

海底構造物による密度界面の上昇・混合過程に関する研究(2)

—3次元場での湧昇特性—

今村 均*・藤原正幸**・大竹臣哉***・明田定満****

1. ま え が き

沿岸海域において、栄養塩類に富んだ底層水塊が上層(有光層)に輸送される、あるいは上層水と混合して上層の栄養塩類濃度が高まっている海域は、海域の基礎生産量(プランクトン)の増大につながっている(続・仲尾, 1987)。そこで、人為的な手法として、海底に設置した構造物等によって地形性湧昇を促進させようとする認みがある(上北ら, 1986)。しかし、夏期等に発達する密度成層場では、下層水の上昇あるいは上下層水の混合が、密度界面によって抑制される懸念がある。

そこで、基礎的な研究として著者らは(1989)、海底構造物(衝立板)を不連続な密度成層場に設置した場合の密度界面の挙動を、2次元水理模型実験から求め、次のことを明らかにした。①密度界面の挙動は、界面形状から4つに類型化でき、界面の上昇や密度境界層・乱れ量の増大としてあらわれる。②これらの現象は、密度 Fd 数によって規定される。

本報は、今後の湧昇流漁場造成の計画・設計の資料とするために、3次元場に拡張した水理模型実験を行い、定量的に湧昇量を把握し、湧昇効果と構造物の規模に関して検討した結果を述べる。また、同時に行った数値計算や実海域観測結果との比較例について述べる。

2. 湧昇効果の定義

図-1に示すような一様な流れ U が存在する。不連続な密度勾配(上層密度 ρ_1 、下層密度 ρ_2 、上層層厚 h_1 、下層層厚 h_2)の成層場に、海底構造物(衝立板: 高さ D 、幅 B)が設置されている場合、密度界面の上昇と上下層間の混合が観測される。この現象を湧昇効果として以下のように評価する。

2.1 密度界面の上昇量

ある点 (x, y, z) で測定した密度の時系列データについて整理をする。

- ①時間平均値 : $\rho_{\text{mean}} = \sum \rho_i / n$
- ②時間変動値 : $\rho' = \sqrt{\sum (\rho_{\text{mean}} - \rho_i)^2 / n}$
- ③瞬間最大・最小値 : $\rho_{\text{max}}, \rho_{\text{min}}$

ここで、 ρ_i はある時刻 t の密度、 n はデータ個数である。

次に、密度界面の位置を密度の混合割合で定義する。

- ④界面上部 η_1 : 混合割合 20% ($\rho_1 : \rho_2 = 80 : 20$)
- ⑤界面中央 η : 混合割合 50% ($\rho_1 : \rho_2 = 50 : 50$)
- ⑥界面下部 η_2 : 混合割合 80% ($\rho_1 : \rho_2 = 20 : 80$)

そこで、密度界面 η が最も上昇した高さを界面最大上昇高さとするが、密度界面は時間的に変動しているため、時間平均値 h_{max} と瞬間最大値 h_{max}' を求める。

- ⑦界面上昇高さ : $h_{\text{max}}, h_{\text{max}}'$ (cm)

さらに、界面上昇体積を単位面積当たりで整理する。

- ⑧上昇量 : V (cm³/cm²)

$$V = \int_{Y=0}^{Y=B/2} \left(\int_{X=0}^{X=X_{\text{END}}} \Delta h(x, y) dx / X_{\text{END}} \right) dy / (B/2)$$

ここに、 $\Delta h(x, y) = h(x, y) - h_2$ である。

2.2 上下層の混合量

上下層間の混合量を密度界面の混合層の厚さと、時間的な変動量から定義する。

- ⑨混合域(界面境界層の厚さ) 1 : $\eta_1 - \eta_2$

さらに、混合域体積を単位面積当たりで整理する。

- ⑩混合量 : $1V$ (cm³/cm²)

$$1V = \int_{Y=0}^{Y=B/2} \left(\int_{X=0}^{X=X_{\text{END}}} 1(x, y) dx / X_{\text{END}} \right) dy / (B/2)$$

次に、乱れ量を密度差 $\Delta \rho$ の割合で示し、かつ、単位体積当たりで整理する。

- ⑪乱れ量 : ΦV (%・cm³/cm³)

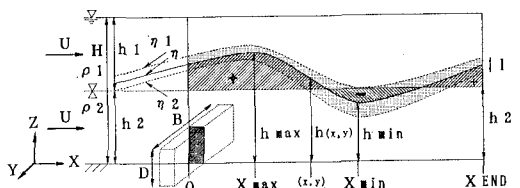


図-1 実験諸元と湧昇効果の定義

* 正会員 五洋建設技術研究所 土木技術開発室

** 正会員 工修 水産庁水産工学研究所 漁場水理研究室

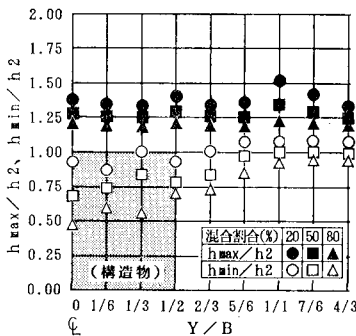
*** 正会員 工修 五洋建設技術研究所 土木技術開発室

**** 正会員 水産庁水産工学研究所 漁場施設研究室

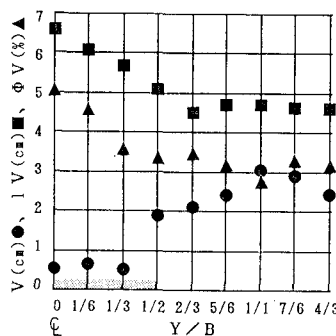
表-1 実験条件

実 験 目 的	水 深 cm		密 度 g/cm ³			流速 cm/s U	構造物 規模 cm		密度 F_d 数	
	h_1	h_2	ρ_1	ρ_2	$\Delta\rho$		D	B		
影響範囲		20	20	0.9998	1.0011	0.0013	2.5	20	30	0.70
密度 成層場 条件の 影響	流速の 影響	20	20	0.9991	1.0003	0.0012	0.8	10	30	0.24
		20	20	0.9991	1.0003	0.0012	1.7	10	30	0.49
		20	20	0.9991	1.0002	0.0011	2.5	10	30	0.76
		20	20	0.9991	1.0003	0.0012	3.8	10	30	1.14
		20	20	0.9991	1.0004	0.0013	4.3	10	30	1.23
	上下密度差の 影響	20	20	0.9996	1.0037	0.0042	2.5	10	30	0.39
		20	20	0.9995	1.0025	0.0030	2.5	10	30	0.46
		20	20	0.9995	1.0015	0.0020	2.5	10	30	0.56
		20	20	0.9994	1.0009	0.0016	2.5	10	30	0.64
		20	20	0.9994	1.0007	0.0013	2.5	10	30	0.70
		20	20	0.0094	1.0005	0.0012	2.5	10	30	0.78
		20	20	0.9999	1.0007	0.0008	2.5	10	30	0.87
		20	20	0.9998	1.0003	0.0005	2.5	10	30	1.08
	層の 厚影 比響	20	20	0.9991	1.0026	0.0035	2.7	10	30	0.46
		25	15	0.9997	1.0028	0.0030	2.6	10	30	0.50
		30	10	1.0005	1.0034	0.0030	2.3	10	30	0.49
構造物規模 の 影響	高さの 影響	20	20	0.9993	1.0010	0.0016	2.5	0	0	0.63
		20	20	0.9994	1.0009	0.0016	2.5	5	30	0.64
		20	20	0.9994	1.0009	0.0016	2.5	10	30	0.64
		20	20	0.9994	1.0009	0.0015	2.5	15	30	0.65
		20	20	0.9994	1.0009	0.0015	2.5	20	30	0.65
		20	20	0.9994	1.0009	0.0015	2.5	25	30	0.66
		20	20	0.9994	1.0009	0.0015	2.5	30	30	0.66
	幅の 影響	20	20	0.9993	1.0006	0.0013	2.5	0	0	0.71
		20	20	0.9994	1.0005	0.0011	2.5	10	10	0.75
		20	20	0.9994	1.0005	0.0011	2.5	10	20	0.75
		20	20	0.9994	1.0005	0.0012	2.5	10	30	0.74
		20	20	0.9994	1.0005	0.0012	2.5	10	40	0.74
		20	20	0.0093	1.0006	0.0012	2.5	10	50	0.72
		20	20	0.9993	1.0006	0.0012	2.5	10	100	0.73

