浸透現象に関するろ過係数および物性値*

一法師 茂俊^{*1}, 井村 英昭^{*1}
紺家 幸治^{*2}, 青山 暢隆^{*3}

Filtration Coefficients and Physical Properties of Fluids for Osmotic Action

Shigetoshi IPPOHSHI, Hideaki IMURA,
Koji KONYA and Nobutaka AOYAMA

In this study, filtration coefficients of tubular type osmosis membranes made of acetyl cellulose are measured by two methods. Effects of temperature and concentration on physical properties of fluids needed for study on osmotic action are also investigated using sodium chloride, potassium chloride, sucrose and polyethylene glycol 600 aqueous solutions as the testing fluids. As a result, a new method for measuring the filtration coefficient is proposed by making use of osmosis and it is clarified that there is no difference between filtration coefficients for osmosis and reverse osmosis processes. In addition, equations for mass diffusivity, permeability, viscosity and density of the above fluids are presented.

Key Words: Mass Transfer, Heat Pipe, Thermophysical Property, Osmosis, Filtration Coefficient, Mass Diffusivity, Permeability

1. 緒 言

著者ら⁽¹⁾⁽²⁾は、これまでに新しいタイプの浸透ヒートパイプを提案し、その研究結果について報告している。その中で、浸透ヒートパイプの特性は主に膜モジュール内の浸透量に依存し、浸透量を正確に予測することが必要であることを述べている。浸透量を算出する際、浸透膜の特性および溶液の物性値は必要不可欠であるが、使用される溶液の物性値は温度、圧力および濃度に依存し、物性値の変化が系統的に明らかされているものは少ないようである⁽³⁾⁽⁴⁾。特に、著者らのこれまでの研究において使用されたポリエチレングリコール600（以下 P.E.G.600）水溶液に関しては、その物性値のほとんどが明らかでない。

そこで、本報ではまず異なる二つの実験方法を用いて得られた円筒型酢酸セルロース膜のろ過係数について検討し、さらに試験流体として塩化ナトリウム、塩化カリウム、しょ糖および P.E.G.600 の4種類の水溶液に関する既存の物性値および本報で得られた物性値を用い、浸透現象を考察するために必要である拡散係

数、浸透係数、粘性係数および密度などについて調査した結果を報告する。

記 号

a : 電離数
 A : 面積 m^2
 c : モル濃度 kmol/m^3
 c_1 : 式(7)内の濃度の拡散係数への影響因子
 c_2 : 式(9)内の温度の拡散係数への影響因子
 d : 直径 m
 D_{AB} : 溶質Aの溶媒Bにおける拡散係数 m^2/s
 f : フガシティ Pa
 h_D : 物質伝達係数 m/s
 j_v : 透水速度 m/s
 L_p : ろ過係数 $\text{m}/(\text{Pa}\cdot\text{s})$
 $\dot{m}_{\text{osmo}}$: 浸透量 kg/s
 M : 分子量 kg/kmol
 n : 式(13)内の指数
 p : 圧力 Pa
 Δp : 圧力差 $(= p_{\text{m, in}} - p_a)$ Pa
 R : 一般ガス定数 $\text{J}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$
 Sh : シャーウッド数
 t, T : 温度 $^{\circ}\text{C}, \text{K}$

* 原稿受付 1997年5月19日。

*¹ 正員、熊本大学工学部 (☎ 860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)。*² 大王製紙(株) (☎ 799-0492 伊予三島市紙屋町 2-60)。*³ 熊本大学大学院。

- u : 速度 m/s
 v : 標準沸点におけるモル容積 m^3/kmol
 x : モル分率
 γ : 活量係数
 ε : 最大誤差 %
 μ : 粘性係数 $\text{Pa}\cdot\text{s}$
 ρ : 密度 kg/m^3
 σ : 反発係数
 ϕ : 浸透係数
 ψ : 溶媒Bの会合係数 (水: 2.6, メタノール: 1.6, ベンゼンおよびヘプタンなどの非会合性溶媒: 1.0)
 ω : 濃度 (溶質質量/溶液質量)

添字

a : 大気	A : A成分 (溶質)
B : B成分 (溶媒)	in : 入口, 内
m : 浸透膜, 膜モジュール内	mi : 浸透膜内表面
out : 出口	sat : 飽和
set : 設定	sn : 溶液
st : 溶質	sv : 溶媒
w : 蒸留水	0 : 無限希釈時, 理想状態

