

PIV 法と画像処理を用いた成層水中の流動・混合解析

ANALYSES OF WIND-INDUCED FLOW AND MIXING IN STRATIFIED WATER BODY USING IMAGE PROCESSING AND PIV METHODS

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 (〒192-0397 八王子市南大沢 1-1)

Experimental and numerical investigations were conducted in order to understand the wind-induced flow and mixing in a closed stratified water body. The two-layer density model was provided in a two-dimensional wind flume. Measurements of conductivity at several vertical points were performed, and the result of the density measurements was compared with the luminance value obtained by the image processing technique. The distributions of luminance were comparable to that of conductivity. The PIV method was also used to measure the two-dimensional velocity field near the density interface. The velocity field by the PIV was compared with the numerical results by the $k - \epsilon$ model with the TVD-MUSCL scheme. It was found that the major feature of the velocity field could be reproduced qualitatively by the present numerical model.

Key Words: stratified water body, wind stress, PIV method, image processing technique, MUSCL scheme

1. はじめに

湖や貯水池等の成層化した閉鎖性水域内の移流・拡散現象は、主に水面に作用する風応力によって引き起こされる。特に、風による成層内の運動や成層境界の破壊は水域内に水質変化をもたらすため、水質を把握し管理するためには水域内の挙動を予測することが重要な課題となる。風が原因で起こる成層の挙動に関する研究は、比較的古くから行われてきており、その中心テーマは密度境界面の1次元的な変動（低下）である連行現象であった。この問題に関する研究では、室内実験¹⁾や現地観測²⁾等のデータが用いられ、Richardson数に基づく連行則が提案されてきた。連行現象を扱う実験では、密度を測定する必要があるために電気伝導度計が用いられ、上下にトラバースすることで鉛直密度分布の変化が測定されてきた。流速に関しては、ホットフィルム流速計³⁾等が用いられ、連行メカニズムに関連する乱れ及び平均流速が測定されてきた。ところで、現象が比較的穏やかな実験においては、鉛直方向の多点で流速や密度計測にある程度時間を要しても定常的と見なして、結果を評価してきた。しかしながら、実際の成層化した閉鎖性水域において大規模な水質変

化を引き起こす下層水の湧昇現象は、密度境界面の運動が非常に早いために定常として扱うことができない。そのため、そのような実験をする場合においては、一点計測の測定器を上下に移動させる方法では現象をとらえることが非常に困難になってくる。尹⁴⁾は、下層水の湧昇が生じる条件下で、水槽中央での鉛直流速分布をレーザードップラー流速計を用いて計測を行い成功している。しかしながら、湧昇現象を考えたとき、それは1次元的な現象ではなく、水槽内では2次元的に起こるため、もはや一点計測で湧昇現象を議論することはあまり意味がなくなってきた。

近年、密度測定に関して著者らは、デジタルビデオカメラを用いた画像解析によって得られる輝度値から密度変化を予測する方法で密度の2次元的な把握を試みている。この方法によって、2成層水域における中間密度層の発達特性⁵⁾、3成層水域における密度境界面の非定常運動及び各層の湧昇限界⁶⁾、湧昇域が斜面地形の場合の湧昇混合状況特性⁷⁾を明らかにしてきた。今回は、画像処理による密度測定の精度を確認するために、多チャンネル電気伝導度計を用いた実験をビデオ撮影と同時に行った。それを使って時々刻々変化する

る密度と輝度値に関する鉛直分布の対応関係を詳細に調べることにする。また、以前の研究において、現象の早さゆえに電磁流速計やレーザードップラー流速計を用いての湧昇水塊内の流速を測定することはできなかった。近年では、2次元、もしくは3次的に流動を測定できるPIV法が開発され様々な分野で成果を上げてきている。この方法を用いれば湧昇現象に関して密度のみならず流速分布の2次的把握も同時に可能となるはずである。しかしながら、現在まで成層流のPIVによる測定例は非常に少なく、その適用性の確認が十分になされていないように思われる。

