

縦渦により駆動する円柱翼水平軸風車に関する基礎研究

Basic Study on the Circular Cylinder Blade Horizontal Axis Wind Turbine Driven by the Longitudinal Vortex

研究代表者 呉工業高等専門学校 機械工学分野 教授 野村高広

Takahiro Nomura

Energy demand is increasing rapidly due to population growth and the electrification, and in recent years there is a concern about the depletion of energy resources. It is anticipated that the development of alternative energy is urgently needed, and there is a demand for the construction of a power generation system using renewable energy such as wind power generation and solar power generation. Wind power generation is currently being built around the world. However, in Japan, the depth of water near Japan is so deep that it is difficult to install wind turbines on the ocean, and the effects of typhoons are behind its introduction. Therefore, focusing on the wind turbine that are small and have high strength, and research have conducted to elucidate their basic characteristics. This wind turbine is driven by a longitudinal vortex, and was devised by Takahashi et al. in 2016, and the principle and basic characteristics of the wind turbine were reported. However, the efficiency of the wind turbine is low, and many of its basic characteristics have not been elucidated. In this study, two triangular bars were attached to the surface of a circular cylinder blade in order to examine how the triangular bars develop longitudinal vortex. As a result, it was found that when the triangular bars were placed at 120° and -60° , the increase in the efficiency of the wind turbine was about 67% compared to the result without the triangular bars. This increase should have happened because the two triangular bars increased the flow velocity near the blade and strengthened the longitudinal vortex.

要旨

縦渦により駆動する円柱翼水平軸風車に着目し、その実用化に向けた風車効率の改善を目的とする。本風車のこれまでの研究では、円柱翼の直径や本数、円柱翼とその後方に配置されたリング状平板との隙間距離といった基本パラメータの特性について調査してきた。著者らは、円柱翼の風下側に生成される縦渦の発生起点を制御し、風車効率の改善に直結する縦渦を効果的に生成する目的で円柱翼表面に三角柱を装着することで、風車効率が改善される取り付け位置が存在することを確認してきた。そこで本研究では、三角柱を円柱翼表面に2本装着した場合について、2本の三角柱の取り付け配置が風車効率に及ぼす影響について調査し、最適な配置があることを明らかにした。

1. まえがき

人口の増加や電化の影響などによりエネルギー需要は急激に増加しており、近年ではエネルギー資源の枯渇が危惧されている。可採年数が特に短いとされている石油や天然ガスでは約50年と予想されており、これらに代わるエネルギーの開拓が急務とさ

れる。その中で、風力発電や太陽光発電などといった再生可能エネルギーを用いた発電システムの構築が求められている。再生可能エネルギーの中でも現在世界中で構築が進んでいるのが風力発電である。風力発電は昼夜を問わず風により発電可能であり、更に洋上や山間部など、比較的導入に場所を選ばないことから世界中で導入が進んでいる。特に近年では北海の遠浅の地形を生かし、洋上に大型の風車が立て続けに導入されており、欧州が風力で賄う電気の割合は大きく増加している。しかし、日本では日本近海の水深が深く、洋上における風車の設置が困難である問題や、設置面積が十分にないことや台風の影響などから導入が海外に比べて遅れている。また、従来のプロペラ型の風車では騒音や動物との接触事故、翼が破損した際の広範囲への破損物の散乱が発生しており、風車の根本的な改善が求められている。このような状況から、日本の実情に合うような風車の研究が進められている。そこで小型でも高強度を有した円柱翼風車に注目し、その基礎特性を解明するために基礎研究を行った^{(1)~(3)}。この風車は縦渦により駆動する水平軸風車で、2016年に長岡技術科学大学の高橋らによって発案され、原理及び基

礎特性が報告されている^{(4)~(9)}. しかし、円柱翼風車は風車効率が悪く、また基礎的な特性の詳細は解明されていない. そこで現在は、実用化に向けて風車効率の向上を目的に研究を行っている.

