渦による空気混入の評価のための 水面形状と循環の同時計測

A SIMULTANEOUS COUNTING OF FREE SURFACE PLOFILE AND
CIRCULATION FOR EVALUATION OF AERATION BY FREE SURFACE VORTEX

久末 信幸¹・竹原 幸生²・津守 雄介³・前田 裕史³
Nobuyuki HISASUE, Kohsei TAKEHARA, Yusuke TSUMORI, Yuji MAEDA

¹正会員 博(工) 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)

²正会員 博(工) 近畿大学教授 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1)

³近畿大学 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1)

Aeration by free surface vortex in hydro-electric facilities has been investigated for many years. The studies on free surface vortex have been mainly conducted by model experiment that required many works and costs. Combination of image velocimetry and numerical simulation is a powerful tool for estimation of occurrence of aeration by free surface vortex. The knowledge of aeration by free surface vortex is necessary to designing the hydro-electric facilities quickly and efficiently. In this paper, the technique to measure the velocity field and free surface profile simultaneously has been developed by using image processing techniques. The developed technique is applied to experiments on the aeration by free surface vortex in order to clarify relationship between free surface profile and circulation of flow fields. The results show some interesting phenomena related to aeration by free surface vortex.

Key Words : *Aeration by free surface vortex, Free surface plofile, Circulation, PTV*

1. はじめに

発電施設には、取水口や水槽の開水路から圧力水路へ水が流れ込む区間があり、渦により自由水面から圧力水路内に空気が混入することが良く知られている¹⁾。水路内の流入部付近に混入した空気は、そこで蓄積され空気塊に発達する。その後、上流側の開水路に向かって排出され、空気排出を伴う衝撃圧となって発電施設のコンクリート躯体に悪影響を与える²⁾。また、水車発電機の羽根車にキャビテーションを生じさせ³⁾、さらには発電能力の低下を招き問題となっている。

従来から渦による空気混入の研究は行われており、模型実験を主体とした研究が行われている。基礎的研究としては、水槽の底面や側面に管を設置した場合に生じる渦に関する研究が行われている。荻原¹⁾、Anwar⁴⁾、Quick⁵⁾により静水面に発生する定常的な渦による空気混入の発生条件や発生限界などが示されている。次に、模型実験の結果を実物の設計に用いるには、模型実験での渦を含む流れ場の再現性や発生する渦の評価が重要となる。そのため、模型縮尺の効果や渦による空気混入の評価手法に関する研究が行われている。日本機械学会⁶⁾で

は、フルードの相似則を基本とした流速比に修正を加えた相似則が考案され、その有効性が示されている。また、Hecker^{7),8)}により、模型実験で渦による空気混入を評価する手法として、発生する渦の鉛直断面の水面形状に基づく評価手法が考案され広く用いられている。そして、Gordon⁹⁾や福原¹⁰⁾により実際の水力発電施設の取水口に発生する渦の研究が行われ、渦対策工が検討されている。

近年、模型実験の計測の分野ではPIVやPTVなどの画像計測を用いて、流れ場に発生する非定常で局所的な渦による空気混入を捉える試みがなされている。Rajendran¹¹⁾や著者ら¹²⁾により、ポンプ取水槽や水力発電施設の取水路内の流れ場に発生する渦の計測が行われている。

一方、数値計算の分野では近年の電子計算機の著しい進歩により、流れ場に発生する渦による空気混入を予測する試みがなされている。例えば、著者ら¹³⁾により水面計算を組み込んだLES (Large-Eddy Simulation) 法を用いて、模型実験と同様に渦による空気混入の評価を行う試みがなされている。

しかしながら、画像計測では高解像度、時系列で水面近傍の渦の流速場や渦度分布から、瞬時の渦の挙動を捉えるところまでは行われているが、渦の特性を表す渦度や循環などを活用して、渦による空気混入を評価するま

図-1 計測装置の配置図の一例

図-2 計測断面

では至っていない。また、数値計算を活用して渦による空気混入を評価するには自由水面の条件を厳密に再現できる計算スキームの開発が必要となり、精力的に開発が行われているが、現状では検証が必要な状況にある¹⁴⁾。

そこで、模型実験において、従来の渦による空気混入の評価に用いられている渦の鉛直断面の水面形状と、近年の画像計測から得られる渦の特性を表す渦度や循環との相関関係を明らかにすることができれば、現地の画像計測や数値計算から得られる渦度や循環を活用し、渦による空気混入を評価することが可能であると考えられる。そのためには、模型実験で渦の鉛直断面の水面形状と水面近傍の水平断面内の流速場を同時に計測する必要がある。