2. ろ過係数

浸透量は, 浸透圧に関する Van't Hoff の式および Katchalsky らの輸送方程式より得られる次式により算出することができる⁽¹⁾⁽⁵⁾.

$$\dot{m}_{\text{osmo}} = \rho_{\text{sv}} L_p \sigma \bar{\phi}_{\text{mi}} RT_m a \bar{\rho}_{\text{sn,mi}} \bar{\omega}_{\text{mi}} A_m / M_{\text{st}} \quad (1)$$

本節では, まず浸透膜の特性として重要であるろ過係数について得られた結果を報告する.

2・1 加圧法を用いた実験 ろ過係数測定装置の概略を図1に示す. 本装置は, 膜モジュール (日東電工 NTR-1595-P18A(HF)), タンク, レギュレータおよびコンプレッサから構成されている. 装置内には 25°C に設定された蒸留水が封入されており, 実験ではコンプレッサおよびレギュレータを用いタンク内圧力が 0.2 ~ 0.8 MPa の範囲内で 0.1 MPa ごとに調節され, 膜内外に生じたこの圧力差により透過する単位時間当たりの透水量が計測された. 本実験装置の膜面積は 1.61 m^2 である. 膜モジュールを立てた状態で実験を行っているが, 透過した蒸留水の流出口が膜モジュール上部に取付けられていることから, 膜モジュール内の膜内外の圧力差は軸方向に一定である. したがって, タンクと膜モジュール内の各液面位置の差 (≈ 0.8 m) を考慮した膜モジュール上部における膜内圧力 $p_{\text{m, in}}$ と大気圧 p_a との差に対し, 得られた実験値は整理された.

Fig. 1 Apparatus for measuring filtration coefficient

Fig. 2 Relation between j_v and Δp

透水速度と膜内外の圧力差の関係を図2に示す. 図より, 明らかに次式の関係が成り立ち,

$$J_v = L_p \Delta p \quad (2)$$

ろ過係数は $2.38 \times 10^{-12} \text{ m}/(\text{Pa}\cdot\text{s})$ と決定された. しかし, 得られたろ過係数は正浸透過程 (濃度差による浸透過程) での値ではなく, 逆浸透過程 (圧力差による浸透過程) における値である. また, この実験に用いられた膜モジュールは市販のものであり, これまでの熱輸送実験⁽¹⁾⁽²⁾で用いられた膜モジュールとは異なる. 特に, 熱輸送実験では, 膜を保持する膜支持層および不織布が疎水性を示すために取り除かれており, スポンジ層とスキン層からなる非対称膜のみ使用された点

Fig. 3 Apparatus for measuring osmotic rate

が異なる。したがって、溶媒が膜を透過する際の流動抵抗が異なり、また一般に浸透膜は加圧されることにより圧密化を生じ、その透過特性は時間と共に変化するとされている⁽⁶⁾。本実験では各圧力に対し三回の測定が行われたが、図2から分るように圧力差が0.6 MPa以上の実験では測定が繰り返されるごとに若干大きな値を示している。それゆえ次節では、熱輸送実験により近い条件の下で得られたろ過係数について考察する。

2・2 膜内平均濃度とろ過係数 浸透量測定装置の概略を図3に示す。装置は、内径15 mm、外径22 mmの硬質塩化ビニール管からなる高さ2 m、幅1.5 mの溶液ループと、溶媒タンクおよびビュレットと膜モジュールを連結する溶媒通路から構成される。溶液ループには、図中左から溶液の流れに沿って恒温器、溶液槽、マグネットポンプ、溶液抽出口、膜モジュールおよび電磁流量計が配置され、溶液はマグネットポンプにより反時計回りに強制循環させられている。膜モジュールの詳細を図4に示す。下方より流入する溶液は、拡大管からなる分配槽を通して各浸透膜内に流入する。それから、溶液は浸透作用により膜を透過する溶媒により希薄化されつつ、浸透膜内を上昇し、縮小管からなる混合槽において合流し、上部溶液通路へ流出する。このように、浸透作用により膜モジュール