そこで、本研究では、新谷ら⁷⁾が行った実験を再現し、PIV法を適用して密度境界面付近の流速測定を試みた。PIV法で測定された流速分布の結果は、数値計算で得られた流速分布との比較を中心に検討を行った。

2. 実験法

風洞実験は、長さ600cm、幅15cm、高さ35cmの2次元水槽を用いた⁷⁾。斜面を使った実験(PIV計測)では風上側に厚さ1cmの透明アクリル製板を勾配1/5で設置した。水槽内の成層構造は、上下層の厚さを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。このとき水槽中央部分での水面における摩擦速度は1.1cm/sであった。測定時間は全てのケースで30分とし、初期の10分のみ風を吹かせた。デジタルビデオカメラを用いた画像解析によって密度を計測するために、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。

(1) 撮影法及び画像解析法

ここでは、実験水槽の撮影法と画像処理法を簡単に説明する。撮影は外部から光が入らない状況で、水槽の裏側に設置した光源(蛍光灯)からの透過光を逆側に設置したデジタルビデオカメラ(TVR-900: SONY)で撮影した。デジタルビデオカメラは、画像に奥行き方向の影響が現れにくいようにカメラを水槽から2m離して設置した⁵⁾。撮影の際は、透過光のノイズによる空間的な不均一を極力抑えるために、光源からの光を一度発砲スチロール製のホワイトボードで反射させ、さらにその光が水槽の裏側に貼り付けた半透明の拡散フィルターを通過するようにした。映像は1/30sの間隔でDVテープに記録しているが、本解析ではDVボードを組み込んだコンピュータによって1秒ごとの静止画像に変換した。その後は、画像解析ソフト(Cosmos32: 株式会社ライブラリー)を用いてこれらの静止画を8ピク

ト(256階調)の輝度分布図へと変換し、さらに実際の寸法に対応させるための座標変換を施して図化した。

(2) 多チャンネル電気伝導度計による計測

これまでの研究⁵⁾では、3本の電気伝導度計を自動昇降機を用いて上下にトラバースさせて密度の鉛直分布を測定していた。しかしながら、この方法では電気伝導度計を時間をかけて移動させねばならず、測定点が多い場合には、同一断面において上と下で大きな時間差が生じてしまっていた。従って、連行などのゆっくりとした現象における鉛直密度分布の測定は可能であるが、湧昇や内部セイシュのような非定常現象を捉えることはできなかった。そこで、今回固定式16チャンネル(16点同時計測可能)電気伝導度計を用いて密度分布を測定した。電気伝導度計のプロープの大きさは、縦1.5cm、横3cm、厚さ4.5mmの直方体であり、この直方体の一番小さな面に2本の電極が6mm間隔で取り付けられている。鉛直分布を測定する場合には、流動を阻害しないように15個のプロープを鉛直に2cm間隔でガラス壁面に貼り付けた。電気伝導度は、塩分濃度だけではなく温度変化によっても値が変化するために補正が必要である。そこで、残りの1個のプロープを塩分濃度変化がない場所に設置し、実験中の電気伝導度を測定し、実験後に15チャンネルの測定値の補正を行った。

(3) PIV法

今回の実験では、流速測定のためにはじめてPIV法を用いた。図-1に示すようにパルスレーザー発射装置(NewWave社製: Solo PIV II-15)から出たレーザーはアクリル性斜面の下方の水槽底部に固定されたシリンドリカルレンズ(円形断面のガラス棒)で屈折して斜面近傍にレーザーシートを形成する。レーザーシートに映し出された粒子はパルスレーザー発射装置と連動したCCDカメラ(Roper社製: ES1.0)によって撮影される。撮影画像は、リアルタイムでフレームグラバー

