

中空糸型正浸透膜モジュールにおける淡水流れの浸透特性

寺嶋真伍*・林秀千人*・奥村哲也*・松山慧**・上山哲郎**・坂井秀之**

Permeation characteristics of fresh water flow
in hollow fiber membrane module

by

Shingo TERASHIMA*, Hidechito HAYASHI*, Tetsuya OKUMURA*
Kei MATSUYAMA**, Tetsuro UEYAMA**, and Hideyuki SAKAI**

Forward Osmosis(FO) is recently paid attention to preprocessing of the Reverse Osmosis(RO). It can reduce the input power of RO plant. It is required to reduce the salt concentration at outlet and increase the permeation flow rate. In this paper, the characteristics of the fresh water flow and osmosis are studied for the hollow fiber membrane module used in RO system. It is cleared that the disappearance of fresh water and the concentration polarization in hollow fiber largely influence the reduction of permeation flow rate in the case of the low fresh water flow rate. Concentration of fresh water and the leakage of salt influence the reduction of permeation flow rate in the case of high fresh water flow rate.

Key words : Forward Osmosis, Fresh water, Reduction of permeation flow, Hollow fiber membrane

1. 緒言

現在, 世界的な水不足により海水淡水化が注目されている。海水淡水化の中でも, 浸透膜を用いた逆浸透(RO)法が広く普及している^[1]。この場合, 浸透膜を介して, 海水側に海水の浸透圧約 3.5[MPa]以上の圧力約 8[MPa]をかけなければならない^[2]。そのため大きな動力を必要とするエネルギー消費型の設備をとっている^[3]。最近では, ROの前処理として正浸透(FO)を用いる新技術が注目されている。これはROの前に, 海水側へFOを利用して淡水を入れ, 海水の塩分濃度, つまり海水の浸透圧を低くするというものである。これによりRO時に必要な動力を大幅に低減させることができる。しかしながら, FO利用における実用化は進んでいない。これは, FOの特性がまだ十分に解明されていないためである。特性を明らかとするためには, 淡水側と塩水側のそれぞれについて調べる必要があるが, 本稿では, 淡水の低流量時における浸透性能の低下に関わる種々の要因を調べ, その影響を検証した。

ここでの種々の要因としては, 膜の透水性能の低下, 浸透圧差の低下, 流体力学的圧力差の増加, 中空糸膜近傍での濃度分極, 中空糸内の淡水流量の低下による浸透流量の低下が挙げられる。この中で, 膜の透

水性能は変化せず一定であるため考慮しない。また, 淡水側における浸透圧差の低下は, 淡水の濃縮, もしくは塩水側から淡水側への塩分の漏洩の二つが考えられる。

したがって以下の4つが, 浸透流量低下の原因として考えられる。①中空糸内部において, 淡水が濃縮されたことで浸透圧差が小さくなり, 浸透流量が小さくなった。②淡水側へ塩水側から塩水が漏れ出すことで, 淡水側の浸透圧が上昇し, 結果として浸透圧差が小さくなり, 浸透流量が小さくなった。③濃度分極により実効浸透圧差が小さくなり, 浸透流量が低下した。④中空糸内の淡水が途中で無くなり, 浸透する淡水が無いために浸透流量が小さくなった。

主な記号

J_w	淡水の透過流束 [$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
A	淡水の透過係数 [$\text{m}/(\text{Pa} \cdot \text{s})$]
$\Delta\pi$	膜間の浸透圧差 [Pa]
ΔP	膜間の流体力学的圧力差 [Pa]
M	モル濃度 [mol/m^3]
R	気体定数 [$\text{kg} \cdot \text{m}^2/(\text{K} \cdot \text{mol} \cdot \text{s}^2)$]

平成27年 1月23日受理

* 長崎大学工学研究科 (Dept. engineering, Nagasaki-university)

** 協和機電工業株式会社 (Kyowa-kiden Co., Ltd.)

T	絶対温度 [K]
J_s	NaCl の透過流束 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
B	NaCl の透過係数 [m/s]
$C_{d,m}$	塩水側膜表面でのモル濃度 [kg/m^3]
$C_{f,i}$	淡水側インターフェースでのモル濃度 [kg/m^3]
R	塩分阻止率 [-]
K	拡散抵抗 [s/m]
$\pi_{d,m}$	塩水側膜表面での浸透圧 [Pa]
$\pi_{f,m}$	淡水側膜表面での浸透圧 [Pa]
S	構造パラメータ [m]
D	NaCl の拡散係数 [m^2/s]
τ	屈曲率 [-]
t	膜の厚さ [m]
ε	空孔率 [-]
$\pi_{d,b}$	塩水側バルクでの浸透圧 [Pa]
$\pi_{f,b}$	淡水側バルクでの浸透圧 [Pa]
kd	物質移動係数 [m/s]
Sh	シャーウッド数 [-]
dh	水力直径 [m]
Re	レイノルズ数 [-]
Sc	シュミット数 [-]
L	中空糸膜全長 [m]
d_i	中空糸膜の内径 [m]
d_o	中空糸膜の外径 [m]
q	中空糸 1 本における淡水流量 [m^3/s]
l	中空糸長さ [m]
P_0	淡水入口圧力 [Pa]
ν	動粘度 [m^2/s]
ρ	密度 [kg/m^3]
q_0	淡水入口流量 [m^3/s]
P_s	塩水側圧力 [Pa]

