

限外濾過法における膜およびゲル層特性の解析

Analysis of Membrane and Gel Layer Characteristics in Ultrafiltration

中 尾 真 一*・木 村 尚 史*

Shin-ichi NAKAO and Shoji KIMURA

膜分離法の一つである限外濾過法を対象に、そこで用いられる膜の溶質排除特性の解析法ならびに実用上大きな問題となる膜面ゲル層の特性の解析法について、これまでに筆者らが行ってきた研究を中心として、従来の研究の結果を解説した。なお、ゲル層の排除特性については、研究途上であることから、ここでは現象のみを簡単に記すにとどめた

1. 結 言

膜分離法と総称されるものには、大きく分けて透析法・電気透析法・圧力濾過法の3つがある。これらのうち、圧力濾過法は、膜の片側に機械的圧力を加えて溶媒(通常は水)のみを透過させ溶質との分離を行うもので、逆浸透法と本報で解説する限外濾過法とに代表される。この2法は分離対象とする溶質の大きさによって以下のように区別されるが、両者の境界そのものはそれほど明確ではない。すなわち、Michaels¹⁾の区分によれば、水分子の10倍程度の大きさまでの溶質を分離対象とするものが逆浸透法で、こういった溶液ではその浸透圧が高いため、これに打ち勝って溶媒を透過させるには、さらに高い機械的圧力を加えることが必要で、通常、30~60 atmで操作されている。これに対し限外濾過法は分子量数百以上のものを対象とし、このため浸透圧もあまり高くないので通常1~5 atm程度の加圧で十分である。

逆浸透法・限外濾過法に用いられる膜は、酢酸セルロースおよび芳香族ポリアミドが代表的なものであるが、限外濾過膜としては、このほかにポリスルホン・ポリオレフィン・ポリアクリロニトリルなど、各種の合成高分子膜が実用化されている。また、これらの膜を組み込んだ装置単位(モジュール)としては、平膜型・管状膜型・スパイラル型・中空糸型の4種が実用化されている。

限外濾過法は、分離に熱を用いないという利点を利用し、熱変性を嫌う食品工業分野での濃縮プロセスに急速に応用が進んでいる。一方、逆浸透法の最大の応用分野は海水やかん水の淡水化であり、すでに中近東などの水の乏しい地域では大型の実用プラントが稼動している。最近ではこれらの2法は、分離に熱を用いないことから従来の蒸留法などに比べ省エネルギー的である点も注目されるようになってきており、今後いっそう広範囲に

応用が進むものと予想される。

こういった実用化を進めていくうえで、よりよい膜の開発はきわめて重要なテーマであるが、その際問題となるのは、“よりよい膜とはどのような膜であるか”ということで、膜性能の相互比較を定量的に行うことが必要となる。こういった比較は、基本となる膜透過現象を正しく記述する輸送方程式を確立し、それに基づいて膜性能を表すパラメータを求め、それをいろいろな膜について比較することによって初めて実現される。しかしながら、限外濾過法についてはこの方面の研究はこれまでほとんどなされていなかった。

一方、逆浸透法・限外濾過法の実際の応用においては、原水中の懸濁物質や高分子溶質が膜面にゲル層と呼ばれる付着層を形成するが、これは大きな透過抵抗を持つため膜透過流速が著しく減少し、実用上の大きな障害となっている。また、通常このゲル層は共存溶質に対する排除能力も有しているため、分子量の大きなものと小さなものとを分ける分子量分画を行う場合などには、本来膜を透過するはずの小分子量溶質がゲル層によって排除されてしまい、分画ができなくなってしまう。こういったゲル層の挙動は逆浸透法と限外濾過法とであまり差はなく、同一の手法で解析できるものと考えられるが、これまではゲル層特性の定量的解析はほとんど試みられていなかった。

以上のような点に基づき、我々はこれまで限外濾過法を対象に、膜特性の解析法の確立、透過抵抗および溶質排除能力に関するゲル層特性の定量的な解析法の確立を目的として研究を行ってきた。ここでは、その研究結果を中心として、限外濾過法における膜およびゲル層特性の解析法について述べることにする。なお、逆浸透法・限外濾過法およびそれらの応用に関してはすでに多くの解説書²⁻⁶⁾が出版されているので、詳細についてはそれらを参照していただきたい。

* 東京大学生産技術研究所 第4部

2. 膜特性の解析

2.1 濃度分極

膜の溶質排除特性は、通常次式で定義される見かけの排除率 R_{obs} を用いて表される。

$$R_{obs} = 1 - C_p / C_b \quad (1)$$

ここで、 C_b, C_p はそれぞれ原液、膜透過液濃度である。分子量の異なる 6 種の溶質を用いて限外濾過実験を行った結果⁷⁾ を図 1, 2 に示すが、これらの図から明らかなように、 R_{obs} は膜面上を流れる原液の流速あるいは加える圧力によって変化する。したがって R_{obs} で膜性能を正確に記述することはできない。

この R_{obs} の流速あるいは圧力依存性は、濃度分極現象と呼ばれる現象に起因している。これは、膜透過流束によって膜面に運ばれてきた溶質が膜によって排除され、膜面にたまって膜面濃度が原液濃度より高くなる現象で