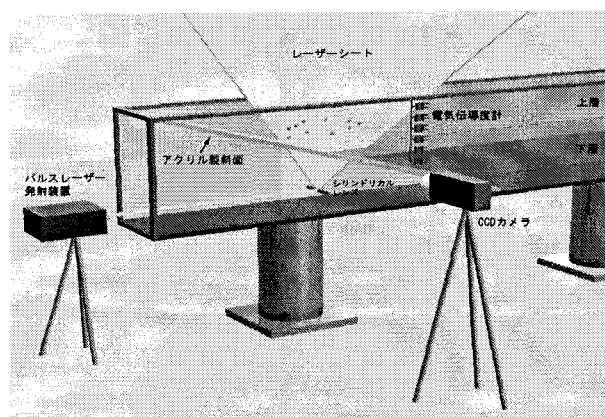


図-1: 実験装置（斜面部分）

ボードを通してコンピューターに取り込まれる。このデジタル画像は不必要部分の除去を行った後、相互相関アルゴリズムに基づいて作成したプログラムで処理することで流速データに変換できる。一台の CCD カメラ（解像度 1008×1018 ピクセル）で正確な流動・乱れを測定するためには 10cm×10cm 程度の範囲が限度であることを考慮し、撮影箇所として初期の密度境界面と斜面が交差する部分の風上側（風上端から 87～97cm 付近）を選んだ。その結果、1 ピクセルに対応する領域の大きさは約 0.13mm × 0.13mm となった。PIV を用いて測定を行う際には、水槽内に白色水性ペイントの希釈液を上層と下層に少量混入させた。

3. 数値計算法

水槽内の密度流を $k-\epsilon$ 乱流モデルを使って計算する。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 の輸送方程式であり、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、基礎方程式をスタッガード格子に基づいて離散化し、数値解法に有限体積法に基づく半陰解法の SIMPLE 法を用いて解を求めた。本研究においては数値拡散の影響を減らすために移流項の離散化に TVD-MUSCL 法を用いた。この方法ではオーバーシュートやアンダーシュートなどの数値振動が生じないため、乱流エネルギー k やその散逸率 ϵ の輸送方程式の移流項にも安定して用いることができる。計算対象領域は、水平・鉛直方向とも等間隔格子で離散化した。今回は狭い領域で PIV の測定結果と比較するために以前⁶⁾よりも水平解像度を多く設定し、水平を 468 メッシュ、鉛直を 34 メッシュ ($\Delta x=1.25\text{cm}$, $\Delta y=1\text{cm}$) に離散化して計算を行った。風上側に設置した斜面は、階段形状の境界で近似した。また、時間ステップは約 $\Delta t=0.003$ 秒として計算を行った。

4. 画像処理と電気伝導度計の比較結果

画像処理によって得られる輝度分布と多チャンネル電気伝導度計によって得られる密度分布の比較を行い、両者の対応関係を調べた結果について述べる。実験は斜面なし、上下層密度差 0.0025g/cm^3 の条件で行った。比較部分は、風上端から 10cm の位置における両者の鉛直分布とした。図-2 は、送風開始後 60 秒、120 秒、180 秒、240 秒経過したときの輝度と密度の鉛直分布を比較したものである。輝度分布には、細かいノイズが生じている。また、密度境界面付近の密度変化の再現性は $T=180\text{s}$ や 240s でやや十分でないものの、どの時間においても密度境界面の位置、密度境界面下側の密度低下の様子を良好に表している。

図-3 は、送風開始後 300 秒までの輝度と密度の鉛直分布に関する時間変化をまとめて示したものである。縦

軸は水深で横軸は経過時間を示している。送風開始後 190s と 230s での上昇ピークや 270 秒後の密度境界面が降下する様子など、非定常な成層の運動が電気伝導度でも輝度でもとらえられていることがわかる。このことから、輝度分布によって得られる値は密度分布として代用できる可能性が十分にあることがわかる。今回の比較では、初期色素濃度や光源（バックライト）強度による影響は考慮していないが、これらの最適な組み合わせを探せばより良い結果が得られる可能性がある。