本研究では、模型実験において、画像計測により渦の鉛直断面の水面形状と、水面近傍の水平断面内の流速場を同時に計測する手法を開発した。開発した計測手法を水力発電施設の取水路内の渦を含む流れ場を対象とした模型実験に適用し、渦の鉛直断面の水面形状と循環との相関関係について検討を行った。その結果、いくつかの新たな知見が得られたので報告する。

2. 計測手法および実験装置

(1) 渦の鉛直断面の水面形状と水面近傍の水平断面内の流速場の同時計測手法

本研究では、画像計測により渦の鉛直断面の水面形状と水面近傍の水平断面内の流速場を同時に計測する手法を開発した。計測装置の配置図の一例を図-1、計測断面を図-2に示す。図中の x , y , z 座標は、格子点の空間座標を表しており座標原点は o 点となる。

開発した同時計測手法では、図-1に示すように取水路終端近傍に発生する渦の鉛直断面の水面形状を計測するビデオ計測装置、取水路終端の水面近傍の水平断面内の流速場を計測するPTV計測装置を用いた。2つの装置は

完全に同期が取られており、同時刻の計測をすることが可能である。

計測では、双方の照明光が問題となる。PTV計測では、暗室内で流速場の一断面のみを計測できるようにレーザーシート光が用いられるが、渦の鉛直断面の水面形状を撮影するために、全体的に照らす照明光を用いる。この全体的に照らす照明光はPTV計測の障害となる。また、渦の鉛直断面の水面形状のビデオ計測では、PTV計測に用いるレーザー光が周囲に比べ非常に明るくなるためハレーションを起こし、ビデオ計測の障害となる。これらの問題を解決するために、全体照明光とレーザー光の波長域を変化させ、カメラ側で各々の波長域に対応した光学フィルターを用いて光を分離させる手法を用いた。以下にビデオ計測装置とPTV計測装置の詳細を説明する。

まず、渦の鉛直断面の水面形状を計測するビデオ計測装置について説明する。図-1に示すビデオ計測装置は、CCDビデオカメラ（1008×1018pixel）、赤色照明（赤色LED、光波長域 $\lambda=600\sim680\text{nm}$ ）、制御用PCから構成される。LED照明は波長域が比較的狭く、光学フィルターによる分離が容易であり、かつ発光効率がよい、という特徴をもつ。計測断面は、図-2に示す赤色のビデオ計測面である。取水路左岸側のガラス面を通して渦の鉛直断面の水面形状を撮影する。CCDビデオカメラには、赤色照明光を透過するロングパスフィルター（光波長 $\lambda=620\text{nm}$ 以上を透過）を装着し、同時に行うPTV計測のレーザーシート光（光波長 $\lambda=532\text{nm}$ ）がCCDビデオカメラに透過しないようにした。

次に、取水路の水面近傍の水平断面内の流速場を計測するPTV計測装置について説明する。図-1に示すPTV計測装置は、ダブルパルスYAGレーザー（出力 120mJ/pulse 、光波長 $\lambda=532\text{nm}$ ）、CCDビデオカメラ（1600×1200pixel）、制御用PCから構成される。計測断面は、図-2に示す緑色のPTV計測断面である。取水路終端の水面近傍の水平断面内 $x=0.350\text{m}$ $y=0.460\text{m}$ の領域を

図-3 実験装置の概要図

計測した。照明光とするレーザー光は、取水路左岸側のガラス面を通して左岸側から右岸側に向けシート状に照射し、水面の上下振動を考慮し水面下0.015m ($z=0.335\text{m}$) の位置に照射した。画像の撮影方向は取水路左岸側上流の下方から撮影した。CCDビデオカメラには、レーザー光（光波長 $\lambda=532\text{nm}$ ）を透過するショートパスフィルター（光波長 $\lambda=550\text{nm}$ 以下を透過）を装着し、同時に行うビデオ計測の赤色照明光（光波長 $\lambda=600\sim 680\text{nm}$ ）がCCDビデオカメラに透過しないようにした。

