

9212 深海静圧頭を利用する逆浸透法海水淡水化に関する研究

助成研究者:宮武 修(九州大学 工学部)

共同研究者:野田 英彦(九州大学)

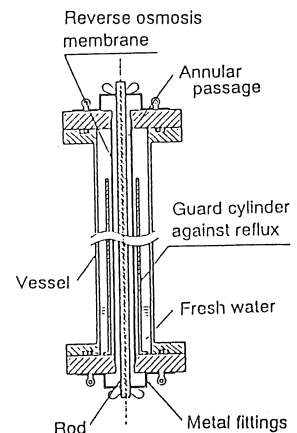
:高木 修一(九州大学)

1. 研究目的 管型逆浸透膜を設置した容器を海面下500~700mに沈めれば、海水の静圧頭が加わり、電力を要すること無く、逆浸透膜を通して淡水を得ることができると考えられる。この際、淡水を放出した濃縮海水は、濃度差による自然対流によって排出される。膜面に生ずる濃度分極を低減させ、取得淡水量を増大させるには、自然対流量を増大させることが有効である。

本研究では第一段階として、自然対流量を増大させるために、管型逆浸透膜の中心軸に丸棒を挿入し、その間隙に形成される環状流路を、非透過性の一様濃度壁と固体壁の平行平板で近似して、自然対流量および自然対流物質移動を数値解析することにした。この近似は必ずしも現実的ではないが、自然対流熱伝達とアナロジーが成立する系においてまず数値解析し、数値解析手法の妥当性を検証し、より現実的な条件を与えた場合の数値解析に対処するために行ったものである。

2. 数値解析結果 流路長さおよび流路幅を変え、自然対流量および流路各位置での物質移動を数値解析した。流路長さ長くなった場合の自然対流量および物質移動、ならびに流路入口近傍での物質移動の数値解析結果は、アナロジー関係にある自然対流熱伝達の解析解に漸近し、本数値解析法の妥当性が検証された。また、自然対流量は流路長さが長くなるにつれて増大すること、所定の流路長さのもとでは自然対流量が最大となる流路幅が存在すること、物質移動が促進される流路長さや流路幅が存在すること、などが分かった。これらの結果は、適切な丸棒の設置により濃度分極を低減できる可能性があることを示唆している。

3. 今後の計画 数値解析法の妥当性が検証されたので、この数値解法に基づき、逆浸透膜を淡水が透過する場合について、流路長さ方向に増大する膜面濃度を考慮した数値解析を行う。また、装置の膜に長さ1.0m、内径11.5mmの管型逆浸透膜を用いて製作した実器(図参照)を海水中に沈めて、取得淡水量を測定し、数値解析結果と比較検討する。



9212 深海静圧頭を利用する逆浸透法海水淡水化に関する研究

助成研究者:宮武 修(九州大学 工学部)

共同研究者:野田 英彦(九州大学)

:高木 修一(九州大学)

1. 緒言

逆浸透法による海水淡水化は、逆浸透膜の性能向上と共に、実施比率が急速に伸び、すでに多数の大規模な造水プラントが稼働中である。一般に海水は塩分濃度が 3.5kg/m^3 であるので、淡水との浸透圧は 2.8MPa である。逆浸透法で海水を淡水化するためには、海水を浸透圧以上の $5\sim 7\text{MPa}$ に加圧する必要がある、取得淡水 1m^3 当たり $7\sim 8\text{kWh}$ の電力を消費している。

そこで、管型の逆浸透膜を設置した容器を海面下 $500\sim 700\text{m}$ に沈めれば、海水の静圧頭が加わり、電力を要すること無く、逆浸透膜を通して淡水を得ることができると予想される。この際、淡水を放出した濃縮海水は、濃度差による自然対流によって排出され、新しい海水と自然に置換されることになる。

この装置を、海水淡水化装置を設置していない小型漁船、ヨットあるいは救命ボートに常備することによって、電力無しに飲料水を自給できるため、海難事故等に対処することができる。また、将来の海底工場や潜水艇に設置・搭載することによって、海中で飲料水や補給水を得ることもできる。

