

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

明田定満*・今村 均**・大竹臣哉***・有富範伊***

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（續・中尾, 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試みがある（上北ら, 1986）。しかし、夏期等によく存在する密度成層場において、下層水の上昇あるいは上下層水の混合については、その効果が密度界面によって抑制される懸念がある（例えば玉井, 1980）。

一方、密度成層場における研究は、これまで海洋学的な立場や、界面の混合、連行に関する原理や機構に焦点をおいたものがほとんどであり（水理委員会密度流研究小委員会, 1975；玉井, 1987）、湧昇の評価、効果やその促進を目的としたものは少ない（Long, 1954）。

そこで、本研究では、湧昇を密度界面の上昇・混合によって下層水内の物質がより上層へと輸送されることと定義し、そして、構造物を基本的形状である衝立壁とした場合の不連続な密度成層流場での密度界面形状の挙動と、その湧昇効果について二次元水理模型実験を実施した。

2. 実験概要

実験は図-1 に示すように、長さ 14 m、高さ 50 cm、幅 20 cm の側面ガラスばりの水路に、あらかじめ淡水、塩水による不連続な密度成層場を作成し、構造物を移動させることにより相対的に一樣な流れ場をあたえた。なお、構造物模型は、水路上部に設置した等速で移動する曳航台車から降ろした底盤上に設置した。

ここでの実験諸元は図-2 に示すように、全水深 H 、上層淡水厚さ h_1 、下層塩水厚さ h_2 、構造物高さ D 、構造物の移動速度 U とする。また、上層密度を ρ_1 、下層

密度を ρ_2 とする。

密度界面形状の可視化は、下層塩水をウラン染料で均一に着色した。また、各層の流況の可視化は、全水深を 5 層に分割して、各種染料を構造物前方から注射針（ $\phi=1\text{ mm}$ ）にて放出した。解析は可視化した写真とビデオから、各染料の挙動を $X=5\text{ cm}$ ピッチで判読した。さらに、代表的な現象については、導電率計（塩分）・水温計より鉛直密度分布を、また、二次元電磁流速計より主要位置での流速を定量測定した。

3. 実験条件

実験条件は、全水深 $H=40\text{ cm}$ 、構造物高さ $D=8\text{ cm}$ 、 $(H/5)$ を一定とし、可変因子として、i) 密度成層強度を変化させるため、上下密度差 $\Delta\rho=0.006, 0.003, 0.001\text{ g/cm}^3$, ii) 流れ条件を変化させるため、構造物の

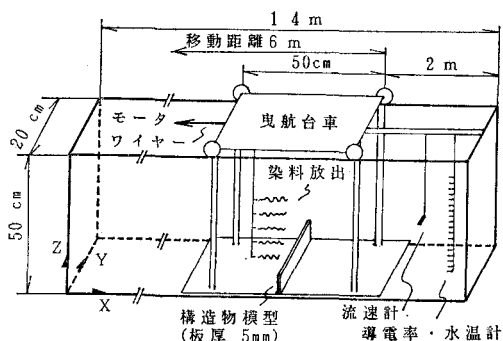


図-1 実験装置

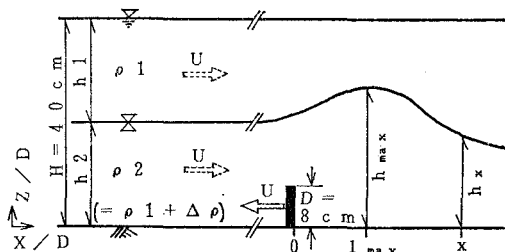


図-2 実験諸元

* 正会員 水産庁水産工学研究所 漁場施設研究室
 ** 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 土木技術開発室
 *** 正会員 工修 五洋建設(株) 技術研究所 土木技術開発室

移動速度 $U=1, 2, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 20$ cm/s, iii) 構造物の規模と相対的に成層厚さを変化させるため、構造物高さと同層塩水層厚の比 $h_2/D=2.50, 1.25, 0.63$ を用いた。

