

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

MIXING OF INTERMEDIATE DENSITY LAYER IN CLOSED TWO-LAYERED WATER UNDER WIND STRESS

新谷哲也¹・梅山元彦²

Tetsuya SHINTANI and Motohiko UMEYAMA

¹正会員 工修 東京都立大学助手 工学部土木工学科 (〒192-0397 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 (〒192-0397 八王子市南大沢1-1)

Experiments by a two-dimensional wind flume were performed to investigate the wind-induced density change and the growth of a wedge-shaped intermediate density layer in a closed stratified water. The vertical distributions of density and velocity were measured near the upwind end while the mixing-layer deepening was visually estimated at the end of the flume. Three digital video cameras were used to take the temporal density changes and the image was analyzed by the digital computer. The luminance profile obtained by the image processing technique is in agreement with the density profile measured by the electric conductivity meters. The intermediate density layer is formed by an accumulation of mixed fluid at the start and gradually increase the thickness and length due to wind-induced circulation in the mixed layer. The temporal velocity distribution in the mixed layer depends on the density difference and the mixing-layer deepening.

Key Words : *Density stratified lake, wind-induced circulation, intermediate density layer, image processing*

1. はじめに

湖や貯水池等の閉鎖性水域では、上層と下層との水温や溶存物質などの違いによって鉛直方向に密度差が生じ、その結果内部境界面が形成される。特に夏期は、水面近くの水が温められるために強い温度成層が形成され、内部境界面が安定することからこの境界面の下層では富栄養化や貧酸素による水質汚染が起こされ深刻な問題となっている。閉鎖性水域に作用する外的要因としては水表面に作用する風応力及び水面を通しての熱のやりとりが考えられるが、これらは湖や池の水質状況を決定する重要な支配因子でもある。特に、水面上をある一定以上の速度を持って一方向に吹く風は、水域全体を循環させ、成層の不安定化をもたらすことによって溶存物質の移流や拡散等を促すことから、水質の悪化を軽減する働きがある。

成層した閉鎖性水域における吹送流に関する研究は、道奥ら¹⁾²⁾、及び尹³⁾が乱流モデルを用いた数値実験や室内実験を通して行ってきた。それらの研究では、主に密度の輸送機構が1次元の連行則との関係で議論されている。

それに対して森川⁴⁾は実験水槽全体をボックスと考え、混合によって生じる密度偏差からポテンシャルエネルギーを計算し、得られた時々刻々のポテンシャル増加量を1次元の連行速度に換算した議論を行っている。しかし、一般に閉鎖水域では上層水の下層水への連行が場所的に均一ではなく、問題を断面2次元的な混合現象として扱わなければならないはずである。閉鎖した水域では、水面付近の吹送流が沈降した結果生じる逆流によって内部境界面付近で上層水と下層水が混じり合い、風上端に蓄積されるので、境界面の鉛直方向の連行だけでなく新たに生成された混合層の空間分布の時間変化も定量的に扱う必要がある。風上側に混合層が時間とともに蓄積することは、すでにKitら⁵⁾や森川⁶⁾も指摘しており、水槽の壁面に対して形成される楔形の層を中間密度層⁷⁾と呼んでいる。この中間密度層は、鉛直方向の領域に大きく割り込んでくるため、上層の流動の形態に大きく変化を与えることになる。また、中間密度層で覆われた下層の一部領域では、上層からの運動量がほとんど伝達されないために流動が起こりにくくなってしまう。従って、閉鎖性水域での水理学的現象を考える上で、この風上側に

蓄積される楔形の間中密度層の発達過程を詳細に調べることは今後重要なテーマになってくるものと思われる。特に、比較的規模が小さくしかも浅い湖やダム湖の循環の問題を解明してゆく上では、この中間密度層の存在が連行を考える上で重要な因子となる可能性がある。

Umeyamaらは、閉鎖水域内での諸現象を解明するために、2次元風洞水槽を用いて実験を行った。その実験では、中間密度層の発達のメカニズムは議論されておらず、中間密度層を無視した水循環について述べられているだけであった。今回の実験では前回同様、水槽に塩水と淡水とで二層層を作り、その上を一方に風を長時間吹かせるが、二次元断面での流速に加え塩分密度の時間変化も測定した。特に、密度分布については電気伝導度計を用いた塩水の伝導度測定及び、ビデオ撮影による輝度測定を行っている。また、両測定結果を比較することによって、今後この種の問題に対しての画像解析の適用性について議論を行っている。

