

風による閉鎖成層水中に形成される 中間密度層の応答

WIND-INDUCED RESPONSE OF INTERMEDIATE DENSITY LAYER IN A CLOSED STRATIFIED WATER BODY

新谷哲也¹・梅山元彦²

Tetsuya Shintani, Motohiko Umeyama

¹ 正会員 工修 東京都立大学助手 工学部土木工学科 (〒192-03 八王子市南大沢 1-1)

² 正会員 Ph.D. 東京都立大学助教授 工学部土木工学科 (〒192-03 八王子市南大沢 1-1)

Experimental investigation is conducted to understand the response of the intermediate density layer together with the upwelling process by the wind action in a stratified lake. In the laboratory study, the density model of the three layer describing the stratified lake of thick thermocline is used. The cross section under the upwind area was recorded by three digital video cameras and the data was analyzed by image processing technique in order to obtain the displacements of the upper and lower density interfaces. At the upwind side, the water density change owing to the upwelling was measured by an electric conductivity meter as well. The Wedderburn number strongly characterizes the displacement of the upper density interface, while the Lake number affects the dynamics of the intermediate density layer. The classification of the dynamics for intermediate density layer depends on the Wedderburn number and the Lake number. The thickness of the mixed layer increases with the decrease of the Lake number.

Key Words wind stress, stratified lake, upwelling, Lake number

1. はじめに

湖や貯水池等の閉鎖性水域では、夏期になると密度成層が形成されて鉛直方向の混合が抑制されるために水域全体での循環が不活発になってしまう。このような状況が長期間続くと、湖の下層部分では貧酸素化が起き、それに伴う栄養塩の溶出は富栄養化を進行させて、底生生物へと被害が及ぶ。この間、風によって貧酸素の下層水が移動・湧昇すると魚類の斃死、栄養塩の拡散による植物プランクトンの異常発生が引き起こされる。これら付随して起こる現象は、周辺の慢性的水環境の悪化と生態系の破壊へとつながる。閉鎖性水域において水域全体に流れを引き起こす主な原因は風であり、風応力による鉛直方向の密度構造の変化特性を把握することは、水域の水質管理や予測を行う上で重要であると考えられている。風によって引き起こされる成層湖内の物理的現象は、密度境界面での連行による躍層の低下と下層水が直接に水面まで上昇して混合が生じ

る湧昇が主要因とされてきた。従って、現在までの研究の多くが、成層化した湖を2層と仮定してモデル化を行い、密度境界面における連行や下層水の水面への湧昇を議論してきた。しかし、最近、森川ら¹⁾や岩熊²⁾によって夏期の受熱期には水温躍層が大きく発達し、上層と下層の間に中間的な密度を持つ層が確認された。水温躍層は風の弱い日が数日間続くと上下層の水を吸収して厚さを増し、風が再び吹くことで水温躍層内の水を上層に湧昇させるので、下層からの栄養塩を間接的に上層へ供給する役割を果たす。また、西条ら³⁾によって水温躍層中で溶存酸素量が極大や極小を示すことも報告されている。これらの報告を合わせて考えると、下層からの直接の湧昇だけでなく水温躍層(中間密度層)からの湧昇が湖の水質に大きな影響を与える可能性があることがわかる。最近では、Monismith⁴⁾は、2成層系で下層からの湧昇限界を示すWedderburn数の限界値に現地観測や実験によってばらつきがあるこ

とに注目し、この理由が有限の厚さを持つ中間密度層の存在のためであることを実験と解析から明らかにした。また、Stevens ら⁵⁾は室内実験で中間密度層を考慮した3成層の場合の実験を行い、密度境界面の挙動がImberger ら⁶⁾によって提案されたLake数(任意の密度成層を持つ湖の湧昇限界を示す数)で分類できることを示した。しかし、より正確に湧昇の状況を把握するためには、湧昇に至るまでの非定常的な密度境界面の挙動や混合を詳しく検討する必要がある。現在まで行われてきた測定^{4),5)}よりもさらに空間的・時間的に連続した測定を行うための手法として、著者らによってビデオ画像処理による測定が提案されてきた⁷⁾。

