

# 振動型膜分離装置のラテックスろ過特性とスケールアップ

Characteristics of Latex Filtration and Scale Up Study by Vibratory Shear Enhanced Process



(技)研究開発部  
 小西嘉雄  
 Yoshio Konishi  
 竹尾由重  
 Yoshishige Takeo  
 谷田克義  
 Katsuyoshi Tanida  
 高田一貴  
 Kazutaka Takata

振動型膜分離装置 VSEP のラテックスろ過特性を透過流束に及ぼす濃度分極モデルとせん断速度の観点から検討を行い、振動により生じる膜面せん断速度がラテックスろ過に有効であることを実証するとともに、透過流束はせん断速度で相関できることがわかった。

そして、透過流束のせん断速度補正により VSEP 室内テスト機テストデータからパイロット機及び実機への性能予測を行った結果、テスト機データを用いて実機性能を実用上許容しうる誤差範囲内で予測できることが判った。

Application of filtration of latex by Vibratory Shear Enhanced Process (VSEP) was investigated using both concentration polarization model and the effect of shear rate on flux. The results show that the shear rate on the surface of membrane by vibration produces high flux and the flux has correlated by shear rate.

Scale-up study was conducted by the relation between flux and shear rate those were obtained from Series L (Laboratory scale). Testing using Series i (industrial scale) was conducted to verify the scale-up procedure. The result shows that performance of Series i is estimated by using Series L data within an acceptable level of deviation.

## Key Words :

膜	分	離	Membrane separation
振		動	Vibration
せん断速度			Shear rate
スケールアップ			Scale up
ラテックス			Latex

## まえがき

膜分離技術のラテックス分野への適用では、重合タンク洗浄廃液からのラテックス回収及び廃液の減容化や濃縮行程などが検討されているが、クロスフロー式に代表される従来型膜分離装置では膜表面に生じる濃度分極やラテックス粒子の膜面への付着な

どの問題で、高濃縮操作はもとより、経済的な透過流束での処理が技術的に困難である。

一般的に膜面のせん断速度を大きくすると、透過流束が増加する<sup>1)</sup>。従来型のクロスフロー式であるスパイラル、チューブラー、ホローファイバー型の膜分離装置では膜表面のせん断速度を増加させるため

に循環流量を増加させる方法をとるが、この方法では送液に要するポンプエネルギーが大きくなる割には、膜表面におけるせん断速度の増加は、速度境界層の存在によりそれほど見込めない。

当社は、高せん断速度で膜分離を行うことができる振動型膜分離装置 VSEP™ (VSEP=Vibratory Shear Enhanced Processing, 製造元: 米国 NEW LOGIC INTERNATIONAL INC.) を保有しており、ラテックス等の乳化物を高透過流束で高濃度領域まで操作が可能である。従来型の膜分離装置では技術的に困難であったラテックス系への適用に大きな期待が寄せられている。

本稿では、VSEP 各機種種の装置説明と振動型膜分離装置の駆動基礎理論 (共振理論) 及び膜面に発生するせん断速度の定量化と濃度分極特性に及ぼすせん断速度の影響を分かり易く説明することを試みた。これら理論を用いて、VSEP のラテックスろ

過における高透過流束・高濃縮の要因を明らかにし、その結果を基に実機のスケールアップ (性能予測) の検討を試みた。

## 1. VSEP の概要

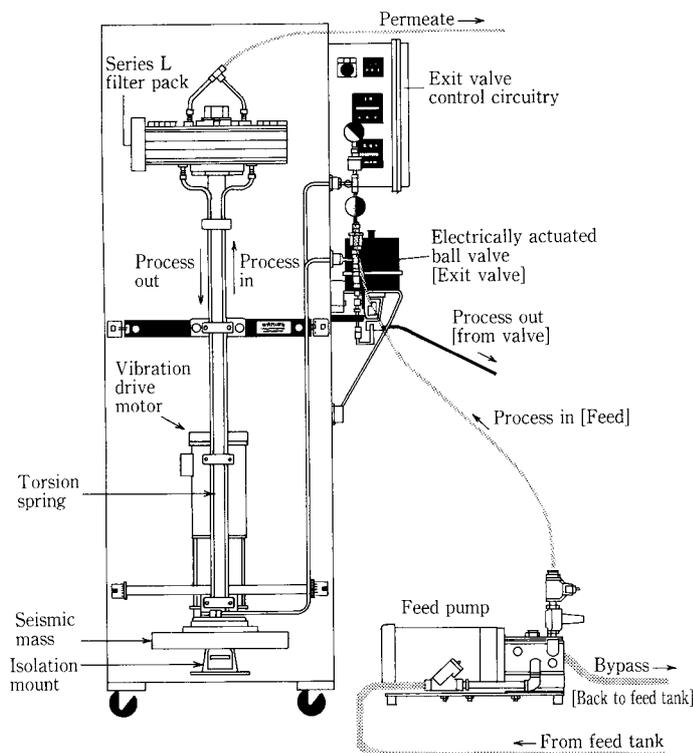
### 1.1 VSEP 仕様

VSEP 仕様を第 1 表に示し、室内テスト機である Series L (以下 Series L)、パイロット機である Series P (以下 Series P) 及び実機 Series i (以下 Series i) の概観図を第 1 図に示す。また、各シリーズの膜モジュール内構造を第 2 図に示す。

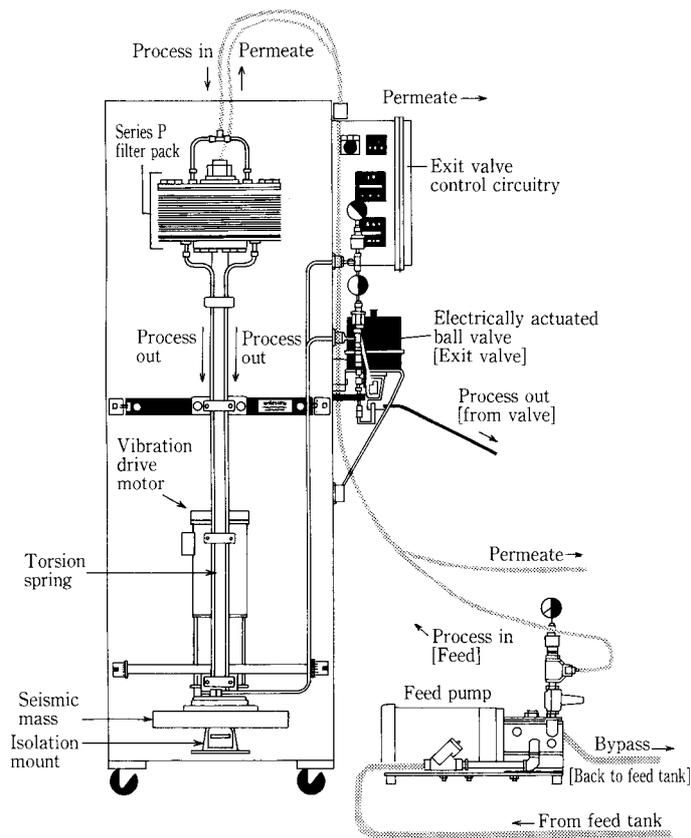
Series L と P, Series i の構造上の大きな違いは、Series L の膜モジュールは単膜構造であるのに対し、P, Series i では膜トレイを数十～数百段積層させた棚段構造となっている点である。また P, Series i の膜モジュールには、仕切板が挿入されており Series L とフローパターンが異なる。第 3 図に Series P, Series i のフローパターン模式図を示

