浸透ヒートパイプの熱輸送に関する研究*
(第2報, 膜モジュール内の流動について)一法師 茂俊^{*1}, 井村 英昭^{*1}Study on Heat Transport Rate of an Osmotic Heat Pipe
(2nd Report, Flow in a Membrane Module)

Shigetoshi IPPOHSHI and Hideaki IMURA

An osmotic heat pipe is a top heat mode heat pipe driven by an osmotic force. Therefore, a concentration and a solution flow rate in a membrane module of the osmotic heat pipe are especially of great importance for the heat transport. Thus, the flow in the membrane module is investigated in detail. As a result, with a ratio of a concentration on the membrane wall to a mixed mean concentration derived semi-theoretically, correlations for the mixed mean concentration, the concentration on the wall and the solution flow rate along the channel in the membrane module were proposed, which can correlate the experimental data from reference (2) within $\pm 20\%$ errors. In addition, a method of increasing in the osmotic pumping rate and heat transport rate was proposed.

Key Words: Heat Pipe, Heat Transfer, Mass Transfer, Osmosis, Concentration, Solution Flow Rate

1. 緒 言

浸透ヒートパイプ⁽¹⁾⁽²⁾とは, 浸透膜により隔てられた溶液と溶媒との間に生ずる浸透作用を液還流駆動源とするトップヒートモードヒートパイプである。それゆえ, 浸透作用の駆動源である溶液と溶媒との濃度差が非常に重要である。そこで, 本報では膜モジュール内の流動に注目し, 局所および平均の膜モジュール内混合平均濃度, 膜内面濃度および溶液循環流量の算出方法について調査した結果を報告する。また, 本報で得られる諸式を用いて流路沿いの各濃度および流量分布を予測し, それらの挙動について考察するとともに, さらなる浸透量の増大法について検討を試みる。

記 号

A : 入口から任意位置までの浸透面積 m^2
 A_m : 有効浸透面積 m^2
 $b_{1\sim 3}$: 式(18)および(18a')内で定義される定数
 c : モル濃度 kmol/m^3

d : 直径 m
 f : 膜内面濃度と混合平均濃度の比
 h_m : 膜モジュール内容媒液面高さ m
 h_D : 物質伝達係数 m/s
 L_p : ろ過係数 $\text{m}/(\text{Pa}\cdot\text{s})$
 $\dot{m}$: 質量流量 kg/s
 M : 分子量 kg/kmol
 ΔP : 膜内外の差圧 Pa
 p, q : 式(21)内で定義される定数
 Q : 熱負荷 W
 R : 一般ガス定数 $\text{J}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$
 T : 温度 K
 π : 浸透圧 Pa または 円周率
 ρ : 密度 kg/m^3
 σ : 反発係数
 ϕ : 浸透係数
 ω : 濃度 (溶質質量流量/溶液質量流量)
 $\omega_{e,1\sim 9}$: 図1に示される局所濃度

添 字

cal: 計算値
 in: 入口
 exp: 実験値
 init: 初期

* 原稿受付 1997年8月25日。

^{*1} 正員, 熊本大学工学部(☎ 860-8555 熊本市黒髪2-39-1)。

out: 出口 osmo: 浸透
 m: 浸透膜, 膜モジュール内および混合平均
 max: 最大 mi: 浸透膜内表面
 mo: 浸透膜外表面 sn: 溶液
 st: 溶質 sv: 溶媒

2. 膜モジュール内の流動

本実験装置の概略を図1に示す。装置は、蒸発器、蒸気通路、液通路、膜モジュール、凝縮器、サブクーラ、溶液上昇管および下降管から構成される。膜モジュール容器壁は可視化のためにアクリル樹脂で製作され、その他は全て黄銅で製作された。各通路は内径6 mmの黄銅管である。本実験では溶液としてポリエチレングリコール600水溶液を、浸透膜として内径11.5 mm、外径11.8 mmの円筒型酢酸セルロース膜（日東電工製、NTR-1595）を18本用いた。実験では、主ヒータへの電力を段階的に変化させ、定常時の熱負荷、凝縮器およびサブクーラにおける放熱量、温度および濃度、さらに膜モジュール内容液液面高さを測定した。

