表面取水施設における渦対策工の 空気取り込み渦に及ぼす影響に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON EFFECTS OF VORTEX-PREVENTING DEVICES FOR SUPPRESSING AIR ENTRAINMENT INSIDE SURFACE INTAKE FACILITY

竹原幸生¹・久末信幸²・高野保英³
Kohsei TAKEHARA, Nobuyuki HISASUE and Yasuhide TAKANO

¹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)

²正会員 博(工) 関西電力㈱ 電力技術研究所構築研究室 (〒661-0974 尼崎市若王寺3-11-20)

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

Air entrainments by vortices at water surfaces inside surface intake facilities of electrical power plants cause some problems, such as deterioration of power generation, destruction of blade in a turbine, etc. To suppress air entrainments by the vortices, some vortex-preventing devices have been proposed and have been used in many electrical power plants. The vortex-preventing devices used in the intake facilities are working effectively in many cases. However, the hydraulic properties of flow structure by the vortex-preventing devices are still unclear.

In this paper, the effects of the vortex-preventing devices in surface intake facilities have been investigated experimentally by using the particle tracking velocimetry. The results show that the vortex-preventing devices suppress the turbulent intensity and the vorticity inside the facility.

Key Words : *hydraulic power plant, surface intake facility, air entrainment, PTV, MLS*

1. はじめに

水力発電施設等における取水施設では、取水口付近に生じる取水渦が表面から空気を取り込み、発電施設にまで達して問題が生じることはよく知られている。一般に、圧力水路内に混入した空気は、空気塊を形成し取水口や水槽の自由水面で解放され、エアハンマーとなって水力発電施設のコンクリート躯体に悪影響を与える¹⁾。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、さらには、発電能力の低下を招き、問題となっている²⁾。

空気取り込み渦の研究は、古くから行われている^{3)~5)}。例えば、渦により生じる水面形状により空気取り込み渦の発生規模を評価する手法が考案されている³⁾。また、実際の水力発電施設の取水口やポンプ取水槽に発生する空気取り込み渦の研究も行われている⁵⁾。さらに、取水施設での空気取り込み防止のための渦対策工が実験的に検討されてきた。

近年の電子計算機の著しい進歩により、数値計算で空気取り込み渦発生を予測する試みがなされている。しかし、空気取り込み渦の発生を正確に判断するには、水表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、現在、精力的に開発が行われている。例えば、水面計算を組み込んだ LES (Large-Eddy Simulation) 法

を用いた空気取り込み渦の研究⁶⁾では、従来の評価法と同様に、空気取り込み渦の水面形状から空気取り込み渦の発生規模の評価を行う試みがなされている。しかし、現状では数値計算による空気取り込み渦の発生予測を行うには、検証が必要な状況にある。

瞬時の二次元場の流れ場を計測する手法として PIV (Particle Image Velocimetry) を代表とした画像計測法が開発されてきた。画像計測法の利点は点計測に比べて流れ場の時空間構造を直接計測することが可能となる点である。特に、PIV の中でも個々の粒子を追跡し、流速を計測する PTV (Particle Tracking Velocimetry) は、高分解能で計測が可能である⁷⁾。しかし、空気取り込み渦の画像計測に関する既往研究はほとんどなく、空気取り込み渦の時空間的な流れ場構造についても不明な点が多い。

本研究では、貯水池から水力発電施設へ表面取水する場合に用いられる一般的な取水施設を対象に、ピア部の曲率や渦防止柵などの渦対策工の流れ場への水理学的効果を PTV により明らかにすることを目的としている。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験水路

実験装置の概要図を図-1 に示す。水力発電施設の表面取水設備で用いられるベルマウス形式の取水設備を対

(a) 平面図

(b) 断面図

図-1 実験装置の概要図

図-2 PTV計測法の概略図

表-1 実験条件

ケース	Case1	Case2	Case3
ピア形状	曲率なし	曲率あり	
渦防止柵	なし	なし	あり
流量 Q (m ³ /sec)	0.012		
水位 z (m)	1.230		
計測位置	水平断面	$z=0.04$ (m)	
	鉛直断面	$y=0.128$ (m)

図-3 取水施設の形状

象とし、貯水池からベルマウス、取水施設、取水路までの模型（長さ $L=5.000\text{m}$ 、幅 $B=3.000\text{m}$ 、高さ $H=1.500\text{m}$ 、取水路内径 $\phi=0.150\text{m}$ ）を用いた。循環式の水路とし、所定の流量（ $Q=0.012\text{m}^3/\text{s}$ ）を電磁流量計で制御し、貯水池の水位を一定に保つようにした。