第 1 表 本テストで使用した各 VSEP 仕様  
Table 1 Specification of VSEP for tests

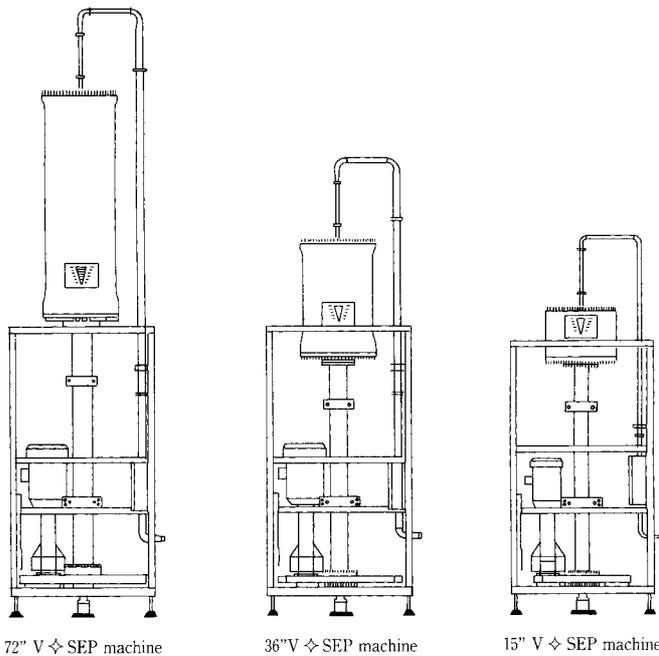
Type	Membrane area [m <sup>2</sup> ]	Width×Depth×Height [m]	Outer diameter of membrane [m]	Inner diameter of membrane [m]
Series L	0.045	0.64×0.8×1.9	0.26	0.10
Series P	1.53	0.64×0.8×1.9	0.28	0.13
Series I/150	13.5	1.17×1.4×3.4	0.47	0.19



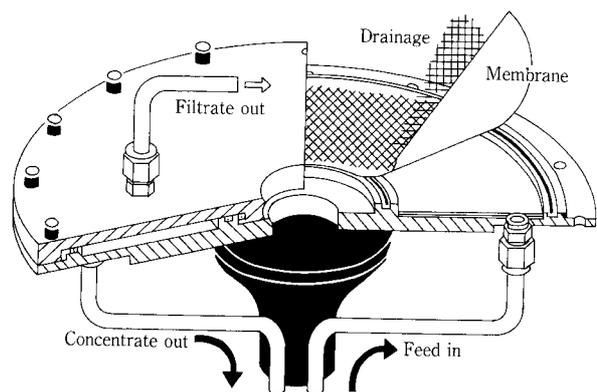
第 1 図 (その 1) VSEP Series L 概観図  
Fig. 1-1 Schematic diagram of VSEP Series L



第1図(その2) VSEP Series P 概観図  
 Fig. 1-2 Schematic diagram of VSEP Series P



第1図(その3) VSEP Series i 概観図  
 Fig. 1-3 Schematic diagram of VSEP Series i



第2図(その1) VSEP Series Lの膜モジュールフローパターン図

Fig. 2-1 Schematic diagram of membrane module for VSEP Series L

す。仕切板で区切られる段により被処理液の成分濃度が異なる。すなわち、上段では低濃度の被処理液のろ過を行い、下段に行くほど高濃度液のろ過を行うフローとなっている。

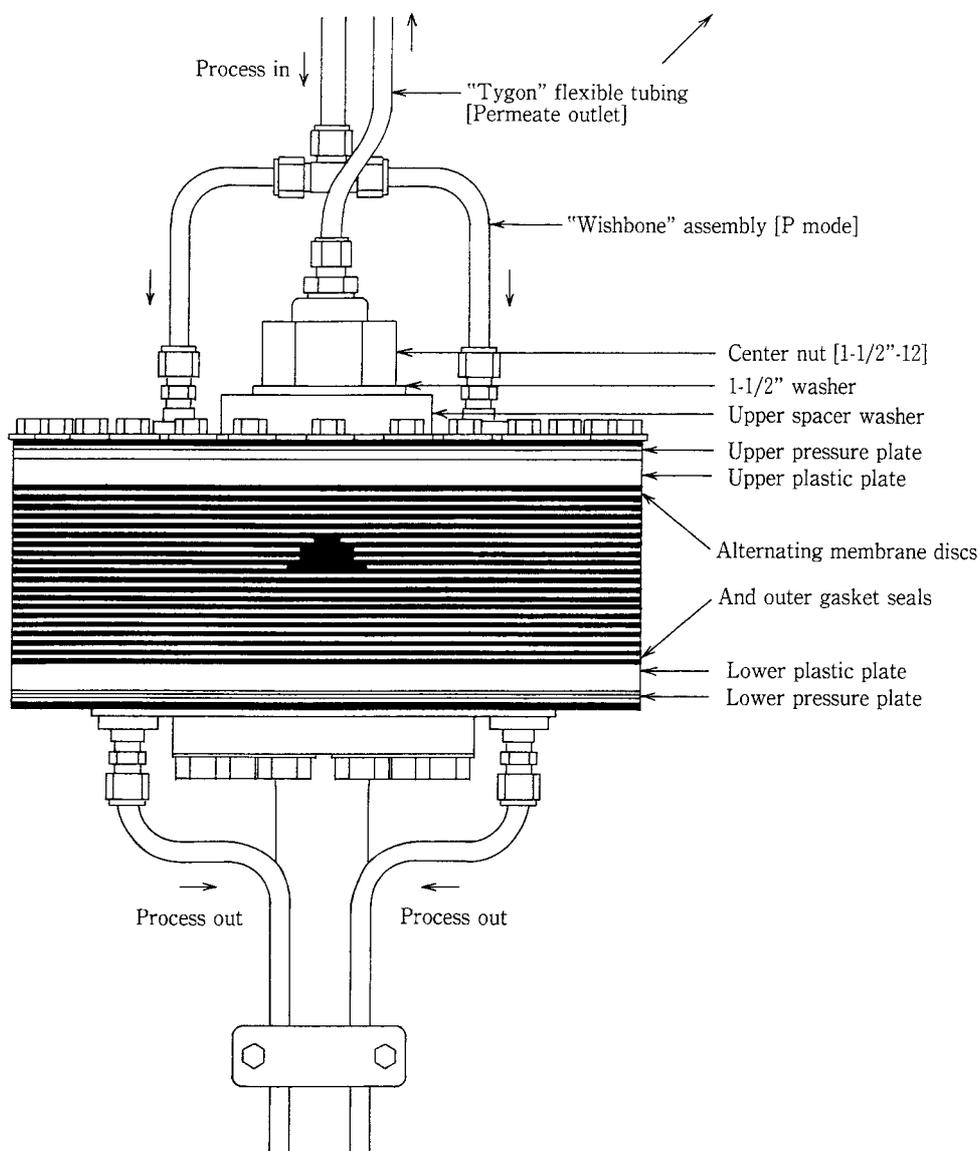
膜は当社が主に米国、独から供給を受けている各種 MF 膜（精密ろ過膜）、UF 膜（限外ろ過膜）、NF 膜（ナノフィルター）そして RO 膜（逆浸透膜）合わせて約50種類の膜が装着可能である。