本装置は、上部に加熱部そして下部に冷却部が設置されたトップヒートモードヒートパイプであり、その熱輸送は主に潜熱の形で行われる。それゆえ、蒸気通路内の溶媒（蒸気）流量が特に重要である。また、定常作動時には膜モジュール内の浸透量自己調節機構によりこの溶媒流量は浸透量に等しくなる。よって、浸透ヒートパイプの熱輸送量を考察する上で浸透量に関する調査が必要と思われるが、この浸透量は膜内面濃度に依存しており、膜モジュール内の濃度および溶液流量分布を明らかにすることが必要とされる。そこで、以下膜モジュール内の流動について検討を行う。

膜モジュールの詳細および任意微小溶液流路区間における質量バランスを図2に示す。ここで、本報では溶液の流動および浸透作用を取り扱うため、濃度を質量流量比 ω およびモル濃度 c の二つの表記法により記述することにする。

$$\omega = \frac{\dot{m}_{st}}{\dot{m}_{st} + \dot{m}_{sv}} \quad (1)$$

$$c = \frac{\rho\omega}{M_{st}} \quad (2)$$

まず、図2内に示される質量バランスに基づき次式が得られる。なお、溶質の質量流量は質量保存則により、定常流においては流路沿いに一定である。

$$\dot{m}_{sn,out} = \dot{m}_{sn,in} + \dot{m}_{osmo} \quad (3)$$

$$\omega_{m,out} = \dot{m}_{st} / \dot{m}_{sn,out} \quad (4)$$

$$\omega_{m,in} = \dot{m}_{st} / \dot{m}_{sn,in} \quad (5)$$

① Evaporator ② Main heater ③ Solution downcomer ④ Vapor line
 ⑤ Subcooler ⑥ Condenser ⑦ Counter heater ⑧ Solution riser
 ⑨ Membrane module ⑩ Liquid line
 ● Positions of thermocouples ▲ Positions of solution sampling taps

Fig. 1 Schematic diagram of apparatus

Fig. 2 Details of membrane module and mass balance in any differential section of solution flow line

Table 1 Symbols in figures

Initial Concentration kmol/m ³	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Experimental data	○	①	□	▢	△	▴	▽	▽	◇	◊

Fig. 3 Comparison of calculated values with experimental data for concentration at outlet of the membrane module

また、浸透圧 (Van't Hoff の式) および微小区間における浸透量は次式により記述される。

$$\pi = \phi_{mi} R T_m c_{mi} \quad (6)$$

$$d\dot{m}_{osmo} = \rho_{sv} L_p (\sigma\pi - \Delta P) dA \quad (7)$$

本浸透ヒートパイプでは、 ΔP は π に比べ非常に小さいので、式 (2), (6) および (7) より、微小区間における浸透量は次式のように記述される。

$$d\dot{m}_{osmo} = (\rho_{sn,mi} \rho_{sv} L_p \sigma \phi_{mi} R T_m \omega_{mi} / M_{st}) dA \quad (8)$$

ここで、本実験は等温条件であり、また後述の考察で膜内面濃度は流路沿いにほぼ一定であることから、 $\rho_{sn,mi} \rho_{sv} L_p \sigma \phi_{mi} R T_m / M_{st} = \text{const.}$ とする。よって、浸透作用が生じている部分にわたり上式を積分することにより、浸透量は次式として記述される。

$$\dot{m}_{osmo} = \bar{\rho}_{sn,mi} \rho_{sv} L_p \sigma \bar{\phi}_{mi} R T_m \bar{\omega}_{mi} A_m / M_{st} \quad (9)$$

