

成層流中に置かれたV型構造物による 湧昇流に関する研究

有田正光¹・Pham Hong Son²・浅枝隆³

¹正会員 工博 東京電機大学教授 理工学部建設工学科(〒350-0311 埼玉県比企郡鳩山町)

²学生員 工修 埼玉大学大学院 理工学研究科生物環境科学専攻(〒338-0826 埼玉県浦和市大久保)

³正会員 工博 埼玉大学助教授 理工学研究科環境制御工学専攻(〒338-0826 埼玉県浦和市大久保)

流れの中に置かれたV型構造物の後部に強い一對の渦が形成され、それによって下層水を湧昇させようことは浅枝等の一連の研究によって明らかにされている。本研究では下層水の湧昇のメカニズムを詳細に明らかにするための実験的検討を実施するとともに、工学的により重要な成層流のケースの湧昇高についても実験的に検討した。

理論的にはLarge Eddyシミュレーションモデルを使用した数値計算が実施された。数値計算結果は実験結果と比較され、その妥当性が検討された。実験結果および数値計算結果より、構造物の角度 θ が 90° の場合に湧昇流効果が最大になること、また、成層流の条件下では成層効果が強くなると湧昇流効果は弱くなる等の種々の知見を得た。

Key Words: upwelling current, large eddy simulation, mixing, vortex

1. はじめに

一般にエスチャリーの深層水は汚染されており、栄養塩が豊富である。そのような深層水の栄養分を生物学的生産活動が盛んな海表面近傍に湧昇させることができれば植物や魚類の増殖が期待できる¹⁾。また、貧酸素状態となっている成層水域の深層水を水表面近傍に湧昇させれば上下層の混合が促進され下層水の貧酸素化を防止する事ができる。この様に深層水を人工的に湧昇させる技術は工学的に、また、環境保全上の観点からその意義は大きい。

深層水を水表面近傍にまで湧昇させる方法としては気泡による方法やポンプによる方法などの様々な方法が考えられる。浅枝・中井・玉井・堀川¹⁾、Asaeda-Pham-Armfield²⁾は流れの中にV型構造物を設置して湧昇流を発生させる方法を提案している。彼等はV型構造物より放出される一對の渦が上昇することによって下層水が水表面近傍に湧昇すると報告している。

本研究においては、先ず下層水の湧昇のメカニズムを詳細に明らかにするための可視化実験を実施する。実験は均質流と成層流の場合に分離して二種の水槽を使用して実施した。また、流れのリチャードソン数、V型構造物の角度などの諸パラメータの湧

昇流現象に及ぼす効果についても実験的に検討する。

理論的にはLarge Eddyシミュレーションモデル(以下、LESモデルと称する)を使用した数値計算を実施した。実験結果と数値計算結果を比較し、V型構造物による湧昇現象の予測のためにLESモデルによる数値計算が妥当なものであるかどうかについて検討する。さらに、LESモデルによる数値計算と実験結果を使用してV型構造物による湧昇流効果について論ずる。

2. 実験的装置・要領と考察

(1) 実験装置・要領

実験には均質流れ実験用と成層流れ実験用の二種の水槽を準備した。均質流れの為の実験水槽は図-1に示すように長さ330cm、幅20cmの循環型開水路である(A水槽)。使用したV型構造物は図中に示すように高さd、一辺の長さLの二枚の板を頂角 θ で接続したものであり、水路底に頂点を流れの下流側に向けて設置した。水路流量は水路内平均流速Uが $U=3\text{cm/s}$ となるように設定した。また、実験における水深Hは $H=22.5\text{cm}$ の一定とした。一方、流況は染料によって可視化するとともに、流速は直径8mmの二成分電磁流速計で測定した。

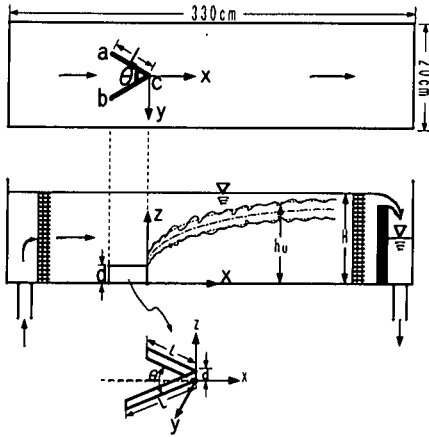


図-1 均質流れのための実験装置(A水槽)

