

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 28 日現在

機関番号：16101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760138

研究課題名(和文)高性能化と安定運転を両立する小型ハイドロタービンの研究開発

研究課題名(英文) Research and Development of Small Hydro-Turbine Achieving High Performance and Stable Operation

研究代表者

重光 亨 (Shigemitsu, Toru)

徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究部・准教授

研究者番号：00432766

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：再生可能エネルギーの中で小水力は、新エネルギー分野として位置づけられており、ピコ水力などの小型ハイドロタービンが注目されている。しかし、小型ハイドロタービンは大型の水車と比較し効率が低く、農業用水や小規模な河川などで利用されるため、異物を含む条件下における水車内の流動現象の解明やその流れ場に適合した高性能かつ異物通過性の良好な小型ハイドロタービンの確立が求められている。そこで、本研究では小型ハイドロタービンの高性能化と安定運転の両立を目的に、小型ハイドロタービンに高性能化が期待できる二重反転形羽根車を採用した。そして、その性能特性および内部流れを明らかにし、羽根車設計指針について検討を行った。

研究成果の概要(英文)：Small hydropower generation is one of important alternative energy, and potential of small hydropower is great. Efficiency of small hydro turbines is lower than that of large one, and these small hydro turbine's common problems are out of operation by foreign materials. Then, there are demands for small hydro turbines to keep high performance and wide flow passage. Therefore, we adopted contra-rotating rotors, which can be expected to achieve high performance and enable to use low-solidity rotors with wide flow passage, in order to accomplish high performance and stable operation. In this research, experimental apparatus of the contra-rotating small hydro turbine with 60mm casing diameter was manufactured. Then, performance and internal flow condition with the foreign vegetable materials were investigated by an experiment. Further, a design guide line for the contra-rotating small hydro-turbine was considered by the experimental and numerical analysis results.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：ピコ水力 小型ハイドロタービン 二重反転形羽根車 低ソリディティ 植物性異物 安定運転

### 1. 研究開始当初の背景

小水力発電は新エネルギーとして位置付けられており、その賦存エネルギー量は極めて大きい。小水力発電の中でも出力が100kW-1000kW程度の比較的大規模な設備は、採算性が良いため、普及しているが水車を設置する土台や導水管など自然環境への負荷も大きい。一方、農業用水や小規模な河川などでは、ピコ水力と呼ばれる100W-1kW程度の発電が可能な箇所が多数存在し、環境への負荷が小さい水車に対する期待も大きい。そのため、農業用水や小規模河川での低落差の仕様に適合したダリウス形水車やジャイロ形水車が検討され、その性能特性や設計パラメータの最適値に関する検討が実施されている。一方、環境調和型ピコ水力として、滝流を利用した小型クロスフロー水車や低コスト化を実現するサボニウス水車などが考案されており、その最適設置位置や遮へい板の設置による性能改善効果なども明らかとなってきている。しかし、これら小規模な水車では、大型の水車と比較し効率が低く、異物混入により運転不能に陥ることがあることが共通の課題となっている。

本研究では小型ハイドロタービンの高性能化と安定運転の両立を目的に、小型ハイドロタービンに高性能化が期待できる二重反転形羽根車を採用した。二重反転形羽根車を使用した水車については、相反転方式水力発電の性能特性やポテンシャル干渉、ソリディティの最適値などが明らかとなっており、水車のみならず潮流発電への適用なども試みられている。しかし、本研究が対象とする水車は直径60mmと非常に小さく相反転方式発電機を構成することは非常に困難であるものと考えられる。そのため、ここでは二つの羽根車に加わるエネルギーを独立した二つの発電機で回収する二重反転形水車を適用した。

### 2. 研究の目的

小型ハイドロタービンにはサボニウス水車やクロスフロー水車が適用されているが、直径100mm前後の小型のハイドロタービンに関しては、効率50%を超えた研究成果は得られていない。本研究で提案する二重反転形羽根車は水車直径の小型化に有効(環境負荷低減に効果的)であるが、小型ハイドロタービンに適用した際の性能上の有用性は検証されていない。また、二重反転形小型ハイドロタービンに低ソリディティ羽根車を採用した際の異物通過性の改善効果も確認されていない。小型ハイドロタービンでは異物混入などにより継続運転が不可能となることが多々あり、メンテナンスの頻度も小水力発電と比較しても高くその内部流動の解明が求められている。しかし、ピコ水力などに利用される小型ハイドロタービンにおいては内部流れに関するデータも少なく、異物混入

