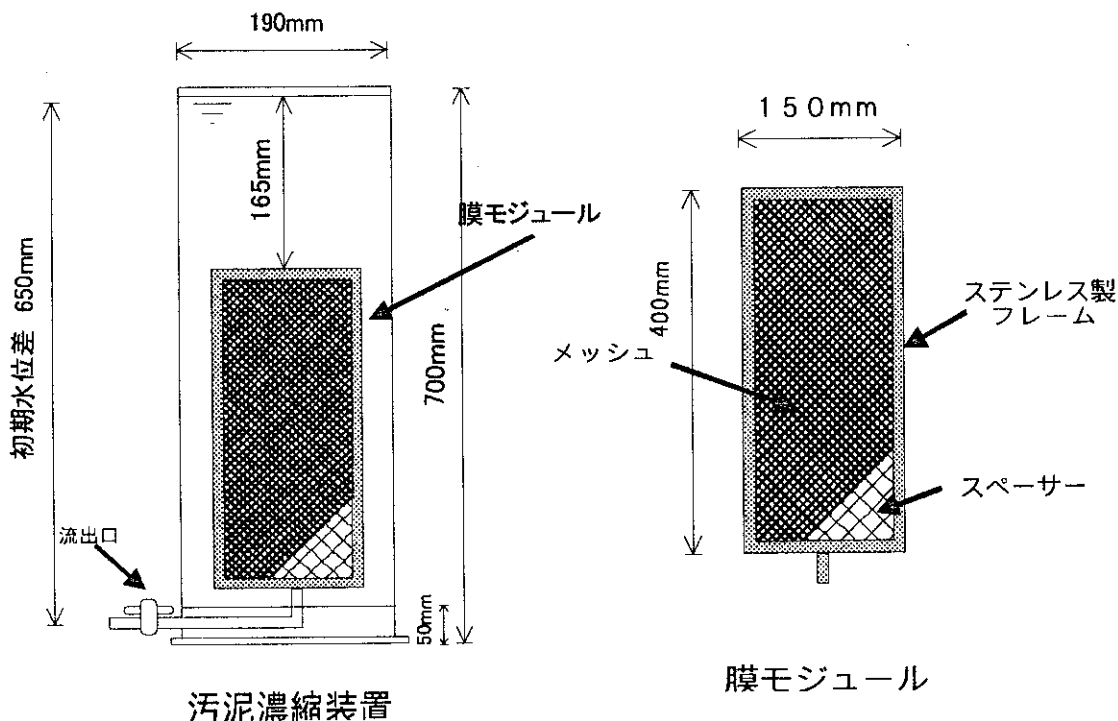


図3-1 実験装置の概要

表3-1 実験条件

初期汚泥濃度 (mg/l)	凝集剤添加率	汚泥の静置	膜面積 (cm ²)
3000	0%、5%	—	1064
6000	0%	1時間	1064
9000	0%、10%	1時間	1064、532

3.3 実験結果

3.3.1 メッシュサイズの影響

3種類のメッシュを用い、汚泥濃度を3段階に変化させて汚泥濃縮実験を行った結果の概要を表3-2にまとめて示す。なお、汚泥体積の減少率は6時間後の値を示し、ろ過水のSSについてはろ過開始5分後の値を示す。また、残留汚泥量 (%) と流出水SSの経時変化を

図3-2、3-3に示す。本装置ではモジュールの下部に0.45ℓのデッドスペースがあり、本装置での最大減容化率は97%であるが、6時間での最大減容化率は95.3%にとどまった。SS濃度が高いほど減容化率は低下し、SS9,000mg/ℓでは89~87%となった。しかし、SS9,000mg/ℓの場合、ろ過速度はメッシュサイズの影響をほとんど受けなかった。これはメッシュ上に付着したろ過機能を有する汚泥ケーキ層が短時間に形成されやすいためと考えられる。また、SS回収率についても、初期SS濃度が高いほど高い値を示した。ろ過開始直後のろ過水のSSはメッシュサイズが大きいほど高いが、初期汚泥濃度が高くなると短時間に清澄なろ過水が得られ、500 μ mのメッシュでも5分後のろ過水のSSは10mg/ℓ以下となった。しかしながら、ろ過水のSSが高い初期5分間の流出量は投入汚泥量の約20%に達するため、この期間のろ過水は水処理プロセスへの返送が不可欠である。

表3-2 メッシュサイズの影響

項 目	Run1			Run2			Run3		
初期MLSS (mg/l)	3000			6000			9000		
メッシュサイズ (μ m)	100	200	500	100	200	500	100	200	500
6h後体積比 (%)	6.7	5.2	4.7	11.3	8	6	12	11.3	13.3
5min後ろ過水SS (mg/l)	6.8	15	84	4.1	13	45	1	3	2
5min後ろ過水濁度	5.9	7.5	30.5	0.2	6.8	17.5	0.7	0.6	0.35
槽内SS回収率 (%)	88.2	77.3	71.7	91.2	83.4	77.2	97.8	90.7	88.4