Fig. 4 Details of membrane module

内容媒区画の溶媒が上部溶液通路へ持ち去られるため、溶媒は溶媒タンクから溶媒通路を通して膜モジュールへ補充されるようになっている。

実験範囲を表1に、実験条件および図5内の記号を表2に示す。実験では、設定された温度(=25℃)、流量および濃度の溶液が、膜モジュール内に装着された1, 6および18(一部17)本の円筒型浸透膜内を上方へ流動する場合における溶媒浸透量が測定された。溶液として塩化ナトリウム、塩化カリウム、しょ糖およびP.E.G.600水溶液の4種類が、浸透膜として前節同様内径11.5 mm、外径11.8 mmの円筒型酢酸セルロース膜が用いられた。ただし、膜を補強するために挿入されているFRPチューブ、膜支持層および不織布は取り除かれている。ループ内は溶液槽および溶媒タンクにおいて大気に開放されている。また、膜モジュール出入口濃度として、膜モジュールの上方および下方に設けられた溶液抽出口から抽出された溶液が光学屈折計を用いて計測され、さらに同位置に設置された熱電対により溶液温度が測定された。浸透量は、ビュレット内の溶媒液面が任意の区間を降下するために要する時間を計測することにより算出された。

このようにして得られた浸透量は、式(1)により整理することができる。式(1)を変形すると、ろ過係数は次式のように記述することができる。

Table 1 Experimental ranges

Solute	$\bar{\omega}_m$	$\bar{u}_m$ m/s	$\dot{m}_{osmo}$ kg/s	Reynolds Number	Schmidt Number
Salt	0.0074 ~0.24	0.0091 ~1.6	0.56~ 2.8×10^3	0.12~ 21×10^3	0.54~ 0.64×10^3
KCl	0.027 ~0.22	0.0089 ~1.7	0.049~ 2.1×10^3	0.13~ 23×10^3	0.38~ 0.45×10^3
Sucrose	0.094 ~0.53	0.0092 ~1.6	0.012~ 0.80×10^3	0.071~ 18×10^3	1.5~ 15×10^3
P.E.G.600	0.011 ~0.66	0.0092 ~1.5	0.011~ 0.83×10^3	0.035~ 15×10^3	2.6~ 28×10^3

Table 2 Experimental conditions and symbols in Fig. 5

Num. of Osmotic Membrane Tube	1			6			18 (17)		
Fluid Velocity in Electromagnetic Flow Detector m/s	1.0	0.5	0.1	1.0	0.5	0.1	1.0	0.5	0.1
Salt	○	①	②	●	③	④	⑤	⑥	⑦
KCl	□	⑧	⑨	■	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭
Sucrose	△	⑮	⑯	▲	⑰	⑱	⑲	⑳	㉑
P.E.G.600	◇	㉒	㉓	◆	㉔	㉕	㉖	㉗	㉘

Fig. 5 Relation between L_p and $\bar{\omega}_m$

$$L_p = \frac{\dot{m}_{osmo} M_{st}}{\rho_{sv} \sigma \bar{\phi}_{mi} RT_m a \bar{\rho}_{sn,mi} \bar{\omega}_m \frac{\bar{\omega}_{mi}}{\bar{\omega}_m} A_m} \quad (3)$$

ここで、実験では膜内面平均濃度の測定が困難なため、膜モジュール出入口濃度しか測定されていない。そこで、得られた出入口濃度がほぼ同一であることおよび $\bar{\omega}_m \rightarrow 0$ のとき $\bar{\omega}_{mi} \rightarrow \bar{\omega}_m$ であることから、膜モジュール内平均濃度を出入口濃度の算術平均とし、さらに $\bar{\omega}_{mi}/\bar{\omega}_m = 1$ と仮定して、得られた実験値の整理を試みた。このようにして算出されたる過係数は、膜モジュール内平均濃度が低下するに従い真のろ過係数に漸近すると思われる。その整理結果を図5に示す。予想されたように溶液の種類によらず膜モジュール内平均濃度が低下するに従いろ過係数はある一定値に漸近しており、前節で得られた $L_p = 2.38 \times 10^{-12}$ とほぼ一致する。これらの結果より、前節で問題として取り上げられた正浸透と逆浸透過程の相違は見られず、また非対称膜以外の部分の流動抵抗は非対称膜内の流動抵抗に比べ非常に小さいことが明らかになった。また、本節で用

