

# 連続成層下における深層水の湧昇技術

An Attempt to Draw Up the Deep Seawater  
under the Continuously Stratified Layer

乃万 俊文<sup>1</sup>・明田 定満<sup>2</sup>・奈倉 昇<sup>3</sup>

Toshifumi NOMA, Sadamitsu AKETA and Noboru NAKURA

## Abstract

In case of one forces the sea surface layer water and jets it into the deeper layer, the forced plume entrains the ambient water and forms a newly mixed water body, whose density is greater than the surface water and less than the ambient water. It ascends to the position where the density is coincident with the continuously stratified layer's. Thus, a part of the deep seawater can be drawn up as a mixed water body. A mechanism is considered that compels the lesser density water into greater density one by the equilibrium of the water pressures. The lesser density column pressure is enforced by upraised water due to wave energy.

**Key Words:** Upwelling, continuously stratified layer, equilibrium of pressures

## 要　旨

表層の密度小の海水を何らかの方法で深層に押し込んだ場合、押し込まれた表層水は深層の密度大の海水と混ざり合って表層水より密度大深層水より密度小の混合水塊となる。この水塊は連続成層のある場合、その密度に応じた密度の位置（水深）のところまで上昇する。このように深層水そのものではないが表層水と混ざった深層海水が上昇することになる。海洋における密度構造（連続成層）の存在を利用することによって栄養塩に富む深層水を連続成層中のある位置まで上昇させることができる。押し込むためのエネルギーとして波浪を利用して平均水位の上昇を図り、位置のエネルギーでもって表層水を深層部に押込み噴出させ得られた混合水塊をその密度に応じた位置まで上昇させることによる深層水湧昇について検討する。

## 1. はじめに

海洋のわずか 0.1 % を占めるに過ぎない湧昇流域で世界の 5 割の魚類生産をあげているといわれるよう湧昇流域は高い生産性を有している。今日、日本および外国で盛んに行われている海洋深層水利用研究は、いずれは栄養塩に富む深層水の湧昇技術の方向に向かうことを著者らは期待している。

表層の密度小の海水を何らかの方法で深層に押し込んだ場合、押し込まれた表層水は深層の密度大の

海水と混ざり合って表層水よりは密度大、深層水よりは密度小の混合水塊となる。この水塊は連続成層のある場合、その密度に応じた密度の位置（水深）まで上昇する。このように深層水そのものではないが表層水と混ざった深層海水が上昇することになる。海洋における密度構造（連続成層）の存在を利用することによって栄養塩に富む深層水を連続成層中のある位置まで上昇させることができ<sup>1)</sup>、海域の肥沃化につなげができると考えられる。

ここでは、波浪を利用して平均水位の上昇を図り、

<sup>1)</sup>株式会社漁港浅海開発コンサルタント (〒103-0012 東京都中央区日本橋堀留町 2-10-9 清紅ビル)

<sup>2)</sup>水産工学研究所

<sup>3)</sup>富山県水産公社

位置のエネルギーでもって表層水を深層部に押込み噴出させ、得られた混合水塊をその密度に応じた位置まで上昇させることによる深層水湧昇手法について検討する。

## 2. 連続成層—佐渡沖における実態—

実際の海域においては、表層は風や波の擾乱作用によって混合域と呼ばれる一様密度分布をなしているが、ある水深より下は水深が大きくなるにつれて

海水密度も大きくなり、更に水深が増すと再び密度が一様となる3層構造を持っている。水深とともに密度が大きくなる密度変化帯のことは連続成層と呼ばれ、明確な密度境界面を持つ成層と区別される。また、海洋中の栄養塩分布は、表層では植物プランクトンの光合成によって消費され濃度が低く、下層は上層からの有機物の沈降・分解によって濃度が高いといわれる。その日本海佐渡沖における実態を気象庁舞鶴海洋気象台発行の「海洋速報」で調べてみると、図-1、表-1のようである。

図および表における密度は水温、塩分から「海洋観測指針」により換算した。水深が大きくなると密度は海水の圧縮性を考慮しなければならないとされるが、ここではその圧縮性は無視した。

成層構造として密度と生物生産に関係する  $\text{NO}_3$ 、 $\text{NO}_2$  および  $\text{PO}_4$  の平成9年の季節変化をみると以下のようなである。

密度に関しては、日本海固有冷水塊の密度（単位 gr/c.c.）として 1.0273 がありこの値になる深さが季節によって 100 m 程度変化して水深 200~300 m である。表層の混合層の厚さは低水温期は大きく、高水温期は小さい。5月から10月の間は連続成層が 40 m から開始するといえる。

海域の肥沃度を表す栄養塩のうち  $\text{NO}_3$ （単位  $\mu\text{mol/l}$ ）に関しては下層で一定値となる水深は 400 m であり、その値は多少変化するが 25 ( $\mu\text{mol/l}$  以下、同じ) 程度である。表層平均値は 2 月 4.3, 11 月 1.5, 他の高水温期は 0.2 と極めて小さい値となる。（ $\text{PO}_4$  に関しては、その値が  $\text{NO}_3$  の 10 分の 1 程度であるが変化の傾向としてはよく似ている。）

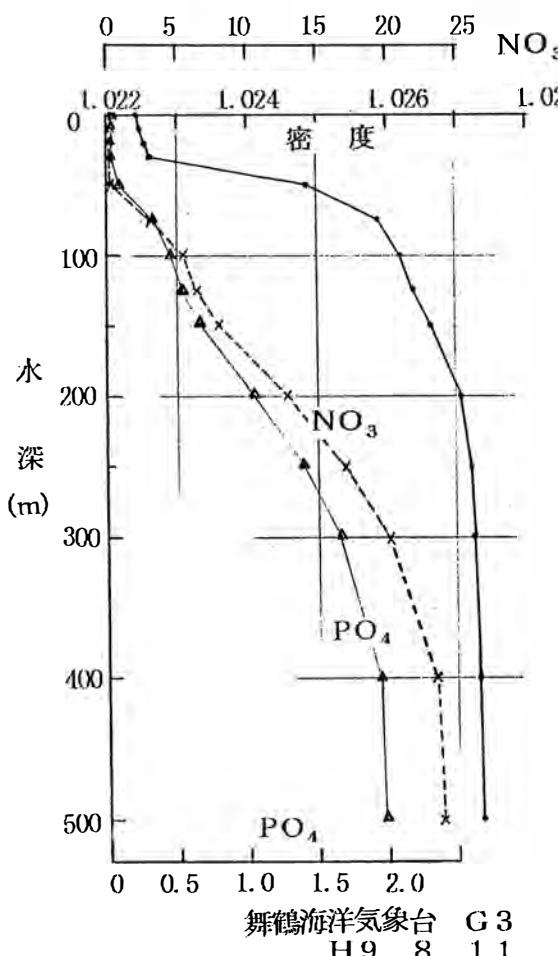


図-1 海洋構造の観測事例

表-1 佐渡沖における成層構造の概略値（平成9年）

時 期	表層平均	増加水帶 (m)	第3層一定値
2月上旬	1.0260/4.3	125~250/150~400	1.0273/24
5月上旬	1.0261/0.2	40~250/50~400	1.0273/25
8月上旬	1.0226/0.2	30~200/50~400	1.0273/24
10月中旬	1.0238/0.2	40~200/40~400	1.0273/27
11月下旬	1.0246/1.5	50~300/50~400	1.0273/26

/の上の数値は密度を、/の下の数値は  $\text{NO}_3$  のものを表す。密度の単位は (gr/c.c.)  $\text{NO}_3$  は ( $\mu\text{mol/l}$ )

### 3. 連続成層下における深層水の湧昇技術

#### 1) 混合水塊の密度、混合比

表層海水の密度  $\rho_1$ 、表層水を押込み噴出させる水深における密度を  $\rho_s$  とし、表層水と深層水の混合比を  $1:n$  とすると、得られる混合水塊の密度は、

$$\rho = (\rho_1 + n\rho_s)/(1 + n) \quad \cdots(1)$$

混合水塊はその密度に応じた連続成層の密度水深位置まで上昇し、その後は水平方向に拡がることになる。なお、厳密には密度を構成する水温に関しては非保存量として送水途中および上昇途中における変化を考慮しなければならないが、ここでは無視した。

一方、栄養塩濃度に関しては表層濃度を  $N_1$ 、表層水噴出位置での値を  $N_s$  とすると、混合水塊の栄養塩濃度は、

$$N = (N_1 + nN_s)/(1 + n) \quad \cdots(2)$$

連続成層において混合水塊の上昇高さは混合水塊の密度で定まるので、上昇高さを決めるものは混合比  $n$  である。 $n$  を小さくすることによって混合水塊の密度を小さくすれば上昇高さを大きくすることは

できる。しかしその場合水塊の持つ栄養塩濃度は小さくなる。

例えば図-1 に示すような密度および栄養塩分布がある場合、混合比を単純に  $n = 1$ 、押込み水深を 150 m と仮定する。

$$\begin{aligned} \rho &= (1.022421 + 1 \times 1.026642)/(1 + 1) \\ &= 1.0245315 \end{aligned}$$

$$N(\text{NO}_3) = (0.3 + 1 \times 8.0)/2 = 4.15$$

$$N(\text{PO}_4) = (0.05 + 1 \times 0.67)/2 = 0.36$$

結果として混合水塊の密度  $\rho = 1.02453$ 、それに対応する水深は 65 m となり、混合水塊に含まれる深層水は 85 m 程度上昇する。この水深 65 m 帯が有光層で上昇した栄養塩により植物プランクトンの発生につながるとすれば海域の肥沃化の可能性が出てくることになる。

いま、混合比  $n$  は仮定したが実際の計画にあたっては、水深  $h$  m の有光層に、栄養塩濃度が  $N$  となるような混合比が求まり、それを満足するような押込み水深が求まることになろう。但し、大きな栄養塩濃度を求めて押込み水深を大とするとそれに応じてパイプの敷設延長も長くなり、また後述するよう

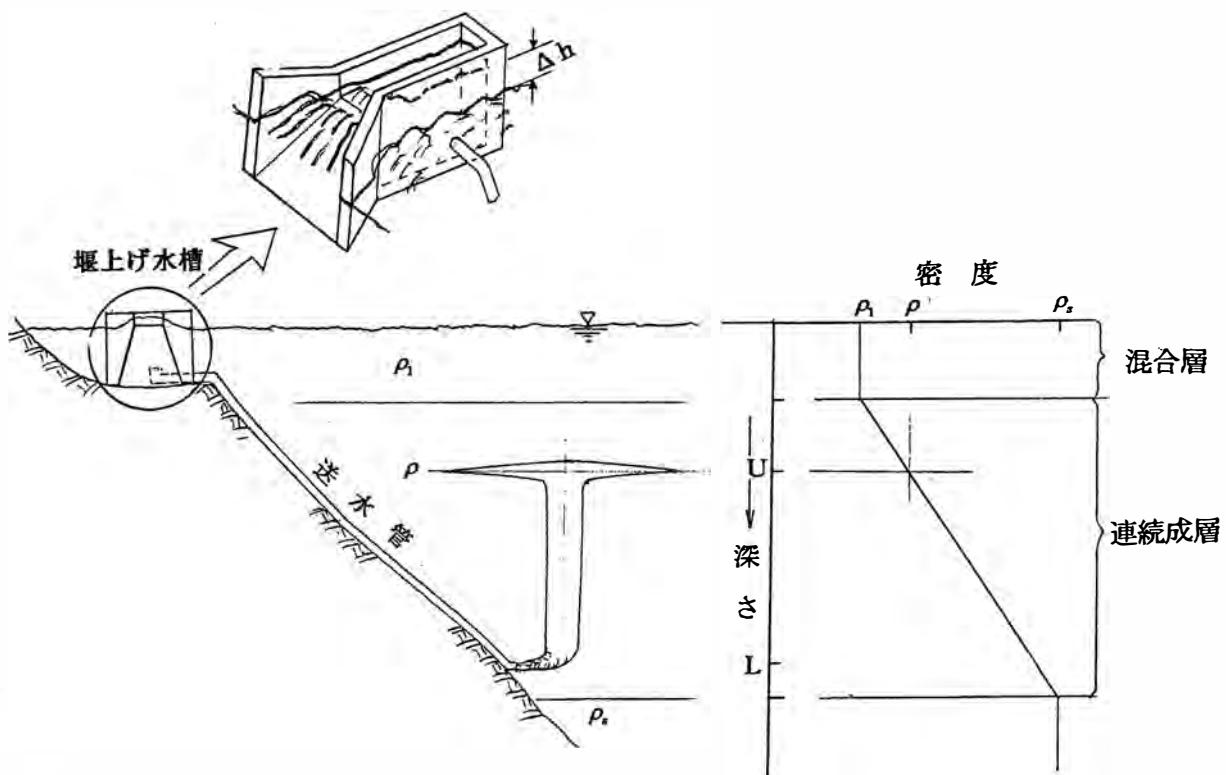


図-2 水位上昇による深層水湧昇概念図

に押込むため必要な水位上昇も大きくなり波浪収束工の規模が大きくなる。

## 2) 所要水位上昇量

密度の小さい表層水を密度大の深層水中に押込むためには、それに応じたエネルギーが必要である。ここではそのエネルギーを波に求め、海岸付近に設けた波浪収束工などによって海水の水位上昇を図りパイプで加圧された表層海水を深層にまで押込むこととする。波浪による水位上昇については、2, 3の文献に紹介されている<sup>2)</sup>。その技術を使って水位上昇のための構造物（水槽）をつくり、圧力水頭をもった水をパイプで深層域へ導き、噴出させる。

この場合、所要水位上昇量 $\Delta h$ は後述するよう所要噴出速度を満足するよう求められ、また、所要水位上昇量を満足するよう別途取入口の構造が決定される。

まず、密度小 ( $\rho_1$ ) の表層海水がパイプを通して密度大 ( $\rho_2$ ) の海水の中に入っていくためには、パイプの下端における圧力が釣り合う必要がある。

いま、連続成層を図-3のように直線近似してみる。この場合、表層水を連続成層の途中で放出させる場合の検査面を b、連続成層下の第3層の一様密度水中で放出させる場合の検査面を c とすると、

b, c における圧力は次のように求められる。

$$\begin{aligned} P_b &= \int_0^{h_u+h_2} \rho_1 g h dh + \int_0^{h_2} (\rho_2 g h - \rho_1 g h) dh \\ &= \frac{1}{2} \rho_1 g (h_u + h_2)^2 + \frac{1}{3} (\rho_2 - \rho_1) \frac{h_2^3}{h_m} \end{aligned} \quad \dots(3)$$

$$\begin{aligned} P_c &= \frac{1}{2} \rho_1 g \left( h_u^2 + \frac{1}{3} h_m^2 + 2h_u h_m + 2h_u h_3 \right) \\ &\quad + \frac{1}{6} \rho_2 g (2h_m^2 + 6h_m h_3 + 3h_3^2) \end{aligned} \quad \dots(4)$$

ここに、  
 $P_b$ ：検査面bにおける圧力  
 $P_c$ ：検査面cにおける圧力

$h_u$ ：表層混合層の厚さ

$h_m$ ：連続成層の厚さ

$h_3$ ：表層混合層と連続成層の境界からの

鉛直下方軸

$h_3$ ：連続成層下端からの鉛直下方軸

$g$ ：重力の加速度

表層密度をもった水柱の平均水面上昇  $\Delta h_e$  による圧力はこの  $P_b$ ,  $P_c$  と釣合う必要がある。

検査面 b では、

$$\begin{aligned} \frac{\rho_1 g}{2} (\Delta h_e + h_u + h_2)^2 - P_b &= 0 \\ \Delta h_e^2 + 2(h_u + h_2)\Delta h_e - \frac{2}{3}\varepsilon \frac{h_2^3}{h_m} &= 0 \quad \varepsilon = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \end{aligned}$$

