

## 9418 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 工学部)

高木 修一 (九州大学 工学部)

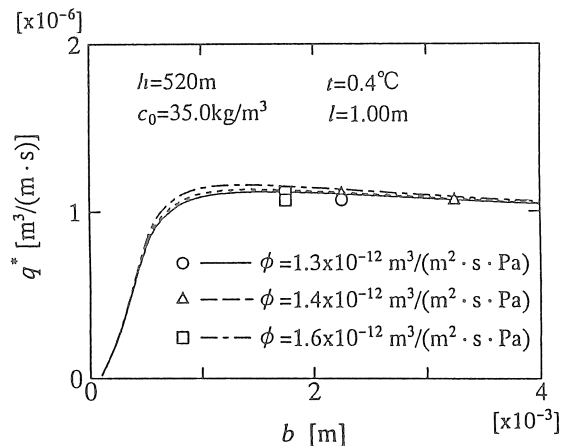
田川公太郎 (九州大学 工学部)

1. 研究目的 両端が解放状態の管型逆浸透膜を垂直に設置した圧力容器を海面下500~700mの海中に懸垂すると、静圧が海水の浸透圧を十分上回り、逆浸透膜を通して海水から淡水を得ることができる。淡水を放出した濃縮状態の海水は、周囲海水との濃度差に基づく自然対流によって、管下端から管外へ排出され、新しい海水と自然に置換される。本研究は、海難事故時の飲料水自給、海底工場の工業用水供給、等に適用可能な深海静圧頭利用逆浸透法海水淡水化装置の開発を目的としている。

2. 研究方法 管型逆浸透膜の中心軸に丸棒を挿入し、間隙の狭い環状の流路を形成させれば、流路内に誘起される自然対流量が増大し、膜面の濃度上昇、すなわち濃度分極が抑制されることから、逆浸透膜を透過する淡水透過流量が増大すると考えられる。そこで、この間隙の狭い環状の流路を逆浸透膜面と非透過性平面の平行平面間流路で近似し、流路内の速度分布および濃度分布を数値解析し、淡水透過流量に及ぼす流路形状、懸垂深さ、透過係数および海水物性、等の影響について検討する。また、管型逆浸透膜を設置した海水淡水化試験装置を海面下に懸垂して淡水取得の実証実験を行い、数値解析結果の妥当性を検証する。

3. 研究結果 流路内の海水の速度分布および濃度分布の数値解析結果を整理して、流路形状、懸垂深さ、透過係数および海水物性、等から、淡水透過流量を容易に推算できる理論式を導いた。

膜面単位幅当たりの淡水透過流量  $q^*$  に及ぼす流路幅  $b$  の影響を右図に示す( $h$ : 懸垂深さ,  $c_0$ : 周囲海水濃度,  $t$ : 温度,  $l$ : 流路長さ,  $\phi$ : 透過係数)。図中



Transmitted fresh water flow rate per unit breadth of the membrane

の線は理論式からの算出値を、記号は実験値を表している。いずれの  $\phi$  の場合でも、 $q^*$  の解析値は、 $b$  が狭くなるにつれ流動抵抗が増大するにもかかわらず増加し、約1~2mmで最大値を示したのち、減少している。実験値は理論値と良好に一致しており、理論式から淡水透過流量が妥当に予測できること、装置の最適設計が可能であることが分かった。



## 9418 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 工学部）

高木 修一（九州大学 工学部）

田川公太郎（九州大学 工学部）

## 1. 研究目的

上・下端が解放状態の管型逆浸透膜を垂直に設置した圧力容器を、海面下500～600mの海中に懸垂すると、静圧が海水の浸透圧を十分上回り、海水中の水が逆浸透膜を透過し、淡水が得られる。淡水を放出した濃縮状態の海水は、周囲海水との濃度差に基づく自然対流によって、管下端から管外へ排出され、管上端から流入する新しい海水と自然に置換される。したがって、電力を要することなく海水から淡水を得ることができる。

この容器をヨット、小型船舶あるいは救命ボートに装備すれば、海難事故時でも飲料水を自給できる。また、将来の海底工場<sup>1)</sup>や潜水艇に設置・搭載すれば、海中で工業用水や補給水を得ることができる。さらに、この容器を多数搭載した装置を海面下500～600mに設置し、膜を透過した淡水のみを揚水すれば、1m<sup>3</sup>を600m揚水するのに必要な電力は高々3～4kWhであり、従来の陸上用逆浸透法海水淡水化装置で必要な電力7～8kWhの50%程度の電力で淡水を取得できるので、省エネルギー型海水淡水化装置となる可能性もある。深層水から逆浸透法によって製造された水は、おいしい水の水質基準を全て満たしており、健康水としての性質も持っているとの報告<sup>2)</sup>もあり、本装置で製造される水は付加価値が高いと考えられる。

