

【技術分類】 2 - 1 - 4 有機高分子多孔質体の機能と物性 / 評価方法 / 吸着・拡散

【 F I 】 C 0 8 J 9 / 0 0 *

【技術名称】 2 - 1 - 4 - 1 吸着 (吸着平衡)

【技術内容】

流体相 (気相または液相) と固体表面が十分長く接触すると、流体相中の特定成分 (吸着質) が固体表面に吸着し、気相または液相と吸着層の化学ポテンシャルが釣り合ったところで吸着平衡が成立する。吸着平衡関係は、温度一定条件下での吸着等温線 (等温式) で示すのが最も一般的である。単成分系での代表的な吸着等温式を表1に示す。気相吸着では(a)Langmuir式と(f)BET式が最も代表的で、液相吸着では(b)の Freundlich 式が簡便に実測値を整理できることから一般的に用いられる。吸着熱は、Clausius-Clapeyron 式により求められる。単成分系での吸着平衡関係を利用して、多成分系の吸着平衡関係を推算する方法として、Langmuir 式を多成分系に拡張した Markham-Benton 式、Myers-Prausnitz らによる Ideal Adsorbed Solution モデルによる方法が提案されている。

平衡吸着量の測定には、定容法、重量法、流通法、加熱脱離法、溶媒抽出法がある。定容法は、吸着に伴う一定温度・圧力に保った気体の容積変化から吸着量を測定する方法で、窒素の吸着量を液体窒素温度で測定する方法は BET 法と呼ばれ、比表面積の測定に用いられる。重量法は、吸着剤試料への吸着による重量変化を直接、石英スプリング或いは電子天秤等により測定する。流通法は、試料を詰めた容器に吸着質を含む流体を流し、出口の濃度変化を測定して吸着量を求める。装置及び破過曲線の例を図1と図2に示す。その他に予め吸着平衡に達した試料から加熱或いは溶媒抽出による脱離量を測定する方法がある。

【図】

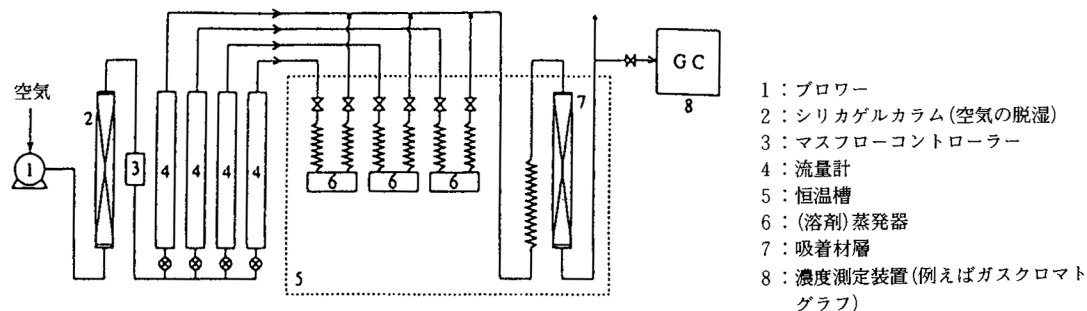
表1 代表的な吸着平衡式

Langmuir 式	$q = \frac{q_{\infty} K p}{1 + K p}$	(a)	平面上の理想的な吸着
Freundlich 式	$q = k p^{1/n}$	(b)	不均一表面上の吸着、DA 式の $n_A=1$ に対応
Toth 式	$\frac{q}{q_{\infty}} = \frac{p}{(b_1 p^t + p^t)^{1/t}}$	(c)	$t=1$ は Langmuir 式に対応
Dubinin 式	$q = q_{\infty} \exp \left\{ \left[-B \left(\frac{T^2}{\beta^2} \right) \right] \left(\log \frac{p_s}{p} \right)^2 \right\}$	(d)	DA 式の $n_A=2$ に相当
Dubinin-Astakhov 式	$q = q_{\infty} \exp \left\{ - \left(\frac{A}{E} \right)^{n_A} \right\}$	(e)	$A = RT \ln (p_s/p)$
BET 式	$\frac{p}{q(p_s - p)} = \frac{1}{q_m C} + \frac{C-1}{q_m C} \frac{p}{p_s}$	(f)	多分子層吸着、C: 定数