2. 実験装置および方法

実験装置は、図 1 のフロー図に示すように、膜モジュールの塩水側へ流入する塩水流路、淡水側へ流入する淡水流路、浸透した淡水が塩水と混合されて膜モジュールから流出する混合水流路、塩水側へ浸透せず残留した淡水が流出する未浸透水流路から成る。塩水流路では、塩水タンクからポンプを通った塩水が流量計、圧力計を通り、膜モジュール塩水側入口へ至る。淡水流路は、淡水タンクからポンプを通った淡水が、流量計、圧力計を通り、膜モジュール淡水側入口へ至る。混合水流路では、膜モジュール混合水出口から流出した混合水が圧力計、流量計、電気伝導度計を通り、排水タンクへ至る。淡水のうち、塩水への浸透がなされない未浸透水の流路では、膜モジュール未浸透水出口から、電気伝導度計を通り、排水タンクへ至る。浸透流量は、混合水流量から塩水流量を引くことで得ている。実験後は、毎回膜モジュール内に実験中の塩水が残らないよう水道水で洗浄する。

中空糸とは、三酢酸セルロースから成る高分子膜で、本実験では図 2 にあるような内径 60[μm]、外径

160[μm]の円筒状の半透膜を用いた。中空糸内の空洞を淡水が流れ、周囲を流れる塩水との間で浸透を起こす。

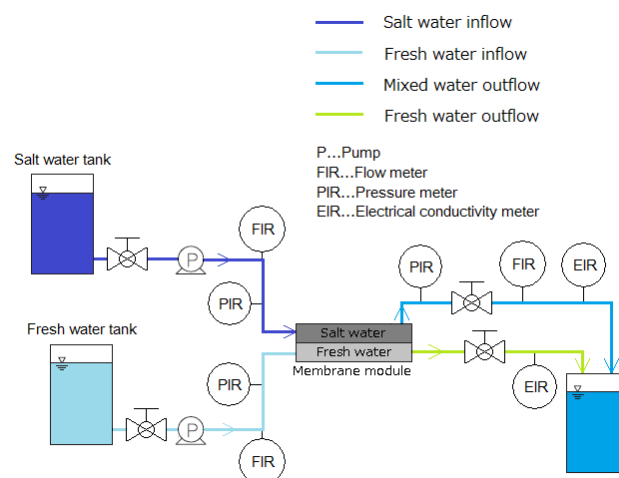


Fig.1 Schematic diagram of experimental device

また、膜の構造は外表面が非常に薄く、緻密な孔のある活性層で覆われており、活性層に強度を持たせるため活性層から中空糸の内側にかけての厚み部分に支持層が形成されている非対称膜となっている。

図 3 は活性層が塩水に、支持層が淡水に接液している場合の塩分濃度分布を示すものである。淡水の透過は淡水側から塩水側（図中右向き）へ行われている。支持層内部では活性層によって遮断された淡水中の溶質が滞り、その一方で活性層の塩水側表面では透過した淡水が塩水の塩分濃度を低下させるため、塩分濃度分布は図のようになることが知られている¹⁶⁾。このように膜を介して塩分濃度差に対応する浸透圧が低下する現象を濃度分極と呼んでいる。したがって、淡水の透過流量は淡水および塩水のバルクの浸透圧によって単純には求められない。

上記の中空糸膜を充填した装置である膜モジュールは、図 4 の断面図に示すような構造となっている。中空糸膜は図中の斜線部分に充填されている。塩水は、図中の右側中央より流入し、軸心部分に設置されているセンターパイプを流れる。このセンターパイプには多数の穴が開けられており、その穴から塩水が中空糸膜の充填されている領域へ流れ出る。その領域で浸透が生じ、淡水と塩水が混ざり合った混合水となり図中左上に設けられた排水口より流出する。淡水は図中右側から流入し、中空糸の開口を得て固定されている端面より、中空糸膜一本一本へ淡水が供給される。浸透せず残留した未浸透水は図中左側の領域から排水される。なお、中空糸エレメントにおける中空糸の本数は 180000 本、中空糸エレメントの長さは 613[mm]、中空糸エレメントでの中空糸は塩水流路に巻きつけられているため、中空糸エレメントの長さより長くなり、中空糸の平均有効長さは 641[mm]となる。ここでの有効長さとは、中空糸エレメントの両端が樹脂で束ねられているため、その固定部分を除いた浸透が行われる部分の中空糸の長さということである。