今回のPTV計測では、1msec間隔で撮影された連続する2枚の画像の組を10Hz間隔で入手した。トレーサー粒子はナイロン12粒子（平均粒径 $160\mu\text{m}$ 、比重1.02）を用いた。画像座標から実空間座標への変換は、レンズ歪等に対応できるように2次関数変換を用いた。変換係数は、直径1mmの標定点を5cm間隔で示した標定板を撮影し、48点の計測値を用いて最小自乗法により求めた。PTVアルゴリズムは、竹原¹⁵⁾のSuper-resolution KC法を用いた。

ビデオ計測装置とPTV計測装置の同期は、PTV計測装置のトリガー信号を分岐、出力し、ビデオ計測装置に入力することにより行った。同期のタイミングは、計測箇所近傍に静止した物体を写し込み、その物体を移動させて記録した。

(2) 実験装置および実験条件

実験装置の概要図を図-3に示す。水路（長さ $L=11.400\text{m}$ 、幅 $B=0.500\text{m}$ 、高さ $H=0.500\text{m}$ ）を側面から見た図となっている。流れは図の右側から流入し、鉛直管（内径 $D=0.125\text{m}$ ）から流出し循環する。所定の流量を流量調節弁で制御し、水位を一定に保つようにした。水路の左岸側壁は流れ場を撮影できるように透明なガラス面となっている。

実験条件は図-3に示す実験装置の水路終端付近の水面近傍に、渦による空気混入が間欠的に発生する条件（流量 $Q=0.029\text{m}^3/\text{sec}$ 、水深 $h=0.350\text{m}$ ）とした。渦の発生が目視で確認できる時点から空気混入、消失までの時間 t は約5.0sec間の計測を計4回行った。

図-4 渦管の直径 d_a の時系列変化
(PTV計測断面, $z=0.335\text{m}$)

3. 平均流速ベクトル分布、瞬時循環値の算出

(1) 平均流速ベクトル分布の算出

PTVにより得られる瞬時流速値はトレーサー粒子が存在する点で定義され、任意の点における流速ベクトル分布となる。乱流統計量の空間分布や変化を比較的求めやすくするために、任意の点の流速ベクトル分布を格子点（格子間隔 $\Delta x=\Delta y=1\text{cm}$ ）の流速ベクトル分布に変換した。格子点への変換は、ガウス分布の重み付き平均を用いた。重み関数であるガウス分布関数の分散値には、PTV計測により求められた粒子数から求められる平均的な粒子間隔の2倍を用いた。変換された格子点の瞬時流速ベクトル分布を用いて平均流速ベクトル分布を算出した。

(2) 瞬時循環値の算出

取水路内の渦を含む流れ場を対象としたPTV計測では、渦による空気混入が発生した場合、図-2に示すように渦管（空気部分）が緑色のPTV計測断面を突き抜け、トレーサー粒子が存在しない、計測データが欠損する部分が生じる。そのため、渦の特性を表すパラメーターの一つである水面近傍の水平断面内の渦中心付近の瞬時渦度の鉛直成分 ω_z を算出することが困難となる。

そこで、渦の特性を表すパラメーターとして、渦管の直径よりも少し広い領域の瞬時循環値の鉛直成分 Γ_z を用いることとする。水面近傍の水平断面内の渦中心付近に渦管が存在し、計測データが欠損している場合でも算出することが可能となる。瞬時循環値を算出するための領域の大きさは、図-2の赤色で示すビデオ計測面で撮影した画像から、図中の破線で示すPTV計測断面位置での渦管の直径 d_a を計測した。

図-4にPTV計測断面 ($z=0.335\text{m}$) での渦管の直径 d_a の時系列変化を示す。渦の発生が目視で確認できる時点から空気混入、消失までの時間 t は約5.0sec間の計測を計4回行った結果を示している。縦軸は渦管の直径 d_a 、横軸は計測時間 t を表している。渦管の直径の最大値 d_{amax} は