ここで、

$$\bar{\omega}_{mi} = \frac{1}{A_m} \int_{A_m} \omega_{mi} dA \quad (10)$$

である。式中の $\bar{\rho}_{sn,mi}$ および $\bar{\phi}_{mi}$ は、それぞれ流路沿いの平均溶液密度および浸透係数である。ただし、これらの値は流路沿いの平均値ではなく、 $\bar{\omega}_{mi}$ を用いて算出することにする。以上の結果より、浸透量を算出するには、膜内面平均濃度 $\bar{\omega}_{mi}$ が必要となる。

式 (1) および図 2 より、微小区間における浸透量は次式となる。

$$d\dot{m}_{osmo} = -(\dot{m}_{st} / \omega_m^2) d\omega_m \quad (11)$$

よって、式 (8) および上式より、

$$-\frac{d\omega_m}{\omega_m \omega_m^2} = \frac{\rho_{sn,mi} \rho_{sv} L_p \sigma \phi_{mi} R T_m}{M_{st} \dot{m}_{st}} dA \quad (12)$$

となる。ここで、流路沿いの混合平均濃度と膜内面濃度の分布が相似であると仮定する。

$$\frac{\omega_{mi}}{\omega_m} = f \quad (13)$$

ただし、 f は定数である。この仮定を用い、式 (12) の両辺を浸透作用が生ずる部分にわたり積分することにより、膜モジュール出口濃度に関する次式が得られる。

$$\omega_{m,out} = \left(\frac{2f \bar{\rho}_{sn,mi} \rho_{sv} L_p \sigma \bar{\phi}_{mi} R T_m A_m}{M_{st} \dot{m}_{st}} + \frac{1}{\omega_{m,in}^2} \right)^{-1/2} \quad (14)$$

また、式 (11) を同様の範囲において積分し、式 (9) および (14) を用いることにより、膜モジュール内平均濃度が導出される。

$$\bar{\omega}_m = 2 / \left(\frac{1}{\omega_{m,out}} + \frac{1}{\omega_{m,in}} \right) \quad (15)$$

さらに、式 (10) および (13) より膜内面平均濃度が次式として記述される。

$$\bar{\omega}_{mi} = 2f / \left(\frac{1}{\omega_{m,out}} + \frac{1}{\omega_{m,in}} \right) \quad (16)$$

3. 結果 および 考察

3・1 膜モジュール出口濃度および濃度比 本実験では膜モジュール内における濃度の測定が行われていないため、代わりに実験で得られた膜モジュール出口濃度と式 (14) を比較することにより、前節の理論的考察の妥当性について考える。

まず、式 (9) および (16) より次式が得られ、実験値より定数 f を以下のように決定した。

$$f = \frac{M_{st} \dot{m}_{osmo}}{2 \bar{\rho}_{sn,mi} \rho_{sv} L_p \sigma \bar{\phi}_{mi} R T_m A_m} \left(\frac{1}{\omega_{m,in}} + \frac{1}{\omega_{m,out}} \right) = 0.280 \quad (17)$$

この値を用い算出された膜モジュール出口濃度の計算値と実験値の比較を図 3 に示す。また、本報内の図中で用いられる記号を表 1 に示す。ここで、計算値の算出においては、文献 (3) 内で報告された物性値およびろ過係数 ($= 2.38 \times 10^{-12} \text{ m/(Pa} \cdot \text{s)}$) を用いた。全実験値が $\pm 35\%$ 程度の誤差内で整理されてはいるが、計算値は低出口濃度において実験値より高く、高出口濃度において低く予測する傾向があり、式 (14) は実際の現象を的確には表現できていない。よって、式 (15) および (16) もまた同様の傾向を示すと思われる。