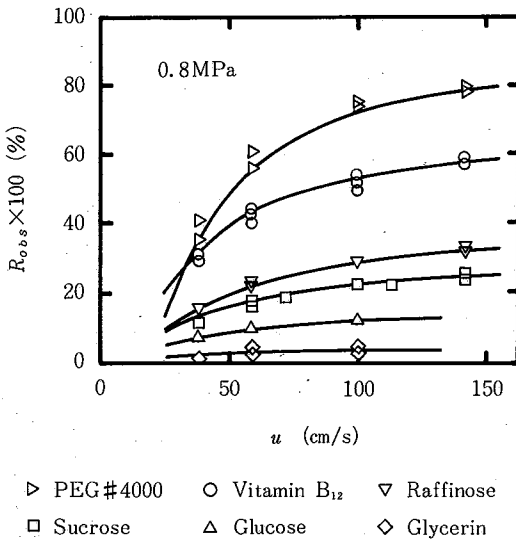


図 1 見かけの排除率の流速依存性(記号は、図 2, 4~7 も同じ)

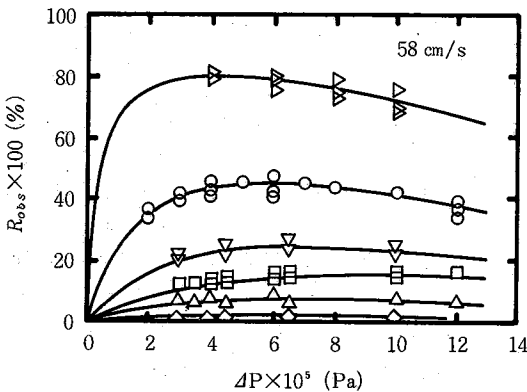


図 2 見かけの排除率の圧力依存性

ある。したがって、実際に膜が排除している溶液の濃度は C_b ではなく膜面濃度 C_m であり、膜の排除性能は次式で定義される真の排除率 R で表されねばならない。

$$R = 1 - C_p / C_m \quad (2)$$

ところが、膜面濃度 C_m は実測することができないため、図 3 に示す濃度分極モデルに基づいて導かれた濃度分極の式によって計算される。⁹⁾

$$\frac{C_m - C_p}{C_b - C_p} = \exp\left(\frac{J_v}{k}\right) \quad (3)$$

ここで、 k は化学工学で通常用いられている物質移動係数である。

この物質移動係数は、流速変化法^{9),10)}を用いて求めることができる。すなわち、 k は液流速 u と次の関係にあり

$$k \propto u^a \quad (4)$$

(4)式を用いて(3)式を書き直すと

$$\ln\left(\frac{1 - R_{obs}}{R_{obs}}\right) = \ln\left(\frac{1 - R}{R}\right) + b\left(\frac{J_v}{u^a}\right) \quad (5)$$

と書ける。そこで、圧力一定のもとで流速を変化させる実験を行い R_{obs} を測定し、(5)式左辺と J_v/u^a をプロットすれば、縦軸への外挿値として R を求めることができ、 k の値は(3)式から各流速ごとに求めることができる。当然、 R は流速によらない一定値となる。

物質移動係数は、通常化学工学で用いている物質移動に関する相関式から求めることもできる。逆浸透法については、円管内乱流における Deissler の相関式¹¹⁾

$$N_{Sh} = 0.023 N_{Re}^{0.75} N_{Sc}^{0.25} \quad (6)$$

の有効性が報告されているので、¹²⁾我々も管型限外濾過膜について(6)式の妥当性を検討してみた。⁷⁾図 4 には、流速変化法で求めた k の値と(6)式との比較を示しているが、両者はよく一致している。したがって、濃度分極現象の影響を補正するために必要な物質移動係数は、溶質の拡散係数や溶液粘度が既知の場合には(6)式で、未知の場合には流速変化法の実験で、いずれの場合にも求

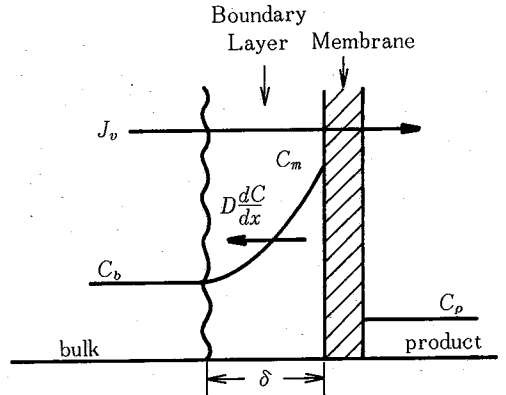


図 3 濃度分極モデル

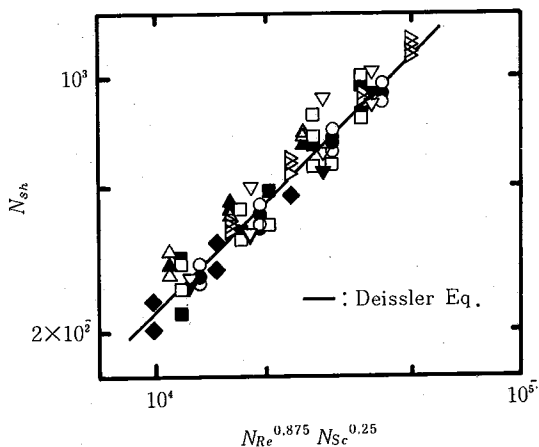


図4 実測の物質移動係数と計算値との比較

めることができるわけである。

このようにして求めた k の値を用いて (3) 式から C_m を求め、(2) 式に代入すると R を計算することができる。得られた R に流速依存性のないことはすでに述べたが、圧力依存性は依然として残っており、膜性能を表すパラメータとしては R もまた不適當であるといえる。