逆浸透法により海水を淡水化する場合、海水中の水が逆浸透膜を透過するため、海水側の溶質の濃度が膜表面近傍で高くなる現象、いわゆる濃度分極現象が発生する。この現象により、膜表面の海水の浸透圧が上昇して、逆浸透のための有効圧が低下するため、膜を透過する淡水の量が減少する。

定常状態での膜面の濃度は、全体流に伴って膜面に向かう溶質の移動量と、濃度勾配によって拡散する溶質の移動量が、膜面において平衡する状態で定まる。したがって、取得淡水量を増加させるためには、膜面での濃度上昇と濃度境界層の厚みを減少させること、すなわち海水の流量を増大させることが重要である。

本研究は、深海静圧頭を利用する逆浸透法による海水淡水化装置の開発を目的とした基礎研究として、濃度差に基づく自然対流を増大させるために、管型の逆浸透膜の中心軸に丸棒を挿入し、流路幅を狭めた場合について、逆浸透膜と丸棒との間に形成される環状流路を非透過性の一様濃度壁と固体壁の平行平板で近似し、濃度差に基づく自然対流物質移動を広範囲なシュミット数 ($Sc=1\sim 10^3$) について数値解析した。なお、この近似は必ずしも現実的ではないが、温度差による自然対流熱伝達とアナロジーが成立する系において

まず数値解析し、数値解析手法の妥当性を検証し、より現実的な条件を与えた場合の数値解析に対処するために行ったものである。

記号

b : 流路幅

c : 濃度

C : 無次元濃度

D : 拡散係数

g : 重力加速度

Gr : グラスホフ数

k : 物質移動係数

l : 流路長さ

L : 無次元流路長さ

p : 圧力

p_0 : 圧力 (周囲流体圧力基準)

P : 無次元圧力 (周囲流体圧力基準)

Q : 無次元流量

u : x 方向流速

\bar{u} : x 方向平均流速

U : X 方向無次元流速

v : y 方向流速

V : Y 方向無次元流速

Sc : シュミット数

Sh : シャーウッド数

x : 垂直方向座標

X : 垂直方向無次元座標

y : 水平方向座標

Y : 水平方向無次元座標

ζ : 濃度変化による膨張係数

ρ : 密度

ν : 動粘度

添え字

0 : 周囲流体

loc : 局所

m : 平均

w : 壁面

2. 基礎方程式

解析する系および座標系をFig. 1に示す。濃度 c_0 の無限流体の中に、逆浸透膜および挿入した丸棒の面を想定した長さ l の2枚の平行平板が、距離 b を隔てて垂直に設置されている。逆浸透膜表面の濃度は x 方向に変化するが、本解析では一様濃度 c_w と仮定した。運動方程式における浮力の項を除き、流体の密度は一定とみなし、同一レベルにおける平板間流体の圧力 p と周囲流体の圧力 p_0 との圧力差 p_0 および濃度変化

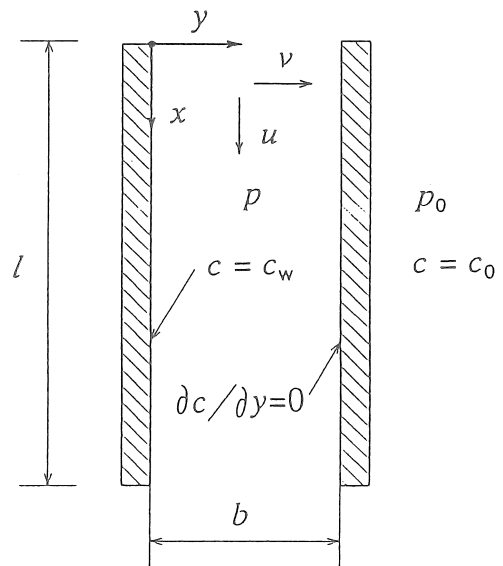


Fig.1 Analytical system and coordinates

による膨張係数 ζ を, それぞれ,

$$p_d = p - p_0 \quad (1)$$

$$\zeta = (\rho - \rho_0) / \{ \rho_0 (c - c_0) \} \quad (2)$$

で定義すると, 連続の式, 運動方程式, 拡散方程式はそれぞれ次式で表される.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{d p_d}{d x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \zeta g (c - c_0) \quad (4)$$

$$u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = D \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \quad (5)$$