時における流動現象に関する報告は皆無に等しい。小型ハイドロタービンにおける流動現象は運転不能状態に密接に関わっているものと考えられているが、その詳細は明らかとなっていないのが現状である。そこで、本研究では小型ハイドロタービンの更なる高性能化と安定運転の実現を目的に以下の重要研究課題を研究期間内に明らかにする。

#### 【小型ハイドロタービンの重要研究課題】

- (1) 小型ハイドロタービンへ二重反転形羽根車を活用した際の性能上の有効性の検証。(環境負荷の小さな直径100mm程度の小型ハイドロタービンにおいては、50%を超える効率は得られていないため、二重反転形の効果を活用し水車効率60%の実現を目指す。)
- (2) 小型ハイドロタービンに低ソリディティ羽根車を採用した際の異物通過性の改善効果の確認
- (3) 小型ハイドロタービンの流動現象の解明
- (4) 異物と運転不能状態との関連性の解明(運転不能状態を抑制するための流動状態の解明。)

### 3. 研究の方法

- (1) 小型ハイドロタービンへ二重反転形羽根車を活用した際の性能上の有効性の検証

本研究で提唱する小型ハイドロタービンはこれまでにない小規模な水力発電を対象としており、その性能特性および内部流れなどの基礎的なデータを取得することは学術的にも極めて重要である。ここでは、簡易水道や2インチ程度の配管を有する農業用水への設置を想定し、本供試小型ハイドロタービンの羽根車直径は58mmと非常に小型に設定する。また、簡易水道や配管が整備された農業用水において想定される入力( $L=10-100W$ )、落差( $H=1-4m$ )、流量( $Q=2-10l/s$ )を参考値として、任意の設計値を設定する(設計流量 $Q_d=4.8 l/s$ 、設計落差 $H_d=2.6m$ )。(図1に供試ハイドロタービンの羽根車を示す。)ハイドロタービンはサイズが小さくなる程、性能が低下するため小型でありながら高性能なハイドロタービンを確立する必要がある。そこで、数値流れ解析より解明した一段目と二段目羽根車間における翼列間内部流れに基づき設計を行った羽根車を使用し、二重反転形小型ハイドロタービンの出力特性およびトルク特性を実験的に調査し、二重反転形羽根車を活用した際の性能上の有効性について検証する。



図1 小型ハイドロタービンロータ

(2) 小型ハイドロタービンに低ソリディティ羽根車を採用した際の異物通過性の改善効果の確認

小型ハイドロタービンでは、異物による性能および安定運転への影響が極めて大きく、数年程度の耐用年数を実現しメンテナンス回数を最小限にするためには異物混入時の性能特性や異物通過性などに関する実験的調査が必要である。そこで、二重反転形小型ハイドロタービンに低ソリディティ羽根車を採用したロータを設計し、ソリディティの違いが異物通過性に及ぼす影響について実験的に調査する。ここでは、オリジナル（初期設計時）のロータと低ソリディティロータの二種類の羽根車を使用し、性能試験を実施する試験装置において異物を流入させ、その通過性を実験により明らかにする。

(3) 小型ハイドロタービンの内部流動現象の解明

小型ハイドロタービンの高性能化および安定運転には、ロータおよびケーシングを通過する異物を含む流体の流動現象を明らかにする必要がある。そこで、高速度カメラを使用し、異物通過時における羽根車内部の可視化実験を実施し、その内部流れを明らかにする。可視化実験では高速度カメラ Phantom V310 を使用し、試験部上流より異物を流入させた際の試験部での内部流れを調査する。高速度カメラの撮影速度は 5273fps であり、試験部に異物が流入している 2 秒間撮影を行う。また、数値解析によりハイドロタービンの内部流れを明らかにし、液体を主とした内部流動状態から小型ハイドロタービンの安定運転に向けた指針を検討する。数値解析には、汎用数値解析コードである CFX13 を使用し 3 次元非定常解析を行う。非定常解析における Time step は  $\Delta t = 2.174 \times 10^{-4}$  s に設定しており、120 step が羽根車 1 回転に対応する。非定常解析では羽根車 5 回転後の 1 回転分のデータを使用し各種データを算出している。計算流量は  $0.9Q_d \sim 2.0Q_d$  までの 10 流量点であり、広い流量範囲における内部流れを調査する。