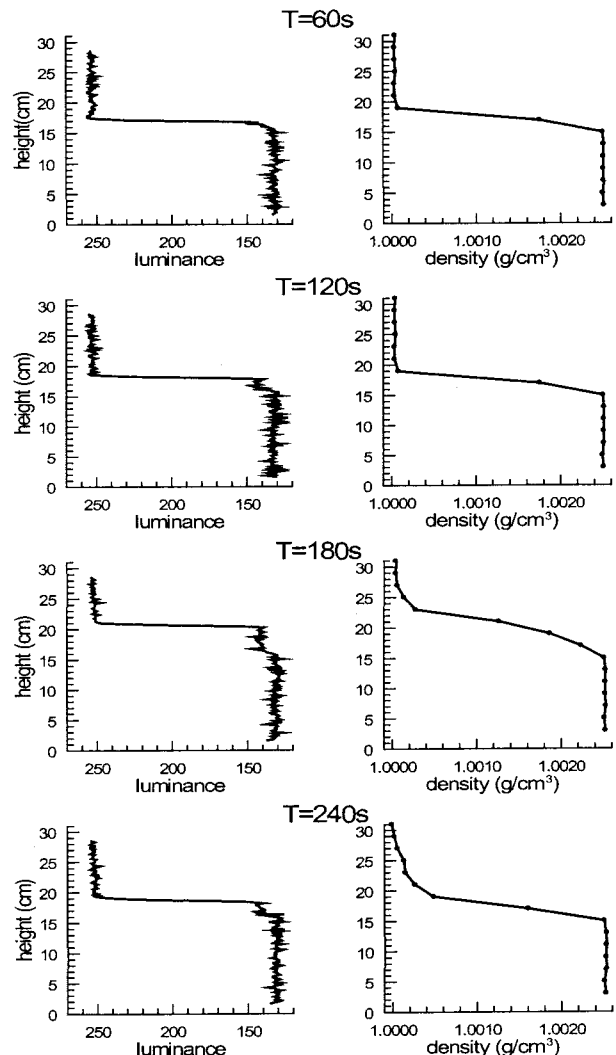


図-2：輝度値（左）と密度（右）の鉛直分布の比較

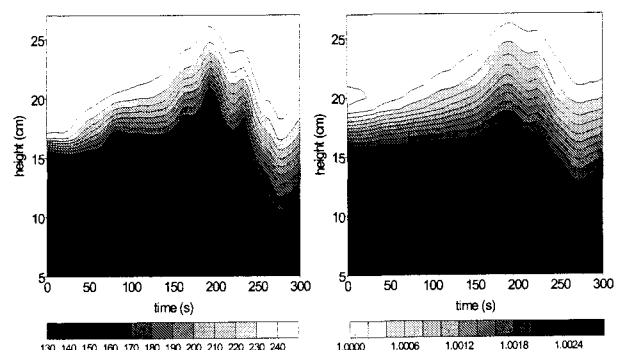


図-3：輝度値（左）と密度（右）の時間変化の比較

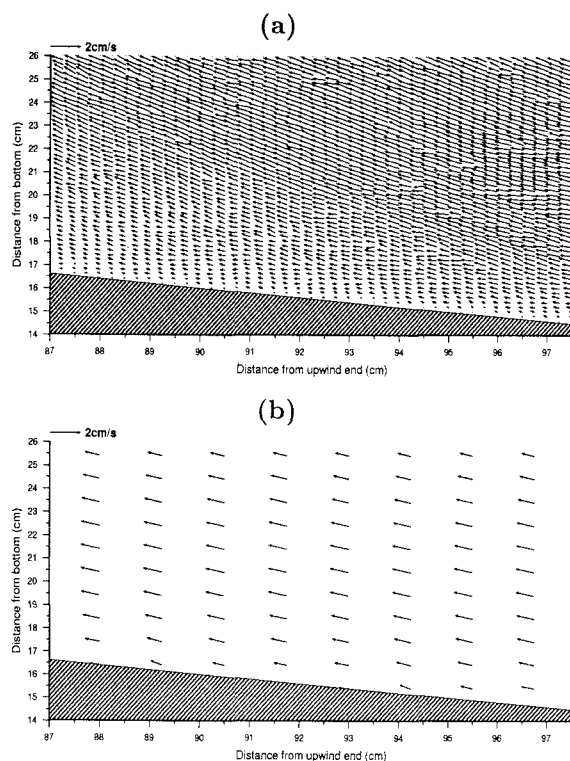


図-4：成層がない場合のPIVによる実験結果(a)と計算結果(b)の比較

5. 実験結果の考察と計算結果の検討

この章では、PIV法による流速測定結果と数値計算で得た結果との比較を行う。瞬時のPIVの結果は、過誤ベクトルが多く含まれているために、本研究においては、周辺8点の流速ベクトルの平均値よりも±50%以上逸脱したものは過誤ベクトルとして周辺8点における流速の平均値で置き換えた。しかしながら、過誤ベクトルを除いただけでは、完全に流速分布からノイズ成分を取り除くことができなかった。そこで0.1秒間隔で連続して計測した結果を75個重ね合わせて、それを平均してベクトル図を作成した。

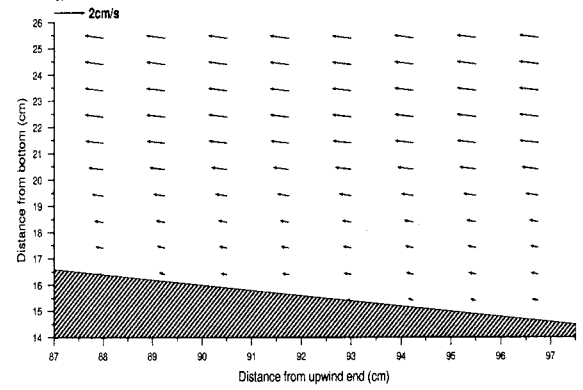
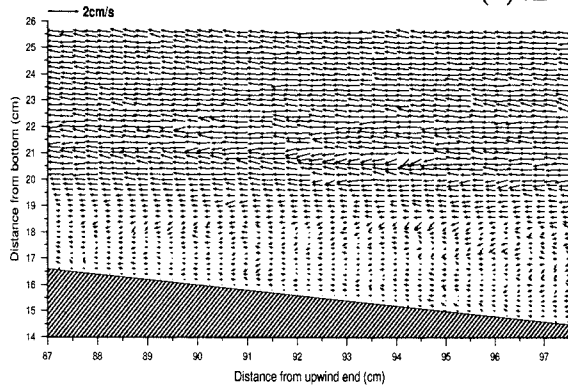
成層化した場合の検討を行う前段階として、斜面上の風成流の特徴を捉えるために成層がない場合(淡水のみ)のPIV測定結果を計算結果と比較したものを図-4に示す。図-4(a)は、風応力によって水槽内が定常に循環するまで待って(送風開始から10分後)測定した結果である。流速ベクトルの状況から、斜面付近でゼロに近い流速が、斜面(底面)から離れるに従って徐々に流速が増加していることがわかる。また、流れはほぼ全域で斜面とある角度を持った方向を示している。次に図-4(b)の計算結果を見ると、全体的な流れの方向と大きさは実験結果とほぼ同様な傾向を示していることがわかる。しかしながら、計算結果では底面近傍における流速の絶対値が実験結果と比較して過大に評価されていることがわかる。この不一致は、実験で用い

た滑らかな斜面を数値計算では階段形状として扱ったために生じたと考えられる。また、水槽の構造上の問題として、底面から26cmより上側にフランジがあるためにPIV法では水面付近のベクトルが得られていない。この部分では、左から右に向かう流れが卓越するはずであるが、その流速ベクトルが反転する層に近づくにつれて流速ベクトルが変化している様子は測定値と計算値とも一致しているのがわかる。

