

回転型膜分離装置「ROTOSEP」の バッフル挿入効果

Effect of baffle in rotary membrane separation
system "ROTOSEP"



(技)第2研究開発部第4研究室
谷田克義
Katsuyoshi Tanida
杭出義也
Yoshiya Kuide

回転型膜分離装置「ROTOSEP」は、高透過流束／高濃縮操作を可能とした新しい膜分離装置である。膜円板を積層させただけの回転型膜分離装置では、膜を高速回転させても膜円板間の流体の滞留により回転の効果が十分に発揮されなくなるが、「ROTOSEP」ではバッフルを膜円板間に挿入することにより膜円板間の流体と膜円板外側の流路を流れる流体との物質交換が促進されることにより、回転の効果が高められている。本報告では、膜分離性能に及ぼすバッフルの挿入効果を明らかにすることを目的として、ラテックス溶液の透過流束測定およびレーザードップラー流速計を用いたバッフル周辺での流速測定をおこなった。その結果、バッフルを挿入することにより膜円板間の乱流が促進され透過流束が向上し、しかもファウリングや閉塞を起こすことなく安定に処理できることがわかった。これは、バッフルの半径方向に沿って、膜円板間の流体の入れ替えが効果的におこなわれていることによる。

The new rotary membrane separation system, "ROTOSEP", has realized the operation with high permeate flux and high concentration. A stagnation of fluid between membrane disks decreases the effect of high rotation of membrane disks, however, "ROTOSEP" uses efficient baffles inserted between membrane disks, and these can promote the exchange of fluid from the space between membrane disks for the fluid in the channel. The purpose of this report is to clarify the effect of baffle on the membrane separation performance. In this study, the permeate flux of latex emulsion was measured, and also the velocity around the baffles was measured using Laser Doppler Velocimeter (LDV). The results show that turbulence between membrane disks is promoted by baffles and that the permeate flux is not only improved but also kept stable flux without fouling or plugging. These performances are due to the effect of the fluid exchange enhanced by the radial flow along the baffles.

Key Words :

膜 分 離	Membrane separation (filtration)
回 転	Rotation
バ ッ フ ル	Baffle
乱 流 促 進	Turbulence promotion
流体の入れ替え	Exchange of fluid
流 速 測 定	Measuring velocity

まえがき

当社は、新型の回転型膜分離装置「ROTOSEP」の開発¹⁾を2002年3月に終了し、2002年4月から本格的に販売を開始した。その「ROTOSEP」の概略図を図1に示す。「ROTOSEP」は円形に成型した膜を円板の両面に貼り付けた膜円板を、回転軸に所定間隔を空けて積層し、その膜円板間にバッフルを挿入して圧力容器内に挿入した構造となっている。そして、モーターをもちいて回転軸とともに膜円板を回転させながら原液の膜分離をおこなう。分離対象である被処理液の原液は装置下部から供給され、濃縮液は装置上部から排出される。また、膜を透過した透過液は、中空の回転軸内に集水されロータリージョイントを介して装置外部に排出される。

このような構造を有する「ROTOSEP」は、次のような特長を有しており、蒸発濃縮や遠心分離の代替装置としての使用が期待される。

①高透過流束／高濃縮操作が可能

「ROTOSEP」では、直径600 mmの膜円板を400 rpmという、従来の回転型膜分離装置と比較して高速で膜円板を回転させることにより膜面にせん断力と遠心力を作用させ、ファウリングや濃度分極が低減される。これにより、高透過流束／

高濃縮操作が可能である。また膜の阻止性能も向上する。

②高効率バッフルを使用

「ROTOSEP」では、膜円板間にバッフルを挿入することにより、膜円板間での溶液の滞留を防止し、乱流を促進して膜円板の高速回転の効果を高めている。

③維持管理／メンテナンスが容易

「ROTOSEP」では、膜の高速回転によりファウリングが低減されるため、膜の洗浄や交換間隔を長くすることができる。また、シンプルなプロセスでの濃縮操作が可能であるため、装置の自動化／無人運転が可能である。

④処理目的に合わせて膜の選定が可能

「ROTOSEP」には、精密ろ過膜（MF膜）、限外ろ過膜（UF膜）、ナノフィルトレーション膜（NF膜）を処理目的に合わせて選択して取り付けることが可能である。

これら多くの特長の中で、もっとも「ROTOSEP」を特長付けているのは、高効率バッフルを使用していることである。本報告では、「ROTOSEP」に使用しているバッフルの挿入効果に関して紹介する。

