

湧昇域の斜面が成層湖の湧昇・混合に与える影響

EFFECTS OF SLOPING BOUNDARY ON UPWELLING AND MIXING OF STRATIFIED LAKE

新谷哲也¹・梅山元彦²

Tetsuya SHINTANI and Motohiko UMEYAMA

¹ 正会員 工修 東京都立大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻 (〒192-0397 八王子市南大沢 1-1)

² 正会員 Ph.D. 東京都立大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (同上)

Laboratory experiments were carried out in a two-dimensional wind flume, where a plexiglass plate was placed at one side, in order to understand the upwelling and mixing in the stratified lake of linearly variable depth. In the flume, a fluid consisting of fresh water and salt water was prepared to imitate the density stratified lake. An image processing technique was used to reveal the motion of the density interface and the mixture of the upper and lower waters. The density of the upwelling fluid near the water surface in the upwind region were measured using three electric-conductivity meters. The flow field and mixing process were predicted by the $k - \epsilon$ turbulent model. The upwelling and mixing conditions depend not only on the density difference between the upper and lower waters, but also on the angle of the slope. The major features of the upwelling processes are well reproduced by the numerical simulation.

Key Words: stratified lake, upwelling, sloping boundary, $k - \epsilon$ model, CIP scheme

1. はじめに

風応力によって引き起こされる成層湖内の湧昇現象は、淡水赤潮やアオコの発生といった問題と密接に関連している。そして、そのメカニズムの解明のために、数多くの研究者達が室内実験や数値計算を試みてきた。例えば、Imberger ら¹⁾ は2成層閉鎖性水域における下層水の湧昇を Wedderburn 数によって統一的に分類する方法を提案しているし、Monismith²⁾ は湖の成層状態を温度躍層を考慮した3成層でモデル化して、実験的に2成層の仮定では説明できない自然現象の解明を試みている。3成層の問題に関連しては Imberger ら³⁾ も風応力と成層の傾きから生じる復元力との比を表す Lake 数を使い、3成層水域における湧昇の分類法を提案している。また、新谷ら⁴⁾ は吹送流によって閉鎖性2成層水域の風上側に形成される中間密度層の発達過程を調べるために、画像処理の手法を用いて研究を行っている。さらに、新谷ら⁵⁾ はこの方法によって閉鎖性3成層水域における湧昇時の密度境界面変動量を抽出し、Imberger らが3成層水域下で提案した湧昇分類が画像からよりの確に予測できることを示した。この3

成層の実験結果は、後に $k - \epsilon$ モデルを使った数値計算の結果と比較し、良好な一致を得た⁶⁾。

これまで行ってきた研究によって、矩形断面に関しての湧昇現象の解明は画像解析の導入によって著しく進展した。しかし、実際の湖や貯水池の底面形状は一定ではなく、斜面形状のものがほとんどである。尹ら⁷⁾ はこの点に着目して、1/7.5 勾配の底面形状を仮定した水理模型実験を行った。その結果、矩形断面の場合に比べて、風上端付近で水塊の体積が減少すること及び底面での摩擦が増大することによって、下層からの湧昇が抑えられるという結果が得られた。尹らは斜面が存在する場合とそうでない場合の現象を定性的に扱っているが、斜面の存在が湧昇や混合過程に与える影響をより正確に把握するためには、著者らが行ってきた画像解析の手法を適用して密度境界面の変動や湧昇水密度の測定を行えば一層その現象を理解することが容易になるものと想像できる。

本研究の目的は、斜面を設置した2次元風洞水槽を用いて、風応力によって引き起こされる斜面付近の流動・混合特性を詳細に把握することである。室内実験

では、ビデオカメラを用いて水槽内の2成層流体の挙動を撮影し、その画像の解析を行うことで密度境界面の変動と混合による濃度分布状況を測定した。それに加え、電気伝導度計による風上側の湧昇水密度の時間変化も測定した。また実験結果の再現のために、 $k-\epsilon$ 乱流モデルを使つての数値計算を行った。これによって斜面を有する2成層水域内の流動分布及び濃度分布を定量的に表すことができた。

