直線翼ダリウス風車の翼型と翼取り付け角が起動性能に及ぼす影響*

田 中 太^{*1}, 川 口 清 司^{*2}
杉 本 真 一^{*3}, 富 岡 政 裕^{*3}Influence of Wing Section and Wing Setting Angle
on the Starting Performance of a Darrieus Wind TurbineFutoshi TANAKA^{*4}, Kiyoshi KAWAGUCHI,
Shinichi SUGIMOTO and Masahiro TOMIOKA^{**} Department of Mechanical Engineering, University of Fukui,
3-9-1 Bunkyo, Fukui-shi, Fukui, 910-8507 Japan

In this study, the improvement of the starting performance of a Darrieus wind turbine with straight wings was investigated. The numerical simulation on the starting torque generated in the stationary Darrieus wind turbine was executed. The parameters used for the numerical simulation are wing section shape and wing setting angle. The wing sections tried were NACA0018, NACA4418 (camber inside), and NACA4418 (camber outside). The following conclusions were obtained in this study. In three kinds of wing sections in which wing setting angle is set in 0 degrees, NACA0018 performs the highest minimum starting torque. In case that the setting angle of NACA0018 is set in -5 degrees, the starting performance improves more than the setting angle 0 degrees.

Key Words: Fluid Machinery, Darrieus Wind Turbine, Numerical Simulation

1. 緒 言

近年、環境問題や安全性の問題への関心の高まりを受けて、太陽、地熱、中小水力、風力等の新エネルギーの有効利用が進められている。風力エネルギーは、ニューサンシャイン計画の下で、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO: New Energy and Industrial Technology Development Organization) を中心として、20 年以上にわたり風力発電に関する研究開発が進められている。しかし、風力発電は風という自然の力を利用しているため、発電量が風況や地形条件に左右され、さらに風車の回転による騒音や景観も考慮する必要があるという欠点がある。そのため、大規模風力発電は山頂や海沿い以外の都市部で行うのは難しい。

風車の形式には、大きく分けてプロペラ型、ダリウス型、サボニウス型の三種類があるが、日本市街地の風況は風向が季節を通じて変化するため、常に風向に正対しなければならぬプロペラ型風車のような水平軸タイプよりも、風向特性に依存しない垂直軸タイプの風車が適しており、その中でもエネルギー変換効

率が比較的高いダリウス型風車が有望であると考えられる。

ダリウス型タービンに関する研究は、従来から様々な研究者により行われている。ダリウス型横流水車に関しては、特に系統的な一連の研究がある。例えば、翼取り付け姿勢がダリウス型横流水車の性能に及ぼす影響について調べた研究や、翼性能推算法に関する研究、更にダリウス水車を用いた低落差水力の有効利用に関する研究などが行われている⁽¹⁾⁽³⁾。一方、ダリウス型風車に関しては、風車の翼に作用する変動トルクの測定や⁽⁴⁾、可視化実験による失速特性の調査などが行われている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。また、定常運転するダリウス型風車周りの流れ場の数値シミュレーションに取り組み、風車周りの流れ場の詳細を明らかにした研究もある⁽⁷⁾。

本研究は、特に一般家庭の庭先に設置されるような小型ダリウス型風車の起動性能に着目したものである。風車の性能は、起動性能と併せて、発電性能も重要である。しかし、小型風車設置の際には、大型風車のような十分な風況調査が行われるとは考え難い。このような小型風車は、電力発電用に設置されるような大型風車と異なり、必ずしも効率良く風力発電を行うのに適した場所に設置できるとは限らない。そのため、発電性能よりも、わずかな風速でも起動できる起動性能の高い風車の重要性のほうが相対的に高いものと

* 原稿受付 2007 年 6 月 4 日。

^{*1} 正員、福井大学工学部 (☎ 910-8507 福井市文京 3-9-1)。^{*2} 正員、富山大学工学部 (☎ 930-8555 富山県市五福 3190)。^{*3} 富山大学工学部。

E-mail: f-tanaka@mech.fukui-u.ac.jp

考えられる。そこで、本研究では、既報において風況と発電性能について報告した小型ダリウス型風車を対象として⁽⁸⁾、その起動性能に関して数値解析を用いて検討した。

まず、風洞実験から得られた模型風車の起動トルクと数値解析との比較を行い、数値解析の解析精度について確認した。次に、小型ダリウス型風車を解析対象として、翼型と翼の取り付け角が及ぼす影響について、数値解析により検討した。その結果、本研究の範囲内において、自己起動に有利な翼型と翼取り付け角度に関する知見が得られたので報告する。