2.2 輸送方程式

流速や圧力などの操作条件によらず膜性能を正しく表すことができるパラメータを決めるためには、膜透過現象を記述する輸送方程式が必要となる。すでに逆浸透法を対象にいくつかの輸送方程式が提案されているが、それらは大きく2種に大別される。一つは、ある特定の透過機構を仮定し、それに基づいて展開されたもので、^{8),13-16)} いま一つは、膜をいわゆる“black box”と考え不可逆過程の熱力学に基づいて現象論的に導かれたものである。我々は、限外濾過膜の透過機構が明らかとなっていない時点では“black box”の取扱いの方が合理的であろうと考え、この方向で限外濾過膜の輸送方程式を検討したので、⁷⁾ 以下にその結果を紹介する。

Kedem と Katchalsky¹⁷⁾ は、不可逆過程の熱力学に基づいて次の輸送方程式を導いた。

$$J_v = L_p(\Delta P - \sigma \Delta \Pi) \quad (7)$$

$$J_s = P(C_m - C_p) + (1 - \sigma) J_v \bar{C} \quad (8)$$

膜特性は、純水の透過係数 L_p 、反射係数 σ 、溶質の透過係数 P の3つのパラメータを用いて表される。(8)式中の \bar{C} は膜両側の平均濃度を表すが、平均としてどのような値をとるかが問題となる。そこで、Spiegler と Kedem は、¹⁸⁾ (8) 式を微分形に書き膜厚方向に積分することでこの問題を解決した。得られた結果は真の排除率を用いて次のように書ける。

$$R = \frac{\sigma(1-F)}{1-\sigma F} \quad (9)$$

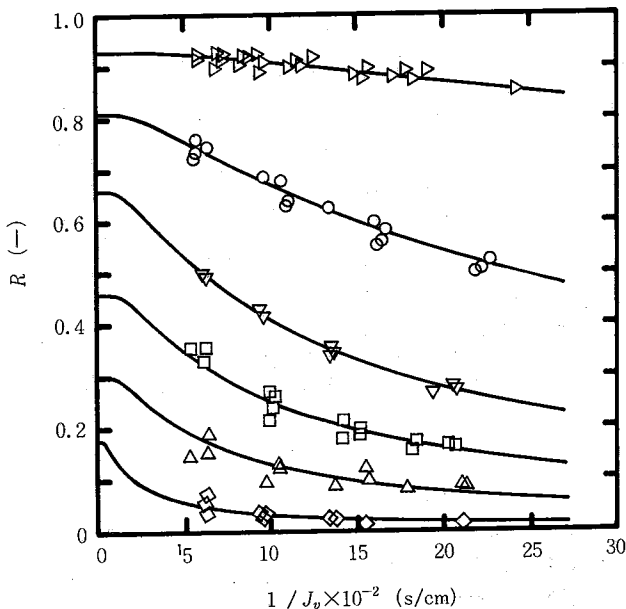


図5 真の排除率と膜透過流速との関係

ただし

$$F = \exp\{-(1-\sigma)J_v/P\} \quad (10)$$

(7) 式は同様の積分を行っても変化しないため、けっきょく(7),(9),(10)式が輸送方程式となる。

次に3つのパラメータの決定方法であるが、 L_p の値は純水の透過実験から容易に計算できる。 σ と P についてはいろいろな決定法を検討した結果、圧力を変化させた実験から得られた R と J_v のデータに対して(9),(10)式のカーブフィッティングを行って求める方法が最もよいことが明らかとなった。図5にはこのカーブフィッティングの一例を示してある。 R が $1/J_v$ に対してプロットしてあるのは、(9),(10)式で

$$J_v \rightarrow \infty : R \rightarrow \sigma$$

の関係があることから、縦軸への外挿値として σ の値を見やすくするためである。図から明らかなように、(9),(10)式は実験データとよく一致しており、限外濾過法の輸送方程式として適當であるといえる。

2.3 細孔モデル

膜の溶質排除能力を表すパラメータ σ, P は現象論的に導かれたもので、透過機構や膜構造を明らかにしていくための情報を与えるものではない。したがって、得られた σ, P が物理的にどういう意味をもっているかは、何らかのモデルに基づいて考察しなければならない。こういったモデルについては、生体膜の分野で細胞壁の透過現象を対象に、細管を通しての輸送として解析する手法が古くから提案されていた。これが、いわゆる細孔モデルと呼ばれるものである。

細孔モデルを最初にまとめた Pappenheimer ら¹⁹⁾によれば、細管内の溶質の流れは濾過流れと拡散流れとからなり、ともに細管入口での立体障害と内部での摩擦力とによって妨害される。この細孔モデルは、その後 Renkin²⁰⁾によってさらに発展させられたが、膜性能パラメータである σ, P とはついに結びつかなかった。

