

物物質移動操作 2012 伊東担当分

4/13(金) 第1回 (谷口)説明, 気液平衡
 4/20(金) 第2回 (谷口)蒸留1
 4/27(木) 第3回 (谷口)蒸留2
 5/11(金) 第4回 (谷口)液液平衡, 液液抽出1
 5/16(水) 第5回 (谷口)液液抽出2
 5/25(金) 第6回 (谷口)ガス吸収1
 6/1(金) 第7回 (谷口) ガス吸収2
 6/8(金) 第8回 (谷口) 中間試験
 6/15(金) 第9回 (伊東) 膜分離1(伊東担当分は情報ネットワーク演習室 第1演習室(D))
 6/22(金) 第10回 伊東) 膜分離2
 ■6/29(金) 第11回 (伊東) 膜分離3
 7/6(金) 第12回 (Wiwut) 調湿2 Humidification 2(
 7/13(金) 第13回 (Wiwut) 調湿1 Humidification 1
 7/17(火) 第14回 (Wiwut) 乾燥1 Drying 1
 7/20(金) 第15回 (Wiwut) 乾燥2 Drying 2
 7/27(金) 期末試験

担当教官 谷口, 伊東, Wiwut

金曜 3, 4 限(13:20-14:50)

講義室:S422 および

南4号館 3階 情報ネットワーク演習室 第1演習室(D)

毎回筆記レポートと演習 Excel シートのプリントアウトレポートの2つを提出してもらいます。演習室に置いた提出 Box へ 15:05 までに提出。(以降は 18:00 までに, 南 1 421 伊東居室前の Box へ。)

演習・実習用の Excel シートテンプレートファイルは以下にあります。当日のフォルダ“bce_”をデスクトップにコピーして使ってください。

1. [エクスプローラ]

2. “¥¥nest2.g.gsic.titech.ac.jp¥home0”を入力

膜分離3 ガス分離膜モジュールのモデル

1 膜透過係数

膜によるガス分離法は, 工場における水素回収や家電製品としての酸素濃縮器などに応用されている。ガス分離に使用される膜は孔のない高分子膜である。膜面積 A [m^2 or cm^2] の高分子均質膜を通過するガスの permeation rate 透過速度 P [mol/s or $\text{cm}^3(\text{STP})/\text{s}$] は, 膜を介した partial pressure difference 分圧差 Δp [kPa or cmHg] に比例し, 膜厚み membrane thickness δ [m or cm] に反比例する:

$$\frac{P}{A} = \frac{Q}{\delta} \Delta p \quad (5.1)$$

この式で定義される Q が permeability 透過係数であり, 膜材料と透過ガス成分の組み合わせで決まる物性値である。(単位は [$\text{mol m}/(\text{m}^2 \text{ s kPa})$] または [$\text{cm}^3(\text{STP}) \text{ cm}/(\text{cm}^2 \text{ s cmHg)$]) 成分毎の透過係数が膜プロセス解析の基礎となる。また2成分系のガス膜透過では成分1,2の透過係数比を ideal separation factor 理想分離係数 $\alpha (= (Q_1/Q_2))$ と呼ぶ。

高分子中の拡散－溶解－拡散モデル

膜によるガス・蒸気分離の基礎(図1) ガス・蒸気の膜分離の原理は, 混合ガスに膜を介して圧力差を与え, ガス成分が膜透過する際の分離機能を使用することである。均質膜(高分子膜)の場合はガス成分の透過係数の差が分離の原理となる。孔のある多孔質膜(多くは無機膜)の場合は膜の孔径や対象分子により分離機構が異なる。孔が分子オーダーなら分子ふるい機構, 大きいと Knudsen 拡散原理, さらに凝縮性分子の場合には毛管凝縮や表面拡散という現象が関与する場合もある。

透過係数 ある膜透過成分について, その透過流束 N_A を膜厚み δ , 膜を介した成分の分圧差 Δp , で規格化した係数が透過係数 P :

$$P = N_A \delta / \Delta p \quad (1)$$

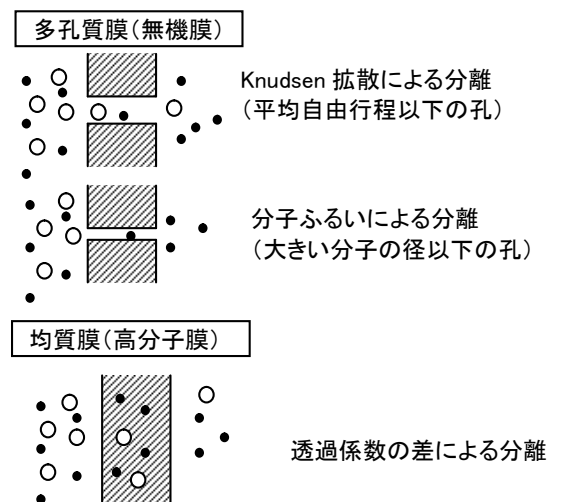


図1 ガス分離の原理

である。透過係数は膜素材と透過成分の組み合わせで決まる物性値である。 P の単位は $[\text{kmol} \cdot \text{m} / (\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kPa})]$ が SI 単位系として推奨されている。しかし従来の慣用としては $[\text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{cm} / (\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{cmHg})]$ が用いられ, $[\times 10^{-10} \text{ cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{cm} / (\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{cmHg})] = [\text{barrer}]$ も使われる。本節でも簡便のため $[\text{barrer}]$ 単位を使用する。 $1 \text{ kmol} \cdot \text{m} / (\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kPa}) = 2.99 \times 10^{15} \text{ barrer}$ である。また、膜厚みが不明な多孔質膜や複合膜の透過においては、膜厚みを含まない透過率:

$$P_R = N_A / \Delta p \quad [\text{kmol} / (\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kPa})] \quad (2)$$