実験での電磁流速計による一点当たりの計測時間は30秒とした。従って、計測される流速はそれぞれの地点の平均流速である。なお、電磁流速計での流速計測可能範囲は $\pm 2.5\text{cm/sec}$ 以上である。従ってそれより流速が遅い地点での精度は落ちると考えられるが、計測結果を基にした流況の定性的議論は可能である。

なお、図中に示すようにV型構造物の頂点をc、両端をa,bとする。座標は流下方向にx、水平方向にy、鉛直上向方向にz座標をとる。

成層流れのケースの実験用水槽は図-2に示すように長さ800cm、幅0.42cmの開水路である(B水槽)。なお、実験における水槽内水深は40cmとした。成層流を水槽内に作ることは実験技術上困難である。本研究では成層状態を水槽内に形成させようと浮遊させたV型構造物の模型を可変速モータで牽引する事によって現象を模擬した。なお、今回の実験におけるフロートの牽引速度は 2.3cm/s もしくは 6.7cm/s に設定した。従って、構造物に対する流体の平均接近速度U(均質流における平均流速Uと物理的に同じ意味を持つので同記号とする)は $U=2.3\text{cm/s}$ 、 6.7cm/s である。

実験に先立って水槽内に塩水を使用して線形の密度分布を持つ成層を形成させた。水表面における水の密度 ρ_u は淡水の密度 ρ_f と一致し、 $\rho_u = \rho_f = 1.00\text{g/cm}^3$ である。一方、水路底における水の密度 ρ_b は $\rho_b = 1.00\text{g/cm}^3, 1.02\text{g/cm}^3, 1.04\text{g/cm}^3, 1.06\text{g/cm}^3$ のいずれかとし、成層度を変化させた。なお、成層度の評価には次式のリチャードソン数 Ri を使用した。

$$Ri = \frac{1}{\rho_f} \frac{d\rho}{dz} \frac{gd^2}{U^2} \quad (1)$$

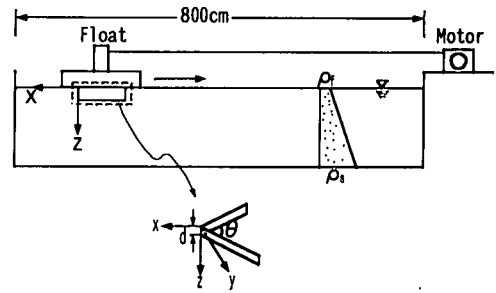


図-2 成層流れのための実験装置(B水槽)

(2)実験結果と考察

写真-1はA水槽を使用して実施した均質流の実験ケースの流況の可視化写真である。V型構造物による湧昇流形成のメカニズムを明らかにするためには水路底面近傍から構造物に至る流況を知る必要がある。このことから可視化の開始に当たり構造物上流の底面に水より若干重い染料水を敷き、その後ポンプを駆動して水路中の水を流す事によってV型構造物の周りの流況を可視化した。

写真-1Aは構造物の斜め上からの可視化写真、写真-1Bは平面的可視化写真、写真-1Cは側面からの可視化写真を示している。同可視化写真より明確な湧昇流形成のメカニズムの概要を以下に論ずる。

写真より、流れが構造物を形成する二枚の板を乗り越えるとき、壁面の下流側に発生する低圧部によって流れが曲げられ(コアンダ効果)、a-cもしくはb-c(図-1参照)方向に軸を持つ強い螺旋渦が板の下流に形成されること、さらに、その螺旋渦はc点近傍(構造物頂点、図-1参照)で構造物より剥離して下流に一对の渦が放出されることが分かる。

また、構造物上流側の底面近傍の流れで構造物中央部付近に至る流れはc点近傍で強い上昇流となる。一方、構造物上流側底面近傍の流れで、板の両端近傍に至る流れは板の両端を下流側に回り込み、そこで螺旋渦を形成して上昇し、板下流に形成される螺旋渦に取り込まれ合体する。なお、写真-1Cには構造物近傍の上昇流による強い湧昇流と、構造物から離れた地点の穏やかな湧昇流が可視化されている。

