

海底構造物による均質及び密度成層化された 振動流場の流況について

辻 本 剛 三* 道 奥 康 治** 西 出 浩 明***
坂 本 格**** 久 野 悟 志****

1. はじめに

近年の漁業に対する見解が獲る漁業から育てる漁業に移行し始めている。そのために漁場を形成する観点から下層の栄養塩に富んだ底層水を上層（有光層）に輸送する「湧昇流」が注目され、湧昇流を人工的に発生させる試みが進められている。従来の湧昇流の発生の検討は均質場の海域を想定したものであり、夏期に見られる密度成層場が発達する場の検討はあまり行われていない。このような場では密度界面の影響等で鉛直方向の湧昇流が水平方向に変化させられるために、上下層の混合が容易には起こり難いので、均質場だけの成果では不十分である。

本研究では振動流中において湧昇流発生させるために、水底に種々の幾何学形状の構造物を設置した場合の構造物周辺の流動・乱流構造を検討した。均質場では実験と $k-\epsilon$ 乱流モデルによる数値計算、密度成層場では実験が困難であるために数値計算を適用して構造物周辺の流況や成層破壊過程などの検討を行った。

2. 既往の研究

人工的な湧昇流発生に関する実験的な研究は、大野ら (1979) の均質場における種々の構造物による渦の発生、上昇高さの検討などがあり、密度成層場では明田ら (1989) の一方向流中の不連続な密度成層場での密度界面形状の挙動の可視化実験があり、密度フルード数で密度界面の形状を分類している。また上嶋らは (1991) 振動流中の密度成層場に潜堤を設置して湧昇高さの変化を測定し、成層の影響で混合が抑制され潜堤高さの必要性を示している。

一方、数値的な検討には松井ら (1988) の均質場における流況と拡散に関する 3 次元非定常解析、藤原ら (1992) の密度成層における 3 次元場での湧昇流の水利構造のマルチレベルモデルを用いた解析、辻本 (1992) の層流場における計算がある。以上のような研究が行われ

ているが、室内実験・数値解析は均質場・密度成層場を想定したものであり、振動流を対象とした研究はきわめて少ないのが現状である。

3. 実験方法

実験は水平長さ 88 cm×88 cm、高さ 45 cm のアクリル製水槽に、図-1 に示すような 6 種類の構造物を設置し、水深は 25 cm とした。図中の単位は mm である。また (c) 型は設置間隔 s を $c1:5\text{ cm}$, $c2:8\text{ cm}$, $c3:10\text{ cm}$, $c4:13\text{ cm}$ とした。構造物を水平方向に振動させ 2 次元振動流場とした。このシステムでは、潮流制御装置など大がかりな付帯設備を必要とせず、容易に条件を変化させて実験を行うことが出来る。位相はポテンシオメーター、流速は 2 次元電磁流速計により 10 Hz でサンプリングした。表-1 に実験条件を示し、構造物 (f) 以外は実験条件 run 1 のみとした。位相の原点は右向き（順流）最大流時に定めた。構造物に対してほぼ対称となる流れ場が形成されるので、測定は片側のみとした。

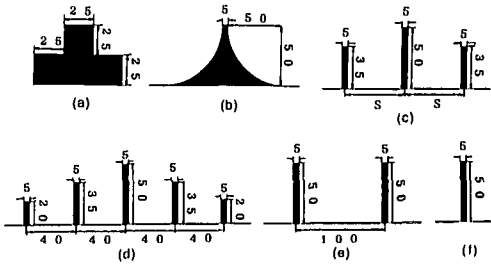


図-1 考案した構造物模型 (単位 mm)

表-1 実験条件

run	振幅 (cm)	周期 (sec)	KC	Re
1	5	15	6.3	1047
2	5	5	6.3	3142
3	8	24	10.1	1047
4	11	33	13.8	1047
5	14	42	17.6	1047
6	17	51	21.4	1047

* 正 会 員 工 博 神戸市立工業高等専門学校 都市工学科 助教授
** 正 会 員 工 博 神戸大学工学部建設工学科 助教授
*** 正 会 員 工 修 阪神道路公団
**** 学生会員 神戸大学大学院建設工学専攻

