●特集：食品への膜の応用

食品工業における膜のファウリングと洗浄

中西一弘・田中孝明・崎山高明

岡山大学工学部生物応用工学科 ☎ 700 岡山市津島中 3-1-1

Fouling of Membranes used in Food Industry and Its Cleaning

Kazuhiro Nakanishi, Takaaki Tanaka, and Takaharu Sakiyama

Department of Biotechnology, Faculty of Engineering, Okayama University
3-1-1 Tsushima-Naka, Okayama 700, Japan

Fouling of membranes always takes place during concentration or separation of liquid foods and fermentation broths. Membrane fouling not only decreases permeation flux but also sieving characteristics. Moreover, the extent of fouling affects greatly the efficiency of cleaning to be carried out after operation. In this review, we summarize the fouling mechanism and introduce some experimental results related to cleaning as well as fouling of the membrane.

Key words : membrane/ultrafiltration/microfiltration/fouling/specific resistance/cleaning

はじめに

近年、逆浸透法や限外濾過法などの各種膜分離法が液状食品の濃縮や分離に広く利用されてきている。膜分離法は常温での操作が可能であり、しかもエネルギー消費に着目すると、原理的には加熱蒸発法や凍結濃縮法よりも優れている。しかし、膜処理操作においても、他の食品製造工程の場合と同様に、濾過中に食品成分が膜表面や膜孔内に吸着、付着、目詰まりする。この現象を膜のファウリングと呼ぶ。膜のファウリングは、膜透過流速や分画能という膜性能の低下を引き起こすだけでなく、その程度は操作終了後の膜洗浄の効率をも左右する^{1, 2)}。

本稿では、膜のファウリングの基礎的諸因子を

概説すると共に、いくつかのファウリング現象の具体例を取り上げて紹介する。さらに、ファウリングの対策や膜の洗浄についても触れる。

1. 膜処理におけるファウリング

1.1 膜分離の対象となる液状食品の特徴

膜分離法は、果汁、ホエー、スキムミルクや牛乳などの液状乳製品の濃縮、タンパク質や糖などの分離精製、牛乳やビール、ワインなどの除菌・清澄濾過、発酵食品からの除菌など広い分野に應用されている³⁾。したがって、これらの液の中には糖や金属イオンなどの低分子、タンパク質や多糖などの高分子、ミセルや微生物菌体のような粒子状物質など多種多様な成分が含まれている。液

Fig. 1 Schematic Illustration of Membrane Fouling
 (a) Aspect at the Initial Stage of Filtration
 (b) Adsorption of Solute onto the Membrane Surface and Concentration Polarization
 (c) Formation of Deposited Layer : The solute coagulate and adheres to the membrane surface

状食品に含まれる成分の多くが、程度の差はあるものの膜のファウリングの原因物質となる。タンパク質や多糖などの高分子物質は、溶液の温度、pH、イオン強度やせん断応力の存在によっても構造や性質が変化するが、このような変化もファウリングに影響を及ぼす。さらに、食品中の低分子と高分子の間で、あるいは高分子間で化学的、あるいは物理的な相互作用が生じ、複合体を形成

したり、ゲル状物質に変化することが多い⁴⁾。これらの現象は膜のファウリングを促進する。

1. 2 膜のファウリング現象

膜のファウリングは、一般には、処理液中に含まれる溶質や微粒子による膜の化学的、あるいは物理的变化の結果生じる不可逆的な膜性能の低下として定義される⁵⁾。膜のファウリングにより、膜透過流束（単位面積あたりの濾過速度）が低下するだけでなく、分画能も変化する。膜濾過は、溶液を膜面に水平に流すクロスフロー方式 (Crossflow filtration) と膜面に垂直に流すデッドエンド方式 (Dead-end filtration) に大別されるが、いずれの場合も程度の差はあるもののファウリングの機構は本質的には同じである。

