

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

THE MODEL EXPERIMENT OF THE INTAKE VORTEX IN SMALL-SCALE
HYDRO-ELECTRIC FACILITY BY USING THE IMAGE VELOCIMETRY

久末信幸¹・竹原幸生²

Nobuyuki HISASUE, Kohsei TAKEHARA

¹正会員 関西電力株式会社 研究開発室 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) 近畿大学助教授 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1)

The electric power industries have been working on development of natural energy sources such as wind, solar, small-scale hydro-electric and biomass energy in order to reduce loads on the environment. The development of small-scale hydro-electric facilities involves making use of small elevation differences available at various sites. This means that the water depth of the reservoir relative to the generator can be shallow and may induce intake vortices causing adverse effects on the generator performance by the air hammer phenomenon of the entrained air. Since the conventional method of evaluation by counting the frequency of occurrence of vortex is not adequate, the measurement method PTV(Particle Tracking Velocimetry) has been applied to obtain detailed flow features in the intake bay with the vortex-preventing devices. From experimental investigations, it can be concluded that the structure near the free surface effectively reduce the flow speed near the surface and work effectively to suppress of the intake vortex.

Key Words : Particle Tracking Velocimetry, Intake vortex, preventing devices, flow near the surface

1. はじめに

近年, 地球環境保全やエネルギーの安定供給確保の観点から電気事業者に対して, 毎年の販売電力量に応じて一定割合以上の新エネルギー等の利用を義務づける法律(RPS法)が施行されている。電気事業者は環境負荷低減を目的とした風力, 太陽光, 1,000kW以下の小水力, バイオマス等の新エネルギーの開発に取り組んでいる。その中でも, 小水力の開発は既存設備を利用するため, 開発費の削減や工程短縮の面で注目されている。現在, 取水堰堤, 農業用水路, 砂防堰堤など様々な場所に設置が計画されている。

しかし, これまでの水力発電施設に比べ小規模であることから, 様々な新しい問題が発生している。例えば, 少量の塵芥, 土砂流入によって取水口のスクリーンが目詰まりを起し, 取水ができなくなる問題, また, 河床変動の激しい箇所では堆砂によって放水口が埋没し, 放流ができなくなる問題, そして, 取水渦による水路内への空気混入などである。問題の一つである取水渦による空

気混入は, 発電機への悪影響やエアハンマーが知られている。小水力発電施設の開発のほとんどは, 低落差を利用したものであり, 取水位から発電機までの被り水深の確保が難しい。そのため, 現状では取水渦が発生しない程度まで発電出力を低減したり, 取水渦対策工を設置して対処している。

従来の研究から取水渦の抑制には, 被り水深の確保や取水渦対策工の設置が, 効果的であることが分かっている。電気事業法関係付属法令の中の水力施設の技術基準(通産省¹⁾)による水圧鉄管径の2倍の被り水深の確保, また, 被り水深と水圧鉄管径との関係式(Johnson²⁾)が知られている。そして, 福原³⁾により取水渦対策工の事例が紹介されている。最終的には取水渦の発生の有無を確認するために水理模型実験が行われている。実際には関係式よりも大きな被り水深が必要であること, また, 具体的な取水渦対策工の形式や設置位置などが知見として得られている。

