

# 水力発電取水路内渦流の数値シミュレーション

## NUMERICAL SIMULATION OF VORTEX FLOW IN INTAKE CHANNEL OF HYDROPOWER FACILITY

中山昭彦<sup>1</sup>・竹内建造<sup>2</sup>・久末信幸<sup>3</sup>・松村友宏<sup>4</sup>

Akihiko NAKAYAMA, Kenzo TAKEUCHI, Nobuyuki HISASUE and Tomohiro MATSUMURA

<sup>1</sup> 正会員 PhD 神戸大学大学院教授 自然科学研究科(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

<sup>2</sup> 非会員 豊中市役所 (〒561-8501 豊中市中桜塚 3-1-1)

<sup>3</sup> 正会員 関西電力株式会社 電力技術研究所 構築研究室 (〒661-0974 尼崎市若王寺 3-11-20)

<sup>4</sup> 学生員 神戸大学大学院 自然科学研究科建設学専攻(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

Three-dimensional unsteady flow with localized areas with large vortices in the intake channel of a small-scale hydroelectric power station has been simulated numerically using a Large-Eddy Simulation (LES) technique. The method computes the motion of the free surface and a standard Smagorinsky model with wall damping is used as the turbulence model. With the total number of grid points of about one-third of a million, the complex and unsteady nature of the vortical flow can be reproduced reasonably well by marginally resolving the near-wall flow. Intake vortex of weak intensity can be captured and the flow conditions associated with appearance of vortices can be examined based on the results of the present simulation.

**Key Words :** Intake flow, HSMAC method, Large Eddy Simulation, vortex flow

### 1. はじめに

近年地球温暖化対策のひとつとして環境負荷の低い水力発電, 特に低落差を利用した水路式の小水力発電は, 既存設備を利用して様々な場所に設置でき, 工費も軽減できることからその有用さが見直されている. この小水力発電には従来の水力発電と比較して施設が小規模であることからいくつかの問題が発生している. 取水口への土砂の流入や放水口での堆砂そして取水渦による空気混入などである. 特に, 取水渦は小水力発電施設の特徴である低落差, 低水位という条件で起こりやすく対策が必要である.

取水渦は決して新しい問題ではなく, また水力発電施設の問題だけではなくこれまでいろいろな研究がなされ, その発生条件や抑制法などについても知見が蓄積されている. たとえば Johnson<sup>1)</sup>は取水渦発生を取水管径とかぶり水深の比の関係式を提案している. また Nakayama & Jones<sup>2)</sup>は空気取入れ口の渦の発生条件についての準理論的考察を行なっている. 近年は流体運動の数値計算により渦運動を捉えようとする試みもなされている. Constantinescu & Patel<sup>3)</sup>や Silva & Li<sup>4)</sup>, また著者ら<sup>5),6)</sup>は, ポンプ取水槽内流れをレイノルズ平均式 (RANS) と 2 方程式モデルを用いた数値計算を行い,

弱い旋回を伴う流れの解析を行なっている. しかし空気を混入するような水面渦の存在する流れは非定常性が強くまた水面の窪みを伴い, 既往の計算のように水面の変化しないレイノルズ平均流の解析では十分でない.

本研究では近年発展している Large-Eddy Simulation (LES)法を用い, 取水路内流れをシミュレーションすることにより流れの性状とりわけ空気混入につながる取水渦の発生を明らかにできるかを調べる. LES では数値計算の格子解像度により, 解像できる運動を直接計算し, 解像できない小スケール運動はモデル化する. 従って計算機の容量と性能が上がればそれだけ解像度が上がり, 実際の流れに近いものが計算できることになる. 問題は現在使用可能な計算機でどの程度の流れの詳細が捉えられるかである. 中山・焦<sup>5)</sup>の RANS 計算では数十万点の格子で弱い旋回流しか捉えられていない. 本研究では格子数を倍増し, しかも瞬時の変動をシミュレーションする LES で局所性の強い渦流を捉えられるかを見るのが最大の目的である.