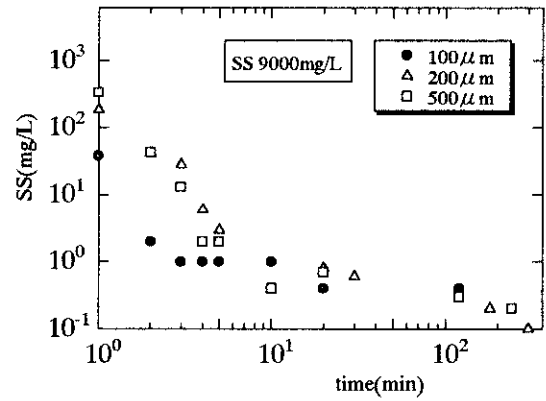
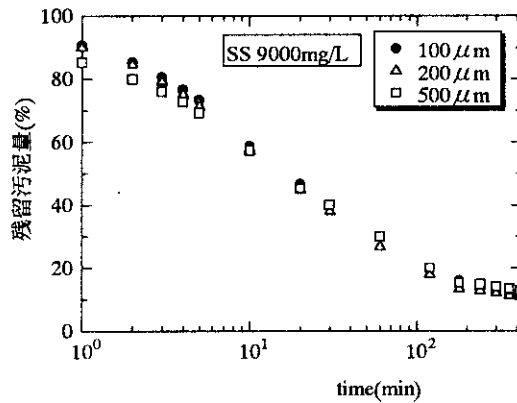
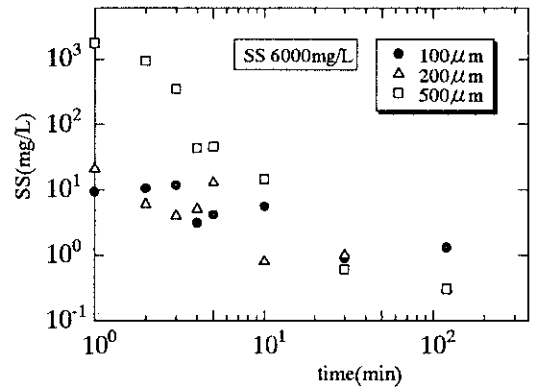
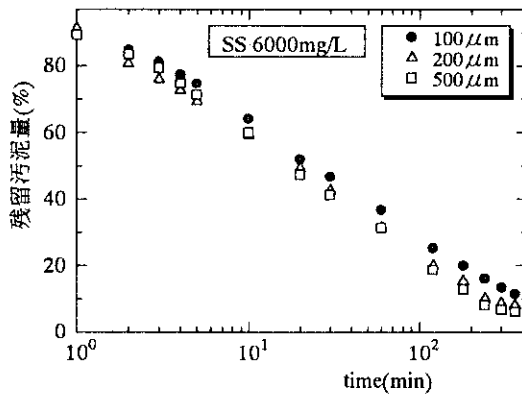
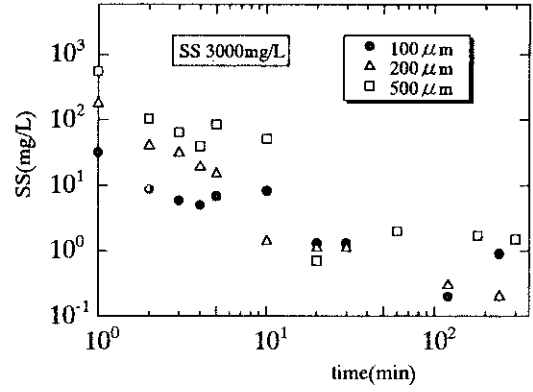
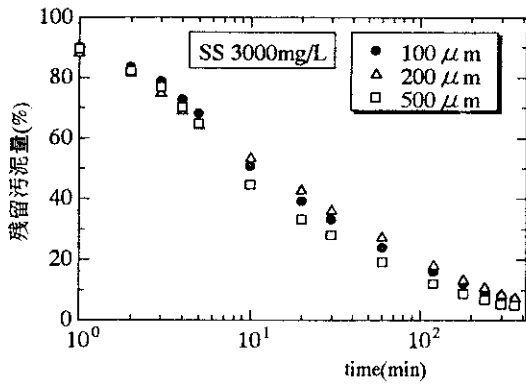


図 3-2 残留汚泥量の経時変化

図 3-3 ろ過水SSの経時変化

3.3.2 ろ過面積の影響

初期SS濃度9,000mg/lの場合において、従来のろ過面積の1/2のメッシュを用いてろ過面積の影響について検討を行った。残留汚泥量(%)の経時変化の例を図3-4に示すとともに、表3-3に結果をまとめて示す。

ろ過面積が小さい場合、初期のろ過速度は遅いがろ過速度の減少率はむしろ低く、比較的安定したろ過速度が得られたことから、6時間での濃縮率にはほとんど影響が認められなかった。メッシュの位置が低く水位差が大きいため、高いフラックスが維持されていたことが指摘できる。

SS回収率をみると、従来のろ過面積の場合に比べて高いことが指摘できるが、これはSS濃度の高い初期のろ過水量が少ないことに起因するものといえる。

これらの結果から、ここで検討を行った汚泥濃縮法において6時間以上のろ過操作を想定すれば、ろ過面積が濃縮率に及ぼす影響は必ずしも大きいものでないと考えられる。

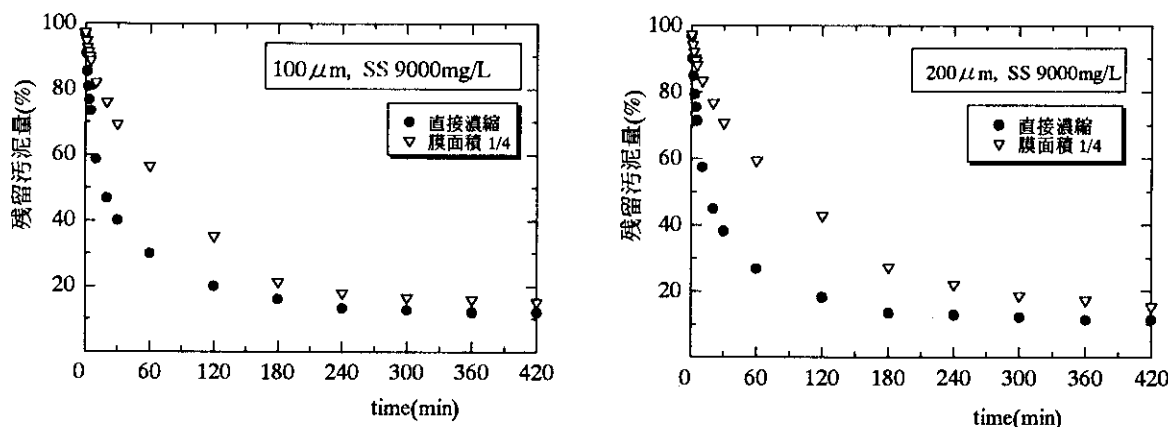


図3-4 ろ過速度に及ぼすろ過面積の影響

表3-3 ろ過面積及び沈殿操作の影響

項目	膜面積 1/2			1時間静置後濃縮		
	100	200	500	100	200	500
初期MLSS (mg/l)	9000			6000		
メッシュサイズ	100	200	500	100	200	500
6h後体積比 (%)	17.3	16.3	11.3	11.3	11.3	5.3
ろ過時間 (h)	7	7	7	6	6	6
5min後ろ過水SS (mg/l)	3.0	1.0	13	14.4	3.0	36.1
5min後ろ過水濁度	0.35	0.19	2.5	46.2	2.9	17
槽内SS回収率 (%)	99.3	93.9	92.0	92.2	85.4	80.7