透過淡水量を増加させるためには、流路内に誘起される自然対流による循環流量を増大させ、膜面に発生する濃度上昇、すなわち濃度分極現象に起因する淡水透過駆動圧力の低下を抑制することが重要である。この循環流量の増大は、逆浸透膜を設置した管の中心軸に丸棒を挿入し、逆浸透膜面と非透過性面で構成される環状流路を形成させ、その流路幅を最適値に調節することにより達成できると考えられる。

本研究は、逆浸透膜面と非透過性面の平行平面間流路に近似できる幅の狭い環状流路内の海水の速度分布および濃度分布を数値解析し、淡水透過流量を求め、淡水透過流量に及ぼす流路形状、懸垂深さ、透過係数および海水物性、等の影響を検討し、最適流路形状を求めるとともに、実際に管型逆浸透膜を設置した海水淡水化装置を海面下500～600mに懸垂して淡水取得の実証実験を行い、淡水透過流量の実験結果と解析結果を比較して、数値解析結果の妥当性を明らかにすることを目的としている。

## 記号

$A_n$ : 膜特性係数	$[m^3/(m^2 \cdot s \cdot Pa)]$	$V$ : $y$ 方向無次元流速	$[-]$
$b$ : 流路幅	$[m]$	$v$ : $y$ 方向流速	$[m/s]$
$C$ : 無次元濃度	$[-]$	$v^*$ : 淡水透過流速 (膜面積基準)	$[m/s]$
$c$ : 濃度	$[kg/m^3]$	$w$ : 透過淡水量	$[kg]$
$D$ : 拡散係数	$[m^2/s]$	$X$ : 垂直方向無次元座標	$[-]$
$d$ : 丸棒直径	$[m]$	$x$ : 垂直方向座標	$[m]$
$g$ : 重力加速度	$[m/s^2]$	$Y$ : 水平方向無次元座標	$[-]$
$h$ : 懸垂深さ	$[m]$	$y$ : 水平方向座標	$[m]$
$L$ : 無次元流路長さ	$[-]$	$\Gamma$ : 無次元体膨張係数	$[-]$
$l$ : 流路長さ	$[m]$	$\gamma$ : 体膨張係数	$[m^3/kg]$
$P$ : 無次元圧力 (周囲海水圧力基準)	$[-]$	$\Delta p$ : 淡水透過駆動圧力	$[Pa]$
$p$ : 圧力	$[Pa]$	$\nu$ : 海水動粘度	$[m^2/s]$
$p_d$ : 圧力 (周囲海水圧力基準)	$[Pa]$	$\Pi_0$ : 無次元周囲海水浸透圧	$[-]$
$p_v$ : 淡水容器内圧力	$[Pa]$	$\pi$ : 浸透圧	$[Pa]$
$Q$ : 流路入口での無次元誘起流量	$[-]$	$\rho$ : 海水密度	$[kg/m^3]$
$Q^*$ : 無次元淡水透過流量	$[-]$	$\rho^*$ : 淡水密度	$[kg/m^3]$
$Q^+$ : 流路出口での無次元誘起流量	$[-]$	$\tau$ : 時間	$[s]$
$q^*$ : 膜面単位幅当たりの 淡水透過流量	$[m^3/(m \cdot s)]$	$\Phi$ : 無次元透過係数	$[-]$
$Sc$ : シュミット数	$[-]$	$\phi$ : 透過係数	$[m^3/(m^2 \cdot s \cdot Pa)]$
$t$ : 温度	$[^{\circ}C]$		
$U$ : $x$ 方向無次元流速	$[-]$	添え字	
$u$ : $x$ 方向流速	$[m/s]$	$max$ : 最大	
$u_m$ : 流路入口での $x$ 方向平均流速	$[m/s]$	$w$ : 逆浸透膜面	
		$0$ : 周囲海水	

## 2. 数値解析

### 2.1. 基礎方程式および境界条件

管型逆浸透膜面と丸棒との間に形成される環状流路の間隙は十分狭いとし、流路を逆浸透膜面と非透過性面の平行平面間流路で近似し、流路内の海水の速度分布および濃度分布を数値解析した。

解析系および座標系をFig. 1に示す。濃度  $c_0$  の海水の中に、長さ  $l$  の2枚の平行平面が距離  $b$  を隔てて垂直に設置されている。平行平面の片方を淡水のみを透過する逆浸透膜面、他方を非透過性面とする。