従来の水理模型実験では, 水路に発生する取水渦の大きさと形状, 発生頻度などに着目して, 取水渦対策工の評価を行っている。しかし, 水路内部の流れ場に着目し

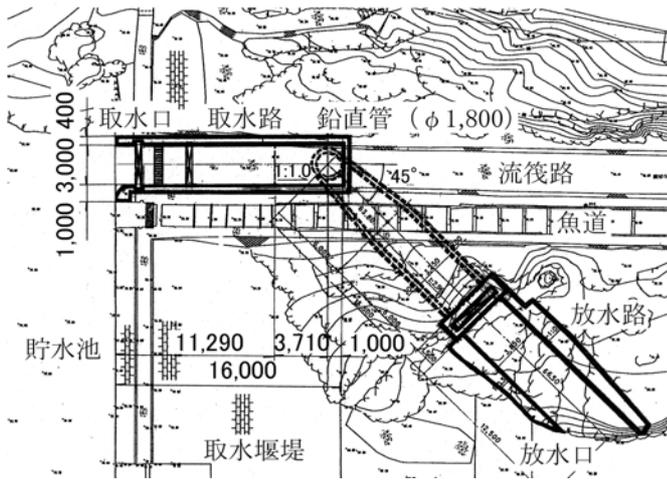


図-1 発電施設平面図



図-2 発電施設断面図

たものは少ない。取水渦がどのような流れ場の時に発生し、また、取水渦対策工が、水路内部の流れ場にどのような影響を与え、取水渦の発生を抑制しているのか、明らかにされていない。

本研究では、取水渦が発生した時や取水渦対策工を設置した時の水路内部の流れ場をPTVにより計測した。また、PTVにより計測した水路内部の流れ場から、取水渦の発生要因と取水渦対策工の流れ場に対する影響を検討した。そして、従来の取水渦の発生頻度と比較し検討した。

2. 実験装置および実験方法

(1) 水理模型

小水力発電施設でよく用いられている、開水路鉛直取水型の発電施設を対象とした。発電施設の平面図を図-1に示す。河川を堰き止めるように取水堰堤が設置されている。取水堰堤の上流側は貯水池となっている。取水堰堤の下流側には、流筏路、魚道が設置されている。

発電施設の断面図を図-2に示す。既設の流筏路の一部

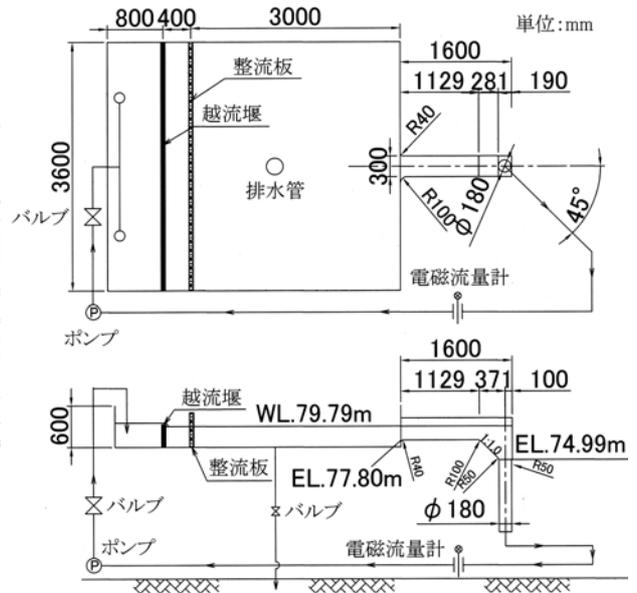


図-3 模型概略図

を締め切り、取水路としている。取水路の底版に鉛直管、発電機を設置して、発電する構造である。

模型の概略図を図-3に示す。取水堰堤から放水口に至る部分を縮尺1/10の水理模型（長さL=5.8m、幅B=3.6m、高さH=1.7m、流量Q=23ℓ/s）で再現した。模型はアクリル板および塩化ビニル管で製作した。レーザーを照明光とするPTVの計測を考慮して、取水路から鉛直管までを透明の部材とした。循環式の水路とし、電磁流量計にて所定の流量を制御し、取水位を一定に保つようにした。

相似則は、日本機械学会のポンプ吸込水槽の模型試験法⁴⁾などを参考にしたが、流れ場の中に発生する渦であることから、水路内の流況再現を重視してフルードの相似則を採用して、流量等を換算した。

(2) 取水渦の発生頻度の計測方法

取水路の水位を一定に保った状態で、ビデオカメラにより流況撮影を行った。撮影範囲は取水路終端から80cm上流までとした。取水渦の大きさを確認するために、模型全面に5cm間隔の格子スケールを記入した。撮影方法は、取水路側面および上方から2台のビデオカメラを同期し撮影を行った。撮影時間は3分間とした。