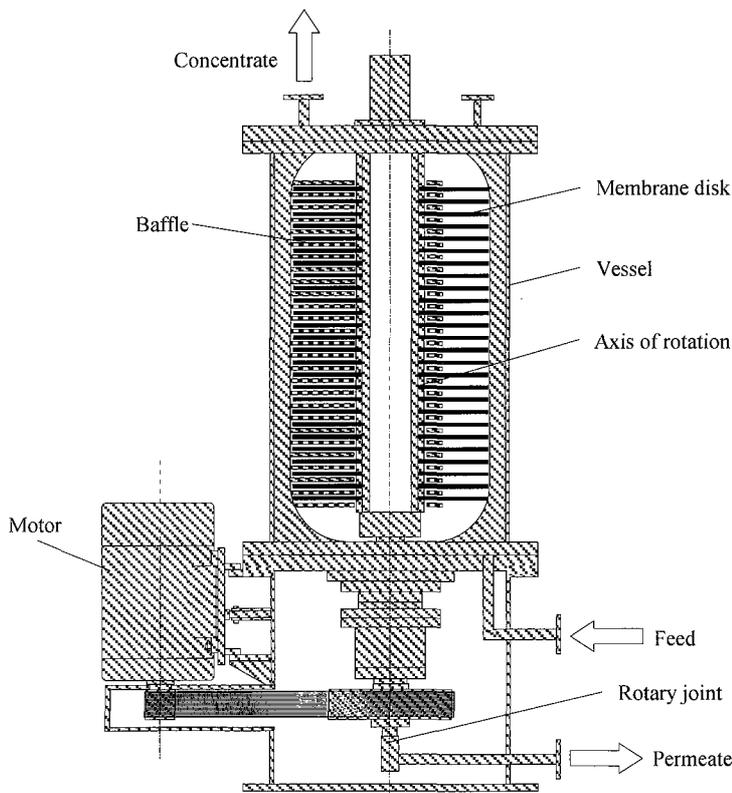


図 1 ROTOSEP 概略図

Fig.1 Schematic diagrams of ROTOSEP

表 1 回転型膜分離装置の課題

Table1 Problem of the rotary membrane separation machine

Problem	Cause	Solution method	Advantage	Disadvantage	Evaluation
Stagnation of fluid between disks.	Co-rotation of fluid with membrane disks.	Using partition. [Fig.2(a)]	Plug flow in a channel.	Large pressure drop. Deformation of disks and partitions.	×
		Opening channel on disks. [Fig.2(b)]	Preventing stagnation area. Small pressure drop.		
		Using baffle. [Fig.3]	Preventing stagnation area. Small pressure drop.	To be clarified in this report.	
Deformation of disks.	Vibration of disk by an unstable flow.	Installing baffle between disks.	Baffle may work as a rectifier.		

1. バッフルの必要性

はじめに、なぜ「ROTOSEP」にバッフルが必要であるかについて述べる。

「ROTOSEP」のように、積層した膜円板を高速回転させて膜分離をおこなう回転型膜分離装置における課題を表1に示す。回転型膜分離装置の課題は大きく分けて、膜円板間での溶液の滞留と膜円板の変形の二つが考えられる。溶液の滞留は、粘性力により膜円板間の溶液が膜円板と共回りするため起こる。また、膜円板の変形は、膜円板を高速回転させることにより、非軸対称な二次流れが生じ、円板が振動するためである²⁾。

溶液の滞留を防止する方法としては、

図2(a)に示すように膜円板間に仕切りを設ける、
 図2(b)に示すように膜円板に溶液の流路を設ける、
 膜円板間にバッフルを挿入する、
 以上3つが考えられる。このうち、膜円板間を仕切る方法は、膜円板間に溶液の流路が形成され溶液の入れ替えが起こるが、装置内の圧力損失が大きくなり膜円板や仕切りの変形が起こる問題を生じる。また、膜円板に流路を設ける方法は、圧力損失は大きくならないが、膜円板のシール部分が増加し、膜モジュールが複雑化する問題が生じる。一方、バッフルを挿入する方法は、圧力損失が大きくならず、膜円板もシンプルになることから、上記2方法の課題を解決できると考えられる。しかし膜分離特性へのバッフルの挿入効果が不明であるので、これを確認する必要がある。

膜円板の変形を防止するためには、膜円板間に非軸対称な二次流れを整流する物体を挿入する方法がある。すなわち、流れの整流器として膜円板間にバッフルを挿入することにより解決できると考えられる。しかしながら、バッフルの流れの整流効果が不明であるので、これを確認する必要がある。

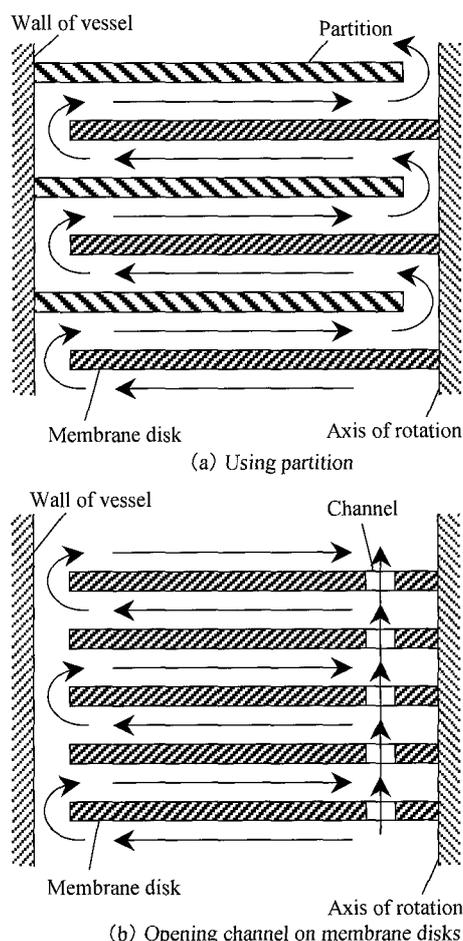


図 2 膜円板間での溶液の滞留防止方法
 Fig.2 Method of preventing a stagnation of fluid between membrane disks