浮力の項に関する海水密度以外の物性値を一定と仮定すると、連続の式、運動方程式、

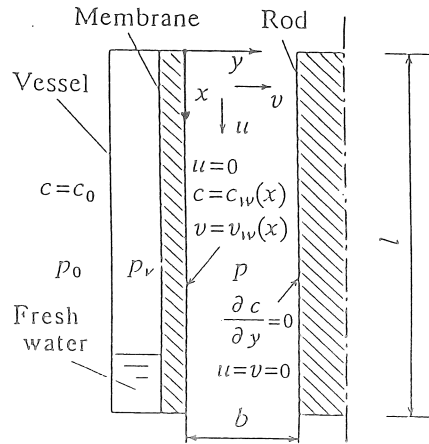


Fig.1 Analytical system and coordinates

拡散方程式は、それぞれ次式で表される。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp_d}{dx} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \gamma g(c - c_0) \quad (2)$$

$$u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = D \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \quad (3)$$

ここで、 $u$  は  $x$  方向流速、 $v$  は  $y$  方向流速、 $\rho$  は海水密度、 $p_d$  は平行平面間の海水圧力  $p$  と周囲海水圧力  $p_0$  との同一レベルにおける圧力差 ( $p - p_0$ )、 $\nu$  は海水動粘度、 $\gamma$  は濃度変化における体膨張係数、 $g$  は重力加速度、 $D$  は拡散係数である。

流路入口において、濃度  $c_0$  の周囲海水が一律流速  $u_m$  で流入すると仮定すると、流路入口から垂直方向距離  $x$  までの領域における巨視的物質収支式として、次式が与えられる。

$$u_m b = \int_0^x (-v_w) dx + \int_0^b u dy \quad (4)$$

ここで、 $v_w (\leq 0)$  は膜面における  $y$  方向流速である。

静圧から動圧への圧力変化を考慮すると、流路入口での境界条件は、

$$x=0, 0 < y < b ; u = u_m, v = 0, c = c_0 \quad (5)$$

$$x=0 ; p_d = -(\rho u_m^2) / 2 \quad (6)$$

逆浸透膜面における濃度  $c_w$  は、全体流に伴って膜面に近づく溶質 (塩分) 量と、拡散によって膜面から遠ざかる溶質量が平衡に達する状態で定まる。このことより、膜面に

ける境界条件は次式で与えられる。

$$y=0, x \geq 0 \quad ; \quad u=0, v=v_w, \quad c_w v_w = D \left( \frac{\partial c}{\partial y} \right) \quad (7)$$

膜面における  $y$  方向流速  $v_w$  は、淡水透過流速  $v^*$  に淡水密度と膜面での海水密度の比 ( $\rho^*/\rho_w$ ) を乗じることによって、次式で与えられる。

$$v_w = -v^* \left( \frac{\rho^*}{\rho_w} \right) = -\phi \Delta p \left( \frac{\rho^*}{\rho_w} \right) \quad ; \quad \Delta p = p - p_v - \pi_w \quad (8)$$

ここで、 $\phi$  は淡水が膜を透過する際の透過係数、 $p_v$  は淡水容器内圧力、 $\pi_w$  は膜面濃度に対応する浸透圧である。

膜面と対向する非透過性面における境界条件は次式で与えられる。

$$y=b, x \geq 0 \quad ; \quad u=0, v=0, \quad \frac{\partial c}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

流路出口では、流路内海水と周囲海水の圧力が等しくなるので、次式が成立する。

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

膜面における  $y$  方向流速  $v_w$  は海水に対するものなので、淡水透過流速は  $v_w$  に膜面での海水と淡水の密度比 ( $\rho_w/\rho^*$ ) を乗じることによって与えられる。したがって、長さ  $l$  の流路全域における膜面単位幅当たりの淡水透過流量  $q^*$  は次式で与えられる。

$$q^* = \int_0^l (-v_w) (\rho_w / \rho^*) dx \quad (11)$$

以上の式を無次元化するために、無次元量群、

$$U = \frac{b u}{\nu \Gamma} \quad (12)$$

$$V = \frac{b v}{\nu} \quad (13)$$

$$X = \frac{x}{b \Gamma} \quad (14)$$

$$Y = \frac{y}{b} \quad (15)$$

$$P = \frac{p_d b^2}{\rho \nu^2 \Gamma^2} \quad (16)$$

$$C = \frac{c}{c_0} \quad (17)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (18)$$