$$\phi V = \int_{Y=0}^{Y=B/2} \left(\int_{X=0}^{X=X_{END}} \left(\int_{Z=0}^{Z=H} (\rho' / \Delta\rho \times 100) \right. \right. \\ \left. \left. \times dz \right) dx / X_{END} \right) dy / (B/2)$$



(1) 界面上昇・下降高さ



(2) その他の湧昇効果

図-2 構造物幅方向の湧昇効果

3. 水理模型実験

3.1 実験方法および実験条件

実験は淡・塩水2系統の循環水路(長さ9m, 高さ50cm, 幅1m)に衝立板を設置し, 上下一様な流れ場をあたえ, パルプの開閉(流量制御)にて流速の調整をおこなった.

密度は, 導電率計(塩分濃度)と水温計で測定した. 測点はX軸: -50~200cm (=X_{END})の間を9分割, Y軸: 0, B/2, B/2+15cmの3点, Z軸: 8等分割(全測点216点)とした. なお, 各点の測定時間は30秒間, サンプリングは1秒間隔とした.

実験条件は, 全水深 H=40cm 一定とし, 表-1に示すような目的別に諸条件を設定した. なお, 密度 F_d 数は

$$\text{密度 } F_d = U / \sqrt{g(\Delta\rho/\rho_2)(h_1 h_2 / H)}$$

とする. また, $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$ とする.

①構造物の影響範囲: Y方向の測定を詳細(Y/B=0~4/3 (1/6ピッチ))におこない, 各XZ断面の密度分布を求めた. ②密度成層場条件の影響: 密度成層場をあらわす無次元量としての密度 F_d が, 湧昇量にどう影響するかを検討する. 支配因子として U , $\Delta\rho$, h_1/h_2 をそれぞれ変化させ湧昇量との関係を検討する. ③構造物規模の影響: 構造物の規模を示す因子 D と B について, 湧昇量との関係を検討する.

3.2 実験結果および考察

a) 構造物の影響範囲

界面の現象として, 構造物背後に明瞭な内部跳水(界面の凹み)が生じていた場合の各XZ断面毎の湧昇効果を整理した結果を図-2に示す.

密度界面の上昇, 下降について(図①): 密度界面の最大上昇高さ(h_{max}/h_2 : 黒塗り)は幅方向(Y/B)でほとんど変化がなく, ほぼ一定値(例えば■ $\div$ 1.25)である. 一方, 最大下降位置(h_{min}/h_2 : 白抜き)は, 中央断面(Y/B=0)で界面の下降が最も大きく, 構造物の外側(Y/B=1/2)に行くほど下降が徐々に小さくなり, 構造物から外れると一定(例えば□ $\div$ 1.00)となる.

その他の湧昇効果量について(図②): 上昇量(V: ●)は構造物背後(0<Y/B<1/3)では小さく, 構造物から外れるにつれて増加する. 混合量(1V: ■)と乱れ量(ϕV : ▲)は, 中央断面で最も大きく, 外

