

振動型膜分離装置による高濃縮操作

High concentration operation procedure using Vibratory Shear Enhanced Processing Membrane Filtration machine



(技)研究開発部第3研究室
谷田 克義
Katsuyoshi Tanida
高田 一貴
Kazutaka Takata

振動型膜分離装置は独自の振動機構により高濃縮操作が可能であるが、操作条件やスラリーの物性によって、時として膜モジュール内の流路の閉塞が起こる。そこで適切な操作条件を見出すために、操作圧力とケーキの発生の関係、および濃縮液の膜面流速と膜モジュール内の流路の閉塞の関係の検討を行った。操作圧力を限界透過流束に達する圧力以上に上昇させると、膜表面で溶質がケーキ化するために有効膜面積が減少し、圧力の上昇とともに透過流速が低下することが分かった。しかしながら、ケーキが発生する圧力は従来のクロスフロー方式と比較して高圧力であり、限界透過流束以下で操作を行うことにより、ケーキの発生を防止しながら、クロスフロー方式と比較して、高透過流束での操作が可能である。また溶液の粘性係数の上昇とともに膜面流速も上昇させる必要があることが分かった。しかしながら、その流速は0.2 m/s程度と小さく、1～3 m/sの膜面流速を必要とする従来のクロスフロー方式と比較して1オーダー低い流速であり、振動型膜分離装置では高濃縮操作を高効率に行えることが確認された。

It is possible to conduct high concentration operation using Vibratory Shear Enhanced Processing by its original vibration mechanism, but the flow path in the membrane module is sometimes plugged by solids, which depend on the operating condition such as shear rate and properties of slurry. Therefore, both the relationship between operating condition such as pressure and cake formation, and the relationship between fluid velocity on the membrane surface and plugging of slurry in the membrane module were investigated in order to find out a proper operating condition. When operating pressure increases over the pressure where permeate flux reaches limiting flux, the effective membrane area decreases because solids become cake on the membrane surface, and permeate flux decreases against pressure due to the restriction of gel layer. However, the pressure, where cake generates, is high compared with that of conventional cross-flow system, and therefore it is possible not only to prevent cake formation on the membrane surface but also to operate with high permeate flux compared with the conventional cross-flow system if the operation is conducted under the pressure where permeate flux reaches limiting flux. Also it is found that increasing of velocity on the membrane surface with viscosity of solution is necessary. However, maximum velocity is approximately 0.2 m/s for VSEP, and the value is small enough compared with that of conventional cross-flow system where 1～3 m/s of cross-flow velocity is usually used. Thus, it was confirmed that concentrating operation to high concentration becomes very efficiency using VSEP.

Key Words :

膜 分 離
振 動
せん断速度
高濃縮操作
ス ラ ッ ジ
チキソトロピー

Membrane separation (filtration)
Vibration
Shear rate
High concentration
Sludge
Thixotropy

まえがき

膜分離法にて濃縮操作を行う際、膜表面への溶質の物質移動が起こり、膜表面の溶質濃度がバルクの濃度よりも高くなる濃度分極現象が起こる。¹⁾ 溶質が固形物の場合、濃度分極により膜面の固形物濃度がある濃度以上に上昇すると、ケーキやゲルが発生・成長する。従来のクロスフロー方式の膜分離装置では、できるだけ低流量で濃縮液の膜面流速を大きくするために、膜モジュール内の濃縮液の流路は非常に狭くなっている。このため、ケーキやゲルが発生すると直ちに流路が閉塞する。また、従来のクロスフロー方式では膜表面の流体に与えることのできるせん断力が小さく、濃度分極現象を低減することができない（膜表面の固形物濃度を低くすることができない）ため、ケーキやゲルが発生する限界のバルク濃度や圧力が低く、高濃度までの濃縮を行うことができない。

振動型膜分離装置は独自の振動機構^{2,3)}により膜表面に従来のクロスフロー方式と比較して大きなせん断力を発生させることができるため、濃度分極をクロスフロー方式と比較して低減することができ、高濃縮操作が可能である。¹⁾ また膜表面のせん断力は、膜の振動により発生しているため、せん断力を発生させるために濃縮液を高速で流通させる必要がなく低流量での処理が可能であり、ワンパスでの高濃縮操作が可能となっている。しかしながら、振動型膜分離装置でも濃度分極を完全に防止することはできないため、従来のクロスフロー方式よりも値は高いが、ある濃度、圧力以上で濃縮を行うとケーキやゲルが発生する。また高速で濃縮液を流通させる必要はないが、溶液の濃度あるいは粘性係数に対して一定以上の流量を確保していないと、高濃度の溶液が膜モジュール内の一定の場所に滞留しケーキやゲルが発生する。そのため、操作条件を最適化していないと、振動型膜分離装置でも膜モジュール閉塞の危険性がある。