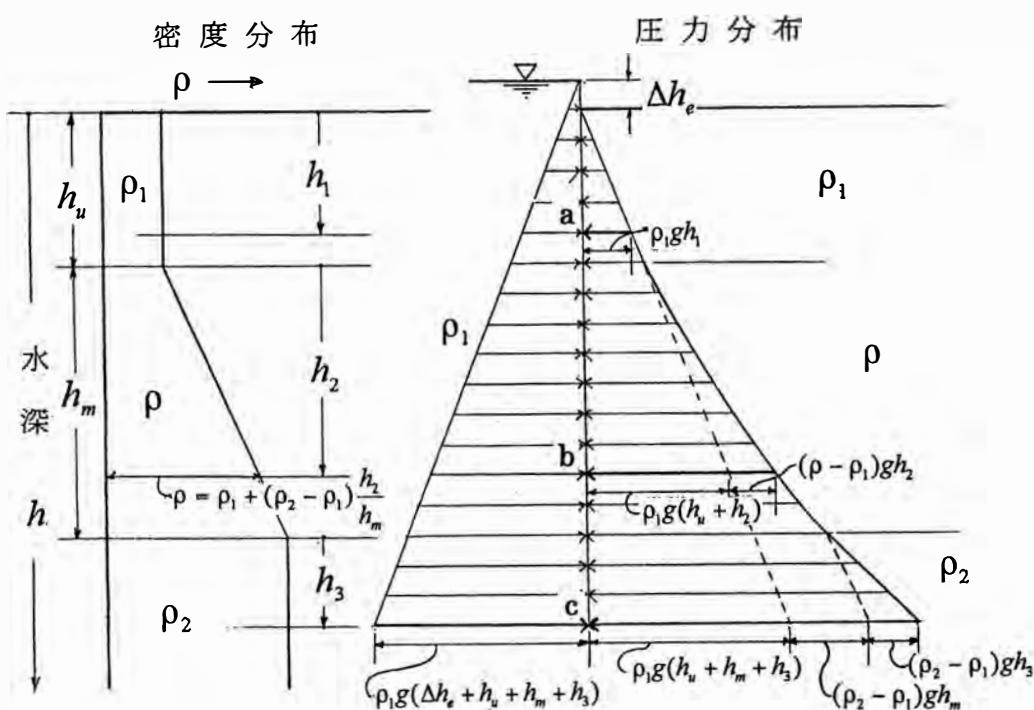


図-3 釣合い水頭模式図

級数展開において第3項以下を省略すると

$$\Delta h_e = \frac{4}{3} \varepsilon \frac{h_2^3}{h_m(h_u + h_2)} - \frac{4}{3} \varepsilon^2 \frac{h_2^6}{h_m^2(h_u + h_2)^3} \dots (5)$$

検査面cでも同様に、

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \rho_1 g (\Delta h_e + h_u + h_m + h_3)^2 - P_c &= 0 \\ \Delta h_e &= 2\varepsilon \frac{\frac{2}{3} h_m^2 + 2h_m h_3 + h_3^2}{h_u + h_m + h_3} - 3\varepsilon^2 \frac{\left(\frac{2}{3} h_m^2 + 2h_m h_3 + h_3^2\right)^2}{(h_u + h_m + h_3)^3} \end{aligned} \dots (6)$$