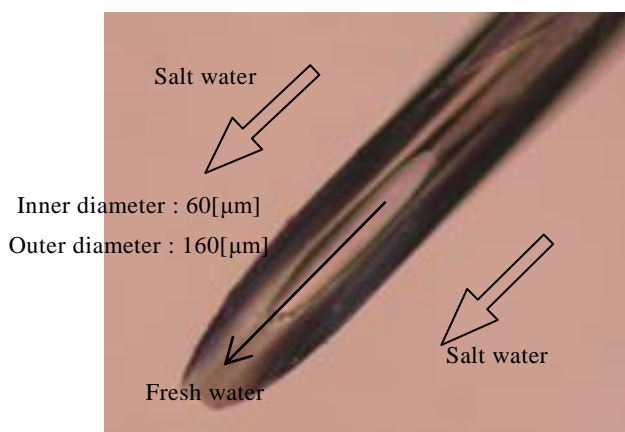


Fig.2 Photograph of cross-section of hollow fiber membrane

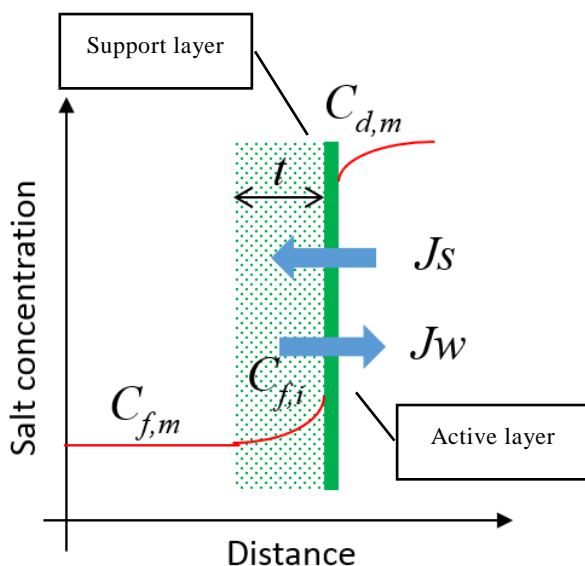


Fig.3 Schematic of cross-section of membrane (AL-DS)

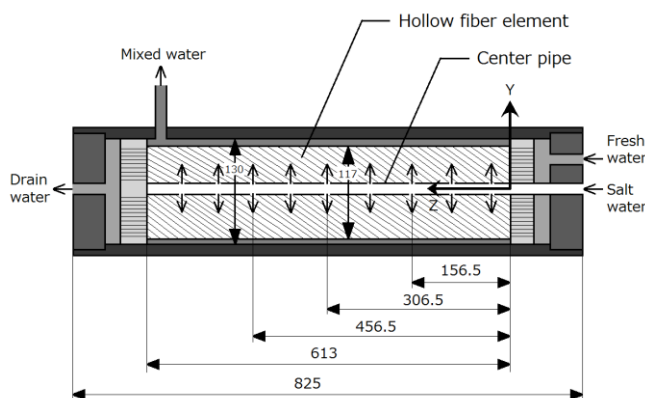


Fig.4 Schematic of cross-section of membrane module

運転条件は、塩水流量を 1.0[l/min]、塩分濃度を

0.5[%]、淡水流量を 1.0,2.0,3.0,3.5[l/min]と変化させ、浸透流量や混合水出口塩分濃度、圧力損失を測定した。

3. 実験結果と考察

3-1. 浸透流量の比較

本実験は低淡水流量時における特性を調べている。図5に、本実験により得られた浸透流量の淡水流量に対する変化をプロットした。実線は理論値を示している。理論的な浸透流束 J_w [m/s]は、 A [m/(s·Pa)]を水の透過係数、 $\Delta\pi$ [Pa]を塩水と淡水の浸透圧差、 ΔP [Pa]を塩水側と淡水側の流体力学的圧力差として式(1)で表される。

$$J_w = A(\Delta\pi - \Delta P) \quad \dots (1)$$

式(1)中の浸透圧差 $\Delta\pi$ は式(2)のファンツホッフの式により計算できる。 M [mol/m³]をモル濃度、 R [kg·m²/(s²·kmol·K)]を気体定数、 T [K]を絶対温度としている。