膜分離装置で高濃縮を行う際、膜モジュールの流

路を閉塞させない条件を見出し、適切な操作条件で濃縮操作を行う必要がある。本稿では、振動型膜分離装置を使用して高濃縮操作を行う際に、膜モジュール内の流路の閉塞を起こさずに効率よく高濃縮操作を行うための条件の探索を目的として、圧力、膜面流速の操作条件の最適値について、浄水スラッジをサンプルとして検討を行った結果を報告する。

1. 閉塞防止運転方法について

振動型膜分離装置の膜モジュール内で固形物による閉塞を防止する方法としては、次の二つの方法が考えられる。

- 1) モーター負荷による制御
- 2) 濃縮液流量による制御

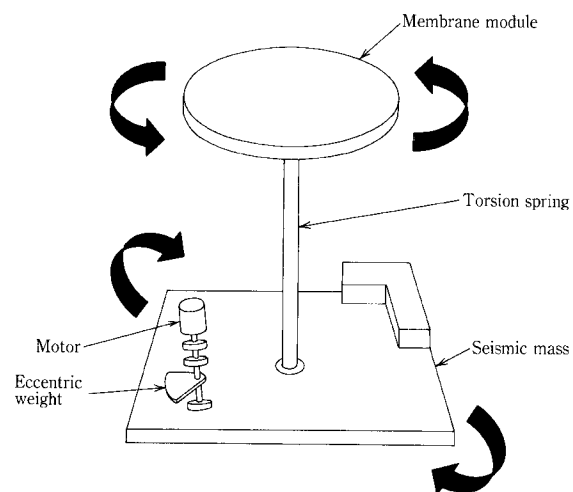
次に、それぞれの方法について述べる。

- 1) モーター負荷による制御

振動型膜分離装置では第1図に示すような振動機構により膜を水平方向に振動させる。³⁾ この時、装置の共振時の固有振動数は次式で表される。

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k \left(\frac{1}{A} + \frac{1}{B} \right)} \quad (1)$$

ここで、 ν = 振動周波数 [Hz]、 A = サイズミックマスの慣性モーメント [kg/m^2]、 B = 膜モジュール



第1図 振動システムの模式図

Fig. 1 Schematic diagrams of vibration system

ルの慣性モーメント $[kg/m^2]$, k = トーションスプリングのバネ定数 $[Hz^2 \cdot m^2/kg]$ であり, バネ定数 k は トーションスプリングの材質と形状から決定される。

通常, 膜モジュール内で流路の閉塞が発生すると固形物の増加により膜モジュール重量が増加し, 膜モジュールの重量増加に伴い膜モジュールの慣性モーメントが増加する。第1式から分かるように, 膜モジュールの慣性モーメントが大きくなると共振周波数が低下するため, 膜モジュールの振幅が大きくなる。この時, モーターに流れる電流値が増加するため, モーターの負荷が上昇する。従って, 閉塞とモーターの負荷の関係を把握しておけば, 膜モジュール内に堆積しているスラリーの排出タイミングを特定できる。しかしこの方法では閉塞により膜モジュールの重量が増加する溶液, つまり固形物の比重が水よりも大きいものにしか適用できない。このため, ある種のラテックスや炭酸カルシウムのように比重が水よりも大きな固形物を含む溶液にしか適用できないため, 汎用性に欠ける。

2) 濃縮液流量による制御

膜モジュールの閉塞が発生すると, 膜モジュール内の流路が固形分の堆積により狭くなり, 流量が低下する, あるいは膜モジュール入り口と出口の圧力損失が大きくなる。従って, 濃縮液の出口流量, あるいは膜モジュールの圧力損失を監視しておき, あらかじめ決定しておいた閉塞を防止できる濃縮液流量を保つように制御を行うことにより膜モジュールの閉塞を防止できると考えられる。この方法では, あらかじめ閉塞と濃縮液流量の関係を溶液に依存しない一般的な形で把握しておけば, 実機で閉塞に関するデータを取る必要がなく1)の方法よりも安全かつ実用的である。よって, 膜モジュールの閉塞防止運転方法に関して, 本テストでは2)の方法についてのデータを測定した。

2. テスト方法

テストでは, 操作圧力とケーキ形成の関係, 濃縮液流量と膜モジュールの閉塞の関係について検討を行った。操作圧力とケーキ形成の関係については Series L を使用してテストを行った。また濃縮液流量と閉塞の関係については Series P, Series i を使用してテストを行った。次にそれぞれのテスト条件について述べる。

