

案内羽根を有するマイクロ水力発電用プロペラ水車の効率に与える

羽根取付角の影響に関する研究

須知成光¹, 杉田優樹²¹ 秋田県立大学システム科学技術学部機械知能システム学科² 元秋田県立大学システム科学技術学部機械知能システム学科 (現 株式会社シーアールイー)

ビル等で利用されている大形空調機器において冷却に用いられている水はポンプ動力等を消費して建物内を循環しているが、その経路において水の位置エネルギーが無駄に捨てられている場合があり、これを回収・利用することでシステム全体の効率を向上させることが期待できる。本研究では 4 階建以下の低い建物でも利用可能となる低落差に対応したマイクロ水力発電システムのための水車について検討した。今回は低落差の条件に適した水車としてプロペラ水車を選択し、案内羽根を組み合わせることで高効率化を図った。呼び直径 100mm の案内羽根および水車の羽根取付角について 4 つの組み合わせを選び、数値モデルを用いた解析によって性能を比較した。解析の結果、今回検討した範囲では案内羽根取付角が 20° の場合に出力は最も高くなった。一方で水車効率としては案内羽根取付角が 25-30° の場合が最も高い効率が得られた。また、羽根回りの流れの可視化の結果より、今後の改善点も明らかとなった。

キーワード: マイクロ水力発電, エネルギー回収, 羽根取付角, 小径配管, 数値解析

近年、再生可能エネルギー利用への関心が高まる中で、水力エネルギー利用については、農業用水路や河川を流れる水を利用した小規模発電システムに注目が集まっている。これらは自然界の水循環システムの中で生じる水の位置エネルギーを利用するという点で従来のダム式発電と同様のエネルギー源を利用するものであると考えられる。一方で、工場内の冷却用循環水などに代表される、電気エネルギーなどの別のエネルギーを消費して生み出される水の流れについても、循環経路において廃棄されている分を回収利用することで総合効率を高めることを目的とした発電システムが提案されており、概ね 10m 以上の落差がある場合に利用できるフランシス水車を用いた実用化事例 (酒井, 2012) がある。フランシス水車は大規模発電システムでも広く利用される高効率の水車であるが、落差が低い場合には他の形

式の水車のほうが適している場合がある。そこで本研究では、4 階建て以下の施設での利用を想定した、低落差中流量の条件で利用可能なプロペラ水車を用いたエネルギー回収システムを検討することとした。今回の報告では、このようなシステムで利用するのに適したプロペラ水車および案内羽根の形状を検討するための基礎的研究として、特に羽根取付角の影響について調査した。

発電システムの概要

本研究で検討するマイクロ水力発電システムは、建物内で循環利用されている空調用上水等の配管をそのまま利用することを想定し、水車の直径および長さをそれぞれ 100mm 程度とし、利用する水力エネルギーを最大落差 10m, 最大流量 1.0m³/min とす

る。発電機は水車と一体となって回転する永久磁石および、水車と同心に設置するコイルで構成される同期式発電機を用いる。図1に発電システム概念図を示す。

図1において、水車外周に配置されているタイル状の部分が永久磁石であり、コイル部分は上下に分割された下半分のみ示している。実際のシステムでは、水車とコイルの間に管路が存在するが、発電効率を高めるためにはできるだけ磁石とコイルを近づける必要がある。

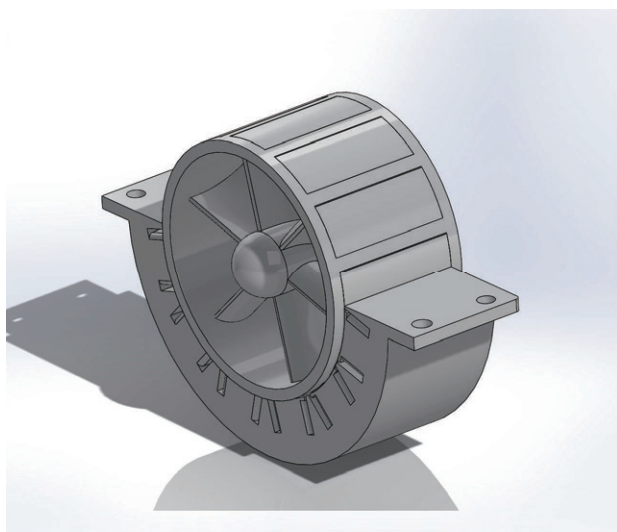


図1 発電システム概念図

水車基本仕様

一般に水車設計においては比速度に基づく設計方法が用いられる。本研究でもこの方法を踏襲するが、今回設計するような超小型の水車については目標とする比速度の値が確立されていないことから、ここでは既存の水車で用いられる値を参考にしつつ、水車回転数が現実的な範囲に収まるような比速度の値を採用することとする。

