

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870395

研究課題名(和文) 低アスペクト比翼を用いたプロペラタービンの小型化に関する研究

研究課題名(英文) An Investigation of Propeller Turbine Performance with Low-Aspect-Ratio Blade for Downsizing

研究代表者

米澤 宏一 (Yonezawa, Koichi)

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号：00362640

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：風力発電や潮流発電に用いられるプロペラタービンの小型化や低速化はコスト削減や環境負荷の低減のために有益である。しかし、一般にプロペラタービンを小型化することは翼の誘導抵抗や断面抵抗に起因する流体力学的な損失の増加に繋がる。本研究では小型でかつ回転数の少ない低速なブレードを実験や数値解析により開発を試みた。様々な形状のブレードを用いた実験により、後方スウィープ形状のブレードを用いることにより、駆動トルクの上昇が確認された。また、数値解析により、小型化の際に問題となる誘導抵抗の低減が確認された。

研究成果の概要(英文)：Reducing a diameter and rotational speed of the propeller turbines of wind power or tidal power generations is beneficial to cut a cost and to save an environment. However, reducing them leads to an increase of the aerodynamic losses due to induced and profile drags of the blades. In the present work, experimental and numerical investigations were carried out to improve aerodynamic characteristics of the propeller turbine with the small diameter and the low rotational speed. Experimental results show that the axial torque and the power are increased by swept-back blade. The numerical result shows that the influence of the induced velocity of the swept-back blade on the blade is reduced.

研究分野：流体工学

キーワード：プロペラタービン 風力発電 潮流発電 後方スウィープ 誘導抵抗

### 1. 研究開始当初の背景

太陽光や風力発電に代表される再生可能エネルギーの活用に対する需要は、日々増加し、近年では海流の運動エネルギーから発電しようとする潮流発電の開発も本格化しつつある。技術開発が先行している風力発電のプロペラタービンのロータ設計には、高効率化のために CFD 解析や翼素理論などに基づく最適設計がなされた、細長い高アスペクト比の翼が用いられている。潮流発電でもこの技術を踏襲すれば同様なプロペラタービンが用いられることになる。潮流発電では、建設コストや送電時のロスを減らすためには、なるべく近海で発電する方が有利となるが、近海は地形も複雑であり、さらに海面上を航行する船舶への影響も考慮しなければならないため、ロータの小型化は重要課題である。しかし、単純に直径を小さくし、翼弦長を大きくする、つまり翼のアスペクト比を小さくして翼面積を大きくすることでパワーを確保しようとする、流れに3次元の構造が生じて翼の空力性能が低下するため、タービンを通過する流量が減少し、発電効率が低下してしまうことが一般的である。また、アスペクト比が大きな翼で3次元の形状を用いてパワーを上げようとする、翼に作用する遠心力による、ねじり変形が発生し、空力性能や耐久性を低下させる可能性がある。以上のように既存の設計方法では限界があり、高い発電能力を維持しつつ、羽根車を小型化するためには、本研究が目標とするようにロータ設計方法の根本的な革新が必要である。また、風力発電においても大型の風車は建設コストが高くなり、また高速に回転することで騒音など、環境負荷も問題となっている。従って、潮流発電同様、風力発電においてもロータの小型や低速化は利点が多い。

### 2. 研究の目的

本研究ではプロペラタービンの小型化と低速化に伴う誘導抵抗増加による損失増加を防止するために、後方スウィープ形状のブレードの有効性を検証することを目的とする。また風洞を用いた性能試験に加えて数値解析を行うことによりそのメカニズムを解明する。

### 3. 研究の方法

本研究では翼素運動量理論に基づく設計法 (Lysen, 1983) を用いて基本形状となるブレードを作成し、様々な後方スウィープ形状とパワーの関係を比較した。実験における作動流体は空気とし、風洞実験により性能系速を行った。以下に実験方法を示す。Lysen の方法では以下の4式でブレードの翼弦長  $c(r)$  とねじり角  $\phi(r)$  が決定される。