4. 密度界面形状

定性的な密度界面の挙動は、可視化実験結果から求める。そこで、密度界面の形状特性として、密度界面の最大上昇高さ $h_{\max}$ と、その位置 $l_{\max}$ について現象を整理すると以下のように類型化できる。

I 型: $l_{\max} \ll 0$ 構造物前方が盛り上がり、ほとんど界面変動がない (図-3 (1))。

II 型: $l_{\max} \approx 0$ 構造物直後で界面が急激に下降し、上層水が下層へ連行される。あるいは内部跳水がうかがえる (図-3 (2))。

III 型: $l_{\max} > 0$ 構造物から剝離した渦により背後で界面が上昇する (図-3 (3))。

IV 型: $l_{\max} \gg 0$ 基本的には III 型と同様であるが、構造物背後で再度界面の上昇がおり、周期的に界面を突き破ろうとする渦がうかがえる (図-3 (4))。

なお、I 型を除いては、いずれの場合も、底層の流脈線は下層内でよく混合しており、下層の物質が界面まで到達する。特に、IV 型での下層染料の拡散は、均質な密度場での拡散状況 (上北ら, 1986) と類似している。

ここで、構造物前方での密度成層場条件を表す無次元パラメータとして、主流速度 U と、長波としたときの密度界面の波速 C との比を密度 Fd 数と定義する。

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

$$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$$

また、 Re 数を以下に定義して、

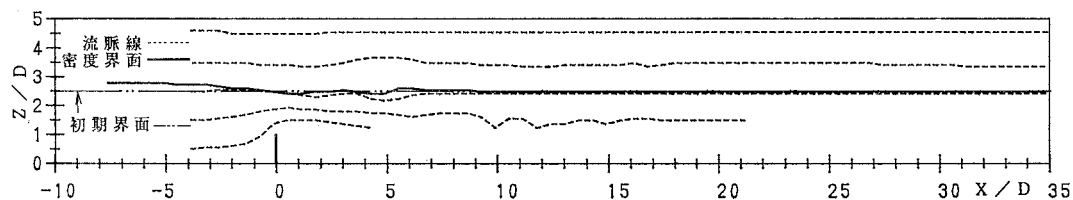


図-3 (1) 密度界面と各層流脈線 I 型 (密度 $Fd=0.26$ $U=2$ cm/s $\Delta\rho=0.006$ g/cm³ $h_2/D=2.5$)

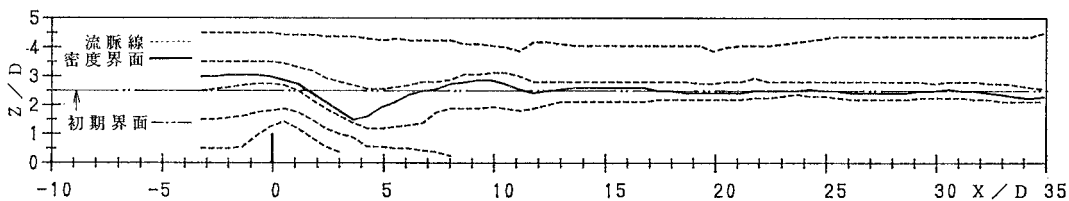


図-3 (2) 密度界面と各層流脈線 II 型 (密度 $Fd=0.68$ $U=5$ cm/s $\Delta\rho=0.006$ g/cm³ $h_2/D=2.5$)