図-3、図-4は写真-1の実験ケースの構造物の周りの流れの二成分電磁流速計による平均流速の計測結果を示す。図-3Aは $y=0\text{cm}$ (x軸上)、図-3Bは $y=3.75\text{cm}$ における縦断面流速ベクトル図である。

図-3Aには構造物下流端より発生する強い湧昇流が計測されている。また、図-3Bには下流側に形成される渦の外側の下降する部分が計測されている(図-4も併せて参照)。

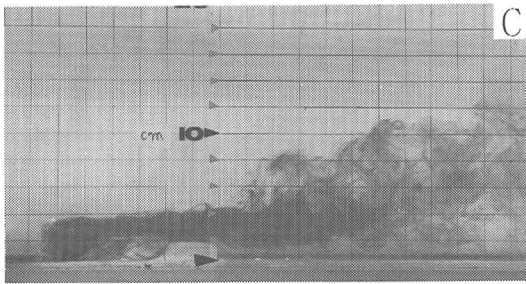
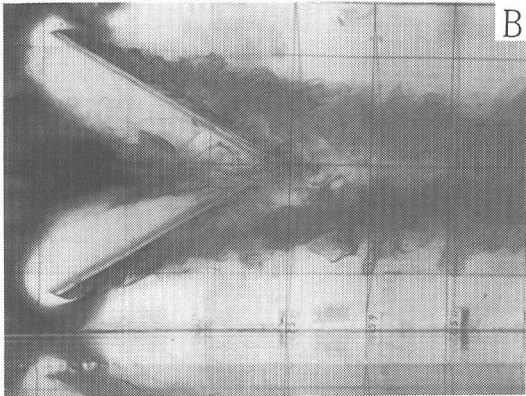
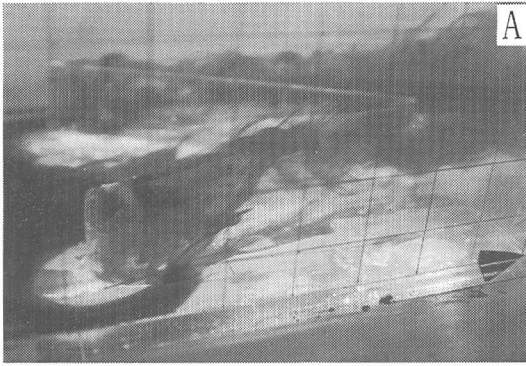


写真-1 V型構造物周りの流況の可視化
($L=15\text{cm}$, $d=3\text{cm}$, $\theta=60^\circ$, $U=3.0\text{cm/s}$, A 水槽使用)

図-4A, 図-4B は $x=20\text{cm}$, $x=30\text{cm}$ における横断面流速ベクトルの計測結果を示している。同図に V 型構造物下流の一対の強い渦および両渦中央部の上昇流が計測されている。また、下流側($x=30\text{cm}$)の渦は上流側($x=20\text{cm}$)の渦に比較して、スケールが大きくなっているとともに水表面付近に上昇していること、渦間の間隔が大きくなっていることが分かる。

写真-2は B 水槽を使用して実施した成層流のケースのシャドウグラフ法による流況の可視化写真を示す。同写真のケースは $U=6.7\text{cm/s}$, $d=2\text{cm}$, $L=10\text{cm}$, $Ri=0.087$ の一定として V 型構造物の頂角 θ の効果を調べたものである。なお、写真中の \downarrow は V 型構

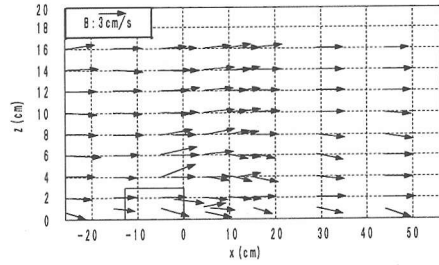
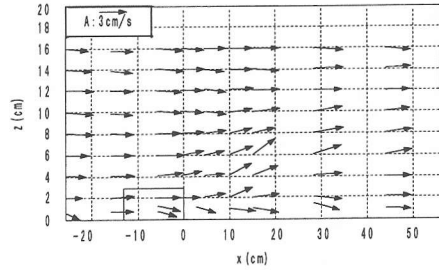