本研究では、水槽内に3層の密度成層を作り、水面に風応力を作用させる実験を行った。水槽内で起こる中間密度層の挙動はデジタルビデオカメラで撮影し、画像処理によって上層と下層及び中層と下層との間のできる密度境界面の変位を求めた。そして、実験で得られた中間密度層の変化を、Lake数やWedderburn数と関連付けて検討した。また、電気伝導度計によって湧昇水密度の時間変化や送風開始前と終了後の密度分布を測定し、水槽内での密度構造の変動を調べた。

2. 実験方法

実験は、図-1に示すような長さ600cm、幅15cm、高さ35cmの2次元風洞水槽を用いて行った。なお、水

槽の風下側には15cmの消波装置が設置してある。水槽を覆っている高さ40cmのアクリル製の風洞は、エッフェル型送風機に接続されている。風速は、すべての実験を通して一定とした(風洞内最大風速≒6.5m/s)。ただし、急に最大風速にまで上昇させると表層の攪拌作用による内部境界面の破壊のおそれがあるために、1分間かけて徐々に速度を増加させていった。風速分布は水槽中央でピトー管を用いて鉛直方向に1cm間隔で測定し、得られた水面付近の風速の対数分布から水面における摩擦速度を求めた。

実験は、表-1に示すように上層と中層と下層の密度差及びそれぞれの層の厚さをいろいろ変えて全部で6ケースの実験を行った。ただし、3層の厚さの合計は常に34cmである。1ケースの測定時間は30分間とし、はじめの10分間が送風時間である。表中の h_1 は上層厚さ、 h_2 は中層厚さ、 h_3 は下層厚さ、 $\Delta\rho_{12}$ は上層と中層の密度差、 $\Delta\rho_{23}$ は中層と下層の密度差、 u_* は摩擦速度である。また、Wedderburn数(W)の算定は次式を用いた。

$$W = \frac{\Delta\rho_{12}gh_1}{\rho u_*^2} \frac{h_1}{L} \tag{1}$$

ここで、 g は重力加速度、 ρ は上層密度、 L は吹送距離である。Stevens ら⁵⁾によれば(1)式で定義されるWedderburn数の湧昇を起こす限界値は $W = 0.5$ であるとされている。

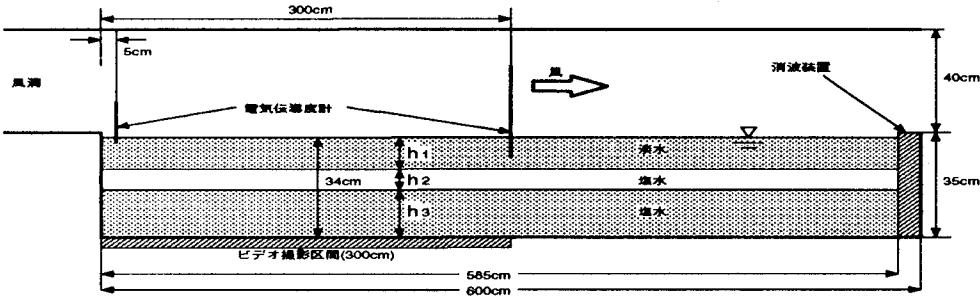


図-1：風洞水槽

表-1：実験条件

	h_1 (cm)	h_2 (cm)	h_3 (cm)	$\Delta\rho_{12}$ (g/cm ³)	$\Delta\rho_{23}$ (g/cm ³)	u_* (cm/s)	W	L_N
CASE-1	14	5	15	0.005	0.005	1.1	1.36	3.8
CASE-2	14	5	15	0.0025	0.0075	1.1	0.68	3.8
CASE-3	14	5	15	0.0025	0.0025	1.1	0.68	1.9
CASE-4	14	5	15	0.00125	0.00125	1.1	0.34	0.95
CASE-5	14	5	15	0.00075	0.00075	1.1	0.2	0.57
CASE-6	9	5	20	0.00125	0.00125	1.1	0.14	0.59