いられた測定法によっても十分ろ過係数を予測できることが分った。本ろ過係数決定法の利点は、(1) 加圧装置および圧力容器を必要としないこと、(2) 圧密化の影響を受けずろ過係数を決定できること、(3) 耐圧性に乏しい膜材料においてもろ過係数を決定できることであり、正浸透を利用する応用例が増加した場合、耐圧性能は低くとも、より透過特性の高い膜材料の開発が行われると予想されるので、そのような場合に本決定法は特に有用であると思われる。

さらに、図5より膜モジュール内平均濃度の増加に伴い式(3)より算出されたる過係数は低下し、各実験値は溶液の違いにより異なる曲線を描くことが分る。このことは、浸透量を算出する際、膜内部の溶液流動に伴う物質伝達 ($\bar{\omega}_{mi}/\bar{\omega}_m$ の変化) を考慮しなければならないことを示している。一般に、物質伝達は熱伝達とのアナログから以下のように記述され、

$$\begin{aligned} \dot{m}_{osmo} &= h_D \{ [\rho(1-\omega)]_{mi} - [\rho(1-\omega)]_m \} A_m \\ &= Sh \frac{D_{AB}}{d} \{ [\rho(1-\omega)]_{mi} - [\rho(1-\omega)]_m \} A_m \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、

$$Sh = f \left(\frac{\rho u d}{\mu}, \frac{\mu}{\rho D_{AB}} \right) \quad (5)$$

である。よって、浸透量を算出する際、拡散係数および粘性係数も必要である。

3. 拡散係数

図6～8に塩化ナトリウム、塩化カリウムおよびしょ糖水溶液の拡散係数を示す。塩化ナトリウムおよび塩化カリウム（電解質）水溶液の場合、拡散係数は濃度の増加に伴い一旦急激に減少し、ある濃度において最小値を示し、その後単調増加する。ただし、塩化ナトリウム水溶液の拡散係数は再度低下している。一方、しょ糖（非電解質）水溶液の拡散係数は濃度の増加に伴い減少しており、電解質と非電解質では濃度の拡散係数に及ぼす影響は異なる。このことは、文献(3)および(4)内でも取扱われており、主に正負のそれぞれのイオンの移動速度が異なるために生ずる溶液中の電場に起因するようである。P.E.G.600水溶液に関しては、文献調査により拡散係数の値を得ることができなかったため、Wilke-Changの式⁽⁹⁾を用いて算出することにした。

$$D_{AB}^0 = 2.95 \times 10^{-20} \frac{(\psi M_B)^{0.5} T}{\mu_B V_A^{0.6}} \quad (6)$$

上式から、P.E.G.600水溶液の場合、25℃において

 Fig. 6 Effect of ω on D_{AB}

 Fig. 10 Effect of ω on ϕ

 Fig. 7 Effect of ω on D_{AB}

 Fig. 11 Effect of ω on ϕ

 Fig. 8 Effect of ω on D_{AB}

 Fig. 12 Effect of ω on ϕ

 Fig. 9 Effect of ω on D_{AB} / D_{AB}^0 ⁽⁸⁾
 (Values in parentheses show the solubility)

Fig. 13 Filtration Coefficient

Fig. 14 Viscosity⁽¹⁰⁾ Fig. 15 Viscosity⁽¹⁰⁾ Fig. 16 Viscosity⁽⁷⁾

Fig. 17 Viscosity

Fig. 18 Density⁽⁸⁾ (Curves show predicted value) Fig. 19 Density⁽⁸⁾ (Curves show predicted value) Fig. 20 Density⁽⁷⁾ (Curves show predicted value)

Fig. 21 Density (Curves show predicted value)

$D_{AB}^0 = 3.45 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ という値が得られた。ここで、P.E.G.600 は沸点が存在しないために、熱分解する点を標準沸点とみなして計算を行った。モル容積が $v = M/\rho$ と記述されることから、実際必要とされる値は標準沸点における溶質の密度であり、多少の基準温度の違いによっては密度が大きく変化しないため、それほど大きな誤差は生じないと考えられる。