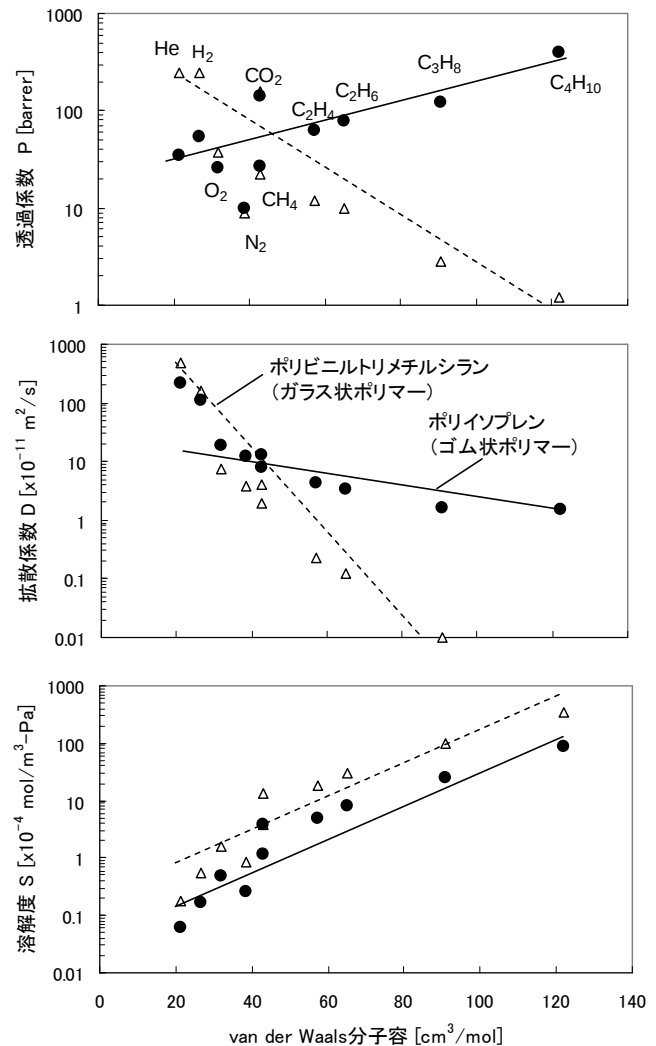
で透過性能が評価される。この場合も $[\times 10^{-6} \text{ cm}^3(\text{STP}) / (\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{cmHg})] = [\text{GPU}]$ なる慣用単位がある。

孔のない高分子膜でのガス・蒸気の透過は、(1)膜の高圧側面での成分の溶解(収着)、(2)高分子固体内での濃度拡散、(3)膜の低圧側面での成分の脱離、の3段階でおこる。普通は透過側が真空の理想的条件を考え、(3)の段階は無視する。すると透過係数は拡散係数 D と溶解度係数 S の積:

$$P = DS \quad (3)$$

であらわせる。

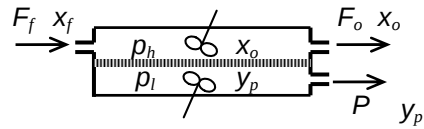
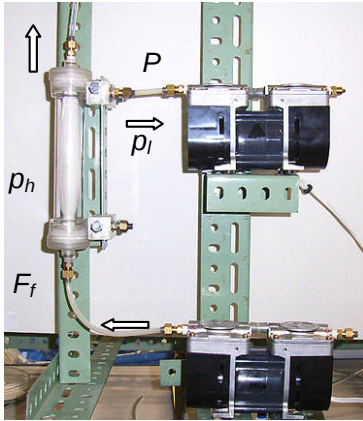
図2<pds.xls>にガラス状高分子のポリビニルトリメチルシランと、ゴム状高分子のポリイソブレンにおける各種ガスの透過係数、拡散係数、溶解度を比較した¹⁾。溶解度はガスの分子容に比例して増加する。拡散係数はガラス状高分子では分子容に反比例する一方、ゴム状高分子では変化は小さい。これらの積である透過係数はその結果、ガラス状高分子では分子容(分子量)の小さいガスで大きく、ゴム状高分子では分子容の大きいガスで大きくなる。



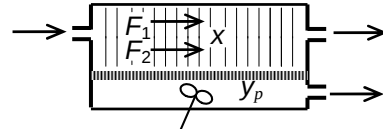
2 ガス分離膜モジュールのモデル

分離膜はこれをハウジング内に納めた膜モジュールとして用いられる。膜モジュールの形態は中空糸膜型やスパイラル型など各種あるが、一般に膜モジュール内の流れ・成分組成の定義を示したのが図 5.3 である。供給ガス(処理ガス)を流量 F_f で膜モジュールに供給し、膜を介して供給側圧力を高圧の p_h [kPa] に、透過側圧力を低圧の p_l に設定する。この圧力差を推進力としてガスの膜透過が生じ、透過側出口流量が P 、供給側出口流量が F_o となる。また、処理ガスが2成分系の場合、第1成分の供給側入口、供給側出口、透過側出口の組成(モル分率)をそれぞれ、 x_f, x_o, y_p とする。