流路入口では, 流体が一様速度分布で流入する仮定すると, 境界条件は,

$$x=0, \quad 0 < y < b \quad ; \quad u = \bar{u}, \quad v=0, \quad c=c_0 \quad (6)$$

$$y=0, \quad x \geq 0 \quad ; \quad u=0, \quad v=0, \quad c=c_w \quad (7)$$

$$y=b, \quad x \geq 0 \quad ; \quad u=0, \quad v=0, \quad \partial c / \partial y = 0 \quad (8)$$

$$x=0 \quad ; \quad p_d = -(1/2) \rho \bar{u}^2 \quad (9)$$

$$x=l \quad ; \quad p_d = 0 \quad (10)$$

以上の式を無次元化するために, 次式で定義される無次元量を導入する.

$$U = \frac{b u}{\nu Gr} \quad (11) \quad V = \frac{b v}{\nu} \quad (12)$$

$$X = \frac{x}{b Gr} \quad (13) \quad Y = \frac{y}{b} \quad (14)$$

$$P = \frac{p_d b^2}{\rho \nu^2 Gr^2} \quad (15) \quad C = \frac{c - c_0}{c_w - c_0} \quad (16)$$

$$Gr = \frac{g \zeta (c_w - c_0) b^3}{\nu^2} \quad (17) \quad Sc = \frac{\nu}{D} \quad (18)$$

これらの無次元量を用いてEqs. (3)~(5)を無次元化すると, それぞれ次式が得られる.

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (19)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{dP}{dX} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} + C \quad (20)$$

$$U \frac{\partial C}{\partial X} + V \frac{\partial C}{\partial Y} = \frac{1}{Sc} \frac{\partial^2 C}{\partial Y^2} \quad (21)$$

また, 境界条件Eqs. (6)~(10)も同様に無次元化すると, それぞれ次式が得られる.

$$X=0, \quad 0 < Y < 1 \quad ; \quad U=Q, \quad V=0, \quad C=0 \quad (22)$$

$$Y=0, \quad X \geq 0 \quad ; \quad U=0, \quad V=0, \quad C=1 \quad (23)$$

$$Y=1, \quad X \geq 0 \quad ; \quad U=0, \quad V=0, \quad \partial C / \partial Y=0 \quad (24)$$

$$X=0 \quad ; \quad P=-Q^2/2 \quad (25)$$

$$X=L \quad ; \quad P=0 \quad (26)$$

ここで、 Q は無次元流量、 L は無次元平板長さであり、それぞれ次式で定義される。

$$L = \frac{l}{b Gr} \quad (27)$$

$$Q = \frac{b \bar{u}}{\nu Gr} = \int_0^1 U \, dY \quad (28)$$

これら L と Q は互いに独立したものではなく、任意のシュミット数 Sc について L が与えられれば必然的に Q が定まり、逆に Q が与えられれば L が定まるという従属の関係にある。本解析では、無次元基礎方程式 Eqs. (19)～(21) を差分化し、 Sc および Q を $Sc=1 \sim 10^3$ 、 $Q=0.005 \sim 0.08$ の広範囲に与え、Eqs. (22)～(25) の境界条件のもとで、流路出口の境界条件 Eq. (26) を満足するまで、前進的に X 方向へ計算を行った。

