Advance Publication by J-STAGE

日本機械学会論文集

Transactions of the JSME (in Japanese)

DOI:10.1299/transjsme.21-00349

Received date : 5 November, 2021

Accepted date : 31 January, 2022

J-STAGE Advance Publication date : 8 February, 2022

© The Japan Society of Mechanical Engineers

この記事はクリエイティブ・コモンズ [表示-非営利-改変禁止 4.0 国際]ライセンスの下に提供されています。
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.ja>)

縦渦によって駆動する円柱翼風車の翼端が及ぼすトルク特性への影響

仲田 翔太^{*1}, 佐藤靖徳^{*2}, 高橋 勉^{*2}

Effect of blade tip on torque characteristics of circular cylinder blade wind turbine driven by longitudinal vortex

Shota NAKADA^{*1}, Yasunori SATO^{*2} and Tsutomu TAKAHASHI^{*2}

^{*1}Department of Science of Technology Innovation, Nagaoka University of Technology, 1603-1 Kamitomioka-machi, Nagaoka-shi, Niigata 940-2188, Japan

^{*2}Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology, 1603-1 Kamitomioka-machi, Nagaoka-shi, Niigata 940-2188, Japan

Abstract

In a circular cylinder blade wind turbine driven by a longitudinal vortex, the torque characteristics of the turbine are greatly affected by the flow field at the blade tip. In general, wind turbines reduce drag by making the blade tips thinner. However, because this wind turbine uses a cylinder as a blade, it is important to control the flow field at the blade tip. From the experiments, it was found that the torque coefficient can be increased by attaching the endplate to the blade tips, and the rotational force can be obtained stably up to very low rotation speeds. The installation of fairing or endplates in circular cylinder blade wind turbines enables stable rotation at low speeds even under high loads, and also reduces drag at high speeds and increases the maximum speed. In the case of a disc-shaped endplate, the torque coefficient can be increased by up to 20% by attaching an endplate with a diameter 2.5 to 3 times the diameter of the cylinder to the outer blade tip only. The L-type endplate has the effect of shifting the characteristics to the higher rotation side than the disk type, and increases the torque coefficient at the same tip speed ratio. However, the lower limit of stable rotation becomes higher, and as a result, the value of the maximum torque coefficient obtained at high load decreases. If the endplate attached inside has a negative effect on the stable formation of the necklace vortex, it will inhibit the rotation at a low speed due to high load, making it difficult to obtain high torque.

Keywords : Wind turbine, Circular cylinder blade, Longitudinal vortex, Tip end, Wind tunnel experiment

1. 緒 言

著者らのグループでは、振動する円筒後方に別の柱状物体を設置することで流れ場を変化させ、物体間のすき間量によって振動を制御する方法を検討した (Shirakashi et al., 1994, Takahashi et al., 1999, 加藤他, 2007). 十字交差配置した2つの柱状体の前方柱状体には主流方向に回転軸を持つ縦渦が形成されることでカルマン渦の形成が阻害されカルマン渦励振 (Karman Vortex-Induced Vibration, KVIV) が抑制される (裴他, 1993). さらに、特定の条件下では縦渦の周期的流出に伴う渦励振, すなわち縦渦励振現象 (Longitudinal Vortex-Induced Vibration, LVIV) が発生することを見いだした (Kato et al., 2012, Koide et al., 2006, 2017). LVIVはKVIVよりも強い励振力を有する. そこで縦渦が誘起する強い揚力に注目し、縦渦の周期性を抑制し特定の位置に定常的に存在させる方法を見いだした. 定在する縦渦が前方柱状体に作用する揚力を駆動力として一様流に対して直交方向の力を誘起し、これを回転力とする全く新しいコンセプトの円柱翼風車を報告した (Takahashi et al., 2016, 高橋他, 2016). 図1に示すように一様流で円柱が後流平板に対して一定のすき間を保ち平行に移動するとき、交差部近傍に縦渦のひとつであるネックレス渦が定在的に形成され、進行方向と反対側に定常的に存在するようになる. この結果、円柱には移動と同方向に定常的な揚力が作用する. 流れ場および円柱に作用する揚力の詳細については数値計算によ

No.21-00349 [DOI: 10.1299/transjsme.21-00349]

^{*1} 正員, 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 技術科学イノベーション専攻 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

^{*2} 正員, 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 機械創造工学専攻

E-mail of corresponding author: ttaka@nagaokaut.ac.jp

Fig. 1 Necklace vortex shedding from cruciform system of upstream circular cylinder and downstream strip-plate. When the cylinder moves in parallel and along with the downstream strip-plate in a uniform flow, a necklace vortex is statically formed near the intersection. It exists constantly on the opposite side of the direction of travel, and a steady lift force acts in the same direction as the movement. Although the cylinder has a symmetric cross section, in case of the flow with necklace vortex, relative wind speed and relative angle of attack can be defined from the flow velocity and the rotation speed.

て明らかにされた (Hemsuwan et al., 2018). 後流平板をリング状に変更し前方円柱がそれに沿って旋回できるよう回転軸を取り付ければネックレス渦による揚力は回転力となり円柱を翼とする風車を作ることができる. この風車に関して, 縦渦の可視化および性能試験の結果から形状因子と動力特性の関係について検討され, 円柱の移動速度と風速のなす相対速度および相対迎角が翼に作用する流体力を決定する重要な因子であることが報告されている (坂本他, 2021a). さらにこの風車の駆動力を生み出すネックレス渦が強い吸い込み流れを形成することを円柱に作用する抗力より明らかにし, 抗力に及ぼす形状因子の影響を明らかにした (坂本他, 2021b). これらの報告から, 円柱翼風車は揚力型風車として使用されることの多い水平軸型でありながら, 抗力型風車と似た低回転高トルク型の風車であることが示されている. また翼が単純な円柱形状のため構造的に強度を維持しやすく, 軽くて柔らかい材料で翼を作製できる. 低回転型であることと合わせて安全性が高く低騒音の風車を設計することができる.

Takahashi らにより提案された円柱翼風車 (Takahashi et al., 2016, 高橋他, 2016) では翼は先端まで一定の直径を有する円柱でありその端面は中心軸に垂直な平面である. 形状が単純で作りやすい反面, 一般的な風車よりも翼端近傍の流れによる損失は大きいと予想される. したがって翼端部の適切な処理により円柱翼風車のトルク特性は大きな改善が期待できる.