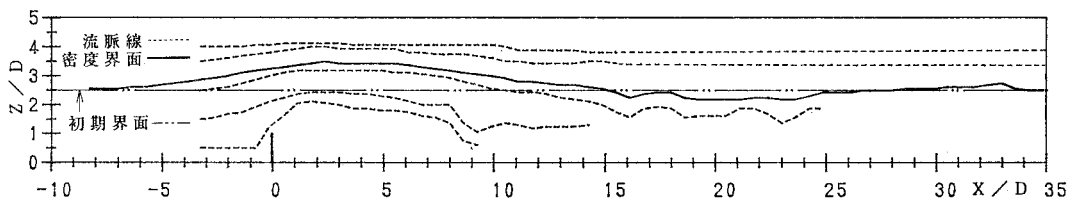


図-3 (3) 密度界面と各層流脈線 III 型 (密度 $Fd=1.32$ $U=10$ cm/s $\Delta\rho=0.006$ g/cm³ $h_2/D=2.5$)

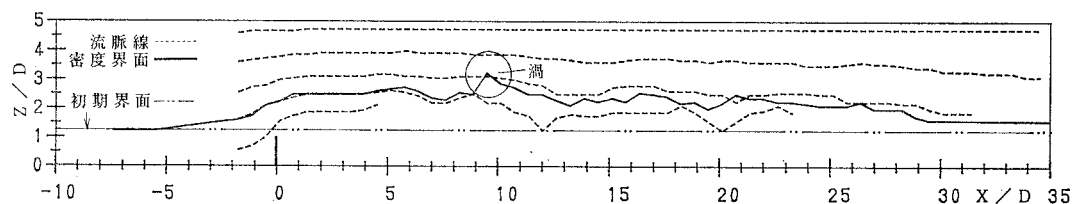
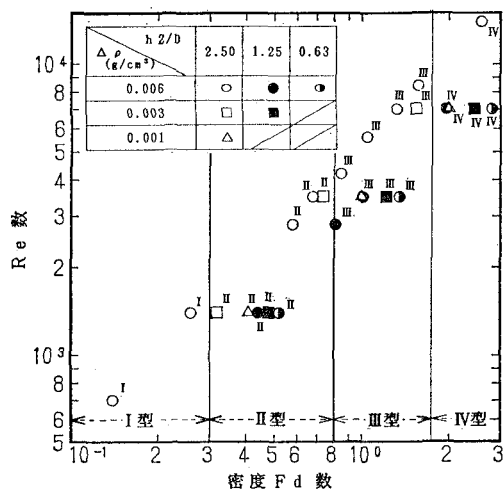
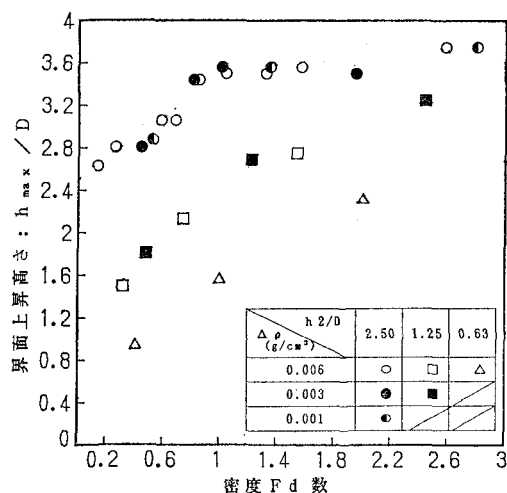
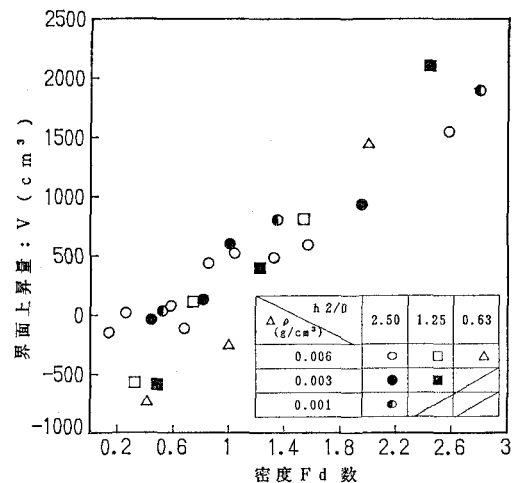


図-3 (4) 密度界面と各層流脈線 IV 型 (密度 $Fd=2.44$ $U=10$ cm/s $\Delta\rho=0.003$ g/cm³ $h_2/D=1.25$)


図-4 密度界面形状と密度 Fd 数, Re 数の関係

図-6 最大上昇高さと密度 Fd 数

図-7 界面上昇量と密度 Fd 数

Re 数 $= U \cdot D / \nu$ ν : 水の動粘性係数

これらのパラメータについて, 類型化した界面形状を整理すると図-4 となる.