(4) 異物と運転不能状態との関連性の解明

運転不能状態は、実際の小型ハイドロタービン設置環境下における流動現象と密接に関連性がある。そこで、実際の設置環境を想定した高精度な流量調整および流量変動を再現する実験装置の構築を行う。その上で、可視化実験および数値解析より明らかとなった流動現象と運転不能状態との関連性について考察を行い、良好な異物通過性を実現する流動状態と羽根車形状について検討を行う。また、運転不能状態を引き起こす流動状態に関する可視化実験結果に基づく運転不能予測法の構築を行う。

#### 4. 研究成果

(1) 小型ハイドロタービンへ二重反転形羽

根車を活用した際の性能上の有効性の検証

環境負荷の小さな直径 100mm 程度の小型ハイドロタービン（サボニウス水車やクロスフロー水車など）においては、50%を超える効率は得られていないため、二重反転形羽根車の効果を活用し水車効率 60% を目標と設定した。ケーシング直径 60mm と非常にコンパクトな小型ハイドロタービン用実験装置を設計・製作し、その性能特性を調査した。図 2 に実験および数値解析より得られた性能曲線を示す。図の横軸は流量、第一縦軸は落差、効率、第二縦軸には出力を示す。前段および後段羽根車の回転速度は設計回転速度  $N_f = N_r = 2300 \text{ min}^{-1}$  に固定している。実験における最大流量は実験装置の制約により  $1.4Q_d$  である。図より、数値解析結果は実験結果の定性的傾向を捉えており、定量的にも実験値とほぼ近い結果が得られていることがわかる。そのため、実験的には計測できない過大流量側での性能特性については、数値解析結果から議論を行う。本供試小型ハイドロタービンの最高効率は  $1.1Q_d \sim 1.2Q_d$  において  $\eta_{max} = 59\%$  であり、ケーシング直径 60mm と非常にコンパクトな小型ハイドロタービンとしては比較的高い効率が得られた。また、 $0.95Q_d \sim 1.8Q_d$  までの広い流量範囲において、本供試小型ハイドロタービンは 50% 以上の効率を実現できた。一方、スポークによる損失により効率が 10% 弱低下していることが明らかとなり、スポーク形状の改善によりさらなる効率改善（60% 以上の効率）が可能であることがわかった。

(2) 小型ハイドロタービンに低ソリディティ羽根車を採用した際の異物通過性の改善効果の確認

小型ハイドロタービンの異物通過性を実験的に調査した。異物の中でハードルの高い植物性異物を使用した実験では、翼間ピッチ距離を長くした低ソリディティ羽根車を使用することで植物性異物の通過率が 15% 程度改善することがわかった。また、植物性異物は羽根車前縁周辺に付着し、植物性異物の

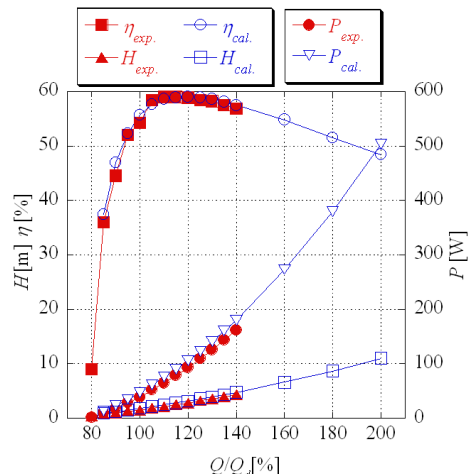
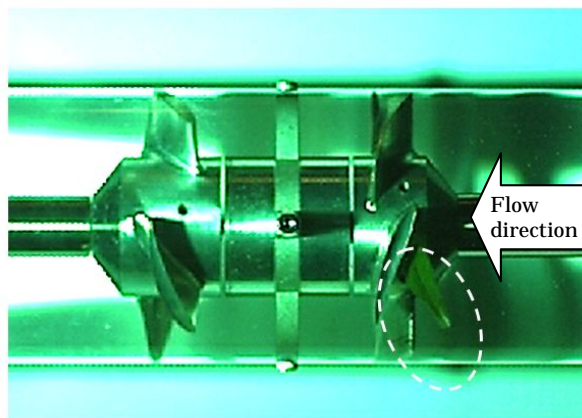


図 2 小型ハイドロタービンの性能特性 ( $0.95Q_d \sim 1.8Q_d$  の広い流量範囲において効率  $\eta$  は 50% 以上)