図-3 縦断面流速ベクトル図(A: $y=0\text{cm}$, B: $y=3.75\text{cm}$)
($L=15\text{cm}$, $d=3\text{cm}$, $\theta=60^\circ$, $U=3.0\text{cm/s}$, A 水槽使用)

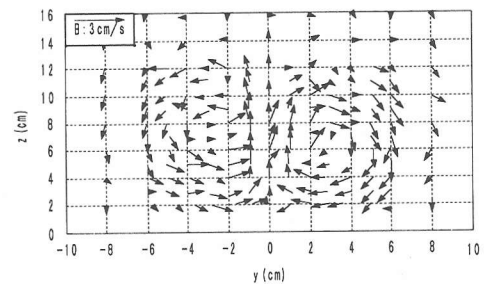
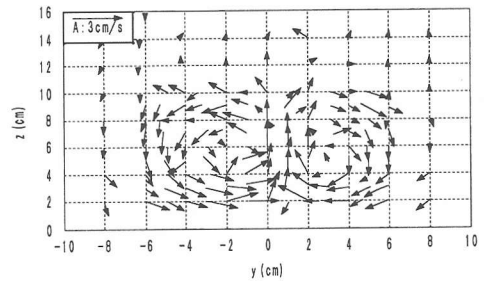


図-4 横断面流速ベクトル図(A: $x=20\text{cm}$, B: $x=30\text{cm}$)
($L=15\text{cm}$, $d=3\text{cm}$, $\theta=60^\circ$, $U=3.0\text{cm/s}$, A 水槽使用)

造物の最下流端の位置を示している。写真より $\theta=90^\circ$ の場合の湧昇効果が最も強いことが認められる (60° の場合もほぼ同様の強さの湧昇効果を持っている)。また、同写真には構造物より放出される渦が可視化されているが、 θ が大きくなると発生する

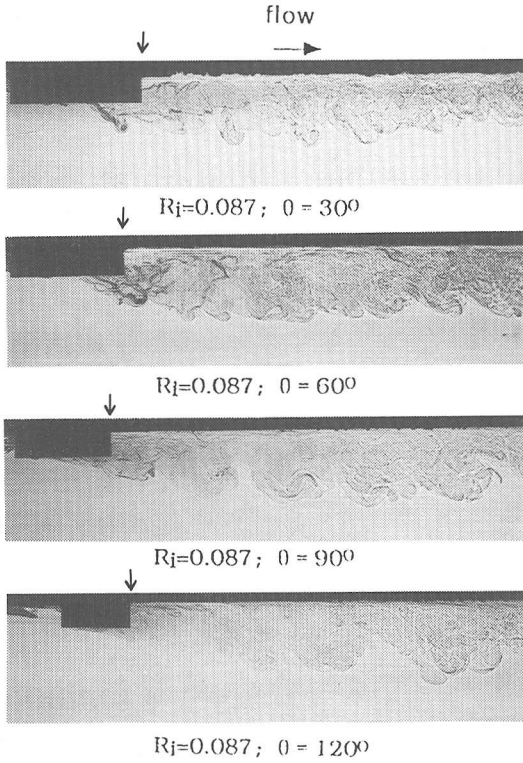


写真-2 成層流下のV型構造物の湧昇流効果(B水槽使用)

渦の周波数は小さくなっていることが認められる。

本研究においては次章で LES モデルによる数値計算を実施するが、計算結果の妥当性の検証に本章に述べた実験的検討結果を使用することとする。

3. 数値シミュレーション手法の概略

本研究においては LES モデルによる数値シミュレーションを実施した。ここでは計算手法の概要のみを示すこととし、詳細については専門書を参照されたい(例えば文献3,4)など。数値モデルの基礎式、つまり、フィルタリングを施した非圧縮性流体のナビエ・ストークスの式、連続の式、密度の拡散方程式はそれぞれ次式で表される。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{1}{\rho_r} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} (2\nu \bar{S}_{ij} - \tau_{ij}) - \frac{\bar{\rho} - \rho_r}{\rho_r} g \delta_{i3} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \bar{S}_{ij} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\bar{u}_k \bar{\rho}) = \frac{\partial}{\partial x_k} (\alpha \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_k} - q_k) \quad (4)$$

