

## 9313 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)

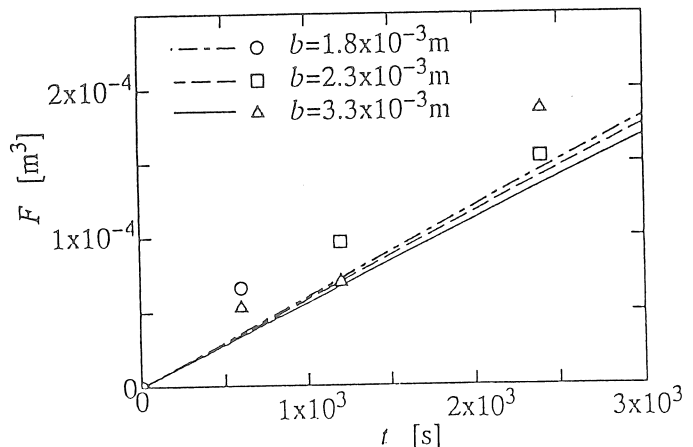
1. 研究目的 上・下端が解放状態の管型逆浸透膜を垂直に設置した容器を、海水の静圧頭が浸透圧を十分上回る海面下500~700mに懸垂すれば、海水中の水だけが逆浸透膜を通して容器内に溜まり、淡水を得ることができる。この際、濃縮された海水は周囲海水との濃度差による自然対流によって下端から系外に排出され、上端から流入してくる新しい海水と置換される。本研究は、海難事故等に対処する手段として、電力なしで海水から淡水が得られる上記方式による装置の開発を目的としている。

2. 研究方法 取得淡水量を増加させるには、濃度差に基づいて誘起される自然対流量を増大して、膜面に発生する濃度分極を低減する必要がある。本研究では、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狭い環状流路を、逆浸透膜と非透過性平板面で形成される垂直平行平板で近似し、流路内の自然対流物質移動特性について数値解析した。また、東シナ海洋上で試験装置を海面下600mに懸垂し、実証試験も行った。

3. 研究結果 管型逆浸透法海水淡水化装置を海中に静止させた場合について、流路内の自然対流物質移動特性に及ぼす流路長さ、流路幅および膜透過係数の影響を数値解析し、実用的な装置の大きさの範囲では、取得淡水量は膜透過係数に大きく依存するが、流路長さにはほぼ比例すること、流路幅を狭めると自然対流量の増大と濃度分極の低減がもたらされ、取得淡水量が増加すること等を明らかにした。

取得淡水量  $F$  と深度600mでの装置保持時間  $t$  の関係(管型逆浸透膜の直径11.5mm, 流路長さ1m, 膜透過係数  $1.0 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ sPa}$ ) について、数値解析結果と実験結果の比較を右図に示す。媒介変数  $b$  は流路幅である。両者はほぼ妥当な一致を示しており、本数値解析から予測される取得淡水量が現実に得られることを実証づけている。

4. 今後の課題 今後は、装置の昇降時(強制対流下)での取得淡水量についても数値解析し、流路幅の最適化を行うとともに、実測値をさらに集積して、取得淡水量の精度良い予測法を追究する。



Comparison between numerical results and experimental results



## 9313 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

海水と淡水との浸透圧は2.8MPaであり、逆浸透法による海水淡水化のためには、海水を浸透圧以上の5~7MPaに加圧する必要がある。そこで、管型の逆浸透膜を垂直に設置した容器を、海水の静圧頭が浸透圧を十分に上回る海面下500~700mに沈めれば、電力を要することなく逆浸透膜を通して淡水を得ることができる。この際、濃縮された海水は周囲海水との濃度差による自然対流によって排出され、新しい海水と置換されることになる。

この装置を、ヨットあるいは小型漁船に装備すれば、海難事故による漂流中でも飲料水を自給でき、将来の海底工場や潜水艇に設置・搭載すれば、海中で飲料水や補給水を得ることもできる。

逆浸透法海水淡水化を行う場合、逆浸透膜表面で発生する濃度分極現象による逆浸透の有効圧力差の低下を抑制し、取得淡水量を増大させるためには、海水流路内の自然対流による循環量を増大させることが重要である。この循環量の増大は、管型の逆浸透膜の中心軸に丸棒を挿入して環状流路を形成させ、最適流路幅を設定することによって達成できる。