## 1. 2 VSEP 各シリーズのテスト目的

### (1) Series L (Series L)

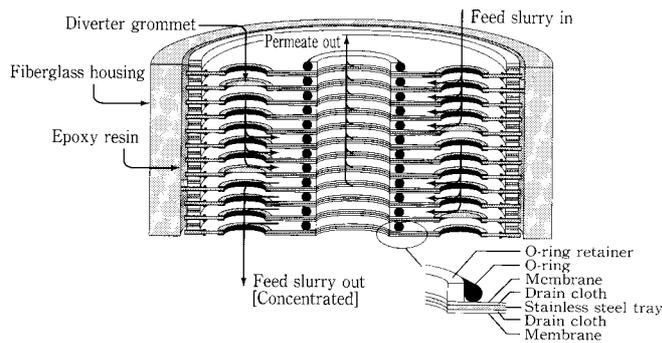
Series L は室内テスト用に開発された振動型膜分離装置であり、Series L でテストを行う目的は、

- ①膜選定
- ②最適操作条件把握、である。



第2図(その2) VSEP Series Pの膜モジュールフローパターン図

Fig. 2-2 Schematic diagram of membrane module for VSEP Series P



第2図(その3) VSEP Series iの膜モジュールフローパターン図

Fig. 2-3 Schematic diagram of membrane module for VSEP Series i

膜選定テストでは、膜材質、分画性能、処理能力とその安定性、そして膜洗浄などを考慮し最適膜を選定する。また、最適操作条件把握テストでは、最適な膜間差圧 (Trans Membrane Pressure 以下TMP)、濃縮率、操作温度そして膜洗浄条件の調査を行う。

(2) Series P (Series P)

Series Pはワンパスの濃縮率を上げることが可能としたもので、膜面への流体負荷をSeries iにより近づけた構造となっている。

シリーズPでテストを行う目的は、

- ①ワンパス操作で高濃縮を行っても安定した膜分離が行えることの確認
- ②透過流束の長期推移を現地のサイドストリームで確認すること
- ③実機の膜モジュールのデザイン設計に必要な最適供給液量や洗浄のインターバルといったデータ収集

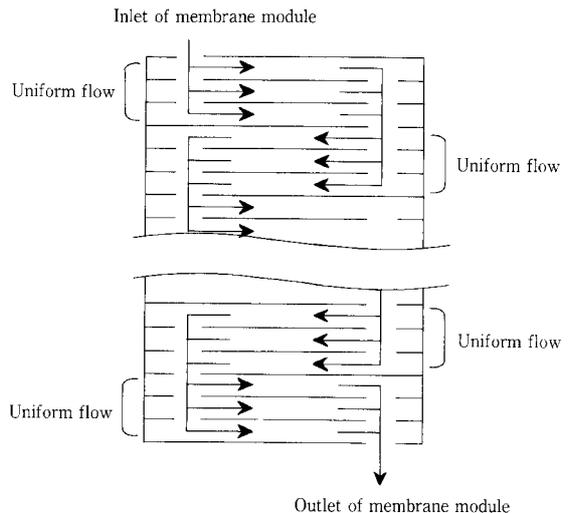
である。

1. 3 VSEPの固有振動数と共振現象

第4図に振動型膜分離装置VSEPの振動システムの模式図を示す。VSEPの主な構成は膜モジュール、トーションスプリング、サイズミックマスである。振動機構を考える場合、膜モジュール及びサイズミックマスはおもりに相当し、トーションスプリングは膜モジュールとサイズミックマスを接続するバネに相当する。

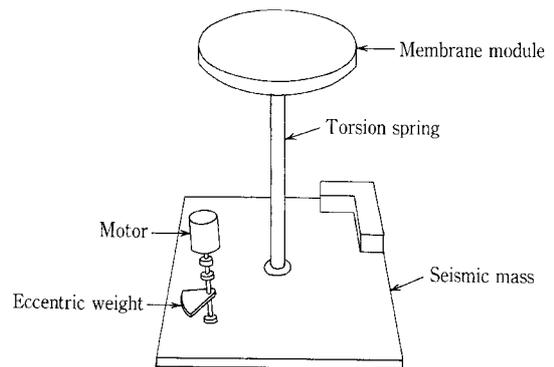
サイズミックマスが時計方向に回転した時、膜モジュールは反時計方向に回転し、サイズミックマスが反時計方向に回転した時、膜モジュールは時計方向に回転する。この運動は共振運動である。

第1式はVSEPシステムの共振時の固有振動数



第3図 膜モジュール内の流体の流れの模式図

Fig. 3 Schematic diagram of flow inside membrane module



第4図 振動システムの模式図

Fig. 4 Schematic diagram of vibration system

を表す式である。

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

ここで、 $\nu$  = 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<sup>2</sup>]

$B$  = 膜モジュールの慣性モーメント [kg/m<sup>2</sup>]

$k$  = バネ定数

バネ定数はトーシヨンスプリングの材質と形状で決定される。

Series L, Series P, Series i では固有振動数が異なる。その理由は、Series L と Series P ではどちらも同じサイズのサイズミックマスとトーシヨンスプリングが使用されているが、膜モジュールの重さが Series L より Series P の方が重くなっているため、Series P の慣性モーメントは Series L よりも大きくなり、その結果、第 1 式の平方根中の値が小さくなるため振動周波数は小さくなることによる。また、Series L と Series i で固有振動数が異なるのは、Series L と Series i ではサイズミックマス及び膜モジュールの重さ及びトーシヨンスプリングの形状（直径、長さ）が大幅に異なることに起因する。

## 2. 理 論

### 2.1 振動型膜分離装置の膜面せん断速度

振動型膜分離装置の最大の特長である膜表面でのせん断速度を求めることは、ラテックスろ過に及ぼす振動の影響を定量的に評価する上で必要である。膜表面におけるせん断速度の計算方法及び計算結果を次に示す。

次元解析より、せん断速度は第 2 式で与えられる。

$$\begin{matrix} (\text{せん断速度}) & = & (\text{代表速度}) / (\text{代表長さ}) \\ [1/s] & & [m/s] \quad [m] \end{matrix} \quad (2)$$