$$\pi = 2MRT \quad \dots (2)$$

本実験において、淡水流量 3.5[l/min]における浸透流量、モジュール内平均塩分濃度、塩水側圧力、淡水側圧力、中空糸膜の総面積を式(1)へ適用し、水の透過係数を計算したところ、透過係数 $A=8.1E-7$ [m/(s·MPa)]という値を得た。これにより得られる浸透流量を、理想的な浸透流量として図5へ実線で示した。淡水流量が多い場合を理想状態と仮定した理由としては、中空糸内を流れる淡水流量が多くなるため、中空糸内の淡水が無くなるということが考えにくいということ。更に淡水流速が大きくなることで、濃度分極に関する理論の項で示したように、淡水側のレイノルズ数が大きくなり、外部濃度分極が低減され、理想状態に近づく想定したためである。これによると、膜モジュールへ供給する淡水流量が少なくなるにつれ、理想浸透流量との差が大きくなることわかる。これに対する原因としては、緒言の章で記述したように以下の4つが、浸透流量低下の原因として考えられる。①中空糸内部において、淡水が濃縮されたことで浸透圧差が小さくなり、浸透流量が小さくなった。②淡水側へ塩水側から塩水が漏れ出すことで、淡水側の浸透圧が上昇し、結果として浸透圧差が小さくなり、浸透流量が小さくなった。③濃度分極により実効浸透圧差が小さくなり、浸透流量が低下した。④中空糸内の淡水が途中で無くなり、浸透する淡水が無いために浸透流量が小さくなった。したがって、上記の理想の浸透流量とは、①-④の影響が十分小さいと想定した場合の浸透流量を示すものである。以降では、これらの影響を定量的に各々検証する。

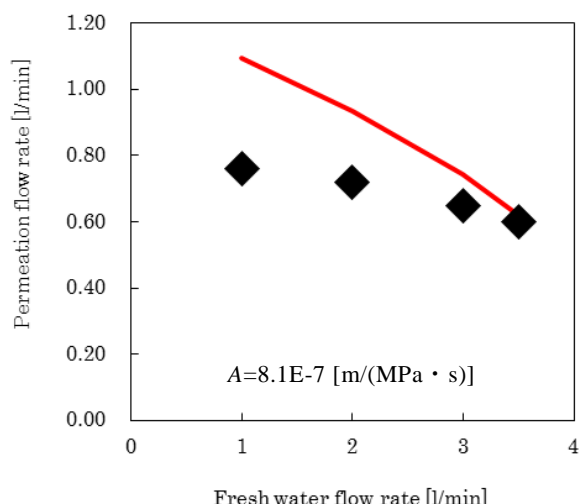


Fig.5 Permeation flow rate of experiments and theoretical value

3-2 濃縮の影響

本節では緒言で要因①と②で示した、淡水側の浸透圧が増大することによる影響を明らかとする。まず、どの程度淡水側の浸透圧が上昇したのかを、淡水の入口と出口における塩分濃度から計算した結果、図6のような結果を得た。図中には、淡水のモジュール入口における浸透圧を赤い実線で示している。これを見ると、供給する淡水流量が小さい程、淡水側の浸透圧が上昇しているということがわかる。つまり、供給する淡水流量が少ない場合、淡水の濃縮、あるいは塩水側から淡水側への塩分の漏洩が生じ易いと言える。ここで、塩分の漏洩による影響のみに着目する。図7は塩分の漏洩による塩分濃度の上昇量を示したものである。ここでの塩分の漏洩による塩分濃度の上昇量の結果は、以降に記す理論式により計算したものである。

半透膜は、理想的には水を通し、塩分を通さない膜であるが、実際には若干の塩分が塩水側から淡水側へ透過する。塩分の透過流束 J_s [kg/(m²·s)] は次式で定義されている^[10]。

$$J_s = B(C_{d,m} - C_{f,i}) \quad \dots (3)$$

ここで B [m/s] は塩分に関する透過係数であり、 $C_{d,m}$ [kg/m³] は高濃度溶液の膜面における塩分濃度、 $C_{f,i}$ [kg/m³] は低濃度溶液の活性層と支持層のインターフェースにおける塩分濃度を示す。塩分に関する透過係数 B は式(4)によって定義されている^[2]。

$$B = \frac{1-R}{R} J_w \quad \dots (4)$$

R [-] は塩分阻止率と呼ばれ、膜の塩分の透過しにくさを表す。

これらの理論式に基づいて図7の結果を得た。本結果より、供給する淡水流量が少ない程、塩分濃度の上昇量が大きくなる。したがって、淡水側の濃度上昇に関しては、塩分の漏洩による影響が強く出ていると言える。

