

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820043

研究課題名(和文)水車導水部における自由表面流れの不安定性制御

研究課題名(英文) Suppression of standing waves on water surface through a water guide for a hydraulic turbine

研究代表者

飯尾 昭一郎 (IIO, Shouichiro)

信州大学・学術研究院工学系・准教授

研究者番号：80377647

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：凸面上を流下する水流の自由表面において、そのスパン方向に周期性を有する定在波が生じる。ハイスピードカメラとレーザーシートを用いて水流断面を観察した結果、この定在波は局所的な水流厚みの増減をともなっており、その振幅は水流速度と凸面部の曲率半径で整理できることがわかった。同様の流れ場となる滝用水車の導水部においてはランナに対する水流作用位置が好適域からずれ、水車性能が低下する。この傾向は流量が大きな条件ほど顕著であった。定在波の抑制方法として、導水部の曲面部に正接する平板角度を従来の鉛直方向(90度)から80度とすることで定在波の抑制と水車性能の向上が確認された。

研究成果の概要(英文)：Standing waves generate along the streamwise direction on the surface of water flow through the convex channel. It was revealed that each waves have regularity in the spanwise direction of the channel, and its amplitude strongly depends on the water velocity and the curvature of the channel. The flow pattern is also occurred on the water guide for a waterfall type hydraulic turbine. In case of the turbine, the wave degrades the turbine performance due to shift from the optimum water impinging position to the runner. The setting angle of the straight part which is connected tangentially to the curved channel was investigated. As a result, higher performance is obtained for lower angle. The performance improvement effect is much remarkable for larger flow rate condition.

研究分野：流体工学

キーワード：液膜流 遠心力不安定 レイノルズ数 ゲルトラー数 水車性能 定在波

1. 研究開始当初の背景

開放型貫流水車のランナの導水路に、水流落下位置制御のために曲面流路が用いられている。実用的な観点から、幅広い流量範囲においても落差工からの滝状流れの落下位置を固定できること、および小水力発電で問題となっている塵芥除去が不要となることなどそのメリットは大きい。その一方で、大流量条件においては、曲面流路に沿って流下する水流の自由表面に流れ方向に筋をなす定在波が曲面流路の曲率開始部から成長をはじめ、水流の落下にともない成長する現象が観察されている。従来の研究において、水平円柱表面に沿って流れる液膜流で同様の現象が観察され、その詳細が調べられているものの、本研究が対象とする落下水流のレイノルズ数およびウェーバ数領域からは大きく外れており、従来の研究成果では解釈できない。

導水路曲面流路に沿う水流に生じる定在波について、その山部はランナへの水流の最適衝突位置よりもランナ回転軸に近い位置に衝突するため、水車性能の悪化を招くことが問題となっている。この定在波の発生機構の解明と抑制の実現の意義は、学術的にも実用的にも大きい。

2. 研究の目的

開放型貫流水車の導水路に適用する曲面流路を対象として、そこを流下する水流の自由表面に生じる定在波の発生機構の解明と抑制を本研究の目的とした。

3. 研究の方法

実験装置の概要を図1に示す。ピットの水をその上部に設けた開放水路(図2)へとポンプアップし、水路一端から流下させ、ランナに作用したのちにピットへと戻る循環式とした。流量はポンプ回転数と手動弁により制御し、電磁流量計により監視した。

曲面流路と測定部の概要を図3に示す。曲面流路は開放水路端から始まる四分円を図のように設置し、四分円の先に平板を正接する構造とした。曲面流路は流路両脇からの空気の流入による流れのはく離を抑制するために高さ50mmの端板を設けた。ランナは開放型貫流ランナとし、その回転軸にトルク計とブレーキを直結する構造とした。ランナの水車効率と周速比は式(1)と式(2)でそれぞれ定義した。水車の出力は、回転軸に作用するトルクと回転軸の回転数を測定することで算出した。

$$\eta = \frac{p}{\left\{ \rho g Q (H_T + h_o) + \frac{\rho Q V_0^2}{2} \right\}} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{u_t}{V_F} \quad (2)$$

曲面流路上の流れ場は、自由表面形状の可

視化、全圧管およびLDVによる流速測定により評価した。可視化にはハイスピードカメラとレーザシート光を用いた。任意の水流断面位置にレーザシート光を照射し、その垂直方向からカメラで撮影した。背景の影響を除去するために、水に蛍光色素(ローダミンB)を混入し、その蛍光をレンズに設けたバンドパスフィルタを介して撮影する方法を採用した。撮影した画像は、グレースケール画像であり、それをPC上で二値化、輪郭抽出をすることで水流自由表面の形状を計測した。LDV計測時は、粒径4μmのナイロンパウダをシーディング粒子として使用した。