図より, 密度界面形状は, 密度 Fd 数で説明でき, 密度 Fd 数の範囲によって,

$0 < I$ 型 $< 0.3 < II$ 型 $< 0.8 < III$ 型 $< 1.8 < IV$ 型となる.

なお, ここでの密度界面の定義を明確にするために, 可視化から判読した密度界面と, 実際に定量測定した鉛直密度分布との比較例を図-5 に示す. ここで図中の密度は, $\sigma_t = (\rho - 1) \times 10^3$ で表示している.

これより以上述べてきた密度界面の定義は, 一般的な密度勾配の最も大きい位置を示すものではなく, 塩分密度が上昇しはじめる位置である. またこの位置は, 前述した下層染料の拡散状況から, 下層物質が到達可能な最大上昇位置でもある.

5. 上昇・混合過程

(1) 密度界面の上昇高さと上昇量

密度 Fd 数と, 構造物背後での範囲 $X=0 \sim 35D$ にお

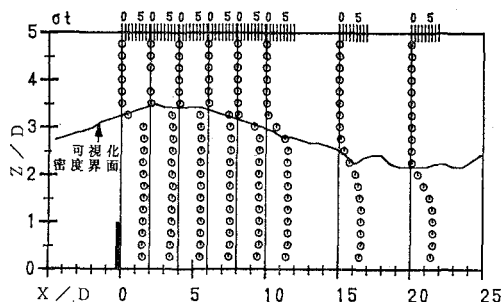


図-5 密度界面の可視化と実測結果の比較

ける, 最大界面上昇高さ; h_{max}/D および, 単位幅当たりの界面上昇量; $V \text{ cm}^3$ (初期基準界面からの界面変位量の積分値) との関係を図-6, 図-7 に示す.

ここに, 単位幅; B とすれば,

$$V = \int_{X=0}^{X=35D} (h_x - h_2) dx \cdot B$$

となる.

図-6 より, 最大界面上昇高さ h_{max}/D は, 層厚比 h_2/D ごとに着目すると, それぞれ密度 Fd 数の増加によって増している. また, $h_2/D=2.5$ の場合に, その増加傾向は, 密度 Fd 数 $0 \sim 1.8$ 程度までは勾配が大きい, 1.8 以上では, 増加が鈍化している. 同様に, $h_2/D=1.25$ や, $h_2/D=0.63$ についても同じ傾向が予測される.

界面上昇量については、図-7 より、層厚比 h_2/D にあまり係わらず、密度 Fd 数に正比例している。また、構造物背後の近傍 ($X/D=0\sim35$) で界面上昇 ($V\geq 0$) を期待するには、密度 Fd 数が約0.7以上必要であることがわかる。逆に、密度 Fd 数が約0.7以下では、構造物背後の近傍においての界面上昇は、期待できない。

ここで、上昇量が連続条件を満足していないのは、解析範囲を構造物後方 $X/D=0\sim35$ に限定しており、密度分布を定量的に考慮していないためである。

(2) 密度界面の混合

構造物後方 $X=0, 2D, 4D, 6D, 8D, 10D, 15D, 20D$ での鉛直密度分布例と、主要点での流速値を図-8 (1)~(4) に示す。

構造物がない場合では、密度 Fd 数が大きい(密度

Fd 数=1.32) にもかかわらず鉛直密度分布がほぼ全域で一様であり、上下層間の混合はほとんどない。

しかし、構造物を設置した場合は、密度 Fd 数の増加にともない界面変動、境界厚さ、および時間的変動が、増大している。特に、密度 Fd 数=1.32 での密度成層界面の混合現象は、界面の上昇後に、密度境界層厚さ、時間的に依存する乱れの増大として現れている。