これに対して Verniory ら²¹⁾は、透過機構に関する摩擦モデル^{22),23)}を介して、この細孔モデルを不可逆過程の熱力学に基づく(7),(8)式と結びつけたが、この修正細孔モデルによって、 σ, P の物理的意味および限外濾過膜の構造を明らかにすることが可能となった。いま、膜にあっては細孔を半径 r_p 、長さ ΔX の円筒と仮定し、溶質は半径 r_s の球であるとする、溶質の膜透過流束 J_s は、修正細孔モデルによれば次式で与えられる。

$$J_s = Df(q)S_D(A_k/\Delta X)(C_m - C_p) + J_v g(q)CS_F \quad (11)$$

ここで、 A_k は細孔断面の合計と膜面積との比、 D は溶質の自由溶液中での拡散係数である。 S_D, S_F は、それぞれ拡散および濾過流れに対する立体障害因子で、Ferry によって $q = r_s/r_p$ の関数として次式で与えられている。²⁴⁾

$$S_D = (1 - q)^2 \quad (12)$$

$$S_F = 2(1 - q)^2 - (1 - q)^4 \quad (13)$$

$f(q), g(q)$ は円筒壁の影響に対する補正係数で、Haberman と Sayre²⁵⁾ によって同じく q の関数として次式で与えられている。

$$f(q) = \frac{1 - 2.105q + 2.0865q^3 - 1.7068q^5 + 0.72603q^6}{1 - 0.75857q^5} \quad (14)$$

$$g(q) = \frac{1 - (2/3)q^2 - 0.20217q^5}{1 - 0.75857q^5} \quad (15)$$

$f(q), g(q)$ については、Bohlin も同様な式を導いている。²⁶⁾ けつきよく、(11)式を(8)式と比較すれば次の関係を得ることができる。

$$\sigma = 1 - g(q)S_F \quad (16)$$

$$P = Df(q)S_D(A_k/\Delta X) \quad (17)$$

(16),(17)式と同様の結果は Bean²⁷⁾ も導いているが、Verniory らの導出の方が適当であると思われる。

この修正細孔モデルを用いての解析は、以下の手順で行われる。まず、前述した方法で求めた σ を(16)式に代入すると q の値を求めることができる。ここで、溶質半径を Stokes-Einstein の式

$$r_s = \eta T / 6\pi\mu D \quad (18)$$

から求めると、得られた q の値から膜の細孔半径 r_p を求めることができる。次に、やはりカーブフィッティングで求められた P の値を(17)式に代入し、 σ から得られた q の値と溶質の拡散係数の値を用いれば、 $(A_k/\Delta X)$ の値も求めることができる。膜構造が r_p と $(A_k/\Delta X)$ とによって表されることはいうまでもない。

我々はこの手順に従って、図5に示したカーブフィッティングから求めた6種の溶質についての σ, P を解析し、 $r_p, (A_k/\Delta X)$ を計算してみた。⁷⁾ その結果、 r_p については一定値を得ることができたが、本来同一膜では一定であるはずの $(A_k/\Delta X)$ が溶質半径によって異なってしまった。その後いろいろ検討してみると、 $f(q), g(q)$ による壁の影響の補正が大きすぎる、(11)式の導出過程で無視した圧力勾配項の影響が実際は無視できないことなどが明らかとなった。そこでこれらの点を考慮し、新たに立体障害細孔モデルを提案した。²⁸⁾ このモデルによれば、 σ, P は次式で与えられる。

$$\sigma = 1 - S_F[1 + (16/9)q^2] \quad (19)$$

$$P = DS_D(A_k/\Delta X) \quad (20)$$

(19),(20)式を用いて前述の6溶質について解析した結果を、図6,7に示す。図より明らかなように、 $r_p, (A_k/\Delta X)$ とほぼ一定値が得られ、 $r_p = 8.4 \times 10^{-8}$ cm、 $A_k/\Delta X$

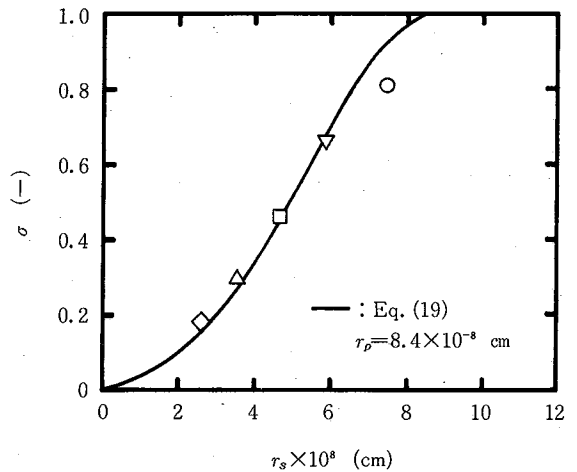


図6 反射係数 σ と溶質半径との関係

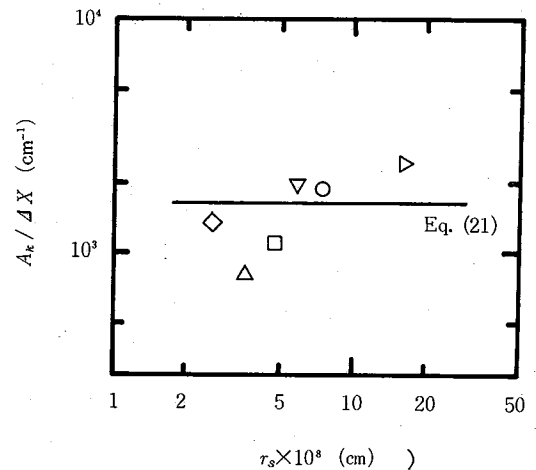


図7 各溶質についての $A_k/\Delta X$ の値

$\Delta X = 1600 \text{ cm}^{-1}$ となった. ($A_k/\Delta X$) については, 別に Hagen-Poiseuille の式