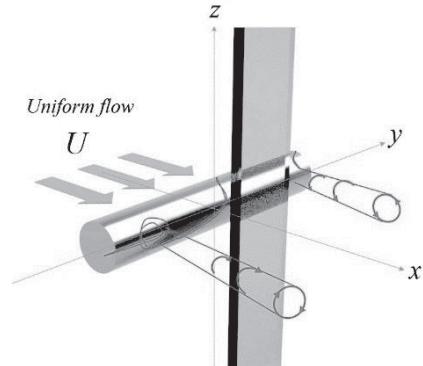
これまでの研究では、円柱翼の長さ円柱翼の直径、円柱翼とその後方に配置されたリング状平板との隙間の比である隙間比といった円柱翼風車の基本的なパラメータについての最適値が求められてきた. また先行研究により、円柱翼に風を誘導する目的で三角柱を1本装着し、従来の風車効率より改善される取り付け角度が見出された^{(10), (11)}. 本研究では、三角柱がどのように円柱翼風車の駆動源である縦渦を発達させるのかを考察し、三角柱を1枚の円柱翼に2本取り付けた場合について、円柱翼の表面に装着する三角柱の取り付け位置（角度）が風車に及ぼす影響について検証した.

2. 実験方法

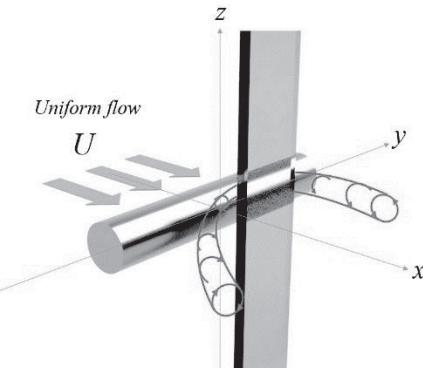
2.1 円柱翼風車の駆動原理

通常、円柱が一様流中に置かれた場合には、後方にカルマン渦と呼ばれる横渦が発生する. しかし、カルマン渦を遮るように円柱翼の後方にリング状平板を交差させて設置することで、円柱翼とリング状平板の交差部分においてネックレス型、あるいはトレーリング型の縦渦（図1参照）が形成される. カルマン渦と同様に渦は円柱翼の後方に交互に発生し、渦の発生した方向とは逆方向に円柱翼が力を受ける. そこで円柱翼は揺動し、揺動をきっかけにして渦が定在的に一方に発生すると、一定の角速度に安定するまで回転を続ける. 回転方向は初期の回転方向に依存し、円柱翼の形状が風向に対して対称である場合は左右どちらにも同じ確率で回転する.

実験に用いた円柱翼風車の外観および各種パラメータを図2に示す. この風車は水平軸風車であり、翼となる円柱の後方にリング状の平板が円柱翼の回転軌道の中央に配置されている. 円柱翼は回転軸とシャフトでつながっている. パラメータの中にはこれまでの研究により最も効率の良いと考えられる条件が定まっているものもあるが、新しい方式の風車であるため多くは解明されていない.

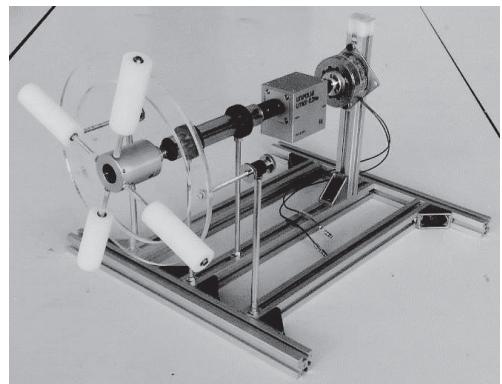


(a) Trailing vortex

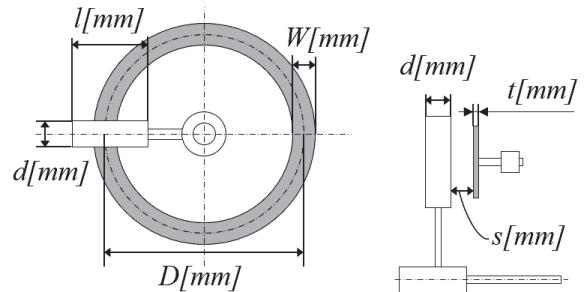


(b) Necklace vortex

Fig. 1 Longitudinal vortices generated by flat plate



(a) Appearance of experimental equipment ($N=4$)