Lake 数 (L_N) の定義の詳細については道奥⁸⁾に示されているが、水域の体積中心まわりの密度成層が傾斜することによって発生した重力による復元モーメント (M_{bc}) と水面に作用する風応力によるモーメント ($\tau A z_v$) の比として表される。従って Lake 数は次式を計算することによって求められる。

$$L_N = \frac{M_{bc}}{\tau A z_v} \quad (2)$$

ここで、 τ は風による水面でのせん断力、 A は水面の面積、 z_v は水面から体積中心まで距離である。3 成層の場合、Lake 数による分類に従えば $L_N = 1$ を境に $L_N < 1$ の場合は下層から湧昇し、 $L_N > 1$ の場合は下層から湧昇しない⁸⁾。ここで示した Wedderburn 数 (W) と Lake 数 (L_N) との組合せによって湧昇形態が、上下の境界面がほぼ平衡に傾く Mode1 と上側の境界面だけが傾く Mode2 の 2 通りのモードがあるとされている⁸⁾(図-2 参照)。

水槽に成層を作る手順を以下に簡単に述べる。下層と中層は塩水を用いて作成し、下層、中層の順にゆっくりと数時間かけて注入し、最後に淡水を上から注いで 3 層構造とした。上層と下層には上下の密度境界面の変位や境界面での混合が観測できるようにウォーターブルーを入れて着色した。また、上層の淡水には風波の発生を軽減するために界面活性剤 (ドデシル硫酸ナトリウム) を 1 リットルあたり 0.0025g 混入した。

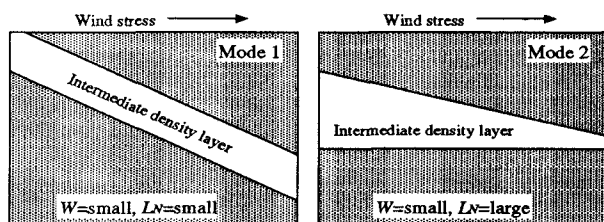


図-2: Wedderburn 数と Lake 数による密度変化特性

(1) 電気伝導度計による塩分濃度の測定

初期の鉛直密度分布と実験終了後の鉛直密度分布を比較するために、水槽の中央に取り付けた電気伝導度計を用いて水面から水深 30cm まで 1 cm 間隔で測定した。各水深の電気伝導度は 20 秒間測った後、移動させた。また、風上端から風下方向へ 5cm、水深 1cm の地点に電気伝導度計を設置し、風上端の湧昇による密度変化を 30 分間測定した。

(2) ビデオ撮影と画像解析

上下の密度境界面の挙動と混合状況を風の吹き始めから連続的に観察するために、風上端から 3m までの区間を 1m 間隔に分け、それぞれの区間を 1 台ずつ同時

に 3 台のデジタルビデオカメラを使って撮影した。撮影は外部から光が入らない状況下で、ビデオカメラと水槽を隔て水槽の逆側から一様な光をあて、水槽内の色素で着色された水を通して光を撮影した。撮影についての詳細は新谷ら⁷⁾を参照していただきたいが、今回は上層と下層がウォーターブルーで着色され、中層が透明であることが前回と異なっている。撮影された映像はコンピューターに転送した後に時間ごとの静止画像に変換され、画像解析ソフトを使って輝度分布を求めた。得られた輝度分布から密度境界面の位置の算定及び混合形態に係わる検討を行った。

3. 実験結果の考察

図-3 は密度境界面の挙動が特徴的であった CASE-3、CASE-4、CASE-5 の 3 ケースについて初期の 5 分間の上側と下側の密度境界面の時間的変化を 30 秒ごとにプロットしたものである。CASE-1 と CASE-2 については CASE-3 とほぼ類似の傾向を示していた。これらの境界面は、初期の段階で設定した色素濃度の輪郭線であり、画像を時々刻々処理することによって求めた。ただし、水面付近に幅 6.5cm の水平のフランジと 1m ごとに幅 6.5cm の縦のフランジがあるためにその部分は空白となっている。