2. 実験方法

実験は、図-1に示す長さ600cm、幅15cm、高さ35cmの2次元風洞水槽を用いて行った。なお、水槽の風下側には消波装置が設置してある。水槽を覆っているアクリル製の風洞の高さは40cmであり、風上側の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（風洞内最大風速：約6.5m/s）とした。ただし、いきなり最大風速にまで上げると表層の攪拌作用による内部境界面の破壊や内部波の発生のおそれがあるために、三分間かけて徐々に風速を上げていった³⁾。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⁷⁾。実験は、表-1に示すように上層と下層の密度差及び上層と下層の水深を変えて6ケースの実験を行った。なお一ケースの測定時間は、120分間とした。表中のウェダーバーン数とレイノルズ数の算定は次式を用いて行った。

$$We = \frac{g \Delta \rho D}{\rho u_*^2} \frac{2h_1}{L}, \quad Re = \frac{u_* D}{\nu}$$

ここで、 g は重力加速度、 $\Delta \rho$ は上層と下層の密度差、 ρ は上層密度、 u_* は摩擦速度、 D は全水深、 h_1 は上層水深、 L は水槽の長さ、 ν は動粘性係数である。

上層と下層の密度の差は、先ず下層に塩水を流し込み、それが静止するのを待って、その上に少しずつ淡水を注ぎ半日かけて二層を作った。下層の塩水には中間層の発達の様子や境界面変位が観測できるようにウォーターブルーを入れて着色し、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。

CASE	密度差 $\Delta \rho$ (g/cm ³)	上層水深 h_1 (cm)	摩擦速度 u_* (cm/s)	Wedderburn num. (We)	Reynolds num. (Re)
CASE-A	0.0280	15	2.1	10.9	7154
CASE-B	0.0150	15	2.1	5.8	7154
CASE-C	0.0100	15	2.1	3.9	7154
CASE-D	0.0075	15	2.1	2.9	7154
CASE-E	0.0280	12	2.1	8.7	7154
CASE-F	0.0150	12	2.1	4.7	7154

表-1 実験条件

(1)電気伝導度計による塩分濃度の測定

風上側に発達する中間密度層の構造を詳細に調べるために水槽の風上端から、20cm、90cm、160cmの3ヶ所に電気伝導度計を設置した。これらの電気伝導度計は全て自動昇降機に接続してあり、水面から水底まで1cmごとに同時に測定できる。各水深の電気伝導度は10秒間測った後、上方又は下方へ移動させた。測定は、測定開始から20分間隔で行われ、一断面の測定時間は約5分（10秒／点×30点＝300秒）であった。