ここに求めた  $\Delta h_e$  が密度の小さい表層水の水柱下端の圧力がパイプを通じて噴出水深位置での密度大の深層水と圧力が釣合うための条件である。

さらに表層水がある噴出速度を持つためには、管路での摩擦損失に釣り合うよう水位上昇を図る必要がある。その摩擦損失水頭を  $\Delta h_q$  とすると、

$$\Delta h_q = \frac{n^2 v_0^2}{R_a^{4/3}} l + \sum h_j \quad \dots (7)$$

ここに、n：マニングの粗度係数、 $v_0$ ：管内流速、 $R_a$ ：径深、l：管路延長、 $h_j$ ：流入、出口、管の曲りなどによる損失水頭

従って、必要な水位上昇は、

$$\Delta h = \Delta h_q + \Delta h_e \quad \dots (8)$$

### 3) 混入量

密度界面を有する成層下において鉛直下方に密度小の表層水を密度界面以深に定常噴出させる場合の混合模式は図-4のように示され、混合水は上昇した後界面を水平方向に広がる他は時間的な変化はない。このことは、噴流は噴出口近傍で混合のためそのエネルギーを失い、その後は重力の作用で上昇することになり、上昇途中での混合は起きないと解釈される。連続成層中を上昇する場合、上昇するにつれ密度差は漸増することになるので上昇速度は逆に漸減することになり混入は起きないと考えられる。一般的に密度成層流において混入の起こるために内部フルード数がある値（閾値）より大きい

ことが必要とされており、密度界面のある場合は上昇途中および水平に拡がる途中の内部フルード数は閾値より小さいと考えられる。混入がもはや起こらない内部フルード数  $F_i$  は、水槽実験では 0.45 程度が得られている<sup>3), 4)</sup>。定常噴出の場合、下層水との混合は噴出直後に行われることになる。その噴流の降下量  $z_m$  は次式で示される<sup>5)</sup>。

$$z_m = 2D = c2r_0 F_d \quad \dots (9)$$

ここに、D：上昇流部を含む混合水塊の直径

c：定数 = 1.48 ± 0.10

$F_d$ ：内部フルード数

$$F_d = \frac{v_0}{\sqrt{2r_0 g (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2}} \quad \dots (10)$$

$r_0$ ：管の半径

図-4 は定常状態（時間的に噴出口付近の形状は変わらない。つまり、噴出流量  $q_i$  は周辺の海水を取り込むがその量は一定）を示すので、混入量を  $Q$  とおいて、流量の連続からら

$$\begin{aligned} q_i + Q &= q_u \\ q_i &= \pi r_0^2 v_0 \\ q_u &= \pi \left( \left( \frac{d}{2} \right)^2 - r_0^2 \right) u = \pi t^2 u \end{aligned} \quad \dots (11)$$

ここに、 $q_u$ ：混合水塊からの上昇流量

d：上昇する混合水の外縁部までの中心部からの半径（パイプの肉厚はゼロ

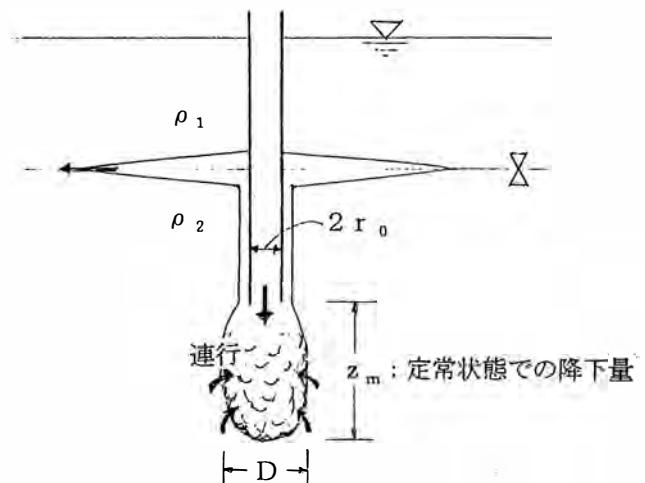


図-4 密度噴流に伴う混合水塊の形状

の見做す)

$u$  : 上昇流速

放水口端に形成される混合水塊の容積  $V$  は流入量および混入量に比例すると考えて,

$$\begin{aligned} V &= k(q_i + Q) \\ V &= \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 z_m \end{aligned} \quad \cdots (12)$$

