

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04966

研究課題名（和文）ピコ水力発電のPTDRの飛躍的向上

研究課題名（英文）Dramatic improvement in PTDR of pico hydroelectric power generation

研究代表者

重光 亨（SHIGEMITSU, Toru）

徳島大学・大学院社会産業理工学研究部（理工学域）・准教授

研究者番号：00432766

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：ピコ水力発電を普及させる上で出力-水車直径比(PTDR)の飛躍的向上は必要不可欠である。本研究では、二重反転形羽根車の高流量域での性能特性に着目し、ピコ水力発電のPTDRの更なる向上を目指す。二重反転形小型ハイドロタービンの性能と内部流れの関連性を数値流れ解析により解明する。高流量域においても出力が漸増する特性を活かした羽根車を考案し、性能試験設備において、その効果検証を実施する。また、PTDRの向上に伴う振動や騒音の増加を抑制させるために、翼列間干渉を明らかにする。最終モデルについてはフィールド試験を実施し、二重反転形小型ハイドロタービンのPTDRの飛躍的向上と長期連続運転を可能にする。

研究成果の学術的意義や社会的意義

出力規模が1kW以下のピコ水力発電は、高性能化と低コスト化（小型化）が強く求められている。そこで、本研究では、出力と水車直径の比（Power Turbine-Diameter Ratio）に着目し、出力が大きく、水車直径が小さな水車を開発するために、二重反転形羽根車を採用した。二重反転形羽根車の高流量域における出力特性、高精度な数値流れ解析技術、小型タービン高効率設計法を活用し、直径49mmの水車において、世界最高のPTDR=12,492W/mを実現した。また、翼列間干渉などの内部流れを明らかにし、実証試験サイトにおいて2か月の長期連続運転を実現した。

研究成果の概要（英文）：In order to popularise pico-hydropower generation, it is essential to dramatically improve the power to turbine diameter ratio (PTDR). In this study, we focus on the performance characteristics of contra-rotating rotors in the high flow rate range and aim to further improve the PTDR of pico-hydropower generation. The relationship between performance and internal flow of a small contra-rotating hydroturbine will be investigated by numerical flow analysis. We will design a rotor that exploits the characteristic of gradually increasing power even in the high flow rate range, and verify its effectiveness in a performance test facility. In addition, to suppress the increase in vibration and noise due to improved PTDR, we will clarify the interference between blade rows. The final model, which will dramatically improve the PTDR of the small contra-rotating hydroturbine and enable long-term continuous operation, will be tested in the field.

研究分野：流体機械、再生可能エネルギー

キーワード：再生可能エネルギー 小水力 インライン水車 二重反転形羽根車 性能 CFD PTDR

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 水力発電の中で、出力規模が 1kW 以下のピコ水力発電の導入ポテンシャルは非常に大きいですが、1kW 規模の水車でも、水車直径は 300mm ~ 500mm と比較的大きい。そのため、水車を設置するための付帯設備が必要となり、高コストとなるため採算が取れていない。そこで、本研究では、出力と水車直径の比 (Power Turbine-Diameter Ratio: 本研究では PTDR と名付ける。図 1 参照) に着目し、出力が大きく、水車直径が小さな水車を開発するために、小型ハイドロタービンへの二重反転形羽根車 (図 1,2 参照、二段の羽根車が反転することで高出力を実現) の採用を考えた。

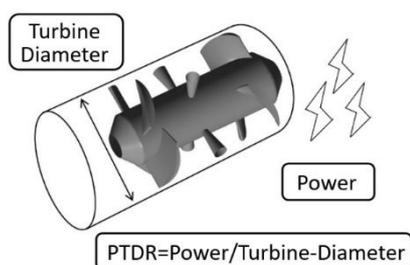


図 1 PTDR について

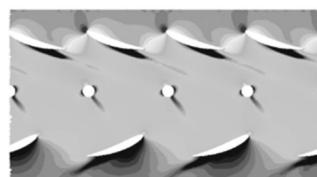


図 2 二重反転形羽根車の翼列間静圧分布

(2) 研究代表者は二重反転形小型ハイドロタービンに旋回流れを定量的に評価できる高精度な数値流れ解析技術と小型タービン高効率設計法を組み合わせることで、直径 200mm 以下の水車では世界最高の PTDR=1,707W/m を実現した (直径 58mm の水車において、最高効率 64.2%、出力 99W を達成)。また、その研究の中で二重反転形小型ハイドロタービンは、高流量域においても出力が漸増することを発見した (図 3 参照、 $Q/Q_d > 120\%$ の流量域においても出力は漸増)。