3. 計算結果および考察

3. 1. 無次元速度分布および無次元濃度分布

無次元速度 U 、無次元濃度 C の X 方向各位置における分布を、シュミット数 $Sc=10$ 、無次元流量 $Q=0.005, 0.08$ の場合について、Fig. 2 に示す。実線は速度分布を、破線は濃度分布を示している。 Q が小さい場合 ($Q=0.005$)、対応する無次元流路長さ L は短く、速度分布のピークは高濃度面に寄っており、出口近傍 ($X/L=0.99$) でも高濃度面から溶質の拡散が十分行われていない。一方、 Q が大きい場合 ($Q=0.08$)、対応する L は長く、速度分布は流路のほぼ全域で放物線状に発達しており、溶質は十分拡散され、出口近傍では一様濃度となっている。

3. 2. 無次元流量

流路内で誘起される自然対流の無次元流量 Q を、シュミット数 $Sc=1, 10, 10^3$ の場合について、Fig. 3 に示す。 Sc が10以上の場合、 Q と Sc/L の関係はほとんど違いは見られず、 L が長くなるにつれて Q は増大している。また、 L が長くなると一様濃度になり、速度分布は、

$$U = \frac{1}{2} Y(1-Y) \quad (L \rightarrow \infty) \quad (29)$$

で表される放物線状となる。したがって、Eq. (28) の関係から、 L が長くなるにつれて、 $Q=1/12$ に漸近する。

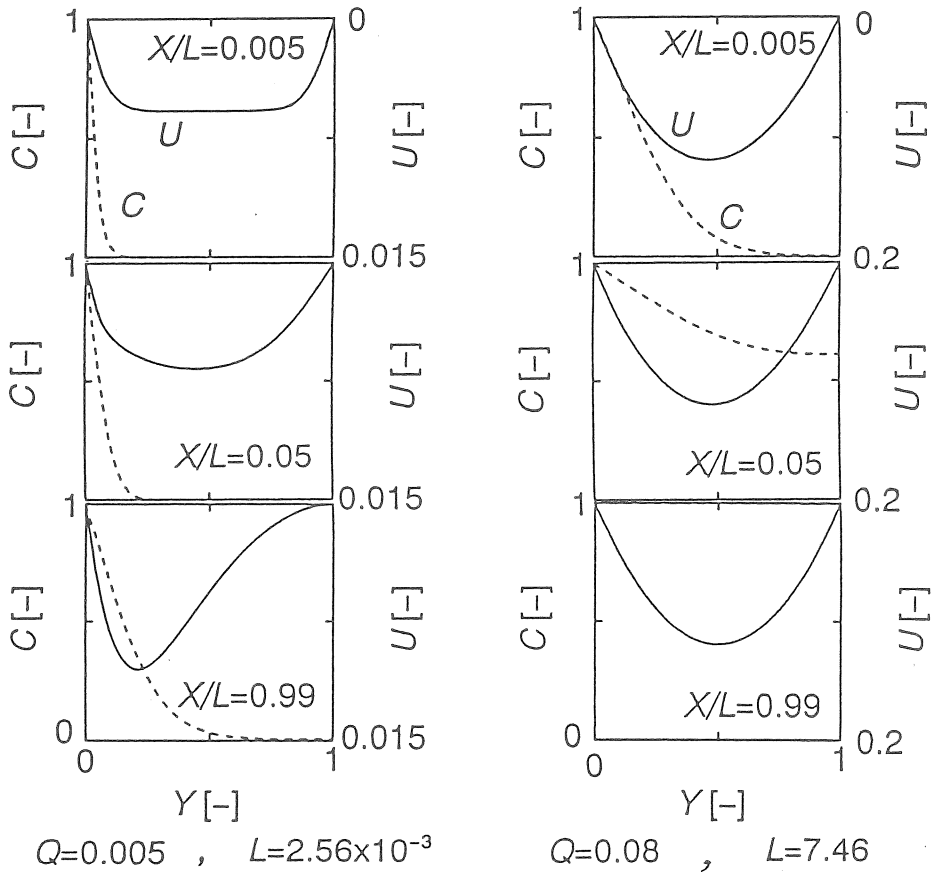


Fig.2 Dimensionless velocity and dimensionless concentration profiles ($Sc=10$)