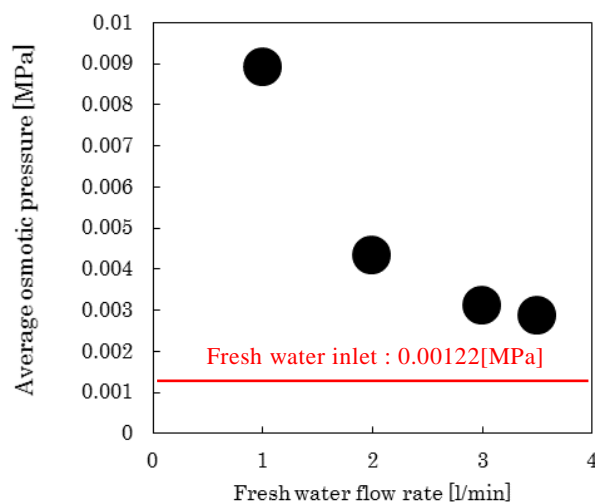


Fig.6 Permeation flow rate of experimental value

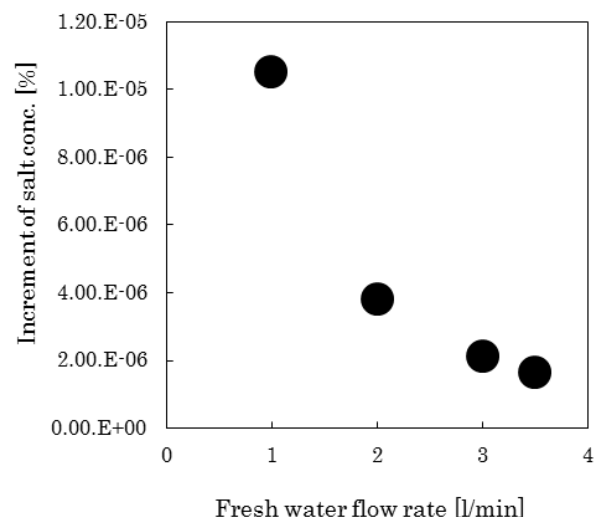


Fig.7 Increment of salt concentration by salt leakage

3-3 濃度分極の影響

本節では、濃度分極が浸透流量低下へ及ぼす影響を明らかとする。その際、濃度分極により膜面近傍の塩分濃度がどのように変化するか、その変化により透水量はどの程度となるのかを計算する理論を用いるが、その理論を以降で紹介する。

M.Elimelech らは、膜の内部と外部における濃度分極、つまり内部濃度分極と外部濃度分極に分けて濃度分極理論を提案した^[6]。はじめに内部濃度分極の理論について説明する。内部濃度分極とは、膜の支持層域において淡水中の溶質が停滞し濃度差が小さくなる現象であり、活性層が塩水に接液している場合 (AL-DS) と、活性層が淡水に接液している場合で現象が異なるため、濃度分極が浸透流量の低下へ及ぼす影響を表す式が変わる。AL-DS における浸透流束を表す式を式(5)に、AL-FS における浸透流束を表す式を式(6)に示す。

$$\text{AL-DS orientation : } J_w = \frac{1}{K} \ln \frac{B - J_w + A\pi_{d,m}}{B + A\pi_{f,m}} \quad \dots (5)$$

$$\text{AL - FS orientation : } J_w = \frac{1}{K} \ln \frac{B + A\pi_{d,m}}{B + J_w + A\pi_{f,m}} \quad \dots (6)$$

ここで $K[\text{s/m}]$ は支持層における拡散抵抗, $B[\text{m/s}]$ は塩に関する透過係数, $\pi_{d,m}[\text{Pa}]$ は膜面における塩水側の浸透圧, $\pi_{f,m}[\text{Pa}]$ は膜面における淡水側の浸透圧を表す. 拡散抵抗 K は, 膜内部での溶質の拡散の生じ易さを表し, 式(7)で定義されている.

$$K = \frac{S}{D} = \frac{\tau t}{D\varepsilon} \quad \dots (7)$$

ここで $D[\text{m}^2/\text{s}]$ は拡散係数, $S[\text{m}]$ は構造パラメータである. 構造パラメータ S は, 膜の空隙率 $\varepsilon[-]$, 膜構造の複雑さを表す屈曲率 $\tau[-]$, 膜の厚さ $t[\text{m}]$ で表される.

外部濃度分極とは, 膜の表面近傍において, 浸透してきた水分, あるいは水分が浸透する際に透過を遮られた溶質の影響により, 濃度差が小さくなる現象を指す. 外部濃度分極による影響を受けた場合の膜面の浸透圧を, バルク溶液の浸透圧から計算する外部濃度分極率を式(8), (9)に示す.

$$\frac{\pi_{f,m}}{\pi_{f,b}} = \exp\left(\frac{J_w}{k_d}\right) \quad \dots (8)$$

$$\frac{\pi_{d,m}}{\pi_{d,b}} = \exp\left(-\frac{J_w}{k_d}\right) \quad \dots (9)$$

式中の $k_d[\text{m/s}]$ とは, 物質移動係数であり, シャーウッド数 $Sh[-]$, 拡散係数 $D[\text{m}^2/\text{s}]$, 水力直径 $d_h[\text{m}]$ を用いて式(10)で定義されている.

$$k_d = \frac{Sh \times D}{d_h} \quad \dots (10)$$

ここで, シャーウッド数 Sh は, 作動流体が層流状態であるか乱流状態であるかによって計算式が異なっており, それぞれ式(11)および(12)で定義されている.

$$\text{Laminar flow : } Sh = 1.85 \left(Re \cdot Sc \cdot \frac{d_h}{L} \right)^{0.33} \quad \dots (11)$$

$$\text{Turbulence flow : } Sh = 0.04 Re^{0.75} \cdot Sc^{0.33} \quad \dots (12)$$

本研究における淡水のレイノルズ数は 10 程度であるため, 層流状態を想定し, 式(11)によってシャーウッド数 Sh を計算した.

更に, 式(8)-(11)より, 淡水側の外部濃度分極率は淡水のレイノルズ数に逆比例していることになるため, 淡水のレイノルズ数が大きい場合, 淡水側の外部濃度分極は緩和されるということがわかる.

これらの理論に基づき, まず, 膜面上での塩水側浸透圧と淡水側浸透圧を式(8), (9)の外部濃度分極率を用いて計算した. それぞれの計算結果をバルクでの浸

透圧と併せて図 8, 9 に示した. 図 8 より, 淡水側に関しては, 僅かではあるものの, 淡水流量が少ない場合において, 淡水側膜面近傍 (黄の凡例) の浸透圧が淡水側バルク (緑の凡例) の浸透圧より大きい値をとることがわかる. また, 図 9 より, 塩水側に関しては, 淡水側と同様に, 膜面上とバルクでの浸透圧の差は, 供給する淡水流量が多い場合において, その差は比較的小さくなっていることがわかる. したがって, 濃度分極に関しては, 淡水流量に対する影響は僅かであるが, 供給する淡水流量が多い程, 濃度分極が浸透流速の低下に及ぼす影響は低減されていると言える.