$$\Gamma = \frac{b^3 \gamma g c_0}{\nu^2} \quad (19)$$

$$\Phi = \frac{b \phi (p_0 - p_v)}{\nu} \quad (20)$$

$$\Pi_0 = \frac{\pi_0}{\rho g h} \quad (21)$$

$$Q = \frac{b u_m}{\nu \Gamma} \quad (22)$$

$$L = \frac{l}{b \Gamma} \quad (23)$$

$$Q^* = \frac{q^*}{\nu \Gamma} \quad (24)$$

を導入し、基礎方程式Eqs. (1)~(3)および巨視的物質収支式Eq. (4)を無次元化すると、

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (25)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{dP}{dX} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} + (C-1) \quad (26)$$

$$U \frac{\partial C}{\partial X} + V \frac{\partial C}{\partial Y} = \frac{1}{Sc} \frac{\partial^2 C}{\partial Y^2} \quad (27)$$

$$Q = \int_0^X (-V_w) dX + \int_0^1 U dY \quad (28)$$

さらに境界条件Eqs. (5)~(10)および淡水透過流量Eq. (11)を無次元化すると、

$$X=0, 0 < Y < 1 \quad ; \quad U=Q, V=0, C=1 \quad (29)$$

$$X=0 \quad ; \quad P = -Q^2/2 \quad (30)$$

$$Y=0, X \geq 0 \quad ; \quad U=0, V=V_w, C_w V_w = \frac{1}{Sc} \left( \frac{\partial C}{\partial Y} \right) \quad (31)$$

$$V_w = -\Phi(1 - \Pi_0 C_w)(\rho^*/\rho_w) \quad (32)$$

$$Y=1, X \geq 0 \quad ; \quad U=0, V=0, \frac{\partial C}{\partial Y} = 0 \quad (33)$$

$$X=L \quad ; \quad P=0 \quad (34)$$

$$Q^* = \int_0^L (-V_w)(\rho_w/\rho^*) dX \quad (35)$$

## 2.2. 数値解析方法

流路入口での無次元誘起流量  $Q$  と無次元流路長さ  $L$  は、 $Q$  が与えられれば流路出口での境界条件Eq. (34)から必然的に  $L$  が定まり、逆に  $L$  が与えられれば対応する  $Q$  が定まる従属的關係にある。

そこで、本解析ではこれらの無次元基礎方程式Eqs. (25)~(28)を差分化し、流路入口における無次元誘起流量  $Q$  の値を与え、境界条件Eqs. (29)~(33)のもとで、流路出口での境界条件Eq. (34)を満足するまで、陰解法を用いて前進的に計算を行い、各レベルにおいて無次元速度分布、無次元濃度分布および  $Y$  方向無次元膜面流速  $V_w$  を求め、Eq. (35)から無次元淡水透過流量  $Q^*$  を算出した。

計算は、海面下500~600mの海水物性値の実測値(温度  $t=0\sim 10^\circ\text{C}$ 、濃度  $c_0=35.0\sim 35.2 \text{ g/m}^3$ )を考慮して、無次元周囲海水浸透圧  $\Pi_0=0.4\sim 0.6$ 、シュミット数  $Sc=1000\sim 3000$ 、無次元透過係数  $\Phi=0.001\sim 0.01$ の範囲で行った。

### 2.3. 数値解析結果

$\Pi_0 = 0.5$ ,  $Sc = 2000$ の海中に, 無次元透過係数  $\Phi = 0.01$ の逆浸透膜を設置した装置を懸垂し, 流路入口に無次元誘起流量  $Q = 7 \times 10^{-2}$  (無次元流路長さ  $L = 1.02 \times 10^2$ に対応) の自然対流が誘起される場合に, 無次元濃度  $C$ の水平方向分布が垂直方向に変化していく様子をFig. 2に示す. 淡水が逆浸透膜を透過する際に膜面に溶質が残留し蓄積されるため, 下流域に行くにつれ膜面濃度は上昇し, 濃度境界層が流路全域へ広がっている.

無次元膜面濃度  $C_w$ および  $Y$ 方向無次元膜面流速  $V_w$ と  $X$ の関係を, 無次元透過係数  $\Phi$ が  $1 \times 10^{-3}$ ,  $1 \times 10^{-2}$ の場合についてFig. 3に示す. 図中の●印は流路内の圧力が周囲海水の圧力と等しくなる流路出口( $X=L$ )での値であり, 無次元最大膜面濃度  $C_{w,max}$ は, Eq. (32)の  $V_w$ が0となる濃度である.  $\Phi$ が大きい場合, 流路入口に近い領域で  $-V_w$ が大きい値となるので, 全体流に伴って膜面に運ばれる溶質量が多く,  $C_w$ の上昇率が大きくなる. したがって,  $C_w$ は短い距離  $X$ で  $C_{w,max} = 1/\Pi_0$ に近づき, それに伴い淡水透過駆動圧力は小さくなるので,  $-V_w$ が0に近づいている.