以上のような理由から、「ROTOSEP」のように積層した膜円板を高速回転させる回転型膜分離装置では、上述した問題を解決するためのバッフルを開発し、膜円板間に挿入する必要があることがわかる。そこで、次に、「ROTOSEP」に採用した新しいバッフルの形状について紹介する。

2. バッフル形状

バッフルに求められる性能をまとめると次のようになる。

- ① 膜円板間の溶液の滞留を防止し、膜円板の回転の効果を十分に発揮させること。
- ② 乱流を促進する形状であること。
- ③ 装置内の流路圧力損失が小さいこと（流路が長くないこと）。
- ④ 形状がシンプルであること。
- ⑤ 円板の変形を防止可能であること。

以上の観点から、図3に示すような形状のバッフルを考案した。

図3(a)は長方形の板状のバッフルであり、上述のバッフルに求められる性能の③、④を満たしていることは容易に想像できる。また、この形状はもっともシンプルな形状である。

図3(b)に示したスポーク型は、放射状に長方形を配した形状のバッフルであり、この形状も図3(a)と同様にバッフルに求められる性能③、④を満たしていることは容易に想像できる。

そこで、考案した二つのバッフルがこれらの条件①～⑤を満たしていることを、実験により確認した。ここで、性能⑤の円板の変形に関する実験の方法と結果についてはとくに示さないが、図3(a)、(b)のバッフルでは円板の変形の問題はないこと確認している。

3. バッフル形状と膜分離性能の関係

本節では、バッフルの形状と膜分離性能の関係について検討した。以下に、その方法と結果について示す。

3.1 実験装置

図4にバッフル形状と膜分離性能の関係を測定するために使用した実験装置の概略図を示す。本装置は図1に示した装置と同様の構造をしているが、本装置では、膜円板を2枚のみ装着し、膜円板間に図3に示した形状のバッフルを1枚装着可能である。また、膜円板の直径は実機と同じ600 mmである。

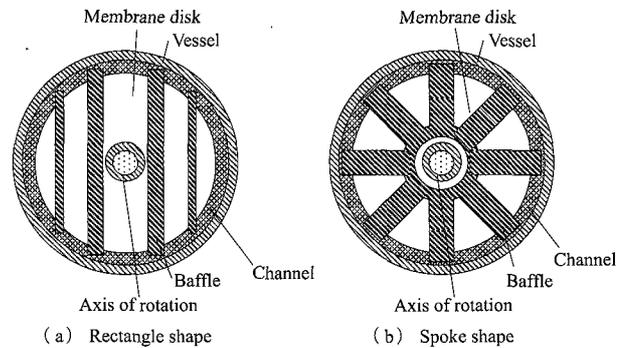


図3 バッフル形状
Fig.3 Shape of baffle

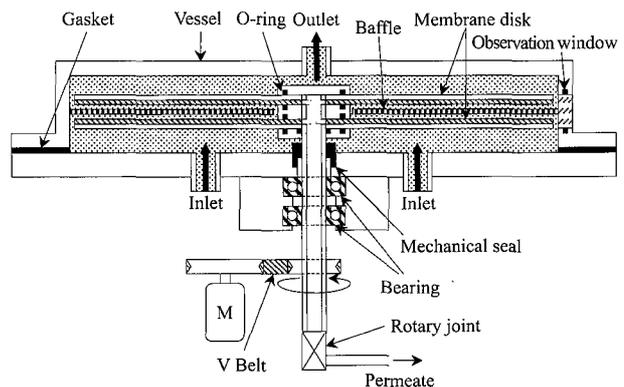


図4 実験装置概略図
Fig.4 Schematic diagrams of the rotary membrane separation apparatus

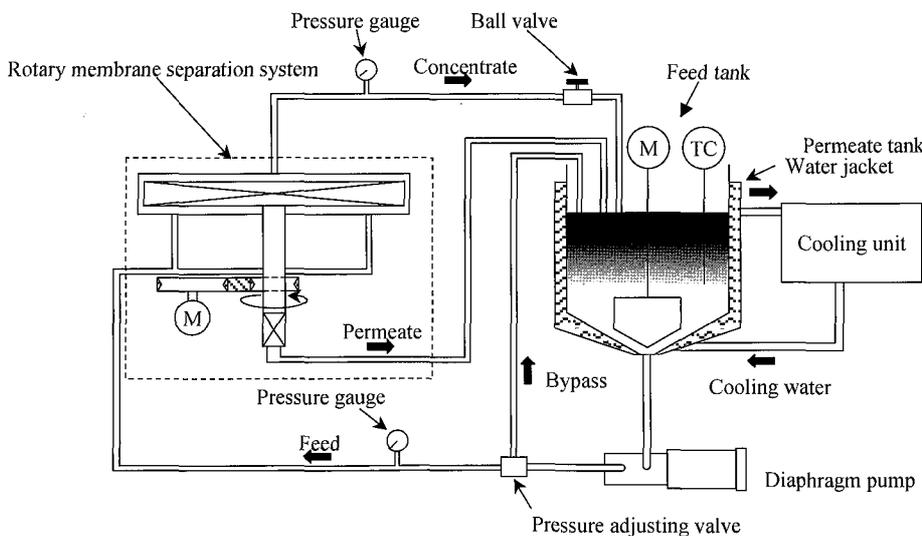


図5 実験装置のフロー図
Fig.5 Flow diagrams of the experimental apparatus

また、図5に図4に示した装置を組み込んだ実験装置全体のフロー図を示す。本装置のフローは、回転膜実験装置に供給ポンプ、原液タンク、クーラー等の供給循環装置を取り付けた構成となっている。