撮影した3分間の映像をスローモーションで再生し、1秒間隔で、発生する取水渦を目視により確認した。確認された取水渦は、図-4の取水渦の発生頻度の判定基準に基づき、判定、記録し、発生頻度を算出した。

(3) PTV計測装置

PTV計測装置はNd:YAGレーザー（120mJ/pulse）、CCDカメラ（解像度1600(H)×1200(V)）、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のレーザー光に変換され、計測部に照射される。

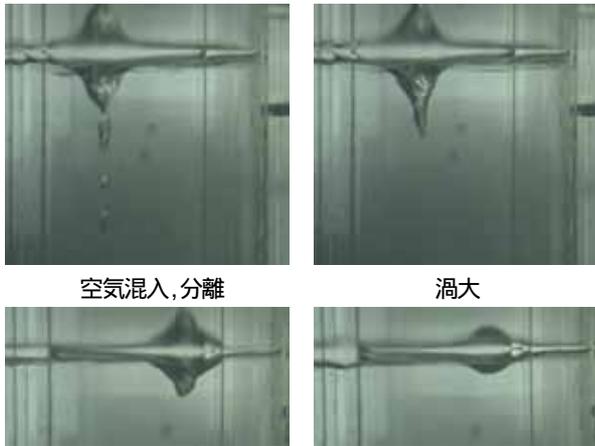
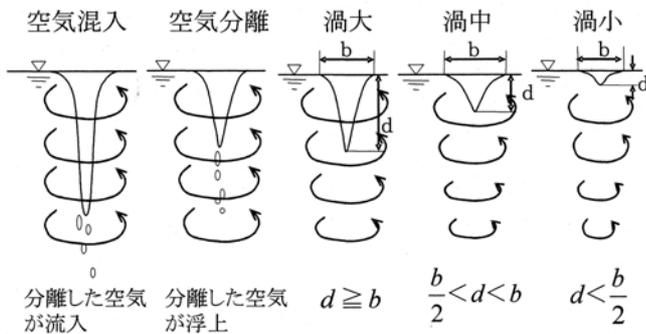


図-4 取水渦発生頻度判定基準

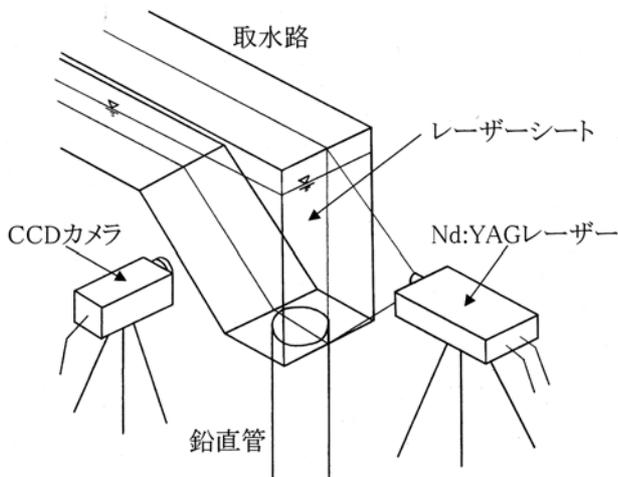


図-5 PTV計測装置の配置の一例

今回使用したPTV計測装置は、連続する2枚の画像をダブルパルスレーザーのパルス間隔を短くすることにより、高速流でも計測可能にしたものである。短い時間間隔で撮影された連続する2枚の画像の組は、10Hz間隔で入手できる。流れ場を可視化するために、トレーサ粒子としてナイロン12粒子(平均粒径160 μ m, 比重1.02)を用いた。

画像座標から実空間座標への変換には、2次関数変換を用いた。変換係数の決定は、直径1mmの標定点を5cm間隔でマークした標定板を撮影し、約60点の計測値を用いて最小二乗法により求めた。

表-1 PTV計測位置

計測断面	ケース	計測位置
鉛直	全ケース	取水路右岸側壁から15cm
	ケース1 (取水渦発生時)	取水路右岸側壁から23cm
水平	全ケース	取水路底板から40cm