2. 実験法

風洞実験は、新谷ら⁴⁾に示されている長さ600cm、幅15cm、高さ35cmの2次元水槽を用い、さらに今回は風上側にアクリル製の斜面を設置した(図-1)。斜面は、その勾配を1/10と1/5の2種類とした。水槽内の成層構造は、上下層の厚さが17cmずつの2成層構造とした。水面に作用させる風応力は、すべての実験を通して一定とした。風速は1分間かけて徐々に増加させ、最終的に風洞内の最大風速を6.5m/sになるまで上げた。1ケースの測定時間は全て30分にとり、初期の10分間のみ風を吹かせた。ビデオカメラによって密度境界面の運動と混合状況を撮影するため、下層水をウォーターブルーで着色した。また、上層水には、風波の発生を抑えるための界面活性剤を混入させた。

湧昇時の密度境界面の挙動と混合を把握するために、風上端2mの区間を2台のデジタルビデオカメラで撮影した。撮影の方法は、新谷ら⁴⁾に詳しく記述されているが、今回は水槽後方からのライティングの際に水槽の裏面全体に半透明フィルターを付着させることによって、より一様でノイズの少ない透過光を撮影することが可能になった。撮影した映像は、画像処理を行って256段階の輝度に変換した後、輝度分布図として表す。また、風上側で水面に湧昇する水塊の密度変化を調べるために、風上端から20cm、90cm、160cmの地点に電気伝導度計を設置した。なお、電気伝導度計のセンサー位置は水面から1cmの深さとした。

実験条件は表-1に示すように、2種類の斜面形状の場合と斜面が存在しない場合の3パターンとし、さらに上下水の密度差を3パターンとして、合計9ケー

スの実験を行った。表中の S は斜面勾配、 $\Delta\rho$ は上層水と下層水の密度差、 W はWedderburn数³⁾である。なおWedderburn数は以下の式を用いて計算した。

$$W = \frac{\Delta\rho g h_1 h_2}{\rho_1 u_*^2 L} \quad (1)$$

ここで、 g は重力加速度、 h_1 は上層厚さ、 ρ_1 は上層密度、 u_* は摩擦速度、 L は吹送距離である。

表-1: 実験条件

Case	S	$\Delta\rho$ (g/cm^3)	W
Case-A1	1/10	0.005	2.0
Case-A2	1/10	0.0025	1.0
Case-A3	1/10	0.00125	0.5
Case-B1	1/5	0.005	2.0
Case-B2	1/5	0.0025	1.0
Case-B3	1/5	0.00125	0.5
Case-C1	斜面無し	0.005	2.0
Case-C2	斜面無し	0.0025	1.0
Case-C3	斜面無し	0.00125	0.5

3. 数値計算法

成層湖内の密度流を $k-\epsilon$ 乱流モデルを使つて計算する際に必要となる基礎方程式は、連続式、運動方程式、密度の輸送方程式及び k と ϵ の輸送方程式である。これらの基礎方程式の詳細については、新谷ら⁶⁾を参照して頂きたい。

本研究では、基礎方程式をデカルト座標スタaggerド格子に基づいて離散化し、斜面部分は階段形状の境界で近似した。この離散化された基礎方程式に2段階準陽解法であるfractional step法を適用して収束解を求めた。数値計算において密度境界面の運動を適切に再現するためには、支配方程式の移流項に数値拡散の少ない高精度の風上差分を用いる必要がある。そこで、本研究においてはYabe⁸⁾によって開発されたCIP法を運動方程式と密度の輸送方程式の移流項に適用する。CIP法は格子間の物理量のプロファイルを物理量その