出典:「化学工学便覧」、1999年2月25日、化学工学会編、丸善株式会社発行、698頁 表13.6 気相吸着平衡式の代表例

表1の説明: Langmuirの単分子吸着理論では、1)均一な表面吸着サイト、2)単分子吸着、3)同じ吸着/脱着エネルギーの可逆吸着、4)吸着分子同士の相互作用はない、との前提で、吸着速度 $V_a = k_a(1-s)P$ と脱着速度 $V_d = k_d s$ が等しいとして(a)式が導出される。 k_a, k_b は吸着及び脱着の速度定数、 $K = k_a/k_b$ 、 s は表面被覆率、 q および p_0 は吸着量及び平衡吸着量を示す。BET式は、Langmuirの単分子吸着理論を多分子層吸着に拡大し、2分子層以上の吸着熱は蒸発潜熱に等しいとして誘導した。

図1 流通吸着装置の例

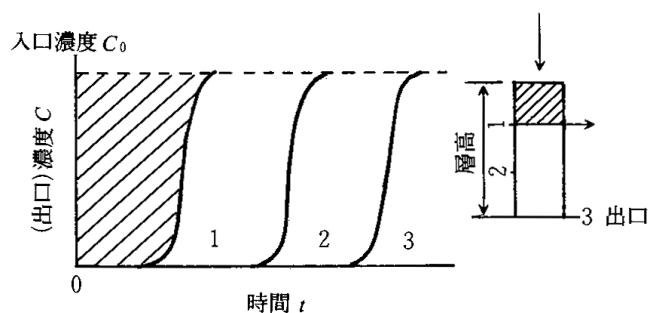


- 1：ブロー
- 2：シリカゲルカラム(空気の脱湿)
- 3：マスフローコントローラ
- 4：流量計
- 5：恒温槽
- 6：(溶剤)蒸発器
- 7：吸着材層
- 8：濃度測定装置(例えばガスクロマトグラフ)

出典：「多孔質体における吸着、拡散とその測定法」「多孔質体の性質とその応用技術」、1999年3月30日、竹内擁著、フジテクノシステム発行、333頁 図16 流通吸着装置の模式図(溶剤蒸気の吸着に用いるもの。6にガス供給装置を置くと、一般のガスに適応可)

図1の説明：例として、予め乾燥、脱気を行った試料を詰めた容器(7:吸着剤層)に、吸着質を含む一定濃度、一定流量、一定温度の気体を流し、吸着剤層出口の気体の濃度をガスクロマトグラフ等の濃度測定装置で測定して破過曲線を得、それから吸着量を求める。

図2 吸着破過曲線の一例



出典：「多孔質体における吸着、拡散とその測定法」「多孔質体の性質とその応用技術」、1999年3月30日、竹内擁著、フジテクノシステム発行、333頁 図17 吸着破過曲線の一例と吸着量の計算法

図2の説明：斜線の面積は吸着された量に相当する。流量と濃度を掛け、吸着材量で割ると吸着量qが求まる。

【出典 / 参考資料】

「多孔質体における吸着、拡散とその測定法」「多孔質体の性質とその応用技術」、1999年3月30日、竹内擁著、フジテクノシステム発行、323 - 346頁

「化学工学便覧」、1999年2月25日、化学工学会編、丸善株式会社発行、696 - 710頁

【技術分類】 2 - 1 - 4 有機高分子多孔質体の機能と物性 / 評価方法 / 吸着・拡散

【 F I 】 C 0 8 J 9 / 0 0 *

【技術名称】 2 - 1 - 4 - 1 吸着 (イオン交換平衡)

【技術内容】

A イオンを含むイオン交換体、価数 z_B (z_A と同符号) の B イオンと接触させると、A イオンは液相に、またそれと等量の B イオンが固相にそれぞれ移動する。



(1)式に質量作用の法則を適用すると、イオン交換平衡式として(2)式が得られる。

$$K_A^B = \frac{q_B^{|Z_A|} c_A^{|Z_B|}}{q_A^{|Z_B|} c_B^{|Z_A|}} \quad (2)$$

K_A^B は、B イオンの A イオンに対する選択係数、c および q は各々液相および固相のイオン濃度 [kmol/cm³]を示す。強酸性イオン交換樹脂における各種陽イオンの選択係数を表 1 に示す。選択係数は、イオンの価数、水和の大きさ、交換基との相互作用により支配される。選択係数は、熱力学的平衡定数 K と(3)式で関係づけられる。'および' は各々固相および液相におけるイオンの活量係数を示す。

$$K_A^B = K \frac{\bar{\gamma}_A^{|Z_B|} \gamma_B^{|Z_A|}}{\bar{\gamma}_B^{|Z_A|} \gamma_A^{|Z_B|}} \quad (3)$$

液相および樹脂相における電気的中性の条件式、 $Q_0 = z_a c_A + z_b c_B$ 、 $Q = z_a q_A + z_b q_B$ を用いると式(1)から(3)式が導かれ、切片から交換容量 Q、勾配から選択係数 K_A^B が求まる。

$$q_B = Q - \frac{1}{K_A^B} \frac{q_B}{c_B} c_A \quad (|Z_a| = |Z_b|) \quad (4)$$

【図】

表 1 強酸性イオン交換樹脂における各種陽イオンの選択係数

イオン B	% DVB			イオン B	% DVB		
	4	8	16		4	8	16
Li ⁺	1.00	1.00	1.00	Co ²⁺	3.23	3.74	3.81
H ⁺	1.32	1.27	1.47	Cu ²⁺	3.29	3.85	4.46
Na ⁺	1.88	1.98	2.37	Cd ²⁺	3.37	3.88	4.95
NH ₄ ⁺	1.90	2.55	3.34	Mn ²⁺	3.42	4.09	4.91
K ⁺	2.27	2.90	4.50	Be ²⁺	3.43	3.99	6.23
Rb ⁺	2.46	3.16	4.62	Ni ²⁺	3.45	3.93	4.06
Cs ⁺	2.67	3.25	4.66	Ca ²⁺	4.15	5.16	7.27
Ag ⁺	4.73	8.51	22.9	Sr ²⁺	4.70	6.51	10.1
Tl ⁺	6.71	12.4	28.5	Cr ³⁺	6.6	7.6	10.5
UO ₂ ²⁺	2.36	2.45	3.34	Pb ²⁺	6.6	9.9	18.0
Mg ²⁺	2.95	3.29	3.51	Ce ³⁺	7.5	10.6	17.0
Zn ²⁺	3.13	3.47	3.78	Ba ²⁺	7.5	11.5	20.8

注 Dowex 50 A≡Li⁺

[妹尾 学, 鈴木 喬: “イオン交換”, p.10, 講談社 (1991)]

出典: 「化学工学便覧」, 1999年2月25日、化学工学会編、丸善株式会社発行、702頁 図 13.9 イオンの選択係数

表 1 の説明 : DVB が 4, 8, 12% のイオン交換樹脂の各種陽イオンに対するイオン交換選択係数を示す。

【出典 / 参考資料】

「化学工学便覧」、1999 年 2 月 25 日、化学工学会編、丸善株式会社発行、696 - 710 頁

【技術分類】 2 - 1 - 4 有機高分子多孔質体の機能と物性 / 評価方法 / 吸着・拡散

【 F I 】 C 0 8 J 9 / 0 0 *

【技術名称】 2 - 1 - 4 - 1 吸着 (QCM による吸着量の測定方法)

【技術内容】

吸着量の測定には、定容法、重量法、流通法、加熱脱離法、溶媒抽出法がある。

重量法では、吸着剤試料への吸着による重量変化を直接、石英スプリング或いは電子天秤等により測定する。微量の測定には、水晶振動子マイクロバランス (QCM) も使用され、10ng/cm² の検出感度がある。吸着による重量変化は、水晶振動子の共振周波数シフト (Δf) から Sauerbrey 式を用いて計算することが出来る。

$$\Delta f = -2f_0^2 \frac{m}{A(\rho_q \mu_q)^{1/2}}$$

f_0 は、水晶振動子単独の周波数、 m は重量変化、 A は Au 電極の圧電活性面積、 ρ_q と μ_q は各々水晶の密度と剛性率を示す。QCM 装置の構成を図 1 に示す。

サンプルを QCM セル内に設置し、所定時間、純 N₂ 流通下 (脱着サイクル) または有機化合物を含む N₂ 流通下 (吸着サイクル) にさらす。吸着および脱着サイクルを数回繰り返し行い周波数を測定する。周波数のシフトから吸着率を以下のように計算する。

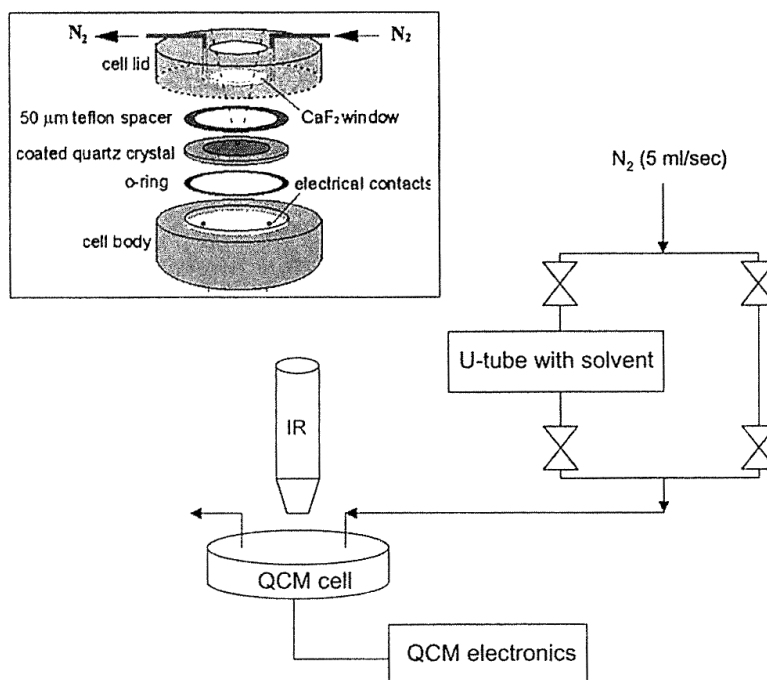
$$\% \text{吸着} = [(f_1 - f_2) / (f_0 - f_2)] \times 100$$

f_1 と f_2 は、吸着前後のサンプルの周波数を示す。吸着する有機分子液相の密度の補正も行う。

測定例として、多孔化剤量の異なるナノポーラス PMSSQ 膜への PMAc 吸着量を図 2 示す。

【図】

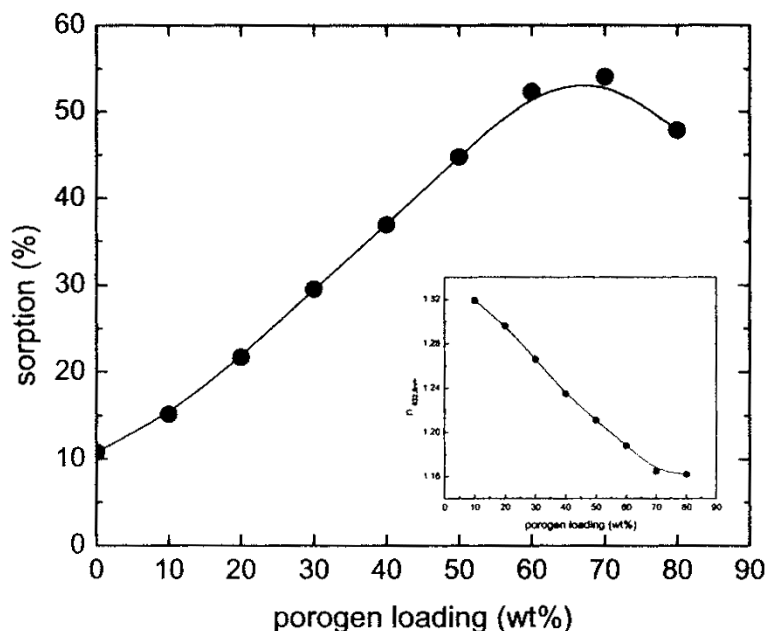
図 1 QCM 装置の構成図



出典 : 「 Selective Sorption of Nanoporous Poly(methyl silsesquioxane) . 」, 「 Chem Mater VOL.14 NO.11 」, 2002 年 11 月、 KIM H-C、 WILDS J B、 JOHNSON L R、 VOLKSEN W、 LEE V Y、 HEDRICK J L、 HAWKERC J、 MILLER R D、 HUANG E 著、 American Chemical Society 発行、 4629 頁 Figure 2 Diagram for QCM setup in this study. Inset shows the cell lid construction for reflectance IR measurement. Reprinted with permission from American Chemical Society.

図1の説明：純 N₂ および有機物を含むガスを供給するガス供給ラインと、QCM セル/電子機器からなる QCM 測定系から構成される QCM 測定装置の概要を示す。図中の挿入図は、反射 IR 測定用セルの構成を示す。

図2 ナノポーラス PMSSQ 膜の PMAc 吸着量と多孔化剤量の関係



出典：「Selective Sorption of Nanoporous Poly(methyl silsesquioxane).」, 「Chem Mater VOL.14 NO.11」, 2002年11月、KIM H-C、WILDS J B、JOHNSON L R、VOLKSEN W、LEE V Y、HEDRICK J L、HAWKERC J、MILLER R D、HUANG E 著、American Chemical Society 発行、4630 頁 Figure 5 Percent sorption of PMAc vs porogen loading plot for nanoporous PMSSQ films. Inset represents the refractive indices of nanoporous films. Reprinted with permission from American Chemical Society.

図2の説明：Poly(methyl methacrylate-co-dimethyl amino ethylmethacrylate) を多孔化剤 (porogen) として調製した poly(methyl silsesquioxane)(PMSSQ) 多孔質膜における、PMAc (1-methoxy-2-propanol acetate)の吸着量と多孔化剤量との関係を水晶振動子マイクロバランス装置を用いて測定した。多孔化剤の増加にともない吸着量が増加する。80%での吸着量の低下は、膜構造の変化を示す。

【出典/参考資料】

「Selective Sorption of Nanoporous Poly(methyl silsesquioxane).」, 「Chem Mater VOL.14 NO.11」, 2002年11月、KIM H-C、WILDS J B、JOHNSON L R、VOLKSEN W、LEE V Y、HEDRICK J L、HAWKERC J、MILLER R D、HUANG E 著、American Chemical Society 発行、4628 - 4632 頁

【技術分類】 2 - 1 - 4 有機高分子多孔質体の機能と物性 / 評価方法 / 吸着・拡散

【 F I 】 C 0 8 J 9 / 0 0 *

【技術名称】 2 - 1 - 4 - 2 拡散 (拡散係数)

【技術内容】

吸着と毛管現象の解析に基づく細孔の分類では、細孔半径が 1.5nm 以下をミクロ孔、1.5 ~ 100nm をメソ孔、100nm 以上をマクロ孔としている。通常、マクロ細孔領域では分子拡散が、メソ細孔領域ではクヌーセン拡散が支配的で、ミクロ領域では細孔壁表面の物理・化学的性質と拡散分子の極性・大きさ・形状などに支配される表面拡散或いは活性化拡散が起こる。

濃度差があるとき、分子運動により次第に濃度が一定になっていく現象を拡散と云う。物質 A-B が断面積 $A[m^2]$ を通る単位時間の物質量 N (流速: $kmol/s$) は、式(1)で表される。

$$-(N/A)=D_{A-B}(dC/dX) \quad (1) \quad C: \text{濃度}[kmol/m^3] \quad D_{A-B}: \text{分子拡散係数}$$

多孔質体内部での分子拡散領域では、分子拡散係数として空隙率 拡散距離を補正する屈曲係数によって修正された有効拡散係数 $D_e=(\quad)D_{A-B}$ が使われる。

細孔径が拡散分子の平均自由行程より極めて小さいときには、気体分子は主に細孔壁と衝突して移動が起こり (クヌーセン拡散)、流速は(2)式で示される。多孔質体での拡散定数は、分子拡散と同様に空隙率、屈曲係数で修正した有効拡散係数 $D_{ke}=(\quad)D_K$ を使用する。

$$-(N/A)=D_K(dC/dX)=(2r_p/3RT)(8RT/M)^{1/2}(dP/dX) \quad D_K=9700r_p(T/M)^{1/2} \quad (2)$$

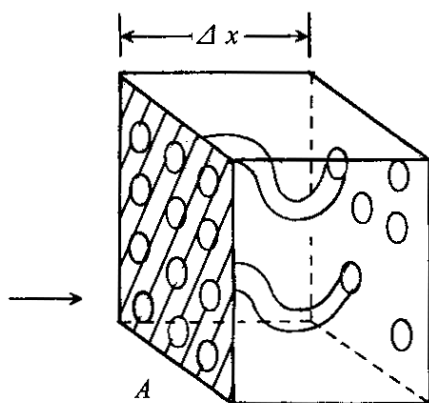
表面拡散は、多孔質表面に気体分子の吸着が起こり、その吸着量の勾配に従って移動する現象で、流速は(3)式で示される。

$$-(N/A)=D_s(dq/dx) \quad D_s=De(dC/dq)=De/(\quad) \quad (3)$$

$= dq/dC$ は、吸着等温線の傾きを示す。表面拡散係数の温度依存性は、拡散の活性化エネルギー E_D により $D_s=D_{s,0}\exp(-E_D/RT)$ で示すことができる。

【図】

図 1 多孔質体細孔の模型的構造



出典：「多孔質体の性質とその応用技術」、1999年3月30日、竹内擁監修、フジテクノシステム発行、336頁 図20 多孔質体における細孔の模型的構造

図1の説明：多孔質体内部の細孔或いは空隙を多数の一樣な大きさの毛細管群と考え、固体部分は拡散に全く寄与しないとすると、拡散に有効な断面積 A_e と、実際に拡散に關与する長さ l_p は、各々 $(A_e/A)= \quad$ 、 $(l_p/X)= \quad$ で示され、多孔質体の有効拡散係数は $D_e=(\quad)D_{A-B}$ として定義される。は、屈曲係数といわれ細孔や空隙の拡大、縮小の影響も含まれる。

表 1 ポリカプロラクタム膜の空隙率、拡散定数、屈曲係数

Film	ε (%)	$DK \times 10^9$ (cm^2/s)	τ
100% PCL	–	0.91 ± 0.05	–
PEG _{10,000}			
1	28.25 ± 2.10	2.84 ± 0.15	881.8 ± 106.6
2	29.27 ± 0.56	3.64 ± 0.34	715.1 ± 68.4
3	31.66 ± 2.45	4.05 ± 0.12	692.4 ± 61.8
4	41.63 ± 0.75	75.11 ± 1.12	489 ± 1.0
5	52.64 ± 0.51	166.01 ± 8.53	28.0 ± 12
PEG ₄₀₀₀			
6	25.36 ± 0.90	2.54 ± 0.11	879.3 ± 9.2
7	30.49 ± 2.39	3.56 ± 0.10	755.0 ± 43.5
8	34.67 ± 1.10	3.64 ± 0.17	843.2 ± 67.1
9	37.51 ± 1.43	134.26 ± 8.61	24.8 ± 2.3
10	49.61 ± 1.07	352.24 ± 15.56	12.5 ± 0.8

出典：「Characterization and permeation of microporous poly(ε -caprolactone) films.」, 「J Membr Sci VOL.198 NO.1」, 2002年3月31日、LIN W-J、LU C-H 著、ELSEVIER 発行、115頁 Table 4 The ,DK values and of porous membranes for theophylline. Reprinted with permission from ELSEVIER.

表 1 の説明：細孔付与剤としての PEG10000 と PEG4000 の添加量を 5 から 40%の範囲で変えて調製した多孔性ポリカプロラクタム膜の空隙率 ()、有効拡散定数 (DK) および屈曲係数 () を示す。空隙率の増加と共に、有効拡散定数は大きくなり、屈曲係数は低下する。

【出典 / 参考資料】

「多孔質体における吸着、拡散とその測定法」, 「多孔質体の性質とその応用技術」, 1999年3月30日、竹内擁著、フジテクノシステム発行、323 - 346 頁

「化学工学便覧」, 1999年2月25日、化学工学会編、丸善株式会社発行、144 - 152 頁

「Characterization and permeation of microporous poly(ε -caprolactone) films.」, 「J Membr Sci VOL.198 NO.1」, 2002年3月31日、LIN W-J、LU C-H 著、ELSEVIER 発行、109 - 118 頁

【技術分類】 2 - 1 - 4 有機高分子多孔質体の機能と物性 / 評価方法 / 吸着・拡散

【 F I 】 C 0 8 J 9 / 0 0 *

【技術名称】 2 - 1 - 4 - 2 拡散 (イオン交換樹脂内での拡散)

【技術内容】

イオン交換樹脂内でのイオン拡散では、交互に拡散するイオンの拡散係数が異なる場合、拡散係数の大きなイオンは減速され、小さなイオンは加速される様な電場が発生する。このため、イオンの拡散には、濃度勾配と電位勾配を考慮した Nernst-Planck 式 (式 1) が用いられる。

$$J_i = -D_i \left(\frac{\partial q_i}{\partial r} + \frac{Z_i q_i F}{RT} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \quad (1)$$

J_i : イオン流束 [$\text{kmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]、 D_i : 自己拡散係数 [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]、 F : ファラデー定数、 q : 樹脂相濃度 [$\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3}$]、 ϕ : 電気ポテンシャル、 R : 気体定数、 r : 拡散距離 [m]

電気中性の条件式 $Q = z_A q_A + z_B q_B$ と電流が流れない条件式 $z_A J_A + z_B J_B = 0$ と式(1)から式(2)が与えられる。

$$\frac{\partial q_B}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \bar{D}_{AB} \frac{\partial q_B}{\partial r} \right) \quad (2)$$

ここで

$$\bar{D}_{AB} = \frac{\bar{D}_A \bar{D}_B (z_A^2 q_A + z_B^2 q_B)}{z_A^2 q_A \bar{D}_A + z_B^2 q_B \bar{D}_B}$$

D_i : 樹脂相自己拡散係数 [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]、 Q : 樹脂の交換容量 [$\text{keq} \cdot \text{m}^{-3}$]

\bar{D}_{AB} は、樹脂相における相互拡散係数 [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] で、位置と時間の関数である。イオン交換の初期 ($q_B=0$) では $\bar{D}_{AB}=D_B$ 、交換の終わり ($q_B=1$) では $\bar{D}_{AB}=D_A$ となる。

【図】

表 1 イオン交換樹脂相の自己拡散係数

架橋度 [%]	\bar{D}_{Na^+}	$\bar{D}_{\text{Zn}^{2+}}$	$\bar{D}_{\text{Ba}^{2+}}$	$\bar{D}_{\text{Co}^{2+}}$	$\bar{D}_{\text{Ce}^{3+}}$	\bar{D}_{H^+} ^{a)}
ダイヤイオン SK						
3	34.8	8.51	2.13	7.70	1.54	
4	28.6	6.10	1.54	6.25	0.992	
6	20.2	3.30	1.08	3.05	0.414	
8	13.5	1.82	0.595	1.93	0.225	120
10	8.70	0.750	0.278	0.606	0.0375	
12	6.65	0.590	0.203	0.422		
16	4.17	0.172	0.0746	0.142		
Dowex 50 WX						
4	27.5	5.20	1.31	5.60		
8	16.1	1.80	0.698	1.60		
10	11.0	0.810	0.282	0.658		

a) Kataoka, T. and H. Yoshida: *J. Chem. Eng. Jpn.*, **8**, 451 (1975); Kataoka, T. *et al.*: *ibid.*, **7**, 105 (1974).

出典: 『化学工学便覧』, 1999年2月25日、化学工学会編、丸善株式会社発行、708頁 表13-17 樹脂相自己拡散係数 ($D \times 10^{11} [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$, 298K, $C_0 = 1 \text{ kmol} \cdot \text{m}^{-3}$)

表 1 の説明：架橋度の異なるイオン交換樹脂（ダイヤイオン SK、Dowex50 WX）相におけるイオンの自己拡散係数の実測値を示す。樹脂の架橋度が大きくなるほど、樹脂が収縮して網目構造が緻密になるため、自己拡散係数が顕著に低下する。

【出典 / 参考資料】

「化学工学便覧」、1999 年 2 月 25 日、化学工学会編、丸善株式会社発行、696 - 710 頁

【技術分類】 2 - 1 - 4 有機高分子多孔質体の機能と物性 / 評価方法 / 吸着・拡散

【 F I 】 C 0 8 J 9 / 0 0 *

【技術名称】 2 - 1 - 4 - 2 拡散 (拡散係数の測定法)

【技術内容】

多孔質体内の拡散係数の測定法としては、隔膜法、ガスクロ法、核磁気共鳴法などが一般的に用いられている。分離膜としての実用的な観点からすると、貫通していない細孔は透過分離に寄与しないため、隔膜法で測定するのが好ましい。