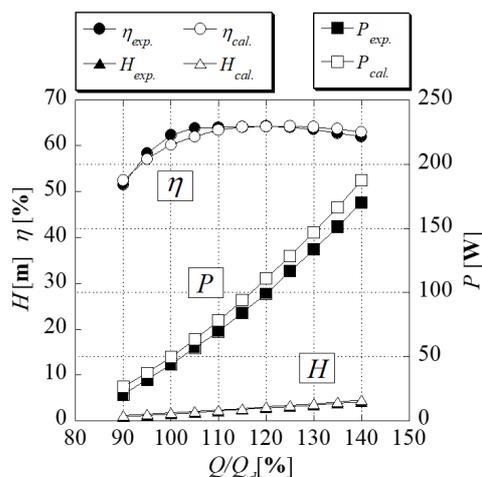


図 3 二重反転形小型ハイドロタービンの性能特性 (実験と数値流れ解析結果の比較。)

(3) この性能特性は、ピコ水力発電の PTDR の向上に大きく寄与する可能性があるため、「なぜ高流量域においても出力が増加したか？」その出力増加メカニズムを解明する必要がある。また、PTDR の向上に伴い二重反転形羽根車では、振動、騒音に関連する翼列間干渉が増加する可能性があるため、その内部流れに基づく翼列間干渉の発生メカニズムについても明らかにしなければならない。

2. 研究の目的

(1) 二重反転形小型ハイドロタービンが高流量域において、出力が漸増するメカニズムを解明し、出力のピーク流量点を明らかにする。さらに、高流量域において高出力になる二重反転形小型ハイドロタービンの性能特性を活かした新しい小型ハイドロタービンを設計・製作し、PTDR の飛躍的向上が実現できるか検証を行う。

(2) PTDR の向上に伴い翼列間干渉が増加する可能性があるため、翼列間干渉の発生メカニズムを明らかにする。その上で、圧力変動を抑制する最終モデルを確立し、二重反転形小型ハイドロタービンの PTDR の飛躍的向上と長期安定運転を実現する。

3. 研究の方法

(1) 高流量域における出力増加メカニズムの解明と出力ピーク流量の調査

二重反転形小型ハイドロタービンを使用し、設計流量の2倍、3倍の流量点において非定常数値流れ解析を実施する。数値流れ解析により、性能と内部流れとの関連性を明らかにすることで、高流量域における出力増加メカニズムを解明する。高流量域における出力および効率の変化など詳細な性能特性を調査し、出力ピーク流量を明らかにする。

(2) PTDRの向上と実験による効果検証

高流量時の出力増加メカニズムをもとに、PTDRを最大限増加させる二重反転形小型ハイドロタービンを新たに設計する。非定常数値流れ解析結果をもとに、各段の羽根車への流入状況、一段目と二段目羽根車の翼列間における内部流れを考慮した上で、最適な羽根車形状を確立する。最適な羽根車の外注を行い、実験装置を使用し、詳細な性能特性を明らかにする。

(3) 圧力変動の抑制と現地フィールドにおける実証試験

最適モデルにおける数値流れ解析結果をもとに、二重反転形羽根車に作用する翼列間干渉の発生メカニズムを解明する。その上で、PTDRを維持しつつ、翼列間干渉に伴う圧力変動を抑制する。圧力変動を抑制できる最終モデルの外注を行い、現地フィールドにおいて実証試験を実施する。

4. 研究成果

本研究では、二重反転形小型ハイドロタービンの性能特性、高精度な数値流れ解析技術、高性能設計技術を活用することで、直径49mmタービンの世界最高のPTDRを実現した。また、内部流れ調査結果をもとに、翼列間干渉の抑制を図り、フィールドにおいて2か月の連続運転を実現した。本研究により得られた成果は以下の通りである。

(1) 高流量域における性能特性の解明

二重反転形小型ハイドロタービンの数値流れ解析モデルの構築(図4参照)を行い、設計流量(Q_d)の1倍、2倍、3倍における定常解析(設計回転数に固定)を実施した。その結果、 $1.0Q_d$ では、出力51.69W、効率67.90%となり、 $2.0Q_d$ の流量では、出力546.03W、効率54.79%が得られ、 $2.0Q_d$ における効率の低下が非常に小さいため、出力は設計流量の10倍以上となった。また、 $3.0Q_d$ では、出力1512.84W、効率39.34%が得られ、設計流量の3倍の流量においても、効率は高水準なまま出力のピークも確認できなかった。