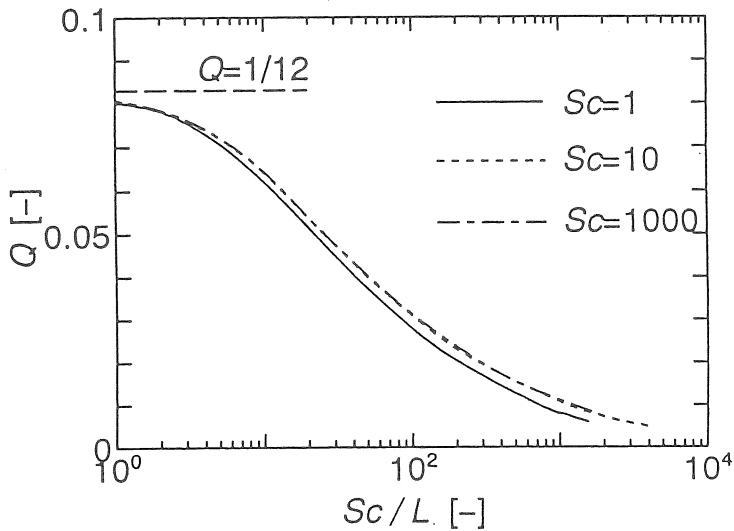


Fig.3 Dimensionless flow rate

3. 3. 局所シャーウッド数

負の浮力の駆動力となる濃度差として、高濃度面と周囲流体との濃度差 ($c_w - c_0$) を採ると、局所物質移動係数 k_{loc} は、

$$k_{loc} = -\frac{D}{c_w - c_0} \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right)_w \quad (30)$$

で表されるので、この k_{loc} 、流路幅 b および拡散係数 D を用いて定義される局所シャーウッド数 Sh_{loc} は、無次元濃度勾配から次式で与えられる。

$$Sh_{loc} = \frac{k_{loc} b}{D} = - \left(\frac{\partial C}{\partial Y} \right)_w \quad (31)$$

局所シャーウッド数 Sh_{loc} を $Sc=10$, $Q=0.008, 0.04, 0.08$ の場合について、Fig. 4 に示す。図中の●は $X=L$ ($P=0$) となる流路出口を示している。 Sh_{loc} は流路入口付近で最も大きく、 X が大きくなり下流に行くにつれて小さくなり、流路出口で最小となっている。このことは、濃度勾配が入口で最大となり、流下するにつれて拡散が進み、濃度勾配が小さくなることに起因している。

破線は流体中に置かれた温度一様の単一平板の強制対流熱伝達における局所ヌセルト数の解析解¹⁾を変形した式、

$$Sh_{loc} = 0.332 Q^{1/2} Sc^{-1/6} (Sc/X)^{1/2} \quad (32)$$

を表しており、 $X \rightarrow 0$ の場合に本解析系で適用できる式である。 Sh_{loc} は X が小さいところで上式に漸近しており、本数値解法の妥当性が検証されている。

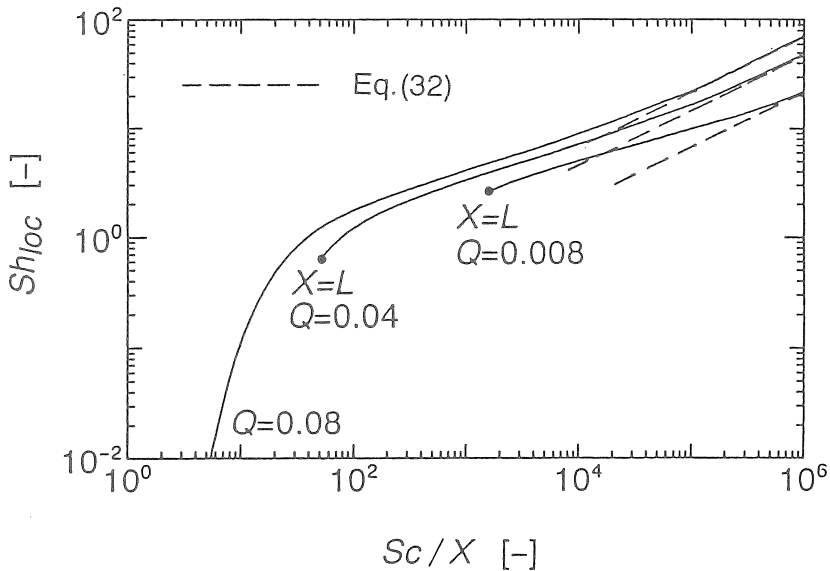


Fig.4 Local Sherwood number ($Sc=10$)