貯水池は模型にかかる水圧を考慮して鋼製の水槽とした。取水施設は通常河岸に設置されるため前面の地形は斜面になっており、その地形は木製の部材で製作した。レーザー光を照明とする PTV 計測を行うため、取水施設を透明の亚克力材で製作した。また、表層取水のためベルマウスの高さ調節は3段階ゲートを用いた。

PTV 計測装置の概要図を図-2 に示す。今回使用した計測装置は、取水施設内の水面近傍の水平断面内および取水施設中央の鉛直断面内の流れ場を計測する。座標原点 o を終端壁と左岸の交点の水面位置とし、 x 軸は上流方向を正、 y 軸は右岸方向を正、 z 軸は鉛直下向きを正とした。また、 x 軸、 y 軸、 z 軸方向の流速をそれぞれ u 、

v 、 w とする。

(2) PTV 計測装置

PTV 計測装置は、YAG ダブルパルスレーザー（ 120mJ/pulse ）、CCD ビデオカメラ（ $1600 \times 1200\text{pixel}$ ）、制御用 PC から構成される。照明光であるレーザービームは、シリンドリカルレンズによりシート状に変換され、計測断面に照射された。今回使用した PTV 計測装置では、ダブルパルスレーザーの各パルス間隔を 10msec 、連続する 2 枚の画像の組は 10Hz 間隔とした。694 組の 2 枚の画像を取得し、計測時間は 69.4sec であった。

トレーサー粒子としてナイロン 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 2 次関数変換を用いた。変換係数は、 5cm 間隔の標定点 65 個の標定板を用い最小自乗法により求めた。PTV アルゴリズムは、竹原ら⁷⁾の Super-resolution KC 法を用いた。

(3) データの処理法

PTV により得られる流速値は、トレーサー粒子が存在する点で定義される。得られた結果は、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易くするために、任意の点の流速ベクトル分布を格子点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偏差値には、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。

渦度分布については、ランダムな点における流速ベクトル分布を用いて、直接渦度を求める MLS 法 (Moving Least Square)⁸⁾によって算出した。

(4) 実験条件

実験条件を表-1 に、渦対策工として用いたピア部の曲率および渦防止柵の概要図を図-3 に示す。ピア部の曲率および渦防止柵の有無の変化による取水施設内の流況の違いを比較するために3 ケースの実験を行った。通常取水施設における取水流速は 1m/sec 以下に抑えられるため、渦防止柵による水面変動や抵抗増加等の影響は小さいものと考えられる。

取水施設での水深は 1.230m に固定して実験を行った。PTV 計測位置は、水平断面と鉛直断面の2断面とした。水平断面は渦流れが顕著に見られる水面近傍を計測するため $z=0.04\text{m}$ の水平断面とした。また、鉛直断面は代表断面として取水施設中央 ($y=0.128\text{m}$) とした。照明光とするレーザー光は、取水施設下流終端壁の亚克力面を通して下流側から上流側に向け照射した。画像の撮影方向は取水施設左岸側の下方から撮影した。

本実験条件における各ケースの空気取り込み渦の発生規模は、既往の評価方法⁹⁾に基づき目視により観察した。case1 および case2 は渦大に分類され、ピア曲率のある case2 は、case1 と比べ渦の発生頻度は少なかった。また、case3 は水面の窪みはほとんど見られなかった。

3. 流速に関する統計量

(1) 平均流速分布

各ケースの平均流速ベクトル分布を図-4 に示す。取水施設内の水面近傍の水平断面は、図の右側が取水施設流入部、左側が取水施設下流終端壁で、流れは図の右側から左側に向かって流れている。取水施設中央の鉛直断面は、図の右側が取水施設流入部でベルマウス部の終端、左側が取水施設下流終端壁となっている。流れは図の右側から左側に向かって流れ、その後、取水施設内で下側に流れている。図中の左下の実線部分は、3段ある取水ゲートのうちの最上段にある取水ゲートの設置位置を示している。

case1 の平均流速ベクトル分布を図-4(a) に示す。水平断面では、ピアから剥離した流れが取水施設中央に集中し、左右にそれぞれ分かれ時計回り、反時計回り

図-4 平均流速分布 (座標単位: cm)

の旋回流が形成されている。左岸側の反時計回りの平均的な旋回流が卓越しており、平均的な旋回流の中心位置は $(x,y)=(23.5\text{cm}, 5\text{cm})$ であった。case1 の鉛直断面では、取水施設下流終端壁の水面近傍には時計回りの小さな旋回流が見られる。ベルマウスから取水施設の接合部(図中の白い□)から流れ込む流れが剥離しているのがわかる。図の左下に取水管があり、取水施設流入部から流入した流れが取水路に向かって流れている。

case2 の平均流速ベクトル分布を図-4(b) に示す。case2 は case1 のピア部に曲率を付けたものがある。水平断面の流速分布より、ピア部の曲率のために $x=30\text{cm}$ 付近から取水施設に流入しているのがわかる。case1 と同様に左岸側の反時計回りの旋回流が卓越しているが、旋回中心位置は $(x,y)=(13\text{cm}, 6\text{cm})$ と終端壁方向に移動している。case2 の鉛直断面の流れ場は case1 の場合とほぼ同様に終端壁水面近傍の小さな旋回流とベルマウス接合部での剥離が確認できる。

case3 の平均流速ベクトル分布を図-4(c) に示す。case3 は case2 にさらに $x=20\text{cm}$ の水面近傍に渦防止柵を設置している。水平断面では、渦防止柵の上流側および下流側には旋回流はほとんど見られない。鉛直断面では、渦防止柵設置位置から下流の水面近傍に逆三角形の死水領域が明確に形成されており、ベルマウス接合部での剥離領域がより明確に形成されている。

(2) 乱れ強度分布

図-5 水平断面($z=0.04\text{m}$)の乱れ強度分布(横軸,軸, 縦軸,軸, 単位cm)

(a) 乱れ強度およびレイノルズ応力の水平断面分布

取水施設内の水平断面の乱れ強度($\sqrt{u'^2}$, $\sqrt{v'^2}$)分布およびレイノルズ応力($-\overline{u'v'}$)分布を図-5に示す。

まず, 図-5(a)に水平断面の x 軸方向の乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ 分布を示している。ピア曲率がなく渦防止柵がない case1 の場合には, 左岸側に乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ の大きな領域がある。対称の実験装置でも取水渦のような不安定現象ではどちらか一方の渦が卓越する傾向があり, 本実験では左岸側の取水渦のスケール, 強度が卓越した。この現象は case2 の場合も同様の結果となった。

case1 の乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ のピーク位置は(x,y)=(18.0cm, 4.0cm)で, ピーク値は 12.42 cm/sec であった。case2 の場合は case1 の場合と同様に左岸側に乱れ強度が大きい領域があるが, その領域は小さくなっている。case2 の場合のピーク位置(x,y)=(13.0cm, 3.0cm)でピーク値は 11.79 cm/sec であった。さらに渦防止柵を設置した case3 の場合には左岸側に生じていた乱れ強度の大きな領域は消失している。

次に, 図-5(b)に水平断面の y 軸方向の乱れ強度 $\sqrt{v'^2}$ 分布を示している。case1 の場合は x 軸方向の乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ 分布と同様に左岸側に乱れ強度 $\sqrt{v'^2}$ の大きな値の領域が生じており, 特徴的には 2 つのピークが現れている。2 つのピークはそれぞれ位置(x,y)=(23.0cm, 4.0cm)と(x,y)=(11.0cm, 7.0cm)で, ピーク値は 5.73cm/sec と 5.56 cm/sec であった。ピア曲率がある case2 の場合, 乱れ強度 $\sqrt{v'^2}$ の大きな領域は小さくなり, ピーク位置は終端壁方向に移動している。case2 の場合のピーク位置は(x,y)

=(9cm, 5cm)でピーク値は 7.39cm/sec であった。case3 の場合は渦防止柵の効果により, 乱れ強度 $\sqrt{v'^2}$ の大きな領域は消失している。

図-5(c)にレイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の分布を示す。ピア曲率のない case1 では, 左岸側近傍に負の大きなレイノルズ応力(ピーク値-36.23cm²/sec²)が見られる。しかし, ピア曲率がある case2 では, レイノルズ応力が低く抑えられている(ピーク値-10.94cm²/sec²)。さらに渦防止柵を設置によりレイノルズ応力の大きな領域は消失している。