前年度は、逆浸透膜と丸棒の間に形成される海水循環流路を非透過性の一様濃度平面と固体平面の平行平板で近似し、流路内に誘起される濃度差に基づく自然対流を広範囲なシュミット数について数値解析し、対流量が流路幅に大きく影響され、丸棒の設置により濃度分極が低減する可能性があることを示した<sup>1)</sup>。

本年度は、装置を海中に静止させた場合を想定し、淡水のみを透過させる理想的な逆浸透膜面と非透過性平面で形成される垂直平行平板間において、濃度差に基づいて誘起される自然対流について数値解析を行い、取得淡水量に及ぼす流路長さ、流路幅および膜透過係数の影響を究明した。さらに、東シナ海洋上にて実証実験を行い、数値解析から予測した淡水が取得可能であることを確認した。

## 記号

|                                   |                                         |                            |                      |
|-----------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| $b$ : 流路幅                         | [m]                                     | $u_m$ : 流入口における $x$ 方向平均流速 | [m/s]                |
| $C$ : 無次元溶質(塩分)濃度                 | [-]                                     | $V$ : $y$ 方向無次元流速          | [-]                  |
| $c$ : 溶質(塩分)濃度                    | [kg/m <sup>3</sup> ]                    | $v$ : $y$ 方向流速             | [m/s]                |
| $D$ : 拡散係数                        | [m <sup>2</sup> /s]                     | $v^{\circ}$ : 淡水透過流速       | [m/s]                |
| $d$ : 丸棒の直径                       | [m]                                     | $X$ : 垂直方向無次元座標            | [-]                  |
| $F$ : 取得淡水量                       | [m <sup>3</sup> ]                       | $x$ : 垂直方向座標               | [m]                  |
| $g$ : 重力加速度                       | [m/s <sup>2</sup> ]                     | $Y$ : 水平方向無次元座標            | [-]                  |
| $h$ : 海面からの設置深さ                   | [m]                                     | $y$ : 水平方向座標               | [m]                  |
| $L$ : 無次元流路長さ                     | [-]                                     | $\alpha$ : 無次元膜透過係数        | [-]                  |
| $L_p$ : 膜透過係数                     | [m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> s·Pa)] | $\gamma$ : 無次元体膨張係数        | [-]                  |
| $l$ : 流路長さ                        | [m]                                     | $\Delta p$ : 逆浸透の有効圧力差     | [Pa]                 |
| $P$ : 無次元圧力(周囲流体圧力基準)             | [-]                                     | $\zeta$ : 体膨張係数            | [m <sup>3</sup> /kg] |
| $p$ : 流路内圧力                       | [Pa]                                    | $\nu$ : 海水動粘度              | [m <sup>2</sup> /s]  |
| $p_d$ : 圧力(周囲流体圧力基準)              | [Pa]                                    | $\pi$ : 浸透圧                | [Pa]                 |
| $p_0$ : 淡水容器内の圧力                  | [Pa]                                    | $\rho$ : 海水密度              | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $Q$ : 流入口における無次元誘起流量              | [-]                                     | $\rho^{\circ}$ : 淡水密度      | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $Q^{\circ}$ : 無次元取得淡水流量           | [-]                                     | $\phi$ : 無次元周囲海水浸透圧        | [-]                  |
| $q^{\circ}$ : 膜面単位幅当たりの<br>取得淡水流量 | [m <sup>3</sup> /(m·s)]                 | 添え字                        |                      |
| $Sc$ : シュミット数                     | [-]                                     | $max$ : 最大                 |                      |
| $t$ : 時間                          | [s]                                     | $w$ : 逆浸透膜面                |                      |
| $U$ : $x$ 方向無次元流速                 | [-]                                     | $0$ : 周囲海水                 |                      |
| $u$ : $x$ 方向流速                    | [m/s]                                   |                            |                      |

## 2. 基礎方程式

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枚の平行平板が距離  $b$  を隔てて垂直に設置されている。平行平板の片方は淡水のみを透過する逆浸透膜面、他方は非透過性平面とする。浮力の項に関する海水密度以外の物性値を一定と仮定し、平行平板間海水の圧力  $p$  と周囲海水の圧力  $p_0$  との同一レベルにおける圧力差  $p_d = p - p_0$  および濃度  $c$  の変化に関連した体膨張係数  $\zeta = (\rho - \rho_0) / \{(c - c_0)\rho\}$  を用いると、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。

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

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

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

ここで、 $\nu$ は海水動粘度、 $\rho$ は海水密度、 $g$ は重力加速度、 $D$ は拡散係数である。

さらに、流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は次式で与えられる。

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

ここで、 $u_m$ は流入口における  $x$  方向平均流速、 $v_w$ は膜面における  $y$  方向流速である。

流入口において、濃度  $c_0$  の周囲海水が一樣流速  $u_m$  で流入すると仮定し、静圧から動圧への圧力変化を考慮すると、流入口における境界条件はEqs. (5), (6)で与えられる。

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

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

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）の移動量と、拡散によって膜面から遠ざかる溶質の移動量が平衡に達する状態で定まる。このことより、膜面における  $y$  方向流速を  $v_w$  とすると、膜面における境界条件は次式で与えられる。

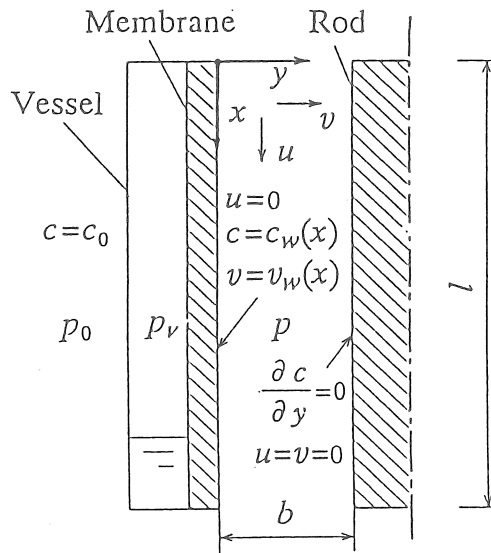


Fig.1 Analytical system and coordinates

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

Eq. (7)中の膜面における  $y$  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。

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

ここで、 $L_p$  は膜透過係数、 $\pi_w$  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平面における境界条件は次式で与えられる。

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

流出口では、流路内海水と周囲海水の圧力が等しくなり次式を満足する。

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

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、膜を透過した淡水の流速は、 $v_w$  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、流路長さ  $l$  全域における単位幅当たりの取得淡水流量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、

$$U = \frac{b u}{\nu \gamma} \quad (12) \qquad V = \frac{b v}{\nu} \quad (13)$$

$$X = \frac{x}{b \gamma} \quad (14) \qquad Y = \frac{y}{b} \quad (15)$$

$$P = \frac{p_d b^2}{\rho \nu^2 \gamma^2} \quad (16) \qquad C = \frac{c}{c_0} \quad (17)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (18) \qquad \gamma = \frac{b^3 \zeta g c_0}{\nu^2} \quad (19)$$

$$\alpha = \frac{b L_p (p_0 - p_v)}{\nu} \quad (20) \qquad \phi = \frac{\pi_0}{\rho g h} \quad (21)$$

$$Q = \frac{b u_m}{\nu \gamma} \quad (22) \qquad L = \frac{l}{b \gamma} \quad (23)$$

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

を導入して、基礎方程式 Eqs. (1)~(4) を無次元化すると、

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

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

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

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

となり、境界条件Eqs.(5)~(10)、さらに取得淡水流量Eq.(11)を無次元化すると、

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

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

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

$$V_w = -\alpha(1-\phi C_w) \left( \frac{\rho^*}{\rho_w} \right) \quad (32)$$

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

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

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

無次元流路長さ  $L$  と無次元誘起流量  $Q$  は、任意の条件で  $Q$  を与えられれば  $L$  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、流入口において  $Q$  の値を与え、Eqs.(29)~(33)の境界条件のもとで、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、各レベルにおいて速度分布、濃度分布および淡水透過流速を求め、淡水透過流速を積分して取得淡水流量を算出した。

各物性値には深さ500~600mで実測した温度、濃度から、補間式<sup>2)</sup>で算出した値を用い、 $Sc=1350$ 、深さ  $h=520$ m ( $\phi=0.45$ )として解析を行った。

### 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  $U$ 、 $V$ 、無次元濃度  $C$  の  $X$  方向の各位置における分布を流路内に誘起される無次元流量  $Q=5 \times 10^{-3}$ 、逆浸透膜の無次元透過係数  $\alpha=8 \times 10^{-4}$  の場合についてFig.2に

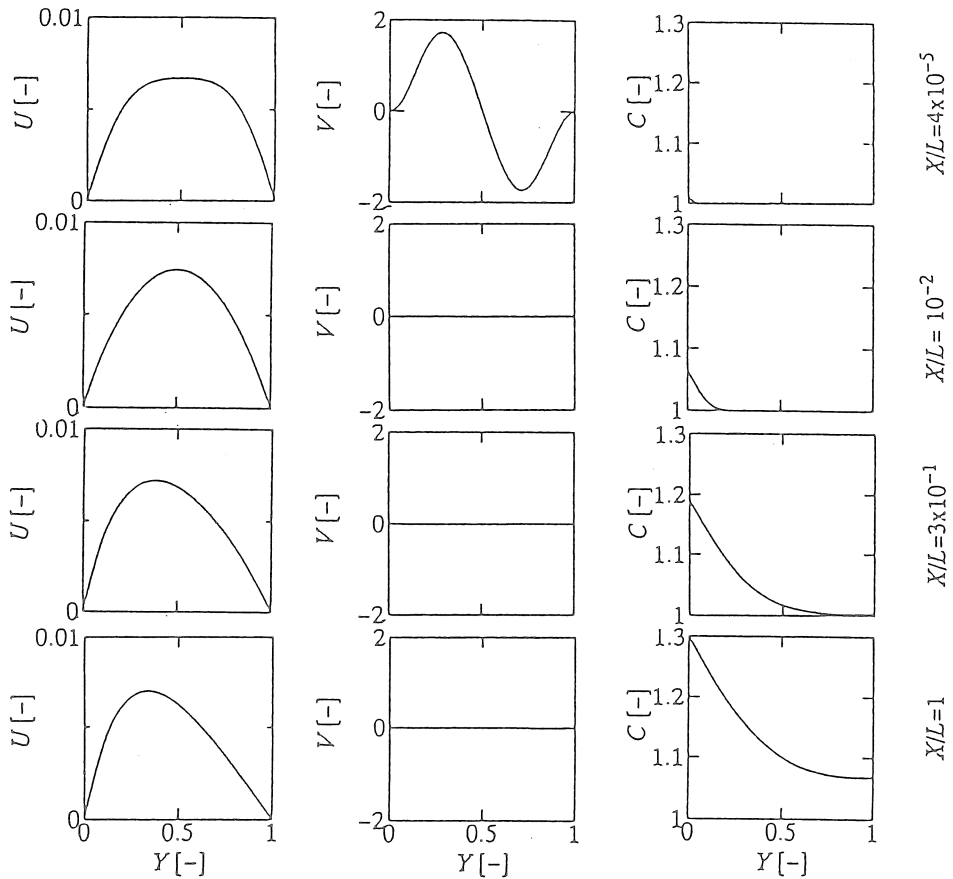


Fig.2 Dimensionless velocity and concentration profiles  
 ( $Q=5 \times 10^{-3}$ ,  $L=1.68$ ,  $\alpha=8 \times 10^{-4}$ )

示す。一様流入速度で流入する  $U$  は、流路入り口付近 ( $X/L=4 \times 10^{-5}$ ) において、濃度分布がほぼ  $C=C_0$  の等濃度流の状態であるので、放物線分布に移行する傾向を示し、 $V$  は  $Y=0.5$  を中心に左右に正負のピークを持つ分布となり、 $X/L=1 \times 10^{-2}$  の位置ですでに発達した放物線分布となる。

淡水が逆浸透膜を透過する際に、海水の  $Y$  方向流れによって膜面に運ばれた溶質が膜面に残るため、海水が流下するにしたがい膜面  $Y=0$  での濃度が徐々に上昇して濃度分布が形成されるので、それに伴って濃度差による自然対流の影響が増大し、 $U$  の速度分布のピークは膜面方向に移動する。

無次元膜面濃度  $C_w$  の  $X$  方向分布を 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同じになり、圧力差  $P_d=0$  となる流路の出口 ( $X=L$ ) での値を示している。したがって ● 印の  $X$  座標が無次元流路長さ  $L$  を表している。逆浸透膜の無次元透過係数  $\alpha$  が同じ



場合、 $L$ が長くなると、出口での $C_w$ は増大するものの、無次元流量 $Q$ が増大するため $X$ 方向の $C_w$ の変化率は小さくなる。 $Q$ が同じである場合には、 $\alpha$ が大きい方が膜を透過する淡水の量が多くなるため、 $C_w$ の変化率は大きくなる。

### 3.2. 取得淡水量

膜面における $Y$ 方向無次元流速 $v_w$  ( $v_w$ は負の値をとる)の $X$ 方向分布をFig. 4に示す。 $X$ 方向に無次元膜面濃度 $C_w$ が上昇するので、 $-v_w$ は減少する。

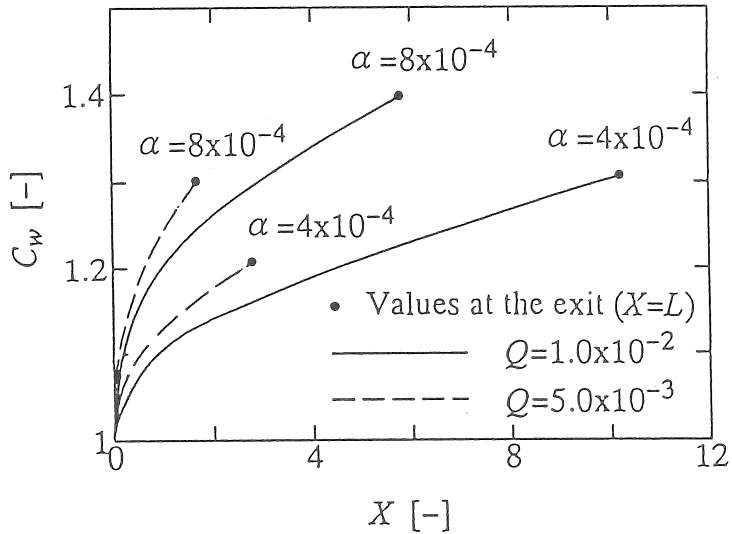


Fig.3 Dimensionless concentration at membrane wall

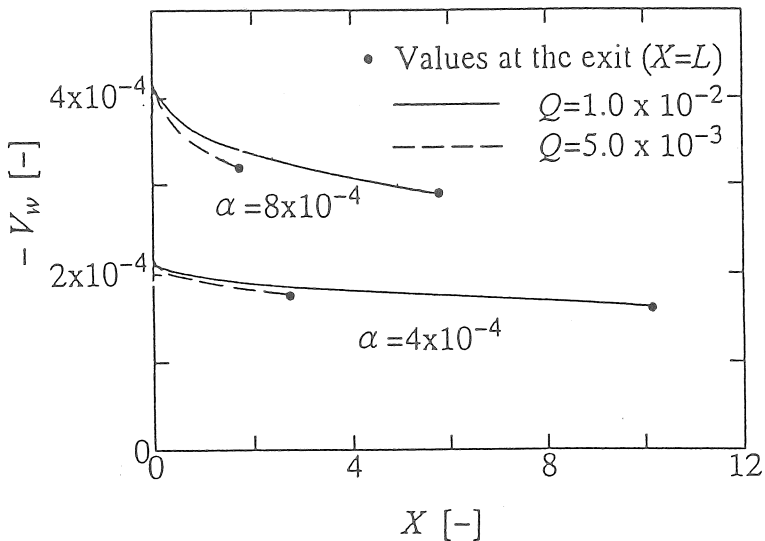


Fig.4 Dimensionless velocity at membrane wall

無次元取得淡水量  $Q^*$  と無次元流路長さ  $L$  との関係をFig. 5に示す.  $Q^*$  と  $L$  はほぼ比例関係にあり,  $Q^*$  は次式で近似できる.

$$Q^* = 0.176 \alpha^{0.88} L \quad (36)$$

この式を有次元形で表すと,

$$q^* = 0.176 \nu^{0.12} (p_0 - p_v)^{0.88} L_p^{0.88} b^{-0.12} l \quad (37)$$

長さ  $l=1\text{m}$  の逆浸透法海水淡水化装置を, 深さ  $h=520\text{m}$  ( $\phi=0.45$ ) の海中に静止した場合に,

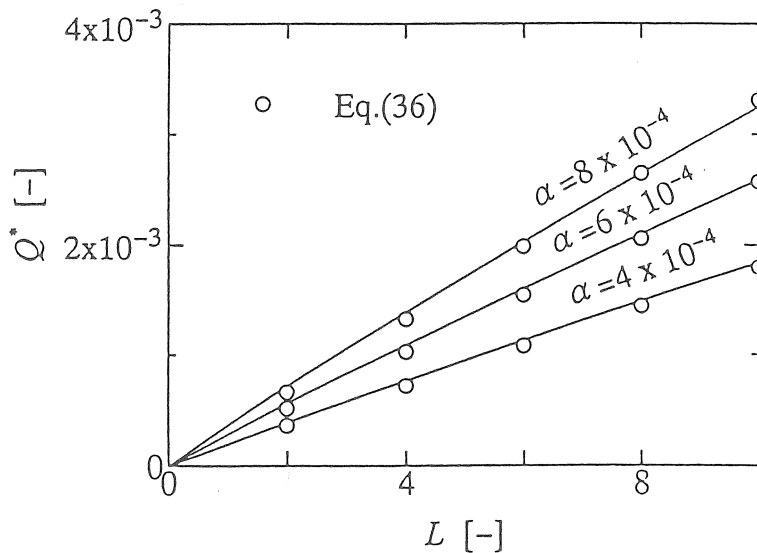


Fig.5 Dimensionless amount of transmitted fresh water

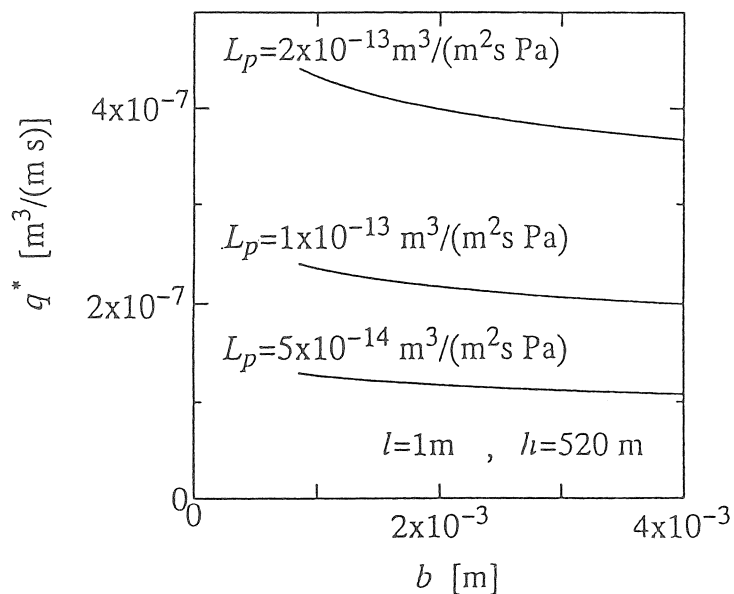


Fig.6 Variation of fresh water flow rate with width

取得される淡水流量  $q^*$  と流路幅  $b$  の関係を Fig. 6 に示す。この流路幅の範囲では、いずれの透過係数  $L_p$  の場合も、 $q^*$  は  $b$  が小さくなるにつれて増大しており、 $L_p$  が大きい場合に  $b$  の影響が顕著である。

## 4. 実証試験

### 4.1. 実験装置および実験方法

淡水が取得可能であることを実証するため、奄美大島西北西沖北緯29° 東経128° の深さ1074mの洋上で、水産大学の練習船“耕洋丸”を用いて、洋上実験を行った。実験に用いた逆浸透法海水淡水化装置を Fig. 7 に示す。逆浸透膜には、長さ1m、内径11.5mmの日東電工製管型逆浸透膜NTRI595を用いた。逆浸透膜は、海水の水圧(5~7MPa)に耐えるようにステンレス製円管で支持されており、その支持管には膜を透過した淡水がしみ出すように長手方向に13mm間隔、周方向に4個の直径1mmの孔を設けた。逆浸透膜の中心には直径5.0, 7.0, 8.0 mmのステンレス製丸棒を設置し、海水流路を平行平板間流路に近似できる間隙の狭い環状形にした。また引き上げ時に、得られた淡水が海水側へ正の浸透圧で逆流することを防止するために、支持管の周囲に逆流防止管を設置した。

実験は以下の手順で行った。①装置を分解し、蒸留水で洗浄する。②装置を組み立てて、逆流防止管内に蒸留水を満たす。③逆浸透膜の管の中心にステンレス製丸棒を設置し、海水流路形状を設定する。④海水の塩分濃度、温度、深さを計測する装置とともに、深度600mまで1m/sの速度で降ろす。⑤船上のウインチを手動で制御して、所定時間(0, 10, 20, 40分)深度600mに保持する。⑥海上まで1m/sの速度で引き揚げ、得られた淡水量および塩分濃度を計測する。⑦この淡水量から装置昇降のみを行った場合に得られた淡水量を差し引き、深度600mに有限時間保持した場合の取得淡水量を求める。

### 4.2. 実験結果および考察

実験を行った海中の深さ方向の塩分濃度および温度分布を Fig. 8 に示す。海水の塩分濃度は海面付近で多少低い値を示し、深度150mで最大値  $34.96\text{kg/m}^3$  を示したのち低下し、深度600mでは  $34.30\text{kg/m}^3$  となっている。一方、海水の温度は

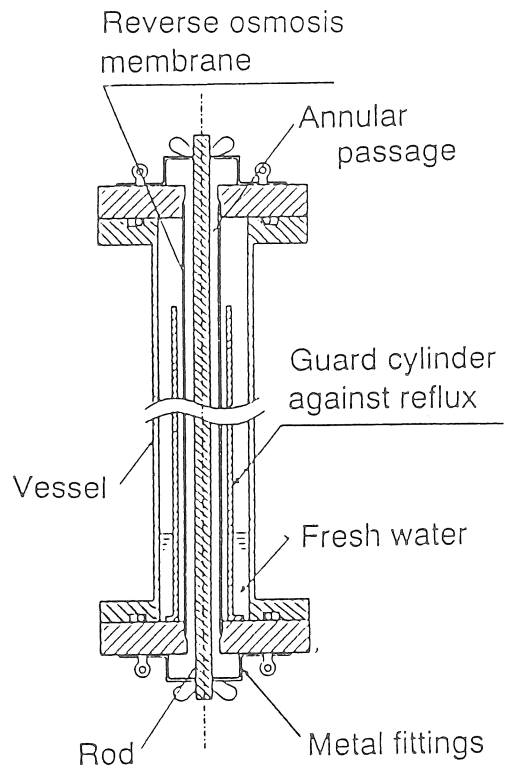


Fig.7 Desalination device

深度50mまで表面付近の温度28.9℃を維持しているが、深度が大きくなるにつれて急激に低下し、深度500m~600mでは11.0~7.7℃となっている。

実験による取得淡水量  $F$  と深度600mに保持された時間  $t$  との関係を図.9に示す。 $F$  は実験で得られた淡水量から装置昇降時に得られた淡水量を差し引いた値である。 $b$  は内径11.5mmの逆浸透膜と丸棒との間にできる流路幅であり、1.8、2.3、3.3mmはそれぞれ  $d$  は

