

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：16101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18017

研究課題名(和文) インライン式小型 hidroタービンの最高効率の実現

研究課題名(英文) Realization of the maximum efficiency of inline small hydroturbine

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) 3,000,000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 hidroタービンが注目されているが、低効率であることが大きな課題である。一方、数インチの管路式農業用水路や簡易水道などに直接設置できるインライン式小型 hidroタービンの実用化への要望も強い。

本研究では、インライン式小型 hidroタービンに二重反転形羽根車を採用し、その最高効率を実現する上で重要な軸方向圧力勾配に関するソリディティ、寸法効果、Re数に関する研究成果を得ると同時に高性能モデルを考案し、数値流れ解析において最高効率68%を実現した。

研究成果の概要(英文)：Small hydropower generation is categorized as new energy in renewable energy and small hydroturbine such as pico hydroturbine have been drawing attention, but having low efficiency is a big issue. On the other hand, there is also a strong demand for practical application of inline small hydroturbines that can be installed directly in several inch pipeline of agricultural canals and small scale water supply system.

In this study, we adopted a contra-rotating rotors for an inline small hydroturbine and obtained research results on solidity related to axial pressure gradient, scale effect and Re number, which is important for achieving the maximum efficiency. At the same time, a high performance model was devised, achieving the maximum efficiency of 68% in the numerical analysis.

研究分野：工学

キーワード：ピコ水力 小型 hidroタービン 二重反転形羽根車 ソリディティ 寸法効果 Re数

## 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。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、ダリウス形水車やジャイロタービンなど低落差での発電が可能なハイドロタービンに関する研究が国内外で実施されている。また、環境調和型ピコ水力として、滝流を利用した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いる。しかし、これらの小型ハイドロタービンの共通した大きな課題として効率が低いことが挙げられる。一方、数インチの管路式農業用水路(図 1 参照)や簡易水道などに直接設置できるインライン式小型ハイドロタービンへの要望も強いが、この分野に関する研究は十分進んでおらず、高効率なインライン式小型ハイドロタービンの確立が強く求められている。

小型ハイドロタービンの高性能化を実現するために、二重反転形羽根車を採用し、直径 60mm と非常にコンパクトなハイドロタービン(図 2 参照)において最高効率 59%、広い流量範囲における高効率化を達成した。これまで直径 100mm 前後のハイドロタービンに関して効率 50% を超えた研究成果は得られていなかった。この性能向上の要因はタービン下流での旋回流れの抑制と二段のロータによる効率の良いエネルギー回収にあるが、これまでの研究により二重反転形小型ハイドロタービンでは、各段のロータにおける軸方向の圧力勾配が効率に大きく影響することが明らかとなった。また、小型ハイドロタービンは低  $Re$  数条件下において運転されるが、寸法効果及び  $Re$  数と効率との関係性を定量的に解明することが、更なる高効率化を実現する上で重要であると考えた。そこで、軸方向圧力勾配、寸法効果、 $Re$  数と効率の関係性に着目し、インライン式小型ハイドロタービンの最高効率 70% を目指す本研究を着想するに至った。

本研究では、インライン式小型ハイドロタービンとして二重反転形羽根車を採用し、その最高効率を実現する上で、重要な軸方向圧力勾配に着目し、好適な軸方向圧力勾配を実現するソリディティを明らかにする。また、ピコ水力発電における寸法効果、レイノルズ数(以下  $Re$  数)と効率の関連性を解明した上で、これらの結果をもとに最高効率 70% を実現する。