次に、より正確な膜内面平均濃度を予測するために、濃度比 $\omega_{mi}/\omega_m (=f)$ をある関数と考え、再度検討を試みる。まず、式(12)を浸透作用が生じている区間において積分すると次式が得られる。

$$-\int_{\omega_{m,in}}^{\omega_{m,out}} \frac{1}{f\omega_m^3} d\omega_m = \frac{\bar{\rho}_{sn,mi}\rho_{sv}L_p\sigma\bar{\phi}_{mi}RT_m}{M_{st}\dot{m}_{st}} A_m \quad (12')$$

ここで、式(12')の右辺は実験値を用いて算出することができ、また左辺より右辺は何らかの濃度の関数であると予想される。そこで、現状における既知の濃度が $\omega_{m,in}$, $\omega_{m,out}$ および式(9)から算出される $\bar{\omega}_{mi}$ の三つであることから、膜モジュール内の現象を最も良く表す指標として $\bar{\omega}_{mi}$ を選択し、上式右辺と比較することにした。その結果を図4に示す。実験値は、両対数グラフにおいて直線分布を示し、次式により表される。

$$\frac{\bar{\rho}_{sn,mi}\rho_{sv}L_p\sigma\bar{\phi}_{mi}RT_m}{M_{st}\dot{m}_{st}} A_m = b_1\bar{\omega}_{mi}^{b_2} \quad (18a)$$

$$b_1 = 6.76 \times 10^{-3} \quad (18b)$$

$$b_2 = -3.28 \quad (18c)$$

よって、式(12')より、

$$-\int_{\omega_{m,in}}^{\omega_{m,out}} \frac{1}{f\omega_m^3} d\omega_m = b_1\bar{\omega}_{mi}^{b_2} \quad (19)$$

となる。ここで、濃度比の関数形が不明であるため、上式を解き、濃度比を決定することはできない。そこで、再度式(18)について検討する。式(18)を作成する際、種々の有効浸透面積における実験値が用いられたことから推測し、式(18)は入口からある位置までの任意の区間においても成り立つ関係であると考えられる。よって、前述同様物性値は流路沿いに一定であると考え、任意の位置にある微小区間について考えると、次式を得る。

$$\frac{\rho_{sn,mi}\rho_{sv}L_p\sigma\phi_{mi}RT_m}{M_{st}\dot{m}_{st}} dA = d(b_1\bar{\omega}_{mi}^{b_2})$$

ここで、上式中の膜内面平均濃度は、微小区間内の平均値であることから、局所膜内面濃度と考えることができる。ただし、後述の図6内に見られるように流路沿いの膜内面濃度の変化は非常に穏やかな直線的減少傾向にあるが若干曲線的傾向を示すことから、式(18)内には膜内面濃度の流路沿いの変化の影響が含まれると考えられるので、その影響を b_3 で表すことにする。したがって、上式は以下のように記述される。

$$\frac{\rho_{sn,mi}\rho_{sv}L_p\sigma\phi_{mi}RT_m}{M_{st}\dot{m}_{st}} dA = d(b_3b_1\bar{\omega}_{mi}^{b_2}) \quad (18a')$$

ここで、 b_3 は弱い距離の関数と考えられるが、ほぼ1

Fig. 4 Relation between values of right hand side in Eq. (12') and $\bar{\omega}_{mi}$

に等しい定数と見なす。ゆえに、式(12), (13) および上式より、次式が得られる。

$$-\frac{1}{f\omega_m^3} = b_1b_2b_3\omega_{mi}^{b_2-1} \frac{\partial \omega_{mi}}{\partial \omega_m} \quad (20)$$

