



膜分離プロセスでの最適化を図る

吉川研究室～化学工学コース



吉川 史朗 助教授

工業的な生産を行うにあたって考えなければならないのが、小さな器で作ると大きな器で作るのでは全く違うということだ。例えば、ある容器内の溶液濃度を場所によらず一定に保ちたいとしよう。小さな器を使うのなら攪拌棒で2、3回混ぜればすむ話だ。ところが、容量数トンに及び大型のタンクになるとそう簡単にはいかない。その程度の操作だけでは、場所によって濃度の差が出てきてしまうのである。

このように、工業的規模での生産を考えたときに生じてくる問題を扱っているのが、化学工学と呼ばれる分野である。その中でここ吉川研究室では、膜を使った分離プロセスに伴う多様な問題に取り組んでいる。



中空系膜って何？

高分子で出来ている薄い膜を用いた分離法が、化学工業、食品工業、医療などの様々な領域で利用されている。ではなぜ今、膜を用いた分離法が注目されているのだろう。

そもそも一口に分離法といっても様々なものがある。例えば膜を使わない分離法として、真っ先に思い浮かぶ蒸留法をみてみよう。これは沸点の違いを利用して、低沸点の成分を気体にして飛ばすことにより両者を分離する方法である。しかしこの方法は、液体を気化させるために高温にしなければならないという弱点を持つ。このため、熱を加えると壊れてしまうような物質の分離には適さない。

その点、膜を使った分離法ならばそのような問題は生じない。ろ過を例にとってみよう。ろ過とは固体の粒子を含む液に圧力を加え、液体だけをろ紙の孔に通すことにより、固体と液体を分離する方法である。このように膜分離法は総じて、分離に熱を必要としないのだ。

数十～数 μm の孔の空いたろ紙、あるいはろ布などを用いるものを「ろ過」というのに対して、 $1\mu\text{m}$ 以下の孔の膜を用いて血球、コロイドなどを分離する方法を「精密ろ過」又は「限外ろ過」という。さらに小さい孔の膜による分離法には

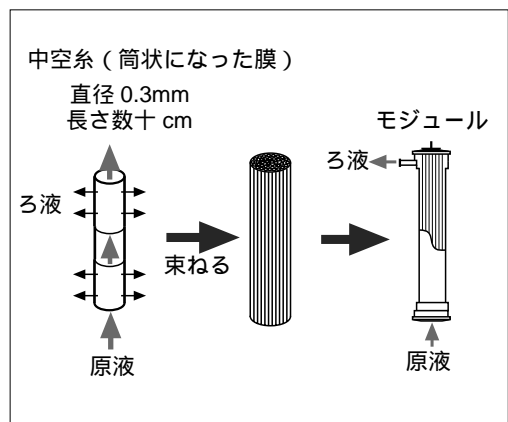


図1 膜モジュールの構造

「ろ過」の名は付かない。それは、それらが必ずしも圧力による分離法ではないからである。例えば透析法は、濃度差により分離する方法である。低濃度の液と高濃度の液を膜を隔てて接触させると、高濃度側の物質が低濃度側へ、膜の中を拡散しながら移動していく。透析法はこの原理により、不要な物質を取り除いているのである。

こういった様々な膜分離法の中で、いま吉川研で特に注目しているのが、中空糸膜を用いた分離である。

中空糸膜とは何か？ これは細長いマカロニのような膜と言えよいだろうか。見た目がまさにそうめんのごとき筒状になった膜のことである。このような形状の膜を使う利点は、とにかく膜面

積が効率よく大きく取れることだ。大量の分離を行うには膜面積を大きくとらなければならないが、平面状の膜を使うには大きな分離装置を作る必要があり、不経済である。そのため、平面状の膜をくるりと丸め、直径を0.3mm程度とした文字通りの「中空糸膜」が利用されているのだ。これを数千本から一万本繰り束ねて円筒形の容器に入れ、図1のような膜モジュールと呼ばれるものを作る。この図の例では長さ約25cm・直径約3.5cmのモジュールひとつに約2800本の中空糸膜が入っており、その膜面積は0.5m²にあたる。数値だけを見ても装置がコンパクトになったことが分かるだろう。しかしこれを一体どのように使うのだろう？ その例を次に紹介しよう。



医療にみる中空糸膜

現在、中空糸膜が最もよく利用されているのが医療分野である。「人工透析」と書かれた看板を街で見かけたことはないだろうか？ 人工透析とは、腎臓の機能が低下している患者に不可欠の治療であり、通常は腎臓で除かれる血液中の老廃物を、人工的に取り除く操作である。この操作に中空糸膜が用いられているのだ。

ここで透析操作の一連の流れを追ってみよう。まず患者から抜いた血をモジュールの中空糸膜の中に流す(図2)。一方中空糸膜を覆う容器にも別に入り口を作っておき、ここから透析液と呼ばれるあらかじめ調整しておいた液を入れて容器の出口へと流す。このため、束になった糸と糸との間は、常に透析液で満たされた状態である。つまり一本一本の中空糸膜を隔てて中が血液、外が濃度の低い透析液というわけだ。すると濃度の高い血液側から、低い透析液側へと老廃物が膜の中を拡散しながら移動していく。そうして老廃物を含んだ透析液を除去し、健康な人と同じ組成に近づけた血を患者の体に戻すのである。