一般的な水平軸型風車に関してプロペラの翼形状や補助機器の追加により翼端効果を改善し動力を増加させる方法が提案されている. 大屋ら (大屋他, 2011) は翼端を覆う構造を有する風レンズ風車により定格 5 kW の 2.5 m 級風車を用いた実験で従来風車に比べて出力が 30 % 向上し, かつ, 翼端渦の低減や安全性の向上効果が得られることを報告した. 西沢ら (西沢他, 2009a) は小型水平軸風車の翼端部に板を設置することで出力が改善することを示した. 翼形状を先端に向かって細くテーパ形とし, 先端部に後流方向に向けて翼端板が設置された. 先端周速比 $\lambda=2\sim3.4$ で設計された 2, 3, 4, 5 枚翼の風車を主流速 $U=10$ m/s において比較し, 6 枚翼の場合で 0.8 %, 4 枚翼の場合でパワー係数が 3.2 % 増加する結果を示した. さらにこの翼端形状をウィングレット形とすることで低風速域での最大パワー係数が顕著に増加することを報告した (西沢他, 2009b).

また, 円柱を翼とした代表的な風車としてマグナス効果風車が挙げられる. これは一様流中で回転する円柱に作用するマグナス効果による揚力を駆動力として利用する風車である. Nicolas ら (Nicolas et al., 2012) は翼である回転円柱の翼端部にエンドプレートを設置し, 円柱のアスペクト比, エンドプレートの直径比, 回転量の比が揚力に及ぼす影響を検討した. 数値解析によりエンドプレート直径の増加によって抗力が減少し揚力が向上する

こと、アスペクト比が小さい円柱では抗力が大きく揚力が小さくなることを報告した。また、回転数を高くすることでより強い翼端渦が発生し誘導抗力が大きくなることを示した。一様流中の単独円柱まわりの流れ場については多数の研究がある。Wenjun ら (Wenjun et al., 2018) は 2 箇所 of 自由端部を有する有限長の円柱周りの流れ場に関して、アスペクト比の違いによって端部から流出する渦が変化する様子を数値解析により検討し、アスペクト比 L/D が 10 以下に小さくなると端面からの三次元的な流れが円柱全体に発達することを報告した。

さらに風車ではないが平板に沿って平行移動する円柱翼について、Hemsuwan ら (Hemsuwan et al., 2018b) は円柱の端部近傍から流出する Trailing 渦が端面から流出する渦と干渉し端部に負の揚力係数を生じていることを数値解析により示した。さらに端部に円板状や L 型のエンドプレートを設置することで揚抗比を 5.5 % 改善できることを示した。

本論文では風洞実験により縦渦によって駆動する円柱翼風車の翼端にエンドプレートなどの抵抗低減用部材を取り付けて回転数およびトルクを測定し、円柱翼風車のトルク特性に及ぼす翼端部の形状因子の影響を明らかにする。ここで、各翼端部に個別に取り付ける部材をすべてエンドプレートと定義し、形状によって円板型、L 字型、円弧状 L 字型とした。最初に翼端部の抵抗改善策として翼を覆うフェアリングの効果を検討する。多翼化や大型化を考えた場合、全周を覆うフェアリングではなく個別に翼に設置可能なエンドプレートが適切であると考えた。円柱翼端部に各種形状のアタッチメントを取り付けた際のトルク特性を実験により求め、形状の変化による性能向上について検討を行う。

2. 実験装置および実験手順

2・1 風洞実験装置

図 2 に示すような吹き出し型風洞装置を用いて実験を行った。風洞の出口は一辺が 350 mm の正方形である。風洞出口部壁面近傍の境界層の影響の強い領域がテストセクション内に入らないようテストセクション口径の一辺は風洞出口より小さい 320 mm の正方形とし、かつ、風洞出口とテストセクションの間にはすき間を設けて壁面近傍の風を逃がしている。テストセクションの長さは 1200 mm である。実験の風速範囲は 2 m/s~20 m/s で、風速 2 m/s における乱流強度は 0.6 % で、11 m/s 以上の風速での乱流強度は 0.3 % となっている (Kato et al., 2012)。実験に用いる主流速は、テストセクション入口から 200 mm 下流の位置でリング流速計 (Koide et al., 2001) によって測定した。

Fig. 2 Schematic diagram of test section and wind turbine setting. The cross section of the test section is square, smaller than that of the wind tunnel outlet, a gap was provided between the wind tunnel outlet and the test section to prevent the strong boundary layer flow on the wind tunnel outlet wall from entering the test section. The main flow velocity range of the experiment was 2 m/s to 20 m/s. The main flow velocity was measured by a ring-type vortex anemometer at a position 200 mm downstream from the inlet of the test section.

2・2 風車およびトルク特性測定装置

縦渦によって駆動する円柱翼風車のトルク特性を調べるため、回転軸の回転数とトルクを測定可能な測定装置を作製した。概略を図3に示す。また、表1に実験に用いた風車装置の各部寸法を示す。本研究で用いた風車装置の翼部分は坂本ら（坂本他, 2021b）によりネックレス渦の安定化が報告されている段付きの円柱翼，すなわち縦渦による揚力を受ける範囲のみを所定の直径を有する円柱としそれより内側は翼を固定するための支持部分として空気抵抗を下げるために細い円柱とした翼形状を利用した。翼部分は直径 $d=20$ mm，有効長さ l の円柱で，支持部分は $\phi 6$ mm の細円柱が同心状に接続する。さらに支持部が回転軸に取り付けられた直径 30 mm のハブに放射状に固定される。円柱翼の後流に設置するリング状平板は中心直径 $D=155$ mm，厚さ $t=3$ mm，幅 $W=20$ mm とした。円柱の有効長さの中心がリング状平板の幅の中心と一致する。リング状平板と円柱翼とのすき間 s は，円柱直径との比 $s/d=0.35$ になるように設定した。本研究で用いた風車の回転軸がテストセクションの断面の中心と一致するようにテストセクション内に設置した。

Fig. 3 Schematic diagrams of stepped cylinder blade wind turbine and measurement instrument. The blade of the wind turbine used in this study is a stepped cylinder blade, which has been reported to stabilize the necklace vortex. The blade consists of a cylinder part with a predetermined diameter only in the radius range where lift force by longitudinal vortex acts and a thin cylinder part in smaller radius range to reduce the air resistance. The wind turbine was installed in the test section so that its axis of rotation coincided with the center of the cross section of the test section.