上式中には変数として混合平均濃度および膜内面濃度の二つが存在する。それゆえ、膜内面濃度が混合平均濃度の関数と考えられる。よって、濃度比もまた混合平均濃度の関数である。次に、濃度比の関数形について考える。上式右辺の膜内面濃度の指数が整数でないため、濃度比を混合平均濃度の多項式と考えることは難しい。また、濃度比を三角関数および対数関数とすると右辺と左辺の関数形が異なる。したがって、上式中に指数関数が含まれていることから、濃度比の関数形を式(21)と推定した。ただし、 $\omega_m \rightarrow 0$ の場合、実際の濃度比は1に近づくが、仮定された濃度比では0または無限大になる。しかし、後述の図8から明らかに、 $\omega_m \rightarrow 0$ の場合、溶液中の物質伝達に関するコンダクタンスが浸透現象に関するコンダクタンスに比べ大きな値を示すため、この場合の浸透量に及ぼす溶液中の物質伝達の影響は小さい。つまり、このような場合、 $\omega_{mi} \approx \omega_m$ であり、浸透量は式(9)によってのみ決定することができるので、濃度比を表す式は不要となる。

$$f = \frac{\omega_{mi}}{\omega_m} = p\omega_m^q \quad (21)$$

よって、式(20)は以下のように変形される。

$$\omega_m^{(q+1)(b_2-1)+2q+3} = -\frac{1}{b_1b_2b_3p^{b_2+1}(q+1)} \quad (22)$$

この式が恒等式であるための条件は、

$$(q+1)(b_2-1)+2q+3=0 \quad (23)$$

$$b_1b_2b_3p^{b_2+1}(q+1)=-1 \quad (24)$$

である。式(18c) および (23) より、

$$q = -\frac{b_2 + 2}{b_2 + 1} = -0.561 \quad (25)$$

となる。次に定数 p の決定を行う。ここで、式 (24) 内の b_3 が未知数であるため、式 (12') および (21) より得られる次式と実験値を用い、

$$p = \frac{M_{st} \dot{m}_{st}}{\bar{\rho}_{sn,mi} \rho_{sv} L_p \sigma \bar{\phi}_{mi} R T_m A_m (q+2)} \left[\omega_{m,out}^{-(q+2)} - \omega_{m,in}^{-(q+2)} \right] \quad (26)$$

定数 p を決定することにした。得られた結果は以下の通りである。

$$p = 0.112 \quad (27)$$

これらの結果に基づき、式 (14) と同様の方法を用いると、膜モジュール出口濃度は以下ようになる。

$$\omega_{m,out} = \left[\frac{p(q+2) \bar{\rho}_{sn,mi} \rho_{sv} L_p \sigma \bar{\phi}_{mi} R T_m A_m}{M_{st} \dot{m}_{st}} + \omega_{m,in}^{-(q+2)} \right]^{-\frac{1}{q+2}} \quad (28)$$

上式を用いて得られる、図3と同様の比較を図5に示す。広範囲な入口濃度に対して、出口濃度を±20%の誤差程度で予測できている。

3・2 流路沿いの各値の変化 式(4)および(5)を(28)

Fig. 5 Comparison of calculated values with experimental data for outlet concentration

Fig. 7 Relation between ω_{mi} and ω_m

に代入することにより膜モジュール出口溶液流量は次式として記述される。

$$\dot{m}_{sn,out} = \left[\frac{p(q+2) \bar{\rho}_{sn,mi} \rho_{sv} L_p \sigma \bar{\phi}_{mi} R T_m A_m \dot{m}_{st}^{q+1}}{M_{st}} + \dot{m}_{sn,in}^{q+2} \right]^{-\frac{1}{q+2}} \quad (29)$$

また、本報には直接関係ないが、上式から導出される膜モジュール内平均溶液流量を以下に示す。

$$\bar{\dot{m}}_{sn,m} = \frac{q+2}{q+3} \frac{\dot{m}_{sn,out}^{q+3} - \dot{m}_{sn,in}^{q+3}}{\dot{m}_{sn,out}^{q+2} - \dot{m}_{sn,in}^{q+2}} \quad (30)$$