ここに、 $\bar{\quad}$ はフィルタリングを施した諸量、 u_i は流速の三方向成分、 t は時間、 p は圧力、 ρ は水の密度、 ρ_r は更正密度、 ν は動粘性係数、 g は重力の加速度、 τ_{ij} はサブグリッドスケール(SGS)におけるレイノルズストレス、 δ_{ij} はクロネッカのデルタ、 α は分子拡散係数、 \bar{S}_{ij} は変形速度であり、次式で与えられる。

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

また、せん断力のテンソル τ_{ij} は次式で与えられる。

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (6)$$

密度の残差フラックス q_k は

$$q_k = \overline{\rho u_k} - \bar{\rho} \bar{u}_k \quad (7)$$

であり、そのモデル化について後述する(式(11)参照)。

本研究ではサブグリッドスケールにおけるレイノルズ応力項は Smagorinsky のモデルを使用して近似する。つまり、

$$\tau_{ij} = \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2\nu_t \bar{S}_{ij} \quad (8)$$

とおく。ここに、 ν_t は渦動粘性係数であり次式で与えられる。

$$\nu_t = C \Delta^2 |\bar{S}| \quad (9)$$

ただし、 $C=0.2$ 、 Δ はフィルタ幅の代表値であり、 $\Delta = (\Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3)^{1/3}$ である。また、 Δx_1 、 Δx_2 、 Δx_3 はそれぞれ x, y, z 方向のメッシュ幅である。式(9)中の $|\bar{S}|$ は次式で与えられる。

$$|\bar{S}| = |\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}|^{1/2} \quad (10)$$

密度の残差フラックス q_k もレイノルズ応力項に対する取り扱いと類似な手法で取り扱い、渦動拡散係数 α_t を使用して次式で与える。

$$q_k = -\alpha_t \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_k} \quad (11)$$

上式中の α_t は次式で与えられる。

$$\alpha_t = C_\rho \Delta^2 |\bar{S}| \quad (12)$$

ここに、 $C_p = C/Pt$ (Pt はサブグリッドスケールで定義される乱流プラントル数) である。

計算に当たっては基礎式を、流速は水路内の平均流速 U (成層流の実験の場合はワイヤによる牽引速度 U)、長さは水路の全水深 H 、密度は更正密度 $\rho = \rho_f$ 、時間は H/U を使用して無次元化した。

数値計算上のメッシュは V 型構造物近傍では細かく、離れるにつれて粗いものとした。構造物周辺のメッシュが最も細かい場所の水平および鉛直メッシュのサイズは $x/d=y/d=z/d=0.125$ とした。また、構造物から離れるにつれて徐々にメッシュ間隔を大きくして、十分離れたメッシュが最も粗い場所の水平方向のメッシュサイズは $x/d=y/d=0.535$ 、鉛直方向のメッシュサイズは $z/d=0.333$ とした (なお、具体的な計算例の計算領域とグリッドポイントの構成の概略については第5章参照)。

基礎方程式は非スタガードの二次の中心差分で離散化した。圧力については Armfield³⁾ によって提案されている、シンプルスキームの特性を備えた非スタガードなメッシュを解く差分スキームを使用した。また、解法のフローチャートや収束判定条件についても Armfield³⁾ によって提案されているものを使用した。

計算上の境界条件は x, y, z 方向 (図-1 参照) の流速を u, v, w として以下の様に設定した。

入口(上流側の鉛直面)では底面近傍の流速分布 u に $1/7$ 乗則 ($u \sim z^{1/7}$) を適用するとともに、鉛直密度分布を線形分布で与えた。また、 $v=w=0$ とした。一方、出口(下流側の鉛直面)では $du/dx=0$, $dv/dx=0$, $dw/dx=0$, $d\rho/dx=0$ とした。