図-5 取水路終端付近の水面近傍の水平断面内の平均流速ベクトル分布の一例（PTV計測断面， $z=0.335\text{m}$ ）

5.5cm程度であるため，瞬時循環値を算出するための領域の大きさは，渦管の直径の最大値 $d_{\max}=5.5\text{cm}$ よりも少し広い領域 $6\text{cm} \times 6\text{cm}$ （格子間隔 $\Delta x=\Delta y=1\text{cm}$ ，セル数36）とした．瞬時循環値の鉛直成分 $\Gamma_{z,i,j}$ は式(1)により求めた．

$$\begin{aligned} \Gamma_{z,i,j} = & \Delta x(u_{i-3,j-3} + 2u_{i-2,j-3} + 2u_{i-1,j-3} + 2u_{i,j-3} \\ & + 2u_{i+1,j-3} + 2u_{i+2,j-3} + u_{i+3,j-3})/2 \\ & + \Delta y(v_{i+3,j-3} + 2v_{i+3,j-2} + 2v_{i+3,j-1} + 2v_{i+3,j} \\ & + 2v_{i+3,j+1} + 2v_{i+3,j+2} + v_{i+3,j+3})/2 \\ & - \Delta x(u_{i+3,j+3} + 2u_{i+2,j+3} + 2u_{i+1,j+3} + 2u_{i,j+3} \\ & + 2u_{i-1,j+3} + 2u_{i-2,j+3} + u_{i-3,j+3})/2 \\ & - \Delta y(v_{i-3,j+3} + 2v_{i-3,j+2} + 2v_{i-3,j+1} + 2v_{i-3,j} \\ & + 2v_{i-3,j-1} + 2v_{i-3,j-2} + v_{i-3,j-3})/2 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで， Δx ， Δy は x 方向， y 方向の格子間隔， i ， j は x 方向， y 方向の格子点座標位置， u ， v はそれぞれ時間 t における各格子点座標の x 方向成分， y 方向成分の瞬時流速値である．

4．実験結果および考察

(1) 取水路終端付近の渦を含む流れ場の概要

渦の発生を容易に捉えるために，流速場の変化が顕著に現れる取水路終端付近の水面近傍の流速場をPTV計測により把握した．取水路終端付近の水面近傍（ $z=0.335\text{m}$ ）の水平断面内の平均流速ベクトル分布の一例を図-5に示す．計測断面は，図-2に示す緑色のPTV計測断面である．図-5の右側が取水路上流，左側が取水路終端で，流れは図の右側から左側に向かって流れている．渦の発生が目視で確認できる時点から空気混入，消失までの時間 $t=5.1\text{sec}$ 間の時間平均である．

取水路終端付近の流れ場は上流からの流れが取水路終

(a) 窪み深さ L

(b) 直径 d_s

図-6 渦の鉛直断面の水面形状の時系列変化

端壁に衝突し，左岸，右岸側壁近傍に各々反時計回りと時計回りの渦が形成されている．今回の計測では渦の鉛直断面の水面形状をビデオ計測装置で計測するため，取水路左岸側のガラス面に近い渦を対象に計測を行った．

(2) 渦の鉛直断面の水面形状の時系列変化

従来の渦による空気混入の評価に用いられている渦の鉛直断面の水面形状と瞬時循環値との相関関係を明らかにするために，ビデオ計測により詳細な渦の鉛直断面の水面形状の時系列変化を把握した．その結果を図-6(a),(b)に示す．渦の発生が目視で確認できる時点から空気混入，消失までの時間 t 約5.0sec間の計測を計4回行った結果を示している．計測断面は図-2の赤色で示すビデオ計測面で，撮影した画像から図中の実線で示す水面位置からの渦の窪み深さ L と水面位置での渦の直径 d_s を計測した．図-6(a)は水面位置からの渦の窪み深さ L の時系列変化を示し，縦軸は渦の窪み深さ L ，横軸は計測時間 t を表している．図-6(b)は水面位置での渦の直径 d_s の時系列変化を示し，縦軸は渦の直径 d_s ，横軸は計測時間 t を表している．

まず，窪み深さ L の時系列変化は，図-6(a)に示すように，(1) $t=0.0 \sim 1.3\text{sec}$ では大きな変化が見られず，(2) $t=1.3 \sim 2.0\text{sec}$ にかけて急に増加する．(3) $t=2.0 \sim 3.5\text{sec}$ で

図-7 渦の水面形状と循環値の相関関係

は、若干、値が振動するがほぼ一定の値を保ち、(4) $t=3.5 \sim 5.0\text{sec}$ で急に減少する。

次に、直径 d_s の時系列変化は、図-6(b)に示すように、値は全体的に振動しており、(1) $t=0.0 \sim 1.3\text{sec}$ では緩やかに増加し、(2) $t=1.3 \sim 3.0\text{sec}$ では値は振動するがほぼ一定を保ち、(3) $t=3.0 \sim 5.0\text{sec}$ で緩やかに減少している。