$$J_w = \frac{r_p^2}{8\mu} \cdot \frac{A_k}{\Delta X} \cdot \Delta P \quad (21)$$

に (19) 式から求めた r_p の値を代入して求めることもできる. 図 7 にはこのようにして求めた値も実線で示してあるが, (20) 式から求めた値とよく一致している.

以上のことから, 限外濾過膜の透過機構および膜構造は, 立体障害細孔モデルによって表せることが明らかであろう. なお, 細孔モデルの仮定によれば, A_k の値は膜の含水率と等しくなるため,²⁷⁾ こういったデータがあれば膜構造を更に詳細に考案することができるものと考えられる. また, 最近の傾向としては, 電子顕微鏡で細孔を観察し, 得られた結果を細孔モデルによる解析結果と比較検討しようという方向に研究が進んでいるようである.

3. ゲル層特性の解析——膜透過流束に及ぼす影響

3.1 ゲル層の膜透過流束に及ぼす影響

膜面にゲル層が形成されると膜透過流束は著しく減少するが, その挙動は逆浸透法でも限外濾過法でもそれほど大差はなく, 以下のように要約される. すなわち, ゲル流速状態下では,

- (1) 膜透過流束は圧力によらず一定となる. また, この一定値は膜によらない.
- (2) 上記の一定流束値を決めるものは, 原液流速と濃度の 2 つで, 流速が大きくなるほど一定値も大きく, 濃度が高いほど一定値は小さくなる.

これらの挙動はすでに数多く報告されているが,²⁹⁾ 図 8, 9 にも, 卵白アルブミンとポリビニルアルコールのゲル層の場合について, その一例を示す.^{30), 31)} 図 9 では, 液流速を再び 95 cm/s に戻すと J_v の値ももとの値に戻っており, これよりこのゲル層形成が可逆的な現象であることが明らかである. こういったゲル層の挙動は, 従来ゲル分極モデルと呼ばれる考え方に基いて解析されていた.

3.2 ゲル分極モデル

これは, 2.1 節で述べた濃度分極モデルと同様の考え方で, 異なる点は, 膜面にゲル層が形成されるので膜面濃度 C_m のかわりにゲル層濃度 C_g を用いる点である. また, ゲル層形成成分は通常膜をほとんど透過しないので, $C_p \ll C_g, C_b$ となる. これらの点を考慮すると, (3) 式に相当するゲル分極の式は次式で与えられる.

$$J_v = k \ln(C_g/C_b) \quad (22)$$

従来のゲル分極モデルの取扱いでは,^{29), 32)~34)} ゲル層濃度 C_g は溶質によって決まる一定値であると考えられており, (22) 式から J_v と $\ln C_b$ とをプロットするとその傾きから物質移動係数 k が, $J_v = 0$ の切片から C_g の値が

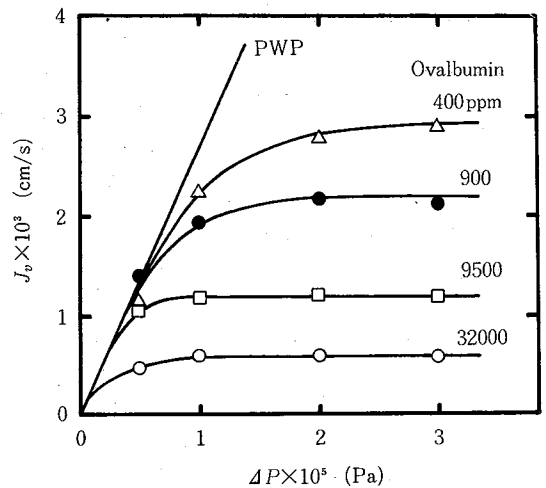


図 8 ゲル層形成時の膜透過流束と圧力との関係

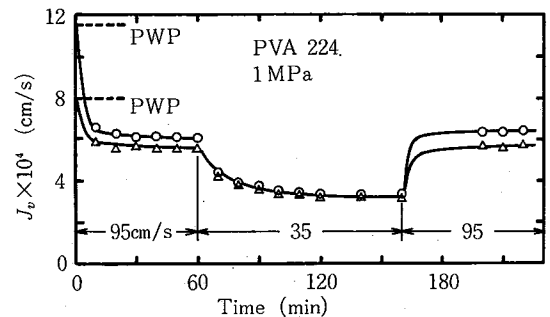


図 9 ゲル層形成時の膜透過流束の経時変化

求まるとされ, これに基づいて解析がなされていた.