供給ポンプはダイヤフラムポンプであり、供給圧力や供給流量の調整をおこなうためにポンプ出口に圧力調整弁を取り付けた。また、濃縮液の出口には装置内の圧力、流量調整をおこなうために圧力調整バルブ（ボールバルブ）を設置した。

原液タンクの容量は0.05 m³である。この原液タンクにはウォータージャケットが設置されており、このウォータージャケット内に冷却水を循環させることにより原液の保温をおこなった。また、原液タンクには攪拌機を取り付け、タンク内で濃度や温度のムラが発生しないように原液の攪拌をおこなった。

操作圧力の測定のために供給配管と濃縮配管上に隔膜式圧力計を取り付け、操作温度の測定のために原液タンクに温度計を取り付けた。

3.2 実験方法

本実験では、一定回転数で一定濃度のラテックス溶液に対する透過流束の圧力依存性と経時変化を測定するため、膜により分離された透過液と濃縮液の両方を原液タンクに戻して循環させ原液濃度を一定に保つ全循環方式にて実験をおこなった。透過流束の圧力依存性の測定ではバッフルがない場合、膜円

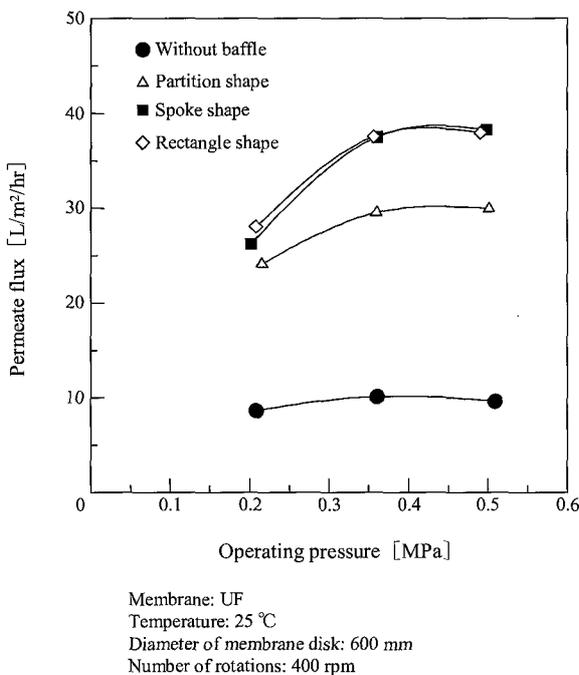
板間を仕切った場合と図3に示したすべてのバッフルを使用して測定をおこない、経時変化の測定では(a)と(b)の長方形状バッフルとスポーク状バッフルを使用して測定をおこなった。また、実験値として、透過流束、ラテックス溶液濃度、操作圧力、操作温度、膜の回転数の測定をおこなった。

透過流束は一定時間に排出される透過液量をメスシリンダーで測定し、透過液量を測定時間と膜面積で除すことにより求めた。また、操作圧力は、回転円板の液出入口に取り付けた隔膜式圧力計により測定した圧力を平均して求めた。また、操作温度は、タンク内の原液温度をサーミスタ方式の温度センサーにて測定して求めた。また、膜の回転数は、回転軸の回転数をタコメーターにて測定して求めた。

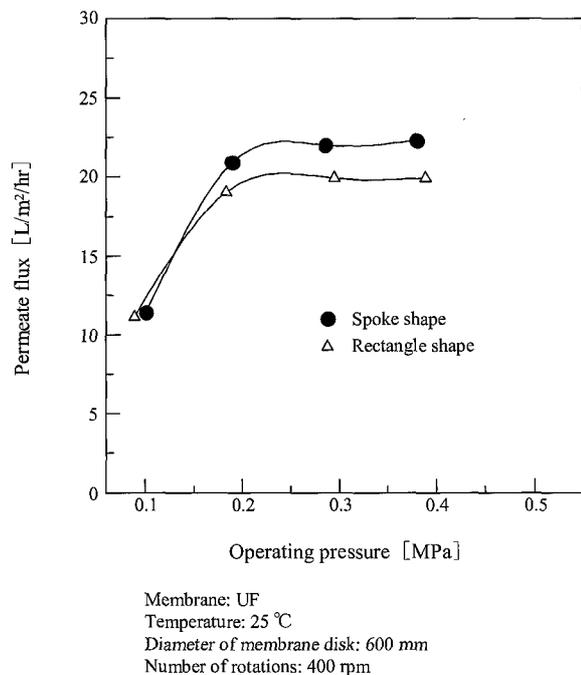
3.3 実験条件

本実験では、実機と同じ膜回転数400 rpm で実験をおこなった。また、透過流束の圧力依存性の測定ではラテックス溶液の濃度を20%、30%と変化させ、操作圧力を0.1~0.5 MPaに変化させた。また、透過流束の経時変化の測定ではラテックス溶液の濃度を30%、操作圧力を0.4 MPa一定でおこなった。