(2)ビデオ撮影と画像解析

内部境界面内部で起こる現象をさらに詳しく把握する

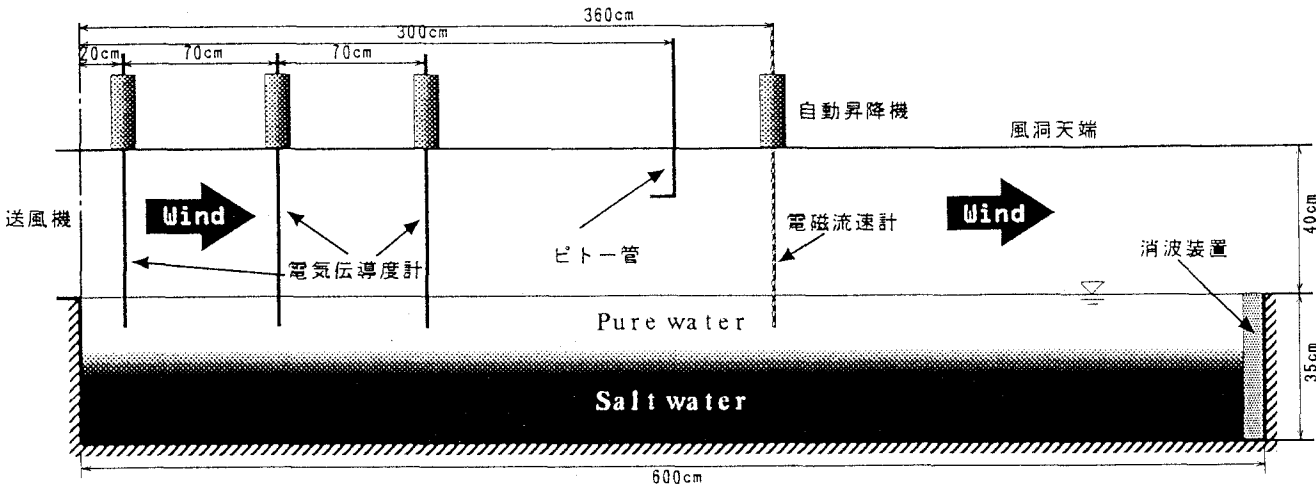


図-1 実験風洞水槽の概略図

ために風上端から3mまでの区間を1m間隔に分け、それぞれの区間を一台ずつ計3台のデジタルビデオカメラで撮影した。撮影は外部から光が入らない状況で、図-2に示すようにカメラと水槽を隔て逆側の下方に蛍光灯を並べ、その上部に約45度傾けて設置した白い発砲スチロールの反射板を照らした後行った。撮影された映像はデジタルコンピューターに組み込んだDVボードを用いて時間ごとの静止画像に変換し、画像解析ソフトを使って輝度分布を求めた。厳密には、得られた輝度を電気伝導度と関連づけるには光源や光路の問題など考慮しなければならないことも多いが、今回はその第一段階として同一断面における電気伝導度の記録から得られる鉛直伝導度分布と輝度分布の結果がどの程度相関性をもつかに着目した。

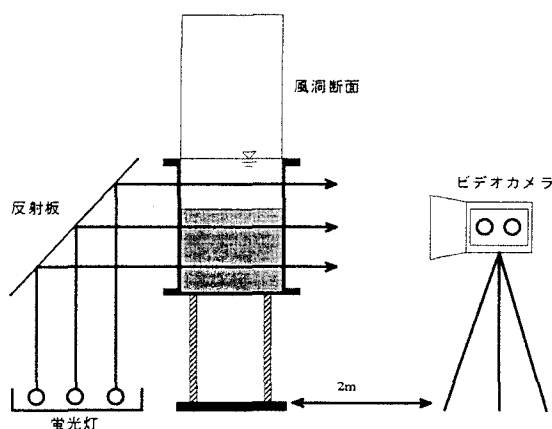


図-2 ビデオ撮影概略図

(3)流速及び風下端境界面変位

水平及び鉛直流速分布は、風上端から360cmの場所に設置した自動昇降機に電磁流速計を接続して、電気伝導度の測定と同様なやり方で20分ごとに測定した。また、風下端の境界面変位は、水槽に取り付けられた目盛りを10分ごとに読みとった。

3. 実験結果及び考察

一般に連行とは濃度等が異なる層と層の間に生じる質量の輸送現象のことであり、今回の実験でも水槽の風下部において密度境界面が次第に低下していく状況が観測できた。しかしながら、風上端では初期段階において移流や拡散の影響で連行が起こるが、間もなく風下側の境界面で生成された混合水が蓄積するために風下部での連行とは異なっていた。風上部の上層と中間密度層の間の斜面状境界で生じている連行は、その境界面を判別することが困難なために連行速度を決定することは難しかった。上層と下層の中間の密度値を持つ深さを境界面と仮定して、電気伝導度計によって測定された内部境界面の動きを追ってみると、どのケースにおいても風上側の境

界面は止まったままであることがわかった。このことは、この境界面の風上部分が中間密度層の内部に位置するために乱れが伝達されず、分子拡散のみで連行が進行しているためであると考えられる⁹⁾。

中間密度層は、風下側で連行が進むほどその厚さを増加させていく傾向が見られた。また、中間密度層は、下層を初期の位置よりも押し下げて、楔の先端は徐々に風下側に伸びて行くのであるが、上層と下層の密度差が大きいほどその形状は鉛直には薄く、水平に長いものとなった。