4. 数値解析方法

4.1 代表物理量

実験では構造物を静止流体中で振動させた条件であるが、本計算では基本的な流れの特性を数値計算で得るために、図-2 のような振動流中の底面に構造物 (f) を設置した流れ場を扱う。 $k-\varepsilon$ 乱流モデルの方程式群、つまり連続式、運動方程式、乱れエネルギー k とその逸散率 ε 方程式、浮力 (熱) 保存式を採用し、これらを無次元化するために以下の代表スケールを設定する。

$$\text{長さ: } L_0 = d \quad \text{速度: } U_0 = 2\pi \cdot S \cdot f$$

$$\text{温度: } T_0 = (T_1 - T_2) \quad \text{時間: } t_0 = L_0 / U_0$$

ここで、 d : 構造物高さ、 S : 振動流の振幅、 f : 周波数、 T_1, T_2 : 上層、下層の水温である。以上の物理量を用いて、 x : 水平方向、 z : 鉛直方向、 u, w : x, z 方向の流速、 t : 時間、 T : 水温とする次のような無次元物理量 ($\sim$ を冠した量) を定義する。

$$\bar{t} = t/t_0, \quad (\bar{x}, \bar{z}) = (x, z)/L_0, \quad (\bar{u}, \bar{w}) = (u, w)/U_0,$$

$$\bar{k} = k/U_0^2, \quad \bar{\varepsilon} = \varepsilon L_0 / U_0^3, \quad \bar{T} = (T - T_2) / T_0$$

4.2 基礎方程式群

上記の無次元物理量を用いて方程式群を無次元化すると以下のようになる。以下の式では無次元量を表す ($\sim$) は略している。

連続式

$$\partial u / \partial x + \partial w / \partial z = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

運動方程式

$$\begin{aligned} \partial u / \partial t + u \cdot \partial u / \partial x + w \cdot \partial u / \partial z = & -\partial p / \partial x + \partial \{ (1/R_e + \nu_i) \\ & \cdot \partial u / \partial x \} / \partial x + \partial \{ (1/R_e + \nu_i) \cdot \partial u / \partial z \} / \partial z \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \partial w / \partial t + u \cdot \partial w / \partial x + w \cdot \partial w / \partial z = & -\partial p / \partial z + \partial \{ (1/R_e + \nu_i) \\ & \cdot \partial w / \partial x \} / \partial x + \partial \{ (1/R_e + \nu_i) \cdot \partial w / \partial z \} / \partial z + R_i \cdot T \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

水温の保存式

$$\begin{aligned} \partial T / \partial t + u \cdot \partial T / \partial x + w \cdot \partial T / \partial z = & \partial \{ (1/(R_e \cdot P_r) + \nu_i / \sigma_i) \\ & \cdot \partial T / \partial x \} / \partial x + \partial \{ (1/(R_e \cdot P_r) + \nu_i / \sigma_i) \cdot \partial T / \partial z \} / \partial z \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

乱流エネルギー k 方程式

$$\begin{aligned} \partial k / \partial t + u \cdot \partial k / \partial x + w \cdot \partial k / \partial z = & \partial \{ (1/R_e + \nu_i / \sigma_k) \cdot \partial k / \partial x \} / \partial x \\ & + \partial \{ (1/R_e + \nu_i / \sigma_k) \cdot \partial k / \partial z \} / \partial z + P + G - \varepsilon \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

逸散量 ε 方程式

$$\begin{aligned} \partial \varepsilon / \partial t + u \cdot \partial \varepsilon / \partial x + w \cdot \partial \varepsilon / \partial z = & \partial \{ (1/R_e + \nu_i / \sigma_\varepsilon) \cdot \partial \varepsilon / \partial x \} / \partial x \\ & + \partial \{ (1/R_e + \nu_i / \sigma_\varepsilon) \cdot \partial \varepsilon / \partial z \} / \partial z + C_{1\varepsilon} \cdot \varepsilon / k (P + G) \\ & \cdot (1 + C_{3\varepsilon} \cdot R_i) - C_{2\varepsilon} \cdot \varepsilon^2 / k \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

ここで、 $P = 2\nu_i \{ (\partial u / \partial x)^2 + (\partial w / \partial z)^2 \} + \nu_i (\partial u / \partial z + \partial w / \partial x)^2$, $G = -R_i \cdot \nu_i / \sigma_i \cdot \partial T / \partial z$, p : 圧力、 k : 乱れエネルギー、 ε : 逸散量、 P_r : プラントル数 ($=7.0$)、 ν_i : 渦動粘性係数 ($=C_\mu \cdot k^2 / \varepsilon$)、 σ_i : シュミット数 ($=1.0$)、 R_i : Flux-type Richardson 数 ($= -G / (P + G)$)、 R_e : レイノルズ数