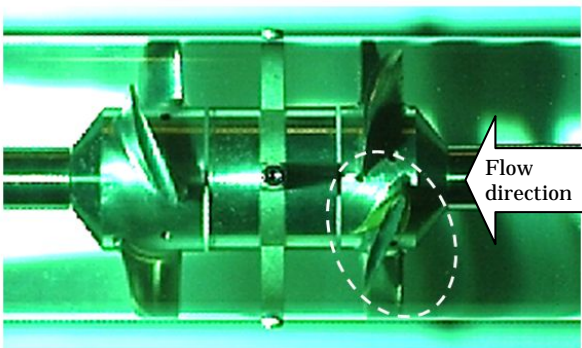
付着により性能は急低下することが確認された。そのため、羽根車前縁と植物性異物の接触を最大限に抑制する羽根車設計が重要であることが明らかとなった。異物通過試験より低ソリディティ羽根車を使用する有効性を確認すると共に、異物通過性のさらなる改善に向けた設計指針を明らかにすることができた。

### (3) 小型ハイドロタービンの内部流動現象の解明

小型ハイドロタービンの高性能化および安定運転には、ロータおよびケーシングを通過する異物を含む流体の流動現象を明らかにする必要がある。そこで、異物の中でハードルの高い植物性異物を使用した可視化実験を実施した。設計流量点において前段羽根車前縁に植物性異物が付着する前後の可視化実験結果を図3に示す。図3(a),(b)はそれぞれ植物性異物が前段羽根車前縁に付着する直前、付着した直後の可視化画像である。可視化実験より植物性異物の中央部付近が前段羽根車前縁に接触し、その後、羽根車前縁周辺に付着していることがわかった。また、後段羽根車においても、羽根車前縁において植物性異物が付着する傾向は類似していた。一方、羽根を通り抜ける植物性異物は羽根間を通過しており、ピッチの大きさが異物通過性能を左右する重要なパラメータであるこ



(a) 前段羽根車付着前



(b) 前段羽根車付着後

図3 可視化実験結果

とがわかった。そのため、羽根枚数を減少させピッチを大きくすることにより、異物通過性能が改善できるものと考えられるが、その際はピッチの増加に伴う性能低下への配慮が必要である。

小型ハイドロタービンは広い流量範囲において運転される可能性がある。そこで、数値解析により広い流量範囲における内部流れを調査した。図4に無次元半径  $r/r_c=0.74$ 、部分流量  $0.9Q_d$  における前・後段羽根車における羽根周りの速度ベクトル図を示す。部分流量  $0.9Q_d$  では前段羽根車の流入状態は良好であることが確認できるが、スポーク下流では大きな後流が発生し、その影響は後段羽根車入口流れにまで及んでいる。図5に無次元半径  $r/r_c=0.74$ 、流量  $0.9Q_d$  における前・後段羽根車における羽根周りの静圧分布を示す。前段および後段羽根車とも前縁負圧面側によどみ点が存在し、前縁圧力面側には低圧域が確認でき、スポーク上流のよどみ点での高圧域と前段羽根車の圧力場との干渉、スポーク下流での離れによる低圧域と後段羽根車の圧力場との干渉が発生した。スポーク上流・下流における流れ場と羽根車周りの流れ場との干渉は高流量域でも確認できたため、広い流量範囲における安定運転を実現する上で、スポーク形状の改良が重要であることがわかった。

### (4) 異物と運転不能状態との関連性の解明

小型ハイドロタービンの実際の設置環境下では流量が変化する。そこで、設置環境を想定し高精度な流量調整を再現できる実験装置の構築を行い、流量変化時における本供試ハイドロタービンの性能特性を調査した。図6に流量を直線的に $\pm 10\%$ 増減させた際の静落差、出力特性を示す。一周期10s程度で流量を直線的に変化させた場合は、流量の増減に追従する形で静落差、出力が直線的に変

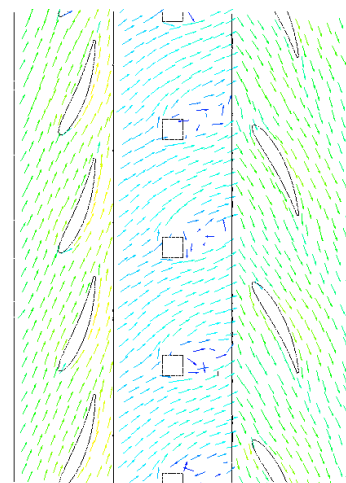
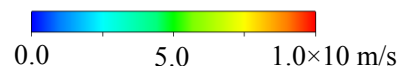