窪み深さ L と直径 d_s の時系列変化は、渦が発生する時点では、直径 d_s は緩やかに大きくなるが、窪み深さ L はほとんど変化しない。渦による空気混入が発生する時点では、直径 d_s はほぼ一定の大きさを保ち、窪み深さ L が急に増加する。渦が消失する時点では、直径 d_s は緩やかに減少し、窪み深さ L が急に減少する。

(3) 渦の鉛直断面の水面形状と水面近傍の水平断面内の渦中心付近の瞬時循環値との相関関係

ここでは、前述の渦の鉛直断面の水面形状と瞬時循環値との間にどのような相関関係があるのかを検討する。渦の鉛直断面の水面形状と、水面近傍の水平断面内の渦中心付近の瞬時循環値との相関関係を図-7に示す。渦の発生が目視で確認できる時点から空気混入、消失までの時間 $t \approx 5.0\text{sec}$ 間の計測を計4回行った結果を示している。縦軸は渦の鉛直断面の窪み深さ L と直径 d_s の変化の度合いを表す比 L/d_s 、横軸は図-2に示す緑色のPTV計測断面($z=0.335\text{m}$)の瞬時循環値の鉛直方向成分 Γ_z を表している。計測の開始点、終了点は例えばvortex1ではそれぞれ $v1(s)$ 、 $v1(e)$ で図中に示されており時系列順に線で結ばれている。

図-7に示す渦の水面形状と循環値の相関関係は、全体的に見ると(1)渦の発生は $\Gamma_z=120 \sim 170$ くらいで、 $\Gamma_z=200$ 付近まで L/d_s は0に近い値を示している。(2) $\Gamma_z=197 \sim 248$ で L/d_s は急に増加している。この時点から窪み深さ L が増加し、渦による空気混入が発生する。この時点の循環値は渦による空気混入の評価を行う上で重要である。(3)その後、 Γ_z は $\Gamma_z=250 \sim 100$ と減少するが、 L/d_s は若干、振動しながらほぼ一定の値を保ち、渦による空気混入が間欠的に発生する。(4) $\Gamma_z=100$ 付近で L/d_s は急に減少する。この時点で渦が消失する。図中の青色の大きな矢印で示すように、反時計回りの円を描くような特徴的な相関関係

(a) vortex2 ($t=1.0 \sim 1.4\text{sec}$)

(b) vortex3 ($t=1.2 \sim 1.6\text{sec}$)

図-8 渦による空気混入の発生前後の水面形状の時系列変化

係であることがわかる。

(4) 渦による空気混入の発生前後の水面形状の変化

図-7に示す渦の水面形状と循環値の相関関係で、特に相関関係の変化が大きく重要な、渦による空気混入のきっかけとなる図中の(2)の時点で、水面形状がどのように変化し、空気混入が発生しているのかを考察する。 $\Gamma_z=250$ 付近で L/d_s が急に増加していることが明確に把握できる図中青線のvortex2と赤線のvortex3に着目する。

渦による空気混入の発生前後の水面形状の時系列変化を図-8(a),(b)に示す。図-8(a)vortex2は計測開始後 $t=1.0 \sim 1.4\text{sec}$ 間、図-8(b)vortex3は計測開始後 $t=1.2 \sim 1.6\text{sec}$ 間の渦の鉛直断面の水面形状を示している。縦軸が座標原点 o からの z 方向の距離、横軸が座標原点 o からの x 方向の距離を表している。

図-8(a)vortex2の水面形状は、計測開始後 $t=1.0\text{sec}$ では、渦の窪み深さ L と直径 d_s はほぼ等しくボウル形状となっている。計測開始後 $t=1.0 \sim 1.1\text{sec}$ では、渦の先端が漏斗形状に変化する。その後、計測開始後 $t=1.2 \sim 1.4\text{sec}$ では、渦管が形成されチューブ形状となる。図-8(b)vortex3の水面形状は、vortex2と同様にボウル形状、漏斗形状、チューブ形状と順に変化している。特に、計測開始後 $t=1.2 \sim 1.3\text{sec}$ でボウル形状の先端の形状が、急激にV字

型に変化し、漏斗形状に変化している。

以上の渦の鉛直断面の水面形状の時系列変化と水面に働く力の釣り合いを模式的に示したものを図-9に示す。図中の実線が渦の鉛直断面の水面形状を表している。実線矢印は水面に働く表面張力の向き、破線矢印は水面に下向きに働く力（渦に起因する圧力低下による水面を引き下げようとする力）を表している。力の向きは、 z 方向上向きを+側、下向きを-側としている。

まず、渦による空気混入が発生する前の時点では、図-9(a)のように表面張力と水面に下向きに働く力は釣り合っておりボウル形状が保たれている。渦による空気混入が発生する時点では、図-9(b)のように水面形状が急激に凹から下に凸に変化し、表面張力の向きが上向きから下向きに変化する。この時点が渦による空気混入のきっかけとなり、その後、図-9(c)のように表面張力と水面に下向きに働く力が同時に下向きに働き、水面が急に引き下げられると考えられる。

5. 結論

本研究では、渦による空気混入の評価や現象の解明を目的とし、画像計測により渦の鉛直断面の水面形状と水面近傍の水平断面内の流速場を同時に計測する手法を開発し、模型実験に適用した。

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 渦の鉛直断面の水面形状と水面近傍の水平断面内の流速場を同時計測するために、全体照明光とレーザー光の波長域を変化させ、カメラ側で各々の波長域に対応した光学フィルターを用いて光を分離させる手法を用いた。
- (2) 渦が発生する時点では、直径は緩やかに大きくなり、窪み深さはほとんど変化しない。空気混入が発生する時点では、直径はほぼ一定で、窪み深さが急に増加する。渦が消失する時点では直径は緩やかに減少し、窪み深さが急に減少する。
- (3) 渦の鉛直断面の水面形状と水面近傍の水平断面内の渦中心付近の瞬時循環値との相関関係は、反時計回りの円を描くような特徴的な相関関係であることがわかった。
- (4) 渦による空気混入が発生する時点で水面形状が凹から急激に下に凸に変化する。この水面形状の変化により、水面に働く表面張力の向きが上向きから下向きに変化し、表面張力と水面に下向きに働く力が同時に下向きに働き、

水面が急に引き下げられると考えられる。

本研究で得られた渦の水面形状と循環値との相関関係を用いれば、現地の画像計測や数値計算から求められる水面近傍の循環値から渦による空気混入の評価を行うことは可能と考えられる。現地のLSPIV計測などの水面での流速場への適用を考える際、流速計測位置が模型実験と異なることから、今後、流速計測位置による影響等を検証する実験や現在改良中の数値計算手法との比較などを通して、より詳細に渦による空気混入の発生機構を明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) 荻原能男：空気吸込み渦に関する研究，土木学会論文報告集，第212号，pp. 15-25，1973.
- 2) 佐藤隆宏：エアハンマー現象を伴う気液二相流の管内圧力変動に関する実験的研究，水工学論文集，第43巻，pp. 461-466，1999.
- 3) ターボ機械協会：ハイドロタービン（新改訂版），pp. 75-81，2007.
- 4) Anwar, H. O. : Flow in a free vortex, *Water Power*, 4, 1965.
- 5) Quick, M. C. : Efficiency of air-entraining vortex formation at water intake ASCE, *J. Hydr. Div.*, HY7, pp. 1403-1415, 1970.
- 6) 日本機械学会基準：ポンプの吸込水槽の模型試験法，JSME S 004-1984，1984.
- 7) Hecker, G. E. : Model-prototype comparison of free surface vortices, 107 (HY10), *J. Hydr. Div.*, pp. 1243-1259, 1981.
- 8) Hecker, G. E. : Fundamentals of vortex intake flow, in *Swirling flow problems at intakes*, edited by J.Knauss, pp. 13-38, A.A.Balkema, Rotterdam., 1987.
- 9) Gordon, J. L. : Vortices at intakes, *Water Power*, pp. 137-138, 1970.
- 10) 福原華一：電力土木構造物に発生する渦の事例，電力土木，No. 249，pp. 70-76，1994.
- 11) Rajendran, V. P. , Patel, V. C. : Measurement of vortices in model pump-intake bay by PIV, *J. Hydr.Eng.*, vol. 126, no. 5, pp. 322-330, 2000.
- 12) 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.
- 13) 久末信幸，中山昭彦：LES法を用いた取水路内流れの数値シミュレーション，土木学会論文集B，Vol.64，No.4，pp. 251-266，2008.
- 14) 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.
- 15) 竹原幸生，R. J. Adrian，江藤剛治：KC法を用いた新しいSuper-Resolution PIVの提案，水工学論文集，第44巻，pp. 431-436，2000.

(2010.9.30受付)