#### 1) 代表速度

膜表面での流体の代表速度は、振動速度と一致すると仮定すれば第 3 式で表される。

$$\text{代表速度} = 2 \omega \quad P = 4 \pi f P \quad (3)$$

ここで、 $\omega$  : 角振動数 [rad/s]

$P$  : 半径方向任意点での振幅 [m]

$f$  : 振動周波数 [Hz] である。

#### 2) 代表長さ

速度境界層付近では次式に示すように粘性力と慣性力が等しくなる。

$$\mu \cdot \partial^2 u / \partial y^2 = \rho \cdot u \cdot \partial u / \partial x \quad (4)$$

ここで、 $x$  : 流れ方向

$y$  : 鉛直方向（膜面に鉛直）

$\mu$  : 粘度 [Pa·s]

$u$  :  $x$  方向速度 [m/s]

$\rho$  : 密度 [kg/m<sup>3</sup>] である。

第 4 式をそれぞれの代表値でスケール表示に置き換えると第 5 式で表され、第 5 式を速度境界層厚さの式で表すと第 6 式となる。

$$\mu \cdot U / \delta^2 = \rho \cdot U \cdot U / l \quad (5)$$

ここで、 $\delta$  : 速度境界層厚さ [m]

$U$  : 速度スケール [m/s]

$l$  : 長さスケール [m] である。

$$\delta = [(\mu/\rho) \cdot (l/U)]^{0.5} \quad (6)$$

ここで往復振動における  $l/U$  は周期に相当するので、 $1/U = 1/f$  と置くことができる。従って、境界層厚さは第 7 式となる。

$$\delta = (\mu/\rho f)^{0.5} \quad (7)$$

#### 3) せん断速度

(3), (7) 式を(2)式に代入してせん断速度を求めると次式になる。

$$\text{せん断速度} = \frac{4\pi f^{1.5} \rho^{0.5}}{\mu^{0.5}} P \quad (8)$$

第 2 表 VSEP のせん断速度と平均せん断速度  
Table 2 Shear rate and Average shear rate of VSEP

	Amplitude [cm]	Frequency [Hz]	Outer shear rate [1/s]	Inner shear rate [1/s]	Average shear rate [1/s]
Series L	2.22	59.0	103 052	40 423	76 215
Series P	2.22	47.9	79 153	36 660	70 112
Series I	2.22	51.0	88 411	34 357	68 660

VSEPでは、内半径と外半径の長さは大きく違っており、また Series L, Series P, Series i で固有振動数も違っている。そのため、膜面全体でせん断速度を面積積分した積分値を膜面積で除した平均せん断速度を膜モジュールのせん断速度とすることにした。

平均せん断速度の導出式を第9式に示す。

$$S_{AVE} = \frac{S_{total}}{A} = \frac{8\pi^2 f^{1.5} \rho^{0.5}}{\mu^{0.5}} \frac{P_2}{r_2} \frac{r_2^3 - r_1^3}{3A} \quad (9)$$

ここで、 $S_{AVE}$  : 平均せん断速度 [1/s]  
 $A$  : 1枚の膜面積 [m<sup>2</sup>]  
 $r_1, r_2$  : 膜モジュールの内半径と外半径 [m]  
 $P_1, P_2$  :  $r_1, r_2$  での振幅 [m]

平均せん断速度の一例として、振幅2.2 cmでの平均せん断速度の計算結果を第2表に示す。

## 2.2 限界透過流束及び濃度分極・ゲル層形成モデルの説明

### 2.2.1 限界透過流束

UF, NF, RO膜での純水透過流束はTMPに比例して増加するが、ラテックス液などを膜分離する場合、第5図に示すように透過流束がTMPに対し比例しなくなり、やがて透過流束は一定値に漸近する。一般的にこのように一定値に漸近する透過流束は限界透過流束と呼ばれている。限界透過流束は原液濃度が高くなるほど小さくなる。

### 2.2.2 濃度分極モデル

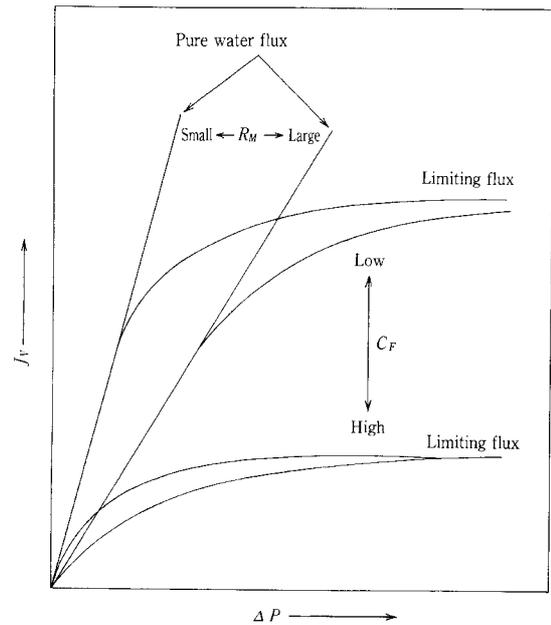
濃度分極の概念図を第6図に示す。濃度分極とは膜表面近傍に存在するある流体中の成分濃度 (cm) が、膜表面近傍と膜表面から遠く離れた場所で濃度が大きく異なっている状態であることを意味する。

膜分離の場合、膜表面近傍への成分供給速度が透過速度と同じである場合濃度分極は起こらないが、透過速度が供給速度より大きい場合、膜表面での濃度は供給流体中の濃度より高くなり、第6図のような濃度分布となる。このような濃度分極を生じると物質の移動速度が減少し、透過流束低下を招く要因となる。

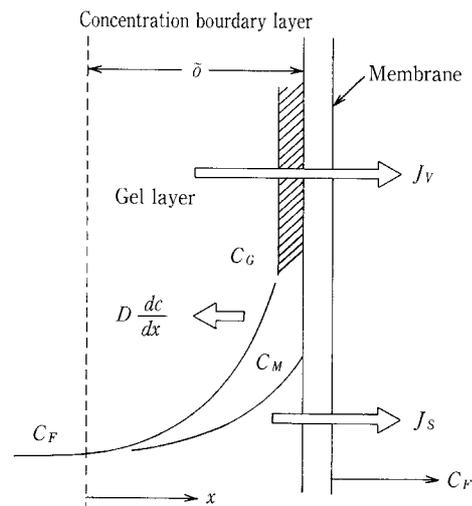
定常状態の濃度分極層内では第10式で表される物質収支が成り立つ。

$$J_v C = D(dC/dx) + J_s \quad (10)$$

ここで、 $D$  : 拡散係数 [m<sup>2</sup>/s]



第5図 透過流束の圧力依存性と限界透過流束  
 Fig. 5 Relation between Flux, transmembrane pressure, and limiting flux



第6図 濃度分極概念図  
 Fig. 6 Schematic diagram of concentration polarization

$J_v$  : 体積透過流束 [m/s]  
 $J_s$  : 溶質の透過流束 [m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·s)] で  
 $J_s = J_v C$  と  $C_p$  表される。