3. 4. 平均シャーウッド数

平均物質移動係数を k_m とすると、溶質の質量収支から、

$$k_m l (c_w - c_0) = \left\{ \int_0^b u (c - c_0) dy \right\}_{x=l} \quad (33)$$

が得られ、平均シャーウッド数 Sh_m は次式で与えられる。

$$Sh_m = \frac{k_m b}{D} = \frac{b}{l (c_w - c_0) D} \left\{ \int_0^b u (c - c_0) dy \right\}_{x=l} \quad (34)$$

上式を無次元化すると、次式が得られる。

$$Sh_m = \frac{Sc}{L} \left\{ \int_0^1 UC dY \right\}_{X=L} \quad (35)$$

平均シャーウッド数 Sh_m を、 $Sc = 1, 10, 10^3$ の場合について、Fig. 5 に示す。 L が長くなると、 $C=1$ の一様濃度となり、速度分布はEq. (29) で表される放物線状となるので、Eq. (35) の関係から、 Sh_m は次式に漸近する。

$$Sh_m = (1/12) (Sc/L) \quad (36)$$

Fig. 5 から、 L が長くなるにつれて、 Sh_m は確かにEq. (36) に漸近していることが分かる。

また、図中には一様温度の単一垂直平板の自然対流熱伝達に対する平均ヌセルト数の解析解²⁾を変形した式、

$$Sh_m = 0.638 \{ Sc / (0.861 + Sc) \}^{1/4} (Sc/L)^{1/4} \quad (37)$$

を、 $Sc = 10$ の場合について参考のために示した。

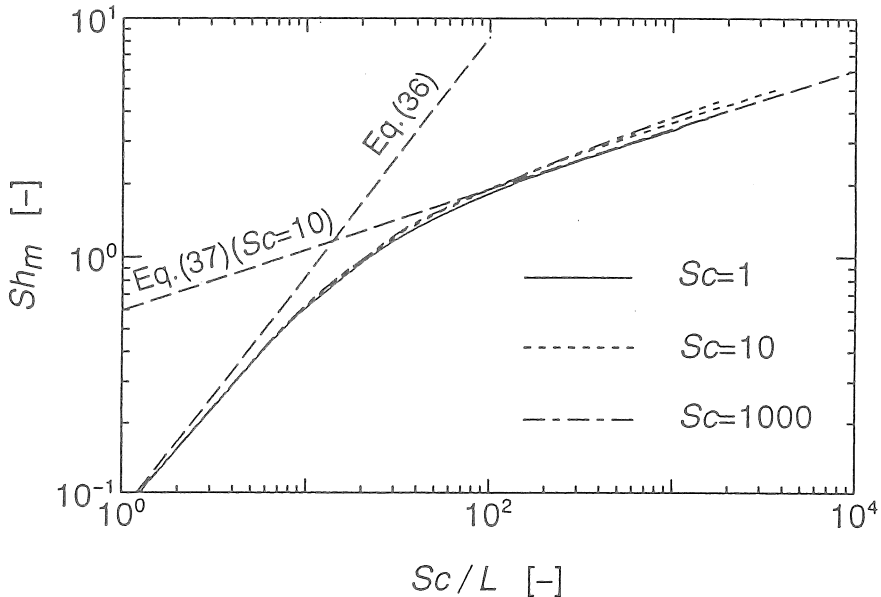


Fig.5 Mean Sherwood number

平行平板間の Sc_m は, Sc/L がおよそ200以上で, 単一垂直平板のそれを上回っている。したがって, この範囲では, 管型の逆浸透膜の中心軸に丸棒を設置し, 流路幅を狭くすることにより, 膜面に発生する濃度分極を低減することができると考えられる。