CASE-3 ($W = 0.68, L_N = 1.9$) では、中間密度層からも下層からも湧昇は確認できなかった。送風開始後の初期の 120~150 秒までは上下の密度境界面がほぼ同様の形で上昇する。その後、両密度境界面は下降するが再び上昇に転じる。上側の密度境界面は初期位置よりも約 5cm ほど上昇した位置を中心に振動している。一方、下側の密度境界面は下降後に再び上昇して 300 秒後には初期位置付近にある。このように上下の密度境界面とも送風の初期段階は内部で振動していることがわかる。このケースは上側の境界面だけが傾く Mode2 型であるものと考えられる。また、上側の密度境界面では比較的活発な混合が見られたが、これは風上端に 2 層系で形成されたくさび型の混合層とよく似ている⁷⁾。

CASE-4 ($W = 0.34, L_N = 0.95$) では、中間密度層だけが湧昇している。CASE-3 と比較して上側と下側の密度境界面の変位が大きくなっており、上側の密度境界面は時間と共に上昇して約 180 秒後に水面に達している。このケースも CASE-3 と同様に Mode2 型に分類できる。上側の密度境界面は上昇する際に送風口から約 1m の地点で少し遅れて上昇しているために、“へ”の字”型をしている。これは風によるせん断力が吹き出し口付近で境界の影響を受けているからであろうと考えられる。また、上側の密度境界面が細かく波打っているのは、Spiegel ら⁹⁾によって示されている、せん断不安定によって発生する Kelvin-Helmholz 波であり、急