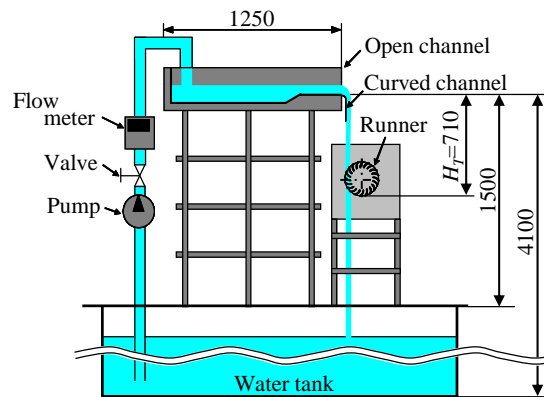


図1 実験装置概要

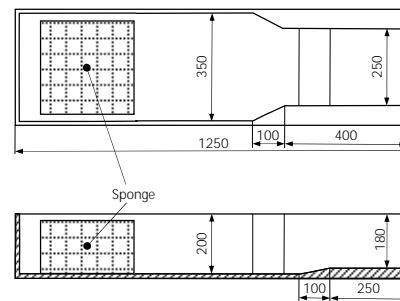


図2 開水路形状

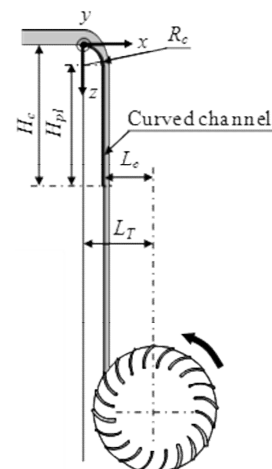


図3 測定部

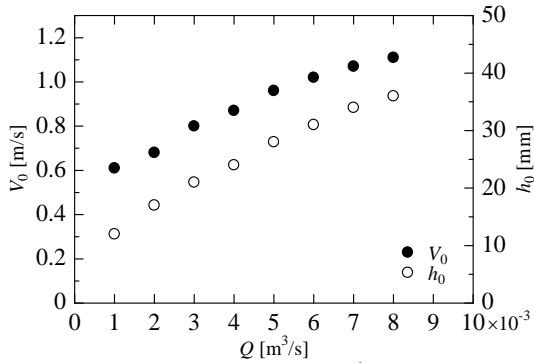


図4 流量と水流速度および水深との関係

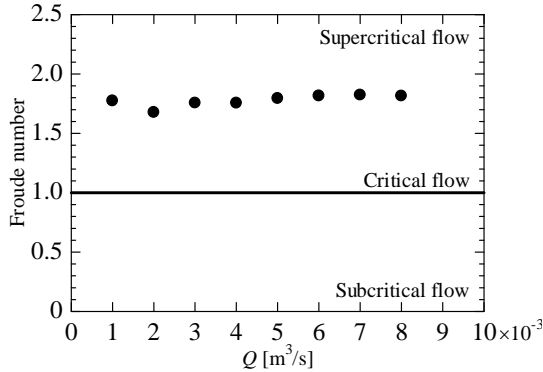


図5 流量とフルード数との関係

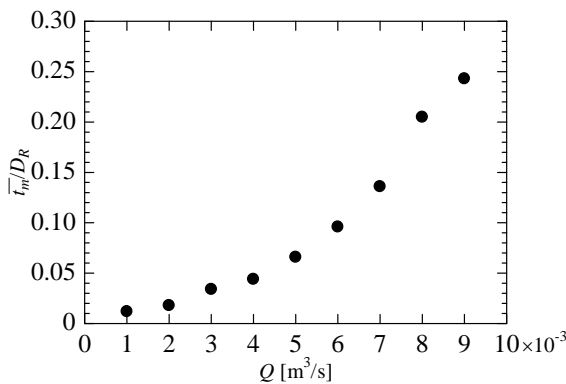


図6 流量と水流平均厚みとの関係

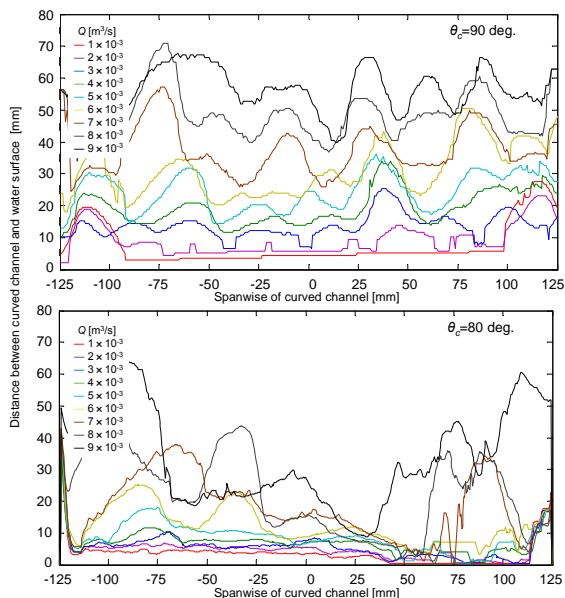


図7 流路スパン方向の自由表面形状分布

4. 研究成果

図4に開水路端における水流速度および水深の測定結果を示す。流量 Q の増加とともに、水流速度 v_0 、水深 h_0 ともに右肩上がりに増加する様子がわかる。両者の値にもとづき算出したフルード数と流量との関係を図5に示す。すべての流量条件において、開水路端(曲面流路開始位置)でのフルード数が1を上回っていることから、水流が射流状態にあることがわかる。したがって、この位置より下流側の水流状況は上流側に影響しない。

以上の水流条件のもとで、水流断面の可視化画像から算出した平均水流厚みと流量との関係を図6に示す。グラフの縦軸はランナ直径 D_r で無次元化している。両者は二次関数的に変化しており、流量増加率に対して水流厚みの増加率が極めて大きいことがわかる。先行研究において、落下水流の最適な厚みはランナ直径の5%前後となっており、流量増加による水流厚みの極端な増加は効率を大きく低下させる。この水流厚みの増加には水流自由表面に生じる定在波の成長が大きく影響していることが可視化画像から明らかになった。