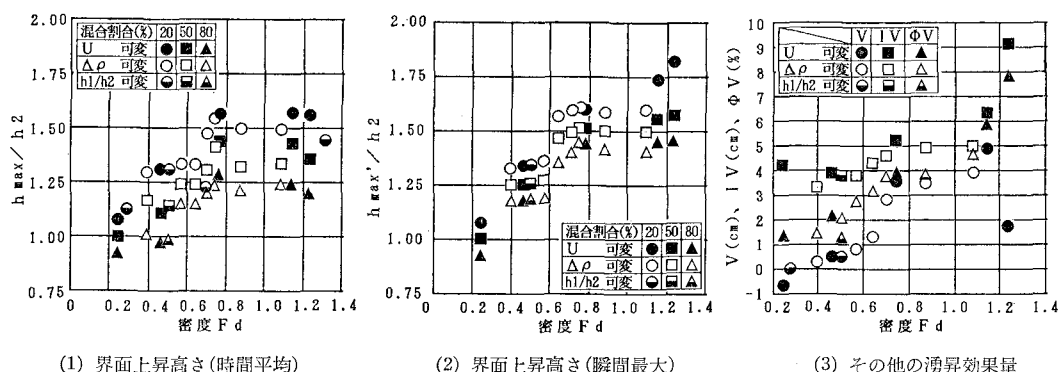


図-3 密度数と湧昇効果の関係

側に行くほど徐々に小さくなり、構造物から外れると一定である。

以上から、構造物による湧昇効果の影響範囲は、構造物中央断面が最大で、外側に行くに従って徐々に小さくなり、構造物から外れると影響はほとんどなくなることがわかる。

b) 密度成層場条件と湧昇量の関係

密度成層場をあらわす各因子 U , $\Delta\rho$, h_1/h_2 を可変した場合の湧昇量を、密度 Fd 数で整理した結果を図-3に示す。図①~③とも各因子を変えても傾向が同じことから、湧昇量は密度 Fd 数で規定されることがわかる。

密度界面の上昇高さについて：時間平均(図①)の上昇高さは、密度 $Fd \approx 0.7$ で最大(混合割合 20% で $h_{max}/h_2 \approx 1.6$)となり、それ以上密度 Fd 数が大きくなっても、さらに界面の上昇はない。しかし、瞬間的(図②)には、界面上部(混合割合 20%)がさらに上昇する傾向である。

その他の効果量について(図③)：ほぼ密度 Fd 数に比例して、増大している傾向である。

以上から、各湧昇量は密度 Fd 数に比例して増加する傾向であるが、界面上昇高さが密度 $Fd \approx 0.7$ で最大と

なり、それ以上密度 Fd 数を大きくしても、さらに界面の上昇が望めないことより、効果的な構造物の設置場の条件は、密度 $Fd \approx 0.7$ が最適と考えられる。

c) 構造物規模と湧昇効果の関係

構造物の規模(高さ D , 幅 B)と湧昇量の関係について検討する。

①高さの影響：構造物高さを下層層厚との比 D/h_2 で整理する。界面の上昇高さについて(図-4 ①)：全体的な傾向は、構造物が高いほど界面上昇高さも高くなり、 $D/h_2 = 1.5$ では境界層(混合割合 20% と 80% の差)が増大している。特に、平均的(黒塗り)には、構造物が下層を突き出る高さ($D/h_2 \geq 1.0$)で上昇が大きい。また、瞬間的(白抜き)には、 $D/h_2 \geq 0.5$ で上昇が大きい。

その他の湧昇量について(図-4 ②)：界面上昇量($V(\bullet)$)と混合量($1V(\blacksquare)$)は、ばらつきがあり明瞭ではないが、構造物が下層より高ければ、増大する傾向である。また、乱れ量($\Phi V(\blacktriangle)$)は全体的に D が高いほど徐々に大きくなる傾向である。

要以上より、効果的な構造物の高さ D は、下層層厚 h_2 と同等($D \approx h_2$)の規模が望ましいが、瞬間的な界面上昇高さを考慮すると、少なくとも $D/h_2 \geq 0.5$ に設定するのがよい。

②幅の影響：構造物幅を高さとの比 B/D で整理する。

界面上昇高さについて(図-5 ①)：全体的に幅が長いほど上昇高さも高くなる傾向である。特に、平均的には混合割合によって傾向が異なり、混合割合 20% ($\bullet$) では $B/D \geq 2$ で、混合割合 50%, 80% ($\blacksquare$, $\blacktriangle$) は $B/D \geq 5$ で上昇が大きい。また、瞬間的には、混合割合 20% ($\circ$) では $B/D \geq 1$, 混合割合 50%, 80%

