

二分子膜における金属イオンの選択透過

Selective Cation Transport Across Bilayer Membrane

鋤柄光則*

Mitsunori SUKIGARA

特定な金属イオンと選択的に錯体を形成し、それによって脂質二分子膜を通しての選択的なイオン輸送を行う化合物が、天然物にも合成物にも見出されてきた。これらのイオンキャリアーによる脂質二分子膜のイオン透過の機構を、排水や海水からの特定成分の分離等、水資源ならびに水中に溶解した資源の有効利用への応用の可能性を考えながら紹介する。

1. はじめに

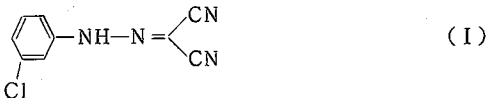
金属イオンに限らず、種々の分子やイオンに対する選択的な透過能を膜に賦与することは、溶液中の特定物質の濃縮や検出を行う機能を組み立てる場合に、そのような膜や、あるいは膜に類似な系を使うことが少なくとも原理的には可能になるということである。たとえば、海水中に稀薄な濃度で存在するさまざまな金属イオンの資源化、工鉱業排水からの重金属イオンなどの分離・濃縮と浄化、河川・湖沼やプロセス循環水の中の特定成分の定量などのために、そのような系を有効に利用できる可能性がある。

このような機能は、たとえば逆浸透膜においては、孔径の制御というような作業仮説に立って相当な成果をおさめてきている。一方、主として脂質二分子膜より成る生体膜においては、極めて選択性の良い金属イオンの透過が生体中の種々のエネルギー変換過程に共役して行われていることがわかってきており、また、このようなイオン透過が分子的な機構によって説明されてきている。すなわち、キャリアー分子による膜透過機構である。このような分子的な膜透過では、生体物質だけでなく、類似な構造を持つ合成分子にもイオン選択的なキャリアーとなるものが数多く見出され、そのようなキャリアー分子を使った分離化学的、分析化学的あるいは合成化学的研究はこの10年間で極めて多数報告されてきている。そこで本稿では、天然物および合成物質のイオンキャリアーの諸性質とその膜透過特性を、これらを使った系の水資源有効利用への応用を念頭において解説する。

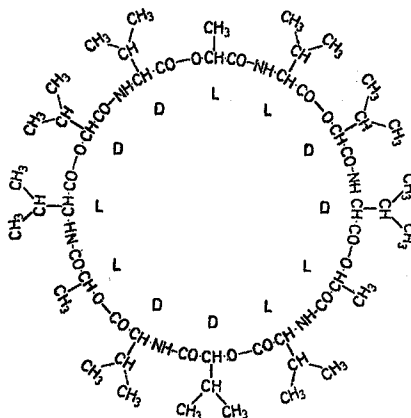
2. イオンキャリアーの概観

ミトコンドリアやクロロプラスト等におけるエネルギー変換は、脂質二分子膜を隔ててのイオン濃度の勾配(および電位勾配)を通して行われることがわかっている。

たとえばクロロプラストでは、光化学系Ⅱが水を酸化して電子を光化学系Ⅰへ伝える間に、クロロプラスト内膜の内側には水の分解によって生じたプロトンと、プラストキノンによって外側から内側へ運ばれたプロトンが増加する。クロロプラスト内膜はクロライドイオンの透過性を持つので、内液と外液の間に電位差は形成されないが、プロトン濃度の違いによる電気化学ポテンシャルの差は作られる。クロロプラストではこのポテンシャルの差を利用してADPからATPを作っているのである。ところが、クロロプラストを含む系にCCCP(I)のよ



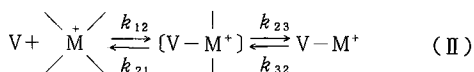
うな、脂質二分子膜を通してプロトンを輸送する能力を持つ分子(プロトンキャリアー)を加えると、照射によるATPの合成は阻害される。これば、照射によって形成されたプロトン勾配がCCCPによるプロトン輸