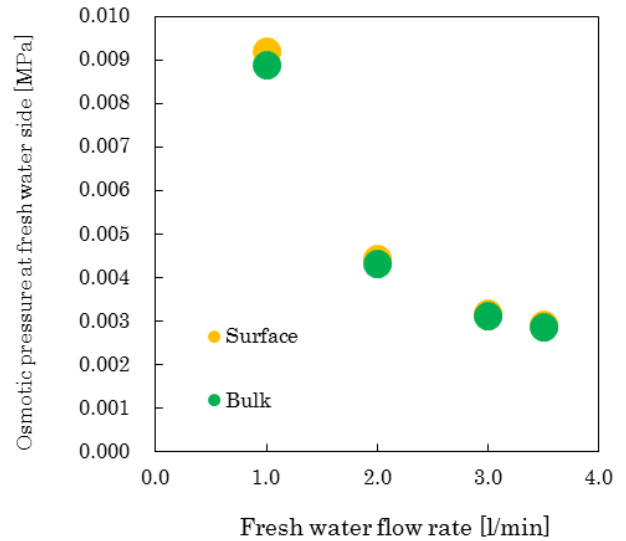


Fig.8 Osmotic pressure of fresh water on bulk and membrane surface

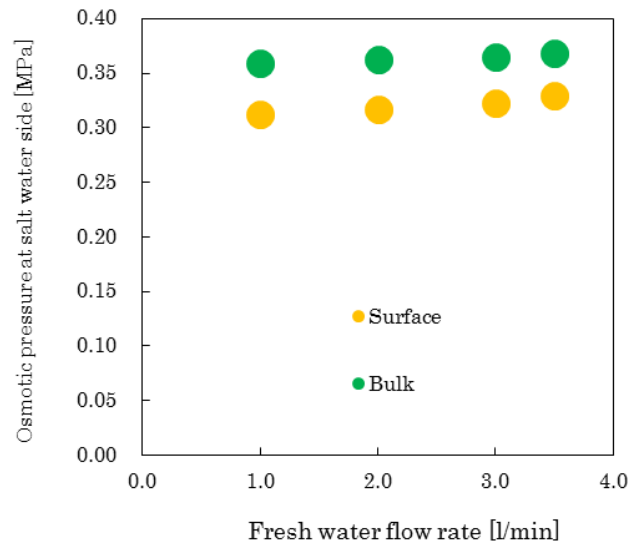


Fig.9 Osmotic pressure of salt water on bulk and membrane surface

3-4. 中空糸内の淡水の有無による影響

最後に, 淡水の有無による浸透流量低下への影響を明らかにする. ここでの計算結果を示すために理論式を利用しているが, 中空糸膜における浸透をモデル化

し、中空糸内部における圧力分布や流量分布を計算する理論を導出した。それらの理論を以降に記しておく。

中空糸内における淡水の圧力と流量の関係を導出するにあたって、下図のように中空糸膜における浸透をモデル化した。

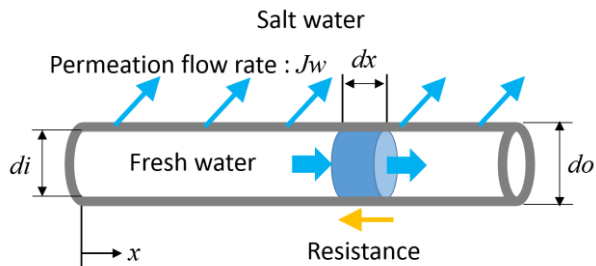


Fig.10 Flow model of fresh water in hollow fiber

図 10 中に示してあるとおり、微小な中空糸長さ dx に関して、淡水流量の変化率 dq/dx と浸透流量 J_w の関係式(13)を導くことができる。

$$\frac{dq}{dx} = -J_w \pi d_i l \quad \dots (13)$$

d_i [m]は中空糸の内径、 q [m³/s]は中空糸内の淡水流量を表す。中空糸内部の圧力勾配 dP/dx に関しては、壁面における浸透流量が、中空糸内の流れに比べて非常に少なく、浸透が損失に及ぼす影響を無視できるとして、Darcy-Weisbach の式を利用し式(14)を得る。

$$\frac{dP}{dx} = \frac{128\nu\rho}{\pi d_i^4} q \quad \dots (14)$$

ν [m²/s]は動粘度、 ρ [kg/m³]は密度を示している。これらの式において、中空糸入口 $x=0$ における圧力と流量を P_0, q_0 とすると、中空糸内の圧力分布、及び淡水流量の分布を表す式が式(15)、(16)のように得られる。

$$P = P_0 + \sqrt{\frac{128\nu\rho}{A\pi^2 d_i^5}} \left\{ 1 - \exp\left(\sqrt{\frac{128\nu\rho A}{d_i^3}} x\right) \right\} q_0 \quad \dots (15)$$

$$q = q_0 \exp\left(\sqrt{\frac{128\nu\rho A}{d_i^3}} x\right) - A\pi d_i \left\{ P_0 + (\Delta\pi - P_s) + \sqrt{\frac{128\nu\rho}{A\pi^2 d_i^5}} q_0 \right\} x \quad \dots (16)$$

式(1)ではなく、上式(15)、(16)を用いて浸透流量を計算することにより、中空糸内において淡水が中空糸全長の途中で消失することで浸透流量が低下する場合を考慮することができる。なお、本計算に用いる浸透圧差 $\Delta\pi$ と中空糸全長であるが、膜モジュールの半径方向に浸透圧差と中空糸全長が変化することを考慮した。この計算により得られた、各半径位置における浸透流量の減少量を図 11 に示す。これから、浸透流量の減少量は、淡水流量が少ない場合、今回の場合では淡

水流量が 3.0[l/min]未満の場合のみが存在し、淡水流量が 3[l/min]を上回ると淡水は中空糸の全長にわたって存在している結果となった。また、半径方向外向きに行くにつれ浸透流量の低下量、つまり本来あるべき浸透流量が増大しているが、これは半径方向外向きに行くにつれて中空糸本数が増大しているためである。