図4 速度ベクトル

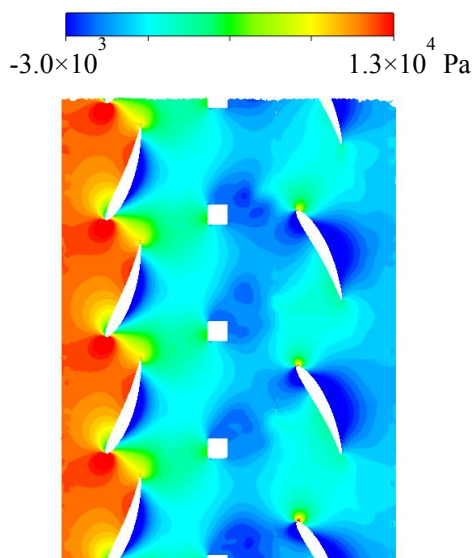


図5 圧力分布

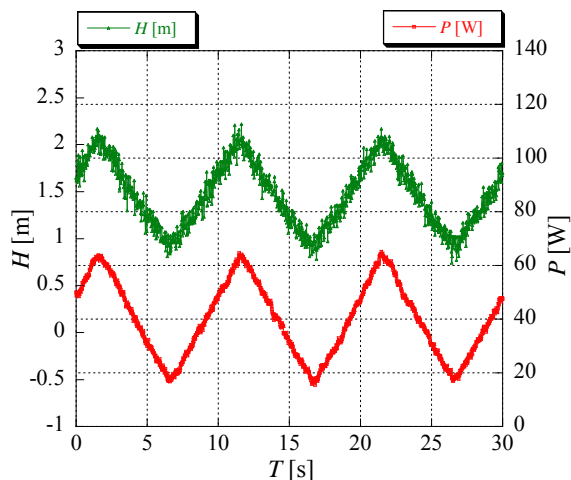


図6 流量変化時の性能変化

化することがわかり、流量変化に伴う発電量の予測も比較的容易に実施できることが確認できた。一方、異物による羽根間流れの閉塞が性能低下、運転不能状態と密接に関わることが内部流れの調査結果から明らかになったため、羽根ピッチを大きくした低ソリディティ羽根車の適用が異物通過性のさらなる改善に向け有効であることがわかった。また、異物の付着形態と性能および運転不能状態との関連性が明らかになったため、性能変化に着目した運転不能予測法を考案するに至った。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1件)

重光 亨, 福富 純一郎, 其畑 遼介, 二重反転形小型ハイドロタービンに関する研究, ターボ機械, Vol.41, No.2, pp.110-115, 2013年2月(査読有り),

(CiNii: 40019569522).

[学会発表](計 8件)

田中 地洋, 福富 純一郎, 重光 亨, 流量変化時における二重反転形小型ハイドロタービンの性能特性, 第91期 日本機械学会流体工学部門講演会, 九州大学(福岡県), 2013年11月9日.

Toru Shigemitsu, Junichiro Fukutomi, Chihiro Tanaka, Unsteady Flow Condition of Contra-Rotating Small-Sized Hydro Turbine, Proceedings of the 12th Asian International Conference on Fluid Machinery, Hotel Santika Premiere(Yogyakarta, Indonesia), 25<sup>th</sup> Sep 2013.

重光 亨, 田中 地洋, 福富 純一郎, 二重反転形小型ハイドロタービンの非設計流量点における内部流れ, ターボ機械協会信州講演会, 信州大学(長野県), 2013年9月13日.

田中 地洋, 福富 純一郎, 重光 亨, 二重反転形小型ハイドロタービンの性能および内部流れに関する研究, 日本機械学会2013年度年次大会, 岡山大学(岡山県), 2013年9月11日.

Toru Shigemitsu, Junichiro Fukutomi, Chihiro Tanaka, Performance and Internal Flow of Contra-Rotating Small Hydro Turbine, Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, Hyatt Regency Lake Tahoe(Nevada, USA), 9<sup>th</sup> July 2013.

重光 亨, 福富 純一郎, 田中 地洋, 其畑 遼介, 繊維状異物混入時における二重反転形小型ハイドロタービンの内部流れ, ターボ機械協会総会講演会, 東京大学(東京都), 2013年5月24日.

Ryosuke Sonohata, Junichiro Fukutomi, Toru Shigemitsu, Study on Contra-Rotating Small-Sized Axial Flow Hydro Turbine, Proceedings of 4th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science, Hanwha Resort(Busan, Korea), 16<sup>th</sup> Oct 2012.

重光 亨, 其畑 遼介, 福富 純一郎, 二重反転形小型ハイドロタービンに関する研究, ターボ機械協会総会講演会, 東京大学(東京都), 2012年5月25日.

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

重光 亨 (SHIGEMITSU TORU)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・准教授

研究者番号: 00432766

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし