

成層水域における吹送密度流に関する実験的研究

大阪大学大学院 学生員 尹 鍾星

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。特に、成層度が強くなる夏期の水域において、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、時には底層近くの貧酸素水塊の巻き上げなどにより、水域の水質や水産環境に重大な変化を引き起こす。後者の例が東京湾の青潮の発生である。

尹ら¹⁾はリチャードソン数とアスペクト比の積で表現した Wedderburn数をパラメータとして、下流端が閉じた水路を用いて吹送密度流の水理実験を行い、密度界面が水表面まで湧昇する限界範囲は $We \leq 4$ であることを指摘した。しかし、その実験は下流端の境界が閉ざされた流域、いわば湖を対象した実験である。閉鎖性故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理挙動とは若干異なる。東京湾のような拡大且つ半閉鎖性の海域での物理現象を再現するためには、循環流の発生を抑えることが必要となる。

そこで、本研究では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吹送密度流の実験を行い、界面の挙動および流動特性について検討した。また、その結果に基づいて風下側閉鎖境界の実験結果との比較を行い、下流端の境界壁の有無による界面の変動および混合機構の特性の差異について考察を行う。

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初期密度差 $\Delta\rho$ (kg/m³)、上層厚さ h_1 (m)の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、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。本研究では風下側閉鎖境界の実験結果との比較のために、尹ら¹⁾と同じ実験条件として実験を行った。

3. 実験結果

本研究で行った実験条件の中で特徴的な現象が観られる $\Delta\rho = 7.0$ (kg/m³)の場合の密度界面の経時変化を図-1に示す。また、比較のために風下側閉鎖境界の場合の界面位置の時間変動を図-2に示す。図中のシンボル○、☆、□、△はそれぞれ風上端 ($x = 0$ cm)、風上端 ($x = 0$ cm)の中間層、水路中央 ($x = 300$ 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。

風下側開放境界の実験(図-1)では、 $x \leq 40$ 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110秒前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160秒には水路中央部 ($x = 300$ 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後約160秒に水表面まで達している。このときの上流側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。水路中央部では送風開始約40秒前後に波長約10cm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

水の混合が続き、送風開始後約 100秒には中間層の存在が識別できなくなる。送風開始後約 130秒には密度界面は水面下 5cmのところまで上昇する。また、送風開始から 50～60秒後の水路中央部での流速分布を測定した結果（図-3）、上層では風応力と同じ方向の順流が形成されており、下層ではそれにとまう逆流が生じることが確認できた。結局のところ、風下側開放境界の実験は全過程を通して水路の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。したがって、風下側開放境界の場合の上・下層水の混合は主に密度界面上に形成された風応力と同じ方向のせん断流れによって引き起こされ、また密度界面が全体的に上昇するのは、このせん断流れが下流側に流れる流量に対する補償流の運動量と均衡を保つためであると考えられる。

ところで、風下側閉鎖境界の実験（図-2）では、上流端での密度界面は水面まで達しなく、明瞭な内部静振が密度界面で生じることが分かる。また、水路中央部での密度界面は風下側開放境界の実験とは違って混合が進むにつれて低下することが分かる。なお、定常状態に達した後の水路中央部での流速分布の測定の結果（図-4）、風下側開放境界の実験とは違って上層で鉛直循環流が形成されていることが確認できた。したがって、風外力によるせん断力は上下層の密度差によって生じる圧力勾配と均衡を保つと判断できる。

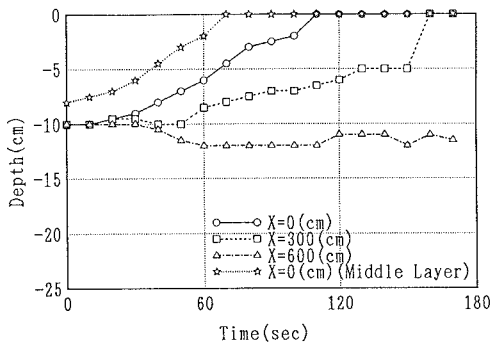


図-1 密度界面の経時変化（風下側開放境界）

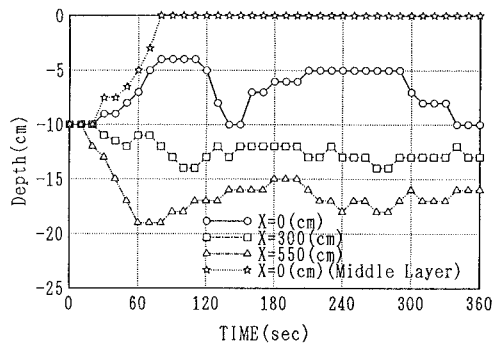


図-2 密度界面の経時変化（風下側閉鎖境界）

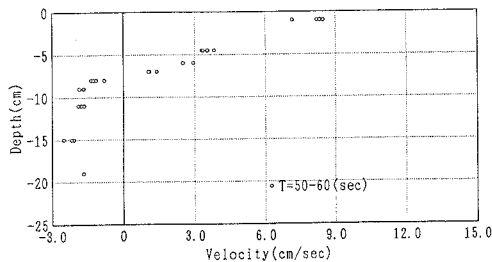


図-3 流速分布（風下側開放境界）

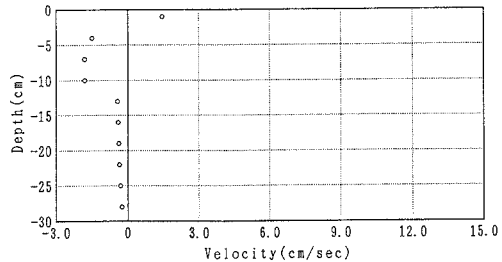


図-4 流速分布（風下側閉鎖境界）

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、吹送密度流の実験を行った。下流端の境界の有無によって上層での平均流の形成形態が異なり、それとともなって密度界面の挙動や混合特性が異なることが明らかになった。この実験結果は成層化した海域での湧昇、混合機構の解明に一步近づいたと考えられる。

参考文献

- 1) 尹 鍾星・中辻啓二・村岡浩爾：水工学論文集、第37巻、pp285-292、1993。