ところが, すでに報告されている多くの限外濾過実験の結果を検討してみると, この従来の取扱いに対して次のような疑問が生じてくる.

- (1) すでに報告されている C_g の値は意外に小さく, ゲルというよりは少し粘度の高い液程度である.
- (2) 膜面濃度に相当する C_g の値が一定であるにもかかわらず, C_b を大きくしていくと C_p も一緒に大きくなる.
- (3) C_b の変化にともなう溶質の拡散係数や粘度の変化にもかかわらず, 傾きで与えられる k は一定となる.

そこで我々は, C_g が一定であるという仮定が不適当なのではないかと考え, 卵白アルブミンとポリビニルアルコールを用いて限外濾過実験を行い, 膜面に形成されたゲル層をかき出してその濃度を実測してみた.³¹⁾ 結果は図 10 に示すように, 原液濃度が高いほど, また流速が小さいほど C_g の値は大きくなっている. したがって, 従来のゲル分極モデルにおける C_g が一定という取扱いは誤

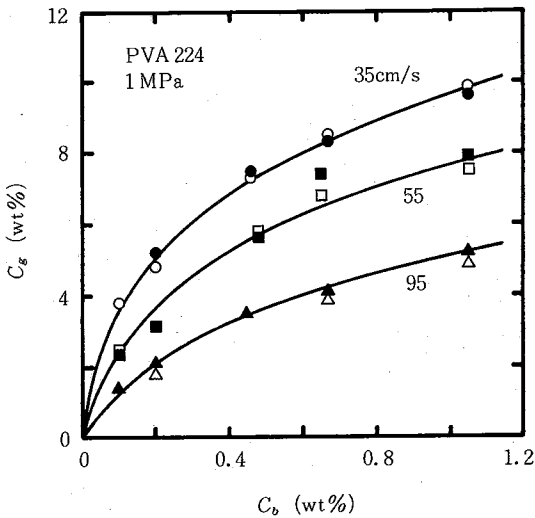


図10 ゲル層濃度と原液濃度との関係

りであると言える。

C_g が一定ではないとすると、従来の方法で J_v vs. $\ln C_o$ プロットの傾きから物質移動係数を求めることもできなくなる。また、ゲル層形成時には J_v は流速によって変化するため、前述した流速変化法を用いることもできない。そこで、実測した C_g の値を用いて(22)式から k を求め、物質移動に関する Deissler の相関式(6)式と比較してみたところ両者はよく一致した。³¹⁾ したがって、ゲル層形成時の物質移動係数についても、Deissler の相関式を用いて推算することが可能である。

3.3 ゲル層濃度とその透過抵抗

限外濾過法における膜透過流束は(22)式を用いて計算することもできるが、これとはまったく別の考え方である、いわゆる抵抗則に基づいて求めることもできる。膜の透過抵抗を R_m 、ゲル層の透過抵抗を R_g とし、この2つが直列につながっているとすると、浸透圧は通常考慮しなくてよいことから、膜透過流束 J_v は次式で与えられる。

$$J_v = \Delta P / (R_m + R_g) \tag{23}$$

限外濾過法の実用においては、与えられた操作条件下でゲル層形成時に J_v がどのくらいになるかを予測することは非常に重要であるが、 J_v を与える(22)式には圧力の項が含まれず、また(23)式には流速や濃度の項が含まれない。したがって、与えられた圧力、流速、濃度のもとで J_v がいくらになるかを推算するためには、(22)式と(23)式とを結びつける何らかの関係が必要となる。

そこで、(22)、(23)式を結びつける最も簡単な関係として R_g と C_g の相関をとってみたところ、図11に示すような1.7乗の関係を得ることができた。³¹⁾ すなわち、卵白アルブミンについては