この定在波の形成状況を目視で観察したところ、曲面流路の四分円部で流路周方向に定在波が成長しており、その成長率は下流になるほど大きい様子が確認された。これは、水流が四分円部を流下する際に作用する遠心力と重力が密接に関わっていると考えられる。つまり、流量増加にともなう水流速度の増加によって水流へ作用する遠心力が増大するとともに、四分円部下流になるほど水流を流路表面に抑えつけようとする重力の作用が減少する。そこで、四部分部下流に直接する平板角度を従来の鉛直($\theta = 90 \text{ deg.}$)から、重力による定在波抑制作用が大きくなると思われる $\theta = 80 \text{ deg.}$ に変更した。それぞれの角度条件における水流自由表面の形状を図7に示す。 $\theta = 90 \text{ deg.}$ では流量増大にともなって定在波が成長している様子が顕著に見られるのに対して、 $\theta = 80 \text{ deg.}$ ではすべての流量条件において定在波の成長が抑制できていることがわかる。この結果から定在

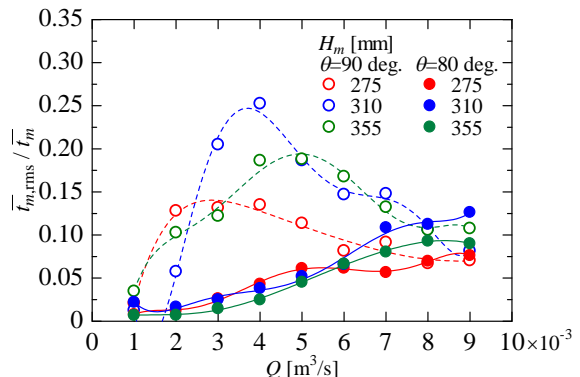


図8 平板設置角度による水流厚み変動と流量との関係比較

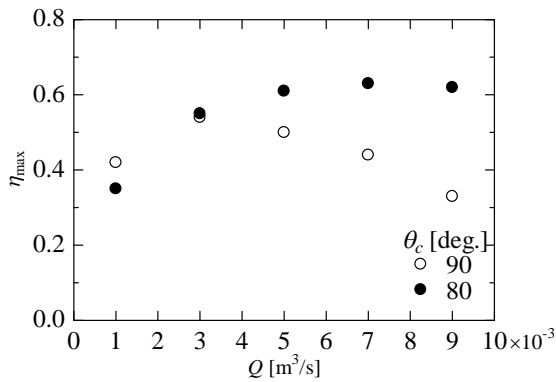


図9 平板角度と最大水車効率との関係

波の抑制には重力の作用を増大することが効果的だと言える。

図8に平板設置角度を変化させたときの流路スパン方向水流厚み分布の平均値の時間変動の大きさと流量との関係を示す。

$\alpha=90\text{deg.}$ では水流厚みの変動が極めて大きいが、 $\alpha=80\text{deg.}$ では大幅に減少している。

図9に平板角度と最大水車効率との関係を示す。平板角度が $\alpha=80\text{deg.}$ では流量が $Q=3 \times 10^{-3} m^3/s$ 以上の条件において最大水車効率が $\alpha=90\text{deg.}$ の場合を上回っている。これは $\alpha=80\text{deg.}$ とすることで水流自由表面の変動が抑制され、水車ランナへの水流の衝突位置が好適範囲に入るためだと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6件)