(b) Various parameters

Fig. 2 Outline of experimental equipment

2.2 風洞実験装置概要と計測システム構成

本研究の実験には小型風洞実験装置を用いた。装置の概略図及び仕様を図3、表1に示す。風洞装置は開放吸い込み型の風洞で、空気を吸入口からディフューザにより加速させ、ハニカムによって整流し、実験エリアを通過する。この実験エリア内に円柱翼風車を設置し特性実験を行った。本研究で用いた計測システムの構成図を図4に示す。風車の回転軸に電磁ブレーキ(HB0.5, OGURA CLUTCH Co., Ltd.)を接続し、電源装置(AD-8722D, A&D Co., Ltd.)により電圧を調整することで風車の回転に負荷を掛け、回転数を制御する。その際に電磁ブレーキと同様に回転軸に取り付けた回転トルクメータ(UTM II-0.2Nm, UNIPULSE Co., Ltd.)により、回転数、トルク及び動力が計測され、トルクモニタ(TM201, UNIPULSE Co., Ltd.)を介してPCに出力される。各回転数での計測データは、5秒間で1500個のサンプルを取得し、それらを平均したものを代表値とした。

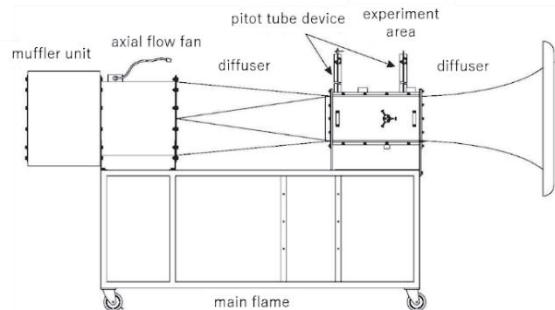


Fig. 3 Appearance of wind tunnel device

Table. 1 Specification of wind tunnel device

Length	3700mm
Depth	1065mm
Height	1900mm
Experiment area	height305mm×depth305mm×length600mm
Flow rate	0~36m/s(0~130km/h)
Control method	Motor drive control
Power supply	3-phase AC200V,26A,50/60Hz

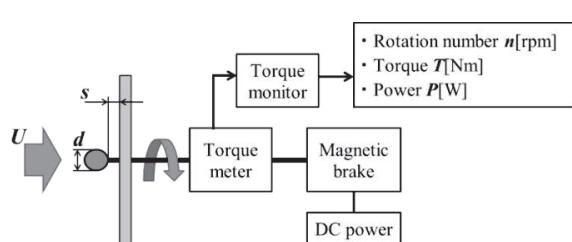
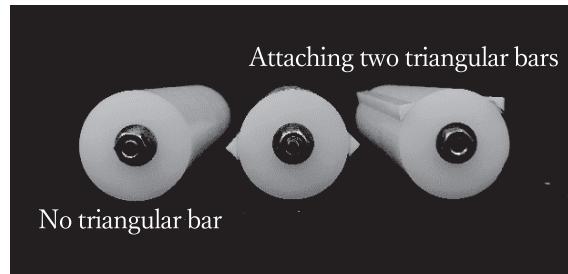


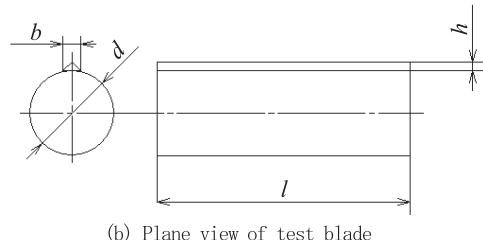
Fig. 4 Outlines of the measurement system

2.3 円柱翼および実験条件

本実験で用いた円柱翼の外観を図5に示す。円柱翼は直径20mm、翼長60mmの大きさに樹脂製の丸棒から削り出して製作し、円柱翼表面に装着した三角柱は模型用樹脂棒を使用し、両面テープにより固定した。使用した三角柱は頂角が90°の二等辺三角形の形状で、等辺が3mmであり、底辺部分を円柱翼に取り付けるように装着したため、底辺からの三角柱高さ $h=2.1\text{ mm}$ 、底辺の幅 $b=4.2\text{ mm}$ となる。2本の三角柱の取り付け角度は、図6に示すように風向に平行な線と円柱翼の中心から三角柱の90°の角の頂点に伸ばした線がなす角を1本目は θ_1 、2本目は θ_2 と定め、風向に平行な下流側を0°とし、翼上部側を正の値で90°、翼下部側を負の値で-90°と表し、風向上流側を180°(-180°)とした。なお、三角柱を装着した円柱の製作には、3Dプリンタを利用して比較的精度よく製作することもできたため、研究後半では3Dプリンタによる製作に移行した。



(a) Appearance of test blades



(b) Plane view of test blade

Fig. 5 Specification of Experiment blades

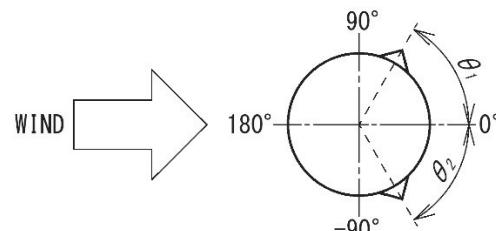


Fig. 6 Mounting angle

本研究では三角柱の取り付け角度をパラメータとして実験を行った。2本の三角柱の取り付け方により下記の条件(1)(2)の2通りの場合での実験を行つた。表2に本研究の実験条件をまとめる。

条件(1)：1本目の取り付け角度は 20° から 160° までの範囲で 10° ピッチで変更を行い、2本目の三角柱は風向に平行な線に対して線対称になるように上下に三角柱を取り付けた場合。

条件(2)：1本目の取り付け位置と円周上の正反対である 180° の開きになる様に2本目を取り付けて 0° から 90° にかけて 10° ピッチで変更し検証する場合。

Table. 2 Experimental conditions

Wind speed U [m/s]	10
Blade diameter d [mm]	20
Blade length l [mm]	60
Gap ratio s/d [-]	0.35
Ring diameter D [mm]	155
Ring width W [mm]	20
Ring thickness t [mm]	5.5
Number of wings N [-]	4
Triangular bar width b [mm]	4.2
Triangular bar height h [mm]	2.1
(1)Mounting angle $\theta_1(\theta_2=-\theta_1)$ [°]	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160
(2)Mounting angle $\theta_1(\theta_2=\theta_1-180)$ [°]	90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180

2.4 風車の性能評価

風車の性能の指標となる周速比 λ とパワー係数 C_p は、それぞれ式(1)および(2)で定義される。 λ と C_p は無次元数、 U [m/s]は風速、 $\omega=(2\pi n)/60$ [rad/s]は角速度、 $R=(D+1)/2$ [m]は円柱翼先端半径、 ρ [kg/m³]は流体密度、 A [m²]は円柱翼回転時の投影面積とする。このときの投影面積は、円柱翼の有効長さが全長でないためリング状となる。回転数 n 、動力 P は実験により測定される。

$$\lambda = \frac{U}{\omega R} \quad (1)$$

$$C_p = \frac{P}{0.5\rho U^3 A} \quad (2)$$

3. 結果と考察

3.1 条件(1) ($\theta_2=-\theta_1$)

風向に対して対称に三角柱を取り付けた場合の周速比 λ とパワー係数 C_p のグラフを図7に示す。また、 $\theta_1=90^\circ$ を超える各条件のパワー係数の最大値のみを取り出したグラフを図8に示す。対称に取り付けた場合では、取り付け角度が 80° 以下となる流れの下流側に三角柱を取り付けた条件においては、すべて回転しなかった。これは、縦渦が発生するために円柱翼の両側からの風の巻き込みが必要であり、図9のように下流側に三角柱を取り付けた場合では三角柱の取り付け位置で風が剥離してから円柱翼後方で巻き込むまでの距離が短くなり、結果的に渦が片側ではなく両端で発生することが原因と考えられる。前方に取り付けた場合では、 $\theta_1=110^\circ$ から 130° に對象に取り付けた条件において、三角柱を取り付けなかった場合に比べてパワー係数が向上した。特に $\theta_1=110^\circ$ と $\theta_2=-110^\circ$ に三角柱を取り付けた場合でパワー係数が最大となった。これは、三角柱によって風がより円柱翼の外側を回り込んで後方で渦を発生させることで、渦の発達が促されたことが原因と考えられる(図10参照)。円柱翼を回り込む風がより外側から回り込むことで渦が発達し効率が上がる結果は、先行研究である円柱翼の翼直径を変更した場合の影響においても直径を大きくした際にパワー係数が上昇する結果が出ており、三角柱によって同様の原理で渦を発達させることができたと推測される。

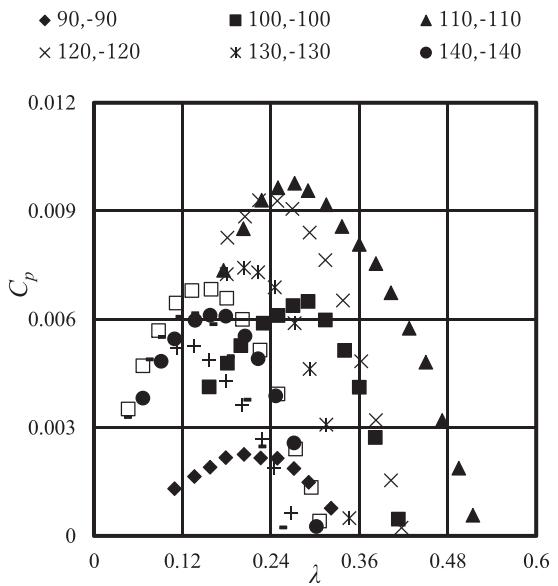


Fig. 7 $\lambda-C_p$ curve ($\theta_2=-\theta_1$)

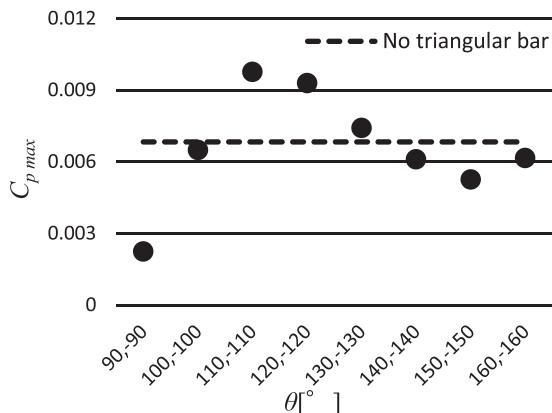


Fig. 8 θ - C_p _{max} curve ($\theta_2 = -\theta_1$)

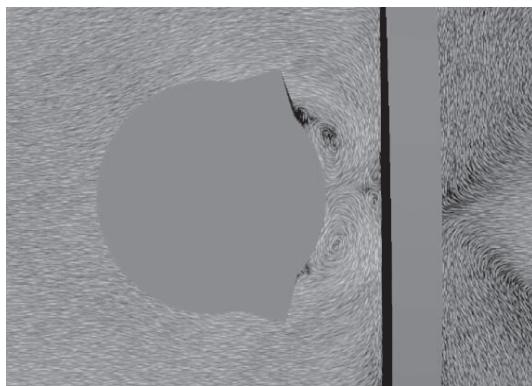


Fig. 9 Flow velocity around the circular cylinder blade with two triangular bars attached ($\theta_1 = 60^\circ$, $\theta_2 = -60^\circ$)

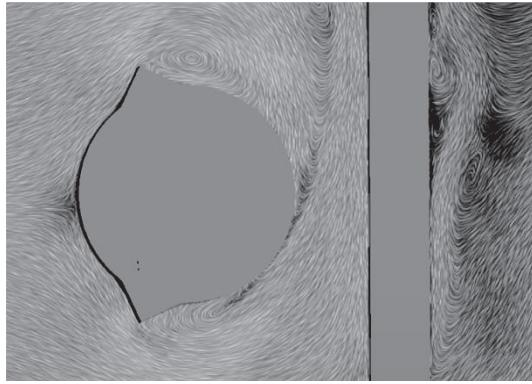


Fig. 10 Flow velocity around the circular cylinder blade with two triangular bars attached ($\theta_1 = 110^\circ$, $\theta_2 = -110^\circ$)

3.2 条件(2) ($\theta_2 = \theta_1 - 180^\circ$)