### 2. 取水路内流れの概要

小水力発電取水路の概要は図-1に示されてあるように, 水路により河川や貯水池などから水を引き込み発電

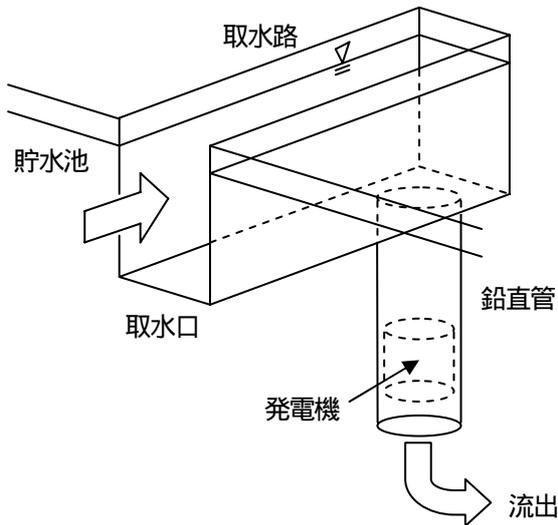


図-1 小水力発電施設の概要

機に通じる取水口に流入するような形である(久末ら<sup>7)</sup>).ポンプ取水のように取水槽底面から上方に吸い上げられる流れ<sup>3-6)</sup>とやや異なる。しかし断面の広い取水口のゆっくりした流れが加速しながら管路に流入する状況は共通している。この加速の程度により水路内に分散する弱い渦が引き伸ばされ、局所に渦度が集中する。渦度が集中し渦管が形成されると圧力が低下し、土砂が巻き上げられたり、水深が浅い場合は水面が引き下げられたりすることになる<sup>8)</sup>。したがって渦発生は、管路に入るときの加速の程度と水深の他に、水路に流入する流れの性状に大きく関連している。そこで本研究ではこれらのパラメータを変化させたときの流れがLES計算により如何に巧く再現できるかがポイントになる。従ってその他の条件はできるだけ簡単でまた一定とした計算を行う。

### 3. 数値計算法

旋回流や渦の発生するような取水路内流れの計算は3次元解析が必須である。既往の計算例<sup>3-6)</sup>は全てレイノルズ平均(RANS)法、それも等方性渦粘性モデルを用いたもので、複雑な3次元流に適用するには限界があった。RANS法に対しLESでは格子解像度により大スケール乱れはうまく捉えられる可能性がある。本計算では著者ら<sup>9)</sup>により開発・検証されている水面計算を組み込んだHSMAC法<sup>10)</sup>を用いる。この計算法の概要は表-1に示すとおりである。LES法の難点は壁面近傍の小スケール乱れを如何に表現するかである。縮尺1/10程度の模型スケールを想定すると、水路側壁と底面の粘性底層がある程度(粘性距離で約30以下)解像できる。従ってサブグリッド(SGS)応力については標準Smagorinskyモデルを適用し、壁面近傍ではVan Driest型のダンピングを施す。本計算では水面変動の

表-1 計算法の概要

要点	手法
圧力解法	HSMAC法
水面計算法	圧力・速度と同時緩和
移流項の差分	3次精度風上差分
時間進行	3次精度A-B法
座標	直交座標
格子	スタッガード格子
サブグリッド応力	標準Smagorinsky 壁面近傍はダンピング
壁面境界	粘着条件

スケールは小スケール乱れと比べ大きいので水面変動によるSGS効果は無視する。

本計算法の精度は実験室スケールの平坦開水路および段落ち流れなど単純な形状流れで検証され、RANS法の2方程式モデルとも比較されている<sup>9)</sup>。平均量については境界近傍の低レイノルズ数領域で調節されているRANS法の結果に比べ必ずしも優れているとは言えないが、乱流応力の非線形性、非等方性は実験に近い結果を示し、瞬時乱れ構造が良好に再現できており、本取水路流れのように3次元性、非定常性の強い流れの計算には適していると言える。

### 4. 計算条件

#### (1) 取水形状と流入・流出条件

一般的に取水路は矩形断面であるが、流入部は設置される河川の状況により形状が異なる。本計算では取水路内流れをシミュレーションする目的であるので流入部の形状は矩形とする代わりに、流入面での速度分布に変化を与える。計算領域、計算格子は図-2に示す。計算領域は鉛直管の半径を $D$ として、管の上流に $9D$ 、下流に $2D$ 、横方向に $3D$ である。同図には解析に用いられる座標系(流れ方向に $x$ 、横断方向に $y$ 、鉛直上方向に $z$ )も示してある。なお $x, y, z$ 方向流速成分は $u, v, w$ で表す。計算格子数は直交座標上、不等間隔格子で、 $x, y, z$ 方向にそれぞれ87, 34, 94である。鉛直管は円形断面であるが、正確な形状を問題としないので、対称性を保持するよう直交格子で近似している。ただし水面は一時的にまた局所的に上昇するので、平均水面よりも上にかかりの格子点をとっている。

流入面流速分布は次の三種を考える。すなわち、(a)理想的なケースで横断方向に一樣な流入流速分布、(b)流速が横断方向に変化している場合、(c)横流れがある場合である。何れのパターンも鉛直分布は発達した滑面開水路等流の対数則分布

$$u(y, z) = u_* (y) \left( \frac{1}{0.41} \log \frac{zu_* (y)}{\nu} + 5.2 \right)$$

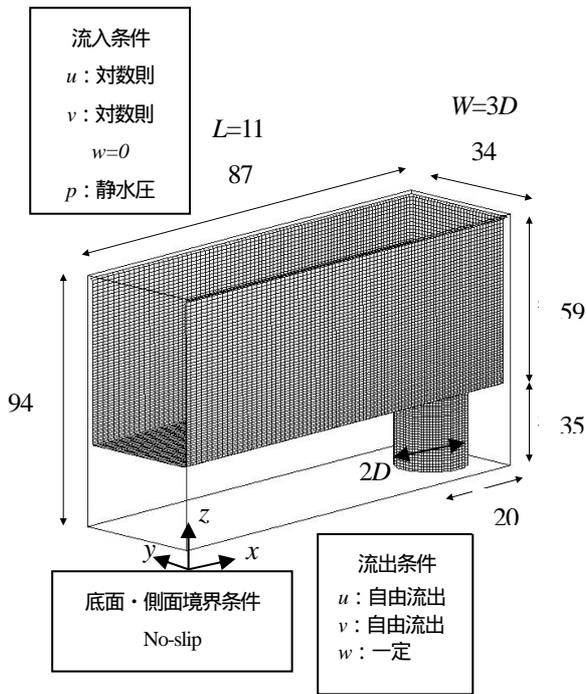


図-2 計算格子

(1) と仮定している。ここで  $u_*(y)$  は底面の摩擦速度で (a), (c) の場合は一定, (b) の場合は線形分布

$$u_*(y) = u_{*max} \left( -\frac{y}{W} + \frac{1}{2} \right) \quad (2)$$

としている。これは左岸  $y = W/2$  で流れが剥離するあるいは再付着するような状況に相当する。また(c)の場合  $u_*$  は一定であるが、横断方向速度  $v$  がゼロではなく

$$v(y, z) = \frac{1}{2} u(y, z) \quad (3)$$

としている。 $u_*(y)$  の一定値および  $u_{*max}$  の値は断面平均流速  $U_{ref}$  に基づくレイノルズ数が一定になるよう計算の各時間ステップで動的に設定している。初期条件として取水路全体で一樣な流速、静水圧分布を与え、上記の流入条件および下流端である鉛直管の流出面で自由流出条件を与えている。水路長さを長く取っているので取水管位置までに底面、壁面からの乱れが発達するので、流入面での乱れは考慮していない。流出速度の値は、平均水面が増加または減少しないよう、すなわち全体が定常な状態になるようこれも動的に設定している。この操作により、何れの計算条件でも、流入面平均水深  $H_{in}$  と流入面平均流速  $U_{ref}$  を基にしたレイノルズ数  $Re$  およびフルード数  $Fr$  は、それぞれ一定値の 5000 と 0.1 に保たれている。

計算条件は表-2 に示すとおり、流入流速分布、水深と取水管径の比を変えたものであり、流入断面積

表-2 計算ケース

計算ケース	流入速度分布	水深/取水管径 $H_m/2D$	流入断面積/取水管断面積
Case1	(a)	1	1.9
Case2	(b)	1	1.9
Case3	(c)	1	1.9
Case4	(a)	2	3.8
Case5	(b)	2	3.8
Case6	(c)	2	3.8

に関係があり重要なパラメータである。

## 5. 計算結果

### (1) 瞬時流れ場の流速ベクトル分布

Case1,2,3,6 の計算結果より水面近傍の瞬時流速ベクトル分布 (Case1,2,3 の場合  $z=0.8D$ , Case6 の場合  $z=1.8D$ ) を図-3 に示す。流入面で横断方向に一樣流速分布で流入する Case1 の場合、流れはほぼ対称で、取水路終端に衝突した流れは、左右方向に分かれ、それぞれ両隅で反時計回り、時計回りの旋回流が形成されている。流入面で流速が横断方向に変化している Case2 の場合、左側からの流速の大きな流れの影響を受け、水路終端中央付近に時計回りの渦流が形成されている。この Case2 は久未ら<sup>7)</sup>の実験の条件に近いもので、この実験においても取水渦の発生が確認されている。横流れがある Case3 の場合、右岸からの流速が大きな流れの影響を受け、全体的に反時計回りに旋回し、左隅にやや広がった渦流が形成され、右隅に小さい時計回りの渦が見られる。

Case3 と同様の流入面の流速分布で、水深が 2 倍である Case6 では、Case3 のような水路終端中央付近に時計回りの渦流が見られない。Case1 のような両隅で反時計回り、時計回りのやや広がった渦は見られる。これは、長時間の計算結果全体にも見られ、水深が深くなると渦が形成し難い事を意味している。

### (2) 瞬時流れ場の渦度

流速ベクトル分布だけでは渦の発生などの判断は、難しい。実験では渦の発生は水面の窪み具合や気泡の混入などから判断される。取水渦は管状あるいは糸状の渦になるため、数値計算結果から渦を検索するには渦度や速度勾配テンソルの不変量などを計算し、その分布を調べることにより渦管の発生を検索することができる<sup>12)</sup>。ここでは計算が簡単な渦度の絶対値の分布を調べる。図-4 は渦度の絶対値が一定値 (Case1 の場合  $6.0U_{ref}/D$ , Case2,3 の場合  $7.5U_{ref}/D$ , Case6 の場合  $2.5U_{ref}/D$ ) をとる面を可視化したものである。同図に水面も表わされている。

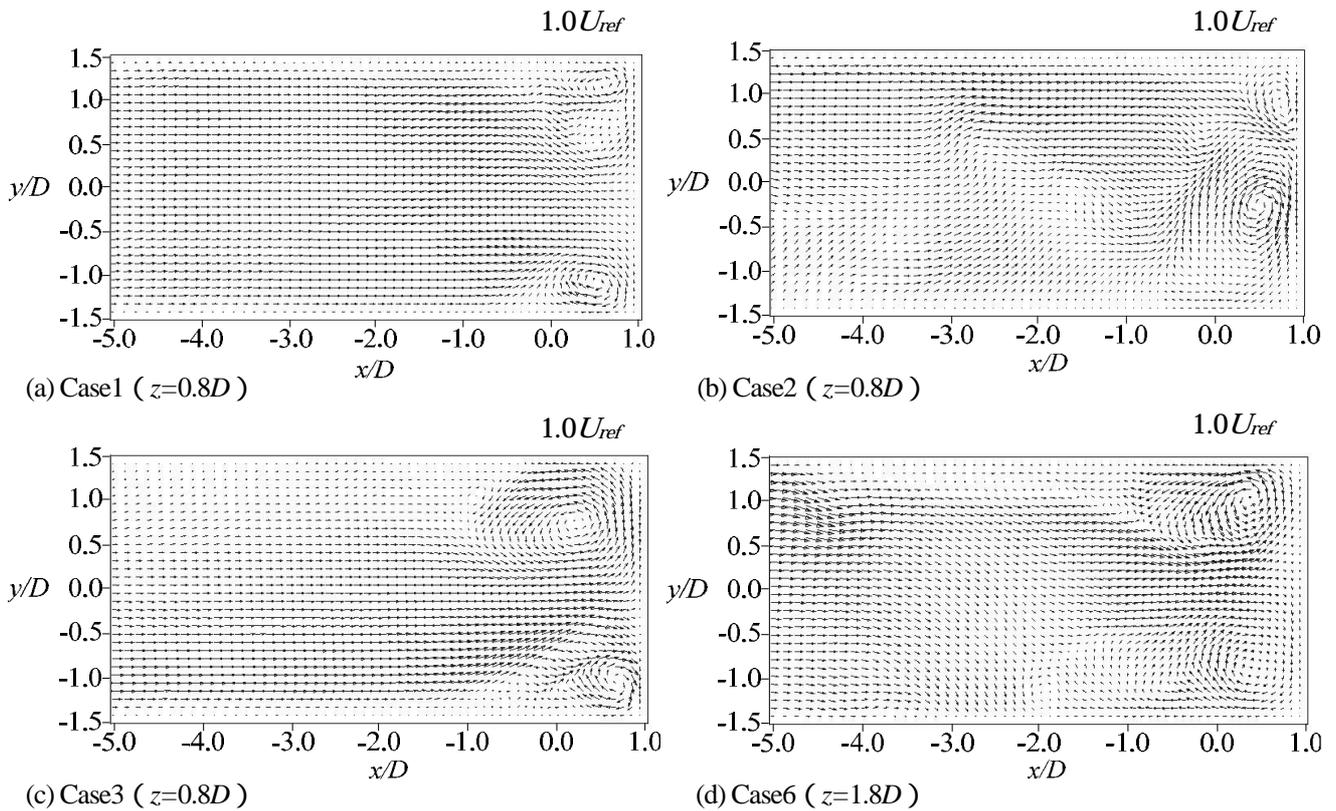


図-3 水面近傍瞬時流速分布

渦度は取水渦の部分のみならず底面でのせん断の強いところでも大きい値をとる。しかし、取水路下流端近傍の分布を見ることにより取水渦あるいはそれに近い構造の有無の判定が可能である。

流入面で横断方向に一樣流速分布で流入する Case1 の場合、取水管近傍の渦度は分散しており、管状に集中している部分は見られない。流入面に速度勾配のある Case2 は取水管入口付近で小さいが管状渦が見られる。横流れがある Case3 でも取水管入口付近に、はっきりと管状に渦度の大きい部分が見られる。Case3 と流入流速の条件が同じで水深が 2 倍の Case6 の場合、全体的に渦度が小さい。Case2, Case3 の管状渦は時間的に間欠的に現れ、その位置も非定常に移動する。これらの傾向は実験でみられる動きと一致している。

### (3) 瞬時流れ場の水面形

取水路の流れではフルード数は 0.1 程度であり高くないが取水渦により水面が局所的に変化する。実験では渦の発生は水面の窪みや気泡の混入などから判断されている。本 LES 計算では空気混入の計算は不可能であるが、渦流の発生とそれが空気混入につながる流況はシミュレーションすることが可能である。図-5 に図-3,4 で示した計算ケースの水面の形状を等高線で示す。白色のコンタは平均水面より高い部分を、黒線コンタは低い部分を表わす。Case2 と Case3 では水面に局

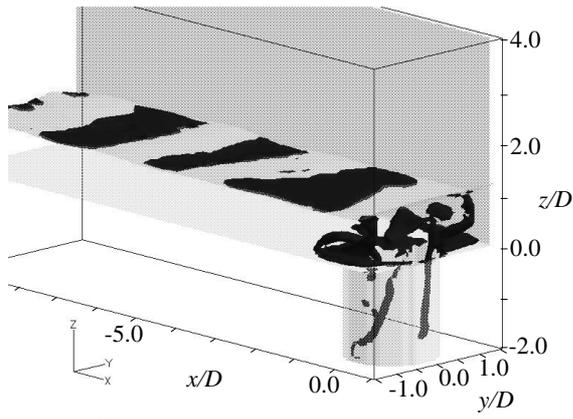
所的な窪みが見られる(図中破線で囲った部分)。窪みの直径と深さの比は $0.5/0.1=5$ 程度であるので Hecker<sup>12)</sup>、久末ら<sup>7)</sup>の分類の弱い水面渦に相当する。

### (4) 瞬時流れ場の流線

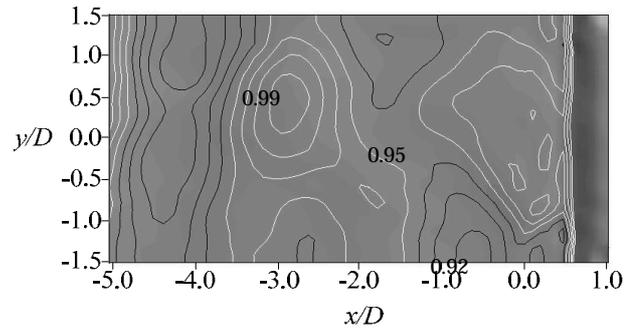
図-6 に Case1,3 の流線を示す。Case1 では水面に広がる流線は水路終端壁に衝突した後まともに取水管に流下している。Case3 では取水管上の水面近傍で旋回した後まともに取水管に流下している。後者の場合は、水面の窪みからも水面渦が発生していると考えられる。

## 6. 考察

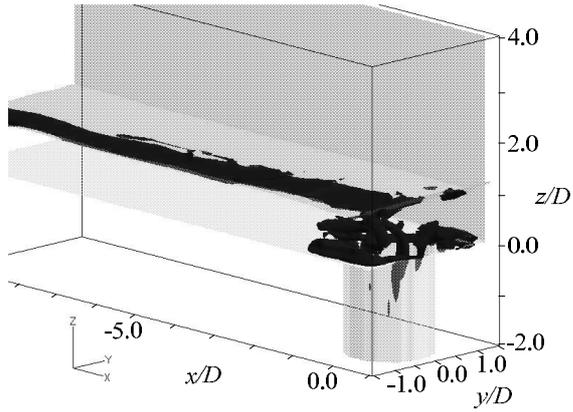
本計算では取水路内の渦流が如何に再現できるかを調べるのが最大の目的である。本計算例のように被り水深が取水管直径とほぼ同じ場合、取水渦の外径は取水管径程度で、流入条件から渦の強度は大まかではあるが推定できる。取水路内で発生する渦は鉛直方向渦度によるものであるが、渦度の生成は粘性効果の大きい境界層でしか起こらないので、流入面あるいは取水路上流端近傍での水平面内の循環に大きく関連している。取水路側壁の境界層内での渦度生成は一樣な流速分布のパターンの場合にも起こるが、両側壁で反対方



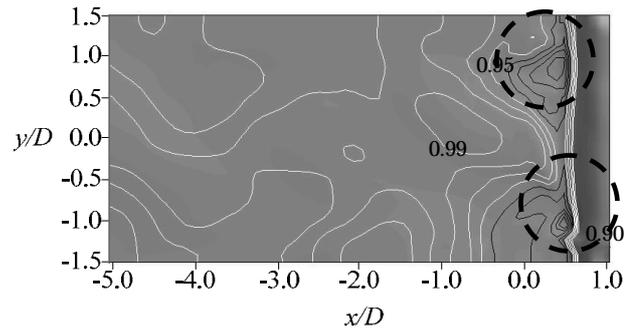
(a) Case1 (渦度= $6.0U_{ref}/D$ )



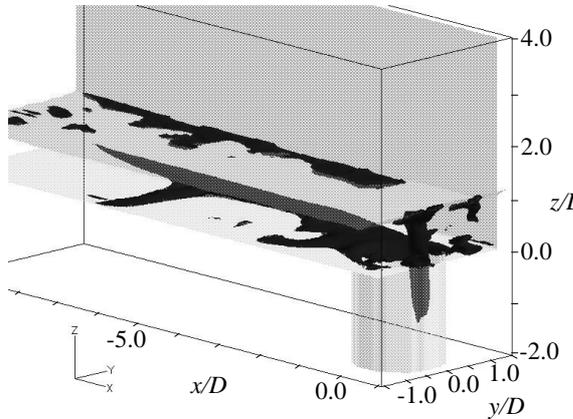
(a) Case1



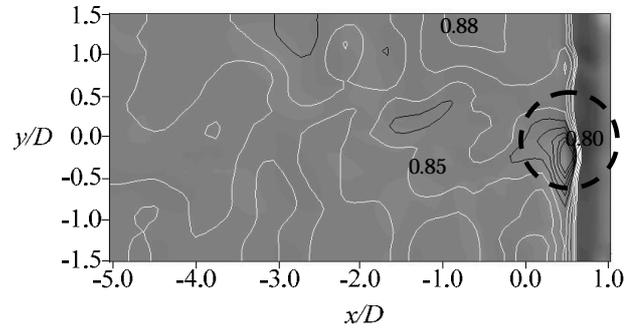
(b) Case2 (渦度= $7.5U_{ref}/D$ )



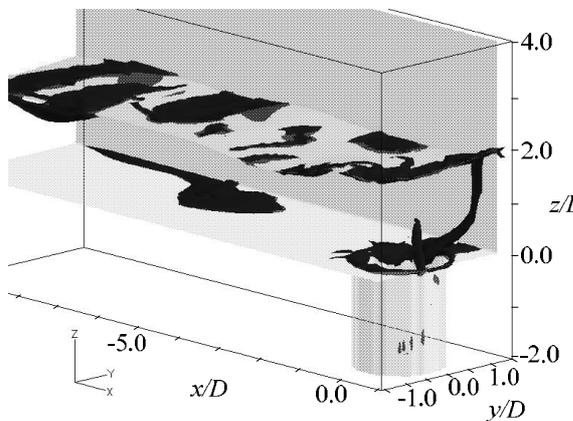
(b) Case2



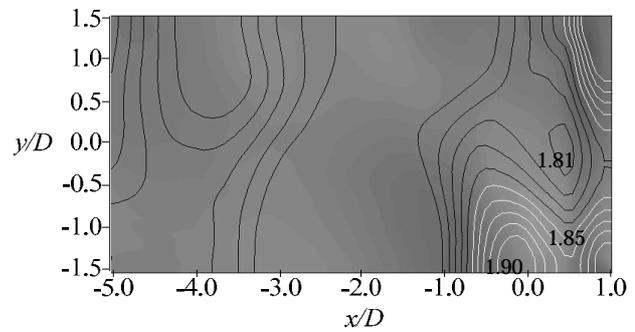
(c) Case3 (渦度= $7.5U_{ref}/D$ )



(c) Case3



(d) Case6 (渦度= $2.5U_{ref}/D$ )



(d) Case6

図-4 渦度絶対値の等値面

図-5 瞬時水面形 (等水深線間隔は,  $0.01D$ )