* 東京大学生産技術研究所 第4部

送のために消失してしまい、プロトン勾配によって駆動される ATPase が働けなくなってしまうからである¹⁾。一方、ATPase のような濃度勾配を化学的仕事に変換する機構を持たない膜、たとえばクロロフィルを埋め込んだ脂質二分子膜では、膜の両側の光酸化還元反応の結合は通常は起こり難いのであるが、この膜に CCCP を加えると、酸化還元反応の結合によって作られたイオン濃度の勾配が打ち消され、反応は CCCP を加える以前に比べてずっと速く進行するようになる²⁾。

酸化的リン酸化を行うミトコンドリアにおいても、イオンキャリアーの同様な効果が観測されている。特に有名な発見は、Streptomyces から分離された抗生物質であるヴァリノマイシン (II) が酸化的リン酸化の脱共役



剤となることであった³⁾。これはヴァリノマイシンがカリ

ウムイオンを選択的に輸送することによって、プロトン濃度差によって形成された電気化学ポテンシャルを打ち消してしまうためであると説明された⁴⁾。また、ヴァリノマイシンが人工の脂質二分子膜のイオン透過性を著しく増大させることも見出され⁵⁾、選択的なイオン透過能という観点からのイオンキャリアーに関する研究が大いに進んだ。その結果多数の天然のイオンキャリアーが見出され、それらの選択的輸送能や分子構造が明らかにされてきた。

現在は、イオンキャリアーは図1のような4つのグループに分類されている⁶⁾。図の中性イオンキャリアーとは、それ自身は電気的に中性であり、イオンを結合するとその電荷を担った形で膜を通り抜け、膜の逆側の溶液相にイオンを放出するような分子である。また、カルボン酸イオンキャリアーはカルボキシル基を1つ持っており、膜の一方側で金属イオンと結合すると同時にプロトンを解離し、逆側で金属イオンを放出すると同時にプロトン