## 2. 研究の目的

インペラを通過する流体の軸方向圧力勾配はハイドロタービンの効率に大きく影響する。本研究において活用する二重反転形小

型ハイドロタービンは、二段のロータにより流体エネルギーを回収するため、軸方向に二つの圧力勾配を持ち、この各段における好適な圧力勾配を実現するソリディティを明らかにする必要がある。また、小型ハイドロタービンは、幾何学的制約により大型のハイドロタービンをそのまま縮小させることはできない。特に、直径に対するチップクリアランスの比率や流路面積に占める翼厚みの影響は、大型のハイドロタービンよりも相対的に大きくなる。これらの幾何学的制約により生じる寸法効果がハイドロタービンの効率に及ぼす影響を明らかにすることは重要である。小型ハイドロタービンは小型化に伴う  $Re$  数の低下により、大型のハイドロタービンと比較し効率が低下するが、ピコ水力発電が運転される低  $Re$  数条件下での  $Re$  数と効率の関係性は明らかになっていない。そこで、本研究ではインライン式小型ハイドロタービンの最高効率 70% を実現するために、以下の重要研究課題を研究期間内に明らかにする。

【インライン式小型ハイドロタービンの重要研究課題】

- (1) インライン式小型ハイドロタービンにおける好適な軸方向圧力勾配を実現するソリディティの探求
- (2) 小型ハイドロタービンの寸法効果が効率に及ぼす影響の解明
- (3) ピコ水力発電における  $Re$  数と効率の関係性の解明



図 1 管路式農業用水路  
(全国に数百万箇所存在)



図 2 二重反転形小型ハイドロタービン  
(2 段の羽根車で良好な性能を実現)

### 3. 研究の方法

#### (1) 小型ハイドロタービンの軸方向圧力勾配の最適化

二重反転形小型ハイドロタービンの多点壁面圧力計測を実施し(図3参照) 軸方向の圧力勾配を計測する。ロータでの圧力勾配は羽根間内部流れに対応し変化するため、インペラ周りの詳細な流れ場を解明するために非定常RANS解析も実施する。その上で、迎え角同一条件下においてソリディティを変更し、羽根間圧力勾配が効率に及ぼす影響を非定常RANS解析により解明し、前後段ロータそれぞれの好適な圧力勾配を実現するソリディティを明らかにする。

#### (2) 小型化に伴う寸法効果が効率に及ぼす影響の解明

寸法効果がハイドロタービンの効率に及ぼす影響を明らかにすることは、小型ハイドロタービンに適したロータ設計を検討する上で重要である。そこで、チップクリアランスおよび翼厚みが小型ハイドロタービンの性能に及ぼす影響を定量的に明らかにする。実験用に全種類のロータを用意することは時間およびコストの面から難しいため、ここではCFDを有効活用する。チップクリアランスが異なる6種類の数値解析モデルを作成し、非定常RANS解析を実施する。次に、翼厚みの異なる数値解析モデルを使用し、ブロッケージ係数がハイドロタービンの効率に及ぼす影響を明らかにする。その上で、各パラメータが効率に及ぼす影響を考慮し、幾何学的制約の限界値の見直しを実施する。

#### (3) ピコ水力発電におけるRe数と効率の関係の解明

現地予備調査において明らかとなったインライン式小型ハイドロタービンの運転Re数  $2.5 \times 10^5$  を基準として、性能試験設備を利用し、Re数を増減させた際の効率の変化を調査する。ここでは、ピコ水力発電が運転されるRe数領域  $10^5$  (超小型ピコ水力発電) ~  $10^6$  (大型のピコ水力発電) でのRe数と効率の関係を調査対象とするが、調査すべきRe数の範囲が想定以上に広く、実験的評価が困難な場合は、CFDを活用する。さらに、各Re数領域における詳細な内部流れ調査および損失評価を実施し、効率改善余地を示した上で、各Re数領域での限界性能を明らかにする。

#### (4) 小型ハイドロタービンの最高効率の実現

インライン式二重反転形小型ハイドロタービンの好適な軸方向圧力勾配を実現するソリディティに関する研究結果、寸法効果を考慮した幾何学的制約の再検討結果、低Re数条件下におけるRe数と効率との関係をもとに新しいロータを設計・製作する。性能試験設備を使用し、目標値である最高効率70%を実現できるか検証実験を実施する。