表-2 実験条件

区分	ケース	使用水量 (m ³ /s)	取水位 (EL. m)	取水路 終端壁 傾斜 (θ°)	取水渦 防止桁
原設計	1	7.25	79.790	なし	なし
取水路 終端壁傾斜	2-1			15	なし
	2-2			30	なし
	2-3			45	なし
取水渦防止桁設置	3			なし	あり

(4)PTV計測方法

取水渦を計測するために、事前に目視による流況確認を行った。その結果、取水渦は水面付近に発生すること、左岸寄りに大きな渦が発生することを確認した。また、取水渦対策工の設置位置を考慮した。PTV計測位置を表-1に示す。

PTV計測装置の配置の一例を図-5に示す。照明光とするレーザーは、取水路終端の透明アクリル板を通して上流側に向け照射した。鉛直断面は取水路側面から撮影した。水平断面は取水路側面下方から上流側を撮影した。

PTVアルゴリズムは、Super-resolution KC法⁵⁾を用いた。Super-resolution KC法は、パターンマッチングPIVの1つである相関法PIVとPTVアルゴリズムであるKC法を組み合わせた方法である。相関法PIVにより粗いメッシュ上の流速ベクトルを計測した後、KC法により個々の粒子の移動を計測する。Super-Resolution KC法は、現在提案されているPTVアルゴリズムの中で、最も空間解像力の高いものの1つである。

(5)実験条件

実験条件を表-2に、実験ケースの概要図を図-6に示す。以下に各ケースについて説明する。

(ケース1) 原設計

(ケース2) 取水路終端の壁を鉛直から $\theta=15^\circ, 30^\circ$ 、取水路底板と平行となる $\theta=45^\circ$ に傾斜した場合