$x=0, x=\delta$  (濃度境界層の厚み) では、境界条件  $C=C_F, C=C_M$  (ここで、 $C_F$  : 膜から遠く離れた場所での成分濃度、 $C_M$  : 膜表面近傍での成分濃度) を用いて第10式を積分すると第3式で表される濃度分極式を得る。

$$J_V = k \ln \left\{ \frac{(C_M - C_P)}{(C_F - C_P)} \right\} \quad (11)$$

$k$ は次式で表される濃度分極層内の物質移動係数 [m/sec] である。

$$k = D/\delta \quad (12)$$

$C_P=0$ の場合(11)式は次式で表される。

$$J_V = k \ln(C_M/C_F) \quad (13)$$

前述の理論及び第7図に示すTMPと透過流束の関係図を用いて、濾過特性に及ぼすせん断速度の影響を説明する。

テスト条件は、

- ①被処理液：ラテックス 1wt%
- ②操作温度：298 [K]
- ③膜：分画分子量 8000, ポリアミド製 UF 膜
- ④操作圧力：207, 414, 621, 827 [kPa]
- ⑤せん断速度：クロスフローのみ (4000 [1/s])  
振動有り, 65000, 43000 [1/s]

である。

第7図より、せん断速度が増加するほど、ラテックス透過流束がTMPに比例する値が増加する。これは、高いせん断速度は膜表面でのラテックス粒子の排除速度を速めるため、 $C_F \approx C_M$ となり、濃度分極の影響を受けにくくなったからである。

また、濃度分極現象が起こっている状態（透過流束が純水透過流束より小さい状態）でもせん断速度が高いと、その透過流束も高くなっている。その理由は、振動により生じる高いせん断速度は、(7)式より速度境界層厚みを薄くする効果がある。速度境界層厚みが薄くなれば、濃度境界層厚み $\delta$ も薄くなり、(12)式の物質移動係数 $k$ が大きくなる結果、(11)式で表される透過流束が高くなるからである。

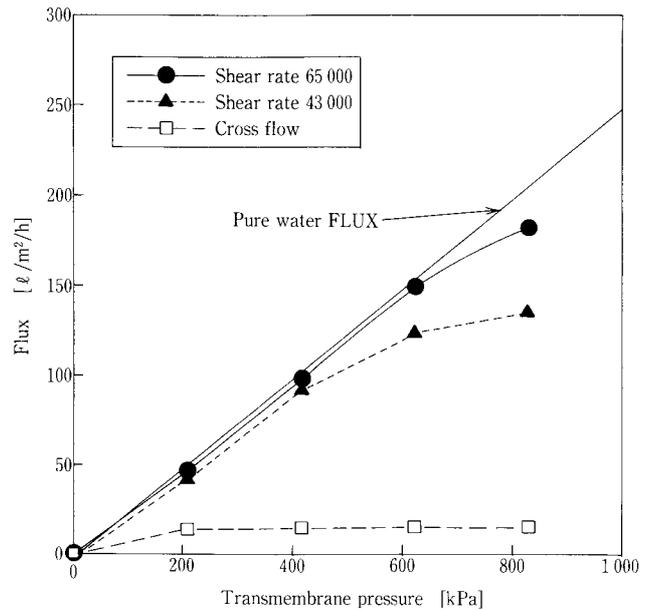
### 3. VSEPのラテックス濾過における適用性 (Series Lによるラテックスろ過テスト)

#### 3.1 テスト内容及びテスト条件

VSEPのラテックスろ過への適用性を検討するためSeries Lを用いて、ラテックス濃度、TMP、せん断速度（振幅及び振動周波数）をパラメータとしたテストを行った。

テストでは、

テスト1：透過流束に及ぼすTMPの影響、



第7図 TMPと透過流束の関係  
Fig. 7 Relation between TMP and Flux

テスト2：透過流束に及ぼす膜面流束の影響、  
テスト3：透過流束に及ぼすせん断速度の影響、  
を調べることを目的に行った。

テスト条件を第3表に示す。また第8図に示す全循環フローでラテックス濾過テストを行い、透過流束を測定した。

#### 3.2 テスト結果

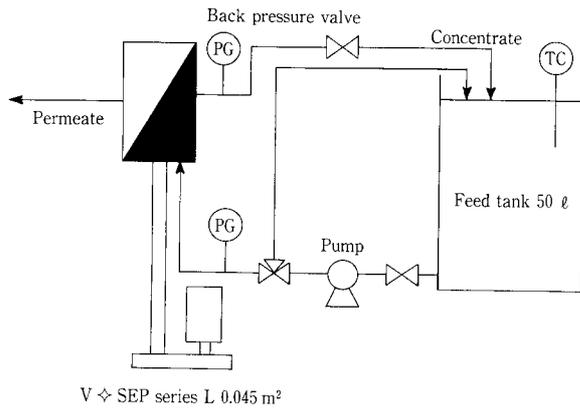
##### (1) 透過流束に及ぼすTMPの関係 (テスト1)

TMPと透過流束の関係を第9図に示す。1.0wt%の場合620 kPaまでは透過流束はTMPに比例し増加して行くが、970 kPa辺りから透過流束はTMPに対し比例して増加しなくなる。このことより、この条件では、970 kPa辺りから濃度分極モデルでろ過が行われていることがわかる。7.0 wt%では280 kPa付近で透過流束はTMPに対し比例関係がなくなり、970 kPaではほぼ限界透過流束となっている。20.0, 35.0 wt%で濃度分極が起らないTMPは280 kPa以下であり、このテストでのTMPでは濃度分極状態でろ過が行われていることになる。35.0 wt%でTMP 1300~2000 kPaで透過流束が減少傾向を示しているが、この原因は高濃度時にTMPを高くしすぎたため、ラテックスが無理な脱水状態となり凝集化（このラテックスの場合クリーム状になった）を起こし、ろ過抵抗が増加したため

第3表 L型テスト条件

Table 3 Test conditions of Series L

	Test 1	Test 2	Test 3
Membrane	UF-membrane : MWCO8000, Polyamide		
Temperature [K]	298 (Constant)		
Average shear rate [1/s]	87 000 (Constant)	87 000 (Constant)	No vibration: 4000 Vibration: 87 000, 76 000, 65 000, 4 300
Concentration of latex [wt%]	1.0, 7.0, 20.0, 35.0	30.0 (Constant)	1.0, 7.0, 20.0, 35.0
TMP [kPa] × 10 <sup>-2</sup>	2.8, 6.2, 9.7, 13.0, 16.5, 20.0	970 (Constant)	970 (Constant)
Fluid velocity on the surface of membrane [m/s]	0.44	0.06, 0.22, 0.44	0.44