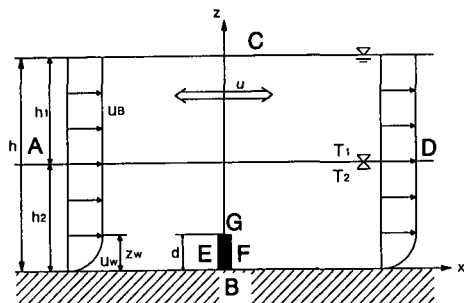


図-2 対象とした2次元密度成層振動流場

表-2 境界条件

	u	w	k	ε	T
A	式 (7)	0	$\partial^2 k / \partial x^2 = 0$	$\partial^2 \varepsilon / \partial x^2 = 0$	$T_1 = 1, T_2 = 0$
B	0	0	0	$2 / \text{Re} (\partial k^{0.5} / \partial z)^2$	$\partial T / \partial z = 0$
C	$\partial u / \partial z = 0$	0	0	$2 / \text{Re} (\partial k^{0.5} / \partial z)^2$	$\partial T / \partial z = 0$
D	式 (7)	0	$\partial^2 k / \partial x^2 = 0$	$\partial^2 \varepsilon / \partial x^2 = 0$	$T_1 = 1, T_2 = 0$
E	0	0	0	$2 / \text{Re} (\partial k^{0.5} / \partial z)^2$	$\partial T / \partial x = 0$
F	0	0	0	$2 / \text{Re} (\partial k^{0.5} / \partial z)^2$	$\partial T / \partial x = 0$
G	0	0	0	$2 / \text{Re} (\partial k^{0.5} / \partial z)^2$	$\partial T / \partial z = 0$

$U_0 L_0 / \nu$, R_i : Overall Richardson 数 ($= \alpha g T_0 L_0 / U_0^2$), α : 熱膨張係数、 ν : 水の動粘性係数、($C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$): 定数 ($=0.09, 1.0, 1.3, 1.44, 1.92, 1.0$) である。 R_e, R_i 以外の無次元量としては、 $h = h/d, h_1 = h_1/d, h_2 = h_2/d$, KC 数 $= U_0 f / L_0 = 2\pi S / d$ などが定義される。ここでは、既往の現場実験の緒言を参考にして $h=5$ の場合を対象にする。

4.3 計算手法、境界条件

境界条件は図-2 を参照にして表-2 にまとめて示す。壁面の流速は開水路乱流の抵抗則を適用して (7) 式のように与える。

$$\begin{aligned} u_w = & u_* \{ 5.5 + 5.75 \log_{10} (u_* z R_e) \} \cos(\theta) \quad (0 < z < z_w) \\ u_B = & \cos(\theta) \quad (z_w < z < h) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 u_* : 摩擦速度である。(1) から (6) 式までをスタッガード格子で差分化し、表-2 の境界条件を用いて、SIMPLE 法により解いた。また構造物の形状を任意に表示出来るように計算格子を不活性化することにより表現している。

5. 結果と考察

5.1 均質場における流れの構造

幾何学形状の相違による流れ場の変化は、剝離渦の発生機構に顕著に現れ、特に設置間隔に依存している。図-3 に位相 $\pi/4$ における各構造物上の流速ベクトルを示す。(a), (c1), (c2), (d) の構造物は三角形断面と同じ効果を有すると考えられ、(c) 型は設置間隔を構造