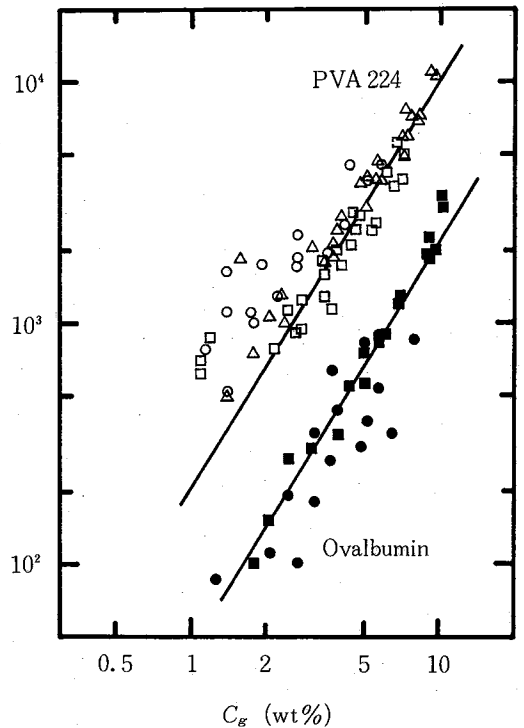


図11 ゲル層の透過抵抗とその濃度との関係

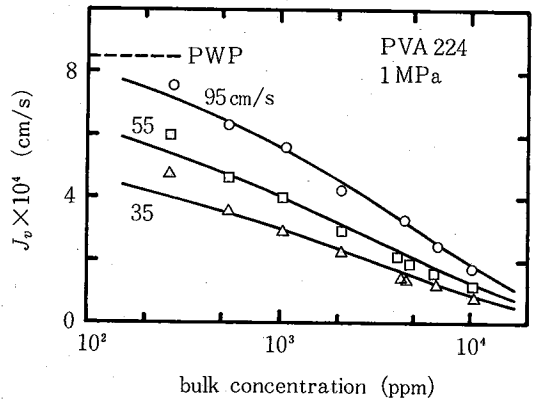


図12 ゲル層形成時の膜透過流束とその推算値との比較

$$R_g = 4.5 \times 10^2 \cdot C_g^{1.7} \tag{24}$$

ポリビニルアルコールについては

$$R_g = 2.0 \times 10^3 \cdot C_g^{1.7} \tag{25}$$

となった。これらの関係は経験的なもので、その物理的意味はいまだに不明であるが、膜特性や操作条件によらず成立することから、 J_v を推算するうえではきわめて有用な相関である。

以上の結果から、(22)、(23)式と1.7乗則を用いることで J_v の推算が可能となる。(22)式の k は、与えられた流

速から(6)式を用いて計算される。図12は、ポリビニルアルコールのゲル層について、 J_v の推算値と実測値との比較を示したものであるが、図から明らかなように両者はよく一致しており、1.7乗則が妥当であることを示している。この1.7乗則については、その後Watanabeら³⁶⁾が、逆浸透法におけるペクチンのゲル層についても成り立つことを報告している。

4. ゲル層の解析——溶質排除に及ぼす影響

膜面に形成されたゲル層が、共存溶質に対して排除能力をもっているということは以前から知られていたが、公表されたデータでこの点を明らかにしているものは少ない。血液濾過の際に、血中タンパクのゲル層が形成されると、分子量1000くらいの尿毒症原因物質が膜を透過しなくなる現象などもこの例である。Dorsonらは、タンパクゲル層の各種の共存溶質に対する排除能力について、定性的ではあるが多くの実験を行いその結果を報告している。³⁶⁾また、逆浸透法においては、廃水処理を行う際に原水中の懸濁物質が膜面に付着層を形成するが、これが脱塩能力を有している例も報告されている。^{37),38)}

こういったゲル層の溶質排除能力を定量的に解析した例は、これまでまったく報告されていない。そこで、我々は現在この点について研究を行っているが、残念ながらいまだ完全には解析法が確立されていない。しかし、結果の一部についてはすでに発表してあるので、³⁹⁾詳しくはそれを参照していただくことにし、ここでは紙面の制限もあることから具体的な解析法についてはふれないことにする。

5. 結 言

膜分離法、そのなかでも特に逆浸透法と限外濾過法の最近の著しい発展には目をみはるものがあり、NaClなどの電解質はもとよりアルコールなどの各種有機物までほとんど100%近く排除する高性能の逆浸透膜や、有機溶媒などの非水系の処理ができる限外濾過膜など、すぐれた膜が次々と開発されている。また、これにともなって応用分野も急速に広がりつつある。

しかしながら、これらの膜開発や応用分野の開拓において基礎となるべき膜特性の解析法、あるいはゲル層特性の解析法などの研究は、従来特に限外濾過法において著しく立ち遅れていた。

本報では、こういった解析法について、これまで我々が行ってきた研究を中心に、従来の研究もあわせて解説したが、それらをまとめてみると、膜についてはその構造との関連で溶質の排除能力を議論できるところまで

できると言える。したがって、今後は希望の排除能力を有する膜を得るためには、どのようにして膜構造をコントロールしたらよいかを検討していくことが重要となる。

一方、ゲル層の透過抵抗については、1.7乗則を用いることで、与えられた操作条件下での膜透過流束の推算が可能となった。これは、装置設計などの際にはきわめて重要なことで、今後はこの1.7乗則についてのより理論的な研究が必要となろう。

ゲル層の溶質排除特性については、いまだ解析法が十分には確立していない。しかしながら、我々も現在この点について研究を進めているので、まもなく定量的な解析も可能になるものと考えられる。

(1982年2月26日受理)

記 号

A_k	全細孔断面積と膜面積の比	(—)
C	濃度	(mol/cm ³),(wt%)
D	拡散係数	(cm ² /s)
$f(q),g(q)$	拡散流れ、濾過流れに対する細孔壁の影響の補正係数	(—)
J_s	溶質の膜透過流束	(mol/cm ² ·s)
J_v	膜透過体積流束	(cm ³ /cm ² ·s)
k	物質移動係数	(cm/s)
κ	ボルツマン定数	(erg/deg)
L_p	純水の膜透過係数	(cm ³ /cm ² ·s·Pa)
N_{Re}	レイノルズ数	(—)
N_{Sc}	シュミット数	(—)
N_{Sh}	シャーウッド数	(—)
P	溶質の膜透過係数	(cm/s)
ΔP	膜両側の圧力差	(Pa)
q	r_s/r_p	(—)
R	真の排除率	(—)
R_g, R_m	ゲル層および膜の透過抵抗	(Pa·s·cm ² /cm ³)
R_{obs}	みかけの排除率	(—)
r_p	細孔半径	(cm)
r_s	溶質半径	(cm)
S_D, S_F	拡散流れ、濾過流れに対する立体障害因子	(—)
T	絶対温度	(K)
u	液流速	(cm/s)
ΔX	細孔長さ	(cm)
μ	粘度	(Pa·s)
$\Delta\pi$	膜両側の浸透圧差	(Pa)
σ	反射係数	(—)