3. 5. 流量に及ぼす流路幅の影響

逆浸透膜表面の濃度は x 方向に大きくなり, 逆浸透の有効圧力 (静水圧と膜面の浸透圧の差圧) が0となる最大濃度に近づく。海面下600m (温度9°C, 塩分濃度34.6 kg/m³)³⁾ の海水中では, 静水圧6.1MPaに対して海水の淡水との浸透圧は2.8MPaであり, 最大有効圧力の値は3.3MPaである。本解析では, 逆浸透膜表面の濃度を一定と仮定して計算を行った。そこで膜表面の濃度を有効圧力が最大有効圧力の1/2となる浸透圧 (4.4MPa) に対応する濃度 (55.2 kg/m³) で一定として, 長さ1mの流路に誘起される平均流速 \bar{u} および流量 G に及ぼす流路幅の影響を求めた結果をFig. 6に示す。流速および流量は流路幅がそれぞれ1.1mm, 1.9mmで最大値を示しており, 最適流路幅が存在することが分かる。

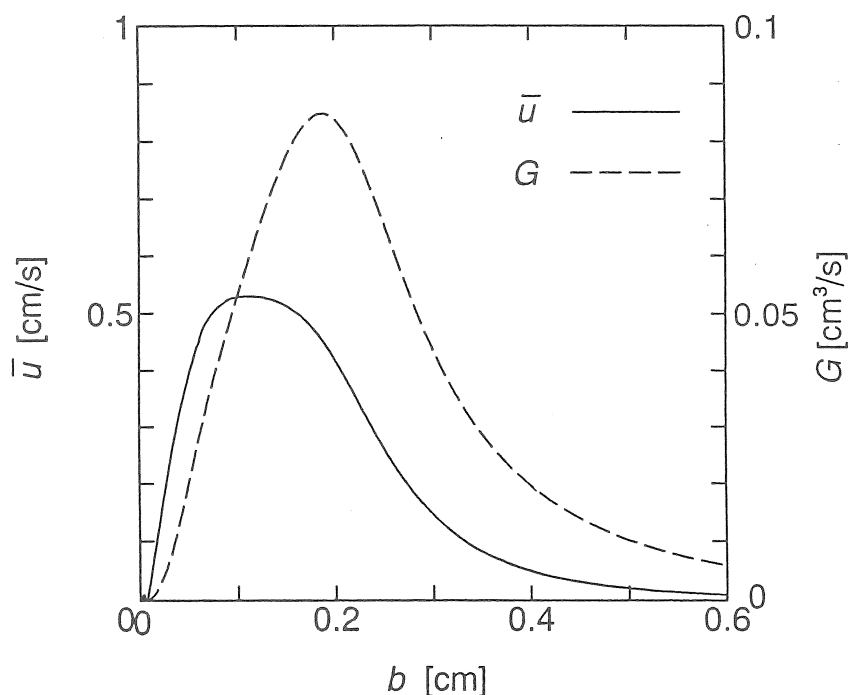


Fig.6 Effects of distance between plates on mean velocity and flow rate
($l=1\text{ m}$, $c_w-c_0=20.6\text{ kg/m}^3$)

4. 結言

深海静圧頭を利用する逆浸透法海水淡水化装置の開発のための基礎研究として、管型の逆浸透膜の中心軸に挿入した丸棒との間に形成される環状流路を、非透過性の一様濃度壁と固体壁の平行平板で近似し、濃度差に基づく誘起自然対流量および自然対流物質移動について数値解析を行った。その結果以下のことが判明した。

- ・無次元流量 Q は無次元平板長さ L が増大し、 L が十分長くなると $Q=1/12$ に漸近する。
- ・流路入口の局所シャーウッド数 Sh_{loc} は、流体中に置かれた温度一様の単一平板での強制対流熱伝達における局所ヌセルト数の解析解を変形して得られる Sh_{loc} に漸近し、本数値解析法の妥当性が検証された。
- ・誘起される流量は流路幅に大きく影響されるので、丸棒の設置により、物質移動が促進され、濃度分極を低減できる可能性がある。

