

開放性成層水域における吹送密度流に関する研究

尹 鍾星*・中辻啓二**・村岡浩爾***

1. はじめに

風のせん断力によって生じる吹送流は水域における物質の拡散に重要な影響を与える。風外力は時には密度成層を破壊し、鉛直混合を促進する役割を果たす。また、時には、それは底層近くの貧酸素水塊の湧昇を誘起し、沿岸海域の水質や水産に重大な変化を引き起こす。後者の典型例は東京湾での青潮である。

尹ら（1993）は閉じた水路を用いて吹送密度流の水力実験（以下、風下側閉鎖境界の実験と称する）を行い、Wedderburn 数 W_e を用いて表示すれば、密度界面が水表面まで湧昇する範囲は $W_e \leq 4$ であることを指摘した。しかし、その実験は境界が閉ざされた流域、いわば湖を対象にした実験である。水路の閉鎖性によって上層内に生じる循環流が流動や混合に与える影響が大きい。開放された湾口をもつ海域での水力挙動とは若干異なるものと想像される。

本研究では、循環流を抑えることを目的として、下流端に容量の大きい水槽を設置した実験装置を用いて実験を行った（以下、風下側開放境界の実験と称する）。淡水と塩水で作った二成層状態の水表面に風外力を作用させる密度流の実験を行った。検討した内容は以下の項目である。①下流端の有無による吹送密度流の流動や湧昇現象の差異に関する検討、②吹送流が水平や鉛直方向への物質の輸送や密度境界の挙動に及ぼす影響の把握、そして、③青潮現象、換言すれば、下層の高密度な流塊の湧昇現象の発生の予想である。

2. 既往の研究

沿岸海域を対象とした吹送密度流の研究は数多く報告されているが、それらは主として密度界面を通しての物性や流体の乱流構造を中心に研究されてきた。（例えば、Kranenburg, 1984；鶴谷ら, 1984 等）しかしながら、これらの研究はあくまで密度界面を通しての一次元的な鉛直混合に着目しており、一次元水槽あるいは循環水路を

用いて実験されてきた。したがって、風上側での界面の湧昇機構や流動特性の水理学的な関係について議論された研究例は少ない。

一方、海域での水産に関連して湧昇現象の重要性が強く認められて以来、湧昇に関する研究は主に沿岸湧昇を対象に行われてきた。（例えば、Mooers et al., 1976；Suginohara, 1977）密度成層の効果を最も簡単な形で取り入れた二層モデルを考えると、湧昇流の速度 w_{h1} は一般に次式のように表される（寺本, 1974）。

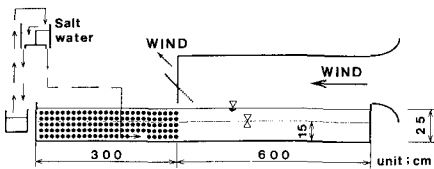
$$\frac{\partial h}{\partial t}_{x=0} \equiv w_{h1} \sim \frac{\alpha \tau_0}{\sqrt{gh_1 \Delta \rho / \rho}} \dots\dots\dots (1)$$

$$\tau_0 = \gamma_d W^2, \quad \gamma_d = 3.2 \times 10^{-6} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\Delta \rho$, h_1 , W はそれぞれ上下層の密度差、上層水深、風速を示す。

3. 実験装置および実験条件

実験装置は図一に示す風洞ならびに長さ 600 cm、高さ 25 cm、幅 15 cm の透明アクリル樹脂製の観測用水路を用いた。風下側に海域を模擬した長さ 300 cm、高さ 25 cm、幅 200 cm の鉄製水槽を設けて観測水路での循環流の発生を抑制している。観測用水路および鉄製水槽に塩水と水道水を用いて密度差を与えた二成層密度場を作り、水表面に風を吹かせた時の密度界面の挙動や混合特性を可視観測した。下層水はメチレンブルーで着色し、風上側から 0 cm、300 cm、600 cm の 3 点において目視観測と写真やビデオ撮影も同時に行った。また、上流側、水路中央および下流側にトレーサーを注入し、その動きを可視観測した。なお、界面の挙動および湧昇に関する素過程を定量的に調べるために流速分布の測定を行うとともに、塩分濃度計を設置して密度分布の変化を調べた。本研究で行った実験条件を表一に示す。表中の L 、



