

大阪大学大学院 学生員○尹 鍾星
電源開発 正会員 寺浦 努
大阪大学工学部 正会員 中辻啓二
大阪大学工学部 正会員 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拡散に重要な影響を与える。例えば、沿岸域の流動や水質構造ならびに恒流などの現象も吹送流の影響を受けている。成層度が強くなる夏期の場合に、吹送流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が、時には底層近くの貧酸素水塊の巻き上げなどにより、青潮を引き起こす原因ともなる。

そこで、本研究では淡水と塩水の二成層状態の水表面に風応力を作用させる吹送流の実験を行った。本研究の特徴は、循環流の発生を抑えるように下流端を開放したことである。界面の挙動ならびに流動特性について可視化により検討した。

2. 実験装置および実験条件

実験装置は長さ600cm、高さ25cm、幅15cmの透明アクリル樹脂製の風洞付き水路を用いた。風下側に海域を模擬した長さ 300cm、高さ 25cm、幅 200cm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、水路の水面に風を吹かせたとき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 0cm、300cm、600cmの3地点において目視観測するとともに、写真撮影やビデオ解析も同時に行った。なお、界面の湧昇に関する素過程を定量的に調べるために、上流端側から 10cm離れた地点の水面下 0.5cmに塩分濃度計を設置し、密度の変化を調べた。実験は、風応力 ($U_* = 6.5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$) と上層水深 ($h_1 = 0.1 \text{ m}$) を固定し、密度差 $\Delta \rho$ (kg/m^3) のみを変えて行った。実験条件を表-1に示す。

表-1 実験条件

Run	$\Delta \rho$ (kg/m^3)	Ri	We
1	3.8	1090	39.6
2	2.0	464	16.9
3	1.2	360	13.1
4	7	160	5.8
5	4	93	3.4
6	1	23	0.8

3. 実験結果

表-1の実験条件の中で特徴的な現象が観られる3ケースを図-2の(a)～(c)に示す。図中のシンボル ○、☆、□、△はそれぞれ風上端 ($x = 0 \text{ cm}$)、風上端 ($x = 0 \text{ cm}$) の中間層、水路中央 ($x = 300 \text{ cm}$) および風下端 ($x = 600 \text{ cm}$) 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。

3.1 $\Delta \rho = 38.0 \text{ kg/m}^3$ の実験： $\Delta \rho = 38.0 \text{ kg/m}^3$ は最も密度差が大きい実験で、送風の開始とともに上流端および中央部での界面が上昇し始め、約120秒後に最大値に達する。特に、 $x \leq 40 \text{ cm}$ の上流部の中間層は密度界面の上昇にともなってセットアップされ、約60秒後に水面下6cmまで達する。その時に中間層と上層の間の界面からフィラメント構造を呈する乱れによって中間層と上層の間に混合が生じ、密度界面が最大値に達する時に中間層がなくなる。その後の全実験過程を通して密度界面の変動や上層水と下層水との間の混合はほとんど観られなかった。

図から判断すると、上流端および中央部での密度界面が初期状態より約 3cm上昇したことが分かる。これ

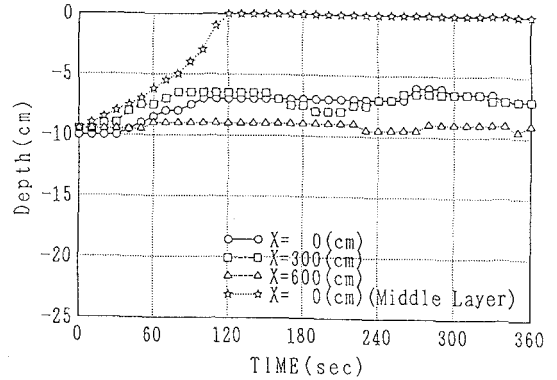
は水槽の下流端が開放されているため、送風の開始段階では上層の淡水は下流側に向かって流れ、それを補償するように下層の塩水が上流側に流されるためだと考えられる。3cm上昇して定常になった段階では、上層内で循環流が形成されているのが別途実施した流速測定よりわかった。

3.2 $\Delta\rho=7.0\text{kg/m}^3$ の実験： $\Delta\rho=7.0\text{kg/m}^3$ の実験では、 $x\leq 40\text{cm}$ の上流部の密度界面が送風の開始とともにほぼ同時に上昇し始め、送風開始約80秒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、送風開始後約180秒後には水路中央部（ $x=300\text{cm}$ ）まで進行する。したがって、図中の中央部の密度界面が送風開始約190秒後に水表面まで達している。このときのの上層水の密度は初期状態の下層水の密度と同じであった。以上のことから、風応力は密度界面上の上層の全水深にわたるせん断力と釣り合っていると判断できる。それはトレーサの注入によるビデオ観測からも確認できた。中央部（ $x=300\text{cm}$ ）の密度界面で規則的に観測される大規模渦の巻き上がりが上層に巻き込まれ、上・下層水の混合が生じる。下流端では送風開始とともに密度界面から上層水への渦列の巻き込みが観測された。

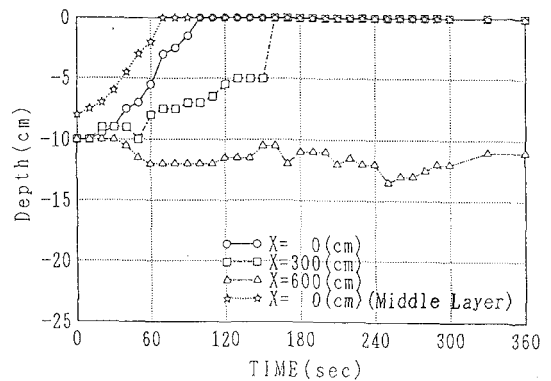
3.3 $\Delta\rho=1.0\text{kg/m}^3$ の実験： 密度差が最も小さな $\Delta\rho=1.0\text{kg/m}^3$ の場合には、上流端の密度界面は送風の開始とともに上述の2つのケースよりもかなり早い時間で上昇し、約60秒後には水表面に達する。水路の中央部では送風の開始まもなく密度境界面で内部波が発生し、その発達と砕波を通して混合が進む。風下側開放境界の実験では風下側閉鎖境界の実験でみられるようなK-H波による混合が観測されないのが特徴である。送風開始約100sec後には上層と下層の界面の識別ができなくなった。

4. 結論

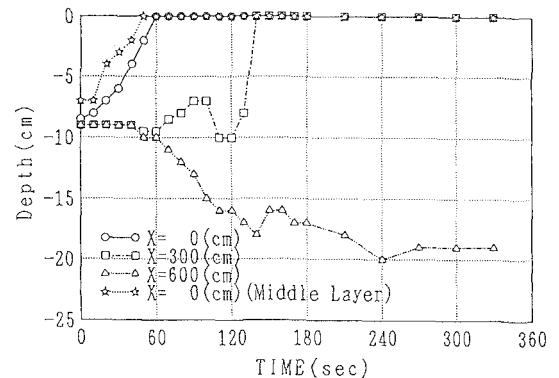
吹送密度流の成層度の違いおよび循環流の有無により生じる内部流動と密度境界面の運動特性を把握することを目的として、可視化実験を行った。現在のところ、定性的な評価に留まっているが、水槽の下流端が開放であるか否かによって、風外力による循環流の形成過程が著しく異なることがわかった。現在、流速分布を測定し、定量的な検討を行っており、講演時にはその結果を含めて報告したい。



(a) $\Delta\rho=38\text{kg/m}^3$



(b) $\Delta\rho=7\text{kg/m}^3$



(c) $\Delta\rho=1\text{kg/m}^3$

図2 密度界面の時間変化