$$\lambda(r) = \frac{r\omega}{v_0}, \quad (1)$$

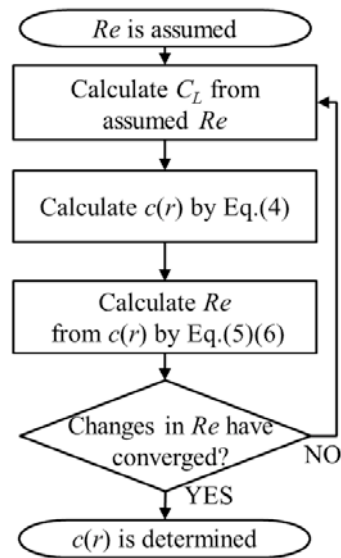


Fig. 1 ブレード設計のチャート図

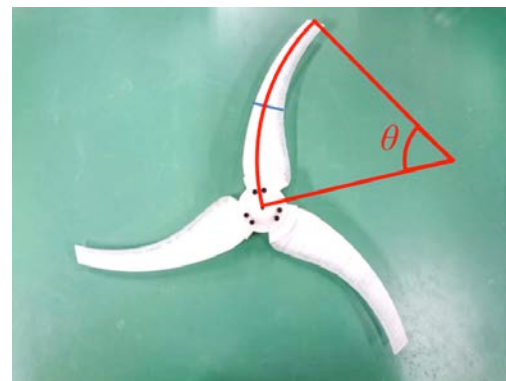


Fig. 2 後方スウィープブレード

$$\phi(r) = \tan^{-1} \frac{v_0}{r\omega} = \tan^{-1} \frac{2}{3\lambda(r)}, \quad (2)$$

$$\beta(r) = \phi(r) - \alpha, \quad (3)$$

$$c(r) = \frac{8\pi r}{BC_L} (1 - \cos \phi(r)), \quad (4)$$

ただし、 $\lambda$  は翼端周速比、 $r$  は半径方向位置、 $\omega$  は角速度、 $v_0$  は風速、 $\phi$  は相対流れ角である。しかし、本研究で用いる装置は直径が 400 mm 程度で、レイノルズ数が低いため本研究で問題としている誘導抵抗ではなく、断面抵抗の影響の方が強くなる場合がある。そこで、Fig. 1 に示すように局所レイノルズ数を考慮した翼性能を用いることで断面抵抗を極力少なくなるような手法に改良を行った。ブレードの後退角は Fig. 2 に示すように各スパン断面における翼弦長の 25% の位置が円弧を描くように変化させ、円弧の中心角度でスウィープ形状を分類した。本研究では設計周速比が 3 および 5 のブレードを基本形状とし、スウィープなし、 $\theta = 30^\circ, 60^\circ, 80^\circ$  について比較を行った。なお、風車では設計周速比は 10 程度が一般的であるが、これと比較する

Table 1 ブレード名称と設計仕様

	A00	A30	A60	A80	B00	B30	B60	B80
$\lambda$	3				5			
$R$	0.20 m							
$v_0$	7 m/s							
$\alpha$	6.0°				6.5°			
$\theta$ [deg]	0	30	60	80	0	30	60	80



(a) Blade A00



(b) Blade B00

Fig. 2 設計周速比の違いによるブレード形状の違い

と、本研究ではかなり低速なタービンを用いていることになる。Table 1 に本研究で用いたブレードの名称と仕様を示す。以降ではここに示す名称で各ブレードを区別する。

Fig. 2 に実験に用いたブレード A00 と B00 の写真を示す。この図のように、設計周速比を小さくすると翼弦長が大きくなり、ブレードのアスペクト比は低下している。また、風速 7m/s のもとで翼端で相対速度を基準に求めたレイノルズ数はブレード A00 で 59000、ブレード B00 で 43000 となる。

風洞実験は大阪大学大学院工学研究科の研究用風洞を用いた。Fig. 2 に計測装置を示す。実験では風速を 7m/s で一定に保ち、再生回路をもつ DC モーターでロータ回転数を制御し、プロペラタービンのパワーと軸方向効力を計測した。なお、プロペラタービンのパワーは