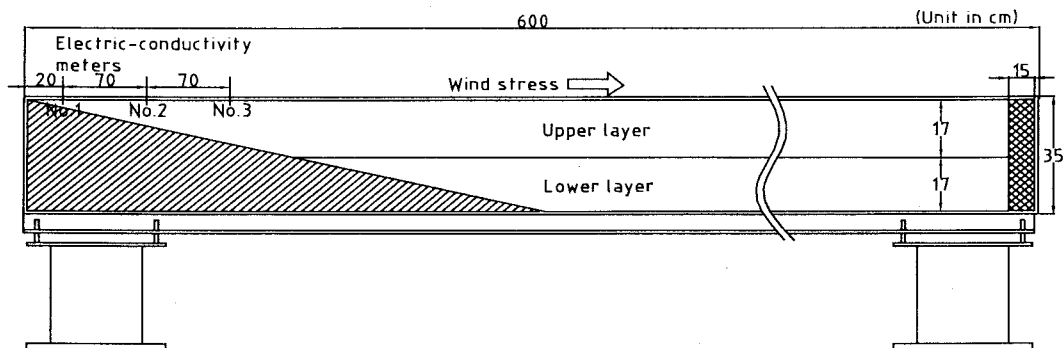


図-1: 実験水槽

ものの空間微分を用いた 3 次補間式で求める方法である。また、密度の移流計算時に生じたオーバーシュートやアンダーシュートは、乱流エネルギー k の輸送方程式中にある浮力による乱流生成項に起因する k の過大評価の原因となるため、MMT スキームを用いてこれらを抑えた。また、 k 及び ϵ の輸送方程式の移流項には非物理的な数値振動の生じない ULTIMATE -QUICKEST スキームを用いた。すべてのケースにおいて、時間ステップは約 $\Delta t = 0.003$ 秒として計算を行った。

4. 実験結果の考察と計算結果の検討

図-2 は、斜面勾配が 1/10 (Case-A1, A2, A3) の画像解析結果を示している。図は実験開始後の下層水の挙動を 1 分ごとに 5 分間示しており、密度変化を輝度値に変換して表現している。本研究では、特に斜面上での密度境界面の挙動に着目しているため、その変化が著しい風上端から 105cm~190cm の範囲を示してある。この斜面勾配では、斜面上における下層水の遡上や混合の形態が Wedderburn 数によって大きく異なっており、それぞれ特徴的な挙動を示しているのがわかる。Case-A1 ($W=2.0$) では、密度境界面のセットアップは非常に小さく、下層水が斜面を遡上する距離は 3 ケース中で最も短い。このケースにおいて、密度境界面は内部セイシュによって振幅の小さい上下運動を繰り返しているだけであった。次に、Wedderburn 数が Case-A1 より小さい Case-A2 ($W=1.0$) では、送風開始後 3 分前後で下層水が斜面のかなり上部まで遡上している様子が画像からわかる。下層水が遡上している間、密度境界面は斜面にほぼ平行状態であり、時間の経過に伴って層厚は次第に薄くなっている。また、密度境界面付近では Case-A1 に比べて激しい混合が発生していることがわかる。以上 2 つのケースでは、下層水が直接水面へ到達することはなかった。しかし、密度境界面で生成された上層水と下層水による中間密度の混合水が風上側に薄く蓄積する現象と、混合水が斜面に沿って水面へと輸送される現象が起こっていた。これらに対して、最も Wedderburn 数の小さい Case-A3 ($W=0.5$) では、下層水が大量に斜面を遡上して水面へ到達した。密度境界面では、Case-A2 のときよりもさらに激しい混合が確認できる。送風開始 5 分後には、内部セイシュによって大部分の下層水は下方向へ移動するが、既に風上側で水面に達した下層水は上層水と激しく混合した後、水面付近の流れによって風下側へ移流・拡散してゆく。この斜面上部の浅い領域での混合現象は物質拡散に対して大きな役割を果たすものと考えられる。

図-3 は、斜面勾配が 1/5 (Case-B1, B2, B3) の画像解析結果を示している。標示範囲は図-2 とは異なっており、風上端から 5cm~95cm を表示している。この斜面勾配

での下層水の挙動は、斜面勾配が 1/10 の場合と比べると大きく違っている。密度境界面は Wedderburn 数に係わりなく、ほぼ水平を保ったまま上下に移動しており、密度境界面付近の混合は斜面が 1/10 の場合に比べて非常に弱い。Case-B1 ($W=2.0$) と Case-B2 ($W=1.0$) では、Case-A1, A2 の場合と同様に混合水の蓄積によって中間密度層が形成されるが、斜面に沿って運ばれる混合水の量は比較的少なかった。また、Case-B3 では密度境界面はその面をほぼ一定に保ったまま上昇して水面に達するが、この区域においては 5 分経過した後も密度境界面は上昇したままであった。今回の実験では流速の測定を行っていないためを確認することはできないが、斜面勾配によって下層水や混合水の挙動が異なるのは、斜面勾配が変わることによって斜面と密度境界面の交点付近での流動が変化することが一つの原因でないかと考えられる。