ここで、式 (28) および (29) は、 A_m を入口から任意位置までの面積 (距離の関数) A と考えることにより、それぞれ流路沿いの混合平均濃度および溶液流量を表すことになる。また、式 (21) にこの流路沿いの混合平均濃度を代入することにより、流路沿いの膜内面濃度分布を得ることができる。図6に典型的な流路沿いの混合平均濃度、膜内面濃度および溶液流量の分布を示す。混合平均濃度は、膜モジュール入口直後では急激な減少を示すが、下流になるほどより穏やかな減少に変わる。一方、膜内面濃度は流路沿いに若干低下する傾向を示すがほぼ一定である。この膜内面濃度の分布の挙動を考察するために、図7および8に膜内面濃度

Fig. 6 Solution flow rate, mixed mean concentration and concentration on membrane wall along channel

Fig. 8 Relation between two conductances and ω_m

Fig. 9 Reduction of mixed mean concentration along channel

と混合平均濃度の関係および次式により定義されるコンダクタンスと混合平均濃度の関係を示す。

$$\frac{d\dot{m}_{osmo}}{dA} = \frac{\rho_{sv} L_p \sigma \phi_{mi} R T_m}{M_{st}} \rho_{sn,mi} \omega_{mi} \quad (31)$$

$$= h_D \left\{ [\rho_{sn}(1-\omega)]_{mi} - [\rho_{sn}(1-\omega)]_m \right\}$$

ここで、上式中の浸透現象を示す項は、式(8)を変形して得られたものであるが、膜外の濃度がゼロであることおよび膜内面濃度が希薄であるため膜外および膜内面密度がほぼ一致することから考えると、膜内外の溶媒濃度差を基準とする浸透量を表す式と考えることができる。図7において、 $\omega_m \leq 0.05$ では混合平均濃度の増加とともに膜内面濃度は増大するが、それ以上の濃度では非常に穏やかに増大する。これは、図8に示されるように浸透現象に関するコンダクタンスは混合平均濃度に関してほぼ一定値を示すのに対し、溶液中の対流に伴うコンダクタンスは混合平均濃度の増加に伴い大きく低下することに起因すると考えられる。このコンダクタンスの低下は濃度増加による物性値変化によるものと考えられ、特に粘性係数の急激な増加によりレイノルズ数の低下を引起し、濃度境界層厚さが増大したものと考えられる。また、式(31)から予想されるように、この膜内面濃度の傾向を反映して局所浸透量は流路沿いにはほぼ一定であると予想される、それゆえ、溶液循環流量もまた直線的に増大しているものと思われる。

3・3 浸透量の増大法 前節の結果から局所浸透量が一定であると仮定すると、式(1)および(3)より導出される次式から、混合平均濃度は双曲線的減少を示すことが分る。

$$\frac{\omega_m}{\omega_{m,in}} = \frac{1}{1 + \frac{\dot{m}_{osmo}}{\dot{m}_{sn,in}} \frac{A}{A_m}} \quad (32)$$

上式は、式中の流量比の値により、その分布形状が大きく変化する。図9に、この流量比をパラメータとす

Fig. 10 Comparison of Eq. (35) with Eq. (9)

る濃度比と浸透面積比の関係を示す。図中には実験において取り得た範囲を斜線で示している。図7に示されるように、混合平均濃度の増加に伴い膜内面濃度が若干増大することから考えると、混合平均濃度の低下により下流域においてはより良い浸透作用が得られないことになる。本実験では、すべての条件において流路沿いの混合平均濃度の減少が大きいため、熱輸送量の増大に関する改良の余地が残されていることになる。例えば、このことに関する膜モジュール出口濃度低下の許容範囲を膜モジュール入口濃度の5%減(図中の点線)と考えると、式(32)より以下の条件が得られる。

$$\frac{\dot{m}_{osmo}}{\dot{m}_{sn,in}} < 0.0526 \quad (33)$$

よって、浸透量の約20倍以上の膜モジュール入口溶液流量を実現すれば、主流濃度の低下による浸透作用の低下は極めて小さくなると考えられる。本実験装置において溶液は、溶液上昇管と下降管内の溶液の濃度差に依存する密度差により自然循環しているので、溶液循環駆動力を大きくするためには、溶質と溶媒との密度差が大きくなるようにその組合わせを選択すること、または溶液ループ内の圧力損失を減少させるために、粘性係数の低い溶液を選択し、さらに流路径を大きくすることにより、上記の条件を満たすことができると考えられる。しかし、流路径を増大させると装置自体の重量が増大するので、上記の値を目安とし可能な限り軽量化する工夫も必要と思われる。