### 4. 研究成果

本研究では、インライン式小型ハイドロタービンに二重反転形羽根車を採用し、その最高効率を実現する上で重要な軸方向圧力勾配に関するソリディティ、寸法効果、Re数に関する以下の研究成果を得ると同時に高性能モデルを考案し、数値解析において最高効率68%を実現した。

#### (1) 小型ハイドロタービンの軸方向圧力勾配の最適化

インライン式小型ハイドロタービンの軸方向圧力勾配を明らかにすることはその高性能化を実現する上で非常に重要である。そこで、試験部ケーシングを新規設計・製作し、多点壁面圧力計測を実現する実験装置と計測環境を構築し、軸方向の圧力勾配を計測した。また、インペラ周りの詳細な流れ場を解明するために非定常数値解析を実施した。図4に設計流量でのベースモデルにおける軸方向圧力勾配の実験結果と数値流れ解析結果を示す。図より、前段羽根車出口における圧力分布において、実験と数値流れ解析の値に差異が生じているが、前段羽根車および後段羽根車における圧力勾配の傾向については類似した結果を得ることができた。また、前段羽根車に

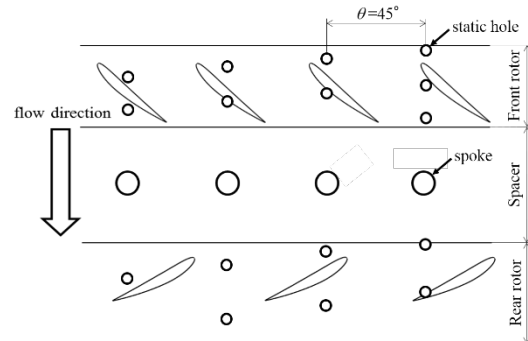


図3 多点壁面圧力計測  
(前段・後段ロータ周辺に圧力センサを配置)

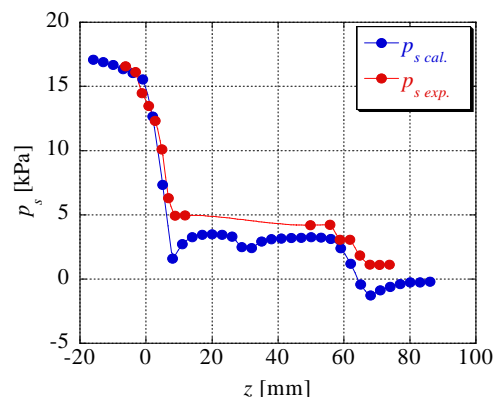


図4 軸方向圧力分布

おける負の圧力勾配が大きく、性能改善を実施する上で圧力勾配を緩和させる必要があることが明らかとなった。そこで、前段および後段羽根車における圧力勾配を調整するために、各羽根車のソリディティを変更し、数値流れ解析を実施した。図5は各羽根車のソリディティを変更した際の各羽根車の効率曲線を示す。流量は最高効率流量  $1.25Q_d$  であり、 $\sigma_0$  はベースモデルにおける各羽根車のソリディティを表す。図より、前段羽根車においては  $0.8\sigma_0$ 、後段羽根車において  $1.2\sigma_0$  において最高効率を得られることが確認でき、前段羽根車および後段羽根車の圧力勾配を緩和させることで効率を改善させることができた。

### (2) 小型化に伴う寸法効果が効率に及ぼす影響の解明

インライン式小型 hidroタービンは、通常の水車と比較し、羽根車に対するチップクリアランスや翼厚みの比率が相対的に大きくなる。これらの寸法効果が hidroタービンの効率に及ぼす影響を明らかにすることは、その設計を検討する上で重要である。そこで、非定常数値解析を実施し、チップクリアランスおよび翼厚みが小型 hidroタービンの性能に及ぼす影響を調査した。図6に、設計流量においてチップクリアランスを変化させた際の性能曲線を示す。チップクリアランスの低下に伴い、水車効率は増加し、 $c=0.5\text{mm}$  において最高効率  $71.2\%$  を実現した。また、翼厚みを薄くした場合は、若干性能が改善することが確認できた。チップクリアランス  $c=0.5\text{mm}$  において、最高効率を得られているが、羽根車の製作・装置の組立て精度や異物の混入などを考慮すると、本供試小型 hidroタービンでは、強度上可能な限り翼厚みを薄くし、チップクリアランス  $c=1.0\text{mm}$  ( $c/R=0.017$ ) を選定することが妥当であると考えられる。