Table 1 Dimensions of the stepped cylinder blade wind turbine used in the experiment.

Gap ratio s/d [-]	0.35
Ring plate width W [mm]	20
Blade diameter d [mm]	20,25,28
Blade length l [mm]	60,80
Ring plate diameter D [mm]	155
Blade Number N [-]	2,4,8

翼端の抵抗を低減するための形状として翼端を覆うフェアリング状のアタッチメントおよびエンドプレートを用意した。円柱翼端部形状の効果を検討するため変更した風車概観を図4に示す。基本となる円柱翼の端部に各形状のエンドプレートをはめ込むことで端部形状を変更した。図4(a)は端部にフェアリングを設置した概観である。フェアリングの幅は翼とする円柱が完全に覆われる 30 mm とした。図4(b)の円板型エンドプレートでは直径を変えたものを用意した。Nicolas ら（Nicolas et al., 2012）により，回転円柱において円柱直径に対するエンドプレート直径の比 d_p/d が 2 以上で翼端渦の強さが減少し，抗力係数が減少することが示されている。また，

(a) Fairing on tip end

(b) Circular endplates on tip ends

(c) Bended endplates with curvature on tip ends

(d) Bended endplates on tip ends

Fig. 4 Photographs of a stepped cylinder blade wind turbine with attachments on the blade tips.

$d_e/d=3$ ではスパン方向に均一な圧力分布が得られることが示された．したがって円板型エンドプレート径は $d_e/d=3$ となる 60 mm まで用意した．図 4 (c) に示す平板に沿う L 字型エンドプレート形状は Hemsuwan らによる数値解析で円柱翼長さの直径比 $l/d=4$ 以上の場合に揚力の増加が報告されている (Hemsuwan et al., 2018b)．L 字型エンドプレートの詳細を図 5 に示す．さらに，図 4 (c) の円弧状 L 字型エンドプレートを円板型エンドプレートと同様に回転半径の接線に沿うように変更した L 字型エンドプレートを図 4 (d) に示す．これらのエンドプレートの各部寸法を表 2 に示す．

Table 2 Parameter of endplate.

	Circular plate	Curved L-type plate	L-type plate
Tip end diameter d_e [mm]	20,30,40,50,60	50	50
Bending part length [mm]	-	10 (0.5 <i>W</i>)	10 (0.5 <i>W</i>)
Plate surface shape	Flat	Arc	Flat

Fig. 5 Detailed view of the L-type endplates attached to both ends of the circular cylinder blade.

2・3 測定装置

回転軸に作用するトルクおよび回転数を測定するため、風車の回転軸にトルク変換器 (UTM II-0.2 N・m, Unipulse Co., Ltd.) の drive 側を取り付け、トルク変換器の load 側に電磁ブレーキ (HB2.5, OGURA CLUTCH Co., Ltd.) を取り付けた。電磁ブレーキに安定化電源を取り付け、電圧を加えることでブレーキに負荷がかかる構造となっている。一様流中で定常回転している風車装置に対し電磁ブレーキで負荷を与え回転数を抑制し、定常となった段階で回転数とトルクをトルクメーターより取得する。負荷を段階的に増加させて回転が停止するまで同じ操作を繰り返す。これらの出力から式 (1) および式 (2) により定義する先端周速比 λ およびトルク係数 C_q を算出し、 C_q - λ プロットで表されるトルク特性を求め、その変化から翼端形状の効果を評価する。

$$\lambda = \frac{\pi L n}{U} \quad (1)$$

$$C_q = \frac{T}{0.5 \rho U^2 A R} \quad (2)$$

ここで、 n [rps]は風車回転数、 U [m/s]は主流速、 T [Nm]はトルク、 ρ [kg/m³]は流体の密度、 A [m²]は風車の受風面積、 R は風車の半径で $R=L/2$ である。なお、前述のように縦渦により駆動される円柱翼風車は抗力型風車の特性に近く電磁ブレーキの負荷をあげて回転数を低下させればさせるほどトルクが増加する。低回転において高トルクを発生する特徴を活かした用途を考えるため、本風車の性能評価においてはパワー係数ではなくトルク係数の向上が重要と考える。そのため本研究では各形状因子に対してトルク係数の比較を行う。

3. 実験結果および考察

3・1 フェアリングによるトルク特性の改善

図6に $U=15$ m/s の一様流において円柱翼先端部をフェアリングで覆った風車とフェアリングなしの円柱翼風車のトルク係数 C_q を先端周速比 λ に対してプロットした結果を示す。図6 (a) ~ (c) は直径の異なる3つの円柱翼の結果であり、フェアリングは同じ形状のものを使用した。各翼直径に対して円柱翼とリング状平板のすき間比は $s/d=0.35$ とした。リング状平板の幅 $W=20$ mm は一定としているため円柱直径の増加に伴い W/d は小さくなる。図6 (a) に示す $d=20$ mm の結果ではフェアリングのない状態において C_q は λ の増加に伴い直線的に低下する。この挙動は水平軸型の一般的なプロペラ翼風車とは大きく異なり、垂直軸型の抗力型風車であるサボニウス型風車の特性に近い (Nasef et al., 2013)。そして、サボニウス型風車よりもさらに λ の小さい $\lambda=0.02\sim0.4$ の範囲でトルクが発生し、直線関係が $\lambda=0$ に近いところまで継続する。一方、電磁ブレーキの電圧をゼロとして軸受けの摩擦など機械的損失による負荷のみの状態が最も回転数が高くなる状態で、このとき λ が最大値である約 0.36 を示す。通常のプロペラ型風車と比べて 1/10 以下、また抗力型の風車と比べても回転数が低い。坂本らの報告 (坂本他, 2021a) によれば、円柱翼においては、ネックレス渦は円柱翼とリング状平板の交差部近傍で形成され、その形成条件は円柱翼のこの位置における周速度と主流速度により式 (1) で定義される先端周速比が重要な因子となる。ネックレス渦により発生する揚力は主流速度 U とリング状平板交差部における円柱翼の周速度で作られる相対迎角 α_r に依存する。電磁ブレーキによる負荷を増加し円柱翼の周速度を小さくすると相対迎角が減少し、これに比例して揚力が増加する。このため U が一定であれば電磁ブレーキの電圧を上げて λ を低下させると C_q が直線的に増加する。図6 (a) では λ がゼロに近い値、すなわち風車の回転がほぼ停止に近い低回転で最大のトルクを発生させる。これは静止状態からの起動特性が極めて良いことを意味する。図6 (b) および (c) よりフェアリングなしの $d=25$ mm, 28 mm の結果は回転が維持できる λ の範囲が狭くなり、 C_q の最大値も低くなる。また、 λ と C_q の関係も直線からわずかにずれてくる。これまでの数値解析からリング状平板の幅 $W=20$ mm に対して直径 $d=20$ mm の円柱では翼有効長さ $l=60$ mm が最適形状である (Hemsuwan et al., 2021)。 d が増加すると低回転においてネックレス渦の形成が円柱翼の軸方向に広がる。 $l=60$ mm はこれらの直径 ($d=25, 28$ mm) に対して安定したネックレス渦を形成するのに十分な長さではなかったため本来得られる揚力よりも小さい値となった。

次に、フェアリングを取り付けた場合の結果について検討する。図6 (b) および (c) に示した $d=25$ mm と 28 mm では λ に対する C_q の負のこう配が急になり λ がゼロにかなり近づいても直線的に増加する。回転可能な領域もほぼ静止に近いほどの低回転かつ高トルクで回転するようになる。すなわち、フェアリングの設置によりネックレス渦の形成が安定化したことを示す。特に、 λ が小さい領域、すなわち低回転においてネックレス渦の形成に影響を及ぼしていた翼端から発生する流れがフェアリングにより抑制されネックレス渦が翼端近くまで広がり

Fig. 6 Relation between tip speed ratio and torque coefficient with and without the fairing ($U=15$ m/s, (a) $W/d=1$, (b) $W/d=0.8$, (c) $W/d=0.7, N=2$). The torque coefficient is higher without the fairing at $d=20$ mm, which is the reference value. On the other hand, at $d=25$ mm and 28 mm, where W/d becomes smaller, the installation of the fairing suppressed the torque reduction.

Fig. 7 Relation between tip speed ratio and torque coefficient with and without the fairing ($U=6$ m/s, (a) $W/d=1$, (b) $W/d=0.8$, (c) $W/d=0.7, N=2$). The torque coefficient is higher without the fairing at $d=20$ mm, which is the reference value. On the other hand, at $d=25$ mm and 28 mm, where W/d becomes smaller, the installation of the fairing suppressed the torque reduction.

揚力が改善される。フェアリングの設置は起動特性の改善に効果的であることが示された。一方、図 6 (a) に示す $d=20$ mm ではフェアリングを設置することで C_q が低下する。Hemsuwan らによる円柱の端部を用いた流れ場の改善に関する研究から、円柱端部に板を取り付けた場合に円柱スパン方向の流れが均一化するものの、端部で二次的な剥離が生じ抗力が増加することが報告されている (Hemsuwan et al., 2018b)。したがって本研究でも同様に、フェアリングの前縁から翼端面までの流れが乱れを誘起したと思われる。円柱翼の前縁とフェアリングの前縁が近い配置にする、あるいはフェアリングの幅を翼直径に合わせることで図 6 (b), (c) のように改善できたものと考えられる。

図 7 は $U=6$ m/s としたときの結果である。図 6 で示した 15 m/s の結果と比べてフェアリングがない状態ではいずれの直径の翼においても C_q の値に直線性が確認されず、ネックレス渦の形成が不安定になっていることがわかる。一方、坂本ら (坂本他, 2021b) や Hemsuwan ら (Hemsuwan et al., 2021) によって報告された同様の円柱翼風車では C_q やトルクは先端周速比に対して一直線上にプロットされ、回転が停止するまで傾きが変わることにはなかった。また、 λ に対する回転可能な範囲も狭い。フェアリングを設置することで $d=25$ mm, 28 mm では低回転側の C_q が改善される。これらの結果より適切に設計されたフェアリングの設置は円柱翼の長さの不足から生じる翼端流れの影響を大きく改善することができ、風車の起動特性を向上させることが明らかとなった。

3・2 エンドプレートによるトルク特性の改善

図 8 に先端周速比 λ に対するトルク係数 C_q の特性を、円板型外側エンドプレートの直径 d_e で比較した結果を $U=6$, および 15 m/s の条件それぞれについて示す。図 8 では直径が 20 mm の円柱翼の外側端面のみに直径 20 mm から 60 mm までの円板状のエンドプレートを適用したときの結果を示している。円柱翼とリング状平板のすき間比 $s/d=0.35$ およびリング状平板の幅 $W=20$ mm は一定とした。図 8 (a) に示す $U=6$ m/s の結果では設置するエンドプレートの直径 d_e によらず C_q は λ に対して直線的に低下する。円柱直径と同じ直径のエンドプレートを設置している $d_e=20$ mm に対し、 $d_e=40$ mm ではわずかに C_q は低下するがそれ以外では概ね C_q が向上する。また、最大トルクとなる状態、すなわち、負荷を増加させたときに回転を維持できる限界である最小先端周速比を $\lambda_{\min}$ と定義すると円柱直径より直径の大きなエンドプレートを設置することで $\lambda_{\min}$ を低下させ、より高い C_q を得ることができる。流速を $U=15$ m/s とすると図 8 (b) に示すように d_e の値により大きな変化は見られないが $d_e=50$ mm および 60 mm においては C_q - λ 直線の負のこう配が大きくなり $\lambda_{\min}$ がより小さく、かつ、そのときの C_q の値 ($C_{q\max}$) は $d_e=20$ mm と比較して 11 %程度高くなる。

Fig. 8 Relation between torque coefficient and tip speed ratio with each diameter of endplate is varied by installing endplates at the outer blade tip for each wind velocity ((a) $U=6$ m/s, (b) $U=15$ m/s). As the blade tip diameter increases, the maximum tip speed ratio indicating the no-load rotation speed became smaller than that without the endplates. In addition, the torque coefficient increases with decreasing tip speed ratio. It is possible to increase the maximum torque coefficient and reduce the minimum rotation speed with the endplates.