なお、操作温度は25℃一定とした。また、本実験で使用した膜は、材質がポリエーテルスルホン、分画分子量が4000の限外ろ過膜（UF膜）である。



(a) 20% latex emulsion



(b) 30% latex emulsion

図6 透過流束へのバッフルの挿入効果
Fig.6 Effect of baffle on the permeate flux .

3. 4 実験結果および考察

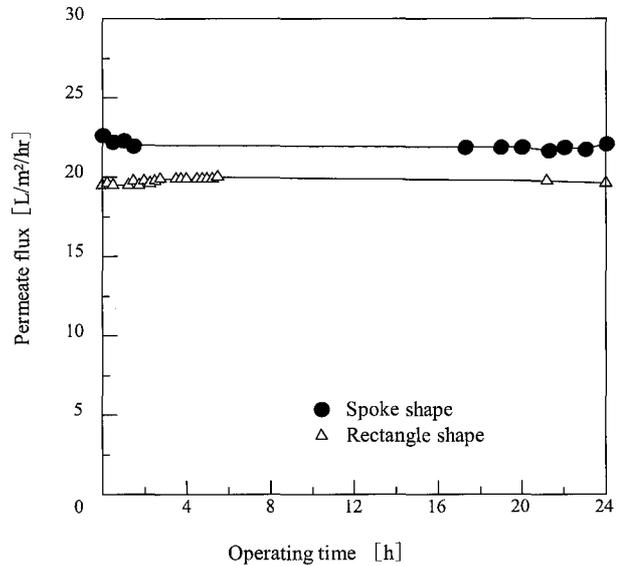
ラテックス溶液を膜分離した際の透過流束と操作圧力の関係について、バブルの形状を変えて測定した結果を図6に示す。図6(a)はラテックス溶液の固形物濃度が20%、図6(b)はラテックス溶液の固形物濃度が30%の時の結果である。

図6(a)から、バブルがない場合、回転の効果が発揮されないことがわかる。これは、膜円板間の流体が共回りして膜面に効果的なせん断速度が発生しないことによるものと考えられる。また、膜円板間を仕切るよりも、バブルを挿入した方が回転の効果が大きいことがわかる。この現象の理由については、次のように考えられる。膜円板間を仕切った場合とバブルを挿入した場合は、遠心力の大きさは回転数と溶液性状によるため同じであると考えられる。しかしながら、バブルの方が膜円板間を不均一に覆っているため、乱流が促進されるので、せん断力は大きくなると考えられる。このため、膜円板間を完全に仕切るよりもバブルを挿入した方が透過流束が大きくなると考えられる。この結果から、バブルは上述したバブルに求められる性能②を満足することがわかる。

また、図6(b)から、濃縮限界に近いような高濃度では、長形状バブルよりもスポーク状の方が透過流束が大きくなることがわかる。この結果から、

長形状のバブルよりもスポーク状のバブルの方が乱流の促進効果が大きいと考えられる。

また、ラテックス溶液の固形物濃度が30%の時の透過流束の経時変化を測定した結果を図7に示す。



Membrane: UF
 Operating pressure: 0.4 MPa
 Temperature: 25 °C
 Diameter of membrane disk: 600 mm
 Number of rotations: 400 rpm