### (3) ピコ水力発電における Re 数と効率の関係の解明

インライン式小型 hidroタービンベースモデルの運転 Re 数  $2.5 \times 10^5$  を基準として、数値流れ解析により Re 数を増減させた際の性能の変化を調査した。ここでは、ピコ水力発電が運転される Re 数領域  $10^5$  (超小型ピコ水力発電) ~  $10^6$  (大型のピコ水力発電) に加え、Re 数  $10^7$  における数値流れ解析を実施した。図7にレイノルズ数が変化した際の性能曲線を示す。 $C_H, C_p, \phi, \phi_d$  はそれぞれ落差係数、出力係数、流量係数、設計流量係数である。Re 数を  $10^5 \sim 10^7$  まで変化させた場合、最高効率は  $63.7\% \sim 69.0\%$  まで変化し、本供試 hidroタービンでは、Re 数よりもチップクリアランスの方が、性能に大きく影響することが明らか

かとなった。

### (4) 小型 hidroタービンの最高効率の実現

軸方向圧力勾配に直結する羽根車のソリディティに着目し、性能改善を試みた結果、CFD 解析において、最高効率  $68\%$  を実現することができた。さらに、チップクリアランス、翼厚み、Re 数に関する研究成果を活用し、ソリディティとチップクリアランスが性能改善に対する効果が大きいことを考慮した上で、新しいロータ (チップクリアランス  $c=0.5\text{mm}$ 、前段羽根車のソリディティ  $0.8\sigma_0$ 、後段羽根車のソリディティ  $1.2\sigma_0$ ) の設計・外注を実施した。しかし、チップクリアランスを  $c=0.5\text{mm}$  に設定したことが影響し、性能試験設備の構築に想定以上に時間を要したため、研究期間内に検証実験を実施することはできなかった。今後、実験設備の構築を行った上で、検証実験を実施していく予定である。

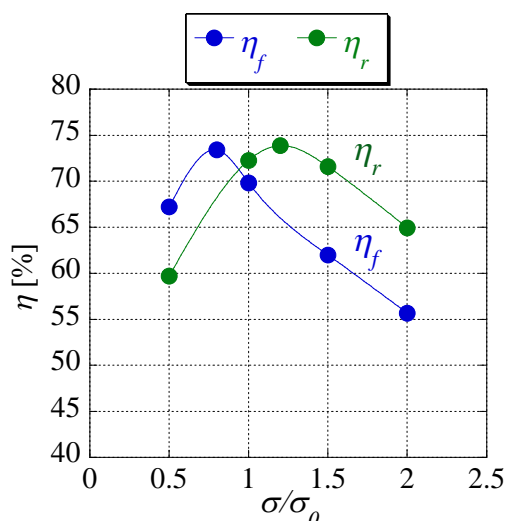


図5 ソリディティと効率の関係

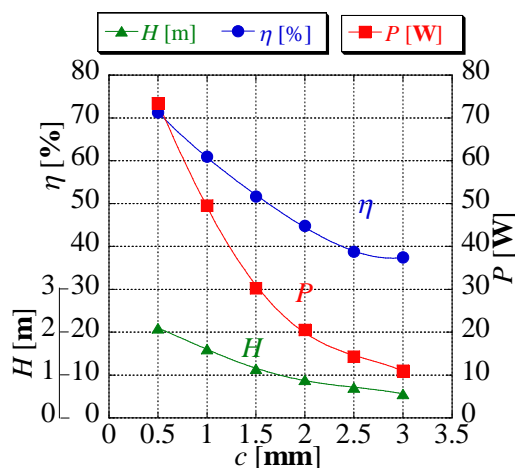


図6 チップクリアランスと性能の関係

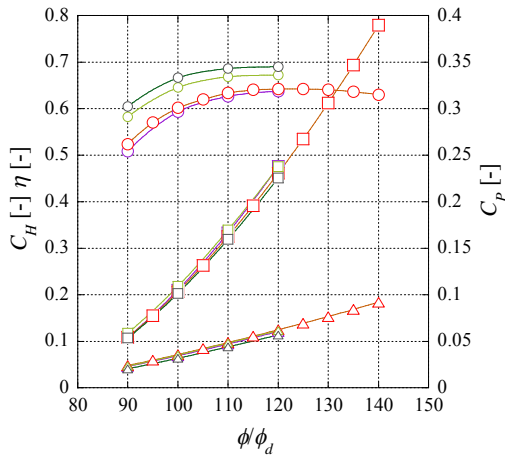
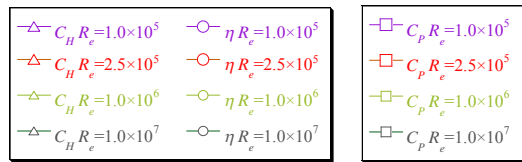


図 7 Re 数と性能の関係

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 4 件)

Nan Ding, Toru Shigemitsu, Zhao Shengdun, Yasutoshi Takeshima, “Study on performance of contra-rotating small hydro-turbine with thinner blade and longer front hub”, Renewable Energy, Vol.117, pp.184-192, March 2018. (査読有り)

Nan Ding, Toru Shigemitsu, Zhao Shengdun, Yasutoshi Takeshima, “Numerical Analysis of Contra-Rotating Small Hydro-Turbine with Cylinder Spoke”, International Journal of Fluid Machinery and Systems, Vol.11, No.1, pp.21-29, Jan 2018. (査読有り)

Nan Ding, Toru Shigemitsu, Zhao Shengdun, Yasutoshi Takeshima, “Internal Flow and Performance with Foreign Vegetable Materials in a Contra-Rotating Small Hydro-Turbine”, International Journal of Fluid Machinery and Systems, Vol.10, No.4, pp.385-393, Oct 2017. (査読有り)

重光 亨, 竹島 康東司, 小川 雄也, 楠 丁, 福富 純一郎, “二重反転形小型ハイドロタービンの翼近傍における圧力変動”, ターボ機械, Vol.44, No.7, pp.429-437, 2016 年 7 月. (査読有り)

[学会発表](計 5 件)

Toru Shigemitsu, Tomofumi Ikebuchi, Ding Nan, Yasutoshi Takeshima, “Influence of Tip Clearance on Performance and Internal Flow of Contra-Rotating Small Hydroturbine”, Proceedings of the 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Okinawa,

Japan, October 2017.

Nan Ding, Toru Shigemitsu, Zhao Shengdun, Yasutoshi Takeshima, “Numerical Analysis of Contra-Rotating Small Hydro-Turbine with Cylinder Spoke”, Proceedings of the 13th International Symposium on Experimental Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, Okinawa, Japan, May 2017.

Nan Ding, Toru Shigemitsu, Yasutoshi Takeshima, “Internal Flow with Foreign Vegetable Materials of Contra-Rotating Small Hydroturbine”, Proceedings of 7th International Symposium on Fluid Machinery and Fluids Engineering, Jeju, Korea, Oct. 2016.

小川 雄也, 竹島 康東司, 楠 丁, 重光 亨, “インライン式小型ハイドロタービンの設計に関する研究”, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 2016 年 9 月.

Toru Shigemitsu, Yasutoshi Takeshima, Yuya Ogawa, Junichiro Fukutomi, “Internal Flow of Contra-Rotating Small Hydroturbine at Off-Design Flow Rates”, Proceedings of the 28th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Grenoble, France, July 2016.

6 . 研究組織

(1)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

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

なし