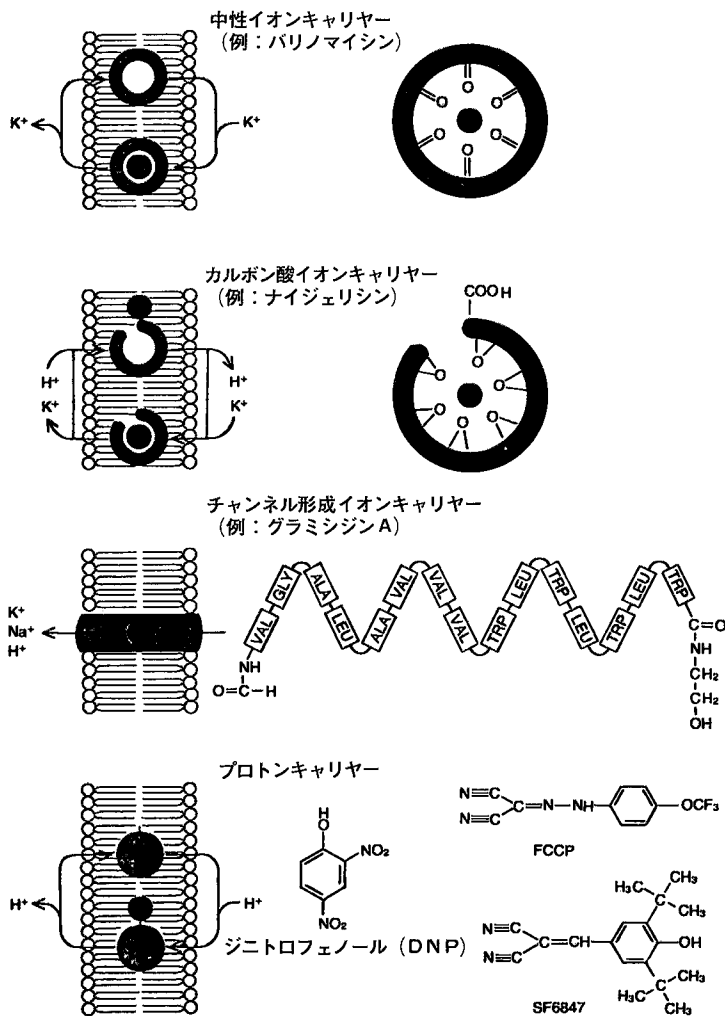


図1 イオンキャリアーの分類⁶⁾

表1 イオンキャリアーの選択性

イオンキャリアー	選 択 性	文 献
中性イオンキャリアー		
Valinomycin	Rb>K>Cs>Ag>Tl>>NH ₄ >Na>Li; Ba>Ca>Sr>Mg	5), 8), 9) 10)
Enniatin A	K>Rb≈Na>Cs>>Li	11)
Nonactin	NH ₄ >K≈Rb>Cs>Na	9)
Monactin	NH ₄ >K>Rb>Cs>Na>Ba	9)
Cryptate 211	Li>Na>K~Rb~Cs; Ca>Sr≈Ba	12)
Cryptate 221	Ag>Tl>Na>K>Li≈Rb>Cs; Sr>Ca>Ba>Mg	12)
Antanamide	Na>Li>Tl>K>Rb>Cs	13)
Dicyclohexyl 18-crown-6	Ag>K>Rb>NH ₄ >Cs>Na>Li; Ba>Sr>Mg>Ca	8), 9), 14), 15)
Dicyclohexyl 14-crown-4	Na>K>Cs	15)
カルボン酸イオンキャリアー		
Monensin	Na>>K>Rb>Li>Cs	8)
Nigericin	K>Rb>Na>Cs>>Li	8)
X-206	K>Rb>Na>Cs>Li	8)
X-537 A	Cs>Rb≈K>Na>Li; Ba>Sr>Ca>Mg	8), 16)
A 23187	Li>Na>K; Mn>Ca>Mg>Sr>Ba	17)
チャンネル形成イオンキャリアー		
Gramicidin A ^a	H ⁺ >Cs≈Rb>NH ₄ >K>Na>Li	18)
Polyene antibiotics ^a	選択性小	19)
Alamethecin ^b	K>Rb>Cs>Na	8)
Monazomycin ^b	Cs>Rb>K>Na>Li	20)

(a) 伝導度に電圧依存性なし

(b) 伝導度に電圧依存性あり

表2 ヴァリノマイシンの錯形成における速度論的パラメータ^a

カチオン	K ^b (M ⁻¹)	k ₁₂ (M ⁻¹ sec ⁻¹)	k ₂₁ (sec ⁻¹)	K ₁₂ =k ₁₂ /k ₂₁ (M ⁻¹)	k ₂₃ (sec ⁻¹)	k ₃₂ (sec ⁻¹)	K ₂₃ =k ₂₃ /k ₃₂
NH ₄ ⁺	47	1×10 ⁹	1.5×10 ⁸	6.5	2×10 ⁶	2.5×10 ⁵	8
Na ⁺	4.7	7×10 ⁷	2×10 ⁷	3.5	4×10 ⁶	2×10 ⁶	2
K ⁺	3×10 ⁴	4×10 ⁸	1×10 ⁸	4.0	1×10 ⁷	1.3×10 ³	7.7×10 ³

(a) メタノール中, 超音波吸収法による²²⁾.

(b) 見掛けの安定度定数

を取り込むものであり, この場合, 膜にアニオン透過性がなくても膜の両側の溶液相の電気的中性は保たれる. 一方, チャンネル形成イオンキャリアーと呼ばれるものでは, 脂質二分子膜に孔を形成する形で埋め込まれ, その孔を通して金属イオンが運ばれる. さらに, プロトンキャリアーは, 膜の片側の溶液相でプロトンを受け取り逆側でこれを放出することによって膜を通してプロトンを輸送する. このようなイオンキャリアーが, どのよう

なイオン選択性を持っているかを Pressman の総説⁷⁾から抜粋して表1に示す.