参考文献

- 1) Michales, A. S.: in "Progress in Separation and Purification vol. I", E. S. Perry ed., Interscience, New York, p. 297 (1962)
- 2) Flinn, J. E. ed.: "Membrane Science and Technology", Plenum Press, New York (1970)
- 3) 萩原文二, 橋本光一編: 「膜による分離法」, 講談社(1975)
- 4) 木村尚史, 大矢晴彦, 鈴木彰: 「逆浸透プロセス」, 食品工業技術調査会 (1973)
- 5) 大矢晴彦: 「逆浸透法・限外濾過法 I 理論」, 幸書房 (1976)
- 6) 大矢晴彦編著: 「逆浸透法・限外濾過法 II 応用, 膜利用技術ハンドブック」, 幸書房 (1978)
- 7) Nakao, S. and S. Kimura: J. Chem. Eng. Japan, vol. 14, 32 (1981)
- 8) Kimura, S. and S. Sourirajan: AIChE J., vol. 13, 497 (1967)
- 9) Jonsson, G. and C. E. Boesen: Desalination, vol. 21, 1 (1975)
- 10) 木村尚史: 日本海水学会誌, 27巻, 295 (1974)
- 11) Deissler, R. G.: NACA report, No. 1210 (1955)
- 12) Derzansky, L. J. and W. N. Gill: AIChE J., vol. 20, 751 (1974)
- 13) Merten, U.: in "Desalination by Reverse Osmosis", U. Merten ed., MIT Press, Cambridge, p. 15 (1966)
- 14) Sourirajan, S. and T. Matsuura: Proc. EPA Symp. Textile Industry Technology, EPA-600/2-79-104 (1979)
- 15) Jonsson, G. and C. E. Boesen: Desalination, vol. 17, 145 (1975)
- 16) Pusch, W.: Ber. Bunsenges. Physik. Chem., vol. 81, 269 (1977)
- 17) Kedem, O. and A. Katchalsky: Biochim. Biophys. Acta, vol. 27, 229 (1958)
- 18) Spiegler, K. S. and O. Kedem: Desalination, vol. 1, 311 (1966)
- 19) Pappenheimer, J. R., E. M. Renkin and L. M. Borrero: Am. J. Physiol., vol. 167, 13 (1951)
- 20) Renkin, E. M.: J. Gen. Physiol., vol. 38, 225 (1954)
- 21) Verniory, A., R. Du Bois, P. Decoodt, J. P. Gasse and P. P. Lambert: J. Gen. Physiol., vol. 62, 489 (1973)
- 22) Spiegler, K. S.: Trans. Faraday Soc., vol. 54, 1408 (1958)
- 23) Kedem, O. and A. Katchalsky: J. Gen. Physiol., vol. 45, 143 (1961)
- 24) Ferry, J. D.: *ibid.*, vol. 20, 95 (1936)
- 25) Haberman, W. L. and R. M. Sayre: David Taylor Model Basin Report No. 1143, Washington, D. C., U. S. Navy Dept. (1958)
- 26) Bohlin, T.: Trans. Roy. Inst. Technol. (Stockholm), No. 155 (1959)
- 27) Bean, C. P.: in "Membranes—A Series of Advances Vol. 1", G. Eisenman ed., Marcel Dekker, Inc., New York, p. 1 (1972)
- 28) Nakao, S. and S. Kimura: to be published in J. Chem. Eng. Japan
- 29) たとえば, Blatt, W. F., A. Dravid, A. S. Michaels and L. Nelson: in "Membrane Science and Technology", J. E. Flinn, ed., Plenum Press, New York, p. 47 (1970)
- 30) 山本敏博: 東京大学工学部化学工学科卒業論文 (1978)
- 31) Nakao, S., T. Nomura and S. Kimura: AIChE J., vol. 25, 615 (1979)
- 32) Baker, R. W. and H. Strathman: J. Appl. Polym. Sci., vol. 14, 1197 (1970)
- 33) de Filippi, R. P. and R. L. Goldsmith: in "Membrane Science and Technology", J. E. Flinn ed., Plenum Press, New York, p. 33 (1970)
- 34) Porter, M. C.: Ind. Eng. Chem. Product Research Develop., vol. 11, 234 (1972)
- 35) Watanabe, A., S. Kimura, Y. Ohta, J. M. Randall and S. Kimura: J. Food Sci., vol. 44, 1505 (1979)
- 36) Dorson, W. J., Jr., D. J. Cotter and V. B. Pizziconi: Trans. Amer. Soc. Artif. Int. Organs, vol. 21, 132 (1975)
- 37) Sheppard, J. D., D. G. Thomas and K. C. Channabappa: Desalination, vol. 11, 385 (1972)
- 38) Kimura, S. and S. Nakao: Desalination, vol. 17, 267 (1975)
- 39) Nakao, S. and S. Kimura: ACS Symposium Series, No. 154, Synthetic Membranes, vol. 2, 119 (1981)