

縦渦によって駆動する円柱の検討

Study on shape of tip end of circular cylinder blades wind turbine driven by longitudinal vortex

- 仲田翔太, 長岡技科大, 新潟県長岡市上富岡町 1603-1, E-mail: s153066@stn.nagaokaut.ac.jp
- 坂本夏澄, 長岡技科大, 新潟県長岡市上富岡町 1603-1
- Hemsuwan Withun, スラナリ工科大, タイ ナコンラチャシマ県
- 高橋 勉, 長岡技科大, 新潟県長岡市上富岡町 1603-1
- Shota Nakada, Nagaoka University of technology, 1603-1, Nagaoka City, Niigata, Japan
- Kasumi Sakamoto, Nagaoka University of technology, 1603-1, Nagaoka City, Niigata, Japan
- Withun Hemsuwan, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand
- Tsutomu Takahashi, Nagaoka University of technology, 1603-1, Nagaoka City, Niigata, Japan

In this study, we considered that the shape factor of each part of the wind turbine affects the lift force acting on the circular cylinder blade by the longitudinal vortex, and examined a method for easily approximating the relationship between these combined factors. In order to propose a blade shape that increases lift in a cylindrical blade wind turbine driven by a longitudinal vortex, the effect of each form factor was confirmed by experiments and numerical analysis. We verified the application to the optimization method by modeling the effect of each form factor. As a result, the multivariate linear regression was insufficient in predicting the optimal blade shape, and the interaction of each factor of the circular cylinder blade wind turbine could be expressed by using the response surface methodology.

1. 緒言

一様流中に流れと直交するように置かれた円柱後流にあるすき間を設けて平板を設置し、円柱が後流平板に沿った方向に平行移動するとき、円柱と平板とのすき間部近傍に縦渦が定発的に発生し、円柱に揚力が作用する⁽¹⁾。この円柱に流れ方向が軸となる (Fig.1(a)における x 方向を軸とし $y-z$ 平面内で回転する) 回転軸を取り付け、平板をその軸を中心とする同心円のリング状に変換することで円柱に作用する揚力を回転力として利用し、円柱を翼とした渦によって駆動する風車となる。当研究グループでは円柱翼の直径、長さ、平板とのすき間などの個別の形状因子が回転特性に及ぼす影響を実験及び数値解析によって考察した⁽²⁻⁴⁾。また、飛行機や水平軸型風車などで問題となる翼端渦がこの風車においても大きく影響することを見出し、翼端部へのエンドプレート設置が揚力の改善効果があることを明らかにした⁽⁵⁻⁶⁾。

本研究では、風車各部の形状因子が縦渦によって円柱翼に作用する揚力に対して相互に影響を及ぼすことを考え、それらの複合する因子の関係を数値的に明らかにする手法を検討し、揚力発生に最適な翼形状を検討する。

2. 数値解析

風車の各部寸法が揚力に及ぼす影響を調べるため、実験計画法に基づく数値解析を行った。得られた結果に対して多変量回帰分析および応答曲面法を用いることで円柱翼風車の各形状因子が揚力に及ぼす影響を定量的に考察する。数値解析には汎用熱流体解析ソフトウェアである SCRYU/Tetra (ソフトウェアクレイドル社) を用いた。

2. 1. 解析手法の検討

解析対象とする形状および各部名称を Fig.1(b)に示す。ここで、円柱直径を d 、円柱長さを L 、平板幅を w 、円柱と平板とのすき間を s とした。また、静止モデルの解析領域は円柱直径の整数倍で決定し、円柱の中心を解析領域の中心としたときに、主流方向に $60d$ の直径を持ち、円柱スパン方向に $30d$ の厚さを持つ円柱状の領域を解析領域とし、Fig.1(a)に示すように円柱状解析領域の側面の円柱側を流入面、平板側を流出面とし、流入する流速成分を x 方向および y 方向に関して規定した。