これまでの研究成果から推定される、クロスフロー濾過における膜のファウリングの様子を図1に示す⁶⁾。濾過を開始すると、膜間圧力差により、膜面に垂直に膜透過流が生じる。この膜透過流により、溶液に含まれる溶質や粒子は膜面に向かって運ばれる (図1-a)。膜孔径よりも十分に小さい溶質は、膜孔を通過する。溶質の一部は膜表面上や膜孔壁面に吸着する (図1-a, b)。この場合の吸着のモードは、通常単分子層吸着である。後述するように、タンパク質分子の中には多分子層吸着を起こすものもある。多分子層吸着が進行すると、膜孔が狭くなり、閉塞 (目詰まり) が起こる (図1-b)。膜孔と同程度の大きさの物質は、膜孔を閉塞し易い。一方、膜孔径よりも大きい分子や粒子は膜によって阻止されるので、膜近傍における濃度が流体本体中よりも高くなる (図1-b)。この現象は濃度分極と呼ばれている。濃度分極の結果、濾過速度が低下するが、これは膜透過流束が、膜面近傍に形成される流体境界膜を膜面から流体本体中への濃度分極した溶質の拡散速度に支配されるからである。濃度分極現象による膜透過流束の低下は、循環液流速や濃度などに対応した可逆的な現象であるので、ファウリングには含めない。膜面近傍での溶質の濃度上昇やpH変化により、沈澱物や凝集物が形成され、それらが、膜面上で付着層を形成する (図1-c)⁷⁾。付着層の形成により、膜透過流束が低下する。付

着層の形成により、膜孔径よりも小さい分子も膜により阻止されるので、膜面近傍での溶液の浸透圧が上昇し、有効な膜間圧力差が低下する。この結果、膜透過流束はさらに低下する⁸⁾。このように付着層の形成は膜のファウリングの重要な原因の1つである。

デッドエンド型濾過においては、膜面に水平な流れが存在しないために、通常クロスフロー濾過の場合よりもファウリングの程度は大きい。

2. 膜のファウリング機構

1. で述べたように、膜のファウリング現象は、基本的には①膜孔壁面や膜表面上への溶質の吸着、②膜孔の閉塞（目詰まり）、③膜表面上への付着層（ゲル層）の形成の3つに大別される。いずれの機構が支配的であるかは基本的には溶質と膜孔の大きさの相対関係で決まる。通常、膜のファウリングには複数の現象が関与している。

2.1 溶質の吸着・付着

溶質と固体表面間の付着力（相互作用）は、ファンデルワールス力、水素結合、イオン結合、疎水結合などの総和で与えられる。これらの中のどの相互作用が支配的であるかは、吸着分子と膜表面の性質に依存する。主としてタンパク質について、膜の表面特性と付着量の関係が調べられている。通常、膜表面の親水性が高いほど吸着量が減少する結果が得られている⁹⁾。また、走査型電子顕微鏡、透過型電子顕微鏡、IR（赤外線分光法）、XPS（X線光電子分光法）などを利用して、膜面や膜孔内部に存在しているタンパク性付着物の量や構造などが調べられている^{10, 11)}。最近、原子間力顕微鏡を用いて、グラファイト上に吸着しているタンパク質の実体の観察に成功したとの報告もなされている¹²⁾。今後、種々の分析機器を駆使して膜面上に吸着・付着している物質の実体がさらに詳細に解明されていくことであろう。

溶質分子が膜孔径よりも十分に小さい場合には、通常溶質は膜孔壁面や膜面上に単分子層で吸着するが、溶質の種類によっては多分子層吸着も

起こる。

多分子層吸着は、特にタンパク質や多糖などの高分子物質の物理的、化学的相互作用により生じる。物理的な相互作用としては、タンパク質の変性や多糖の構造変化に起因する場合が多い。牛血清アルブミン (BSA) や β -ラクトグロブリン (β -Lg) のような SH 基、S-S 結合を有するタンパク質では、S-S 交換反応による凝集反応により多分子層吸着すると考えられている^{13, 14)}。BSA 1 分子中には 35 個のシステイン残基が存在し、その中の 34 個は S-S 結合を形成し、1 個が遊離の状態が存在する。 β -Lg 1 分子中には、5 個のシステイン残基が存在するが、4 個は S-S 結合に関与し、1 個は遊離状態である。

Kelley と Zydney¹³⁾ は、攪拌セル型の精密濾過装置を用いて BSA 溶液の濾過を行い、1) 長期間の保存中に、あるいは濾過中の攪拌によるせん断応力により凝集した BSA 分子が精密濾過膜面上に付着し、その結果膜透過流束の急激な低下がみられること、2) BSA 分子の凝集は、主として分子中の SH 基と S-S 結合の間の S-S 交換反応によること、3) BSA 分子中の SH 基をカルボキシメチル化や S-システニル化し、さらに保存中に生じた凝集体を除去した BSA 溶液を使用した場合には、膜透過流束の低下はほとんどみられないこと、などを示している。