(b) 乱れ強度およびレイノルズ応力の鉛直断面分布

取水施設内の鉛直断面の乱れ強度($\sqrt{u'^2}$, $\sqrt{w'^2}$)およびレイノルズ応力($-\overline{uw'}$)分布を図-6に示す。

まず, 図-6(a)に示す乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ の分布に関しては, ピア曲率がない case1 とピア曲率がある case2 で, 双方に終端壁水面近傍に乱れ強度が大きい領域が見られる。case1 の場合のピーク位置は(x,z)=(12.0cm, 3.0cm)でピーク値は 8.90cm/sec であり, case2 の場合のピーク位置は(x,z)=(9.0cm, 5.0cm)でピーク値は 7.39cm/sec であった。渦防止柵を設置した case3 の場合, 終端壁水面近傍の乱れ強度は低く抑えられている。

次に, 図-6(b)に示す乱れ強度 $\sqrt{w'^2}$ に関しては, ベルマウス接合部より生じる剥離域に沿った大きな領域がある。ピア曲率がない case1 の場合はピーク位置は(x,z)=(21cm, 37cm)で, ピーク値は 7.23cm/sec であった。曲率がある case2 の場合のピーク位置は(x,z)=(22cm, 32cm)でピーク値は 6.38cm/sec と case1 に比べて小さな値となった。渦防止柵を設置した case3 の場合, 主流部の乱

図-6 鉛直断面 ($y=0.128\text{m}$) の乱れ強度速分布
(横軸: x 軸, 縦軸: z 軸, 単位: cm)

れが大きく抑制されている。ベルマウス接合部からの剥離域に沿った乱れ強度 $\sqrt{w'^2}$ は他のケースと同様で、ピーク位置は $(x, z)=(23.0\text{cm}, 32\text{cm})$ でピーク値は $7.44\text{cm}^2/\text{sec}^2$ であった。

図-6(c)にレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ 分布を示している。ピア曲率がない case1 では、終端壁の水表面付近に逆三角形のレイノルズ応力が正の領域があり (ピーク位置 $(x, z)=(5\text{cm}, 7\text{cm})$, ピーク値 $12.18\text{cm}^2/\text{sec}^2$) , その斜め下方に楔形の負の領域 (ピーク位置 $(x, z)=(15\text{cm}, 14\text{cm})$, ピーク値 $-7.76\text{cm}^2/\text{sec}^2$) が見られる。また、取水路付近の剥離域に沿った領域にレイノルズ応力の大きな正の領域 (ピーク位置 $(x, z)=(15\text{cm}, 34\text{cm})$, ピーク値 $17.71\text{cm}^2/\text{sec}^2$) が見られる。ピア曲率がある case2 では、case1 に比べて終端壁の水表面付近に逆三角形の正の領域 (ピーク位置 $(x, z)=(9\text{cm}, 6\text{cm})$, ピーク値 $9.21\text{cm}^2/\text{sec}^2$) や、その斜め下方に楔形の負の領域 (ピーク位置 $(x, z)=(15\text{cm}, 8\text{cm})$, ピーク値 $-1.93\text{cm}^2/\text{sec}^2$) のレイノルズ応力が小さく抑えられている。また、ベルマウス接合部からの剥離域に沿った正の領域 (ピーク位置 $(x, z)=(18\text{cm}, 33\text{cm})$, ピーク値 $15.84\text{cm}^2/\text{sec}^2$) が細長くなっているのがわかる。

また、渦防止柵がある case3 では、終端壁の水表面付近の逆三角形の正の領域や、その斜め下方の楔形の負

の領域がほとんど消失している。取水路付近の剥離領域に沿った領域 (ピーク位置 $(x, z)=(25\text{cm}, 29\text{cm})$, ピーク値 $11.78\text{cm}^2/\text{sec}^2$) は小さく、レイノルズ応力が低く抑えられているのがわかる。また、渦防止柵により取水口に向かう流れが整流されているため、渦防止柵付近のレイノルズ応力は低く抑えられている。

4. 渦度に関する統計量

(1) 渦度の平均値分布

各時刻の流速分布よりMLSによって求めた各時刻の渦度分布を用いて渦度の平均値分布を求めた。また、渦度の変動強度を平均渦度から差の二乗平均平方根値と定義して求めた。図-7には水平断面の平均渦度および渦度変動強度の分布を示し、図-8には鉛直断面の平均渦度および渦度変動強度分布を示す。

