電解質膜による選択輸送

—有機溶媒／電解質系を中心として—

谷岡明彦

1. はじめに

「燃料電池においてメタノールやジメチルエーテルなどを直接燃料として利用するシステム」, 「有機溶媒が混合した廃水処理」, 「高濃度塩濃縮」, 「イオンチャンネルにおけるイオン透過」, 「アルコールの生体膜に及ぼす影響」, これらは電荷を有した膜における有機溶媒系および低含水率下でのイオン輸送の問題としてとらえることができる。両者は一見関係のない現象のように見えるが, 最近の研究から統一的に扱えることが明らかとなった。

固定荷電基をもつ膜において, 膜含水量に対する固定荷電基量, すなわち固定荷電密度が物質の選択輸送に対して大きな影響を及ぼす。膜の固定荷電密度が大きいほどイオンの選択性が増大する。しかし膜中の固定電荷がすべて有効に作用しているわけではない。従来の研究によると実際には固定荷電基全量の1/5程度しか有効に働いていないとされてきた。これは膜内電解質の活量低下や膜相中における水の分布が不均一であることに起因すると考えられてきた。しかし荷電膜中におけるイオンの活量係数や拡散係数を実験的に正確に測定できないことから, 水溶液系で行われてきた議論を膜系にどのように適用するかは大きな問題であった。

電解質/水溶液系において, 膜中におけるイオンの挙動を表すために, 外部溶液と膜との界面でドナン平衡の概念を, 膜内におけるイオンの拡散流束に関してはNernst-Planckの式を用いることは有用な方法であることが知られている^{1), 2)}。これらの取り扱いには膜に発生する電位と濃度や流束との関係を非常にうまく表現することができる。

このとき膜内の固定荷電基の量を表すパラメーターとして固定荷電密度が導入された^{4), 5)}。固定荷電密度は膜中の水1Lあたりの固定荷電基のモル数である。固定荷電密度を求める方法としては, (1) 滴定法と(2) 膜電位法が知られている。滴定法で得られる荷電密度は膜中の正味の荷電密度, 膜電位法によって得られた値は有効荷電密度と考えられている。電解質/水溶液系において含水率15~35%程度の膜では有効荷電密度は正味の荷電密度の約20%である。この理由を明らかにすることにより電解質膜におけるイオンの選択輸送について従来の考え方をさらに進展させることができる。

溶液中においてカチオンとアニオンがイオンペアを形成する^{5)~7)}。イオンペアの程度は媒体中の誘電率に依存し, 誘電率が小さくなるとイオンペアの形成が容易になる。一般的に電荷を有した膜は高分子からできており, 高分子の誘電率は水の1/8程度である。このことは含水率が低下すると膜中の固定荷電基と対イオンはイオンペアをつくることを示唆している。また有機溶媒の誘電率は一般的に水に比べて小さい場合が多い。膜中に有機溶媒が存在すると含水率が低い場合と同様に固定電荷と対イオンはイオンペアを形成する。したがって, 低含水率下と有機溶媒存在下では同様の考え方で扱えることを示している。

以上の効果は膜の両界面に接した溶液相に設置された電極で測定した電位(膜電位)から論じることができる。膜電位の測定は比較的容易で誤差も少なく, 理論的解析を行いやすい。

2. 膜電位^{8)~12)}

膜電位は膜中のイオン輸送現象を具体的に表現できる最適の量である。今1枚の電荷を帯びた膜の左右にそれぞれ異なった濃度の電解質溶液がおかれている系を考える。膜電位 $\Delta\phi_M$, 膜と外部溶液界面で発生する電位(ドナン電位)を $\Delta\phi_D$, 膜内部で発生する電位(拡散電位)を $\Delta\phi_d$ とすると, 次の関係式が成立する。

Akihiko TANIOKA 東京工業大学大学院理工学研究科 (152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)・教授, 国際高分子基礎研究センター・基幹研究員, 工学博士, 1975年東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了, 専門は高分子物性 〈趣味〉世界史探訪

Selective Transport by Polyelectrolyte Membrane

$$\Delta\phi_M = \Delta\phi_{D_0} + \Delta\phi_d \quad (1)$$

今回考える系では以下の仮定をおく。

- (1) 膜内の電解質は膜面に垂直方向のみ濃度勾配をもつ。
- (2) 溶液中の電解質は 1-1 型の強電解質である。固定荷電基も 1 価で強電解質である。
- (3) 膜-溶液相界面における拡散電気二重層の影響は無視する。
- (4) 膜内における電解質の輸送と溶媒の輸送の間に連結はないものとする。

2.1 ドナン電位^{1), 2)}

膜と液相との間に平衡が成立し、電位差が生じる。このとき発生する電位をドナン電位とよぶ。外部溶液と膜内における各イオン種の間の化学ポテンシャルが互いに等しいことから、ドナン電位 ($\Delta\phi_{D_0}$) と外部溶液および膜内のイオン濃度 (C_i , $\bar{C}_i$) との間には次の関係が成立する。

$$\phi_{D_0} = \bar{\phi} - \phi = -\frac{RT}{F} \ln \frac{\bar{r}_i \bar{C}_i}{k_i C_i} \quad i = +, - \quad (1)$$

ここで、 $\bar{}$ は膜内の状態を表す。また k_i はイオン i の分配係数でイオンの膜内外の標準電気化学ポテンシャル ($\bar{\mu}_i$, μ_i) との間に次の関係が成立する。

$$\bar{\mu}_i^0, \mu_i^0 = -RT \ln k_i \quad i = +, - \quad (2)$$

以上のことから膜中におけるイオンの濃度 ($\bar{C}_+$, $\bar{C}_-$) と外部溶液中の電解質濃度 (C_s) との間には次の関係が成り立つ。

$$\frac{\bar{C}_+ \bar{C}_-}{C_s^2} = \frac{r_{\pm}^2}{Q^2} \quad (3)$$

ここで Q は次のように定義する。

$$Q = \left(\frac{\bar{r}_+ \bar{r}_-}{k_+ k_-} \right)^{1/2} \quad (4)$$

一方、膜内では次の電気的中性条件が保たれていなければならないから、膜中の固定荷電基の量 C_x (荷電密度: 実用的にはイオン交換容量) と膜内イオンの濃度との間には次の関係式が成立する。

$$\sum_{i=+, -} z_i \bar{C}_i + z_x C_x = 0 \quad (5)$$

(5) 式を使用すると (1) 式は外部溶液の濃度と膜内の荷電密度で表すことができる。

2.2 拡散電位^{1), 2)}

膜内をイオンが拡散すると電位が発生する。この電位は拡散電位とよばれる。拡散電位は次の Nernst-Planck の式から導かれる。

$$J_i = -\bar{\omega}_i RT \frac{d\bar{C}_i}{dx} - z_i F \bar{\omega}_i \bar{C}_i \frac{d\bar{\phi}}{dx} \quad i = +, - \quad (6)$$

ここで $\bar{\omega}_i$ はイオン i の膜中における移動度である。膜内における電気的中性条件を考慮して拡散電位 $\Delta\phi_{diff}$ は次式と

なる。

$$\Delta\phi_d = \bar{\phi}'' - \bar{\phi}'$$

$$= -\frac{RT}{z_+ F} \frac{r-1}{r+1} \ln \left[\frac{(r+1)\bar{C}_+' + \frac{z_x}{z_+} C_x}{(r+1)\bar{C}_-' + \frac{z_x}{z_+} C_x} \right] \quad (7)$$

ここで r は膜内におけるアニオン ($\bar{\omega}_-$) に対するカチオン ($\bar{\omega}_+$) の移動度の比である。

$$r = \frac{\bar{\omega}_+}{\bar{\omega}_-} \quad (8)$$

2.3 水/アルコール系における膜電位の測定値

水とメタノールを混合した溶液において LiCl を電解質として用いカチオンおよびアニオン交換膜における膜電位の測定結果を見ると、いずれの膜においても純水溶液系における膜電位値がもっとも大きく、メタノールの増加とともに減少し、純メタノール系における値がもっとも小さい。このことはメタノールの比誘電率が約 33 程度と水より小さいこと、すなわち膜内のイオン交換基の機能が低下していることを示唆している^{13), 14)}。次にこのような系を説明する理論的背景を示す。

3. 有効荷電密度

(1) 式および (2) 式を用いて得られた膜電位は電気的中性条件を使用して膜外の電解質濃度、膜内のイオン移動度、膜内の荷電密度を使用して記述することができる。このとき膜外電解質溶液の活量係数はあらかじめ知ることができる^{15)~17)}。一方、膜内の電解質の活量係数や分配係数を知ることは不可能に近いことから (4) 式の Q を決めることは困難である。ところで膜電位測定を行い (1) 式を適用して得られる荷電密度は有効荷電密度 (C_x^e) である。一方、滴定では膜内のイオン交換基の数を数えることになるから正味の荷電密度 (C_x) を与えることになり両者の間には次の関係がある^{18), 19)}。

$$C_x^e = Q C_x \quad (9)$$

このことから Q は膜内の固定荷電基の有効性を表す指標と考えることができる。一般的に Q の範囲は $0 \leq Q \leq 1$ とされている。 $Q=0$ のとき膜は見かけ上電荷を有しておらず、 $Q=1$ のとき膜内の固定荷電基がすべて有効に機能していることを示している。さらに (4) 式によると膜内のイオンの活量係数が著しく小さくなるか、分配係数が大きくなると Q は小さくなる。以上のことから Q は固定荷電基と移動するイオンの相互作用に関するパラメーターと考えることができる。

荷電膜における固定荷電基と対イオンとの関係を説明するために微多孔膜モデルが使用される。膜内には溶液を保持しておくチャンネル (直径 2~10 nm 程度の貫通空孔) が存在し、チャンネル内壁に固定電荷が配置され、イオン

はチャンネル内を自由に移動することができる。したがって、チャンネル内では固定電荷と対イオンとの関係は溶液中のカチオンとアニオンとの関係と同様に考えることができる。固定電荷の近傍を自由に対イオンが運動しているとき、膜電位測定において固定荷電基と認識することができる。一方、固定荷電基と対イオンがイオンペアをつくってしまうと固定荷電基として認識することができない。このとき電解質溶液におけるイオンペアの式を膜中の固定電荷と対イオンの関係に適用すると、両者間の結合定数 (K_A) は次式で表すことができる^{5)~7)}。

$$K_A = \frac{4\pi N_A}{3 \times 10^{-3}} a^3 \exp(b) \quad (10)$$

$$b = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_S a k T} \quad (11)$$

ここで N_A はアボガドロ数、 e は電荷、 ϵ_S は媒体の比誘電率、 ϵ_0 は真空中の誘電率、 k はボルツマン定数、 a は接触距離つまり固定電荷と対イオンがイオンペアをつくったときのイオン間距離である。(10), (11) 式において接触距離 a と比誘電率 ϵ_S が膜内の状態を表すパラメーターである。とくに ϵ_S は文献により知ることができるから、 K_A と Q の関係を明らかにできれば有効荷電密度の物理的意味が明らかになる。誘電率が高いとき水中の状態に近いから従来からの取り扱いと大きく違わないが、誘電率の低いとき興味ある展開が期待できる。誘電率が低い状態として次の2つを代表的な例としてあげることができる²⁰⁾。

(1) 低含水率系

(2) 有機溶媒系

これらの系では(10)式で示される K_A が大きくなり、固定電荷と対イオンはペアをつくりやすくなる。このような条件下で対イオンが膜内を拡散するとき、対イオンは容易に不動化され、自由に運動しているイオンと不動化されたイオンの間には局所平衡が成立する。不動化の速度は対イオンが不動化されていない固定電荷の濃度 (QC_x) と結合定数に比例し、不動化された対イオンが固定電荷から離れる速度は不動化された成分の濃度 ($C_x - QC_x$) に比例すると仮定する。局所平衡下では両者の速度が等しいから、有効荷電密度 (QC_x) と結合定数の間には次の関係が成立する。

$$QC_x = \frac{1}{k'K_A + 1} C_x \quad (12)$$

ここで k' は定数である。(12) 式から明らかにイオンペアの効果は膜の有効荷電密度を減少させる。水/メタノール混合溶媒系のような場合異なった2つの溶媒からなる系の誘電率は Oster²¹⁾ によると次式で表すことができる。

$$\epsilon_S = \epsilon_1 + [(\epsilon_2 - 1)(2\epsilon_2 + 1)/2\epsilon_2 - (\epsilon_1 - 1)]x_2V_2/V \quad (13)$$

ここで

$$V = x_1V_1 + x_2V_2 \quad (14)$$

ϵ_1 と ϵ_2 , V_1 と V_2 , x_1 と x_2 は溶媒1, 2のそれぞれ比誘電率, 部分モル体積, モル分率である。以上のことから有効

図1 メタノール/水混合溶媒系におけるカチオン交換膜 (K171) とアニオン交換膜 (A201) の Q 値。実線は計算値。

図2 各種有機溶媒系におけるカチオン交換膜 (K171) とアニオン交換膜 (A201) の Q 値と比誘電率との関係。実線 (K171) および点線 (A201) は計算値。●, ■, ◆, ▲, ▼ (K171) および ○, □, ◇, △, ▽ (A201) はそれぞれ水, DMSO, エチレングリコール, メタノール, n -プロパノールを溶媒としたときの Q 値を表す。

荷電密度は次式のようにになる。

$$C_x^e = QC_x = \frac{C_x}{\frac{4\pi N_A}{3 \times 10^{-3}} k' a^3 \exp\left\{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 a k T (\epsilon_1 + \Delta\epsilon x_2^2 V_2/V)}\right\}} \quad (15)$$

ここで

$$\Delta\epsilon = (\epsilon_2 - 1)(2\epsilon_2 + 1)/2\epsilon_2 - (\epsilon_1 - 1) \quad (16)$$

図1にメタノール水溶液-電解質-カチオン交換膜またはアニオン交換膜において求めた Q とメタノールの重量分率との関係を示す。○と□は実験値であり実線は(15)式から求めた計算結果である。計算値と実験値はよく一致しており Q 値の導入にイオンペアの理論を用いることは妥当である考えることができる。

図2に25℃における n -プロパノール ($\epsilon_S = 20$), メタノール ($\epsilon_S = 33$), エチレングリコール ($\epsilon_S = 41$), DMSO ($\epsilon_S = 47$), 水 ($\epsilon_S = 80$) 中のカチオン交換膜とアニオン交換膜における Q 値を誘電率の関数として示す。点線と実線は

計算値である。理論はおおむね実験結果を説明していると言える。エチレングリコールに関してはOH基を2個有していることが Q 値を大きくする原因と考えられる²²⁾。

4. 膜中のイオン移動度^{14), 23)}

前述したように対イオンが膜内を拡散するとき、自由に運動しているイオンと不動化されたイオンの間には局所平衡が成立すると、第一次近似として不動化された対イオンの濃度(C_{im})は自由に拡散している対イオンの濃度(C_f)に比例すると考えることができる。すなわち、

$$C_{im} = RC_f \quad (17)$$

化学反応を伴う系における拡散の理論に従うと²⁴⁾、見かけの拡散係数(D_a)と実際の拡散係数との間に次の関係が成り立つ。

$$D_a = \frac{1}{R+1} D' \quad (18)$$

ここで R は K_A にきわめて類似した物理的意味をもつ定数で、両者の間には次の関係が成り立つ。

$$R = \beta K_A \quad (19)$$

ここで β は膜中の対イオンの移動度に及ぼす結合定数の効果を示している。(18)式を考慮すると膜中の対イオンの移動度 $\bar{\omega}_{\text{counter-ion}}$ と結合定数 K_A との間には次の関係が成立する。

$$\bar{\omega}_{\text{counter-ion}} = \frac{1}{\beta K_A + 1} \frac{\omega_{\text{counter-ion}}}{q^2} \quad (20)$$

ここで、 q は曲路率、 $\omega_{\text{counter-ion}}$ は外部溶液中の対イオンの移動度である。明らかにイオンペアの効果で対イオンの移動度が減少することがわかる。2種類の溶媒が混合されている系における対イオンの移動度が次式で表されるとする。

$$\omega_{\text{counter-ion}} = \omega_{\text{counter-ion}, 1} x_1 + \omega_{\text{counter-ion}, 2} x_2 \quad (21)$$

ここで x_1, x_2 はそれぞれ溶媒1, 2中の塩がないときのモル分率である。以上のことを考慮すると有機溶媒/水混合溶液系における対イオンの膜内の移動度($\bar{\omega}_{\text{counter-ion}}$)は次式となる。

$$\bar{\omega}_{\text{counter-ion}} = \frac{(\omega_{\text{counter-ion}, 1} x_1 + \omega_{\text{counter-ion}, 2} x_2)/q^2}{\frac{4\pi N_A}{3 \times 10^{-3}} \beta a^3 \exp\left\{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 a k T \{\epsilon_1 + \Delta\epsilon x_2 V_2/V\}}\right\}} \quad (22)$$

副イオンの移動度($\bar{\omega}_{\text{co-ion}}$)は(8)式から得ることができる。

図3に膜電位法と透過法を使用してメタノール水溶液-電解質-カチオン交換膜またはアニオン交換膜において求めたカチオンおよびアニオンの移動度をメタノールの重量分率の関数として示す。メタノールの増加とともにイオンの移動度は著しく低下する。実線は計算値であるが理論は実験結果をほぼ良く説明していると言える。

図3 メタノール/水混合溶媒系におけるカチオン交換膜(K171)とアニオン交換膜(A201)中のLiおよびClの移動度。実線は計算値。

5. おわりに

高分子荷電膜中におけるイオンの挙動を説明するためにイオンペアの理論を導入した。得られた関係式は実験結果を比較的良く説明することができた。有機溶媒系などの膜内の誘電率が低い状態では固定電荷と対イオンはイオンペアを形成し、膜のイオン交換能を著しく低下させる。このことは膜のイオン選択性を著しく下げることになる。

以上の結果はLiCl/有機溶媒-高分子電解質膜系で得られた結果であるが、広くすべての電解質/有機溶媒-高分子電解質膜系に適用できる。たとえば燃料電池においてはカチオン交換膜中をカチオンとしてプロトンが移動するわけであるから、接触距離 a と対イオン移動度 $\omega_{\text{counter-ion}}$ が異なるだけで本理論の枠内で扱うことができる。メタノールを直接燃料とする燃料電池の場合メタノールが10 wt%膜内に浸入しただけでイオン交換能は約15%、プロトン移動度は約30%低下することがわかる。エタノールやジメチルエーテル中ではイオン交換能や移動度がさらに低下することが推測される。最近各種アルコールや有機酸/バイポーラ膜系において電圧を印可すると膜の中間層界面でこれらの化合物が容易にイオン化することがわかってきた^{25)~29)}。上記の考え方を使用してイオン化の程度と膜のイオン交換能とを関係づけることが可能である。さらに生体膜においてアルコールが存在するとイオンの選択透過性が低下することが示唆される。また同様のことが低含水率系におけるイオン輸送においても言える。高濃度塩濃縮を行うために膜中の含水率を低下させるとイオン選択性とイオン移動度が低下し電流効率を下げてしまう。燃料電池においても膜中の含水率を下げるとプロトンの選択透過性が著しく低下する。図3における Q 値と誘電率との関係においてエチレングリコールの Q 値が理論値よりも大きな値を示す。このことは含水率の低下にもかかわらず Q 値を下げないようにするにはヒドロキシル基の導入が有効であ

ることを示唆している。とくに有機溶媒を含んだ廃液の処理に際し、膜におけるイオン交換能の低下が指摘されている。この問題を解決する手段を考えるうえで図2は非常に参考になる結果を示していると言える。

文 献

- 1) F. Helfferich: *Ion Exchange*, McGraw-Hill, New York (1962)
- 2) N. Lakshminarayanaiah: *Transport Phenomena in Membranes*, Academic Press, New York (1969)
- 3) M. Yuasa, Y. Kobatake, H. Fujita: *J. Phys. Chem.*, **72**, 2871 (1968)
- 4) N. Kamo, Y. Toyoshima, H. Nozaki, Y. Kobatake: *Z. Kolloid: Z. Polym.*, **248**, 914 (1971)
- 5) H. Reiss: *J. Chem. Phys.*, **25**, 400 (1956)
- 6) R. M. Fuoss: *J. Am. Chem. Soc.*, **80**, 5059 (1958)
- 7) J. O'M. Bockris, A. K. N. Reddy: *Modern Electrochemistry*, Plenum Press, New York (1970)
- 8) R. Schroege: *Stofftransport durch Membrane*, Steinkopff, Darmstadt (1964)
- 9) H.-U. Demisch, W. J. Pusch: *Electrochem. Soc.*, **123**, 370 (1976)
- 10) H.-U. Demisch, W. Pusch: *J. Colloid & Interface Sci.*, **76**, 445, 464 (1980)
- 11) W. Pusch: *Desalination*, **59**, 105 (1986)
- 12) S. Mafe, J. A. Manzanares, H. Reiss: *J. Chem. Phys.*, **98**, 2325 (1993)
- 13) T.-J. Chou, A. Tanioka: *J. Membr. Sci.*, **144**, 275 (1998)
- 14) T.-J. Chou, A. Tanioka: *J. Phys. Chem.*, **102**, 129 (1998)
- 15) R. A. Robinson, R. H. Stokes: *Electrolyte Solution*, 2nd ed., Academic Press, New York (1959)
- 16) M. Cardoso, J. P. O'Connell: *Fluid Phase Equilibria*, **33**, 315 (1987)
- 17) C. L. Lin, L. S. Lee, H. C. Tseng: *Fluid Phase Equilibria*, **90**, 57 (1993)
- 18) J. A. Manzanares, S. Mafé, J. Pellicer: *J. Chem. Soc., Faraday Trans.*, **88**, 2355 (1992)
- 19) K. Saito, A. Tanioka: *Polymer*, **37**, 2299 (1996)
- 20) S. Mafé, P. Ramirez, A. Tanioka, J. Pellicer: *J. Phys. Chem. B*, **101**, 1851 (1997)
- 21) F. Franks: *Water, a Comprehensive Treatise*, Vol. 2, Plenum Press, New York (1973)
- 22) T.-J. Chou, A. Tanioka: *J. Phys. Chem. B*, **102**, 7198 (1998)
- 23) M. Sieber, S. Motamedian, N. Minoura, A. Tanioka: *J. Chem. Soc., Faraday Trans.*, **93**, 2533 (1997)
- 24) J. Crank: *The Mathematics of Diffusion*, 2nd ed., Clarendon Press, Oxford (1975)
- 25) T.-J. Chou, A. Tanioka: *J. Phys. Chem. B*, **102**, 7866 (1998)
- 26) T.-J. Chou, A. Tanioka: *J. Electroanalytical Chem.*, **462/1**, 12 (1999)
- 27) T.-J. Chou, A. Tanioka: *J. Colloid & Interface Sci.*, **212**, 293 (1999)
- 28) T.-J. Chou, A. Tanioka: *J. Colloid & Interface Sci.*, **212**, 576 (1999)
- 29) N. Onishi, N. Osaki, M. Minagawa, A. Tanioka: *J. Electroanalytical Chem.*, **506/1**, 34 (2001)

出版物頒布のお知らせ ——会員割引——

プラスチック加工技術ハンドブック

編 集 高分子学会 発 行 日刊工業新聞社

体 裁 A5判, 1,530頁

定 価 33,641円(税込), 送料実費

会員割引 30,000円(税, 送料込み)

内 容

第I編: 総論 (1. プラスチック産業の概況 2. 成形加工概論 3. 環境問題)

第II編: 成形材料 (1. 成形材料の構成 2. 熱可塑性樹脂 3. 熱硬化性樹脂 4. エラストマー 5. 複合材料)

第III編: 加工理論 (1. 状態変化とレオロジー 2. 成形加工理論 3. スクリュー理論 4. プラスチック加工成形のCAE)

第IV編: 一次加工 (1. 成形加工の基本 2. 前処理 3. 圧縮・トランスファー成形 4. 強化プラスチック成形 5. 射出成形 6. 押出成形 7. 中空成形 8. カレンダー成形 9. 発泡成形 10. 液体成形 11. 固体成形 12. 粉末成形 13. 特殊成形)

第V編: 二次加工 (1. 二次加工概論 2. 機械加工 3. 表面機能性付与 4. メタライジング 5. 接合 6. 印刷 7. 塗装 8. 特殊加工)

第VI編: 試験・評価 (1. 概論 2. 主な規格 3. 特性試験・評価)

資料 (ポリマーの記号/SI単位および他の単位との換算表)

申込方法 出版物名(巻), 氏名, 勤務先, 連絡先, 電話番号, 会員番号を明記し, FAXでお申し込み下さい。

申 込 先 [104-0042] 東京都中央区入船3-10-9 新富町東急ビル6F 高分子学会出版係

☎03-5540-3772 Fax 03-5540-3737