無次元淡水透過流量  $Q^*$ と  $Sc/L$ の関係を,  $\Pi_0$ が0.4, 0.5の場合についてFig. 4に示す.  $\Pi_0$ が小さい(懸垂深さ  $h$ が深い)場合, 淡水透過駆動圧力が大きいので  $Q^*$ は大きい値となっている.  $\Pi_0$ が同じでも,  $\Phi$ が大きい場合には, 淡水透過流速が増大するため当然

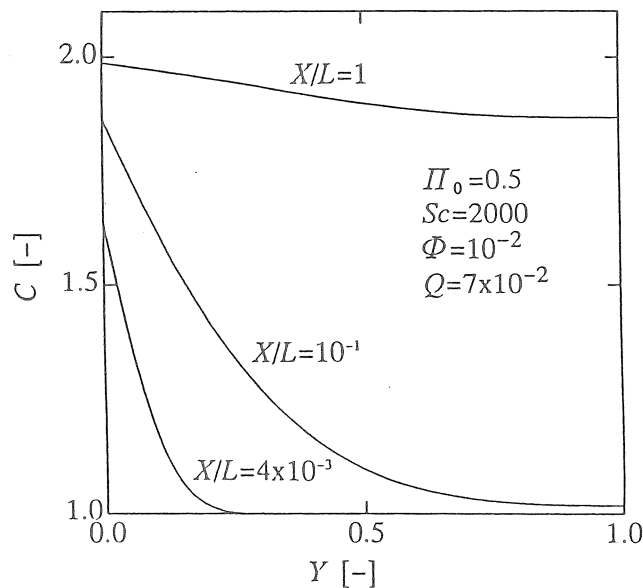


Fig.2 Dimensionless concentration profiles



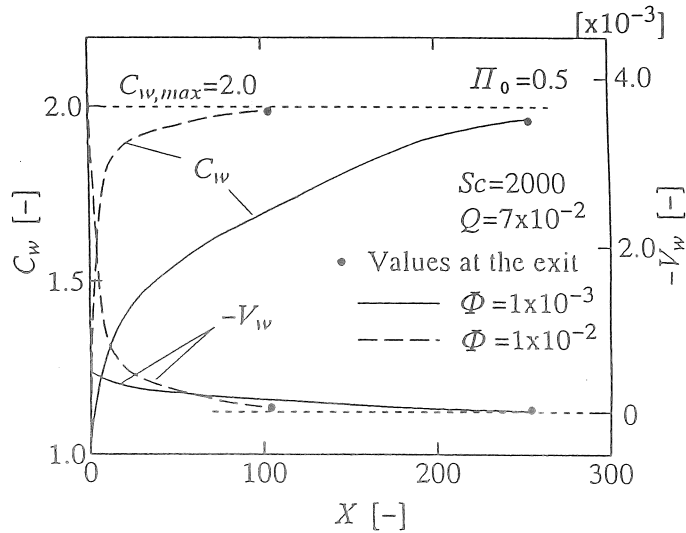


Fig.3 Dimensionless concentration and dimensionless velocity at the membrane wall

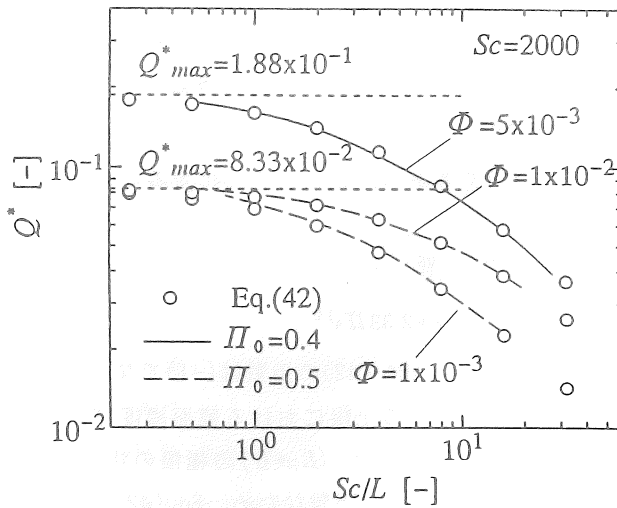


Fig.4 Dimensionless amount of transmitted fresh water

のことながら  $Q^*$  は大きい値を示している。また、 $L$  が長くなり  $Sc/L$  が小さくなるにつれて、 $Q^*$  は増加し、無次元最大淡水透過流量  $Q^*_{max}$  (後掲Eq.(40)) に漸近している。