三角柱を円周上の反対の位置に取り付けた場合の周速比 λ とパワー係数 C_p のグラフを図 11 に示す。また、各条件のパワー係数の最大値を取り出したグラフを図 12 に示す。通常の円柱翼風車では回転方向は初期の揺動運動に依存し、左右どちらにも回転す

るが、風向に対して対称に三角柱を取り付けない場合、回転方向が固定され、渦が一方の円柱の端でのみ発生していると考えられる組み合わせが存在した。円周上の正反対の位置に取り付けた場合では、 $\theta_1=110^\circ$, $\theta_2=-70^\circ$ の取り付け角度から、 $\theta_1=140^\circ$, $\theta_2=-40^\circ$ までの 4 つの実験条件で三角柱を取り付けない場合よりパワー係数が向上した。その中でも $\theta_1=120^\circ$, $\theta_2=-60^\circ$ で取り付けた場合が最もパワー係数が高い値となり約 67% の向上が見られた。先行研究で三角柱が 1 本の場合、 60° に取り付けた際に円柱翼後方にできる渦が発達する傾向にあることは示されており^{(10), (11)}、本実験でも同様の位置で効率の向上が見られた。また本実験では、風向に對象に三角柱を取り付けた場合と同様に、風向の上流側の三角柱により円柱翼の直径よりも大きく風が回り込んだことで、円柱翼の両端で発生する風速の差が大きくなり、渦の発達をさらに促進させたと推測される。一方、特にパワー係数の低下が著しかった $\theta_1=150^\circ$ の条件では、 $\theta_2=-30^\circ$ に取り付けた三角柱が渦の発生しない面から回り込んだ流れを阻害してしまい、渦の発達が抑制されたことがパワー一定数低下の原因と考えられる。また、 $\theta_1=180^\circ$, $\theta_2=0^\circ$ に取り付けた場合では、回転方向に翼の投影面積が増加したこと、回転の際の空気抵抗をより受けようになったことがパワー係数の低下につながっていると推測される。

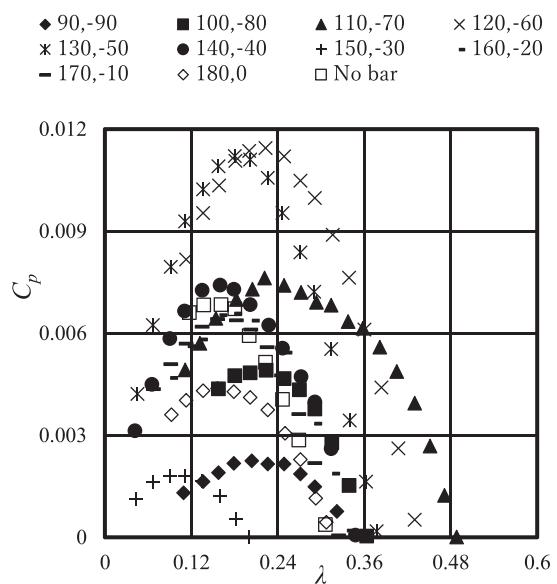


Fig. 11 λ - C_p curve ($\theta_2 = \theta_1 - 180^\circ$)

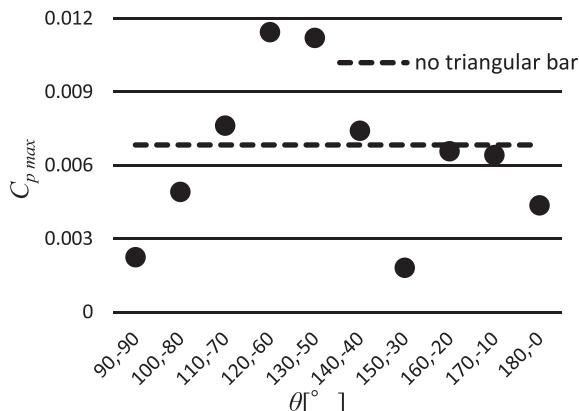


Fig. 12 θ - $C_{p\max}$ curve ($\theta_2 = \theta_1 - 180^\circ$)