2.1 テストフロー

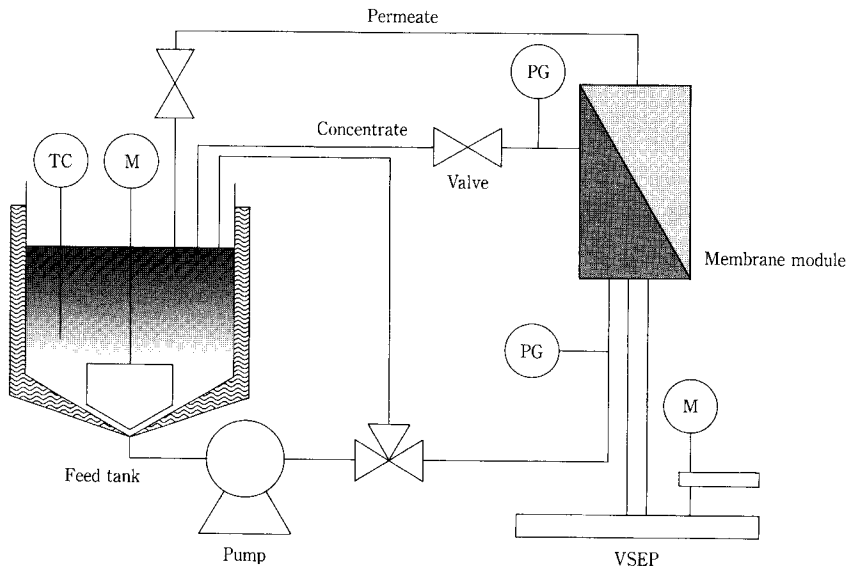
第2図に Series L, Series P でのテストフロー, 第3図に Series i でのテストフローを示す。第1表にテストで使用した Series L, Series P, Series i それぞれの装置の仕様を示す。

すべてのテストは透過液, 濃縮液ともにタンクに戻し循環させる全循環方式で行った。膜モジュール入口圧力及び入口流量はポンプ出口に設置した圧力調整弁で調整し, 出口圧力及び出口流量はポンプ出口に設置したボールバルブで調整を行った。第2図に示した Series L, Series P でのテストでは膜モジュール入口, 出口配管上に圧力計を設け, 圧力の測定を行った。また第3図に示した Series i でのテストでは透過液の流量が大きく, 透過液の圧力が無視できないため, 透過液の圧力の測定を行うために透過液配管上にも圧力計を設置した。Series L, Series P の操作圧力は膜モジュール入口と出口の平均値とし, Series i の操作圧力は膜モジュール入口と出口の平均値から透過液の圧力を引いた値とした。また, Series L, Series P でのテストでは, 透過液流量及び濃縮液流量はメスシリンダーに一定量の液体が溜まる時間を測定し流量を算出したが, Series i では透過液及び濃縮液配管上に流量計を設置し流量の測定を行った。また原液タンク内の原液の温度を一定に保つため, 原液タンクをウォータージャケットで保温しており, 原液タンク内の溶液の温度を測定し操作温度とした。

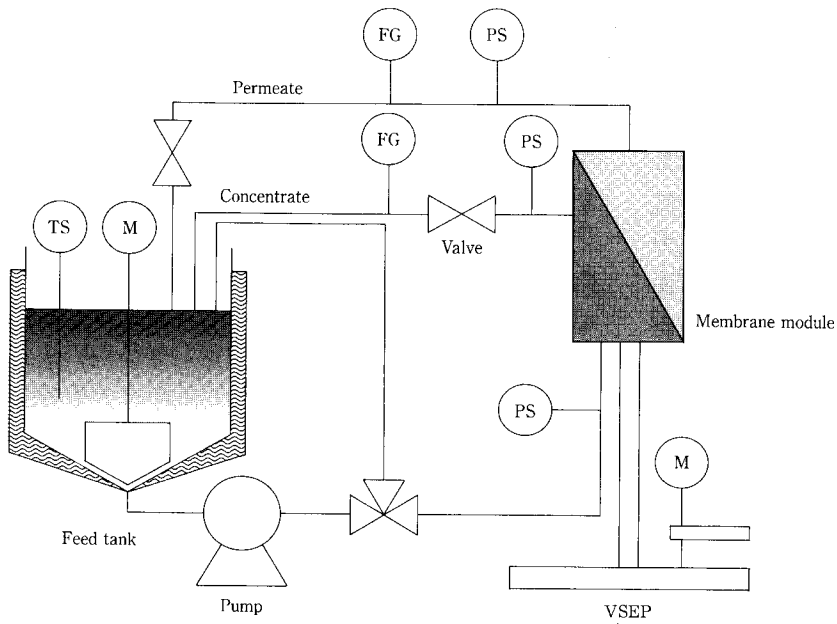
第1表 振動型膜分離装置の仕様

Table 1 Specifications of Vibratory Shear Enhanced Processing

VSEP	Membrane area [m ²]	Number of membranes	Vibration Motor [kW]	Pump capacity [m ³ /hr]	Tank [ℓ]
Series L	0.045	1 (0.045 m ²)	2.2	0.6	50
Series P	1.07	22 (0.049 m ²)	2.2	0.6	50
Series i	13.3	98 (0.136 m ²)	5.5	4	500



第2図 Series L, Series P テストフロー
 Fig. 2 Block flow diagrams for VSEP Series L and Series P test



第3図 Series i テストフロー
 Fig. 3 Block flow diagrams for VSEP Series i test

第2表 使用膜の仕様
 Table 2 Specifications of membranes

VSEP	Material/Backing	Membrane Class	Temperature [°C]	Pressure [MPa]	pH
Series L	PES/PE	UF2 000 MWCO	90	1.0	1~13
Series P	PES/PP	UF4 000 MWCO	90	1.0	1~14
Series i	PA/PS	UF8 000 MWCO	50	4.0	2~11