$L$  が長くなり  $\infty$  となる極限では、流路のほぼ全域で  $C=C_{w,max}$  となり、流路下流域では粘性力と周囲海水との濃度差による逆浮力が釣り合った一様濃度流れとなる。この場合、運動方程式Eq.(26)は、

$$0 = \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} + (C_{w,max} - 1) \quad (36)$$

と簡略化され、逆浸透膜面および非透過性面での境界条件Eqs. (31), (33)を用いてEq. (36)を解くことにより得られる  $U$  を、さらに  $Y=0 \sim 1$  の範囲で積分することによって、流路出口での無次元最大誘起流量  $Q_{max}^+$  は次式で与えられる。

$$Q_{max}^+ = (1/12) \{ (1/\Pi_0) - 1 \} \quad (37)$$

流路入口に流入する海水の溶質量と流路下流域の一樣濃度海水の溶質量は等しいので、流路入口での無次元最大誘起流量  $Q_{max}$  は、

$$Q_{max} = (C_{w,max}/C_0) Q_{max}^+ \quad (38)$$

また、淡水も含めた質量保存の条件から、

$$Q_{max}^* = Q_{max} - Q_{max}^+ \quad (39)$$

$C_0=1$ ,  $C_{w,max}=1/\Pi_0$ , Eqs. (37), (38)をEq. (39)に代入することにより、 $Q_{max}^*$  は次式で与えられる。

$$Q_{max}^* = (1/12) \{ (1/\Pi_0) - 1 \}^2 \quad (40)$$

一方、 $L$  が短くなり0となる極限では、膜面の濃度上昇は無くなり、 $C_w=C_0=1$  となるので、この関係およびEqs. (32), (35)より、 $Q^*$  は次式に漸近する。

$$Q^* = \Phi (1 - \Pi_0) Sc (Sc/L)^{-1} \quad (41)$$

これらの漸近式Eqs. (40), (41)を考慮し、数値解を式化することにより、 $Q^*$  を表す次式の理論式が導出される。

$$Q^* = Q_{max}^* \{ 1 + \alpha Q_{max}^* (Sc/L) \}^{-4/5} \quad (42)$$

$$\alpha = 2.05 / \{ \Phi (1 - \Pi_0) Sc \} + 2.33 \Pi_0^{1.2}$$

ここで、Eq. (41)を満足するためには、Eq. (42)の指数は(-1)でなければならないが、数値解析の上限は  $Sc/L = 20 \sim 30$  であり、この上限における膜面濃度は最低でも周囲海水より30~40%上昇していることから、 $Sc/L \rightarrow \infty$  ( $L \rightarrow 0$ )の極限の状態には近づいておらず、Eq. (41)の漸近線をそのまま適応することが困難なため、Eq. (42)の指数を(-4/5)とした。

Fig. 4中の○印は理論式Eq. (42)で算出される  $Q^*$  の推算値を示している。数値解析値と推算値は±5%以内の範囲で一致しており、理論式Eq. (42)を用いることにより、任意の  $L$ ,  $\Pi_0$ ,  $Sc$ ,  $\Phi$  に対して無次元淡水透過流量  $Q^*$  を予測することが可能となった。

### 3. 洋上実験

#### 3.1. 実験装置

洋上で行った淡水取得の実証実験に用いた海水淡水化装置をFig. 5に示す。逆浸透膜に

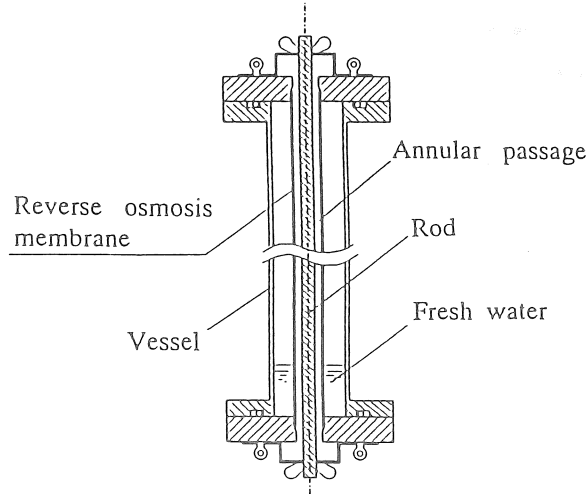


Fig.5 Desalination device

は、長さ1m、内径11.5mmの日東電工製管型逆浸透膜 NTR1595 を用いた。膜の中心軸には直径 $d=5.0, 7.0, 8.0$ mmのステンレス製丸棒を設置し、膜と丸棒との間に狭い環状流路を形成させた。