円板状エンドプレートは安定して回転する範囲をより低回転側に拡張し、これにより高トルクを発生可能とすることがわかった。そこでエンドプレートの直径 d_e とトルク係数 C_q の最大値の関係をより詳細に調べる。加えてエンドプレートを円柱翼の外側端のみにつけた場合と両端面につけた場合についての比較も行う。図9は各風速 U に対して得られた C_q - λ 特性における C_q の最大値 C_{qmax} の値に対するエンドプレートの直径 d_e の効果をまとめたものである。図9 (a) は外側端面のみにエンドプレートを取り付けたときの結果である。 d_e の大きなエンドプレートを取り付けることにより C_{qmax} は向上し、かつ低風速において d_e による効果はより高くなる。ただし、 d_e が大きくなるほど C_{qmax} の向上効果が明確であるが 50 mm から 60 mm の大ききで効果がほぼ変わらなくなる。一方、図9 (b) に示す両端面にエンドプレートをつけた場合は U が 15 m/s および 20 m/s において d_e の増加により C_{qmax} は低下する。図9 (a) の結果との比較から内側のエンドプレートが C_{qmax} を低下させ、 d_e を大きくするほど低下量が大きくなることがわかる。外側端面にエンドプレートを取り付けた場合、エンドプレートの縁は回転

Fig.9 Relation between maximum torque coefficient and blade tip diameter for each wind speed ((a) Outer end, (b) Both ends). When endplates are installed at the outer blade tip, the maximum torque coefficient tended to increase with the increase in blade tip diameter at all wind speeds. When endplates are installed at both blade tips, the increase in blade tip diameter reduce the entering wind to the rotor near the root of blades.

面の接線方向に突出する。したがって円柱翼単体の回転面に加えてエンドプレート直径による突出部分が通過する領域の空気が円柱翼部分に導入される。反対に内側端面のエンドプレートは円柱翼に導入される空気を減少させる。通常の翼型であれば半径方向のわずかな速度成分の変化は性能に大きな影響を与えないが、円柱翼風車においては内側エンドプレートの d_e の増加は縦渦形成領域に干渉し縦渦の安定形成に影響を与えたと考えられる。

次に、翼本数を増加させたときのエンドプレート直径と最大トルク係数の関係について検討する。図 10 は前項で用いた風車に関して翼本数 N を $N=2$ から 4, 8 本へと増加させた風車において得られた最大トルク係数を翼本数で除し、翼 1 本あたりの最大トルク係数とした結果である。エンドプレートは外側のみに取り付けた。図 10 (a) に示す主流速を $U=6\text{ m/s}$ とした結果では、どの翼本数においても d_e に対する $C_{q\max}/N$ は増加傾向となる。低風速の場合はエンドプレート設置により、より安定した縦渦の形成が促され、 d_e の増加により改善の効果が向上する。図 10 (b) や (c) では流速の増加によりエンドプレートがない ($d_e=20\text{ mm}$) 状態でも $C_{q\max}/N$ が向上するようになるため d_e の影響が小さくなる。ただし、図 10 (c) および (d) に示す $U=15, 20\text{ m/s}$ の結果では $N=8$ において d_e の増加により $C_{q\max}/N$ は低下する。これは翼本数の増加によって翼間距離が狭くなっている状態において、エンドプレート直径を増加させることで翼端部分の翼間距離がさらに狭くなり、隣接する翼による流れの影響を受けるようになったと考える。これらの結果より高風速では多翼化した場合にはエンドプレート直径をあまり大きくできないことがわかる。

Fig. 10 Relationship between blade tip diameter and maximum torque coefficient for each number of blades ((a) $U=6\text{ m/s}$, (b) $U=10\text{ m/s}$, (c) $U=15\text{ m/s}$, (d) $U=20\text{ m/s}$). As the number of blades increases, the torque increase with the increasing endplate diameter is suppressed. This tendency becomes stronger with an increase in wind speed. Increasing the blade tip diameter results in a larger decrease in maximum torque coefficient.

3・3 エンドプレート形状によるトルク特性の改善

Hemsuwan らは直線状の平板に沿って並進する円柱に対して数値解析を行い、円柱端部に設置するエンドプレートに対して後流側の一部を後流平板と平行になるように折り曲げてL字型とすることにより曲げ部分から新たな渦が流出し、駆動力を増加させることを示した。特に円柱直径 $d=20$ mm としたとき、翼長さ $l=80$ mm ($l/d=4$)、翼端直径 $d_e=50$ mm ($d_e/d=2.5$) とすると円柱単体に比べて揚抗比が 5.5 %改善すると報告している (Hemsuwan et al., 2018b)。そこで、Hemsuwan の示した L 字型エンドプレートを作製し、前節に示した円板型のエンドプレートとの比較を行う。Hemsuwan らの報告により L 字型エンドプレートの効果が得られるのは l/d が 4 以上の条件であるため、この節では $l=80$ mm の円柱翼について実験を行った。Hemsuwan らの L 字型エンドプレートは一方方向への直進運動する円柱に対する検討であった。単純な L 字型エンドプレートに加えて、風車として円柱翼が回転運動をすることを考慮し、翼端面に接する部分を回転方向に沿う円弧状とした円弧状 L 字型エンドプレートについても作製して比較を行った。