3・4 膜モジュール内平均濃度および膜内面平均濃度 これら二つの濃度に関しては、濃度比を関数とした場合、式(15)および(16)と同様の方法では導出することができない。そこで、膜内面平均濃度の定義式(10)とそれと同様の膜モジュール内平均濃度の定義式に式(3)~(5)、(21)および(32)を代入することにより、各濃度を導出することにした。得られた結果は以下の通りである。

$$\bar{\omega}_m = \frac{\ln\left(\frac{\omega_{m,in}}{\omega_{m,out}}\right)}{\omega_{m,out}^{-1} - \omega_{m,in}^{-1}} \quad (34)$$

$$\bar{\omega}_{mi} = \frac{p \frac{\omega_{m,in}^q - \omega_{m,out}^q}{q}}{\omega_{m,out}^{-1} - \omega_{m,in}^{-1}} \quad (35)$$

ここで、式(9)から算出される膜内面平均濃度と式(35)から算出される計算値の比較を図10に示す。ほとんどの値が±20%程度の誤差内で整理できており、前述の膜モジュール出口濃度の予測結果とほぼ一致する。膜モジュール内平均濃度に関しては比較する値が得られていないが、両式の導出方法が同一であるため、式(34)もまた式(35)と同程度の予測結果を示すと思われる。ここで、上式の導出において $dm = \text{const.}$ という仮定が用いられているが、本実験では溶液流量が非常に小さいにもかかわらず、膜内面平均濃度に関する良い予測が得られており、溶液流量が大きくなるに従い流路沿いの混合平均濃度および膜内面濃度が一定になるので、つまり局所浸透量が一定となるため、比較的溶液流量が大きな場合にはさらに良い予測が可能と思われる。また、本実験では広範囲な濃度および溶液流量(流速)において測定が行われているにもかかわらず、導出された膜内面平均濃度の式(35)は溶液流速の変化を考慮することなしに、実験値を良く予測できることから考えると、溶液流速の浸透量に及ぼす影響は比較的小さいと考えられる。

4. 結 論

(1) 膜内面濃度と混合平均濃度の比を定数および混合平均濃度の関数と仮定した二つのモデルを用い、局所

および平均の膜モジュール内混合平均濃度、膜内面濃度および溶液流量を予測する式を導出した。結果として、後者のモデルは得られた実験値を±20%程度の誤差内で予測できており、実際の現象を適確に表現していると思われる。

(2) 膜モジュール内混合平均濃度は、流路沿いに双曲線的分布を示し、浸透量と膜モジュール入口溶液流量の比がその分布形状に影響することが明らかにされた。また、流路沿いの主流濃度の低下による浸透作用の低下が生じないようにするには、膜モジュール入口溶液流量が浸透量よりかなり大きくなるように設計する必要があることが分った。

(3) 膜モジュール内の局所膜内面濃度および浸透量は、下流ほど若干低下するがほぼ一定であった。これは混合平均濃度の増加に伴う溶液中の物質伝達係数の急激な低下によるものであり、溶液濃度の増加に伴う浸透量の増大は比較的穏やかであることが明らかにされた。

終わりに、実験に協力された当時 熊本大学 学生 山村博隆、紺家幸治、緑忠行、土佐谷仁志、山田克則、田上理 君に心から謝意を表す。また、本研究は、平成7年度文部省科学研究費補助金・奨励研究(A)(No.07855027)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) 一法師茂俊・井村英昭・紺家幸治・青山暢隆, 機論, 64-620, B(1998), 1179.