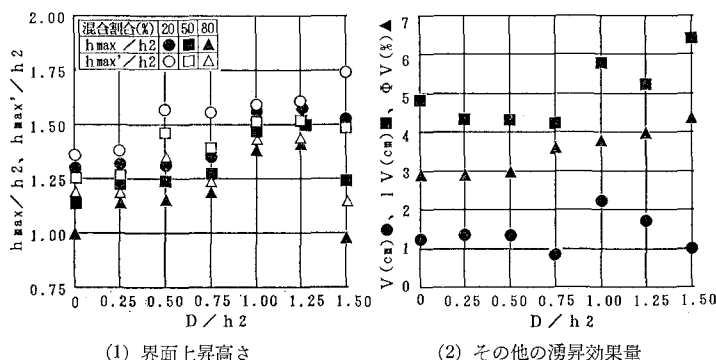


図-4 構造物高さと湧昇効果の関係

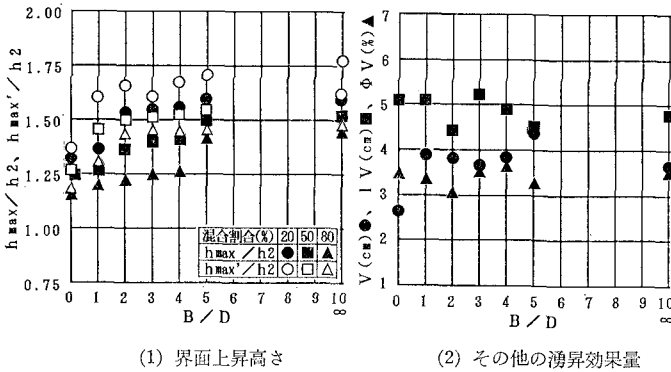


図-5 構造物幅と湧昇効果の関係

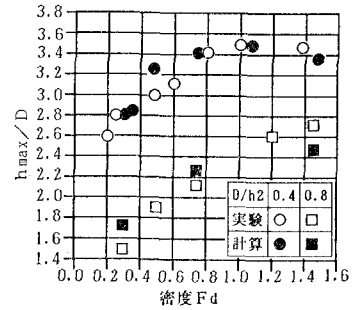


図-6 水理・数値実験結果の比較

(□, △) では $B/D \geq 2$ で上昇が大きい。

その他の湧昇量について(図-5 ②): 界面上昇量は、ばらつきがあり、明瞭ではないが、 $B/D \geq 1$ で上昇量が大きい。また、混合量と乱れ量については、幅による影響がうかがえない。

以上より、効率的な構造物の幅は、 $B/D \geq 5$ の規模が望ましいが、瞬間的な界面上昇高さを考慮すると、少なくとも $B/D \geq 2$ に設定するのがよい。

4. 数値計算

成層場に適用可能なマルチレベル密度流モデルを開発し、2次元水理模型実験結果(明田ら, 1998)との比較によりモデルを検証する。さらに、3次元モデルへ適用して、構造物周辺の水理構造を検討する。

平面近似された回転地球上の粘性非圧縮流体で、鉛直方向には静力学平衡、f-Plane 近似が成立することを仮定した運動量・質量・熱量・塩素量の保存式と状態方程

式(Knudsen 式)を基礎方程式とし、計算対象海域を鉛直水平に分割し、各セルで基礎方程式を積分した式が当モデルの基礎方程式(中田ら, 1983)となる。基礎方程式の離散化には、有限差分法を用いる。

① 2次元モデル条件(変数諸元は 図-1 参照)は、計算領域: $X \times H = 240 \text{ m} \times 40 \text{ m}$, 格子サイズ: $4 \text{ m} \times 2 \text{ m}$, 成層条件: $h_1/h_2 = 20/20, 30/10(\text{m})$, $\Delta \rho = 0.003, 0.006 \text{ g/cm}^3$, $U = 20, 40, 46, 80, 100 \text{ cm/s}$, 密度 $Fd = 0.26 \sim 1.5$, 構造物規模: $D = 8 \text{ m}$ とする。