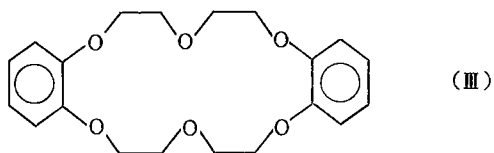
イオンキャリアーにおけるイオン選択性は, イオンとの結合部位の大きさや孔の大きさとイオンの直径とのマッチングによって説明されている. いくつかのイオンキャリアーにおけるイオン半径と錯形成自由エンタルピーとの関係を図2に示す. さらに詳しい速度論的パラメータは, ヴァリノマイシンの場合に次のスキームに基づい

て求められている²¹⁾。

すなわち、反応の第一段階では溶媒和した金属イオンと極性溶媒中のヴァリノマイシンが中間的な錯体を形成し、次いで、金属イオンから溶媒がはずれて最終的な錯体となる。これらの速度定数の値^{21,22)}を表2に示す。表2からわかるように、ヴァリノマイシンのイオン選択性はほとんど第二段階の分子内過程によって生じていることがわかる。

3. クラウンエーテル

人工的に合成されたイオンキャリアーとして、クラウンエーテル類は極めて優れた性質を示し、分離、分析、あるいは触媒の応用への大きな可能性を持つものとして注目されている^{23,24)}。クラウンエーテルが金属イオンと錯体を形成することは、1967年に du Pont の Pedersen²⁵⁾ によって見出され、Crown の名も Pederson によって付けられたものである。たとえば (Ⅲ) のクラウンエーテルは、



ジベンゾ-18-クラウン-6 と呼ばれるが、18 は環を形成する原子の数であり、6 はその内の酸素原子の数を表

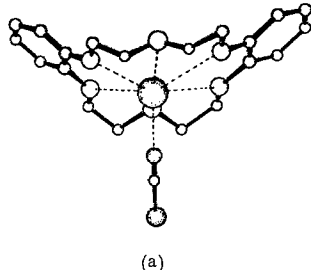
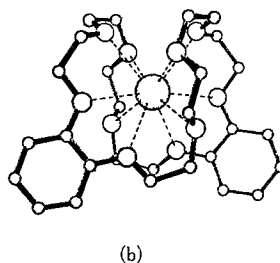


図3 (a): ジベンゾ-18-クラウン-6 と RbNCS との錯体の構造



(b): ジベンゾ-30-クラウン-10 と KI との錯体の構造^{23,24)}

表3 クラウンエーテルの孔径とカチオンの直径 (Å)

カチオン	Li ⁺	Na ⁺	K ⁺	Cs ⁺	NH ₄ ⁺	Ag ⁺	Ba ²⁺
直径	1.20	1.90	2.66	2.96	3.34	2.52	2.68
クラウンエーテル	14-Cr-4	15-Cr-5	18-Cr-6	21-Cr-7			
直径	1.3	2.0±0.2	2.9±0.3	3.85±0.45			

表4 ジンクロヘキシル-18-クラウン-6・金属イオン錯体の安定度定数 (水溶液中, 25°C)

イオン	Li ⁺	Na ⁺	K ⁺	Rb ⁺	Cs ⁺	Ag ⁺	Tl ⁺	Hg ₂ ²⁺	Sr ²⁺	Ba ²⁺	Pb ²⁺
log K	0.6	1.2	2.1	1.5	1.0	2.3	2.4	1.9	3.2	3.6	~5

している。金属イオンはクラウンエーテルの中央の空間に取り込まれるが、たとえば (Ⅲ) が Na⁺ を結合したときの構造は図3(a)のように表され、さらに大きなジベンゾ-30-クラウン-10 が K⁺ と結合した構造は図3(b)のように表される^{26,27)}。このようなクラウンエーテルの中央の空間の直径とイオンの直径を比べると表3