30% latex emulsion

図7 連続運転での透過流束の安定性
 Fig.7 Stability of permeate flux in continuous operation

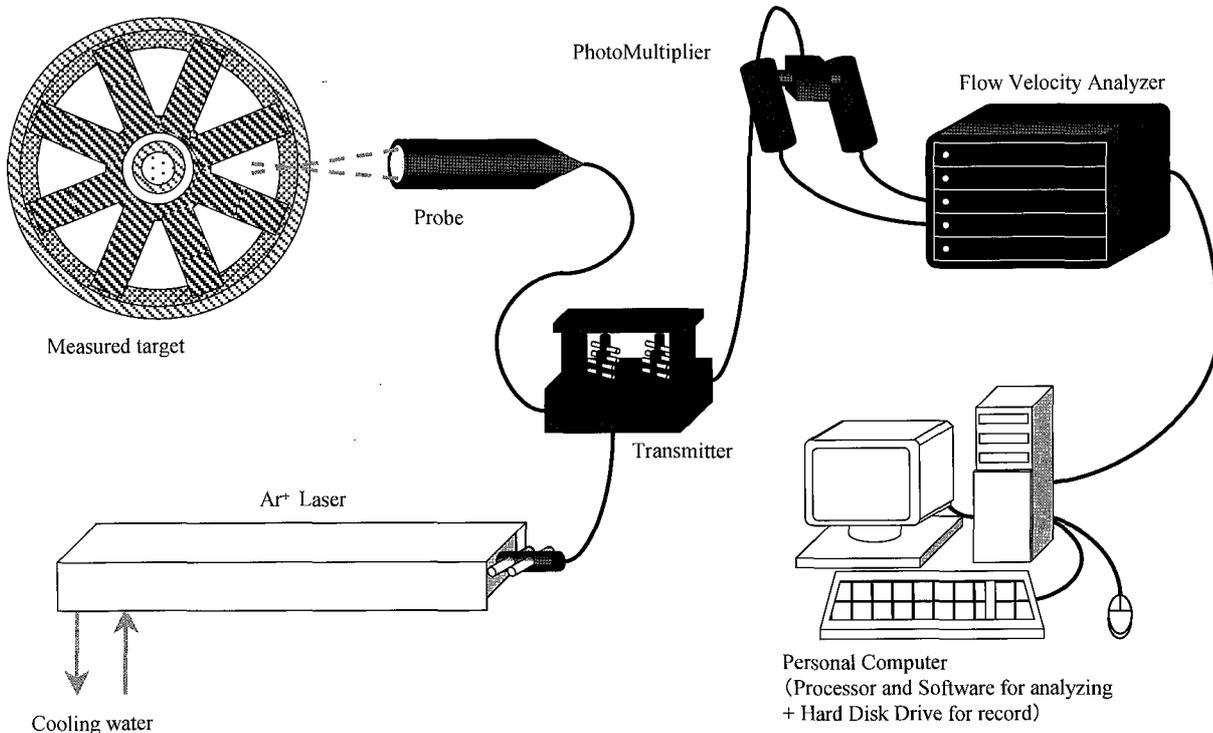


図8 LDVをもちいた流速測定システムの概略図
 Fig.8 Schematic diagrams of measuring system of velocity using LDV

図7から、乱流の促進効果の違いのために透過流束の大きさに差はあるが、いずれのバッフルでも透過流束が安定しており、膜円板間で溶液が滞留して過濃縮され透過流束が減少する現象は見られないことがわかる。これは、バッフルの挿入により膜円板間への溶液の流入出が安定しておこなわれていることを示唆している。通常、膜間を仕切った場合、溶液は膜円板表面を流通するため、強制的に膜円板間への溶液の流入出が起こる。一方、バッフルを挿入した場合、膜円板間を仕切った場合のように、強制的な膜円板間への溶液の流入出は生じない。次節で、このバッフルによる膜円板間への溶液の流入出メカニズムを確認するための検討をおこなった。

4. バッフルによる流体の入れ替え効果

前節において、バッフルを挿入することにより膜円板間への溶液の流入出がおこなわれていることを示唆する結果がえられた。そこで、バッフルを膜円板間に挿入して膜円板を回転させ、バッフル周辺の流速を測定することによりこの効果の発生メカニズムを解明することを試みた。以下に、その方法と結果について示す。なお、ここではスポーク状バッフルについて検討をおこなった。

4.1 実験装置

バッフル周辺の流速の測定には、レーザードップラー流速計 (Laser Doppler Velocimeter, LDV) を用いた。LDVでの流速測定原理は次の通りである。2本のレーザー光線を発信して交差させると、レーザー光線の交差する点に干渉縞が発生する。この干渉縞部分にトレーサー粒子を流し、干渉縞の明滅速度を検出する。検出した干渉縞の明滅速度は、トレーサー粒子の移動速度、つまり流速に比例している。LDVは、この明滅速度を検出して流速を測定する装置である。

本実験では、図4に示した装置にスポーク上バッフルを取り付け、装置ののぞき窓からLDVのレーザー光線を発信し、バッフルと膜円板外周周辺の流速測定をおこなった。図8にLDVを用いた流速測定システムの概略図を示す。本実験で使用したLDVは、後方散乱方式であり、アルゴンイオンレーザー (AIL), トランスミッター (TM), プロープ, フォトマルチプライヤー (PM), フローベロシティアナライザー (FVA) およびデータ解析、記録用のPCから構成される。AILから発信されたレーザーはTMを経由してプロープから測定部に発信される。レーザー光線の交差した干渉縞の反射光は、プロープからTMを経由してPMにて分光されFVAにて

解析された。そして、PCの専用ソフトを使用してHDDに流速測定データが記録された。

また、レーザー光線の乱反射を防止するため、回転型膜分離装置のレーザ照射部分周辺の円板、バッフル、容器内をつや消し黒に塗装した。

4.2 実験方法

回転型膜分離装置の容器内をトレーサーが溶解した溶液で満たし、膜円板を回転させレーザを測定点に発信させた。本実験ではレーザー光線を装置ののぞき窓から発信したため、膜円板の半径方向や回転方向である接線方向の流速を測定するための角度でレーザー光線を発信することができなかった。そこで、レーザー光線を膜円板の中心線に対して任意の角度で測定位置に発信し、中心線に対するレーザー光線の角度と流速ベクトルを測定し、正弦定理から流速ベクトルの半径方向の速度成分と接線方向の速度成分を算出した。