図-3は、CASE-Aの条件での風上側3地点(20cm, 90cm, 160cm)における密度の時間変化を電気伝導度計とビデオ解析から求めた結果である。図中の曲線は20分ごとの密度分布を示している。ビデオ解析のグラフの水面付近は、水槽のフランジのために撮影することができなかった。ビデオ解析の結果は瞬間の値であるので、電気伝導度計による結果に比べて細かい変動が含まれているが、大まかに見てほぼ電気伝導度計の結果と同様な傾向を示している。特に、上層の密度が徐々に増加している様子や、密度変化の速度が場所によって異なる場所などは良好な相関関係にある。図-4は、CASE-Dの条件で同様な測定をした結果を示したものである。CASE-Aとほぼ同様の傾向を示しているが、CASE-Dの方が初期の内部境界面よりも厚く中間密度層が発達しているのがわかる。

図-5は、CASE-Dの境界面の変位を風上端から1m~2m区間のビデオ撮影から求めたものである。上層と中間密度層の境界面は、画像内で輝度が急激に変わる領域を結ぶことで得た。風上側では送風開始後20分で境界面は一気に増加し、その後も少しずつ増加を続けた。それに対し、風下側では、最初やや上昇するものの次第に下降しているのがわかる。

図-6は、CASE-A, B, C, Dの4ケースの実験条件で得られた風下端の内部境界面の時間変化をプロットしたものである。風下端付近には中間密度層がほとんど存在しないため、目視での計測が可能であった。いずれの条件下においても時間が経過するにつれて境界面が降下している様子が確認できるが、CASE-Aが開始20分後からほとんど沈下しなくなっているのに対して、CASE-Dは120分経過した後も内部境界面の降下が見られた。実験終了時の沈下量を比較すると、上層と下層の密度差の最も大きいCASE-Aに対してCASE-B, CASE-C, CASE-Dは各々1cmずつ沈下量が増している。

上層では実験開始から乱流混合によって常に密度が一定に保たれていることがわかったが、その時間的変化を表したものが図-7である。この図は風上端から160cmの地点での電気伝導度計による平均密度の変化量である。上層と下層の密度差が大きいケースほど密度増加が早いですが、すべてのケースで時間とともに直線的な増加傾向が見られる。