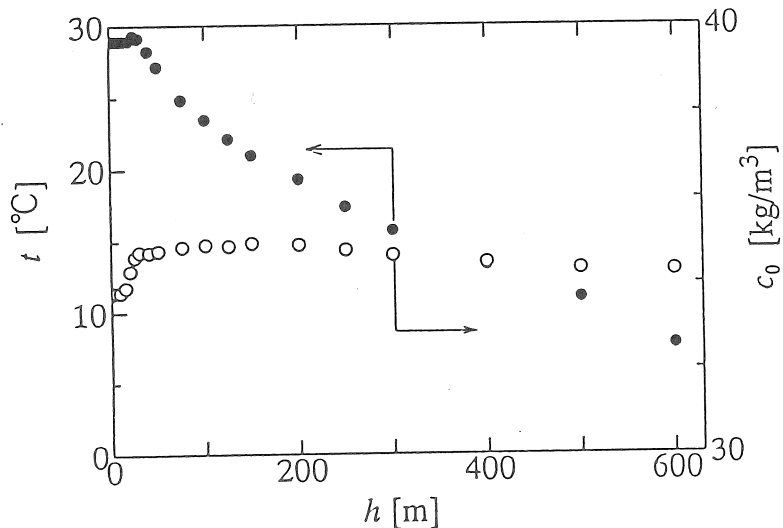


Fig.8 Variations of temperature and concentration with depth

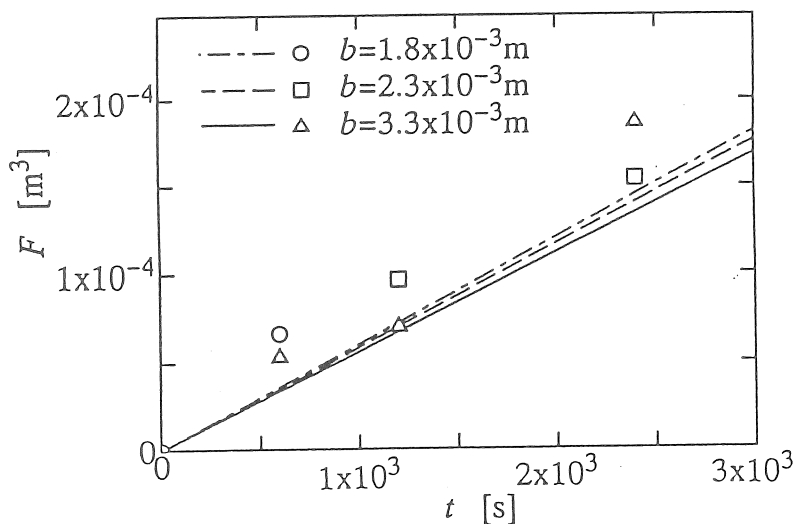


Fig.9 Comparison between numerical results and experimental results

8.0, 7.0, 5.0mmに対応している。図中の線は、 $\phi=0.45$ ,  $L_p=1.0 \times 10^{-12} \text{m}^3/(\text{m}^2 \text{s} \cdot \text{Pa})$ として、それぞれの流路幅に対して、解析解を式化して得たEq.(37)から予測した取得淡水量である。Fの実験値は、時間tが長くなるにしたがって多くなっており、Eq.(37)からの予測値と同様の傾向を示している。

本実験で使用した逆浸透膜が地下かん水等の淡水化を目的として作製されたものであり、塩分の阻止率が60%程度と低いため、得られた淡水の塩分濃度は0.5%~1%と高く、飲用水としては不適であった。しかし、高阻止率の管型逆浸透膜を用いれば、電力なしに飲用水を取得できることが十分実証できた。

## 5. 結言

深海の静圧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、管型の逆浸透膜を用いた装置を海中に懸垂させた場合を想定し、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平行平板で近似し、濃度差に基づく自然対流について数値解析を行った。その結果、実用的な装置の大きさの範囲では、取得淡水量は装置の長さにはほぼ比例すること、流路幅を狭めた方が取得淡水量が増加することを示した。

また、東シナ海洋上において、実器を海中に沈めて取得淡水量を測定した。その結果、解析結果以上の淡水が取得可能であることを実証した。

## 今後の課題

逆浸透膜の中心軸に丸棒を設置し流路幅を狭めることによって、取得される淡水量を増加することができることを解析的に示した。しかし、洋上で行った実証実験から、取得淡水量が装置昇降時の強制対流の影響を受けることが推測された。今後は強制対流により得られる淡水量に及ぼす流路幅の影響を解析し、流路幅の最適化を行うとともに、洋上で淡水取得実験を行い、数値解析結果と比較して、取得淡水量の精度良い予測法を求めることが課題となる。

## 謝辞

本研究を遂行するに当たり、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㈱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の中岡勉助教授、練習船「耕洋丸」の乾栄一船長他乗組員一同および当研究室の莫雲助手に謝意を表します。

## 文献

- 1)宮武修,野田英彦,高木修一:ソルサイエンス助成研究報告集(1994).
- 2)R. P. Hammond *et al.*:O. S. W. R&D Prog. Rep., No. 214(1966).

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

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

### Summary

A desalination device to be used to obtain fresh water from seawater, utilizing the high static pressure of deep sea without the use of electrical power, has been developed. A tube type membrane has been used as the reverse osmosis membrane in the device. The concentrated seawater flows out of the tube by natural convection caused by concentration difference. Increase of the flow rate in the membrane tube is effective in increasing the quantity of fresh water obtainable from seawater. 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 development and the mass transfer characteristics 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. The results show that the quantity of fresh water obtainable from seawater increases nearly in proportion to the length of the device. It also increases with the decrease of the width of the annular passage.

Experimental studies on the desalination of seawater was performed using this devices in the East China Sea. It has been proved that fresh water can be obtained from seawater utilizing the static pressure due to the depth of sea.