次に P.E.G.600 水溶液の拡散係数に及ぼす濃度の影響について考察する。上述されたように電解質と非電解質では、拡散係数に及ぼす濃度の影響が異なるので、非電解質溶液に限定して文献調査した結果、図 9 のような結果が得られた。この図より濃度の拡散係数に及ぼす影響はおおよそ以下の関係式により整理できる。

$$c_1 = \frac{D_{AB}}{D_{AB}^0} = (\omega - 1)^2 \quad (7)$$

よって、25 °C における P.E.G.600 水溶液の拡散係数は以下のように表される。

$$D_{AB} = 3.45 \times 10^{-12} (\omega - 1)^2 \quad (8)$$

さらに、温度の拡散係数に及ぼす影響について考察する。これについては、式 (6) を基に得られた次式を用いることにした。

$$c_2 = \frac{D_{AB}|_t}{D_{AB}|_{t=25}} = \frac{(T/\mu_B)|_t}{(T/\mu_B)|_{t=25}} \quad (9)$$

よって、かなりの誤差を伴うと考えられるが非電解質溶液の拡散係数は次式により算出することができる。

$$D_{AB} = 2.95 \times 10^{-20} \frac{(\psi M_B)^{0.5} T}{\mu_B v_A^{0.6}} (\omega - 1)^2 \quad (10)$$

ただし、上述の 3 種類の溶液に対してはより正確な拡散係数を得るために、図示された実験値を最小二乗法を用いて数式化し、さらに式 (9) を考慮することにした。

4. 浸透係数

式 (1) 中の浸透係数は、実在溶液の非理想性を示す係数であり、浸透現象を取扱う上で重要である。図 10～12 に塩化ナトリウム、塩化カリウムおよびしょ糖水溶液の浸透係数を示す。また、浸透係数および活量係数は次式のように記述される⁽¹¹⁾。

$$\phi = 1 + \frac{\ln \gamma_B}{\ln x_B} \quad (11)$$

$$\gamma_B = \frac{f_B}{f_B^0 x_B} \quad (12)$$

ここで、上式中のフガシティを計算する際には実在流体

の状態方程式が必要であり、本報で取扱っているような溶液についてはその状態方程式についての一般法則はないようである。そこで、他の方法により数式化することを試みる。種々の物性値には相互関係が有ることが認められており、これまでも対象とする物性値を他の物性値と関連付ける試みが成されている。そこで、浸透係数が明らかである三つの溶液に関し、試行錯誤的に他の物性値と関連付けることを試みた。その結果を図 13 に示す。結果として次式により整理される。

$$\phi = \left[\left(\frac{D_{AB}\mu}{\rho} \right)_{\text{sn}} / \left(\frac{D_{AB}\mu}{\rho} \right)_{\text{sv}} \right]^n \quad (13)$$

ここで、 $\phi < 1.0$ の場合 $n = 1.0$ 、 $\phi \geq 1.0$ の場合 $n = 0.5$ である。式の根拠については明らかでないが、 $\pm 9\%$ 以内で整理される。

5. その他の物性値

その他の物性値として、まず反発係数は溶質漏れが無いと考え、 $\sigma = 1.0$ とした。電離数は、塩化ナトリウムおよび塩化カリウム水溶液に対しては $a = 2$ 、しょ糖および P.E.G.600 水溶液に対しては $a = 1$ である。P.E.G.600 水溶液の粘性係数は B 型粘度計 ((株)東京計器 BL 型粘度計) を用い、また密度はボーメ計 (Nikkei 標準比重計、最小目盛 0.005) を用いて実測した。その他の溶液の粘性係数および密度は各文献値を参照した。それらの結果を図 14～21 に示す。なお、コンピュータによる計算などに便利なように、主に最小二乗法を用いて数式化された結果および実験値と計算値の最大誤差を以下に示す。なお、それぞれの適用範囲は、おおよそ $0 < t < 100 \text{ }^\circ\text{C}$ および $0 < \omega < (25^\circ\text{C}$ における溶解度に相当する濃度) である。本報では各物性値への圧力の影響についての考察がなされていないが、取扱われている流体が溶液であるためにその影響は小さいと考えられ、大気圧近傍においては各式とも適用できると思われる。