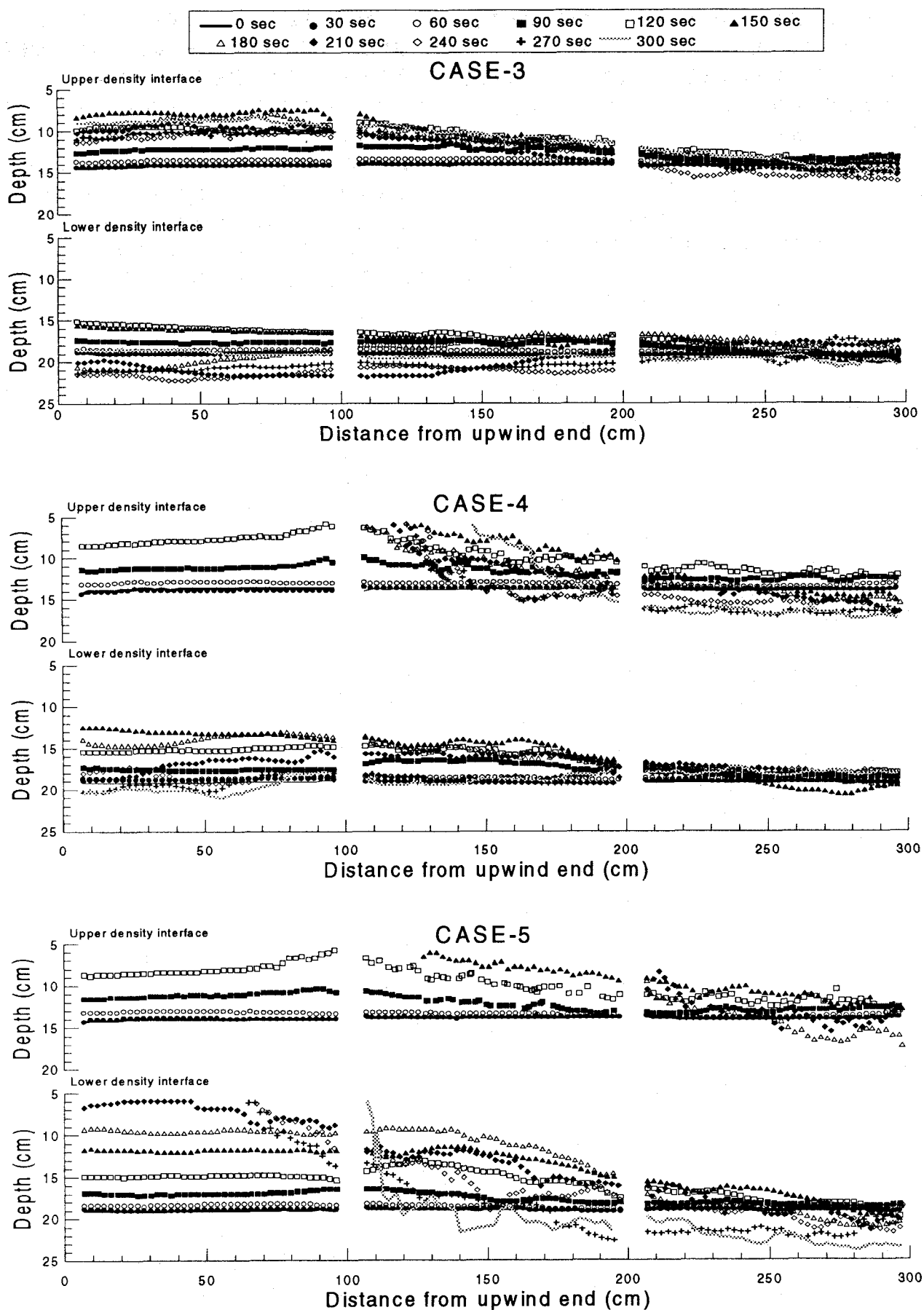


図-3：上下の密度境界面の時間的変化

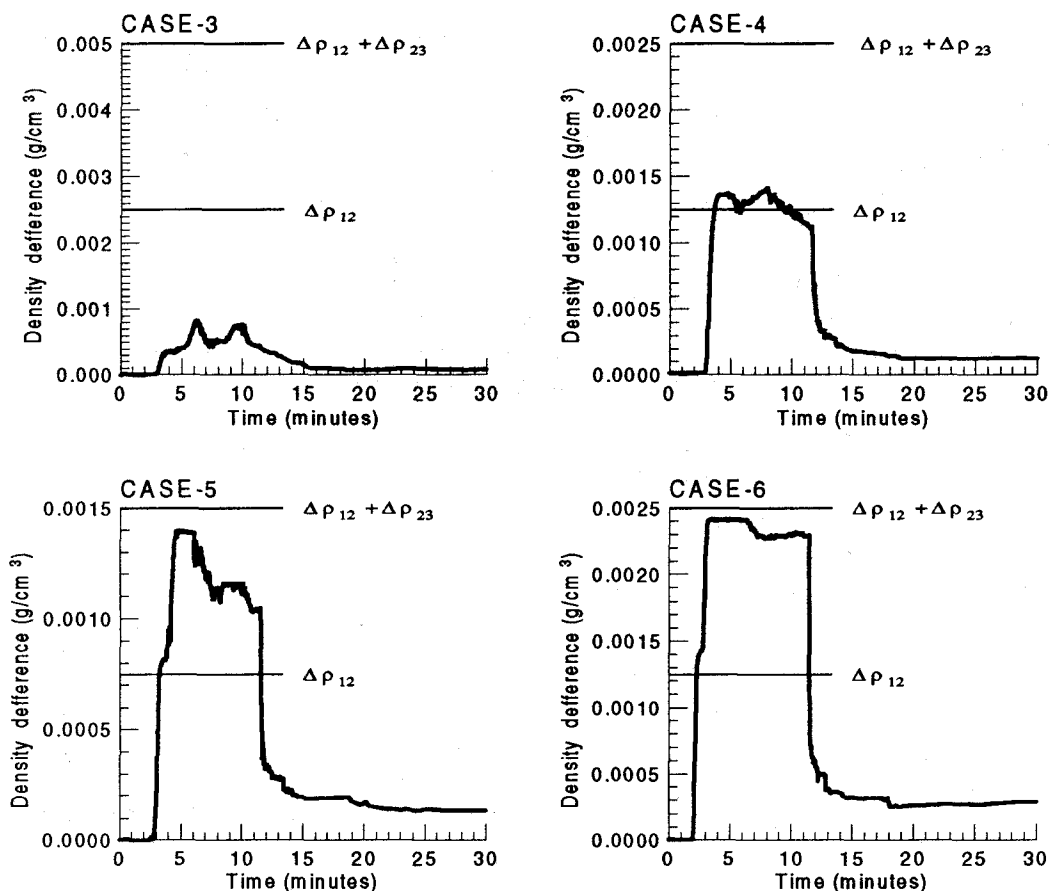


図-4：風上端の水面への湧昇水密度

速に密度界面が侵食 (deepening) されていく様子がわかる。

CASE-5 ($W = 0.2, L_N = 0.57$) では下側の境界面まではほぼ完全に湧昇した。上側の境界面はほぼ平行に”へ”の字”型をしながら上昇し、上側の密度境界面が最初に、続いて下側の密度境界面が水面に達して下層水が水面まで湧昇した。このケースは上下境界面が同じように傾く Model に分類できる。CASE-4 で上側の境界面で目立った Kelvin-Helmholz 不安定が CASE-5 では上下の密度境界面で見られるようになった。上側の境界面は 210 秒後には判別できなくなり、上層と中間密度層は強く混合している。Lake 数 $L_N < 1$ の場合は道奥⁸⁾の指摘通り下層まで乱流状態となり下側の密度境界面も急激に低下している。

図-4 は、風上端に取り付けた電気伝導度計によって測定された CASE-3、CASE-4、CASE-5、CASE-6 の水面における密度の時間変化を示したものである。CASE-3 では中層と上層の混合によって生じた水塊が送風開始 3 分後に湧昇していることが確認でき、最大 0.0008 g/cm^3 に達している。次に CASE-4 では中間密度層の密度よりいくぶん高い密度の水塊の湧昇が確認できるが、これは下層と中層との混合した後にその混合水塊が急速に湧昇していることを示すものである。CASE-5 の $L_N = 0.57$