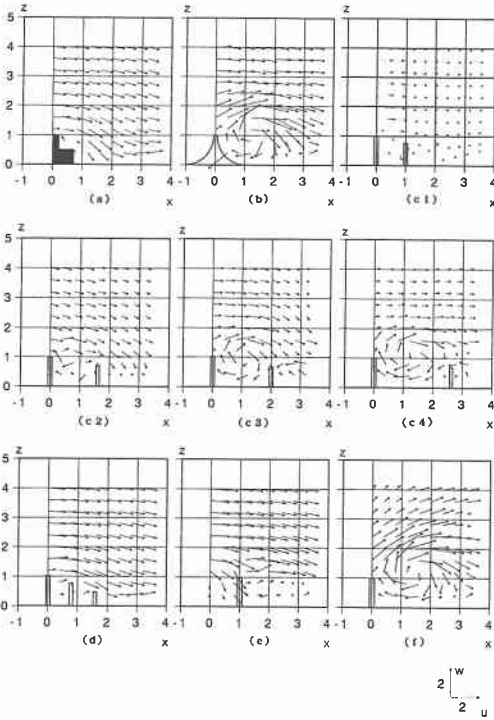


図-3 各種構造物上の流速ベクトル

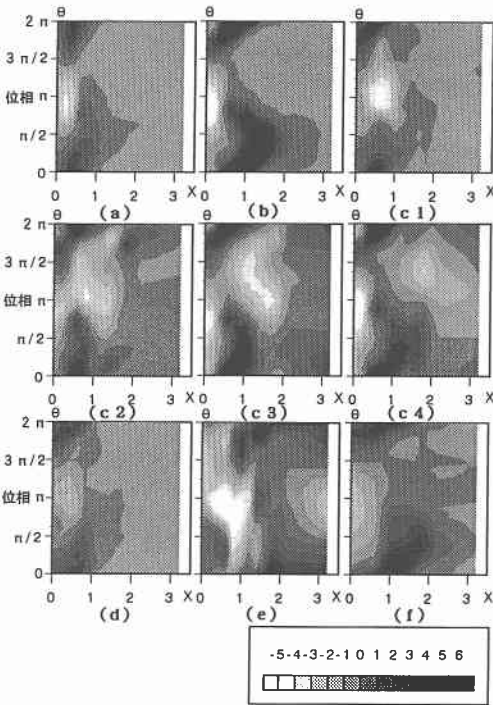


図-4 $z=1.0$ の (x, θ) 平面上の渦度の分布

物高さの2倍以上離すと渦のスケールに差が見られなくなり、また数倍以上に設置間隔を保たないと複数に渦が形成され難い。(b)と(f)の形状による違いはあまり見られない。後述するように湧昇流の効果の目安として渦の挙動が重要である。

図-4には (x, θ) 平面上の $z=1.0$ における渦度の分布を示す。(b),(f)を比較すると正の渦度のピークが存在する期間に差があり、(f)では渦度が拡散するために広い範囲にわたって渦度の分布が見られる。そのために流れの反転($\theta=\pi/2$)後も正の渦度の影響で構造物の左側の負の渦度の形成が遅れる。また複数設置した場合、図-3からも明らかなように、構造物高さの1倍程度の設置間隔では、剥離渦の発達が妨げられ明確な正の渦度の渦にはなり難い。流れの反転後もその影響が残らないために、構造物間に負の渦度が形成される(c1)。設置間隔が1.3, 2倍となると流れの順流, 逆流時には正, 負の渦度は発達するが、隣接する構造物まで分布しないために相互に干渉しない(c2, c3)。設置間隔が2.6倍程度になると正の渦度が隣接する構造物付近まで達するので、流れの反転後に(c3)で見られた負の渦度が形成されない。しかし中央の構造物上に負の渦度が見られる(c4)。(a),(d)は互いに類似した分布形をなしている。このように種々の形状の構造物が考案したが、渦の空間的スケールや渦度の強度、さらに構造の単純性を考慮して、以後は形状(f)の場合について検討する。

図-5に剥離渦が顕著になる位相0でのrun1の流速ベクトルと渦度の計算および実験結果の分布を示す。鉛直方向の流速の分布形状にやや違いがあるが、渦の形成、渦度の分布は良好に計算されている。

図-6に位相 $\pi/8$ における乱れエネルギーの分布の計算結果を示す。KC数の増大は剥離領域を拡大させ、渦が構造物よりもやや離れたところに形成される。それに伴い乱れの分布領域は拡がる傾向が見られる。

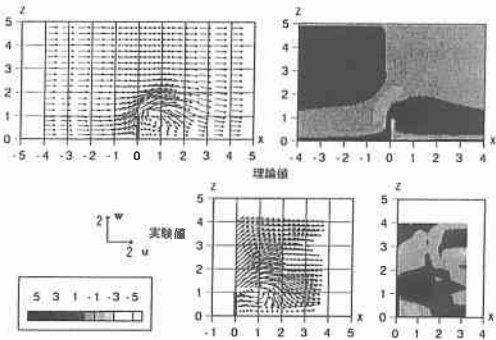
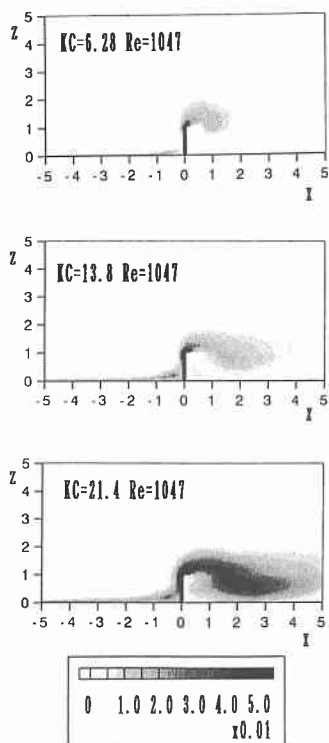