ここに  $k$  : 放水口先端の混合水塊の容積に関する係数 (時間の次元を持つ)

次に、運動量は保存されると考えて,

$$\rho_1 v_0^2 q_i = \rho u^2 q_u \quad \cdots (13)$$

また、もはや混入が起こらなくなる内部フルード数の閾値を  $f$  とおき上昇流に適用すると,

$$f = \frac{u}{\sqrt{2\varepsilon' g t}} \quad \cdots (14)$$

ここに,  $\varepsilon' = \frac{\rho_2 - \rho}{\rho_2}$

(11), (12), (13) および (14) 式から,

$$\begin{aligned} (n+1)^9 - A(n+\sigma)^5 &= 0 \\ n = \frac{Q}{q_1} &\quad \sigma = \frac{\rho_1}{\rho_2} \end{aligned} \quad \cdots (15)$$

$$A = \frac{2^7 f^8 c^{21} v_0^6 \sqrt{r_0}}{\sigma^5 k^7 (2\varepsilon_2 g)^{3/2}} \quad \cdots (16)$$

が得られる。混入量はこの 9 次方程式を解くことによって得られる。 $n$  が求まると混合海水密度  $\rho$  は (1)式で求まる。

このように鉛直下方への噴出と仮定した場合の混合比は水力学的に定まっている。しかし、混合比は (2)式の栄養塩の所要濃度を得られるように求められるべきで、任意の混合比を得るため (15), (16) 式で噴出速度を制御できるよう放水口付近の管径を変化させることが必要となろう。

#### 4) 湧昇量

上昇する混合水塊中の深層水の量を湧昇量と呼ぶこととするとその量は混入量  $Q$  となる。これは表層水の押込み量と混合比に関係し、混合比を一定とした場合、押込み量に比例することになる。押込み量は波浪条件などによって定まるので、例えば時化が続いて大量の表層水の定常的押込みがあった場合、図-4 の混合水塊容積に変化はないので、結局水平に広がる楔の先端が伸びることで貯えられることになる。陸上への深層水取水後の放流のように、その密度が大きいためせっかくの放流水が沈降するような問題は起こらない。

なお、深層に押し込む密度小の表層水は密度大の深層水中に留まることができず、混合水塊の密度に釣合う位置まで上昇するので表層水による深層水の汚染といったような問題は起きないと考えられる。

#### 5) 計算例

以下、式の理解のため計算例を示す。

いま、図-1 の密度構造を

$$\begin{aligned} \rho_1 &= 1.022421, \quad \rho_2 = 1.026642, \quad \varepsilon = 0.00413, \\ \varepsilon_2 &= 0.00411, \quad h_u = 25 \text{ m}, \quad h_m = 145 \text{ m}, \\ h_2 &= 150 - 25 = 125 \text{ m} \end{aligned}$$

と仮定して直線近似し、表層水を水深 150 m に押込み噴出させる (ケース b) 場合の釣合い水頭は、

$$\begin{aligned} \Delta h_e &= \frac{4}{3} \varepsilon \frac{125^3}{145(25+125)} - \frac{4}{3} \varepsilon^2 \frac{125^6}{145^2 (25+125)^3} \\ &= 0.493 \text{ m} \end{aligned} \quad \cdots (16)$$

次に、パイプ直径 1 m、管内流速  $v_0 = 1.0 \text{ m/sec}$  で放水すると仮定する。マニングの粗度係数  $n = 0.015$ ,  $R_a = 0.5 \text{ m}$ , 管路長は海底勾配を  $1/8$  と考えると