という値は下層水が直接に湧昇してもおかしくない値であるが、結果では下層密度より少し密度の小さい水塊が湧昇するにとどまっている。これは中層と下層の境界面が水面に達する前に境界面で激しい混合が生じたためであると考えられる。CASE-6 は CASE-4 の場合と密度関係は同じであるが、上層が 5cm 薄く、下層が 5cm 厚い場合である。この違いによって湧昇にかなりの違いが生じているのがわかる。また、Lake 数 (L_N) が異なっている点にも注目したい。 $L_N = 0.95$ の CASE-4 では中間密度層のみ湧昇を起こしているのに対して、 $L_N = 0.59$ の CASE-6 では下層密度近くの水塊まで湧昇していることが確認できる。また、CASE-4 のほうが湧昇してくる時間が 1 分ほど遅れている。CASE-5 と CASE-6 のグラフにおいて密度が上昇する際に段があるのは、下層と少し混合した中間密度層が湧昇した際の変化である。貯水池や湖では風によって成層破壊 (destratification) がどの程度まで進行したのかを知ることは水質管理上重要である。図-5 は CASE-3、CASE-4、CASE-5 の初期の鉛直密度分布 (点線) と送風後の最終的な鉛直密度分布 (実線) を示したものである。最終的な密度分布は送風中の混合と送風停止後の内部波による混合の両方の影響を受けるが、それぞれのケースで特徴的な密度分布を示している。CASE-3 では上側の密度境界

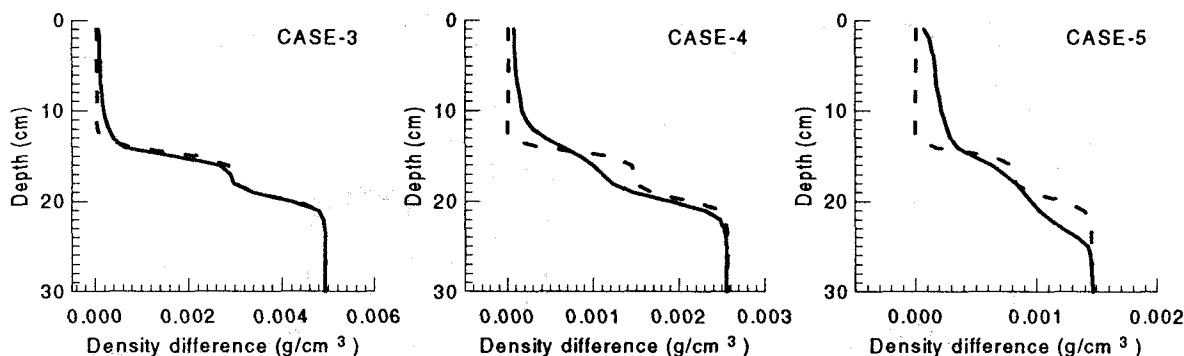


図-5：初期密度分布と実験終了後の密度分布の比較

面近くでのみ混合が起こったようにしか見えないのに対して、CASE-4では上層と中間密度層が強く混合し、下側の密度境界面においても若干混合が生じたような結果を示している。さらにCASE-5では、底面付近を除くすべての層で混合が生じたことがグラフから読みとれる。