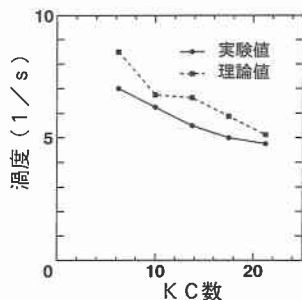
図-5 流速ベクトルと渦度の比較



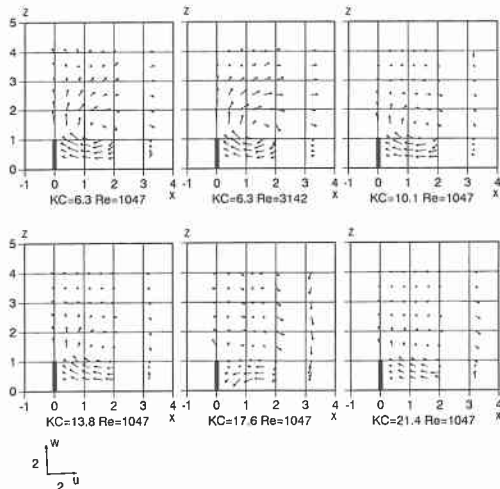
図—6 乱れエネルギーの分布

5.2 渦度と KC 数

湧昇流は底層の水塊を上方に移動させ、上下層の混合を促進させる流れである。実験からも明らかにように剝離に伴う渦が、湧昇流の発生に重要な役割を果たしている。剝離渦の強度の指標としては渦度と循環値が考えられるが、算出の容易さからここでは渦度をその指標とする。西出ら (1994) は剝離渦の発達初期の渦度の値は KC 数によらず一定であるが、発達段階においては KC 数に依存することを実験的に示している。図—7 に一周期間における渦度の最大値の絶対値と KC 数との関係を示す。KC 数の減少に伴い渦度の値が増加し、計算においても同様な結果が得られている。



図—7 渦度と KC 数の関係



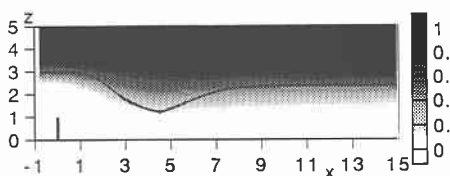
図—8 KC 数による残差流の変化

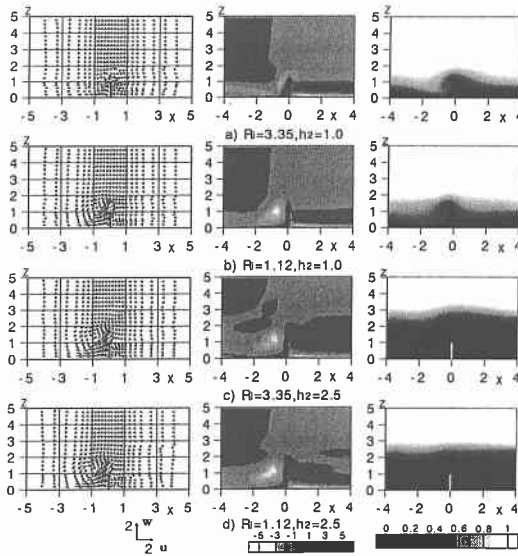
5.3 残差流の分布

剝離渦により局所的に発生した流れは、流れ場を一周期平均した際に残差流となりうる。残差流は長期的に見れば一方に物質等を輸送する流れであり、湧昇の効果の評価することができる。図—8 に残差流を KC 数をパラメータとした実験結果を示す。KC 数の減少は構造物近傍に強い渦度を持った剝離渦を形成させるため、速い残差流を構造物近傍に発生させる。逆に KC 数の増加は渦度の拡散をもたらすために明瞭な残差流が発生し難く、図—6 にも示したように乱れの強い領域を拡げることになる。