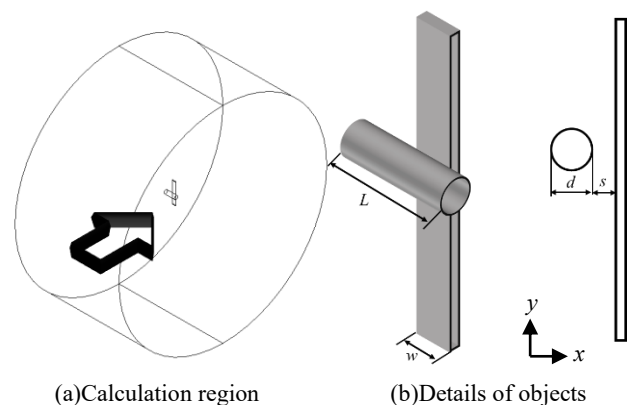


Fig. 1 Numerical Domains

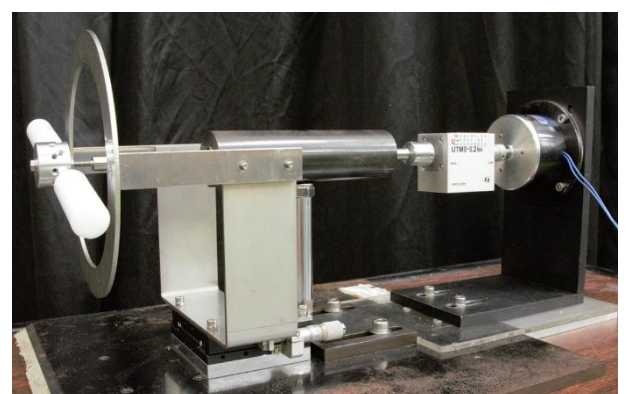


Fig.2 Experimental equipment

実験計画法に基づいて数値解析を行う際に、パラメータが増えるに伴い必要な計算回数が増えるため、多くのパラメータに関して複合的な影響を検討する場合には 1 回の計算に必要なコストを低減する必要がある。計算コストを低減するためにできるだけ解析領域や解析条件を単純化する。本研究において実験に用いた風車の概観を Fig.2 に示す。Fig.2 に示した風車を解析モデルとして数値解析を行う場合、主流方向の流入条件の他に、平板に沿って移動する円柱の回転運動を再現する移動境界条件を与える必要があ

り、さらに時間的に移動する円柱を再現するためには非定常解析が必要となるため、コストが増大する。本研究では、解析領域への流入流速に主流方向である x 方向および円柱の移動方向である y 方向の成分を持った相対速度を用いることで、円柱に移動境界条件を与えることなく円柱の主流に対する移動現象の再現を試みた。ここで、主流に対する円柱の移動現象は相対速度によって再現できるが、円柱に移動境界条件を用いない場合は平板と円柱との位置関係は変化しない。そのため、実機で固定された平板に沿うように移動している円柱が、数値解析では平板との位置関係を変化させないことになる。したがって円柱と平板との相対的な位置関係による揚力への影響を検証し解析手法を検討した。ここで、円柱翼の回転に対して相対的な位置関係を変えずに後流平板も回転している場合に関しては既に垂直軸型風車に関して Sakamoto らにより報告されており、円柱と平板が同方向に回転し相対的な位置関係を変えない場合には回転数、パワー係数、トルク係数が向上し、逆方向に回転すると低下することが分かっている⁹⁾。

2. 2. 比較に用いる実験条件

数値解析に用いる条件が適当であるかを検証するために実験との比較を行う。比較に用いる実験値として Nakada らの報告⁶⁾ から翼本数が 2 本の時のトルク係数から翼一本あたりに作用する揚力を算出した。実験条件を Table 1 に示す。評価に用いる揚力 F_l 、トルク T 、相対速度によって回転を再現した際の主流速に対する y 方向成分の速度比 (実験における周速比) λ の計算式をそれぞれ式 (1)、式(2)、式(3)に示す。

$$F_l = \frac{T}{RN_b} \quad (1)$$

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

$$\lambda = \frac{R\omega}{U}, \frac{V}{U} \quad (3)$$

ここで、 C_q はトルク係数、 A は風車の受風面積、 R は回転半径、 ω は角速度、 V は流速の y 方向成分である。

2. 3. 解析条件

2. 3. 1. 実験との比較

実験との比較に用いる数値解析の条件を Table 2 に示す。円柱および平板の各部寸法は実験と同様とした。

Table 1 Experimental conditions.

Test section size [m]	0.32×0.32×1.0
Wind velocity U [m/s]	10
Cylinder diameter d [m]	0.02
Cylinder length l [m]	0.06
Width of ring-plate W [m]	0.02
Gap ratio s/d [-]	0.35
Number of blades N_b	2

Table 2 Numerical setup.