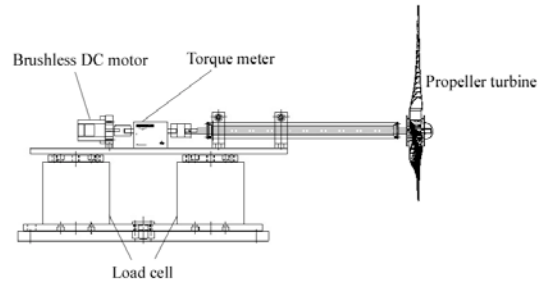


Fig. 2 計測装置

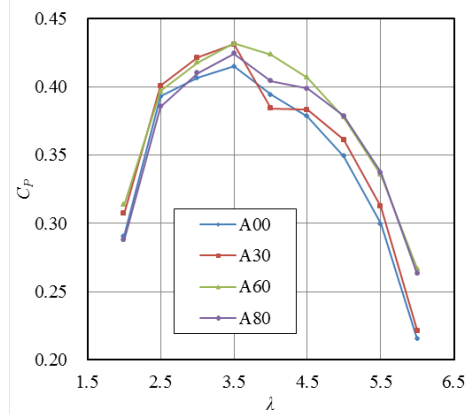


Fig. 3 パワー係数と周速比 (ブレード A)

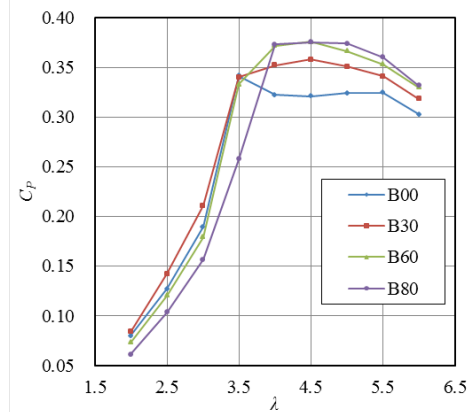


Fig. 4 パワー係数と周速比 (ブレード B)

以下のように無次元化されたパワー係数を用いて整理する。

$$C_p = \frac{Q\omega}{\frac{1}{2}\rho v_0^3 A} \quad (5)$$

ただし、 $Q$  は軸トルク、 $A$  はロータ回転面の面積である。

流れ場を実験で計測することは困難であるため、本研究では数値解析により、流れ場を調べた。数値解析には ANSYS CFX15.0 を用いた。境界条件は実験条件と同様の風速とロータ回転数を与えた。

#### 4. 研究成果

ブレード A00, A30, A60, A80 についてパワー係数と周速比との関係をプロットしたものを Fig. 3 に示す。ブレード A00 は設計周速比が  $\lambda = 3$  であるが、実際には  $\lambda = 3.5$  でパワー

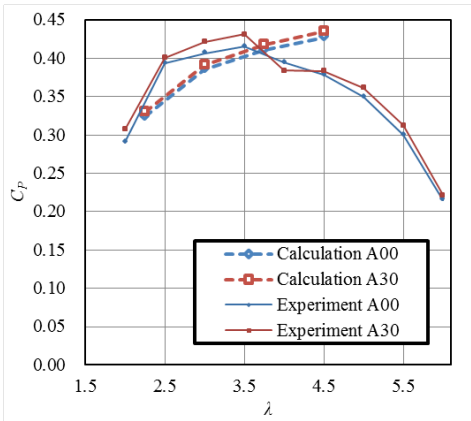


Fig. 5 パワー係数と周速比（ブレード A00, A30, 実験結果と数値解析結果との比較）

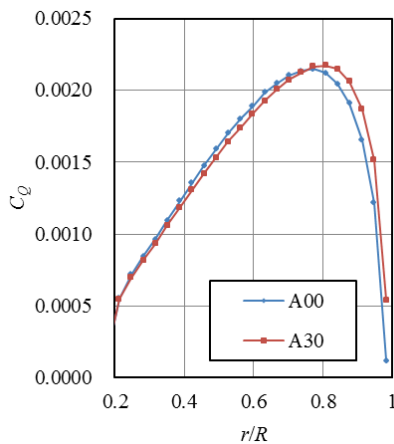
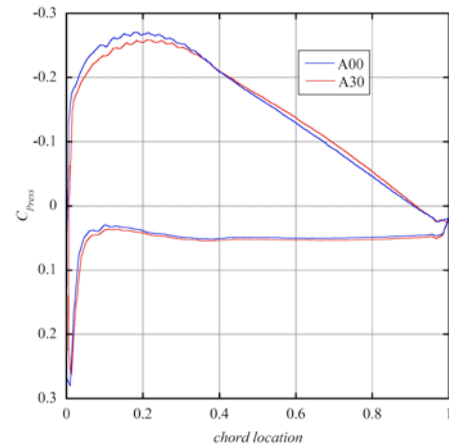