水車比速度は以下の式で定義される。

$$n_s = n_d \frac{P_{theory}^{1/2}}{H^{5/4}} \quad (1)$$

$$P_{theory} = \rho g Q H \quad (2)$$

式(1)および(2)において、上述の設計条件を適用すると、

水の密度 $\rho = 1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

流量 $Q = 1.67 \times 10^{-2} \text{ [m}^3\text{/s]} (= 1.0 \text{ [m}^3\text{/min]})$

重力加速度 $g = 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$

落差 $H = 10 \text{ [m]}$

より、理論出力 P_{theory} は 1.63 [kW] となる。

一般に大、中水力発電に用いられるプロペラ水車の比速度は $200 \sim 900 \text{ [min}^{-1}, \text{kW}, \text{m}]$ (ターボ機械協会編, 2005) であるが、マイクロ水力発電に用いるプロペラ水車の場合、この値をそのまま用いることは必ずしも適切ではないと考えられる。仮に比速度 n_s を $100 \text{ [min}^{-1}, \text{kW}, \text{m}]$ とすると、式(1)より設計定格回転数は $n_d = 1391 \text{ [rpm]}$ となる。今回はこの値を用いて案内羽根および水車羽根の設計を行う。

なお、案内羽根および水車羽根の断面形状について、本研究では基本的な形状としてそれぞれ単純板形状と NACA0010-30 翼形状を用いることとした。

数値解析方法

本研究では、市販の有限要素法数値解析ソフト ANSYS-CFX を用いて水車回りの流れ解析を行い、水車の性能評価を行う。

水車羽根モデルは翼型設計に特化したパラメトリックな作図ソフト BladeGen を用いて製作し、羽根回りの計算格子はターボ機械解析用メッシュ生成ソフト TurboGrid を用いて生成した。図2に今回用いた案内羽根および水車羽根回りの計算格子の例を示す。本研究では、羽根角度が水車効率に与える影響を検討するため、案内羽根と水車羽根の取付角について

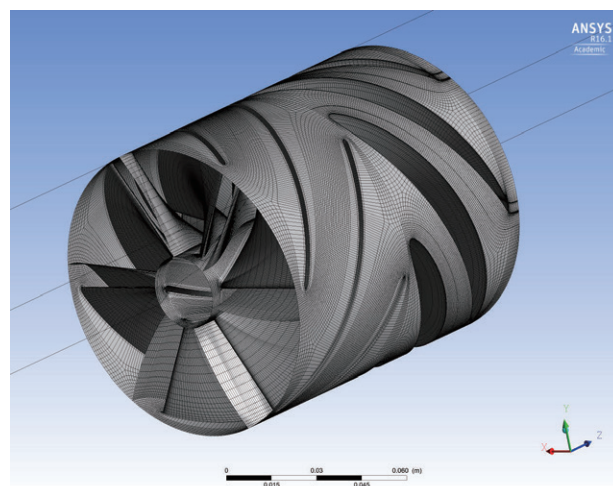


図2 案内羽根および水車羽根回りの計算格子

4 パターンの組み合わせを選び、解析モデルを作製した。表 1 にその組み合わせを示す。ここで、水車羽根取付角は、案内羽根を通過した流れが水車に流入する際の水車羽根に対する迎え角が翼の揚抗比が最大となる角度 (8°) となるように設定した。

また、水車前後には流れを整えるために解析結果に影響が出ない長さの直管部を設けた。

解析条件は、前述の設計条件の上限 (流量 $Q = 1.67 \times 10^{-2} \text{ [m}^3/\text{s]}$) とし、管路入口条件は発達した乱流速度分布を与え、出口条件は平均圧力 (大気圧) を指定した。また、水車回転数は前述の比速度を 100 とした場合の定格回転数を含む 200 – 2000[rpm]の範囲で変化させた。解析は時間発展の非定常解析とし、水車回転軸回りのトルク値の周期的変化が安定するまで解析を行った。

表 1 案内羽根および水車羽根の取付角

| モデル | 案内羽根 [deg] | 水車羽根 [deg] |
|-----|------------|------------|
| 1 | 20.0 | 34.3 |
| 2 | 25.0 | 29.4 |
| 3 | 30.0 | 23.7 |
| 4 | 35.0 | 17.0 |

(*) 角度はすべてハブ位置における値

解析結果と考察

図 3 に解析で得られた各モデルの水車軸出力の水車回転数による変化を示す。

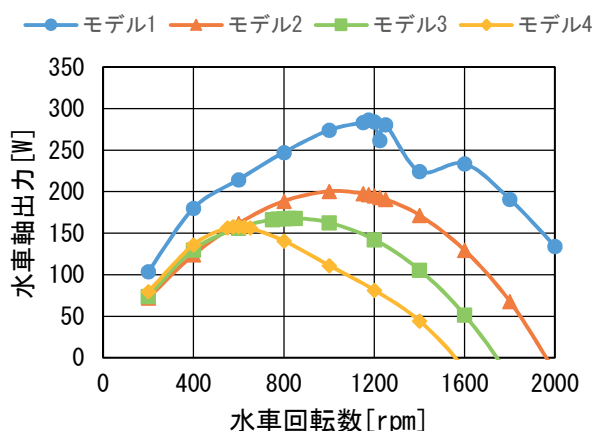


図 3 水車軸出力と水車回転数

今回解析を行った 4 つのモデルにおいては、案内羽根取付角が小さな方が出力が高くなる結果が得られた。なかでも最も高い水車出力が得られたのは、モデル 1 (案内羽根取付角 20°) であった。一方で、モデル 1 の解析においては、回転数変化による水車軸出力の変化が不安定であり、とくに設計定格回転数である 1391[rpm]付近で出力が落ち込む結果が得られた。このような結果になった原因については明確になっておらず、今後の検討が必要である。

次に案内羽根単体の性能について検討する。今回検討するシステムにおいて案内羽根は流れの圧力エネルギーを周方向の運動エネルギーに変換する役割をもたせているため、ここでは案内羽根前後の周方向運動エネルギーの変化について注目する。表 2 に各モデルで水車軸出力が最大となる回転数における案内羽根前後の周方向運動エネルギー変化量と ΔE_{θ_g} [W] 圧力エネルギー変化量 ΔE_{p_g} [W] および両者の比として案内羽根効率 η_g [%] を示す。

表 2 案内羽根効率

| モデル | ΔE_{θ_g} [W] | ΔE_{p_g} [W] | η_g [%] |
|-----|---------------------------|----------------------|--------------|
| 1 | 150.9 | 264.7 | 57.0 |
| 2 | 198.3 | 367.6 | 53.9 |
| 3 | 254.3 | 500.7 | 50.8 |
| 4 | 391.1 | 735.4 | 53.2 |

表 2 より、案内羽根効率はモデル 1 が最も高く、取付角が大きくなるとともに減少する傾向が見られる。ただし、最も角度の大きいモデル 4 ではモデル 3 に比べてやや高い効率が得られた。

次に、水車単体の性能評価として、表 2 と同じ条件における各モデルの水車前後の圧力エネルギー変化量 ΔE_{p_t} [W]、周方向運動エネルギー変化量 ΔE_{θ_t} [W]、全エネルギー変化量 $E_{total_{t_{in}}}$ [W]、水車軸出力 P_t [W] および水車軸出力と全エネルギー変化量の比として水車効率 η_t [%] を表 3 に示す。

案内羽根の場合と異なり、水車効率はモデル 2 で最も高くなった。一方で水車前後の全エネルギー変化量はモデル 1 が最も大きくなった。本研究で作製した水車モデルは、案内羽根との組み合わせで羽根

取付角を決定したが、表 1 より案内羽根取付角が大きくなると水車羽根取付角は逆に小さくなる。そのため、水車羽根と水流の衝突損失を含む水車前後の全エネルギー変化量は取付角が最大のモデル 1 で最も大きくなったと考えられる。

表 3 水車効率

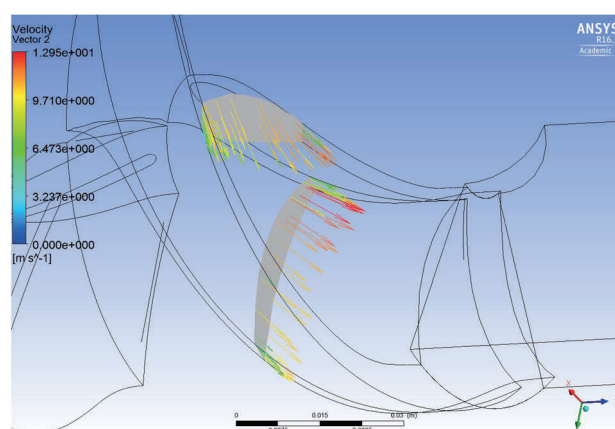
| モデル | ΔE_{θ_t} [W] | ΔE_{p_t} [W] | ΔE_{total_t} [W] | P_t [W] | η_t [%] |
|-----|------------------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------|-----------------|
| 1 | 70.0 | 819.9 | 889.9 | 286.2 | 32.2 |
| 2 | 185.4 | 332.0 | 517.4 | 200.4 | 38.7 |
| 3 | 245.4 | 167.8 | 441.5 | 168.0 | 38.1 |
| 4 | 318.6 | 211.7 | 530.3 | 157.8 | 29.8 |

また、モデル 1 においては水車前後の圧力エネルギーの変化が 4 モデル中で最も大きく、逆に周方向運動エネルギーの変化量は最も小さい。このことは、モデル 1 の水車は圧力エネルギーを直接消費して水車にエネルギーを与える反動水車的な働きをしていることを示している。一方、圧力エネルギーの変化量に対して周方向運動エネルギーの変化量の比率が最も大きなモデル 3 はどちらかというとは衝動水車的な動作をしていると考えられる。

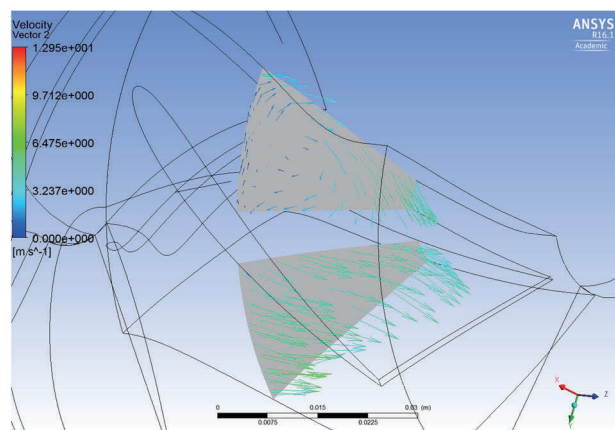
次に羽根回りの流れの様子について代表例を示す。図 4 (a) にはモデル 1, (b) はモデル 4 について、水車中央付近の流速ベクトル図を示す。図の灰色部が羽根間の流路断面を示しており、速度ベクトルはこの面を起点として描画されている。図 4 (a) においては、流れは概ね羽根面に沿って流れているが、図 4 (b) においては、流路内に大きな渦が生じており、羽根回りの流れが設計で想定していた状態から乖離していることが明らかとなった。この原因としては、今回のモデルで行った、案内羽根および水車それぞれについて、入口と出口における羽根形状の調整が不十分であった可能性がある。羽根回りの流れについてはさらに詳細な検討を行い、設計の改善を図る必要があると考えられる。

まとめ

ビル内を循環する水のもつエネルギーを利用したマイクロ水力発電のために利用可能な、案内羽根を有するプロペラ水車の性能に与える羽根取付角の影響について、数値解析による検討を行った。検討の結果、水車比速度を 100 とした場合には、案内羽根取付角は 25-30° 程度が最も適していると考えられる。今後は水車比速度の適切な値や、羽根回りの流れの最適化について検討を進め、最終的には水理実験による実証試験を行う予定である。



(a) モデル 1



(b) モデル 4

図 4 水車中央付近の流速ベクトル図

文献

酒井孝寿 (2012), 「マイクロ水力発電の事務所ビル等への適用」『電気設備学会誌』32 (4), 266-270.

ターボ機械協会編(2005),「ハイドロタービン(新改訂版)」, 日本工業出版.

〔平成29年6月30日受付〕
〔平成29年7月11日受理〕

Basic Study on the Effects of the Angle of Incident of Blades on the Efficiency of a Propeller Turbine Having Guide Vanes for a Micro Hydropower Generation System

Shigemitsu Shuchi¹, Yuuki Sugita²

¹ *Department of Machine Intelligence and Systems Engineering, Faculty of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University*

² *Former student at the Department of Machine Intelligence and Systems Engineering, Faculty of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University (presently at CRE Co., Ltd.)*

Water used for cooling in large air-conditioning equipment used in a building circulates in the building by consuming pump power. In the system, the position energy of water given by the pump is thrown away in some cases. It can be expected to improve the efficiency of the entire system by efficiently collecting and using this. In this study, we examined a water turbine for a micro hydropower generation system corresponding to a low drop that can be used even in a low building of less than four stories. We chose a propeller turbine as a water wheel suitable for the condition of small head, and aimed for high efficiency by combining guide vanes. We selected four combinations of the angle of incident of guide vanes and turbine blades with a nominal diameter of 100 mm and compared their performances using numerical analysis. The output was the highest in the range studied this time, when the angle is 20°. On the other hand, as the turbine efficiency, the highest efficiency was obtained when the angle was 25–30°. In addition, from the visualization of the flow around turbine blades, further points of improvement are also clarified.

Keywords: Micro hydropower generation, Energy recovery, Angle of incident, Small diameter piping, Numerical analysis