直線翼ダリウス型水車内部に設置した 円柱型及び楕円柱型ガイドによる性能向上効果の検討

加瀬 篤志^{a,*} 井出 慎輝^b 川口 清司^a

Evaluation of Effect of the Cylindrical or Ellipsoidal Guide for the Performance Improvement of the Straight Darrieus Water Turbine

Atsushi Kase^{a,*}, Shinki Ide^b, Kiyoshi Kawaguchi^a

(Received January 7, 2020; revised February 18, 2020; accepted February 26, 2020)

Abstract

To develop the high performance water turbine for the small hydroelectric power generator, we suggest the some flow guides set inside the straight Darrieus water turbine. The guides shape the cylindrical or ellipsoidal column. When the tip speed ratio λ is below 1.0, the power coefficient C_P of the water turbine with the cylindrical or ellipsoidal guide is larger than that of the turbine without any guides. Then the cylindrical guide shows the highest C_P and the ellipsoidal guides which be set the suitable angle shows comparable C_P to that of the cylindrical guide. When the λ is above 1.0, the C_P of the turbine with cylindrical guide is smaller than that of the turbine without any guides. Then the C_P of the turbine with the ellipsoidal guides which have the suitable oblateness and be set the suitable mounting angle are larger than that of the turbine without any guides. Hence, the ellipsoidal guides will be able to rise the C_P in wide range of λ .

キーワード : 直線翼ダリウス型水車, 整流ガイド, 回流水槽, 小水力発電

Keywords : Straight Darrieus water turbine, Current guide, Water tunnel, Small hydroelectric power generator.

1. はじめに

近年, 再生可能エネルギーの利用が推進されている。中でも小規模河川や農業用水路, 上下水道等を活用した小水力発電は太陽光や風力といった他の再生可能エネルギーに比べて安定した発電が可能であり, また未開発の包蔵量が多いことから注目が高まっている。そこで我々は, 比較的構造が単純で低コストで作製可能な直線翼ダリウス型水車を小水力発電に利用することを考えた。この水車は揚力型であることから, 抗力型に比べて高効率期待できる。ただし一般的に直線翼ダリウス型水車は,

低周速比の状態での性能が低く起動性に難があり, また回転トルクの生じる方位角の範囲が限られている等の問題点が知られている。従って, 小水力発電システムとして実用化するには, 水車自体の性能向上のための何らかの仕組みが必要であると考えられる。

直線翼ダリウス型水車に関する研究はこれまでも多くの報告例がある。例えば別府ら⁽¹⁾は, 水車の外側に設置したディフューザにより水車に流入する流速を増大させて性能向上を図っている。しかしこの方法では, 占有空間が肥大化してしまうことが欠点として挙げられる。また, 水車内部にサボニウス型ロータを設置して混合水車とした場合については, 北風ら⁽²⁾や Kyojuka ら⁽³⁾等比較的多くの報告がなされている。占有空間自体は水車単体と同じであるが, サボニウス型ロータでは起動性は向上するが高周速比域で抵抗となるため, 広い周速比での性能向上は期待できない。一方, 直線翼ダリウス型風車において, 風車内部に円柱状のロータを設置することで翼周りの流れの剥離を抑制し, 風車全体のパワー係数が

* Corresponding author. E-mail: kase@eng.u-toyama.ac.jp

^a 富山大学
〒930-8555 富山県富山市五福 3190
University of Toyama
3190, Gofuku, Toyama-shi, Toyama, Japan 930-8555

^b 富山大学大学院理工学教育部
〒930-8555 富山県富山市五福 3190
University of Toyama, Graduate School of Science and Engineering for Education
3190, Gofuku, Toyama-shi, Toyama, Japan 930-8555

向上することが確認されている⁽⁴⁾。今回はそれをヒントにして、水車の内部に円柱形状の整流ガイドを設置することで性能向上が図れないかの検討を行った。円柱であれば形状が単純なため、比較的低コストで設置することが可能であると考えられる。また風車では風向きが変化するため、風向依存性の観点からガイド形状は回転対称な形状が望ましいが、水車、特に小水力発電においては、流入方向が流路形状により確定しているため、ガイド形状の自由度が高い。そこで、円柱と同様の剥離抑制効果を残しつつも、より流路抵抗が小さい楕円柱型の整流ガイドについても設置角度及び扁平率を変えて水車性能の比較検討を行った。本論文では、回流水槽を用いた水車のトルク測定実験の結果と、流れ場の詳細を調べるために実施した流れの非定常三次元数値シミュレーションの結果について報告する。