まず、翼長さを長くしたことによるエンドプレートの効果の変化を円板型エンドプレートで比較する。 $l=80$ mm と 60 mm の円柱翼に対して $d_e=50$ mm のエンドプレートを付けたときと付けないときの C_q - λ を比較した結果を図 11 に示す。主流速は $U=10$ m/s で一定とした。円柱翼の外側端部にエンドプレートを設置した結果を図 11 (a) に示し、さらに内側の端部にもエンドプレートを設置した結果を (b) に示す。図 11 (a) においてエンドプレートなしの結果と比較すると翼長 l を 80 mm に伸ばすことで C_q の値が大きく低下した。これはリング幅 $W=20$ mm に対して $d=20$ mm の円柱翼では $l/d=3$ の翼が最も高いトルクを発生するという Hemsuwan ら (Hemsuwan et al., 2021) の報告と同様の結果である。また、Hemsuwan らによると W/d が一定の条件で円柱を長くした場合、円柱のスパン方向中央部では揚力係数に変化がなく、端部に作用する負の揚力係数の領域が増加することが示されている。一方、この翼に外側のみにエンドプレートを取り付けると $l=60$ mm と 80 mm の差がかなり小さくなる。 $l/d=3$ 以上の翼長において性能が低下した原因が翼端の流れ場の影響であったことがわかる。翼長が長い方が翼端効果による性能低下がより顕著になるというのは一般的な感覚とは逆であるが、円柱では後縁部が負圧となるため翼端からスパン方向への流れが発生しやすい。スパン方向の流れが生じる範囲がかなり長く、60 mm から 80 mm に伸びた分は全てこの範囲に入ってしまう、負の効果が強まったものと考えられる。図 11 (b) に示す円柱翼の両端にエンドプレートを付けた場合 $l=60$ mm の翼では両端に取り付けることで λ の大きい領域では C_q が低下し性能が悪化する。これに対して $l=80$ mm の場合は設置位置によらずエンドプレートを設置することによって全体によく改善されており、内側のエンドプレートによる悪影響はそれ程大きくないことがわかる。

Fig. 11 Relation between torque coefficient and tip speed ratio for each blade tip shape ($U=10$ m/s, $N=2$, $l=60, 80$ mm, $d_e=50$ mm). The performance at $l=80$ mm is reduced because the drag at the wing tip increases with the increase in wing length. The performance is improved by installing an endplate at the outer tip end only. Installing the endplate on the inside in addition to the outside does not affect the stabilization of the longitudinal vortex but increases the drag.

図 12 にエンドプレートなし、および円板型、L 字型、円弧状 L 字型の各エンドプレートを外側端のみに付けた場合、内側端のみに付けた場合、そして両端に付けた場合の C_q - λ 特性を示す。翼本数は $N=2$ である。主流速は $U=10$ m/s 一定とした。図 12 (a) に示す外側翼端部にエンドプレートを設置した結果ではいずれの形状も円柱翼に比べて C_q は増加し大きな改善効果を示した。低回転側の挙動に着目するとより低回転まで安定して回るのは円板型であり、L 字型エンドプレート、円弧状 L 字型エンドプレートの順に低回転特性が悪化する。特に $\lambda=0.1$ 以下の範囲では L 字型エンドプレートおよび円弧状 L 字型エンドプレートで回転が停止する。 λ に対する C_q の減少率（負のこう配）に着目すると、L 字型エンドプレート、円板型、円弧状 L 字型エンドプレートの順に低下する。すなわち、高回転時は回転半径に合わせた同心円状の円弧型とすることで回転抵抗を抑制し、より高い回転数まで回転するようになる。図 12 (b) は内側翼端部のみにエンドプレートを設置した結果を示す。円板型エンドプレートはエンドプレートなしの結果とほぼ同じ直線上にプロットされるが、回転可能な λ の範囲がかなり狭くなり、結果として C_{qmax} は小さくなっている。一方、L 字型および円弧状 L 字型のエンドプレートを設置すると高回転で回転するようになる。その効果は回転抵抗を減らした円弧状 L 字型よりも平板を折り曲げた L 字型のほうが高く、高回転域まで回る。いずれも円板型と同様に低回転側では安定して回転せず、回転可能な λ の範囲はかなり狭い。L 字型および円弧状 L 字型のエンドプレートは翼端の端板部と曲げた下流平板部で構成されることから、高回転時には下流平板部に導入される流れを利用することができるが、低回転時には流れを乱すことでトルク特性を悪化させる。図 12 (c) に示す両側翼端部にエンドプレートを設置した結果では円板型の場合は内側のエンドプレートによる性能悪化の影響はそれ程大きくないのに対し、L 字型、円弧状 L 字型では内側のエンドプレートの特性が大きく表れた。円弧状 L 字型では内側のみの設置よりも両側に設置したほうが悪化するという結果となった。これにより、エンドプレートを外側と内側の端面に取り付ける場合、それぞれのエンドプレートの効果の単純な足し算ではトルク特性を表すことができないことが明らかとなった。

λ が小さい領域では回転数が小さく、円柱翼の周速度が小さい。円柱翼が静止している場合、ネックレス渦は後流平板と円柱のすき間の前後に周期的に形成される。円柱が一方向に回転し周速度を得ることで円柱に対して流れは相対迎角を持つことになる。1 章で述べたように、相対迎角が生じることでネックレス渦が円柱の進行方向後方に定在的に形成される。これが縦渦風車の原理となるが回転数が低い場合、周速度が小さくネックレス渦を安定して定在させることが難しくなるため回転が停止する。すなわち、本実験で行ったように負荷を増加させ低回転数にすると縦渦の形成が不安定となる。したがって、縦渦により駆動される円柱翼風車の翼端流れの制御による性能改善としては、図 6～8 に示した通常の風車でも適用できる流動抵抗を抑制して回転速度を増加するという効果に加えて、低回転速度における縦渦の安定形成を促進させることでより低回転で回転可能とする効果がある。回転数が下がるほど線形的にトルクが増加する特徴を有することから低回転域まで安定して回転できる

Fig. 12 Relation between torque coefficient and tip speed ratio for each blade tip shape ($U=10$ m/s, $N=2$, $l=80$ mm, $d_c=50$ mm). The curvature in the bent part of the endplate does not affect the increase of the torque coefficient. By changing the blade tip shape, the characteristics of the circular cylinder blade wind turbine can be changed from the low speed and high torque to the high speed and low torque.