(ケース3) 取水路終端の横断方向の水面近傍に複数の桁(取水渦防止桁)を設置した場合

取水渦防止桁は、施工現場でも入手が容易な、汎用性の高い部材(H形鋼200 \times 200)を用いた。

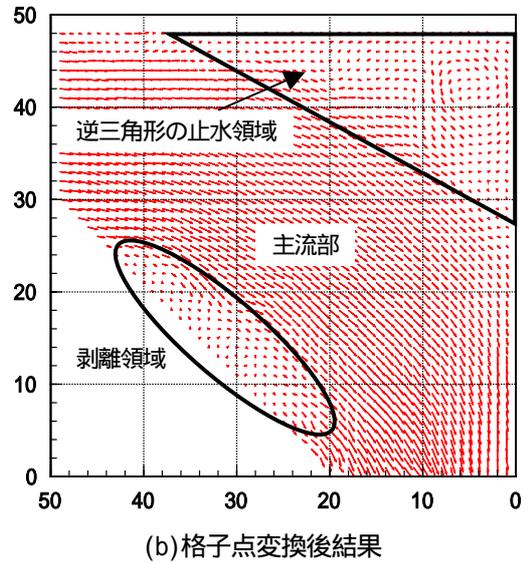
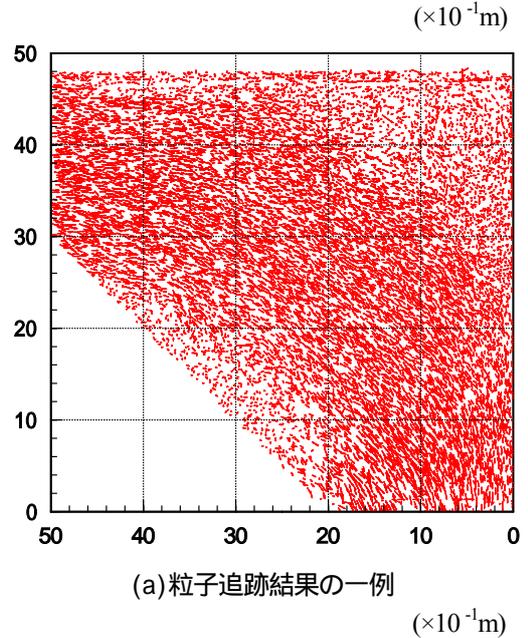
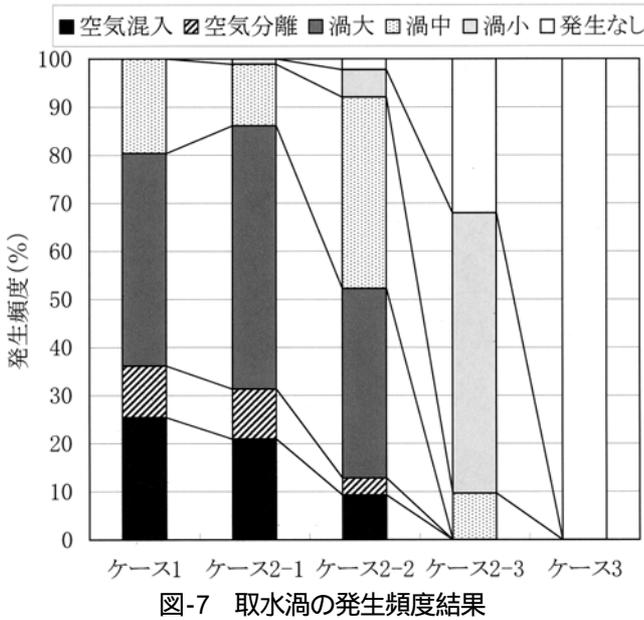
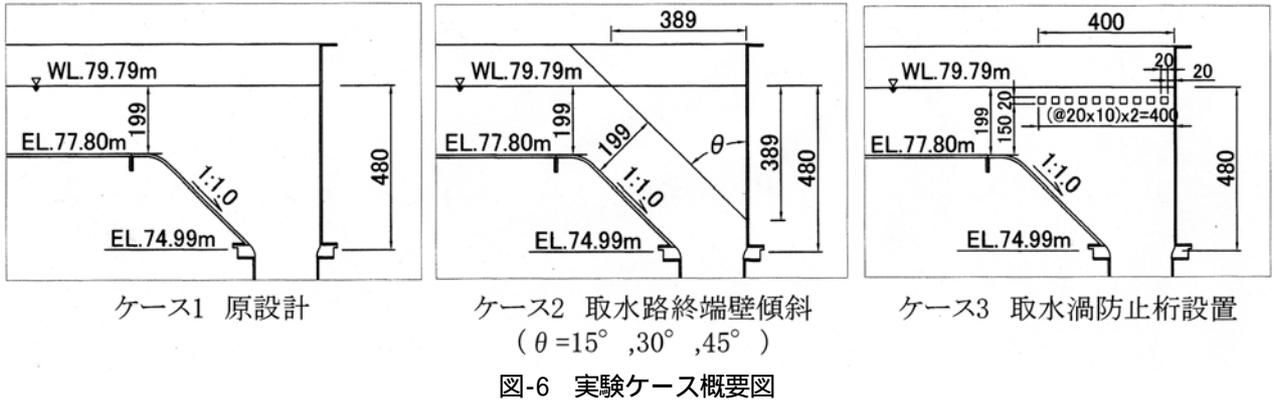


図-8 ケース1 (取水渦なし) の鉛直断面のPTV計測結果

また、実験結果の比較を行うために、ケース3の取水渦防止柵の設置範囲は、ケース2の取水路終端壁を $\theta=45^\circ$ に傾斜させた場合とほぼ同じ範囲にした。

ケース1原設計の被り水深 $h=4.8\text{m}$ に対する鉛直管内径 $D=1.8\text{m}$ の比率 h/D は、2.6である。既往の水理模型実験の知見から得られている比率 $h/D=3\sim 4$ よりも小さく、取水渦の発生が予見される形状である。