2. トルク測定実験

2.1 実験装置と方法

Fig. 1 にトルク測定実験に使用した水車の概略図を示す。翼型は対称翼である NACA0018 を採用し、翼弦長 76.7 mm、翼スパン長さ 150 mm とした。翼の製作には、光造形式 3D プリンタ (3DSYSTEMS, Project 3510 HD Plus) を使用し、スパン方向に積層する形で製作した。その際、材料節約のために内部に中空の領域を設け、加工時間を考慮して翼スパン方向に 25 mm ずつの 6 パーツに分けて出力して M3 の全ネジボルトとナットで結合させた。ただし、出力したパーツそのままでは、パーツ間の隙間や積層痕が段差として残るため、翼表面にアルミテープを巻き付けることで表面粗さの低減を図った。また水車直径 d は 300 mm とし、翼の固定と翼端の影響軽減のため、上下に直径 340 mm、厚さ 5 mm のアクリル円板を取り付けている。ただし下側の円板については、後述のガイドを設置するために、中央に直径 170 mm の穴が開いたドーナツ状になっている。また、ガイドを設置する空間の確保のため、回転軸は上側の円板にのみ接続されており、水車内部を貫通してはいない。

Table 1. Model data.

Model name	Height h_g [mm]	Major axis length $2l_a$ [mm]	Minor axis length $2l_b$ [mm]	Flattening f [-]
Without	-	-	-	-
Cylinder	140	150	150	0
Ellipse A	140	150	125	0.17
Ellipse B	140	150	100	0.33
Ellipse C	140	150	75	0.50
Ellipse D	140	150	50	0.67

Fig. 1. Schematics of water turbine.

Fig. 2. Schematics of each model.

Fig. 2 にガイドを設置した各モデルの模式図、Table 1 にその諸元を示す。表中の扁平率 f は、長軸の長さを $2l_a$ 、短軸の長さを $2l_b$ として次式で定義される。

$$f = 1 - \frac{l_b}{l_a} \quad (1)$$

ガイド比 (= ガイドの長軸の長さ / 水車直径) については 0.5 の条件で固定した。各ガイドはテストセクション下部に設置した支柱に固定することで供試水車の内部に配置されている。また水車上面とのクリアランス確保のため、高さは全て翼スパンよりも短い 140 mm で統一している。ガイドについては、レーザー加工機 (コムネット, Spirit 40W) で 10 mm 厚のアクリル板から円または楕円の断面形状を切り出し、14 枚積層して接着した後、側面にアルミテープを巻き付けることで製作した。なお、楕円柱型ガイドについては、主流に相対する向きによって流れ場が変わるため、ガイドの長軸が主流と直交する

Fig. 3. Schematic of experimental setup.

状態を設置角 $\beta=0\text{ deg}$ として、 $0\sim150\text{ deg}$ まで 30 deg 刻みで変化させて同様の計測を行った。

Fig. 3 に実験装置の模式図を示す。ポンプ（イワキ，MX400CV6-2）及び船外機（エレキモーター，od278）により駆動する水平に設置された回流水槽内に、幅 500 mm 、長さ 800 mm のテストセクション部が設けられている。テストセクションの上から回転軸が伸びる形で供試水車が設置され、水車の下から各ガイドを挿入できるようになっている。供試水車の回転軸は、トルク変換器（共和電業，TP-2KCE）を介して水車駆動用のギヤードモータ（オリエンタルモーター，51K90GU-SF+5GU9KB）に接続されている。トルク変換器の出力信号は、動ひずみ計（共和電業，DPM-713B），AD変換器（CONTEC，AI-1608AY-USB）を介してPCに取り込まれる。また水車の回転数は、モータに接続したインバータにより調整し、回転軸に取り付けた遮光板の通過によりパルス信号を出力するフォトセンサ（Panasonic，PM-L24）を用いて計測した。またテストセクションに流入する流速は、前述のポンプに接続したインバータにより調節し、今回は流入流速を 0.35 m/s に設定した。その際、水車上流 500 mm 、水面から深さ 125 mm の位置に設置した電磁流速計（ケネック，VM-901H+VMT-200-04P）を用いて流速を計測した。なお今回は水深を 250 mm とした。