今後の計画

数値解析法の妥当性が検証されたので、この数値解析法に基づき、今後は逆浸透膜を淡水が透過する場合について、流路長さ方向に増大する膜面濃度を考慮した数値解析を行う。また、装置の膜に長さ1m、内径11.5mmの日東電工製の管型逆浸透膜NTR1595型を用いて製作した実器（Fig. 7）を海水中に沈めて、取得淡水量を測定し、数値解析結果と比較する。

文献

- 1) 日本機械学会編，伝熱工学資料改訂第2版，p. 18，日本機械学会（1966）
- 2) 甲藤好郎，伝熱概論，p. 76，養賢堂（1975）
- 3) 乾栄一・他5名，OTEC，Vol. 3，p. 1（1990）

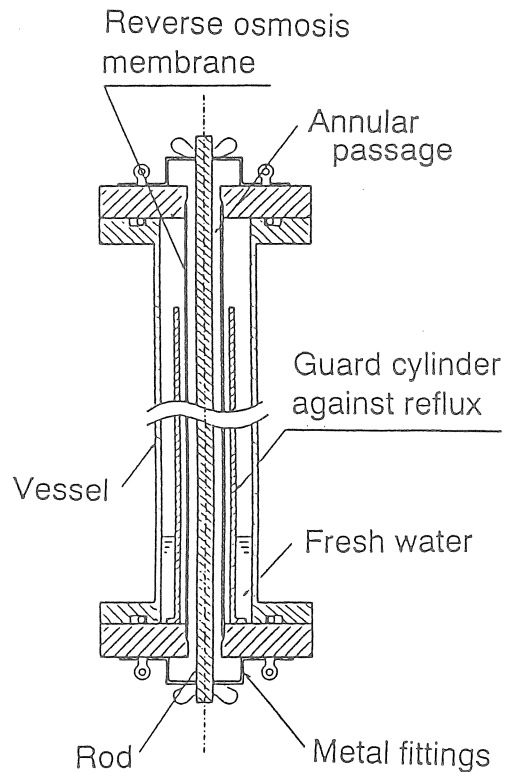


Fig.7 Desalination device

No. 92 / 2

Desalination of Seawater Using the Reverse Osmosis Method
by Utilizing the Static Pressure due to the Depth of the Sea

Osamu Miyatake, Hidehiko Noda
(Dept. of Chem. Eng., Faculty of Eng., Kyushu Univ.)
and Shuichi Takaki
(Div. of Eng., Graduate school, Kyushu Univ.)

Summary

When a device containing the reverse osmosis membrane tubes, as shown in the figure, is put into the sea at a depth of 500-700 meters from the sea surface, it may be possible to get fresh water from seawater through the reverse osmosis membrane by utilizing the high static pressure at that depth. The concentrated seawater flows out from the membrane tubes by natural convection caused by concentration difference.

In order to increase the quantity of fresh water obtainable from seawater, it is necessary to increase the flow rate in the membrane tubes and thereby to decrease the concentration polarization which appears on the membrane surface. For this purpose, a cylindrical rod is put into the central axis of each membrane tube. In this research, a numerical analysis is conducted to clarify the characteristics of the natural convection occurring in the narrow annular passage between the membrane tube and the rod. As the first step, it is assumed that the narrow annular passage is the passage formed between two parallel plates, and concentration of the membrane surface is uniform.

The numerical results show that the flow rate increases with increasing tube length, and there exists the optimum clearance and length of the passage at which flow rate becomes maximum and mass transfer is accelerated. Therefore, the concentration polarization may be reduced by the selection of the appropriate clearance and length of the passage.

The above mentioned results are based on the assumption of constant concentration on the membrane surface. In future, numerical analysis will be performed with the variable concentration on the membrane surface.