Test section [m]	$\phi 60d \times 30d$
Analysis method	Steady RANS
Turbulent model	SST $k-\omega$
y^+	0.8
Velocity ratio λ	0.1, 0.2, 0.3, 0.4
Density ρ [kg/m ³]	1.205
Viscosity μ [Pa s]	1.82×10^{-5}

2. 3. 2. 実験計画法による条件

6 因子の中心複合要素計画法を行い必要な実験パラメータを算出した。決定した各水準に対する各パラメータを Table 3 に示す。Table 3 の一行目は各水準を表し、-1 が設計の低水準、1 が高水準である。

2. 4. 多変量回帰分析

実験計画法によって算出したパラメータで数値解析を行った後、得られた結果から各パラメータが円柱翼に作用する揚力に及ぼす影響を近似するため多変量回帰分析を行う。多変量回帰分析における近似式は式(4)のとおりである。

$$y_i = \mathbf{X}_i \boldsymbol{\beta} + \varepsilon_i \quad (4)$$

ここで、 y は応答ベクトル、 \mathbf{X} は計画行列、 $\boldsymbol{\beta}$ は係数ベクトル、 ε は誤差項のベクトルである。

2. 5. 応答曲面法

多変量線形回帰ではいくつかの変数に対して線形近似を行うが、各変数に対して応答が線形であるとは限らないため、応答曲面を作成して円柱直径に対する各形状パラメータによる揚力への影響および、流入流速の x 方向成分と y 方向成分による揚力への影響を近似する。2 変数にて応答曲面を表す 2 次の多項式を式(5)に示す。

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1^2 + \beta_4 x_2^2 + \beta_5 x_1 x_2 \quad (5)$$

3. 結果及び考察

3. 1. 静止モデルによる解析手法の検証

定常解析に関して、カルマン渦や縦渦のように周期性を持った現象に対して、揚力は時間的に変動するが、一定の振動数で同様の現象が繰り返されることがあり、これを準定常状態という。定常解析によって得られた静止モデルの揚力を周速比ごとに比較したグラフを以下の Fig.3 に示す。ここで、円柱に作用する y 方向の力を F_y とした。どの周速比条件においても周期的な揚力の変動が起こり、特にサイクル数 2500 以上では振幅がほとんど一定で揚力が変動していることから、準定常状態であるといえる。また周速比 $\lambda=0.4$ では特に平均的に揚力の方向が正方向に出ていることから、

Table 3 Numerical condition.

	-2.378	-1.000	0.000	1.000	2.378
U m/s	2.865	7.000	10.000	13.000	17.135
V m/s	1.432	3.500	5.000	6.500	8.568
d m	0.008	0.015	0.020	0.025	0.032
s m	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009
w m	0.008	0.015	0.020	0.025	0.032
L m	0.012	0.040	0.060	0.080	0.108

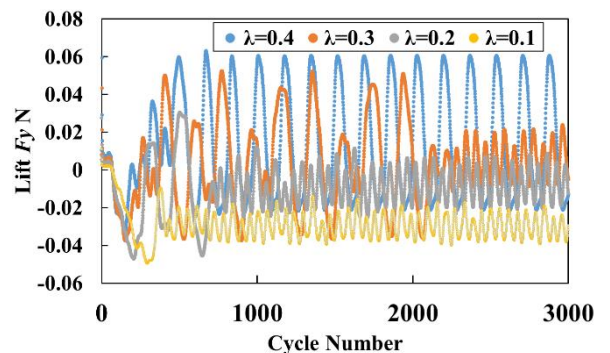


Fig.3 Lift for each velocity ratio in steady analysis.

円柱後方に定在的に発生し y 軸方向の揚力を円柱に作用させる縦渦とは異なる挙動を示している。

また、静止モデルの数値解析で得られた周速比に対する揚力を実験結果と比較したグラフを Fig.4 に示す。揚力は定常計算の最終 500 サイクルの平均値を用い、数値解析によって円柱に作用する揚力と実験で得られた揚力を比較するため、数値解析で得た揚力の符号を反転させ揚力の方向を揃えている。

図より、実験における高回転側である周速比 $\lambda=0.3$ の条件では揚力が実験値と大きく異なっているが、低速回転になるにつれて揚力が増加する傾向を良く捉え、誤差も小さくなっている。また、実験では到達しない風速比 $\lambda=0.4$ においては傾向の異なる揚力が発生しており、流入流速の向きが変わることによって縦渦から形態を変更していることが考えられる。以上のことから回転系にて行った実験との一致をみるため数値解析を静止モデルに単純化し、定常解析を行うことは計算コストの低減のために有効であるといえる。