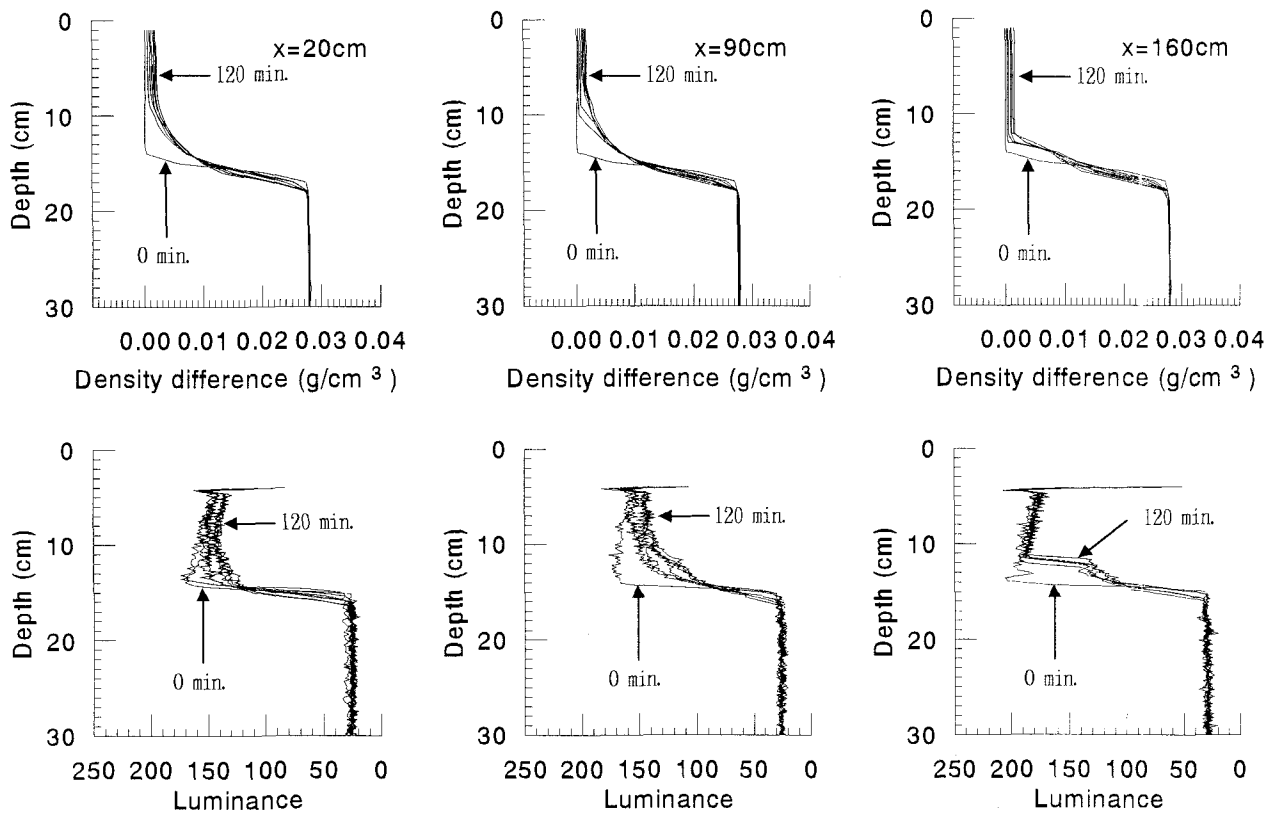


図-3 CASE-Aの密度分布の時間変化（上：電気伝導度計，下：ビデオ解析）

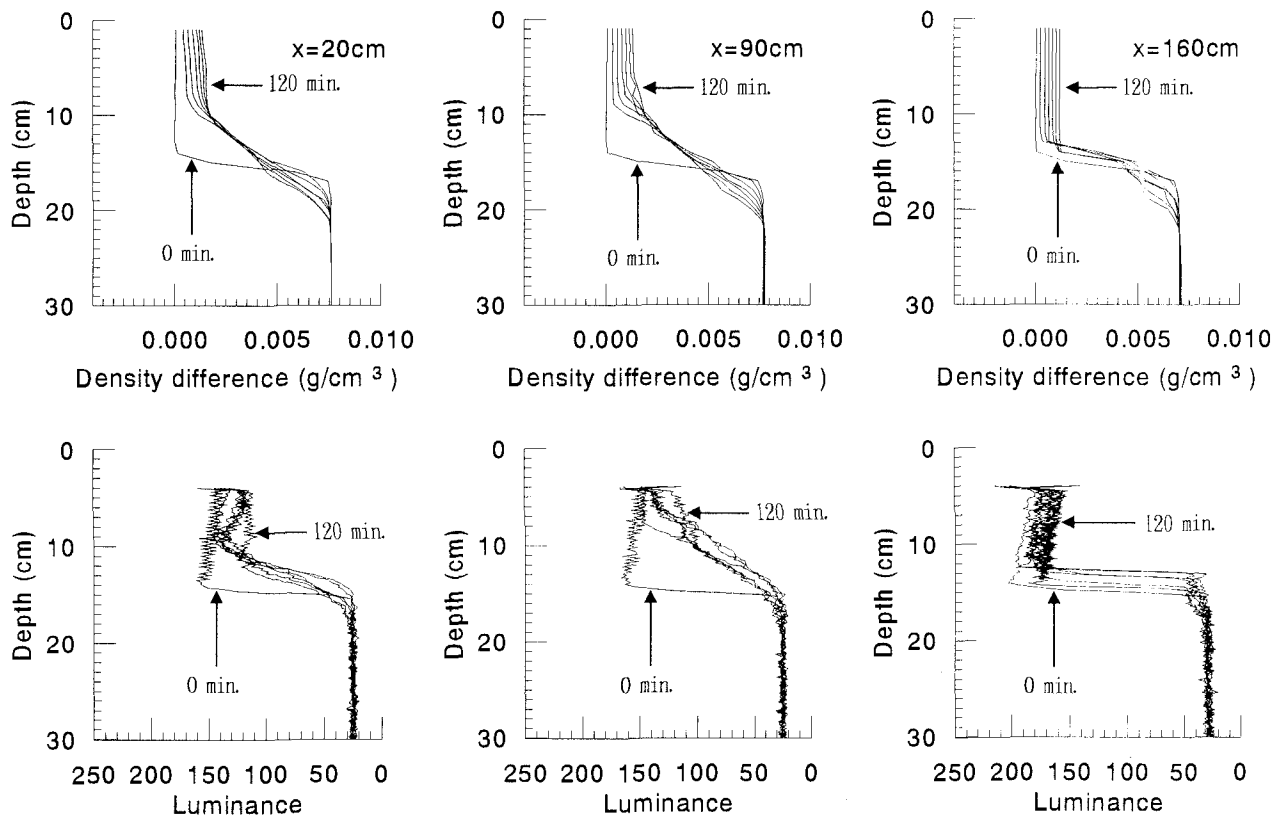


図-4 CASE-Dの密度分布の時間変化（上：電気伝導度計，下：ビデオ解析）

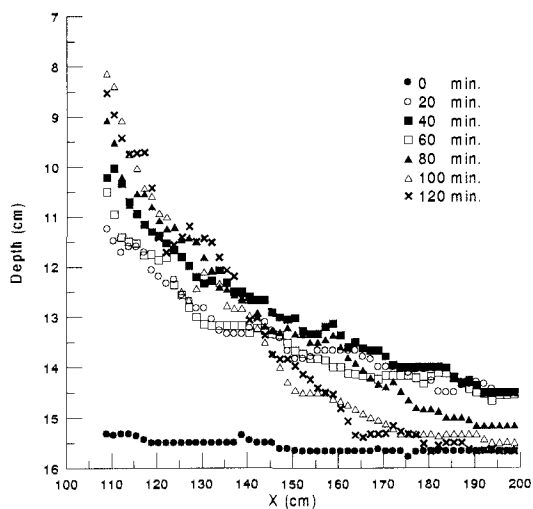


図-5 境界面（輝度一定面）の変動

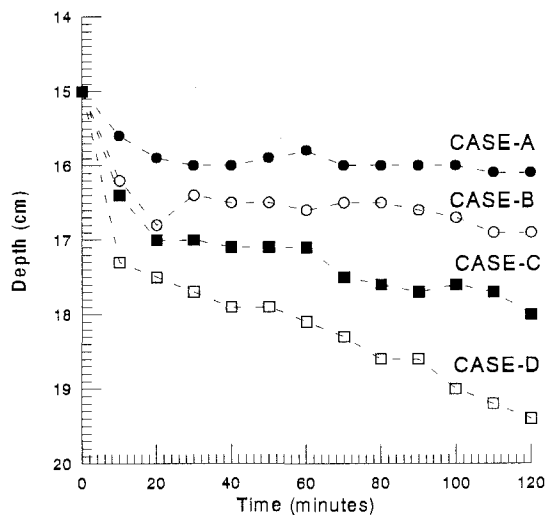


図-6 風下端内部境界面の時間変化

図-8は、風上端から360cm地点の電磁流速計によって測定した上層部分の流速分布を示したものである。一般に水面付近では風の方向に速い速度で流れ、下層に向かって逆流に転じているが、CASE-Dでは時間とともに内部境界面が大きく下がっていくため実験開始1時間後は水深が15cm以上の深さで逆流が生じていた。注目すべき事は、CASE-Aの流速分布形が、時間とともにほとんど変化しないのに対して、CASE-Dの流速分布形は時間とともに大きく変化していることである。このことは、上層域の物理的な形状が時間とともに大きく変化していることを表している。今回の実験では中間密度層のない風下部分で連行による流れが観測されたが下層部では測定できるほどの流動は存在しなかった。また、中間密度層の内部も上層との境界付近以外ではほとんど流動はなかった。密度界面では界面波が発生し、それが碎波することによって連行が進むことが実験的にわかっているが¹⁰⁾、本実験においても風下側の上層と下層及び風上側の