3. 実験結果および考察

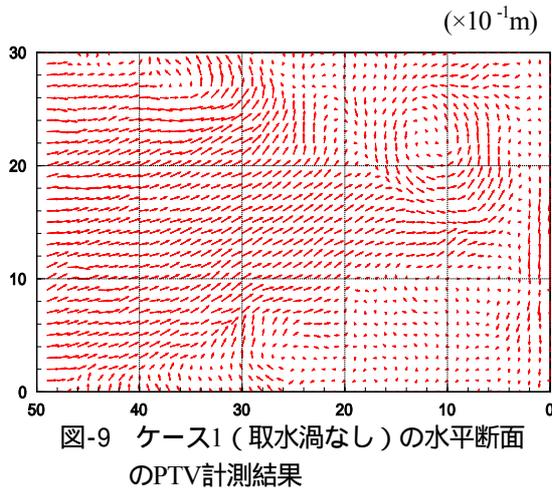
(1) 取水渦の発生頻度結果

取水渦の発生頻度の結果を図-7に示す。

ケース1は、空気混入を伴う規模の大きな渦が80%程度発生している。既往の水理模型実験の知見を裏付けるものである。取水渦の発生要因の一つとして、被り水深の不足が挙げられる。

ケース2-1から2-3は、取水路終端壁の傾斜角度が大きくなるほど、取水渦の発生が減少している。取水路終端壁を $\theta=45^\circ$ に傾斜させた場合、水路形状が管路と同じになる。自由水面の範囲が減少するほど、取水渦の発生が

減少している。ケース3は、取水渦の発生は見られない。ケース2-3とケース3は、形状が異なる取水渦対策工であるが、取水渦を抑制する効果はほぼ同じである。



以下では、取水渦の発生頻度と取水路内部の流況について考察する。

(2) PTVによる計測結果

a) ケース1の取水渦なしと取水渦ありの流況比較

ケース1の取水渦なしの鉛直断面のPTV計測結果を図-8(a), (b)に示す。図-8(a)は、ある瞬間の粒子の流速ベクトル図の一例である。図-8(b)は粒子流速を格子点に変換し、平均した流速ベクトル図である。以下、PTV計測結果は格子点に変換した流速ベクトル図を示す。

流れ場は、基本的に取水路終端表層に形成される逆三角形の止水領域、流速が大きく下向き的主流部、取水路底板付近の剥離領域から成っている。

次に水平断面の結果を図-9に示す。取水路終端に衝突した流れは、左右方向に分かれ、それぞれ反時計回り、時計回りの旋回流を形成している。旋回流は上流方向に徐々に小さくなりながら移動している。今回用いた模型水路は、取水口形状が非対称であるため、流入する流れが右岸から左岸に流れている。右岸に比べ左岸の旋回流が大きい。

ケース1の取水渦ありの鉛直断面のPTV計測結果を図-10(a)に示す。逆三角形の止水領域と主流部の境界に大きな変動が生じている。取水路底板付近の剥離領域が減少している。主流部の中に流速の小さいところが見られる。これは、レーザーシートに対して垂直に流れる取水渦を捉えているものと思われる。次に水平断面の結果を図-10(b)に示す。複数の旋回流が一箇所に集まり、取水渦を形成している。取水路終端に衝突し、左右方向に分かれた旋回流は発達していない。

取水渦の発生なしと発生ありを比較した場合、特に、取水路終端表層に形成される逆三角形の止水領域の乱れの程度が大きく異なる。この領域の乱れの程度が取水渦の発生に関係していると思われる。