図-4 は、風上側の 3 ヶ所に設置した電気伝導度計で測定した実験開始から 10 分間の湧昇水密度の時間変化を示したものである。図中の太線、破線、細線はそれぞれ、風上端から 20cm (No.1), 90cm (No.2), 160cm (No.3) の位置に設置した電気伝導度計による測定結果を示している。横軸は経過時間を示し、縦軸は湧昇水と上層水の密度差を初期密度差 $\Delta\rho$ で無次元化した値を示している。まず、これらの図から、読み取ることのできる密度変化の傾向について考察する。斜面勾配が同一なケースでは、Wedderburn 数が小さいほど湧昇水密度が下層水密度に近くなっている。また、Wedderburn 数が等しい場合には、斜面勾配が緩やかなほど湧昇水密度が高くなっている、測定場所による湧昇水密度差は広がる傾向にある。次に、風上端に最も近い電気伝導度計 (No.1) によって得られた結果から湧昇水密度の変動特性を考察する。すべてのケースにおいて湧昇水密度の最大値は、No.1 の電気伝導度計で観測されているが、必ずしも最初から下層水もしくは混合水の湧昇がこの近傍から起きているわけではない (Case-B2, B3, C2, C3 を参照)。また、No.1 と No.2 での湧昇開始が顕著になるのは、成層状態ではなく斜面勾配に関係するという結果が得られている。そのおおよその開始時間は勾配が 1/10 のケースでは約 3 分、勾配が 1/5 のケースでは約 3 分 30 秒、斜面が存在しないケースでは約 4 分であり、斜面勾配が緩いほど湧昇開始までの時間が短くなる傾向にある。全実験ケース中で下層水が湧昇したのは、Case-A3 と Case-B3 であることがわかる。しかし、この 2 ケースのグラフからは異なる点も発見できる。一つは、No.1 地点における密度変化であり、Case-B3 の方が Case-A3 よりも高密度水の供給が長時間続いているのがわかる。この理由として、尹らによっても指摘されているが、斜面の存在やその勾配の大小によって