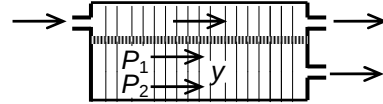
一般に装置内流れの混合状態は完全混合とプラグフローの2つでモデル化されるが、図のように各々を供給側と透過側に適用することで、①供給側完全混合ー透過側完全混合、②供給側プラグフローー透過側完全混合、③供給側プラグフローー透過側プラグフロー、の各モデルとなる。また膜分離における特殊なモデルとして④供給側プラグフローー透過側クロスフローがある。



プラグフロー—完全混合



プラグフロー—プラグフロー



プラグフロー—クロスフロー

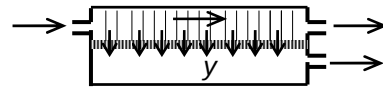


図 5.3 ガス分離膜モジュールの流れモデル

3 ガス分離膜モジュールの分離性能

2成分系混合ガスを対象として、膜面積 A [m²]、膜厚み δ [m]の均質膜による膜モジュールの分離性能を、以上の各モデルにより解析して比較する。ここでは小型シリコーンゴム中空糸膜モジュールによる空気中の酸素濃縮操作を想定して、第1成分が酸素、第2成分が窒素として以下の条件でおこなう。

膜モジュール: 膜面積 $A_0 = 0.45$ m², 膜厚み $\delta = 20$ μ m = 2×10^{-5} m

透過係数: 酸素 $Q_1 = 1.27 \times 10^{-10}$, 窒素 $Q_2 = 6.0 \times 10^{-11}$ mol m/(m² s kPa), 分離係数 $\alpha = 2.11$

操作条件: 供給側圧力 $p_h = 101$ kPa, 透過側圧力 $p_l = 2$ kPa, 供給ガス流量 $F_f = 1.0$ L/min = 0.000682 mol/s, 供給ガス組成: $x_f = 0.21$ 。

両側完全混合モデル: 膜モジュール全体の物質収支および第1成分収支式は次式である。

$$P = F_f - F_o \quad (5.5)$$

$$Py_p = F_f x_f - F_o x_o \quad (5.6)$$

各成分のガス透過係数から第1成分及び第2成分の透過速度は、

$$Py_p = (Q_1 A_0 / \delta)(p_h x_o - p_l y_p) \quad (5.7)$$

$$P(1 - y_p) = (Q_2 A_0 / \delta)[p_h(1 - x_o) - p_l(1 - y_p)] \quad (5.8)$$

である。以上は F_o , P , x_o , y_p の4つの未知数に関する連立方程式である。

なお、式(5.7),(5.8)の比、および式(5.5),(5.6)により x_o を x_f に置き換えると次式となる。

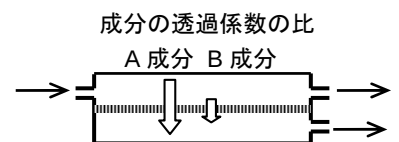
$$\frac{y_p}{1 - y_p} = \frac{\alpha(x_f - \phi y_p)}{(1 - x_f) - \phi(1 - y_p)} \quad (5.9)$$

ここで、 $\phi = \theta + \gamma - \gamma\theta$ であり、3つのパラメータ、理想

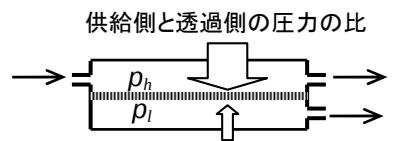
分離係数: $\alpha \equiv \frac{Q_1}{Q_2}$ 、圧力比: $\gamma \equiv \frac{p_l}{p_h}$ カット:

ガス分離膜モジュールの3つのパラメータ

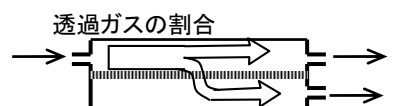
$$\text{理想分離係数 } \alpha \equiv \frac{Q_1}{Q_2}$$



$$\text{圧力比 } \gamma \equiv \frac{p_l}{p_h}$$



$$\text{カット } \theta \equiv \frac{P}{F_f}$$



$$\theta \equiv \frac{P}{F_f} \text{ を導入した。}$$

得られた式(5.9)は y_p の2次方程式であり、解は次式である¹¹⁾。

$$y_p = \frac{(\alpha - 1)(\phi + x_f) + 1 - \sqrt{\{(\alpha - 1)(\phi + x_f) + 1\}^2 - 4\phi(\alpha - 1)\alpha x_f}}{2\phi(\alpha - 1)} \quad (5.10)$$

【例題1】両側完全混合モデル<memb10.xls>

与えた条件で連立方程式(5.5)-(5.8)を解け。

図 5.4 のシートにおいて、条件を B7:B14 に書く。未知数の初期値を B2:B5 に設定し、方程式の残差を D2:D5 に記述する。残差2乗和を D6 に書き、ソルバーで目的セルを D6、目標値を最小値、変化させるセルを B2:B5 として実行する。(解のオーダー(桁数)が異なるので初期値の設定やソルバーの[オプション]→[■]単位の自動設定)に注意する。)これより透過ガス量 $P = 0.000160 \text{ mol/s} = 0.235 \text{ L/min}$ 、その酸素濃度 $y_p = 0.311$ と求められる。