第8図 VSEP Series L テストフロー

Fig. 8 Block flow diagrams of VSEP Series L test

である。

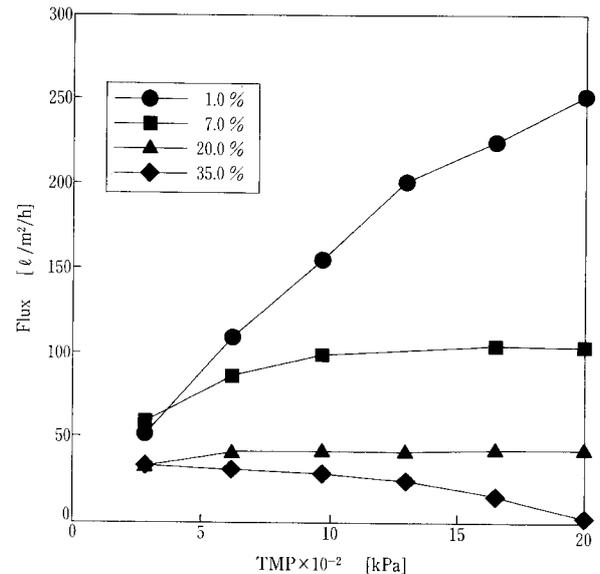
以後のテストでは TMP を 970 kPa とした。その理由は、①高濃度では、TMP 1 300 kPa 以上であるとラテックスが凝集化を起こす、②TMP 970 kPa では、各濃度とも濃度分極モデルのろ過状態であるため、ろ過に及ぼせん断速度の影響が顕著に現れることが考えられるからである。

(2) 透過流束に及ぼす膜面流速の影響 (テスト2)

膜面流速と透過流束の関係を第10図に示す。これより透過流束は膜面流速に依存せず一定であることが判った。これは、クロスフローによる膜面最速流速 0.44 [m/s] の条件でも膜表面のせん断速度は約 4 000 [1/s] 程度であり、振動により発生する平均せん断速度 87 000 [1/s] と比較すれば一桁違っているため、透過流束に及ぼす影響は小さかったものと考えられる。

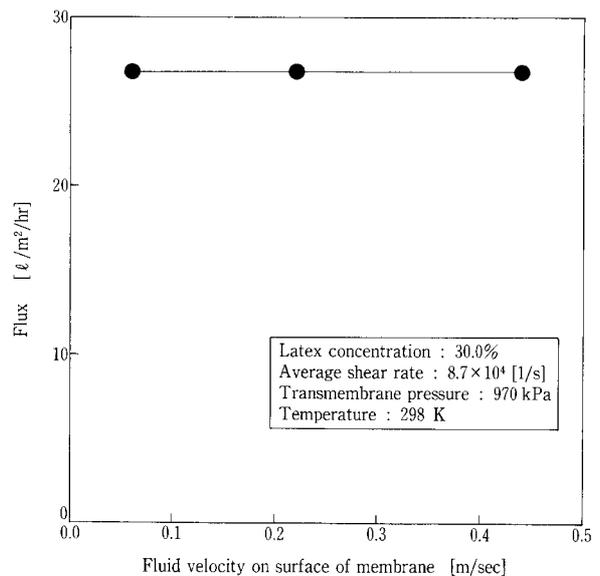
この結果より、VSEP では振動により生じるせん断速度が大きいため、本テストで使用したラテックスの透過流束に及ぼす膜面流速の影響は小さいことが判った。

(3) せん断速度が透過流束に及ぼす影響 (テスト3)



第9図 膜間差圧と透過流束の関係

Fig. 9 Relation between Trans Membrane pressure and Flux



第10図 膜面流速と透過流束の関係

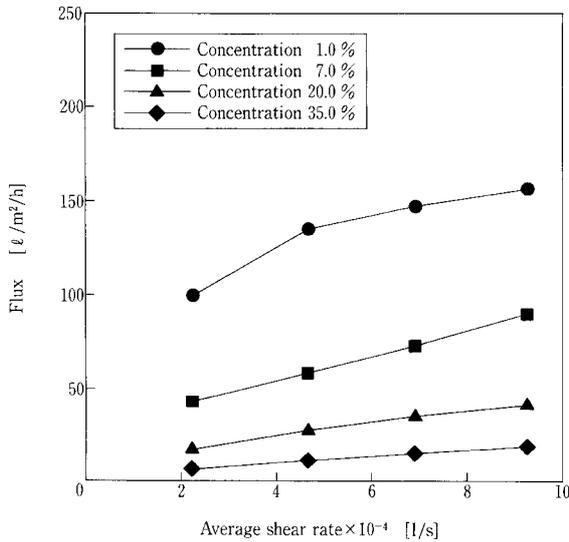
Fig.10 Relation between fluid velocity on surface of membrane and Flux

第11図に平均せん断速度と透過流束の関係をプロットした。

第11図よりどの濃度に対しても、透過流束が平均せん断速度に比例して増加している。よって、振動により発生するせん断速度はラテックスろ過での透過流束に対し良好に作用していること、そして、透過流束がせん断速度で相関可能であることがわかった。

次に、このテスト結果を対数濃度と透過流束についてプロットした。その結果を第12図に示す。

第12図より平均せん断速度が大きいほど透過流束は大きくなり、特に振動が有る状態とクロスフローのみの状態で大きく透過流束が違っている。このことから、ラテックスろ過に振動が効果的であることが証明された。

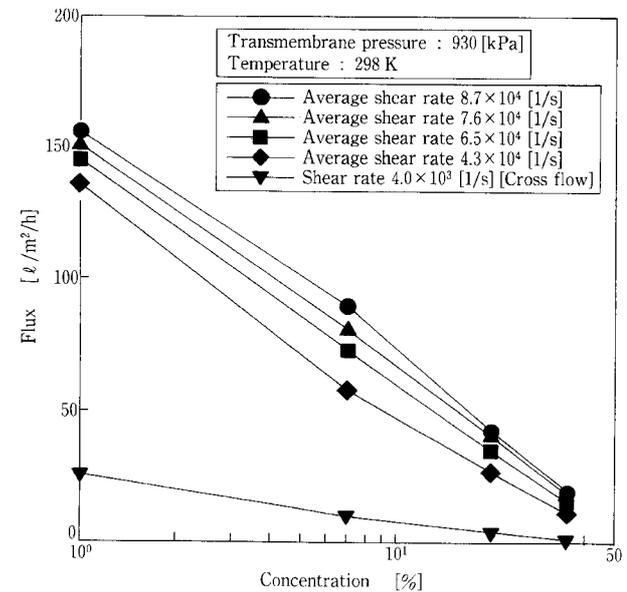


第11図 平均せん断速度と透過流束の関係  
Fig.11 Relation between average shear rate and flux

各条件とも透過流束は対数濃度に線形的に減少していること、透過液成分にラテックスは含まれないこと (3. 1. 2 章, 第3式における  $C_p = 0$ ) から、濃度と透過流束の関係式は第13式 (3. 1. 3 章記載) で表すことが可能である。

各透過流束直線の傾きと濃度切片を計算し、各せん断速度での物質移動係数とゲル層形成濃度を求めた。その結果を第4表に示す。

第4表より、平均せん断速度が増加するほど、物質移動係数及びゲル層濃度が増加することがわかった。また振動が有る状態とクロスフローのみの状態では、物質移動係数は1桁値が変わっており、濃縮限界と考えられるゲル層形成濃度も大幅に増加することがわかった。