3.3.3 沈殿操作による影響

本装置ではメッシュが鉛直方向に設置されており、沈殿効果も期待できることから汚泥を装置に供給してから1時間静置した後ろ過を開始し、沈殿による影響について検討を行った。SS6,000mg/lの汚泥を供給した場合の結果を上表3-3にまとめて示す。また、100 μ m及び1200 μ mのメッシュにおける装置内残留汚泥量(%)の経時変化を、静置を行わなかった場合と比較して図3-5に示す。

1時間静置直後のろ過速度は極めて速く、ろ過開始から1時間後(操作時間:2時間)における残留汚泥量は静置をしなかった場合の2時間後のそれと同程度となった。したがって、6時間の全操作時間における濃縮率にもほとんど影響を及ぼさなかった。これは、1時間の静置によって汚泥界面が1/2程度まで沈降したためメッシュ上の汚泥ケーキ層が厚くならず、ろ過抵抗が小さくなったことによるものといえる。ろ過開始5分後のSSは若干高くなったが、その後のろ過水のSSは低くなり、ろ過終了時のSS回収率はむしろ高くなった。

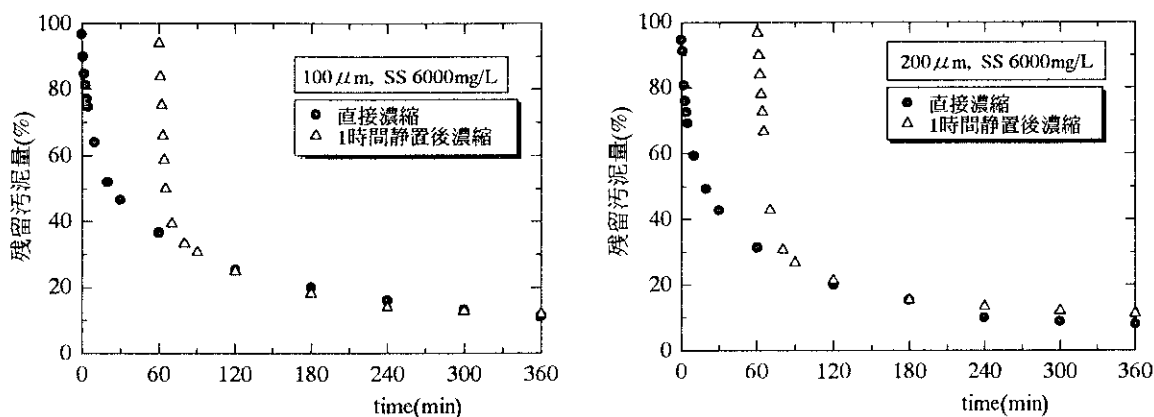


図3-5 沈殿操作(1時間)による影響

3.3.4 凝集剤添加の影響

メッシュによる汚泥ろ過の機能は、メッシュ表面上に形成される汚泥ケーキ層によるものであるが、汚泥ケーキ層を保持するには相対的に緻密なメッシュの方が有効であった。汚泥濃度が高い場合には目開きの大きなメッシュでも高い汚泥捕捉性を示したが、ろ過開始直後にはSSの流出が顕著であった。この点を改善する目的で、凝集剤を添加したろ過分離についても検討を行った。

凝集剤にはA12(SO4)3·18H2Oを用い、SS3,000mg/lの汚泥についてはSSに対して5%を添加し、SS9,000mg/lの汚泥についてはSSに対して10%を添加した。また、後者の場合には、装置内で汚泥を1時間沈殿させてからろ過を開始した。結果を表3-4にまとめて示す。

SS3,000mg/l の場合、100 μ m のメッシュでは凝集剤添加による効果は認められなかったが、500 μ m のメッシュではろ過開始5分後のろ過水のSSが著しく改善され、SSの回収率も高くなった。しかしながら、凝集剤の添加はろ過分離速度にはほとんど影響が認められなかった。

一方、SS9,000mg/l の場合には、いずれのメッシュでもろ過開始5分後のろ過水SS、6時間での汚泥減容化率及びSS回収率において改善効果は認められなかった。この場合、ろ過の進行にともなって水位が低下するとメッシュ表面上に形成された汚泥ケーキ層が容易に脱落する現象が見られた。このため、新たな汚泥ケーキ層が形成されるまでにSSが流出したものと考えられる。

これらのことから、凝集剤添加によってより大きな目開きのメッシュを利用できる可能性が示されたが、凝集フロックサイズをより大きくするとともにフロック強度を高める必要性が指摘でき、高分子凝集剤について検討することが課題といえる。

表 3-4 凝集剤添加の影響

条 件	凝集剤5%添加			凝集剤10%添加 1時間静置		
	100	200	500	100	200	500
初期MLSS (mg/l)	3000			9000		
メッシュサイズ (μ m)	100	200	500	100	200	500
6h後体積比 (%)	5.3	5.3	5.3	12.7	11.3	13.3
5min後ろ過水SS (mg/l)	175	19	22	8	36	50
5min後ろ過水濁度	78.3	3.2	9.8	0.5	23.5	5.1
槽内SS回収率 (%)	88.5	84.2	83.4	92.0	91.1	84.7

3.4 おわりに

メッシュろ過と重力沈殿を組み合わせた簡易な汚泥濃縮法について、メッシュの目開き、ろ過面積、沈殿作用の積極的な利用、凝集剤の効果などについて実験的検討を行った結果ら、次のような点が指摘できた。

- (1) 100 μ m程度の緻密なメッシュであれば、無薬注でろ過分離が可能であり、ろ過開始後5分間程度はろ過分離水を返送する必要があるが、それ以後は直接放流できる良好な水質が得られた。

(2) ろ過面積を1/2に低減しても、6時間程度の操作時間ではろ過面積の影響はほとんど見られず、ろ過面積は必ずしも重要な因子とはならなかった。

(3) 汚泥を1時間沈殿させてからろ過を行うと、初期のろ過速度が著しく速くなるため、全操作時間には影響を及ぼさなかった。したがって、本法では厳密な操作を必要としない点も特長といえる。

(4) 凝集剤添加によって目開きの大きなメッシュの利用可能性が示唆されたが、凝集剤の選定には課題が残された。

以上の結果から、メッシュろ過分離法は小・中規模施設において間欠的に操作できる簡易な汚泥濃縮法として可能性の高い方法と考えられる。ここでは、無薬注で濃縮が可能であったが、汚泥の性状は施設によってかなり変化するものであることから凝集剤を必要とする場合もあるといえる。この場合でも、ろ過分離槽自体を混和槽に利用できるため、特別な施設を必要としない。今後は、性状の異なる汚泥を用いて検討するとともに、凝集剤の必要性について検討することが課題といえる。