PES: Polyethersulfone, PE: Polyester, PP: Polypropylene, PA: Polyamide, PS: Polysulfone

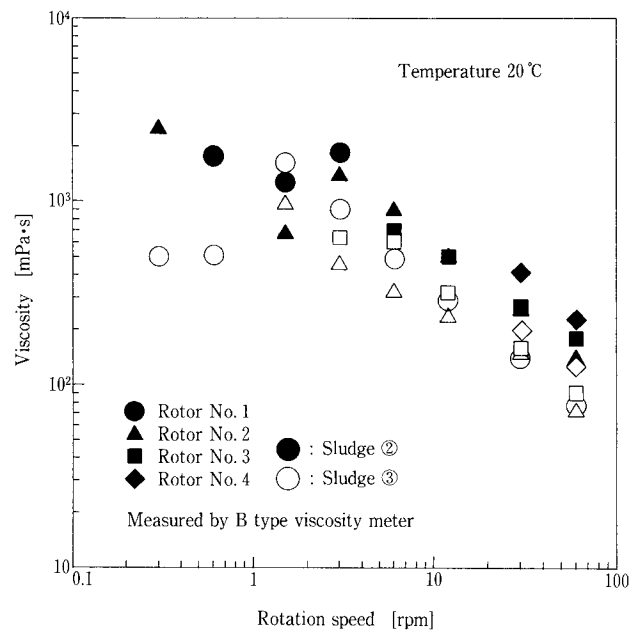
2.2 使用膜

テストで使用した膜の仕様を第2表に示す。本テストでは Series L, Series P, Series i ではそれぞれ異なる膜を使用した。それぞれのテストで異なる膜を使用したのは、本テストの目的を、最適膜の探索ではなく、ケーキを形成しない操作条件及び実機の膜モジュールが閉塞しない操作条件の探索としたためである。

2.3 サンプル

サンプルとして4種類の浄水スラッジを使用した。サンプルの性状を第3表に示す。操作圧力とケーキ形成の関係を測定した Series L でのテストでは、スラッジ①を使用した。濃縮液流量と膜モジュールの閉塞の関係を測定したテストでは、Series L/P でスラッジ②, ③を使用し、Series i でスラッジ④を使用した。

濃縮液流量と膜モジュールの閉塞の関係の検討については流量のみではなく、評価のパラメータとして溶液の粘性係数も測定した。粘性係数の測定はB型粘度計を使用して行った。第4図にスラッジ②及び③の粘性係数測定結果を示す。図の縦軸は粘性係数の対数、横軸はローター回転数の対数であり、図中の記号●, ▲, ■, ◆はそれぞれ、ローター No.1~4を表しており、黒抜きと白抜きはそれぞれスラッジ②と③を表している。ローター回転数が1 rpm以下の領域ではデータに多少ばらつきがあるが、スラッジの粘性係数の対数がローターの回転数の対数と比例しており、典型的なチキソトロピー性の傾向が見られた。チキソトロピー性とは高粘性の



第4図 粘性係数とB型粘度計のローター回転数の関係
Fig. 4 Relationship between viscosity and rotation speed of B type viscosity meter

溶液にせん断力を与えることにより見かけの粘性係数が低下する現象である。チキソトロピー性を有する溶液に対しては、溶液に与えるせん断力を一定にして粘性係数の比較を行う必要がある。従って、スラッジの粘性係数の評価には、ローター No.3, 12 rpm を基準条件とし、この条件で測定した値を使用した。また第5図にB型粘度計のローター No.3, 12 rpm で測定したスラッジ③及び④の粘性係数と濃度の関係を示す。図の縦軸は粘性係数の対数、横