両側面の境界条件は $du/dy=0$, $dv/dy=0$, $dw/dy=0$, $d\rho/dy=0$ とした。また、計算領域の上面で $du/dz=0$, $dv/dz=0$, $w=0$, $d\rho/dz=0$ 、下面(底面)および V 型構造物の表面では $u=v=w=0$, $d\rho/dz=0$ とした。

一方、計算の初期条件としては、流速 u の鉛直分布には水路全長に渡って $1/7$ 乗則適用した。ただし、 V 型構造物の表面の流速は零とした。また、密度 ρ の鉛直分布は水路全長に渡って線形の密度分布を与えた。

4. 数値計算の概略および数値計算結果と実験結果との比較

本研究では既述のように水槽 A, B の二種の水槽を使用して実験を実施した。水槽 A の実験は V 型構造物による湧昇流発生 of 流体力学的メカニズムを把握するとともに数値計算の妥当性を定性的に検証

するために企画されたものである。一方、水槽 B の実験は成層条件下での湧昇現象の挙動を知るとともに、数値計算の定量的な妥当性の検討のために実施されたものである。

数値計算に当たっては、先ず、LES モデルを本研究に適用することの妥当性を調べる為の試行的な計算が水槽 B の実験を念頭に置いて実施された。試行計算の条件は $U=6.7\text{cm/s}$, $d=2\text{cm}$, $L=10\text{cm}$, $Ri=0$ であり、また、 θ は実験において湧昇流効果が最も強いと判断された $\theta=90^\circ$ の場合とした。なお、 $Ri=0$ の条件は水槽 A の実験と同様に均質流の計算を実施したことに対応している。

計算領域は $-30\text{cm} \leq x \leq 70\text{cm}$ (d の 50 倍), $-20\text{cm} \leq y \leq 20\text{cm}$ (d の 20 倍), $0\text{cm} \leq z \leq 20\text{cm}$ (d の 10 倍) であり、既述のような計算メッシュのもとに計算を実施した。今回の計算の計算上のグリッドポイントの総計は $136 \times 92 \times 54 = 675,648$ 点であった。これは使用した計算機 (Digital 200 4/233 Alpha Station) の能力のほぼ上限である。

試行的計算の結果、時間ステップ Δt は $\Delta t = 0.001\text{sec}$ と設定することが妥当であることが分かった。つまり、 Δt をより小さくすると計算時間が膨大となり、大きくすると計算が不安定となるという結果を得た。なお、数値計算の収束条件は連続式の誤差が 0.1% となるように設定した。

実施された数値計算は非定常計算であるが、計算開始から 22,000 ステップ目、つまり $t=22\text{sec}$ の計算結果 (瞬間流速分布である) を図-5 に示す。同図で図-5A は中心軸上 (x 軸上) における縦断面流速ベクトル図、また、図-5B, 5C はそれぞれ $x=8\text{cm}$, 40cm における横断面流速ベクトル図を示している。

図-5A に構造物後部の強い上昇流れが、図-5B, 5C に構造物後部の一対の渦が明らかである。また、その一対の渦が流下に伴って、渦の強さが弱くなり、スケールが大きくなるとともに中心軸が上昇していることが分かる。以上の計算結果は写真-1 および図-3, 図-4 に示す実験結果より得られている流況と、その定性的挙動が良く一致している。この事は本研究で取り扱う問題に LES モデルを適用することの妥当性を示していると考えられる。

なお、既述のように数値計算は非定常計算であるので、図-4, 図-5 のように平均流速を捕らえた実験結果と直接の比較できない。つまり、実験で得られる流速ベクトルは現在のところ、数値計算結果の定性的な妥当性の検証のみに使用しうるものである。

ところで、浅枝等¹⁾ は V 型構造物の下流に周期的に渦が放出される、強い非定常現象を報告している (写真-2 参照)。本研究で実施した LES モデルの

計算結果は、ある程度の非定常現象を示すものの、実験にみられるような強い非定常現象を十分に再現するものではなかった。このことは、提案された数値モデルを使用することで実験のすべてを置き換えることは無理があり、LES モデルと実験を相互補完的な関係に位置づけるべきであることを示している。また、さらに精度の高い LES モデルのためには追加的な検討が必要であることも示している。