拡散係数

Salt-Water ($\varepsilon < 0.52\%$):

$$0.000 < \omega < 0.006$$

$$D_{AB} = (1.602 \times 10^{-9} - 1.628 \times 10^{-7} \omega + 1.456 \times 10^{-4} \omega^2 - 0.06470 \omega^3 + 14.10 \omega^4 - 1439 \omega^5 + 5350 \times 10^4 \omega^6) \times (T/\mu_{\text{sv}})_t / (T/\mu_{\text{sv}})_{t=25}$$

$$0.006 < \omega < 0.260$$

$$D_{AB} = (1.491 \times 10^{-9} - 1.442 \times 10^{-9} \omega + 4.482 \times 10^{-8} \omega^2 - 5.542 \times 10^{-7} \omega^3 + 3.920 \times 10^{-6} \omega^4 - 1.378 \times 10^{-5} \omega^5 + 1.827 \times 10^{-5} \omega^6) \times (T/\mu_{\text{sv}})_t / (T/\mu_{\text{sv}})_{t=25}$$

KCl-Water ($\varepsilon < 2.3\%$):

$$0.00 < \omega < 0.03$$

$$D_{AB} = (1.949 \times 10^{-9} - 1.954 \times 10^{-8} \omega + 9.221 \times 10^{-7} \omega^2 - 1.649 \times 10^{-5} \omega^3 + 1.214 \times 10^{-4} \omega^4 - 3.037 \times 10^{-4} \omega^5) \times (T / \mu_{sv})_t / (T / \mu_{sv})_{t=25}$$

$$0.03 < \omega < 0.26$$

$$D_{AB} = (1.783 + 1.264 \omega + 7.294 \omega^2 - 23.11 \omega^3) \times 10^{-9} \times (T / \mu_{sv})_t / (T / \mu_{sv})_{t=25}$$

Sucrose-Water ($\varepsilon \approx 0\%$):

$$D_{AB} = (0.5323 + 1.285 \omega + 0.7535 \omega^2) \times 10^{-9} \times (T / \mu_{sv})_t / (T / \mu_{sv})_{t=25}$$

P.E.G. 600 (ε is not clear):

$$D_{AB} = 3.45 \times 10^{-12} \cdot (\omega - 1)^2 \cdot (T / \mu_{sv})_t / (T / \mu_{sv})_{t=25}$$

浸透係数

Salt-Water ($\varepsilon < 1.0\%$):

$$\phi = 0.9240 - 0.1884 \omega + 7.807 \omega^2 - 7.603 \omega^3$$

KCl-Water ($\varepsilon < 1.3\%$):

$$\phi = 0.9182 - 0.5302 \omega + 3.972 \omega^2 - 5.511 \omega^3$$

Sucrose-Water ($\varepsilon < 0.3\%$):

$$\phi = 1.003 + 0.1523 \omega + 0.5020 \omega^2 + 0.5914 \omega^3$$

P.E.G. 600 (ε is not clear):

$$\phi = \left[(D_{AB} \mu / \rho)_{sn} / (D_{AB} \mu / \rho)_{sn} \right]^{0.5}$$

粘性係数

$$\mu_w = 1.792 \times 10^{-3} - 6.242 \times 10^{-5} t + 1.762 \times 10^{-6} t^2 - 4.558 \times 10^{-8} t^3 + 9.990 \times 10^{-10} t^4 - 1.585 \times 10^{-11} t^5 + 1.596 \times 10^{-13} t^6 - 8.937 \times 10^{-16} t^7 + 2.102 \times 10^{-18} t^8$$

Salt-Water ($\varepsilon < 6.3\%$):

$$\mu = \mu_w \cdot (1.0 + 1.531 \omega + 1.521 \times 10 \omega^2 - 6.001 \times 10^2 \omega^3 + 1.024 \times 10^4 \omega^4 - 7.967 \times 10^4 \omega^5 + 3.128 \times 10^5 \omega^6 - 5.868 \times 10^5 \omega^7 + 4.045 \times 10^5 \omega^8)$$

KCl-Water ($\varepsilon < 7.8\%$ ($20 < t < 30$; $\varepsilon < 2.6\%$)):

$$\mu = \mu_w \cdot (1.0 - 0.1639 \omega - 0.1766 \omega^2 + 6.317 \omega^3) \times [1.0 + 3.5 \times 10^{-3} (\omega / 0.25) \cdot (t - 20)]$$