2. 主な記号

c	: 翼弦長	[m]
C_p	: 圧力係数 ($(P-P_{ref})/0.5\rho U^2$)	[-]
C_t	: トルク係数 ($T/0.5\rho U^2 h D R$)	[-]
dt	: 時間刻み	[s]
D	: 風車の直径	[m]
h	: 翼高さ	[m]
N	: 翼の枚数	[-]
P	: 圧力	[Pa]
P_{ref}	: 参照圧力 (流入境界上の圧力)	[Pa]
R	: 風車の半径	[m]
Re	: 風車周りのレイノルズ数 (UD/ν)	[-]
Re_w	: 翼周りのレイノルズ数 (Ucl/ν)	[-]
T	: トルク	[Nm]
U	: 一様流の流速	[m/s]
β	: 翼の取り付け角	[deg]
γ	: 一様流の向き	[deg]
μ	: 空気の粘度	[Pa s]
ν	: 空気の動粘度	[m ² /s]
ρ	: 空気の密度	[kg/m ³]
σ	: ソリディティ (Nc/R)	[-]

3. 実験装置と計算モデル

数値解析の解析精度の検証のために、風洞実験を実施した。ゲッチング型⁽⁹⁾の回流型風洞を用いて、風車模型に作用する静止起動トルクについて測定した。

3・1 供試模型 図1に本研究で使用したダリウス型風車の供試模型を示す。また、表1に供試模型の諸元を示す。風車の代表直径は $D=200$ mm、風車高さは $h=200$ mm である。翼型は翼弦長 $c=30$ mm の NACA0018 を使用し、翼のアスペクト比は 6.7 である。

供試模型は4枚の翼を持ち、ソリディティは $\sigma=1.2$ である。4枚の翼は、翼前縁から翼弦長の1/4の位置において、円形の翼端板に取り付けられている。翼端板は、直径220 mm、厚さ2 mm のアルミ板を使用した。回転軸は直径10 mm の S45C 丸棒を使用し、ベアリングで滑らかに回転できるように支持した。本実験では、対象とした小型風車 (代表直径1.67 m、代表速度2 m/s) と風車周りの流れのレイノルズ数をできるだけ一致させるため、風洞からの一様流速は $U=16$ m/s とした。このとき、風車周りの流れのレイノルズ数は $Re=2.04\times 10^5$ となる。

3・2 実験装置 図2に実験装置の概要を示す。実験ではゲッチング型の回流式風洞を使用した。風洞の吹き出し口は直径400 mm、吸い込み口は直径600 mm の円形となっている。空気は軸流ファンにより吸い込み口から風洞内に吸い込まれ、風洞内流路を通過してノズルからテストセクションに吹き出される。実験時には、ノズルから吹き出される空気の流速を計測して、試験風速 ($U=16.0$ m/s) になるように軸流ファンの回転数を調節した。

Fig. 1 Darrieus wind turbine model with straight wings

トルク測定にはトルク検出器 (小野測器 SS050) とトルク表示器 (小野測器 TS-200) を使用した。トルク検出器の駆動側と風車モデルの軸をフレキシブルカップリング (アサ電子工業 MLC25P) で結合し、トル

ク検出器の負荷側には、厚さ 2 mm、直径 150 mm のアルミニウム板を取付けてディスクブレーキとした。このディスクブレーキを用いて、風車を任意の角度で静止させて、風車にあたる風の向き γ を 0 度から 75 度まで 15 度おきに变化させた場合の静止起動トルクを計測した。トルク表示器からのアナログ出力（サンプリング周期 0.1 秒）は、AD コンバータ（マイクロサイエンス ADM-652AT）を用いて、PC に取り込んだ。計測時間は 30 秒であり、その時間平均値を計測した起動トルクとした。同じ条件での計測を 4 回実施して、その平均値と標準偏差を求めた。

Table 1 Specifications of the wind turbine model

Wing chord length c	30 mm
Wind turbine diameter D	200 mm
Wing span h	200 mm
Number of wings N	4
Solidity σ	1.2
Wing section	NACA0018

Fig. 2 Experimental apparatus

3・3 数値解析モデル 図 3 に数値解析モデルの概要を示す。数値解析には、汎用 CFD ソフトウェアである CFD2000(開発元: Adaptive Research)を使用した。計算対象とした風車の翼のアスペクト比が 6.7 以上あり、ある程度の二次元性が見込めることと、多くのパラメータスタディを行うため、二次元解析モデルとした。解析領域は、風車直径 D に対して 15 倍の直径を