b) ケース1とケース2, ケース3の流況比較

ケース2に関しては、取水渦の発生頻度が最も少なか

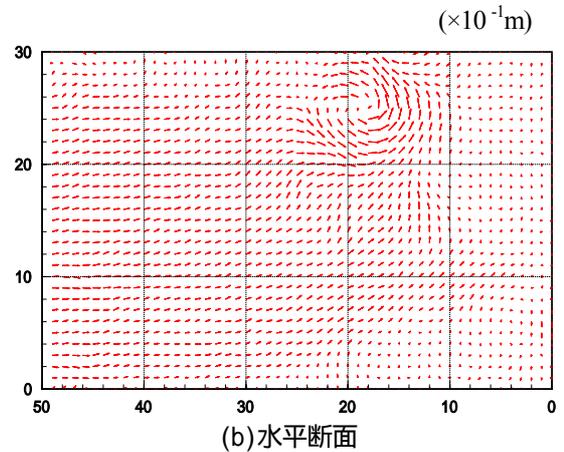
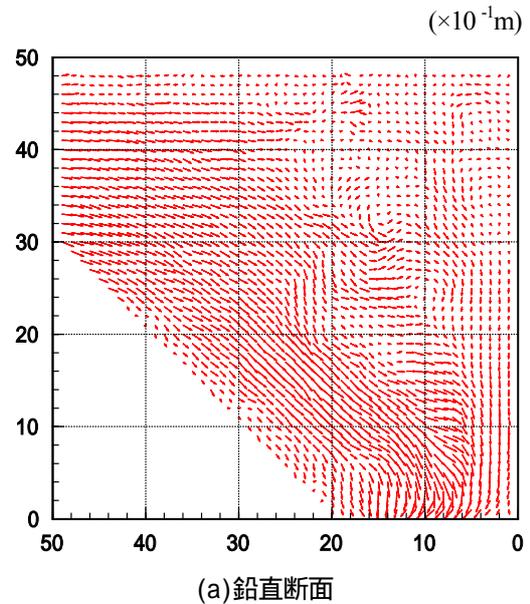


図-10 ケース1 (取水渦あり) のPTV計測結果

ったケース2-3のみについて述べる。ケース2-3 (傾斜角度 $\theta=45^\circ$) の鉛直断面のPTV計測結果を図-11(a)に示す。取水路底板付近での剥離は見られない。取水路形状に沿った流れとなっている。次に水平断面の結果を図-11(b)に示す。右岸から左岸に向かう流れが取水路終端壁に衝突し、左岸側に流れている。

ケース3の鉛直断面のPTV計測結果を図-12(a)に示す。表層の流れが取水渦防止桁で阻害されている。取水渦防止桁から下流で、流速が大きく低減している。取水路終端表層付近の逆三角形の止水領域は、取水渦防止桁を設置した全域に広がり、安定している。取水路終端壁を $\theta=45^\circ$ に傾斜させたケース2-3と同様な流れとなっている。取水路底板付近の剥離領域は小さい。次に水平断面の結果を図-12(b)に示す。取水渦防止桁に衝突した流れが左岸側に流れている。

4. まとめ

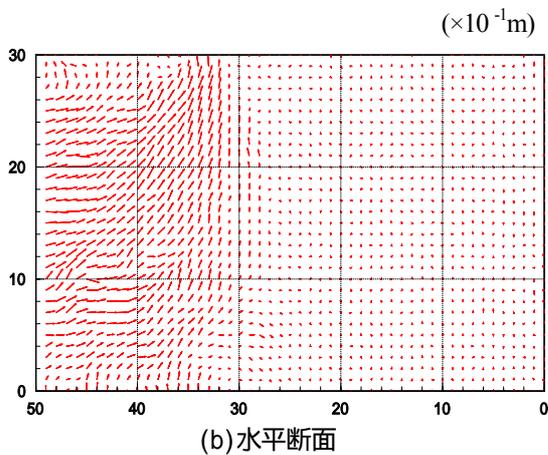
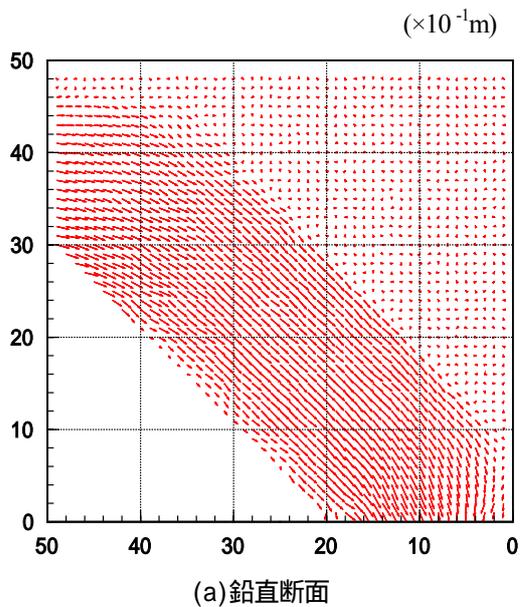