2.2 評価指標

今回は主流速度を一定に保ったまま、水車の回転数を調整して周速比 λ を設定し、その周速比 λ においてトルクを測定した結果からパワー係数 C_P を算出し、各ガイドの水車性能の比較を行った。なお、周速比 λ 及びパワー係数 C_P は次式で定義される。

$$\lambda = \frac{U_b}{U_{in}} \quad (2)$$

$$C_P = \frac{2\omega}{\rho U_{in}^3 A} \quad (3)$$

ここで、 U_{in} は主流速度（ $=0.35\text{ m/s}$ ）， U_b は翼の周速度を示している。また ρ は水の密度， A は水車の前方投影面積（ $=\text{直径 } 0.3\text{ m} \times \text{スパン } 0.15\text{ m} = 0.045\text{ m}^2$ ）， ω は角速度， T は平均トルクを示している。トルクの測定はサンプリングレート 30 ms の設定で 30 s 間の計測を行い、その平均値を T として採用した。

Fig. 4. Tip speed ratio λ vs. power coefficient C_P . (Experimental results)

Fig. 5. The relationship between mounting angle β and power coefficient C_P . (Experimental results, $\lambda = 1.3$)

2.3 測定結果

Fig. 4 に上記計測により得られた周速比 λ とパワー係数 C_P の関係を示す。Fig. 4 より、 λ が1以下の低周速比では、円柱型ガイドを取り付けた場合、ガイド無し (Without) に比べて C_P が向上しており、 $\lambda = 0.65$ で約 58% 向上している。楕円柱型ガイドにおいても同様に、いずれの条件でも低周速比ではガイド無しよりも C_P が向上している。その向上の度合いは、扁平率 f が低いほど設置角 θ の違いによる差はほぼ見られない。また C_P が大きく向上しているものはいずれも値に大差なく、円柱型ガイドとほぼ同程度の値を示す。一方 λ が1より大きい高周速比域を見ると、円柱型ガイドではガイド無しよりも C_P が低下し、 $\lambda = 1.3$ で約 17% 低下している。楕円柱型ガイドでも、高周速比においてはガイド無しより C_P が低下するが、条件によっては円柱型ガイドほど低下せず、ガイド無しと同程度の値を維持していることが見て取れる。従って、設置角 θ や扁平率 f を適切に設定した楕円柱型ガイドであれば、低周速比でのパワー係数の増加と、高周速比でのパワー係数の低下を低減することが期待でき、幅広い周速比の範囲で有効に機能することが見込まれる。

いずれのモデルもパワー係数 C_P のピークは $\lambda = 1.3$ 付近であることから、 $\lambda = 1.3$ の時のパワー係数の値を比較すると Fig. 5 のようになる。Fig. 5 より、いずれも設置角 $\beta = 90^\circ$ の時に最大パワー係数をとることが分かる。また Ellipse B では、すべての設置角の範囲で円柱型ガイドよりも最大パワー係数が大きく、他の楕円柱型ガイドと比べても高いパワー係数を示している。よって、今回検討した条件範囲内では、Ellipse B (扁平率 $f = 0.33$)、設置角 $\beta = 90^\circ$ がパワー係数 C_P を向上させるのに最適であると考えられ、円柱型ガイドと比べると $\lambda = 1.3$ で約 12% 向上する。

3. 流れの数値シミュレーション

3.1 計算条件と計算方法

実験では流れ場やトルクの発生部位の詳細を調べるこ

Fig. 6. Schematics of calculation conditions.

Fig. 7. Cross sections of calculation mesh.

とは困難であるため、数値シミュレーションにより同様の流れ場を再現して検討した。今回は上述の実験結果より楕円柱型ガイドで最も有効と判断した Ellipse B (扁平率 $f = 0.33$ 、設置角 $\beta = 90^\circ$) について、ガイド無し (Without) 及び円柱型ガイド (Cylinder) と比較した。

Fig. 6 に計算条件の模式図を示す。計算領域は実験装置のテストセクションに合わせて流路幅 500 mm、水深 250 mm とし、流路長さは水車の中心から上流に 500 mm、下流に 800 mm の計 1300 mm とした。この直方体の静止領域の内部に直径 400 mm、高さ 250 mm の回転領域と、その内部にガイドを取り囲むように直径 160 mm、高さ 197.5 mm の静止領域を設けた。また流入部で一定の流入流速 $U_{in} = 0.35$ m/s、出口部で圧力 $p_{out} = 0$ Pa を与え、流路の底面及び側面には No slip 条件、上面は Free slip 条件を課した。

Fig. 7 に使用した計算メッシュの断面図の一例を示す。計算メッシュの作成にはメッシュ作成ソフトウェア Pointwise (Pointwise Inc.) を使用した。また境界層部の空間分解能を稼ぐため、翼表面及びガイド表面のメッシュからは初期高さ 0.05 mm、成長率 1.3 で 5 層の押出を行い、いずれも総要素数 50 万程度とした。なお、計算メッ

シユはガイドを囲む静止領域以外は全て共通のものを用いた。流れ場の計算及びポスト処理には、有限体積法に基づく汎用熱流体解析ソルバーである ANSYS CFX (ANSYS Inc.) を使用した。水の物性値については、ANSYS CFX のライブラリの値を使用した。また 1 回転あたり 360 ステップとして 1 deg 毎の計算を 3 回転分実施した。なお、乱流モデルについては、Daróczy ら⁽⁵⁾によりダリウス型風車において各モデルの比較検討が実施されており、その結果を参考にして、今回は SST モデルを使用した。

3.2 各モデルでのパワー係数の比較

数値シミュレーション結果の妥当性の検証のため、周速比とパワー係数の関係を実験結果と比較する。Fig. 8 にその結果を示す。Fig. 8 より、数値シミュレーションの結果は全体的に実験結果よりも高いパワー係数を示した。これは計算コストの観点から各部固定用のボルトやシャフトホルダー等の実験装置の細部までは厳密に再現していないことに加えて、水面の変動を考慮していないことも差異の要因と考えられる。しかし、周速比に対するパワー係数の変化の全体的な傾向は実験結果とほぼ一致しており、低周速比では円柱型ガイドのパワー係数が高いが楕円柱型ガイドと同程度であり、高周速比では円柱型ガイドのパワー係数が低いことが確認できる。よって本計算結果は、定性的には妥当であると言える。

3.3 翼一枚の 1 回転中のトルク変動

ガイド無し、円柱型ガイド、楕円柱型ガイド B (設置角 $\beta=90$ deg) の一回転中に翼一枚に発生するトルクの変化を示すと Fig. 9, 10 のようになる。Fig. 9 は低周速比域の代表例として周速比 $\lambda=0.8$ の結果を、Fig. 10 は高周速比域の代表例として周速比 $\lambda=1.3$ の結果をそれぞれ示している。なお横軸は方位角 θ を表しており、図中に示す通り、主流に正対する位置に翼が来た時を $\theta=0$ deg としている。また翼は 3 枚であるが、それらは位相が 120 deg ずれているだけでトルクの変動波形自体は同じである。

Fig. 8. Tip speed ratio λ vs. power coefficient C_p . (Calculation results)

Fig. 9. The changes of torque on a wing. (Calculation results, $\lambda = 0.8$)

Fig. 10. The changes of torque on a wing. (Calculation results, $\lambda = 1.3$)

Fig. 9 より、ガイド無しではトルクの最大値が最も低く、 $\theta=90 \sim 200$ deg の範囲でトルクが負の値を示している。これに対し、いずれのガイドを付けた場合でもトルクの最大値はガイド無しよりも大きく、また $\theta=90 \sim 200$ deg でトルクが正の値をとっていることが分かる。加えて $\theta=60 \sim 230$ deg の広い範囲でガイド無しよりも高いトルクを維持している。すなわち低周速比では、ガイドを設けることでトルクの最大値が増大し、さらに負のトルクの発生を抑制しつつガイド無しよりも高いトルクを維持していることから、一回転の平均トルクの値がガイド無しより増加する。これはガイドの存在により、翼に流入する流れが変化するためであると考えられる。

一方高周速比では、Fig. 10 よりトルクの最大値はガイド無しが最も高く、円柱型ガイドが最も低くなっていることが分かる。また円柱型ガイドでは $\theta=210$ deg 以降の負のトルクを生じている区間で比較的大きな負の値をとる範囲が広いことから、一回転の平均トルクにすると他の場合よりも低下すると考えられる。なお楕円柱型ガイドでは、トルクの最大値はガイド無しに比べると低いものの、ガイド無しでトルクが低下する $\theta=90 \sim 170$ deg の範囲でガイド無しよりも高いトルクを維持していることから、一回転の平均トルクとしてはガイド無しよりも向

上したものと考えられる。

3.4 流速分布及び圧力分布

ガイド無し、円柱型ガイド、楕円柱型ガイド B ($\beta=90$ deg) について、速度分布及び圧力分布を低周速比と高周速比のそれぞれにおいて比較する。直線翼ダリウス型水車であるため流れはほぼ二次元的であることから、ここでは翼幅の中央の断面で考える。

Fig. 11. Velocity and pressure distribution.
(Calculation results, $\lambda = 0.8$, $\theta = 80$ deg)

まず低周速比の代表例として、ここでは $\lambda=0.8$ の場合を考える。Fig. 9においてトルクの差が比較的顕著な $\theta=80$ degの時の速度分布及び圧力分布を Fig. 11 に示す。なお図中には矢印で速度分布を示し、カラーコンターで圧力を表示しており、負圧が大きいほど青く表示されるようになっている。Fig. 11 より、ガイド無しでは翼に当たった流れが大きく剥離して、回転中心側の面に負圧の傾

Fig. 12. Velocity and pressure distribution.
(Calculation results, $\lambda = 1.3$, $\theta = 90$ deg)

域が生じているが、位置的に翼の回転方向のトルクにはあまり寄与しないと考えられる。一方、円柱型ガイドではガイドの存在により翼周りの流れの剥離が抑制され、翼の前縁付近に負圧の領域が形成されていることが分かる。この位置での負圧は回転方向のトルクを生じるため、円柱型ガイドのパワー係数が増大したものと考えられる。また、楕円柱型ガイドにおいても、翼周りの流れ場は円柱型ガイドの場合と同様である。

次に高周速比の代表例として $\lambda=1.3$ の場合を考えると、Fig. 10においてトルクの差が比較的顕著な $\theta=90\text{ deg}$ の時の速度分布及び圧力分布は Fig.12 のようになる。Fig. 12を見ると、いずれもこのタイミングでは翼前縁付近に負圧の領域が生じていることから、回転トルクを生じていることがわかる。ただしガイド無しでは、翼の回転中心側の面で流れが大きく剥離して回転トルクを生じにくい翼の中腹部にまで負圧の大きい領域が広がっている。これに対しガイドがある状態では、流れの剥離が抑制され、翼前縁付近に負圧の大きい領域があり、より回転トルクを得やすい状態になっている。

Fig. 8において $\lambda=1.3$ でパワー係数に明確な差が生じていたにもかかわらず、Fig. 12ではガイド間の差が顕著に見られなかったため、翼面上の圧力分布を比較した結果を Fig. 13に示す。ここで横軸は翼弦長で正規化された翼弦方向の位置を表しており、0が前縁、1が後縁となっている。Fig. 13より、翼の外側の面での圧力はいずれもほぼ同じであるが、内側の面ではガイド無しのみトルクに寄与しない翼中腹部で負圧が大きくなっている。また翼前縁近傍の負圧のピーク値は、ガイド無しで約-18.1 kPa、円柱型ガイドで約-16.7 kPa、楕円柱型ガイドで約-

Fig. 13. Pressure distribution on a wing.
(Calculation results, $\lambda=1.3$, $\theta=90\text{ deg}$)

18.2 kPa となっている。この位置での大きな負圧はトルクの発生に貢献することから、楕円柱型ガイドでトルクが向上したと考えられる。

以上のことから、ガイドの設置により翼周りの流れ場が変化し、扁平率及び設置角を適切に設定した場合、翼前縁付近に強い負圧が発生することでトルクが増大し、結果的にパワー係数の増大につながると考えられる。