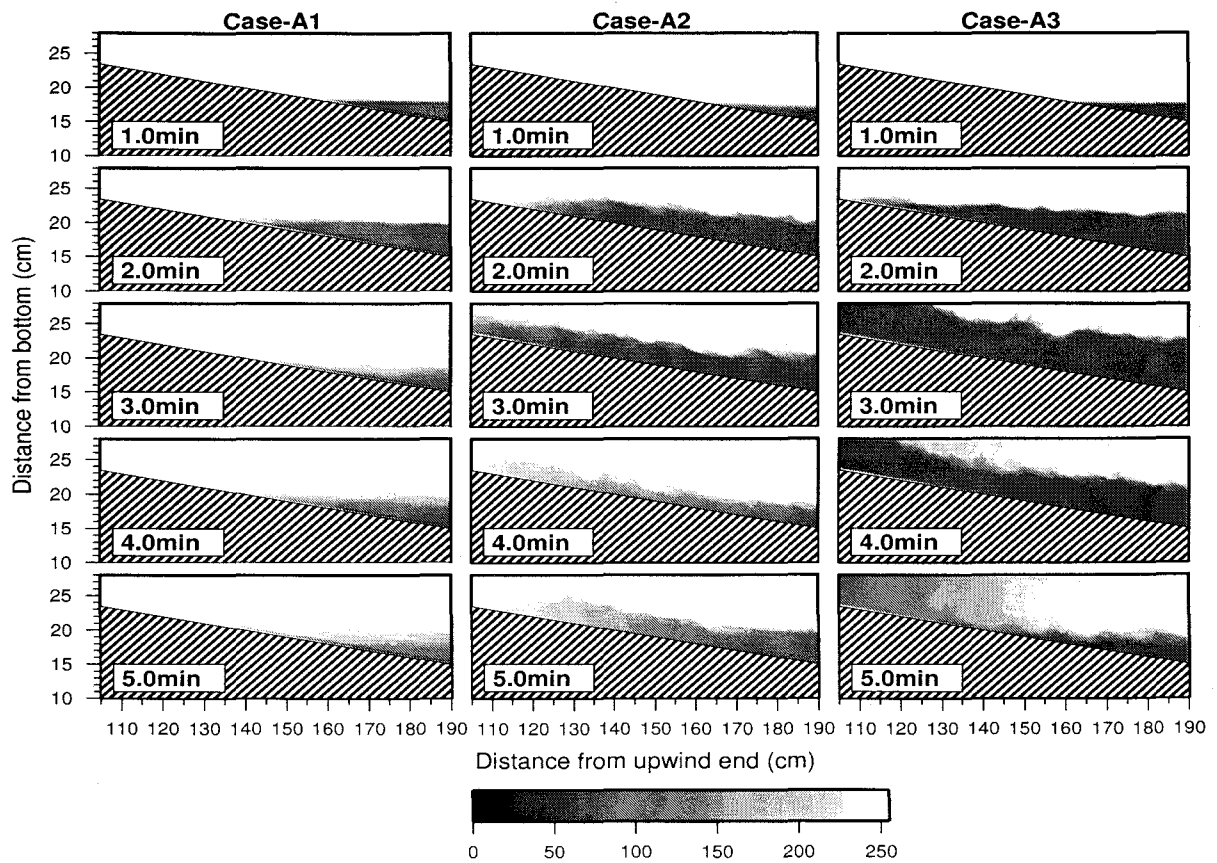


図-2 :斜面勾配が 1/10 の斜面上における密度境界面の挙動と混合形態 (輝度分布)

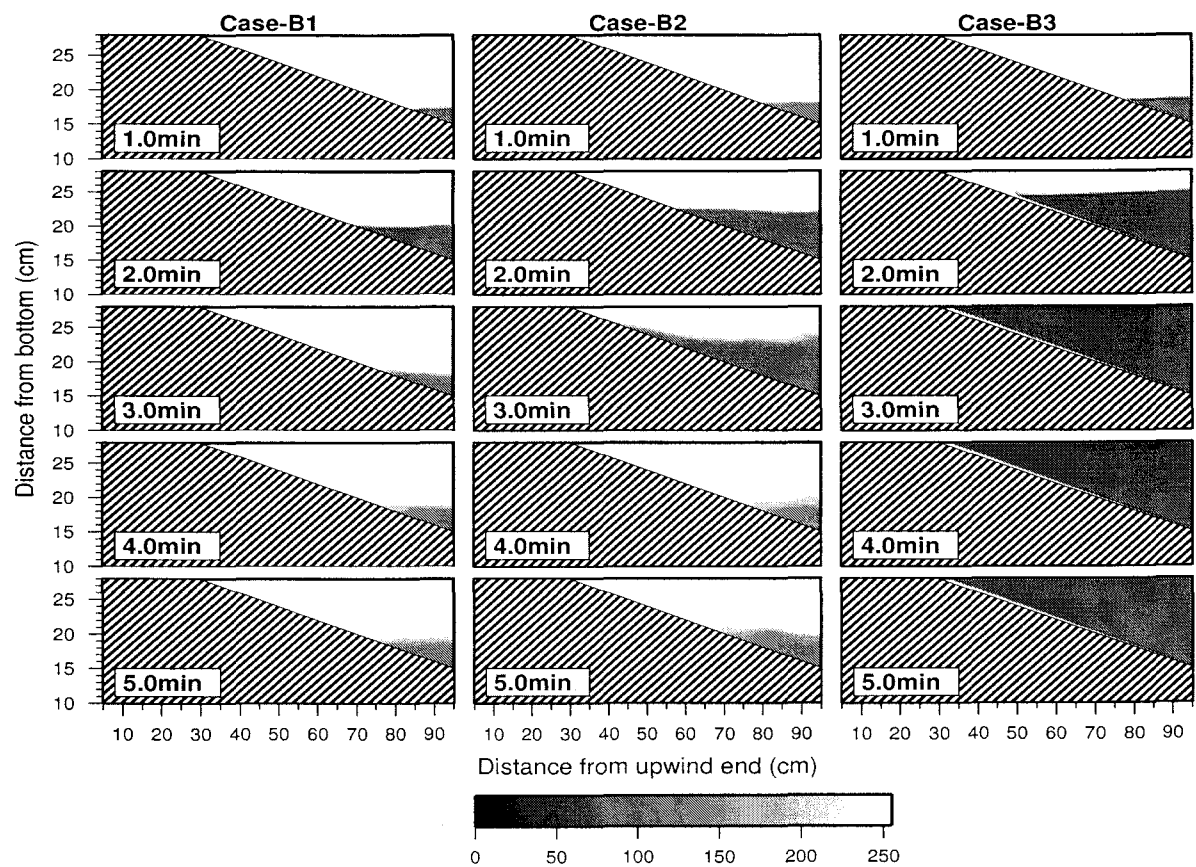


図-3 :斜面勾配が 1/5 の斜面上における密度境界面の挙動と混合形態 (輝度分布)