図一 実験装置

* 学生員 工修 大阪大学大学院 工学研究科
** 正会員 工博 大阪大学助教授 工学部土木学科
*** 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

表-1 実験条件

Run	u_* (m/s)	h_1 (m)	$\Delta\rho$ (kg/m ³)	Ri_*	$\frac{2h_1 Ri_*}{L}$	W_{h_1} (cm/s)	T_m (s)
1	6.5×10^{-3}	0.1	38	1090	36.3	0.041	241
2	6.5×10^{-3}	0.1	20	464	15.5	0.057	175
3	6.5×10^{-3}	0.1	12	360	12.0	0.074	136
4	6.5×10^{-3}	0.1	7	160	5.3	0.097	104
5	6.5×10^{-3}	0.1	4	93	3.1	0.128	78
6	6.5×10^{-3}	0.1	1	23	0.76	0.256	39

W_{h_1} , T_m はそれぞれ送風距離, 式 (1) から求めた湧昇流の速度, 密度界面が水表面まで湧昇するに要する時間を示す. 風上端の初期水表面を原点として, 流下方向に x 軸, 鉛直方向に z 軸とする.

4. 実験結果

(1) 界面の変動および流動特性について

図-2~5 の (a), (b) はそれぞれ各測点における界面位置の時間変動と水路中央部 ($x=300$ cm) での流速分布を示す. 図中のシンボル○, ☆, □, △は風上端 ($x=0$ cm), 風上端の中間層, 水路中央部 ($x=300$ cm) および風下端 ($x=600$ cm) において観測された界面の鉛直方向位置を示す. ここで, 中間層は二成層状態を作るときに初期分子拡散や, 弱い混合によって上層水と下層水の間に形成される薄い層を示す.

a) $\Delta\rho=38$ kg/m³ (Run 1) の場合

図-2(a) に示すように, 送風開始とともに上流端および水路中央部での密度界面が上昇し始め, 約 110 秒後に最大値に達する. 送風開始から 30 秒経過後に, 風上端から約 35 cm 離れた地点の中間層の界面上で小規模の水塊の巻上がりが観測された. しかし, この水塊の巻上がりはそれ以上に発達することなく, また上流側の湧昇域の流動にも大きな影響を及ぼさなかった.

送風開始後約 60 秒になると, 中間層の密度界面が上流側 $x \leq 35$ cm の範囲で一様に上昇して, 水面下 5.5 cm の水深に達する. その後, その中間層の密度界面を通して上層との弱い混合を生じながら上昇し続け, 約 110 秒経過すると, 風上端の中間層は水面に達する. ただし, 密度界面が水表面に到達することは観測されなかった.

水路中央部 ($x=300$ cm) での界面の変動は全実験過程を通して安定な状態を示している. 密度界面で小さい規模の渦が間欠的に発生するが, それによる上層・下層の水の混合は可視観測では認められない程度である. 同図から判断すると, 疑似定常状態になった 180 秒後には上流端と中央部での密度界面が初期状態より約 3 cm 上昇したことが分かる. 尹ら (1993) の閉鎖性水域の実験においては上層で鉛直循環流が形成されたのに対して, 開

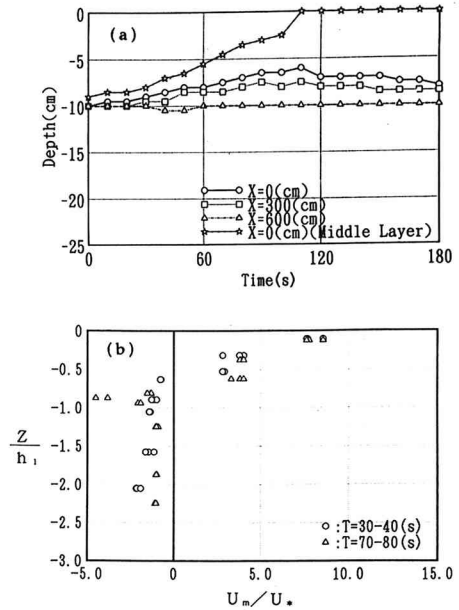


図-2 $\Delta\rho=38$ kg/m³ の密度界面の時間変動と流速分布

放性水域では図-2(b) の流速分布に示されているように, 上層では風応力と同じ方向の順流が形成され, 下層ではそれを補償する逆流が生じていることが分かる. 図中の h_1 は各流速計測時の上層水深を示しており, 密度界面の位置は $z/h_1 = -1.0$ である.