ことは高負荷においても起動できるトルクが発生することを意味し、低回転高トルクの特徴をより強く示すこととなり風車としての実用性の向上に大きく寄与する。一方、ネックレス渦により駆動される風車であるため、図 11 および 12 に示すように外側と内側の翼端の流れ場がネックレス渦形成に悪影響を与える場合、どちらかが性能を改善する効果があったとしても悪影響を与える側の影響が支配的となり風車としての特性が悪化する。翼端の流れ場が翼全体の流れに対して大きく影響する点で、通常の風車とは性質が大きく異なることが明らかとなった。

4. 結言

縦渦により駆動される円柱翼風車では翼端の流れ場により風車のトルク特性が大きく影響を受ける。翼端にエンドプレートを付けることによりトルク係数の値を大きくできるとともに非常に低回転まで安定して回転力を得ることができるようになることを実験により明らかにした。翼端に取り付けるエンドプレートの効果について新たに以下の知見を得た。

円柱翼風車においてはフェアリングあるいはエンドプレートの設置により高負荷においても安定して低回転で回転できるようになるとともに、高速回転時の抵抗を低減し最高回転数を増加させることが可能となる。ただし、円柱翼の直径に対して適した形状と大きさが存在し、フェアリングの場合は円柱翼の直径より幅が太い場合にはトルク係数を低下させる。円板型エンドプレートの場合は円柱直径の 2.5 から 3 倍程度の直径のものを外側の翼端のみに取り付けることで最大 20% 程度のトルク係数の向上が得られる。多翼化に際しては、高風速では翼枚数が増加すると直径の大きなエンドプレートでは改善効果が減少する場合がある。Hemsuwan らの数値計算により予測された L 字型のエンドプレートは円板型よりも高回転側に特性をシフトさせる効果があり、同じ先端周速比においてトルク係数を増加させる。しかし、安定して回転する下限の回転数が高くなり、結果として高負荷時に得られる最大トルク係数の値は低下する。また L 字型のエンドプレートを回転に沿う円弧状とした場合、L 字型に比べてトルク係数の増加が抑制された。

エンドプレートを円柱翼の外側と内側の翼端に取り付けたとき、その効果は外側のみに取り付けたときの効果と内側のみに取り付けたときの効果を重ね合わせた結果にはならない。内側に取り付けたエンドプレートがネックレス渦の安定形成に悪影響を与える場合、外側のエンドプレートの性能改善効果にかかわらず内側のエンドプレートの影響がトルク特性を支配し、性能を悪化させる。特に、高負荷による低回転数での回転を阻害し高トルクが得にくくなる。

文 献

- 裴憲民, 高橋勉, 白樫正高, 下流に設置された円柱によるカルマン渦励振抑制効果, 日本機械学会論文集B編, Vol.59, No. 557 (1993), pp.1-7.
- Hemsuwan, W., Sakamoto, K. and Takahashi, T., Numerical investigation of lift-force generation on a moving circular cylinder in a uniform flow driven by longitudinal vortex, Journal of Fluids and Structures, Vol. 83, Issue 20 (2018a), pp.448-470.
- Hemsuwan, W., Sakamoto, K. and Takahashi, T., Lift Force Generation of a Moving Circular Cylinder with a Strip-Plate Set Downstream in Cruciform Arrangement: Flow Field Improving Using Tip Ends, International Journal of Aeronautical and Space Sciences, Vol. 19, Issue 3 (2018b), pp.606-617.
- Hemsuwan, W., Sakamoto, K. and Takahashi, T., Steady lift-force generation on a circular cylinder utilising a longitudinal vortex: Influence of geometrical parameters, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 212 (2021), 104612.
- 加藤直人, 小出瑞康, 高橋勉, 白樫正高, 円柱の下流に十字交差配置された帯状の平板による振動制御 (第1報, 固定系からの縦渦流出), 日本機械学会論文集B編, Vol. 73, No. 728 (2007), pp.957-964.
- Kato, N., Koide, M., Takahashi, T. and Shirakashi, M., VIVs of a circular cylinder with a downstream strip-plate in cruciform arrangement, Journal of Fluids and Structures, Vol. 30 (2012), pp.97-114.
- Koide, M., Ootani, K., Yamada, S., Takahashi, T. and Shirakashi, M., Vortex excitation caused by longitudinal vortices shedding from cruciform cylinder system in water flow, JSME International Journal, Series B, Fluids and Thermal

- Engineering, Vol. 49, No. 4 (2006), pp.1043-1048.
- Koide, M., Takahashi, T., Shirakashi, M. and Salim, S. A. Z. B. S., Three-dimensional structure of longitudinal vortices shedding from cruciform two-cylinder systems with different geometries, *Journal of Visualization*, Vol. 20, Issue 4 (2017), pp.753–763.
- 小出瑞康, 高橋勉. 白樫正高, 風洞実験における低流速測定を目的としたリング流速計の試作, *日本機械学会論文集B編*, Vol. 67, No. 657 (2001), pp.1105-1111.
- Nasef, M.H., El-Askary, W.A., AbdEL-hamid, A.A. and Gad, H.E., Evaluation of Savonius rotor performance: static and dynamic studies. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 123 (2013), pp.1–11.
- Nicolas T., Christian B. and Nikolaus A. A., Numerical Analysis of a Rotating Cylinder with Spanwise Disks, *AIAA Journal* Vol.50, No.2 (2012), pp.271-283.
- 西沢良史, 鈴木政彦, 谷口英人, 牛山泉, 翼端板を有する低周速比型の水平軸小型風車に関する実験的研究, *風力エネルギー*, Vol.33, No.2 (2009a), pp.98-103.
- 西沢良史, 鈴木政彦, 谷口英人, 牛山泉, 垂直軸型風車の実験的研究, *日本機械学会論文集B編*, Vol.75, No.751 (2009b), pp.164-166.
- 大屋裕二, 風レンズ風車という新しい風力発電システム, *日本風工学会誌*, Vol.36, No.1 (No.126) (2011), pp.19-22.
- 坂本夏澄, 宇高啓太, Withun Hemsuwan, 高橋勉, 縦渦の定常揚力により駆動する円柱翼風車の開発, *日本機械学会論文集* Vol.87, No.894 (2021a), DOI:10.1299/transjsme.20-00365.
- 坂本夏澄, Withun Hemsuwan, 高橋勉, 縦渦の定常揚力により駆動する円柱翼風車の抗力特性, *日本機械学会論文集* Vol.87, No.894 (2021b), DOI: 10.1299/transjsme.20-00375.
- Shirakashi, M., Bae, H. M., Sano, M. and Takahashi, T., Characteristics of periodic vortex shedding from two cylinders in cruciform arrangement, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 8, Issue 3 (1994), pp.239-256.
- Takahashi, T., Baranyi, L. and Shirakashi, M., Configuration and frequency of longitudinal vortices shedding from two circular cylinders in cruciform arrangement, *可視化情報学会学会誌*, Vol. 19, No. 75 (1999), pp.328-336.
- 高橋勉, 吉武裕美子, 小又直, 植木由記子, 流体発電用回転装置および流体発電装置, 特願 2016-568339 (2016).
- Takahashi, T., Yoshitake, Y., Sakamoto, K. and Hemsuwan, W., An innovative wind/water turbine with circular propeller driven by longitudinal vortex, *Proceedings of the 15th WVEC2016 TOKYO conference* (2016), PS-A-5.
- Wenjun G., Daniel N., Zhenxia L. and Yaguo L., Numerical investigation off low around one finite circular cylinder with two free ends, *Ocean Engineering*, Vol.156 (2018), pp.373-380.