第4章 超音波処理によるファウリング防止技術の開発

4.1 はじめに

膜処理における問題点として、膜により阻止された溶質や付着物質による濾過特性の著しい低下があげられる。これらの抑制技術としては、水や薬品による洗浄など、様々な方法が提案されている¹⁾。しかし、薬品などの利用は、膜性能を著しく低下させると共に、洗浄後に、濾過系から再度、完全に薬品を洗浄除去しなければならない。このような膜処理技術に望まれている問題解決のため、本研究では、平成8年度から超音波処理を用いたファウリング防止技術の開発について行ってきた^{2,3)}。昨年度は、限外濾過(UF)膜や精密濾過膜等の膜濾過による水処理プロセスに超音波処理を適応し、これらの濾過特性における超音波照射の効果についての研究を行ってきた^{4,5)}。特に、薬品洗浄を行わずに、超音波と水の洗浄の組み合わせにより効果的に目詰まりした膜を再生できることを明らかにした⁶⁾。今年度は、ファウリング防止技術の開発ということで、ペプトン溶液のクロスフロー濾過の際に超音波照射を行い膜透過特性や膜再生への超音波効果についての詳細な検討を行った。そして、超音波処理による膜分離プロセスの新しい手法として確立するための基礎的結果についての重要な知見を得た。

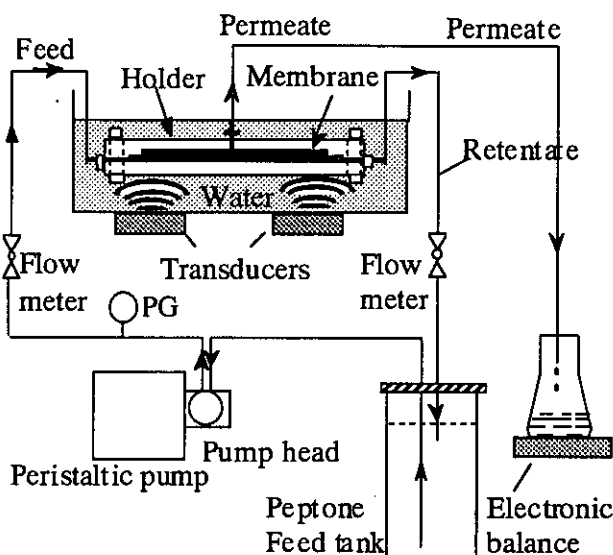


図4-1 Schematic diagram of the cross-flow experimental setup for ultrasound effect on membrane permeability. PG was pressure gauge. Feed tank contained 1500 mL of 1 wt% peptone solution.

4.2 実験方法

図4-1に超音波処理の効果を調べるためのクロスフロー濾過実験の装置図を示す。ステンレス製の濾過セル（ミリポアーミニタンS）内には、 $8 \times 12 \text{ cm}^2$ のUF膜（ポリスルホン

(PS)膜(ミリポアー、PTGCO-MS10))をセットし、この濾過セルを水浴槽(30x24x16cm)内に浸し実験を行った。濾過条件は送液ポンプを用い流量 325ml/minでペプトン溶液を濾過セルに送り操作圧30kPaで加圧し、これにより膜を透過した溶液量を測定し体積流束(m^3/m^2s)を計算した。濾過セルを浸した水浴槽の底には、超音波を発信させる振動子(本多電子)を張り付け28、45、100kHzのそれぞれの周波数の超音波を濾過セルに照射できるようにした。発振器は、W115(本多電子)を用い、発振出力は2.7W/cm²であった。

表4-1に濾過実験に用いたPS UF膜の特性を示す。この膜は分画分子量(MWCO)が、1万の非対称膜であり、分子量2,300(デキストラン換算)のペプトンをほぼ16%ほど阻止でき、実際のペプトン溶液濾過では、ほとんどの溶質は膜を透過している。しかし、水の体積流束($1.7 \times 10^{-5} m^3/m^2s$)に比べて、1wt% ペプトン溶液の体積流束($5.6 \times 10^{-6} m^3/m^2s$)は著しく小さく、さらにはペプトン溶液を60分間濾過した後は阻止率が27%に低下している結果からもペプトンによる膜の目詰まりが生じていることがわかる。

表4-1 PS Membrane properties used for crossflow experiments.

MWCO	Water flux (m^3/m^2s)	1wt% peptone solution		
		Flux (m^3/m^2s)	Rejection of peptone (%)	
			Beginning	After filtration
1x10 ⁴	1.7x10 ⁻⁵	5.6x10 ⁻⁵	16	27

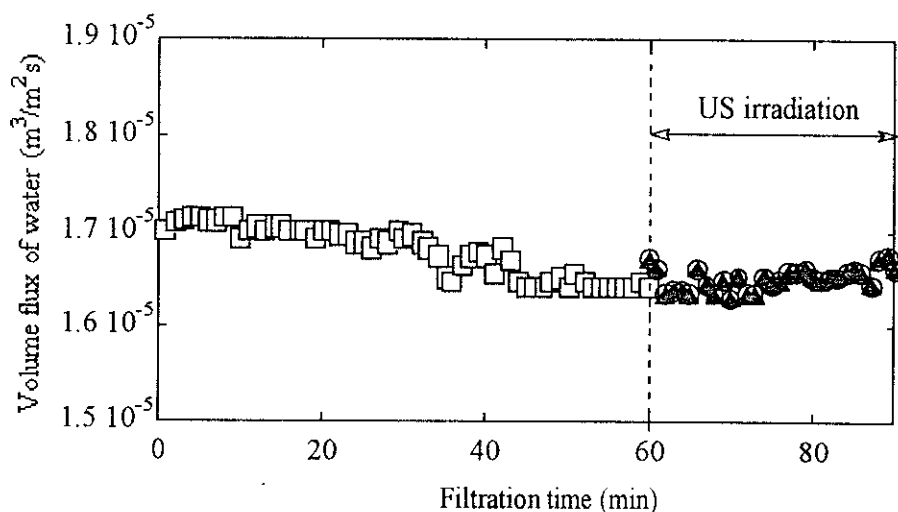


図4-2 Volume flux of water for PS UF membrane operating by 30 kPa pressure in the absence (\square) and presence of ultrasound with 28 (\bullet), 45 (\circ), and 100 (\blacktriangle) kHz frequency.

4.3 結果と考察

4.3.1 膜透過特性への超音波照射の効果

図4-2には、PS膜に水を透過させた時の体積流束を濾過時間に対してプロットした結果を示す。濾過開始後、60分間、超音波（以下、図中ではUS）を照射しないで水の透過（□）を行い、引き続きこの条件でそれぞれ、28（□）、45（●）、100（■）kHzの周波数の超音波を照射した。それぞれの発振周波数の超音波を照射しても得られた体積流束は照射前とほぼ同じであり、PS膜の透過性は超音波で影響を受けないことがわかる。

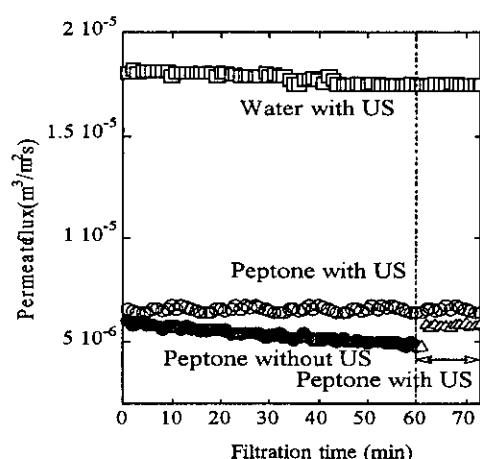


図4-3 Plots of permeate flux versus filtration time for water (□) and 1wt% peptone solution (○, ●). Open and closed symbols were for experiments with and without 45 kHz ultrasound irradiation, respectively. The Δ symbol was for flux measured under ultrasound irradiation.

図4-3に1wt%ペプトン溶液をPS膜に30kPaの操作圧で送液したときの体積流束変化を示す。水の体積流束に比べて、1wt%ペプトン溶液を透過させると、濾過初期から著しく濾過性能が低下してことがわかる。この濾過速度の著しい低下は濾過時間が長くなるに従って徐々に低下する傾向を有する。一方、ペプトン透過を開始直後から超音波(45kHz)を照射した場合(○)には、濾過速度は水の場合に比べて低いものの、時間とともにその性能が低下する現象が現れず、逆に、徐々に体積流束が増加する傾向があることがわかった。また、超音波を照射しないで、ペプトン溶液を60分間濾過した後、超音波を照射(Δ)するとわずかではあるが、体積流束は増加した。このような濾過初期から超音波を照射し、体積流束が増加する現象は、デキストランを溶質として用いた場合にも起こることを我々はすでに報告している3)。図4-2に示すように、PS膜の濾過特性は超音波照射で変化しないことから、溶質溶液の透過時性が超音波照射により促進される現象は、膜への溶質付着や阻止されて膜面に生じたペプトン層の状態に超音波照射が影響し膜の目詰まりを抑制するように作用すると考えられる。

図4-4は、周波数を28、45、100kHzと変えて、濾過初期から超音波を照射しながら測定した体積流束の時間変化を示す。28kHzの周波数を用いた場合には濾過初期から70分間経過しても体積流束の低下は見られず、ほぼ、初めの濾過性能を維持した。45kHzの透過性が促進される場合に比べると超音波照射の効果は少ないが、超音波を照射しない場合(▲)では濾過性能が徐々に時間とともに低下することを考えると、この発信周波数でも超音波の効果はあるといえる。これに対して、100kHzでは濾過開始後、急激に、体積流束が低下し、45kHzの場合とは逆に、膜の目詰まりを促進させるような結果となった。デキストランを溶質に用いた結果4)では、100kHzでは超音波照射の影響はみられなかったが、28と45kHzの発信周波数では、濾過初期から直ちに体積流束が増加した。この実験結果と、これまでの結果4)から、低周波数の超音波照射ほど体積流束の増加が顕著にみられる傾向がある。今後、このような体積流束増加の原因について、更なる解明が必要とされるが、超音波照射により生成する水中内のキャビテーション量が明らかに低周波数の超音波では多いことから考えると、このキャビテーション崩壊のエネルギーが、膜表面洗浄に利用され、溶質の膜上での析出、付着を妨げ、目詰まり防止に役立っていると考えられる。従って、ファウリングと呼ばれる溶質の不可逆的な析出により引き起こされる濾過特性の低下は、濾過開始当初から低周波数の超音波を照射することで抑制できることが明らかになった。

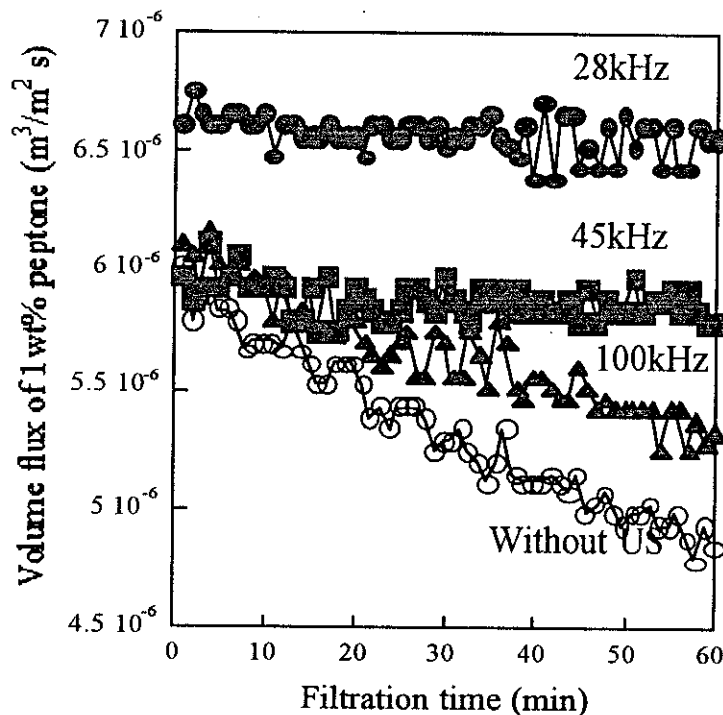


図4-4 Permeate flux of 1 wt% peptone solution measured under ultrasound irradiation with 28 (●), 45 (■), and 100 (▲) kHz frequency. Open symbol (○) was for experiments without ultrasound irradiation for 1 wt% peptone solution.

4.3.2 膜再生における超音波効果

図4-3、4-4にも示したように、ファウリングにより膜の濾過特性は著しく低下する。このような溶質の不可逆的な析出により引き起こされる濾過特性の低下は、膜濾過システムにおいては、避けては通れない重要な問題である。そこで、次に、ファウリングを生じた膜を超音波を利用し再生できないかを検討した。すでに、図4-3で45kHzの結果を示したように、ファウリングが生じた後に、超音波を、ただ照射しただけでは透過性の改善は顕著になされなかった。図4-5に、ファウリング後に周波数28kHzと100kHzの超音波を照射した結果と45kHzの結果を比較して示す。周波数を変えてもあまり超音波の効果は見られない。

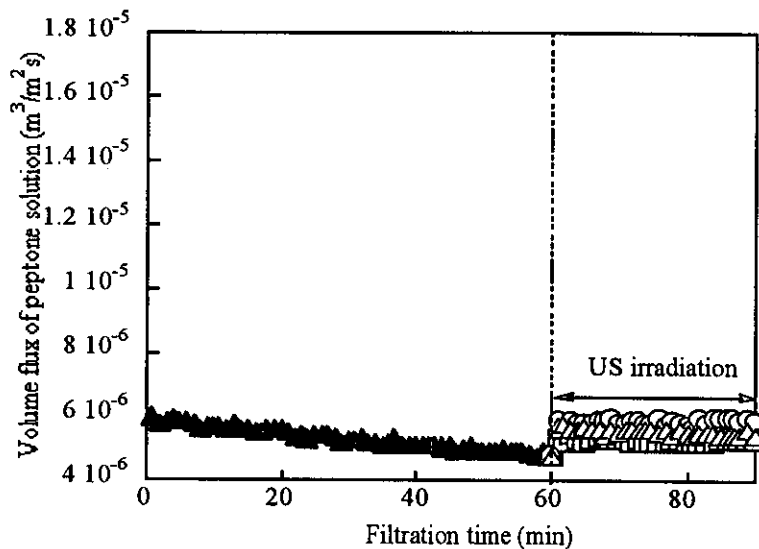


図4-5 Permeate flux of 1 wt% peptone solution measured without ultrasound irradiation for 60 min filtration and with 28 (□), 45 (○), and 100 (△) kHz ultrasound for following 30 min.

図4-6は、1 wt%ペプトン溶液を60分間濾過した後に、供給タンク内のペプトン溶液を水に変え、さらに引き続き30分間、超音波を照射しながら体積流束を測定した結果である。ペプトン溶液を水に変えて洗浄しただけでも体積流束の回復は観測されるが、水で30分洗浄してもこのPS膜が有する水の体積流束値($1.7 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ s}$)にはもどらず、水洗浄だけでは膜再生はできないことがわかる。

一方、この水洗浄の過程で超音波を照射すると、きわめて効率よく、短時間で膜特性が回復した(Water washing with US (図4-6))。ここで得られた再生後の水の体積流束は、ほぼ初期値と同じであり、洗浄が大変効果的に行われていることがわかる。また、この過程では、発信周波数の依存性は見られなかった。このように、超音波と水洗浄を併用した操作により、水洗浄だけではもとに戻らなかった膜特性が、完全に水の体積流束値と同じになり、膜再生が可能であることが示された。

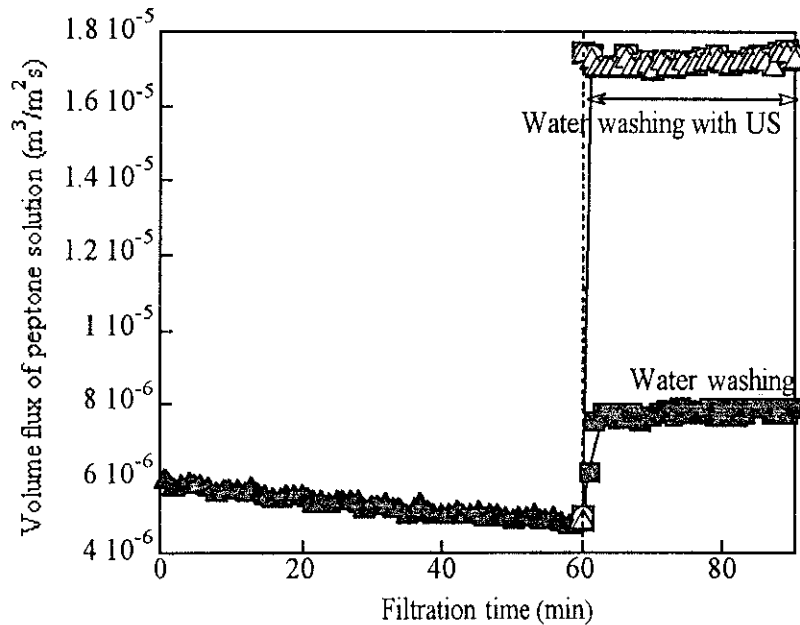


図 4-6 Permeate flux of 1 wt% peptone solution measured without ultrasound irradiation for 60 min filtration and with 28 (□), 45 (○), and 100 (△) kHz ultrasound for following 30 min. The content of feed tank was replaced with water after 60 min peptone filtration and US was irradiated. The closed symbol (■) was for experiments without ultrasound for replaced water filtration.

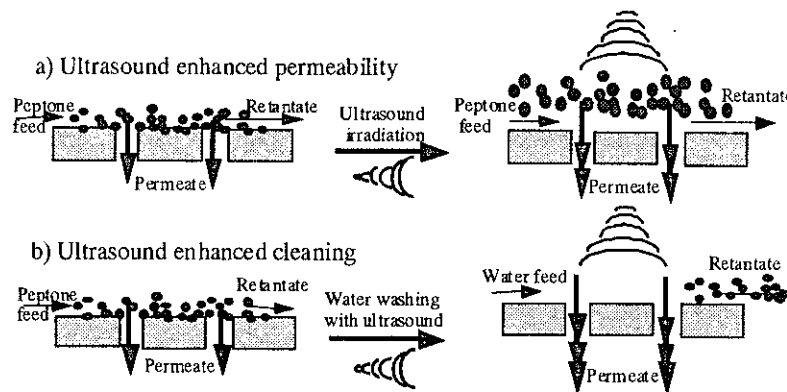


図 4-7 Schematic illustration of a) ultrasound enhanced permeability of fouled membrane and b) ultrasound enhanced cleaning for UF processes.

4.4 おわりに

PS UF膜を用いたペプトン溶液のクロスフロー濾過においてその濾過特性とファウリング後の水洗浄について超音波の効果を検討した。図 4-7 に超音波効果をまとめて示す。ペプトンを透過させることにより生じたファウリング状態に、超音波を照射することにより膜の透過性は増加し図 4-7 a)、また、濾過当初から超音波を照射することによりファウリングを防止できることがわかった。さらに、超音波照射と水洗浄を併用することによる顕著な洗浄促進効果も見いだされた図 4-7 b)。これにより目詰まりを起し膜性能が著しく低下した膜でも薬品等の洗浄による操作に頼ることなく超音波洗浄により簡単に再生できることが明らかになった。本研究の結果は、超音波処理の膜濾過プロセス応用への有用性

を強く示唆しており、これにより膜濾過機能が高度化され、今後、この技術を有する生活排水処理への膜技術のハイパフォーマンスな応用開発に期待できる。

参考文献

- 1) R.D.Noble and S.A. Stern, Membrane Separations Technology, Principles and Applications, Elsevier, The Netherland, p75 (1995).
- 2) 平成 8 年度膜処理法を導入した小型生活排水処理装置の実用化に関する研究報告、(財)日本環境整備教育センター、p35-41.
- 3) 平成9年度膜処理法を導入した小型生活排水処理装置の実用化に関する研究報告、(財)日本環境整備教育センター印刷中.
- 4) 小林高臣、柴喜君、藤井信行、膜シンポジウム98、p29、(1998).
- 5) X. Chai, T. Kobayashi and N. Fujii, J. Membrane Sci., 148, 129 (1998).
- 6) X. Chai, T. Kobayashi and N. Fujii, , Separation and Purification Techn., 15、 139-146 (1999).

第5章 ARモデルを用いた膜分離活性汚泥法の

膜目詰まり過程の予測手法の開発

5.1 はじめに

膜分離活性汚泥法は処理水質が良好である反面、膜が目詰まりを起こすため、薬品による膜の洗浄が必要となる。その際、膜の目詰まり過程を予測することができれば、膜洗浄の時期をあらかじめ予測し、効果的な運転をすることが可能になる。しかし、活性汚泥法のように不確定な要素が多いものであると、式にすべてのシステムを組み込むのは不可能である。一方、時系列解析の分野では時系列データを数値の並びとしてとらえ、物理的根拠を無視した数学モデルというものがある。この手法であると各々の複雑に関係している要因について、考慮する必要が無いため、容易に予測を行う事ができる。本章では数学モデルの代表的なものであるARモデルを用いたろ過抵抗の上昇の予測を試みた。

5.2 ARモデルの概要

ある時系列データの現在値 Z_t が N 期前の値とランダムショック V_t の線形関数で表すことができるとき、この時系列データは N 階の自己回帰過程に支配されているという。式では以下のように示される。これは自らの過去値の回帰モデルになっていることからこの名がある。

$$x_t = \sum_{i=1}^N a_i x_{t-i} + v_t \quad (1)$$

ここで a_i は自己回帰パラメータであり、 N 期前の値が変化したときの X_t への影響をあらわしている。これは推定すべきパラメータである。ランダムショック V_t は誤差項であり、本研究では平均値0、標準偏差 σ のガウス白色雑音となる。また、 V_t と X_{t-1} は互いに独立であると仮定されている。すなわち

$$\begin{aligned} E(v_t) &= 0 \\ E(v_t, v_s) &= \begin{cases} \sigma^2 & t = s \\ 0 & t \neq s \end{cases} \\ E(v_t, x_{t-1}) &= 0 \end{aligned}$$

となる。

ここで、時系列データの動きを支配しているモデルを同定するには、まずその時系列データの主要な要素をフィルタによって取り出さなければならない。次にこれらの要素の特徴から適切なモデルを構築するという作業が必要となってくる。

5.3 カルマンフィルタへの適用

ARモデルを用いて予測を行う場合、もっとも重要な作業は自己回帰パラメータを推定する事である。本研究においてはARモデルのパラメータ推定にカルマンフィルタをもちいる。

実際の物理現象は、入力系、構造系、観測系等のすべてにノイズが含まれており、我々の得られるデータは確率的に支配された同一環境下のデータ群の中の一つのサンプルデータとして取り扱うのが適切であると考えられ、この表現方法が確率システムに基づく表現法である。線形確率システムは以下の状態方程式(2)と、観測方程式(3)で表現される。雑音ベクトルは平均値0のガウス白色雑音である。

$$x_{t+1} = F_t \cdot x_t + G_t \cdot w_t \quad (2)$$

$$Y_{t+1} = H_t \cdot x_t + K_t \cdot v_t \quad (3)$$

ここに X_t :状態ベクトル Y_t :観測ベクトル W_t :システム雑音 V_t :観測雑音 H_t :観測行列 G_t K_t :駆動行列である。

同定問題をカルマンフィルタで定式化するためには対象を状態方程式と観測方程式に表現する必要がある。

状態量にAR係数をとると状態方程式は以下のようになる。

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{t+1} \\ Y_t \\ Y_{t-1} \\ Y_{t-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_t \\ Y_{t-1} \\ Y_{t-2} \\ Y_{t-3} \end{bmatrix} + w_t \quad (4)$$

観測量はARモデルにもとづいて以下のように表される。

$$Y_t = a_1 \cdot Y_{t-1} + a_2 \cdot Y_{t-2} + \dots + a_4 \cdot Y_{t-4} + v_t \quad (5)$$

(5) 式をマトリクス表示にすると以下のようになる。

$$Y_t = \begin{pmatrix} Y_{t-1} & Y_{t-2} & Y_{t-3} & Y_{t-4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{pmatrix} + v_t \quad (6)$$

(4)、(6)式をカルマンフィルタのアルゴリズムに当てはめることにより、観測データ X_t に追尾したAR係数を逐次求めることができる。そこで求められたパラメータを用いて1step先を求める場合は(7)式による。

$$\hat{Y}_{t+1} = a_1 \cdot Y_t + a_2 \cdot Y_{t-1} + \dots + a_3 \cdot Y_{t-3} + v_t \quad (7)$$

5.4 計算方法

膜洗浄のように急激な値の変化があると、ARモデルは過去の値の自己回帰モデルなの

で、そのまま計算を続けてしまうと、その後の予測の精度を落とすことになる。そこで以下の手順により洗浄前の値を調整してから自己回帰パラメータを算出した。そのフローチャートを図5-1に示す。

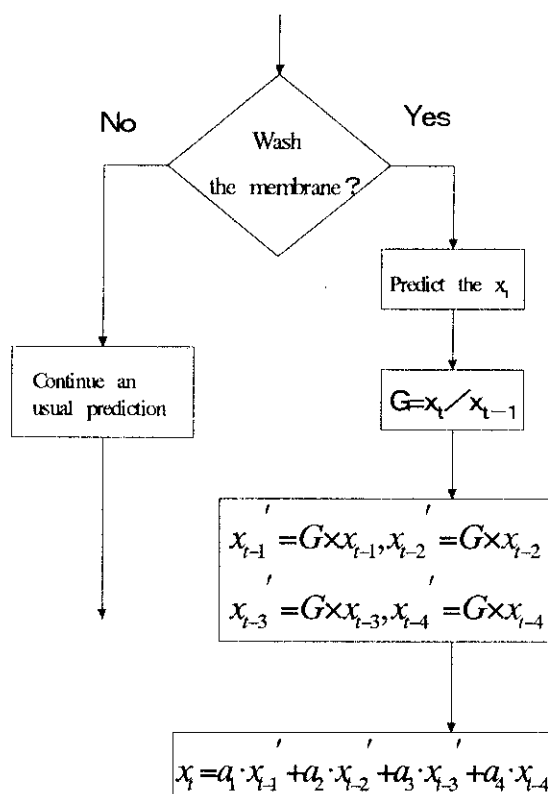


図5-1 Flow chart of prediction of filtration resistance.

膜洗浄を行うときは、算出した推定値は膜洗浄を行わなかったときの推定値なのでこの値を用いて洗浄後の観測値との減少率を(8)式で算出する。

$$G(\text{減少率}) = x_t / x_{t-1} \quad (8)$$

洗浄前の値に減少率を乗じ、調整後の値とする。これらの調整を行った値を観測値として用いて自己回帰パラメータを算出し、洗浄後の推定値とする。

ARパラメータの初期値はすべて0とし、ARモデルの次数は4次とした。ろ過抵抗の標準偏差は $1 \times 10^{12}(\text{m}^{-1})$ として計算を行った。予測に用いる実験値は、前項で用いた植田らによる実験1)のものと工藤らによる実験2)とする。植田らによる実験は使用している膜はMF中空糸膜で、TOC容積負荷は $0.9(\text{g/L/day})$ 、膜洗浄は30、46、72日目に行われている。工藤らによる実験の使用している膜はMF平膜で、TOC容積負荷は $1.5(\text{g/L/day})$ とし、膜洗浄は16、29、53、67、86、102日目に行われている。

また、ろ過抵抗の対数をとったものについても予測を行った。対数をとった理由は値の急激な変化を緩やかなものとし、予測値の突出を防ぐ為である。

5.5 短期予測の計算結果及び考察

5.5.1 中空糸膜を用いた実験の予測

図5-2に植田らの行ったろ過抵抗の実験値をサンプルとして1ステップ(2日)先の予測を行った結果を示す。さらに、その際に同定されたARパラメータを図5-3に示す。図5-2において30日目付近で予測値が大きくなってしまっている。これは観測量の上昇に対してAR係数が過大に計算されてしまっているためであることが図5-3のパラメータ値の大きさよりわかる。理由としてはそれまでは低い値を推移していたろ過抵抗が、突然上昇したためであると思われる。急激な剥離や曝気の状態の変化などによるろ過抵抗の上下動については、1期遅れるような傾向を見せている。これは次の予測値を求めるのに過去の予測値を用いているため、過去の値が上昇傾向を示していると、次の予測値も上昇してしまうためである。実験値が豊富にあり、AR次数を大きくすることができれば、このような誤差は小さくなると思われる。ARパラメータはある一定の値に収束する傾向が見られる。

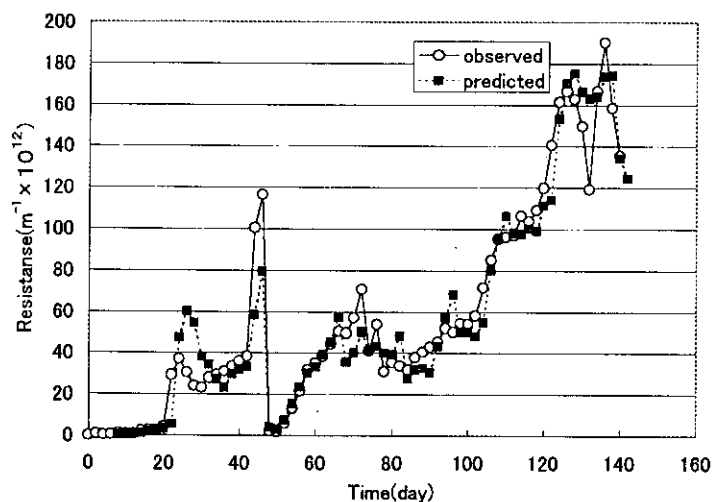


図5-2 Prediction of filtration resistance(Hollowfiber)(1step foraward).

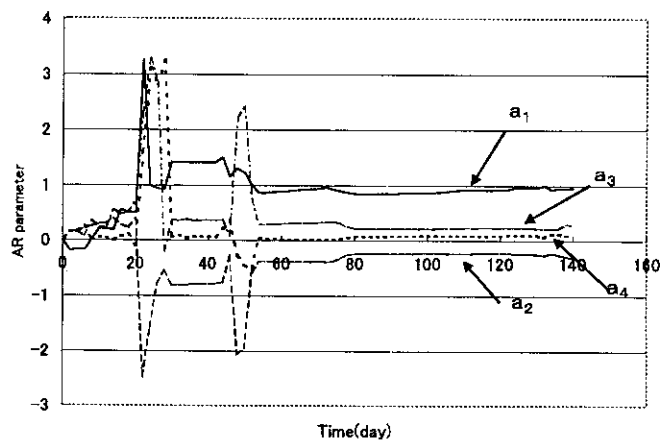


図5-3 Variation of AR parameter.