持つ円形領域とした。解析領域の左半分を流入境界条件として、一様流速 U を与えた。右半分は流出境界条件として、圧力を 0 Pa に固定した。流入空気物性値は粘度 $\mu = 1.85 \times 10^{-5}$ Pa s、密度 $\rho = 1.177$ kg/m³ とした。また、図 3(b) に示すように、一様流の風向を γ 、翼の取り付け角を β とした。翼型としては、NACA0018、NACA4418 の反り外向き、および NACA4418 の反り内向きの三種類を用いた。図 3(c) に NACA4418 の反り配置を示す。

(a) Computational conditions

(b) Definition of wind direction γ and setting angle β

Camber outside Camber inside

(c) Camber arrangement of NACA4418

Fig. 3 Schematic representations of computational model

流れの支配方程式は、連続の式とナビエ・ストークス方程式であり、有限体積法に基づき離散化を行った。移流項には、計算の安定化のために 2 次精度 TVD 上流化スキームを使用した⁹⁾。時間積分は 1 次精度のオイラー陽解法である。速度、圧力などの物理量の定義はコロケート配置を使用し、圧力場のチェッカーボード不安定を避けるために、Rhie-Chow 法を使用した。速度と圧力のカップリングには、PISO(Pressure Implicit with Splitting of Operations)を使用した。時間刻みは、CFL 数を 0.8 として、これを超えない値を、毎ステップ計算して使用した。平均的には $dt = 2 \times 10^{-5}$ s 程度である。

図 4 に解析領域全体の計算格子と翼周りの格子分布を示す。計算格子は H 型シングルブロック構造格子を使用し、翼や回転軸をマスク処理して取り扱った。翼周りに発生する渦や剥離を捉えるため、翼周りに格子を集中させた。翼弦長 c を代表長さとして、一様流 U を代表速度とした翼周りの流れのレイノルズ数を Re_w としたとき、翼表面に形成される層流境界層の厚さ δ を $c / \sqrt{Re_w}$ で見積もり、境界層内に 5 点程度の計算格子点が入るように格子生成を行った。翼表面の最小格子厚さは、いくつかの試行計算を得た後、 $0.1 c / \sqrt{Re_w}$ を基準として決定した。格子点数は、 x 軸方向に 372 点、 y 軸方向に 372 点の合計 138384 点とした。数値計算は 8 秒分を行い、1 秒から 8 秒までの 7 秒間の時間平均で静止起動トルクを求めた。数値計算に要する CPU 時間は、1 ケースあたり 35 時間程度である。

(a) Computational domain (b) Mesh around the wings

Fig. 4 Computational mesh around the darrieus wind turbine

4. 結果と考察

4-1 数値解析精度の検証 模型風車を用いた風洞実験と数値解析で得られた静止起動トルクを比較し、数値解析精度を検証する。翼型は NACA0018 とし、風速 $U = 16$ m/s において比較を行う。

図 5 に実験値と解析値の比較結果を示す。横軸は風向、縦軸は静止起動トルク係数である。この図より実験値と解析値は定性的に一致していることがわかる。実験で使用した翼のアスペクト比は 6.7 と比較的大きい。また、4 枚の翼を取り付けた円板には、翼端板としての効果も期待できるため、翼端渦の影響は小さいと考えられる。しかし、解析値は実験値よりも 1.3 倍程度、起動トルクを過大評価している。これは後流の三次元性を無視する 2 次元解析を行ったことが原因と考えられる。泉らの報告によれば、無限長円柱 (2 次元円柱) 周りの流れ場に対して、2 次元の数値解析は後流の 3 次元性を無視するために、3 次元の数値解析や実験結果に対して、抗力が 1.3 倍程度に過大評価されることを示している⁽¹⁰⁾。また、本研究における数値解析では乱れを考慮していないため、翼の前縁や後縁から発生した剥離渦の散逸が十分でなく、翼表面に実際よりも強い負圧が得られる傾向があることも原因のひとつと考えられる。解析値は実験値と比較して、定性的には良好な再現性を持つので、2 次元解析結果はパラメータスタディにおける相対評価には使用できると考えられる。

Fig. 5 Comparison between computational and experimental results (NACA0018)