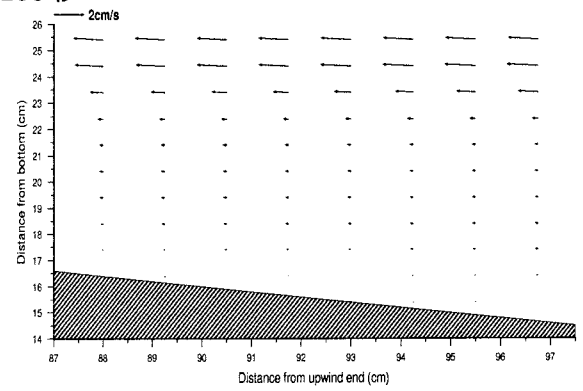
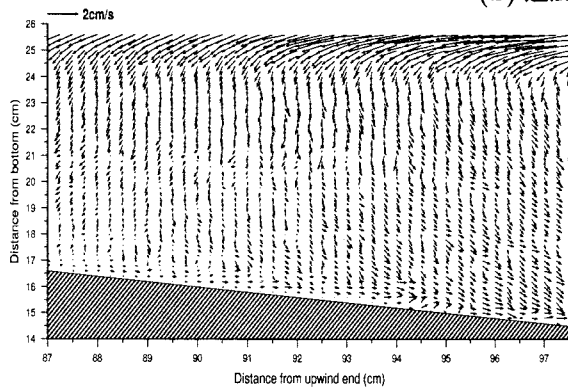
次に、水槽内を2層に成層化した場合のPIVの測定結果を示す。上下層の密度差が大きい場合は密度境界面でのレーザーシートの反射が激しくなり、計測断面で良好な画像が得られなかった。ここでは、反射の影響が無視できる条件である上下層の密度差 0.0025g/cm^3 の場合の結果について述べる。図-5は、送風開始から400秒までの両者の比較を100秒ごとに示している。左側が実験結果、右側が計算結果である。送風開始後100秒では、徐々に下層水が斜面を遡上している段階であり、水底からの距離が19cm以下で速度が遅い部分が下層水塊である。この瞬間には、計測領域全体で斜面に沿ってほぼ一方向に流れがある。数値計算から得られた結果を実験結果と比較するとほぼ同様の傾向が得られていることがわかる。200秒後の状況は、遡上していた下層水(底からの距離が24cm以下の部分)がほぼ遡上を終了し、斜面に沿って下降を始める段階であり、上層水が比較的大きな流速で下降してくる様子が見える。数値計算の結果も、上層で流速が大きくなり、下層で向きを変えようとしているところなど、流れの傾向は類似している。300秒後の実験結果を見ると下層水と上層水は逆方向の流れを示し、流況が非常に複雑になっているのがわかる。この下層水の運動は、図-3の270秒付近の内部静振による密度境界面の低下に対応した現象と考えられる。この段階になると、強い混合が密度境界面付近で生じているものと予想される。計算では下降する下層水は表現されているものの複雑な流況を表すまでには至っていない。400秒後になると、実験では下層水が底から24cm付近まで再び上昇し、下層では静止に近い状態になっているが、計算ではまだその状況には到達していない。

図-6は、PIV計測で得られた流速分布から渦度を計算したものである。左側には正の渦度分布、右側には負の密度分布を示してある。まず、100秒後を見ると風応力によって風上へ移動し始めている上下層の密度境界面付近(底から19cm)と底面において正の渦度が高くなっており、この部分で他の部分より強い剪断流が生じているのが予測できる。200秒後では、水底から約25cmまで上昇した密度境界面において100秒の時よりも高い正の渦度が示され、底面付近では下降に転じた下層水によって負の渦度が高くなっている。300秒後