図-11 ケース2-3 (傾斜角度 $\theta=45^\circ$)
のPTV計測結果

以下に、本研究で得られた知見を示す。

- (1) 鉛直断面において、取水路終端表層の逆三角形の止水領域では、原設計の場合、旋回流が顕著に見られる。しかし、取水路終端壁を $\theta=45^\circ$ に傾斜した場合、および取水渦防止柵を設置した場合では、旋回流が見られない。
- (2) 水平断面において、取水路終端に衝突した流れは、原設計の場合、左右方向に分かれて旋回流を形成している。しかし、他のケースではほとんど見られない。
- (3) 取水路終端壁を $\theta=45^\circ$ に傾斜した場合、および取水渦防止柵を設置した場合は、同様な流れ場となっている。また、取水渦を抑制する効果はほぼ同じである。

以上の結果より、取水渦の発生には、取水路終端表層に形成される逆三角形の止水領域の流動が、大きく寄与していることがわかった。また、水面近傍に複数の柵を

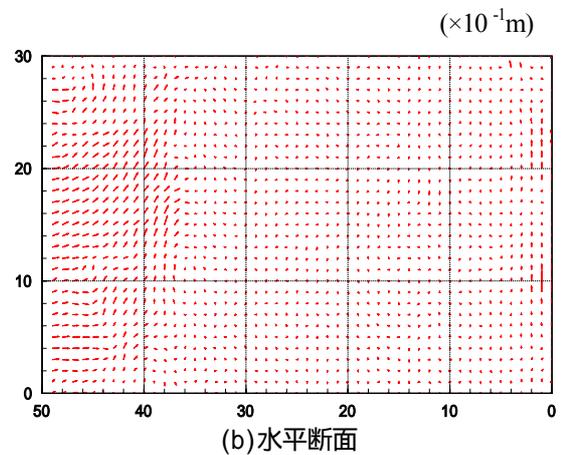
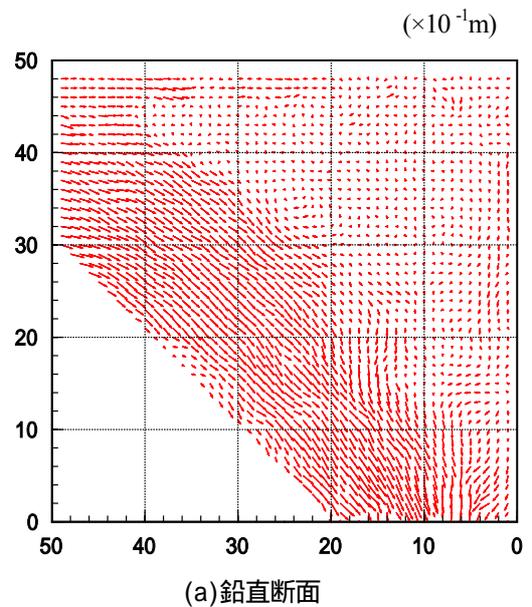


図-12 ケース3のPTV計測結果

設置する取水渦対策工は、取水路終端表層に形成される逆三角形の止水領域全体の流動を安定化させ、取水渦の発生を抑制していることがわかった。

参考文献

- 1) 通商産業省資源エネルギー庁公益事業部発電課編：発電用水力設備の技術基準と官庁手続き 電気事業法関係附属法令の解説，1965.
- 2) Perry L.Jhonson, Hydro-Power Intake Design Consideration, J.Hydr.Eng., vol.114, No.6, 1998.
- 3) 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.
- 4) 日本機学会基準：ポンプの吸込水槽の模型試験法，1984.
- 5) 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.

(2005.9.30受付)