4-2 翼型の変化が及ぼす影響 本節以降は、改良の対象としている小型ダリウス型風車について検討を行う。この風車の寸法は、ロータ直径が $D = 1.67$ m、風車高さが $h = 2$ m、翼弦長が $c = 265$ mm である。構造が簡単な直線翼を 4 枚有する小型風車である。風車が自己起動する風速が 2 m/s であるとき、風車の起動トルクについて調べた。風速 2 m/s における風車周りの流れのレイノルズ数は、 $Re = 2.12 \times 10^5$ である。図 6 に翼型をパラメータとしたときの風向に対する起動トルクの変化を示す。翼型としては、NACA0018、

NACA4418 の反り外向き、および NACA4418 の反り内向きの三種類を用いた。どの翼型においても、風向 0° で最も起動トルクが小さく、風向 30° で最大の起動トルクが得られることがわかる。風車の起動特性で重要となるのは、最低起動トルクが高いことであり、どの方向から風が吹いても十分な起動トルクが得られることである。そこで、最も起動トルクが小さくなる風向 0° において、他の翼形より高い起動トルクを発生させる NACA0018 が、最も起動性が良い翼型と考えられる。NACA4418 の反り外向きと反り内向きを比較すると、風向 15° から風向 45° 付近においては、反り内向きの方が高いトルクが得られるが、風向 45° 付近から風向 75° 、そして風向 0° 付近においては、反り外向きの方が高いトルクが得られる結果となった。

Fig. 6 Relations between the starting torque and the wind direction

Fig. 7 Comparison of the starting torque

(a) NACA0018 wings

(b) NACA4418 wings with camber outside

(c) NACA4418 wings with camber inside

Fig. 8 Pressure fields around the wings (Wind direction: 0 deg)

図7に、起動トルクが最も小さくなる風向 0° における翼1から翼4の起動トルクの比較を示す。図8は平均圧力場の比較である。圧力場の時間平均は1秒から8秒まで0.02秒おきの圧力場の時間平均を行った。図7をみると、NACA0018とNACA4418の反り内向きの傾向は同じであり、翼2に生じる抗力と翼3に生じる揚力から起動トルクが得られている。翼4に生じる抗力は、いずれの翼型においても、起動トルクとしては作用しない。

図8に示すように、翼1は周囲に大きな圧力差を生じるが、図7によるとNACA4418の反り外向き以外は、起動トルクに寄与していない。図9は、翼1の後縁を原点として、翼周り反時計方向に座標軸を採ったときの翼表面圧力分布を示している。横軸は風車直径で無次元化している。図9によると、三種類のどの翼型においても、圧力分布にそれほど大きな違いはない。図10は、翼型周りの格子点上におけるトルク分布を示している。格子点番号は、翼の後縁は1、前縁は43であり、翼周りを反時計回りに84点の計算格子点で分割して、トルク分布を示している。各格子点におけるトルク値を加算すると翼1に作用する起動トルクが得られる。図10のトルク分布を見ると、翼型による違いが分かる。NACA4418の反り内向きの場合には、翼の前縁部分から得られる起動トルクが小さいのに加えて、翼の後縁負圧側から最も大きな制動トルクが生じているため、全体として起動トルクは得られていない。それに対して、NACA4418の場合は、翼の前縁部分から得られる起動トルクはNACA0018と大きな違いは無いが、翼の後縁負圧側から生じる制動トルクがNACA0018よりも小さくなるため、全体として翼1に関しては、三種類の翼型の中で最大の起動トルクが得られている。

Fig. 9 Pressure distributions around the wing 1

Fig. 10 Torque distributions around the wing 1

Fig. 11 Relations between the starting torque and the wind direction

Fig. 12 Comparison of the starting torque

4・3 翼取り付け角が及ぼす影響 4.2 節において検討した翼型で、最も起動性の良かったNACA0018の翼取り付け角に対する起動トルクの変化について調べた。図11に翼取り付け角をパラメータとした風向に対する起動トルクを示す。翼取り付け角としては、

外向きと内向きに3度、5度および外向きに8度のケースについて調べた。外向きの翼取り付け角を一の符号で示している。起動トルクの小さくなる風向0°に着目すると、得られるトルク値は、翼取り付け角を設けない場合（翼取り付け角0度）に比べ、翼取り付け角を内向きに5°とすることで約43%向上し、外向きに5°とすることで約34%向上した。しかし、翼取り付け角が内向き5°のケースは風向30°から75°にかけて著しくトルクが低下するため起動性が向上するとはいえない。一方、翼取り付け角外向き5°はどの風向においても高い安定したトルクが得られ起動性が向上するものと考えられる。