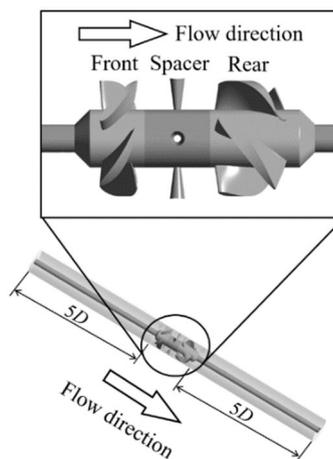


図4 数値流れ解析モデル (D50model)

(2) 出力ピーク流量の調査

流量を $6.0Q_d$ から $20Q_d$ まで段階的に増加させ数値流れ解析を実施したが、出力は減少することなく、増加し続ける結果となった(図5参照)。高流量域においても、ある程度の効率を維持でき、出力が増加し続けることは、PTDRの向上に直結するため、想定以上の出力の増加が期待できる。

(3) 高流量域における出力増加メカニズムの解明

出力のピークを確認できなかったが、内部流れと性能との関係性について明らかにするために、 $1.0Q_d$ 、 $2.0Q_d$ 、 $6.0Q_d$ における内部流れの調査を実施した(図6参照)。内部流れの調査結果から、 $1.0Q_d$ では、前段および後段羽根車とも羽根の入口角、出口角に沿って流入、流出していることが確認できた。流量の増加に伴い、前段羽根車入口での流れと入口角とのミスマッチが大きくなるが、前段羽根車の入口から出口まで羽根に沿った比較的良好な流れ場になっていることがわかった。一方、 $6.0Q_d$ では、特に後段羽根車入口での流れと入口角とのミスマッチが大きく

なった。しかし、後段羽根車翼間では、流れが急激に転向され、羽根に沿った流れとなった。この影響により、高流量域での効率低下が抑制され、高い出力を実現できたものと考えられる。

(4) PTDR の向上と実験による効果検証

高流量時の出力増加メカニズムをもとに、PTDR を最大限増加させる高ソリディティのタービンの設計を行った。回流試験装置の改良と実験装置の構築を実施し、連続試験下の漏水状況や電気トラブル発生の有無を確認した。直径 49mm の二重反転形小型ハイドロタービンの性能試験を実施し、数値流れ解析同様、流量の増加に伴い出力が大きく増加することを確認した。また、流量 9.86l/s において、直径 49mm の水車では世界最高の出力 516.6W が得られた (PTDR=10,543W/m, 図 7 参照)。これまでの基礎研究における 58mm のタービンでは、PTDR=1707W/m, 高流量条件下で PTDR=3000W/m を予想していたため、大幅な性能改善を実現できた。また、水車システムとしても、漏水、電気関係のトラブルもなく完成度の高い試験装置を構築できた。

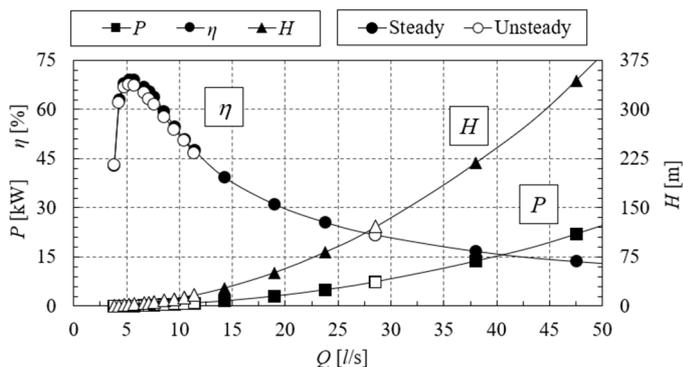


図 5 性能曲線 (D50model, Numerical analysis)