隔膜法では、膜両面の濃度を一定に保っておき、ある瞬間に片方の濃度 (或いは圧力) をステップ状に変化させると、その瞬間から拡散が起こり、二次側で図 2 に示すような濃度 (或いは圧力) の変化が観測される。初期の膜中の拡散による遅れ時間を経た後に時間と共に直線的に増加する定常透過を示す。膜透過流束は、膜内の拡散が支配因子であるとして、 $dc/dt=Dd^2c/dx^2$ の非定常拡散方程式を所定の初期条件および境界条件で解くことにより得られ、定常透過領域では下式のように示される。

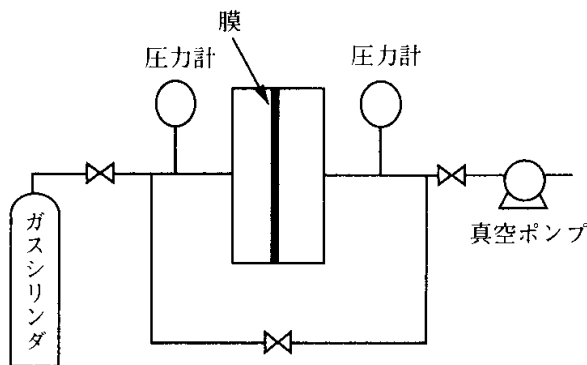
$$Q=(Dc_1/l) \{ t-(l^2/6D) \}$$

濃度ゼロへの外挿時間 (遅れ時間) $t=l^2/6D$ から拡散係数 D が算出される。定常透過流束 (二次側の濃度または圧力の勾配) から透過率 $P=Dc_1/l$ が求まる。ただし、膜厚 l が既知であることが必要である。

多くの実用的な分離膜は非対称構造のため、分離に有効な膜圧を測定するのが困難な場合が多い。このような場合は、支持層の拡散係数を別に求めておき、透過抵抗の直列モデルより算出することが行われる。

【図】

図 1 気体拡散係数測定装置の概略図

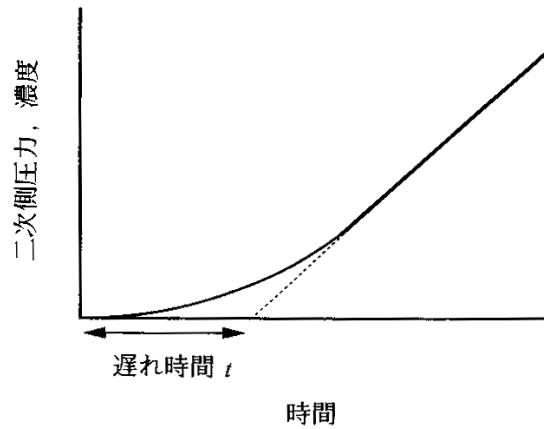


出典：「多孔質膜内の拡散現象」、*「多孔質体の性質とその応用技術」*、1999年3月30日、都留稔了著、フジテクノシステム発行、321頁 図 3 気体拡散係数測定装置の概略図

図 1 の説明：気相の拡散定数の測定装置の概念図を示す。膜の 1 次側および 2 次側を減圧後、供給側に圧力を加えると図 2 に示すような 2 次側圧力の変化が観測される。

液相の場合には、単純な 2 室式拡散セルを用いて測定可能で、気相の場合と同様にある時間に一方のセルの濃度を変化させ、2 次側の濃度の経時変化を測定する。

図2 隔膜法による拡散係数の測定における2次側圧力、濃度の経時変化



出典：「多孔質膜内の拡散現象」、「多孔質体の性質とその応用技術」、1999年3月30日、都留稔了著、フジテクノシステム発行、321頁 図2 遅れ時間法による拡散係数の測定

図2の説明：隔膜法による拡散係数の測定における2次側圧力、濃度の経時変化の概念図を示す。

【出典/参考資料】

「多孔質膜内の拡散現象」、「多孔質体の性質とその応用技術」、1999年3月30日、都留稔了著、フジテクノシステム発行、317 - 322頁

「化学工学便覧」、1999年2月25日、化学工学会編、丸善株式会社発行、144 - 152頁