そこで、可視化からは評価できなかった混合域; A と、乱れ量; Φ について以下に定義する。

$$A = \int_{X/D=0}^{X/D=20} (l_z/D) d(x/D)$$

l_z ; 密度境界層の厚さ (cm)

$$\Phi = \int_{X/D=0}^{X/D=20} \int_{Z/D=0}^{Z/D=5} (\rho'/\bar{\rho}) d(z/D) d(x/D)$$

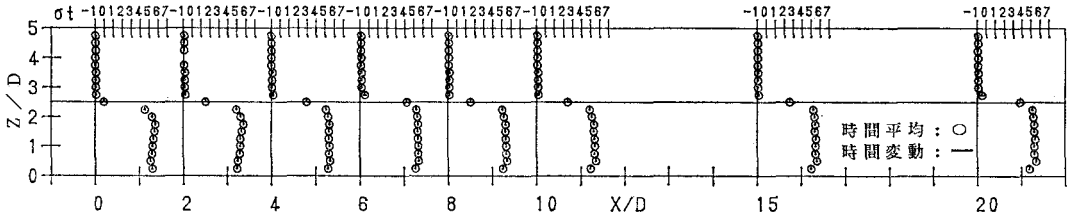


図-8 (1) 鉛直密度分布 (密度 $Fd=1.32$ $U=10$ cm/s $\Delta\rho=0.006$ g/cm³ 構造物なし)

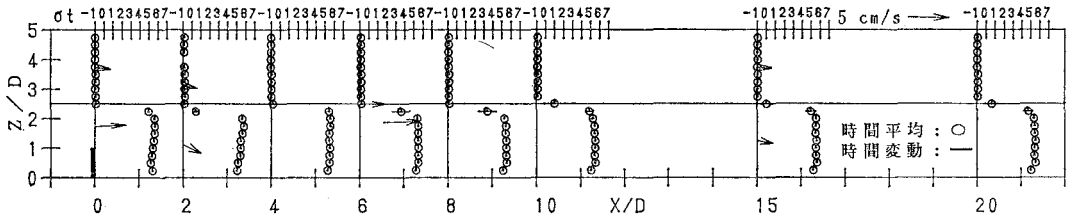


図-8 (2) 鉛直密度分布 (密度 $Fd=0.26$ $U=2$ cm/s $\Delta\rho=0.003$ g/cm³ $h_2/D=2.5$)

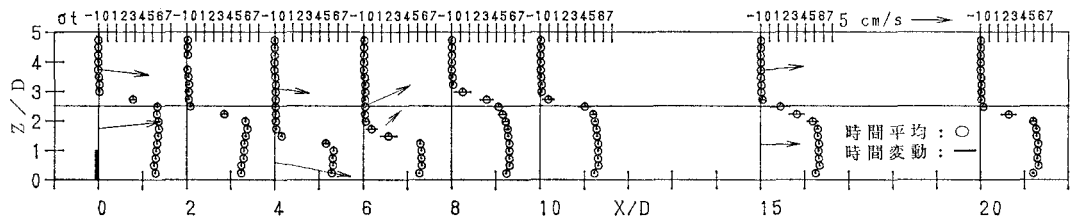


図-8 (3) 鉛直密度分布 (密度 $Fd=0.68$ $U=5$ cm/s $\Delta\rho=0.006$ g/cm³ $h_2/D=2.5$)