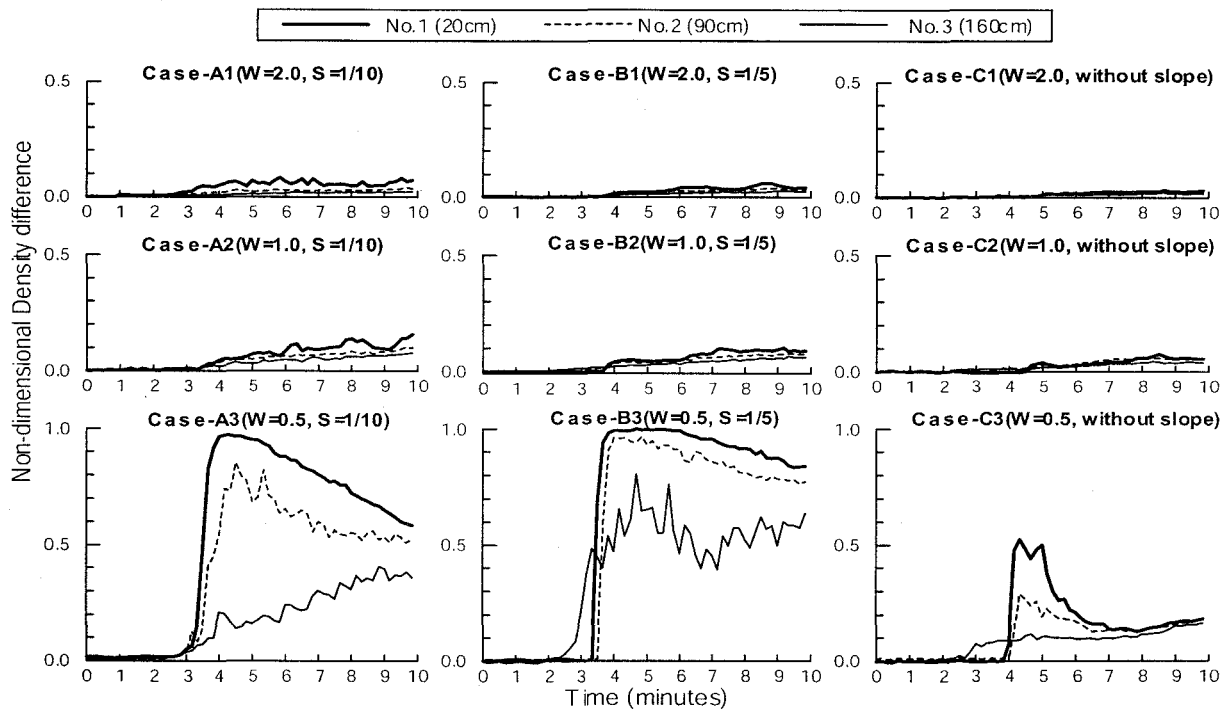


図-4：電気伝導度計による湧昇水密度の時間的変化

風上端付近の水塊体積が変化することが関係しているようである。斜面勾配が緩やかな場合は風上側での水深が相対的に減少するために、下層水が大量に湧昇できなくなることや風応力によって生じる混合が激しくなることにより、風上における密度の低下が早くなるものと考えられる。もう一つの違いは、No.3 地点における湧昇密度の変化である。Case-A3 では、小刻みな振動をしながら次第に密度が上昇しているのに対して、Case-B3 では急激に上昇した後に下降し、再び上昇に転じる。このことは、Case-A3 よりも Case-B3 の方が、広い範囲にわたって下層水が上層水と混合をする前に湧昇してしまうということを示すものである。Case-A3 や Case-B3 と同じ密度構造を持つ Case-C3 は、No.1 付近で密度境界面は水面近くまで上昇したが、下層水の直接の湧昇には至らなかった。