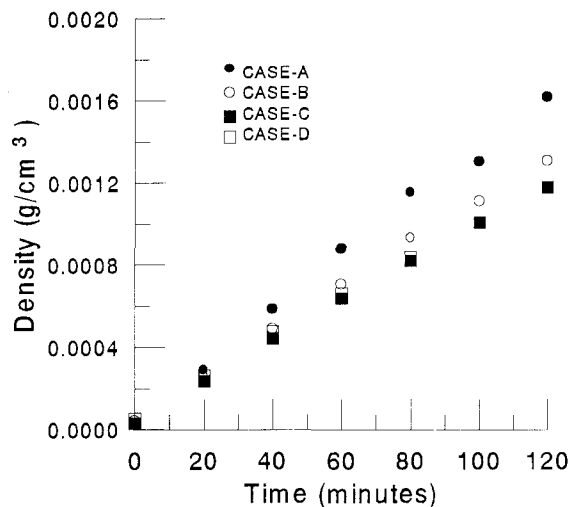


図-7 上層の平均密度の時間的变化

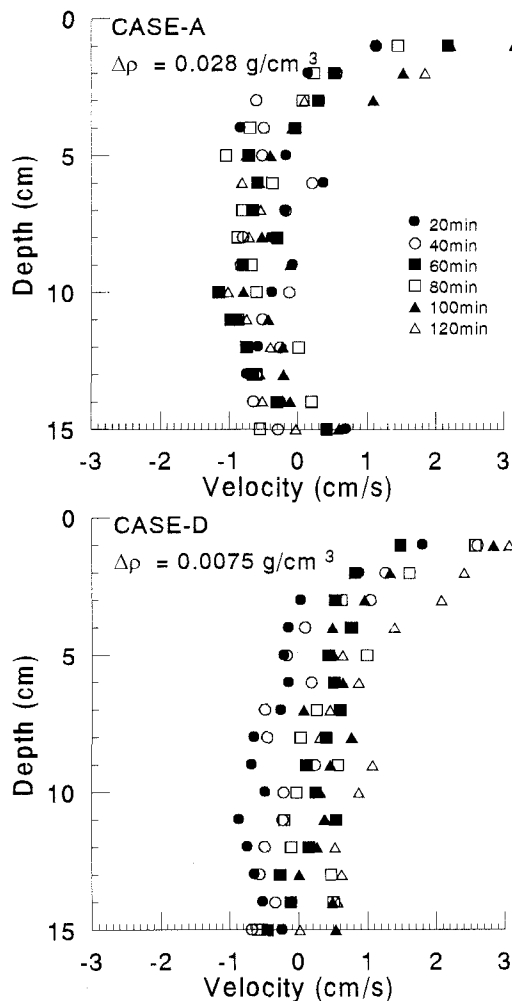


図-8 流速分布の変化

上層と中間密度層の境界面に界面波が発生していた。また、中間密度層と上層の間では碎波している様子も確認することができた。

図-9は密度差が同一であるが上層水深を変えることによって密度の時間変化がどのように違ってくるのかを

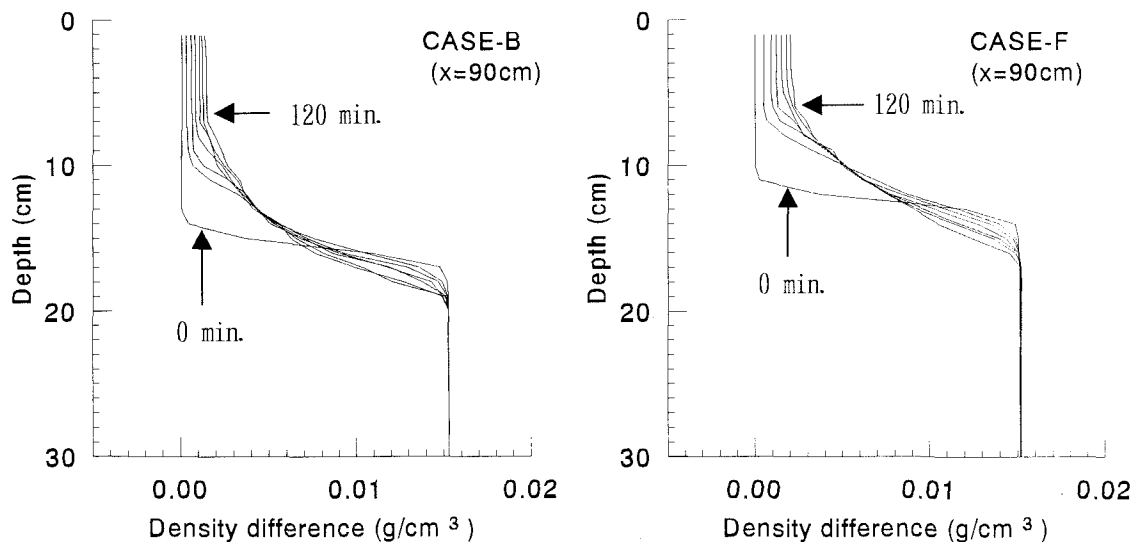


図-9 上層水深の違いによる密度の時間変化

見るために行った実験結果の比較である。CASE-BとCASE-Fの条件下で風上端から90cmの地点に設置した電気伝導度計によって測定した密度分布である。両者ともに中間密度層の発達にはさほど違いはないが、上層水深の浅いCASE-Fのほうが上層の平均密度上昇が早いことがわかる。

4. 結論及び今後の課題

本研究では、閉鎖性成層水域に一定方向、一定風速の風が吹いた場合に鉛直断面内で起こる水理学現象を室内実験により検証した。今回得られた結論は以下の通りである。

- (1) 風上側の領域では、風の吹き始めから短時間の間に風下側からの混合水の輸送があり、これが次第に中間密度層として発達してゆく様子が観察できた。
- (2) ビデオ画像解析によって得られた時間ごとの輝度分布形は、電気伝導度計によって測定された密度の分布との類似性を示した。また、ビデオ画像解析は密度分布を面的にとらえることができる点で従来の測定法に比べて優れていることがわかった。
- (3) 上層の平均濃度変化は、密度差が大きいほど密度増加が早い。どのケースにおいても直線的に増加する。
- (4) 上層と下層との密度差が大きいほど、密度界面の変位も流速分布形の時間的な変化も小さい。

今回、ビデオ撮影において光の当て方によってノイズにむらがあることがわかった。今後はこれを改善することによって水槽全体で同一の画像が得られるようにするつもりである。また、内部境界面付近で密度の急激な変化のために電磁流速計では正確な流速測定は不可能であることがわかった。そこで今後はレーザードップラー流

速計を用いて内部境界面付近の流速を詳細に測定し直す予定である。