しかし、現在の膜モジュールではまだまだ十分な分離が行えているわけではない。老廃物を次々と除去するには、モジュール内の透析液ができるだけ速く流れていくことが必要である。だが、現在はこれが十分に達成されていないのだ。束になった糸と糸との間を透析液と老廃物が流れていくと、どうしてもその隙間に物質の溜まる

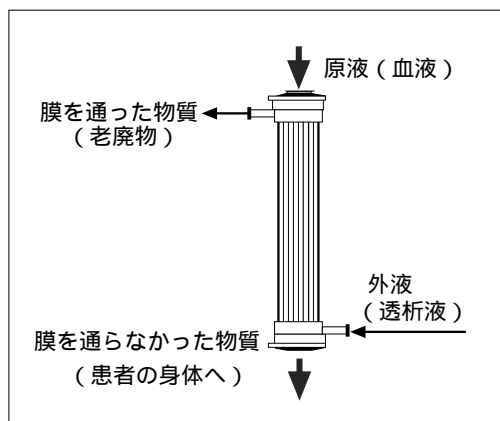


図2 人工透析での利用例

が出てきてしまうのである。物質が溜まるということは、その透析液の濃度が上がってしまうということだ。結果、膜の内外の濃度差が小さくなり、中の老廃物が外に出にくくなる。すなわち、効率が悪くなってしまふのである。

そこで吉川研究室で行っているのが、モジュール内の液体の圧力や流速の測定結果などという、多様なデータの収集から始まる研究である。それにより流体力学の立場から、膜モジュールという分離装置の性能評価に取り組んでいるのだ。またそれら进行分析することで、さらに効率のよい透析器の設計に向けた研究にも、意欲的に取り組んでいるのである。



連続操作にギャクセンを

もう一つ、中空糸膜が利用されている分野であるバイオプロセスに注目してみよう。バイオプロセスとは菌体を利用した酵素の生産等のことである。具体的にはバイオリアクター（生物を利用したシステムの総称）で菌体を培養し、ここから菌体の作り出した酵素を工業製品として取り出すことが目的である。その過程をこれから順に追ってみよう。

まず、バイオリアクターの中の菌と酵素を含んだ混合物を「限外ろ過」と呼ばれる膜モジュールに入れる(図3)。ここで低分子からなる不要物質が除去されるわけだ。このとき、菌や酵素は膜に空いた孔よりも大きいため、膜を通過できずにそのまま中空糸の中から出てくることになる。

そこで今度は、この菌と酵素を含んだ濃縮液を「精密ろ過」と呼ばれる膜モジュールに入れる。これには前述のモジュールに比べて、膜に大きな孔が空いている。このため、不要物質よりも大きく菌体より小さな酵素が膜を通過し、製品として取り出されるのである。

一方、膜を通れずに除去された菌体は再利用できるから、再びバイオリアクターに戻される。そ

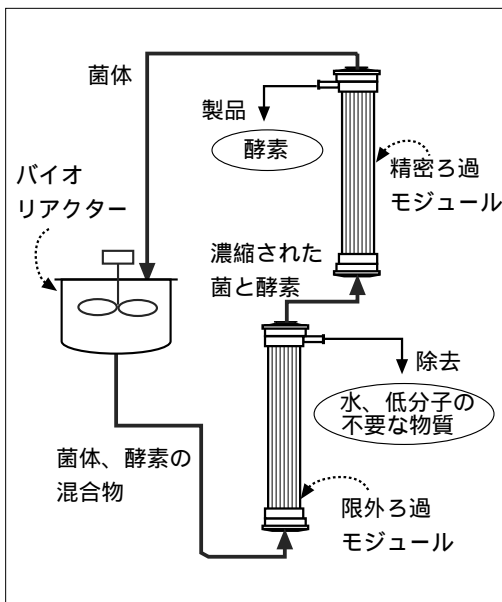


図3 バイオプロセス操作

してまた始めの操作から繰り返されるというわけだ。では、この一連の操作をこのまま続けていくとどうなるだろう。

一般にろ過を行うと、ろ紙の上に分離すべき固体が溜まっていく。しかし固体成分が溜まれば溜まるほど液が膜を通りにくくなっていき、効率が悪くなってしまふ。

同様に、バイオプロセスにおいても、菌体などの様々な物質を含んだ液を流していくと、膜の内側にゲル状物質が溜まっていく。すると液が膜を通るときの抵抗が大きくなり、生産性が落ちてしまうのだ。