第3表 スラッジの性状

Table 3 Properties of sludges

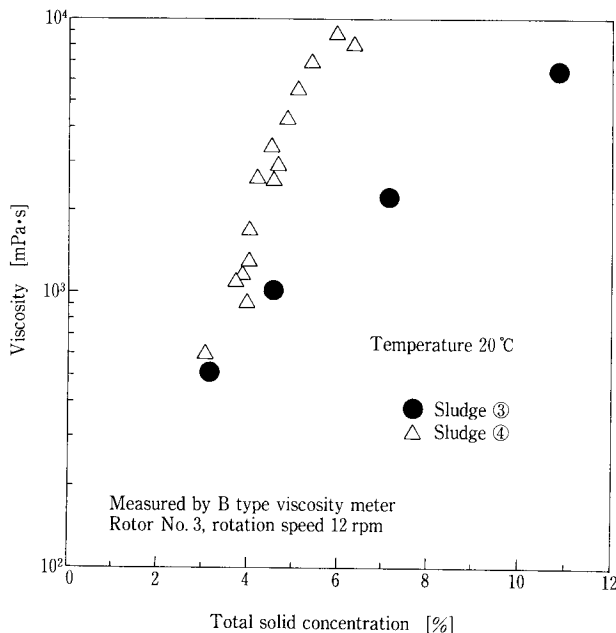
	Sludge ①	Sludge ②	Sludge ③	Sludge ④
pH	6.8	6.9	6.7	6.5
Suspended solids [mg/ℓ]	110 000	31 000	43 000	33 000
Electric conductivity [μS/cm]	440	420	530	350
Ignition loss [%/SS]	26.09	18.35	23.19	32.67
SiO ₂ [%/SS]	40.10	39.51	40.34	31.93
Al ₂ O ₃ [%/SS]	23.78	26.00	28.31	31.14
Fe ₂ O ₃ [%/SS]	4.83	7.01	5.31	3.89
MnO [%/SS]	0.26	0.13	0.29	0.16
Density of soil particle [kg/m ³]	2 352	2 449	2 431	2 340
Conglomerate (2~75 mm) [%]	0	0	0	0
Sand (75 μm~2 mm) [%]	2	0	0	4
Silt (5~75 μm) [%]	38	37	13	38
Clay (under 5 μm) [%]	60	63	87	58
Maximum Particle diameter [mm]	0.106	0.075	0.075	0.106

軸はスラッジの全固形分濃度であり、図中の記号●と△はそれぞれスラッジ③と④を表している。スラッジの粘性係数の対数値はスラッジの濃度と比例関係があり、また直線の傾きはスラッジにより大きく異なっている。またスラッジ濃度と粘性係数の関係は第3表に示したスラッジの性状からは予測することができない。このため、閉塞の評価を濃度で行うと汎用性のあるデータが得られないと考えられた。よって閉塞の評価はスラッジの濃度ではなく、スラッジの粘性係数で行うのが妥当であると考えられる。

2.4 テスト条件及び方法

1) 操作圧力とケーキ形成の関係

操作圧力とケーキ形成の関係の測定は、スラッジ①を使用し、Series Lにて行った。第4表にテ



第5図 粘性係数とスラッジ濃度の関係
Fig. 5 Relationship between viscosity and concentration of sludge

第4表 テスト条件
Table 4 Test conditions

VSEP	Amplitude [mm]	Operating pressure [MPa]	Operating temperature [°C]	Concentration flow rate [m ³ /hr]	Inlet concentration [%]	Outlet concentration [%]
Series L	19	0.29~0.50	25	0.33	10.7	10.7
Series P	22	0.43	25	0.12 ~0.36	2.92~6.28	3.56~7.33
Series i	22	0.35~0.60	40	0.189~1.14	1.96~5.01	3.05~9.79

ト条件を示す。テストは圧力以外の操作条件を一定として、操作圧力を0.29~0.50 MPaまで変え、圧力と透過流束の関係を測定した。また、膜表面に発生するせん断力がSeries P, Series iと同じ値になるように、振幅を19 mmとした。

2) 濃縮液流量と膜モジュールの閉塞の関係

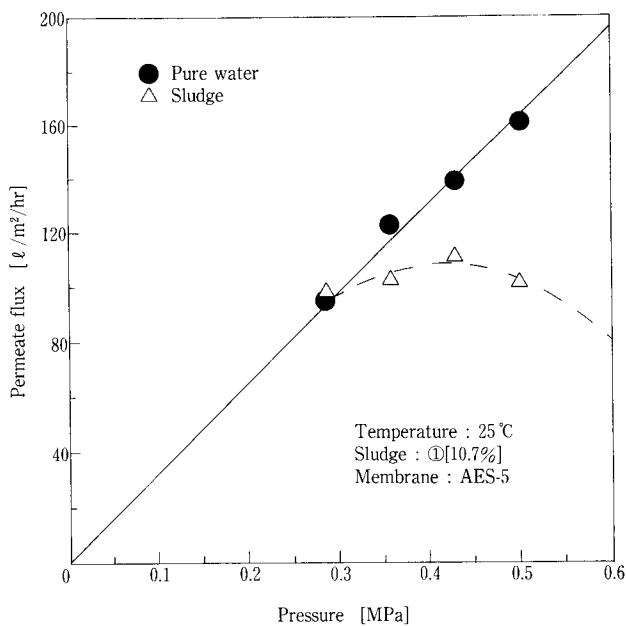
濃縮液流量と膜モジュールの閉塞の関係の測定は、Series Pでスラッジ②, ③を使用し、Series iでスラッジ④を使用した。第4表にテスト条件を示す。Series Pのテストではスラッジの種類に関係なく、振幅、操作圧力、操作温度を一定にして、スラッジ濃度、濃縮液流量を変化させて測定を行った。Series iのテストでは振幅、操作温度を一定にして、操作圧力、スラッジ濃度、濃縮液流量、スラッジ濃度を変化させた。Series iで操作圧力を変化させたのは、濃縮液濃度を濃縮液流量に依存させるのみではなく、圧力も変えて広範囲の濃縮液濃度での測定を行うためである。