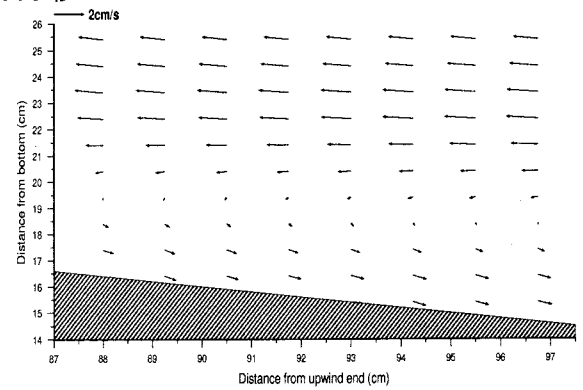
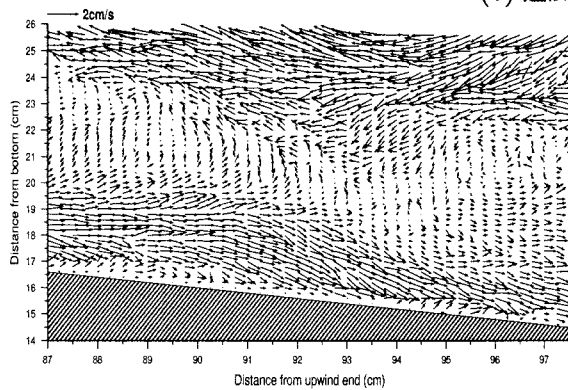
(a) 送風開始後 100 秒



(b) 送風開始後 200 秒



(c) 送風開始後 300 秒



(d) 送風開始後 400 秒

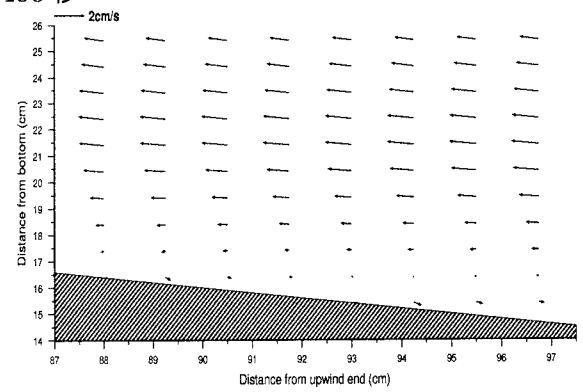
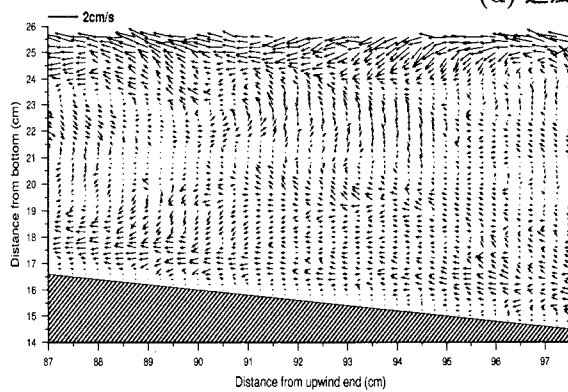