この S-S 交換反応による凝集反応は温度が高くなると著しく促進される。筆者ら¹³⁾ は、ステンレス表面上へのタンパク性汚れの付着機構の解明を目的として研究を行っているが、1) β -Lg の付着は温度が上昇すると急激に増加すること、2) この付着量の増加は表面での S-S 交換反応に起因する表面凝集反応によること、3) 付着量は、 β -Lg をカルボキシメチル化することにより著しく低下することを明らかにした。

2.2 膜孔の閉塞（目詰まり）

溶質の大きさが膜孔と同程度であれば、細孔の閉塞が起こる。例えば、微生物菌体を含む懸濁液を MF 膜により濾過する場合や、タンパク質や多糖を UF 膜で処理する場合にみられる。タン

Fig. 2 Permeation Flux of β -Glucan Solution during Dead-end Filtration
(a) Change of Permeation Flux
(b) Comparison of Experimental Data with Standard Blocking Model

パク質を MF 膜で処理しても、2.1 で述べたように、凝集している場合には目詰まりが生じる。また、BSA など柔軟なタンパク質の場合は、その構造が歪むことにより、タンパク質分子よりも小さい膜孔径内に侵入し、細孔を閉塞することも知られている。

膜の閉塞による膜透過流束の低下の変化を定量的に表現するモデルとしては、1) 完全閉塞モデル、2) 中間閉塞モデル、3) 標準閉塞モデルが提案されている¹⁵⁾。完全閉塞モデルでは、閉塞された膜孔はその後の濾過には関係がないこと、新たに膜面に到達する粒子は捕捉された粒子上に重ならないと考える。中間閉塞モデルが、完全閉塞

モデルと異なる点は、新たな粒子は捕捉された粒子の上にも堆積できることである。標準閉塞モデルでは、膜孔は円管状であり、捕捉される粒子は膜孔の内壁面から、膜孔径を小さくするように捕捉が進行すると考える。実験結果はみかけ上、いずれかのモデルにより説明されることが多いが、実際には膜孔径に分布が存在するだけではなく拡大収縮や屈曲しており、さらには膜孔が三次元的なネットワークで結ばれているので、はるかに複雑である。また、非対称膜では深さ方向に膜孔の分布が存在する。Belfort ら¹⁶⁾は、標準閉塞モデルに基づいて膜の孔径分布が対数正規分布に従うと仮定して、閉塞による膜透過流束の低下を解析しているが、実際の現象をシミュレートするためには問題点が残されている。膜孔の構造の観察や定量化しようとする試みは、多く分野の研究者により試みられつつある^{17, 18)}。

多糖類を含む液状食品の場合も濾過膜の閉塞は起こることが知られている。しかし、タンパク質の場合に比較して、多糖類による濾過膜のファウリングに関しては報告例が少ない。筆者らの研究室で多糖類水溶液の濾過特性をデッドエンド型の濾過装置を用いて検討を行った結果の 1 例を図 2 (a) に示す。濃度 200 ppm の大麦由来 β -グルカン水溶液を、公称孔径 $0.22 \mu\text{m}$ 、直径 13 mm のポリビニリデンジフルオライド製メンブレンフィルター（ミリポア社製）を用い、圧力 0.5 気圧で定圧濾過した際の透過流束の経時変化を測定した。 β -グルカンはビール中に含まれており、ビールの精密濾過（清澄濾過）における主たるファウリング物質の 1 つと考えられている。 β -グルカン水溶液を定圧濾過した場合、濾過開始当初の透過流束は大きいものの、濾過の進行とともに膜透過流束は急激に減少し、ついには濾過膜が閉塞してほとんど液が透過しなくなる状況となる。このような β -グルカン水溶液の透過流束の経時変化について、上述した 3 種類の濾過モデルの適合性を検討した結果、図 2 (b) に示すように、膜透過流束の $1/2$ 乗 ($J^{1/2}$) と単位膜面積あたりの濾液量 (v) の関係がほぼ直線となることから、みかけ上標準閉塞モデルにより説明できることがわかる。