b) $\Delta\rho=12$ kg/m³ (Run 3) の場合

図-3 に示す $\Delta\rho=12$ kg/m³ の実験では, 送風開始後約 25 秒で $x \approx 35$ cm 地点の中間層の界面で大規模な水塊の巻上がりが観測された. それは $\Delta\rho=38$ kg/m³ の場合と比較して相当大きい, この水塊の巻上がりは $\Delta\rho=38$ kg/m³ の場合と同様に $x \leq 35$ cm の範囲で密度界面に平行に上昇する. (写真-1 参照) 送風開始後 80 秒になると, 風上端の中間層が水表面に達する. それにともなって上流側で中間層の水塊を形成する. この水塊は上層水との間で明瞭な円弧形的のフロント状の境界を保持しながら, 下流側へと徐々に進行していく. 送風開始後約 160 秒

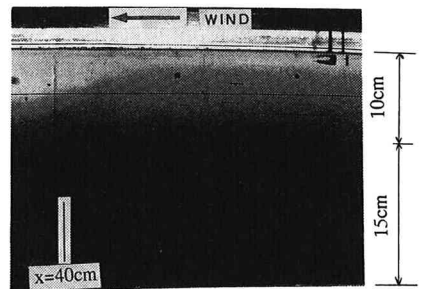
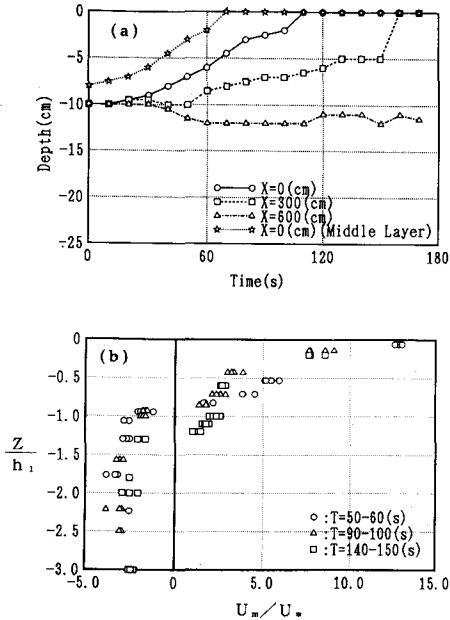


写真-1 $\Delta\rho=12$ kg/m³ の上流端の混合状態

図-3 $\Delta\rho=12\text{ kg/m}^3$ の密度界面の時間変動と流速分布

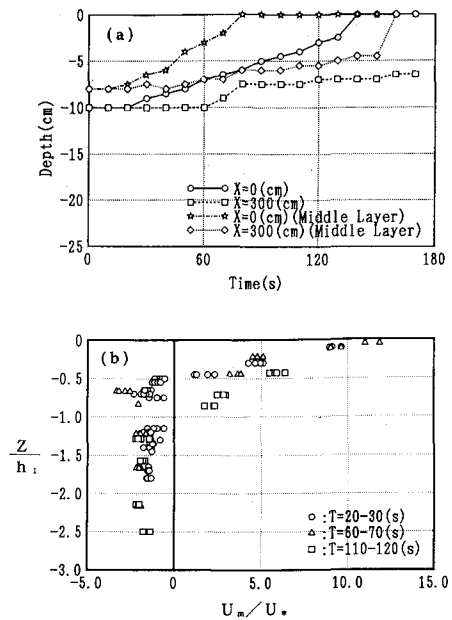
には、このフロントは水路中央部の $x=300\text{ cm}$ にまで達する。その結果、図中に△印で示した水路中央部の中間層が急に水表面に到達することになる。

上流側の密度界面は、中間層の界面が水表面に達した後も湧昇し続け、送風開始後約 140 秒で $x\leq 35\text{ cm}$ の範囲の密度界面がほぼ同時に水表面に到達する。そして、中間層と同様にフロントを形成しながら下流側へと徐々に前進するが、そのフロントは $x\approx 100\text{ cm}$ の地点で切り立った形で安定な状態となった。この時点において風外力による水面のせん断とフロント部の圧力勾配が均衡を保っていると思われる。上流端の密度界面が水表面に到達した時間 140 秒は、式 (1) から算出された $T_m=136\text{ 秒}$ (表-1 参照) と合致している。

水路中央部では送風開始とともに密度界面が徐々に上昇し、送風開始後約 130 秒には初期状態より約 3.5 cm 上昇している。その界面では間欠的に小規模の渦による弱い混合が生じているが、その後はほとんど安定な状態となった。すなわち、上・下層の水塊間の混合が進むにつれて界面の低下が生じないのが、風下側開放境界実験の大きな特徴であると言える。流速分布 (図-3(b)) に関しては Run 1 と同様の傾向を示している。

c) $\Delta\rho=7\text{ kg/m}^3$ (Run 4) の場合

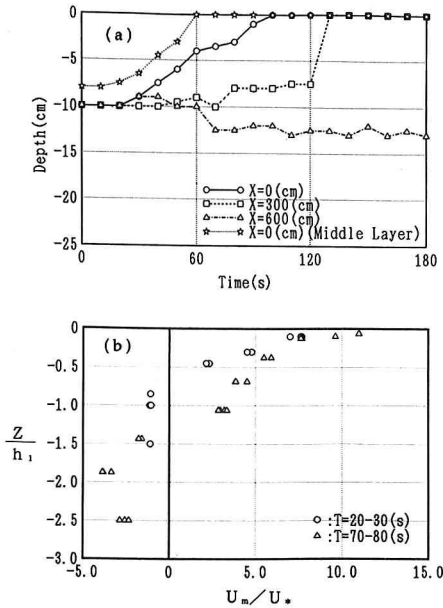
つぎに、 $\Delta\rho=7\text{ kg/m}^3$ の実験では、図-4(a) に示すように送風開始とともに、 $x\leq 35\text{ cm}$ の上流側の密度界面は湧昇し続け、約 110 秒経過後に水表面に達する。水表面に達した密度界面は上層の全水深にわたって切り立った形でフロント部を形成しながら下流側へ拡がり、送風開

図-4 $\Delta\rho=7\text{ kg/m}^3$ の密度界面の時間変動と流速分布

始約 160 秒には水路中央部 ($x=300\text{ cm}$) まで進行する。したがって、図-4 (a) の中央部の密度界面が送風開始後約 160 秒に水表面まで達するようになる。このときのの上流側の上層水の密度は下層水の初期密度と同じであった。

水路中央部では送風開始約 40 秒前後に波長約 10 cm の内部波の発生によって激しい混合が生じる。その後、密度界面は徐々に上昇しながら、上・下層水の混合が続く。送風開始後約 100 秒には中間層が水面に達する。また、130 秒後には密度界面が水面下 5 cm のところまで上昇する。水路中央部で観測した流速分布 (図-4(b)) は、上層では風応力と同方向の順流が形成されており、下層ではそれとともなう逆流が生じることが明瞭に確認できた。つまるところ、風下側開放境界の実験では全過程を通して水路中央部での密度界面が初期状態より全体的に上昇していることが大きな特徴であると言える。密度界面が全体的に上昇するのは、連行による下層の流量の減少を補償する流れが風下側水槽から流入してくるからであろう。

一方、尹ら (1993) による同じ密度差の風下側閉鎖境界の実験では上流端での密度界面は水表面まで達しなく、明瞭な内部共振が密度界面で生じることが観察された。また、水路中央部での密度界面は混合が進むにつれて低下した。疑似定常状態に達した後の水路中央部で流速分布を測定したところ、鉛直循環流が上層で形成されていることが確認できた。このように下流端の条件の違いは当然のことながら水路内の流動の大きな変化をもた

図-5 $\Delta\rho=4\text{ kg/m}^3$ の密度界面の時間変動と流速分布

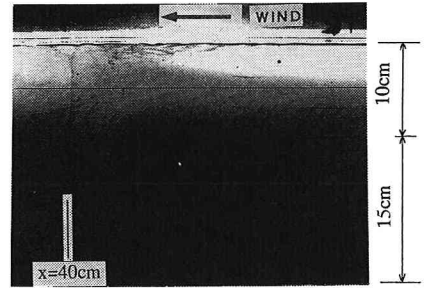
らすことになる。

d) $\Delta\rho=4\text{ kg/m}^3$ (Run 5) の場合

$\Delta\rho=4\text{ kg/m}^3$ の場合は $\Delta\rho=7\text{ kg/m}^3$ の場合とは定性的に類似しているが、 $\Delta\rho=12\text{ kg/m}^3$ の場合とは界面の挙動や乱れの発達機構は全く異なっていた。風上端から約 35 cm 離れた地点においては、送風開始 30 秒前後にバースト風の大規模な水塊の巻き上がりが観察された。約 50 秒にその水塊の巻き上がりが成長して水表面に到達することが観測された (写真-2 参照)。おそらく、水表面で与えられる風外力が、密度界面に直接的に働きかける地点が $x \approx 35\text{ cm}$ であると考えられる。上流端での中間層はそれより約 10 秒遅れて水表面に達する。その結果、写真-2 にみられるように、上層の流体を巻き上がった水塊によって分断することになる。つまり、写真の上流端の白い部分は初期の上層水の水塊である。この水塊は風によるせん断を継続して受けることにより、上層水と湧昇水の間に混合が生じ、やがて消滅してしまう運命にある。巻き上がった染料塊の風下側では明瞭なフロント (前線) が形成される。すなわち、この場合はフロント部の形成の初期段階で上流側でのフロント部が二つのセルに分けられるのが大きな特徴である。

水路中央部では送風開始とともに密度界面を通して大きい規模の渦列が上層に巻き込まれ、それによって上・下層水の激しい混合が生じる。送風開始後約 130 秒には、上下層間の混合とともに上流側に形成されたフロント部が水路中央部に到達して上下層の識別はできなくなる。

図には示さないが、最も密度差の小さい Run 6 ($\Delta\rho=$

写真-2 $\Delta\rho=4\text{ kg/m}^3$ の上流端の混合状態

1 kg/m^3) の実験においても $\Delta\rho=4\text{ kg/m}^3$ と同様の現象が観察された。

(2) フロントの形成および湧昇機構

本研究で行った実験の結果からフロントの形成及び湧昇機構は三つに大別できる。本研究で行った実験によると、Run 1~2 の形態 I, Run 3 の形態 II, また Run 4~6 の形態 III である。形態 I は成層安定度が強い場合であり、密度界面は水面に湧昇しない。密度界面が水表面に湧昇する場合は形態 II と形態 III であり、その模式図を図-6 に示す。形態 II の場合は風上側 $x \leq 35\text{ cm}$ の密度界面が一様に上昇しながら湧昇の生じる例である。(写真-1 参照) 一方、形態 III の場合には $x \approx 35\text{ cm}$ での水塊の巻き上がりが成長して水面への湧昇、引き続いて密度界面の湧昇が生じる例である。(写真-2 参照)

つまり、形態 III の場合は成層度が相対的に弱いために、内部波の発生・砕波による密度界面の変動量が大きくなり、 $x \approx 35\text{ cm}$ 近傍で大規模な水塊の巻き上がりが発生する。また、その水塊の巻き上がりは風上端 ($x=0\text{ cm}$) よりも早く水表面に達し、結果として上層の流体を分断す