図中には参考のため式(5.10)による $x_f - y_p$ の関係とパラメータの影響を示した。

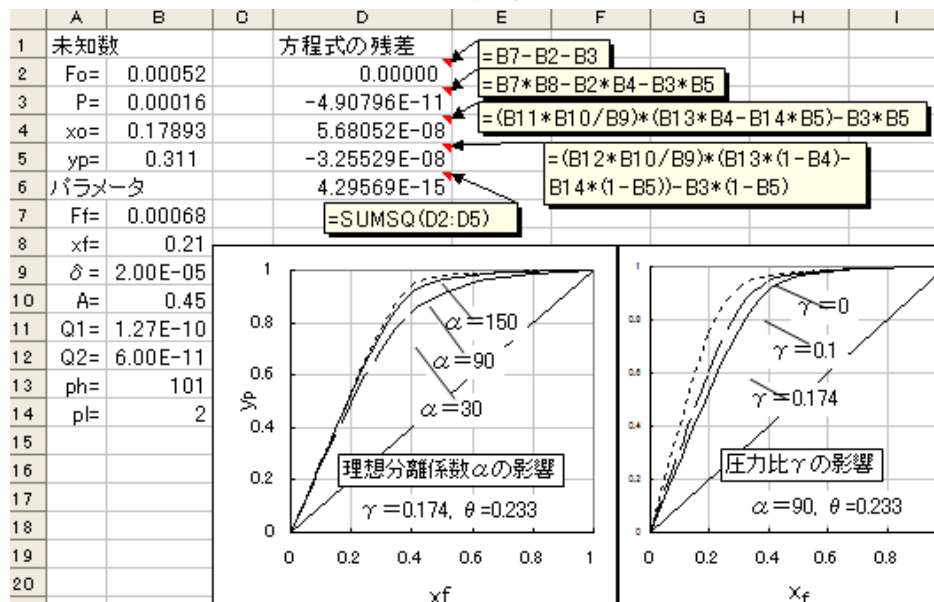


図 5.4 両側完全混合モデル<memb10.xls>

供給側プラグフロー-透過側完全混合モデル: 膜モジュール内供給側の各成分流量 F_1, F_2 について、微小膜面積区間 dA での変化とガスの膜透過速度との関係が次式となる。

$$\frac{dF_1}{dA} = -\left(\frac{Q_1}{\delta}\right)(p_h x - p_l y_p) \quad (5.11)$$

$$\frac{dF_2}{dA} = -\left(\frac{Q_2}{\delta}\right)(p_h(1-x) - p_l(1-y_p)) \quad (5.12), \quad x = \frac{F_1}{F_1 + F_2} \quad (5.13)$$

透過側は完全混合を仮定するので透過ガス濃度 y_p は定数である。しかし計算初期にはこれは不明なので、 y_p を仮定して積分計算をおこない、計算結果と一致するよう試行する。

【例題 5.3】プラグフロー-完全混合モデル<memb11.xls>

与えた条件で式(5.11)-(5.12)を解き、透過ガス濃度と透過ガス速度を求めよ。

図 5.5 は「微分方程式解法シート」である。G2:G6 にパラメータを書き、B5:C5 に微分方程式(5.11)-(5.12)を記述する。その際変数 F_1, F_2 はセル B3, C3 を指定する。 F_1, F_2 の初期値を B12:C12 に設定して、ボタンを押して VBA プログラムを実行し、A を 0 から A_0 まで積分する。計算後、セル G8 に y_p が再計算されるので、これが G7 と一致するよう、G7 の値を試行する。得られた解は $y_p = 0.33, P = 0.000162 \text{ mol/s} = 0.238 \text{ L/min}$ であ

る。図中に膜モジュール内の x, y の変化を示した。

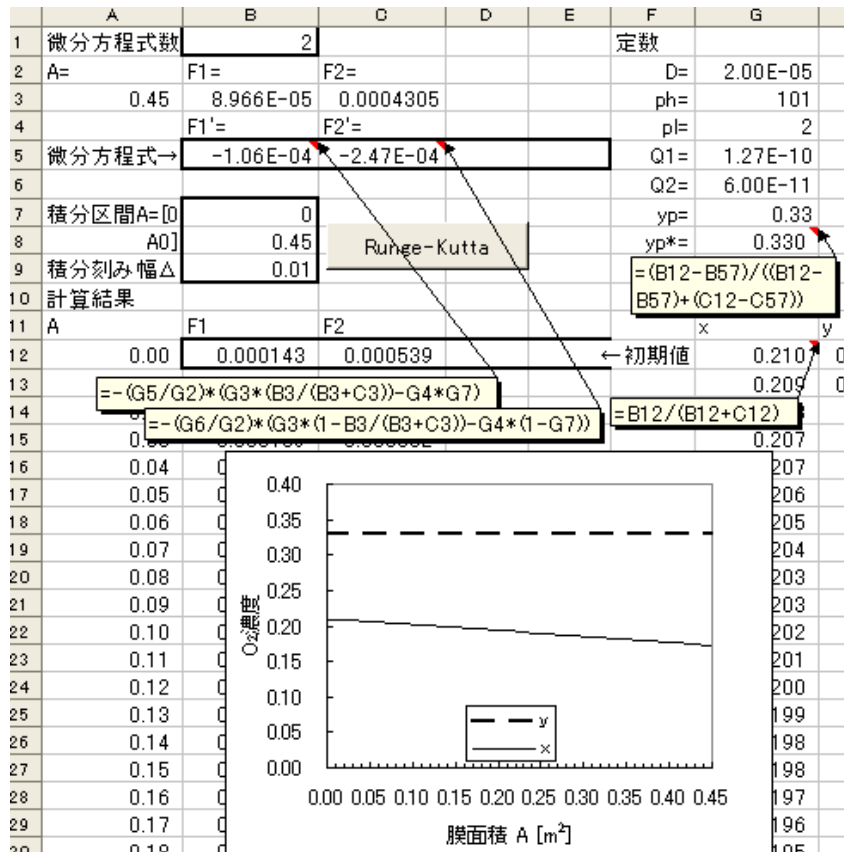


図 5.5 供給側プラグフロー-透過側完全混合モデル<memb11.xls>

供給側プラグフロー-透過側プラグフローモデル: このモデルでは透過側組成 y は一定でなく、次式のように y の局所組成が上流で透過したガス流量から計算される。

$$y = \frac{P_1}{P_1 + P_2} = \frac{F_f x_f - F_1}{F_f - F_1 - F_2} \quad (5.14)$$