Fig. 3 Specific Resistance of the Deposited Layer Formed from Skimmed Milk²⁰⁾
 (a) Calcium Concentration Dependence of the Specific Resistance at a Transmembrane Pressure Difference of 3.3 bar
 (b) Transmembrane Pressure Dependence of the Specific Resistance of Deposited Layer Skimmed Milk

したがって、 β -グルカンは何らかの原因で濾過膜の細孔内表面に捕捉されて細孔を徐々に狭め、濾過抵抗を増大させるものと推測される。

2.3 膜面上への付着層の形成

溶質や粒子が膜により保持される場合には、膜面上に付着層が形成される。この付着層は膜透過に対する支配的な抵抗となる¹⁹⁾。溶質は膜面上に単に充填されているだけではなく、強く付着される。さらに、付着している溶質成分間に作用する物理的あるいは化学的相互作用の結果、ゲル状物質に変質することが多い。膜処理操作は比較的低温で行われるが、膜面上では濃度分極のために、溶質濃度が高く、しかも膜透過流束により圧密化を受けるためにゲル状化が促進される。さらに単一のタンパク質溶液においても、タンパク質がせん断応力により変性した結果、凝集体になる場合があるが、このような場合も付着層を形成する。膜面上に形成される付着層の構造や比抵抗に関しては比較的多くの研究が報告されている。

2.3.1 高分子から生じた付着層

牛乳、スキムミルク、ホエーや果汁などを膜濃縮すると、膜面上に主としてタンパク質や多糖を主成分とする付着層が形成される。付着層の膜透過に対する比抵抗をデッドエンド濾過を行うことにより測定することが可能である。

Kessler ら²⁰⁾は、スキムミルクのデッドエンド型濾過を種々の条件下で行い、膜面上に形成された付着層の比抵抗を測定した。その結果、比抵抗は一定圧の条件では、スキムミルク中のカルシウム濃度に強く依存すること(図3-a)、カルシウム濃度が一定の条件では膜間圧力差(操作圧)が高くなるに伴い増加すること(図3-b)、などが示された。さらに、膜間圧力差が高くなると、膜面上の付着層はカゼインとカルシウムが相互作用してゲル状に変化することが明らかにされた。

Palecek ら^{21, 22)}は、牛血清アルブミン(BSA)溶液のデッドエンド濾過を行い、付着層が多孔性でしかも可逆的な圧縮性を示すこと、また付着層の構造と透過性が溶液のpHやイオン強度に依存することを示した。pHに関しては、等電点に近いほど、またイオン強度が大きいほどタンパク付着層の構造は密となり、透過性は低下することが示されている。

Fig. 4 Specific Resistance of the Deposited Layer for Various Microorganisms^{19, 23)} Baker's yeast (elliptical, 4.8 μm); *Corynebacterium glutamicum* (elliptical, 1.5 μm); *Staphylococcus aureus* (spherical, 1.3 μm); *Bacillus circulans* (rod-shaped, 1.65 μm); *Rhodopseudomonas spheroides* (rod-shaped, 1.6 μm); *Escherichia coli* (rod-shaped, 1.2 μm); Latex-1 (spherical, 0.55 μm); Latex-2 (spherical, 0.21 μm).

2.3.2 菌体付着層

微生物菌体懸濁液のクロスフロー濾過においては、膜面上に菌体の付着層が形成される。通常、この付着層が膜透過の支配的な抵抗となる。図4には、デッドエンド濾過で得られた種々の菌体付着層の比抵抗と平均粒径（体面積平均径）の関係を示す²³⁾。平均比抵抗は平均径が小さいほど大きいこと、同じ平均径で比較すると、*Escherichia coli*, *Rhodopseudomonas spheroides*などの桿菌の方が*Staphylococcus aureus*や*Corynebacterium glutamicum*のような球形に近い菌よりも比抵抗が大きいことなどがわかる。さらに、筆者らは、種々の形状、大きさの微生物菌体懸濁液のクロスフロー濾過を行い、膜面上に形

Fig. 5 Structures of the Deposited Layer Formed during Dead-end Filtration of Suspension of *Bacillus subtilis* (a) and that Formed during Crossflow Filtration (b) Observed with a Scanning Electron Microscope