謝辞：実験とデータ整理を手伝っていただいた都立大学学部4年生の中島敬次郎、高橋健の両氏に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 道奥康治, 辻本剛三, 宮本仁志：吹送密度流の流動・混合特性, 水工学論文集, 第37巻, pp. 293-298, 1993.
- 2) 道奥康治, 辻本剛三, 宮本仁志：半閉鎖性水域における風成密度流の水質交換特性, 水工学論文集, 第39巻, pp. 805-810, 1995.
- 3) 尹 鍾星：成層水域における貧酸素水塊の湧昇現象に関する水理学的研究, 大阪大学工学博士学位論文, 163pp., 1994.
- 4) 森川浩, 村本嘉雄, 大久保賢治, 濱口一郎, 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.
- 5) Kit, E., Berent, E. and Vадja, M.: Vertical mixing induced by wind and a rotating screen in a stratified fluid in a channel, J. of Hydr. Res., pp.33-57, 1980.
- 6) 玉井信行：連行概念の統一化と連行係数の評価法, 土木学会論文集, 第381号/II-7, pp. 1-11, 1987.
- 7) Umeyama, M., and Shintani, T.: Wind-induced circulation in a shallow flume with stratified water, Proc. of IAHR Congress, Vol.28, pp.325.1-325.6, 1999.
- 8) Kranenburg, C.: Mixed-layer deepening in lakes after wind setup, J. of Hydr. Div., ASCE, Vol.111, No.9, pp.1279-1297, 1985.
- 9) 神田徹, 宮本仁志, 東野誠, 岩見収二: 画像の輝度情報を用いた浮遊泥濃度の計測, 水工学論文集, 第42巻, pp. 553-558, 1998.
- 10) 浦勝：風の剪断力による密度界面の変動と連行速度, 第30回海岸工学講演会論文集, pp.561-565, 1983.

(1999. 9. 30受付)