3. テスト結果

3.1 操作圧力とケーキ形成の関係

スラッジ①を使用して、Series Lで操作圧力と透過流束の関係を測定した結果を第6図に示す。比較のために純水の透過流束も同時に示した。図の縦軸は透過流束、横軸は操作圧力であり、図中の記号●と△はそれぞれ、純水の透過流束とスラッジ①の透過流束を表している。

図から分かるように、純水の透過流束は圧力に対して直線的に増加する。これに対して、スラッジの透過流束は、低圧では純水と同じ値を示しているが、圧力が上昇すると、スラッジの透過流束の増加の傾きは純水透過流束の増加の傾きと比較して小さくなり、圧力0.5 MPa付近では圧力の上昇により透過流束が減少している。透過流束が減少した後、膜を取り出して膜表面を観察したところ、写真1に示す



第6図 操作圧力と透過流束の関係
Fig. 6 Relationship between operating pressure and permeate flux

ように膜表面に厚さ0.5 mmほどの固形分のケーキが発生していた。写真1の白い部分が膜表面であり、黒い部分がケーキ化したスラッジが膜表面に張り付いている部分である。これらの結果から、次のように考察することができる。

通常、溶質を含む流体を膜分離する際、低圧では透過流束は純水の場合と同じであるが、高圧になると純水透過流束よりも小さくなり、一定の透過流束に達するとそれ以上圧力を上昇させても透過流束は大きくならない。この透過流束は限界透過流束⁴⁾と呼ばれる一般的な傾向であり、第6図から本テストでは0.45 MPa付近で限界透過流束に達している。限界透過流束は濃度分極現象により、膜表面の溶質濃度がバルクでの溶質濃度よりも高くなるために起こる。しかしながら、第6図に示した測定結果では、0.45 MPa付近で限界透過流束に達した後、0.5 MPa以上で透過流束が減少している。これは、透過流束が限界透過流束に達する圧力以上に圧力が上昇したために、濃度分極現象により膜表面の溶質が流動可能な濃度以上に上昇し、写真1に示すように膜表面の溶質がケーキを形成して膜表面に付着し、有効膜面積が減少したためと考えられる。この状態でも過を継続するとケーキが成長して膜モジュールの流路が閉塞すると考えられる。ケーキが発生する条件は溶質の性質により異なり、サンプル毎にテストにより確認する必要がある。振動型膜分離装置では、膜表面のせん断力が大きく、濃度分極を低減し

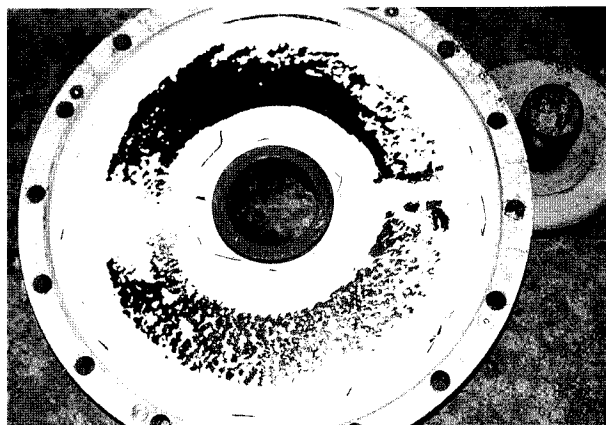


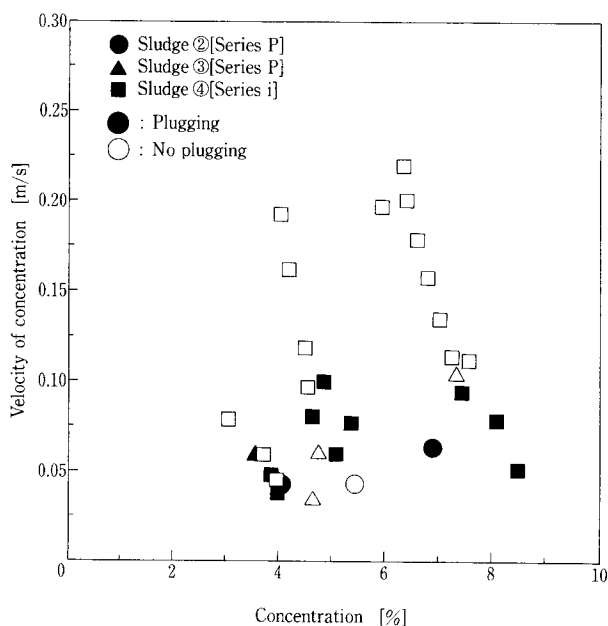
写真1 膜表面でのケーキ化
Photo.1 Cake formation on the membrane surface

ているため、ケーキが発生する条件は従来のクロスフロー方式と比較して高圧、高濃度であると考えられるが、高濃縮を行う場合には、ケーキの発生しない操作条件を正確につかみ、ケーキの発生しない条件で運転を行う必要がある。