② 3次元モデル条件は、計算領域: $X \times Y \times H = 2.4 \text{ km} \times 480 \text{ m} \times 40 \text{ m}$, 格子サイズ: $30 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 2 \text{ m}$, 成層条件: $h_1/h_2 = 20/20(\text{m})$, $\Delta \rho = 0.0015 \text{ g/cm}^3$, $U = 60 \text{ cm/s}$, 密度 $Fd = 1.56$, 構造物規模: $D = 10 \text{ m}$, $B = 120 \text{ m}$ とする。なお、水平渦動粘性係数と水平拡散係数 $= 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, 鉛直拡散係数 $= 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ とした。

2次元の水理模型実験および数値実験から得られた密度界面の最大上昇高さや密度 Fd 数の関係を 図-6 に示

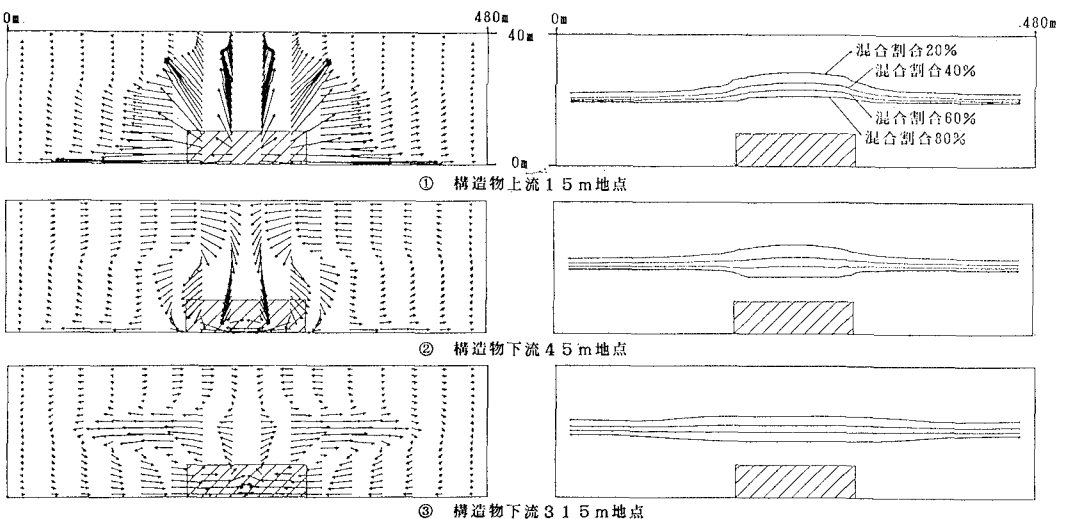


図-7 数値計算による流況及び密度分布

す。内部跳水が発生する密度 Fd 数 0.5 付近では、水理現象そのものが基礎方程式を定式化した際の仮定、静水圧近似を満足しないため、実験値と計算値に差が生じる。また、密度 Fd 数が大きくなると、計算値より実験値の方が大きくなる傾向であるが、これは、数値計算では拡散現象は移流による効果が大として、拡散係数=0 に固定したためである。しかし、ほぼ本モデルでの効果予測が可能であることがわかる。

次に、3次元場での流況と密度分布を図-7に示す。流下してきた水塊は衝立板に衝突し、構造物高さの上半分の水塊が構造物の上方を越すように流れ、下半分の水塊は構造物側方を迂回するように流れる(図①)。その後、上方を越してきた水塊は、流下するに従い構造物から離れるように外側に流下する(図②)。それを補うように最下層の水塊が、構造物背後に回り込み構造物中央ラインで上昇流となる(図③)。この上昇流は流下しながら、密度界面を進んでいく。この上昇流には密度界面を持ち上げるだけのエネルギーはないが、海底面付近から上昇流が発生するため、密度界面付近まで底層の物質が運ばれる。