下層水が風上側で湧昇する際の密度境界面の状況を以下のように分類する。T1 としてほとんど混合を起こさずに湧昇する場合、T2 として中間密度層が蓄積する場合、T3 として密度境界面で混合を起こしながら湧昇する場合、T4 として混合しながら上昇して水面に達する場合の4つの分類を考える。図-5は、この分類に従って今回実験を行った全ケースを整理したものである。図から、Wedderburn 数が小さいときは斜面勾配によって下層水の湧昇形態に変化が見られるが、大きくなるにつれて形態に変化がなくなる。

図-6は、送風後5分間の Case-A1 と Case-A3 の流動と密度の変化を数値計算で再現したものである。図中の密度は、下層水密度で無次元化した値で示している。計算結果は、両ケースとも実験で見られる密度境

界面の特徴的な挙動を良く再現している。Case-A1 では上層部分でほぼ定常的に循環流が生じているのに対し、Case-A3 では風下端付近の下降流が水槽の底まで達し、水槽のほぼ全域で循環流が起こるようになっている。この水槽の底まで達する下降流は、実験においても風下端付近で起きていた。しかし、数値計算では実験よりも混合が激しくなる傾向が得られた。これは、標準型の $k-\epsilon$ 乱流モデルが壁面や密度境界面付近における低レイノルズ数効果を再現できないことや斜面を階段形状で近似したことが原因であると考えられる。