最後に、Lake数(L_N)とWedderburn数(W)を用いて湧昇現象を分類すると図-6のようになる。

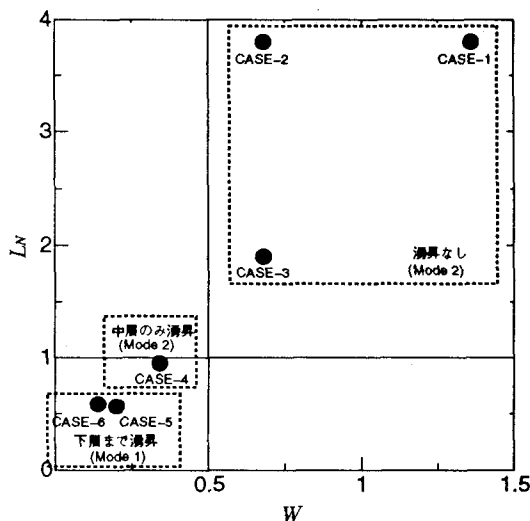


図-6：Lake数とWedderburn数による湧昇現象の分類

4. まとめ

本研究では、中間密度層が存在する成層水域における密度境界面の挙動及び湧昇現象を室内実験により再現した。今回得られた結論は以下の通りである。

(1) 3層構造を有する閉鎖性水域での密度境界面の挙動は非定常的であり、上側と下側の密度境界面が個別に動くために複雑な現象となるが、Lake数(L_N)とWedderburn数(W)を用いることによって各層の湧昇現象が分類できることが実験的に確かめられた。

(2) 下層水や中間密度水の水面への湧昇を引き起こすような小さな L_N や W の領域では、密度境界面においてせん断流による不安定が生じ、混合が激しくなる。この場合、密度層間の混合による影響も湧昇水密度を決定する重要な要素である。

(3) 実験において、密度境界面が”へ”の字”型をして上昇した。

謝辞

実験とデータ整理を手伝っていただいた東京都立大学大学院修士1年の高橋健、小松篤太郎の両氏に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 森川浩, 村本嘉雄, 大久保賢治, 濱口一朗, 細身知彦: 風応力が及ぼす成層湖の流動に関する実験, 水工学論文集, 第43巻, pp.1061-1066, 1999.
- 2) 岩熊敏夫: 湖を読む, 岩波書店, pp.30-33, 1994
- 3) 西条八束, 三田村緒佐武: 新編 湖沼調査法, 講談社サイエンティフィク, pp.74-80, 1995
- 4) Monismith, S, G.: An experimental study of the upwelling response of stratified reservoirs to surface shear stress, J. of Fluid Mech., Vol.171, pp.407-439, 1986
- 5) Stevens, C. and Imberger, J.: The initial response of a stratified lake to a surface shear stress”, J. of Fluid Mech., Vol.312, pp.39-66, 1996
- 6) Imberger, J. and Patterson, J. C.: Physical Limnology, Advances in Applied Mechanics, Vol.27, pp.303-475, Academic Press, 1990
- 7) 新谷哲也, 梅山元彦: 風応力下における閉鎖二成層水域内での中間密度層の混合特性, 水工学論文集, 第44巻, pp.981-986, 2000
- 8) 道奥康治: 水温成層と熱循環が水質におよぼす影響, 湖沼、貯水池の管理に向けた富栄養化現象に関する学術研究のとりまとめ (土木学会水理委員会、環境水理部会), pp.303-400, 2000
- 9) Spiegel, R. H., and Imberger, J: The classification of mixed layer dynamics in lakes of small to medium size, J. Phys. Oceanog., Vol.19, pp.1104-1121, 1980.

(2000.10.2 受付)