通常、逆浸透膜の有効膜厚さは不均一であるので、透過係数 $\phi$ は各膜によって異なる。実証実験に用いた各管型逆浸透膜の $\phi$ を、濃度 $c=0\sim 4.5$ wt%のNaCl水溶液を用いて、逆浸透膜の溶液側と透過淡水側の圧力差 $3\sim 5$ MPa、温度 $10\sim 30^\circ\text{C}$ の範囲で測定した。その際、管型膜の管内流路に、水溶液を濃度分極の影響が無視できる $Re > 10000$ の流量で流し、膜面濃度を $c_w=c$ と見なした。

測定結果から、 $\phi$ は圧力差に依存しないことが分かり、溶液の温度 $t$ と膜面濃度 $c_w$ の関数として次式で整理できた。

$$\phi = A_n \exp(0.0247t - 0.0843c_w) \quad (43)$$

ここで、 $A_n$ は各膜の膜特性係数であり $1.38 \times 10^{12} \sim 2.28 \times 10^{12} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ であった。

### 3.2. 実験方法

水産大学校の練習船“耕洋丸”を用い、日本海 $36^\circ 51' \text{N}$ ,  $135^\circ 13' \text{E}$ 、深さ1780mの洋上で、淡水取得の実証実験を行った。実験は、海水淡水化装置を蒸留水で十分洗浄し、流路幅を設定し、海中の濃度、温度、深度を計測する装置とともに海面下 $h=520$ mに1m/sの速度で下降させ、所定時間(600~2400s)その深さに懸垂したのち、船上へ1m/sの速度で上昇させ、装置の淡水容器内に蓄積された総透過淡水量および透過淡水濃度を計測した。

### 3.3. 数値解析結果と実験結果の比較

装置を海面下  $h=520\text{m}$  に懸垂して得た透過淡水量  $w$  と懸垂時間  $\tau$  の関係を Fig. 6 に示す。 $w$  は、逆浸透膜面濃度を海水濃度として算出した装置昇降時に得失する淡水量を、淡水容器内に蓄積された総透過淡水量から減じた値である。また、縦軸は膜の特性の影響を軽減するため  $w$  を膜特性係数  $A_n$  で割った値を示している。

懸垂時間  $\tau$  が長くなるにつれて  $w$  は増加しており、深海静圧頭を利用して海水淡水化が行われることを示している。また、 $\tau > 1200\text{s}$  の領域では、 $w$  の実験値は直線的に増加しており、自然対流が定常状態に達していることが分かる。

装置懸垂開始初期には、装置下降時に流入した新しい海水が流路内に満ちており、膜面に発生する濃度分極が発達していない。したがって、 $\tau$  が短い領域での淡水透過流量は、自然対流が定常状態に達した際に得られる淡水透過流量よりかなり大きい流量になると推察できる。懸垂開始初期の非定常状態の影響による透過淡水量の増分は、 $\tau$  が長い領域の実験値を最小二乗した図中の破線の縦軸切片で評価することができる。

懸垂開始初期の影響を考慮した定常状態における、膜面単位幅当たりの淡水透過流量  $q^*$  の実験値と解析値の対応を Fig. 7 に示す。実験値は解析値と良好に一致している。

また、いずれの透過係数  $\phi$  の場合でも、 $q^*$  の解析値は流路幅  $b$  が狭くなるにつれて、流動抵抗が増大するにもかかわらず増加し、約  $1\sim 2\text{mm}$  で最大値を示したのち減少することを示している。このことは、流路幅に最適値が存在することを示している。