5. 実海域の観測例

実際の沿岸海域での密度成層状態と密度界面の挙動として、愛媛県宇和島沖での水質調査結果例(大竹ら, 1991)を図-8に示す。

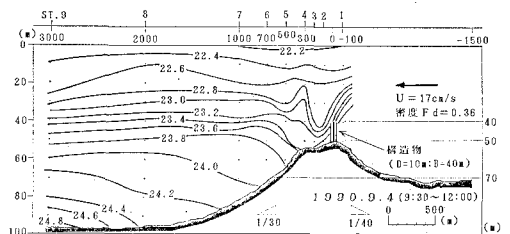


図-8 実海域観測結果例(密度 σ_t 鉛直断面)

水深 100 m ~ 70 m の斜面に、高さ 20 m の瀬がある海底地形の上に衝立状の構造物(高さ 10 m、幅 20 m を 4 基)が設置されている。ここで、構造物の上流での成層状態($U=17$ cm/s, $\Delta\rho=0.002$ g/cm³, $H=50$ m, $h_1=h_2=25$ m)から、密度 Fd 数を算出すると 0.36 となる。構造物背後 300 m にかけて、内部跳水現象がうかがえ、実験結果(明田ら, 1898)と類似した密度界面の挙動(界面波や内部跳水)が実海域でも観測されている。

6. あとがき

本研究では、不連続な密度成層流場に、海底構造物(衝立板)を適用した場合の密度界面の上昇と上下層の混合について、水理模型実験、数値計算、実海域観測例から検討した。主要な結果を列挙すると以下となる。

①構造物による湧昇効果の影響範囲(構造物幅方向)は、構造物の中央断面が最大で、側壁にいくに従って徐々に小さくなり、側壁から外れると効果がなくなる。

②湧昇効果は密度 Fd 数によって規定され、効果的な構造物の適用条件場は密度 $Fd \geq 0.7$ である。

③また、効果的な構造物の規模は、少なくとも $D/h_2 \geq 0.5$, $B/D \geq 2$ に設定するのが良い。(h_2 : 下層の層厚)

④数値計算から、2次元場での密度界面最大上昇高さについて本モデルで予測が可能である。また、3次元場での計算から、構造物により発生した湧昇流の水理構造が明らかとなった。

⑤実海域でも実験結果と類似した密度界面の挙動が観測された。

今後、物理的な立場としては、連続的な密度成層分布場や往復流場での湧昇効果について研究を推進する必要がある。また一方で、今回の物理的な湧昇効果を生物的效果と関係づける(和田ら, 1988)ことによって、生物生産量を踏まえたうでの湧昇効果を評価しなければならない。

最後に、実海域調査データについては愛媛県が実施している『湧昇流漁場開発事業』の一環として行われたもので、データを提供していただいたことに謝意を表する次第です。また、本研究は農林水産省官民交流共同研究として実施した『地形性湧昇流を利用した上下混合機構の解明に関する研究』の一部であることを併記する。

参考文献

- 明田定満・今村 均・大竹臣哉・有富範伊 (1989): 海底構造物による密度界面の上昇・混合過程に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 849-853.
- 上北征男・浅岡邦一・森井伸正・大竹臣哉 (1986): 湧昇流発生構造物の開発に係る実験的研究, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 342-347.
- 大竹臣哉・今村 均・山本晴樹・近藤浩右 (1991): 人工湧昇流漁場の実証実験—動・植物プランクトンについて—, 日本水産工学会学術講演会論文集, 平成 3 年度, pp. 95-96.
- 横辰之介・中尾 徹 (1987): 天然湧昇域の海洋環境特性について, 水産土木, Vol. 22, No. 2, pp. 41-58.
- 中田喜三朗・堀口文男・田口浩一・瀬戸口泰史 (1983): 追波湾の三次元潮流シミュレーション, 公害資源研究所彙報, 第 12 巻, 第 3 号, pp. 17-36.
- 和田構造・中島 靖・梅沢信敏・武内智行・桑原伸司 (1988): 浚渫土砂により形成されたマウンドの湧昇流発生機構とその魚礁効果, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 772-776.