図-5 : PIV による測定結果 (左) と計算結果 (右) の比較

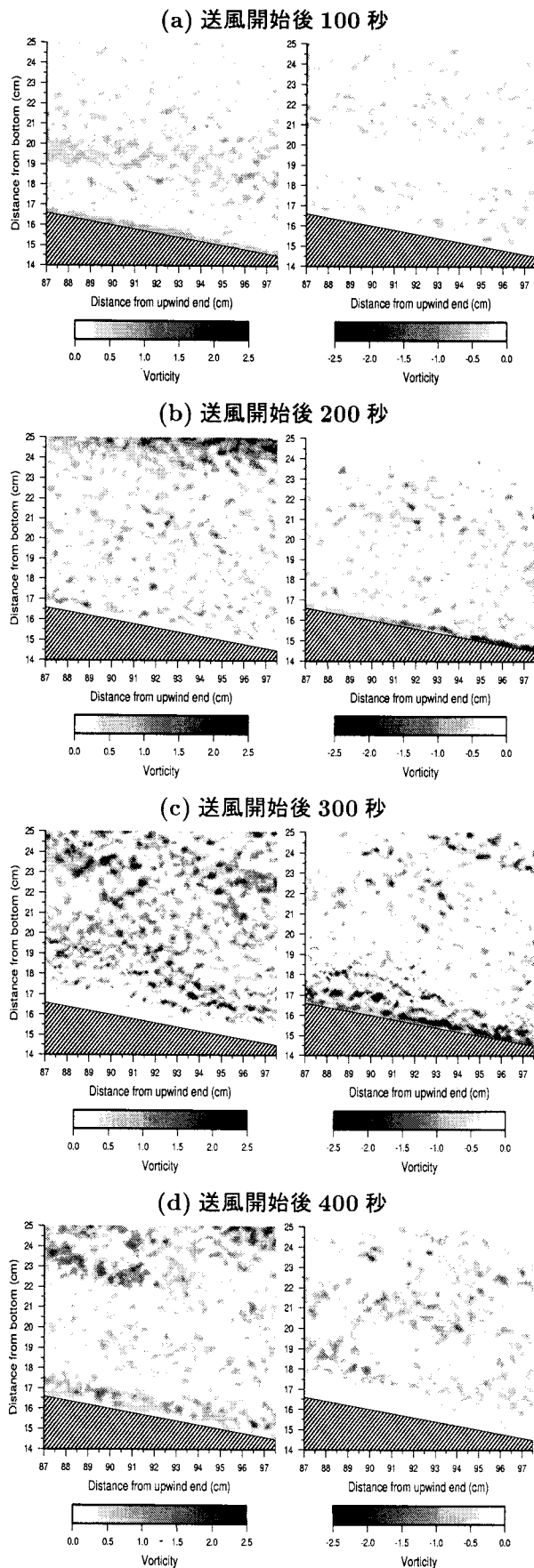


図-6：渦度の空間分布（左が正值，右が負値）

には、ほぼ全域で高い正の渦度になっており、強い剪断流が生じていることがわかる。また、斜面上では下層

水の斜面下方への移動による負の渦度が高くなっている。400秒後には、再び風上に向かう下層水によって底面部分で正の渦度が大きくなっているのがわかる。これらの結果から、水域が成層している場合の初期段階では、風によって引き起こされる循環によって様々な部分で剪断流が非定常的に生じ、成層混合を促進していることが確認できた。

6. まとめ

今回の研究で得られた結論は以下の通りである。

- (1) 2層に成層した水槽内の風循環によって生じる混合現象を画像処理によって得られた輝度分布と多チャンネル電気伝導度計によって得られた結果を用いて比較した。その結果、両者に良好な一致が見られ、今まで使われてきたビデオ撮影による画像解析が2次元的な混合状態を把握するための有力な手段であったことが確認できた。
- (2) 密度成層場の流動は、PIV法を用いて計測を行った。その結果、湧昇時の斜面上での下層密度水塊内の流動が把握できた。また、非定常的に生じる密度境界面と底面付近の剪断流もとらえることができた。
- (3) PIV法による測定結果を数値計算結果と比較したところ、斜面上における上下層水の流動状況は数値計算によって定性的に再現できていることがわかった。

参考文献

- 1) Kranenburg, C.: Mixed-layer deepening in lake after wind setup, J. of Hydr. Engrg., ASCE, Vol.111, No.9, pp.1279-1297, 1985.
- 2) 田中昌宏, 石川忠晴: 日成層の連行則の理論的考察, 水工学論文集, 第34巻, pp.169-174, 1990.
- 3) 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.
- 4) 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, 1994.
- 5) 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.
- 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) 新谷哲也, 梅山元彦: 湧昇域の斜面が成層湖の湧昇・混合に与える影響, 水工学論文集, 第47巻, pp.1189-1194, 2003.
- 8) 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.

(2003.10.1 受付)