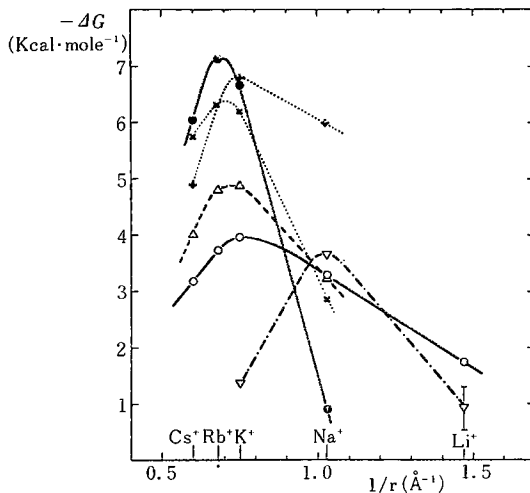


図2 種々のイオンキャリアーのイオン選択性²¹⁾

●—●: ヴァリノマイシン, ○—○: エニアチン,
 △—△: ソナクチン, ▽—▽: アンタマナイド,
 ×—×: ジベンゾ-30-クラウン-10, +—+:
 ジベンゾ-18-クラウン-6

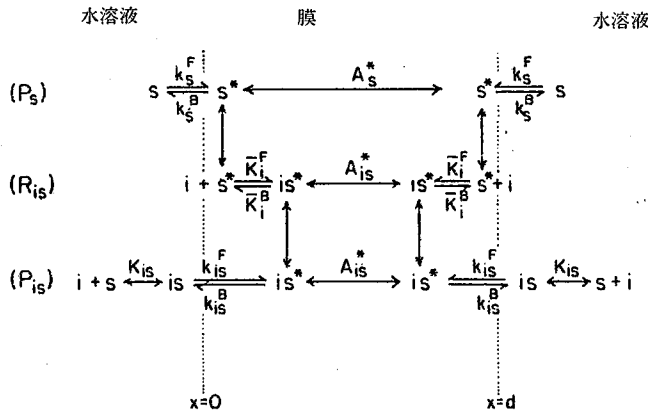


図4 中性イオンキャリアーによる膜透過のモデル³¹⁾

のようになり²⁸⁾、表1に示した選択性とほぼ平行な関係のあることが知られる。このようなイオン選択性は、また、環を形成する酸素原子をSやNHに変えることによっても大きく変化させることができる。たとえば、18-クラウン-6とカチオンとの錯体の安定度定数は、水溶液中でNa⁺、K⁺、Cs⁺、NH₄⁺、Ag⁺に対して、それぞれ、log K=0.3, 2.06, 0.8, 1.1, 1.6であるが、向かい合う2つの酸素原子をSで置換したものでは、Ag⁺に対してlog K=4.34、さらに、向かい合う2つのOをNHで置換した場合は、Ag⁺に対してlog K=7.8という値が得られている²⁹⁾。また、錯形成能は環についている置換基によっても微妙に変化する。上記の18-クラウン-6に置換基を導入したジシクロヘキシル-18-クラウン-6の水溶液中における金属イオンとの錯形成の安定度定数³⁰⁾を表4に示す。

4. イオンキャリアーによる膜透過の速度論

イオンキャリアーによって促進される金属イオンの膜透過の速度論的解析は、いくつか報告されているが、ここではLapradeら³¹⁾に従って、分配輸送(図のP_sとP'_{is})と膜界面でのキャリアーとイオンとの反応(図のR'_{is})の複合過程として取り扱う。このとき、膜透過のモデルは図4のようになる。図4のX=0からX=d迄は膜であり、両側はそれぞれ水溶液相である。

i) 膜内の輸送

膜内の動き得る化学種は、電荷を持たないイオンキャリアーとイオンと結合したキャリアー(錯体)のみとする。したがって、膜を通過する電流密度Iは錯体の流速J_{is}^{*}によるものだけである。

$$I = zF J_{is}^* \tag{1}$$

ここでFはFaraday定数、zは錯体の電荷であり以下ではすべて+1とする。膜は中性キャリアーに関しても錯体に関しても、両界面近傍にポテンシャルの極小を

持ち、それらの間をキャリアーおよび錯体は同一の活性化エネルギーによって、移動するものとする。このとき、各流速は次のように表される。

$$J_s^* = A_s^* [C_s^*(0) - C_s^*(d)] \tag{2}$$

$$J_{is}^* = A_{is}^* [e^{\phi/2} C_{is}^*(0) - e^{-\phi/2} C_{is}^*(d)] \tag{3}$$