References

- Bae, H. M., Takahashi, T. and Shirakashi, M., Suppression of Karman vortex excitation of a circular cylinder by another cylinder located downstream in cruciform arrangement, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.59, No. 557 (1993), pp.1-7 (in Japanese).
- Hemsuwan, W., Sakamoto, K. and Takahashi, T., Numerical investigation of lift-force generation on a moving circular cylinder in a uniform flow driven by longitudinal vortex, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 83, Issue 20 (2018a), pp.448-470.
- Hemsuwan, W., Sakamoto, K. and Takahashi, T., Lift Force Generation of a Moving Circular Cylinder with a Strip-Plate Set Downstream in Cruciform Arrangement: Flow Field Improving Using Tip Ends, *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 19, Issue 3 (2018b), pp.606-617.
- Hemsuwan, W., Sakamoto, K. and Takahashi, T., Steady lift-force generation on a circular cylinder utilising a longitudinal vortex: Influence of geometrical parameters, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 212 (2021), 104612.
- Kato, N., Koide, M., Takahashi, T. and Shirakashi, M., Vibration control for a circular cylinder by a strip-plate set downstream in cruciform arrangement : 1st report, Influence of a downstream strip-plate on the shedding of longitudinal vortices from fixed system, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 73, No. 728 (2007), pp.957-964 (in Japanese).
- Kato, N., Koide, M., Takahashi, T. and Shirakashi, M., VIVs of a circular cylinder with a downstream strip-plate in cruciform arrangement, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 30 (2012), pp.97-114.
- Koide, M., Ootani, K., Yamada, S., Takahashi, T. and Shirakashi, M., Vortex excitation caused by longitudinal vortices shedding from cruciform cylinder system in water flow, *JSME International Journal, Series B, Fluids and Thermal Engineering*, Vol. 49, No. 4 (2006), pp.1043-1048.

- Koide, M., Takahashi, T., Shirakashi, M. and Salim, S. A. Z. B. S., Three-dimensional structure of longitudinal vortices shedding from cruciform two-cylinder systems with different geometries, *Journal of Visualization*, Vol. 20, Issue 4 (2017), pp.753-763 (in Japanese).
- Koide, M., Takahashi, T. and Shirakashi, M., Development of a ring-type vortex anemometer for low-velocity wind tunnel experiment, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 67, No. 657 (2001), pp.1105-1111 (in Japanese).
- Nasef, M.H., El-Askary, W.A., AbdEL-hamid, A.A. and Gad, H.E., Evaluation of Savonius rotor performance: static and dynamic studies, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 123 (2013), pp.1–11.
- Nicolas T., Christian B. and Nikolaus A. A., Numerical Analysis of a Rotating Cylinder with Spanwise Disks, *AIAA Journal* Vol.50, No.2 (2012), pp.271-283.
- Nishizawa, Y., Suzuki, M., Taniguchi, H. and Ushiyama, I., An experimental study on the low tip speed ratio type Horizontal-axis small wind turbines with winglets, *Journal of JWEA*, Vol.33, No.2 (2009a), pp.98-103 (in Japanese).
- Nishizawa, Y., Suzuki, M., Taniguchi, H. and Ushiyama, I., An experimental study of vertical-axis wind turbines, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.75, No.751 (2009b), pp.164-166 (in Japanese).
- Ohya, Y., New wind turbine with wind-lens technology, *Wind Engineers, JAWE*, Vol.36, No.1 (No.126) (2011), pp.19-22 (in Japanese).
- Sakamoto, K., Udaaka, K., Hemsuwan, W. and Takahashi T., Development of circular cylinder blade wind turbine driven by longitudinal vortex, *Transactions of the JSME (in Japanese)*, Vol. 87, No. 894 (2021a), DOI:10.1299/transjsme.20-00365.
- Sakamoto, K., Hemsuwan, W. and Takahashi T., Drag force of circular cylinder blade wind turbines driven by steady lift force of longitudinal vortex, *Transactions of the JSME (in Japanese)*, Vol. 87, No. 894 (2021b), DOI: 10.1299/transjsme.20-00375.
- Shirakashi, M., Bae, H. M., Sano, M. and Takahashi, T., Characteristics of periodic vortex shedding from two cylinders in cruciform arrangement, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 8, Issue 3 (1994), pp.239-256.
- Takahashi, T., Baranyi, L. and Shirakashi, M., Configuration and frequency of longitudinal vortices shedding from two circular cylinders in cruciform arrangement, *Journal of the Visualization Society of Japan*, Vol. 19, No. 75 (1999), pp.328-336.
- Takahashi, T., Yoshitake, Y., Komata, N. and Ueki, Y., Rotary device for fluid power generation and fluid power generation Device, Japanese Patent Application No.2016-568339 (2016) (in Japanese).
- Takahashi, T., Yoshitake, Y., Sakamoto, K. and Hemsuwan, W., An innovative wind/water turbine with circular propeller driven by longitudinal vortex, *Proceedings of the 15th WWEC2016 TOKYO conference* (2016), PS-A-5.
- Wenjun G., Daniel N., Zhenxia L. and Yaguo L., Numerical investigation off low around one finite circular cylinder with two free ends, *Ocean Engineering*, Vol.156 (2018) pp.373-380.