これを用いて基礎式は次式となる。

$$\frac{dF_1}{dA} = -\left(\frac{Q_1}{\delta}\right)(p_h x - p_l y) \quad (5.15)$$

$$\frac{dF_2}{dA} = -\left(\frac{Q_2}{\delta}\right)(p_h(1-x) - p_l(1-y)) \quad (5.16)$$

【例題 5.4】両側プラグフローモデル<memb12.xls>

例題 5.3 と同じ操作をこのモデルで解析せよ。

図 5.6 は「微分方程式解法シート」である。G2:G8 が定数である。セル G9 に y (式(5.14)) を記述する。(式の中の数値(1.0001)は積分開始時のエラーを防止する工夫である。) B5:C5 に微分方程式(5.15), (5.16)を記述する。初期値を設定してボタンクリックで実行する。計算結果は $y_p = 0.33$, $P = 0.000162 \text{ mol/s} = 0.238 \text{ L/min}$ である。与えられた条件では、圧力比が小さいので両側完全混合(例題 5.2), 透過側完全混合モデル(例題 5.3)とほぼ同じ計算結果となった。

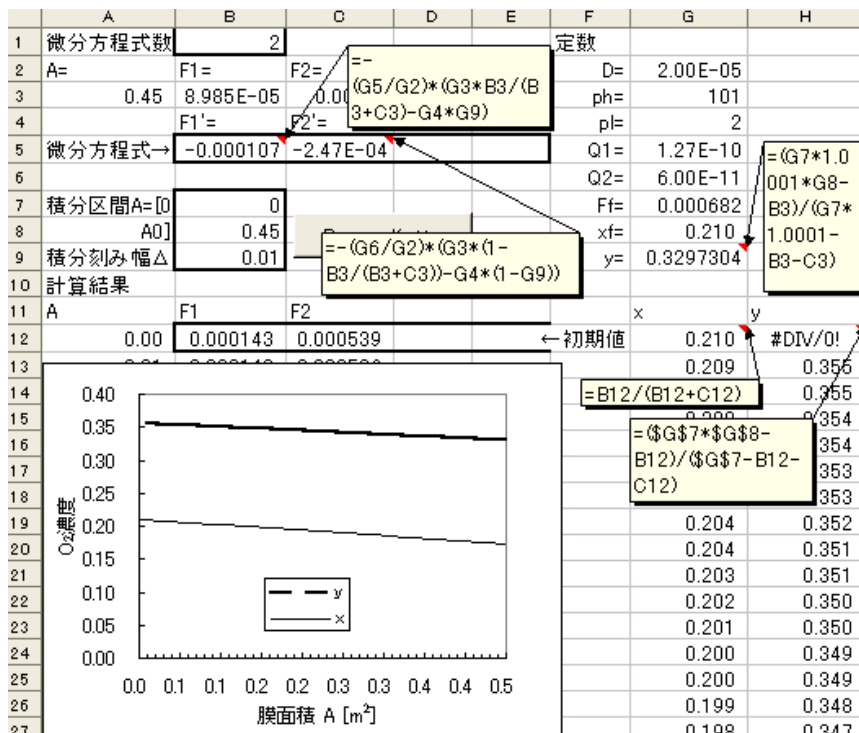


図 5.6 供給側プラグフロー-透過側プラグフローモデル<memb12.xls>

多成分系: 処理ガスが N 成分の混合ガスでも取り扱いには以上と同様である。供給側プラグフロー-透過側プラグフローモデルの場合、基礎式は、

$$\frac{dF_i}{dA} = -\left(\frac{Q_i}{\delta}\right)(p_h x_i - p_l y_i) \quad (i=1, \dots, N) \quad (5.17)$$

$$x_i = F_i / \sum F_i \quad (5.18), \quad y_i = P_i / \sum P_i \quad (5.19)$$

となる。なお、ここでは微分方程式を各成分の流量(F_i)に関してたてていることに注意されたい。この種の問題の場合、濃度 x_i を変数にしがちであるが、膜プロセスの基礎式を解くには各成分の流量で取り扱う方法が簡明である。

【例題 5.5】4 成分系両側プラグフローモデル<memb13.xls>

例題 5.2 と同じ膜モジュール、操作条件で O₂(1), N₂(2), CO₂(3), H₂O(4) の 4 成分系混合ガスの膜透過を、供給側プラグフロー-透過側プラグフローモデルで計算せよ。供給ガスの組成は O₂ 5%, N₂ 70%, CO₂ 10%, H₂O 15% とする。CO₂, H₂O の膜透過係数は各々 5.0×10^{-10} , 1.07×10^{-8} mol m/(m² s kPa) とする。

図 5.7 に「微分方程式解法シート」を示す。セル B5:E5 に式(5.17)を記述する。B12:E12 に各成分の供給側入口流量を設定する。ボタンクリックで積分を実行することで、13 行以下に供給側の各成分流量変化が求められる。図中のグラフに供給側ガスの組成変化を示す。