$$\ell = 150 \times 8 = 1,200 \text{ m}$$

$\Delta h_q$  は入・出口や曲りによる損失水頭を無視すると、(5)式より、

$$\Delta h = \frac{0.015^2 1.0^2}{0.5^{4/3}} 1200 = 0.680 \text{ m}$$

よって、 $\Delta = 1.173 \text{ m}$  となる。

さらに、鉛直下方に放出し混入比  $n = 1, 2, 4$  としたい場合、(15)式から

$$A = \frac{(n+1)^9}{(n+\sigma)^5} \quad \cdots(17)$$

この式から  $A$  を求め、 $A$  を構成する  $v_0, r_0$  を次式を満足するように変化させる

$$q = \pi r^2 v = \text{const.} \quad \cdots(18)$$

結果は表-2 のように求まる。

表-2 任意の混入比を与えた場合の  $r, v$

$n = Q/q_i$	1.0	2.0	3.0
A	16.98552	84.28619	640.0684
r (m)	0.932	0.800	0.660
v (m/s)	0.288	0.390	0.574

$$k = 1.0 \quad c = 1.48 \quad f = 0.44$$

ここでは、所要の混入比を与えて  $r, v$  を計算したが、(15)式を次のようにニュートンの漸近解法で  $n$  を求めることもできる。

$$y_{m+1} = y_m - \frac{n^9 + 9n^8 + 36n^7 + 84n^6 + (126-A)n^5 +}{9n^8 + 72n^7 + 252n^6 + 504n^5 +} \\ \frac{(126-5A\sigma)n^4 + (84-10A\sigma^2)n^3 +}{5(126-A)n^4 + 4(126-5A\sigma)n^3 +} \\ \frac{(36-10A\sigma^3)n^2 + (9-5A\sigma^4)n +}{3(84-10A\sigma^2)n^2 + 2(36-10A\sigma^3)n +} \\ \frac{(1-A\sigma^5)}{(9-5A\sigma^4)} \quad \cdots(18)$$

ここに、 $y_{m+1}$  は  $n$  の第  $m$  次近似であり ( $y_{m+1} - y_m$ ) が所要の微小量となるまで計算を行って解を求める。

#### 4. 考 察

本研究は海域の肥沃化のため波を利用して平均水位の上昇を図り、密度小の表層水を深層へ導き噴出させ密度大の深層水と混合させ中間の密度を持つ水

塊を形成させ、混合水塊がその密度の釣合う位置まで湧昇させるという湧昇手法について理論的に考察した。しかし、噴出直後の深層水混入の実態については、混合水塊の形状および密度流実験結果の知見から類推するに留まった。送水途中や上昇途中での温度変化、連続成層中を上昇する場合の混入については無視している。また、深層において無視できないとされる海水の圧縮性による密度増加をゼロとみなすなど多くの前提条件をおいた研究であるが、深層水をくみ上げるだけでなく、密度の小さい表層水を深層域に押込むことも深層水の湧昇に繋がることを明らかにできた。

構造物に作用して平均水位上昇を起こす基となる波は、その発生は不規則だが海域には確実に存在するものであり、時化が長時間続いた場合の湧昇水塊は水面下ある水深を水平方向に拡がることで貯留されることが考えられる。

現地海域への展開については、日本近海では海底勾配がきつい場合でも 1/8~1/10 程度で送水管の敷設延長が長くなる。今後は海底勾配がより急峻な島の周辺への展開を検討するとか、浮体型の波浪収束工の開発が望まれる。

#### 参考文献

- 乃万俊文・明田定満：波浪による水位上昇を利用した深層水の湧昇（1），平成 12 年度日本水産工学会学術講演会講演論文集，pp 99~102
- 中村・乃万・萩野・坂下：波浪利用による海水導流について，第 22 回海岸工学講演会論文集，pp 197~200，1975
- 乃万俊文：ゲートからの定常流出に伴う内部流の流況，水産工学研究所報告 5，1984，pp 25~32
- 濱田・太田・味村・海野・糸沢：内部界面波の斜面這い上がり変形（II）－碎波指標と這い上がり距離－，平成 12 年度日本水産工学会学術講演会講演論文集，pp 109~112
- 土木学会編「水理公式集 S 60 版」：7.3 密度噴流，pp 51~56

(2000. 12. 28 受付, 2001. 5. 8 受理)