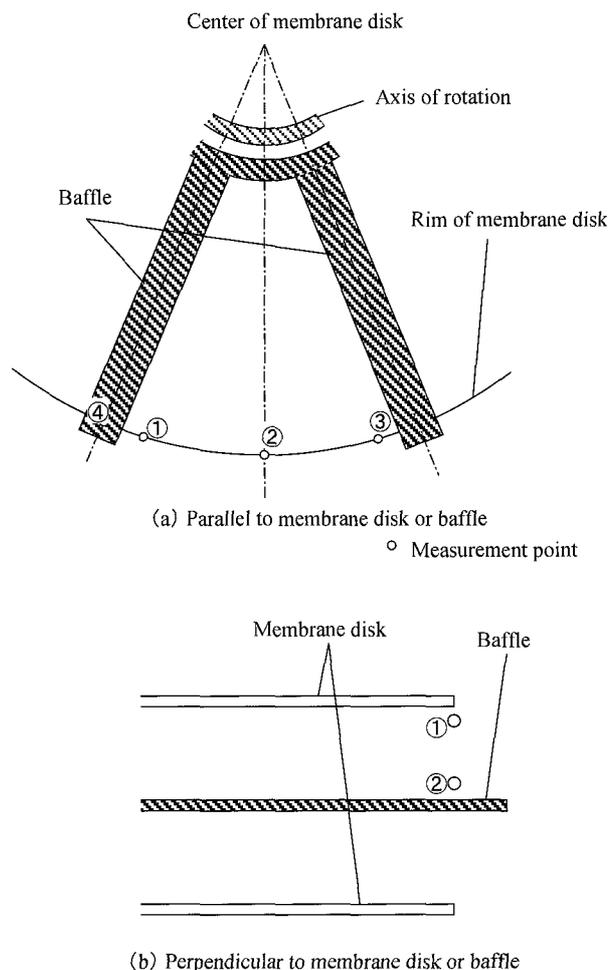
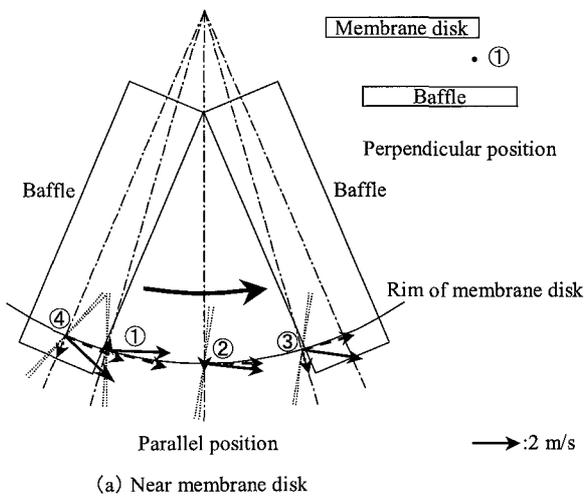


図9 LDVによる流速測定位置
Fig.9 Measurement point of velocity by LDV

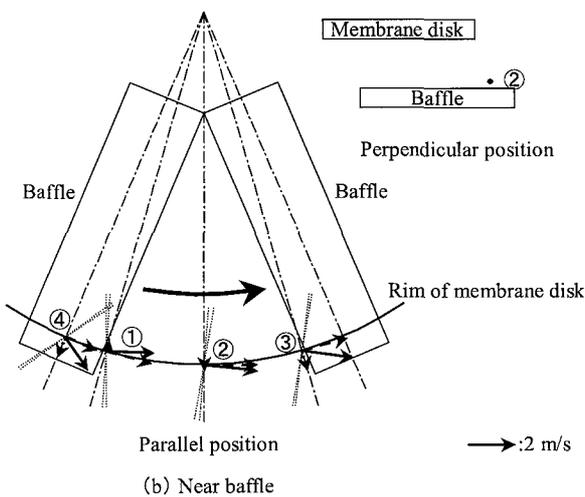
4.3 実験条件

本実験では、トレーサー粒子として水性塗料を使用し、溶液として水道水を使用した。また、膜円板の回転数は200 rpmとした。

流速測定をおこなった箇所を図9に示す。流速の測定は、のぞき窓からの測定が可能な2本のバッフル間でおこない、合計8箇所である。膜円板やバッフルと平行な測定位置は、図9(a)に示したように、膜円板外周部に沿った、バッフルから膜円板回転方向下流側1.5 mmの位置(図9(a)の①の位置)、2本のバッフルの中央(図9(a)の②の位置)、バッフルの膜円板回転方向上流側へ1.5 mmの位置(図



(a) Near membrane disk



(b) Near baffle

- Velocity vector
- - - Tangential component of velocity vector
- Radius component of velocity vector
- Laser beam
- Center line of membrane disk
- Direction of rotation

図 10 流速ベクトル測定結果
Fig. 10 Results of measured velocity vectors

9(a)の③の位置)、およびバッフル上の中央の位置(図9(a)の④の位置)の4箇所である。また、膜円板やバッフルの垂直位置は、図9(b)に示したように、膜円板から下側に1.5 mmの位置(図9(b)の①の位置)、バッフルから上側に1.5 mm(図9(b)の②の位置)の位置である。

4.4 実験結果および考察

図10に流速測定結果を示す。図10(a)に膜円板近傍で測定した流速ベクトルと速度ベクトル成分を、図10(b)にバッフル近傍で測定した流速ベクトルと速度ベクトル成分を示している。