Fig. 13 Pressure field around the wings in which the setting angle of NACA0018 is set in -5 degrees (Wind direction: 0 deg)

Fig. 14 Pressure distributions around the wing 1

Fig. 15 Torque distributions around the wing 1

図12は、風向0°における翼1から翼4の起動トルクの比較である。図12によると、外向きに取付け角5度を与えることで、翼1から生じる起動トルクが大きくなるのがわかる。翼2に作用する抗力と翼3に作用する揚力から生じる起動トルクは、取り付け角を外向きに5度与えたケースでは小さくなっており、とりわけ翼3においては0に近い。翼4に生じる抗力は、どちらの場合も起動トルクとしては作用しない。

図13はNACA0018の翼取り付け角が外向き5度のケースの平均圧力場である。図8(a)のNACA0018の翼取り付け角0度のケースに対応する。図13に示すように、翼1は周囲に大きな圧力差を生じる。図14は図9と同様な翼表面の圧力分布を示している。横軸は風車直径で無次元化している。図14によると、翼周りの圧力分布は翼取り付け角を変えても大きな違いはないことがわかる。図15は図10と同様な翼型周りの格子点上におけるトルク分布を示している。トルク分布を見ると、翼取り付け角を外向きに5°とすると、翼前縁付近に生じる起動トルクに大きな変化はないが、翼後縁負圧側に生じる制動トルクが減少し、全体として起動トルクが増加することがわかる。その結果、翼取り付け角を外向きに5°とすることで、より大きな起動トルクを得ることができる。

5. 結 言

直線翼を有するダリウス型風車の起動性能の向上を目的とし、静止状態での風車に作用する起動トルクについて数値解析し、起動性能の向上する翼形状及び翼取り付け角の検討を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 翼取り付け角を0度とした場合、NACA0018、NACA4418（反り内向き）、NACA4418（反り外向き）

の中で、最低起動トルクが高いのは対称翼の NACA0018 である。

(2) NACA0018 において、翼取り付け角を外向きに 5° 与えることで、最低起動トルクが向上するため、起動性が更に向上する。

文 献

- (1) Takamatsu, Y., Furukawa, A., Okuma, K., Takenouchi, K., Effects of Geometrical Attitude of Blade on Hydrodynamic Performance of Darrieus-Type Cross-Flow Water Turbine, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 50, No. 458(1984-10), pp. 2631-2634.
- (2) Takamatsu, Y., Furukawa, A., Takenouchi, K., Okuma, K., Experimental Consideration in an Approximate Method for Estimating the Blade Performance of Darrieus-Type Cross-Flow Water Turbine, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 57, No. 541(1991-9), pp. 3110-3116.
- (3) Furukawa, A., Okuma, K., Gajanayake, P. A., Tagaki, A., Basic Study of Low Head Water Power Utilization by Using Darrieus-Type Turbine, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 64, No. 624(1998-8), pp. 2534-2540.
- (4) Okubayashi, T., Kage, K., Ishimatsu, K., Study of Darrieus Wind Turbine (Fluctuation Torque acting on a Single Blade), *Proceedings of the Kyushu Branch Meeting of the Japan Society of Mechanical Engineers*, No.018-2(2001-10), pp. 127-128.
- (5) Fujisawa, N., Hori, Y., Investigation of Flow Field around a Darrieus Rotor by Flow Visualization and Image Analysis, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 63, No. 606(1997-2), pp. 590-595.
- (6) Fujisawa, N., Shibuya, S., Takuno, T., Visualization and Image Analysis of Dynamic Stall Phenomenon for a Darrieus Wind Turbine, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 65, No. 638(1999-10), pp. 3374-3379.
- (7) Ishimatsu, K., Kage, K., Okubayashi, T., Numerical Simulation for Flow Fields of Darrieus Turbine, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 61, No. 587(1995-7), pp. 2543-2548.
- (8) Tanaka, F., Kawaguchi, K., Tomioka, M., Study on Wind Measurements and Annual Energy Production of a Darrieus Wind Turbine, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 73, No. 735(2007-11), pp. 2283-2289.
- (9) Yee, H. C., A Class of High-Resolution Explicit and Implicit Shock-Capturing Methods, NASA TM101088, (1989).
- (10) Izumi, H., Taniguchi, N., Kawata, Y., Kobayashi, T., Adachi, T., Three-Dimensional Flow Analysis around a Circular Cylinder (1st Report, In the Case of a Stationary Circular Cylinder), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 60, No. 579(1994-11), pp. 3797-3804.