Sucrose-Water ($\varepsilon < 18.6\%$ ($20 < t < 30$; $\varepsilon < 2.6\%$)):

$$\mu = \mu_w \cdot (1.0 - 3.953 \omega - 8.297 \omega^2 + 62.92 \omega^3 + 8.832 \omega^4 - 87.58 \omega^5 - 94.55 \omega^6 + 685.8 \omega^7 + 1281 \omega^8) \times 10^{(2\omega)^2 (-9.644 \times 10^{-3} t + 8.749 \times 10^{-5} t^2 - 4.177 \times 10^{-7} t^3)}$$

P.E.G. 600 ($\varepsilon < 32\%$ ($20 < t < 30$; $\varepsilon < 4.5\%$)):

$$\mu = \mu_w \cdot 10^{3.347 \omega - 7.343 \omega^2 + 20.13 \omega^3 - 21.83 \omega^4 + 8.029 \omega^5} \times 10^{\omega / 0.9291 (-2.349 \times 10^{-2} t + 3.943 \times 10^{-4} t^2 - 3.948 \times 10^{-6} t^3 + 1.549 \times 10^{-8} t^4)}$$

密度

$$\rho_w = 999.8 + 7.692 \times 10^{-2} t - 8.884 \times 10^{-3} t^2 + 7.202 \times 10^{-5} t^3 - 4.464 \times 10^{-7} t^4 + 1.208 \times 10^{-9} t^5$$

Salt-Water ($\varepsilon < 0.83\%$):

$$\rho = \rho_w \cdot (1.0 + 0.7096 \omega + 0.1133 \omega^2 + 0.3882 \omega^3) \times [1.0 + 4.938 \times 10^{-5} \omega \cdot (t - 20)]$$

KCl-Water ($\varepsilon < 0.34\%$):

$$\rho = \rho_w \cdot (1.0 + 0.6360 \omega + 0.1134 \omega^2 + 0.3542 \omega^3)$$

Sucrose-Water ($\varepsilon < 1.2\%$):

$$\rho = \rho_w \cdot (1.0 + 0.3744 \omega + 0.1531 \omega^2) \times [1.0 - 2.0 \times 10^{-4} \omega \cdot (t - 20)]$$

P.E.G. 600 ($\varepsilon < 0.4\%$):

$$\rho = \rho_w \cdot (1.0 + 0.2050 \omega - 6.823 \times 10^{-3} \omega^2 - 6.355 \times 10^{-2} \omega^3) \times [1.0 - 2.5 \times 10^{-4} \omega \cdot (t - 20)]$$

4. 結 言

(1) 加圧型のろ過係数測定装置を用い円筒型酢酸セルロース膜のろ過係数が測定された。また、正浸透現象を用いて、ろ過係数を決定する新しい方法を提案した。
 (2) Wilke-Chang の式をもとに、濃度および温度の影響を考慮した非電解質溶液の拡散係数の相関式を提案した。
 (3) 試行錯誤的に他の物性値と関連付けることにより、浸透係数の予測式が作成され、実験値を $\pm 9\%$ 以内で整理することができた。

終わりに、実験に協力された当時熊本大学 学生 川端茂樹 君に心から謝意を表す。また、本研究の一部は平成 8 年度文部省科学研究補助費・奨励研究(A) (No. 08750239) を用いて行われた。ここに記して、謝意を表す。

文 献

- (1) 一法師茂俊・井村英昭・山村博隆, 機論, 61-591, B (1995), 4178.
- (2) 一法師茂俊・井村英昭, 機論, 64-617, B (1998), 254.
- (3) 佐藤一雄, 物性定数推算法, (1980), 丸善.
- (4) 大江修造, 設計者のための物性定数推算法, (1985), 日刊工業新聞.
- (5) Spiegler K. S. and Kedem O., *Desalination* 1, (1966), 311.
- (6) 木村尚史・酒井清孝・白田利勝・鶴飼哲雄, 膜分離技術マニュアル, (1990), アイピーシー.
- (7) 日本化学学会, 化学便覧基礎編 改訂2版, (1992), 丸善.
- (8) 日本化学学会, 電気化学便覧 第4版, (1985), 丸善.
- (9) Wilke C.R. and Chang P., *A.I.Ch.E. Journal*, 1(1955), 264.
- (10) 日本機械学会, 流体の物性値集, (1988), 日本機械学会.
- (11) 清山哲郎・坂井渡, 近代工業化学 9 反応解析, (1968), 朝倉書店.