このようなとき実験室で行う場合には、一回のろ過操作が終わったらろ紙を取り換えればよい。しかし工業的規模でろ過を行う場合は、長時間連続して使用されるため、膜あるいはモジュールを頻繁に取り換えることは出来ない。もし途中でモジュールを取り換えるとしたら、一時的に生産を止めることになるから、効率が悪くなってしまふ。そこで、生産を止めることなく問題を解決できる「逆洗」と呼ばれる操作を行うのだ。

ろ過を行っているときは通常、中空糸膜の内部の方が圧力が高く、圧力の低い外部に向かって液が流れている。逆洗とはこれを一時的に逆にして、外部の圧力を高く設定することにより、液を中空糸の外部から内部に流す操作である。これにより、膜の表面に溜まっていた物質を除去するのである。そうして再び流れ易くすることで、連続してろ過を行うのだ。

だが実際には、逆洗操作を行ってもそれほどうまく膜の穴に溜まった物質は取れてくれないのである。最初の数回は十分機能するのだが、回を重ねるにつれてどうしてもうまく機能しなくなる。更には、流れにくくなった後しばらく時間が経つと、一時的に今度は流れやすくなるという非常に不可解な現象も見せるのである。

そこで吉川研究室では、以上のような現象を明らかにしてより効率よく逆洗ができるよう、研究を行っているところである。



損して得とれ

前節で触れた「逆洗」について、もう少し掘り下げてみよう。

逆洗を行うと、膜を介した液の流れが逆流する。ということは、せっかく膜の中から外へと分離した物質が、また膜の中に戻ってきってしまうのではないのだろうか。それでは効率が悪くなってしまわないか？ 皆さんの中にはこう疑問に思われた方がいるかもしれない。これはまさにその通りで、戻ってきってしまうのである（図4参照）それにも関わらず、逆洗操作はやはり有効な手段なのだ。その理由をみてみよう。

逆洗のときに外側に流す液体には、中空糸膜の中に逆流しても支障のない、通常のろ過操作で膜を通して取り出されたる液を使う。前述の精密ろ過モジュールの場合、この液体が製品に当たるわけだ。

一方、除去された液体は原料である菌体を含んでいるため、再びバイオリクターに戻される。ところがこの液体には、逆洗操作によって膜の中に戻ってきた酵素も含まれている。このため、もともとバイオリクターの中にあった分離して取り出そうとしていた酵素を、再び元に戻してしまうことになる。

これだけをみれば確かに生産性が悪いのだが、酵素を含んだ膜の中の液体は、原料の中に戻されるのであって捨てられるわけではない。逆洗操作によって中空糸膜の中に戻る液の量というのは、実はそれほど多くないのである。平均して1回の逆洗操作で戻る製品の量は、原液の10%にも満たない。それくらいの量ならば堆積したものをは

がす方が、はるかに効率的なのだ。

この効率性をさらに高めようと、吉川研究室では現在、逆洗操作時における中空糸膜内外の圧力の計測等に取り組んでいる。それにより、どのような条件のときにどのくらい膜を通る液の量が復活するのか、その操作条件と液の復活量との相関関係を調べているのだ。そうした情報をフィードバックする形で、より効率のよい分離プロセスのための最適な制御量を求めようと、研究を行っているのである。

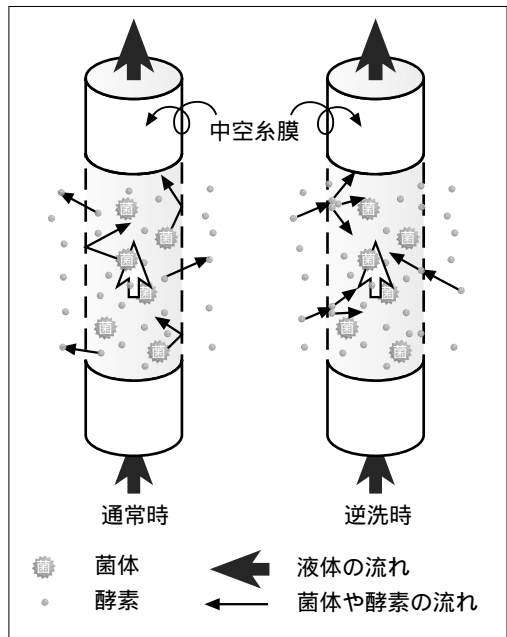


図4 逆洗時の酵素の動き

今までみてきたように、ものを作り出す反応を考えると、実際にものを作り出すことの間にはかなり大きな開きがある。物質の合成経路を研究するレベルから、工業的プロセスにおいてものを生産するレベルになったときに、初めて出てくる問題があるからである。それにどのように対処し、原料から製品までのプロセス全体を見渡したときに、どのような化学技術システムを導入するのが最善なのか。その最適な方法を探し出し、

より効率よい生産のためのプロセスを作り出す。これが化学工学の扱う領域なのである。

こうした研究に熱意を注いでおられる吉川先生に、今まで抱いていた化学工学という分野の認識を新たにしたいように思います。最後になりましたが、お忙しい中快く取材にご協力頂いた吉川先生と研究室の皆様にご心からお礼を申し上げますとともに、ますますの発展をお祈りいたします。

（深谷 実央）