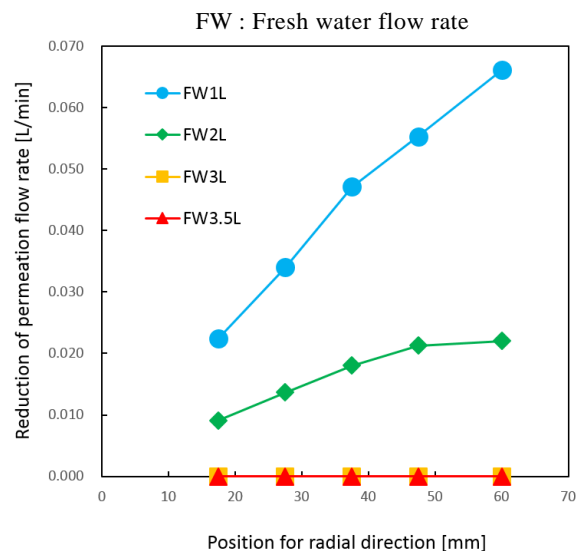


Fig.11 Reduction of permeation flow rate

3-5 各影響因子の比較

以上4つの原因に関して、浸透流量の低下に及ぼす影響を定量的に評価した。これらの影響をまとめると図 12 のようになる。これより、供給する淡水流量によって、浸透流量の低下に及ぼす影響の支配的因子が変わっていることが見てとれる。本実験の場合、供給する淡水流量が 3[l/min]未満である場合、中空糸内の淡水の有無と濃度分極が浸透流量低下へ大きな影響を及ぼし、淡水流量が 3[l/min]以上となる場合については、淡水側浸透圧の上昇、つまり淡水の濃縮と塩分の漏洩が浸透流量低下へ比較的大きな影響を及ぼしていることになる。

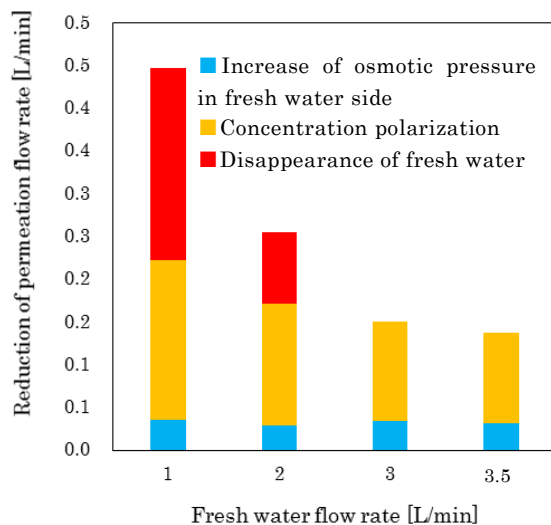


Fig.12 Reduction of permeation flow rate for every effect

4. 結言

淡水流量を変化させた場合の中空糸膜モジュールの性能実験、及び中空糸内の圧力分布と淡水流量分布を表す理論より、以下の結論が得られた。

- (1) 供給する淡水流量が多い場合、浸透流量低下の主たる原因は、淡水の濃縮と塩分の漏洩である。
- (2) 淡水流量が少ない場合、浸透流量低下に主たる原因は、淡水の有無と濃度分極である。
- (3) 上記(1)(2)の結論より、最適な淡水流量は存在する。

参考文献

- [1] C.E.Reid and E.J.Breton, Water and Ion Flow Across Cellulosic Membrane, Journal of Applied Polymer Science, vol.1 issue no.2(1959), p.133-143.
- [2] 協和機電工業株式会社ホームページ, 福岡海水淡水 化 紹 介 < <http://www.kyowa-kk.co.jp/product/mizu/kaitan.html> >. (参照 高圧 RO 設備)
- [3] 松井公一, 海水淡水化プラントの造水コスト低減技術, 東芝レビュー特集, Vol. 67 No. 5 (2012), p. 20-23.
- [4] K.L.Lee, W.R.BAKER, H.K.LONSDALE, "MEMBRANE FOR POWER GENERATION BY PRESSURE RETARDED OSMOSIS", Journal of Membrane Science, 8, p.141-171 (1981)
- [5] Sidney Loeb, Leonid Titelman, Emmanuel Korngold, Joseph Freian, "Effect of porous support fabric on osmosis through a Loeb-Sourirajan type asymmetric membrane", Journal of Membrane Science, 129, p.243-249 (1997)
- [6] J.R. McCutcheon, M. Elimelech, "Influence of concentrative and dilutive internal concentration polarization on flux behavior in forward osmosis", Journal of Membrane science, 284, p.237-247
- [7] M. F. Gruber, C. J. Johnson, C. Y. Tang, M. H. Jensen, L. Yde, C. Helix-Nielsen, "Computational fluid dynamics simulations of flow and concentration polarization in forward osmosis membrane systems"
- [8] J.Fernandez-Sempere, F.Ruiz-Bevia, P.Garcia-Algado, R.Salcedo-Diaz, "Experimental study of concentration polarization in a crossflow reverse osmosis system using Digital Holographic Interferometry"
- [9] 酒井雄介, "濃縮海水と下水二次処理水を用いた濃度差発電の効率的な前処理法の検討"
- [10] E.Sivertsen, T.Holt, W.Therin, G.Brekke, "Modeling mass transport in hollow fiber membrane used for pressure retarded osmosis", Journal of Membrane Sci., 417-418(2012),69-79