第12図 濃度と透過流束の関係  
Fig.12 Relation between concentration and flux

第4表 物質移動係数とゲル層形成濃度推算結果

Table 4 Estimation of mass transfer Coefficient and concentration of formation of gel layer

Average shear rate × 10 <sup>-4</sup> [1/ s]	Coefficient of mass transfer [m/ hr]	formation of gel layer [wt%]	Film thickness [m]
8.8	1.13 × 10 <sup>-5</sup>	57.1	1.93 × 10 <sup>-7</sup>
7.6	1.09 × 10 <sup>-5</sup>	54.5	2.00 × 10 <sup>-7</sup>
6.5	1.07 × 10 <sup>-5</sup>	50.0	2.04 × 10 <sup>-7</sup>
4.3	1.02 × 10 <sup>-5</sup>	42.6	2.13 × 10 <sup>-7</sup>
0.4 (no vibration)	2.02 × 10 <sup>-6</sup>	38.0	1.08 × 10 <sup>-6</sup>

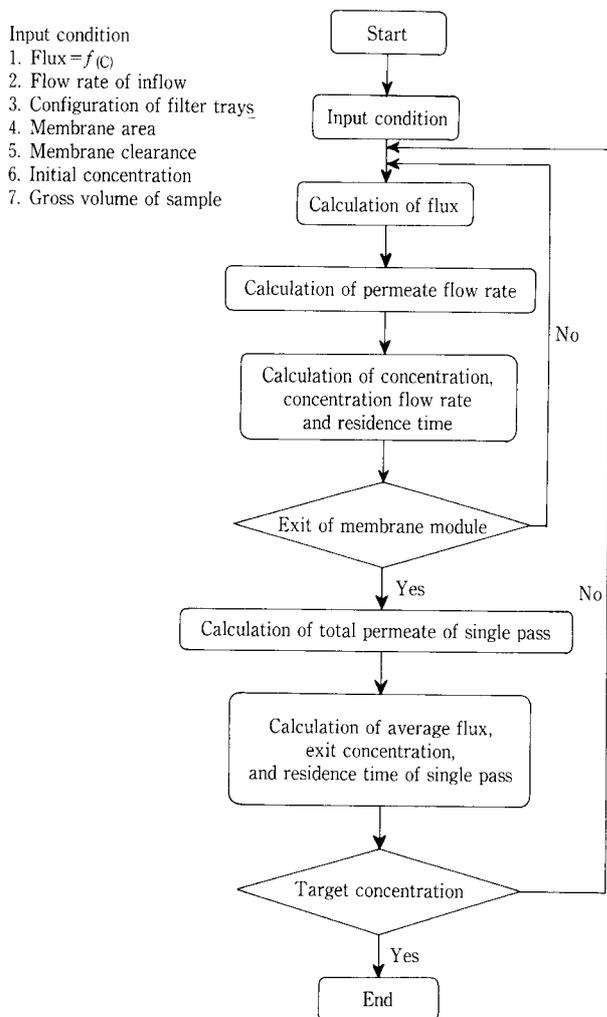
従って、振動により発生するせん断速度はラテックス濃縮における透過流束に良好な影響を与えるだけでなく、濃縮限界も大幅に増加させる。

前述の結果より①VSEPはラテックスろ過濃縮に適していること、②透過流束がせん断速度で相関可能であること、③本テスト条件では、濃度と透過流束の関係は濃度分極モデル式で表示可能であること、がわかった。

#### 4. スケールアップ性能予測評価

##### 4.1 性能予測方法

Series LとSeries P, Series iでは前述したとおり慣性モーメントが違っているため、シリーズにより固有振動数が異なり、せん断速度が違っているた



第13図 スケールアップ計算フローチャート  
Fig.13 Flow chart of scale up calculation

めSeries Lテストの透過流束値にせん断速度補正を行う必要がある。また、Series P, Series iでは膜モジュールの構造がワンパスで高濃縮を行える棚段構造になっているため、膜モジュール内の濃度分布を考慮した、平均透過流束で評価を行う必要がある。

これらの点を考慮した性能予測方法確立を試みた。Series Lテスト結果からSeries P, Series iの性能を予測する方法のフローチャートを第13図に示す。

なお、透過流束と濃度の関係式は、せん断速度補正後の透過流束値を濃度分極モデル式(13)に近似させた式を用いた。

##### 4.2 Series P 性能予測

まず、膜の寸法がSeries Lとほぼ同じで、フローパターン及びせん断速度が異なるSeries P(19段)の性能予測を検討した。そして、実際にSeries Pを用いてラテックスろ過テストを行い、性能予測(計算)値の検証を行った。

###### (1) 性能予測検証条件

性能予測検証条件を第5表に示す。Series Pのテストは全循環方式で行い、ワンパス平均透過流束及び出口濃度を測定した。また、性能予測(計算)では、この条件を計算初期条件とし、第13図に従いSeries Pでのワンパス平均透過流束値を求めた。

###### (2) 性能予測の検証

第5表 P型テスト条件  
Table 5 Test conditions of Series P

Membrane	UF-membrane: MWCO8000, Polyamide
Temperature [K]	298
Average shear rate [1/s]	60 150
Concentration of latex [wt%]	19.9
TMP [kPa]	970
Feed flow rate [L/hr]	208.3
Stage	19

第6表 計算値と実験値比較  
Table 6 Comparison of the calculated and measured average flux and exit concentration of series P

	Exit concentration [wt%]	single pass [L/m <sup>2</sup> /hr]
Calculated	25.3	29.6
Measured	25.2	28.2
Precision [%]	+0.4	+5.0

計算値と実験値比較表を第6表に示す。  
 (但し、精度は(計算値/実験値-1)×100とした。)