まず、図-7(a)に水平断面の平均渦度分布を示している。ピア曲率がない case1 およびピア曲率がある case2 の場合は、共通して時計回り (青色) , 反時計回り (橙色) の渦対が生じており、case1 に比べて case2 の渦度が小さくなっていることがわかる。ピーク位置は case1 が $x=20\sim 25\text{cm}$ であるのに対して、case2 が $x=10\sim 15\text{cm}$ と終端壁側に移動している。渦防止柵が設置されている case3 では時計回り、反時計回りの渦対が消失している。

図-7(b)に渦度の変動強度の水平断面分布を示している。ピア曲率がない case1 の場合、左岸側に渦度の変動強度の大きい領域が存在する。本実験では左岸側に旋回流が卓越し、旋回流自体の変動が大きいと考えられる。ピア曲率により、渦度の変動強度のピーク値は低下し、その領域が終端壁方向に移動している。渦防止柵を設置した case3 の終端壁付近の渦度変動強度の大きな領域が消失している。

次に、図-8(a)に鉛直断面の平均渦度分布を示している。case1 および case2 では水面付近の時計回り (橙色) の渦層が終端壁に向かって伸びているのがわかる。それに対して、渦防止柵が設置されている case3 では、その渦層が斜め下方に向かって潜り込んでいる。また、ベルマウス接合部から剥離域に沿った反時計回り (青色) の渦層がすべてのケースに存在する。渦防止柵を設置した case3 の場合に最も長く伸びているのがわかる。これは渦防止柵により流れが整流され、剥離域が安定したためと考えられる。

最後に、図-8(b)に渦度の変動強度の鉛直断面分布を示している。case1 および case2 では終端壁水面近傍にピークがみられるが、渦防止柵が設置されている case3 ではそのピークが消失している。主流部の渦度変動強度は case1 より case2 の方が低く抑えられ、ピア曲率により渦が安定することがわかる。さらに、渦防止柵を設置した case3 の場合、主流部の渦度変動強度がさらに低く抑えられている。渦防止柵により渦構造が安定することが

図-7 水平断面($z=0.04\text{m}$)の平均渦度分布および渦度の変動強度分布(横軸x軸, 縦軸y軸, 単位cm)

図-8 鉛直断面($y=0.128\text{m}$)の平均渦度分布および渦度の変動強度分布(横軸x軸, 縦軸z軸, 単位cm)

わかる。

5. まとめ

水力発電施設で一般的に用いられる表面取水設備の模型を用いて, 空気取り込み渦に対する渦対策工の水理学的影響を実験的に求めた。実験ではPTV法により流れ場の時系列の瞬時流速ベクトル分布を求め, 乱流統計量および渦度の統計量を評価した。今回の実験により以下のようなことがわかった。

- ① ピア曲率がある場合とない場合の比較より, 平均的に生じる終端壁付近の時計回り, 反時計回りの渦対の位置がピア曲率の存在により下流側に移動する。

また乱流強度も低くなる。

- ② ピア曲率がない場合にはベルマウス接合部から終端壁に乱流強度の大きな領域があるが, ピア曲率により低く抑えられている。
- ③ 渦防止柵が存在する場合は水面近傍の終端壁に生じる渦対がほぼ消滅する。
- ④ 渦防止柵により, 水面から取水管に向かう流れが整流され, 乱れおよび渦度変動が抑制されている。

今後, 得られた渦度分布の時系列データをもとに, 詳細な渦度の時空間的構造と空気取り込み渦の関係や空気取り込み渦の発生条件を解明していく予定である。

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215号, pp. 15-25, 1973.
- 2) ターボ機械協会: ハイドロタービン (新改訂版), pp. 75-81, 2007.
- 3) 栗津清蔵: 流出渦について, 土木学会論文集, 第13号, pp. 46-54, 1952.
- 4) 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.
- 5) 和田章弘, 山本順平, 水島次郎: 立軸ポンプ吸込口の形状とポンプ性能, ターボ機械, 第32巻, 第10号, pp. 40-45, 2004.
- 6) 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.
- 7) 竹原幸生, Adrian, R. J., 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.
- 8) 竹原幸生, 江藤剛治: MLSを導入したPTVによる渦度推定法の提案と風波流速場への適用, 土木学会論文集B, Vol.65, No.3, pp. 151-165, 2009.
- 9) 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.

(2013. 9. 30受付)