本研究においては提案した LES モデルによる数値計算を水槽 B を念頭に置いて種々の条件の下に実施した。図-6には $x/d=20$ における無次元湧昇高 h/d (湧昇流の上縁, 図-1参照) に関する B 水槽使用の実験結果と数値計算結果がプロットされている。なお、同図-中の実験および数値計算は $d=2\text{cm}$, $L=10\text{cm}$ の一定とした上で、構造物の頂角 θ および流れの場の成層度 Ri を種々変化させて実施したものである。

ところで、湧昇高は写真-2に示すようなシャドウグラフ法による可視化結果からは、密度界面の位置がほぼ水平となる地点での高さであり、数値計算結果からは流速ベクトルがほぼ水平となる地点での高さとして定義される。つまり、実験は密度で、数値計算は流速で湧昇高を定義するが両者は概ね一致すると考える。

しかしながらこの様な定義をそのまま使用すると、原理的には $Ri=0$ での湧昇現象は無限遠で水表面まで及ぶことになる(A 水槽の場合)が、遠方での湧昇現象は極めて弱く、工学的には意味がない。また、数値計算上もそのような遠方の計算はしていない(できない)。このことから、種々のパラメータの変化による湧昇現象の強さを比較するためには、その強さが工学的な意味を持ち、かつ数値計算上計算可能な任意の無次元距離を選択する必要がある。本論文では図-6に示すように、実験および数値計算結果の双方から湧昇高がほぼ一定となることが認められた、 $x/d=20$ を選択して湧昇高を議論する。

図-6より成層度が強くなると湧昇高が小さくなるということが認められる。特に $0 \leq Ri < 0.1$ では h/d の値が急激に小さくなり $Ri \sim 0.1$ で $h/d \sim 5.0$ 程度となっていることが分かる。なお、湧昇高は $\theta=90^\circ$ の場合が最も大きく、 $\theta=120^\circ$ の場合が最も小さいこと、均質流の場合には $\theta=90^\circ$ で $h/d \sim 6.5$, $\theta=120^\circ$ で $h/d \sim 4.5$ 程度となることなどが分かる。また、成層度が強くなると θ の効果が小さくなり、 θ の値によらず $h/d \sim 2.8$ 程度となることがわかる。

ところで、図-6中で実験条件の範囲が $0 \leq Ri \leq 0.8$ であるのに対して、数値計算の条件の範囲は $0 \leq Ri < 0.1$ である。これは、 $0.1 \leq Ri$ では1ケース当

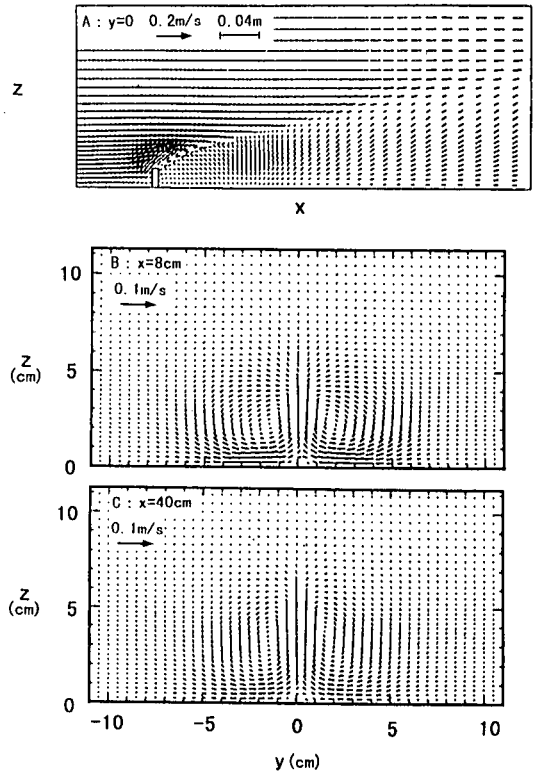


図-5 均質流のケースの数値計算例 ($U=6.7\text{cm/s}$, $d=2\text{cm}$, $L=10\text{cm}$, $\theta=90^\circ$, $Ri=0$)