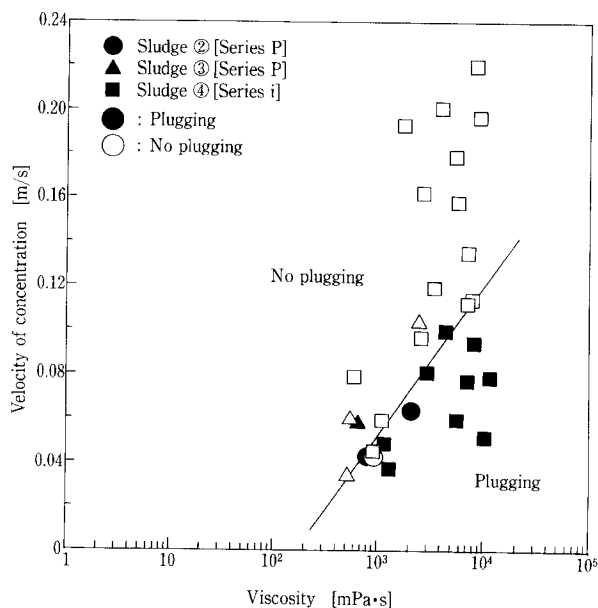
3.2 濃縮液流速と膜モジュールの閉塞の関係

濃縮液の膜面流速と膜モジュールの閉塞の関係の測定結果を第7, 8図に示す。なお、テストでは濃縮液の流量を測定したが、Series PとSeries iでは流路面積が異なるため、データを一般化するために膜面流速を算出しデータを評価した。第7, 8図の縦軸は濃縮液の膜表面での流速であり、第7図の横軸はスラッジの濃度、第8図の横軸はスラッジの粘性係数である。ここで粘性係数の測定はB型粘度計を使用して、ローターNo.3, 12 rpmで行った。また両図中の●, ▲, ■はそれぞれ、スラッジ②, ③ (Series Pにてテスト), ④ (Series iにてテスト)を表しており、黒抜きは膜モジュールの閉塞が見られた条件、白抜きは膜モジュールの閉塞が見られなかった条件である。ここで、閉塞の判定は、濃縮液の流出が停止した、あるいは濃縮液流量が急激に低下した場合を閉塞と見なし、その他の場合は閉塞なしとした。

第7図から、スラッジの濃度に対して膜モジュールが閉塞しない流速を評価しようとする時、閉塞が発生した場合と発生しなかった場合の条件の境界がはっきりしない。これは1.3でも述べたように、溶質の性状によって濃度と流動性(粘性係数)の関係が異なり、溶質の濃度では流動性を正確に評価できないためと考えられる。このことから、溶質の濃度では一般的に使用可能な膜面流速と閉塞の関係を評価で



第7図 濃縮液流速と閉塞の関係 (スラッジ濃度)
 Fig. 7 Relationship between velocity of concentration and plugging (concentration of sludge)



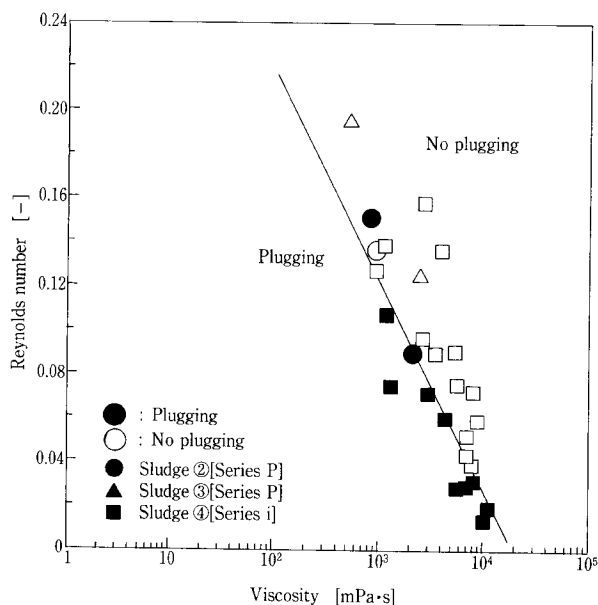
第8図 濃縮液流速と閉塞の関係 (粘性係数)
 Fig. 8 Relationship between velocity of concentration and plugging (viscosity)

きるデータとして、本テスト結果を整理することは困難であり、閉塞が発生しない条件の評価は溶液の流動性を表す粘性係数を使用して行うのが妥当であると考えられる。

第8図に示すように、粘性係数でデータを整理することにより、閉塞が発生した場合としない場合の条件の境界が、濃度で整理した場合よりもはっきりしている。このことから、閉塞が発生しない条件の評価は濃度ではなく粘性係数で行うのが妥当であることが確認できた。また閉塞が発生する条件としない条件の境界は粘性係数の上昇とともに高流速側に移動しており、粘性係数が増えると濃縮液の膜面流速を上昇させる必要があることが示されている。これは粘性係数が増えると溶液の流動性が低下するため、より大きな流動エネルギーを流体に与える必要があることを示している。しかしながら、流速は大きくても0.2 m/s程度であり、従来のクロスフロー方式では1~3 m/sの流速で濃縮液を流す必要があることと比較するとワンオーダー小さい値である。