成される付着層の比抵抗を付着量と膜透過流速から算出し、比較した^{24, 25)}。その結果、パン酵母や*C. glutamicum*のような比較的球状に近い形状を有する微生物の場合は、デッドエンド型濾過装置で得られた値と類似していた。これは、菌体の形状が球状に近いためにデッドエンド濾過とクロスフロー濾過の場合に形成される付着層がほぼ同じ構造をとるためである。一方、*E. coli*や*Bacillus subtilis*などの桿菌の場合は、クロスフロー濾過中に形成される付着層の比抵抗は、デッドエンド型濾過で求められる比抵抗の値よりも著しく大きい結果が得られた。さらに、クロスフロー濾過時の循環液流速が高いほど、比抵抗が

Fig. 6 Rinsing Behavior of the Membrane Used for Ultrafiltration of Skimmed Milk (Protein Concentration=3.3%) at a Circulation Velocity of 2.5 m/s and 14°C. The transmembrane pressure was 1, 2.2 and 3.35 bar²⁹⁾

増加した。この原因について種々の観点から検討したところ、デッドエンド濾過の場合は比較的ランダムな状態の付着層を形成する（図 5-a）のに対し、クロスフロー濾過では膜面に水平に並ぶためであることが判明した（図 5-b）。菌体懸濁液中に菌体以外の夾雑微粒子が含まれている場合には、非常に少量でも付着層の比抵抗が著しく増大することも示されている^{26, 27)}。

2.4 ファウリングに対する対策

ファウリングの機構が次第に解明されてきているが、同時に膜のファウリングに対する方策も種々の観点から検討されている。ファウリングを軽減することは、膜処理効率を高めるだけでなく、操作終了後の洗浄に対する負荷の軽減にもつながる。ファウリングに対する対策としては、1) 膜の物性、膜孔径、膜孔構造の検討¹⁰⁾、2) 溶液の物性、状態、溶質の状態の制御⁹⁾、3) 操作条件、装置、操作の工夫^{10, 19, 28)}、などの観点から検討されている。詳細は、該当する文献を参照されたい。

3. 液状食品の膜濃縮と洗浄

液状食品や発酵液の膜処理後の洗浄に関して、洗剤や洗浄条件の検討などの試験的検討は数多く

なされている。しかし、定量的な検討は少ない。これは、膜濃縮に対する実験よりも洗浄実験の方がはるかに時間や手間がかかるからであろう。

中西と Kessler²⁹⁾ は、スキムミルクを種々の条件で限外濾過した膜の水洗浄速度に関して検討を行った。水洗浄はアルカリや酸洗浄の基本となる操作であるばかりではなく、膜のファウリングの状態や付着層の構造に関する情報が得られる。まず、一定の圧力・流速の条件下でスキムミルク濃度を一定（タンパク濃度で 3.4%）に保ちながら濾過を行い、膜面上に付着層を形成させた。スキムミルクを装置から排出後、水洗浄（循環洗浄）に切り替え、水透過流束の経時変化を追跡した。図 6 に実験結果の 1 例を示す。この図は濃縮と水洗浄時の循環流速を一定とし、圧力を変化させた場合の結果である。縦軸の J_{rei} 値は濾過前の新鮮な膜に対する水透過流束に対する相対値を示す。 J_{rei} が 1 に達すると膜からファウリング物質が完全に除去されたことを意味する。いずれの場合も水洗浄により膜透過流束が回復したが、その程度は膜間圧力差が高いほど低いことがわかる。同じ条件で濾過を行った場合でも、透過流束の回復が洗浄条件により異なることから、この場合の膜のファウリングの主たる原因は、膜面上に形成された付着層であると考えられる。水洗浄における洗浄効率を、付着層の除去率（3 時間水洗

後の付着層量の水洗前の付着層量に対する相対比)として定義すると、洗浄効率は、①限外濾過時の流速は高く、圧力は低い、②水洗時の流速が高い、③カルシウム濃度が低いほどよいことが明らかとなった。限外濾過時の圧力が低く、カルシウム濃度が低いほど、付着層のゲル状化が抑えられるために、洗浄が容易となる。