3. 2. 多変量回帰分析

数値解析によって得られた各パラメータの変化に対する揚力への影響を多変量回帰分析によって近似した。近似式に用いる各パラメータの係数を Table 4 に示す。

近似式から得られる予測値と実際の解析結果を比較したグラフを Fig.5 に示す。Fig.5 の横軸は解析を行ったケースごとに取り、第一縦軸を揚力、第二縦軸を数値解析結果に対して近似式による予測値の相対誤差とした。Fig.5 より、部分的には予測値と解析結果がよく一致することがあるが、全体的に誤差が数十～数百%と大きく、予測精度としては不十分であり風車の出力予測には適していない。

Table 4 Factor for each parameter

x	U	V	d	L	s	w
beta	-0.000284	0.0073459	-1.067498	0.4498059	-0.042619	-0.807205

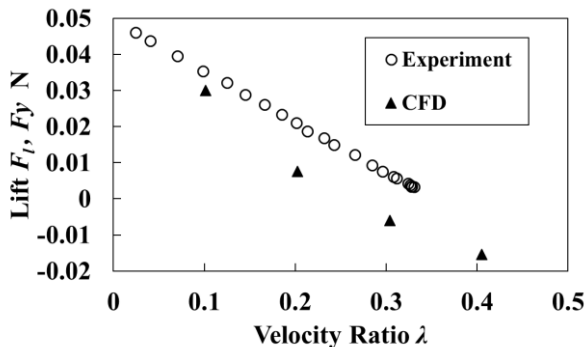


Fig.4 Comparison the tendency of CFD results and experimental data

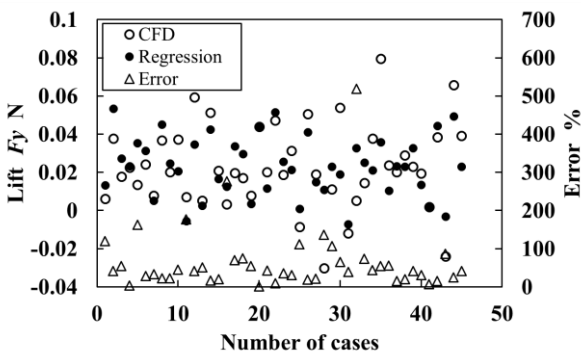
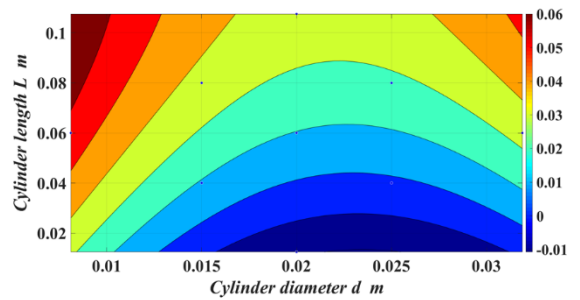
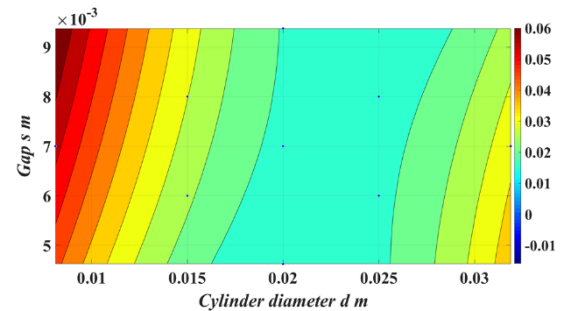


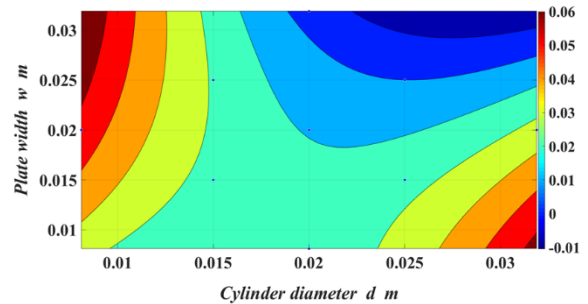
Fig.5 Comparison of CFD and regression predictions.