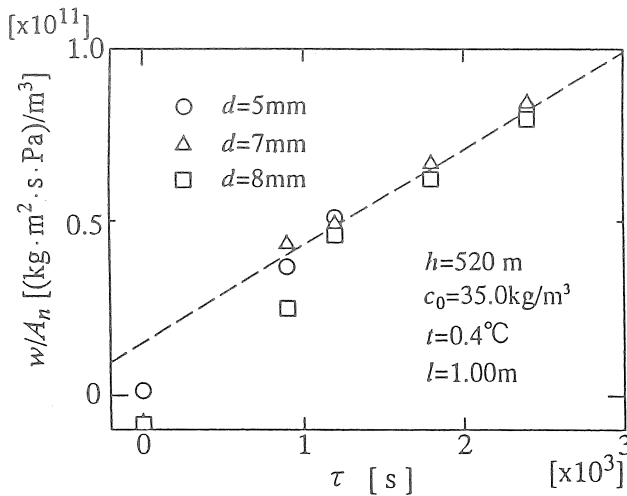


Fig.6 Variation of the amount of transmitted fresh water

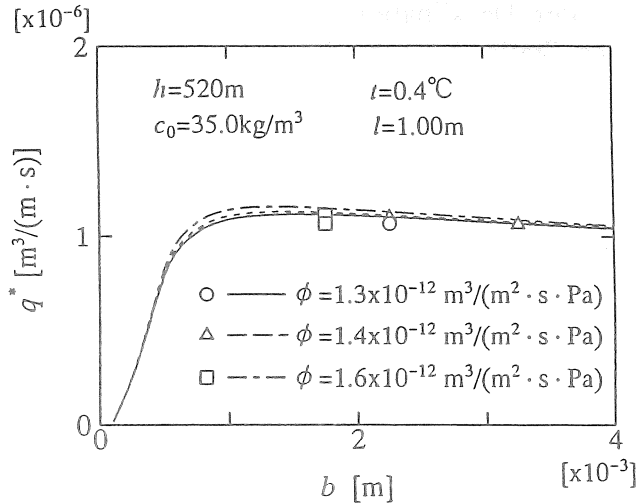


Fig.7 Transmitted fresh water flow rate per unit breadth of the membrane

#### 4. 結論および今後の課題

深海静圧頭利用逆浸透法海水淡水化装置を開発するための基礎研究として、管型逆浸透膜の中心軸に丸棒を設置した場合の、流路内海水の速度分布および濃度分布を数値解析し、逆浸透膜を透過する淡水透過流量を流路形状、懸垂深さ、透過係数、海水物性、等から容易に推算できる理論式を提出した。さらに、日本海洋上で淡水取得の実証実験を行い、得られた淡水透過流量の実験値が解析値と良好に一致することを明かにし、理論式から淡水透過流量が妥当に予測できることを示した。また、理論式は、淡水透過流量を最大にする流路幅が存在することを示しており、装置の形状を最適設計することが可能となった。

今後は、装置体積当たりの取水面積が広く、塩分除去率が高いスパイラル型逆浸透膜を設置した装置を海中に懸垂した場合について、流路内の速度分布および濃度分布を解析し、洋上にて淡水取得の実証実験を行い、淡水透過量を予測する手法を求める。

**謝辞：**本研究を遂行するにあたり、逆浸透膜および海水淡水化装置を提供下さった日東電工(株)の安達哲朗博士に謝意を表します。洋上実験にご協力下さった水産大学校の中岡勉助教授ならびに練習船“耕洋丸”の乾栄一船長他乗組員一同に謝意を表します。

**文献：**1)瀬川爾朗:KAIYOU MONTHLY, Vol. 23-7, p. 349-352(1991)

2)山口光明:日本海水学会誌, Vol. 49-2, p. 109-108(1995)

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

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

### Summary

Employment of the reverse osmosis technique by utilizing the high static pressure of deep sea has been considered for the development of a desalination device to be used to obtain fresh water from seawater without the use of electrical power. A tube type membrane has been used as the reverse osmosis membrane in the device. The concentrated seawater flows through the tube by natural convection caused by concentration difference. The quantity of fresh water obtainable from seawater can be increased with the increase of the flow rate through the membrane tube. For this purpose, a cylindrical rod was put into the central axis of the membrane tube.

A numerical analysis was conducted to determine the flow profile and the concentration profile in laminar flow in the narrow annular passage between the membrane tube and the rod. A forward-marching, implicit method with iteration was used to solve the nonlinear partial-differential equations.

A theoretical equation is deduced from the results of the numerical calculation to predict the transmitted fresh water flow rate from the width of the annular flow passage, depth of the device from the sea level, permeability of the membrane and the properties of seawater. The transmitted fresh water flow rate increases with the decrease of the width of the annular passage and subsequently becomes maximum at the width of about 1 mm, and then decreases rapidly.

Experimental studies on the desalination of seawater was performed using this device in the Japan Sea. It has been proved that fresh water can be obtained from seawater utilizing the static pressure due to the depth of the sea. And the experimental data shows good agreement with those calculated from the theoretical equation. Utilizing the theoretical equation, it is possible to make optimum design of a desalination device.