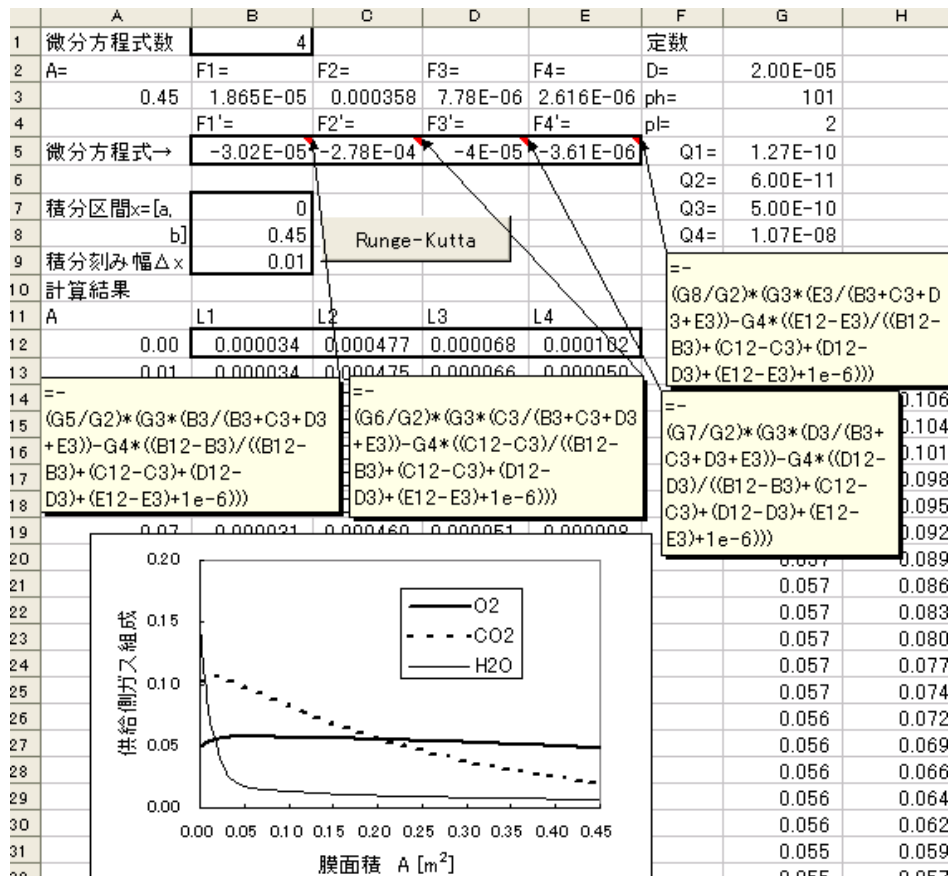


図 5.7 4成分系供給側プラグフロー-透過側プラグフローモデル<memb13.xls>

4 パーバレーション操作における膜モジュールの分離性能

パーバレーション(PV)とは孔のない均質膜を介した供給液の蒸発操作である。この物質移動のモデルとして「蒸気相推進力モデル」を用いると、膜透過の推進力は膜を介した溶液の平衡蒸気分圧と透過側分圧との差である。その際、各成分の膜透過係数はガス・蒸気の透過係数が使えるので、前節のモデルとほとんど同様に、次式でモデル化できる。

$$\frac{dL_1}{dA} = -\left(\frac{Q_1}{\delta}\right)(\gamma_1 p_1^* x - p_l y_p) \quad (5.20)$$

$$\frac{dL_2}{dA} = -\left(\frac{Q_2}{\delta}\right)(\gamma_2 p_2^* (1-x) - p_l (1-y_p)) \quad (5.21), \quad x = \frac{L_1}{L_1 + L_2} \quad (5.22)$$

ここで、 L [mol/s]は供給液中の各成分流量、 γ は活量係数、 p^* [kPa]は操作温度の各純成分の平衡蒸気圧、 x は供給液中の低沸点成分モル分率である。上式は供給側プラグフロー-透過側完全混合のモデルであり、透過側濃度 y_p は定数である。PV 操作は通常透過側を高真空にしておこなわれるので、透過側完全混合の仮定が適用できる。

なお、一般に均質膜による PV 操作では液側の物質移動抵抗が 5-10%程度関与しており、厳密なモデル計算ではこれを考慮する必要がある。

【例題 5.6】パーバレーション操作のモデル<memb14.xls>

前節と同じシリコンゴム中空糸膜モジュールにより、 $x_f = 0.15$ のエタノール水溶液の PV 操作をおこなう。透過蒸気量と濃度を求めよ。供給液流量 50 g/min (すなわち $L_1 = 0.00563$ mol/s, $L_2 = 0.0319$ mol/s) 透過側圧力は $p_l = 0.4$ kPa, 操作温度 25°C とする。エタノール、水蒸気の膜透過係数は各 6.7×10^{-9} , 1.07×10^{-8} mol

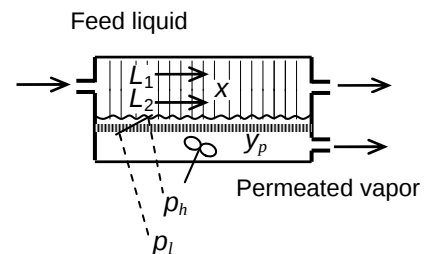


図 5.8 PV 分離膜モジュールのモデル (プラグフロー-完全混合)