スキムミルクの濃縮に使用した逆浸透膜の水洗浄においても、濃縮時の膜間圧力差が低く、循環液流速が高いほど洗浄効率が高いなど、上述した限外濾過膜の場合と同様な傾向を示す結果が得られている^{10, 30)}。

神武ら^{31, 32)}は、チーズホエーと還元脱脂乳を試料として濾過を行い、吸着に起因する膜透過抵抗(すなわち濾過を行わないで、膜を溶液と接触させた場合生じる吸着に基づく膜透過抵抗)と、濾過を行うことにより増加した膜透過抵抗をそれぞれ測定し比較している。チーズホエーの場合は、濾過中に形成される膜表面上の付着層が濾過に対する最大の抵抗となること、一方、スキムミルクの場合は吸着と濾過による膜細孔の目詰まりが膜透過抵抗の大部分を占めることを示した。さらに、還元脱脂乳とスキムミルク(生脱脂乳)の6倍濃縮実験を行い、UF膜の水洗浄と薬剤洗浄を行い、その結果水洗浄による透過流束回復は少ないこと、電顕写真観察やアミノ酸分析からファウリングは細孔内へのホエータンパク質の目詰まりに起因することなどを明らかにしている。神武らの結果と、中西とKesslerらの結果は矛盾するが、この理由として、①使用した膜が異なること(セルロースアセテート膜²⁹⁾とポリスルホン膜、PAM膜^{31, 32)})、②温度や流速など膜処理時の操作条件が異なること、③スキムミルクの濃度が異なること、④スキムミルクの組成が異なること、⑤洗浄水の硬度が異なることなどが考えられる。このことからわかるように、食品のファウリングの程度は、種々の因子により変動することが特徴である。

おわりに

膜のファウリングと洗浄の問題は、膜分離法の

実用化に際して必ず検討しなければならない問題である。一方、基礎的観点に着目すると、ファウリングは流れ場における物質と固体表面の間の相互作用の関連した界面現象に係わる問題として捉えることができる。基礎と応用の両面からファウリングという、複雑な現象の解明を進めていくことが肝要である。

文 献

- 1) 中西一弘:「輸送と洗浄」食品工学基礎講座2巻(矢野俊正, 桐米良三監修)光琳(1989).
- 2) 中西一弘, 崎山高明: 化学装置, **9**, 61 (1994).
- 3) 中村厚三:「濃縮と乾燥」食品工学基礎講座6巻(矢野俊正, 桐米良三監修)光琳(1989).
- 4) 食品成分の相互作用, 松下雪郎, 並木満夫(編), 講談社(1980).
- 5) G. Belfort, F. W. Altena: Desalination, **47**, 105 (1983).
- 6) G. Belfort, R. H. Davis, A. L. Zydney: *J. Membrane Sci.*, **96**, 1 (1994).
- 7) 田村吉隆, 福渡康夫: 膜 (MEMBRANE), **13**, 259 (1988).
- 8) M. Koutake, I. Matsuno, H. Nabetani, M. Nakajima, A. Watanabe: *Biosci. Biotech. Biochem.*, **56**, 697 (1992).
- 9) M. Kim, K. Saito, S. Furusaki, *J. Membrane Sci.*, **56**, 289 (1991).
- 10) 中村厚三: MRC News (食品膜技術懇話会誌), **4**, 95 (1990).
- 11) 大谷敏郎: 膜 (MEMBRANE), **19**, 155 (1994).
- 12) D. C. Cullen, C. R. Lowe: *J. Colloid Interface Sci.*, **166**, 102 (1994).
- 13) H. Itoh, T. Nagata, T. Toyomasu, T. Sakiyama, N. Nagai, T. Saeki, K. Nakanishi: *Biosci. Biotech. Biochem.*, **59**, 1648 (1995).
- 14) S. T. Kelly, A. L. Zydney: *Biotechnol. Bioeng.*, **44**, 972 (1994).
- 15) J. Hermia: *Trans IChemE*, **60**, 183 (1982).
- 16) J. Belfort, J. M. Pimbley, A. Greiner, K.-Y. Chung: *J. Membrane Sci.*, **77**, 1 (1993).
- 17) L. T. Fan, R. Nassar, S. H. Hwang, S. T. Chou: *AIChE J.*, **31**, 1781 (1985).
- 18) S. Nakao: *J. Membrane Sci.*, **96**, 131 (1994).
- 19) 中西一弘, 田中孝明: 日本食品工業学会誌, **41**, 578-584 (1994).
- 20) H. G. Kessler, C. Gernedel, K. Nakanishi:

- Milchwissenschaft*, **37**, 584 (1982).
- 21) S. P. Palecek, S. Mochizuki, A. L. Zydne : *Desalination*, **90**, 147 (1993).
 - 22) S. P. Palecek, A. L. Zydne : *J. Membrane Sci.*, **95**, 71 (1994).
 - 23) K. Nakanishi, T. Tadokoro, R. Matsuno : *Chem. Eng. Comn.*, **62**, 187 (1987).
 - 24) T. Tanaka, K. Abe, K. Nakanishi : *Biotechnol. Techniques*, **8**, 57 (1994).
 - 25) T. Tanaka, K. Abe, H. Asakaw, H. Yoshida, K. Nakanishi : *J. Ferment. Bioeng.*, **78**, 455 (1994).
 - 26) T. Tanaka, T. Kamimura, R. Itoh, K. Nakanishi, R. Matsuno : *Biotechnol. Bioeng.*, **41**, 617 (1993).
 - 27) T. Tanaka, T. Kamimura, R. Fujiwara, K. Nakanishi : *ibid.*, **43**, 1094 (1994).
 - 28) M. Dekker, R. Boom : *TIBTECH*, **13**, 129 (1995).
 - 29) K. Nakanishi, H. G. Kessler : *J. Food Sci.*, **50**, 1726 (1985).
 - 30) U. M. Kulozik, H. G. Kessler : "Fouling and Clening in Food Processing (ed. H. G. Kessler, D. B. Lund). Druckerei Walch, Augsburg, Germany, p.328 (1989).
 - 31) 神武正信, 内田幸生, 佐藤孝義, 下田幸三, 渡辺敦夫, 中尾真一 : 日本農芸化学会誌, **61**, 677 (1987).
 - 32) 神武正信, 内田幸生, 佐藤孝義, 下田幸三, 木村利明, 相良康重, 渡辺敦夫, 中尾真一 : *ibid.*, **61**, 683 (1987).

(受付 1996年1月22日)

書 評

日本生物物理学会編集 (編集担当 葛西道生, 田口隆久)

生物物理から見た生命像2「生体膜—生命の基本形を形づくるもの」

吉岡書店 B5版 167頁 本体価格 3,000円 1996年2月25日第1刷発行
ISBN4-8427-0256-7 C3345 P3090E

本書は日本生物物理学会が企画したシリーズの第2巻である。「生体膜」研究のホットな話題を、生体膜について、どこまでが分かり、何が分かっていないかを明確にする意図のもとに、それぞれの最先端で研究を実施している15名が分担して執筆している。本を開くと2色刷りが目に入り、専門書の堅い雰囲気はなく、素直な気持ちで読み始めることができる。さらに、第1章「生体膜とは何か」が、生体膜の構造、性質、機能の優れた概説書になっているので、生体膜についての十分な知識をもたない専門外の読者でも、この章で十分な基礎知識が得られる。そこで、第2章「イオンチャンネル」、第3章「イオンをくみ出す仕組み—イオンポンプ」、第4章「信号伝達」、第5章「細胞内膜輸送とエンドサイトーシス」、第6章「膜をいじる」のどの章へも、それぞれの興味にしたがって、読み進むこともできる。とくに、イオンチャンネルについては、

多くのページを用いて最新の知見までが詳細に記述されている。信号伝達では、光情報の伝達に取り上げられており、膜をいじるでは、電気穿孔法、一粒子追跡法、光ピンセット法などが紹介されている。

本書は、全体を通じて、執筆者が生命機能の行われる生体膜をぜひとも読者に理解してもらいたいとの熱意が感じられ、そのための工夫が随所に見られる。欄外には専門用語の詳しい説明と関連する章が示されている。

また、本の内容に関連して詳しく知りたい人のために執筆者のFax番号とE-mailアドレスが記載されている。

若い学生諸君を対象としたと述べられているが、広く読んで欲しい本であり、生体膜に興味をもつ、膜学会の会員諸氏にお勧めしたい一冊です。

[大木和夫]