4. 今後の展望

水車内部に楕円柱型ガイドを設置することにより、幅広い周速比でパワー係数を向上させることに成功した。ただし、パワー係数の理論限界が0.593(周速比 $\lambda=1.3$ では0.45程度)であるのに対し、現状は最大でも0.2程度であるため、更なる改良の余地があると考えられる。今後の展望としては、円柱型または楕円柱型ガイドを水車中心に対して偏心させて設置した場合で同様の実験及び数値シミュレーションを行うことを検討している。

5. まとめ

直線翼ダリウス型水車の性能向上を図るため、水車内部に円柱型または楕円柱型ガイドを設置した場合について、トルク測定実験及び流れの三次元非定常数値シミュレーションを実施した結果、以下のことが分かった。

- (1) 円柱型ガイドを設置すると、パワー係数 C_P は低周速比域ではガイド無しに比べて向上するが、高周速比域ではガイド無しより低下する。
- (2) 低周速比域では、今回検討したいずれのガイドもガイド無しよりも C_P は向上する。中でも円柱型ガイドが最も高い C_P を示し、周速比 $\lambda=0.65$ ではガイド無しに比べて約58%向上する。ただし、扁平率 f 及び設置角 β を適切に設定した楕円柱型ガイドであれば、円柱ガイドと同程度の C_P を示す。
- (3) 高周速比域では、楕円柱型ガイドを適切な設置角 β で設置すれば、ガイドなしと同程度まで C_P の低下を軽減できる。 $f=0.33$ の楕円柱型ガイドを $\beta=90\text{ deg}$ で設置した場合、 $\lambda=1.3$ で円柱型ガイドよりも約12% C_P が向上する。
- (4) 楕円柱型ガイドは、円柱型ガイドよりも広い周速比 λ の範囲で C_P の向上が期待できる。今回検討した条件の範囲では、 $f=0.33$ の楕円柱型ガイドを $\beta=90\text{ deg}$ で設置した場合が最も効果的である。
- (5) ガイドを設置すると翼周りの流れ場が変化し、特に適切なガイドを設置すると、翼の回転中心側の面で流れの剥離が抑制されることで回転トルクを生む翼前縁付近に負圧の大きい領域が発生する。

文 献

- (1) 別府克哉, 大賀博文, 林則行:「ダリウス型水車の出力特性に及ぼ

すディフューザ寸法の影響」, 電気関係学会九州支部連合大会講演
論文集, Vol. 2012, 01-2P-02, 2012

- (2) 北風裕教, 村上秀隆, 堀義則: 「潮流発電技術を応用した小水力発電システムの開発」, 産業応用工学会論文誌, Vol. 4, No. 1, pp. 1-6, 2016
- (3) Yusaku Kyojuka: “An experimental study on the Darrieus-Savonius turbine for tidal current power generation”, Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 3, No. 3, pp. 439-449, 2008
- (4) 川口清司, 春山幸浩: 「円柱型ガイドを用いた直線翼ダリウス型風車の性能向上」, 日本機械学会論文集, Vol. 84, No. 865, p.18-00212, 2018
- (5) László Daróczy, Gábor Janiga, Klaus Petrasch, Michael Webner, Dominique Thévenin: “Comparative analysis of turbulence models for the aerodynamic simulation of H-Darrieus rotors”, Energy, Vol. 90, pp. 680-690, 2015

加瀬 篤志

2007年3月関西大学工学部機械システム工学科卒業。同年4月同大学院理工学研究科博士課程前期課程入学, 2009年3月修了。同年4月同大学院博士課程後期課程入学, 2012年3月修了, 博士(工学)。同大学研究員等を経て2015年4月富山大学大学院理工学研究部(工学)助教, 現在に至る。血流や羽ばたき翼等の生物流体関連の研究の他, 近年は主に風車, 水車, 送風機等の研究に従事。

井出 慎輝

2019年3月富山大学工学部機械知能システム工学科卒業。同年4月同大学大学院理工学教育部機械知能システム工学専攻入学, 現在に至る。直線翼ダリウス型水車の性能向上に関する研究に従事。

川口 清司

1979年3月金沢大学工学部機械工学科卒業。同年4月日本電装㈱(現㈱デンソー)入社, 2001年4月富山大学に移り, 現在富山大学大学院理工学研究部(工学)教授, 工学博士。ファン騒音の低減, 再生可能エネルギー, アルミ水素エネルギー等, 熱流体の研究に従事。