$\text{m}/(\text{s m}^2 \text{ kPa})$ である。操作範囲での各成分蒸気圧および活量係数はシート中に示す。

「微分方程式解法シート」を使う。図 5.9 のシートでセル I1 に x (式(5.22))を作り, B5:C5 に微分方程式(5.20), (5.21)を記述する。B12:C12 に初期値を書き, ボタンを押して積分を実行する。得られた y_p の値(G10)が y_p の初期値(G9)に一致するよう G9 の値を試行する。

計算結果は透過蒸気量 $P = 0.001096 \text{ mol/s} = 0.128 \text{ g/h}$, 透過蒸気濃度 $y_p = 0.453$ と得られる。

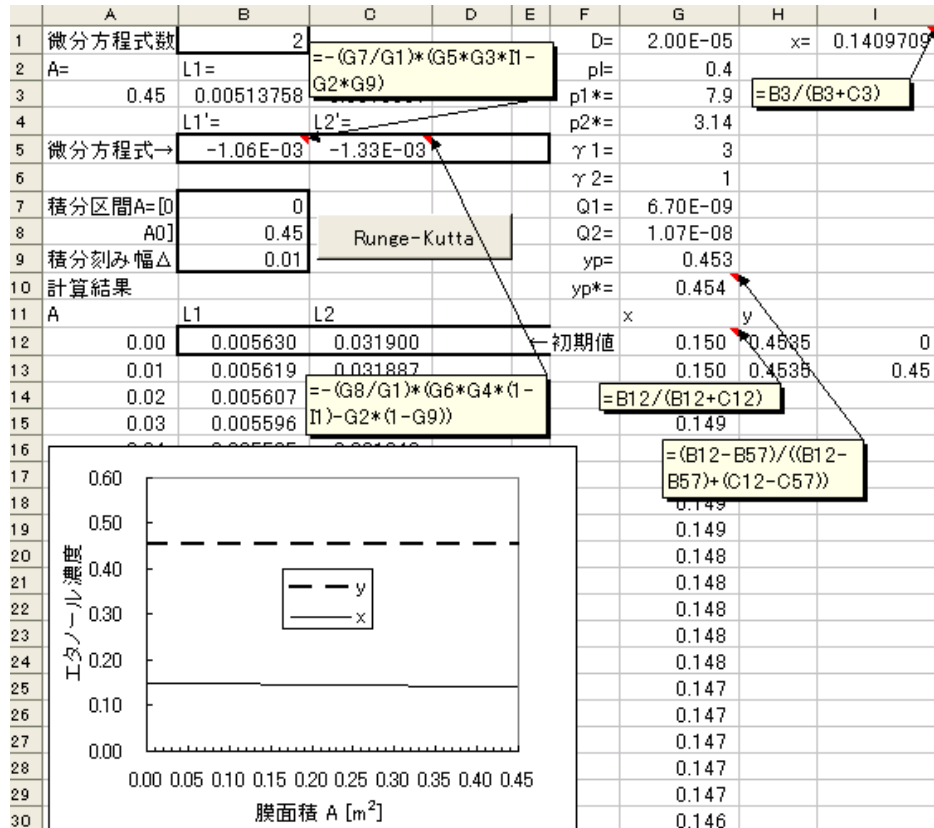


図 5.9 均質膜によるパーバレーション操作のモデル計算<memb14.xls>

【第 11 回 Excel 演習レポート課題】(作成した Excel シートの 1 ページ目をプリントアウトして提出)

"memb11_temp.xls"を完成する。

【第 11 回筆記レポート課題】

今回はありません

期末試験 伊東担当分「膜分離1～3」出題範囲 (満点防止のため一部これ以外の問題(その場でなんとか出来る問題)も出題しますのであしからず。)

問題 ルースの濾過方程式 図のデッドエンド濾過で, $L_c = VC_b / A$, $L_m = V_0 C_b / A$ である。水の流束 J_v [$\text{m}^3/(\text{m}^2 \text{ s})$] の式:

$$J_v = \frac{k\Delta P}{\mu} \frac{1}{L_c + L_m} \quad (6.2)$$

(J_v [$\text{m}^3\text{-水}/(\text{m}^2 \text{ s})$]: 水の透過流束, ΔP [Pa]: 圧力差, k : ケークの抵抗, μ : 水の粘度, L_c : ケーク厚さ) から出発して,

$$V = \sqrt{Kt + V_0^2} - V_0 \quad (6.7)$$

を導け。

$$\left(K = \frac{2A^2 k \Delta P}{C_b \mu} \right)$$

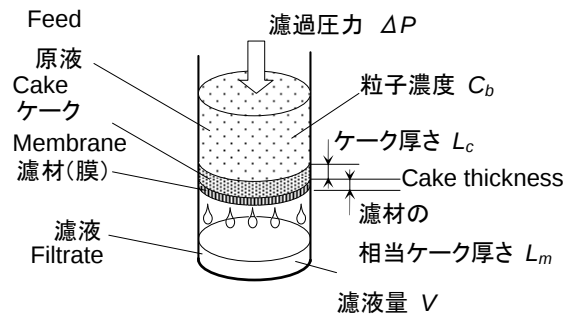


図 6.1 デッドエンド濾過

答 濾液量 V と水の透過流束は,
$$\frac{dV}{dt} = J_v A \quad (6.3)$$

の関係なので, 式(6.2)は,
$$\frac{dV}{dt} = \frac{Ak\Delta P}{\mu} \frac{1}{L_c + L_m} \quad (6.4)$$