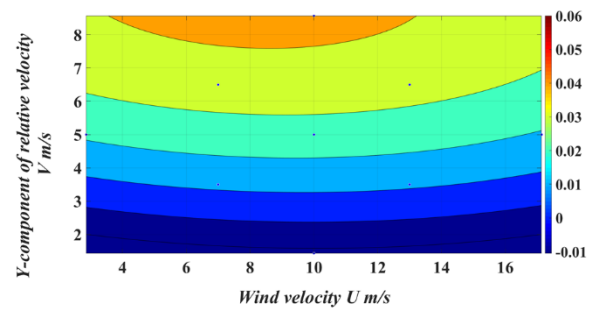
(a) Cylinder diameter and cylinder length.



(b) Cylinder diameter and Gap.



(c) Cylinder diameter and plate width.



(d) Wind velocity U and V .

Fig.6 Response surface of lift force for each parameter.

3. 3. 応答曲面法

数値解析結果を円柱直径に対する各部形状パラメータおよび流速に関して揚力の応答曲面を作成したものを Fig.6 に示す。カラーバーは翼に作用する y 方向の力の大きさを示している。ここで、縦渦による揚力は負方向に作用するため、カラーバーが 0 以下となっている濃い青色の部分縦渦による揚力である。

Fig.6(a)より、円柱直径 $d=0.01\text{m}$ では円柱長さが增大するごとに縦渦による揚力とは逆向きに力が作用し、円柱直径が増大するごとに逆向きの力が弱くなっていくが、円柱直径を $d=0.025\text{m}$ 以上にするると再び縦渦による揚力とは逆向きの力が増大していくことが分かる。このことから、円柱直径に対して長さを大きくしていくと縦渦によって発生する揚力とは逆方向の力が増大し、円柱直径に対して最適な翼長が存在することが分かる。

Fig.6(b)より、どの領域にわたっても縦渦による揚力と逆方向の抵抗となる力となっており、風車の動力特性を高めるためには最も抵抗の少ない領域を選ぶ必要がある。円柱直径の増加に対して抵抗力が最も低くなるすき間も一定に増大しているため、ある一定のすき間比を維持することが効果的であるといえる。

Fig.6(c)より、Fig.6(b)に示した直径に対するすき間量の変化による影響と同じように円柱直径の増加に伴って抵抗となる力が小さくなる平板幅も増加しており、特に円柱直径 $d=0.02\text{m}$ 以上では円柱の運動方向に揚力が作用する領域があることが分かる。平板幅は円柱直径と同等もしくはそれ以上の大きさにすると良いことが分かる。

Fig.6(d)より、主流速の増加に対して y 方向流速の増加による揚力の増大はほとんどないが、主流速 $U=10\text{m/s}$ 以上では主流速の増加に対して揚力が作用する y 方向流速も増加している。このことから主流速の増大に対して達し得る最大の回転数が制限されることを示している。

以上のことから、円柱直径 d を決定すれば Fig.6 に示した傾向をもとに抵抗力が小さく揚力を増大させる形状を設計することができるようになる。

4. 結論

最適な翼形状を検討する際に多変量線形回帰では予測精度が不十分であり、応答曲面法を用いることで円柱翼風車の各因子の相互作用を表すことができた。

参考文献

- (1) Takahashi, T. et al., "An innovative wind/water turbine with circular propeller driven by longitudinal vortex," Proc. 1st WWEC2016 TOKYO Conference, PS-A-5 (2016).
- (2) Sakamoto, K., Hemsuwan, W. and Takahashi, T., "Influence of Wind Configuration on a Circular Cylinder Blades Wind Turbine Driven by Longitudinal Vortex," Proc. *The 22nd National Symposium on Power and Energy Systems*, E131 (2017).
- (3) Hemsuwan, W. et al., "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.1, Issue 2 (2018).
- (4) Hemsuwan, W. et al., "Longitudinal Vortex Wind Turbine: Effect of the Blade Length," *Fluid-Structure-Sound Interactions and Control* (2019), pp.117-123.
- (5) 仲田, 坂本, Hemsuwan, 高橋, "縦渦により駆動される水平軸型円柱翼風車の動力特性に及ぼす翼端の影響" 平成 29 年度日本太陽エネルギー学会/日本風力エネルギー学会合同研究発表会講演論文集, 93 (2017) pp.335-336.
- (6) Shota, N. et al., "Effect of the blade tip on power characteristics of horizontal axis circular cylinder blades wind turbine driven by longitudinal vortex," Proc. CMFF'18, 49 (2018).
- (7) 坂本, 高橋, "縦渦により駆動される垂直軸型円柱翼風車における動力特性の解明", 日本機械学会 2017 年度年次大会講演論文集, No.17-1(2017).