4. まとめ

本研究では、円柱翼風車の円柱翼表面に三角柱を2本装着し、風車効率の特性実験を行った。三角柱の取り付け位置（角度）が風車性能にどのような影響があるかを検証した。本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 風向に対して対称に2本の三角柱を取り付けた場合、取り付け角度 $\theta_1=110^\circ$, $\theta_2=-110^\circ$ において $C_{p\max}$ が高い値を示した。
- (2) 2本の三角柱を正反対の位置に取り付けた場合、 $\theta_1=120^\circ$, $\theta_2=-60^\circ$ に取り付けた時に $C_{p\max}$ が高い値を示し、約 67% の向上が見られた。
- (3) 2本の三角柱の取り付け位置によっては、縦渦の発達を阻害してしまう条件もあり、この条件では風車効率が著しく低下する。

謝辞

本研究はマツダ研究助成金(19KK-192)の助成を受け実施することができたものであり、ここに深く感謝の意を申し上げます。

本研究の風洞実験や流体シミュレーションの遂行にあたり、呉工業高等専門学校卒業生の木村祐也君、三京拓弥君、藤本健明君に感謝の意を表します。

発表論文

- [1] 藤本健明(指導学生), 野村高広(研究代表者), 山田祐士, 尾川茂: 縦渦を駆動力とする円柱翼水平軸風車の基礎特性(円柱翼の表面に装着した三角柱の影響), 日本設計工学会2020年度秋季大会研究発表講演会講演論文集, pp. 5-8, 2020年10月, リモート開催。

- [2] Kenmei FUJIMOTO(指導学生), Takahiro NOMURA(研究代表者), Yuji YAMADA, Shigeru OGAWA: Basic Characteristics of the Wind Turbine with the Circular Cylinder Blades Driven by Longitudinal Vortex (Effects of Triangular Bars Mounted on the Surface of the Circular Cylinder Blade), 5th STI-GIGAKU 2020, pp. 38, 2020.10, リモート開催。

参考文献

- (1) 三京拓弥ほか2名: 縦渦により駆動する円柱翼風車の製作と実験, 呉工業高等専門学校・機械工学科卒業研究論文集, pp102-107, 2018年2月。
- (2) 大室拓也: 縦渦により駆動する円柱翼風車に関する研究, 呉工業高等専門学校・専攻科特別研究論文集, pp7-11, 2018年3月。
- (3) 秋本康平ほか1名: 縦渦により駆動する円柱翼風車の基礎特性, 呉工業高等専門学校・機械工学科卒業研究論文集, pp1-5, 2019年3月。
- (4) T. Takahashi et al., "A novel wind / water turbine with circular cylinder blades driven by steady lift force caused by longitudinal vortex," JSME Fluids Engineering Conference, No. 0617, Nov. 2016.
- (5) K. Sakamoto et al., "Performance test of a novel wind turbine propeller with circular blades driven by longitudinal vortex," JSME Fluids Engineering Conference, no. 0618, Nov. 2016.
- (6) K. Sakamoto et al., "ENHANCEMENT OF EFFICIENCY OF A NEW HORIZONTAL TYPE TURBINE DRIVEN BY LONGITUDINAL VORTEX," 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, TFEC9-1421, Oct. 2017.
- (7) W. Hemsuwan et al., "LONGITUDINAL VORTEX WIND TURBINE: EFFECT OF THE BLADE LENGTHS," Fluid-Structure-Sound Interactions and Control, Springer, pp. 117-123, May. 2018.
- (8) W. Hemsuwan et al., "LIFT FORCE GENERATION OF A MOVING CIRCULAR CYLINDER WITH A STRIP PLATE SET DOWNSTREAM IN CRUCIFORM ARRANGEMENT: FLOW FIELD IMPROVING IN TIP-ENDS," International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 19(3), pp. 606-617, Aug. 2018.
- (9) W. Hemsuwan et al., "A LONGITUDINAL VORTEX WIND TURBINE: NUMERICAL STUDY," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 180, pp. 213-230, Sep. 2018.
- (10) 木村祐也: 縦渦により駆動する円柱翼風車の基礎特性, 呉工業高等専門学校・専攻科特別研究論文集, pp1-6, 2019年3月。
- (11) 三京拓弥: 縦渦により駆動する円柱翼風車における円柱翼表面の突起物の影響, 呉工業高等専門学校・専攻科特別研究論文集, pp43-48, 2019年3月。