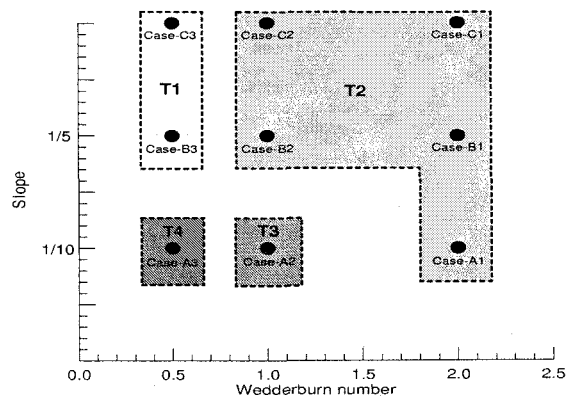


図-5：下層水の湧昇形態分類

5. まとめ

本研究では、斜面形状の地形をもつ成層湖の湧昇・混合現象を室内実験と数値解析によって確かめた。今回の研究で得られた結論は以下の通りである。

(1) 斜面の有無や斜面勾配の大きさによって、湧昇時の密度境界面の形状と混合形態が大きく異なることが画像解析から明らかとなった。

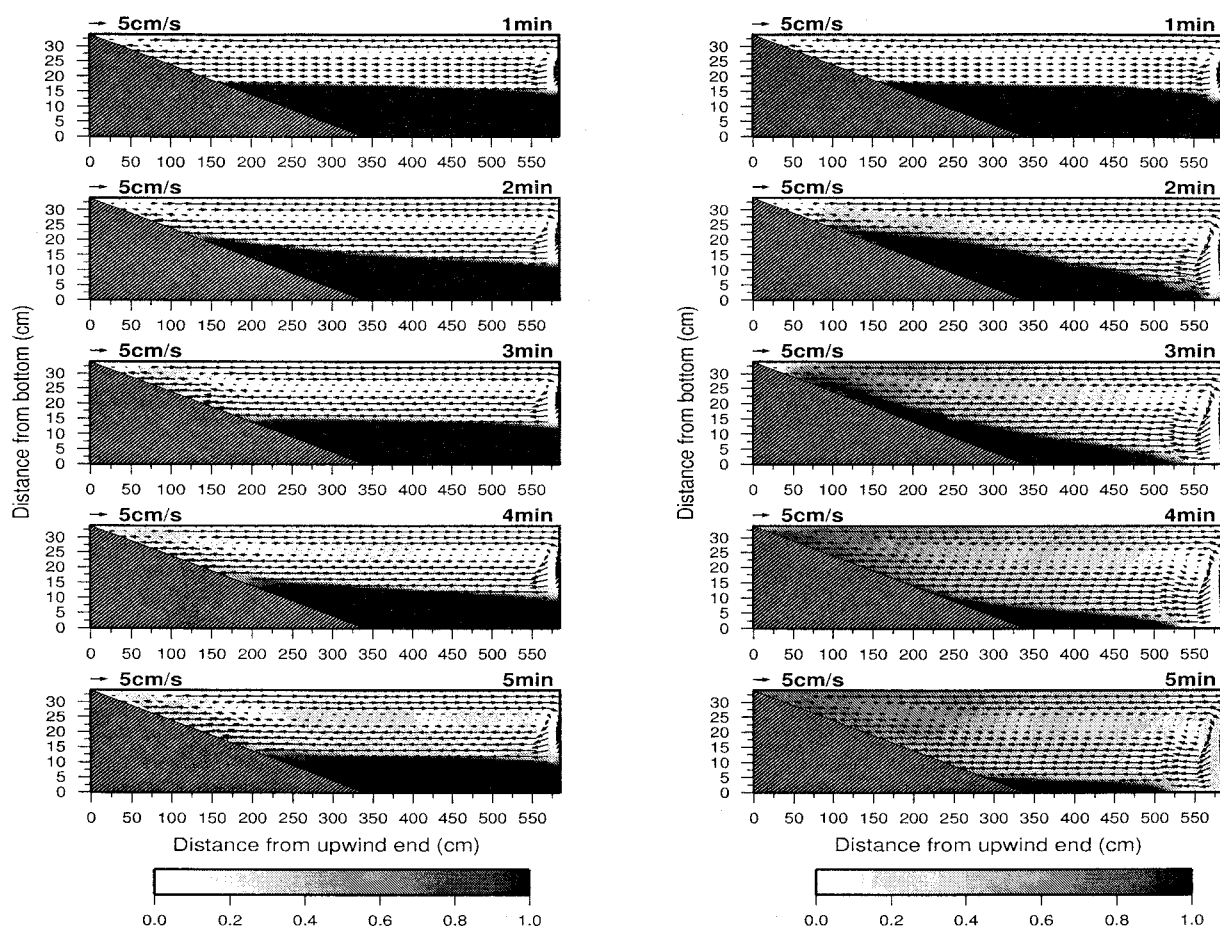


図-6 :Case-A1 (左) と Case-A3 (右) の数値計算結果 (初期の5分間)

(2) 湧昇水密度を電気伝導度計を使って測定した結果、斜面のないケースに比べて斜面が存在するケースの方が湧昇開始が早く、より高濃度な混合水の湧昇が起こることがわかった。

(3) 下層水の湧昇形態を斜面勾配と Wedderburn 数によって分類し、その分類に従って実験を行った全ケースを図上に示した。

(4) $k-\epsilon$ 乱流モデルを使った数値計算で水槽内の流速と密度を計算した結果、実験における湧昇時の密度境界面の初期挙動と特徴的な混合現象をほぼ再現することができた。しかし、数値計算と実験の整合性をより高めるためには、低レイノルズ数効果を考慮した乱流モデルの採用や斜面を一般座標で直線的に表現することが必要であり、現在この方針で解析を試みている。

謝辞

実験とデータ解析を行って頂いた東京都立大学大学院修士2年の坂井宗、同学部4年小林哲也の両氏に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) Imberger, J. and Hamblin, P. F.: Dynamics of lakes, reservoirs and cooling ponds, Annu. Rev. Fluid Dynam., Vol.14, pp.153-187, 1982.
- 2) 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.

3) Imberger, J. and Patterson, J. C.: Physical Limnology, Advances in Applied Mech., Vol.27, pp.303-475, Academic Press, 1990.

4) 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.

5) 新谷哲也, 梅山元彦: 風による閉鎖成層水中に形成される中間密度層の応答, 水工学論文集, 第45巻, pp.1141-1146, 2001.

6) 新谷哲也, 梅山元彦: 風応力による三成層水域の応答に関する数値解析, 水工学論文集, 第46巻, pp.1007-1012, 2002.

7) 尹鍾星, 中辻啓二, 村岡浩爾: 閉鎖性成層水域における吹送密度流に関する実験, 水工学論文集, 第37巻, pp.285-292, 1993.

8) Yabe, T.: Unified solver CIP for solid, liquid and gas, Computational Fluid Dynamics Review, Wiley, 1997.

(2002. 9. 30受付)