Fig. 6 トルク係数分布

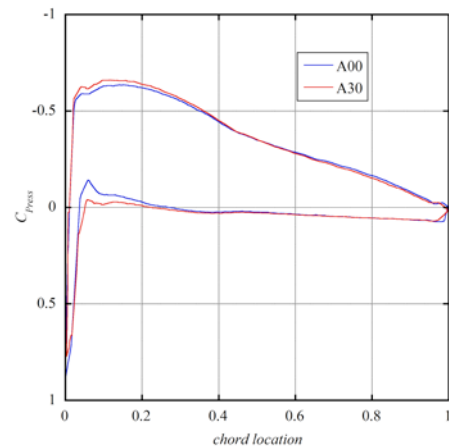
係数が最大となっている。なお、最大パワー係数は 0.42 程度となっており、局所レイノルズ数を考慮した設計を行なった結果、小型のプロペラタービンとしては比較的高いパワー係数が得られた。後方スウィープ形状のブレードについて図を見ると、ブレード A30 と A60 については 4%程度最大パワー係数が増加している。また、ブレード A60 については他の  $\lambda$  の条件でも全てブレード A00 のパワーを上回っており、特に大きな  $\lambda$  では 10%以上のパワー係数の向上が確認された。

ブレード B00, B30, B60, B80 についてパワー係数と周速比との関係をプロットしたものを Fig. 4 に示す。ブレード A00 は設計周速比が  $\lambda = 5$  であるが、実際には  $\lambda = 3.5$  でパワー係数が最大となっている。また、ブレード B はブレード A に比べて最大パワー係数が小さくなっているが、これは断面抵抗が増加したためであると考えられる。しかし後方スウィープ形状にすることによるパワー係数の増加傾向は確認でき、10%程度の増加が得られている。

Fig. 5 に実験及び数値解析により得られたブレード A00 と A30 のパワー係数の比較を示す。数値解析結果では大きな  $\lambda$  でのパワー係



(a) 0.5R



(b) 0.95R

Fig. 7 翼面圧力分布

数が過剰に評価されているが、後方スウィープ形状によるパワーの増加は捕らえられている。

数値解析結果より後方スウィープが翼の空力特性に及ぼす影響を調べた。Fig. 6 はブレードに作用するトルク係数の半径方向分布を示している。ただしトルク係数は以下のように定義した。

$$C_q = \frac{Q}{\frac{1}{2} \rho v_0^2 AR} \quad (6)$$

この図から、後方スウィープ形状のブレードでは翼根側でトルクが低下し翼端側でトルクが上昇していることがわかる。

Fig. 7 に翼面圧力分布を示す。Fig. 7(a)に示す  $r = 0.5R$  での圧力分布を見ると、負圧面と圧力面の圧力差はブレード A30 よりも A00 の方が大きい。すなわち、後方スウィープにより、翼面負荷が低下している。一方 Fig. 7(b)に示す  $r = 0.95R$  での結果を見ると、圧力差はブレード A30 の方が A00 よりも大きい。つまり後方スウィープにより、翼面負荷が大きく

なっている。以上のような傾向はブレード B00 と B30 との比較でも確認されている。つまり、ブレードに後方スウィープを施すことで負荷分布が変化していることがわかる。

以上より、本研究で得られた成果は以下のとおりまとめられる。

(1) 局所レイノルズ数を考慮してブレード設計を行えば、小型のプロペラタービンでも比較的高いパワー係数が得られる

(2) ブレードを変形させ、後方スウィープ形状にすることで最大パワー係数および設計点外でのパワー係数が向上する。

(3) 後方スウィープにより、ブレードのスパン方向の翼面荷重が変化し、特に翼端側の荷重が増えるためにパワーが増大する。

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計1件)

渡部景佑, 米澤宏一, 杉山和靖, 川田裕, “プロペラタービンの小型化・低速化のためのブレード形状の検討,” 日本機械学会関西支部平成26年度関西学生会学生員卒業研究発表講演会, 2015, 京都市

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

米澤 宏一 (YONEZAWA, Koichi)  
大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教  
研究者番号：00362640