5.4 一方向流密度成層場について

密度成層場での本数値計算手法の妥当性を検証をするために明田らの実験と同じ水理条件 ($R_b=4000$, $R_t=1.88$, $h=5.0$, $h_2=2.5$) で計算を行った。図—9 に密度界面の形状の計算結果と実験結果 (図中の曲線) を示す。計算では密度界面 ($T=0.05$) 位置が、構造物直後の $x=1.0$ 付近で急激に低下し始め、 $x=4.0$ 付近で最も低下しその後はやや上昇をする形状をなし、上層水が下層に連行される現象が顕著に見られる。実験の密度界面の位置は可視化により定められているため、多少のばらつきはあるが計算結果と良好に対応している。


図—9 一方向流における密度界面の比較
(右端の値: 無次元温度差)



図一〇 密度成層振動流場における計算結果
(左から流速・渦度・温度分布)

5.5 振動流密度成層場について

前述の結果より本計算手法を振動流場に適用した。図一〇 ($KC=6.28$, $Re=1047$) に位相 $3\pi/2$ の結果を示す。構造物と初期の密度界面高さが同じ ($h_2=1$) 場合、剥離渦が最大流速前後に構造物先端付近で発生することなど均質場の結果に類似している(図略)。しかし密度界面の影響を受けるために負の渦度は形成後の発達過程で上方に広がるのではなく、下方に押し込められた形状となる。さらに Ri 数の増加は、流れの転流時に密度界面付近に逆向き正の渦度をもたらすために、 $1/4$ 周期前に形成された負の渦度の領域は急激に減衰してしまう。しかしながら成層破壊は Ri 数によらず進行している。

一方、初期の密度界面の位置が高い場合 ($h_2=2.5$)、剥離渦の成長は均質場と同程度であり、負の渦度の値の高い領域も形成されている。本計算条件の KC 数では渦度値は極めて高い値を有するが、構造物周辺に限られ十分に成長しない。そのために密度界面付近の渦度は大きな値を有することができないので、 Ri 数の値が大きい場合は、成層破壊はそれほど進行しないと推定される。

6. ま と め

本研究では湧昇流の発生を検討するために、振動流中の均質場・密度成層場における流れの解析を実験および数値計算で行った。

湧昇流を促進させる物理的な要因の1つに剥離渦の存在が重要であることが明らかとなった。 KC 数の減少は中心部に高い渦度を有する剥離渦を局所的に形成させ、 KC 数が増大すると剥離渦の形成が広い領域におよぶために渦度値の高い領域が拡散する。そのために局所的に強い渦度を持つ剥離渦は、構造物周辺に速い残差流を形成させる。一方 KC 数の増加は残差流の値を減少させ、乱れの強い領域が流れの方向に拡がる。

乱流モデルを密度成層場に適用し、一様流における密度界面の形状を良好に再現した。また振動流場においては Ri 数が小さい場合には成層破壊が早く進行することを示した。また Ri 数に関わらず無次元下層水深が $h_2 < 1$ の時つまり密度界面より構造物が突き出ている場合、上下層の水塊の混合が比較的容易に促進させることが可能である。

湧昇流を促進させる上で重要な無次元量としては、 KC 数、 Ri 数、 h_2 であり、 h_2 がきわめて重要であることがわかった。今後は、マーカーの投入追跡などを通じて底層水塊の湧昇特性を検討する予定である。

参 考 文 献

- 明田定満・今村均・大竹臣哉・有富範伊 (1989): 湧昇流発生構造物の開発に係わる実験的研究, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 849-853.
- 上嶋英機 (1991): 潮流制御による瀬戸内海環境保全技術に関する研究, 中国工業技術試験所研究報告, 第8号, 142 p.
- 大野健一・増田善男・宮崎武男・高橋賢一・浮田基信・横辰之介 (1983): 湧昇流に関する水槽実験, 海洋科学技術センター報告書, Vol. 50-57.
- 辻本剛三 (1992): 成層化した振動流場に海底構造物を設置した場合の流れと密度界面について, 第47回土木学会年次講演会, pp. 1216-1217.
- 西出浩明・坂本格・道奥康治・辻本剛三 (1994): 振動流中の構造物周辺における局所流の実験, 第49回土木学会年次講演会, pp. 298-299.
- 藤原正幸・明田定満・武内智行 (1992): マルチレベル密度流モデルの開発と人工湧昇流への適用, 水工研技報, 水産土木14, pp. 13-35.
- 松井臣光・有富範伊 (1988): 湧昇流発生構造物「マリテックス」の流況予測法に関する考察-数値シミュレーションによる流況予測, 五洋建設技術研究所年報, Vol. 17, pp. 49-54.