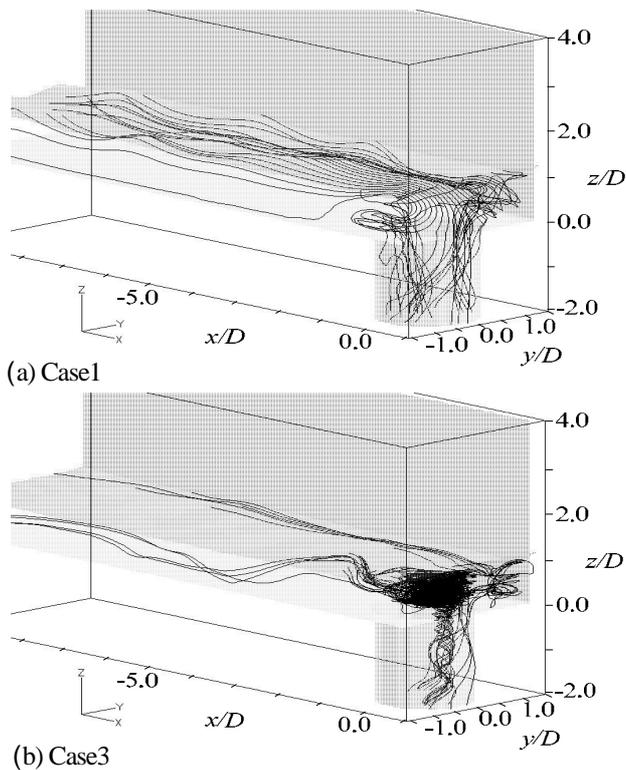


図-6 流線図

向の渦で、図-3の結果からも見られるように両隅に停滞している渦流は、取水渦には直接関係しないと考えられる。流入条件(b)の流速が横断方向に変化している場合、この横方向速度勾配は流入面近傍で反時計回りの循環をもっている。取水路右岸で  $U_{max}$ 、左岸ではほぼゼロとなる領域が水路幅程度の領域で存在すると考えると、この領域での循環は約  $\Gamma = U_{max}W$  と推定できる。これに対し(c)主流速の  $1/2$  の横流れがあるパターンの場合、流入面近傍での循環は  $\Gamma = 1/2 U_{ref}W$  である。何れの場合もこの循環が水路終端近傍で面積  $A$  の渦に集中するとすると  $\Gamma/A$  の渦度になる。したがってこれら二つの場合とも同様な渦が形成される可能性を持っているといえる。

## 7. 結論

本研究では、LES による一般的な形状の水力発電取水施設流路流れの数値解析を行うことによって、水路内渦流をどの程度再現できるのか検討した。適用した LES 法は、壁面近傍の粘性底層をある程度解像する場合、結果の信頼性が示されているが、本計算でも十分ではないが壁面近傍が解像されており乱流構造それに取水渦構造がとらえられた。とくに非定常で時間的、

空間的に変化する流れがうまく再現できた。また、取水渦が発生するときに見られる水面のくぼみにしても弱いものであるが、再現できたといえる。このことから、さらに細かい格子をとる事により実スケールに近い流れでも局所的で非定常変動の再現が可能であることを示せたといえる。今後、渦発生条件と水面の窪みの定量的予測及び実験観測との相関について詳しく調べる予定である。

## 参考文献

- 1) Johnson, P. L. :Hydro-Power Intake Design Consideration , *J. Hydr. Eng.* , vol.114 , pp.651-661, 1988.
- 2) Nakayama, A. and Jones, J.R. :Correlation for formation of inlet vortex, *AIAA J.*, Vol.37, pp.508-510, 1999.
- 3) Constantinescu, G and Patel, V.C. : Numerical model for simulation of pump-intake flow and vortices, *J. Hydr. Eng.*, Vol.124, pp.123-134, 1998.
- 4) Silva, J.M. and Li, S. : Numerical study of the influence of the inlet flow in a practical water-pump intake, Proc. XXIX IAHR Congress, Theme D, Vol.1, 593-600, Beijing, 2001.
- 5) 中山昭彦・焦徳思・市成準一: 取水路回りの渦を伴う3次元流の要因とその予測計算法, 水工学論文集, 第43巻, pp.485-490, 1999.
- 6) Nakayama, A. and Jiao, D.: Velocity-gradient tensor and local topology of three-dimensional flows in intake bay, XXIX IAHR Congress Proc. Theme D, Vol.1, pp.442-447, Beijing, 2001.
- 7) 久末信幸・竹原幸生: 画像計測を用いた取水渦の発生要因に関する実験的検討, 水工学論文集, 第50巻, pp.883-888, 2006.
- 8) 中山昭彦: 取り入れ口渦の発生条件, 土木学会論文集, No.447/ -19, pp.9-15, 1992.
- 9) 中山昭彦・江田智行・松村友宏: 修正 HSMAC 法による開水路乱流の LES, 水工学論文集, 第49巻, pp.661-666, 2005.
- 10) Hirt, C.W. and Cook, J.L.: Calculating three-dimensional flow around structure and over rough terrain, *J. Comp. Phys.* pp.324-340, 1972.
- 11) 中山昭彦・焦徳思: 速度勾配テンソル不変量解析を応用した取水槽流れの3次元渦構造特性の検索, 水工学論文集, 第45巻, pp.451-456, 2001.
- 12) Hecker, G.E.: "Fundamentals of Vortex Intake Flow", ed. J., knauss, Swirling Flow Problems at Intakes, A.A.Balkema, Rotterdam, pp.13-38, 1987.

(2006.9.30受付)