図10から、平行位置①の半径方向速度成分が負の値となっており、それ以外の平行位置では正の値となっていることがわかる。また、正の値となっている平行位置②、③、④でも、その値は平行位置②から④に向かって徐々に大きくなっていることがわかる。この結果は、平行位置①の位置、つまりバッフルから膜円板回転方向下流側の位置で膜円板間への溶液の流入が起こり、それ以外の位置で膜円板間からの溶液の排出が起こっていることを示している。また、膜円板間からの溶液の排出は、2本のバッフルの間ではほとんど起こらないが、バッフルの膜円板回転方向上流側の位置やバッフル上では盛んに起こっていることを示している。このように、バッフルの膜円板回転方向上流側で溶液の膜円板間からの排出が起こるのは、回転により溶液がバッフルと接触する際に圧力が膜円板外よりも高まるためと考えられる。逆にバッフルの膜円板回転方向下流側で溶液の膜円板間への流入が起こるのは、回転により溶液がバッフルから離れる際に圧力が膜円板外よりも低くなるためと考えられる。

また、流速の膜円板接線方向成分は、円板に近い

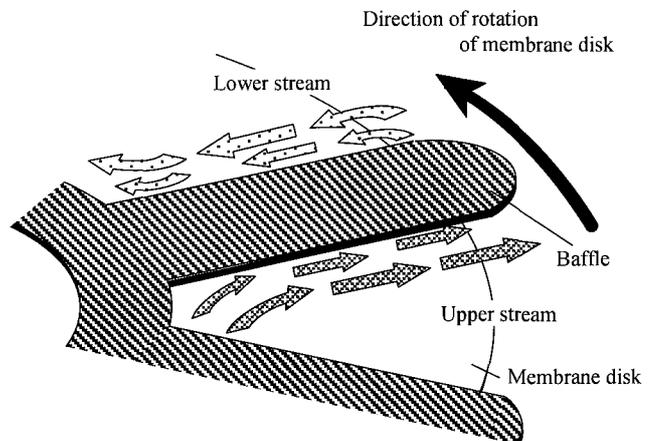


図 11 バッフル周辺の溶液の流れのイメージ
Fig. 11 Image of flow pattern of solution near baffle

垂直位置①ではバッフルに近い垂直位置②よりも値が大きいことがわかる。これは、膜円板に近い方が粘性力により膜円板に引っ張られやすいため、流速が大きくなっていることを示している。とくに、バッフル上（平行位置④）において、垂直位置②の中でも他の位置よりも流速の接線方向成分が小さくなっている。逆に垂直位置①では、他の位置よりも流速の接線方向成分が大きくなっている。これは、バッフル上のバッフルに近い位置では、粘性力により流体がバッフル上に留まろうとし、逆に膜円板に近い位置ではバッフルにより流路が狭くなるために流速が上昇してバッフル上から流出しようとしていることを示している。これにより、バッフル上ではバッフル近傍と膜円板近傍の流速差（せん断速度）が大きくなり、乱流促進が起こると考えられる。

この流速ベクトル測定結果から、バッフルによる膜円板間と膜円板外との溶液の入れ替え効果を模式的に表すと図11のようになると考えられる。つまり、バッフルの膜円板回転方向上流側で膜円板間から排出される流れが生じ、膜円板回転方向下流側で膜円板間に吸い込まれる流れが生じていると考えられる。

むすび

新型の回転型膜分離装置「ROTOSEP」に採用しているバッフルについて、その必要性、形状、性能について紹介した。

回転型膜分離装置では、膜円板間での溶液の滞留

と乱流促進のために、膜円板間へのバッフルの挿入が不可欠である。そのためのバッフルとして、「ROTOSEP」では長方形型とスポーク型の2種類のバッフルを採用した。これらのバッフルは、回転膜用のバッフルとして求められる5つの性能である、①膜円板間での滞留防止、②乱流の促進、③圧損の低減、④単純な形状、⑤円板の変形防止を満足している。これらの求められる性能のうち、とくに①と②について、ラテックス溶液の透過流束測定およびLDVを用いたバッフル周辺の流速測定をおこない確認した。その結果、バッフルを挿入することにより膜円板間の乱流が促進され透過流束が向上することがわかった。また、バッフルに沿って、膜円板間の流体の入れ替えが効果的におこなわれていることがわかった。

このように、「ROTOSEP」に採用したバッフルを膜円板間に挿入することにより、膜分離効率が向上し、「ROTOSEP」は蒸発濃縮や遠心分離の代替装置としての優れた性能を発揮することが可能となった。今後は、「ROTOSEP」が様々な固液分離プロセスへ適用されることを期待する。

[参考文献]

- 1) 谷田克義ら：神鋼パンテック技報，Vol.45，No.1 (2001)，p.12-17
- 2) 舟木治郎ら：機械学会論文集（B編），Vol.61，No.588（1995），p.160-165

連絡先

谷田克義 技術開発本部
第2研究開発部
第4研究室

TEL 078-992-6525
FAX 078-992-6504
E-mail k.tanida@pantec.co.jp