$L_c = VC_b / A$, $L_m = V_0 C_b / A$ なので,

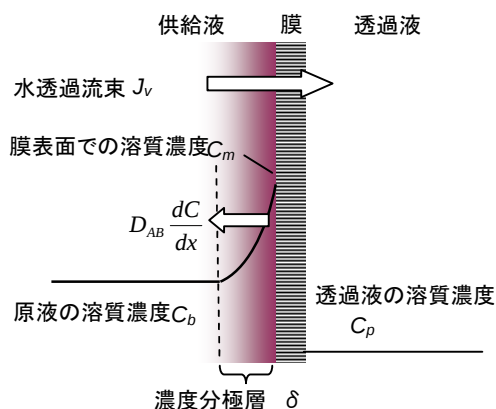
$$\frac{dV}{dt} = \frac{A^2 k \Delta P}{C_b \mu} \frac{1}{V + V_0} = \frac{K}{2(V + V_0)} \quad (6.5)$$

である。この式は V に関する微分方程式である。これを初期条件 ($t=0$; $V=0$) で解くと,

$$(V + V_0)^2 = K(t + t_0) \quad (t_0 = V_0^2 / K) \quad (6.6)$$

すなわち次式となる。
$$V = \sqrt{Kt + V_0^2} - V_0 \quad (6.7)$$

問 図は濃度分極モデルの概念と記号である。 C_m , C_p , C_b 間の関係を示せ。



答 濃度分極層内では微小区間 dx における物質収支より次式が成り立つ。

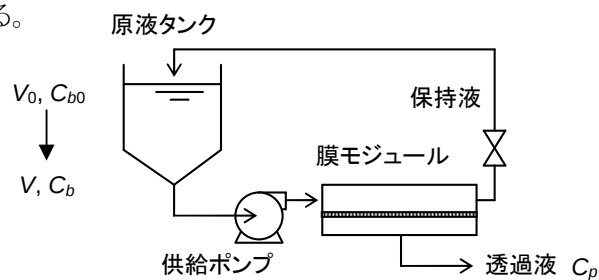
$$J_v C - D_{AB} \frac{dC}{dx} = J_v C_p \quad (1)$$

濃度分極層の厚さを δ として、境界条件: $x=0; C=C_b, x=\delta, C=C_m$ でこれを解いて次式となる。(解法過程を示すこと)

$$\frac{C_m - C_p}{C_b - C_p} = \exp \frac{J_v}{k}, \quad k = \frac{D_{AB}}{\delta} \quad (2)$$

ここで k [m/s] は物質移動係数である。

問 図の逆浸透膜による回分式濃縮操作で原液量 V の時間変化を表す微分方程式を書け。浸透圧 $\Delta \pi$ は溶質濃度 C_b に比定し、阻止率は $R=1$ とする。



答 透過流束 J_v は

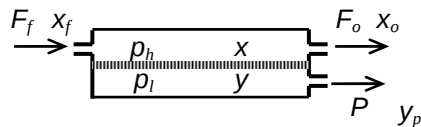
$$J_v = L_p (\Delta P - \Delta \pi) = L_p (\Delta P - C_1 C_b)$$

であり、 $R=1$ より $C_b = C_{b0} V_0 / V$ なので、

$$\frac{dV}{dt} = -A J_v = -A [L_p (\Delta P - C_1 \frac{C_{b0} V_0}{V})]$$

である。

1) 2成分系ガス分離膜モジュール解析の3つのパラメータを示せ。図中の F, P はガス流量, x, y は第1成分モル分率, p は圧力である。各成分の膜透過係数を Q_1, Q_2 とする。

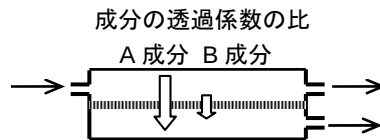


2) ガス分離膜モジュールの解析モデル(流れモデル)を3種類挙げて、その仮定を説明せよ。

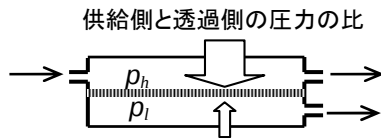
答 1)

ガス分離膜モジュールの3つのパラメータ

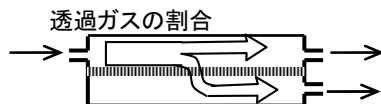
理想分離係数 $\alpha \equiv \frac{Q_1}{Q_2}$



圧力比 $\gamma \equiv \frac{p_l}{p_h}$



カット $\theta \equiv \frac{P}{F_f}$



- 2)1. 両側完全混合 $x = x_o$ および $y = y_p$
2. 供給側プラグフローー透過側完全混合 x は軸方向分散無しで x_f から x_o に連続的に変化, $y = y_p$
3. 両側プラグフロー x は軸方向分散無しで x_f から x_o に連続的に変化, y も y_p へ連続的に変化

サブライズ問題

問題 ガスの膜透過速度は差圧, 膜面積に比例し, 膜厚さに反比例する。膜面積 650 cm^2 , 膜厚み $20 \text{ }\mu\text{m}$, の高分子膜で供給側大気圧, 透過側 5 cmHg の圧力で膜透過をおこなった。その結果, 温度 100°C , 大気圧で $4.0 \text{ cm}^3/\text{min}$ の空気透過速度が得られた。この膜の空気透過係数 $Q [\text{cm}^3(\text{STP})\cdot\text{cm}/(\text{cm}^2\cdot\text{s}\cdot\text{cmHg})]$ を求めよ。((STP)は 0°C , 1 気圧の意味。

$$\text{答 } Q = \frac{4 \times (273/373)}{60} \times 0.002 \times \frac{1}{650(76-5)} = 2.1 \times 10^{-9}$$