第9図に Reynolds 数 (以下、Re 数) の計算結果を、粘性係数の対数に対してプロットして示す。Re 数は流れの状態を表す無次元数であり、次式で定義される。

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} \quad (2)$$



第9図 Reynolds 数と閉塞の関係
 Fig. 9 Relationship between Reynolds number and plugging

ここで、 u = 膜表面の平均流速 [m/s], d = 代表長さ [m], ρ = 液密度 [kg/m^3], μ = 粘性係数 [$\text{Pa} \cdot \text{s}$] である。本テストでは Re 数の計算に必要なスラッジの粘性係数を静置した状態で測定した。これは、スラッジがチキソトロピー性を有するため、膜モジュール内では見かけの粘性係数が低下するが、膜モジュール内の見かけの粘性係数を測定することができないためである。

第9図に示すように、本実験条件ではRe数は小さい値となっている。これは前述したように、スラッジを静置して測定した大きな粘性係数を使用してRe数を計算したためである。第9図から分かるように、閉塞が発生する条件としない条件の境界は、流速の場合と同様に明確に現れている。また粘性係数が上昇するのに対して、閉塞を防止できるRe数は減少していることが分かる。また閉塞を防止できるRe数が粘性係数に対して減少していることから、粘性係数の上昇に対して膜面流速を大きくする割合は小さくても良いことが分かる。

前述の結果から、振動型膜分離装置を使用して高濃縮操作を行う場合は、濃縮液の膜面流速と濃縮液の粘性係数の関係、あるいはRe数と粘性係数の関係で見られた境界よりも大きい流速あるいは大きいRe数になるような条件で濃縮液を流すことにより閉塞を防止することができると考えられる。この条件は粘性係数で評価しているため、溶質が変わっても適用できると考えられる。また従来のクロスフロー方式の場合、1~3m/sで濃縮液を流通させても振動型膜分離装置で可能な高濃度までの濃縮は困難である。これに対して、振動型膜分離装置を使用することにより、従来のクロスフロー方式と比較して、低流速で高効率な高濃縮操作を行うことができる。

む す び

振動型膜分離装置を使用して高濃縮操作を行う際に、膜モジュール内の流路の閉塞を起こさずに効率よく高濃縮操作を行うための条件の探索を目的として、操作圧力、濃縮液の膜面流速の最適値の検討を、浄水スラッジを使用して行った。その結果以下の知見を得た。

- (1) 振動型膜分離装置を使用して高濃度までの濃縮を行う際、限界透過流束以上に圧力を上昇させると膜表面の溶質がケーキとなって有効膜面積が減少し、圧力を上昇させると透過流束が減少する。

その状態でろ過を継続するとケーキが成長して膜モジュール内の流路の閉塞が起こる。そのため、テストを行い、ケーキが発生しない操作条件をつかむ必要がある。

- (2) (1)で得られた操作条件で濃縮を行っても、濃縮液の流速が小さければ、膜モジュール内の流路の閉塞は発生する。閉塞を防止するためには、濃縮液の膜表面での流速を濃縮液の粘性係数の上昇に合わせて大きくする必要がある。しかしながら、粘性係数の上昇の割合と比較して流速の上昇の割合は小さくても良い。また高粘性係数の流体でも濃縮液の膜面流速は0.2m/s程度で良く、1~3m/sの膜表面流速を必要とする従来のクロスフロー方式と比較して、低流速でのろ過が可能である。

高濃縮操作を行う際は、振動型膜分離装置を使用しても閉塞の危険性を完全に無くすることはできないが、本稿で示した条件を守って運転を行うことにより、閉塞を防止しながら効率的な高濃縮操作を行うことができる。

<記号の説明>

- A : サイズミックマスの慣性モーメント [kg/m²]
 B : 膜モジュールの慣性モーメント [kg/m²]
 d : 代表長さ [m]
 k : トーションスプリングのバネ定数 [m²/kg]
 u : 膜表面の平均流速 [m/s]
 μ : 粘性係数 [Pa · s]
 ν : 振動周波数 [Hz]
 ρ : 液密度 [kg/m³]

[参考文献]

- 1) 谷田克義ほか：神鋼パンテック技報，Vol.43，No.1，(1999)，p.40~58
- 2) B. Culkin : U.S. Patent, No.4, 952, 317 (1990)
- 3) B. Culkin : U.S. Patent, No.5, 014, 564 (1991)
- 4) 小西嘉雄ほか：神鋼パンテック技報，Vol.42，No.2，(1999)，p.28.

連絡先

谷田克義	技術開発本部 研究開発部 第3研究室	高田一貴 (工学博士)	技術開発本部 研究開発部 第3研究室 室長
	TEL 078-992-6525		TEL 078-992-6525
	FAX 078-992-6504		FAX 078-992-6504
	E-mail k.tanida@pantec.co.jp		E-mail k.takada@pantec.co.jp