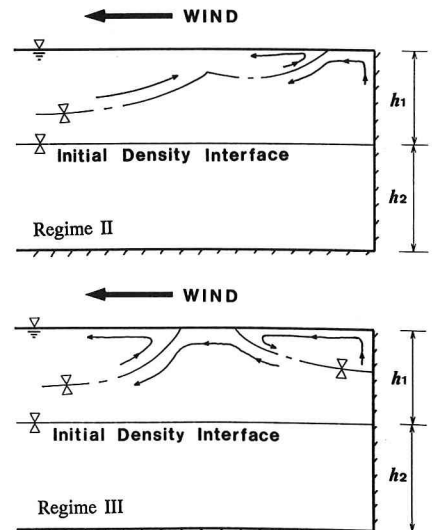


図-6 湧昇形態の模式図

ることになる。この場合は形態Ⅱとは異なって、 $x \approx 35$ cmでの密度界面が水表面に達しても風上側の密度界面が混合と湧昇を続けていることから、フロントの先端部はその風下側の密度場の変化を生じさせながら、圧力勾配の均衡を保つ形で早い速度で下流側へと前進する。一方、分断された上層水は下層水と混合して、やがて消滅する。フロント部は形態Ⅱと同じく切り立った形で安定な状態になる。

いずれも、式(1)を用いて算出した密度界面の水面に達する時間 T_m は実験結果とよく一致していることが表-1から分かった。

5. 東京湾の青潮現象への適用

東京湾の青潮に関する報文、論文などから青潮の発生が認められた時期のうち、水温・塩分濃度の鉛直方向分布が実測されたのが三例ある。そこで、実測値を用いて諸水理量および湧昇流の速度 W_{10} と、密度界面が水面に湧昇する時間 T_m を求めたのが表-2である。実験結果と表-2の比較から、東京湾で底層の高密度水が湧昇する現象(青潮)は、 $2h_1 Ri_*/L \leq 12$ の場合に発生すると判断できる。また、小・中規模の青潮の流動形態は Run 3の実験ケースに相当し、大規模の青潮の場合は Run 4～6の実験ケースの流動形態に相当すると推察される。

なお、密度成層度および密度界面の位置によって異なるが、青潮(底層の貧酸素水塊の湧昇現象)が発生するには平均風速 4 m/s の沖向きの風でも1日～2日以上連吹するという条件が必要となり、青潮発生時の既往の観測結果とよく一致していると判断できる。

6. おわりに

循環流を抑えることを目的として風下側開放境界の吹送密度流の実験を行った。本研究では東京湾で発生する底層の高密度水の湧昇現象に着目して、二成層場における沖向きの風外力による界面の挙動や湧昇機構について検討した。得られた結果をまとめると、以下に示すとおりである。

表-2 東京湾での青潮発生時の観測値への適用

Observed Date	$\Delta\rho$ (kg/m ³)	h_1 (m)	W_{10} (m/s)	Ri_*	$\frac{2h_1 Ri_*}{L}$	T_m (hr)
16-17, July, 1979	4.0	10.0	3.3	25,000	10.0	49.3
20-21, Aug, 1985	10.0	7.5	4.2	28,940	8.7	31.3
5-6, June, 1986	4.0	7.5	3.0	22,680	6.8	38.4

(1) 下流端の境界の有無によって流動形態および界面の変動が異なる。

(2) 風外力と密度成層度の違いによって湧昇およびフロントの形成機構が異なることが分かった。湧昇・混合の形態は3つに大別できた。

(3) 以上の実験結果は、青潮発生時の東京湾での観測値を用いて推算した結果とも一致しており、青潮現象を解明する上で興味深い。

しかしながら、上述の議論は定性的な評価に留まっている。それは非定常な密度流実験の難しさに原因しており、定量的な評価を行うためには数値実験を併用した研究が必要であろう。

参 考 文 献

- 鶴谷広一・中野晋・一戸秀久(1984): 吹送流による密度界面の混合と乱れ特性, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 655-659.
- 寺本俊彦(1974): 海洋物理学 I, 東京大学出版会, pp. 136-139.
- 尹 鍾星・中辻啓二・村岡浩爾(1993): 閉鎖性成層水域における吹送密度流の実験, 水工学論文集, 第37巻, pp. 285-292.
- Mooers, C. N. K., C. A. Collins and R. L. Smith (1976): The dynamic structure of the frontal zone in the coastal upwelling region off Oregon, J. Phys. Oceanogr., Vol. 6, pp. 3-21.
- Suginohara, N. (1977): Upwelling front and two-cell circulation, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 33, pp. 115-130.
- Kranenburg, C. (1984): Wind-induced entrainment in a stably stratified fluid, J. Fluid Mech., Vol. 145, pp. 253-273.