Yusuke Katayama, Shouichiro Iio, Salisa Veerapun, Tomomi Uchiyama, Toshihiko Ikeda, Investigation of blade angle of an open cross-flow runner, International Journal of Turbo and Jet-Engines, 査読有, 32(1), 65-72, 2015

Tomomi Uchiyama, Shou Uehara, Haruki Fukuhara, Shouichiro Iio and Toshihiko Ikeda, Numerical study on the flow and performance of an open cross-flow mini-hydraulic turbine, Journal of Power and Energy, 査読有, 229(8), 968-977, 2015

Yusuke Katayama, Shouichiro Iio, Kaika Kimoto, Salisa Veerapun, Open-type cross-flow turbine with curved channel (Effect of channel angle on water surface stability), International Review of Aerospace Engineering, 査読有, 7(6), 187-191, 2014

Yusuke Katayama, Shouichiro Iio,

Tomomi Uchiyama, Toshihiko Ikeda, Effect of flow condition on undershot water wheel performance, International Review of Mechanical Engineering Journal, 査読有, 8(6), 1005-1011, 2014
DOI:http://dx.doi.org/10.15866/ireme.v8i6.4707

Yusuke Katayama, Shouichiro Iio, Salisa Veerapun, Effect of runner position on performance for open type cross-flow turbine utilizing waterfalls, International Review of Mechanical Engineering Journal, 査読有, 8(6), 1012-1016, 2014

Tomomi Uchiyama, Shou Uehara, Shouichiro Iio, Toshihiko Ikeda, Yukio Ide, Numerical simulation of water flow through nano-hydraulic turbine driven by rapid and shallow stream, Journal of Energy and Power Engineering, 査読有, 8, 1663-1672, 2014

〔学会発表〕(計 9件)

Y. Katayama, S. Iio, S. Veerapun, T. Uchiyama, Study on open type cross-flow turbine utilizing small waterfalls (Influence of relative position between dropping water flow and a runner), Proc. Int. Sympo. EcoTopia Science 2015, 2015.11.28, Nagoya University

Yusuke Katayama, Shouichiro Iio, Tomomi Uchiyama, Salisa Veerapun, Study of open type cross-flow turbine (Influence of drop position and thickness of water), Proc. The 13th Asian International Conference on Fluid Machinery, AICFM13, 2015.9.10, Waseda University.

藤代凌兵, 飯尾昭一郎, 片山雄介, 木本海花, 滝用水車の導水部に関する検討, ターボ機械協会第73回総会講演会, 2015.5.8, 東京大学生産技術研究所

片山雄介, 飯尾昭一郎, 水流の厚みと落下位置の違いが開放型貫流水車の性能に与える影響, ターボ機械協会第73回総会講演会, 2015.5.8, 東京大学生産技術研究所

木本海花, 片山雄介, 飯尾昭一郎, 凸面に沿って流下する水流の不安定性, 第92期 日本機械学会流体工学部門講演会,

2014.10.26, 富山大学

片山雄介, 飯尾昭一郎, 開放型貫流水車に関する研究(ブレード入口角度と出力特性の関係), 第72回タ-ボ機械協会大分講演会, 2014.10.3, 大分高専

Yusuke Katayama, Nobuhiro Hayashi, Shouichiro Iio, Toshihiko Ikeda, Influence of inlet condition on undershot type cross-flow turbine, Grand Renewable Energy 2014, 2014.7.31, 東京ビッグサイト

Kaika Kimoto, Yusuke Katayama, Shouichiro Iio, Toshihiko Ikeda, Effect of flow direction control with curved for waterfall type turbine, Grand Renewable Energy 2014, 2014.7.31, 東京ビッグサイト

片山雄介, 木本海花, 飯尾昭一郎, 開放型貫流水車に関する研究(曲面状流路を用いた水流変動の抑制効果), タ-ボ機械協会 第71回 総会講演会, 2014.5.9, 東京大学生産技術研究所

〔その他〕

ホームページ等

研究代表者情報

<http://www.kankyo.shinshu-u.ac.jp/~iiolab/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

飯尾 昭一郎 (IIO, Shouichiro)

信州大学・学術研究院工学系・准教授

研究者番号: 80377647