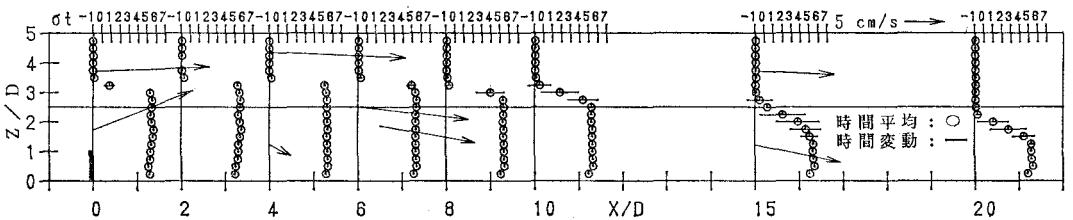
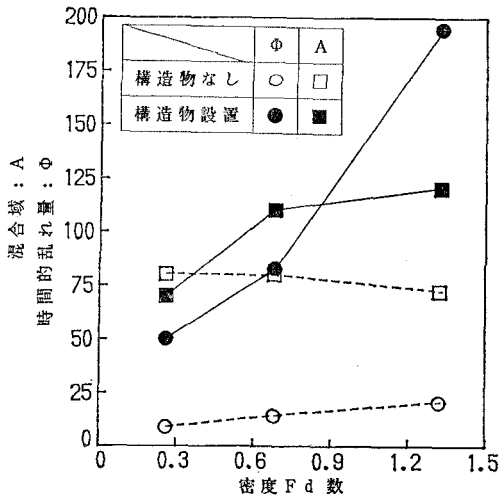


図-8 (4) 鉛直密度分布 (密度 $Fd=1.32$ $U=10$ cm/s $\Delta\rho=0.003$ g/cm³ $h_2/D=2.5$)


図-9 密度界面の混合と密度 Fd 数

ここに、

$$\rho'; \text{ 密度の時間的変動量 } \rho' = \sqrt{\sum (\rho_t - \bar{\rho})^2 / N}$$

$$\bar{\rho}; \text{ 密度の時間平均 } \bar{\rho} = \sum \rho_t / N$$

$$N = \text{移動距離 2m 間のデータ数 } (dt = 1 \text{ sec})$$

である。

これより、図-9 に示すように、密度 Fd 数との関係は、構造物がない場合と比較すると、混合域（境界層厚）および、乱れによる混合が促進されており、密度 Fd 数に比例して両効果とも増大している。

6. あとがき

本研究では、湧昇を密度界面の上昇・混合によって下層水内の物質がより上層へと輸送されることと定義し、海底構造物を利用した場合の不連続な密度成層流場での密度界面の現象を二次元水理模型実験で解明した。

主要な結果を以下に列挙すると、

- 1) 密度界面の挙動は、界面形状により4つに類型化できる。
 - 2) 構造物による湧昇効果は、密度界面の上昇と、境界層厚さや、乱れの増大による混合として現れる。
 - 3) またこれらは、密度 Fd 数によって説明される。
- 等が明らかとなった。

今後は、生物生産を踏まえたうえで(和田ら,1988),湧昇効果を定量的に評価しなければならないが、一方で、物理的な観点からも、3次元場での現象や湧昇・混合の促進手法について、より研究を推進する。

最後に、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し、本実験を実施するにあたり尽力下さった橋本健君（元東京水産大学学生）および、御助言頂いた中村充教授（東京水産大学）等の関係各位に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 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わる実験的研究, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 342~347.
- 水理委員会密度流研究小委員会 (1975): 成層密度流の界面現象 (1), (2), 土木学会論文報告集, 第242, 243号 pp. 73~90, 99~109.
- 玉井信行 (1980): 密度流の水理, 新体系土木工学, 22, 土木学会編.
- 玉井信行 (1987): 連行概念の統一化と連行係数の評価法, 土木学会論文集, 第381号/II-7, pp. 1~11.
- 續辰之介・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.
- 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.
- Long, R. R. (1954): Some Aspects of the flow of stratified fluids II, —Experiments with a two-fluid system, Tellus, Vol. 6, No. 2, pp. 97~115.