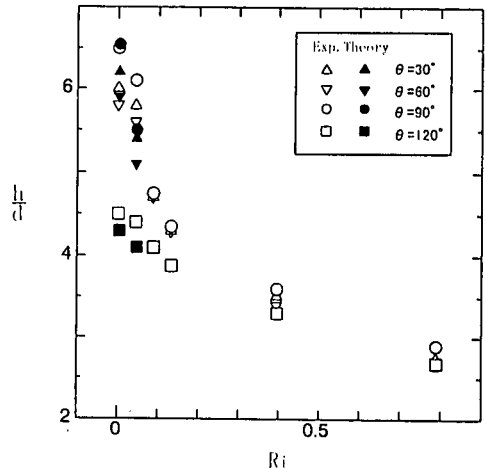


図-6 湧昇流の上昇高 $h/d(x/d=20)$ における値 (実験結果:中抜記号, 計算結果:中黒記号)

たりの計算時間が4日以上となり、使用した計算機では事実上、実行不能であったことがその理由である。

以上の検討より、導入した LES モデルは V 型構造物による湧昇流の流動のメカニズムを定性的に再

現しうること、また工学的に最も重要な湧昇高を一定の条件の範囲では定量的にも再現しうることを明らかにした。

5. 結論

本研究は V 型構造物が誘起する湧昇流のメカニズムを実験的に明らかにするとともに LES モデルによる数値シミュレーションを実施したものである。

実験および数値シミュレーションより V 型構造物の頂角 θ が $\theta = 90^\circ$ の場合に流れの場の成層の状態によらず最も湧昇流効果が強いことが明らかになった。また、渦の上昇高は $Ri=0$ において $\theta = 90^\circ$ の場合には $x/d=20$ で $h/d \sim 6.5$ に達する。しかしながら、成層流の条件下では成層度が強くなるほど、湧昇流の上昇高が急激に小さくなり、 $Ri=0.8$ では θ の値によらず $h/d \sim 2.8$ 程度となることが分かった。

本文中に示したように提案した数値モデルは定性的には良い結果を示すものの現象の詳細、特に非定常的挙動については不十分な結果しか得られず、今

後の追加的検討が必要であることが明らかになった。ただし、工学的に最も重要な湧昇高を一定の条件の範囲では定量的にも再現しうることを明らかにし、数値モデルの有効性を明らかにした。

参考文献

- 1) 浅枝隆, 中井正則, 玉井信行, 堀川清司: V 字型構造物による上昇流, 土木学会論文集, 第423号/II-14, pp. 83-90, 1990.
- 2) Asaeda, T., Pham H. S. and Armfield, S.: Vortex convection produced by V-shaped dihedral obstruction, *Jour. of Hydr. Engrg., ASCE*, 120 (11), pp. 1274-1291, 1993.
- 3) Armfield, S. W.: Finite difference solutions of the Navier-Stokes equations on staggered and non-staggered grid, *Computer Fluid*, Vol. 20, No. 1, pp. 1-17, 1991.
- 4) 保原充, 大宮司久昭編: 数値流体力学(基礎と応用), 東京大学出版会, 1992.

(1997.3.27 受付)

STUDY ON RISING CURRENT PRODUCED FROM V-SHAPED STRUCTURE IN THE STRATIFIED FLUID

Masamitsu ARITA, Pham Hong Son and Takashi ASAEDA

Strong rising current produced from V-shaped structure in the stratified fluid was studied experimentally and numerically. Flow visualization were conducted to reveal the mechanism of creation of rising current in homogeneous flow field. Experimental studies were also conducted in the linearly stratified flow field. Large eddy simulation (LES model) was selected for numerical studies. The results of simulation by LES model were verified by comparison with experimental results.

From both of experimental results and numerical simulation, it was found dihedral angle of about 90° was most effective angle for the rising effects. Rising height may reach 6.5 times of the plate height in homogenous flow and has reduced in stratified flow to 2.8 times of the plate height with $Ri=0.8$.