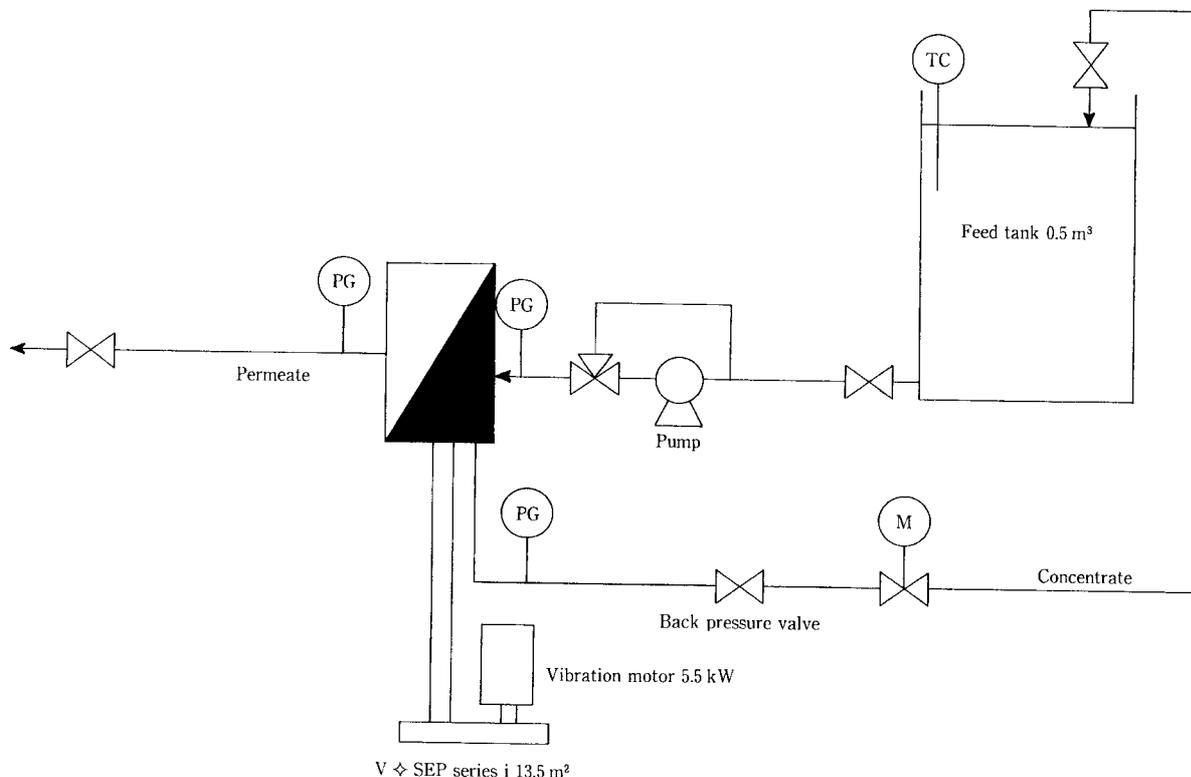
この結果より5%以内の精度で計算値と実験値は一致しており、Series L から棚段構造である Series P への性能予測は、棚段内の濃度分布を考慮した透過流束を平均せん断速度補正することで対応できることが証明できた。

#### 4.3 Series i の性能予測

膜サイズが同じである Series L から Series P への性能予測が平均せん断速度補正で成り立つことは証明できたが、膜サイズが異なる Series i でもその法則が成り立つか検討を試みた。

第7表 i型テスト条件  
 Table 7 Test conditions of Series i

Membrane	UF-membrane: MWC08000, Polyamide
Temperature [K]	298
Average shear rate [1/s]	65 600
Initial Concentration of latex [wt%]	6.1
Initial storage of latex	520
TMP [kPa]	970
Feed flow rate [L/s]	970
Feed flow rate [L/hr]	1 700
Stage	50



第14図 VSEP Series i テストフロー  
 Fig.14 Block flow diagrams of VSEP Series i test

第8表 計算値と実験値比較  
 Table 8 Comparison of the calculated and measured exit concentration and average flux of Series I

Feed concentration [wt%]	Exit concentration [wt%]				Average flux [L/m²/hr]			
	6.3	10.7	17.1	21.2	6.3	10.7	17.1	21.2
Calculated	11.9	17.1	23.2	27.1	62.5	54.9	48.5	45.6
Measured	11.5	16.7	22.7	27.1	60.0	56.1	52.7	50.3
Precision [%]	+3.5	+2.4	+2.2	±0	+4.2	-2.1	-8.0	-9.3

### (1) 性能予測検証条件

性能予測検証条件を第7表に示す。テストに用いた Series i の膜面積は13.5 m<sup>2</sup> (50段) であり、テストは第14図に示す循環濃縮方式で行い、平均透過流束及び供給濃度を測定した。また、性能予測(計算)では、条件を計算初期条件とし、第11図に従い Series i での平均透過流束値を求めた。

### (2) 性能予測の検証

計算値と実験値比較表を第8表に示す。

(但し、精度は(計算値/実験値-1)×100とした。)

第8表より平均透過流束の予測精度は9.3%以内となった。よって、実機へのスケールアップも透過流束を平均せん断速度補正することで対応でき、10%の安全率を見込めば十分に実機性能予測ができることがわかった。さらに、実証実験では膜モジュール出口濃度は27.1 wt%であった。このことから、実機でもラテックスの高濃縮が可能であることが証明できた。

Series P 性能予測と比較して予測精度が悪くなっている原因は、膜の寸法が Series i では大幅に異なるため、Series P 性能予測計算プログラムに計算誤差が大きくなったこと、そして流動状態の変化などが考えられる。

### む す び

ラテックス濾過に振動型膜分離装置を用いると、振動により発生する膜表面の高いせん断速度によって、膜面濃度分極層内のラテックスの物質移動係数を増大させることができるため、高透過流束でしかも高濃度まで濃縮可能であることがわかった。この

ことから VSEP はラテックス分野への適用性が高い装置であることが証明された。

また、膜サイズ、フローパターン、そしてせん断速度が異なるテスト機 (Series L) と実機 (Series i) の性能は透過流束のせん断速度補正で相関可能であることが証明され、振動型膜分離装置を用いてラテックスを濃縮する実プロセスの性能を予測できることがわかった。

### <記号の説明>

$\nu$	: 振動周波数 [Hz]	
$A$	: サイズミックマスの慣性モーメント	[kgm <sup>2</sup> ]
$B$	: 膜モジュールの慣性モーメント	[kgm <sup>2</sup> ]
$k$	: バネ定数	
$\omega$	: 角振動数	[rad/s]
$P$	: 半径方向任意点での振幅	[m]
$f$	: 振動周波数	[Hz]
$x$	: 流れ方向	[m]
$y$	: 鉛直方向 (膜面に鉛直)	[m]
$\mu$	: 粘度	[Pa·s]
$u$	: x 方向速度	[m/s]
$\rho$	: 密度	[kg/m <sup>3</sup> ]
$S_{AVE}$	: 平均せん断速度	[1/s]
$A$	: 1 枚の膜面積	[m <sup>2</sup> ]
$r_1, r_2$	: 膜モジュールの内半径と外半径	[m]
$P_1, P_2$	: $r_1, r_2$ での振幅	[m]
$D$	: 拡散係数	[m <sup>2</sup> /s]
$J_V$	: 体積透過流束	[m/s]
$J_S$	: 溶質の透過流束	[m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·s)]

### [参考文献]

- 1) 例えば松本幹治ら: ユーザーのための実用膜分離技術, 日刊工業新聞社
- 2) 高田一貴ほか: 神鋼パンテック技報 Vol.41, No.2 (1997), p.48.

### 連絡先

小 西 嘉 雄	技術開発本部 研究開発部	竹 尾 由 重	技術開発本部 研究開発部	谷 田 克 義	技術開発本部 研究開発部
	TEL 078-992-6525 FAX 078-992-6504 E-mail y.konishi@pantec.co.jp		TEL 078-992-6525 FAX 078-992-6504 E-mail y.takeo@pantec.co.jp		TEL 078-992-6525 FAX 078-992-6504 E-mail k.tanida@pantec.co.jp
高 田 一 貴	技術開発本部 (工学博士) 研究開発部 主任研究員				
	TEL 078-992-6525 FAX 078-992-6504 E-mail k.takada@pantec.co.jp				