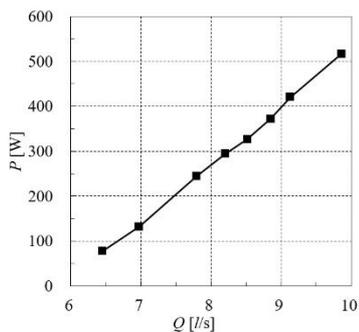


図 7 出力特性

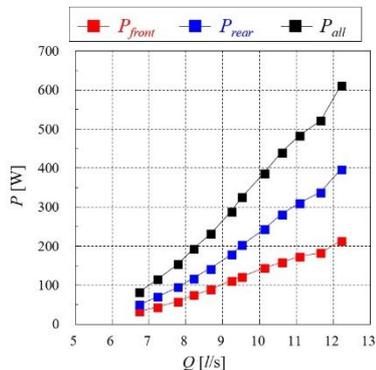
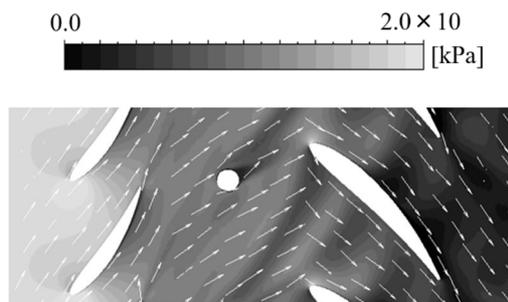
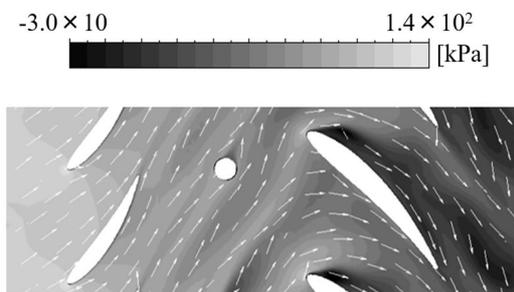


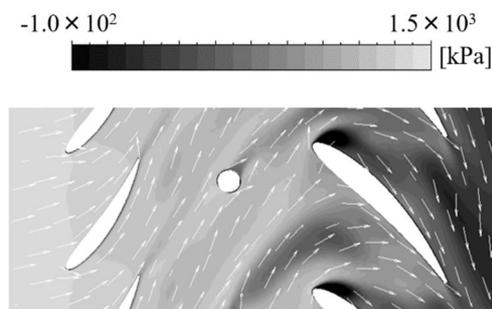
図 8 出力特性 (前段, 後段羽根車別の出力)



(a) $Q=4.75$ l/s($1.0Q_d$)



(b) $Q=9.5$ l/s($2.0Q_d$)



(c) $Q=28.5$ l/s($6.0Q_d$)

図 6 全圧及び速度ベクトル (D50model)

(5) 圧力変動の抑制と現地フィールドにおける実証試験

性能向上と圧力変動の抑制の両立を目指し、羽根枚数、翼型の好適化を図り、前段羽根車からの後流の挙動や後段羽根車前縁付近の圧力分布の影響を明らかにした。圧力変動を抑制できる最終モデルの外注を行い、実験室での性能試験を実施した結果、612.1W (PTDR=12,492W/m) の最高出力(図8参照)を実現した。さらに、実証試験装置(図9参照)を徳島県内のフィールド(図10参照)に設置し、2か月間の連続運転も実施し、振動、騒音も問題ないことを確認した。

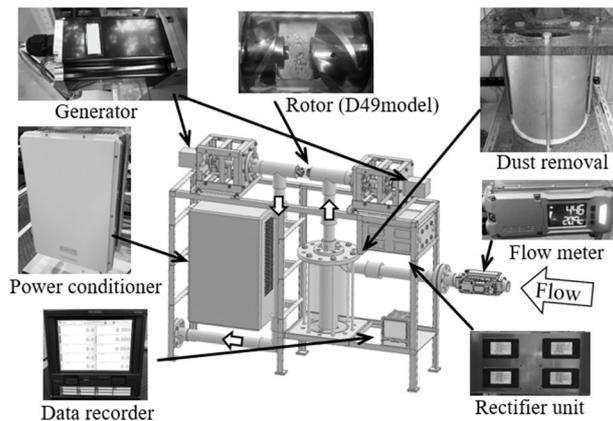


図9 フィールド試験装置



図10 フィールドに設置した実証試験装置

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 重光 亨, 平石 裕哉, 細谷 拓司	4. 巻 Vol. 52, No. 6
2. 論文標題 直径49mm二重反転形小型ハイドロタービンの研究開発	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 ターボ機械	6. 最初と最後の頁 344-354
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 重光 亨, 平石 裕哉, 細谷 拓司
2. 発表標題 直径49mm二重反転形小型ハイドロタービンの研究開発
3. 学会等名 ターボ機械協会第89回創立50周年記念学術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------