ここで、A_s^{*}=dk_s^{*}/2、A_{is}^{*}=dk_{is}^{*}/2であり、k_s^{*}およびk_{is}^{*}は、それぞれ中性キャリアーおよび錯体の移動の速度定数、dは膜厚である。また、φは膜の両側のポテンシャル差であり、次式で与えられる。

$$\phi = \frac{zF}{RT} [\varphi^*(0) - \varphi^*(d)] = \frac{zF}{RT} V \tag{4}$$

ii) 膜-液界面

図4の3つの独立な過程はそれぞれ次のように表される。

a) キャリアーの分配

$$S \frac{R_s^f}{R_s^b} S^* \tag{5}$$

$$\frac{C_s^*(0)_{eq}}{C_s(0)_{eq}} = \frac{R_s^f}{R_s^b} = k_s \tag{6}$$

b) 界面反応

$$i + S^* \xrightleftharpoons[\bar{K}_i^b]{\bar{K}_i^f} iS^* \tag{7}$$

$$\frac{C_{is}^*(0)_{eq}}{C_i(0)_{eq} C_s^*(0)_{eq}} = \frac{\bar{K}_i^f}{\bar{K}_i^b} = \bar{K}_i \tag{8}$$

c) 錯体の分配

$$i_s \frac{k_{is}^F}{k_{is}^B} i_s^* \quad (9)$$

$$\frac{C_{is}^*(o)_{eq}}{C_{is}(o)_{eq}} = \frac{k_{is}^F}{k_{is}^B} = k_{is} \quad (10)$$

iii) 水溶液相

水溶液中のイオンとキャリアーの錯形成は次式で表される。

$$i + s \frac{K_{is}^F}{K_{is}^B} i_s \quad (11)$$

$$\frac{C_{is}}{C_i C_s} = \frac{K_{is}^F}{K_{is}^B} = K_{is} \quad (12)$$

キャリアーの全濃度は $C_s^T = C_s + C_{is}$ であるから、(12)式より次式が得られる。

$$C_s = \frac{C_s^T}{1 + K_{is} C_i}, \quad C_{is} = \frac{K_{is} C_s^T C_i}{1 + K_{is} C_i} \quad (13)$$

さらに、表面電荷を持つ膜においては電荷を持つ化学種の表面濃度は当然 (13) 式とは異なってくるが、ここでは簡単のために膜は表面電荷を持たないものとして扱う。

以上のモデルによって速度式を作り、定常状態に関して解けば次のような解が得られる^{31,32)}。すなわち、膜の両側のキャリアーの全濃度が等しく、等濃度のイオンを含む場合の膜のコンダクタンスは、

$$G(i) = \frac{I(\infty)}{V} = \frac{2z^2 F^2}{RT\phi} \bar{K}_i k_s C_i \frac{C_s^T}{1 + K_{is} C_i} \cdot \frac{A_{is}^* \sinh \frac{\phi}{2}}{1 - 2A_{is}^* A_{is}^*(o) \cosh \frac{\phi}{2}} \quad (14)$$

ここで V は加えた電圧であり、 $A_{is}^*(o)$ は次式である。

$$A_{is}^*(o) = - \frac{1}{k_{is}^B + [\bar{K}_i^B + (k_s^B + 2A_s^*)] / (k_s^B + 2A_s^* + \bar{K}_i^F C_i)} \quad (15)$$

(14)、(15)式からわかるように、定常状態のコンダクタンスはキャリアーの全濃度に比例するが、イオン濃度に関しては、それほど簡単な関係は示さない。特に、電流 O の場合のコンダクタンスを、2つの両極端、すなわち純粋に溶液内反応によって錯体が形成され、それが分配されることによって膜を透過する場合と、膜界面での反応が膜透過を支配している場合とについて、(14)式を変形して表すと、それぞれの場合について次の二式が得られる。

$$G_o(i) = \frac{z^2 F^2}{RT} k_s C_s^T \frac{L_i C_i}{1 + K_{is} C_i} \quad (P_{is} \text{ 機構}) \quad (16)$$

$$L_i = \frac{\bar{K}_i A_{is}^*}{1 + 2A_{is}^* / k_{is}^B} \quad (17)$$

また、

$$G_o(i) = \frac{z^2 F^2}{RT} k_s C_s^T L_i' C_i \frac{1}{(1 + K_{is} C_i)(1 + N_i C_i)} \quad (R_{is} \text{ 機構}) \quad (18)$$

$$L_i' = \frac{\bar{K}_i A_{is}^*}{1 + 2A_{is}^* / \bar{K}_i^F} \quad (19)$$

$$N_i = \frac{2A_{is}^*}{(2A_{is}^* + \bar{K}_i^F)} \frac{\bar{K}_i^F}{(k_s^B + 2A_s^*)} \quad (20)$$

たとえば、ヴァリノマイシンによる Rb^+ や K^+ の輸送は、 R_{is} 機構による (18) 式が実験とよく一致するようである³¹⁾。

5. 結 言

以上述べたように、天然物あるいは合成物のイオンキャリアーは数多く知られてきており、それらの錯形成等のデータも蓄積されている。このようなキャリアーを含む膜透過の速度論は極めて複雑であり、現在、必ずしも全ての場合について解明されているとは言えない段階である。しかし、イオンキャリアー特にクラウンエーテルの応用は合成化学、分離化学、分析化学、電気化学等の分野で極めて活発に研究されており³³⁾、すでに実用段階にある技術もいくつかあるようである。常温常圧での化学反応、選択性の極めて高い定量分析や分離など、省資源・省エネルギーという立場からも注目すべき物質であり、今後の実用的展開が期待されるものである。

(1980年1月16日受理)

文 献

- 1) 藤茂宏, 光合成 裳華房 (1973)
- 2) K. Kurihara, Y. Toyoshima, M. Sukigara, Biochem. Biophys. Res. Commun. **84**, 546 (1979)
- 3) W. McMurray, R. W. Begg, Arch. Biochem. Biophys. **84**, 546 (1959)
- 4) B. C. Pressman, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **53**, 1076 (1965)
- 5) P. Mueller, D. O. Rudin, Biochem. Biophys. Res. Commun. **26**, 398 (1967)
- 6) P. C. Hinkle, R. E. McCarty (丸山工作訳), サイエンス No. 5, 86 (1978)
- 7) B. C. Pressman, Ann. Rev. Biochem. **45**, 501 (1976)
- 8) B. C. Pressman, Fed. Proc. **27**, 1283 (1968)

- 9) D. H. Haynes, B. C. Pressman, *J. Membr. Biol.* **18**, 1 (1974)
- 10) E. Grell, T. Funk, F. Eggers, "Molecular Mechanisms of Antibiotic Action on Protein Biosynthesis and Membranes", ed. E. Munoz et al., p. 646, Amsterdam, Elsevier, 1972
- 11) Yu. A. Ovchinnikov, V. T. Ivanov, A. M. Shkrob, "Membrane Active Complexones", B. B. A. Library, Vol. 12, New York, Elsevier, 1974
- 12) B. Dietrich, J. M. Lehn, J. P. Sauvage, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* **1973**, 15
- 13) T. Wieland et al., *FEBS Lett.* **9**, 89 (1970)
- 14) J. J. Christensen, J. C. Hill, R. M. Izatt, *Science* **174**, 459 (1971)
- 15) C. J. Pedersen, *Fed. Proc.* **27**, 1305 (1968)
- 16) B. C. Pressman, *Fed. Proc.* **32**, 1698 (1973)
- 17) N. T. deGuzman, B. C. Pressman, *Circulation* **49**, 1972 (1974)
- 18) S. B. Hladky, D. A. Haydon, *Biochim. Biophys. Acta* **274**, 294 (1972)
- 19) A. Cass, A. Finkelstein, Y. Krespi, *J. Gen. Physiol.* **56**, 100 (1970)
- 20) S. Estrada, C. Gomez-Lojero, *Biochemistry* **10**, 1598 (1971)
- 21) E. Grell, T. Funck, F. Eggers, "Lipid Bilayers and Biological Membranes: Dynamic Properties" ed. by G. Eisenman, p. 1 New York, Marcel Dekker, 1975
- 22) T. Funck, F. Eggers, E. Grell, *Chimia* **26**, 637 (1972)
- 23) I. M. Koltzoff, *Anal. Chem.* **51**, 1 R(1979)
- 24) F. Vögtle, E. Weber, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **18**, 753 (1979)
- 25) C. J. Pedersen, *J. Am. Chem. Soc.* **89**, 7017 (1967)
- 26) M. R. Truter, C. J. Pedersen, *Endeavour* **30**, 142 (1971)
- 27) M. A. Bush, M. R. Truter, *Chem. Commun.* **1970**, 1439
- 28) C. J. Pedersen, H. K. Frensdorff, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **11**, 16 (1972)
- 29) 文献 11) p. 62
- 30) R. M. Izatt et al. *J. Am. Chem. Soc.* **98**, 7620 (1976)
- 31) R. Laprade, C. Sergio, G. Eisenman, G. Szabo, "Lipid Bilayers and Biological Membranes: Dynamic Properties" ed. by G. Eisenman, p. 127, New York, Marcel Dekker, 1975
- 32) S. M. Ciani, R. Laprade, G. Eisenman, G. Szabo, *J. Membr. Biol.* **11**, 255 (1973)
- 33) J. Christensen, D. J. Eatough, R. M. Izatt, *Chem. Rev.* **74**, 251 (1974)

東京大学生産技術研究所報告刊行案内

第28巻 第3号(和文)

原善四郎・明智清明著

繊維強化金属の抵抗焼結に関する研究

A Study on the Resistance-Sintering of Fibre Reinforced Metals

加圧下の金属粉に直接、低電圧・大電流を通電して焼結を行う抵抗焼結法は、焼結時間がきわめて短いという特長をもっている。本研究は、抵抗焼結法によって繊維強化複合材料(FRM)を作製する場合の、Al, Ti, Ni, Feなどの金属粉およびこれら金属粉とB繊維、鋼繊維との各混合物の抵抗焼結特性ならびに作製されるFRMの物理的・機械的性質、繊維マトリックス間の反応などを検討することによって、FRMの作製に対する抵抗焼結法の適否を明らかにしている。

金属粉の抵抗焼結においては、抵抗焼結過程中に金属粉圧粉体の電気抵抗が抵抗焼結機の固有の電気抵抗と等しいとき、単位時間当たり最大入力となり昇温速度が最大となることから、上記金属粉の中でTi粉の抵抗焼結特性が最良であることが明らかにされた。

Al粉とB繊維混合物をAlマトリックスが過度に溶けない程度の入力で抵抗焼結すると、繊維マトリックス間に反応層を生ずることなく優れた機械的性質のFRMを作製できる(Al-20 vol% B材 50 kg/mm²)。反応性の高いTi-B系においても、通電途中に切電時間を挿入したサイクリック通電方式によってTi-B間の反応を抑制し、繊維強化効果のある複合材が得られる。

同様にAl-鋼繊維系、Fe-鋼繊維系でも抵抗焼結法によってFRMを作製できることが明らかになった。Fe-B系、Ni-B系では繊維マトリックス間の反応が著しく、B繊維に不活性被覆を施さないかぎり抵抗焼結法によるFRMの作成は困難である。

(1980年3月発行)